

**ALTIGEN GEOMETRİ NÜKLEER REAKTÖR
KOR MODELİ İÇİN
NÖTRONİK HESAPLAMALAR**

**NEUTRONIC CALCULATIONS
FOR HEXAGONAL GEOMETRY
NUCLEAR REACTOR CORE**

OSMAN ŞAHİN ÇELİKTEN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

NÜKLEER ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2011

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan(Danışman) :.....

Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU

Üye :.....

Doç. Dr. S. Sinan KESKİN

Üye :.....

Doç. Dr. C. Niyazi SÖKMEN

Üye :.....

Doç. Dr. Ayhan YILMAZER

Üye :.....

Yrd. Doç. Dr. Cemil KOCAR

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adil DENİZLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ALTIGEN GEOMETRİ NÜKLEER REAKTÖR KOR MODELİ İÇİN NÖTRONİK HESAPLAMALAR

Osman Şahin ÇELİKTEN

ÖZ

Bu çalışmada, PWR tipi reaktörler için geliştirilmiş olan RPM yazılımı VVER-1000 reaktör geometrisi için uyarlanmıştır.

Nükleer reaktör yakıt yükleme örüntüsünün hesaplanması için, konuma bağlı güç üretiminin çevrim başından sonuna kadar yanma oranlarına göre belirlenmesi gerekmektedir. Kor nötronik analizleri için çeşitli kod sistemleri kullanılmakta olup, hızlı ve güvenilir bir hesap yapan kod sistemi kullanmak yakıt yükleme örüntüsünün optimizasyonu(eniyilemesi) probleminin çözüm süresini azaltacaktır. Bu çalışmada geliştirilen yazılımda kullanılmak üzere, yakıt demetlerinin nötronik parametrelerini veren fonksiyonlar WIMSD kodu kullanılarak yanma oranlarına ve reaktör güç üretimine bağlı olarak elde edilmiştir.

Geliştirilen yazılımın doğrulaması, referans (IAEA, 1995)'da VVER-1000 reaktörü için 1. Çevrim analizi yapılarak deneysel verilerle karşılaştırılmıştır

Anahtar Kelimeler : Yanma Oranı, Nötronik Hesaplamalar, WIMSD, VVER

Danışman : Prof. Dr. Mehmet Tombakoğlu, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

NEUTRONIC CALCULATIONS FOR HEXAGONAL GEOMETRY NUCLEAR REACTOR CORE

Osman Şahin ÇELİKTEN

ABSTRACT

In this work, RPM software which is actually developed for PWR is adjusted for the VVER-1000 core geometry.

Space-depended power production requires to reckon at the specific burnup values throughout the cycle (from BOC to EOC) life in order for computing the nuclear core loading pattern. In reality, while there are various code systems for neutronic core analyses, using fast and reliable code system will decrease computational time of the optimization problem of core loading pattern.

In order to implement the functions which gives the neutronic parameters of fuel assemblies, into developed code, they are obtained as a function of burnup and of reactor power production. by using WIMSD code.

To make a verification of the developed code, the results are compared with the experimental values presented in referance (IAEA, 1995) for VVER-1000 reactor by performing initial core loading analysis.

Keywords : Burnup, Neutronic Calculation, WIMSD,VVER

Advisor : Prof. Dr. Mehmet Tombakoğlu, Hacettepe Univeristy, Department of Nuclear Engineering.

TEŞEKKÜR

İlk olarak danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Tombakoğlu'na teşekkür ederim. O'nun rehberliği olmasaydı, bu çalışmanın sonuca ulaşması çok zor olacaktı.

Ayrıca tez değerlendirme komitemde bulunan, Sayın Doç. Dr. S. Sinan Keskin'e, Sayın Doç. Dr. C. Niyazi Sökmen'e, Sayın Doç. Dr. Ayhan Yılmazer'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Cemil Kocar'a teşekkür ederim.

Bana tez çalışmamda her türlü desteğini sağlayan Sayın Araş. Gör. Mehmet Türkmen'e teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca bana her türlü manevi desteği sağlayan tüm Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Ailesi'ne de özel teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
KISALTMALAR	viii
1 GİRİŞ	1
2 VVER REAKTÖRLERİ VE ÇEŞİTLERİ	3
2.1 VVER-440 Tipi Reaktörler ve Teknik Özellikleri.....	5
2.2 VVER-440 Reaktörlerinin Tasarım Parametreleri (IAEA, 1995)	7
2.3 VVER-1000 Tipi Reaktörler ve Teknik Özellikleri.....	13
2.4 VVER-1000 Reaktörlerinin Tasarım Parametreleri (IAEA, 1995)	16
2.5 VVER-1200 (AES-2006, A3C-2006 (V392M, V491)) Tipi Reaktörler ve Teknik Özellikleri.....	24
3 GİRDİ HAZIRLANMASI	28
3.1 WIMSD “Standart Kafes Fiziği Analiz” Kodu (AEA Tech., 1997).....	28
3.2 WIMSD Kodu İçin Girdi Dosyasının Hazırlanması.....	28
3.2.1 Kullanılan Anahtar Kelimeler ve Anlamları	29
3.2.1.1 Giriş Bilgileri	29
3.2.1.2 Ana Bilgiler	30
3.2.1.3 Düzenleme Bilgileri	33
3.3 Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması	35
3.3.1 Reaktivite Değerleri Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması	36
3.3.1.1 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Reaktivite Değerleri Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması	36
3.3.1.2 Gadolinyum İçeren Yakıtlar için Reaktivite Değerleri Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması	37
3.3.2 Nötron Göç Alanı ve Nötron Difüzyon Uzunlukları Değerleri için Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması.....	38
3.3.3 Uyum Eğrisi Fonksiyonlarına Yapılan Düzeltmeler.....	38
4 NÜKLEER REAKTÖR ANALİZİ	41
4.1 Nükleer Reaktör Analizlerinde Uygulanan Metotlar	41
4.1.1 Nötron Taşıma Denklemi.....	41

4.1.2	S_N Metodu	43
4.1.3	Monte Carlo Metodu.....	43
4.1.4	P_N Methodu ve Difüzyon Yaklaşımı	44
4.2	Yakıt Tükenme Modeli ve Tayfsal Etkiler.....	45
4.3	Hafif Su Reaktörlerinde Reaktivite Kontrol Mekanizmaları	46
4.3.1	Çözünebilen Zehir	46
4.3.2	Yanabilen Zehir	48
4.3.2.1	Yakıtla Bütünleştirilmiş Yanabilen Yutucular(IFBA)	48
4.3.2.2	Gadolinium Oksit (Gadolinyum(Gd_2O_3)).....	49
4.3.2.3	Erbiyum Oksit (Erbiyum(Er_2O_3))(Kodochigov et.al.,2003)	49
5	KOR GÜÇ DAĞILIM HESAPLAMALARI	51
5.1	Bir Buçuk Grup Nötron Difüzyon Denklemi Yaklaşımı	51
5.2	Yerel Güç Yoğunluğu ve Akı Arasındaki İlişki.....	53
5.3	Yakıt Demetlerinin Güç Değerlerinin Hesaplamaları	55
5.3.1	Levha Geometrisi için Güç Paylaşım Değerlerinin Türetilmesi (Driscoll et.al., 1991).....	56
5.3.2	Kare Şeklindeki Düğüm Noktaları için Güç Paylaşım Değerlerinin Türetilmesi (Driscoll et.al., 1991).....	59
5.3.3	Altıgen Şeklindeki Düğüm Noktaları için Güç Paylaşım Değerlerinin Türetilmesi	62
6	RPMHEX KODU	65
6.1	Program Algoritması	66
7	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	71
8	TARTIŞMA VE YORUM.....	75
	KAYNAKLAR.....	77
	EKLER DİZİNİ.....	80
	EK.A Örnek WIMSD-5B Girdi Dosyası.....	80
	EK.B Girdi Katsayı Tabloları	83
	B.1 Reaktivite Değerleri için Elde Edilen Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları	83
	B.2 Nötron Göç Alanları için Elde Edilen Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları	86
	B.3 Nötron Difüzyon Uzunlukları için Elde Edilen Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları	89
	EK.C RPMHEX Kaynak Kodu	92
	ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 VVER Çalışma Prensiğini Gösteren Şema (Javys).....	6
Şekil 2.2 VVER-440 Birinci Döngü ve Birinci Döngü Ana Parçaları (Skoda, 2010)	6
Şekil 2.3 VVER-440 için Reaktör, Kor ve Yansıtıcı Geometrisi	10
Şekil 2.4 Kontrol Demetlerinin Konumları	10
Şekil 2.5 Yakıt Demeti	11
Şekil 2.6 Ara Izgaraların Konumları	11
Şekil 2.7 Kontrol Demeti Radyal Görünümü	12
Şekil 2.8 Kontrol Demeti Eksenel Görünümü	12
Şekil 2.9 VVER-440 İlk Kor Yükleme Düzeni.....	13
Şekil 2.10 Birim Hücre	15
Şekil 2.11 VVER-1000 Birinci Döngü ve Döngü Ana Parçaları (Banyuk et.al.,2010)	15
Şekil 2.12 VVER1000 Kor Geometrisi	20
Şekil 2.13 VVER-1000 Yansıtıcı Geometrisi.....	20
Şekil 2.14 Yakıt demeti ve Yakıt çubukları Eksenel Görünümleri	21
Şekil 2.15 VVER-1000 İlk Yükleme Düzeni	21
Şekil 2.16 Kontrol Demetlerinin Konumları ve Grup Numaraları.....	22
Şekil 2.17 Kontrol Demetleri	22
Şekil 2.18 Şekillendirilmiş Yakıt Demeti.....	23
Şekil 2.19 Şekillendirilmemiş Yakıt Demeti.....	23
Şekil 2.20 Yakıt Demeti Eksenel Geometrisi ve Ara Izgaraların Konumları.....	24
Şekil 2.21 VVER-1200 Birinci Döngü ve Birinci Döngü Ana Parçaları (Banyuk,2010)	25
Şekil 3.1 Uyum Eğrisi Fonksiyonları Düzeltmesi ve WIMSD Verileri (Nötron Göç Alanı)	40
Şekil 3.2 Reaktivite Uyum Eğrisi ve WIMSD Verileri.....	40
Şekil 5.1 Levha Geometrisi için Düğüm Noktaları	56
Şekil 5.2 Kartezyen Geometri için Düğüm Noktaları.....	59
Şekil 5.3 Altıgen Geometri için Düğüm Noktaları.....	62
Şekil 6.1 RPMHEX Programı Hesaplama Matrisi	65
Şekil 6.2 RPMHEX Programı Hesaplama Alanı	66
Şekil 6.3 RPMHEX Programı Akış Şeması.....	67
Şekil 7.1 İlk Kor Yükleme Düzeni	71
Şekil 7.2 Yanma Oranı 1700. MWgün/t AM Gadolinyum İçeriği Varken.....	72
Şekil 7.3 Yanma Oranı 1700. MWgün/t AM Gadolinyum İçeriği Yok İken	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Düşük ve Orta Ölçekli Güçlerde İlk Tasarımlar (1955 – 1975).....	4
Çizelge 2.2 Yüksek Ölçekli Güçlerdeki Tasarımlar (1966 – 2003).....	4
Çizelge 2.3 Çağdaş Tasarımlar (2000 – 2007).....	5
Çizelge 2.4 Gelişmiş ve Yenilikçi Tasarımlar	5
Çizelge 2.5 VVER-440 Tasarım Parametreleri	7
Çizelge 2.6 VVER-1000 Tasarım parametreleri	16
Çizelge 2.7 VVER-1200 Reaktörlerinin Bazı Tasarım Parametreleri (Makhov, Dragunov, 2010)	26
Çizelge B.1 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Reaktivite Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları	83
Çizelge B.2 0,02 g/cm ³ Gd İçeren Yakıtlar için Reaktivite Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları	84
Çizelge B.3 0,036 g/cm ³ Gd İçeren Yakıtlar Reaktivite Uyum Eğrileri Katsayıları	85
Çizelge B.4 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Nötron Göç Alanı Katsayıları....	86
Çizelge B.5 0,02 g/cm ³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Göç Alanı Katsayıları.....	87
Çizelge B.6 0,036 g/cm ³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Göç Alanı Katsayıları.....	88
Çizelge B.7 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Nötron Difüzyon Uzunlukları Katsayıları.....	89
Çizelge B.8 0,02 g/cm ³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Difüzyon Uzunlukları Katsayıları.....	90
Çizelge B.9 0,036 g/cm ³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Difüzyon Uzunlukları Katsayıları.....	91

KISALTMALAR

AM : Ağır Metal

DRM : Doğrusal Reaktivite Modeli

EUR : European Utilities Requirements for LWR Nuclear Power Plants
(LWR Nükleer Güç Santralleri için Avrupa İşletici Şartları)

IAEA : International Atomic Energy Agency (Uluslar arası Atom Enerjisi
Ajansı)

IFBA : Integrated Fuel Burnable Absorber (Yakıtla Bütünleştirilmiş
Yanabilen Yutucular)

k_{eff} : Etkin Çarpan Faktörü

k_{inf} : Sonsuz Ortam Çarpan Faktörü

LOFA : Loss of Flow Accident (Soğutucu Kaybı Kazası)

LWR : Light Water Reactor (Hafif Su Reaktörü)

MOX : Mixed Oxide (U-Pu Karışık Oksitli Nükleer Yakıt)

NEA : Nuclear Energy Agency (Nükleer Enerji Ajansı)

NGS : Nükleer Güç Santrali (AES, АЭС-Атомная электростанция)

ppm : Milyon tane parçacık içerisindeki parçacık sayısı (particle per million)

RPMHEX : **R**ector **P**ower **M**apping for **HEX**agonal Core Geometry (Altıgen
Kor Geometrisi için Reaktör Güç Haritası)

S_N : Discrete Ordinates (Ayrık Ordinatlara)

VVER : ВВЭР[Водо-водяной энергетический реактор (Voda-Vodyanoyi
Energetičeski Reaktör)] (Su Yavaşlatıcılı, Su Soğutmalı Enerji Reaktörü)

H_3BO_3 : Borik Asit

Er_2O_3 : Erbiya

Gd_2O_3 : Gadolinya

ZrB_2 : Zirkonyum Diborid

1 GİRİŞ

Dünyadaki artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerji kaynaklarının kullanım miktarları artmaktadır. Dünyada belli başlı enerji kaynaklarını düşünecek olursak, enerji üretiminde en çok fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak fosil yakıtların atmosfere verdiği zarardan dolayı son dönemlerde dünya 'Küresel Isınma' gerçeği ile karşı karşıya kalmıştır. Dünya da barajlardan elde edilen hidroelektrik enerjiside yadsınamaz büyüklüktedir. Hidroelektrik enerjisinin kaynağının kısıtlı olması ve kurulduğu bölgedeki habitatı etkilemesinden dolayı son dönemlerde elektrik üretmek için kurulan barajlara tepkiler artmaktadır. Bu iki ana kaynağın yanında alternatif olarak güneş, rüzgar ve jeotermal gibi enerji kaynaklarından enerji üretilmektedir. Fakat üretilen enerji miktarının az ve sürekli olmamasından dolayı enerji arzını tam olarak karşılayamamaktadır. Hali hazırda dünya toplam elektrik üretiminin yaklaşık % 16'sını üreten nükleer santraller enerji sürekliliği, ürettiği enerji yoğunluğunun yüksek olması, fosil yakıtlar gibi doğaya sera gazları salmaması, en önemlisi güvenli ve ekonomik olmasından dolayı günümüzde elektrik üretimi için ön plana çıkmaktadır.

Nükleer santrallerde, santrallerin kor kısmında meydana gelen nükleer tepkimeler sonrasında açığa çıkan ısı elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elde edilen enerjinin belirli bir süre boyunca sürekli, güvenli ve ekonomik bir şekilde üretimi gerekmektedir. Verimlilik ve süreklilik, yakıt demetlerinin kor bölgesine nasıl yüklendiği ile doğrudan alakalıdır. Yükleme süresinden ilk çevrimin sonuna kadar kor içerisindeki yakıtların yanma oranlarını bilmek ve doğru zamanda doğru konumda olmalarını sağlamak yakıt yöneticileri tarafından yapılan hesaplamalar ile sağlanmaktadır.

Geliştirilmek istenen RPMHEX **R**ector **P**ower **M**apping for **HEX**agonal Core Geometry), ilk yakıt yükleme çevrimi için bir buçuk grup nötron difüzyon denklemini kullanıp altıgen yakıt demeti geometrisinde düğüm noktaları üzerinden hesaplama yaparak yakıt yanma oranlarına bağlı olarak reaktör koru içerisindeki güç dağılımını hesaplaması amaçlanmaktadır. Böylece iki ve üçüncü çevrimlerin kor yükleme haritalarını çıkarmak için altyapı oluşturulacaktır.

Bu çalışma sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bir bilgilendirme ile başlayıp tezin amacını ve tez düzeni anlatılmaktadır

İkinci bölümde VVER güç reaktörleri hakkında tarihsel gelişim ile başlayıp günümüz teknolojisinde bulunduğu konumdan bahsedilmiştir. VVER-440 ve VVER-1000 için referans (IAEA, 1995)'dan alınan ve VVER-1200 için listelenmiş tablolarda ve teknik resimlerde reaktör yapısı ve kor hakkında geniş çaplı bilgiler verilmektedir.

Üçüncü bölümde WIMSD kodu içerisinde kullanılan anahtar kelimeler ve ne anlama geldikleri açıklanmıştır. Yakıt hücresi reaktivite ve grup sabiti değerleri WIMSD kodu ile yanma oranları, yakıt demetinde üretilen güç miktarı ve bor konsantrasyonu değişkenlerine bağlı olarak oluşturuldu. Oluşturulan bu kütüphanelerden RPMHEX yazılımında kullanılmak üzere fonksiyonel olarak bir uyum eğrisi oluşturularak, uyum eğrisi fonksiyonları veri tabanına yazıldı. Oluşturulan bu fonksiyonlarda hata oranlarını düzeltmek için yaklaşımlar yapılmıştır. Oluşturulan fonksiyonlar sabitleri ile birlikte FORTRAN altprogramları içerisine yerleştirilerek hesaplamalar sırasında çağırılmaları sağlandı.

Dördüncü bölümde nükleer reaktör analizinde kullanılan metotlardan bahsedildi. Yakıt tükenme modelleri ve tayfsal etkilerinden bahsedildi. Son kısmında ise hafif su reaktörlerinde reaktivite kontrol mekanizmalarından bahsedilerek yanabilen yutucu çubukların çeşitlerinden bahsedildi.

Doğrusal Reaktivite Modeli (DRM)'nin kullanıldığı beşinci bölümde, bir buçuk grup nötron difüzyon yaklaşımı ile birlikte yerel güç yoğunlukları ile hızlı nötron akısı arasında bağıntılar bulundu. Levha, kare ve altıgen geometrilerde güç paylaşım değerlerinin dögümsel hesaplamaları için eşitlikler elde edildi.

RPMHEX kodunun hesaplama ve analiz için gerekli düğüm noktaları ile program algoritması altıncı bölümde anlatılmıştır. Geliştirilen kod için yapılan termal sızıntı akısının düzeltilmesi için yapılan yaklaşım yine bu bölümde gösterilmektedir.

Programdan elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı yedinci bölümden hemen sonra tartışma ve yorumların yapıldığı son bölüm olan sekizinci bölüm gelmektedir. Sekizinci bölümde ayrıca ileride RPMHEX üzerinde yapılması planlanan iyileştirmelere değinilmektedir.

2 VVER REAKTÖRLERİ VE ÇEŞİTLERİ

Sovyetler Birliği (şimdiki Rusya Federasyonu) tarafından tasarlanan ve batılı anlamda hafif sulu basınçlı su reaktörlerinin benzeri olan VVER (Rusça : ВВЭР [Водо-водяной энергетический реактор], Telaffuzu: Voda-Vodyanoyi Energetičeski Reaktör; İngilizce: WWER [Water-Water Energetic Reactor]), Türkçeye «Su Yavaşlatıcılı, Su Soğutmalı Enerji Reaktörü» olarak çevrilmiştir. Dünyada halen Bulgaristan, Ermenistan, Çin, Çek Cumhuriyeti, Finlandiya gibi ülkelerin kullandığı bir reaktör tipi olarak karşımıza çıkmaktadır.

VVER reaktörlerinin tarihsel sürecine baktığımızda, 1955 yılında I. V. Kurchatov ve A. P. Aleksandrov önderliğinde, “Atom Enerjisi Enstitüsü” ve “OKB Hidropress” şirketinin uzmanları tarafından kısa bir süre içerisinde detaylı çizimleriyle Novovoronezh NGS’nin 1 no’lu ünitesi 210 MW gücünde geliştirilmiş (Dragunov and Denisov, 2005) ve 1964 yılında, “Novovoronezh 1” VVER-210 modeli işletilmeye başlamıştır. Ardından VVER-365 modeli olan ‘Novovoronezh 2’ işletmeye alınmıştır. VVER-210 ve VVER-365 modelleri sırasıyla 1984 ve 1990 çalışma sürelerinin dolmasıyla kapatılmış ve bu iki model de prototip olarak kalmıştır. Novovoronezh’de VVER-440 tipi reaktörler 3. ve 4. üniteler olarak yapılmış ve bu reaktörler ilk standart model olan V230 modeli olarak adlandırılmıştır. VVER-440/V230 modeli “Birinci Nesil VVER”lar içerisinde değerlendirilir. Güvenlik gereksinimlerinin artmasından dolayı “İkinci nesil VVER”lar ise VVER-440/V213 1970 ve 1980 yılları arasında tasarlanmıştır. 1975-85 yılları arasına rastlayan dönemde geliştirilen “Üçüncü Nesil VVER” reaktörleri ise VVER-1000/V320 modelidir. VVER-1000/V320 modeli özellikle uluslararası uygulamalarla oluşan yeni Sovyet Nükleer Standartları’nın gereksinimleri çerçevesinde tasarlanmıştır (Warman et. al.,1995).

VVER reaktörlerinin gelişim süreçleri, modelleri, kurulu bulundukları yerler ve şu andaki durumları (Makhov, 2010)., Çizelge 2.1, Çizelge 2.2, Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4’te listelenmiştir

Çizelge 2.1 Düşük ve Orta Ölçekli Güçlerde İlk Tasarımlar (1955 – 1975)

Reaktör Tasarımı	Reaktör Tipi	Saha ve/veya Birimleri	Şuan ki Durumu	Evrimsel Nesli
VVER-1	VVER-210	Novovoronezh NGS (1)	DÇ	1
VVER-2	VVER-70	«Rheinesberg» NGS (1)	DÇ	1
VVER-3M	VVER-365	Novovoronezh NGS (2)	DÇ	1
V-179	VVER-440	Novovoronezh NGS (3,4)	HZU	1
V-230	VVER-440	Kola NGS (1,2), «Kozloduy» NGS (1-4), «Nord» NGS (1-4), «Bohunice» NGS (1,2)	HZU DÇ	1
V-270	VVER-440	Armenian NGS	İD	1
V-213	VVER-440	Kola NGS (3,4), Rovno NGS (1,2), «Loviisa» NGS (1,2), «Paks» NGS (1-4), «Bohunice» NGS (3,4), «Mochovce» NGS (1,2), «Dukovany» NGS (1-4), «Nord» NGS (5)	İD DÇ	2

Çizelge 2.2 Yüksek Ölçekli Güçlerdeki Tasarımlar (1966 – 2003)

Reaktör Tasarımı	Reaktör Tipi	Saha ve/veya Birimleri	Şuan ki Durumu	Evrimsel Nesli
V-187	VVER-1000	Novovoronezh NGS (5)	HZU	2
V-302	VVER-1000	South Ukraine NGS (1)	İD	2
V-338	VVER-1000	South Ukraine NGS (2), Kalinin NGS (1,2)	İD	2
V-320	VVER-1000	Balakovo NGS (1-4), Zaporozhe NGS (1-6), Rovno NGS (3,4), Khmelnitsk NGS (1,2), South Ukraine NGS (3), Rostov NGS (1,2), «Temelin» NGS (1,2), Kalinin NGS (3), «Kozloduy» NGS (5,6)	İD	2
V-392	VVER-1000		TG	3
V-446	VVER-1000	«Bushehr» NGS (1)	DA	3

Çizelge 2.3 Çağdaş Tasarımlar (2000 – 2007)

Reaktör Tasarımı	Reaktör Tipi	Saha ve/veya Birimleri	Şuan ki Durumu	Evrimsel Nesli
V-392B	VVER-1000	Balakovo NGS (5)	TG	3
V-412	VVER-1000	«Kudankulam» NGS (1,2)	YA	3
V-428	VVER-1000	Tianwan NGS (1,2)	İD	3
V-407	VVER-640	-	TG	3+
V-466B	VVER-1000	«Belene» NGS (1,2)	TG	3+
V-392M	VVER-1200	Novovoronezh NGS-2 (1,2)	YA	3+
V-491	VVER-1200	Leningrad II NGS (1-4), Baltic(Kaliningrad) NGS (1,2)	YA TG	3+
V-448	VVER-1500	-	TG	3+

Çizelge 2.4 Gelişmiş ve Yenilikçi Tasarımlar

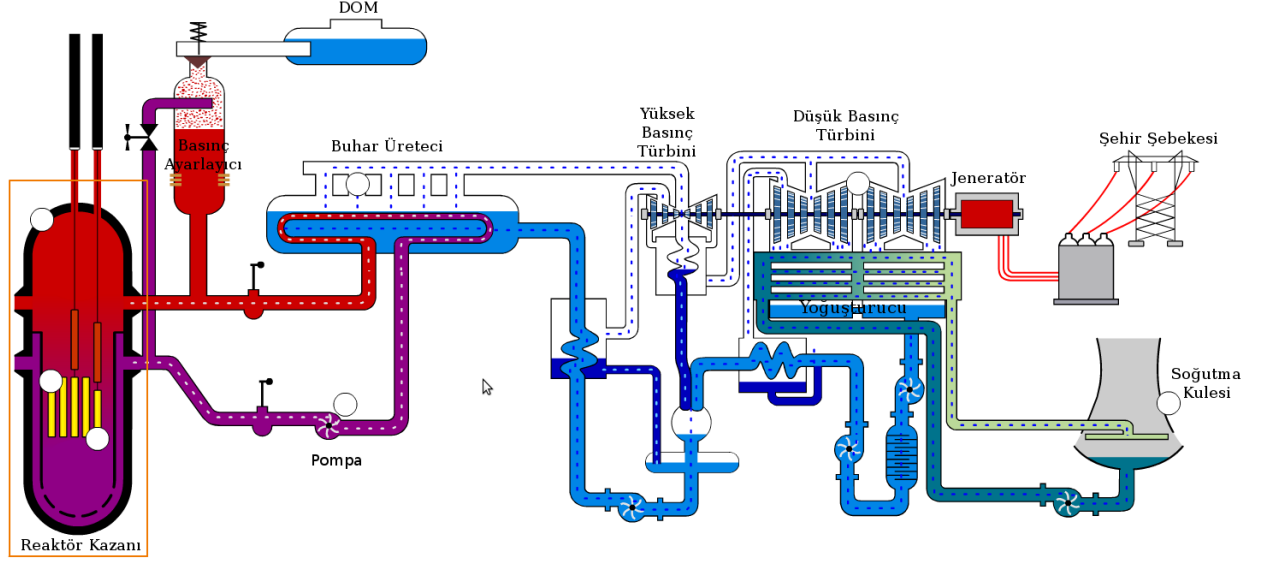
Reaktör Tasarımı	Reaktör Tipi	Saha ve/veya Birimleri	Şuan ki Durumu	Evrimsel Nesli
V-498	VVER-600	-	T	3+
V-501	VVER-1200A	-	T	3+
	VVER-1800	-	T	3+
V-393	VVER-SCP	-	T	4

Kullanılan Kısaltmalar: HZU – Hizmet Zamanı Uzatılmış; DA – Devreye Alınmış; T – Tasarlanmakta
TG – Tasarımı Geliştirilmiş; DÇ – Devreden Çıkarılmış; YA – Reaktör Yapım Aşamasında; İD – İşletme Durumunda.

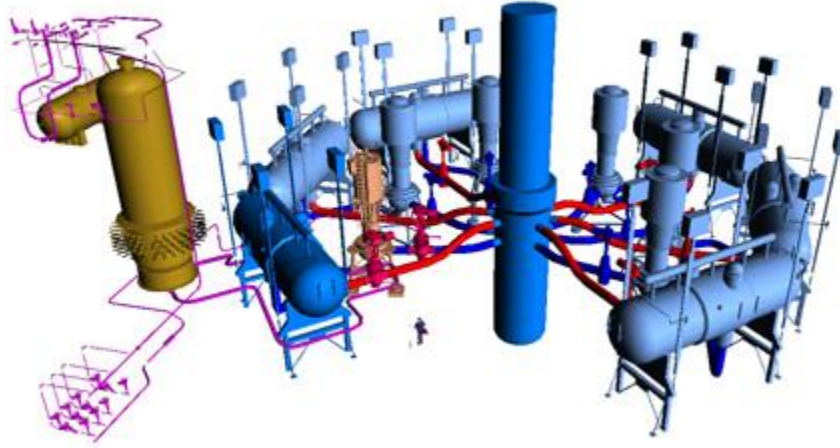
2.1 VVER-440 Tipi Reaktörler ve Teknik Özellikleri

Yukarıda da değinildiği gibi batılı anlamda bir Basıncılı Su Reaktörü olan VVER’lar iki ana çevrimden oluşmaktadır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere birincil çevrim kısmında reaktörde ısınan su buhar üreteçlerine gönderilmektedir. Buhar üreteçlerinde üretilen buhar ise türbin kısmına aktarılarak türbin şaftına bağlı olan jeneratör ile elektrik enerjisine dönüştürülür. VVER’lar temel bazı özellikler bakımından batılı benzerlerinden farklılıklar içerirler. Şekil 2.2’de üç boyutlu modelinde görüldüğü üzere VVER-440 reaktörleri reaktör kazanından çıkan 6 adet hat ve her biri bu hatlara bağlı olan izolasyon vanaları, yatay buhar üreteçleri, dişli ve ray sistemi tipindeki kontrol çubuğu sürücülerini bulmaktadır. VVER-440’lar ‘İkiz Tasarım (Twin Design)’ denilen iki reaktörün aynı reaktör binasında olduğu ve her biri 220 MWe üreten türbinlere bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir

reaktör kendine ait işletme odasına sahiptir. Batılı tasarımlardan farklı olarak yakıt demetleri altıgen geometride olup 126 adet yakıt çubuğu içermektedir. Net elektriksel güç çıkışları ise 408 MWe ve 510 MWe arasında değişim göstermektedir (IAEA, 2002).



Şekil 2.1 VVER Çalışma Prensibini Gösteren Şema (Javys)



Şekil 2.2 VVER-440 Birinci Döngü ve Birinci Döngü Ana Parçaları (Skoda, 2010)

2.2 VVER-440 Reaktörlerinin Tasarım Parametreleri (IAEA, 1995)

VVER-440 tasarım parametreleri Kozloduy NGS'nin 2 numaralı ünitesi için Çizelge 2.5'te listelenmiştir. Kozloduy 2. ünitesi için listelenen veriler oda sıcaklığındaki değerlerdir.

Reaktör kor geometrisinin radyal yöndeki uzunlukları Şekil 2.3'de verilmektedir, kontrol elemanlarının bulunduğu yakıt demetlerinin reaktör koru içerisinde bulunduğu konumlar ise Şekil 2.4'de verilmektedir. Şekil 2.5'de altıgen yakıt demeti geometri içerisinde yakıt çubuklarının konumları gösterilmektedir. Yakıt demetinin tam ortasında gerekli ölçümlerin alınması için ölçüm aleti kanalı yer almaktadır. Şekil 2.6'da ise yüksek akışın olduğu hatta yakıt çubuklarını bir arada tutan ve akışın kalitesini artırmaya yarayan, paslanmaz çelikten imal edilmiş ara ızgaraların yerleşimleri santimetre birimi cinsinden verilmektedir.

Çizelge 2.5 VVER-440 Tasarım Parametreleri

Reaktör Koru		
Termal Güç		1375 MW
Elektriksel Güç		440 MW
Öz Güç Yoğunluğu		84,4 W/m ³
Soğutucu :		
Kor Giriş Basıncı		1225,83 N/cm ²
Net Akış Hızı		43000m ³ /saat
Tam Güç (Sıcak Konumda) Giriş Sıcaklığı		269°C
Tam Güç (Sıcak Konumda) Ortalama Kor Çıkış Sıcaklığı		300°C
Tam Güç (Sıcak Konumda) Ortalama Zarf Sıcaklığı		302°C
Tam Güç (Sıcak Konumda) Ortalama Yakıt Sıcaklığı		707°C
Kor :		
Toplam Yükleme		47000 kg UO ₂ 42000 kg U metal
Geometri		Şekil 2.3
İlk Yüklemede Kullanılan Yakıt Demeti Çeşidi		3
Her bir Yakıt Demeti Tipi ve Sayıları		114, 133, 102
Yakıt Demeti Zenginliği		1,6%, 2,4%, 3,6%
Yakıt Demetlerinin Yükleme Konumları		Şekil 2.9
Etkin Kor Yarıçapı		144 cm
Kontrol Yakıt Demetlerinin Konumları		Şekil 2.4
Sistemin Kontrolü ve Kapatılması için Kullanılan Kontrol		6
Yakıt Demetleri ya da Kontrol Çubuklarının Grup Sayısı		

Yansıtıcı :

Geometri	Şekil 2.3
Su Sıcaklığı	260°C
Su Basıncı	1225,83 N/cm ²
Kor Potası Malzemesi	08X18H10T
Varil Malzemesi	08X18H10T

Yakıt Demeti:

Genel :	
İki Yakıt Demeti Merkezleri Arası Uzaklık	14,7 cm
İki Yakıt Demeti Arası Boşluk	0,3 cm
Kabuk Malzemesi	Zirkonyum Alaşımı (Z125-2,5% Nb)
Kabuk Kalınlığı	0,2 cm

Yakıt Tipi :

Zenginlik	1,6%, 2,4%, 3,6%
Geometri	Şekil 2.5
Yakıt Çubuğu Sayısı	126
Her Yakıt Demetindeki Toplam UO ₂ kütlesi	136 kg (119,75 kg U metal)
İki Yakıt Elemanı Merkezleri Arası Uzaklık	1,22 cm

Ara Izgaralar :

Malzeme	12X18H10T
Yoğunluğu	Paslanmaz Çelik 7,86 g/cm ³
Ara Izgaraların Konumları ve Sayıları	Şekil 2.6
Bir Ara Izgaranın Kütlesi	0,118 kg

Ölçüm Alma Kanalları :

Malzeme	Zirkonyum Alaşımı Z110- 1% Nb
Yoğunluğu	6,52 g/cm ³
İç Yarıçapı	0,515 cm
Kalınlığı	0,075 cm

Yakıt Çubuğu :

Zarf :	
Malzeme	Zirkonyum Alaşımı Z110- 1% Nb
Yoğunluğu	6,52 g/cm ³
Dış Yarıçapı	0,455 cm
İç Yarıçapı	0,386 cm

Yakıt Tableti :

Malzemesi	UO ₂
Yüzde Teorik Yoğunluğu x Yoğunluğu	0,95x10,2 g/cm ³
Dış Yarıçapı	0,3800±0,0025 cm
Tabletin Ortalama Kütlesi	13,7 g UO ₂
	11,9 g U metal
Yüksekliği	3 cm
Yakıt Çubuğu İçerisindeki Tablet Sayısı	82
Toplam UO ₂ Yüksekliği	246 cm
Başlangıçtaki He Basıncı	~0,15 MPa
Yakıt Demetlerindeki İçerisindeki Yakıt Çubuğundaki UO ₂ miktarı	1080 g

Kontrol Yakıt Demeti :

Geometri :

Radyal Düzlemde

Şekil 2.7

Eksenel Düzlemde

Şekil 2.8

Yutucu

Bor Çeliği

Yoğunluk

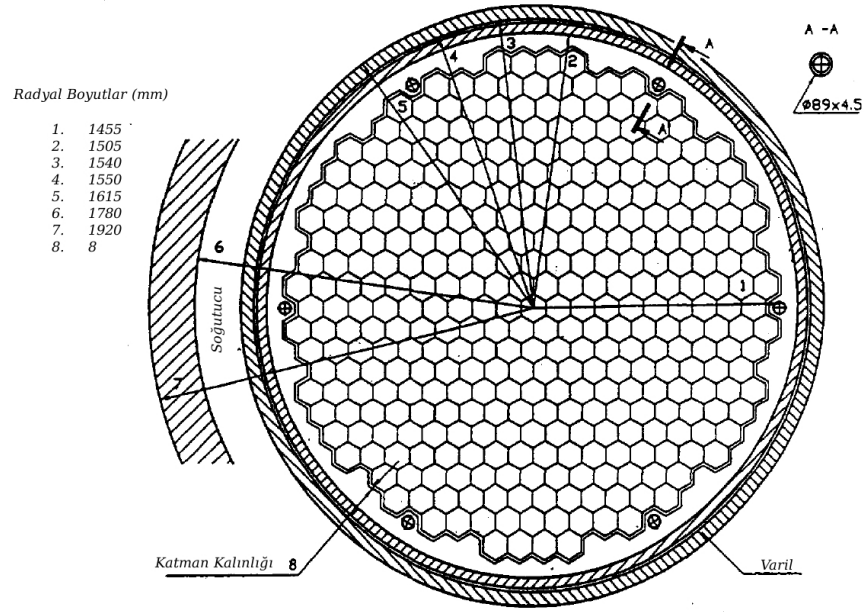
7,51 g/cm³

Çelik ve Bor Çeliği'nin Kompozisyonları :

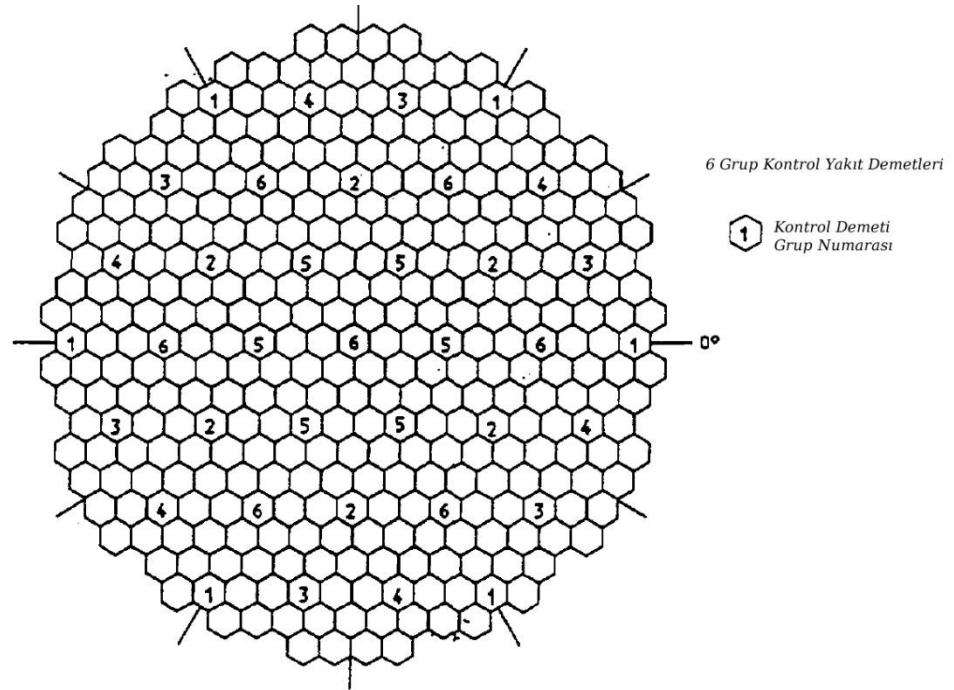
Malzeme	Ağırlık Yüzdesi					Yoğunluk
	Fe	Ni	Cr	Mn	B	
Çelik	70,5	10	18	1,5	-	7,86 g/cm ³
Bor Çeliği	69,2	9,8	17,7	1,5	1,9	7,51 g/cm ³

Zirkonyum Alaşımının Kompozisyonu :

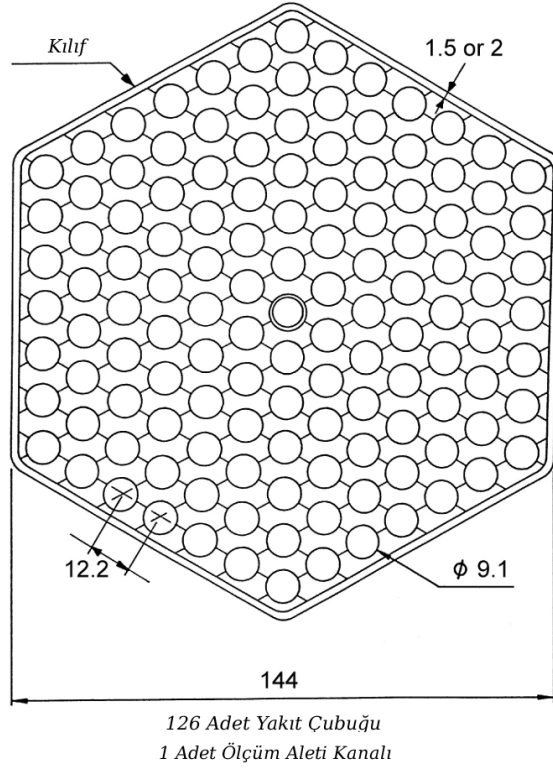
Malzeme	Ağırlık Yüzdesi		
	Zr	Nb	Hf
Z110	98,97	1,0	0,03
Z125	97,47	2,5	0,03



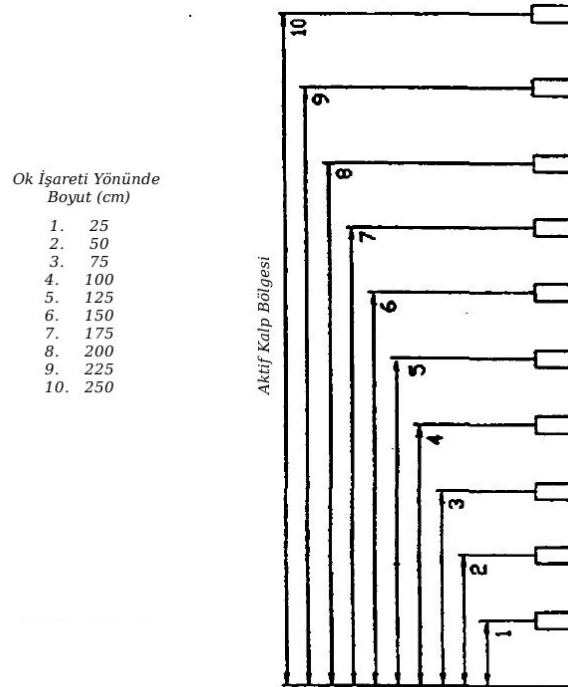
Şekil 2.3 VVER-440 için Reaktör, Kor ve Yansıtıcı Geometrisi



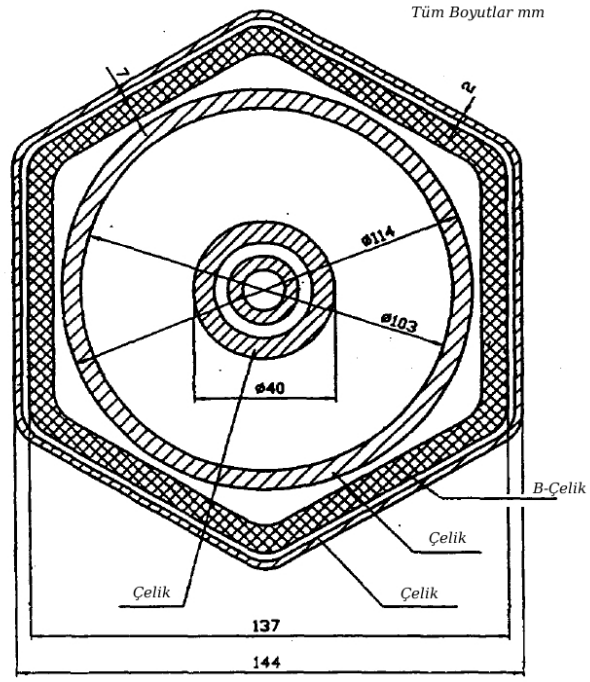
Şekil 2.4 Kontrol Demetlerinin Konumları



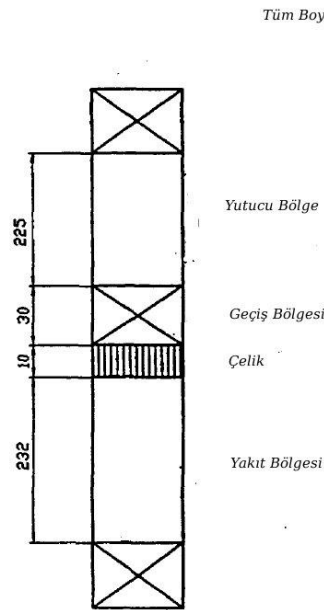
Şekil 2.5 Yakıt Demeti



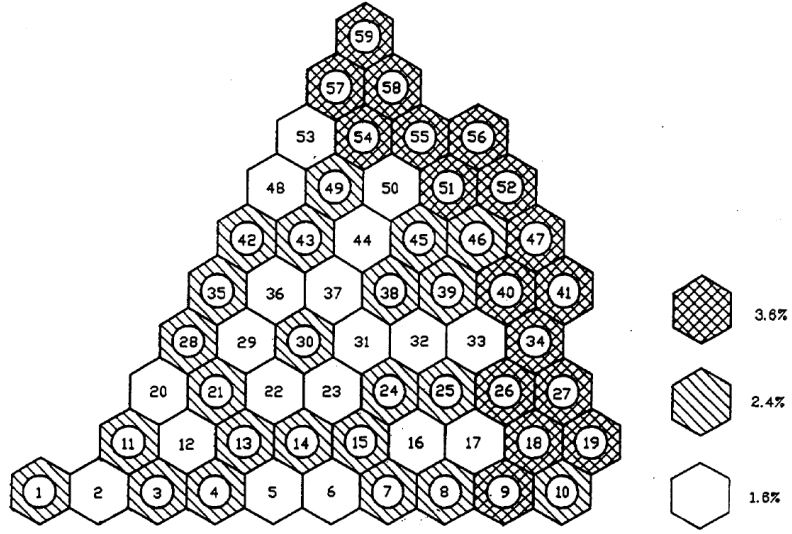
Şekil 2.6 Ara Izgaraların Konumları



Şekil 2.7 Kontrol Demeti Radyal Görünümü



Şekil 2.8 Kontrol Demeti Eksenel Görünümü



Şekil 2.9 VVER-440 İlk Kor Yükleme Düzeni

2.3 VVER-1000 Tipi Reaktörler ve Teknik Özellikleri

VVER-1000 reaktörleri su soğutmalı ve su yavaşlatıcılı basınçlı hafif su reaktörüdür. VVER-440'ların gelişmiş versiyonudur. VVER-440'lardan farklı olarak batılı nükleer santrallerin kullandığı "Koruma Kabı" ile inşa edilmektedir. 3000MW ısı güce sahip % 33 verim oranıyla 1000 MW elektrik üreten reaktör 40 yıl olan ömrü, 3-4 tekrardan yükleme periyodunda 40 MWgün/kg'un üzerinde olan yakıt yanma oranları ve %90'a yaklaşan kapasite faktörü ile II. nesil reaktörler içerisinde yerini almaktadır.

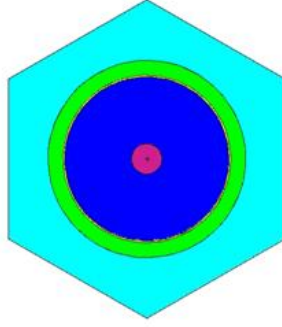
VVER-1000'lerde reaktör basınç kazanı 10,897 m yüksekliğinde olup 4,15 m iç çapına sahiptir. Cidar kalınlığı 192,5 mm olan kazanın ağırlığı 320 tondur. VVER-440'larda 6 hat olan birincil çevrim bölgesi VVER-1000'lerde Şekil 2.11'de görüldüğü üzere 4 hat olacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir hatta kendine ait olan ana soğutucu pompası ve buhar üretici bulunmaktadır. VVER reaktörlerinin genel özellikleri olarak karşımıza çıkan buhar üreteçlerini yatay biçimde konumlandırılması VVER-1000 reaktörü için de geçerlidir. Buhar üreteçlerinin tasarım basınçları 7,84 MPa, yatay uzunlukları 13,8 m, çapları ise 4,29 m olup

saatte ortalama 1470 ton buhar üretmektedir (Gagarinski et.al.). Birincil döngü bölgesinden saatte 84800 m³ su ile reaktör koru soğutulmaktadır. 4850 m² ısı transferi alanına sahip olan reaktörde, su sıcaklığı, kor bölgesinden geçerken yaklaşık 29-29,5°C yükselmektedir (Ergün, 2008).

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi 108 kW/litre güç yoğunluğuna sahip kor bölgesi 79,5 ton UO₂ içermekte ve aktif yakıt bölgesi 353 cm olan 163 tane yakıt demetinden oluşmaktadır. Her bir yakıt demetinde ise 312 yakıt çubuğu, 18 kılavuz kanalı ve 1 adet ölçüm aleti kanalı bulunmaktadır. Yakıt olarak 3 çeşit zenginlikte UO₂ yakıt kullanılmaktadır. VVER-1000’ler 3 çeşit yakıt kullanılmasına karşın içerisinde 4 çeşit yakıt demeti tipi vardır. Bunlar VVER-1000 reaktörlerinde kullanılan ve güç düzenlemesi sağlamaya yarayan ‘Şekillendirilmiş Yakıt Demetleri (Profiled Assemblies)’dir. Yakıt zenginliği bakımından şekillendirilmemiş yakıt demetlerinden farklı olarak, bu yakıt demetleri iki farklı zenginlikte yakıt çubuğu içermektedir (3,0% ve 3,3%). Şekil 2.18’de şekillendirilmiş yakıt demeti, Şekil 2.19’da şekillendirilmemiş yakıt demeti yakıt dizilimlerini göstermektedir.

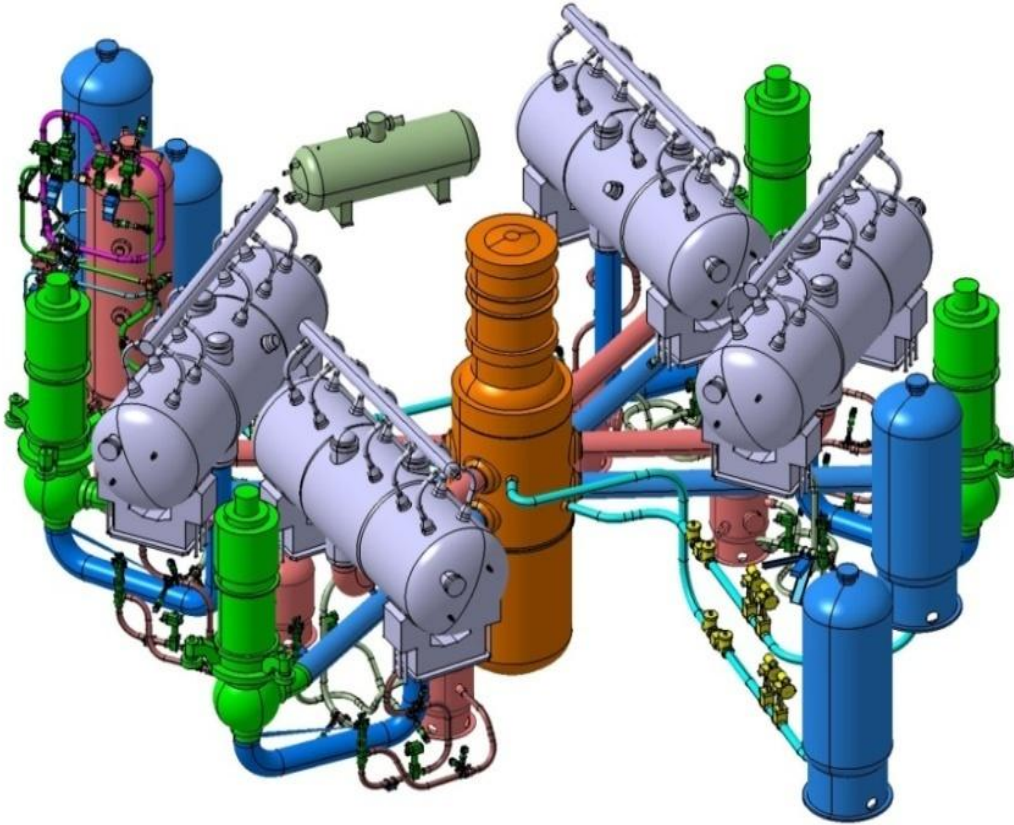
Yakıt demeti içerisinde bir yakıt elemanın incelendiği alan Şekil 2.10’de verilmiştir. İki yakıt elemanın merkezleri arasındaki uzaklık 1,275 cm’dir. VVER reaktörlerinin yakıtlarında diğer basınçlı su reaktöründen farklı olarak ortasında hava içeren boşluk bulunmaktadır. Reaktörün çalışma esnasında fisyon gazlarının bu bölgeye dolarak yakıtın şişmesine bağlı olarak yakıt tableti ve zarf malzemesinin etkileşiminin azaltılması ve yakıt tabletinin maksimum sıcaklığının düşürülmesi amaçlanmıştır.

Reaktörün kritik olma durumu borik asit ve kontrol çubukları ile sağlanmaktadır. Kontrol çubukları küme tipinde kontrol çubukları olup reaktör kontrolü için 10 gruba ayrılmışlardır.



Şekil 2.10 Birim Hücre

Güvenlik bakımından da VVER-1000 reaktörleri ciddi seviyede gelişmeler göstermiştir. Herhangi aksi bir durumda, daha önceki tasarımlarda olduğu gibi dışsal kuvvetler yardımıyla aktif olarak çalışan sistemler yerine, kendini idame ettirecek pasif sistemler (Yerçekimi kuvveti, Doğal Taşınım vb.) şekilde tasarlanmıştır. Kabuk binasının dışında bulunan hava soğutmalı ısı değiştiricileri ile 'Pasif Isı Atma Sistemi' reaktörde oluşan bozunma ısısının dışarı atılması için tasarlanmıştır (Gagarinski et.al.). Acil kor soğutması için daha fazla akümülatör eklenmiştir.



Şekil 2.11 VVER-1000 Birinci Döngü ve Döngü Ana Parçaları (Banyuk et.al.,2010)

2.4 VVER-1000 Reaktörlerinin Tasarım Parametreleri (IAEA, 1995)

VVER-1000 tasarım parametreleri Kozloduy NGS'nin 5. ünitesi için Çizelge 2.6'da listelenmektedir. VVER-1000 reaktörü için kor geometrisi Şekil 2.12'de ve daha detaylı olarak Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Şekil 2.14 yakıt demetleri ve yakıt çubuklarının ve zarf bölgelerinin aksenel olarak görünümüleri verilmektedir. VVER-1000 reaktörünün ilk yükleme düzeni Şekil 2.15'de görülmektedir. Şekil 2.16'da kontrol elemanlarının bulunduğu kor içi konumlar ve kontrol grup numaraları verilmiştir. Ardından gelen Şekil 2.17'de ise kontrol yakıt demetleri 1/4'lük kor geometrisi içerisinde dizilimleri verilmiştir. Yakıt demetlerindeki ara ızgaraların konumları Şekil 2.20'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 VVER-1000 Tasarım parametreleri

Reaktör Kori	
Termal Güç	3000 MW
Elektriksel Güç	1000 MW
Öz Güç Yoğunluğu	108 W/m ³
Soğutucu :	
Kor Giriş Basıncı	1583.284 N/cm ²
Net Akış Hızı	84800 m ³ /saat
Tam Güç(Sıcak Konumda) Giriş Sıcaklığı	288°C
Tam Güç(Sıcak Konumda) Ortalama Kor Çıkış Sıcaklığı	317°C
Tam Güç(Sıcak Konumda) Ortalama Zarf Sıcaklığı	320°C
Tam Güç(Sıcak Konumda) Ortalama Yakıt Sıcaklığı	727°C
Kor :	
Toplam Yükleme	79500 kg UO ₂
Geometri	Şekil 2.3
İlk Yüklemede Kullanılan Yakıt Demeti Çeşidi	
Herbir Yakıt Demeti Tipi ve Sayıları	4
Yakıt Demeti Zenginliği	79, 42, 36, 6
	2,0%, 3,0%, 3,3%, 3,3%
	Şekillendirilmiş
	(78 çubuk 2,0%,
	234 çubuk 3,3%)
Yakıt Demetlerinin Yükleme Konumları	Şekil 2.15
Etkin Kor Yarıçapı	158 cm

Kontrol Demetlerinin Konumları	Şekil 2.16
Sistemin Kontrolü ve Kapatılması için Kullanılan Kontrol Demetleri ya da Kontrol Çubuklarının Grup Sayısı	10
Yansıtıcı :	
Geometri	Şekil 2.13
Su Sıcaklığı	286°C-288°C
Su Basıncı	1581.284 N/cm ²
Kor Potasını Malzemesi	08X18H10T
Varil Malzemesi	08X18H10T
Yakıt Demeti:	
Genel :	
İki Yakıt Demeti Merkezleri Arası Uzaklık	23,6 cm
İki Yakıt Demeti Arası Boşluk	0,2 cm
Kabuk Bulunmamakta	
Yakıt Tipi :	
Zenginlik	Ağırlıksal Yüzde(w/o)
Geometri	Şekil 2.18 3,0% ve 3,3% Zenginlikte Şekil 2.19 2,0-3,0-3,3% Zenginlikte
Yakıt Çubuğu Sayısı	312
Her Yakıt Demetindeki Toplam UO ₂ kütlesi(İki yıllık döngü boyunca)	486,7 kg
İki Yakıt Elemanı Merkezleri Arası Uzaklık	1,275 cm
Ara Izgaralar :	
Malzeme	12X18H10T Paslanmaz Çelik (Fe-69,88%, C-0,12%, Cr-18,5%, Ni-10,5%, Ti-1%)
Yoğunluğu	7,85 g/cm ³
Ara Izgaraların Konumları ve Sayıları	Şekil 2.20
Bir Ara Izgaranın Kütlesi	654 g

Ölçüm Alma Kanalları :
Malzeme

Zirkonyum Alaşımı
(Zr-98,97%,
Nb- 1%,
Hf-0,03%)
6,55 g/cm³
0,56 cm
0,080 cm
Şekil 2.18

Yoğunluğu
İç Yarıçapı
Kalınlığı
Konumu

Kontrol Çubuklarının Kılavuz Kanalları :
Malzeme

Paslanmaz Çelik
(Fe-69,88%,
C-0,12%,
Cr-18,5%,
Ni-10,5%, Ti-1%)
18
0,63 cm
0,08 cm

Yakıt Demetindeki Kılavuz Kanal Sayısı
Dış Yarıçapı
Kalınlığı

Yakıt Çubuğu :

Zarf :
Malzeme

Zirkonyum Alaşımı
(Zr-98.97%,
Nb- 1%
Hf-0,03%)
6,515 g/cm³
0,455 cm
0,386 cm

Yoğunluğu
Dış Yarıçapı
İç Yarıçapı

Yakıt Tableti :
Malzemesi

UO₂
10,2-10,4 g/cm³
0,07 cm
353cm
(383/356,7cm)
0,38 cm
29,24 N/cm²
1056 g

Yüzde Teorik Yoğunluğu
Orta Boşluğun Yarıçapı
Yakıt Çubuğu içerisindeki UO₂ Yüksekliği
(Soğuk Durum/Tam güç)
Dış Yarıçapı
Başlangıçtaki He Basıncı
Yakıt Çubuğundaki UO₂ miktarı

Kontrol Çubukları ve Yanabilen Yutucu Çubuklar :

Kontrol Çubukları :

Zarf İç Çapı

0,7 cm

Zarf Kalınlığı

0,06 cm

Zarf Malzemesi

Paslanmaz Çelik
(Fe-69,88%,
C-0,12%,
Cr-18,5%,
Ni-10,5%, Ti-1%)

Yutucu Çapı

0,7 cm

Yutucu Malzemesi

B₄C

Yutucu Yoğunluğu

1,8 g/cm³

Yanabilen Yutucu Çubuklar :

Zarf İç Çapı

0,772 cm

Zarf Kalınlığı

0,069 cm

Zarf Malzemesi

Zirkonyum Alaşımı
(Zr-98,97%,
Nb- 1%,
Hf-0,03%)

Yutucu Çapı

0,772 cm

Yutucu Malzemesi (%)

B10- 0,2496

Yoğunluğu

B11- 1,011

Al – 91,738

Fe – 0,1918

Ni – 1,915

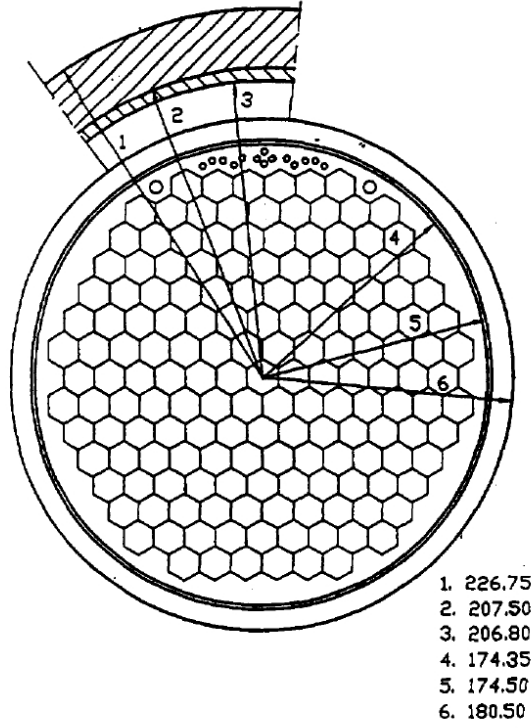
Cr – 2,9796

Zr – 1,915

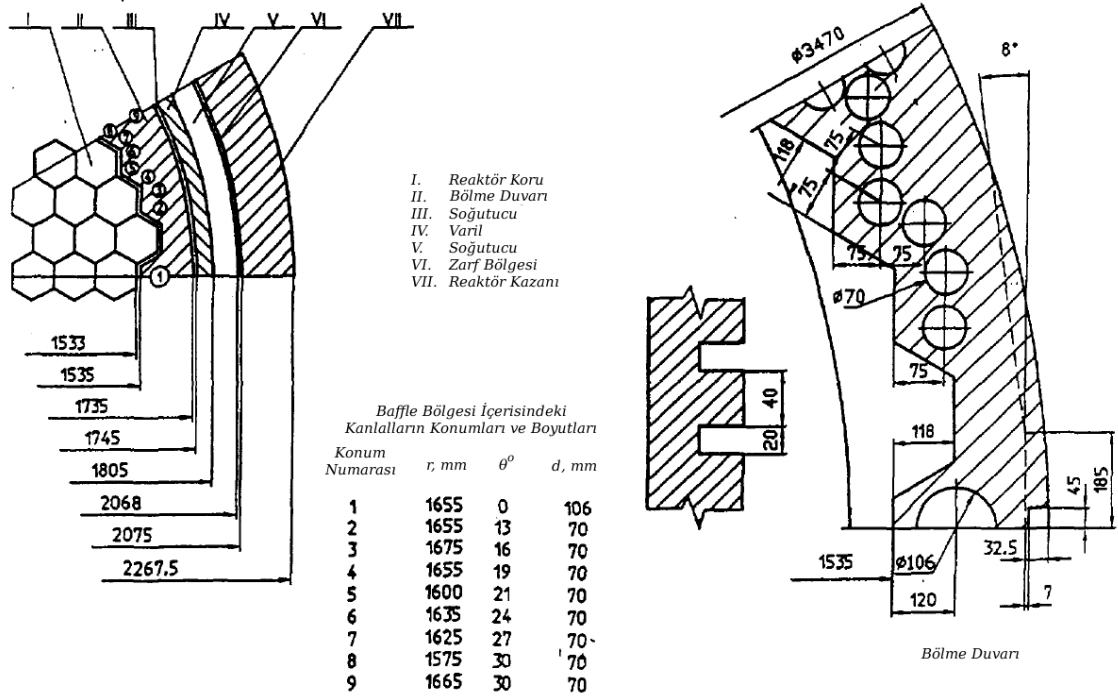
Yanabilen Yutucu Çubuklar İçerisindeki

1,8 g/cm³

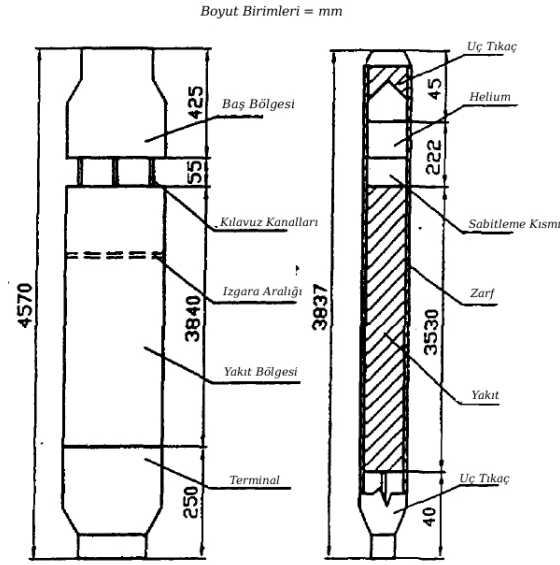
Doğal Bor 0,036 g/cm³



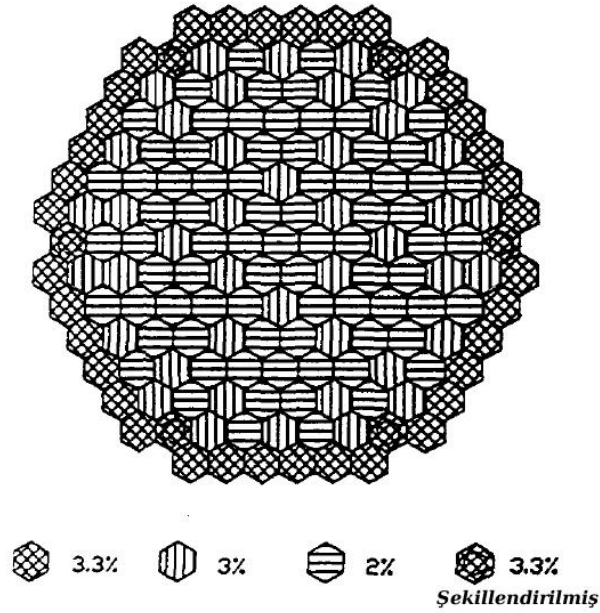
Şekil 2.12 VVER1000 Kor Geometrisi



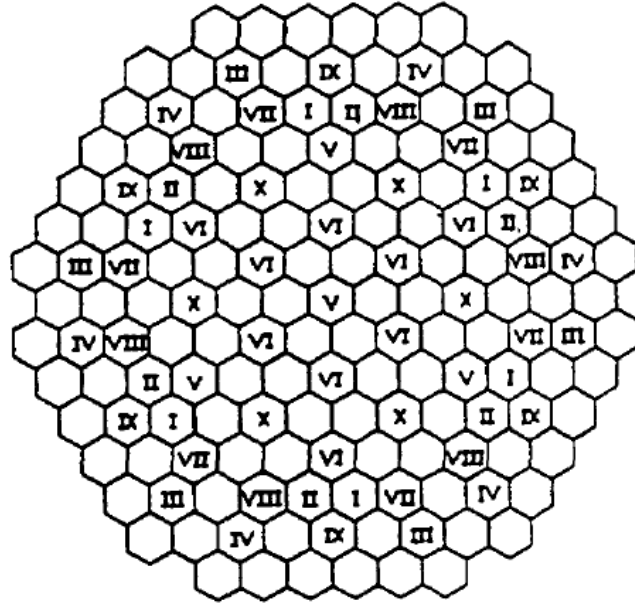
Şekil 2.13 VVER-1000 Yansıtıcı Geometrisi



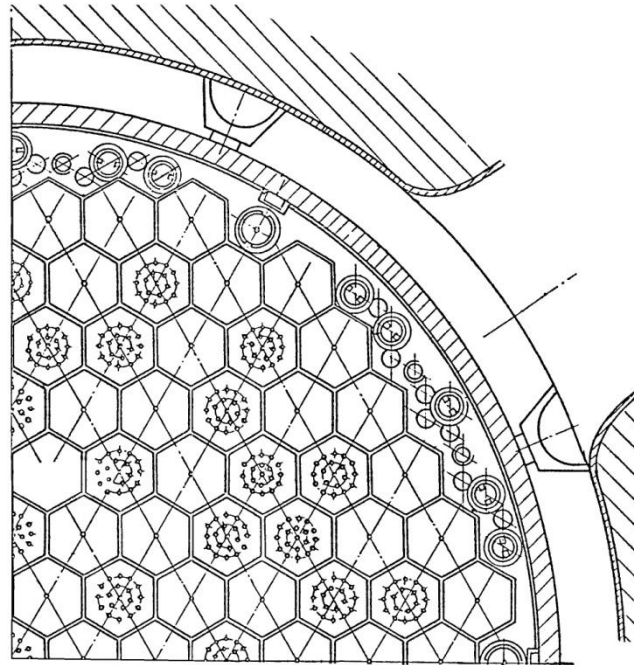
Şekil 2.14 Yakıt demeti ve Yakıt çubukları Eksenel Görünümleri



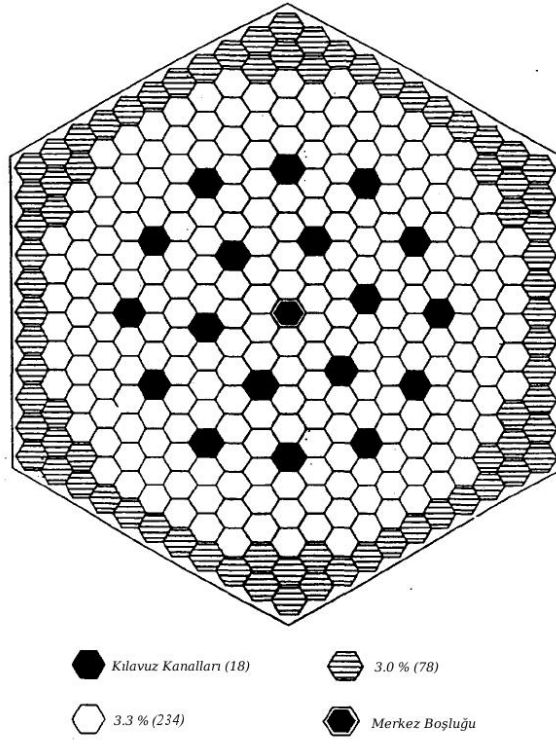
Şekil 2.15 VVER-1000 İlk Yükleme Düzeni



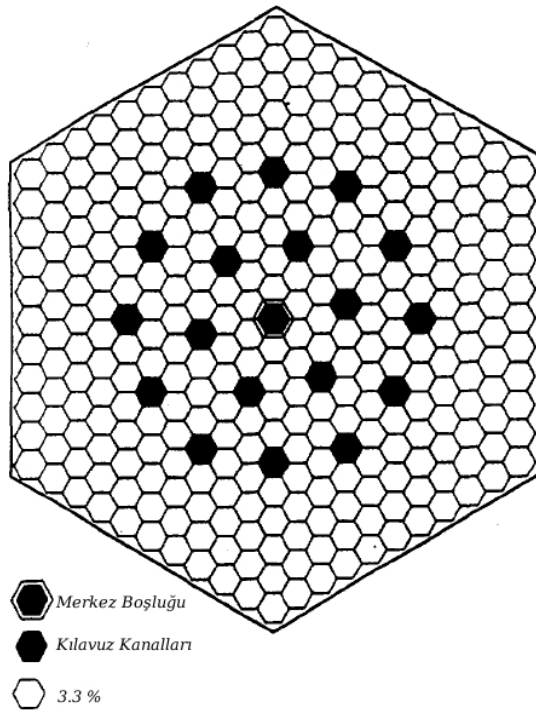
Şekil 2.16 Kontrol Demetlerinin Konumları ve Grup Numaraları



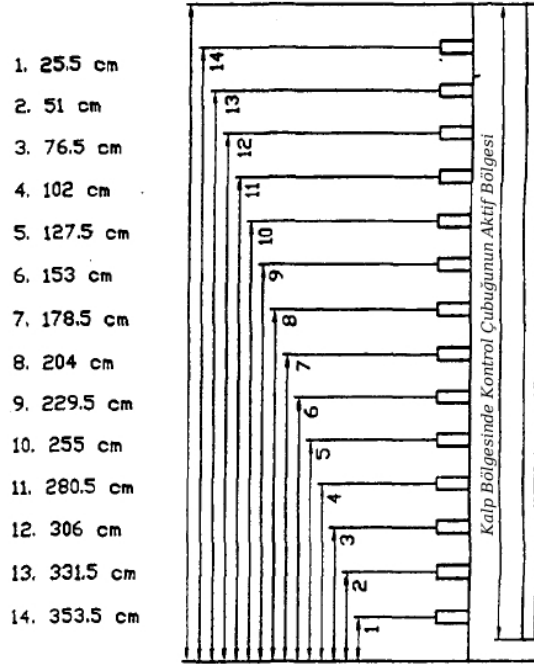
Şekil 2.17 Kontrol Demetleri



Şekil 2.18 Şekillendirilmiş Yakıt Demeti



Şekil 2.19 Şekillendirilmemiş Yakıt Demeti



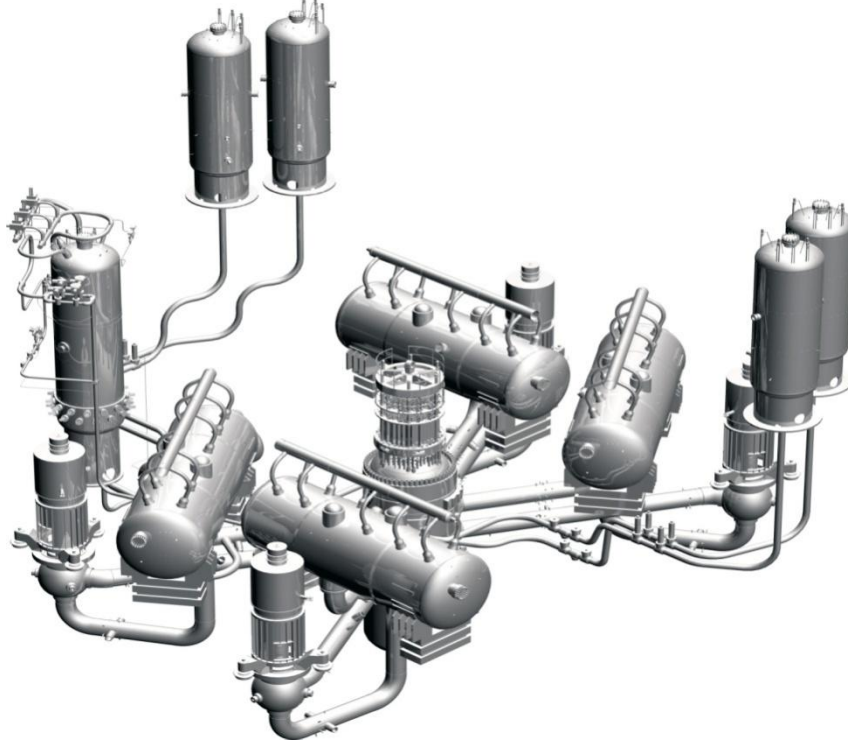
Şekil 2.20 Yakıt Demeti Eksenel Geometrisi ve Ara Izgaraların Konumları

2.5 VVER-1200 (AES-2006, A3C-2006 (V392M, V491)) Tipi Reaktörler ve Teknik Özellikleri

VVER-1200 oldukça geliştirilmiş devrimsel bir VVER modeli olup 3. nesil nükleer reaktör tasarımları arasında yerini almaktadır. Bazı tasarım özellikleri Çizelge 2.7’de verilmiştir. İki çeşit modeli geliştirilmiştir. Bunlardan ilki V392M modeli olan Moskova Tasarım Ofisi’nde, diğer modeli olan V491 ise St. Petersburg Tasarım Ofisi’nde geliştirilmiştir. V491 modelinde aktif sistemler V392M’e göre daha baskındır. Beyaz Rusya’nın Leningrad II NGS için V491 modelini seçmesine V320 modelinden kazanılan pozitif deneyim ile birlikte de, aktif sistemlerin daha verimli olması sebep olmuştur(Hirsch,2010). Türkiye’de Akkuyu/Mersin nükleer santral alanında kurulması planlanan nükleer santral modeli de V491’dir. V392M modelinin ise Çizelge 2.3 listelendiği üzere yeni bir NGS olarak Novovoronezh’de yapımına devam edilmektedir.

VVER-1200’lerde reaktör kazanının boyutları büyüyerek 11,185 m yüksekliğe, iç çapı 4,25 m’ye ve cidar kalınlığı 197,5 mm’ye çıkarılmıştır. Böylece kazanın

toplam ağırlığı 323 ton olmuştur. Şekil 2.21’de görüldüğü üzere buhar üreteçlerinin sayıları değiştirilmemiş ancak iç çapları büyütülerek 4,2 m olmuştur. Ayrıca buhar üreteçlerinin hizmet süreleri de artırılarak 60 yıla çıkartılmıştır.



Şekil 2.21 VVER-1200 Birinci Döngü ve Birinci Döngü Ana Parçaları
(Banyuk,2010)

Yakıt demetlerinin tasarımlarında da gözle görülür değişiklikler olmuştur. Yakıt demetlerinin aktif bölgeleri 200 mm artırılmış ve böylece yakıt demetindeki yakıt ağırlığı 534,1 kg olmuştur. Yakıt demetlerinin alt kuyruk bölgeleri ise 100 mm kısaltılmış ve yakıt demetlerinin toplam ağırlığı 750 kg olmuştur. Bu durum kor bölgesini çevreleyen baffle (saptırıcı) bölgesinin tasarımını da değiştirmiş ve yüksekliği 200 mm artırmıştır.

Reaktör koru içerisine yerleştirilmiş kontrol demetlerinin sayısı 121’e çıkarılmıştır. Böylece MOX yakıtlarının da sistemde kullanımı dahil olmak üzere farklı yakıt çevrimleri imkan sağlamaktadır.

VVER-1200 modellerine eklenen reaktör korunun erime durumunda erimiş metali tutan ve soğutan kor tutucular ile çift katmanlı kabuk binası gibi sistemler mevcut güvenlik sistemlerinin uyumlu bir şekilde tamamlayarak, EUR (European Utilities

Requirements for LWR Nuclear Power Plants)’nin istediği gerekli güvenlik standartları yerine getirmiş olacaktır(Hirsch,2010).

Bütün nükleer santrallerde olduğu gibi derinlemesine güvenlik prensibi ve bu prensibi tamamlayıcı sistemler VVER-1200’lerde artırılarak uygulanmaktadır. Daha önceden de değinildiği gibi tasarımın dayandırıldığı kazaların sonrasında buhar üreteçlerinden “pasif ısı atma sistemi” tüm 3. Nesil VVER modellerine eklenmiş ayrıca kabuk binasının soğutulması için “pasif kabuk ısı atma sistemi” de sisteme ilave edilmiştir. Yine olası kor erimesi kazası durumunda kor tutuculara bağlanmış borik asit çözeltisi içeren tanklar bulunmaktadır. Kaza durumunda sistemde oluşacak hidrojeni uzaklaştırmak için birleştiriciler sisteme eklenmiştir. Acil durum kor soğuması için 4 adet akümülatör de reaktör kazanına bağlı bulunmaktadır.

Ciddi kazaların haricinde tasarımın dayandırıldığı kazalarda ve tasarımın dayandırıldığı kazaların sonrasında reaktör kendisini 24 saat içerisinde güvenli kapanma durumuna getirebilmekte ve bu zaman bağımsız güç kaynaklarının sayesinde 72 saate kadar çıkarılabilmektedir. Reaktörde oluşan bozunma ısısının atılması için gerekli besleme suyu envanteri yetecek şekilde tasarlanmıştır.

VVER-1200’lerde toplam kor erime frekansı $10^{-5}/_{\text{reaktör-yıl}}$ ’ı geçmeyecek şekilde tararım yapılmıştır. Leningrad II NGS için yapılan Olasılıklı Güvenlik Değerlendirilmesi’nde bu değer $5,9 \cdot 10^{-7}/_{\text{reaktör-yıl}}$ olarak hesaplanmıştır (Makhov,2010).

Çizelge 2.7 VVER-1200 Reaktörlerinin Bazı Tasarım Parametreleri
(Makhov,Dragunov,2010)

Reaktör		
	Genel :	
	Termal Güç	3200 MW
	Elektriksel Güç	1170 MW
	Öz Güç Yoğunluğu	107,1 W/m ³
	Net Verim	33,7 %
	Soğutucu :	
	Kor Giriş Basıncı	16,2 MPa
	Soğutucu Tasarım Basıncı	17,64 MPa
	Soğutucu Tasarım Sıcaklığı	350°C

	Net Akış Hızı	86000 m ³ /saat
	Kor Giriş Sıcaklığı	298,6°C
	Kor Çıkış Sıcaklığı	329,7°C
	Kazan :	
	Yüksekliği	11185 mm
	İç Çapı	4250 mm
	Cidar Kalınlığı	197,5 mm
	Toplam Ağırlığı	330 ton
	Kazan Malzemesi	15X2HMΦA
	Buhar Üretici :	
	Buhar Üretici Çıkış Basıncı	7,0 MPa
	Buhar Üretici Tasarım Basıncı	8,1 MPa
	Üretilen Buharın Sıcaklığı	285,8 °C
	Buhar Üretisindeki Toplam Tüp Sayısı	10978
	Buhar Kapasitesi	1602 ton/saat
	Isı Aktarım Alanı	6104,9 m ²
	Maksimum Nem Miktarı	0.2 %
	Basınçlayıcı:	
	Genel :	
	Hacim	79 m ³
	Su Hacmi	55 m ³
	Basıncı	16,1 MPa
	Sıcaklığı	347,9 °C
	Yakıt :	
	Yakıt Demeti Geometrisi	Altıgen
	Aktif Yakıt Bölgesi	373 cm
	Maksimum Yanma Oranı	70 MWgün/kg AM'ın üzerinde
	Yakıtın Kor İçerisinde Geçirdiği Süre	4-5 yıl
	Yakıt Yeniden Yükleme Süresi	12/(18-24) ay

3 GİRDİ HAZIRLANMASI

3.1 WIMSD “Standart Kafes Fiziği Analiz” Kodu (AEA Tech., 1997)

WIMSD(Winfrith Improvement Multigroup Scheme) ilk olarak 1964 yılında Winfirth’de AEE Technolgy tarafından geliştirilmiştir. Kod bir ticari konum aldıktan WIMSD-2B versiyonu üzerine sonra kullanıcılar tarafından bazı özellikler eklenmiştir. Şu anda Nükleer Enerji Ajansı (NEA)’nın sitesinde WIMSD-5B.12 versiyonuna üyeler tarafından erişilebilmektedir.

WIMS genel olarak bir kafes hücresi hesaplaması yapan belirleyici (deterministik-rasgele olmayan) nötron taşınım kodudur. Kod, düzenli olarak dizilmiş veya kümelenmiş çubuk veya levha şeklindeki yakıt geometrilerini çözebilmektedir. Enerji grup yapılarına göre 14 hızlı, 13 rezonans ve 42 termal grup olarak 69 grup enerji kütüphanesi ile derlenmiştir. Kullanıcıların tercihlerine göre yüksek kesinlikle doğru sonuçlar için çok gruplu hesaplamalar veya hızlı sonuç elde etmek için ise az gruplu hesaplamalar yapabilme seçeneklerini sunmaktadır (AEA Tech., 1997).

WIMSD kodu nötron akı dağılımı, etkin çarpan faktörü (k_{eff}), sonsuz ortam çarpan faktörü (k_{inf}) ile difüzyon teorisinde kullanılmak üzere, grup sabitleri olan tesir kesitleri ve difüzyon katsayıları gibi birçok değeri hesaplayabilmektedir.

Nötron taşınım hesaplamalarını yaparken S_N (ayrık ordinatlar) ve çarpışma olasılığı metotları ile çözüm yapmakta iken hücrelerde oluşan sızıntı hesaplarını ise ya difüzyon teorisini kullanarak ya da B_1 -metodu kullanarak hesaplamaktadır.

3.2 WIMSD Kodu İçin Girdi Dosyasının Hazırlanması

WIMSD kodu için girdi değişkenleri hazırlanırken VVER reaktörü için yazılacak olan ana girdi değişkenleri göz önünde tutulmuştur. Bunlar:

- Sistemi kritik yapacak bor konsantrasyonunun değerleri (BC)
- Yakıt zenginliklerinin değerleri (E)
- Yakıtın içinde gadolinyum bulunup bulunmadığı (Gd)
- Güç çarpanları (PPF)
- Yanma Oranları (B)’dir.

WIMSD kodu, anahtar kelimeler ile gerekli girdi bilgilerini belirlenmiş bir standarda göre girdi dosyalarından okumaktadır. Girdi dosyaları giriş bilgileri, ana bilgiler ve Düzenleme (Edit) bilgileri olarak 3 ana kısımdan oluşmaktadır.

3.2.1 Kullanılan Anahtar Kelimeler ve Anlamları

EK.A erilmiş olan örnek girdi dosyası içerisinde kullanılmış anahtar kelimeler ve anlamları aşağıda 3 ana kısma ayrılarak anlatılmıştır. Örnek girdi dosyası % 2,0 zenginlikte, 800 ppm(particle per milllion-milyon tane parçacık içerisindeki parçacık sayısı) bor konsantrasyonuna ve 0,5 güç çarpanı değerine sahip bir WIMSD kodu girdi dosyasıdır.

Girdi dosyası içerisinde “*”den sonra ki her satır veya cümle, yorum ya da açıklama satırı veya cümlesidir.

3.2.1.1 Giriş Bilgileri

Bu kısımda enerji grupları ve problemi çözmek için oluşturulan ağ (örüleri-mesh) gibi değerler için sistemde kullanılacak bellek gereksinimleri tanımlanmakta, ENDLUDE ve PREOUT anahtar kelimeleri ile kısım sonlandırılmaktadır. Bu kısımda kullanılan anahtar kelimelerin anlamları aşağıdaki gibidir.

CELL 6

CELL anahtar kelimesi pincell hesaplamasının enerji kümelenmesi ile çözülecek olduğunu

SEQUENCE 1

Hesaplamalarda DSN(Discrete Ordinates) metodu ile çözülecek olduğunu

NGROUPS 2 2

İlk 2 ana taşınım çözümünde kaç enerji grubu olduğunu, ikinci 2 ise reaksiyon düzenleme grubu sayısını ifade etmektedir

NMESH 35

Yapılan modellemedeki toplam ağ noktalarının sayısını

NREGION 5 0 5

5 → Toplam çember yada levha sayısı

0 → Çubuk içeren çembersel bölge sayısı

5 → Düzenlenen bölge sayısı

NMATERIAL 3 1

3 → Toplam Malzeme miktarı

1 → Yakılacak malzeme tipi sayısı

NREACT 2

Reaksiyona girecek çekirdek(izotop) sayısını

PREOUT

Giriş bilgisinin sonlandırılması

INITIATE

Ana Bilgileri başladığını bildiren anahtar kelime

3.2.1.2 Ana Bilgiler

Bu kısımda kullanılan anahtar kelimeler bölge, boyutlar ve malzeme kompozisyonları gibi problemin fiziksel yapılarını tanımlamaktadır. BEGIN anahtar kelimesiyle kısım sonlandırılmaktadır. Ana bilgiler bölümündeki anahtar kelimeler ve anlamları aşağıdaki gibidir.

ANNULUS 1 0.070000 0

ANNULUS 2 0.378000 1

ANNULUS 3 0.386000 0

ANNULUS 4 0.455000 2

ANNULUS 5 0.669423 3

ANNULUS anahtar kelimesinde ilk değişken çembersel bölgenin etiketini, ikinci değişken cm birimi cinsinden çembersel bölgenin yarıçapını, en son değişken ise malzemenin türünü 1-yakıt, 2-zarf ve 3-soğutucu MATERIAL anahtar kelimesi kısmında malzeme numarasını ifade etmektedir. Çembersel olarak tanımlanan bölgeler sırasıyla içerden dışarıya doğru 1-yakıtın içerisindeki boşluk, 2-yakıt, 3-yakıtlı zarf malzemesi arasındaki boşluk, 4-zarf malzemesi, 5-altıgen birim hücre bölgesinin geometrik olarak eşdeğer çember yarıçapını ifade etmektedir.

MESH 1 15 1 3 15

ANNULUS anahtar kelimesi ile tanımlanan geometri bilgisini içeren bölgelerin yine içerden dışarıya doğru kaç adet ağ bölgesiyle çözüm yapılacağını göstermektedir.

MATERIAL 1 -1 1000.15 1 \$ * FUEL 2.0 at. percent

2235.0 4.697053e-04 8238.0 2.272809e-02 \$

6016 4.648214e-02 2155 5.865730e-05 \$ * Gd Density= 2.00e+00 g/cc

MATERIAL 2 -1 1000.15 2 \$ * CLAD

91 4.279275e-02 93 4.256163e-04 \$ * Zirconium,Niobium

178 6.646276e-06 \$ * Natural Hafnium

MATERIAL 3 -1 575.15 3 \$ * COOLANT **

3001 5.128421e-02 6016 2.564599e-02 \$ * Water 800 ppm Boron

1011 3.417982e-05 \$ * Boron Concentration

$Nb = Nw * (MA_H2O / MA_B) * BoronConcentration * 1E-6$

Malzeme bilgisinin tanımlandığı bu kısımda ise MATERIAL anahtar kelimesinden sonra gelen ilk sayı yukarıda geometri bölgesinde tanımlanmış malzeme numarasını ifade etmektedir. “-1” rakamı ilgili malzemenin birim hacimdeki atom yoğunluğuna göre hesap yapılacağını bildirmektedir. “-1” rakamından sonra gelen ilk sayı ise malzemenin Kelvin birimi cinsinden mutlak sıcaklığını ifade eder.

Yukarıdaki girdi dosyasında yapılan varsayım ile yakıt ve zarf malzemesinin sıcaklıkları aynı kabul edilmiştir.

Mutlak sıcaklık değerlerinden sonraki gelen rakam ise malzemenin tipini belirlemektedir. Malzeme numarası 1 ise yakıt malzemesi olduğunu, 2 ise zarf malzemesi olduğunu ve 3 ise soğutucu malzeme olduğunu ifade eder. Bu tanımlamalardan sonra gelen "\$" işareti ilgili malzeme için tanımlamaların alt satırda devam ettiğini göstermektedir. Alt satırda malzemenin tipi ve atom yoğunlukları hesaplanmıştır. Örneğin "MATERIAL 1" için yakıt malzemesi UO_2 uranyumun reaksiyona giren izotopları ^{235}U ve ^{238}U ve oksijen atomlarının atom yoğunlukları verilmektedir.

Girdi dosyaları hazırlanırken değişkenlerin çeşitliliği ve çok fazla hesaplama işlemi gerektirdikleri için PYTHON™ programlama dili ile geliştirilen bir betik sayesinde yakıt zenginliğinin değişimi (2.0-3,0-3,225-3,3 ağırlıksal %), yakıt içerisinde gadolinyum içerip içermediği(içeriyorsa $0,02 \text{ g/cm}^3$ ve $0,036 \text{ g/cm}^3$), su içerisindeki borik asit konsantrasyonunun ppm birimi cinsinden değişimini(0-1400 ppm arasında) hesaplayarak malzeme özelliklerini formatlı bir biçimde oluşturulmuştur.

Kullanılan ana bilgileri anlatmaya devam edersek,

REGULAR 1 6

1 haricinde bir değer için kafeste bir düzensizlik olduğunu ifade ederken, 6 ise altıgen geometri tanımlaması yapmaktadır.

S 32

Yüksek kesinlik için SN metodundaki yönelim sayısı(varsayılan değeri 4)

TOLERANCE 5.0E-5

Ana taşınım betiğindeki yakınsama toleransının değeri

FEWGROUP 48 69

Kümelenecek grup üst sınırı(burada iki grup yaklaşımı için)

SUPPRESS 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0

Çıktı dosyasına hangi özellikleri yazılıp yazılmayacağını belirler. Değer “1” ise yazılmaz değer “0” ise çıktı dosyasına ilgili değer yazılır.

POWERC 1 42.253521127 0

Güç kartı için ilk değer, sonrasında gelecek olan değer birimini belirtmektedir. Burada “1” 42.253521127 değerinin 1 ton ağır metalden(AM) kaç MW güç elde edildiğinin değeridir yani 42.253521127MW/t U'dir.

BEGINC

Buradaki BEGINC anahtar kelimesi ana bilgiler bölümünü bitirmektedir.

3.2.1.3 Düzenleme Bilgileri

Bu kısımda eklenen anahtar kelimeler ise örneğin akı bükülmesi, ısı grup, sızıntı ve yanma oranı gibi hesaplamaların yapılmasını sağlamaktadır. Bu kısımda standart anahtar kelime BEGIN ile sonlandırılmaktadır.

THERMAL 1

(Thermal Group+1)/2 formülüne göre hesaplanmaktadır.

BUCKLING 0.0 7.653144E-05

Radyal ve eksenel yönde akının bükülme değerleri. Radyal yönde akı bükülmesi olmadığını, eksenel yönde de $B_z^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$ kadarlık bir akı bükülmesi değeri oluşmaktadır. Burada H değeri aktif yakıt bölgesinin yüksekliğidir.

BEEONE 1

B₁ akı çözümünün sızan akının içerisinde olacağını ifade etmektedir. Eğer DNB anahtar kelimesinde ki tüm kartlar “0” ise B₀ çözümü uygulanmaktadır.

DNB 1 0.0 0.0 0.0 0.0

DNB 2 0.0 0.0 0.0 0.0

DNB 3 6.67205E-02 0.0 3.33603E-02 0.0

BEEONE anahtar kelimesi ile işlem yapıldığında DNB tanımlanmamışsa bütün değerler “0” olarak varsayılır. DNB anahtar kelimesinden sonra gelen ilk rakam malzeme numarasını tanımlamaktadır. 3. malzeme(soğutucu) için hidrojen ve oksijen’in atom yoğunlukları verilmiştir.

LEAKAGE 5

Spektrum hesabını yaparken girilen akı bükülmesi değerleriyle yapılmasını ifade etmektedir.

REACTION 2235.0,1000.15 8238.0,1000.15

^{235}U ve ^{238}U izotoplarını tepkimelerinin tanımlama numaraları ve 1000,15 K’de fisyon ve yutulma tesir kesitleri ile alakalıdır.

PARTITION 45 69

Birleştirilen kütüphane gruplarının üst sınırlarını ifade etmektedir.

BEGINC

Düzenleme bilgisinin sonunu ifade etmektedir. Burada program hesaplamalara başlamaktadır.

POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5

Güç kartı için ilk değer, sonrasında gelecek olan değer birimini belirtmektedir. Burada “1” 21.126760563 değerinin 1 ton ağır metalden kaç MW güç elde edildiğinin değeri 21.126760563 MW/t U. “9.466666667” girilen güç seviyesi için kritiklik hesabı ve akı normalleştirilmesi arasındaki zaman adımı(gün). “5” ise bu işlemi kaç kez tekrarlanacağını ifade etmektedir.

BEGINC

Yeni güç özellikleriyle program tekrar çalışmaya başlamaktadır.

Burada aslında 1000 MWgün/t AM'lik yanma oranı adımlarında hızlı ve yavaş yakıt yanma durumlarında grup sabitleri değişiminin nasıl olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu adımlar hesaplanırken güç değerlerin ortalama güç değeri üzerinden normal olan “güç çarpanı değerleri” (0,5 ile 1,5 arasında değişen), yazılmış olan PYTHON™ betiği ile gerekli hesaplamalar yapılarak girdi dosyalarını oluşturmuş ve WIMSD programında koşturmuştur. Betik, oluşan WIMSD çıktı dosyaları içerisindeki gerekli grup sabitlerini de yukarıda adı geçen değişkenlere göre düzenli bir şekilde başka çıktı dosyalarına yazmaktadır.

Oluşan çıktı dosyalarının içerisinde bor konsantrasyonu, yakıt zenginliği, güç çarpanı değerleri ve gadolinyum yoğunluklarının değişimlerine göre hızlı ve ısı nötronik grup sabitleri ve etkin çarpan faktörü değerlerini içermektedir.

Oluşturulan bu dosyalardan, VVER reaktörü için yazılacak kod için gerekli reaktivite(reactivity) ρ , nötron göç alanı(Migration area) M^2 ve difüzyon uzunluğu(Diffusion length) L^2 değerleri betik tarafından hesaplanmıştır.

Aşağıdaki bölümde reaktivite(ρ), nötron göç alanı(M^2) ve difüzyon uzunluğu(L^2) değerleri için uyum eğrisi fonksiyonlarının nasıl oluşturulduğu ve oluşturulan uyum eğrisi fonksiyonlarına yapılan düzeltmeler verilmektedir.

3.3 Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması

WIMSD çıktı dosyalarından toplanarak oluşturulan veriler yakıt zenginlikleri ve gadolinyum içeriklerine göre 12 farklı dosyada ρ , M^2 ve L^2 değerleri BC, PPF ve B'nin değişimlerine göre düzenli veriler topluluğu haline getirilmiştir.

ρ , M^2 ve L^2 değerlerinin fonksiyonel yaklaşımları aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

3.3.1 Reaktivite Değerleri Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması

Reaktivite değerleri için uyum eğrileri oluşturulurken, gadolinyum içeren ve içermeyen yakıtlar arasında reaktivitenin değişiminde farklılıklar gözlenmiştir. Gözlenen bu farklılıklardan dolayı gadolinyum içeriğinin bulunup bulunmamasına göre uyum eğrisi fonksiyonları da değişmektedir. Gadolinyum içeriğinin bulunup bulunmamasına göre yapılan yaklaşımlar ve uyum eğrisi fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

3.3.1.1 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Reaktivite Değerleri Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması

Verilerin uyum eğrisi fonksiyonlarının bulunması MATLAB® programı kullanılarak hesaplanmıştır. İlk olarak yakıt yanma oranlarının bir fonksiyonu olarak reaktivite değerleri için 2. dereceden uyum eğrisi fonksiyonları Denklem 3.1'deki gibi oluşturulmuştur.

$$\rho(B) = K_1(PPF, BC) \cdot B^2 + K_2(PPF, BC) \cdot B + K_3(PPF, BC) \quad 3.1$$

burada K_i değerleri güç çarpanı değerlerine ve bor konsantrasyonuna bağımlı değişkenlerdir. K_i değerlerin güç çarpanı değerlerine bağımlılıkları doğrusal uyum eğrisi yaklaşımı yapılmıştır.

$$K_k(PPF, BC) = \sum_{i=1}^2 L_{2k-2+i}(BC) \cdot PPF^{2-i} \quad k = 1, 2, 3 \quad 3.2$$

Bu uyum eğrisi yaklaşımından elde edilen L_i değerleri ise bor konsantrasyonuna bağlı 2. dereceden bir fonksiyon yaklaşımı yapılmıştır. L_i değerlerinin uyum eğrilerinin yaklaşımları ise aşağıdaki gibidir.

$$L_i(BC) = \sum_{j=1}^3 A_{i,j} \cdot BC^{3-j} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad 3.3$$

Yukarıda oluşturulan uyum eğrileri ile reaktivite hem borik asit konsantrasyonunun hem güç çarpanı değerlerinin hem de yanma oranlarının bir fonksiyonu olarak oluşmuş olmaktadır. Oluşturulan $A_{i,j}$ değerleri Çizelge B.1'de verilmiştir.

3.3.1.2 Gadolinyum İçeren Yakıtlar için Reaktivite Değerleri Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması

Gadolinyum içeren yakıtlarda gadolinyum içermeyen yakıtlara göre daha farklı bir reaktivite değişimi gözlenmektedir. Gadolinyum içeren yakıtlarda gadolinyum elementinin yüksek yutma tesir kesitine sahip olmasından dolayı reaktivite değerlerinde öncelikler bir artış olmakta, gadolinyum içeriğinin etkinliğinin azalmasının sonrasında ise reaktivitede doğrusal bir azalma gözlenmektedir. Bu duruma bağlı olarak gadolinyum gibi yanabilen nötron yutucu maddeler içeren yakıtlar için uyum eğrisi yaklaşımı biraz farklı yapılmaktadır. Reaktivitenin arttığı yere kadar bir uyum eğrisi, azalmaya başladığı yerden sonra başka bir uyum eğrisi oluşturulmuştur. Yapılan yaklaşım şöyledir:

Varsayalım ilk 7000 MWgün/t yanma oranı için reaktivite artış göstermiş sonrasında azalmaya başlamıştır.

$$\rho(B) = \left[K_1 B^2 + K_2 B + K_3 \right] \cdot u \left[1 + \frac{7000 - B - 1}{50000} \right] + \left[K_4 B + K_5 \right] \cdot u \left[1 + \frac{B - 7000}{50000} \right] \quad 3.4$$

$u(B)$ fonksiyonu birim adım fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Burada ilk 7000 MWgün/t yanma oranına kadar fonksiyonun ilk kısmı, belirtilen yanma oranı ve sonrasında sonra ise fonksiyonun ikinci kısmı çalışmaktadır.

K_i değerleri güç çarpanı değerlerine ve bor konsantrasyonuna bağlı değişkenlerdir. Bu değişkenler için ise 3. dereceden uyum eğrileri oluşturulmuştur.

$$K_k(PPF, BC) = \sum_{i=1}^4 L_{4k-4+i}(BC) \cdot PPF^{4-i} \quad k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad 3.5$$

L_i değerleri ise bor konsantrasyonuna bağlı değerlerdir, bor katsayıları olan $A_{i,j}$ değerleri Çizelge B.2 ve Çizelge B.3'de verilmektedir. Bu değerler için 2. dereceden uyum eğrisi fonksiyonu yaklaşımı yapılmıştır.

$$L_i(BC) = \sum_{j=1}^3 A_{i,j} \cdot BC^{3-j} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 20 \quad 3.6$$

3.3.2 Nötron Göç Alanı ve Nötron Difüzyon Uzunlukları Değerleri için Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Oluşturulması

MATLAB® programı ile nötron göç alanı ve nötron difüzyon uzunlukları, yanma oranlarının 9. dereceden bir polinom fonksiyonu olan uyum eğrileri oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M^2(B) &= K_1 B^8 + K_2 B^7 + K_3 B^6 + K_4 B^5 + K_5 B^4 + K_6 B^3 + K_7 B^2 + K_8 B + K_9 \\ L^2(B) &= K_1 B^8 + K_2 B^7 + K_3 B^6 + K_4 B^5 + K_5 B^4 + K_6 B^3 + K_7 B^2 + K_8 B + K_9 \end{aligned} \quad 3.7$$

yine yukarıda reaktivite değerleri için oluşturulmaya çalışılan uyum eğrilerine uygulanan sistem ile güç çarpanı değerlerine bağımlı değişkenler olan K_i değişkenleri için

$$K_k(PPF, BC) = \sum_{i=1}^2 L_{2k-2+i}(BC) \cdot PPF^{2-i} \quad k = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad 3.8$$

doğrusal uyum eğrisi yaklaşımı yapılmıştır. Bu yaklaşımdan elde edilen L_i değerleri ise bor konsantrasyonuna bağlı 2. dereceden bir fonksiyon yaklaşımı yapılmıştır.

$$L_i(BC) = \sum_{j=1}^3 A_{i,j} \cdot BC^{3-j} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 18 \quad 3.9$$

bor katsayıları olan $A_{i,j}$ değerleri Çizelge B.4, Çizelge B.5, Çizelge B.6, Çizelge B.7, Çizelge B.8 ve Çizelge B.9'de verilmektedir.

Böylelikle nötron göç alanı ve nötron difüzyon uzunlukları istenilen değişkenler cinsinden (BC, PPF ve B) oluşturulmuş olmaktadır.

3.3.3 Uyum Eğrisi Fonksiyonlarına Yapılan Düzeltmeler

Yukarıda yapılan yaklaşımlarla ρ , M^2 ve L^2 değerleri için çok değişkenli uyum eğrisi fonksiyonları oluşturulmaya çalışılmıştır. Oluşturulan bu fonksiyonlar içerisinde doğal olarak uyum eğrilerinden kaynaklanan hatalar bulunmaktadır. Bu hataların bir kısmı yapılan bazı yaklaşımlarla azaltılmaya çalışılmıştır. Yapılan düzeltmeler aşağıdaki gibidir.

Reaktivite için Denklem 3.1 ve Denklem 3.4’de ki reaktivite denklemine 0.0075’lik bir ekleme yaparak düzeltilmiş reaktivite değerleri olan ρ_d kullanılarak sistemin hata oranları düşürülmüştür.

$$\rho_d(B) = \rho(B) + 0.0075 \quad 3.10$$

Nötron taşıyım alanı(M^2) için ise oluşan hatalar yanma oranlarına göre doğrusal olarak değişmektedir. Denklem 3.7’deki M^2 değerleri için yapılan düzeltme ise,

$$M_d^2(B) = M^2(B) - 0.0001 \cdot B \quad 3.11$$

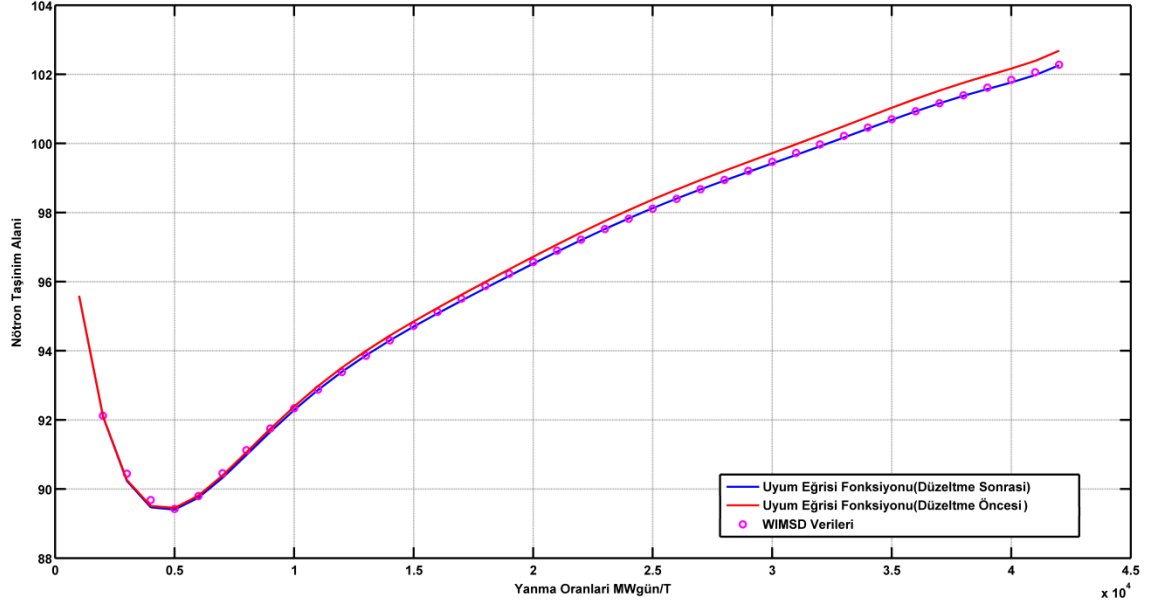
şeklindedir. Nötron difüzyon uzunlukları(L^2) değerleri için ise M^2 değerlerinin değişimine benzer bir yaklaşım yapılarak,

$$L_d^2(B) = L^2(B) + 0.0001 \cdot B \quad 3.12$$

değerleri kullanılarak hata oranları düşürülmüştür.

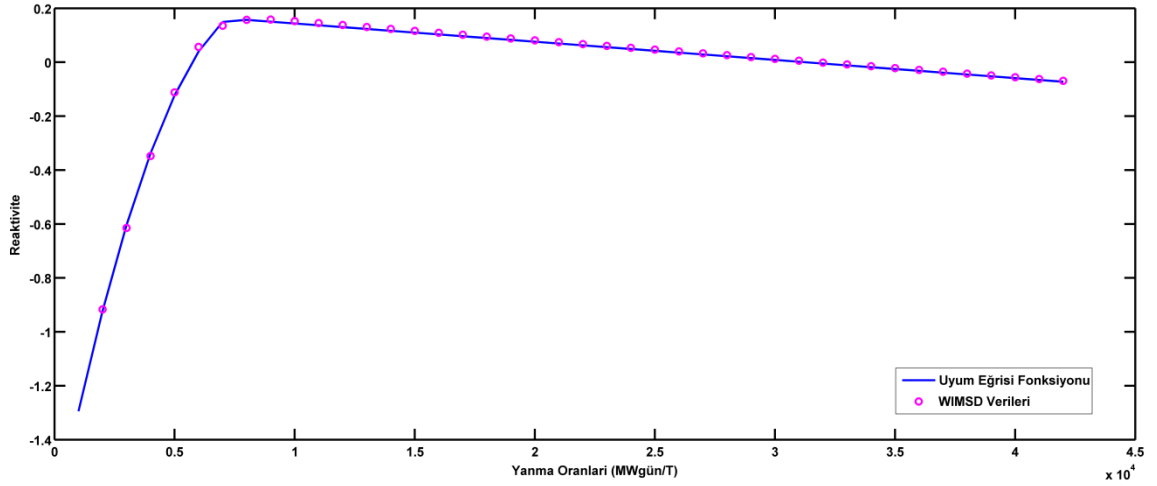
WIMSD kodundan elde edilen değerler ile bu değerlerden elde edilen uyum eğrisi fonksiyonları düzeltmeler öncesinde ve düzeltmeler sonrasında oluşan uyum eğrisi fonksiyonları sonuçlarından bazıları aşağıdaki gibidir.

M^2 uyum eğrisi fonksiyonlarının değerlerinin düzeltme yapılmadan önce ve sonrasındaki değişimi Şekil 3.1’de göstermektedir. Şekil 3.1’de gösterilen M^2 değeri % 2,0 zenginlikte, 0,036 g/cm³ Gd içeren, 600 ppm bor içeren ve 0,5 güç çarpanı değerine sahip olan bir sistemdeki değişimi göstermektedir.



Şekil 3.1 Uyum Eğrisi Fonksiyonları Düzeltmesi ve WIMSD Verileri (Nötron Göç Alanı)

Gadolinium içeren bir yakıt için uyum eğrisi fonksiyonu ve WIMSD verileri Şekil 3.2'deki gibidir. Bu veriler 3,3 % zenginlikte, 0,036 g/cm³ gadolinium içeren, 0 ppm bor konsantrasyonu ve 0,5 güç çarpanı değerine sahip olan bir sistemdir.



Şekil 3.2 Reaktivite Uyum Eğrisi ve WIMSD Verileri

4 NÜKLEER REAKTÖR ANALİZİ

4.1 Nükleer Reaktör Analizlerinde Uygulanan Metotlar

Nükleer reaktör analizinde uygulanan ve geliştirilen metotlar, temelde nükleer reaktörler içerisindeki fisyon tarafından üretilen nötronlar ile yakıtlar ve sistem elemanları tarafından yakalanan ve sistemden sızan nötronların arasındaki ilişkiyi sürdürülebilir şekilde tutmak için oluşturulmuştur. Nükleer reaktörlerde üretilen nötronlar ile sistemde yutulan ve sistemden sızan nötronlar arasındaki ilişki sistemin çarpan faktörü (criticality) olarak nitelendirilmektedir.

Nükleer reaktör analizinde tüm yaklaşımlar sistemin çarpan faktörünü ve sistemin her anında kontrol etmek zorunda olunan konum, enerji ve zamana bağımlı nötron akısını belirlemek için yapılmaktadır. Çünkü sistemde üretilen güç seviyesi sistem içinde bulunan nötronlar ile direkt olarak alakalı olduğundan, nötron akısının zaman konum enerjiye göre dağılımını bulmak gerekmektedir.

Konumun, enerjinin ve zamanın fonksiyonu olan nötron akısının hesaplanması, nükleer mühendisliğin ana problemi olan “Nötron Taşınım Denklemi”nin ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Nötron taşınım denkleminde başka; nötron difüzyon yaklaşımı, S_N metodu ve Monte-Carlo teknikleri ile çarpan faktörü hesapları ve akı dağılım hesapları yapılabilmektedir. Birim hücrelerin ve yakıt demeti hesaplamalarında transport teorisinin ve Monte-Carlo tekniklerinin kullanılması tercih edilirken, tüm kor geometrisi nötronik hesaplamalarında ise difüzyon teorisinden yararlanılmaktadır.

4.1.1 Nötron Taşınım Denklemi

Nötron taşınım denklemi nötronların konumuna, enerjisine ve zamana bağlı dağılımlarını tanımlayan bir denklemdir. Nükleer reaktör teorisinin ana problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Gazların kinetik teorisi ile alakalı olarak Boltzmann tarafından benzer bir biçimde elde edilen denklem Boltzmann denklemi olarak ta adlandırılır. Zaman, enerji ve konuma bağımlı nötron taşınım denklemini yazacak olursak (Bell and Glasstone, 1970):

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} n(r, E, \underline{\Omega}, t) + \underline{\Omega} \cdot \nabla n(r, E, \underline{\Omega}, t) + \Sigma_t(r, E) n(r, E, \underline{\Omega}, t) \\
&= \int_{4\pi} d\underline{\Omega} \int_0^\infty dE' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \underline{\Omega}' \rightarrow \underline{\Omega}) n(r, E, \underline{\Omega}, t) \\
&+ \frac{\chi_p(E)(1-\beta)}{4\pi} \int_{4\pi} d\underline{\Omega} \int_0^\infty dE' \nu \Sigma_f(r, E', \underline{\Omega}) n(r, E', \underline{\Omega}, t) \\
&+ \frac{1}{4\pi} \beta \sum_i \chi_i(E) \lambda_i C_i(r, t) + s(r, E, \underline{\Omega}, t) \\
&\frac{\partial}{\partial t} C_i(r, t) = -\lambda C_i(r, t) + \int_{4\pi} d\underline{\Omega} \int_0^\infty dE' \beta_i(E') \nu \Sigma_f(r, E', \underline{\Omega}) n(r, E', \underline{\Omega}, t)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Denklem içerisindeki değişkenlerin neler olduğunu sıralanacak olursa: v =Nötronun hızı(cm/s), t =Zaman(s), $r \in R^3$ =Konum vektörü, $\underline{\Omega} \in R^2$ = Açısal yönelim vektörü, E = Enerji(MeV), Σ_t =Toplam tesir kesiti, Σ_s =Saçılma tesir kesiti, Σ_f =Fisyon tesir kesiti, ν =Fisyon başına çıkan ortalama nötron sayısı, χ_p =anlık(prompt) nötronların enerji tayfı, χ_i =i.nci gecikmiş(delayed) nötron grubunun enerji tayfı, C_i = i.nci öncüllerin konsantrasyonu, λ =i.nci çekirdeğin bozunum katsayısı ve β =gecikmiş nötronların kesridir. Nötron taşınım denklemindeki, $\frac{\partial}{\partial t} v n(r, E, \underline{\Omega}, t)$ terimi nötronların zamana göre değişimlerini göstermektedir. $n(r, E, \underline{\Omega}, t)$ ise r , E , $\underline{\Omega}$, t 'ye bağlı birim hacimdeki (cm^3) nötron yoğunluğudur. $\underline{\Omega} \cdot \nabla n(r, E, \underline{\Omega}, t)$ terimi ise sistemden sızan nötronların yoğunluğunu, $\Sigma_t(r, E) n(r, E, \underline{\Omega}, t)$ sistemde oluşan toplam etkileşim miktarı yoğunluğunu, $\int_{4\pi} d\underline{\Omega} \int_0^\infty dE' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \underline{\Omega}' \rightarrow \underline{\Omega}) n(r, E, \underline{\Omega}, t)$ terimi ise E' enerjisinden E enerjisine geçerken $\underline{\Omega}'$ açısından $\underline{\Omega}$ açısına saçılan nötronların yoğunluklarını, $\frac{\chi_p(E)(1-\beta)}{4\pi} \int_{4\pi} d\underline{\Omega} \int_0^\infty dE' \nu \Sigma_f(r, E', \underline{\Omega}) n(r, E', \underline{\Omega}, t)$ terimi sistemde anlık oluşan nötronların yoğunluklarını, $\frac{1}{4\pi} \beta \sum_i \chi_i(E) \lambda_i C_i(r, t)$ terimi de sistemde gecikmeli olarak oluşan nötron yoğunluğunu ifade etmektedir. $s(r, E, \underline{\Omega}, t)$ ise sisteme eklenen dışsal kaynaktır.

Nötron taşınım denkleminin karmaşıklığından dolayı reaktör hesaplamalarını daha kolay bir şekilde incelemek amacıyla taşınım denkleminde yaklaşımlar getirilerek kolaylaştırmalar yapılmaktadır.

4.1.2 S_N Metodu

S_N metodu nötron taşınım denklemindeki sürekli açı bağımlılığı yerine belirli yönlerde saçılan bir yaklaşım getirerek sonuç elde etmeye yarayan bir metottur. Açı devamlılığı olmadığı için “Ayrık Ordinatlara S_N Metodu” olarak da adlandırılmaktadır. Ayrık ordinatlar ve benzer enerji bağımlı nötron taşınım denklemini çözen nümerik metotlar reaktör hesaplamalarında oldukça sık kullanılmaktadır.

Metot Laplace denklemlerinin açısal çözüm kümesi olan küresel uyum (spherical harmonics) fonksiyonlarını kullanmak yerine her bir ayrık açı yöneliminde açısal nötron akısını hesaplamaktadır. Metodu kullanırken nötron taşınım denklemini çözümünün doğruluğu için yeterince yönelim açımızın olup olmadığı sorusu karşımıza çıkmaktadır. Bu durum hesaplama makinemizin sınırlarına bağlı olmakla birlikte, günümüz teknolojisinde bilgisayarların yüksek hesaplama kapasiteleri göz önünde bulundurularak ve hatta paralel hesaplama uygulamaları sayesinde bu sınırlamalar az da olsa ortadan kalkmaktadır.

Ayrık ordinatlar metodu ile çözüm geliştirilirken ayrık enerji değişkenleri (sisteme çok gruplu çözüm yapıldığı anlamına gelmektedir) ile ayrık konum ağırları(meshes) kullanılarak uygun çözümler elde edilmektedir. Sonuç olarak nötron taşınım denkleminin tüm bağımsız değişkenleri, zaman(t), konum(r), açısal yönelim(Ω) ve enerji(E) belirli ayrık seviyelerde ele alınarak çözüm oluşturulmaktadır.

4.1.3 Monte Carlo Metodu

İstatistik (veya olasılık) teorisine dayanan bir nümerik yöntem olan Monte Carlo günümüzde birçok alanda uygulanarak kendisini reaktör hesaplamaları alanında da kanıtlamış bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Son dönemlerde hesaplama işlemlerinde bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle de reaktör tasarım hesaplamalarında geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Ayrıca Monte Carlo metodu belirleyici (deterministik) hesaplama yapan kodların çözemediği çok karmaşık geometrilerde bile oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Monte Carlo metodu her biri bireysel olarak davranan istatistiksel olayların seri halde örneklenmesiyle yapılmaktadır. Olaylar 'olasılık dağılım fonksiyonu' denilen ve örneklemelerin bu dağılımlara göre yapıldığı istatistiksel fonksiyonlara göre oluşmaktadır. İstatistiksel örneklemeler rastgele sayılara göre yapılmaktadır. Nükleer reaktör teorisinde ise rastgele üretilen seri halindeki parçacıkların (nötronların) her birinin doğumundan ölümüne kadar olan süreçte yaptıkları etkileşimleri takip edilmektedir. Her bir parçacığın hayat süreci takip edilmesinden dolayı Monte Carlo metotları belirleyici metotlara göre çok fazla hesaplama zamanı gerektirmekte ancak, nötron taşınım denkleminin çözümü için yeterli sayıda örneklem ve uygun tesir kesiti kütüphaneleri kullanılarak kesin sonuçlar sağlayabilmektedirler. Monte Carlo metotlarının çalışma prensiplerine bakıldığında aslında gerçek hayattaki bir olayın aynen sanal olarak örneklenmesi ile sistemi çözerken belirleyici metotlar ise çözüm yaparken bir parçacık yerine parçacıkların genel davranışlarını modellemektedirler. Bu kadar iyi sonuçlar bulmalarına karşın Monte Carlo metotları belirgin(explicit) denklemleri çözemez fakat gerekli sonuçları parçacıkları örnekleyerek ve onların ortalama davranışlarını kaydederek elde edebilmektedir (Shayesteh and Shahriari,2009).

4.1.4 P_N Methodu ve Difüzyon Yaklaşımı

P_N metodunda nötron transport denklemindeki açı bağımlılığının Laplace denklemlerinin açısal çözüm kümesi olan küresel uyum (spherical harmonics) fonksiyonlarını kullanarak, grup sabitleri ve akı değerlerinden açı bağımlılığını uzaklaştırmak amaçlanmıştır. Bu yöntem aynı zamanda 'Küresel Uyum (Spherical Harmonics)' metodu da denilmektedir.

$$\begin{aligned}\psi(\vec{r}, E, \mu, t) &= \sum_{l=0}^N \left(\frac{2l+1}{4\pi} \right) \psi(\vec{r}, E, t) P_l(\mu) \\ \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \mu, t) &= \sum_{l=0}^N \left(\frac{2l+1}{4\pi} \right) \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, t) P_l(\mu)\end{aligned}\tag{4.2}$$

yukarıda denklemlerde görüldüğü gibi açısal bağımlılık Legendre polinomları üzerine aktarılmıştır. Eğer açısal akının, yönelim açısına bağımlılığının az olduğu (doğrusal olarak bağımlılık) varsayımı yapılırsa, nötron transport denkleminin nötron difüzyon denklemi elde edilmiş olur.

$$\psi(\vec{r}, E, \mu, t) = \frac{1}{4\pi} \phi(\vec{r}, E, t) + \frac{3}{4\pi} \underline{\Omega} \cdot \underline{J}(\vec{r}, E, t) \quad 4.3$$

Açısal akı için yukarıdaki denklemi önerilmesi ile P₁ yaklaşımı yapılmış olmaktadır.

Difüzyon Denklemi: (Zaman bağımlılığı kaldırılmış)

$$\begin{aligned} -\nabla D(\vec{r}, E) \nabla \phi(\vec{r}, E) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E) = & \int_0^\infty dE' \Sigma_{s0}(\vec{r}, E' \rightarrow E) \phi(\vec{r}, E') \\ & + \chi(E) \int_0^\infty dE' \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \phi(\vec{r}, E') + Q(\vec{r}, E) \end{aligned} \quad 4.4$$

σ_{s0} = Eşyönlü Saçılım Tesir Kesiti, D = Difüzyon Katsayısı, ϕ = Nötron Akısı
 Q = Dışsal Kaynaktır.

4.2 Yakıt Tükenme Modeli ve Tayfsal Etkiler

Reaktör kor modellemelerinde, zamana bağımlı modelleme yapıldığında zamanla yakıt içerisinde meydana gelen değişikliklerinde göz önünde bulundurulması gereklidir. Bunlar zamanlar yakıt miktarındaki azalma ve kompozisyonu değişen yakıttaki yakıt özelliklerinde meydana gelen değişikliklerdir. Ayrıca yakıt malzemesinin özellikleri, reaktör işletme durumunda güç değişimlerinden, yerel sıcaklık değişimlerinden, kontrol çubuklarının kor içerisine giriş-çıkışlarından, termal-hidrolik değişimler gibi etkilere bağlı olarak ta değişmektedir. Bu değişimler çerçevesinde reaktör hesaplamaları için “Yakıt Tükenme Modeli (Depletion Model)” uygulanacak ise, o zaman dilimi için sistemin parametrelerine bağlı olarak yakıtın grup sabitleri olan tesir kesitleri ve difüzyon katsayıları gibi sabitlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Grup sabitleri, yakıt yanma oranlarına, kontrol elemanlarına ve termal-hidrolik değişimlerine bağlıdır. Bu değişkenler çerçevesinde yakıt elemanı reaktör içerisinde yanmaya başladığında yakıtın izotopik içeriğinin değişiklik meydana gelmektedir. Bu değişim, uranyumun bozunmasından ve fisyon sonrasında oluşan plütonyum diğer toprak metallerinin içeriğinin artmasına bağlı olarak, yakıt tesir kesitlerinin tayflarının değişmesine neden olmaktadır. Tesir kesitlerinin tayflarını değiştiren başka bir etken ise sistemde kullanılan Erbiyum ve Gadolinyum Oksit gibi yanabilen yutucu malzemelerdir. Bu tür malzemelerin varlığında da grup

sabitlerinin tayfları değişmektedir. Yanabilen yutucu malzemelerin varlığında nükleer yakıttan elde edilen yanma oranları artırılarak, yeniden yakıt yükleme periyotları da artırılmaktadır.

Nükleer reaktör kor hesaplamaları yapılırken, reaktör korunun termal-hidrolik parametrelerinin ortalama değerleri üzerinden yapılmaktadır. Nükleer reaktör koru içerisinde alt kısımdan üst kısımlara doğru ve korun bazı radyal bölgelerinde sıcaklık dağılımının değişimden dolayı grup sabitleri etkilenmektedir. Bu da 2 ve 3 boyutlu modellemeler yapıldığında tayfsal olarak etkilerin göz önünde tutulması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca bu sıcaklık değişimleri yavaşlatıcı malzemesinin yoğunluğunu değişimine neden olarak, tayfını etkilemekte ve meydana gelen etkileşim miktarını ile çeşidini etkilemektedir. Yavaşlatıcı malzemesinin sıcaklığına bağlı yoğunluk farkı eksenel güç şeklini de doğrudan etkilemektedir.

Düğüm noktaları için hesaplamalar yapılırken termal-hidrolik değişimler sonrasında meydana gelen geri besleme etkileri göz önünde tutulmalıdır. Örneğin yukarıda belirtildiği gibi reaktör koru içerisinde sıcaklık değişimi geri besleme etkilerine neden olacaktır. Eksenel güç dağılımlarının doğru olarak belirlenmesinde eksenel sıcaklık değerlerine göre değişen grup sabitlerinin kullanılması oldukça büyük önem arz etmektedir.

4.3 Hafif Su Reaktörlerinde Reaktivite Kontrol Mekanizmaları

Nükleer reaktör analizinde sistemin içerdiği fazla reaktivitenin kontrolü, sistemi belirlenen enerji seviyesinde tutmak için oldukça önemlidir. Reaktiviteyi kontrol etmek için nükleer reaktörlerde kullanılan, çözünebilen ve yanabilen zehir olarak adlandırılan mekanizmalar bulunmaktadır. Bunlar sistemin kontrolü için gerekli manevraların yapılmasını, sistemin güç dağılımlarını düzenlenmesini ve gerekli durumlarda sistemin devre dışı kalmasını sağlamaktadır.

4.3.1 Çözünebilen Zehir

Çözünebilir zehir reaktörün birincil döngüsündeki çevrim suyunun içerisinde Borik Asit (H_3BO_3)'in çözünmesiyle kullanılmaktadır. Soğutma suyunun içerisinde çözünmüş olan H_3BO_3 kor içerisinde oldukça düzgün bir şekilde dağılarak

reaktivitenin kontrolünü sağlamaktadır. H_3BO_3 'in reaktör koru içerisinde düzgün bir dağılım sergilediği için noktasal düzensizlik oluşturmamaktadır. Reaktör kontrol sistemi için kullanışlı olmasına karşın H_3BO_3 kullanım miktarı reaktör içerisinde kısıtlanmaktadır. Bu kısıtlamalar birincil döngü suyunun kimyasının bozulması ve yavaşlatıcı sıcaklık katsayısını etkilemesinden dolayı kaynaklanmaktadır.

Doğal H_3BO_3 içerisinde % 19.9 oranında ^{10}B izotopu bulunmaktadır. ^{10}B izotopunun yüksek nötron yutma tesir kesitine (0.0253 eV enerjide 3837 barn (Kaeri)) bağlı olarak, nötronla etkileşimini öncelikle (n, α) reaksiyonunu aşağıdaki gibi gerçekleştirmektedir.



Bu reaksiyon sonucunda oluşan $LiOH$ bileşiği sistemin pH değerini yükseltmektedir. Bu olayların oluşması neticesinde reaktör içerisinde değişen birincil döngü suyunun kimyası değişmektedir. Sistemde korozyon problemlerinin oluşmasına yol açabileceği için H_3BO_3 miktarı 2000 ppm seviyesinin altında tutulmaktadır. H_3BO_3 ve suyun kütleleri arasındaki oran olan ppm (particle per million) birimi, 10^6 gram suyun içerisinde çözünen 1gram H_3BO_3 miktarını belirtmektedir.

Yavaşlatıcı sıcaklık katsayısı etkisi H_3BO_3 'ün diğer bir etkisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer ki yavaşlatıcı sıcaklığımız yüksek ise H_3BO_3 eklenmesiyle sistemde yavaşlayan nötron miktarı artarak pozitif reaktivite eklenmesi olarak sisteme girmekte ve böylece yavaşlatıcı malzemenin sıcaklığı daha yükselerek, yavaşlatıcı malzemesinin yoğunluğu düşecektir. Bu da sistemimize negatif yavaşlatıcı sıcaklık katsayısı olarak geri dönmektedir. Örneğin reaktör sistemleri tamamen H_3BO_3 ile kontrol edilemez, "Soğutucu Kaybı Kazası (LOFA-Loss of Flow Accident) durumlarında sistemi H_3BO_3 ile kontrol edilmeye çalışıldığında, yukarıda anlatılan olay gerçekleşerek anlık olarak düzensizlik meydana gelecek, ardından, yükselen yakıt sıcaklığının yeterince atılamaması ve basınçlı su reaktörlerinde istenmeyen kaynama olayına sistemin gitmesi gerçekleşebilmektedir.

4.3.2 Yanabilen Zehir

Nükleer reaktörlerde sistemde bulunan fazla reaktivitenin dengelenmesi ve güç yoğunluğunun düzenlenmesi için bazı yakıt demetlerinin içerisinde yanabilen yutucu malzeme içeren yakıt çubukları kullanılmaktadır. Bu çubuklardaki yanabilen malzemelerin yüksek nötron yutma tesir kesitlerinden dolayı nötronların yakıt malzemesi yerine öncelikle bu malzemeler ile etkileşime girmeleri sağlanmaktadır. Böylelikle sistemdeki fazla reaktivite kontrol altına alınmaktadır. Ayrıca yanabilen yutucu çubukların kullanılması sistemde bulunan fazla reaktivitenin daha uzun süre devamını sağlayarak yakıt yanma oranlarının direkt olarak etkilemektedir. Kor yaşam süresinin etkileyen bu olayda mekanik bir etki olmaksızın sistemin sürekliliği de sağlanmış olmaktadır. Yakıt demetlerinde üretilen güç, kendi içerisindeki fazla reaktiviteden ve komşu yakıt demetlerinin reaktivitelerinden etkilendiği için güç çarpanı değerlerinin kontrolü de yanabilen yutucu malzemeler ile sağlanmaktadır. Böylelikle sistemin güç dağılımı kontrol edilerek, herhangi yerde istenmeyen güç çarpanı değerleri oluşmamış olacaktır.

Bu pozitif özelliklerinin yanında yanabilen zehirlerin olumsuz yönleride bulunmaktadır. Bunlar(Xu, 2003):

1. Artık zehir miktarı ile yakıt çevriminin süresini azaltmakta
2. Yakıt malzemesinin yerine kullanılarak, yakıt yükleme miktarını azaltmaktadır
3. IFBA (Integrated Fuel Burnable Absorber) şeklinde yakıt tabletinin yüzeyine kaplanan ZrB_2 kullanılan yanabilen yutucu çubuklarda oluşan helyum gazından ve Erbiyum ile Gadolinyum içeren çubuklarda ise ısı iletkenliğinin düşmesinden dolayı yakıt çubuklarının zenginlikleri düşürülmektedir.

Yanabilen yutucu malzemelerin kullanılmasındaki ana amaç kor içerisinde oluşan güç çarpanı değerlerinin dengelenmesi ve reaktivitenin kontrolünün sağlanması olarak özetlenebilir.

4.3.2.1 Yakıtle Bütünleştirilmiş Yanabilen Yutucular(IFBA)

Westinghouse firması tarafından üretilen IFBA (Integrated Fuel Burnable Absorber) tipi yanabilen yutucu çubuklarda yakıt tabletinin dış kısmı Zirkonyum

Diborid (ZrB_2) malzemesi ile kaplanarak yapılmaktadır. Gd_2O_3 ve Er_2O_3 içeren yanabilen yutucular içeren yakıtlara göre çevrim sonuna kadar tamamen yandığı için artık bir yutulma penaltısı içermemektedir. IFBA tipi yanabilen yutucuların en önemli dezavantajları yukarıda belirtildiği gibi içerisinde bulunan bor elementinin ^{10}B izotopunun nötronla (n, α) reaksiyonu yapmasından dolayı oluşan helyum gazını zarf malzemesi içerisinde basıncı artırma çabasında bulunmaktadır. Bu durumdan dolayı Westinghouse IFBA miktarını $2X$ (X 1.545 mg ^{10}B /inç) değeri ile sınırlamıştır(Xu, 2003).

IFBA tipi yanabilen yutucular ile yakıt zenginliğinde değişiklik yapılmadığı takdirde, çok daha yüksek yanma oranlarında çıkılabilmeyi sağlamaktadır.

4.3.2.2 Gadolinyum Oksit (Gadolinya(Gd_2O_3))

Sisteme eklenen H_3BO_3 konsantrasyonun ve güç çarpanı değerlerinin sınırlandırılması yakıt malzemesi içerisine eklenmiş Gadolinya(Gd_2O_3) ile sağlanmaktadır. Gadolinya eklenen yakıt çubuklarında ısı iletkenliğinin düşmesine bağlı olarak yakıt çubuğunun zenginliği düşürülmektedir. Gadolinyum oldukça yüksek termal yutma tesir kesitine sahip bir element olduğu için IFBA yakıt demetlerine(~100 yakıt çubuğu) göre Gadolinya içeren yakıt demetleri oldukça az sayıda yanabilen yutucu (~12 yakıt çubuğu)çubuk içermektedir(Xu, 2003).

Yakıt demetlerinde gadolinya kullanımı yakıt yanma oranlarını değiştirerek, yakıt yanma oranı çevrimini de etkilemektedir.

Hafif su reaktörlerinde kullanılan gadolinya çubuk sayıları (12, 24, 36 ve 48) değiştiği gibi bu çubukların gadolinya içeriklerinin ağırlıkça yüzdeleri(%6,%8 ve %10) gibi değerlerde değişmektedir. Gadolinya içeriğinin yakıt demeti içerisinde fazla olması o yakıt demetindeki fazlalık reaktivitesini daha uzun süre tutmasını sağlamaktadır.

4.3.2.3 Erbiyum Oksit (Erbiya(Er_2O_3))(Kodochigov et.al.,2003)

Erbium doğal olarak % 22,95 ^{167}Er izotopunu içermektedir. ^{167}Er izotopu rezonans bölgesinde yüksek yutma tesir kesitine (0,5 eV enerjide ~10000 barn)

sahip olduğu için sıcaklık azalmalarında ^{239}Pu izotopunun nötron yutmasını engellemektedir. Erbiya tipi yanabilen yutucular gadolinya gibi yakıt ile birlikte yakıt çubuklarında kullanılmaktadır. Erbiya yakıt yanma oranlarına bağılı olarak yakıt içerisinde ^{241}Pu birikmesinden dolayı meydana gelen sonsuz ortam çarpan faktörü (k_{∞}) azalmasını daha düz hale getirmektedir. Yanabilen yutucular içeren ve içermeyen yakıt çubuklarının k_{∞} değerlerindeki farklılıkları erbiyum izotoplarının yanma oranları, plütonyum izotoplarının yanma oranları ile karşılaştırıldığında arasında uyumsuzluk göstermektedir. Bu uyumsuz yanma oranları reaktör etkin tam güç gününden yaklaşık 50 gün kayıpla sonuçlanmaktadır. Yakıt çevrimi açısından elverişsiz bir durum yaratmasına karşın, tamamen Pu yakıt içeren bir kor içinde erbiyumun varlığında sistemi negatif sıcaklık katsayısında tutmayı sağlamaktadır.

5 KOR GÜÇ DAĞILIM HESAPLAMALARI

Nükleer reaktör korunun yüklemeleri, hem kor içerisinde güç dağılımının düzenli olması hem de kullanılan yakıttan alınacak verim bakımından için önemlidir. Reaktör korunun düzeni içerisinde hangi yakıt demetinin nereye konulacağı ne kadar süre kor içinde kalacağı, hangi yakıt demetinde yanabilen yutucu çubukların kullanılıp kullanılmayacağı, kullanılacaksa miktarı ve içeriklerinin neler olacağı yakıt yöneticilerinin ilgilendiren konulardır. Bu bölümde reaktör kor geometrileri için geliştirilecek bir kod için yapılacak matematiksel yaklaşımlar ve düğüm noktalarının çözümü için oluşturulan denklem setleri yer almaktadır. İlk olarak bir buçuk grup nötron difüzyon denklemi yaklaşımı ve demetlerin ortalama güç ve ortalama reaktivite yaklaşımları yer almaktadır.

5.1 Bir Buçuk Grup Nötron Difüzyon Denklemi Yaklaşımı

İki grup nötron difüzyon denklemi çözüm yaklaşımlarından birisi de bir buçuk grup nötron difüzyon yaklaşımıdır. Öncelikle iki grup difüzyon yaklaşımı ile başlayacak olursak,

Hızlı grup için:

$$-D_1 \nabla^2 \phi_1 + \Sigma_{a1} \phi_1 + \Sigma_{12} \phi_1 - \frac{1}{\lambda} (\nu \Sigma_{f1} \phi_1 + \nu \Sigma_{f2} \phi_2) = 0 \quad 5.1$$

Termal grup için:

$$-D_2 \nabla^2 \phi_2 + \Sigma_{a2} \phi_2 - \Sigma_{12} \phi_1 = 0 \quad 5.2$$

burada D_1 ve D_2 hızlı ve termal grupların difüzyon katsayıları, Σ_{a1} ve Σ_{a2} hızlı ve termal grupların yutma tesir kesitleri, Σ_{f1} ve Σ_{f2} fisyon tesir kesitleri, Σ_{12} hızlı nötron grubundan termal gruba saçılan nötronların tesir kesiti, ν sistemde bir fisyon başına üretilen ortalama nötron sayısı ve λ sistemin çarpan faktörüdür.

Bir buçuk grup difüzyon yaklaşımında termal nötronlarından kaynaklanan sızıntı ihmal edilmektedir. ($D_2 \nabla^2 \phi_2 \ll \Sigma_{a2} \phi_2$ termal sızıntı oranı, termal bölgede yutulan nötronlardan çok küçüktür. %5 ten küçüktür (Driscoll et.al., 1991).

Yapılan bu varsayım ile termal grup akısı,

$$\phi_2 = \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{a2}} \phi_1 \quad 5.3$$

şeklinde ifade edilir. Termal grup için yapılan yaklaşımdan elde edilen Denklem 5.3'ü Denklem 5.1'in içerisine yerleştirirsek,

$$-D_1 \nabla^2 \phi_1 + \Sigma_{a1} \phi_1 + \Sigma_{12} \phi_1 - \frac{1}{\lambda} (\nu \Sigma_{f1} \phi_1 + \nu \Sigma_{f2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{a2}} \phi_1) = 0 \quad 5.4$$

elde edilmiş olur. Nötron göç alanını (migration area) tanımlayacak olursak,

$$M^2 = \frac{D_1}{\Sigma_{a1} + \Sigma_{12}} \quad 5.5$$

sonsuz ortam çarpan faktörü ise,

$$k_\infty = \frac{\nu \Sigma_{f1} + \nu \Sigma_{f2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{a2}}}{\Sigma_{a1} + \Sigma_{12}} \quad 5.6$$

şeklinde elde ifade edilmektedir. Denklem 5.4'i tekrar düzenleyecek olursak,

$$\nabla^2 \phi_1 + \left(\frac{k_\infty}{\lambda} - 1 \right) \frac{1}{M^2} \phi_1 = 0 \quad 5.7$$

şekline dönüşür. Bölgesel reaktiviteyi:

$$\rho_\infty = 1 - \frac{1}{k_\infty} \quad 5.8$$

(ρ_∞ değerleri ρ olarak tanımlanacak) sistem reaktivitesi ise:

$$\rho_s = 1 - \frac{1}{\lambda} \quad 5.9$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Yeni değişkenlerimizle Denklem 5.7,

$$\nabla^2 \phi_1 + \left(\frac{\rho - \rho_s}{1 - \rho} \right) \frac{1}{M^2} \phi_1 = 0 \quad 5.10$$

şekline dönüşmektedir. Elde edilen denklem için sistemin kritik olduğunu düşünürsek ($\lambda = 1$) sistem reaktivitesi sıfıra eşit olacaktır.

$$\nabla^2 \phi_1 + \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \frac{1}{M^2} \phi_1 = 0 \quad 5.11$$

ya da eşdeğer olarak

$$\nabla^2 \phi_1 + (k_\infty - 1) \frac{1}{M^2} \phi_1 = 0 \quad 5.12$$

olarak da yazılmaktadır. Böylece reaktivite değerlerine ve akı değerlerinin dolayısıyla güç değerlerinin hesaplamaları için bir eşitlik elde edilmiş olmaktadır.

5.2 Yerel Güç Yoğunluğu ve Akı Arasındaki İlişki

Daha önce de değinildiği gibi nükleer reaktör hesaplamaları yapılırken nötron akısının ya da gücün kontrol altında tutulması ve sistemin nötronik bakımdan da sürekliliği önemlidir.

Yukarıda bir buçuk grup nötron difüzyon denklemi yaklaşımı ile sistemin davranışın izleyebilmek için kolaylaştırma yapılmıştır. Sistemimizde oluşan güç, hızlı ve termal nötronların fisyon yapmaları sonrasında meydana gelmektedir. Öyle ise sistemimizin yerel güç yoğunluğu,

$$q''' = \kappa \Sigma_{f1} \phi_1 + \kappa \Sigma_{f2} \phi_2 \quad 5.13$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada κ bir fisyon başına üretilen enerji miktarıdır. Bir buçuk grup yaklaşımı ile Denklem 5.14 hızlı nötron akısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$q''' = \kappa \left(\Sigma_{f1} \phi_1 + \Sigma_{f2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{a2}} \phi_1 \right) \quad 5.14$$

Elde edilen bu denklemde,

$$\begin{aligned}
 q''' &= \kappa \left(\Sigma_{f1} \phi_1 + \Sigma_{f2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{a2}} \phi_1 \right) \frac{\nu \Sigma_{a1} - \Sigma_{12}}{\nu \Sigma_{a1} - \Sigma_{12}} \frac{D_1}{D_1} \\
 &= \kappa \frac{1}{\nu} \phi_1 \frac{\left(\Sigma_{f1} + \Sigma_{f2} \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{a2}} \right) \Sigma_{a1} - \Sigma_{12}}{\Sigma_{a1} - \Sigma_{12}} \frac{D_1}{D_1}
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

şeklinde bir düzenleme yapılırsa,

$$\begin{aligned}
 q''' &= \kappa \frac{1}{\nu} \phi_1 k_{\infty} \frac{1}{M^2} D_1 \\
 &= \frac{\kappa}{\nu} k_{\infty} \frac{D_1}{M^2} \phi_1
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

Denklem 5.16'dan hızlı nötron akısını çekersek,

$$\phi_1 = q''' \frac{\nu}{\kappa} \frac{M^2}{D_1} \frac{1}{k_{\infty}}
 \tag{5.17}$$

ya da eşdeğer olarak,

$$\phi_1 = q''' \frac{\nu}{\kappa} \frac{M^2}{D_1} (1 - \rho)
 \tag{5.18}$$

şeklinde bulunur.

N tane düğüm noktasına ayrılmış bir reaktör koru içerisinde, düğüm noktası hacmi üzerinden hızlı nötron akısının integrali alınır,

$$\int_V \phi_1 dV = \frac{\nu}{\kappa} \frac{M^2}{D_1} (1 - \rho) f_i \frac{Q}{N}
 \tag{5.19}$$

elde edilir. Bu denklemde f_i , o düğüm noktası için tüm güç ortalaması üzerinden normal değeridir (güç çarpanı değeri). Q reaktörün termal gücü ve N ise düğüm noktası sayısıdır. Güç çarpanı değeri ise:

$$f_i = \frac{1}{Q} \int_V q''' dV = q''' \frac{N}{Q} V \quad 5.20$$

şeklinde elde edilir.

Böylece bir buçuk grup nötron difüzyon denklemi yaklaşımıyla N tane düğüm noktasına ayrılmış bir reaktör sisteminin incelenmesi için hızlı akı değerleri ve güç çarpanı değerleri elde edilmiş olmaktadır.

Yukarıda yapılan yaklaşımlarla düğüm noktaları için Denklem 5.18' de görüldüğü üzere akı ve yerel güç yoğunluğu arasında $\phi_1 = Aq'''(1-\rho)$ ilişkisi bulunmaktadır. Bu ilişki kullanılarak Denklem 5.11 tekrar düzenlenirse:

$$\nabla^2 [q'''(1-\rho)] + \frac{\rho q'''}{M^2} = 0 \quad . \quad 5.21$$

Elde edilen bu denklik ise belirli bir düğüm noktası için toplam termal güç değeri olan Q ile normalleştirilerek:

$$\nabla^2 [f_i(1-\rho_i)] + \frac{\rho_i f_i}{M^2} = 0 \quad . \quad 5.22$$

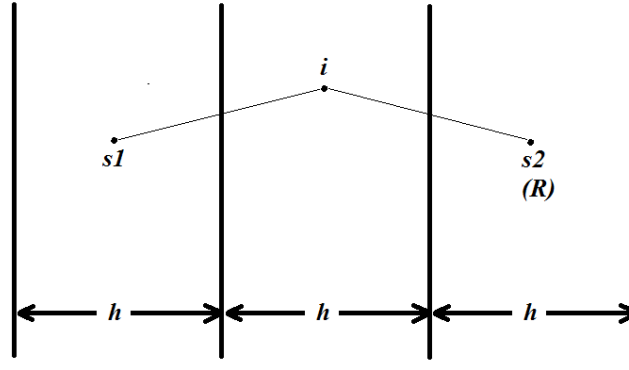
denklemini elde edilmiş olur. Elde edilen bu denklik reaktör analizinde düğüm noktaları ile yapılan nümerik çözümlemelerde kullanılma imkânı sağlamaktadır. Bu yaklaşım ile reaktör yakıt demetleri analizleri yapılabilmektedir. Daha sonraki bölümlerde yakıt demetleri üzerinden reaktör korunun analizleri için denklem ile yapılan yaklaşımlar gösterilmektedir.

5.3 Yakıt Demetlerinin Güç Değerlerinin Hesaplamaları

İki grup difüzyon denklemi, bir buçuk grup difüzyon denklemi yaklaşımı ile sadece hızlı akı değerleri üzerinden hesap yapılacak forma getirilmiştir. İlerleyen bölümlerde tek boyutta levha geometrisinde, iki boyutta ise kare ve altıgen düğüm noktalarının güç çarpanı değerleri ve yerel güç yoğunlukları için düğüm noktalarındaki denklemler türetilmiş ve geliştirilecek kodda kullanılmak üzere düğüm noktaları denklemleri elde edilmiştir.

5.3.1 Levha Geometrisi için Güç Paylaşım Değerlerinin Türetilmesi (Driscoll et.al., 1991)

İki komşu düğüm noktası tarafından Şekil 5.1'deki gibi sarılmış olan bir i düğüm noktası için yaklaşım aşağıdaki gibidir. Etrafında $s1$ ve $s2$ yakıt demetleri olduğu durumda, bir iç düğüm noktasını, $s2$ değerinin yansıtıcı bir yüzeye eşit olduğu durumda ise R ise çevresel bir düğüm noktasını ifade etmektedir.



Şekil 5.1 Levha Geometrisi için Düğüm Noktaları

İç düğüm noktaları için Denklem 5.11 sonlu farklar yöntemi ile nötron dengesi yapılırsa,

$$\frac{\phi_{s1} - 2\phi_i + \phi_{s2}}{h^2} + \left(\frac{\rho}{1-\rho} \right) \frac{1}{M^2} \phi_i = 0 \quad 5.23$$

Hızlı nötron akısının yerel güç yoğunluğu ile ilişkisi $\phi \sim q(1-\rho)$ daha önceden ifade edilmişti. Yukarıdaki denklemde nötron akısı yerine koyulursa:

$$\frac{q_{s1}(1-\rho_{s1}) - 2q_i(1-\rho_i) + q_{s2}(1-\rho_{s2})}{h^2} + \left(\frac{\rho}{1-\rho} \right) \frac{1}{M^2} q_i(1-\rho_i) = 0 \quad 5.24$$

denklem yeniden düzenlenirse

$$\frac{q_{s1} + q_{s2}}{2} - \frac{q_{s1}\rho_{s1} + q_{s2}\rho_{s2}}{q_{s1} + q_{s2}} \frac{q_{s1} + q_{s2}}{2} + q_i \left(1 - \rho_i - \frac{1}{2} \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right) = 0 \quad 5.25$$

burada $\frac{q_{s1} + q_{s2}}{2}$ 'yi ortalama $\bar{q}$, $\frac{q_{s1}\rho_{s1} + q_{s2}\rho_{s2}}{q_{s1} + q_{s2}}$ değeri için ise güç değerleri

üzerinden normal alınmış $\bar{\rho}$ olarak tanımlanırsa, etrafında yakıt demetleri olan bir i .nci düğüm noktası için güç yoğunluğu:

$$q_i = \frac{\bar{q}(1 - \rho_i)}{1 - \theta\rho_i} \quad 5.26$$

şeklinde bulunur. Burada $\theta = 1 + \frac{1}{2} \frac{h^2}{M^2}$ 'dir.

Yukarıdaki yaklaşımlar şimdi de bir yüzeyinde yansıtıcı olan bir sistem için yapılırsa, ϕ_{s2} yerel güç akısının yerine ϕ_R yazılarak denklem çözümü yapılmaktadır. Ancak ϕ_R değerini direk olarak bulamayız. Albedo sınır koşulunu yansıtıcı yüzey için yazacak olursak:

$$\alpha = \frac{J^-}{J^+} = \frac{\phi + 2D \frac{d\phi}{dx}}{\phi - 2D \frac{d\phi}{dx}} \quad 5.27$$

türev teriminin tam yüzey noktasında yaklaşık değeri :

$$\frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dx} \sim \frac{1}{\frac{(\phi_R - \phi_i)}{2}} \frac{(\phi_R - \phi_i)}{h} \quad 5.28$$

Yapılan bu yaklaşım ile Denklem 5.27

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1 + 2D \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dx}}{1 - 2D \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dx}} = \frac{1 + \frac{4D}{h} \frac{\phi_R - \phi_i}{\phi_R + \phi_i}}{1 - \frac{4D}{h} \frac{\phi_R - \phi_i}{\phi_R + \phi_i}} \\ &= \frac{(\phi_R + \phi_i) + \frac{4D}{h}(\phi_R - \phi_i)}{(\phi_R + \phi_i) - \frac{4D}{h}(\phi_R - \phi_i)} \end{aligned} \quad 5.29$$

Bir adım daha ileri giderek denklemi açar, ϕ_i ve ϕ_R parantezlerine alırsak:

$$\phi_i \left[(\alpha - 1) + \frac{4D}{h} (\alpha + 1) \right] = \phi_R \left[(-\alpha + 1) + \frac{4D}{h} (\alpha + 1) \right] \quad 5.30$$

şekline gelir ve kesrin pay ve paydasını $-(\alpha + 1)\frac{4D}{h}$ 'e böler ve ϕ_R :değerini çekersek:

$$\phi_R = \left[\frac{1 - \frac{(1 - \alpha) h}{(1 + \alpha) 4D}}{1 + \frac{(1 - \alpha) h}{(1 + \alpha) 4D}} \right] \phi_i = \gamma \phi_i \quad 5.31$$

elde edilmiş olur. Yansıtıcı bölgesi için oluşturulan bu akı değeri Denklem 5.23'de yerine koyulursa:

$$\phi_{s1} - 2\phi_i + \gamma\phi_i + \left(\frac{\rho_i}{1 - \rho_i} \right) \frac{h^2}{M^2} \phi_i = 0 \quad 5.32$$

q_{s2} değerinin sıfır olmasından dolayı $\bar{q} = q_{s1}$ olmaktadır. Benzer şekilde $\bar{\rho} = \rho_{s1}$ olmaktadır. Bu yaklaşımlar çerçevesinde çevresel düğüm noktaları için:

$$q_i = \frac{\bar{q}(1 - \bar{\rho})}{(2 - \gamma)(1 - \rho_i) - \frac{h^2}{M^2} \rho_i} \quad 5.33$$

elde edilmiş olur. Denklem 5.32, Denklem 5.26 ile yeniden düzenlenecek olursa

$$q_i = \frac{\bar{q}(1 - \rho_i)}{1 - \theta_p(\rho_i - \rho_L)} \quad 5.34$$

burada:

$$\theta_p = 2\theta - \gamma = \frac{2\theta - 1}{1 - \rho_L} \quad 5.35$$

ve sızıntı reaktiviteside:

$$\rho_L = \frac{1 - \gamma}{2\theta - \gamma} \quad 5.36$$

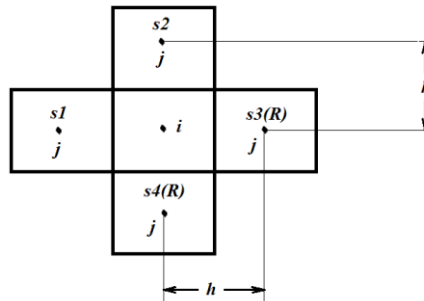
şeklinde elde edilerek levha geometrisi için güç yoğunluğu değerlerinin çözümü oluşturulmuş olur.

5.3.2 Kare Şeklindeki Düğüm Noktaları için Güç Paylaşım Değerlerinin Türetilmesi (Driscoll et.al., 1991)

Güç paylaşım değerleri iki boyutlu sistemler için çözülürken, sistemin akı bükülme değerleri sistemin ayrıştırılması sırasında yönelimler boyunca eşit olarak ayrıldığı yaklaşımı yapılmaktadır (Iso-Buckling Approximation). Böylece sistemin çözümü için kolaylaştırma sağlanmıştır. Yapılan yaklaşım kritik bir sistem için

$$B_M^2 = \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \frac{1}{M^2} = B_g^2 = B_x^2 + B_y^2 \quad 5.37$$

şeklindedir. Laplace teriminin de iki boyutta Şekil 5.2 gibi eşit uzaklıktaki düğüm noktası uzaklıkları ile Denklem 5.11 için sonlu farklar yöntemi yaklaşımı yapılırsa,



Şekil 5.2 Kartezyen Geometri için Düğüm Noktaları

$$\frac{\phi_{s1} - 2\phi_i + \phi_{s3}}{h^2} + \frac{\phi_{s2} - 2\phi_i + \phi_{s4}}{h^2} = -\left(\frac{\rho_i}{1-\rho_i}\right) \frac{1}{M^2} \phi_i \quad 5.38$$

levha geometrisi için yapılan akının yerel güç yoğunluğu ile ilişkisi olan $\phi \sim q(1-\rho)$ kullanıldığı zaman Denklem 5.25'e benzer bir şekilde:

$$q_{s1} + q_{s2} + q_{s3} + q_{s4} + (q_{s1}\rho_{s1} + q_{s2}\rho_{s2} + q_{s3}\rho_{s3} + q_{s4}\rho_{s4}) - 4q_i + 4q_i\rho_i = \frac{h^2}{M^2} q_i\rho_i \quad 5.39$$

denklemini yeniden düzenlersek,

$$q_i = \frac{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 q_{sj} (1-\rho_{sj})}{1-\theta_0 \rho_i} \quad 5.40$$

şekline dönüşür ve buradaki θ_0 değeri:

$$\theta_0 = 1 + \frac{1}{4} \frac{h^2}{M^2} \quad 5.41$$

ifadesidir. Benzer bir yaklaşımla s3 ve s4 düğüm noktalarının i düğüm noktası ile birleştiği yüzeylerin sadece biri veya her ikisinin de yansıtıcı yüzeyler olduğu varsayımı yapılır ve Denklem 5.31 ve Denklem 5.31 bir araya getirilirse:

$$\sum_{j=1}^S \phi_{sj} + 4\phi_i + (4-S)\phi_i\gamma = -\frac{h^2}{M^2} \left(\frac{\rho_i}{1-\rho_i}\right) \phi_i \quad 5.42$$

ifadesi elde edilmiş olur. Burada S, i düğüm noktası için komşuluklarındaki yakıt demetleri sayısıdır. Akının yerel güç yoğunluğu ile ilişkisi olan $\phi \sim q(1-\rho)$ terimini ekleyip denklemini yeniden düzenlersek,

$$q_i = \frac{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S q_{sj} (1-\rho_{sj})}{\frac{1}{S} \left([4-(4-S)\gamma](1-\rho_i) - \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right)} \quad 5.43$$

denklemin paydasını düzenleyecek olursak,

$$\begin{aligned}
 4 - S &= R \\
 \frac{1}{S} \left((4 - R\gamma)(1 - \rho_i) - \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right) & \\
 \frac{1}{S} \left(4 - R\gamma + R\gamma\rho_i - 4\rho_i - \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right) & \\
 \frac{1}{S} (4 - R\gamma + R\gamma\rho_i - 4\theta_0\rho_i) & \\
 \frac{1}{S} ((R + S) - R\gamma) - \frac{(4\theta_0 + R\gamma)}{S} \rho_i & \\
 1 + \frac{R(\gamma - 1)}{S} - \frac{(4\theta_0 + R\gamma)}{S} \rho_i &
 \end{aligned} \tag{5.44}$$

burada R, i düğüm noktasını çevreleyen yansıtıcı yakıt demetlerinin sayısıdır.

$$\theta_R = \frac{((R + S)\theta_0 + R\gamma)}{S} \tag{5.45}$$

$$\rho_L = \frac{\frac{R(\gamma - 1)}{S}}{\theta_R} \tag{5.46}$$

şeklinde tanımlanırsa, Denklem 5.43 :

$$q_i = \frac{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S q_{sj} (1 - \rho_{sj})}{1 - \theta_R (\rho_i - \rho_L)} \tag{5.47}$$

ρ_L değeri sistemin sızıntı reaktivite değeridir. Elde edilen bu denklem hem iç düğüm noktaları hem de çevresel düğüm noktalarını sağlayacak şekilde oluşturulmuş olup, iç düğüm noktaları için Denklem 5.40'ı da sağlamaktadır.

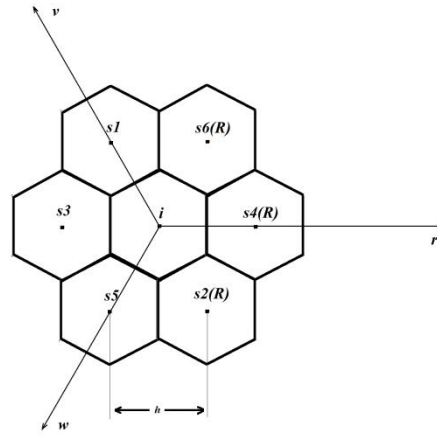
Yapılan matematiksel çıkarımlar ile sistemin güç yoğunluğu değerleri için genel bir denklem çıkarılmıştır. Çıkarımı yapılan bu denklem genel bir ifade olması dolayısıyla sistemin tüm düğüm noktaları için kullanılabilir. Çevresel düğüm noktalarına geldiğinde ise tanımlanan sızıntı reaktivitesi değeri tanımlanarak ya da geliştirilebilecek bir yaklaşımla hesaplamaların yapılmasına olanak sağlamaktadır.

5.3.3 Altıgen Şeklindeki Düğüm Noktaları için Güç Paylaşım Değerlerinin Türetilmesi

Kritik bir sistem için kare geometri için yapılan akı bükülmesinin eşit olarak ayrıştırılması yaklaşımı, altıgen geometri için de geçerlidir.

$$B_M^2 = \left(\frac{\rho}{1-\rho} \right) \frac{1}{M^2} = B_g^2 = B_r^2 + B_v^2 + B_w^2 \quad 5.48$$

r, w ve v altıgen geometri için yönelim eksenlerini belirtmektedir.



Şekil 5.3 Altıgen Geometri için Düğüm Noktaları

Denklem 5.11'in çözümü altıgen geometri için yapılırken kartezyen geometriden farklı olarak Laplace terimi değişmektedir. Bu değişim bir skalar fonksiyonun açılımı (Baumeister, 1990), düzgün altıgen geometri için Şekil 5.3'teki düğüm noktaları ile,

$$\nabla^2 \phi = \frac{\phi_{s1} + \phi_{s2} + \phi_{s3} + \phi_{s4} + \phi_{s5} + \phi_{s6} - 6\phi_i}{\frac{3}{2}h^2} \quad 5.49$$

şeklinde sonlu farklar yöntemi ile açılabilir. Bu yaklaşımı Denklem 5.11'de yerine koyarsak,

$$\frac{\phi_{s1} + \phi_{s2} + \phi_{s3} + \phi_{s4} + \phi_{s5} + \phi_{s6} - 6\phi_i}{\frac{3}{2}h^2} + \left(\frac{\rho}{1-\rho}\right) \frac{1}{M^2} \phi_i = 0 \quad 5.50$$

denklemini elde edilmiş olur. Denklem 5.39'da olduğu gibi akı değerlerinden yerel güç yoğunlukları değerlerine $\phi \sim q(1-\rho)$ ile geçiş yapılır ve θ_0 değerinin Denklem 5.41'deki formu korunur ise,

$$q_i = \frac{\frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 q_{sj} (1-\rho_{sj})}{1-\theta_0 \rho_i} \quad 5.51$$

eşitliği elde edilmiş olur.

Kartezyen geometri yaklaşımında yaptığımız gibi s_2, s_4 ve s_6 düğüm noktalarının bir, ikisi veya hepsi yansıtıcı malzeme içeren yakıt demeti olduğu düşünülürse Denklem 5.42'ye benzer bir şekilde,

$$\sum_{j=1}^S \phi_{sj} + 6\phi_i + (6-S)\phi_i \gamma = -\frac{3}{2} \frac{h^2}{M^2} \left(\frac{\rho_i}{1-\rho_i} \right) \phi_i \quad 5.52$$

elde edilir. Bu denklemde S , i düğüm noktasını çevreleyen yakıt demetleri sayısını göstermektedir. Yerel güç yoğunluğu değerlerine geçiş yapılır ve denklem düzenlenirse:

$$q_i = \frac{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S q_{sj} (1-\rho_{sj})}{\frac{1}{S} \left([6-(6-S)\gamma](1-\rho_i) - \frac{3}{2} \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right)} \quad 5.53$$

yine Denklem 5.44'te yapıldığı gibi denklemin paydasında düzenlemeler yapılırsa,

$$\begin{aligned}
6 - S &= R \\
\frac{1}{S} \left((6 - R\gamma)(1 - \rho_i) - \frac{3}{2} \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right) &= \frac{1}{S} \left(6 - R\gamma + R\gamma\rho_i - 6\rho_i - \frac{3}{2} \frac{h^2}{M^2} \rho_i \right) \\
&= \frac{1}{S} (6 - R\gamma + R\gamma\rho_i - 6\theta_0\rho_i) \\
&= \frac{1}{S} ((R + S) - R\gamma) - \frac{(6\theta_0 + R\gamma)}{S} \rho_i \\
&= 1 + \frac{R(\gamma - 1)}{S} - \frac{(6\theta_0 + R\gamma)}{S} \rho_i
\end{aligned} \tag{5.54}$$

R, i düğüm noktasını çevreleyen yansıtıcı demetlerinin sayısı ve S 'te aynı düğüm noktası için yakıt demetlerinin olup Denklemler 5.45 ve Denklemler 5.46 aynı formda elde edilmiş olur.

$$\theta_R = \frac{((R + S)\theta_0 + R\gamma)}{S} \tag{5.55}$$

$$\rho_L = \frac{\frac{R(\gamma - 1)}{S}}{\theta_R} \tag{5.56}$$

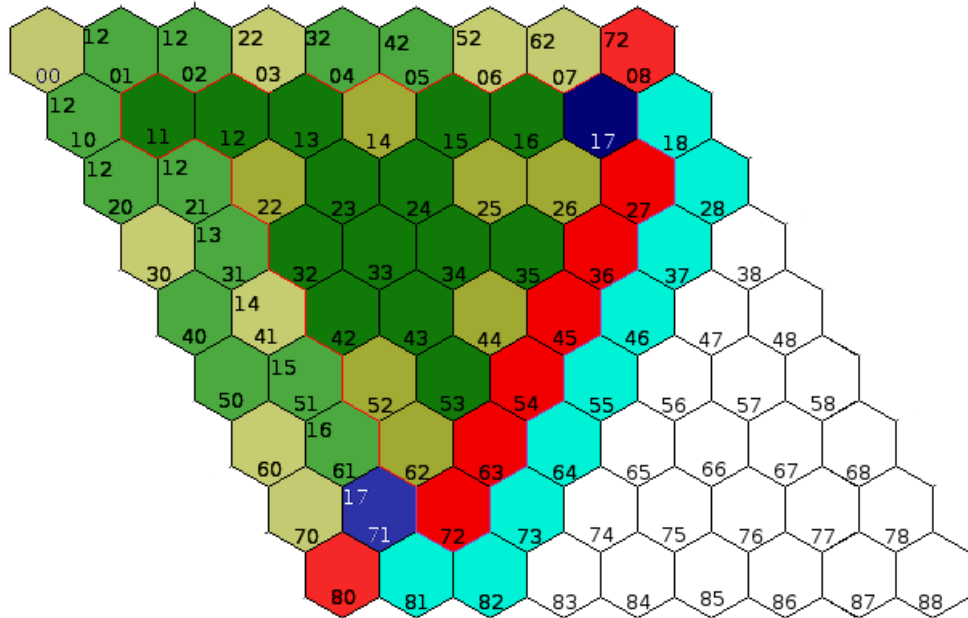
$$q_i = \frac{\frac{1}{S} \sum_{j=1}^S q_{sj} (1 - \rho_{sj})}{1 - \theta_R (\rho_i - \rho_L)} \tag{5.57}$$

Elde edilen bu denklemler ile altıgen yakıt demetlerine sahip reaktör kor geometrisi için geliştirilecek olan difüzyon kodu çözümünü oluşturmaktadır.

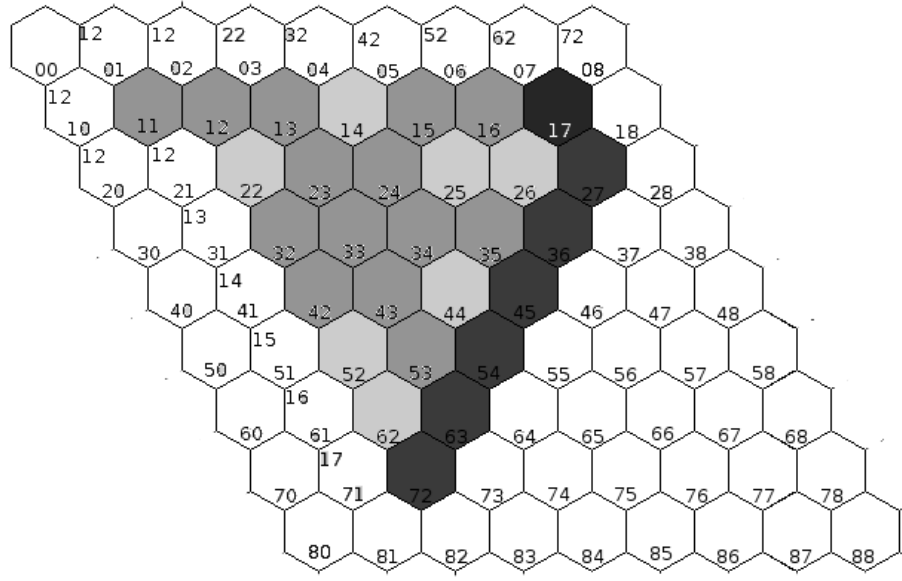
6 RPMHEX KODU

Beşinci bölümde, altıgen düğüm noktaları için oluşturulan hesaplamalar ile kor içi güç dağılımlarını ve yanma oranları dağılımlarını kor içi yükleme periyodu boyunca hesaplayan RPMHEX kodu geliştirilmiştir. Daha önceden kare bir kafes için geliştirilmiş RPM (Reactor Power Mapping) kodu temel alınarak, altıgen kafes için benzeşim yapılmıştır. FORTRAN programlama dilinde geliştirilen kod, düğüm noktaları için hesaplamaları gerçekleştirmektedir.

RPMHEX kodu, ilgili düğüm noktası için hesaplamalarını yaparken daha önce hazırlanan girdi dosyalarından reaktivite, nötron göç alanı ve difüzyon uzunluğu bilgilerini, hesaplama yapılan ve çevresinde bulunana düğüm noktalarındaki bor konsantrasyonu, güç çarpanı değerleri ve yanma oranlarının bir fonksiyonu olarak bir alt programdan çağırılmaktadır. Şekil 6.1’de RPMHEX kodunun hesaplama matrisi indislerini göstermektedir. Şekil 6.1’de altıgenlerin alt kısmında yazan rakamlar hesaplama matrisi indislerini, sol üst kenarında yazan numaralar ise simetri özelliği oluşturularak kullanılan düğümlerin hangi matris indisine eşit olduğunu göstermektedir. Şekil 6.2 ise RPMHEX programı için esas hesaplamaların yapıldığı düğüm noktalarını göstermektedir.



Şekil 6.1 RPMHEX Programı Hesaplama Matrisi



Şekil 6.2 RPMHEX Programı Hesaplama Alanı

6.1 Program Algoritması

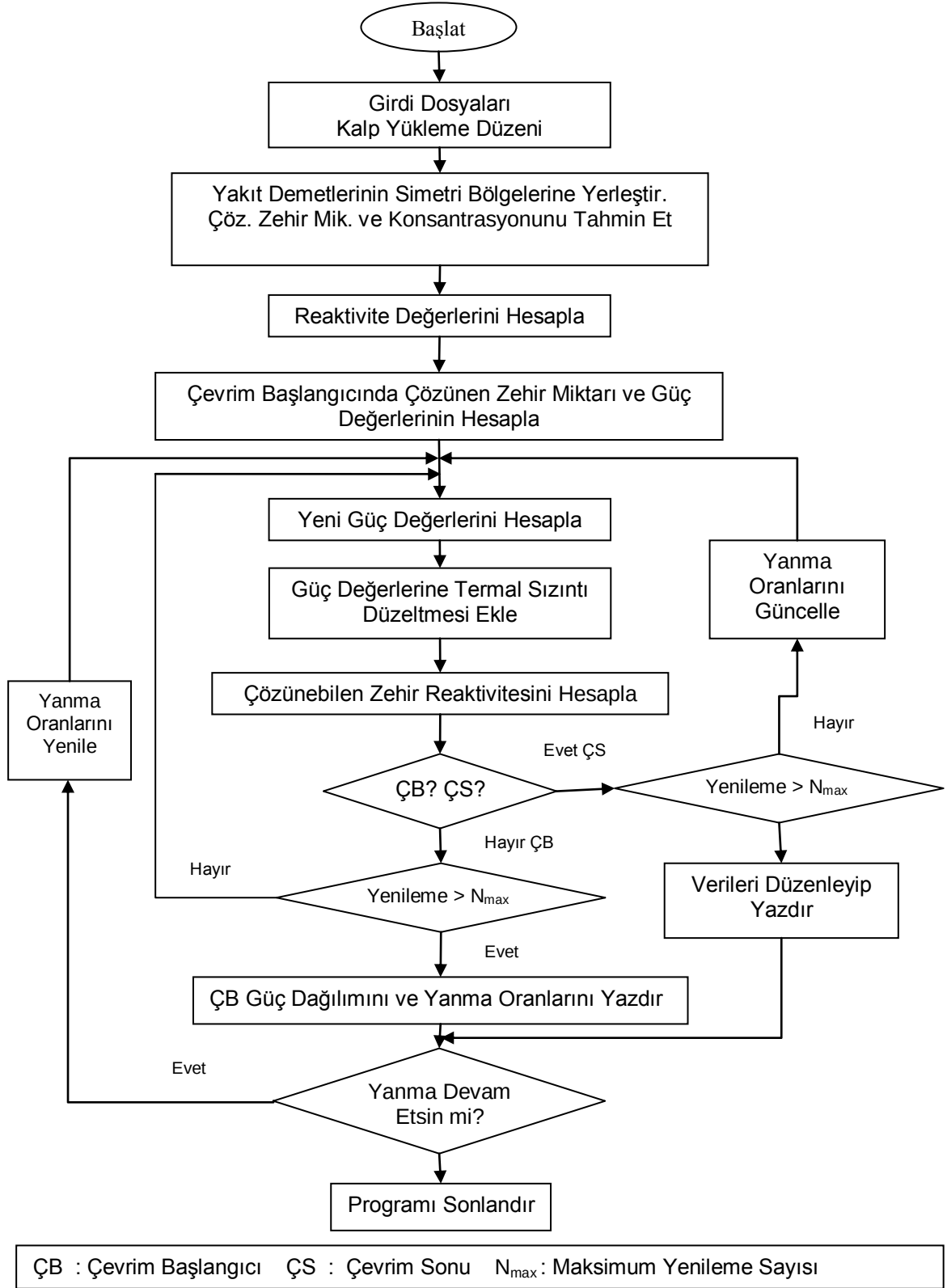
Beşinci bölümde, altıgen geometriye sahip bir yakıt demeti için çıkarılan Denklem 5.57 ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Programın esas yaklaşımı,

$$\rho_s = \bar{\rho}_c - (\bar{\rho}_L + \bar{\rho}_{sp}) = 0 \quad 6.1$$

üzerine yapılmaktadır. Burada ρ_s sistem reaktivitesini, $\bar{\rho}_c$, $\bar{\rho}_L$ ve $\bar{\rho}_{sp}$ sırasıyla güç değerleri üzerinden normal alınmış kor, sızıntı ve çözünen zehirden kaynaklanan reaktivite değerlerini ifade etmektedir. $\rho_s = 0$ olması sistemimizin kritik olması anlamına gelmektedir ki bu durumda,

$$\bar{\rho}_{sp} = \bar{\rho}_c - \bar{\rho}_L \quad 6.2$$

olacak şekilde sistemin algoritması geliştirilmiştir.



Şekil 6.3 RPMHEX Programı Akış Şeması

Başka bir önemli konu ise bir buçuk grup difüzyon yaklaşımı ile ihmal edilen termal akının sızıntı değeri için yapılan düzeltmedir. Bir buçuk grup difüzyon yaklaşımı ile termal nötronların sistem içerisinde hemen yutuldukları varsayımı yapılmıştır. Ancak termal nötronların difüzyon edebileceği uzaklık hafif su reaktörleri için 1-2 cm civarında olup, bu değer iki yakıt demeti arasında oluşan net nötron akımının(current) ihmal edilemeyeceğini gösterir (Driscoll et.al,1991).

Yakıt demetlerinin güç çarpanı değerleri olan f ($f_i = \frac{q_i}{Q}$) değerleri ile sistem hesaplaması yapıldığı için, f_i değerleri üzerine termal akı düzeltmesi,

$$f_i = f_i \left(1 - \frac{\left(\frac{\theta_i^*}{2} \right) \theta_i^* (6 - R)}{6} \right) + \frac{\left(\frac{\theta_i^*}{2} \right)}{6} \sum_{j=1}^6 f_j \theta_j^* \quad 6.3$$

şeklinde yapılmıştır. Burada f_i güç çarpanı değerleri, R ilgili düğüm noktası için komşuluğundaki yansıtıcı bölgesi sayısı olup,

$$\theta_i^* = \frac{4L}{h} \quad 6.4$$

L termal difüzyon uzunluğu ve h 'de iki yakıt demeti merkezleri arasındaki mesafedir.

1. Programın çalışması için gerekli olan girdi dosyalarından
 - a. Kor için başlangıç yükleme diziliminin
 - b. Yanma oranları hesaplamaları için yanma oranlarının artırım miktarları

okutularak program için gerekli matrislere yazdırılır.

2. Yazılan bir alt program ile Şekil 6.2'deki gibi 1/6'lık kor içerisindeki yakıt demetleri Şekil 6.1'deki simetri eksenlerine göre tekrardan yüklenir.

3. Bu yakıt demetlerinin dizilimleri ile sistemi kritik yapacak bor konsantrasyonunun hesaplanması için, ilk olarak bir reaktivite değeri (ρ_{sp}) ve bor konsantrasyon değeri tahmini yapılır.

4.

$$\rho_{sp,t} = \sum_{i=1}^6 f_i \rho_{sp} / \sum_{i=1}^6 f_i \quad 6.5$$

formülü ile sistemin kritik bor reaktivitesi hesaplanır.

5. Yapılan tahminle ile çıkan sonuçlar karşılaştırılır, sistemi kritik yapacak bor konsantrasyonuna yaklaşmak için

$$BC = BC + (\rho_{sp,t,eski} - \rho_{sp,t,hesaplanan})BC \quad 6.6$$

formülü kullanılır.

6. Sistemi kritik yapan bor konsantrasyon değeri ile başka bir alt programın altında yeni güç değerleri Denklem 5.57 ile hesaplanır. Aynı anda sistemden kaçan reaktivite, ve toplam reaktivite değerleri de her bir düğüm noktasının ağırlıkları üzerinden

$$\rho_t = \sum_{i=1}^6 f_i \rho_i / \sum_{i=1}^6 f_i \quad 6.7$$

$$\rho_{L,t} = \sum_{i=1}^6 f_i \rho_{L,i} / \sum_{i=1}^6 f_i \quad 6.8$$

şeklinde hesaplanır. Hesaplanan bu reaktivite değerleri

$$\rho_s = \rho_t - (\rho_{L,t} - \rho_{sp}) \quad 6.9$$

eşitliğinden ρ_s değeri sistemin kritik olduğunda $\rho_s = 0$ olacağından,

$$\rho_{sp} = \rho_t - \rho_{L,t} \quad 6.10$$

eşitliği kullanılarak kor reaktivitesi çözünebilen zehir reaktivitesine eşitlenir.

7. Sistemin güç değerleri için “Termal Akı Düzeltmesi” için Denklem 6.3’ten yararlanılarak yeni güç değerleri hesaplanır.

8. Yenileme değeri için koyulacak kriterde kor reaktivitesi çözünebilen zehir reaktivitesine eşit değilse 4. Adımdan itibaren yenileme tekrarlanır. Eşitlik durumunda ise sistemi kritik yapacak olan kritik bor konsantrasyonu hesaplanmış olur.

Böylelikle çevrimin başlangıcında, 0 yanma oranı için ilk yükleme düzeni için sistemi kritik yapacak bor konsantrasyonu değeri hesaplanmış olur.

Daha sonrasında yanma oranlarındaki değişime göre yanma oranları artırılarak aynı işlemler 2. Adımdan başlayarak tekrarlanır. En son yanma adımını da sonlandırdıktan sonra gerekli derlemeler yapılarak programdan çıkılmaktadır.

değerlerinde oldukça yüksek değerler hesaplanmakta yansıtıcı bölgesindeki çevresel bölgede ise güç çarpanı değerleri olması gerekenden aşağıda hesaplandı.

				0.74000-----		Deneysel Veriler
				0.73356-----		RPMHEX
				0.86974-----		Göreceli Hata
			1.34000	0.91000		
			1.07432	0.88122		
			19.82696	3.16315		
		1.41000	0.99000	0.92000		
		1.29597	0.81051	0.86343		
		8.08702	18.13027	6.14877		
	0.89000	0.98000	1.21000	0.90000		
	1.00375	0.93989	1.01486	0.86392		
	-12.78100	4.09278	16.12703	4.00871		
	0.85000	0.88000	0.98000	0.94000	0.89000	
	0.95272	1.00284	0.98982	0.82657	0.84921	
	-12.08519	-13.95918	-1.00206	12.06707	4.58354	
	1.24000	0.88000	0.90000	1.40000	1.23000	0.74000
	1.52174	0.95714	1.03151	1.31291	1.07833	0.71983
	-22.72067	-8.76576	-14.61232	6.22073	12.33082	2.72583
0.91000	0.94000	0.91000	0.66000	1.00000	1.15000	1.16000
1.31387	1.27718	1.13448	0.74626	1.08691	1.00478	0.97402
-44.38109	-35.86974	-24.66852	-13.07003	-8.69108	12.62769	16.03305

Şekil 7.2 Yanma Oranı 1700. MWgün/t AM Gadolinyum İçeriği Varken

				0.74000-----		Deneysel Veriler
				0.98675-----		RPMHEX
				-33.34426-----		Göreceli Hata
			1.34000	0.91000		
			1.00386	0.76855		
			25.08479	15.54444		
		1.41000	0.99000	0.92000		
		1.18753	0.70347	0.73892		
		15.77812	28.94275	19.68294		
	0.89000	0.98000	1.21000	0.90000		
	1.00291	0.84191	0.88681	0.75702		
	-12.68629	14.09053	26.71032	15.88653		
	0.85000	0.88000	0.98000	0.94000	0.89000	
	1.08337	0.96293	0.90270	0.74261	0.77819	
	-27.45536	-9.42427	7.88770	20.99888	12.56324	
	1.24000	0.88000	0.90000	1.40000	1.23000	0.74000
	1.52996	1.14066	1.05289	1.22878	1.00608	0.73038
	-23.38383	-29.62023	-16.98803	12.22975	18.20490	1.29980
0.91000	0.94000	0.91000	0.66000	1.00000	1.15000	1.16000
1.27792	1.27495	1.20822	1.45702	1.07961	0.94035	0.95726
-40.43117	-35.63261	-32.77100	-120.76039	-7.96094	18.23020	17.47787

Şekil 7.3 Yanma Oranı 1700. MWgün/t AM Gadolinyum İçeriği Yok İken

Güç çarpanı değerlerine bağlı olan yakıt yanma değerlerindeki aynı şekilde bir değişim gösterdiği gözlemlendi.

RPMHEX kodunun RPM kodunu temel aldığını daha önceden belirtilmişti. RPM kodu PWR reaktörleri için oldukça makul sonuçlar vermiş olduğu bilinmektedir. RPMHEX'in de benzer şekilde çalışıldığı düşünüldüğü takdirde hesaplamalarda oluşan hataların kaynakları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a. WIMSD-5B kodu ile grup sabitlerinin oluşturulması sırasında kodun oluşturacağı hesaplama hatalarından kaynaklanabilir. WIMSD-5B kafes hücresi hesaplamaları yapmasından ve elde edilen grup sabitleri tamamen hücre bazında olmasından dolayı, yakıt demeti ile yakıt hücrelerinin özellikle reaktivite değerleri davranışları farklılık göstermektedir. RMPHEX için yakıt demetleri bazında grup sabitleri türetilmesi gerekmektedir. Bu sebebe bağlı olarak da hatalar oluşmuş olabilir.
- b. WIMSD-5B kodu ile birim hücre üretilen kütüphanelerin içindeki yanabilen yutucu çubukların zenginleştirilmiş uranyum ile karıştırılmaları sonucunda, ilk olarak gadolinyum içeriği yüksek bir negatif reaktivite sağlamak fakat gadolinyum içeriğinin çok hızlı tükenmesinden dolayı. reaktivite değerlerinin çok hızlı değiştiği için doğru bir modelleme yapılamamış olması da hatalar getirmiştir.
- c. WIMSD-5B kodu ile elde edilen değerler için uyum eğrisi fonksiyonları oluşturulmuştur. Uyum eğrisi fonksiyonları oluşturulurken de elde edilen değerler de hata içermektedir.
- d. Kor akı sızıntıları hesaplanırken Denklem 5.31'deki formül yaklaşımı ile yansıtıcı bölgesine sızan akının hesaplaması γ değerlerine bağlanmıştı. Ancak γ değerleri iki komşu altıgen düğüm noktasının yüzeyleri arasındaki albedo ve hızlı grup için difüzyon katsayısı değerlerinin bir fonksiyonuydu. γ değerinin sabit olmasından dolayı gelen hatalarda çözümlemenin içerisinde yer almaktadır.
- e. Referansta (IAEA, 1995) verilmemiş olan ya da açıkça belirtilmemiş olan yanabilen yutucu çubukların yakıt demetleri içerisindeki sayısı önemlidir. İlk çevrim dahil reaktiviteyi kontrol etmek için farklı noktalarda farklı sayılarda yanabilen yutucu çubuklar kullanılmaktadır. Bu değerler tasarım

parametreleri oldukları için özellikle de verilmemiş olabilirler. Bu sebepten dolayı kesin olarak değerlerin karşılaştırılma imkanı bulunamadı.

- f. RPMHEX bir buçuk grup difüzyon denklemi hesaplaması yapmakta ve termal akıyı bir düzeltme ile sisteme eklemekteyiz. Bu düzeltme faktöründen kaynaklanan hatalarda program çözümünü etkilemektedir.

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı geliştirilen kod doğru olarak hesaplama yapamamaktadır Bu yüzden yüksek yanma oranları ile karşılaştırma yapılmamıştır.

8 TARTIŞMA VE YORUM

Bu çalışmada VVER-1000 tipi reaktörler için kor güç haritasını yanma oranlarına bağlı olarak hesaplama yapan RPMHEX isimli bir kod geliştirildi. RPMHEX'in hesaplamaları için gerekli grup sabitleri ve reaktivite değerleri WIMSD-5B kodu ile oluşturuldu.

RPMHEX hesaplamaları yakıt yanma oranlarına bağlı olarak yakıt demetleri için güç değerleri hesaplamaları yapmaktadır. Bu hesaplamaları yaparken gadolinyum içeren veya içermeyen yakıt demetleri için reaktivite ve grup sabitleri, kafes hücresi bazında hazırlanılan değerler için oluşturulan uyum eğrisi fonksiyonlarından elde edildi. Yakıt demeti gadolinyum içermiyorsa direkt hücre için elde edilen reaktivite ve grup sabitleri değerleri, gadolinyum içeriyorsa içerdiği gadolinyumlu çubuk kadar tüm yakıt demeti üzerinden ağırlığı alınarak elde edilen değerler kullanıldı. Elde edilen bu değerler ile RPMHEX koşullarında alınan sonuçlar incelendi, fakat verilen sonuçlarda da görüldüğü gibi uygun sonuçlar elde edilemedi. Hücre bazında oluşturulan grup sabitleri değerleri, yakıt demeti bazında hesaplamalar için uygun olmadığı gözlemlendiği için, ya WIMSD-5B ile tüm yakıt demeti için model oluşturulacak ya da WIMSD-5B kodu yerine yakıt demeti bazında hesaplama yapan başka kodların kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna varıldı.

Genel olarak literatüre bakıldığı zaman kod, sızan akıdan dolayı kaynaklanan sızıntı reaktivitesi uygun mertebelerde hesaplanmaktadır. Ancak daha doğru sonuçlar elde etmek için farklı yaklaşımlar geliştirilerek uygun değerler elde edilebilir. Denklem 5.31'deki γ değerleri, hesaplama yapılan düğüm noktasının yüzeylerinden giren ve çıkan net nötron akımların oranları olan albedo ve hızlı grup için difüzyon katsayısını içerecek şekilde yeni bir yaklaşımla hesaplamalara dahil edilerek sonuçların düzeltilmesine yardımcı olabilir.

Bu çalışma hücresel hesaplamalar yapılarak elde edilen reaktivite ve grup sabitleri değerlerinin yakıt demeti bazında hesaplamalarda kullanılmasının uygun olmadığı, bu hesaplamaların yakıt demeti modellemesi yapan hazır bir kod ile ya da benzer sonuçlar veren farklı yaklaşımlarla hesaplanmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

İLERİKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda RPMHEX kodunu geliştirmek için aşağıda sıralanan işlemlerin yapılması planlanmaktadır.

1. Öncelikle yakıt demeti için hesaplamalar yapılarak yanma oranlarına bağlı yeni bir kütüphane oluşturulacaktır.
2. Oluşturulması planlanan kütüphanelere yakıt ve yavaşlatıcı sıcaklıkları değişimleri eklenerek geri besleme mekanizmalarının da modellemeleri koda eklenilebilir.
3. Reaktivite kontrolü ve güç ayarlamaları için kontrol çubuklarının kor içerisindeki yüksekliklerine göre kontrol çubuklarının değerleri ayarlanarak kodun içine entegrasyonu sağlanabilir.
4. Yakıt demetlerinde kullanılan yanabilen yutucu çubukların etkileri ve tipleri değiştirilerek güç dağılımlarının ayarlanması yapılabilir.
5. Termal akı düzeltmesi ve sızıntı reaktivite değerleri için yeni yaklaşımlar getirilerek daha doğru sonuçların elde edilmesi sağlanabilir.
6. Türkiye'ye yapılması planlanan VVER-1200 tipi reaktörler için Son Güvenlik Analizi Raporları ve kor yüklemeleri ile ilgili dokümanlar incelenerek kullanılan yakıt demetleri için yeni kütüphaneler oluşturulup, çevrim başlangıcında ve sonundaki değerler hesaplanabilir.
7. Koda eklenecek bir genetik algoritma modülü ya da yapay sinir ağları ile 2. ve 3. Yakıt yüklemeleri için yeni kor yükleme düzenlemelerinin oluşturulması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- AEA Tech., 1997, WIMSD:A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis, NEA-1507/04, ANSWERS Software Service, AEA Technology
- Banyuk, G.F., 2010, Ryzhov, S.B., Mokhov, V.A., Piminov, V.A., Materials of Equipment for Reactor Plants V-320 and V-491, VVER-2010 Experience & Perspectives, Prague, Czech Republic.
- Baumeister, K.J., 1990, Galerkin finite difference Laplacian Operators on Isolated Unstructured Triangular Meshes by Linear Combinations, Lewis Research Center(Cleveland,Ohio) Prapared for the Annular Meeting of the American Society of Mechanical Engineers Dallas,Texas.
- Bell, G.I., 1970, Glasstone, S., Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand Reinhold Co. New York,619p.
- Dragunov, Yu., 2005, G.,Denisov,V.P., 60th Anniversary Of The Experimental Design Office Hidropress, Contribution Made By The Experimental Design Office Hidropress To The Development Of Nuclear Power And The Atomic Energy Industry In Our Country, Atomic Energy, Vol. 99 No.6, pp.837-843.
- Dragunov, Yu.,2006, Ryzhov, S.B., Mokhov, V.A., Development of WWER-1200 reactor plant for NPP of «large series» [NPP-2006).
- Driscoll, M. J., Downar, T. J., Pilat, E. E., 1991, The Linear Reactivity Model for Nuclear Fuel Management, Amer Nuclear Society, 233p.
- Ergün, Ş, 2008, VVER-1200(Vodo-Vodyanoi Energeticheskyy Reaktor) International Congress of "World Conjuncture In Nuclear Technology" "Generation III and III+ Nuclear Reactors" İstanbul/Turkey http://www.tasam.org/egitim/sule_ergun_2.ppt
- Ermolaev, V., Deputy Director-Technical Director of Marketing and Business Development Department, Atomstroyexport Russia, <http://www.atomeromu.hu/download/1675/AES%202006%20reaktor.pdf>

- Gagarinski, A. Yu., Ignatiev, V. V., Novikov, V.M., Subbotin, S.A., Advanced LWRs: analysis of new approaches and ideas, Nuclear Society International, Moscow, Russia.
- Hirsch, H., 2010, Wenisch, A., Construction of a NPP In Belarus, Umweltbundesamt GmbH, REP-0291, Vienna, Austria
- IAEA, 1995, In-core fuel management code package validation for WWERs, Technical Report Series No.847, IAEA Vienna,156p.
- IAEA, 2002, Decommissioning Costs of WWER-440 Nuclear Power Plants, Technical Report Series No.1322, IAEA Vienna,156p.
- Javys,Jadrová a vyradovacia spoločnosť, a.s. , Bratislava, Slovenská Republika
<http://www.javys.sk/sk/index.php?page=jadrova-elektraren-v1/technicky-popis-je-v1>
- Kaeri, <http://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/nuclide?nuc=B-10&n=2>
- Kodochigov, N.,2003, Sukhareva Yu., Marovaa E., Ponomarev-Stepnoyb N., Glushkovb E. and Fomichenkob P., Neutronic features of the GT-MHR reactor, Nuclear Engineering and Design,Volume 222, Issues 2-3, June 2003, Pages 161-171
- Makhov, V.A., 2010, Advanced Designs of VVER Reactor Plant, VVER-2010 Experience & Perspectives, Prague, Czech Republic.
- Shayesteh, M., 2009, Shahriari, M., Calculation of time-dependent neutronic parameters using Monte Carlo method, Annals of Nuclear Energy, Volume 36, Issue 7, July 2009, Pages 901-909
- Skoda, R., 2010, Current reactor technology, part III:VVER, RBMK Czech Technical University Prague, WNU SI 2010, Christ Church, Oxford
- Warman, E, Whattam, K, Spencer, B, 1995 Soviet-Designed Nuclear Power Plants. http://www.insc.anl.gov/neisb/neisb4/NEISB_1.1.html

Xu,Z., 2003, Design Strategies for Optimizing High Burnup Fuel in Pressurized Water Reactors, Dep. of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 326p.

EKLER DİZİNİ

EK.A Örnek WIMSD-5B Girdi Dosyası

* Hot Zero Power Condition Enrichment=2.0

CELL 6
SEQUENCE 1
NGROUPS 2 2
NMESH 35
NREGION 5 0 5
NMATERIAL 3 1
NREACT 2
PREOUT
INITIATE

***** MAIN DATA*****

***** GEOMETRY*****

ANNULUS 1 0.070000 0 * Central Void
ANNULUS 2 0.378000 1 * Fuel
ANNULUS 3 0.386000 0 * Gap
ANNULUS 4 0.455000 2 * Clad
ANNULUS 5 0.669423 3 * WATER PITCH 1.275cm
MESH 1 15 1 3 15
MATERIAL 1 -1 1000.15 1 \$ * FUEL 2.0 at. percent
2235.0 4.687995e-04 8238.0 2.268422e-02 \$
6016 4.648214e-02 2155 5.865730e-05 \$ * Gadolinium Density= 2.00e+00 g/cc
MATERIAL 2 -1 1000.15 2 \$ * CLAD
91 4.279275e-02 93 4.256163e-04 \$ * Zirconium,Niobium
178 6.646276e-06 \$ * Natural Hafnium
MATERIAL 3 -1 575.15 3 \$ * COOLANT **Last 3 Denotes Moderator**
3001 5.128421e-02 6016 2.564599e-02 \$ * Water 800 ppm Boron
1011 3.417982e-05 \$ * Boron Concentration
Nb=Nw*(MA_H2O/MA_B)*BoronConcentration*1E-6

***** MAIN TRANSPORT OPTIONS*****

REGULAR 1 6
S 32
TOLERANCE 5.0E-5
FEWGROUP 48 69
SUPPRESS 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0
POWERC 1 42.253521127 0 5 * 0 MWD/T 42.253521127MW/t HM average burnup
BEGINC

**** EDIT DATA OPTIONS

THERMAL 1

* (Thermal Group+1)/2

BUCKLING 0.0 7.653144E-05 * 1.27/1.6/0.0/21 B2=50.57E-04

BEEONE 1

DNB 1 0.0 0.0 0.0 0.0

DNB 2 0.0 0.0 0.0 0.0

DNB 3 6.67205E-02 0.0 3.33603E-02 0.0

LEAKAGE 5 * spectrum with input bucklings

REACTION 2235.0,1000.15 8238.0,1000.15

PARTITION 45 69

BEGINC

POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 1000 MWD/T B avrg=42.253521127MW/t HM

BEGINC

BEGINC

POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 2000 MWD/T

BEGINC

BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 3000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 4000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 5000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 6000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 7000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 8000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 9000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 10000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 11000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 12000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 13000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 14000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 15000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 16000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 17000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 18000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 19000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 20000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 21000 MWD/T
 BEGINC
 BEGINC
 POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 22000 MWD/T
 BEGINC

BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 23000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 24000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 25000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 26000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 27000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 28000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 29000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 30000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 31000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 32000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 33000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 34000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 35000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 36000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 37000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 38000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 39000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 1 21.126760563 9.466666667 5 * 40000 MWD/T
BEGINC
BEGINC
POWERC 0 0
BEGINC
BEGINC
*END

EK.B Girdi Katsayı Tabloları

B.1 Reaktivite Değerleri için Elde Edilen Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları

Çizelge B.1 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Reaktivite Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları

%2,0 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum				%3,0 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-2,12E-19	3,63E-16	9,88E-12	-1,47E-19	7,40E-16	1,07E-11
2	-5,74E-18	-1,32E-14	8,10E-11	-2,27E-18	2,78E-15	3,82E-11
3	4,96E-15	3,41E-11	-4,71E-07	4,32E-15	-1,22E-12	-5,29E-07
4	3,43E-13	1,51E-09	-1,14E-05	2,11E-13	8,83E-11	-9,24E-06
5	1,69E-12	-9,63E-07	-4,28E-03	-1,42E-11	-4,59E-07	-4,32E-03
6	2,35E-09	-1,13E-04	1,66E-01	1,02E-09	-7,80E-05	2,25E-01
%3,225 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum				%3,3 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-1,26E-19	7,26E-16	1,07E-11	-1,26E-19	7,28E-16	1,07E-11
2	-1,67E-18	2,85E-15	3,31E-11	-1,49E-18	2,77E-15	3,17E-11
3	3,76E-15	-3,44E-12	-5,37E-07	3,82E-15	-4,35E-12	-5,39E-07
4	1,82E-13	-1,42E-11	-8,82E-06	1,73E-13	-4,00E-11	-8,69E-06
5	-1,33E-11	-4,01E-07	-4,39E-03	-1,34E-11	-3,82E-07	-4,42E-03
6	9,15E-10	-7,30E-05	2,34E-01	8,86E-10	-7,15E-05	2,36E-01

Çizelge B.2 0,02 g/cm³ Gd İçeren Yakıtlar için Reaktivite Uyum Eğrisi
Fonksiyonlarının Katsayıları

	%2,0 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum		%3,0 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum	
	1	2	1	2
1	-1,62E-13	6,05E-10	-1,99E-15	2,87E-10
2	2,17E-14	-5,11E-10	6,59E-15	-3,85E-10
3	9,10E-13	1,89E-09	1,01E-13	5,04E-10
4	9,33E-12	-1,49E-07	2,71E-12	-4,80E-08
5	6,02E-10	-4,05E-06	3,55E-11	-2,95E-06
6	-1,03E-10	3,90E-06	-3,47E-11	3,71E-06
7	-4,53E-09	-1,01E-05	-6,93E-10	-4,07E-06
8	-5,86E-08	1,18E-03	-2,31E-08	5,09E-04
9	-4,28E-07	3,10E-03	-9,07E-09	2,45E-03
10	3,97E-08	-3,34E-03	-1,70E-09	-2,81E-03
11	3,38E-06	6,51E-03	3,08E-07	4,17E-04
12	-1,54E-05	-2,24E+00	-3,00E-05	-1,18E+00
13	2,55E-11	1,34E-07	1,97E-11	1,21E-07
14	-2,07E-11	-9,99E-08	-2,05E-11	-9,33E-08
15	3,58E-11	-2,63E-08	2,52E-11	-2,93E-08
16	8,92E-10	-7,58E-06	2,92E-10	-7,24E-06
17	-1,26E-07	-5,88E-03	-4,91E-08	-6,55E-03
18	8,70E-08	6,41E-03	1,14E-07	7,65E-03
19	-8,59E-07	-7,63E-03	-6,57E-07	-8,45E-03
20	-9,65E-05	1,31E-01	-7,34E-05	2,00E-01
	%3,225 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum		%3,3 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum	
	1	2	1	2
1	-1,12E-14	2,86E-10	-1,14E-14	2,79E-10
2	7,33E-15	-3,86E-10	6,94E-15	-3,86E-10
3	9,26E-14	5,75E-10	8,93E-14	5,98E-10
4	2,40E-12	-4,07E-08	2,30E-12	-3,85E-08
5	8,45E-11	-2,94E-06	8,59E-11	-2,89E-06
6	-4,59E-11	3,75E-06	-4,33E-11	3,75E-06
7	-6,47E-10	-4,61E-06	-6,26E-10	-4,79E-06
8	-2,10E-08	4,47E-04	-2,03E-08	4,28E-04
9	-5,73E-08	2,47E-03	-5,44E-08	2,43E-03
10	1,31E-08	-2,84E-03	1,13E-08	-2,85E-03
11	3,28E-07	1,06E-03	3,23E-07	1,28E-03
12	-2,91E-05	-1,05E+00	-2,89E-05	-1,01E+00
13	1,91E-11	1,10E-07	1,86E-11	1,06E-07
14	-2,02E-11	-8,43E-08	-2,01E-11	-8,12E-08
15	2,33E-11	-3,41E-08	2,28E-11	-3,58E-08
16	2,06E-10	-7,04E-06	1,81E-10	-6,96E-06
17	-4,60E-08	-6,46E-03	-3,67E-08	-6,43E-03
18	1,15E-07	7,69E-03	1,16E-07	7,69E-03
19	-6,12E-07	-8,53E-03	-6,00E-07	-8,56E-03
20	-6,94E-05	2,10E-01	-6,81E-05	2,13E-01

Çizelge B.3 0,036 g/cm³ Gd İçeren Yakıtlar Reaktivite Uyum Eğrileri Katsayıları

	%2,0 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum		%3,0 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum	
	1	2	1	2
1	-4,80E-14	4,24E-10	-2,12E-14	1,73E-10
2	-5,28E-14	-4,08E-11	1,72E-14	-2,12E-10
3	2,27E-13	-4,33E-10	1,58E-13	6,23E-10
4	5,03E-12	-9,26E-08	2,13E-12	-3,37E-08
5	3,10E-10	-4,07E-06	1,56E-10	-2,38E-06
6	4,02E-10	1,38E-06	-1,14E-10	2,74E-06
7	-1,39E-09	3,58E-06	-1,09E-09	-3,92E-06
8	-4,23E-08	9,84E-04	-2,23E-08	4,68E-04
9	-2,95E-07	4,19E-03	-1,38E-07	2,39E-03
10	-5,13E-07	-1,63E-03	9,23E-08	-2,44E-03
11	3,82E-07	-1,10E-02	7,56E-07	-1,98E-03
12	-1,54E-05	-2,48E+00	-2,11E-05	-1,45E+00
13	2,29E-11	1,49E-07	2,02E-11	1,23E-07
14	-2,15E-11	-1,16E-07	-2,10E-11	-9,59E-08
15	3,43E-11	-8,08E-09	2,30E-11	-3,52E-08
16	7,77E-10	-7,49E-06	2,82E-10	-7,00E-06
17	-4,86E-08	-6,26E-03	-5,52E-08	-6,60E-03
18	1,01E-07	6,93E-03	1,25E-07	7,75E-03
19	-8,11E-07	-8,17E-03	-5,84E-07	-8,32E-03
20	-9,27E-05	1,29E-01	-7,25E-05	1,93E-01
	%3,225 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum		%3,3 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum	
	1	2	1	2
1	-1,96E-14	1,36E-10	-1,90E-14	1,26E-10
2	1,69E-14	-1,99E-10	1,72E-14	-1,95E-10
3	1,32E-13	7,54E-10	1,24E-13	7,88E-10
4	1,63E-12	-2,65E-08	1,48E-12	-2,44E-08
5	1,59E-10	-2,12E-06	1,49E-10	-2,04E-06
6	-1,16E-10	2,67E-06	-1,20E-10	2,64E-06
7	-9,37E-10	-4,99E-06	-8,86E-10	-5,28E-06
8	-1,86E-08	3,99E-04	-1,75E-08	3,79E-04
9	-1,58E-07	2,13E-03	-1,36E-07	2,04E-03
10	9,72E-08	-2,32E-03	1,01E-07	-2,28E-03
11	6,65E-07	-4,38E-04	6,29E-07	9,03E-06
12	-2,27E-05	-1,30E+00	-2,32E-05	-1,26E+00
13	1,88E-11	1,13E-07	1,93E-11	1,09E-07
14	-2,08E-11	-8,75E-08	-2,06E-11	-8,46E-08
15	2,17E-11	-4,15E-08	2,12E-11	-4,35E-08
16	2,11E-10	-6,73E-06	1,90E-10	-6,63E-06
17	-3,38E-08	-6,54E-03	-4,47E-08	-6,50E-03
18	1,29E-07	7,79E-03	1,29E-07	7,80E-03
19	-5,53E-07	-8,36E-03	-5,42E-07	-8,38E-03
20	-6,89E-05	2,00E-01	-6,78E-05	2,02E-01

B.2 Nötron Göç Alanları için Elde Edilen Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları

Çizelge B.4 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Nötron Göç Alanı Katsayıları

	%2,0 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum			%3,0 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-2,44E-19	2,42E-15	2,99E-11	-5,60E-19	2,62E-15	1,22E-11
2	-1,37E-18	1,07E-14	1,10E-10	-4,15E-19	6,00E-15	6,77E-11
3	4,56E-17	-4,39E-13	-5,40E-09	9,21E-17	-4,62E-13	-2,22E-09
4	2,45E-16	-1,91E-12	-2,03E-08	8,55E-17	-1,15E-12	-1,26E-08
5	-3,49E-15	3,29E-11	4,05E-07	-6,25E-15	3,38E-11	1,68E-07
6	-1,82E-14	1,39E-10	1,56E-06	-7,22E-15	9,12E-11	9,85E-07
7	1,41E-13	-1,32E-09	-1,64E-05	2,27E-13	-1,33E-09	-6,92E-06
8	7,26E-13	-5,37E-09	-6,47E-05	3,23E-13	-3,86E-09	-4,19E-05
9	-3,26E-12	3,02E-08	3,87E-04	-4,79E-12	3,05E-08	1,68E-04
10	-1,67E-11	1,16E-07	1,56E-03	-8,27E-12	9,27E-08	1,05E-03
11	4,31E-11	-3,97E-07	-5,38E-03	5,95E-11	-4,09E-07	-2,45E-03
12	2,24E-10	-1,33E-06	-2,12E-02	1,21E-10	-1,22E-06	-1,53E-02
13	-3,08E-10	2,76E-06	4,20E-02	-4,21E-10	3,03E-06	2,07E-02
14	-1,67E-09	5,92E-06	1,31E-01	-9,72E-10	7,28E-06	1,11E-01
15	1,04E-09	-7,95E-06	-1,47E-01	1,52E-09	-1,02E-05	-7,77E-02
16	3,11E-09	5,54E-05	5,41E-01	1,84E-09	3,36E-05	2,91E-01
17	-8,20E-10	4,91E-06	9,71E-02	-1,24E-09	6,87E-06	5,38E-02
18	-5,91E-08	1,81E-03	8,21E+01	-2,61E-08	1,64E-03	8,70E+01
	%3,225 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum			%3,3 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-6,32E-19	2,54E-15	1,01E-11	5,06E-19	1,36E-15	9,23E-12
2	-3,89E-21	6,03E-15	5,79E-11	-6,26E-20	6,75E-15	5,48E-11
3	1,01E-16	-4,44E-13	-1,83E-09	-7,34E-17	-2,67E-13	-1,68E-09
4	5,50E-18	-1,10E-12	-1,10E-08	1,64E-17	-1,22E-12	-1,04E-08
5	-6,55E-15	3,22E-11	1,39E-07	4,16E-15	2,16E-11	1,28E-07
6	-9,11E-16	8,41E-11	8,75E-07	-1,74E-15	9,15E-11	8,36E-07
7	2,24E-13	-1,26E-09	-5,74E-06	-1,14E-13	-9,34E-10	-5,28E-06
8	6,32E-14	-3,46E-09	-3,79E-05	9,63E-14	-3,72E-09	-3,65E-05
9	-4,34E-12	2,88E-08	1,40E-04	1,46E-12	2,34E-08	1,29E-04
10	-2,24E-12	8,20E-08	9,68E-04	-3,00E-12	8,69E-08	9,37E-04
11	4,82E-11	-3,85E-07	-2,06E-03	-5,25E-12	-3,38E-07	-1,92E-03
12	4,25E-11	-1,08E-06	-1,45E-02	5,22E-11	-1,14E-06	-1,41E-02
13	-2,93E-10	2,84E-06	1,78E-02	-5,20E-11	2,64E-06	1,68E-02
14	-4,33E-10	6,48E-06	1,08E-01	-4,96E-10	6,89E-06	1,06E-01
15	8,92E-10	-9,51E-06	-6,77E-02	4,50E-10	-9,25E-06	-6,43E-02
16	3,66E-10	3,27E-05	2,60E-01	5,96E-10	3,05E-05	2,51E-01
17	-5,86E-10	6,22E-06	4,72E-02	-4,03E-10	6,27E-06	4,49E-02
18	-2,12E-08	1,62E-03	8,80E+01	-2,04E-08	1,62E-03	8,84E+01

Çizelge B.5 0,02 g/cm³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Göç Alanı Katsayıları

%2,0 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum				%3,0 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	4,59E-19	-6,55E-16	6,04E-11	1,94E-19	-2,87E-16	3,93E-11
2	1,47E-18	-3,10E-14	6,74E-10	-9,39E-19	-5,57E-15	3,47E-10
3	-7,94E-17	1,04E-13	-1,07E-08	-3,35E-17	3,99E-14	-7,02E-09
4	-3,16E-16	5,93E-12	-1,24E-07	1,51E-16	1,18E-12	-6,55E-08
5	5,57E-15	-6,55E-12	7,89E-07	2,41E-15	-2,02E-12	5,19E-07
6	2,85E-14	-4,78E-10	9,57E-06	-9,41E-15	-1,05E-10	5,19E-06
7	-2,02E-13	1,99E-10	-3,10E-05	-9,32E-14	3,69E-11	-2,06E-05
8	-1,41E-12	2,11E-08	-4,00E-04	2,70E-13	5,18E-09	-2,25E-04
9	4,00E-12	-2,72E-09	7,04E-04	2,06E-12	4,16E-10	4,73E-04
10	4,11E-11	-5,53E-07	9,79E-03	-2,56E-12	-1,54E-07	5,75E-03
11	-4,14E-11	4,48E-09	-9,22E-03	-2,52E-11	-2,85E-08	-6,32E-03
12	-7,21E-10	8,76E-06	-1,42E-01	-4,47E-11	2,81E-06	-8,83E-02
13	1,89E-10	2,36E-07	6,56E-02	1,49E-10	4,40E-07	4,65E-02
14	7,32E-09	-8,19E-05	1,15E+00	1,32E-09	-3,08E-05	7,72E-01
15	-1,53E-10	-1,49E-06	-2,03E-01	-2,59E-10	-2,43E-06	-1,50E-01
16	-4,19E-08	4,55E-04	-4,00E+00	-1,33E-08	2,21E-04	-2,93E+00
17	-9,86E-11	1,83E-06	1,14E-01	7,17E-11	2,14E-06	9,14E-02
18	4,04E-08	1,02E-03	9,14E+01	1,58E-08	1,24E-03	9,47E+01
%3,225 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum				%3,3 Zenginlik 0,02 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-4,56E-21	3,15E-16	3,52E-11	2,38E-19	-4,60E-16	3,46E-11
2	-1,24E-18	-1,26E-15	2,91E-10	-8,82E-19	-2,32E-16	2,74E-10
3	-6,35E-18	-4,98E-14	-6,29E-09	-4,78E-17	8,37E-14	-6,18E-09
4	2,06E-16	4,34E-13	-5,55E-08	1,49E-16	2,51E-13	-5,25E-08
5	8,27E-16	3,54E-12	4,66E-07	3,94E-15	-6,20E-12	4,58E-07
6	-1,37E-14	-5,18E-11	4,45E-06	-1,01E-14	-3,81E-11	4,23E-06
7	-3,84E-14	-1,52E-10	-1,86E-05	-1,73E-13	2,38E-10	-1,82E-05
8	4,53E-13	3,09E-09	-1,95E-04	3,41E-13	2,54E-09	-1,86E-04
9	7,63E-13	4,27E-09	4,28E-04	4,39E-12	-5,02E-09	4,20E-04
10	-7,35E-12	-1,05E-07	5,07E-03	-5,51E-12	-9,15E-08	4,86E-03
11	-4,46E-12	-7,69E-08	-5,74E-03	-6,44E-11	5,50E-08	-5,63E-03
12	3,20E-11	2,10E-06	-7,93E-02	1,87E-11	1,91E-06	-7,64E-02
13	-4,63E-11	7,93E-07	4,26E-02	5,08E-10	-2,46E-07	4,18E-02
14	6,06E-10	-2,48E-05	7,07E-01	6,06E-10	-2,31E-05	6,87E-01
15	6,24E-10	-3,73E-06	-1,38E-01	-1,70E-09	-1,62E-08	-1,35E-01
16	-9,67E-09	1,91E-04	-2,74E+00	-9,17E-09	1,83E-04	-2,68E+00
17	-1,02E-09	3,27E-06	8,55E-02	1,14E-09	4,53E-07	8,38E-02
18	1,22E-08	1,27E-03	9,54E+01	1,15E-08	1,28E-03	9,57E+01

Çizelge B.6 0,036 g/cm³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Göç Alanı Katsayıları

%2,0 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum				%3,0 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	7,28E-20	-1,90E-15	8,26E-11	-3,98E-19	-4,06E-16	5,18E-11
2	-5,53E-18	1,09E-14	4,92E-10	-3,40E-18	1,20E-14	1,42E-10
3	-2,27E-17	3,38E-13	-1,47E-08	7,35E-17	6,31E-14	-9,28E-09
4	9,39E-16	-1,53E-12	-9,34E-08	6,04E-16	-1,96E-12	-2,99E-08
5	2,33E-15	-2,46E-11	1,08E-06	-5,56E-15	-3,96E-12	6,90E-07
6	-6,48E-14	7,40E-11	7,45E-06	-4,40E-14	1,27E-10	2,67E-06
7	-1,13E-13	9,45E-10	-4,25E-05	2,22E-13	1,28E-10	-2,76E-05
8	2,31E-12	-8,16E-10	-3,24E-04	1,69E-12	-4,00E-09	-1,30E-04
9	2,91E-12	-2,04E-08	9,64E-04	-5,02E-12	-2,15E-09	6,37E-04
10	-4,45E-11	-5,11E-08	8,35E-03	-3,65E-11	5,66E-08	3,81E-03
11	-3,97E-11	2,44E-07	-1,26E-02	6,43E-11	1,46E-08	-8,54E-03
12	4,17E-10	2,11E-06	-1,29E-01	4,25E-10	9,32E-09	-6,75E-02
13	2,67E-10	-1,49E-06	8,88E-02	-4,38E-10	3,99E-08	6,27E-02
14	-9,25E-10	-3,36E-05	1,13E+00	-2,24E-09	-1,03E-05	6,90E-01
15	-6,87E-10	3,96E-06	-2,71E-01	1,37E-09	-7,84E-07	-2,02E-01
16	-1,43E-08	2,91E-04	-4,54E+00	-7,92E-10	1,48E-04	-3,21E+00
17	4,70E-10	-2,49E-06	1,60E-01	-8,65E-10	5,82E-07	1,29E-01
18	2,04E-08	1,13E-03	9,48E+01	6,77E-09	1,30E-03	9,78E+01
%3,225 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum				%3,3 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-1,13E-18	7,34E-16	4,61E-11	-3,14E-19	-3,54E-16	4,47E-11
2	-3,04E-18	1,34E-14	8,78E-11	-2,99E-18	1,45E-14	7,18E-11
3	1,73E-16	-9,53E-14	-8,28E-09	6,14E-17	5,27E-14	-8,03E-09
4	5,34E-16	-2,17E-12	-2,00E-08	5,24E-16	-2,35E-12	-1,70E-08
5	-1,07E-14	4,51E-12	6,18E-07	-4,92E-15	-3,03E-12	5,99E-07
6	-3,87E-14	1,40E-10	1,91E-06	-3,78E-14	1,53E-10	1,68E-06
7	3,41E-13	-8,64E-11	-2,48E-05	2,08E-13	8,21E-11	-2,40E-05
8	1,49E-12	-4,49E-09	-9,96E-05	1,45E-12	-4,94E-09	-9,01E-05
9	-5,99E-12	2,25E-10	5,75E-04	-4,94E-12	-8,91E-10	5,57E-04
10	-3,23E-11	6,78E-08	3,08E-03	-3,11E-11	7,76E-08	2,85E-03
11	5,73E-11	1,21E-08	-7,76E-03	6,54E-11	-3,53E-09	-7,53E-03
12	3,82E-10	-1,78E-07	-5,74E-02	3,66E-10	-3,04E-07	-5,42E-02
13	-2,76E-10	-1,08E-07	5,75E-02	-4,43E-10	1,57E-07	5,59E-02
14	-2,10E-09	-8,13E-06	6,15E-01	-1,98E-09	-7,10E-06	5,91E-01
15	5,86E-10	6,95E-08	-1,87E-01	1,28E-09	-1,03E-06	-1,82E-01
16	1,77E-11	1,32E-04	-2,97E+00	-2,23E-10	1,26E-04	-2,90E+00
17	-1,11E-10	-3,17E-07	1,21E-01	-6,49E-10	5,11E-07	1,18E-01
18	5,52E-09	1,32E-03	9,85E+01	5,88E-09	1,33E-03	9,88E+01

B.3 Nötron Difüzyon Uzunlukları için Elde Edilen Uyum Eğrisi Fonksiyonlarının Katsayıları

Çizelge B.7 Gadolinyum İçermeyen Yakıtlar için Nötron Difüzyon Uzunlukları
Katsayıları

%2,0 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum				%3,0 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	6,40E-19	-2,07E-15	-5,70E-11	-4,22E-19	-1,86E-15	-1,94E-11
2	2,38E-18	1,73E-14	-4,56E-10	1,52E-18	3,68E-16	-2,13E-10
3	-1,01E-16	3,26E-13	1,04E-08	7,13E-17	3,20E-13	3,61E-09
4	-4,07E-16	-3,46E-12	8,36E-08	-2,89E-16	-9,85E-14	3,96E-08
5	6,57E-15	-2,03E-11	-7,93E-07	-4,93E-15	-2,25E-11	-2,82E-07
6	2,80E-14	2,94E-10	-6,40E-06	2,24E-14	1,34E-11	-3,09E-06
7	-2,32E-13	6,19E-10	3,27E-05	1,80E-13	8,25E-10	1,20E-05
8	-9,64E-13	-1,38E-08	2,64E-04	-9,12E-13	-1,06E-09	1,31E-04
9	4,80E-12	-8,35E-09	-7,90E-04	-3,71E-12	-1,65E-08	-3,06E-04
10	1,63E-11	3,88E-07	-6,29E-03	2,05E-11	4,88E-08	-3,27E-03
11	-5,82E-11	-8,18E-09	1,13E-02	4,34E-11	1,62E-07	4,71E-03
12	-8,08E-11	-6,56E-06	8,53E-02	-2,40E-10	-1,29E-06	4,75E-02
13	3,61E-10	1,56E-06	-9,08E-02	-2,72E-10	-3,73E-07	-4,21E-02
14	-1,23E-09	6,22E-05	-5,56E-01	1,06E-09	1,81E-05	-3,52E-01
15	-7,25E-10	-1,34E-05	3,26E-01	8,32E-10	-3,24E-06	1,68E-01
16	1,81E-08	-2,43E-04	-4,90E-01	4,30E-09	-1,04E-04	-4,57E-02
17	5,65E-10	1,28E-05	-2,29E-01	-6,12E-10	3,81E-06	-1,23E-01
18	1,66E-07	-4,55E-03	1,54E+02	1,28E-07	-3,71E-03	1,41E+02
%3,225 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum				%3,3 Zenginlik 0,0 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-5,54E-20	-1,07E-15	-1,63E-11	6,04E-19	-2,18E-15	-1,49E-11
2	7,60E-19	-1,56E-15	-1,81E-10	7,35E-19	-3,06E-15	-1,71E-10
3	9,72E-18	1,88E-13	3,02E-09	-1,01E-16	3,74E-13	2,78E-09
4	-1,43E-16	1,60E-13	3,42E-08	-1,31E-16	4,02E-13	3,23E-08
5	-7,32E-16	-1,34E-11	-2,36E-07	6,95E-15	-2,61E-11	-2,18E-07
6	1,13E-14	-3,78E-13	-2,70E-06	9,73E-15	-1,63E-11	-2,56E-06
7	2,96E-14	4,96E-10	1,01E-05	-2,52E-13	9,54E-10	9,36E-06
8	-4,69E-13	-6,44E-10	1,16E-04	-3,88E-13	-8,29E-11	1,10E-04
9	-6,53E-13	-9,89E-09	-2,57E-04	5,25E-12	-1,93E-08	-2,41E-04
10	1,08E-11	3,94E-08	-2,92E-03	8,58E-12	2,77E-08	-2,80E-03
11	7,11E-12	9,30E-08	4,01E-03	-6,32E-11	2,03E-07	3,77E-03
12	-1,25E-10	-1,11E-06	4,31E-02	-9,35E-11	-9,56E-07	4,15E-02
13	-2,94E-11	-7,56E-08	-3,64E-02	4,19E-10	-7,78E-07	-3,46E-02
14	4,10E-10	1,58E-05	-3,25E-01	1,98E-10	1,45E-05	-3,16E-01
15	3,39E-11	-3,28E-06	1,47E-01	-1,27E-09	-1,12E-06	1,41E-01
16	5,41E-09	-9,33E-05	5,83E-03	5,86E-09	-8,87E-05	1,80E-02
17	-5,16E-10	4,36E-06	-1,09E-01	8,85E-10	2,07E-06	-1,04E-01
18	1,18E-07	-3,55E-03	1,39E+02	1,15E-07	-3,50E-03	1,38E+02

Çizelge B.8 0,02 g/cm³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Difüzyon Uzunlukları Katsayıları

%2,0 Zenginlik 0,02 g/cm³ Gadolinyum				%3,0 Zenginlik 0,02 g/cm³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	3,95E-19	4,13E-15	-1,06E-10	6,70E-19	1,28E-15	-5,40E-11
2	-7,34E-18	1,62E-13	-1,71E-09	-6,05E-18	1,07E-13	-9,96E-10
3	-6,00E-17	-7,54E-13	1,89E-08	-1,04E-16	-2,53E-13	9,71E-09
4	1,32E-15	-2,92E-11	3,10E-07	1,06E-15	-1,93E-11	1,83E-07
5	3,51E-15	5,75E-11	-1,40E-06	6,50E-15	2,07E-11	-7,26E-07
6	-9,94E-14	2,19E-09	-2,34E-05	-7,74E-14	1,45E-09	-1,40E-05
7	-9,33E-14	-2,37E-09	5,54E-05	-2,08E-13	-9,13E-10	2,92E-05
8	4,03E-12	-8,85E-08	9,51E-04	3,04E-12	-5,89E-08	5,82E-04
9	8,17E-13	5,76E-08	-1,27E-03	3,57E-12	2,35E-08	-6,85E-04
10	-9,58E-11	2,09E-06	-2,25E-02	-6,95E-11	1,40E-06	-1,42E-02
11	1,14E-11	-8,32E-07	1,70E-02	-3,06E-11	-3,58E-07	9,43E-03
12	1,35E-09	-2,88E-05	3,10E-01	9,42E-10	-1,95E-05	2,03E-01
13	-2,90E-10	6,86E-06	-1,24E-01	8,34E-11	3,16E-06	-7,25E-02
14	-1,09E-08	2,22E-04	-2,33E+00	-7,32E-09	1,54E-04	-1,63E+00
15	1,83E-09	-2,67E-05	3,92E-01	2,24E-10	-1,32E-05	2,47E-01
16	4,77E-08	-8,10E-04	6,84E+00	3,18E-08	-6,00E-04	5,47E+00
17	-1,46E-09	1,70E-05	-2,27E-01	-2,25E-10	9,05E-06	-1,59E-01
18	1,08E-07	-3,42E-03	1,39E+02	8,26E-08	-2,80E-03	1,29E+02
%3,225 Zenginlik 0,02 g/cm³ Gadolinyum				%3,3 Zenginlik 0,02 g/cm³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-5,32E-20	2,05E-15	-4,67E-11	2,33E-19	1,25E-15	-4,44E-11
2	-5,28E-18	9,27E-14	-8,65E-10	-5,84E-18	8,89E-14	-8,24E-10
3	1,66E-17	-3,73E-13	8,39E-09	-3,86E-17	-2,25E-13	7,97E-09
4	9,43E-16	-1,69E-11	1,60E-07	1,04E-15	-1,62E-11	1,52E-07
5	-1,86E-15	2,84E-11	-6,28E-07	2,62E-15	1,69E-11	-5,97E-07
6	-6,98E-14	1,28E-09	-1,23E-05	-7,69E-14	1,23E-09	-1,18E-05
7	1,04E-13	-1,18E-09	2,53E-05	-9,45E-14	-6,89E-10	2,41E-05
8	2,78E-12	-5,24E-08	5,14E-04	3,05E-12	-5,06E-08	4,93E-04
9	-3,16E-12	2,85E-08	-5,95E-04	1,96E-12	1,67E-08	-5,66E-04
10	-6,43E-11	1,25E-06	-1,26E-02	-7,02E-11	1,21E-06	-1,21E-02
11	5,26E-11	-4,12E-07	8,25E-03	-2,38E-11	-2,46E-07	7,85E-03
12	8,77E-10	-1,77E-05	1,83E-01	9,52E-10	-1,72E-05	1,77E-01
13	-4,55E-10	3,44E-06	-6,40E-02	1,59E-10	2,19E-06	-6,12E-02
14	-6,84E-09	1,41E-04	-1,49E+00	-7,33E-09	1,38E-04	-1,45E+00
15	1,78E-09	-1,37E-05	2,21E-01	-4,37E-10	-9,50E-06	2,12E-01
16	2,97E-08	-5,59E-04	5,13E+00	3,10E-08	-5,47E-04	5,01E+00
17	-1,82E-09	1,00E-05	-1,45E-01	7,03E-10	5,92E-06	-1,39E-01
18	7,73E-08	-2,69E-03	1,27E+02	7,38E-08	-2,66E-03	1,26E+02

Çizelge B.9 0,036 g/cm³ Gd İçeren Yakıtlar için Nötron Difüzyon Uzunlukları Katsayıları

%2,0 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum				%3,0 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-8,11E-19	9,13E-15	-1,38E-10	-5,35E-19	4,77E-15	-7,01E-11
2	-1,33E-17	2,29E-13	-1,94E-09	-8,62E-18	1,26E-13	-8,48E-10
3	1,36E-16	-1,61E-12	2,45E-08	9,84E-17	-8,53E-13	1,26E-08
4	2,38E-15	-4,13E-11	3,54E-07	1,54E-15	-2,31E-11	1,60E-07
5	-9,29E-15	1,17E-10	-1,81E-06	-7,45E-15	6,33E-11	-9,38E-07
6	-1,77E-13	3,10E-09	-2,70E-05	-1,14E-13	1,77E-09	-1,26E-05
7	3,37E-13	-4,55E-09	7,12E-05	2,99E-13	-2,52E-09	3,76E-05
8	7,07E-12	-1,26E-07	1,11E-03	4,54E-12	-7,30E-08	5,43E-04
9	-7,06E-12	1,02E-07	-1,62E-03	-6,79E-12	5,81E-08	-8,75E-04
10	-1,64E-10	2,96E-06	-2,69E-02	-1,05E-10	1,77E-06	-1,38E-02
11	8,69E-11	-1,33E-06	2,12E-02	8,76E-11	-7,80E-07	1,19E-02
12	2,23E-09	-4,09E-05	3,81E-01	1,44E-09	-2,53E-05	2,10E-01
13	-6,20E-10	9,65E-06	-1,50E-01	-6,12E-10	5,86E-06	-8,93E-02
14	-1,70E-08	3,15E-04	-3,00E+00	-1,11E-08	2,05E-04	-1,82E+00
15	2,22E-09	-3,22E-05	4,61E-01	2,00E-09	-2,07E-05	2,96E-01
16	6,73E-08	-1,17E-03	1,04E+01	4,53E-08	-8,29E-04	7,19E+00
17	-1,41E-09	1,78E-05	-2,61E-01	-1,29E-09	1,34E-05	-1,93E-01
18	6,90E-08	-2,65E-03	1,29E+02	5,57E-08	-2,24E-03	1,22E+02
%3,225 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum				%3,3 Zenginlik 0,036 g/cm ³ Gadolinyum		
	1	2	3	1	2	3
1	-7,30E-21	3,78E-15	-5,97E-11	-9,19E-19	4,09E-15	-5,58E-11
2	-7,04E-18	1,03E-13	-6,70E-10	-7,52E-18	9,66E-14	-6,17E-10
3	-6,89E-18	-6,62E-13	1,07E-08	1,56E-16	-7,26E-13	1,00E-08
4	1,28E-15	-1,91E-11	1,28E-07	1,36E-15	-1,79E-11	1,18E-07
5	1,01E-15	4,82E-11	-8,02E-07	-1,10E-14	5,35E-11	-7,52E-07
6	-9,64E-14	1,47E-09	-1,02E-05	-1,02E-13	1,39E-09	-9,48E-06
7	-5,56E-14	-1,89E-09	3,22E-05	4,18E-13	-2,12E-09	3,03E-05
8	3,91E-12	-6,18E-08	4,47E-04	4,11E-12	-5,86E-08	4,17E-04
9	1,51E-12	4,30E-08	-7,53E-04	-9,17E-12	4,89E-08	-7,10E-04
10	-9,23E-11	1,52E-06	-1,16E-02	-9,66E-11	1,45E-06	-1,09E-02
11	-2,17E-11	-5,77E-07	1,03E-02	1,18E-10	-6,65E-07	9,76E-03
12	1,28E-09	-2,21E-05	1,80E-01	1,33E-09	-2,12E-05	1,71E-01
13	1,54E-10	4,39E-06	-7,83E-02	-8,37E-10	5,11E-06	-7,46E-02
14	-1,00E-08	1,83E-04	-1,60E+00	-1,04E-08	1,76E-04	-1,53E+00
15	-4,44E-10	-1,58E-05	2,63E-01	2,81E-09	-1,85E-05	2,52E-01
16	4,16E-08	-7,57E-04	6,54E+00	4,28E-08	-7,37E-04	6,33E+00
17	6,77E-10	1,01E-05	-1,74E-01	-2,04E-09	1,25E-05	-1,68E-01
18	5,30E-08	-2,18E-03	1,20E+02	4,90E-08	-2,15E-03	1,20E+02

EK.C RPMHEX Kaynak Kodu

Main.f

```
program rpm2dhunem
implicit real (a-h,o-z)
parameter(n=8)
character*80 ara
character(len=50) FMT
integer ITT(0:8,0:8),BARods(0:8,0:8)
real rq1(0:8,0:8),ExpData(0:8,0:8)
open(1,file='InputOutput/rpm2dhunem1.inp',form='formatted',
&status='old')
open(3,file='InputOutput/rpmpop.inp',form='formatted',
&status='old')
open(20,file='InputOutput/rpm2dhunem.out',form='formatted'
&,status='unknown')
open(22,file='InputOutput/BARods.inp',form='formatted'
&,status='old')
do i=1,8
  read(3,*)(itt(i,j),j=1,8)
  read(22,*)(BARods(i,j),j=1,8)
  read(23,*)(ExpData(i,j),j=1,8)
  write(FMT,*)2*i+2
  write(*, "(" // adjustl(FMT) // "X,9(l4))" ) (itt(i,j),j=1,8)
  write(*, "(" // adjustl(FMT) // "X,9(l4))" ) (BARods(i,j),j=1,8)
end do
call MakeMirrorSymmetryInt(itt)
do i=1,8
  do j=1,8
    read(8,99)rq1(i,j)
  end do
end do
call garpmy(n,itt,rq1,BARods)
99 FORMAT(40X,F7.4,2X,i3)
end
```

```
c *****
c ***** Subroutine garpmy *****
c *****
c
subroutine garpmy(n,itt,rq1,BARods)
implicit real (a-h,o-z)
integer s1,s2,s3,s4,s9
integer ITT(0:8,0:8),IAN(n),xna
character*80 ara
character(len=50) FMT
real bx,bs,xils
real fth(0:8,0:8)
real by,W,th1,RQ1(0:8,0:8),pow1,tr(0:6)
real tl(0:6)
real f2old(0:8,0:8)
real f2k(0:8,0:8)
real th(0:8),ts(0:8),trtemp(0:8,0:8),thtemp(0:8,0:8)
real f2(0:8,0:8),F(0:8,0:8),F1(0:8,0:8),tltemp(0:8,0:8)
real bn(n),bb(n),fold(0:8,0:8)
real sb(0:8,0:8)
real c2(0:8)
do i=0,6
  tr(i)=0.
  th(i)=0.
  tl(i)=0.
```

```

enddo
do i=0,8
  do j=0,8
    f2old(i,j)=0.
    fold(i,j)=0.
    f(i,j)=0.
    fth(i,j)=0.
    f1(i,j)=0.
    f2(i,j)=0.
    f2k(i,j)=0.
    sb(i,j)=0.
  enddo
enddo
do i=0,8
  do j=0,8
    if(itt(i,j).ne.0)then
      f(i,j)=1.
    else
      f(i,j)=0.
    endif
  enddo
  write(FMT,*) 5*i+2
enddo
call countasstype(n,ian,itt,xna)
read(1,'(30x,i3)') NI
read(1,'(30x,f7.3)') W
write(*,*) NI,w
conteski=0.
burendpo=0.
cr=0.
b=0.
it=0
sp=0.1
cont=1000.
read(1,'(a80)',end=9919)ara
read(1,'(30x,f7.3)')xils
read(1,'(30x,i3)') icontboc
write(*,*) ara,xils,icontboc
if (icontboc.ne.1) then
  burendpo=0.
  bx=0.0
  write(*,*) burendpo,bx
else
  bx=0.
  burendpo=0.
endif
write(*,*) 'step1',bx,burendpo
2101 continue
2100 continue
do i=1,8
  do j=1,8
    if(itt(i,j).ne.0)then
      fold(i,j)=f(i,j)
    else
      fold(i,j)=0.
    endif
  enddo
enddo
do i=1,8
  do j=1,8

```

```

        if(itt(i,j).ne.0)then
            f2old(i,j)=f2(i,j)
        else
            f2old(i,j)=0.
        endif
    enddo

    enddo
    call MakeMirrorSymmetryReal(f2)
    fl=0.
    ft=0.
    fr=0.
    conteski=cont
    call solbcalc(itt,f,f2,sb,sp,cont,xils,rq1,BARods)
    cr=sp
    call MakeMirrorSymmetryReal(fold)
    call reactivitecalc(xna,itt,rq1,f,f2,sb,cr,sp,cont,xils
&,BARods)
    call ppfcalcterm(itt,f,f2,ttemp,fth,XNA,cont,xils,BARods)
    call convcheck(icontboc,w,IT,NI,F,FOLD,F2,f2old,cont,
&conteski,icont,bstep,f2k,f1)
    if(icont.eq.1) go to 2100
    write(*,*) 'step2'
    call controlproc(itt,n,icontboc,b,f,f2k,f1,f2,it,iconteoc
&,bx,bstep,burendpo,cr,xils)
    icontboc=0
    if(iconteoc.eq.1) goto 9919
    goto 2100
    return
9919 stop
    return
end
C  ++++++
C  ***** Ending Subroutine garmy *****
C  ++++++
C  *****
C  ***** Subroutine solbcalc *****
C  *****
subroutine solbcalc(itt,f,f2,sb,sp,cont,xils,rq1,BARods)
character(len=50) FMT
real f(0:8,0:8),dumyarr(0:2)
real f2(0:8,0:8)
real sb(0:8,0:8),rq1(0:8,0:8),ZBR(0:8,0:8)
integer itt(0:8,0:8)
integer :: AssemblyID,i,BARodNumber,BARods(0:8,0:8)
real :: DummyArray(0:2),Reactivity
itcheck=0
1256 continue
    fs=0.
    ft=0.
    fl=0.

    itcheck=itcheck+1
    do i=1,7
        if (i==1) then
            k=1;l=7
            write(FMT,*)15-2*i
        else
            k=2;l=9-i

```

```

        write(FMT,*)24-2*I+3*I
    end if
    nls=0          ! To determine Number of Leaked Surface of the Assembly
    do j=k,l
        if (itt(i-1,j+1)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        if (itt(i,j+1)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        if (itt(i+1,j)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        if (itt(i+1,j-1)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        BARodNumber = BARods(i,j)
        DummyArray(0)=f2(i,j)
        DummyArray(1)=f(i,j)
        DummyArray(2)=0.

        if ( (itt(i,j) == 5).or.(itt(i,j) == 6).or.
&(itt(i,j) == 7).or.(itt(i,j) == 8) ) then
            AssemblyID = itt(i,j) - 4
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
            ReactivityNonGdRod = Reactivity
            AssemblyID = itt(i,j)
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
            ReactivityGdRod = Reactivity
            ZeroBoronReactivity =( (312-BARodNumber)*ReactivityNonGdRod
& + BARodNumber * ReactivityGdRod ) / 312

            DummyArray(2)=cont
            AssemblyID = itt(i,j) - 4
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
            ReactivityNonGdRod = Reactivity
            AssemblyID = itt(i,j)
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
            ReactivityGdRod = Reactivity
            Reactivity =( (312-BARodNumber)*ReactivityNonGdRod
& + BARodNumber * ReactivityGdRod ) / 312
            sb(i,j)=ZeroBoronReactivity - Reactivity
        elseif ( (itt(i,j) == 9).or.(itt(i,j) == 10).or.
&(itt(i,j) == 11).or.(itt(i,j) == 12) ) then
            AssemblyID = itt(i,j) - 8
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
            ReactivityNonGdRod = Reactivity
            AssemblyID = itt(i,j)
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
            ReactivityGdRod = Reactivity
            ZeroBoronReactivity =( (312-BARodNumber)*ReactivityNonGdRod
& + BARodNumber * ReactivityGdRod ) / 312
            DummyArray(2)=cont
            AssemblyID = itt(i,j) - 8

```

```

        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        ReactivityNonGdRod = Reactivity

        AssemblyID = itt(i,j)
        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        ReactivityGdRod = Reactivity
        Reactivity = ( (312-BARodNumber)*ReactivityNonGdRod
&      + BARodNumber * ReactivityGdRod ) / 312
        sb(i,j)=ZeroBoronReactivity - Reactivity
        else
            AssemblyID = itt(i,j)
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,Reactivity)
            ZeroBoronReactivity = Reactivity
            DummyArray(2)=cont
            call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,Reactivity)
            Reactivity=Reactivity
            sb(i,j)=ZeroBoronReactivity - Reactivity
        endif
        if ((i==1).and.(j==1)) then
            ft = ft + f(i,j)
            fs = fs + f(i,j)*sb(i,j)
        else
            ft = ft + 6. * f(i,j)
            fs = fs + 6. * f(i,j) * ( sb(i,j) )
        end if
    end do
end do
spcal= fs /ft
conteski1=cont
cont=cont+(sp-spcal)*0.1*cont
if (itcheck.gt.200) then
    write(*,*)'System cannot be converged'
    return
end if
if (abs(cont-conteski1).gt.0.1) then
    goto 1256
else
end if
call MakeMirrorSymmetryReal(sb)
return
end

C  ++++++
C  ***** Ending Subroutine solbcalc *****
C  ++++++
C  *****
C  ***** Subroutine reactivitecalc *****
C  *****
subroutine reactivitecalc(xna,itt,rq1,f,f2,sb,cr,sp,cont,
% xils,BARods)
implicit real (a-h,o-z)
character(len=50) FMT
integer s1,s2,s3,s4,s9
integer ITT(0:8,0:8),xna
real rq1(0:8,0:8),tr(0:6)
real th(0:6),ts(0:6),trtemp(0:8,0:8),thtemp(0:8,0:8)
real f(0:8,0:8),ftmp(0:8,0:8)
real sb(0:8,0:8),c2temp(0:8,0:8)
real c2(0:6),f2(0:8,0:8),DummyArray(0:2),outsns(3)

```

```

real :: h,Reactivity,MigrationArea,Upper,Lower,w,br,GammaWeight
real :: TethaR,Gamma,LeakageReactivity(0:8,0:8)
real :: MigrationAreaGdRod,MigrationAreaNonGdRod
real :: ReactivityGdRod,ReactivityNonGdRod
integer :: AssemblyID, BARodNumber,BARods(0:8,0:8)

h=23.6    ! h=23.6 assembly pitch
ft=0.
fl=0.
fr=0.
GammaWeight =3.0
LeakageReactivity = 0.
do i=1,8
  do j=1,8
    thtemp(i,j)=0.
    ftmp(i,j)=f(i,j)
    trtemp(i,j)=0.
  enddo
enddo
do i=1,8
  do j=1,8
    DummyArray(0)=f2(i,j)
    DummyArray(1)=f(i,j)
    DummyArray(2)=0.
    BARodNumber = BARods(i,j)
    if (itt(i,j).eq.0) then
      trtemp(i,j)=0.
      thtemp(i,j)=0.
      c2temp(i,j)=0.
    else
      if ( (itt(i,j) == 5).or.(itt(i,j) == 6).or.
&(itt(i,j) == 7).or.(itt(i,j) == 8) ) then
        AssemblyID = itt(i,j) - 4
        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        ReactivityNonGdRod = Reactivity

        call MigrationAreaCalculate(DummyArray,
&AssemblyID,MigrationArea)
        MigrationAreaNonGdRod=MigrationArea
        AssemblyID = itt(i,j)
        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        ReactivityGdRod = Reactivity
        call MigrationAreaCalculate(DummyArray,
&AssemblyID,MigrationArea)
        MigrationAreaGdRod=MigrationArea
        MigrationArea = ( (312-BARodNumber)*
& MigrationAreaNonGdRod + BARodNumber * MigrationAreaGdRod )/312
        trtemp(i,j) =( (312-BARodNumber)*ReactivityNonGdRod
&
        + BARodNumber * ReactivityGdRod ) / 312
      elseif ( (itt(i,j) == 9).or.(itt(i,j) == 10).or.
&(itt(i,j) == 11).or.(itt(i,j) == 12) ) then
        AssemblyID = itt(i,j) - 8
        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        ReactivityNonGdRod = Reactivity
        call MigrationAreaCalculate(DummyArray,
&AssemblyID,MigrationArea)
        MigrationAreaNonGdRod=MigrationArea

```

```

        AssemblyID = itt(i,j)
        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        ReactivityGdRod = Reactivity
        call MigrationAreaCalculate(DummyArray,
&AssemblyID,MigrationArea)
        MigrationAreaGdRod=MigrationArea
        MigrationArea = ( (312-BARodNumber)*
& MigrationAreaNonGdRod + BARodNumber * MigrationAreaGdRod )/312
        trtemp(i,j) = ( (312-BARodNumber)*ReactivityNonGdRod
& + BARodNumber * ReactivityGdRod ) / 312
    else
        AssemblyID = itt(i,j)
        call ReactivityCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&Reactivity)
        trtemp(i,j) = Reactivity
        call MigrationAreaCalculate(DummyArray,
&AssemblyID,MigrationArea)
        MigrationArea = MigrationArea
    end if
    thtemp(i,j)= 1.+ 0.25*(h**2 / MigrationArea)
end if
end if
enddo
enddo
call MakeMirrorSymmetryReal(trtemp)
call MakeMirrorSymmetryReal(thtemp)
call MakeMirrorSymmetryReal(ftmp)
do i=1,7
    if (i==1) then
        k=1;l=7
        write(FMT,*)15-2*i
    else
        k=2;l=9-i
        write(FMT,*)24-2*i+3*i
    end if
    nls=0
    do j=k,l
        if (itt(i-1,j+1)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        if (itt(i,j+1)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        if ( itt(i+1,j)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
        if ( itt(i+1,j-1)==0) then
            nls = nls + 1
        end if
    end if

    Gamma = 0.

    if ( nls.ne.0) then
        Gamma = 1. / 6. * GammaWeight

        TethaR = (6. * thtemp(i,j) - (nls * Gamma)) / (6-nls)
    else
        TethaR = thtemp(i,j) !!! TethaR = Tetha0
    end if
    LeakageReactivity(i,j) = nls * (1.- Gamma)

```

```

&          / (6.*thtemp(i,j) - nls * Gamma)
br = spcal
  f(i,j) = (1./(6-nls))
&      * ( ftmp(i-1,j) * (1. - trtemp(i-1,j) -sb(i-1,j) )
&      + ftmp(i-1,j+1) * (1. - trtemp(i-1,j+1) -sb(i-1,j+1))
&      + ftmp(i,j-1) * (1. - trtemp(i,j-1) -sb(i,j-1))
&      + ftmp(i,j+1) * (1. - trtemp(i,j+1) -sb(i,j+1))
&      + ftmp(i+1,j+1) * (1. - trtemp(i+1,j+1) -sb(i+1,j+1))
&      + ftmp(i+1,j) * (1. - trtemp(i+1,j) -sb(i+1,j)) )
&/ (1. - TethaR*( trtemp(i,j)-sb(i,j) - LeakageReactivity(i,j)))
  end do
end do
fl = 0.
ft = 0.
do i=1,7
  if (i==1) then
    k=1;l=7
    write(FMT,*)15-2*i
  else
    k=2;l=9-i
    write(FMT,*)24-2*i+3*i
  end if

  do j=k,l

    if ((i==1).and.(j==1)) then
      ft = ft + f(i,j)
      fl = fl + f(i,j) * LeakageReactivity(i,j)
      fr = fr + f(i,j) * (trtemp(i,j) - sb(i,j) )
    else
      ft = ft + 6. * f(i,j)
      fl = fl + 6. * f(i,j) * LeakageReactivity(i,j)
      fr = fr + 6. * f(i,j) * (trtemp(i,j) -sb(i,j) )
    end if
  end do
end do
rc=fr/ft      ! Infinite Core Reactivity - Soluble Poison Reactivity
rl=fl/ft      ! Leakage Reactivity
cr=rc-rl      ! Core Reactivity (System Reactivity)
sp=cr         ! New Soluble Poison Reactivity

ftot = 0.
do i=7,1,-1
  if (i==1) then
    k=1;l=7
    write(FMT,*)15-2*i
  else
    k=2;l=9-i
    write(FMT,*)24-2*i+3*i
  end if
  do j=k,l
    F(l,j)=F(l,j)*163./ft
  end do
end do
call MakeMirrorSymmetryReal(f)
return
end
C ++++++
C ***** Ending Subroutine reactivitecalc *****
C ++++++

```

```

C *****
C ***** Subroutine ppfcalcterm *****
C *****
subroutine ppfcalcterm(itt,f,f2,tltemp,fth,xna,cont,xils,
&BARods)
character(len=50) FMT
integer itt(0:8,0:8)
real f(0:8,0:8),fth(0:8,0:8),tltemp(0:8,0:8),tl(0:6)
real DummyArray(0:2),f2(0:8,0:8)
integer :: AssemblyID,BARods(0:8,0:8)
real :: DiffusionLength,h,Lthermal,DiffusionLengthGdRod
real :: DiffusionLengthNonGdRod,ft

h=23.6
fth=f
do i=1,8
  do j=1,8
    DummyArray(0)=f2(i,j)
    DummyArray(1)=f(i,j)
    DummyArray(2)=cont
    BARodNumber = BARods(i,j)
    if (itt(i,j).eq.0) then
      tltemp(i,j) = 0.
    else
      if ( (itt(i,j) == 5).or.(itt(i,j) == 6).or.
&(itt(i,j) == 7).or.(itt(i,j) == 8) ) then
        AssemblyID = itt(i,j) - 4
        call DiffusionLengthCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&DiffusionLength)
        DiffusionLengthNonGdRod = DiffusionLength
        AssemblyID = itt(i,j)
        call DiffusionLengthCalculate(DummyArray,AssemblyID,
&DiffusionLength)
        DiffusionLengthGdRod = DiffusionLength

        Lthermal =( (312-BARodNumber)*DiffusionLengthNonGdRod
& +BARodNumber * DiffusionLengthGdRod ) / 312

        elseif ( (itt(i,j) == 9).or.(itt(i,j) == 10).or.
& (itt(i,j) == 11).or.(itt(i,j) == 12) ) then
          AssemblyID = itt(i,j) -8
          call DiffusionLengthCalculate(DummyArray,AssemblyID,
& DiffusionLength)
          DiffusionLengthNonGdRod = DiffusionLength
          AssemblyID = itt(i,j)
          call DiffusionLengthCalculate(DummyArray,AssemblyID,
& DiffusionLength)
          DiffusionLengthGdRod = DiffusionLength

          Lthermal =( (312-BARodNumber)*DiffusionLengthNonGdRod
& +BARodNumber * DiffusionLengthGdRod ) / 312
          else
            AssemblyID = itt(i,j)
            call DiffusionLengthCalculate(DummyArray,AssemblyID,
& DiffusionLength)
            Lthermal = DiffusionLength
            end if
            tltemp(i,j) = 4. * Lthermal / h
          end if
    end if
  end if
end do

```

```

        enddo
    enddo
    call MakeMirrorSymmetryReal(tltemp)
    fl = 0.
    ft = 0.
    do i=1,7
        if (i==1) then
            k=1;l=7
            write(FMT,*)15-2*i
        else
            k=2;l=9-i
            write(FMT,*)24-2*i+3*i
        end if
        do j=k,l

            f(i,j) = fth(i,j) * ( 1. - tltemp(i,j)*
&                (tltemp(i,j)/2.) * (6.- nls) / 6.)
&    + (tltemp(i,j)/2.) * (1./6.)
&    * (      fth(i-1,j) * tltemp(i-1,j)
&        + fth(i-1,j+1) * tltemp(i-1,j+1)
&        + fth(i,j-1) * tltemp(i,j-1)
&        + fth(i,j+1) * tltemp(i,j+1)
&        + fth(i+1,j+1) * tltemp(i+1,j+1)
&        + fth(i+1,j) * tltemp(i+1,j)      )
            if ((i==1).and.(j==1)) then
                ft = ft + f(i,j)
            else
                ft = ft + 6. * f(i,j)
            end if
        end do
    end do
    do i=1,8
        do j=1,8
            f(i,j)=(f(i,j)/ft)*163.
        enddo
        write(FMT,*) i*4+2
    enddo
    return
end

C  ++++++
C  ***** Ending Subroutine ppfcaltterm *****
C  ++++++
C  *****
C  ***** Subroutine convcheck *****
C  *****
subroutine convcheck(iconboc,w,IT,NI,F,FOLD,F2,f2old,cont,
%conteski,icont,bstep,f2k,f1)
character(len=50) FMT
real F(0:8,0:8),FOLD(0:8,0:8),fdummy(0:8,0:8),f2dummy(0:8,0:8)
real F2(0:8,0:8),F2OLD(0:8,0:8),F2k(0:8,0:8),F1(0:8,0:8)
it=it+1
icont=1
do i=7,1,-1
    if (i==1) then
        k=1;l=7
        write(FMT,*)15-2*i
    else
        k=2;l=9-i
        write(FMT,*)28-2*i+4*i
    end if

```

```

c      write(*,"(//adjustl(FMT)//"X,9(F15.5))")(f(i,j),j=k,l)
end do
if (icontboc.eq.1) then
  if (it.GT.NI) then
    icont=0
    return
  end if
  do i=1,7
    if (i==1) then
      k=1;l=7
      write(FMT,*)15-2*i
    else
      k=2;l=9-i
      write(FMT,*)24-2*i+3*i
    end if

    do j=k,l
      if (abs(fold(i,j)-f(i,j)).gt.0.001) then
        icont=1
        return
      end if
    end do
  end do
  if(abs(conteski-cont).gt.0.1) then
    icont=1
    return
  end if
  icont=0
  return
end if
do i=1,8
  do j=1,8
    f2(i,j)=f2k(i,j)+(f1(i,j)+f(i,j))/2.* bstep
  end do
end do
icont=1
if (it.GT.NI) then
  icont=0
  return
end if
do i=1,7
  if (i==1) then
    k=1;l=7
    write(FMT,*)15-2*i
  else
    k=2;l=9-i
    write(FMT,*)24-2*i+3*i
  end if

  do j=k,l
    if(abs(f(i,j)-fold(i,j)).gt.0.001) then
      icont=1
      return
    end if
  end do
end do
do i=1,7
  if (i==1) then
    k=1;l=7
    write(FMT,*)15-2*i
  end if
end do

```

```

        else
            k=2;l=9-i
            write(FMT,*)24-2*l+3*i
        end if

        do j=k,l
            if(abs(f2(i,j)-f2old(i,j)).gt.0.01) then
                icon=1
                return
            end if
        end do
    end do

    if (abs(conteski-cont).gt.0.1) then
        icon=1
        return
    end if
    icon=0
    return
end

C  ++++++
C  ***** Ending Subroutine convcheck *****
C  ++++++
C  *****
C  ***** Subroutine countasstype *****
C  *****

subroutine countasstype(n,ian,itt,xna)
integer ian(n),ITT(0:8,0:8),k,i,j,xna
xna=0
print *, '*****Assembly Types and Counts*****'
do i=1,n
    ian(i)=0
end do
do k=1,5
    do i=1,8
        do j=1,8
            if (itt(i,j)==(k-1)) then
                ian(k)=ian(k)+1
                if ((k-1).ne.0) then
                    xna=xna+1
                end if
            end if
        end do
    end do
    write(*,*) 'Assembly type =',k-1,'    There are',ian(k),
&    ' assemblies'
end do
return
end

C  ++++++
C  ***** Ending Subroutine countasstype *****
C  ++++++
C  *****
C  ***** Subroutine controlproc *****
C  *****

subroutine controlproc(itt,n,icontboc,b,f,f2k,f1,f2,it,iconteoc
&,bx,bstep,burendpo,cr,xils)
character(len=50) FMT
real f(0:8,0:8),f2k(0:8,0:8)
real f1(0:8,0:8),f2(0:8,0:8)

```

```

real bb(n),bn(n),burendpo,bx
integer itt(0:8,0:8)
character*80 ara
if(cr.le.0.) goto 1111
it=0
read(1,'(a80)',end=9919)ara
read(1,'(30x,f7.3)')xils
read(1,'(30x,i3)') icontboc
write(FMT,*) i*4+2
if (icontboc.eq.1) then
  bx=0.
  bstep=0.
  burendpo=b
  do l=0,8
    do J=i,8
      F1(l,J)=F(l,J)
      f2k(i,j)=f2(i,j)
      f2(i,j)=f2k(i,j) + bstep*f(i,j)
    enddo
  enddo
  return
else
  read(1,'(30x,f7.3)')burendpo
  bx=burendpo-b
  bstep=bx
  b=b+bx
  write(*,*) 'Bstep',bstep
  do l=0,8
    do J=0,8
      F1(l,J)=F(l,J)
      f2k(i,j)=f2(i,j)
      f2(i,j)=f2k(i,j) + bstep*f(i,j)
    enddo
  enddo
  return
endif
1111 write(20,*)cr,b, 'cr is less than zero'
  iconteoc=1
3333 continue
  iconteoc=1
  return
9919 iconteoc=1
  return
end

C  ++++++
C  ***** Ending Subroutine outputproc *****
C  ++++++
C  *****
C  ***** Subroutine outputproc *****
C  *****
subroutine outputproc(icontboc,b,fbx,bs,xils,f2,it,cont)
real f(0:8,0:8),f2(0:8,0:8)
pow1=0.
do J=1,8
  do l=1,J
    if(f(i,j).gt.pow1)then
      pow1=f(i,j)
    endif
  enddo

```

```

enddo
if (icontboc.eq.1) then
write(20,*)'burnup=',b,pow1
do i=1,8
  write(20, '(8f9.4)')(f(i,j), j=1,8)
enddo
write(20,*)cont,' ppm'
write(20,*)'iteration number'
write(20,*)it
else
write(20,*)'burnup=', b,pow1
do i=1,8
  write(20, '(8f9.4)')(f(i,j), j=1,8)
enddo
write(20,*)cont,' ppm'
write(20,*)'burnup each ass'
do i=1,6
  write(20, '(8f7.2)')(f2(i,j), j=1,8)
enddo
write(20,*)it
endif
return
end
C ++++++
C ***** Ending Subroutine outputproc *****
C ++++++

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman Şahin ÇELİKTEN

Doğum Yeri : Konya

Doğum Yılı : 1984

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise : Konya-Ereğli Cumhuriyet Lisesi(1998-2001)

Lisans:Hacettepe Üniveristesi Nükleer Enerji Mühendisliği

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrubesi

2008-...:Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği.