

**BUHAR ÜRETECİ TÜP KIRILMASI KAZASI
KOŞULLARINDA NÜKLEER YAKIT GÜVENİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

**ANALYSIS OF NUCLEAR FUEL RELIABILITY UNDER
STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE ACCIDENT
CONDITIONS**

FATMA BURCU TAŞ

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

NÜKLEER ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2012

Bu çalışmayı,

bir parçası olmaktan her zaman gurur duyduğum ve duyacağım

canım aileme ithaf ediyorum...

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

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

Başkan :.....

Prof. Dr. Üner ÇOLAK

Üye (Danışman) :.....

Yard. Doç. Şule ERGÜN

Üye :.....

Doç. Dr. Cemal Niyazi SÖKMEN

Üye :.....

Doç. Dr. Cemil KOÇAR

Üye :.....

Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adil DENİZLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BUHAR ÜRETECİ TÜP KIRILMASI KAZASI KOŞULLARINDA NÜKLEER YAKIT GÜVENİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Fatma Burcu Taş

ÖZ

Bu çalışmada; Basınçlı Su Reaktörleri'nde (PWR) nükleer yakıt bütünlüğünün bozulması açısından risk oluşturabileceği bilinen, Buhar Üretici Tüp Kırılması (SGTR) kazası koşullarında, nükleer yakıt güvenilirliğinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Sözkonusu kaza koşullarında, nükleer yakıt performansının incelenmesi için FRAPTRAN-1.4 geçiş rejimi yakıt performans kodu kullanılmıştır. FRAPTRAN-1.4 çözümlemelerinde yakıt çubuğu davranışının belirlenmesi için gerekli olan sistemin rejime karşı verdiği tepki ve sınır koşulları RELAP5/SCDAP Mod3.4 ve FRAPCON-3.4a kodlarıyla hesaplanmıştır. SGTR kazasının ısıl hidrolik benzeşimi, 1991 yılında Mihama nükleer güç santralinin ikinci ünitesinde meydana gelen SGTR kazasının temel alındığı bir kaza senaryosu üzerinden RELAP5/SCDAP Mod3.4 kullanarak gerçekleştirilmiştir ve normal işletme koşulları, FRAPCON-3.4a ile modellenmiş ve benzeşimi yapılmıştır. FRAPTRAN-1.4 için gerekli veriler elde edilmiş ve sonra da geçiş rejimi benzeşimini gerçekleştirmek ve yakıt güvenilirliğini çözümlemek amacıyla kullanılmıştır.

Çalışmanın sonuçlanmasıyla, incelenen koşul için yakıt davranışı tespit edilerek yakıt bütünlüğünün hangi durumlarda bozulmaya uğradığı, bu bozulmaların hangi nedenlerle oluştuğu bilgilerine ulaşılmış ve bu sayede yakıt güvenilirliği çözümü gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yakıt güvenilirliği, Yakıt davranışı, Nükleer yakıt, Buhar üretici tüp kırılması kazası, Mihama Ünite 2, FRAPCON-3.4a, FRAPTRAN-1.4, RELAP5/SCDAP Mod3.4.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şule ERGÜN, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

ANALYSIS OF NUCLEAR FUEL RELIABILITY OF NUCLEAR FUEL UNDER STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE ACCIDENT CONDITIONS

Fatma Burcu Taş

ABSTRACT

In this study; it is aimed to determine the reliability of nuclear fuel in Pressurized Water Reactors (PWRs) under Steam Generator Tube Rupture (SGTR) accident conditions which is posing risks on losing integrity of the nuclear fuel.

The FRAPTRAN-1.4 fuel transient code was used to examine the performance of the nuclear fuel under these circumstances. The response of the system and boundary conditions needed for the fuel rod behavior in FRAPTRAN-1.4 analyses were calculated by using RELAP5/SCDAP Mod3.4 and FRAPCON-3.4a codes. The thermal hydraulic simulation of the SGTR accident was performed by using RELAP5/SCDAP Mod3.4 code with an accident scenario based on the SGTR accident happened at Unit 2 of the Mihama nuclear power plant in 1991 and the steady state conditions were modeled and simulated with FRAPCON-3.4a. The necessary data were provided for FRAPTRAN-1.4 and then used to perform the transient simulations and analyze the fuel reliability.

As the result of the study, at which circumstances the fuel integrity fails by obtaining the fuel behavior for the condition examined, which causes result in these failures were figured out and by this means the fuel reliability analyses were actuated.

Keywords: Fuel reliability, Fuel behavior, Nuclear fuel, Steam generator tube rupture accident, Mihama Unit 2, FRAPCON-3.4a, FRAPTRAN-1.4, RELAP5/SCDAP Mod3.4.

Advisor: Asst. Prof. Dr. Şule ERGÜN, Hacettepe University, Department of Nuclear Energy Engineering

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda gösterdikleri ilgi ve değerli yardımlarından dolayı, lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince değerli fikir ve tavsiyeleriyle beni aydınlatan tez danışmanım ve hocam, Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği öğretim üyesi, Sayın Yrd. Doç. Dr. Şule ERGÜN' e ve tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım hocam, Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği öğretim üyesi, Sayın Prof. Dr. Üner ÇOLAK' a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca; çalışmamı değerlendirip verdikleri tavsiyelerden dolayı, tez komitemde yer alan değerli hocalarım Sn. Doç. Dr. Cemil KOÇAR, Sn. Doç. Dr. Cemal Niyazi SÖKMEN ve Sn. Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN ile Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, fikirleri ile beni destekleyen tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak; tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi her konuda beni destekleyen, sonsuz sevgi ve ilgisini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili annem Safiye TAŞ' a, sevgili babam Sami TAŞ' a ve sevgili kardeşim Gizem Berrak TAŞ' a bu çalışma boyunca gösterdikleri anlayıştan dolayı teşekkürlerimi, sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR	ix
1 GİRİŞ	1
2 YAKIT GÜVENİLİRLİĞİ VE YAKITIN İŞLEVSİZLEŞMESİ	10
3 KULLANILAN BİLGİSAYAR KODLARI.....	17
3.1 FRAPTRAN-1.4 Yakıt Performans Kodu	18
3.1.1 Veri hazırlama.....	21
3.2 FRAPCON-3.4a Yakıt Performans Kodu	23
3.2.1 Veri hazırlama.....	25
3.3 RELAP5/SCDAP Mod3.4 Isıl-Hidrolik Çözümleme Kodu	25
3.4 Kodlar Arasındaki Bağlantılar.....	26
4 BUHAR ÜRETECİ TÜP KIRILMASI KAZASI.....	28
4.1 Mihama Ünite-2	32
5 BUHAR ÜRETECİ TÜP KIRILMASI KAZASI KOŞULLARI ALTINDA YAKIT DAVRANIŞI BENZEŞİMİNİN YAPILMASI.....	38
5.1 Geçiş Rejimi Başlangıç Koşulları ve Geçiş Rejimi Boyunca Sistem Davranışının Elde Edilmesi	38
5.1.1 FRAPCON-3.4a ile geçiş rejimi başlangıç koşullarının elde edilmesi.....	38
5.1.2 RELAP/SCDAP Mod3.4 ile geçiş rejimi boyunca sistem davranışının elde edilmesi.....	39
5.2 FRAPTRAN-1.4 ile Geçiş Rejimi Yakıt Davranışı Benzeşiminin Yapılması	43
6 HESAPLAMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	44
7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	64
EKLER DİZİNİ.....	67
EK.A FRAPTRAN-1.4 Veri Hazırlama	67
EK.B FRAPCON-3.4a Veri Hazırlama	73

EK.C FRAPCON-3.4a Veri Değeri Tablosu	76
EK.D FRAPTRAN-1.4 Veri Değeri Tablosu	80
Çizelge D.1 FRAPTRAN Veri Değerleri.....	80
ÖZGEÇMİŞ	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Birleşik Devletler nükleer endüstrisinde yakıt performansı [Bocock G., 2011].....	3
Şekil 1.2 Tipik bir basınçlı su reaktörü şeması	4
Şekil 1.3. İki döngüden oluşan Westinghouse tasarım bir santralin elemanları.....	5
Şekil 2.1. PWR'lerde 2006-2010 yılları arasında yakıt işlevsizleşme şekillerinin dağılımı [Onufriev, V., 2011].	12
Şekil 2.2. Yakıt ayracı-yakıt çubuğu aşındırmasına sebep olabilecek durumlar [Crawford, D., 2009].....	12
Şekil 2.3. Bazı birikinti aşındırma görüntüleri [Crawford, D., 2009].....	13
Şekil 2.4. Tipik bir tablet zarf etkileşimi [Crawford, D., 2009].....	14
Şekil 4.1. SGTR olay ağacı.	31
Şekil 4.2. Her bir SGTR Olayı İçin Koşula Bağlı Kor Hasarlanma Olasılığı [Watanabe, N., 1997].....	33
Şekil 4.3. SG ve kırılan SG tüpünün yeri [Kitsunai, Y. and Kobayashi, H., 2011].	34
Şekil 4.4. Bir SG'de bulunan U şekilli tüp demeti için kullanılan AVB'ler [Kitamura, M., 2010].....	35
Şekil 4.5. Mihama-2 SGTR kazasının, SGTR olay ağacı üzerinde izlediği yol.	36
Şekil 5.1. Buhar Üretici Tüp Kırılması kazası koşulları altında yakıt davranışı benzeşiminin yapılması için izlenen işlem süreci.	38
Şekil 5.2. Referans yakıt.....	39
Şekil 5.3. Soğutucu döngüleri ve basınç kabı sayısal düğümleri ve sistem parçaları.....	41
Şekil 5.4. Buhar üretici modeli sayısal düğümleri ve kırık modeli.	42
Şekil 6.1. Geçiş rejimi süresince soğutucu kütle akısının değişimi.	46
Şekil 6.2. Geçiş rejimi süresince soğutucu basıncının değişimi.....	46
Şekil 6.3. Geçiş rejimi süresince soğutucu entalpisinin değişimi.	47
Şekil 6.4. Yakıt tablet ve zarfın işletme öncesi ebat ve konumları.	48
Şekil 6.5. 15.51 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.....	48
Şekil 6.6. 37.31 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.....	49
Şekil 6.7. 46.83 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.....	49
Şekil 6.8. 52.61 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.....	50
Şekil 6.9. 59.67 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.....	50
Şekil 6.10. Normal işletme sonunda farklı yanma oranlarında boşluk gaz basıncı ile soğutucu basıncı.	51
Şekil 6.11. Normal işletme sonunda farklı yanma oranlarında boşluk gaz basıncı ile soğutucu basıncının düğümlerde gösterimi.....	52
Şekil 6.12. Farklı yanma oranı değerlerinde düğümlerde zarfın radyal ebat değişimi.	52
Şekil 6.13. Farklı yanma oranı değerlerinde düğümlerde zarfın eksenel ebat değişimi.	53
Şekil 6.14. Güç üretiminin zamanla değişimi.	55

Şekil 6.15. Soğutucu kuruluk derecesinin zamanla değişimi.	57
Şekil 6.16. Yüzey ısı transferi sabitinin zamanla değişimi.	58
Şekil 6.17. Zarf dış sıcaklığının zamanla değişimi.	58
Şekil 6.18. Yakıtın merkez hat sıcaklığının zamanla değişimi.	59
Şekil 6.19. Yakıt yüzeyi yer değişiminin zamanla değişimi.	59
Şekil 6.20. Boşluk gaz basıncının zamanla değişimi.	60
Şekil 6.21. Yapısal radyal boşluğun zamanla değişimi.	60
Şekil 6.22. Zarf teğetsel ebat değişimi ve boşluk gazı basıncının zamanla değişimi.	61
Şekil 6.23. Soğutucu basıncı ve boşluk gaz basıncının zamanla değişimi.	61
Şekil 6.24. Metal-su reaksiyon enerjisinin zamanla değişimi.	62
Şekil 6.25. İç yarıçap oksit kalınlığının zamanla değişimi.	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 6.1. RELAP5/SCDAP Kodu ile Hazırlanan SGTR Kaza Senaryosu	45
Çizelge 6.2 SGTR kazası sırasında yakıtın davranışı.	53
Çizelge 6.3 SGTR benzeşiminde yakıt işlevsizleşmesi ölçütleri.	54
Çizelge A.1 FRAPTRAN-1.4 Veri Değişkenleri Ve Tanımları	67
Çizelge B.1 FRAPCON-3.4a Veri Değişkenleri Ve Tanımları	73
Çizelge C.1 FRAPCON Veri Değerleri.....	76
Çizelge D.1 FRAPTRAN Veri Değerleri.....	80

KISALTMALAR

AFW	Auxiliary Feedwater (Yedek Besleme Suyu)
ATWS	Anticipated Transient Without Scram (Beklenebilecek geçiş rejimi (anı durdurmasız))
AVB	Anti-Vibration Bars (Tüp Titreşimi Sönümleme Barları)
CD	Core Damage (Kor Hasarlanması)
CDF	Core Damage Frequency (Kor Hasarlanma Sıklığı)
DBA	Design Basis Accident (Tasarıma esas kaza)
ECCS	Emergency Core Cooling System (Acil Durum Kor Soğutma Sistemi)
ECR	Equivalent Cladding Reacted Ratio (Eşdeğer Zarf Etkileşme Oranı)
EPRI	Electrical Power Research Institute
FRAP-T	Fuel Rod Analysis Program - Transient
FSAR	Final Safety Analysis Report (Son Güvenlik Analizi Raporu)
HEM	Homogeneous Equilibrium Model
HPSI	High Pressure Safety Injection (Yüksek Basınç Güvenlik Enjeksiyon)
H ₂ O	Hidrojenioksit
IFBA	Integral fuel burnable absorber (Yakıtla bütünleştirilmiş yanabilir yutucu bulunan yakıt)
INL	Idaho National Laboratory (Idaho Ulusal Laboratuvarı)
INPO	Institute of Nuclear Power Operations
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ITU	Europe Institute for Transuranium Elements
LOCA	Loss of Coolant Accident (Soğutucu kaybı kazası)
LPSI	Low Pressure Safety Injection (Düşük Basınç Güvenlik Enjeksiyon)
LWR	Light Water Reactor (Hafif Su Soğutmalı Reaktör)
NRC	Nuclear Regulatory Commission (Nükleer Düzenleme Komisyonu)
MFW	Main Feedwater (Ana Besleme Suyu)
MOX	Karışık oksit yakıt (Mixed oxide fuel)

MSIV	Main Steam Isolation Valve (Ana Buhar İzolasyon Vanası)
PCI	Pellet-Clad Interaction (Tablet zarf etkileşimi)
PCMI	Pellet Clad Mechanical Interaction (Yakıt Zarf Mekanik Etkileşimi)
PCT	Peak Cladding Temperature (En Yüksek Zarf Sıcaklığı)
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory (Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarı)
PORV	Pilot operated relief valve (Pilot kumandalı rahatlatma vanası)
PSA	Probabilistic Safety Assessment (Olasılıklı Güvenlik Değerlendirmesi)
PWR	Pressurized Water Reactor (Basınçlı su Reaktörü)
RIA	Reactivity Initiated Accident (Reaktivite kazası)
RCS	Reactor Cooling System (Reaktör Soğutma Sistemi)
SCC	Stress-Corrosion Cracking (Gerilmeli korozyon çatlaması)
SGTR	Steam Generator Tube Rupture (Buhar Üretici Tüp Kırılması)
SI	Safety Injection (Güvenlik Enjeksiyon)
UO ₂	Uranyumdioksit
Zircaloy	Zirconium Alloy (Zirkonyum alaşım)
ZIRLO	Zirconium low oxidation (Zirkonyum düşük oksidasyon)
ZrB ₂	Zirkonyumdiborayt

1 GİRİŞ

Reaktör güvenliğinde hedef, ticari nükleer güç santrallerinin işletilmesinde çevreye karşı oluşan etkilerin toplumsal ve bireysel sağlık konusunda oluşturacağı risklerin en aza indirilmesidir.

Bundan dolayı, reaktör güvenliği öncelikle nükleer santrallerden topluma etki edebilecek olan radyasyon-ilintili zararları önlemekle ilgilenmektedir ve bu amaç doğrultusunda, normal işletme sırasında oluşan yakıt işlevsizleşmelerini önlemek veya reaktör kalbinin hasar alabileceği düzeydeki reaktör kazalarının önüne geçmek adına güvenlik sınırları belirlenmiştir.

Normal işletme koşulları altında, yakıt sıcaklık değişimine, radyasyon hasarlanmasına, fisyon ürünlerinin oluşumuna, fisyon gazı kabarcık oluşumuna, boşluk birleşmesine, tane yeniden yapılanmasına, şişmeye, basınca ve ısı iletkenlik ve mekanik özelliklerde değişime uğramaktadır.

Bunlara ilaveten, yakıt matrisi ve zarf işlevsizleşmesi oluşmadan, yakıtın geçiş rejimlerine ve kazalara dayanması beklenmektedir. Nükleer güç santrallerinde, yakıt matrisi ve yakıt zarfı, radyoaktivitenin dışarıya çıkmasını engelleyen birinci ve ikinci bariyerleri oluştururlar. Yakıt zarfının bütünlüğünü kaybetmesi durumunda, mesela bir kaza veya geçiş rejiminde yakıt çubuğunun işlevsizleşmesi sonucunda, radyoaktif fisyon ürünleri soğutucuya sızarlar.

Dahası; yakıt işlevsizleşmesi, radyoaktivitenin sızmasına neden olduğu gibi, yakıtın kullanılamaz duruma gelmesine, güç çıkışının düşmesine, sistemin devre dışı kalmasına veya reaktörün kapatılmasına da sebebiyet verebilir.

Westinghouse World View [2007, Oct., p.11]'in Westinghouse Nükleer Yakıt Ürün Yönetimi ve Mühendisliği Başkan Yardımcısı Meena Mutyala ile yaptığı söyleşide, Mutyala şu açıklamayı yapmıştır:

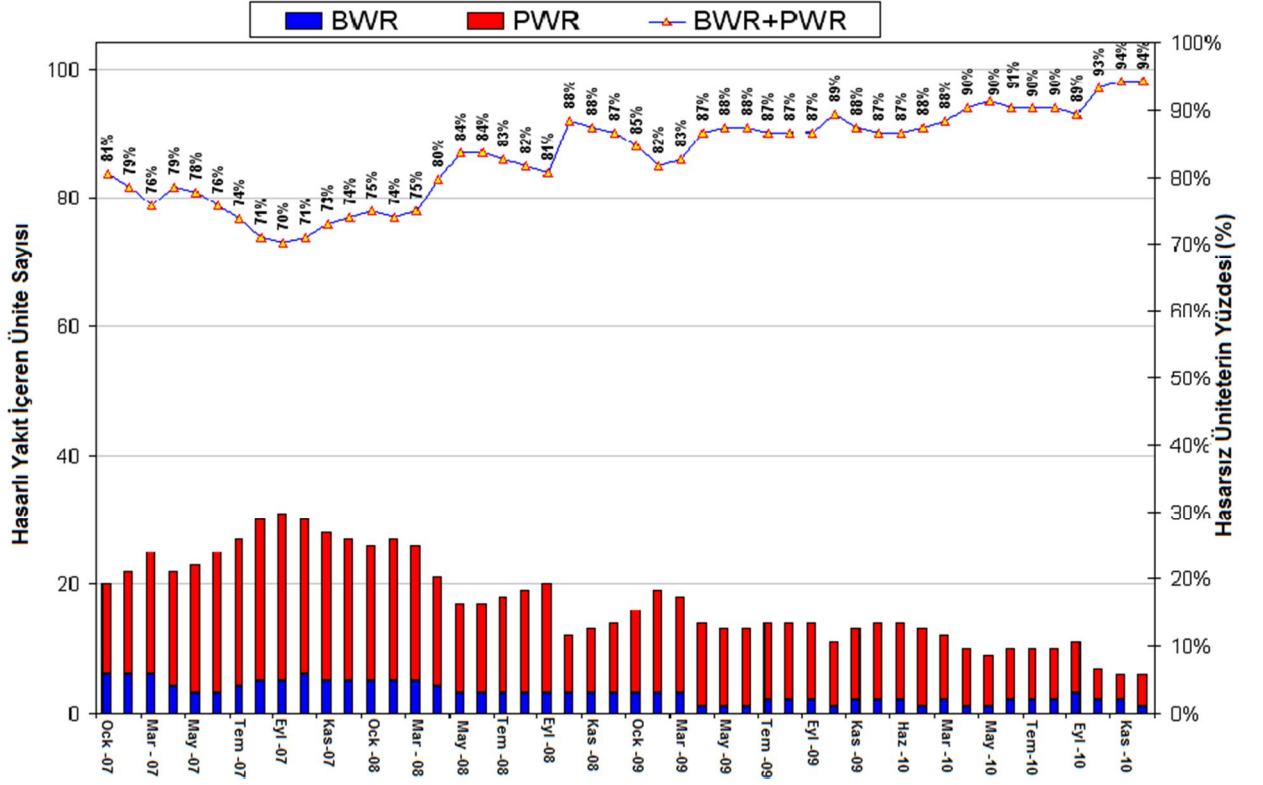
“Tek bir yakıtın işlevsizleşmesi, endüstriye yaklaşık bir milyon dolara mal olmaktadır. Seviyeleri her zaman kabul görmüş güvenlik ve lisanslama sınırlarının içinde kaldığından, bugünkü yakıt işlevsizleşmelerinin bir santral güvenlik sorunu oluşturmadığını vurgulamak önemlidir. Birincil etkisi ekonomiktir.”.

Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere; yakıt işlevsizleşmesinin, derinlemesine güvenlik kültürüne sahip olan nükleer santrallerde çevreye etkilerinin güvenlik sınırlarını aşmamasına rağmen, yol açtığı harcamaların maddi yükü çok fazladır.

Yakıt işlevsizleşmelerinin kontrolü ve azaltılması, ekonomik ve güvenlik açılarından önem taşımaktadır. Bu sebeple, nükleer yakıt güvenilirliği, son yıllarda yoğun çalışmalar yapılan ve ilerleme gösteren bir alandır. Hafif Su Soğutmalı Reaktörler (LWR), yani dünya çapındaki kullanımı en yaygın olan reaktörler için yakıt işlevsizleşme oranları, kullandığı bir milyon yakıt çubuğunun bir yılda on tanesinde işlevsizleşme meydana gelmesi anlamına gelen 10^{-5} mertebelerindedir.

Yakın dönemde, yakıt üreticileri ve ilgili kuruluşlar, literatürde “Zero Fuel Failure by 2010” olarak geçen ve pratikte yakıt arızalanma oranını 10^{-6} mertebesine düşürmek anlamına gelen, “2010’a kadar Sıfır Yakıt Hatası” idealini gerçekleştirmeyi hedeflemişlerdir. Bu hedef sadece Amerika Birleşik Devletleri tabanlı olmasına rağmen, dünya genelindeki yakıt işletmecileri sıfır yakıt hatasına veya kusursuz yakıtla ulaşmaya odaklanmışlardır. 2010 yılı sonunda bu hedefe ulaşamamış olursa da, santraller bugüne kadarki en yüksek yakıt güvenilirliği seviyesinde işletilmektedir.

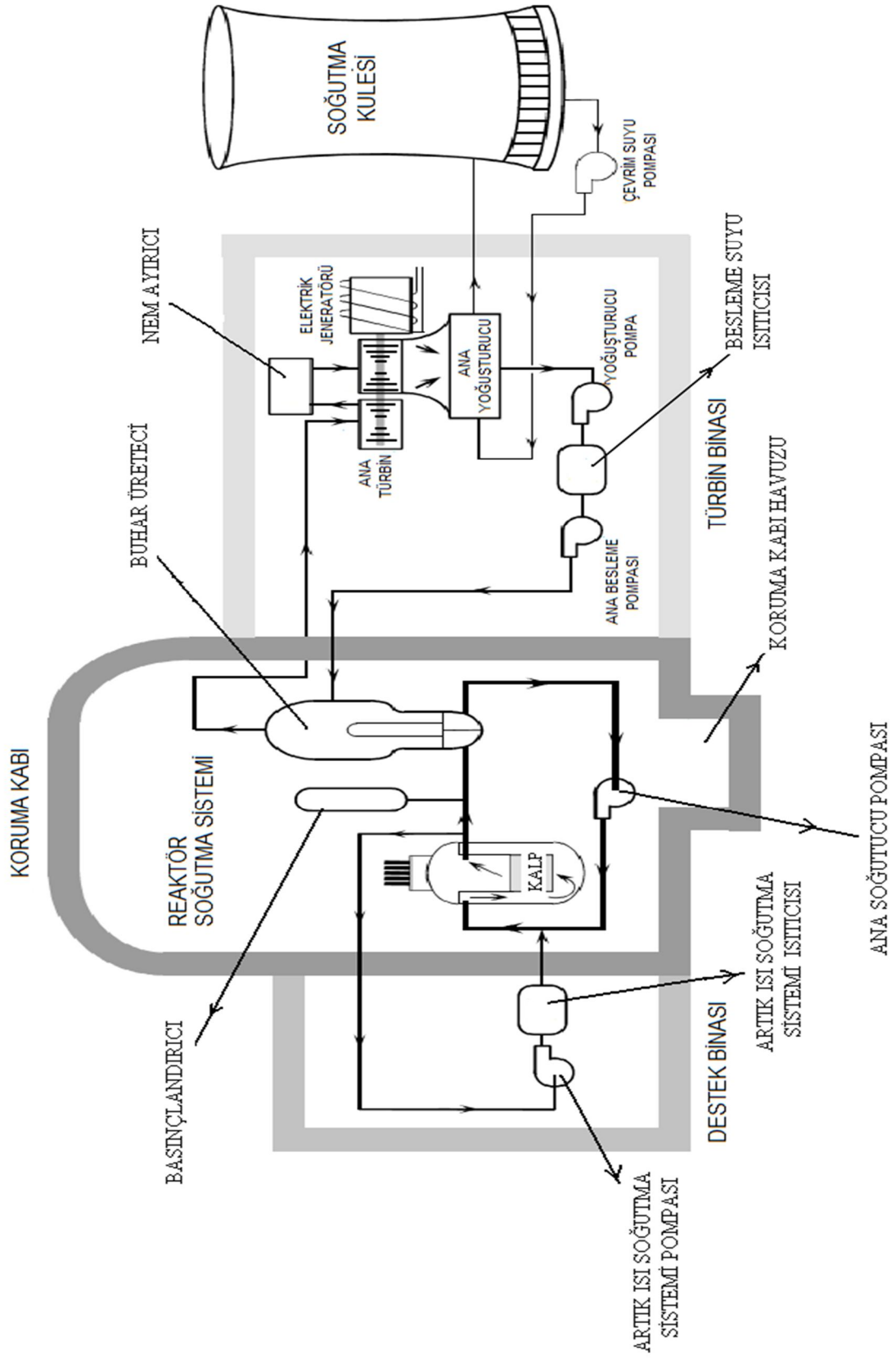
Bu yükseliş, Şekil 1.1’de görülmektedir [Bocock G., 2011]. Şekilde; 2006 yılında Nükleer Güç İşletmeleri Enstitüsü (INPO) tarafından öne sürülen “2010’a kadar Sıfır Yakıt Hatası” idealiyle kendine yeni bir hedef koyan, Amerika Birleşik Devletleri nükleer endüstrisinin, 2007 yılı ile 2010 yılı arasında hasarlı yakıt bulunan ünitelerin sayısı ve hasarsız yakıtlarla çalışması ilerleyen ünitelerin yüzdesiyle yakıt güvenilirliğine dair aylık değişim gösterilmektedir. Bahar ve günde işletmenin durdurulduğu zamanlarda hasarlı yakıtın çıkarılmasına bağlı olarak dalgalanmalar görülmesine rağmen, açık bir şekilde iyiye gidiş olduğu gözlenmektedir. Temmuz 2010 itibarıyla, Amerika Birleşik Devletleri’ndeki ünitelerin %90’dan fazlasının hasarsız yakıtla çalıştığı Şekil 1.1’den görülebilmektedir.



Şekil 1.1 Birleşik Devletler nükleer endüstrisinde yakıt performansı [Bocock G., 2011].

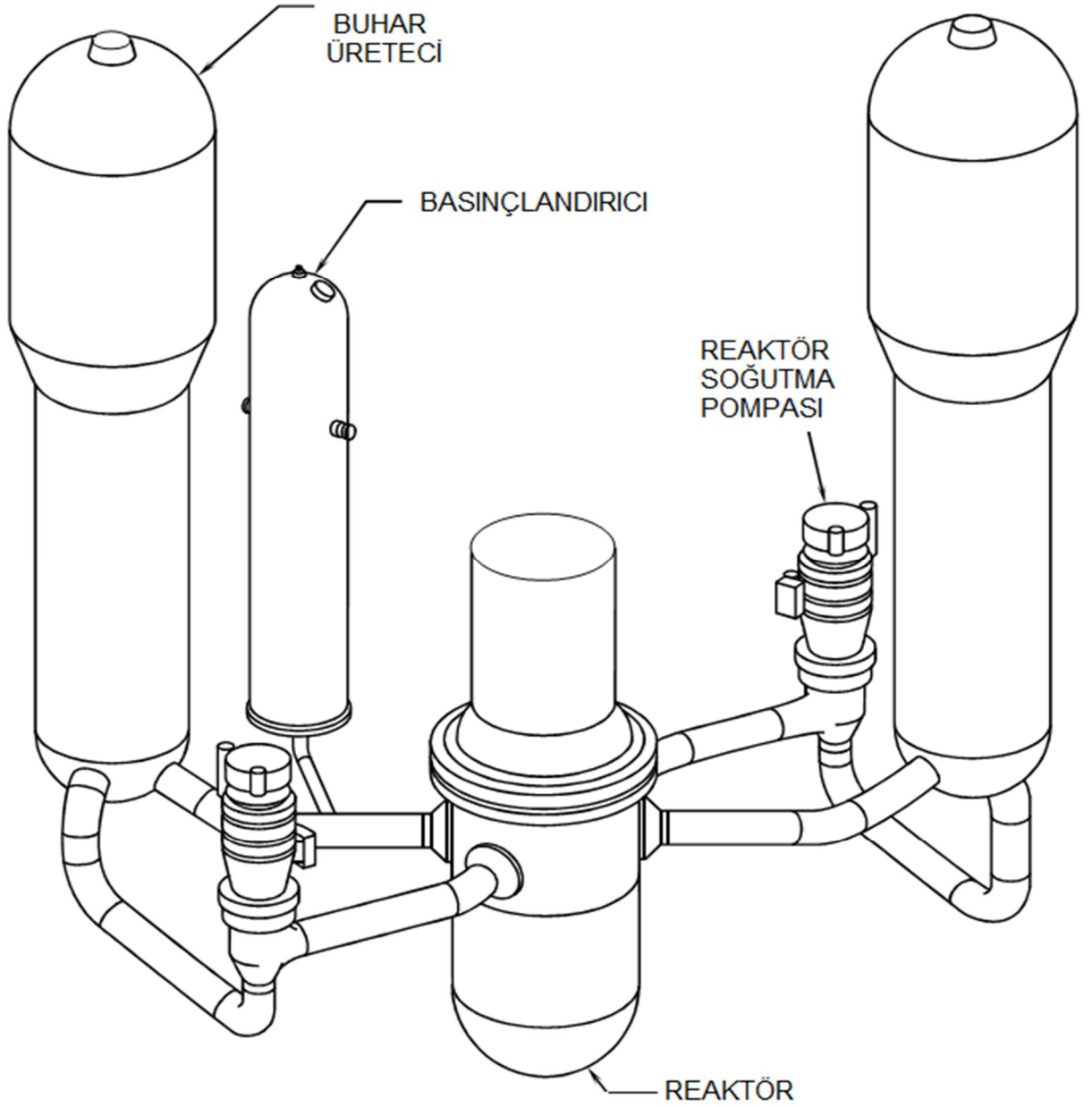
Bu çalışma ile dünya üzerinde işletme halinde olan santrallerin arasında ünite sayısına bakılarak 62.1% ile en yüksek yüzdeye sahip olan Basıncılı Su Reaktörleri'nde Buhar Üretici Tüp Kırılması kazası çözümlenmiş ve bu esnadaki geçiş rejimi incelenmiştir.

Basıncılı su reaktörleri, soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hafif su (H_2O), yakıt olarak da UO_2 kullanan reaktörlerdir. PWR tipi reaktörler, reaktörün soğutma sistemini oluşturan birbirlerine bağlı olan reaktör kabı, basınçlandırıcı, buhar üretici ve soğutma pompasının bulunduğu birinci devre ve birinci devrenin buhar üretici ile bağlandığı türbin ve jeneratörün bulunduğu ikinci devreden oluşan iki kapalı devreye sahiptir. Tipik bir PWR tipi reaktör Şekil 1.2'de görülmektedir [U.S. NRC, 2011, Mar.].



Şekil 1.2 Tipik bir basınçlı su reaktörü şeması

Birinci devrede yüksek basınç ve sıcaklıkta soğutucu ve yavaşlatıcı görevlerini gören saf su dolaşmaktadır. Birinci devrede dolaşan su, reaktör kalbinde bulunan yakıtta nükleer reaksiyonlar meydana gelmesi sonucu oluşan ısıyla birlikte ısınır. Bu çalışmada modellenen iki döngülü Westinghouse tasarımı bir PWR, Şekil 1.3’de görüldüğü gibi iki buhar üretici, iki reaktör soğutma pompası ve bir basınçlandırıcıdan oluşmaktadır [U.S. NRC, 2011, Mar.].



Şekil 1.3. İki döngüden oluşan Westinghouse tasarım bir santralin elemanları.

Birinci devredeki yüksek sıcaklıktaki suyun ısısı, buhar üretici vasıtasıyla ikinci devredeki suya aktarılmaktadır. Buhar üreticisinde üretilen yüksek basınçlı buhar, elektrik üretilmesi amacıyla türbin-jeneratör bölümüne gönderilir.

PWR'lerde yakıt demeti dizilimleri, 14×14 ve 18×18 arasında değişmektedir. Bu çalışmada 14×14 dizilime sahip bir reaktör model alınmıştır. 14×14 dizilimlerde 179 tane yakıt çubuğu mevcuttur. Yakıt demetinde, yakıt çubukları dışındaki elemanlar yani yakıt demetine suyun girdiği kısım, kontrol çubuklarının girdiği tüpler ve yakıt ayraçları, yakıt güvenilirliği incelenirken dikkate alınmalıdır.

Yakıt çubuğu, zarf içinde yakıt tabletlerinin üst üste konmasıyla oluşur. Uçlardan tutucularla sabitlenmiş ve içeriden üst plenumda bulunan bir yaya tutturulmuş ve basınçlı helyumla doldurulmuştur. PWR'lerde yaygın olarak ZIRLO, M5, Duplex Zircaloy-4 ve Zircaloy-4 zarf malzemesi olarak kullanılmaktadır. Önceleri yaygın olarak kullanılan Zircaloy-4, daha iyi alaşımlara yerini bırakmaktadır. Uç tutucularda da genellikle zarf malzemesiyle aynı malzeme kullanılır. Plenum yayı, çelik veya nikel alaşımlardan yapılmaktadır. Yakıt çubuklarını doldurmak ve basınçlandırmak için helyum gazı kullanılır. Çalışmada modellenen yakıtın ayrıntıları ilerideki bölümlerde verilecektir.

Bu çalışmada, incelenecek koşul olarak Buhar Üretici Tüp Kırılması kazası seçilmiştir. SGTR kazası, daha önce gerçekten yaşanmış, hatta sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde 1975 ve 2000 yılları arasında 10 kere gerçekleşmiş bir kazadır [U.S. NRC, 2011, Dec.]. Bu senaryonun sonuçları, birinci devre soğutucusunun kırılmış buhar üretici tüplerinden ikinci devreye geçip oradan da çevreye çıkmasına sebep olabileceği için önem taşımaktadır. Eğer ikinci devre koruma kabı dışına açılıyorsa ama izole edilmiş durumda değilse, radyoaktivite salımının 10 CFR Part 100'deki sınırları aşabilme ihtimali vardır.

Soğutucu kaybı yaşanması durumunda, Acil Durum Kor Soğutma Sistemi (ECCS)'nin devreye girme ve başarılı bir şekilde müdahale etme ihtimali çok yüksek olsa da, çıkabilecek herhangi bir sorunda zaten dışarıya açık olan bir salım yolu mevcutsa sonuçları çok ağır olabilir.

SGTR, çoğu Son Güvenlik Analizi Raporu (FSAR)'nın 15'inci bölümünde yer almaktadır ve çoğu santrale özel Olasılıklı Güvenlik Değerlendirmesi (PSA)'nde kaza başlama sebebi olarak gösterilmektedir [U.S. NRC, 2011, Dec.].

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise, SGTR, Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC)'na göre 3. kategori olay olarak kabul edilmiştir. Yani, yakıt elemanı işlevsizleşmesi olabilme ihtimali içerse de, reaktördeki yakıt elemanlarının küçük bir bölümünden fazlasının işlevsizleşmesine yol açmayan durumlardan biri olarak tanımlanmıştır.

Özetle, SGTR, tek başına gerçekleştiğinde yakıt elemanlarında işlevsizleşme görülmesi muhtemel ama kor hasarlanmasına sebep olma ihtimali düşük; ancak, başka problemlerin de eklenmesiyle kor hasarlanmasına sebep olabilecek bir kazadır. Bu, Diablo Canyon Nükleer Güç Santrali için yapılan çözümlemelerin sonucunda [IAEA, 2011], SGTR kazasının Kor Hasarlanma Sıklığı (CDF)'nda %4 paya sahip olmasıyla örneklenebilir.

Bu kaza koşulları altında yakıt güvenilirliğinin incelenmesi gereklidir. Bu inceleme için de, SGTR kazasının doğru modellenip değerlendirilmesi ve kaza sonuçlarının farklı boyutlarının yakıt üzerine etkisinin incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, SGTR esnasında yakıt davranışını incelemek ve meydana gelen yakıt işlevsizleşmelerine neden olan mekanizmaların saptanması için geçiş rejimi yakıt performans kodu olan FRAPTRAN-1.4 [Geelhood, K.J. et al., 2011a] kullanılmıştır. FRAPTRAN-1.4 kodunu kullanmak için bilinmesi gereken sistemin kaza boyunca ısıl hidrolik davranışını belirlemek için ısıl hidrolik çözümleme kodu RELAP5/SCDAP Mod3.4 [Allison, C.M. and Wagner, R.J., 2004] ve normal işletmenin sonunda ne durumda olduğunu aktaran geçiş rejimi başlangıç koşullarını belirlemek içinse normal işletme yakıt performans kodu FRAPCON-3.4a [Geelhood, K.J. et al., 2011b] kullanılmıştır.

Literatürde, soğutucu kaybı kazası modellemeleri için bu çalışmaya benzer benzeşim çalışmaları yer alsa da, SGTR modellemesi için bu çalışmanın kapsamında benzeşimler bulunmamaktadır

RELAP5/SCDAP Mod3.4 ısıl hidrolik çözümleme kodu kullanılarak ve 1991 yılında Mihama Nükleer Güç Santrali'nin ikinci ünitesinde meydana gelen SGTR kazasının model alındığı bir kaza senaryosu üzerinden SGTR kazasının hidrolik benzeşimi yapılmıştır. Sistem koda aktarılmış, kırığın oluşumu ve değişen parametrelere göre sisteme dahil olan ve çıkan tüm ekipmanlarla kaza durumu bir tüpte giyotin kırık boyutu için modellenmiştir. Bu çalışmada yapılan benzeşimin Mihama Nükleer Güç Santrali'nde gerçekleşen kazadan temel farkı, tüp kırılması başlangıcıyla reaktörde üretilen gücün azaltılmamasıdır. Bu çalışmada reaktör gücünün kırık başlangıcından yaklaşık 600 sn sonra düştüğü kabul edilmiştir. Kaza boyunca soğutucuya ait basınç, sıcaklık, kuruluk derecesi ve kütle akısı değerleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

FRAPCON-3.4a yakıt performans kodu kullanılarak yakıtın normal işletme sürecinde benzeşimi yapılmıştır. Referans reaktör (Mihama Ünite-2) ve bu reaktöre ait yakıt, normal çalışma koşullarında farklı yanma oranları elde etmek adına değişik sürelerde modellenmiştir. Değişik süreler sonunda yakıtta meydana gelen tüm değişimler ve yakıtın son haline ait değerler elde edilmiştir.

FRAPTRAN-1.4 yakıt performans kodu kullanılarak yaklaşık 15 ile 60 GWd/MTU arasında değişen yanma oranlarına sahip farklı çevrimlere girmiş ve SGTR kazasına maruz kalmış yakıtların benzeşimleri yapılmıştır. Yakıtın kaza öncesi durumu, FRAPCON-3.4a ile elde edilmiş veriler kullanılarak ve sistemin kaza esnasındaki davranışı RELAP5/SCDAP Mod3.4 ile elde edilmiş veriler kullanılarak yakıt ve kaza durumu modellenmiştir. Zarfa ait elastik, ısıl, sürünme ve plastik deformasyonlar, yakıt ve zarf arasında mekanik etkileşim olup olmadığı, fisyon gazı salımı, radyal ısı aktarımı, uzama, incelme, zarf oksitlenmesi gibi bilgilere ulaşarak; buhar üretici tüp kırılması kazasında yakıtın davranışı, kaza sonundaki durumu, kaza esnasında bozulmaya uğrayıp uğramadığı belirlenmiştir.

Çalışmanın sonuçlanmasıyla incelenen koşul için yakıt davranışı tespit edilerek yakıt bütünlüğünün hangi durumlarda bozulmaya uğradığı ve bu bozulmaların hangi mekanizmalarla gerçekleştiği bilgilerine ulaşılmış ve bu sayede yakıtın bu kaza koşulları altında bütünlüğünü koruyup korumadığı incelenmiş ve dolayısıyla yakıt güvenilirliği çözümlemesi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez yedi bölümden oluşmaktadır.

Bu bölüm (Giriş Bölümü), sektörde nükleer yakıt güvenilirliğinin ve SGTR kazasının yeriyle ilgili temel bir bilgilendirme sağlamakta ve çalışmanın motivasyonunu, amaçlarını ve tezde kullanılan çözümleme araçlarını açıklamaktadır.

Yakıt güvenilirliğinin açıklaması ve çözümlemelerin nasıl yapılması gerektiği ile işlevsizleşme şekilleri, sebepleri ve etkileri, tezin ikinci bölümü olan Yakıt Güvenilirliği ve Yakıt işlevsizleşmesi Bölümü'nde anlatılmaktadır.

Tezin üçüncü bölümünü oluşturan Kullanılan Bilgisayar Kodları Bölümü'nde incelenen koşulların ve yakıtın modellenmesi ve benzeşimlerinin yapılmasında yararlanılan RELAP5/SCDAP Mod3.4, FRAPTRAN-1.4 ve FRAPCON-3.4a kodlarına ait açıklamalar yer almaktadır.

Tezin dördüncü bölümü olan Buhar Üretici Tüp Kırılması Kazası Bölümü'nde buhar üretici tüplerinin kırılması durumunda sistemin ne tepki verdiği ve çalışmada model alınan Mihama-2 SGTR kazasını anlatılmaktadır.

İncelenen kaza koşullarının ve yakıtın nasıl modellendiğini, geçiş rejimi başlangıç koşullarının ve geçiş rejimi boyunca sistem davranışının nasıl elde edildiği ve bu süreçlerin çözümlemeleri, tezin beşinci bölümü olan Buhar Üretici Tüp Kırılması Kazası Koşulları Altında Yakıt Davranışının Modellenmesi Bölümü'nde anlatılmaktadır.

Benzeşim Sonuçları ve Değerlendirmeler isimli tezin altıncı bölümünde kodlarla yapılan benzeşimlerin sonuçları yer almaktadır. Sonuçlar verilerin karşılaştırmalarını da içermektedir.

Tezin yedinci ve son bölümü olan Sonuçlar ve Öneriler Bölümü'nde yapılan çalışma ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve çalışma özetlenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarla ilgili öneriler de bu bölümde verilmiştir.

2 YAKIT GÜVENİLİRLİĞİ VE YAKITIN İŞLEVSİZLEŞMESİ

Güvenilirlik, bir sistemin veya parçanın belirlenen koşullarda belirli bir süre için görevini yerine getirme olasılığı olarak tanımlanır. Güvenilirlik analizi, tasarım aşamasında bulunması gereken bir analizdir. Güvenilirlik analizi sistemin karmaşıklığını, güvenilirlik gereksinimlerini ve analizi destekleyen verilerin doğruluğunu da hesaba katarak sistematik bir şekilde uygulanmalıdır.

Nükleer yakıt, nükleer güç santrallerinin güvenilirliğinin kritik bir parçasıdır. İşlevini yitirdiğinde sistemin etkili ve güvenli bir şekilde işletilmesini ciddi anlamda etkileyebilecek bir sistem elemanıdır.

Yakıtın işlevsizleşmesi, yakıt zarfı bütünlüğünün bozulması yani zarfta bir açıklık meydana gelmesi anlamına gelmektedir. Bu açıklık, radyoaktif malzemelerin soğutucuya kaçmasına sebep olur. Bu, aynı zamanda ekonomik olarak da büyük zarara yol açar; çünkü yakıtın işlevsizleşmesi elektrik üretiminin kaybedilmesine, santralin yakıt değişimi veya bakım için normal durma zamanından önce durdurulmasına ve yakıt yenilenmesine sebep olur. Bunlardan herhangi biri tek başına 40 ile 80 milyon dolar arasında bir masrafa mal olabilir [EPRI, 2008].

Nükleer yakıtın güvenilirliğinin sağlanması için güvenilirlik gereksinimleri belirlenmeli ve uygulanmalıdır. Bunun için yakıtın içinde bulunabileceği durumlar, bu durumlar süresince yakıtın işlevsizleşmesine sebep olabilecek etkiler ve işlevsizleşmenin şekli belirlenmelidir.

İşlevsizleşmenin şekli ve sebebini anlamak, işlevsizleşmeye karşı önlem alınması ve sistem performansının artırılması için öncelik verilmesi gereken önlemlerin belirlenmesi açısından önemlidir.

Bu belirlemelerle birlikte; yakıtın belirlenen işlevsizleşme şekillerine karşı direncini arttıracak gerek yakıt tasarımında gerek se sistem işletimi ve güvenlik sistemlerinde değişiklikler yapılarak yakıtın güvenilir bir şekilde görevini yapması sağlanabilir. Yani, “hata türleri ve etkileri analizi” olası yakıt problemlerini ve her bir sistem faaliyetinin kritikliğini ve seçilebilecek uygun değişikliğin güvenliğini belirler.

Ayrıca, bu analizle yakıtın hangi koşullar altında, ne kadar süre güvenilir olarak kullanabileceği de saptanabilir ve bu sayede tasarım sürecinin belirlenmiş

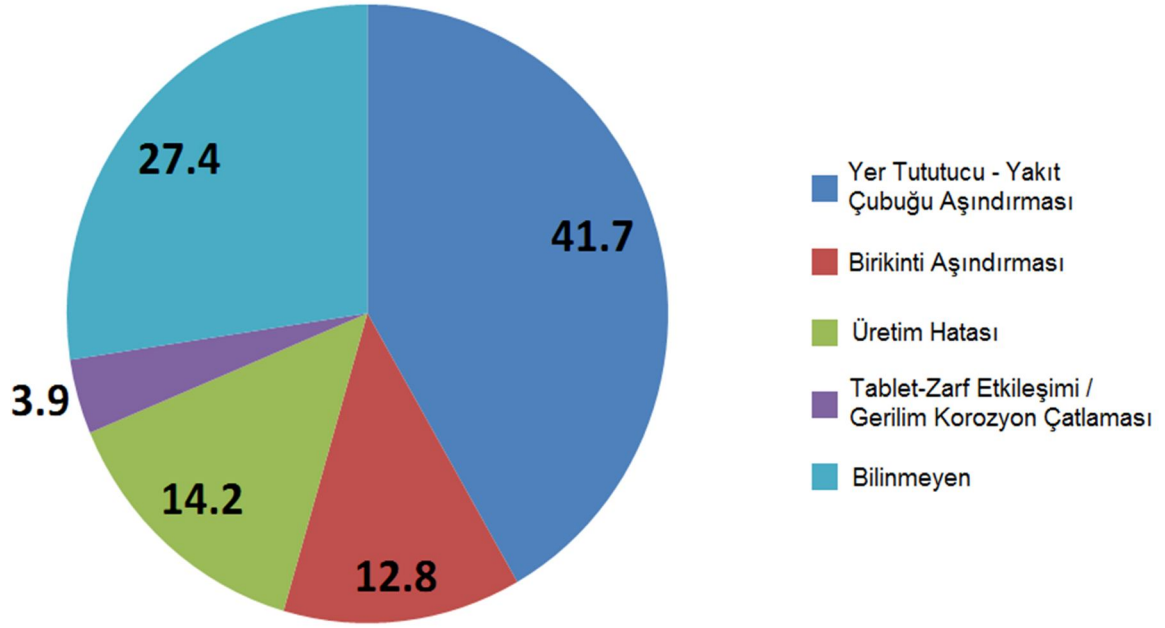
noktalarında yakıt tasarımının gelişiminin desteklenmesi için uygulanabilir. Örneğin; yüksek yanma oranları elde etmek için sistemin çalışma süresinin uzatılması veya yakıt zenginliğinin artırılması yollarından birine girilmelidir. Bu yollar, sistemin güvenilirliğinin belirlendiği koşulların ve sistemin değişeceği anlamına gelir. Yakıtta veya herhangi bir öğede önerilen her değişiminin sistem faaliyeti veya güvenliğinde yaratacağı etkinin bulunması için işlevsizleşme şekilleri ve etkilerinin analizi ile değerlendirilmesi gereklidir. Her tasarım gözden geçirmesinde, bu analizin sistem tasarımını yönlendirip, gerekli verileri sağlaması için devamlı bir gayret olarak planlanması gerekir.

Yakıt işlevsizleşme şekilleri ve etkilerinin analizinde takip edilen adımlar, şu şekilde sıralanabilir:

1. Yakıtın bileşen listesini ve amaçlanan faaliyet tanımını da bulunduran bir tanımı,
2. Beklenen işlevsizleşme sıklığı ve olası işlevsizleşme şekilleri,
3. Yakıtın kullanımı ve güvenliği açısından işlevsizleşme şeklinin beklenen etkisi,
4. Yakıtın sistem güvenliği ve işletimine olan ciddi etkilerinin belirlenmesi.

Yakıt işlevsizleşmesinin birçok sebebi vardır. En çok karşılaşılanları, korozyon, sürtünme aşındırması ve tablet zarf etkileşimidir. Farklı tip reaktörlerde farklı tip mekanizmalar baskındır. BWR’lerde birincil işlevsizleşme sebebi “birikinti (sistem içinde istenmeyen hareketli parçaların sürtünmesiyle) aşındırması”dır; PWR’lerde ise “yakıt ayrıcının yakıt çubuğunu aşındırması”dır [Tompkins, B., 2008].

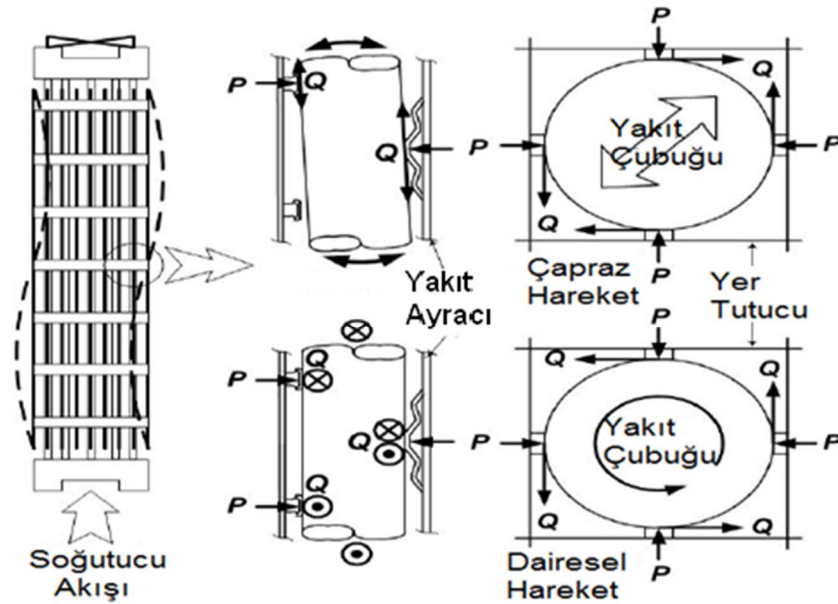
Şekil 2.1’deki PWR’ler için 2006-2010 yılları arasında yakıt işlevsizleşme şekillerinin dağılımından görülebileceği gibi en yüksek yüzdeye “yakıt ayrıcının yakıt çubuğunu aşındırması” sahiptir, bu işlevsizleşme şeklini sırasıyla “birikinti aşındırması”, “üretim hatası”, “tablet zarf etkileşimi/gerilmeli korozyon çatlaması (PCI/SCC)” takip etmektedir ve %27.4’lük bir dilim için işlevsizleşme şekli bilinmemektedir. Yakıt ayrıcının yakıt çubuğunu aşındırması işlevsizleşme sebebi tasarım; birikinti aşındırması işlevsizleşmesinin sebebi işletmedir. Üretim kaynaklı işlevsizleşmeler de meydana gelmektedir. PCI/SCC işlevsizleşmenin sebepleri içinde üretim, işletme ve tasarımın üçü de mevcuttur.



Şekil 2.1. PWR'lerde 2006-2010 yılları arasında yakıt işlevsizleşme şekillerinin dağılımı [Onufriev, V., 2011].

Yakıt Ayracı-Yakıt Çubuğu Aşındırması:

Soğutucu akışıyla birlikte yakıt ayracının arasında kalan yakıt çubuklarının titreşmesi

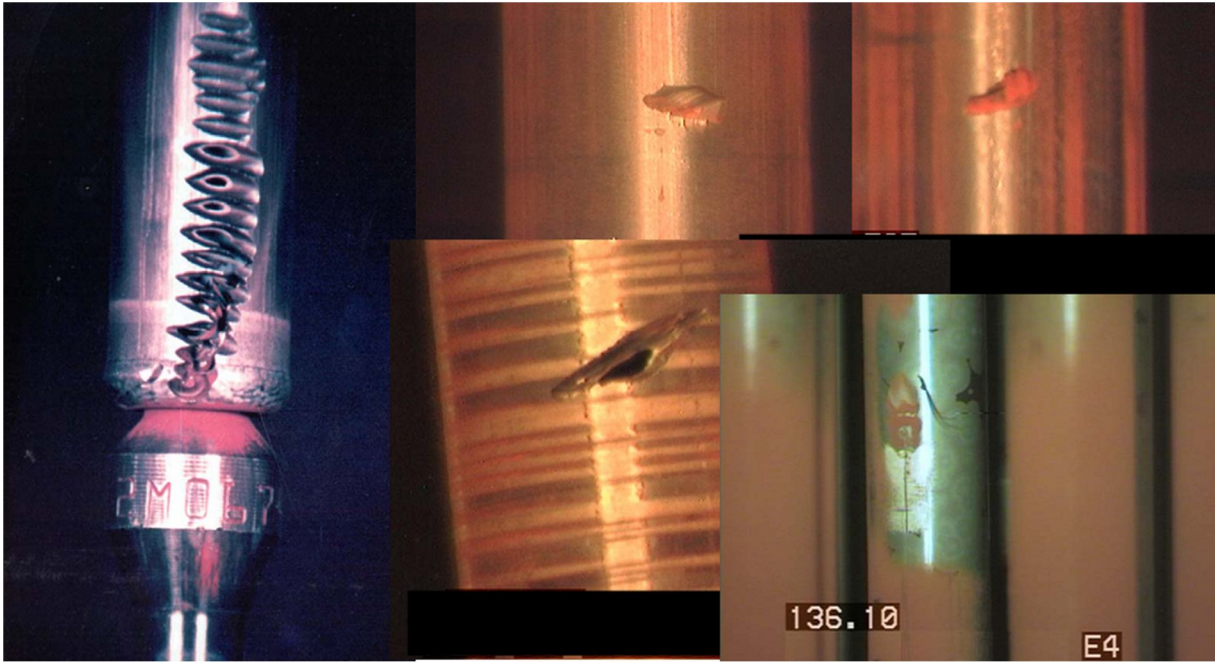


Şekil 2.2. Yakıt ayracı-yakıt çubuğu aşındırmasına sebep olabilecek durumlar [Crawford, D., 2009].

sonucu zarfla temas ettikleri noktalarda zarfın aşınmasına sebep olmaktadır. PWR'lerde çapraz akış olması da işlevsizleşme şeklinin gelişmesini tetiklemektedir.

Birikinti Aşındırması:

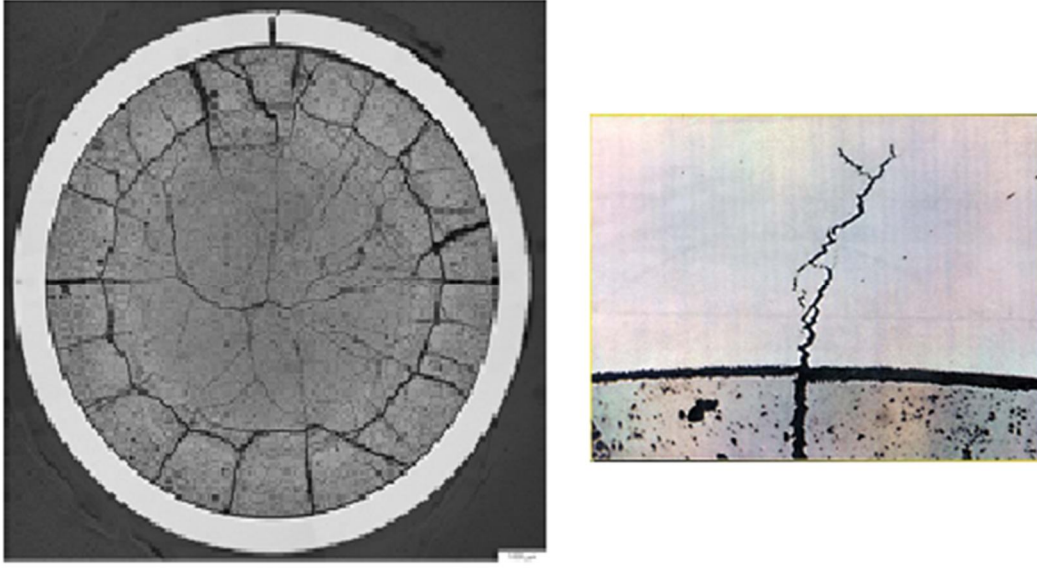
Kanallarda sıkışan çeşitli birikintilerin (soğutucu içinde hareketli, vida gibi istenmeyen parçalar) soğutucu akışıyla birlikte etkileşimleri (sürtünme veya çarpma), zarfta temas ettikleri kısmı aşındırmalarına sebep olmaktadır.



Şekil 2.3. Bazı birikinti aşındırma görüntüleri [Crawford, D., 2009].

Tablet zarf etkileşimi/gerilmeli korozyon çatlaması(PCI/SCC):

Tablet zarf etkileşimi, mekanik ve kimyasal olarak ayrılmak üzere iki tür mekanizmaya sahiptir. Mekanik etkileşim, yakıtın zarfla teması sonucu zarfın üzerine eksenel ve radyal yük bileşenleri kaynaklıdır. Bu tür tablet genişmesi, sürünme ve kırılmış ve yerinden kaymış tablet parçalarının zarfı basınçlandırması nedeniyle oluşur ve bu da zarfın işlevini yitirmesine sebep olur. Diğer etkileşim türü ise gerilmeli korozyon çatlamasıdır. Fisyon gazları zarfın iç tarafında birikerek tane sınırları boyunca ilerlemeye çalışır. Bu türde de zarfta bazı mekanik gerilmeler sonucu oluşmuş küçük çatlaklar, tablettan çıkan fisyon gazları, özellikle iyot tarafından korozyona uğrayarak yayılırlar.



Şekil 2.4. Tipik bir tablet zarf etkileşimi [Crawford, D., 2009].

Bunların dışındaki mekanizmaları da kısaca açıklamak gerekirse:

Korozyon, zarfın incelmesine sebep olur ve taşıyıcı duvar kalınlığını düşürür; zarfta hidrojen artışıyla hidrat oluşumu kırılabilirliğin artmasına sebep olur. Fisyon gazı salımı, yakıt çubuğunun iç basıncını artırır ve zarfı basınçlandırır; bu da zarfın dışarıya doğru uzamasına ve tablet- zarf boşluğunun açılıp zarf sıcaklığının artmasına sebep olur. Tablet ısı genleşme ve güç artışı olması durumunda çatlaması, zarf üzerinde basınç oluşturur ve fisyon ürünlerinin zarf yüzeyine kaçmasına sebep olur. Oksit ve tortunun (tanımlanamayan çökelti) parçalanması, yakıtta bazı bölümlerin daha soğuk kalmasına sebep olur çünkü yalıtımı kötüleştirir ve hidrojen birikiminin artmasına dolayısıyla kırılabilirliğin artmasına sebep olur. Isınma büyümesi, boyutların değişimine ve yapısal öğelerin ve zarfın deformasyonuna sebep olur.

Yakıtta bir işlevsizleşme gerçekleşmesi durumunda buna neyin neden olduğunun anlaşılabilmesi için yakıtın nelere maruz kaldığının bilinmesi gereklidir. Zarf ve tablet malzeme özellikleri, yakıtın güvenilirliğinin hangi koşullarda geçerli olduğunun belirlenmesindeki en büyük etmenlerden biridir. Bu çalışmada modellenen bir PWR'ye ait zirkonyum alaşım (Zircaloy-4 tipi) zarflı UO_2 yakıt, 14×14 bir yakıt demetinde bulunmaktadır.

UO₂ seramik bir malzemedir ve sıcaklığa göre değişen düşük bir ısı iletkenliğe sahiptir. İşletme halindeyken yüzey sıcaklığına göre çok daha yüksek bir merkez sıcaklığına sahiptir. Merkez sıcaklığı, yakıt elemanının çapına ve güç üretimine bağlıdır. UO₂ yaklaşık 1400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalıştığı zaman tane büyümesi meydana gelir. Sıcaklık artışı bunu tetikler. Gerilim altında düşük dayanıma sahip olması nedeniyle tabletler sıcaklık değişiminden dolayı genişleme ve daralmaya maruz kaldıklarında çatlama meydana gelir. 800-1400°C üzerinde UO₂ seramiğinin deformasyon kabiliyeti artar ve sürünmeye uğrar; bu boyutsal büyümeye neden olur.

Zirkonyum alaşım zarflı UO₂ yakıtı, aşırı yüksek güç, soğutucuyla temasının kesilmesi ve basınç sıcaklık değişimleri gibi durumlara sınırlı bir süre dayanabilir. Aşırı güç yükselmeleri, erime sıcaklığı 2800°C olan UO₂'nin merkezinde küçük bir miktar erime meydana gelmesine sebep olabilir veya aşırı yüksek ısı üretimi sebebiyle tabletin %10 üzerinde genişlemesine ve kırılmasına sebep olabilir. Soğutucuyla temasının kesilmesi durumunda, zarf sıcaklığında büyük bir artış meydana gelecektir. Burada sıcaklığın mertebesine göre zarfın dayanımı söz konusu olabilir. 810°C'de zarfta şişme meydana gelir. 1150°C'de zirkonyum ve oksijen arasında ekzotermik bir reaksiyon başlar. Eğer Zirkonyum alaşım uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalırsa oksidize olur ve zarf işlevini kaybeder. 1850°C zirkonyum alaşımın erime sıcaklığıdır.

Güç üretimi ve soğutucu sıcaklığı artarsa ve yakıt-zarf ısı transferi katsayısı azalırsa yakıt sıcaklığı artar. Güç üretiminin artması gaz salımını artırır, bu da gaz basıncının artmasına sebep olur. Yakıt sıcaklığının artması yakıtın genişlemesine sebep olur, bu da içerideki gazı basınçlandırır. Ayrıca sıcaklık artışı gaz basıncını da artırır. Gazın basınçlanması, yakıtın şişmesi zarfın iç basıncını artırır ve ebat değişimine sebep olur. Soğutucu basıncı da zarf üzerinde etkilidir. Bu da yakıt ve zarf arasındaki boşluğun ebatının değişmesine neden olarak, ısı transferini ve yakıt sıcaklığını etkiler.

Yakıtın normal işletme sırasında ve kaza durumlarında, maruz kaldığı bu etkileşimlere dayanması beklenmektedir. Bu çalışmanın içeriğinde, sadece bir yakıt çubuğunun modellenmesi yapılarak, sistemin ısıl hidrolik değişiminin yakıt çubuğuna etkileri incelenecektir. Bu sebeple, başka modellemeler de gerektiren

“yakıt ayracının yakıt çubuğunu aşındırması” ve “birikinti aşındırması” işlevsizleşme şekillerine dair bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmanın asıl amacı SGTR kazası süresince gerçekleşen kütle akısı, basınç ve sıcaklık değişimlerine yakıtın tepkisini incelemektir.

3 KULLANILAN BİLGİSAYAR KODLARI

Çalışmanın hedeflerine ulaşmak için öncelikle deneysel veya teorik olarak belirlenen koşulları doğru bir şekilde modellemek gereklidir. Teorik modelleme de bir bilgisayar kodu vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Bu sebeple, geçiş rejimi ve kaza koşullarında yakıt performans çözümlemesi yapan kodlar kullanılmalıdır. Bu kodlara örnek olarak; FRAPTRAN (PNNL, ABD), FALCON (EPRI, ABD), SCANAIR (IRSN, FRANSA), TRANSURANUS (ITU, ALMANYA) yaygın kodlar sayılabilirler.

Bu çalışmada kullanılmak üzere FRAPTRAN kodu seçilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından desteklenerek geliştirilen kod, yaygın kullanıldığı (örneğin çalışmada modellenen santralin tasarımına sahip şirket Westinghouse Electric Corporation tarafından bu çalışmadakine benzer kaza koşulları için kullanılmaktadır) ve kaynak kodları açık olduğu için bu çalışmada yapılan benzeşimler için uygun bulunmuştur. FRAPTRAN kodu FORTRAN programlama diliyle yazılmıştır; hem kodun kullanılmasına hem de FORTRAN programlama diliyle ilgili sahip olunan tecrübeler de FRAPTRAN kodunu bu çalışma için uygun kılmıştır.

FRAPTRAN serisinin en güncel sürümü olan FRAPTRAN-1.4 ısıl-mekanik yakıt performans kodu, SGTR kazası koşulunda yakıt davranışı benzeşimi için yani sadece geçiş rejimi koşulunun hesaplamasını yapmak için kullanılmıştır. Normal işletme koşullarında yakıt davranışının belirlenmesi ve FRAPTRAN-1.4 için yanma oranına bağlı başlangıç koşullarını elde etmek amacıyla ısıl-mekanik yakıt performans kodu FRAPCON-3.4a ve sistemin kaza boyunca ısıl-hidrolik davranışını belirlemek için ısıl-hidrolik çözümleme kodu RELAP5/SCDAP Mod3.4 için kullanılmıştır.

Bu bölümde, çalışmada kullanılan FRAPTRAN-1.4, FRAPCON-3.4a ve RELAP5/SCDAP Mod3.4 kodları ile FRAPTRAN-1.4 ve RELAP5/SCDAP Mod3.4 arasında bağlantı kurmak için geliştirilmiş kod, dört ayrı başlıkta detayları ile anlatılmaktadır.

3.1 FRAPTRAN-1.4 Yakıt Performans Kodu

FRAPTRAN-1.4 tek bir yakıt çubuğunun geçiş rejimi ve tasarıma esas kaza çözümlemesi için kullanılan bilgisayar kodudur. FRAPTRAN kodu 1970ler ve 1980lerde yazılan FRAP-T kod serisinin (Siefken et al., 1981; Siefken et al., 2010a) devamıdır. Aynı zamanda FRAPTRAN, tek bir yakıt çubuğunun normal işletmede yüksek yanma oranlarına tepkilerini hesaplamak için geliştirilmiş FRAPCON-3 koduyla beraber kullanılır; dolayısıyla, FRAPCON-3 yazılımının ortak kodudur. Kaynar sulu reaktörler, basınçlı su reaktörleri ve ağır sulu reaktörler için kullanılabilir.

FRAPTRAN kodu Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarı'nda (PNNL) geliştirilmiştir ve FRAPTRAN v1.0 [Cunningham et al., 2001] ilk sürümüdür. O zamandan beri beş güncelleme sürümü piyasaya sürülmüştür (FRAPTRAN 1.1, FRAPTRAN 1.1.1, FRAPTRAN 1.2, FRAPTRAN 1.3, ve FRAPTRAN 1.4).

Önceleri olası acil durumlarda ve ulaşılan yanma oranı değerlerinde sadece Zirkonyum alaşımı yakıt zarfı kullanımını göz önüne alarak yakıt davranışı modelleyen kod, daha sonra tasarıma esas kazalarda yüksek yanma oranlı yakıt için geliştirilmiştir. Şu anda, UO_2 , MOX ($(U,Pu)O_2$), IFBA, ZrB_2 kaplamalı UO_2 ve gadolinyum ile karıştırılmış yakıt için yakıt modelleri ve Zircaloy-2, Zircaloy-4, M5 ve ZIRLO içinde zarf modellerine sahiptir. Ayrıca, E110 zarf malzemesinin özellikleri de FRAPTRAN'da mevcuttur; ancak, PNNL tarafından eklenmemiştir, bu malzemenin özellikleri kodun malzeme özellikleri kitapçığında bulunmaktadır. FRAPTRAN, NRC'nin normal işletme koşullarında yakıt performansı çözümlemesi yapan FRAPCON-3 kodu ile aynı malzeme özellikleri paketini yani MATPRO'yu kullanmaktadır.

FRAPTRAN yakıt ve zarf sıcaklıkları, zarf elastik ve plastik gerilme ve ebat değişimleri, yakıt çubuğu gaz basıncı gibi yakıt çubuğu değişkenlerini zaman, güç ve soğutucu durumu değişkenleriyle birlikte hesaplar. Yakıt yoğunlaşması ve şişmesi, zarf sürünmesi ve ısınma büyümesi gibi zamanla yavaş değişen değişkenler FRAPTRAN tarafından hesaplanmaz.

FRAPTRAN, yakıt çubuğu geometrisini aksisimetrik olarak kabul etmektedir ve üst üste gelen tabletler bir bütün olarak modellenmektedir. FRAPTRAN'da; yakıtın

benzeşimi, üst üste eksenel bölgeler olarak yapılmaktadır. Bu bölgelerin her biri için ısı transferi ve deformasyonlar tek boyutlu (1D) olarak radyal ekseninde ayrı ayrı hesaplanır ve bunlar birbirine soğutucu ısı transferi ve eksenel doğrultu boyunca sabit olan içsel gaz basıncı ile ilişkilendirilir. Bunlar, diğer bir boyutlu ve yarı iki boyutlu hesaplama yapan kodlarda da aynı şekilde yapılmaktadır. Bu durumda, tüm eksenel bölgeler arasında yineleme yapmak gerekir; ancak, FRAPTRAN'da bu hesaplamadan kaçmak için her eksenel bölgeye ayrı ayrı bölgesel temas modeli uygulama yoluna gidilmiştir. Bu yöntem hızlıdır; fakat tablet ve zarf arasındaki boşluğun çubuk boyunca belirgin bir şekilde değişmesi durumunda fiziğe aykırı sonuçlar hesaplanmasına neden olabilir.

Soğutucu ısı transferi de bir boyutlu olarak modellenmiştir. Çubuğun etrafını saran sıvı/buhar soğutucunun özelliklerinin sadece eksenel olarak değişiyor olduğu kabul edilmiştir. Bu sebeple, radyal veya açısal sıcaklık değişimi ile çubuğun etrafındaki buhar miktarı hesaba katılmamış ve sıvı ve buhar fazları termodinamik dengede kabul edilmiştir (HEM).

Bu soğutucu kanalı modeli ise çubuktaki her ayrı bölge için ısı sınır koşullarını; yani, soğutucu sıcaklığı ve zarftan soğutucuya ısı transferi katsayısını, yakıt çubuğu gücü, soğutucu giriş entalpisi, kütle akısı ve basıncının zamana bağlı değişimine göre hesaplamaktadır. FRAPTRAN-1.4'de ısı sınır koşullarının veya bu koşulları elde etmek için gerekli değişkenlerin girilebileceği iki ayrı seçenek mevcuttur; bu seçenekler sınır koşullarını anlatan bölümde detaylandırılmıştır.

Yakıt Zarf Mekanik Etkileşimi (PCMI) için se, yakıt çubuğu içindeki boşluk bir kez tamamen kapandığında, tablet ve zarf arasında eksenel hareket tamamen bastırılmış olarak “eksenel yapışma” temeline dayalı modellenmektedir. Bu modelleme yüksek yanma oranına sahip yakıtlar açısından, tablet ve zarfın bağlanması kaymayı engelleyeceği için, uygun bir modelleme olmuştur. Ancak, düşük veya orta yanma oranlarındaki yakıtlar için, tablet-zarf mekanik teması örneğin, FALCON'da kullanılan “sürtünmeli kayma” temelli modellerle daha iyi temsil edilmektedir.

FRAPTRAN'da fisyon gaz salımı ve yakıt deformasyonu (şişme/patlama)'nın geçiş rejimi esnasında birikmiş gazın ısınmayla aniden genişlemesinin etkileri

FRAPTRAN'da mevcut değildir. Ayrıca, zarf tüpü için FRAPTRAN diğer kodlarda kullanılan "kalın duvar modeli"nden farklı olarak "ince kabuk modeli" kullanılmaktadır. Bu model, malzeme özellikleri, gerilmeler ve ebat değişimlerini zarf kalınlığı boyunca eşit olarak kabul etmektedir.

Yakıt performansı çözümlerinin en önemli noktalarından birisi, zarfın işlevini yitirip yitirmediğinin tespiti. Bundan dolayı kodlarda, reaktör dışında zarf tüpleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiş verilere dayalı işlevsizleşme ölçütleri mevcuttur. Her kodun kabul ettiği farklı ölçütler vardır.

FRAPTRAN-1.4'ün güç esaslı geçiş rejimleri (özellikle reaktivite kazası - RIA koşulları), soğutucu esaslı geçiş rejimleri (özellikle soğutucu kaybı kazası - LOCA koşulları) ve hem güç hem de soğutucu esaslı geçiş rejimleri (özellikle beklenebilecek geçiş rejimi (ani durdurmasız) - ATWS) koşulları için geçerliliği denetlenmiş ve kodun ayrıntılarının anlatıldığı NUREG/CR-7023 [Geelhood, K.J., 2011a] raporunun ikinci cildinde bu ayrıntılar yer almıştır.

Zarf işlevsizleşme ölçütü farklı dökümanlarda raporlanmıştır: NRC NUREG-0800, Standard Review Plan ve ASME B&PV Code Section III Article NH-3000 [Garkisch, H., internet kaynağı]. Bu ölçüt, iki kısımdan oluşmaktadır; birincisi zarf gerilme ölçütü, ikincisi ise zarf ebat değişimi ölçütüdür. Sürünme önem teşkil ediyorsa, ikinci ölçüt esas alınır. Ancak, gerilme için de konservatif sınırlar belirlenmiştir.

Zarf gerilme ölçütü, farklı yükleme mekanizmaları için ayrı ayrı hesaplanabilir: P_m, birincil zarf gerilmesi (zarf boyunca basınç değişimi ve PCMI); P_I, birincil bölgesel gerilme (tablet çatlaması ve şişmeye bağlı gerilme arttırıcı); P_b, birincil bükülme gerilmesi (bükülme ve tablet-zarf etkileşimi farklılıkları); ve Q, ikincil gerilme (ısı gerilmeleri) dikkate alınarak;

- 1) $P_m < 1.0 S_m$
- 2) $P_m + P_I < 1.5 S_m$
- 3) $P_m + P_I + P_b < 1.5 S_m$
- 4) $P_m + P_I + P_b + Q < 3.0 S_m$

koşulları sağlanmalıdır. Burada, S_m , oda sıcaklığı koşullarındaki S_y (akış gerilmesi)'nin üçte ikisi, işletme sıcaklığındaki S_y 'nin üçte ikisi, oda sıcaklığı koşullarındaki S_u (kopma gerilmesi)'nin üçte biri, ve işletme sıcaklığındaki S_u 'nun üçte biri hesaplanarak, bu değerlerden en küçüğü olarak belirlenir.

Genelde tipik yakıt performans kodlarında P_I ve P_b hesaplanmaz, P_m ve Q hesaplanır.

Zarf Ebat Değişimi Ölçütü:

Toplam kalıcı ebat değişimi şu sınırları aşmamalıdır:

- 1 % zar ebat değişimi (sınırlandırıcı)
- 2 % bükülme ebat değişimi
- 5 % bölgesel ebat değişimi

Bu sınırların gerekliliği, zarf gerilmesi, akış gerilmesi yani sınır gerilme değerine ulaşmadığı zamanlarda da yavaş hızla gerçekleşen ebat değişiminin birikmesini engellemektir. Çubuk iç basıncı, sistem basıncı ve zarfın tablet genişmesi ve PCMI sebepli ebat değişimleri zarfa etki eden yükleme mekanizmalarıdır. FRAPTRAN bükülmeme ebat değişimi ve bölgesel ebat değişimi'ni hesaplamalarına katmaz ve sınırlama getirmez.

Son olarak da; şu anda kullanımda olan bütün kodlar gibi FRAPTRAN'da işlevsizleşme olduktan sonrasında olabilecek yakıt soğutucu etkileşimi, aksisimetrik geometrinin kaybı, vb. durumlar için modelleme yapmamaktadır. Bu sebeple değerlendirmelerde, işlevsizleşmeye kadar olan modellemeler esas alınmıştır.

3.1.1 Veri hazırlama

Koda yakıt çubuğunun boyutları, yay boyutları, tablet boyutları, tablet izotop bilgileri, tablet üretimi, zarf üretimi, boşluk gazı, yakıt demeti boyutları, reaktör özellikleri, zamana bağlı güç değişimi, eksenel güç profili, radyal güç profili, başlangıç ve bitiş koşulları, zaman adımları, modeller, nodalizasyon ve girdi/çıkı

özelliklerini tanımlayan ilgili değerler girilerek benzeşimi yapılacak yakıt tanımlanır ve kodun benzeşim yapısı sonuç verebilmesi için gerekli bilgiler koda aktarılır.

“\$boundary Data Block” isimli ısıl hidrolik sınır koşullarının girildiği veri bloğundaki seçenekler, geçiş rejiminin sağlıklı tanımlanması açısından çok önemlidir. Bu veri bloğu dört seçenek içerir. Bu seçenekler ‘coolant’, ‘heat’, ‘reflood’ ve ‘radiation’ seçenekleridir. Bu seçeneklerin nasıl kullanılacağı ve hangi durumlarda kullanımlarının uygun olduğu aşağıda özetlenmiştir:

‘coolant’ seçeneği

Bu seçenek, soğutucu su ise ve suyun basıncı, sıcaklığı ve kütle akısı biliniyorsa kullanılmalıdır. Bu seçenek kullanıldığında ‘heat’ seçeneği kullanılmamalıdır. Kaynamanın soğutucu sıcaklığı doyma sıcaklığında gerçekleştiği ya da kritik ısı akısı geçildiği durumlar için kullanılacak ısı transferi katsayısı modelleri, kaynar sulu reaktörler ve basınçlı su reaktörlerinde gerçekleştirilecek soğutucu kazaları göz önünde bulundurularak farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde kullanılacak şekilde yenilenmiştir. Bu seçeneğin kullanıldığında; akış kanalının geometrisini tanımlamak için “geomet” alt seçeneği, soğutucu basıncının zamanla değişiminin tanımlanması için “pressu” alt seçeneği, soğutucu kütle akısının zamansal değişiminin tanımlanması için “massfl” alt seçeneği, soğutucu giriş, çıkış veya kor ortalama entalpilerinden birini tanımlamak için “lowpl”, “upppl” veya “coreav” alt seçeneklerinden sadece biri, kaynama soğutucu doyma sıcaklığında gerçekleştiğinde kullanılan ısı transferi katsayısı korelasyonunun tanımlanması için “nucbo” alt seçeneği, ısı transferi katsayısının belirlenmesi için “chf” alt seçeneği, geçiş ve film kaynama ısı transferi katsayılarının hesaplanmasında kullanılacak modelleri belirlemek için “filmbo” alt seçeneği kullanılmalıdır.

‘heat’ seçeneği, soğutucu su olmadığında, sadece zarf yüzeyi sıcaklığı bilindiğinde ya da yakıt çubuğunun ısı ve mekanik davranışı belirli sınır koşulları için modellenenecekse kullanılmalıdır. Bu seçenek kullanıldığında, ‘coolant’ seçeneği kullanılmamalıdır. Aşağıda bu seçeneğin nasıl kullanılacağı ve verilerin nasıl girileceği anlatılmıştır. Basıncın zamanla değişimini tanımlamak için “press” alt seçeneği kullanılmalıdır. Her düşey bölge için soğutucu sıcaklığı ve ısı transferi katsayısı bölgenin üst kısmı için girilmelidir.(Bu bölgeler, düğümlerden farklıdır,

düğümlemler için kod tarafından ara değer hesabı yapılır.) Her düşey bölge için soğutucu sıcaklığının zamanla değişimi “tem” alt seçeneği kullanılarak tanımlanmalıdır. Her düşey bölge için ısı transferi katsayısının zamanla değişimi “htco” alt seçeneği kullanılarak tanımlanmalıdır. Zarf sıcaklığının hesaplanması için soğutucu sıcaklığı zarf sıcaklığına eşit tanımlanabilir, bu tanım yapıldığında ısı transferi katsayısı çok büyük girilmelidir (2.0×10^6 W/m²K ya da 352,222 BTU/ft²-hr-F).

‘reflood’ seçeneği, soğutucu kaybı durumunda yeniden akış gerçekleştiği durumlar için kullanılabilir. Bu seçenek ‘coolant’ ya da ‘heat’ seçenekleriyle birlikte kullanılabilir. Ancak, ‘coolant’ ve ‘heat’ seçenekleri hesaplamada, yeniden akışın başlama zamanına dek kullanılırlar. Yeniden akış başladığında ısınma ve yeniden akış modelleri kullanılır.

‘radiation’ seçeneği, kılıf içinde yer alan akış kanalı ve yakıt çubuğu için ve yukarıda sıralanan tüm seçeneklerle birlikte kullanılır. Bu seçenek kullanıldığında, ısı transferi için yakıt çubuğu ve soğutucu arasında yeni bir rezistans tanımlanmış olur.

Fraptran-1.4 koduna tanımlanacak veriler ve tanımları EK.A’de açıklanmıştır. Veri dosyası, bu bilgiler doğrultusunda hazırlanmaktadır.

3.2 FRAPCON-3.4a Yakıt Performans Kodu

Bu çalışmada, FRAPCON-3 serisinin FRAPCON-3.4a sürümü kullanılmıştır. A.B.D. Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından yürütülen reaktör güvenlik araştırma programının başlıca amacı, LWR yakıt çubuklarının uzun dönem işletme altındaki performanslarının kesin olarak hesaplanmasıdır. Bu amaçla, NRC sponsorluğunda geniş bir analitik bilgisayar kodu geliştirme programı başlatılmıştır. Tek yakıt çubuğu için uzun dönem yanma oranı tepkisinin hesaplanması için FRAPCON-3 kodu geliştirilmiştir.

FRAPCON-3 kodu Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarları’nda (PNNL) geliştirilmiştir ve FRAPCON-3 v1.0 ilk sürümüdür [Berna et al., 1997]. O zamandan beri sekiz güncelleme sürümü piyasaya sürülmüştür (FRAPCON-3 v1.1, FRAPCON-3 v1.2, FRAPCON-3 v1.3, FRAPCON-3 v1.3a, FRAPCON-3.2, FRAPCON-3.3, FRAPCON-3.4, FRAPCON-3.4a).

FRAPCON-3.4a, normal işletme altında LWR yakıt çubuğu davranışlarını hesaplayan bir analitik araçtır. Kaynar sulu reaktörler, basınçlı su reaktörleri ve ağır sulu reaktörler için kullanılabilir. Uranumdioksit (UO_2), karışık oksit yakıt ya da MOX ($(U,Pu)O_2$), bütünleştirilmiş yanabilir yutucu bulunan (IFBA), zirkonyumdiborayt (ZrB_2) kaplamalı UO_2 ve Gadolinyum ile karıştırılmış yakıt için yakıt modelleri ve Zircaloy-2, Zircaloy-4, M5 ve ZIRLO içinde zarf modellerine sahiptir.

Yakıt, zarf ve gaz malzeme özelliklerini, yanma oranına bağlı özellikler ve gelişmiş zirkonyum bazlı zarf alaşımları için özellikleri de kapsayan MATPRO'dan alır. FRAPCON-3'deki malzeme özellikleri, malzeme özelliklerini oda sıcaklığından erime sıcaklığının üstündeki değerlere ve çubuk ortalama yanma oranı seviyelerine 0 ile 62 GWd/MTU arasında tanımlayan modüler altprogramlarda saklanmaktadır.

Kodun hesaplamaları normal güç reaktör operasyonlarında olan uzun periyodlu sabit güç durumu ve yavaş güç rampalarını gibi durumları kapsar. Kod, yakıt ve zarf sıcaklığı, zarf teğetsel gerilmesi, zarf oksidasyonu, yakıt ısınma şişmesi, yakıt yoğunlaşması, fisyon gaz salımı ve çubuk iç gaz basıncı gibi bütün önemli yakıt çubuğu değişkenlerinin zamana bağlı değişimini hesaplar. Buna ek olarak kod, geçiş rejimi yakıt performansı çözümleme kodu olan FRAPTRAN için başlangıç şartlarını türetmektedir.

FRAPCON-3.4a, tek kanalda soğutucu entalpisi yükselişi modelini kullanır. Aynı zamanda RELAP5 ve FRAPTRAN'da olduğu gibi yüksek yanma oranına sahip yakıtlarda tablet sınırında ani güç artışı oluşumuna izin verebilecek, değişken geometrik hesaplama aralığı kullanan bir sonlu fark ısı iletim modeli kullanır.

Mekanik modelleme için FRACAS-I (sonlu fark) modeli ya da FEA (sonlu eleman) modeli seçilebilir. FRACAS-I modeli PNNL tarafından önerilen ve varsayılan model olarak atanmış olan modeldir. FEA modeli yakıt ve zarf arasında kayma olduğu durumlarda zarf eksenel ebat değişimini hesaplamak için kullanışlıdır.

Fisyon gaz salım modeli için kullanıcı Massih, ANS-5.4 (ANS, 1984) ya da FRAPFGR modellerinden birini seçebilir. Massih modeli PNNL tarafından önerilen ve varsayılan model olarak atanmış olan modeldir. ANS-5.4 modeli kısa ömürlü

radioaktif gaz çekirdeklerinin salımının hesaplanmasında kullanışlıdır. FRAPFGR modeli de FRAPTRAN 1.4'de geçiş rejimi gaz salımı modelinin ilklendirilmesi için kullanışlıdır.

Bu modeller ve diğer modellerin ayrıntılı açıklamaları NUREG/CR-7022v1 [Geelhood, K.J., 2011b] dökümanında bulunabilir.

3.2.1 Veri hazırlama

Koda yakıt çubuğunun boyutları, yay boyutları, tablet şekli, tablet izotop bilgileri, tablet üretimi, zarf üretimi, boşluk gazı, reaktör özellikleri, zamana bağlı güç değişimi, eksenel güç profili ve eksenel sıcaklık dağılımı, modeller, nodalizasyon, hassaslık, girdi ve çıktı özelliklerini tanımlayan ilgili değerler girilerek benzeşimi yapılacak yakıt tanımlanır ve kodun benzeşim yapıp sonuç verebilmesi için gerekli bilgiler koda aktarılır.

Frapcon-3.4a koduna tanımlanacak veriler ve tanımları EK.B'de açıklanmıştır. Veri dosyası, bu bilgiler doğrultusunda hazırlanmaktadır.

3.3 RELAP5/SCDAP Mod3.4 Isıl-Hidrolik Çözümleme Kodu

RELAP5/SCDAP [Allison, C.M. and Wagner, R.J., 2004] (Reactor Excursion and Leak Analysis Program/Severe Core Damage Analysis Package - Reaktör Sapma ve Sızıntı Çözümlemesi Programı/Ciddi Kor Hasarı Çözümleme Paketi) yazılımı, Amerika Birleşik Devletleri'nde, Nükleer Düzenleme Komisyonu için Idaho Ulusal Laboratuvarı (INL) tarafından geliştirilmiş olan RELAP5 ve SCDAP yazılımlarının bir arada kullanılmasını sağlayan bir programdır. Program, hali hazırda Innovative Systems Software şirketi tarafından geliştirilmektedir ve nükleer santral çözümlemeleri için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yazılım, hafif sulu reaktörlerde meydana gelebilecek soğutucu kaybı kazalarının ya da işletme sırasında gerçekleşebilecek, santral kararması, besleme suyu kaybı gibi durumların benzeşiminin yapılmasında kullanılır. Nükleer santraller ve santraller sistemleri yanı sıra, RELAP5 yazılımı suyun özellikle soğutucu akışkan olarak kullanıldığı birçok sistemin modellenmesinde kullanılabilir. Yazılım, suyun yanı sıra, su-yoğuşmayan gaz karışımları içeren sistemler için de kullanılabilir.

RELAP5/SCDAP sayısal çözümü, örtük sayısal çözümleme ile yapılır; iki fazlı akış için, faz hızları eşit kabul edilmeden çözüm yapılır. Sayısal çözümler, boru, pompa, vana, jet pompası, faz ayırıcı, ısıtılan ya da ısıtılmayan çubuk ve yüzeyler gibi sistem parça ve elemanları tanımlanarak, bu elemanlara ait modeller kullanılarak yapılır. Akış için farklı geometrik durumlarla, Boron konsantrasyonu takibi gibi farklı durumlar da bu yazılımla modellenenir.

Yazılımın hidrodinamik modellemesi, bir boyutta ve zamanla değişen durumlarda çözümlemenin zamana bağıllığı hesaplanacak şekilde yapılır. İki fazlı akışta fazlar iki ayrı akışkan olarak modellenir ve daha önce de bahsedildiği gibi akışkan içinde çözünen Boron ya da akışkanda bulunabilecek yoğunlaşmayan gazlar için de çözüm yapılır.

Karmaşık sistemler için karmaşık çözümleri yapabilen yazılım, yaygın kabul bulmuş, basit modellerin kullanımına da uygundur.

Yazılım kullanılarak, tanımlanacak her sistem parçası ve tanımlanan her sayısal düğüm için, basınç, gaz fazı ve sıvı fazı içsel enerjisi, gaz fazı hacim oranı, faz hızları, yoğunlaşmayan gazın kütle akış oranı ve Boron yoğunluğu hesaplanır. Bunun için sekiz koruma denklemi çözülür. Bu denklemlerin ikincil bağımlı değerleri olan, faz kütle yoğunlukları, sıcaklıkları, doyma sıcaklığı ve farklı yoğunlaşmayan gazların toplam yoğunlaşmayan gaz kütlesi içindeki miktarları da yazılımla hesaplanır. Bahsedilen denklemlerin çözümünde kullanılan kütle, momentum ve enerji transferi ile ilgili modeller de, iki fazlı akışın akış ve ısı transferi rejimleri göz önüne alınarak uygun seçimler yapılmasıyla hesaplamalara katılırlar.

RELAP5/SCDAP yazılımının SCDAP paketi, radyasyonu ve radyoaktif fisyon ürünlerini sistem içinde tutan bariyerlerden yakıt, yakıt zarfı ve basınç kabının bütünlüğünü kaybedebileceği ciddi kazaların benzeşiminin yapılmasında kullanılır. SCDAP paketi, bu çalışmada kullanılmadığından burada detaylı anlatılmamıştır.

3.4 Kodlar Arasındaki Bağlantılar

FRAPCON-3.4a ve FRAPTRAN-1.4 hem normal işletme hem de geçiş rejimi koşullarında LWR yakıt performansını hesaplamak için geliştirilmiş bağlantılı kodlardır. Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı gibi FRAPCON-3.4a'da yakıtın temel bir tanımı yapılarak yanma oranına bağlı normal işletme değerlerini

hesaplanmakta ve hesaplanan gerekli veriler FRAPTRAN-1.4'de girdi dosyası olarak tanımlı bir dosyaya aktarılmaktadır. Bu veriler, FRAPTRAN-1.4 için başlangıç koşullarını oluşturmaktadır.

FRAPTRAN-1.4 ve RELAP5/SCDAP arasında, FRAPTRAN-1.4'ün kaza esnasındaki geçiş rejimini temellendirdiği RELAP5/SCDAP tarafından hesaplanan soğutucuya ait ısıl-hidrolik verilere ulaşabileceği bir bağlantı mevcut değildir. Bu sebeple, RELAP ve FRAPTRAN birlikte kullanmayı kolaylaştırmak için gerekli ısıl-hidrolik verileri elde etmek adına C+ ve FORTRAN programlama dillerinin bir arada kullanıldığı bir bağlantı programı oluşturulmuştur. Bu program ile FRAPTRAN-1.4'de tanımlı 'coolant' seçeneğinde gereken verileri yani soğutucu giriş entalpisi, basıncı ve kütle akısı değerler hesaplanmaktadır. Kodun ilk kısmı RELAP5/SCDAP çıktısından ilgili verileri yani zamana bağlı soğutucuya ait basınç değeri, bu basınçtaki sıvı sıcaklığı, doyma sıcaklığı, kuruluk derecesi, kütle akısı verilerinin çekilmesi görevini yerine getirmektedir. Daha sonra ilgili termodinamik hesaplamalara ait altprogramların mevcut olduğu ikinci kısımda birinci kısımda elde edilmiş olan basınç, sıcaklık ve kuruluk derecesi değerlerine göre entalpi değerleri hesaplanmaktadır ve de FRAPTRAN-1.4'de istenilen formata getirilen zamana bağlı entalpi, kütle akısı ve basınç değerleri bir dosyaya aktarılmaktadır. Kodun burada sonlandırılma veya FRAPTRAN-1.4 sınırları dahilinde gerekli seçimlerin yapılması için kullanıcıyı yönlendirip, sonuçta FRAPTRAN-1.4 girdisini tamamen oluşturma seçenekleri mevcuttur.

4 BUHAR ÜRETECİ TÜP KIRILMASI KAZASI

PWR'lerin güvenlik analizinde Tasarıma Esas Kazalar (DBA) sırasında yakıt davranışının incelenmesi önemli bir yere sahiptir. Bu durumlarda sistemin, ciddi işlevsizleşmeler olabileceği düşünülen durumlar için belirlenmiş güvenlik ölçütlerine uygun davranış gösterip göstermediği belirlenmelidir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, kaza koşulları üzerine deneysel veya teoriye dayalı çalışmalar içinde çoğunlukla; ECCS tasarımı ve en sıcak akış kanalındaki güç sınırlandırılmasının dayandırıldığı soğutucu kaybı kazası (LOCA) ve Reaktivite Kazası (RIA) için yakıt analizi çalışmaları yapıldığı görülmektedir.

Soğutulabilir geometri prensibiyle hareket edilerek LOCA koşullarının temel alındığı, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1971 yılında "Interim Acceptance Criteria for ECCS" olarak kabul gören En Yüksek Zarf Sıcaklığı (PCT), sınır değeri 1204°C ve Eşdeğer Zarf Etkileşme Oranı (ECR), sınır değeri 17%, ölçütleri ve sınırları ile yine soğutulabilir geometri prensibiyle hareket edilerek RIA koşullarının temel alındığı, 70'li yıllarda çalışılan deneylerde taze veya en fazla 30 GWd/MTU'ya kadar yakılmış UO₂ yakıtları için elde edilmiş güvenlik ölçütleri ve sınırları, bugünkü teknolojinin, hedeflerin, hatta yakıtların ve reaktörlerin değişimine rağmen halen geçerlidir.

Nükleer endüstri, ekonomik olarak ilerlemek adına, yakıt yanma oranını artırma ve daha dayanıklı malzemeler kullanma hedeflerine yönelmiştir. Bu hedefler doğrultusunda yakıt işletme koşulları ve yakıt teknolojisinin değişimiyle, güvenlik ölçütlerinin ve bu ölçütlere ait sınır değerlerinin yeniden değerlendirilmesi ve dolayısıyla DBA'ların da ilgili güvenlik ölçütlerine uygunlukları açısından yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, son zamanlarda lisanslama çalışmaları için LOCA ve RIA koşullarında yakıt davranışı ve güvenilirliği üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Aynı şekilde bir LOCA olan, sonuçları çevreye radyoaktivite salınımına sebep olabileceği için büyük önem taşıyan, daha önceki bölümlerde örneklediği gibi azımsanmayacak CDF yüzdelerine sahip olan ve kaza esnasında soğutucu kaybı yaşandığı için ısıl hidrolik olarak bütün sisteme etki eden ve yakıt bütünlüğünü de etkileme ihtimali bu sebeplerle göz ardı edilemeyecek olan SGTR kazası koşulları

için de yakıt davranışı ve güvenilirliği analiz edilmeli, ilgili güvenlik ölçütlerinin ve sınırlarının belirlenmesinde yerini almalıdır.

Buhar reteci Tp Kırılması kazası durumu meydana geldiği zaman, Buhar reteci (SG)'nin ikinci tarafına göre yüksek basınçta olan birinci taraftaki soğutucu, yüksek basınç farkından dolayı hızla ikinci devreye akar ve ikinci taraftaki suya karışır.

Operatör, prosedürleri takip ederek, etkilenmiş SG güvenlik vanasından buhar kaçışı olmasını engellemekten sorumludur. SGTR kazasının gidişatını kırılmış tp sayısı, kırığın bulunduğu yer ve Acil Kor Soğutma Sistemleri'nde olabilecek aksaklıklar belirler.

Diğer aksaklıkların oluşmadığı STGR kazalarında, prosedür şu şekilde ilerler:

- Birinci devreyi sağlam buhar reteciyle soğuturken, mümkün olduğunca kısa sürede, hasarlı buhar üretecinin birinci ve ikinci taraf dengeleyerek kırık akışını durdurmak,
- Sızıntı sonlandırıldığı zaman ECCS'yi kullanarak, birinci devre soğutucu kütlesini ayarlamak,
- Eşzamanlı olarak rahatlatma hattı kullanarak ikinci devrenin ve basınçlandırıcı spreylere ve ısıtıcılarını kullanarak birinci devrenin basınçları düşürülerek, reaktörü soğuk durma aşamasına geçirmek.

Eğer Yüksek Basınç Güvenlik Enjeksiyon (HPSI) sistemi ve Yedek Besleme Suyu (AFW) sistemleri çalışmazsa veya başka bir kurtarma tekniği uygulanmazsa, kor ısınması ile yüksek birinci devre basıncı altında erime meydana gelebilir. Bu tarz bir durumda, kalbin hasar almasını önlemek için basınçlandırıcı pilot kumandalı rahatlatma vanaları (PORVs) ve SG atmosferik buhar vanalarının bir kombinasyonu kullanılır. Bu hareketin amacı birinci devre sistem basıncını ve ikinci devre sistem basıncını dengelemek ve gerekirse, akümülatör ve Düşük Basınç Güvenlik Enjeksiyon (LPSI) sisteminin devreye gireceği basınç değerine düşürmektir.

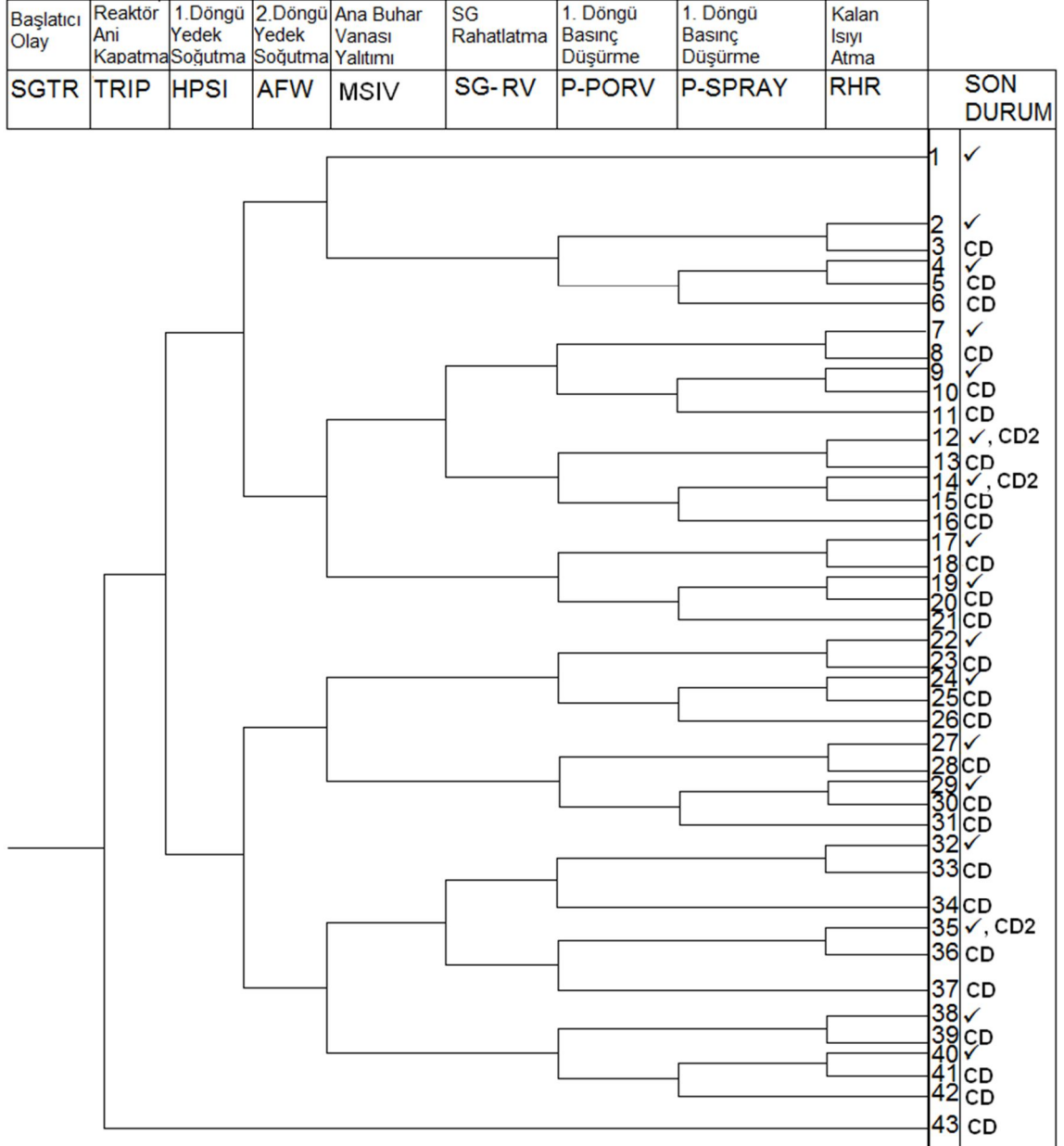
SGTR kazasına, sistemin normal koşullarda vermesi gereken tepkiden bahsetmek gerekirse; Buhar Üretici'nde tüp kırılması gerçekleşmesiyle, düşük basınçlandırıcı basıncı veya yüksek sıcaklık değişiminden dolayı reaktörün ani ve otomatik olarak kapatılması ve arkasından düşük basınçlandırıcı basıncını takiben Güvenlik Enjeksiyon (safety injection - SI) sinyali üretilmesi gerekir. Reaktörün kapatılmasıyla, Ana Buhar İzolasyon Vanası (MSIV) kapatılmalıdır. HPSI sistemi, reaktör soğutma sistemine (RCS) eksilen suyun yerine su sağlamalıdır. Küçük tüp kırılmalarında, reaktörün anide durdurulması ve HPSI sisteminin başlatılması manuel olarak yapılabilir. Ana Besleme Suyu (MFW) sistemi, SI sinyaliyle birlikte ani olarak durdurulur ve tüm buhar üreteçlerine soğutucu sağlamak için AFW sistemi otomatik olarak başlatılmalıdır.

Operatörlerin, hasarlı buhar üreticini tespit etmeleri ve tespit edilen buhar üreticini ve diğer muhtemel sızıntı yollarını izole etmeleri gerekmektedir. Ayrıca, sızıntıyı mümkün olduğunca düşürmek için; ikinci devre soğutmasıyla yani AFW/MFW ve buhar boşaltma sistemlerinin kullanımıyla veya basınçlandırıcı PORV'lerinin kullanımıyla operatörlerin reaktör soğutma sisteminin basıncını düşürmesi gereklidir. Bu işlem tamamlandığında, RCS'nin tekrar basınçlanmaması için HPSI sistemini kontrol etmeleri gerekmektedir. Daha sonrasında ise, artık ısı atılmalıdır.

Sistemin vermesi gereken tepkiyi, SGTR kazasında devreye girmesi gereken elemanların devreye girip girmemesine bağlı olarak olayların gidişatının farklı seçenekler için takip edilebileceği "Olay Ağacı"na dökülerek Şekil 4.1'deki olay ağacında görüldüğü gibi SGTR kaza durumu özetlenebilir. Burada, Son Durum reaktörün güvende olduğunu (✓) veya kor hasarlanmasının mevcut olduğunu (CD) anlatır.

Şekil 4.1'deki '1. durum' olaya başarıyla müdahale edildiği durumdur ve en yüksek ihtimale sahip gidişat bu durumla sonlanır. '2.-6. arası durumlar' SG'nin ana buhar izolasyon vanasının kapanmadığı durumları temsil etmektedir. Bu durumda; soğutucunun buhar üreticine akışı, yani birinci devrenin soğutucu kaybetmesi ve bu suyun türbine gönderilmesi devam etmektedir. Bu durumda operatör, en hızlı şekilde besleme ve boşaltma işlemiyle RCS'yi soğutmalıdır ve izolasyon vanasını kapatmalıdır. '2. durum' da izolasyon vanasının kapatılamadığı ancak besleme ve

boşaltmayla RCS'nin basıncının düşürülmesinin başarıya ulaştığı durumdur. Bu durumda, uzun dönemli besleme ve boşaltma işleminin devamlılığının sağlanması gereklidir.



Şekil 4.1. SGTR olay ağacı.

Ciddi kor hasarına sebep olabilecek en baskın gidişat, hem birinci devrenin hem de ikinci devrenin basıncını düşürmek üzere besleme ve boşaltma işleminin başarıya ulaşamadığı '16., 26. ve 37. durum'larla sonlanmıştır.

Ulaşılabilecek başka bir sonuçsa, ikinci devre soğutmasının mümkün olmadığı durumda, ciddi kor hasarlanması, besleme ve boşaltma işleminin uygulanmasıyla engellenebilir. Bu sonuç, '7., 9., 12.,14.,17.,19., 32., 35., 38., ve 40. durum'ların gelişimine bakılarak gözlemlenebilir.

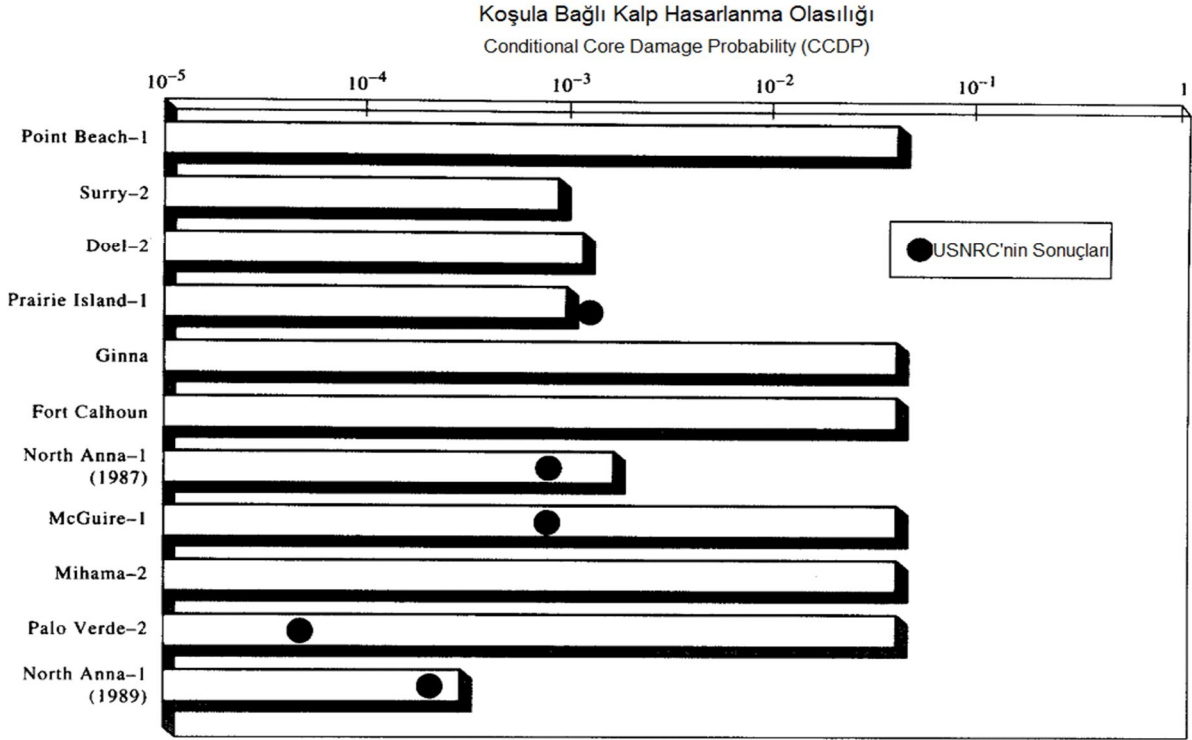
Son olarak; ciddi kor hasarlanmasının, izolasyon vanasının kapatılmasının başarılı olması durumunda sadece ikinci devre soğutmasının ve birinci devre basınç düşürmesinin kullanılmasıyla engellenebileceği, olay ağacında '22. durum' üzerinden görülmektedir.

Olay ağacında, 12., 14. ve 35. durumlarda kor soğutması gerçekleşse de, ikinci devre basıncı düşürülemeyeceği için buhar üretici hasarlanabilir.

4.1 Mihama Ünite-2

Bu çalışmada, 1991 yılının Şubat ayında Mihama Nükleer Güç Santrali'nin 2. ünitesinde meydana gelen SGTR kazası model alınarak; tam güçte çalışan PWR tipi bir reaktörde, yaklaşık 20m yüksekliğe ve 4m dış çapa sahip bir Buhar Üretici'nde bulunan 22mm dış çapı olan ve 1.27mm et kalınlığına sahip 3260 tüpten birinde giyotin kırık meydana geldiği bir SGTR kazası koşulu incelenmiştir [Kitsunai, Y. and Kobayashi, H., 2011].

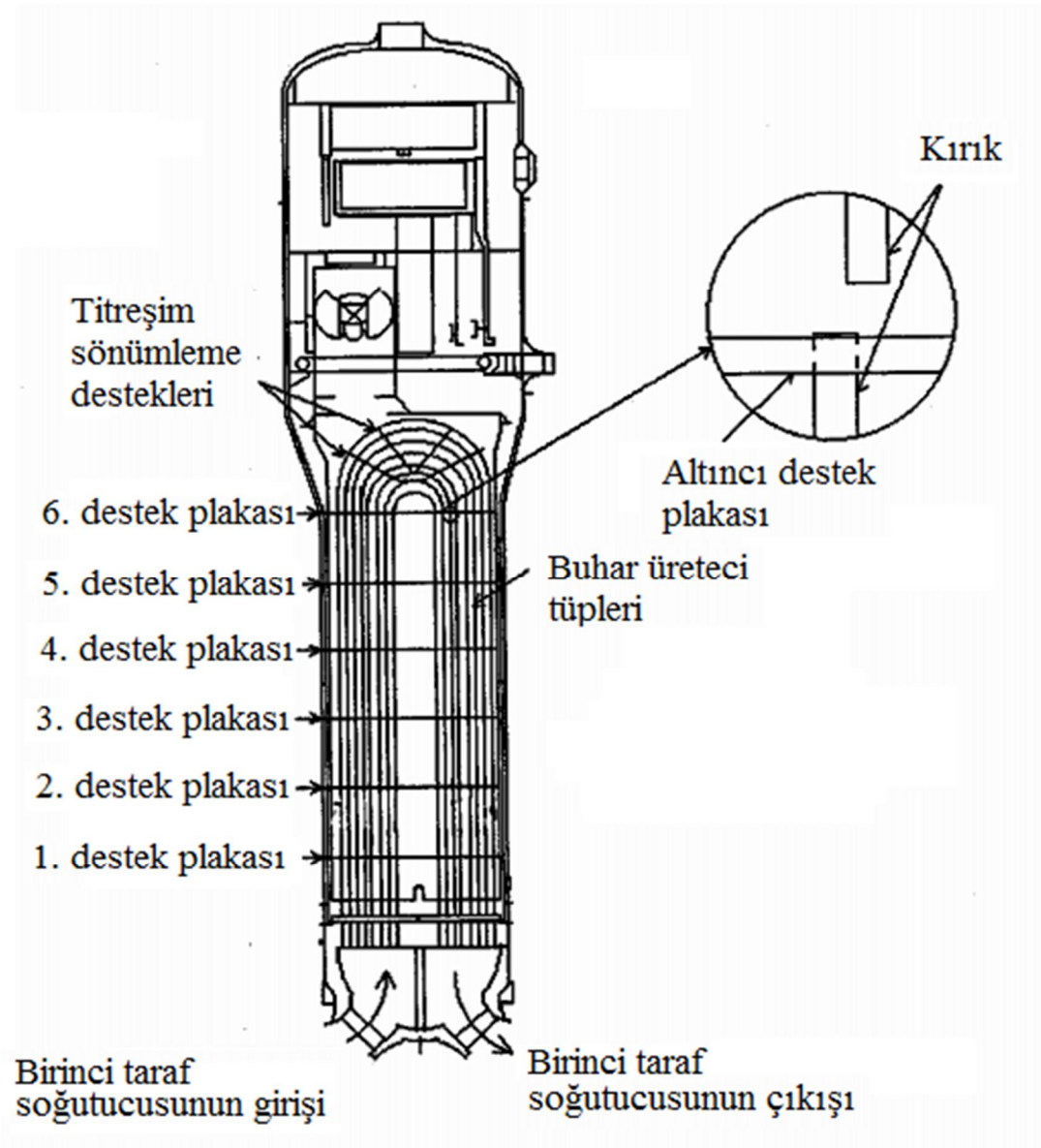
Watanabe (1997)'nin yaptığı çalışmaya göre, çalışmasında yer alan SGTR kazaları içinde Mihama-2'deki SGTR kazası için Şekil 4.2'den görüldüğü gibi "Kor Hasarlanma Olasılığı" diğerlerinden yüksektir. Bu sebeple, Mihama-2 SGTR kazası, bu çalışmada yapılacak olan modellemelere temel alınmıştır ve modellemeler, bu reaktördeki çalışma koşulları ve boyutlar kullanılarak yapılmıştır.



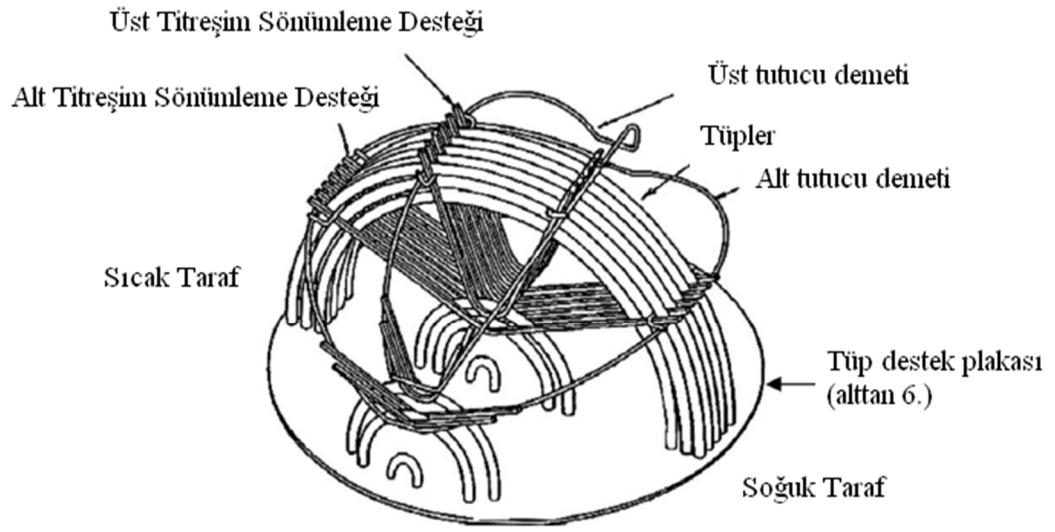
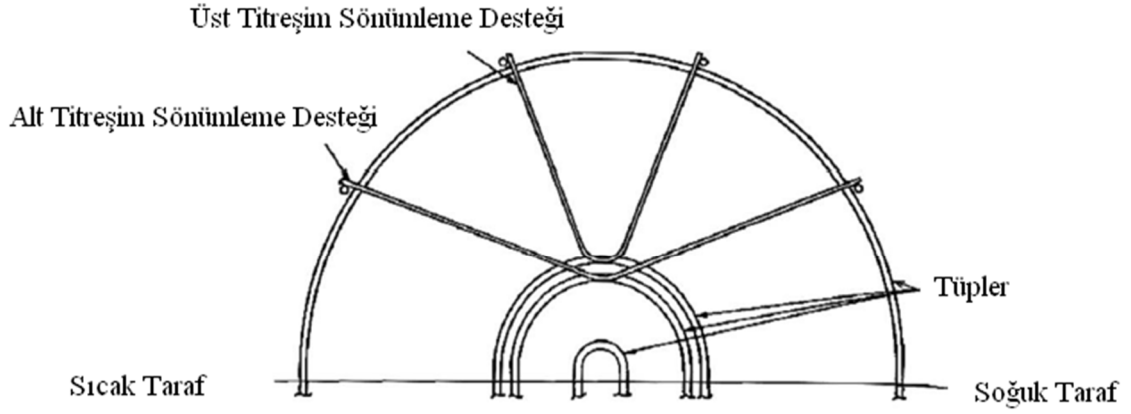
Şekil 4.2. Her bir SGTR Olayı İçin Koşula Bağlı Kor Hasarlanma Olasılığı
[Watanabe, N., 1997].

Mihama-2, Westinghouse tasarımı iki döngülü bir santraldir ve 1972 yılında işletmeye alınmıştır. SGTR kazası gerçekleştiğinde, santral 19 yıldır işletmede bulunmaktadır. Kırık gerçekleştiğinde 10 yıldır serviste bulunan SG, Westinghouse model 44 tip bir buhar üreticidir [Livingston, N.J., 1996]. Bu model, U şekilli yani birinci tarafın suyunu taşıyan tüplerin buhar üreticine ters U şeklinde yerleştirildiği bir tasarımıdır (Şekil 4.3.).

Bu kazada tüp kırığı, Tüp Titreşimi Sönümlleme Barları (AVBs)'nin yanlış yerleştirilmesi sonucu tüplerinin malzemesini yüksek yorulmaya uğraması sonucu gerçekleşmiştir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, U şekilli tüpler, tüp destek plakaları ve Şekil 4.4'de ayrıntıları görülen AVB'ler tarafından desteklenmektedir. AVB'lerin arasında, bazı titreşim söndürme barları tasarımına uygun şekilde yeterli derinliğe kadar yerleştirilmemiştir. Kırılan tüpün bulunduğu yerdeki tüpler AVB'ler tarafından desteklenmemiştir.



Şekil 4.3. SG ve kırılan SG tüpünün yeri [Kitsunai, Y. and Kobayashi, H., 2011].



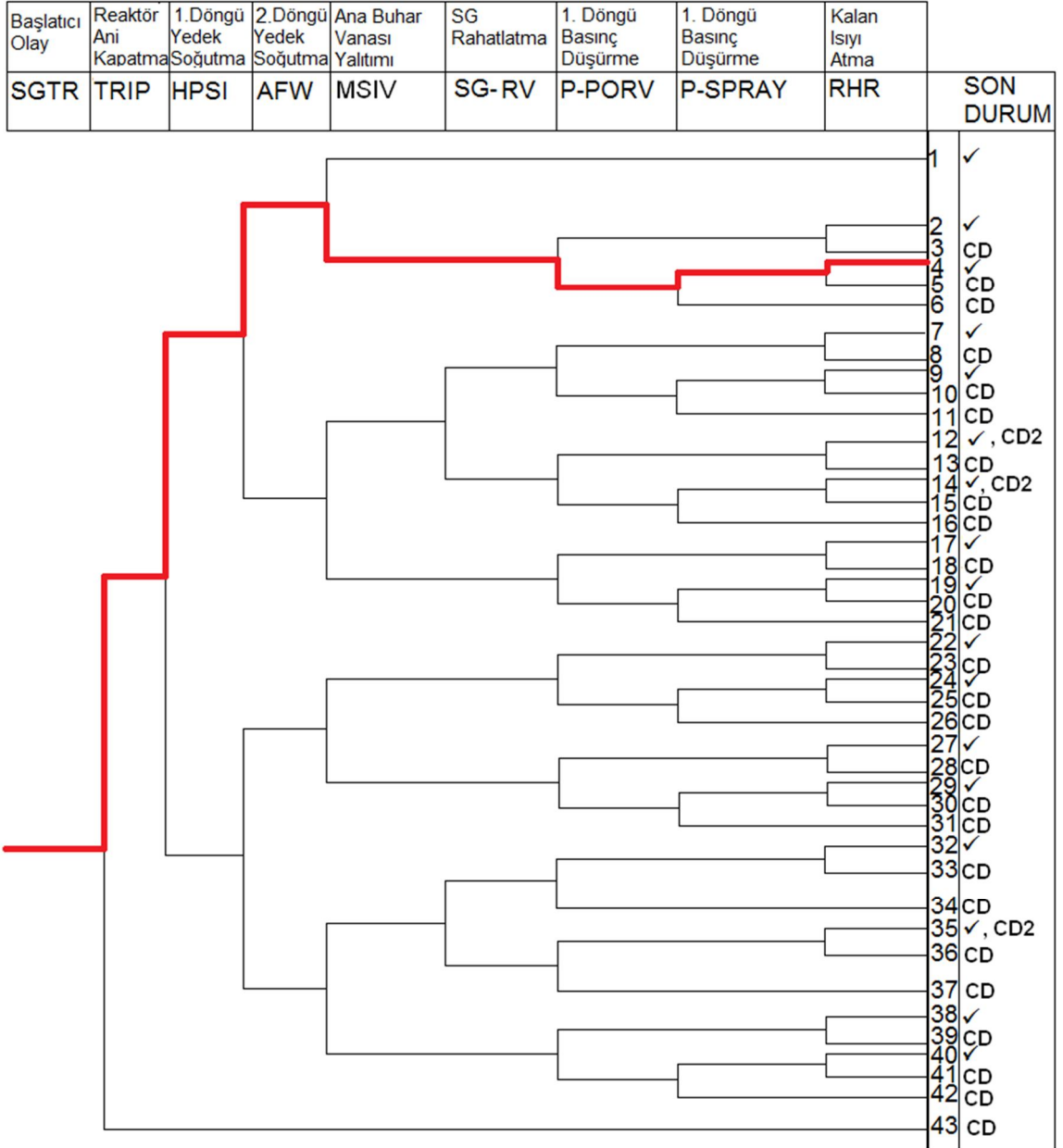
Şekil 4.4. Bir SG'de bulunan U şekilli tüp demeti için kullanılan AVB'ler [Kitamura, M., 2010].

Buna ek olarak, kaza esnasında, iki farklı vanada da arıza meydana gelmiştir:

-MSIV'nin tam olarak kapanamaması

-PORV'lerin kullanılamaması

Şekil 4.1'de görülen olay ağacından anlaşılabileceği üzere bu iki aksaklığın da olayı kor hasarlanmasına taşıma ihtimali vardır. Kazada gerçekleşen olaylar, Şekil 4.5'de gösterilen olay ağacında kırmızıyla gösterilmiş kısımlardan görülebilmektedir.



Şekil 4.5. Mihama-2 SGTR kazasının, SGTR olay ağacı üzerinde izlediği yol.

Kırığın gerçekleşmesinin hemen ardından sistemin birinci akış döngüsü tarafından ikinci akış döngüsü tarafına, iki tarafın basınç farkından dolayı, kütle akışı başlamıştır. Bu kütle akışı, birinci tarafın basınç kaybetmesine ikinci tarafın basınçlanmasına sebep olmuştur.

Birinci tarafın basıncının düşmesi, birinci tarafta reaktörün (yaklaşık 200 sn gecikmeyle) ve reaktör soğutucu pompalarının kapanmasına; ikinci tarafta ise, ana besleme suyu pompalarının ve ana buhar izolasyon vanalarının kapanması için

sinyallerin üretilmesine sebep olmuştur. Oluşan bir arıza yüzünden, kırılan buhar üretici tarafında ana buhar izolasyon vanası açık kalmıştır. Bu, operatörlerin hangi buhar üreticinde kırık olduğunu belirlemelerini engellemiş ve kazanın uzun sürmesine sebep olmuştur. Bunun yanı sıra, kaza boyunca birinci taraf suyu kırıktan ikinci tarafa, türbine ve yoğunlaştırucuya ulaşmıştır.

Birinci tarafta basıncın düşmesiyle HPSI sistemi otomatik olarak çalışmaya başlamış ve acil kor soğutma suyu soğuk bacakla üst plenuma ulaştırılmaya başlamıştır. Aynı zamanda da, basınçlanan ikinci tarafın basıncını düşürmek amacıyla, buhar üreticinin ikinci tarafındaki basınç rahatlatma vanaları açılmıştır.

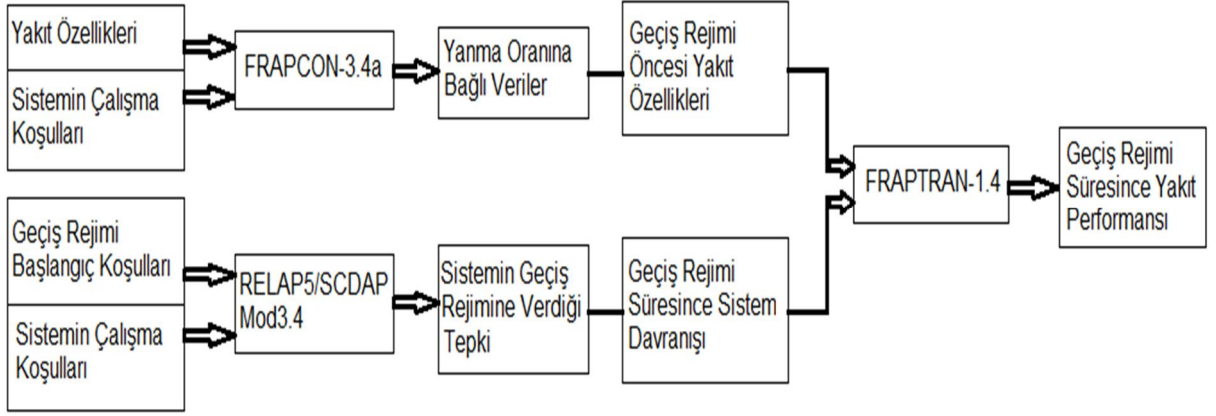
Buhar üreticinin ikinci tarafının basınç rahatlatma vanası, Mihama santrali ikinci ünitesinin acil durum işletme prosedürü gereğince aralıklarla kapatılıp açılmıştır. Kırıktan kütle akışını azaltmak üzere, birinci ve ikinci tarafın basıncını dengelemekte bu durum (buhar üretici rahatlatma vanasının açılıp kapatılması) güçlüklerle neden olmuştur.

Birinci ve ikinci tarafın basıncını dengelemek amacıyla, birinci tarafa bağlı olan basınçlandırıcıda yer alan PORV operatörlerce açılmak istenmiş ancak vana açılmamıştır. Bunu takiben basıncı düşürmek için basınçlandırıcı spreylere devreye alınmıştır. Basınçlandırıcı spreylere devreye alındığında basınçlandırıcı buharla dolu durumdadır ve bu birinci tarafın basıncının düşürülmesinde zorluk olduğunu göstermektedir. Yüksek basınç acil durum soğutma suyu enjeksiyonu, basınçlandırıcıda su seviyesi yükselince durdurulmuştur. Basınçlandırıcı spreylere ise birinci tarafın basıncıyla ikinci tarafın basıncı sağlam soğutucu döngüsü pompalarıyla dengelenebildiğinde durdurulmuştur.

Kaza sırasında; operatörler, yaklaşık 15dk sonra kırığın gerçekleştiği buhar üretici tarafındaki ana buhar izolasyon vanasının açık kaldığını farketmişler ve bu vana kapatıldıktan sonra hangi buhar üreticinde kırık olduğunu anlayabilmişlerdir. Kaza yaklaşık 70dk sürmüş ve kaza sonucunda, birinci taraftan ikinci tarafa yaklaşık 2600 kg su geçmiştir [Seul, K. W., et al., 1996].

5 BUHAR ÜRETECİ TÜP KIRILMASI KAZASI KOŞULLARI ALTINDA YAKIT DAVRANIŞI BENZEŞİMİNİN YAPILMASI

Buhar Üreteci Tüp Kırılması kazası koşulları altında yakıt davranışı benzeşiminin yapılması için FRAPTRAN-1.4 yakıt çözümleme kodu kullanılmıştır. Yaklaşık 15 ile 60 GWd/MTU arasında değişen yanma oranlarına sahip farklı çevrimler için benzeşimler yinelenmiştir. Geçiş rejimi başlangıç koşulları ve geçiş rejimi boyunca sistem davranışı, FRAPCON-3.4a ve RELAP5/SCDAP Mod3.4 kodlarının kullanımıyla belirlenerek FRAPTRAN-1.4 koduna SGTR kazası sırasında sistem davranışını ve yakıtın geçiş durumu başlangıç koşullarını tanıtmak için kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Buhar Üreteci Tüp Kırılması kazası koşulları altında yakıt davranışı benzeşiminin yapılması için izlenen işlem süreci.

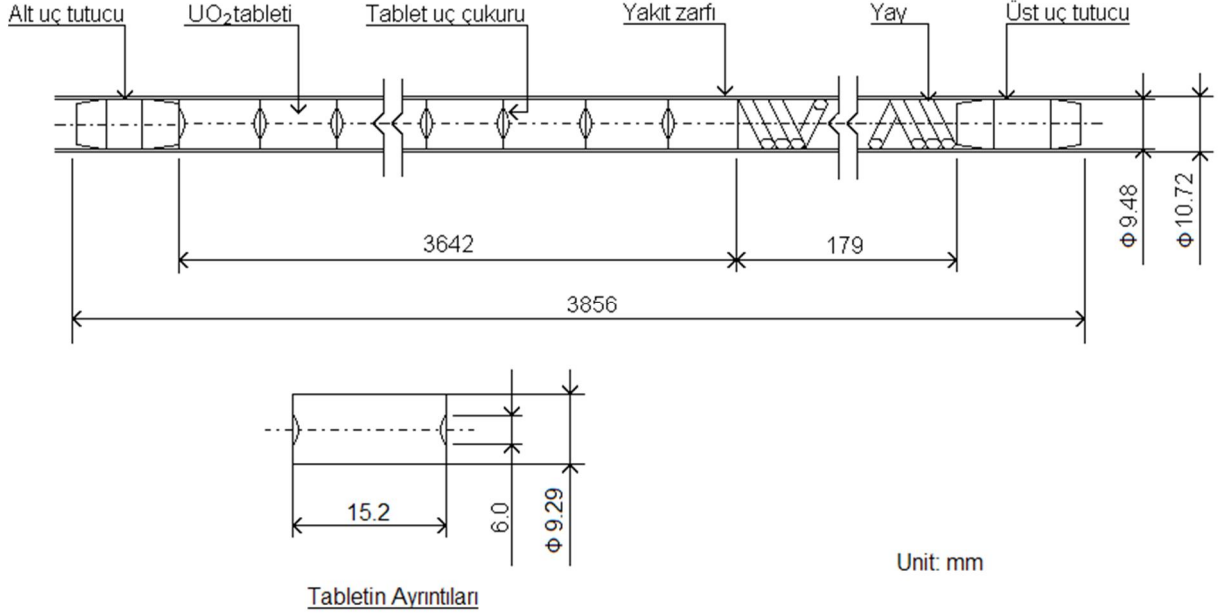
5.1 Geçiş Rejimi Başlangıç Koşulları ve Geçiş Rejimi Boyunca Sistem Davranışının Elde Edilmesi

Bu kısımda FRAPTRAN-1.4 için gerekli verilerin nasıl elde edildiği, bu amaç için kullanılan kodlarda yapılan benzeşimler açıklanarak anlatılmaktadır. FRAPTRAN-1.4 için gerekli veriler de bu başlık altında özetlenmiştir.

5.1.1 FRAPCON-3.4a ile geçiş rejimi başlangıç koşullarının elde edilmesi

FRAPCON-3.4a yakıt performans kodu kullanılarak yakıtın normal işletme sürecinde benzeşimi yapılmıştır. Referans reaktörü tanımlayan veriler, bu reaktöre ait yakıtı tanımlayan veriler, yanma oranını belirleyen veriler ve kodun istediği

tanımlamalar ve seçimler, EK.C'deki gösterilen ilgili veri değişkenlerine tanımlanarak veri dosyası hazırlanması suretiyle koda aktarılmıştır. Referans alınan reaktör yakıtının detayları Şekil 5.2'de görülebilmektedir.



Şekil 5.2. Referans yakıt.

Yakıtın benzeşiminin yapılması için hazırlanan çözümleme düğümleri 11 eksenel düğümden ve 17 radyal eşit genişlikte hacimden oluşmaktadır. Benzeşimler, normal çalışma koşullarında farklı yanma oranları elde etmek adına değişik sürelerde yinelenmiştir. Değişik süreler sonunda yakıtta meydana gelen tüm değişimler ve yakıtın son haline ait değerler elde edilmiştir.

5.1.2 RELAP/SCDAP Mod3.4 ile geçiş rejimi boyunca sistem davranışının elde edilmesi

RELAP5/SCDAP Mod3.4 ısıl hidrolik çözümleme kodu kullanılarak Buhar Üretici Tüp Kırılması kazasının benzeşimi yapılmıştır [Ergün, Ş., 2011, Sözlü görüşme]. Yakıt güvenilirliğinin buhar üretici tüp kırılması kazası koşullarında incelenebilmesi için, kaza sırasında sistemin ısıl hidrolik davranışının bilinmesi gerekir.

RELAP5/SCDAP MOD3.4 yazılımı kullanılarak benzeşim yapılırken, modellenen santralin sistemleri ve sistem parçaları tanımlanmalı ve bu parçalar, sayısal çözüm

için uygun geometri ve büyüklükte sayısal düğümlere bölünerek yazılıma girdi hazırlanmalıdır.

Mihama Nükleer Santrali'nin İkinci Ünitesi'nin bahsedilen şekilde modellenenebilmesi için, Innovative Systems Software Şirketi tarafından hazırlanan RELAP5/SCDAP MOD3.4 eğitim paketinde yer alan ve dört soğutucu döngüsüne sahip tipik bir basınçlı su reaktöründe küçük kırıklı soğutucu kaybı kazasının benzeşiminin yapılmasında kullanılan bir girdi dosyası kullanılmıştır.

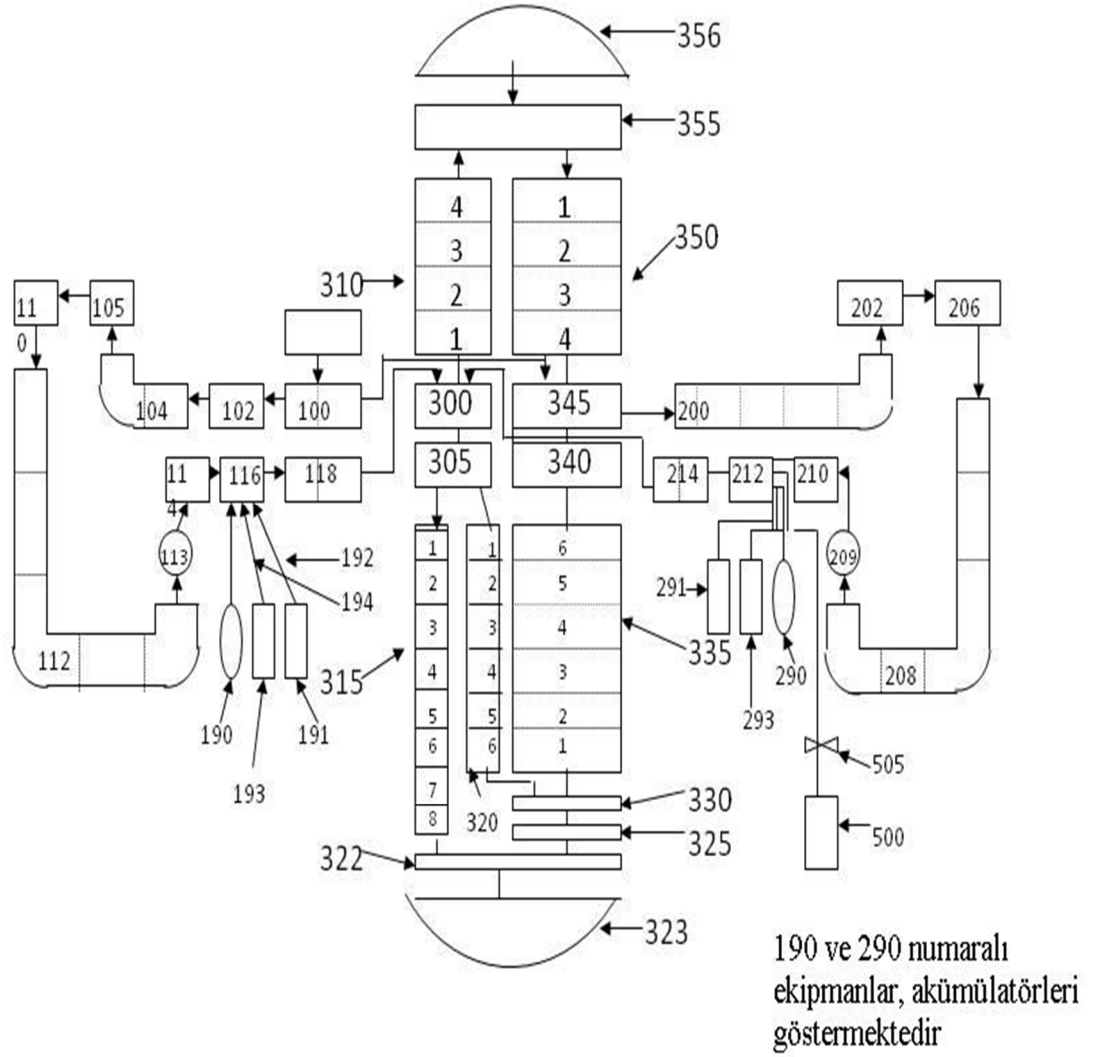
Girdi dosyası, Mihama Nükleer Santrali'nin İkinci Ünitesi'nin iki döngüsü, acil soğutma sisteminin özellikleri, kaza senaryosu [Seul, K.W. et al., 1996] ve sistemin geometrisi kullanılarak değiştirilmiştir. Bunların yanısıra, kullanılan girdi dosyasında, soğuk bacak üstünde tanımlanan kırık yerine, buhar reteci birinci tarafını göstermek üzere tanımlanan boru üzerinde kırık tanımlanmıştır. Girdi dosyasında g üretiminin zamanla değişimi standart artık ısı değerleri kullanılarak tanımlanmamıştır; Mihama kazası sırasında geciken reaktör durdurmasını modellemek üzere, g üretimi yaklaşık 600 sn dşrlmemiştir [Seul, K.W. et al., 1996].

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4, hesaplamalar için hazırlanan girdi dosyası için kullanılan sayısal düğümleri, sistemin iki soğutucu döngüsü ve kırığın yer aldığı buhar reteci için göstermektedir. Daha önce bahsedildiği gibi, bu düğümler, RELAP5/SCDAP MOD3.4 yazılımının eğitim paketinden alınarak kullanılmıştır.

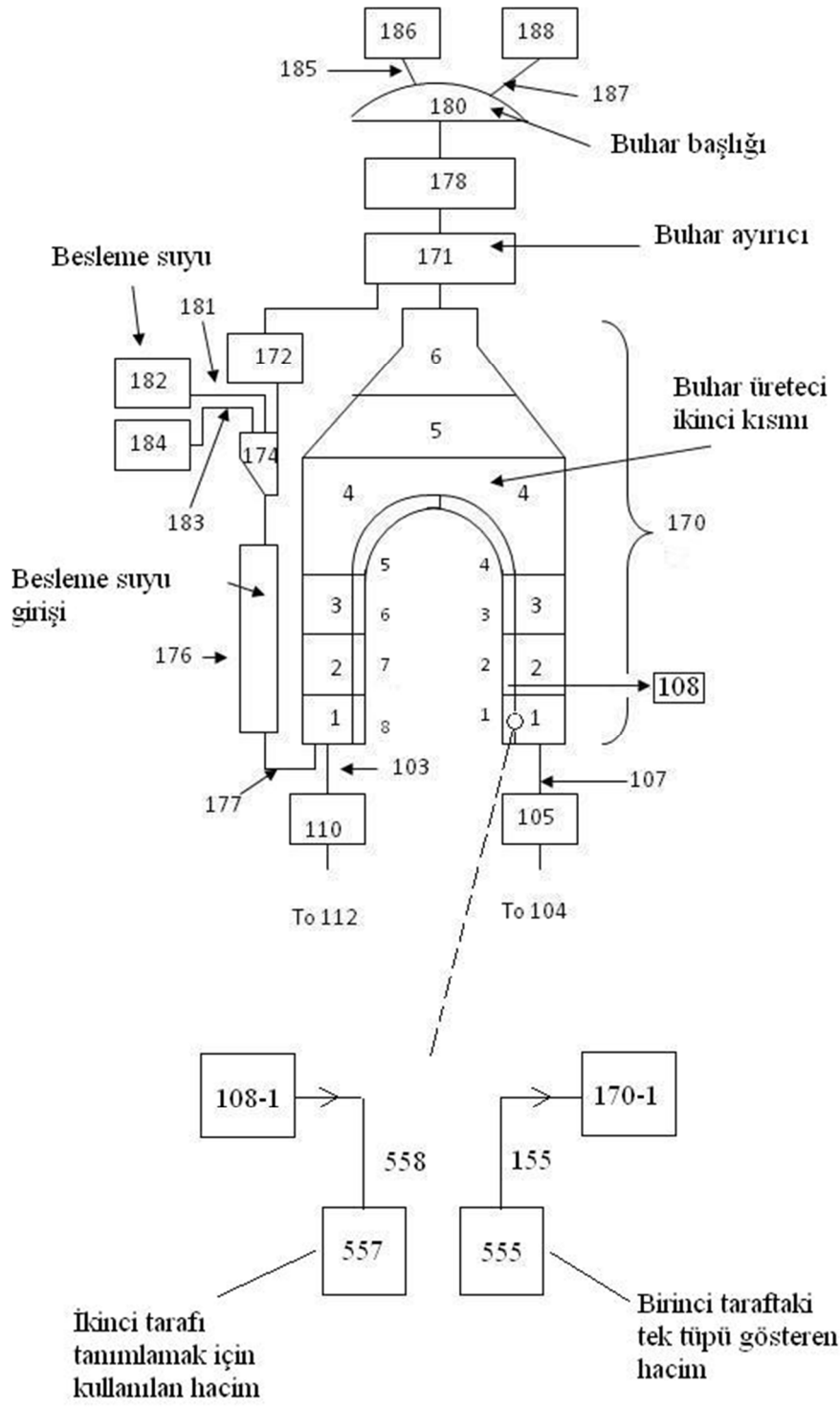
Buhar retecinin birinci tarafında kırık tanımlanırken, kırığın kesit alanının bir buhar reteci tüpünün akış alanına eşıt olmasına zen gösterilmiştir. Özellikle birinci taraftaki basınç değişiminin ve kırıktaki kütle akışının doğru modellenenebilmesi için, kırık ısıl hidrolik ve geometri özellikleri buhar üretecinin ikinci tarafı ile aynı olan ve ısıl hidrolik özellikleri zamanla değişen bir hacme bağlanmıştır.

Buhar reteci tp kırılması kazasında, buhar üretecinin ikinci kısmında zamanla meydana gelen değişiklikler (zellikle basınçtaki) de sistem tepkisinin doğru modellenenebilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmada yapılan benzeşim için kullanılan örnek girdi dosyasında, buhar üretecinin birinci tarafındaki tüpler tek bir boru olarak tanımlandığından, bu borudan, buhar üretecinin ikinci tarafını

tanımlamak için kullanılan boruya kırığın bağlanması sonuçların gerçekçi olmasını engelleyeceğinden, birinci taraftaki tek tüpten ikinci tarafa kütle akışı, ısıl hidrolik ve geometrik özellikleri tek bir birinci taraf tüpü ile aynı olan ve ısıl hidrolik özellikleri zamanla değişen bir hacim tanımlanarak modellenmiştir. Şekil 5.4'de kırığın tanımlanması için kullanılan girdi dosyasına eklenen bu hacimler ve kırığın modellenmesi de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Soğutucu döngüleri ve basınç kabı sayısal düğümleri ve sistem parçaları.



Şekil 5.4. Buhar üretici modeli sayısal düğümleri ve kırık modeli.

5.2 FRAPTRAN-1.4 ile Geçiş Rejimi Yakıt Davranışı Benzeşiminin Yapılması

Daha önce bahsedildiği gibi, FRAPTRAN kodu, SGTR kazası sırasında gerçekleşen geçiş durumunda yakıtın davranışının incelenmesi için kullanılmıştır.

Kod, tek yakıtın modellenmesi için kullanılmış, geçiş durumunun modellenmesi için farklı yakıt yanma oranları göz önünde bulundurularak, yakıtın normal işletme sonucu durumu ile kaza sırasında sistemin tepkisini gösteren kütle akışı, entalpi ve basınç parametreleri kodun girdisi olarak değerlendirilmiştir.

Geçiş rejimi başlangıç koşullarını belirlemek için FRAPCON kodunun sonuçlarından, zarf dış yüzey oksit kalınlığı, zarf hidrojen konsantrasyonu, zarf sıcaklığı, tablet ve zarfta ebat değişikliği, fizyon gazı konsantrasyonları, zarf plastik ebat değişikliği, radyal sıcaklık dağılımı, şişme ve yoğunlaşma sonucu kalıcı tablet deformasyonu ve sürünme ve plastik ebat değişikliği nedeniyle kalıcı zarf deformasyonu gibi yakıt durumunu gösteren parametreler FRAPTRAN koduna girdi olarak hazırlanır.

Sistemin kazaya tepkisinin, FRAPTRAN kodunda girdi olarak kullanılması için RELAP5/SCDAP kodu hesaplamalarının sonuçlarından basınç kabının alt plenumundaki akışın kütle akısı, entalpisi ve basıncının geçiş durumundaki değişimleri değerlendirilir. Bu, FRAPTRAN kodunda, soğutucu davranışının benzeşiminin yapılması için 'coolant' seçeneğinin kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

FRAPTRAN kodu ile yapılan hesapların sonuçlanmasıyla incelenen koşul için yakıt davranışı tespit edilerek yakıt bütünlüğünün hangi durumlarda bozulmaya uğradığı ve bu bozulmaların hangi seviyelerde olduğu bilgilerine ulaşılması ve bu sayede yakıt güvenilirliği analizi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada FRAPTRAN kodu için hazırlanan girdi verileri EK.D'de, kaynakları ile birlikte listelenmiştir.

6 HESAPLAMA SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Tezin bu kısmında, modelleme ve benzeşimlerde kullanılan üç kodla yapılan hesaplamaların sonuçları, geçiş dönemi benzeşimleri için önemli parametreler değerlendirilerek gösterilmiştir.

Daha önce bahsedildiği gibi, RELAP5/SCDAP kodu kullanılarak, SGTR durumunda, basınç kabının alt plenumundaki kütle akısı, basınç ve entalpi değişimleri hesaplanarak, FRAPTRAN koduna sınır koşulu oluşturmak üzere girdi verisi hazırlanmıştır. RELAP5/SCDAP kodu ile benzeşimler yapılırken, daha önce bahsedildiği gibi, Mihama Nükleer Santrali ikinci ünitesindeki kaza modellenmeye çalışılmıştır. Bunun için hazırlanan ve kod ile modellenen kaza senaryosu Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Çizelge 6.1’de gösterildiği üzere, tüp kırılması anında reaktörün durdurulduğu kabul edilmiştir. Bu kabul dışında, sistem tepkisi ve kaza senaryosu gerçeğe uygun oluşturulmuştur.

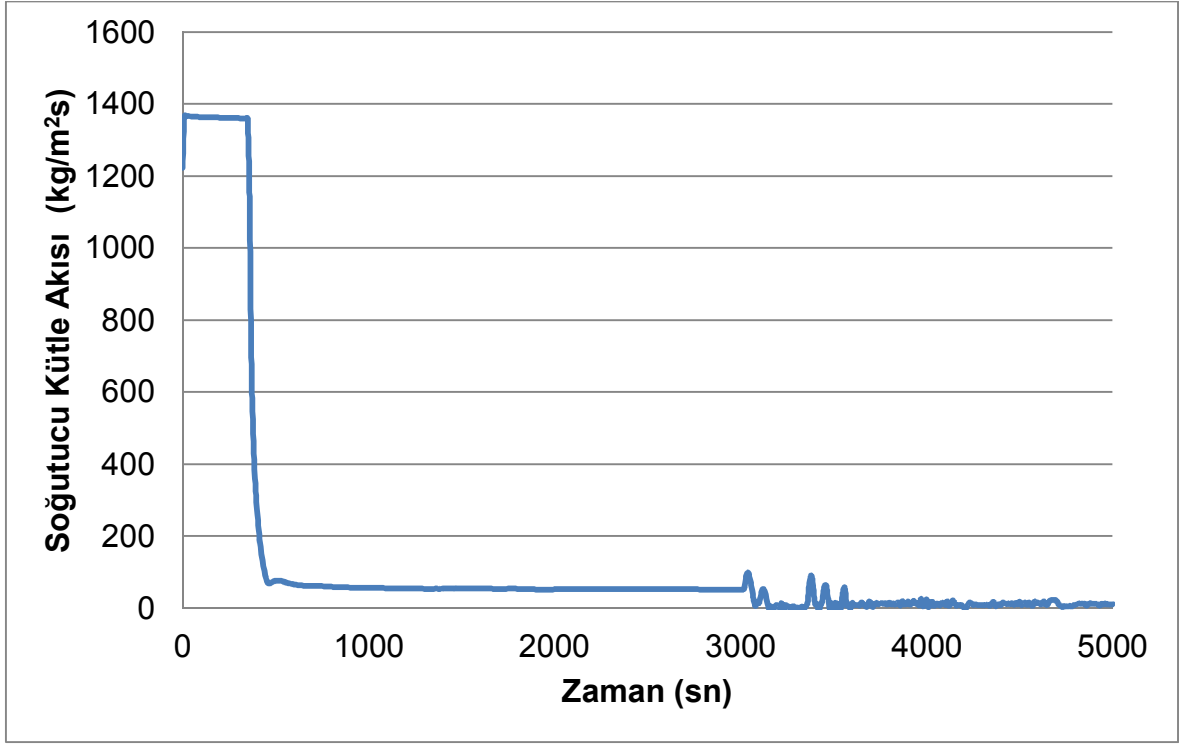
Şekil 6.1’de RELAP5/SCDAP kodu kullanılarak hesaplanan alt plenum kütle akısının değişimi görülmektedir. Şekil 6.1’de görüldüğü gibi alt plenumda kütle akısı kaza başlangıcında ısı üretimi ve kütle kaybı yüzünden başlangıçta artmaktadır. Benzer nedenlerden artış alt plenum basıncı ve soğutucu entalpisinde de görülmektedir (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3).

Şekiller 6.1, 6.2 ve 6.3’de görüldüğü üzere, kırık oldukça küçük olduğundan basınç ve kütle akısındaki azalma oldukça yavaştır. Ayrıca, bu şekillerde gösterilen değişimler basınç kabı alt plenumundaki değişiklikleri gösterdiğinden, yüksek basınç acil kor soğutma sistemi ya da rahatlatma vanalarının devreye girişleri alt plenumda gecikmeli olarak görülmektedir.

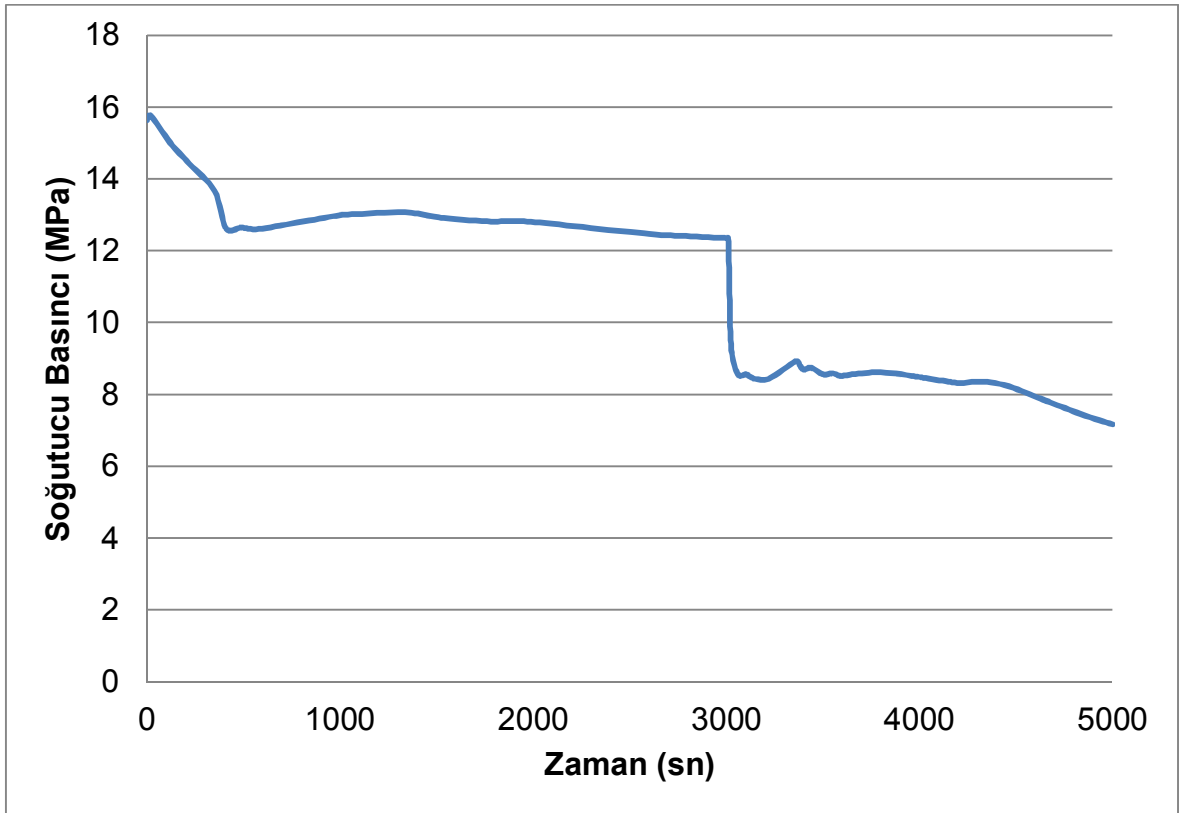
Sistemde basıncın düşmesiyle (rahatlatma vanalarından çok, kırıkta kütle akısının artmasıyla) kütle akısı ve soğutucu entalpisinin azaldığı da şekillerde görülmektedir. Alt plenum kütle akısının azalması, reaktör kalbine giren soğutucu kütle akısının azalması demek olduğundan, basıncın ve kütle akısının azalması, yakıttan soğutucuya gerçekleşen ısı transferinin de azalmasına neden olmaktadır. Şekiller 6.1 ve 6.2 incelendiğinde, geçiş durumunda yaklaşık 350-450 saniye arasında yakıttan soğutucuya ısı transferinin oldukça kötüleşmesi ve bu zaman aralığında yakıt zarfının işlevini kaybedeceği beklenebilir.

Çizelge 6.1. RELAP5/SCDAP Kodu ile Hazırlanan SGTR Kaza Senaryosu

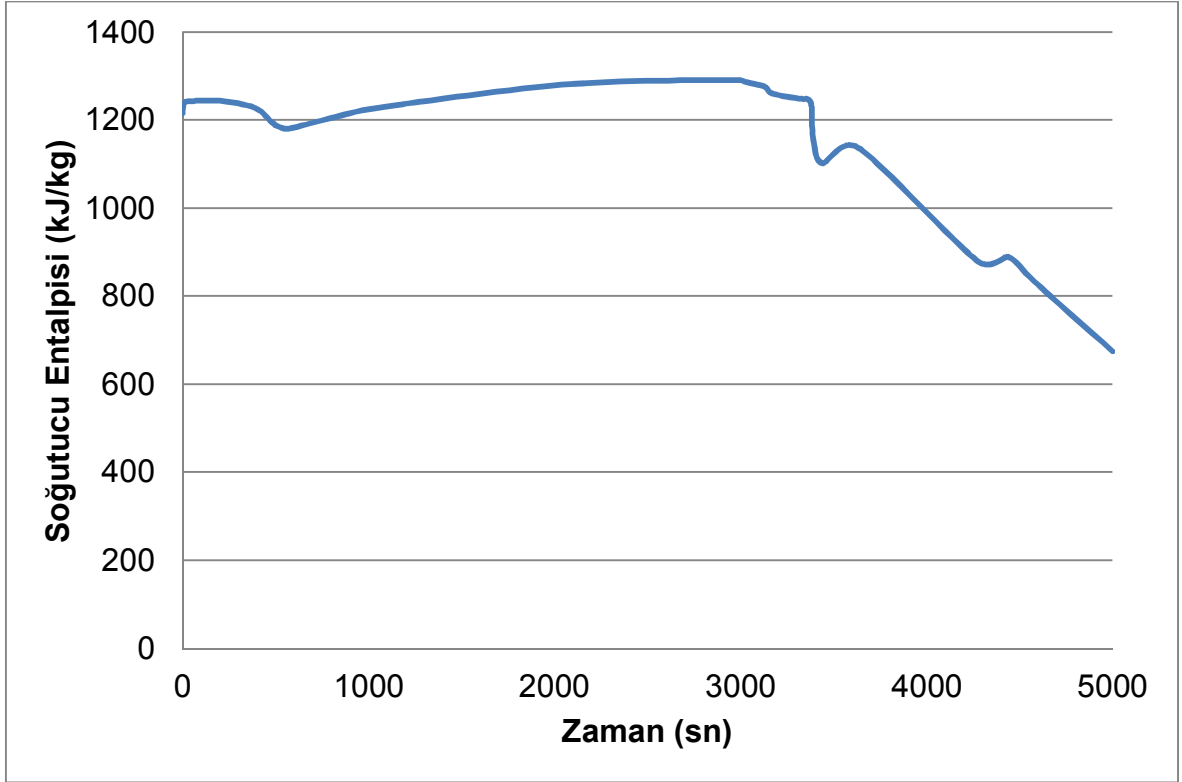
Olay (RELAP benzeşiminde kullanılan)	Zaman (s)
Tüp kırılması	0
Ana Besleme Suyu Sistemi kapanması	4
Yüksek Basınç Acil Durum Kor Soğutma Sistemi sinyalinin verilmesi	9
Ana Soğutucu Pompasının hızının azalması	82
Yedek Besleme Suyu Sisteminin devreye girmesi	76
Yüksek Basınç Acil Kor Soğutma Sisteminin devreye girmesi	137
Reaktörün kapanması	605
Buhar Üreteçlerinin rahatlatma vanalarının açılması	722
Basınçlandırıcı Rahatlama Vanasının açılması (basınçlandırıcı spreyn açılması yerine)	2666
Basınçlandırıcı Rahatlama Vanasının kapanması	3351
Benzeşimin sonlandırılması	5000



Şekil 6.1. Geçiş rejimi süresince soğutucu kütle akısının değişimi.



Şekil 6.2. Geçiş rejimi süresince soğutucu basıncının değişimi.

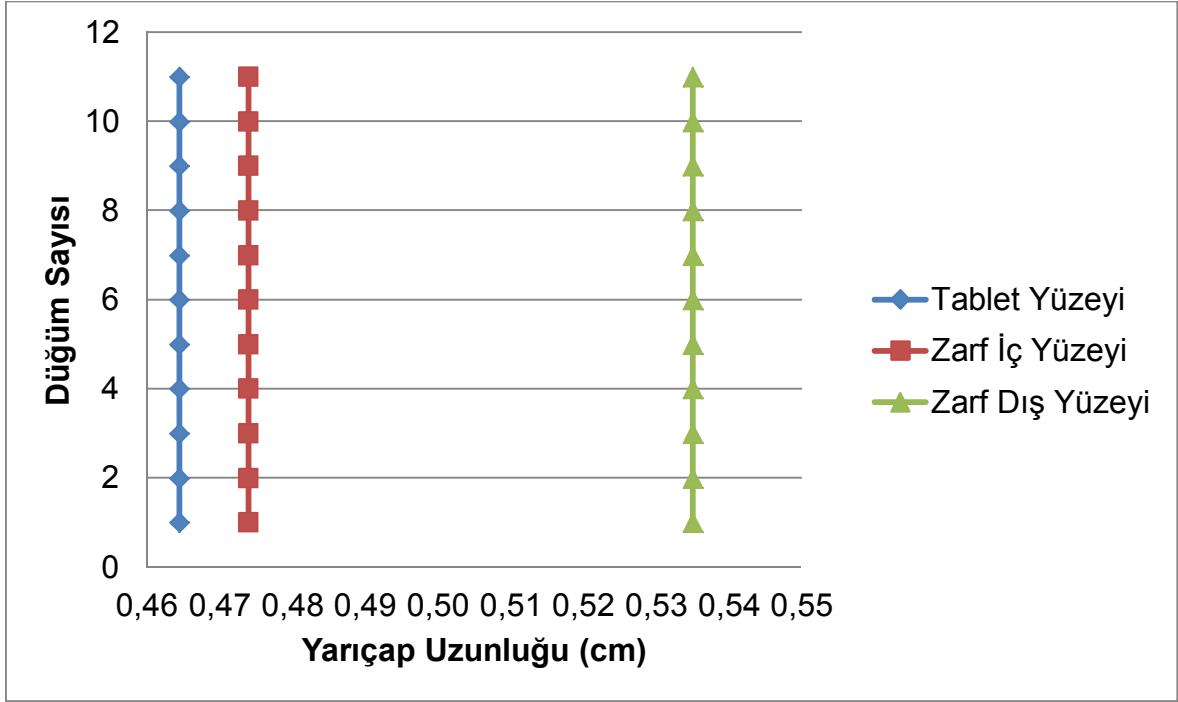


Şekil 6.3. Geçiş rejimi süresince soğutucu entalpisinin değişimi.

FRAPCON sonuçlarından, farklı yakıt yanma oranlarında, normal işletme sırasında yakıt tableti ve zarf ebatı ve zarfın dış yüzeyindeki oksit tabakası kalınlığındaki değişikliklerle tablet ve zarf arasındaki boşluk gazı basıncının değişimi Şekiller 6.4 - 6.13'de gösterilmiştir.

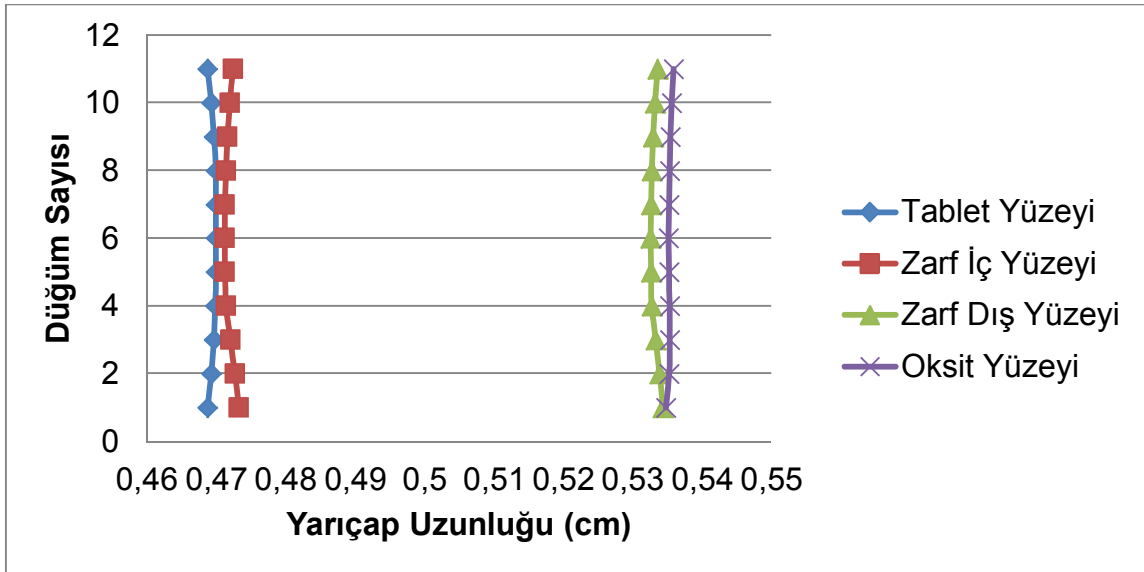
Bahsedilen şekillerde gösterilen yakıt parametreleri FRAPTRAN kodunda girdi olarak kullanılan verilerden tablet ve zarfın geçiş durumu modellemeleri için en önemli başlangıç koşullarını gösterdiklerinden, bu kısımda incelenmektedir.

Nükleer yakıt tableti, zarfı ve tablet-zarf arası boşluk normal işletme sırasında, sıcaklık, radyasyonun etkisi, boşluk gazı basıncı, soğutucu basıncı ve fisyon ürünleri nedeniyle ebat ve konum değiştirir. Yakıt davranışı için geçiş dönemi benzeşimleri yapılırken bu değişikliklerin bilinmesi gerekir. Ayrıca, yakıt zarfının ısı ve mekanik davranışını belirleyeceğinden ve gerilmeli korozyon kırılmalarına neden olabileceğinden zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının kalınlığının da bilinmesi önemlidir. Şekiller 6.4 ila 6.9, işletme öncesi ve farklı yanma oranları koşullarında bahsedilen değişikliklerin FRAPCON kodu kullanılarak nasıl hesaplandığını göstermektedir.

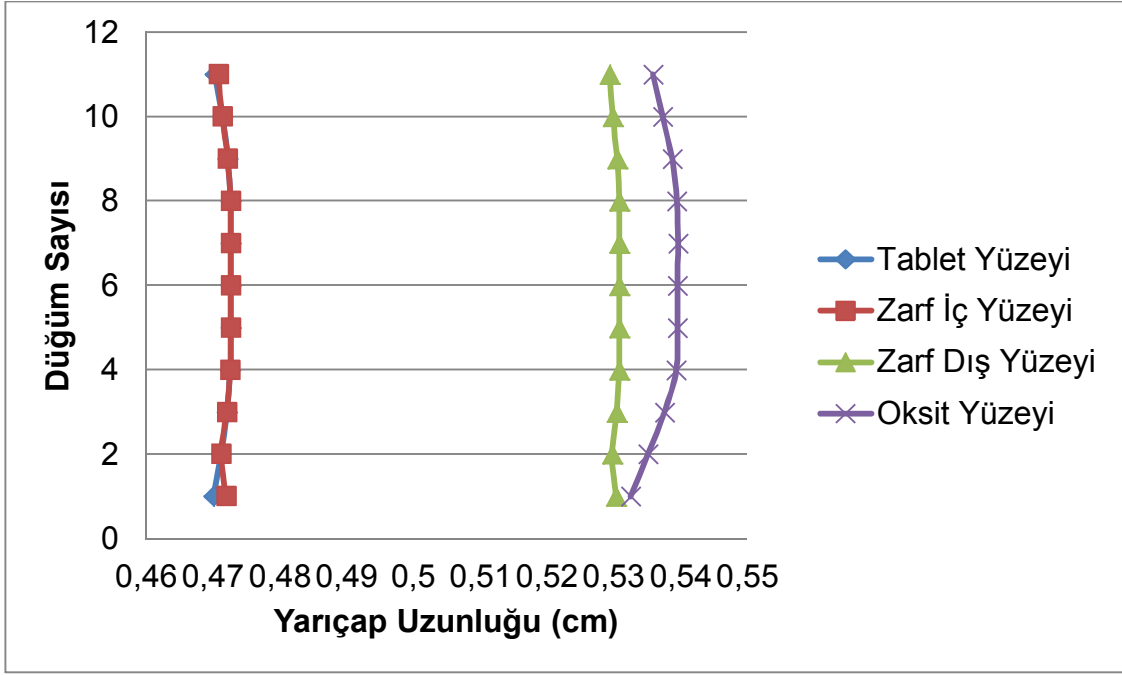


Şekil 6.4. Yakıt tableti ve zarfın işletme öncesi ebat ve konumları.

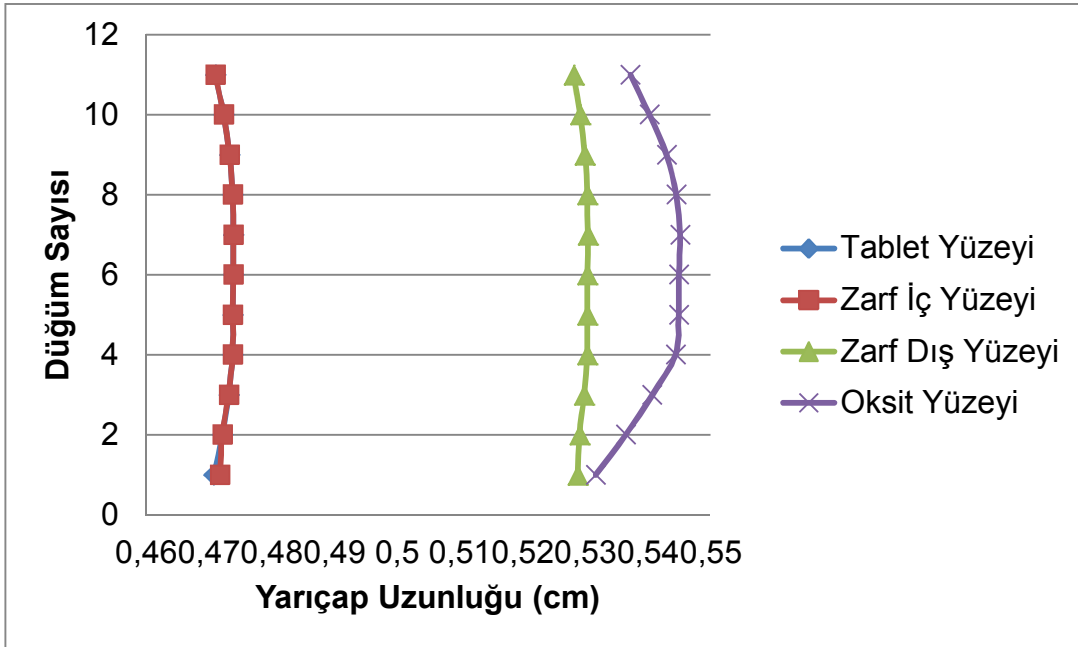
Şekil 6.4, işletme öncesi tablet ve zarf ebatını, dolayısıyla aralarındaki boşluk ebatını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, yakıt tablet arasındaki boşluk 0.2mm'den küçüktür. Bu boşluğun kapanarak tablet-zarf etkileşiminin gerçekleşmesi yüksek yakıt yanma oranlarında ve normal işletme sırasında beklenir.



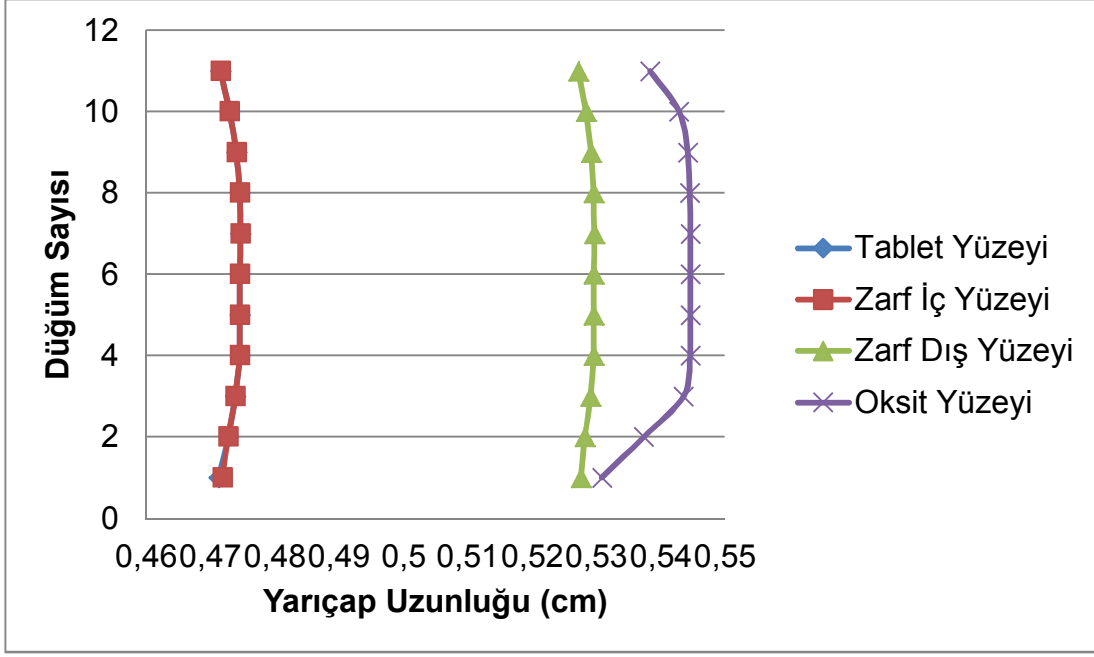
Şekil 6.5. 15.51 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.



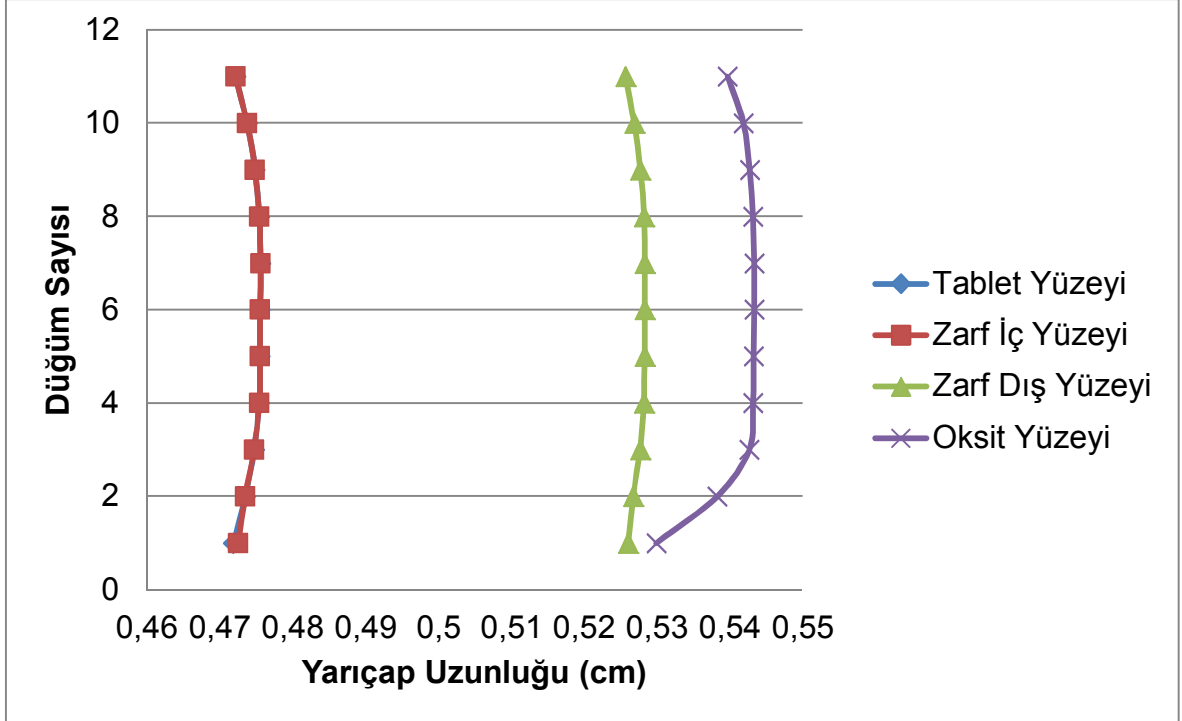
Şekil 6.6. 37.31 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.



Şekil 6.7. 46.83 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.



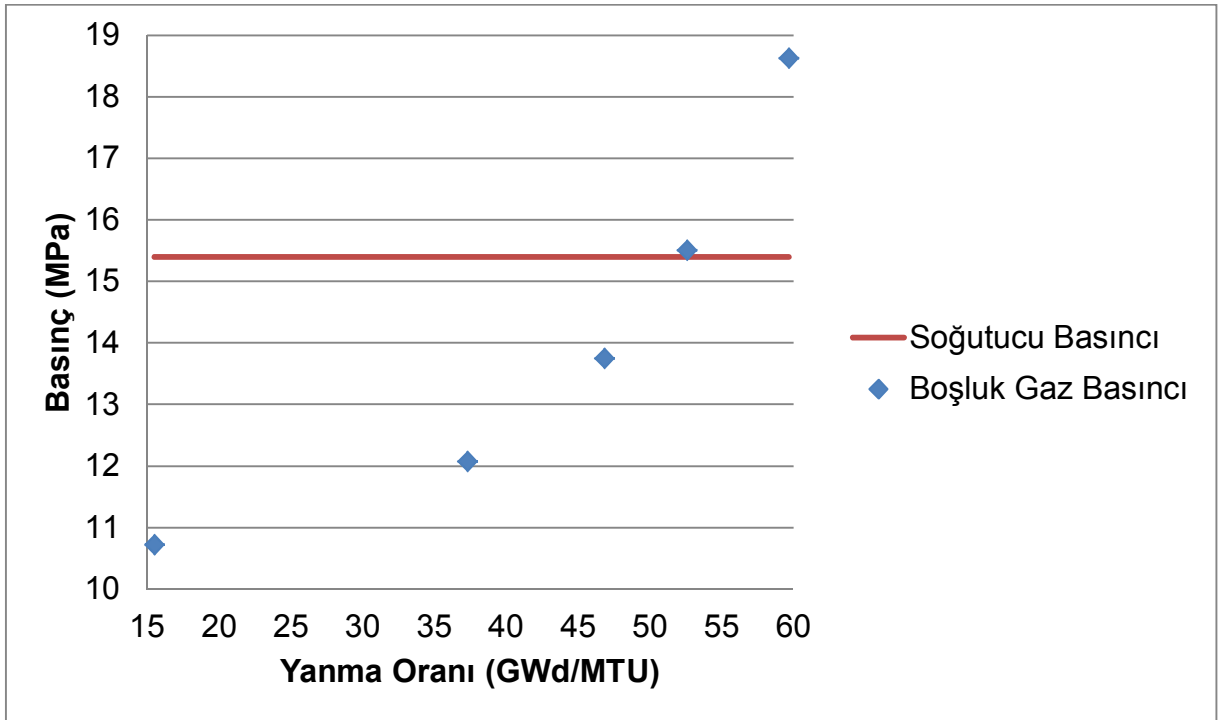
Şekil 6.8. 52.61 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.



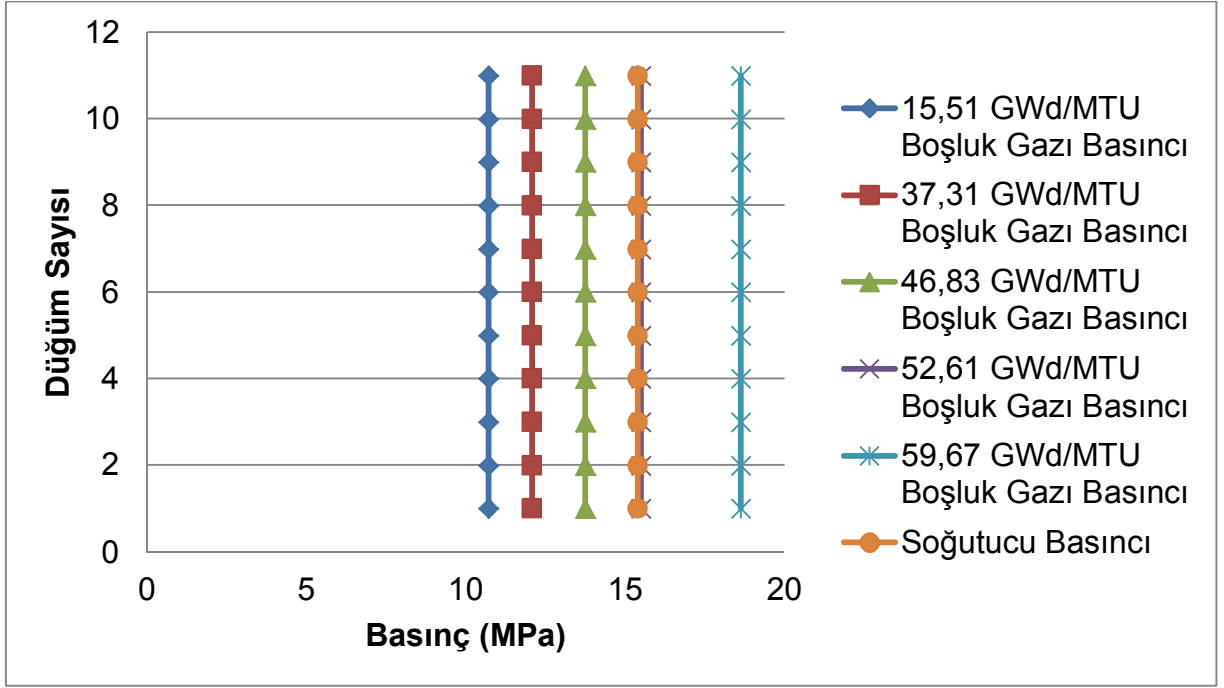
Şekil 6.9. 59.67 GWd/MTU yanma oranında tablet, zarf ve zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının ebatları.

Şekiller 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 ve 6.9, yakıt yanma oranı arttıkça, zarf dış yüzeyindeki oksit tabakasının kalınlığının arttığını, tablet ve zarf arasındaki boşluğun kapanarak, bu iki malzemenin etkileşime girdiğini, etkileşme sonrasında tabletin büyüyerek ve zarfı bir miktar soğutucu tarafına ittiğini göstermektedir. Bu, Şekil 6.10 ve 6.11’de gösterilen boşluk gaz basıncı ve soğutucu basıncının yanma oranı ile değişimi incelendiğinde de görülebilir. Yakıt yanma oranı arttıkça, boşluk gaz basıncı soğutucu basıncından daha büyük olmaktadır (tablet-zarf etkileşimi neticesinde de); bu, zarfa soğutucu tarafına doğru bir kuvvet uygulandığını göstermektedir.

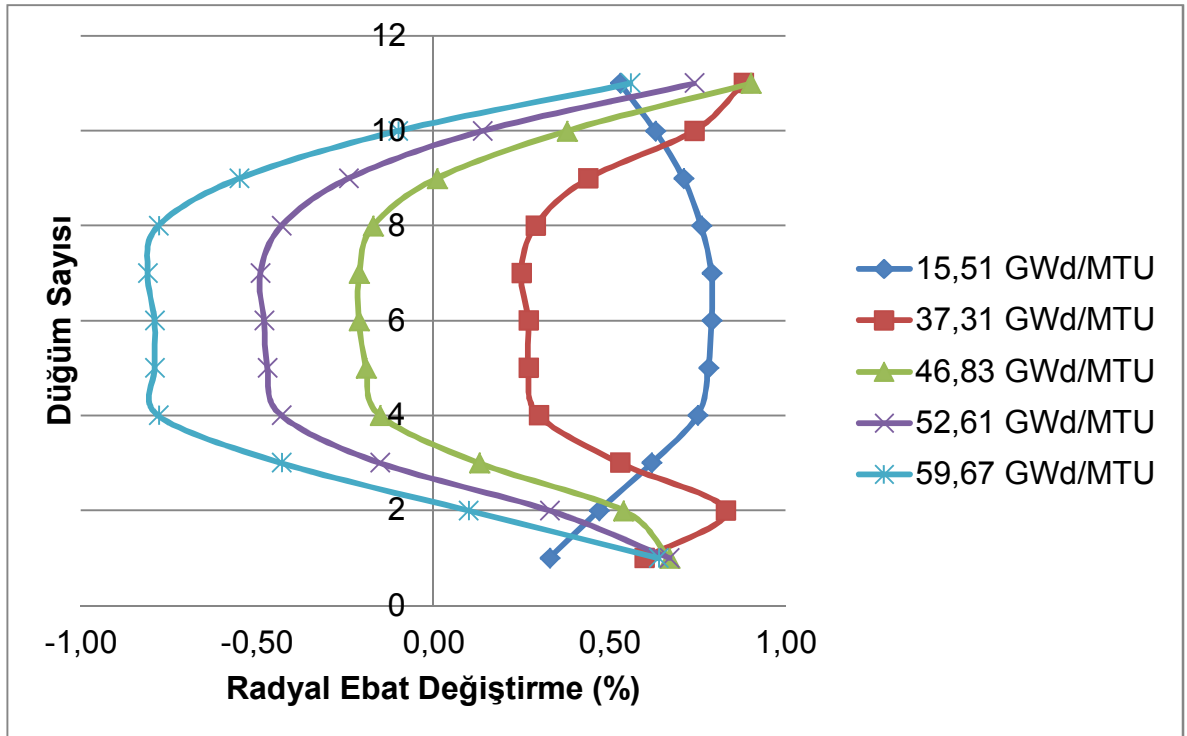
Zarf ebatının radyal ve eksenel yönde değişimi Şekiller 6.10 ve 6.11’de gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi, yakıt yanma oranı düşükken yakıt zarfı radyal yönde büyüyüp eksenel yönde küçülürken, yakıt yanma oranı arttıkça, zarf ebatındaki değişim bunun tersi yönünde gerçekleşmektedir.



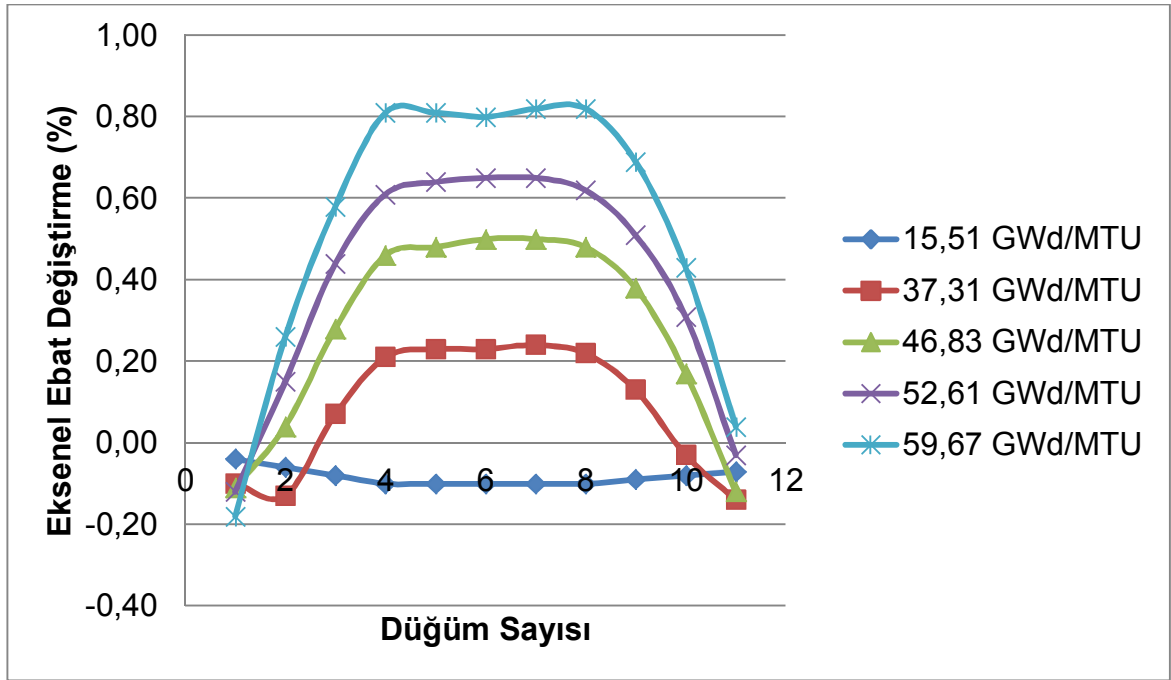
Şekil 6.10. Normal işletme sonunda farklı yanma oranlarında boşluk gaz basıncı ile soğutucu basıncı.



Şekil 6.11. Normal işletme sonunda farklı yanma oranlarında boşluk gaz basıncı ile soğutucu basıncının düğümlerde gösterimi.



Şekil 6.12. Farklı yanma oranı değerlerinde düğümde zarfın radyal ebat değişimi.



Şekil 6.13. Farklı yanma oranı değerlerinde düğümlerde zarfın eksenel ebat değişimi.

Yapılan analizler sonucunda, Buhar Üretici Tüp Kırılması kazası süresince yakıtın davranışı, kaza sonundaki durumu ve kaza sırasında işlevini yitirip yitirmediği belirlenmiştir. Çalışılan bütün yanma oranlarında, yakıtın hasara uğradığı tespit edilmiştir [Çizelge 6.2].

Çizelge 6.2 SGTR kazası sırasında yakıtın davranışı.

Yanma Oranı (GWd/MTU)	İşlevsizleşme Durumu	İşlevsizleşme Şekli	İşlevsizleşme Zamanı (sn)	İşlevsizleşmenin Eksenel Konumu-Düğüm merkezi (m)
15.51	Var	Patlama	470	3.48
37.31	Var	Patlama	440	3.15
46.83	Var	Patlama	430	3.15
52.61	Var	Patlama	430	3.15
59.67	Var	Patlama	430	3.48

Çizelge 6.2'den görülebileceği üzere, bütün durumlarda işlevsizleşme şekli patlamadır. Zarfın patlaması fisyon ürünlerinin soğutucu akış kanalına salımına, SGTR koşulundaysa basınç kabının dışına çıkmasına sebep olur. Bu sebeple,

bazı ülkelerdeki düzenleyici ölçütlere göre kordaki yakıt çubuğu sayısının 10%'undan fazlasında patlama meydana gelmemelidir [Chung, H.M., 2005].

FRAPTRAN-1.4'de kullanılan zarf patlama modeli, NUREG-0630 modellerine dayanmaktadır. Bu dökümanda deneysel veriler ve deneysel verilere dayalı modeller yer almaktadır. FRAPTRAN-1.4 patlama sıcaklığında, zarf teğetsel gerilmesinin deneysel verilere dayalı sınırı aşıp aşmadığını kontrol ederek ve ebat değişiminin çok büyük olduğu durumlarda, kalıcı teğetsel ebat değişiminin kodun sınırlarını aşıp aşmadığını denetleyerek patlamanın varlığını belirler.

Patlamanın mevcudiyetini belirleyen ölçütler gerilme, ebat değişimi ve ebat değişim hızıdır. Bu ölçütlerin değişimini belirleyen zarf sıcaklığı ve ısınma hızı, çubuk iç basıncı, zarf radyal gerilmesi, soğutucuya ısı aktarımı gibi durumlar, patlamanın olduğu an ve hemen öncesi için incelenerek hangi mekanizmanın patlamaya sebep olduğu anlaşılabilir. Bundan dolayı, bu ölçütleri geliştiren mekanizmalar incelenmelidir. Patlamayı tetikleyen sebeplerle, patlama anındaki ve bir önceki andaki zarfa ait ölçütlerin değerleri Çizelge 6.3'de tablo halinde sunulmuştur.

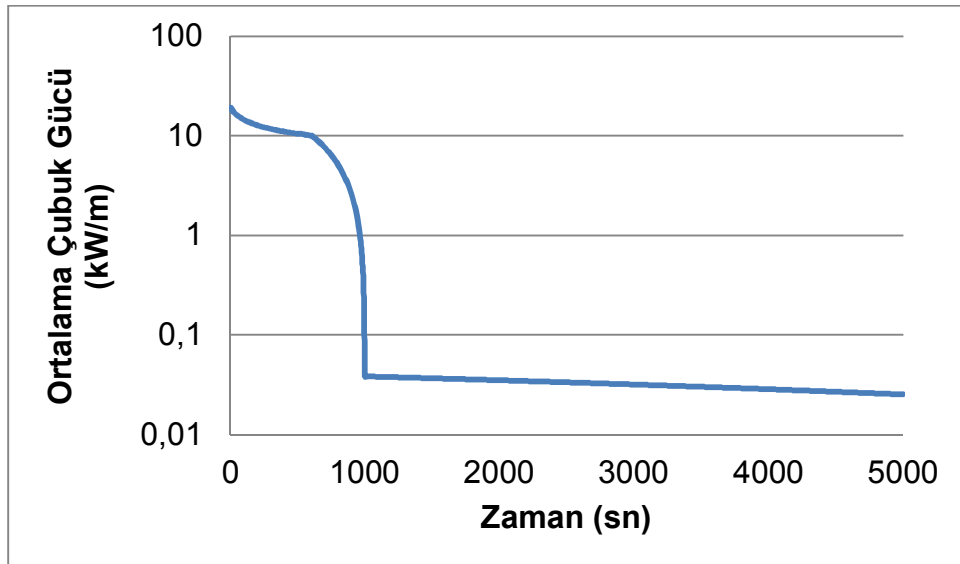
Çizelge 6.3 SGTR benzeşiminde yakıt işlevsizleşmesi ölçütleri.

Yanma Oranı (GWd/MTU)	İşlevsizleşme sebebi	Zarf teğetsel gerilmesi (MPa)		Zarf kalıcı teğetsel ebat değişimi (%)		Zarf Sıcaklığı (K)		Teğetsel ebat değişimi oranı (1/sn)	
		Patlama öncesi	Patlama anı	Patlama öncesi	Patlama anı	Patlama öncesi	Patlama anı	Patlama öncesi	Patlama anı
15.51	Ani ebat değişimi	-12.601	-12.649	0.1949	0.2097	2098.2	2101.3	0	0.2138
37.31	Balonlaşma	6.583	-12.640	1.5937	1.5937	1175.5	1541.4	0.0129	0.0129
46.83	Balonlaşma	28.312	-12.637	0.0066	0.0580	1036.1	1142.5	0.0058	0.0444
52.61	Balonlaşma	40.443	-12.637	0.0182	0.0585	1003.4	1126.2	0	0.0204
59.67	Balonlaşma	57.766	-12.637	0.0447	0.0483	967.66	1130.0	0	0.0164

Buradan SGTR kazasının en etkili sonucunun balonlaşma olduğu görülmektedir. Çizelge 6.3'de görüldüğü gibi en düşük yanma oranında ani ebat değişimi zarfın işlevini yitirmesine sebep olmaktadır.

Yanma oranı azaldıkça, patlama zamanının geciktiği (Bkz. Çizelge 6.2.) ve patlamanın gerçekleştiği sıcaklık değerinin arttığı (Bkz. Çizelge 6.3.) görülmektedir. Buradan anlaşılabileceği üzere; düşük yanma oranında zarf, üzerine etkiyen yüklere daha uzun süre dayanabilmektedir. Bunun sebebi, düşük yanma oranlarında yüksek yanma oranlarına göre zarfın deformasyon kabiliyetinin daha yüksek olmasıdır. Normal işletme sonunda, yanma oranı arttıkça zarfın uzayıp daraldığı görülmüştür (Bkz. Şekil 6.12-6.13.), buradan anlaşılabileceği üzere yüksek yanma oranına sahip yakıtta zarf kalınlığı düşüktür ve bu balonlaşmayı kolaylaştırır; ayrıca oksit tabakasının kalınlaştığı görülmüştür (Bkz. Şekil 6.5.-6.9.) yani hidrat oluşumu da yüksektir ve bu kırılganlığı artırır. Bu sebeplerden dolayı da düşük yanma oranlarında yüksek yanma oranlarına göre zarfın deformasyon kabiliyeti daha düşüktür. 15.51GWd/MTU'da aşırı yüksek sıcaklığa (2100K civarında) çıkan zarf malzemesi, erime sıcaklığına gelmiş ve bundan dolayı hasarlanma gerçekleşmiştir.

En yüksek yanma oranı ve en düşük yanma oranı için, zarfın işlevini yitirmesine sebep olabilecek mekanizmalar incelenmiştir. Şekil 6.14'de görüldüğü gibi tam olarak durdurulduktan sonra yani yaklaşık 605'inci saniyeden sonra, artık ısınının etkisinin olmayacak kadar düşük olmasından dolayı, bahsedilen incelemeler bu süreye kadar geçen süreyi kapsamaktadır.



Şekil 6.14. Güç üretiminin zamanla değişimi.

FRAPTRAN benzeşiminin sonuçları, soğutucunun buhar içeriği, yüzey ısı transferi sabiti, zarf dış sıcaklığı, yakıt merkez hat sıcaklığı, yakıt yüzey yer değişimi, boşluk gaz basıncı, yapısal radyal boşluk, soğutucu basıncı, zarf kalıcı teğetsel ebat değişimi, metal-su reaksiyon enerjisi ve iç yarıçap oksit kalınlığının zamanla değişimleri üzerinden anlatılmıştır. İlgili grafikler, Şekil 6.15-6.25 arasında mevcuttur.

Kaza sırasında düşen basınç, doyma sıcaklığının da düşmesini sağlamıştır. Su, doyma sıcaklığında olduğu sürece zarf sıcaklığı da onu takip etmiştir. Ancak, Şekil 6.1 'de görüldüğü gibi kütle akısının 360'ıncı saniyede ani düşüşüyle birlikte soğutucu büyük bir hızla buhara dönüşmeye başlamış ve 400.'üncü saniyede yüzey tamamen buharla kaplanmıştır (Şekil 6.15). Bu durum, yüzey ısı transferi sabitinin 390'ıncı saniyede aniden yaklaşık %4'üne düşmesine sebep olmuş ve ısı aktarımını kötüleştirmiştir (Şekil 6.16). Buna karşın, zarfın üstündeki ısıyı atamaması sebebiyle 390. saniyede zarf sıcaklığı 50°C birden yükselerek, hızla yükselmeye devam etmiş, 430'uncu saniyede 1128°C'ye ulaşmıştır ve aynı anda zarf patlamıştır. Şekil 6.17'de görüldüğü gibi bu andan sonra zarf sıcaklığı erime sıcaklığına ulaşmıştır.

Aynı şekilde yakıttaki ısı atılamadığı için Şekil 6.18'de görüldüğü gibi 390'uncu saniyede 25°C'lik bir farkla artmaya başlayan yakıt merkez hat sıcaklığı, 430'uncu saniyede 1450°C'ye kadar hızla artmıştır. Bu esnada yakıtın üzerinde biriken ısı ve yüksek sıcaklık nedeniyle yakıt ısı genleşmeye uğramıştır, bu yakıt yüzey yer değişimini gösteren Şekil 6.19'dan görülebilir.

Zarf ve tabletin arasındaki boşlukta kalan gazın da üzerinde tuttuğu enerji ve sıcaklığı yükselmesi sebebiyle boşluk gaz basıncında da 400'üncü saniyede bir artış meydana gelmiş ve radyal olarak gaz boşluğu genişlemiştir (Şekil 6.20 ve 6.21).

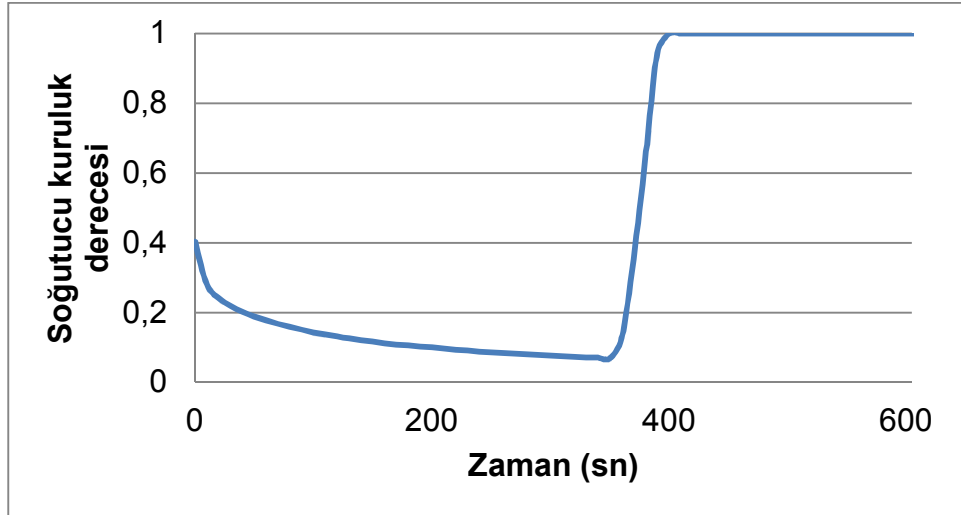
Hem yakıtın genleşmesi hem de gazın genişlemesi zarf üzerinde yüksek miktarda yük oluşturmuş ve zarfın radyal yönde dışarıya doğru balonlaşmasına sebep olmuştur (Şekil 6.22).

Zarfın yüklenmelere karşı direnci kalmadığı durumda patlama meydana gelmiştir. Boşluk gaz basıncı ve zarf kalıcı teğetsel ebat değişiminin birbirini nasıl takip

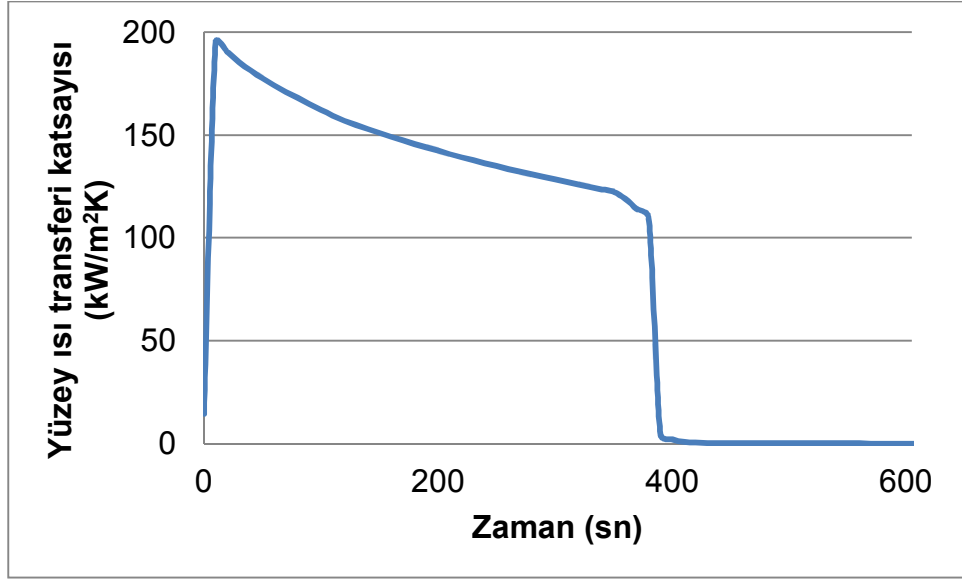
ettiğine ilişkin grafik Şekil 6.22’de verilmiştir ve Şekil 6.20’den de görüldüğü gibi boşluk gaz basıncındaki artışın hemen arkasından 420’nci saniyede zarfta meydana gelen genişlemeden sonra 430’uncu saniyede patlama görülmektedir.

Zarfta patlamanın gerçekleştiği soğutucu basıncı ve boşluk gaz basıncının birlikte incelenmesiyle de gözlenebilir. Patlamadan sonra boşluk gaz basıncı, patlamayla aniden düştükten sonra soğutucu basıncı ile dengelenip daha sonra soğutucu basıncını takip etmektedir (Şekil 6.23).

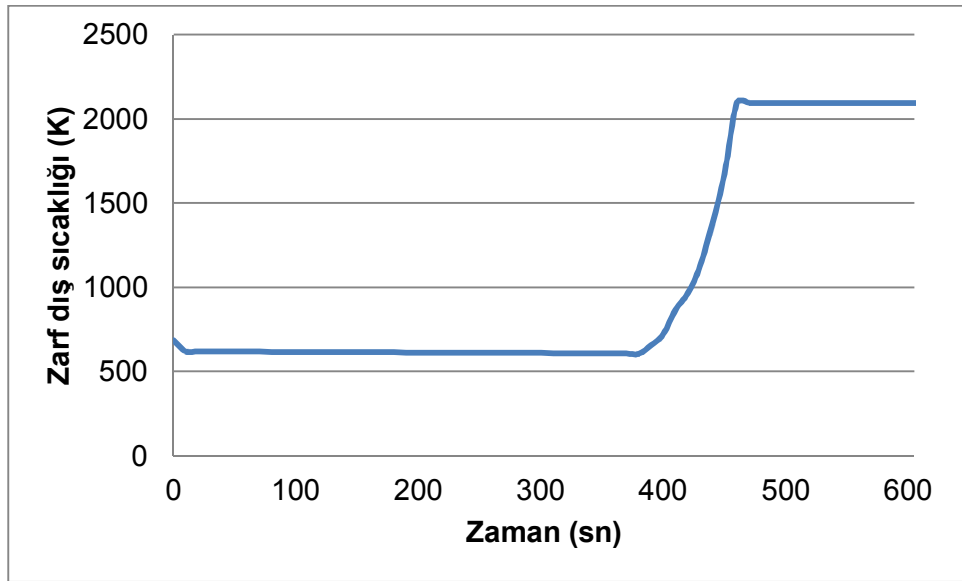
Patlamanın gerçekleştiği anda yani 430’uncu saniyede Şekil 6.24’de görülebilecek olan metal-su reaksiyon enerjisine bakıldığında, metal su reaksiyonunun patlamayla gerçekleştiği ve iç yarıçap oksit kalınlığının patlamayla açılan zarfın içine giren suyun zarfta içeride temasının sonucu iç yarıçapta da oksitlenme meydana geldiği gözlemlenebilir (Şekil 6.25). Sadece 11’inci düğümde iç yarıçap oksit kalınlığında artış meydana gelmektedir; çünkü yakıt 11.’inci düğümün olduğu yerden hasar görmüş ve o noktadan zarfın içine buhar girmiştir.



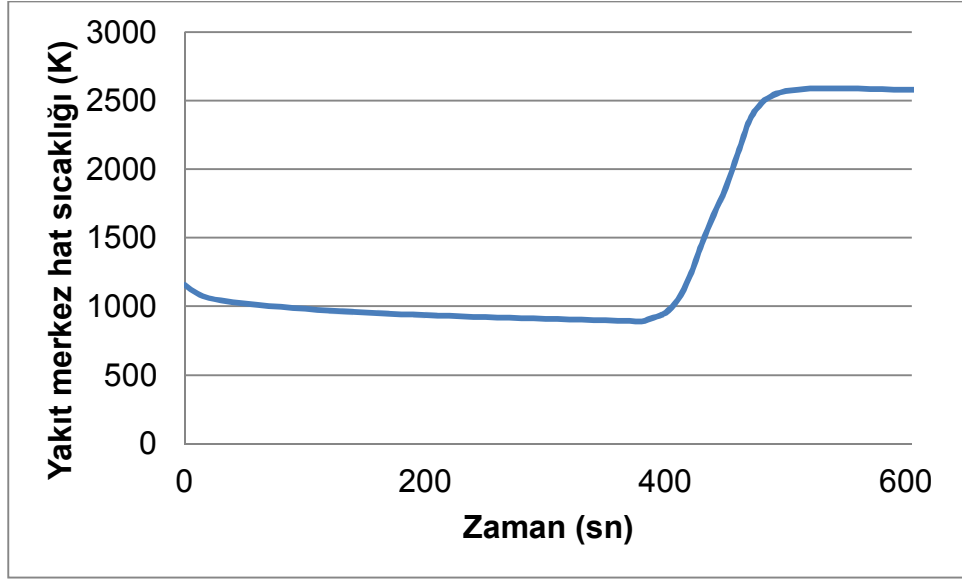
Şekil 6.15. Soğutucu kuruluk derecesinin zamanla değişimi.



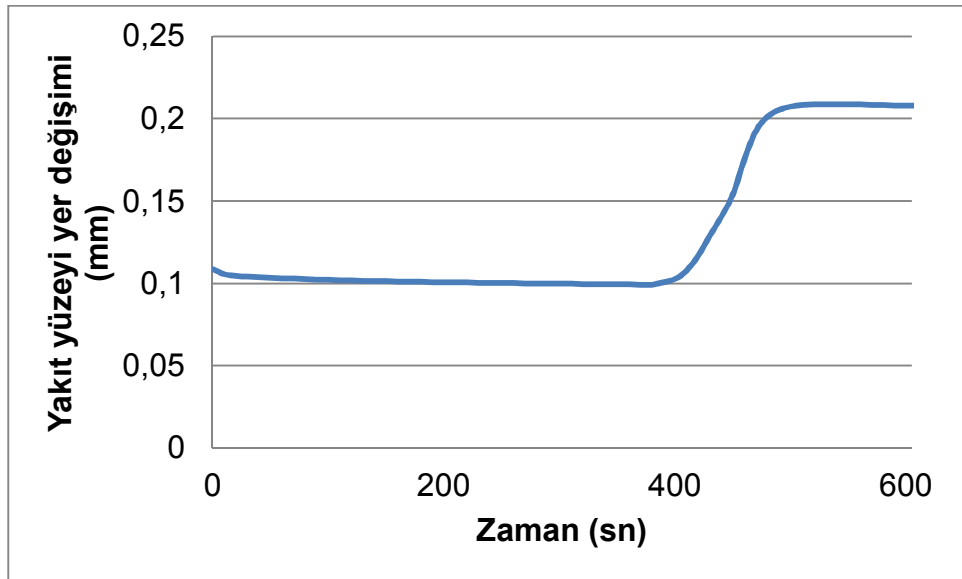
Şekil 6.16. Yüzey ısı transferi sabitinin zamanla değişimi.



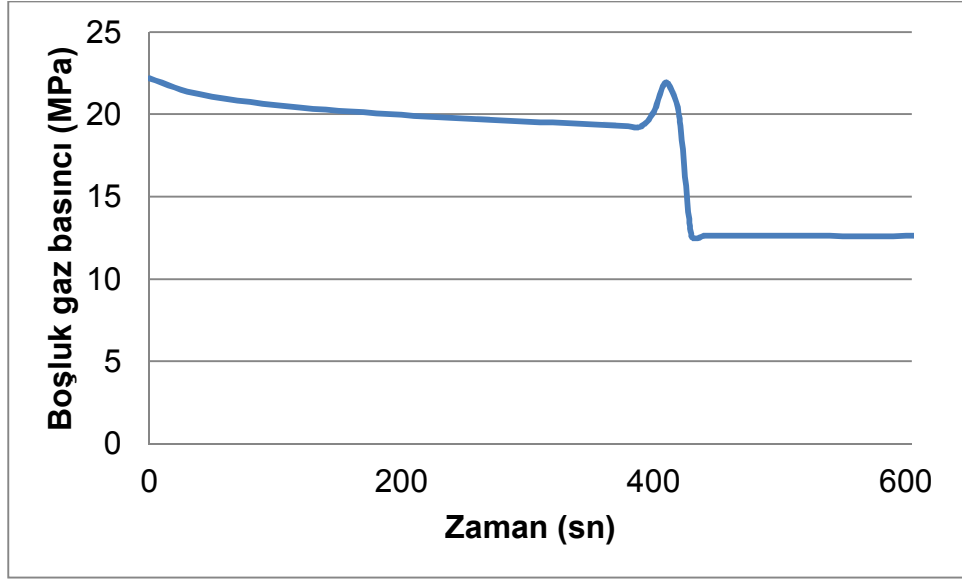
Şekil 6.17. Zarf dış sıcaklığının zamanla değişimi.



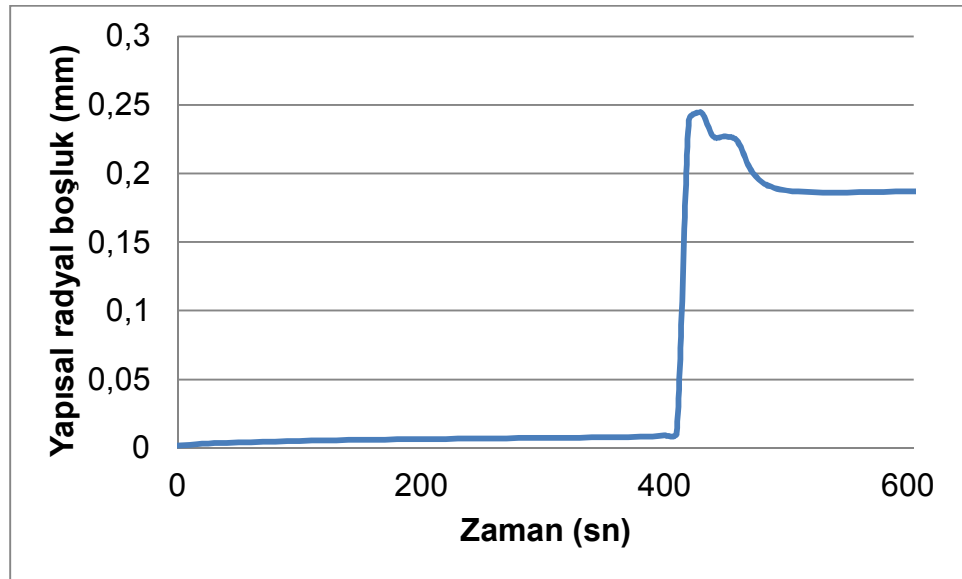
Şekil 6.18. Yakıtın merkez hat sıcaklığının zamanla değişimi.



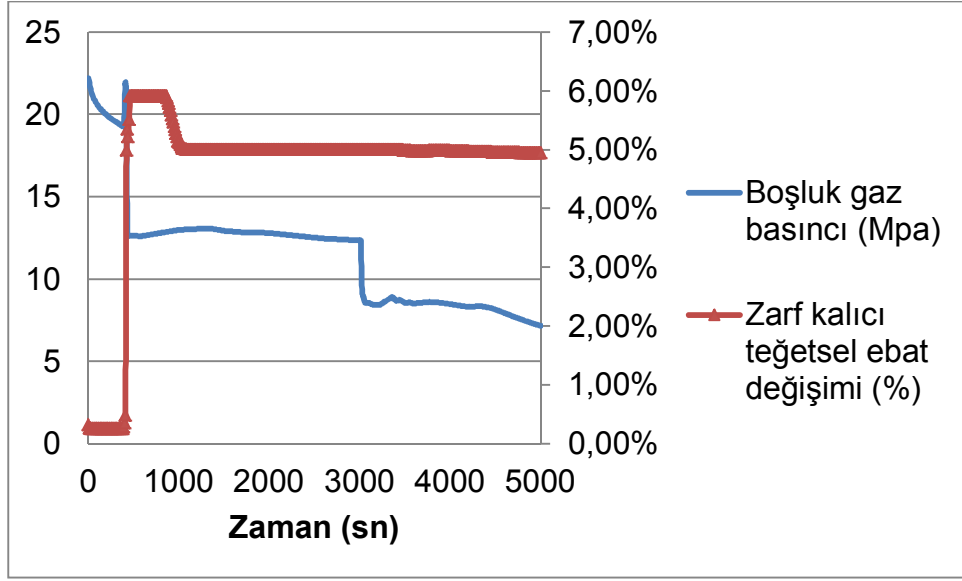
Şekil 6.19. Yakıt yüzeyi yer değişiminin zamanla değişimi.



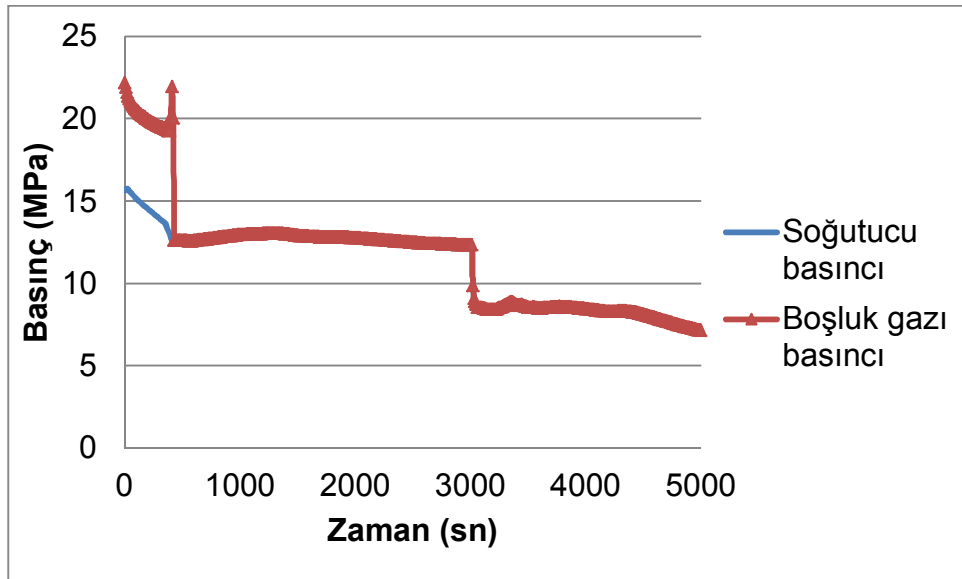
Şekil 6.20. Boşluk gaz basıncının zamanla değişimi.



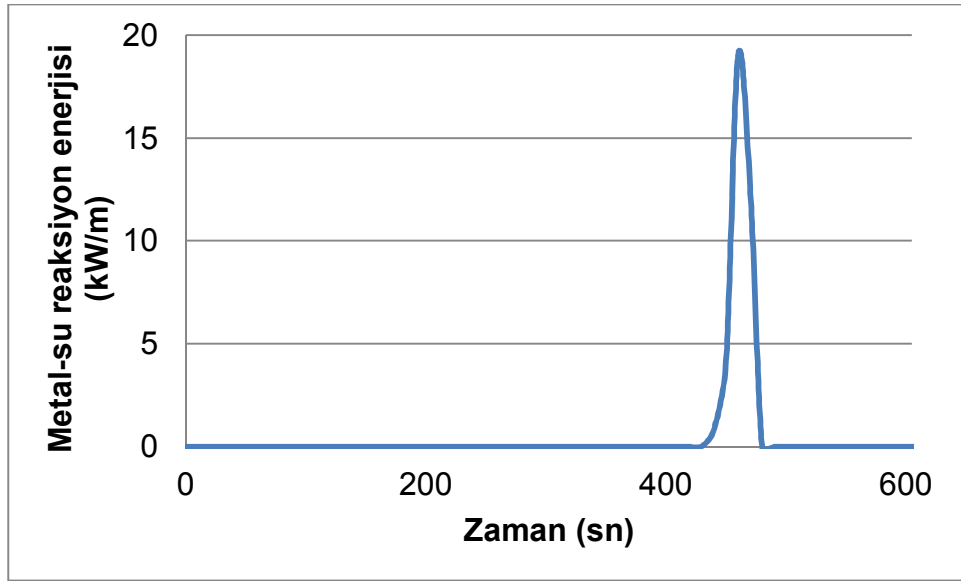
Şekil 6.21. Yapısal radyal boşluğun zamanla değişimi.



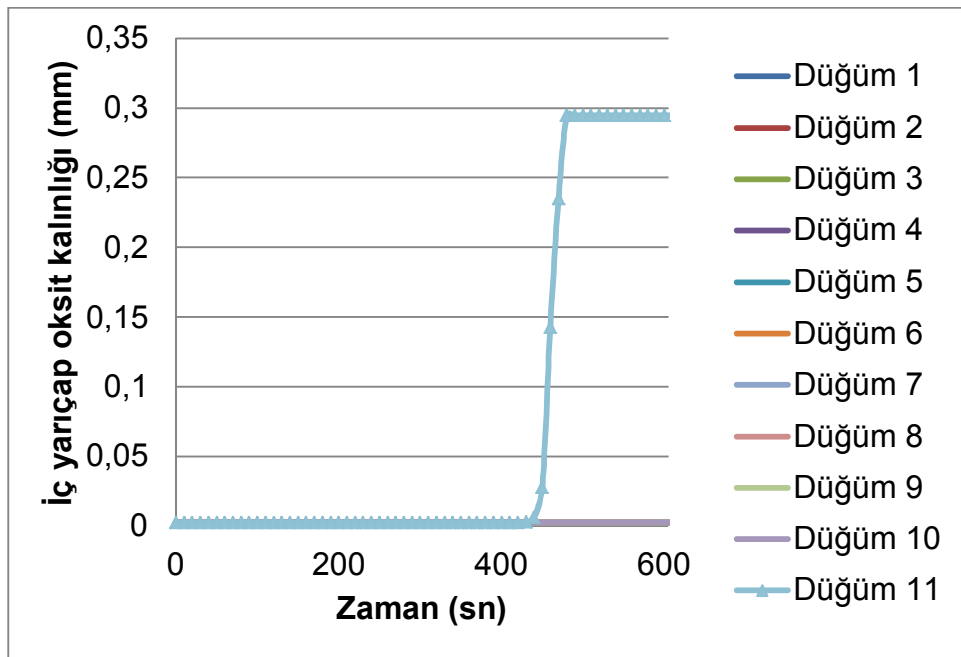
Şekil 6.22. Zarf teğetsel ebat değişimi ve boşluk gazı basıncının zamanla değişimi.



Şekil 6.23. Soğutucu basıncı ve boşluk gaz basıncının zamanla değişimi.



Şekil 6.24. Metal-su reaksiyon enerjisinin zamanla değişimi.



Şekil 6.25. İç yarıçap oksit kalınlığının zamanla değişimi.

7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yakıtın içinde bulunabileceği durumlardan biri olan SGTR kazası koşulları altında, bu durum boyunca yakıtın işlevsizleşmesine sebep olabilecek basınç, sıcaklık, kütle akısı değişimleri ve bu koşullar altında oluşan işlevsizleşme şekilleri belirlenmiştir.

Sonuç olarak, SGTR kazasının 15 ile 60 GWd/MTU arasında değişen farklı yanma oranlarında, orta ve yüksek yanma oranlarında balonlaşmanın, düşük yanma oranlarında ise yüksek sıcaklıktan kaynaklı aşırı hızlı şekil değişiminin yakıt zarfı işlevsizleşmesine sebep olduğu saptanmıştır.

Yakıt işlevsizleşmesine soğutucu davranışının dolayısıyla ısı transferinin etkisi büyüktür. Dolayısıyla soğutucu davranışının gerçekçi modellenmesi gerekir. Bu çalışmada, yakıt soğutucu arası ısı transferi, FRAPTRAN-1.4 yazılımının konservatif modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Gelecekte, bu çalışmada yapılan benzeşimlerin gerçekçi ısı transferi katsayıları kullanılarak ileriye taşınması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Allison, C.M. and Wagner, R.J., 2004, Dec., RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 Supplemental, Supplemental, Innovative Systems Software, LLC.
- Berna, G.A., Beyer, C.E., Bohn, M.M., Davis, K.L. and Lanning, D.D., 1997, FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, NUREG/CR-6534, PNNL-11513, Vol. 2, prepared for the U.S. NRC by Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- Bocock G., 2011, Feb., Nuclear Fuels – Past, Present and Future, Women In Nuclear, Presentations.
- Chung, H.M., 2005, July, Fuel Behavior Under Loss-Of-Coolant Accident Situations, Temecula, California, USA.
- Crawford, D., 2009, June, LWR Fuel Performance (with emphasis on BWR fuel), Fuel Performance & Design, Global Nuclear Fuel.
- EPRI, 2008, Frequently asked questions; Fuel Reliability Guidelines, Electric Power Research Institute, <http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/SectorPages/Portfolio/PDM/FRP%20Del%20FAQ1c.pdf>.
- Ergün, Ş., 2011, Sözlü görüşme, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Beytepe 06800, Ankara, sulergun@hacettepe.edu.tr.
- Fuketa, T., Ishijima, K., Mori, Y., Sasajima, H., and Fujishiro, T., NSRR Experiment With 50 MWd/kgU PWR Fuel Under an RIA Condition, XA9743304, Department of Reactor Safety Research, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai Research Establishment, Tokai, Japan.
- Garkisch, H., SCWR Fuel Rod Design Requirements Design Limits Input for Performance Evaluations, Westinghouse Electric Co., <http://wins.engr.wisc.edu/research/scw/intl/SCIEM-III/SCW-INEL-Cor-Des-Crit.ppt>.
- Garzarolli, F., Jan, R., Stehle, H., 1979, The Main Causes of Fuel Element Failure in Water Cooled Power Reactors, Atomic Energy Review 171, Kraftwerk Union Aktiengesellschaft, Erlangen, Germany.
- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Beyer, C.E., 2011a, FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods, NUREG/CR-7023, Vol. 1, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Beyer, C.E., 2011b, FRAPCON-3.4: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup, NUREG/CR-7022, Vol. 1, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.

- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Beyer, C.E., 2011c, FRAPTRAN 1.4: Integral Assessment, NUREG/CR-7023, Vol. 2, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- Geelhood, K.J., Luscher, W.G., Beyer, C.E., 2011d, FRAPCON-3.4: Integral Assessment, NUREG/CR-7022, Vol. 2, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- IAEA, 1987, Sep., Reactor Water Chemistry Relevant To Coolant-Cladding Interaction, IAEA-TECDOC-429, IAEA, Vienna.
- IAEA, 1998, Jan., Fuel modeling at extended burnup, Report of the Co-ordinated Research Programme on Fuel Modelling at Extended Burnup — FUMEX, 1993-1996, IAEA-TECDOC-998, IAEA, Vienna.
- IAEA, 2010, Sep., Diablo Canyon NPP Probabilistic Risk Assessment Program, IAEA Training Course on Safety Assessment of NPPs to Assist Decision Making, Workshop Information, IAEA Workshop, 10p.
- Ichikawa, M., 1997, May, JAPANESE COUNTRY REPORT, XA9744839, Paper to be presented at IWGFPT Plenary Meeting, Japan Atomic Power Company.
- Kitamura, M., 2010, The Mihama-2 Accident from Today's Perspective, Taylor & Francis Group, LLC.
- Kitsunai, Y. and Kobayashi, H., 2011, 25 Mar., Leakage of Primary Coolant at Mihama Unit 2 due to Failure of SG Tube, February 9th, 1991, Mihama in Fukui Prefecture, Failure Knowledge Database / 100 Selected Cases, <http://www.sozogaku.com/fkd/en/hfen/HB1061010.pdf>.
- Livingston, N.J., 1996, Dec., Steam Generator Tube Fatigue Evaluation, Final Report, Prepared by Foster Wheeler Development Corporation for Electric Power Research Institute (EPRI), TR-107263, S415-02, S540-01.
- Onufriev, V., 2011, Apr., Preliminary results of the IAEA study on Fuel Failures in Water Cooled Reactors in 2006-2010, Based on data presented by the IAEA TWGFPT Members, calculated and summarized by V. Onufriev.
- PRIS, 2011, May, Mihama-2, PRIS data base, <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.ophis.htm?country=JP&site=MIHAMA&units=&refno=6&opyear=2010&link=HOT>.
- Sasajima, H., Fuketa, T., Mori, Y., Ishijima, K., Kobayashi, S., Yamahara, T., Sukegawa, T., and Ito, T., 1995, "Behavior of Irradiated PWR Fuel Under a Simulated RIA Condition [Results of NSRR Test MH-3]", JAERI-Research-95-087, Japan Atomic Energy Research Institute.
- Seul, K.W., Bang Y.S., Lee S., Kim H.J., 1996, Sep., Assessment of RELAP5/Mod3.1 With The LSTF SB-SG-06 Experiment Simulating a Steam Generator Tube Rupture Transient, International Agreement Report, NUREG/IA-0130, CAMP002.

- Tompkins, B., 2008, June, "Advancing the cause of fuel reliability", Nuclear News, pp. 34-37.
- U.S. NRC, 2011, Mar., Pressurized Water Reactor Systems, "Nuclear Reactor Concepts" Workshop Manual, USNRC Technical Training Center.
- U.S. NRC, 2011, Dec., Resolution of Generic Safety Issues: Issue 188: Steam Generator Tube Leaks or Ruptures, Concurrent with Containment Bypass from Main Steam Line or Feedwater Line Breaches, NUREG-0933, Main Report with Supplements 1–33.
- Watanabe, N., 1997, Accident sequence precursor analyses for steam generator tube rupture events that actually occurred, Department of Reactor Safety Research, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan, Reliability Engineering and System Safety 57, 281-297p.
- Westinghouse Electric Company, 2007, Oct., Westinghouse World View, http://www.westinghousenuclear.com/docs/News_Room/worldviewOctober2007.pdf.

EKLER DİZİNİ

EK.A FRAPTRAN-1.4 Veri Hazırlama

Çizelge A.1 FRAPTRAN-1.4 Veri Değişkenleri Ve Tanımları

Veri değişkeni	Değişken tanımı
ProblemStartTime	Hesaplama başlangıç zamanı
ProblemEndTime	Hesaplama bitiş zamanı
ncards	1=: Yeni bir hesaplama yapılacak, 0=: Önceki bir hesaplama devam edecek, 2=: Önceki geçiş rejiminin verilerinin etkileri üzerine ikinci bir geçiş rejimi hesaplaması yapılacak anlamına gelir.
unitin	Girdiler, SI birimi üzerinden belirlenecekse; '1' değeri girilerek bu seçenek kullanılır. Eğer kullanılmazsa; girdiler, İngiliz birimleri üzerinden belirlenecek anlamına gelir.
inp	FRAPCON-3 tarafından oluşturulan dosyadaki yanma oranına bağlı verilerin kullanılması için '1' değeri girilerek bu seçenek kullanılır.
trest	FRAPCON-3 hesaplama bitiş zamanı
unitout	Çıktılar, SI birimi olarak isteniyorsa; '1' değeri girilerek bu seçenek kullanılır. Eğer kullanılmazsa; çıktılar, İngiliz birimleri olarak isteniyor anlamına gelir.
dtpoa	Çıktılar arasındaki zaman aralığı
dtplta	Çizim için gerekli değerlerin çıktıları arasındaki zaman aralığı
dtmaxa	Geçiş rejimi boyunca hesaplamalarda kullanılacak zaman adımı
dtss	Yakıt çubuğu sıcaklığının; geçiş durumu denklemi yerine, normal çalışma durumu denklemi ile hesaplanması için zaman adımı eşik değeri belirtilmelidir.
prsacc	Yakıt çubuğu içsel basınç değerinin yaklaşması için iki başarılı yineleme arasındaki en yüksek değişim oranı.
tmpac1	Herhangi bir radyal düğümdeki sıcaklık değerinin yakınsaması için iki başarılı yineleme arasındaki en yüksek değişim oranı.
maxit	Normal çalışma durumu sıcaklık çözümünde en yüksek yineleme sayısı
noiter	Geçiş rejimi sıcaklık çözümünde en yüksek yineleme sayısı
epsht1	Yakınsama olmadan önce ısı özelliklerindeki yinelemeler arasındaki en büyük sıcaklık değişimi.
naxn	Eşit aralıklı eksenel düğümlerin sayısı (Düğümlerin yerleşimi eksenel bölgelerin ortasındadır)
nfmesh	Yakıttaki eşit alanlı radyal düğümlerin sayısı (İlk radyal düğüm yakıt merkezine, son radyal düğüm yakıt yüzeyine yerleştirilmiştir)

Çizelge A.1 devam ediyor	
ncmesh	Zarftaki eşit alanlı radyal düğümlerin sayısı
RodLength	Etkin yakıt boyu
RodDiameter	Yakıt zarfı dış çapı
gapthk	Tablet-zarf arası boşluk genişliği
vplen	Üst plenum hacmi
volbp	Alt plenum hacmi
ncs	Üst plenum yayı sarım sayısı
spl	Üst plenum yayı sıkıştırılmamış yüksekliği
scd	Üst plenum yay halkası dış çapı
swd	Üst plenum yay teli çapı
FuelPelDiam	Yakıt tableti çapı
pelh	Oda sıcaklığında (300K) tablet boyu
rshd	Oda sıcaklığında (300K) yakıt tablet çukurunun çapı
dishd	Oda sıcaklığında (300K) yakıt tableti çukur derinliği
dishv0	Oda sıcaklığında (300K) yakıt tableti çukur hacmi
roughf	Yakıt tableti yüzey pürüzlülüğü
frden	Yakıt yoğunluğu (kuramsal yoğunluk kesri)
tsntrk	Yakıt sinterlenme sıcaklığı
CladType	Zarf çeşidi
coldw	Zarf soğuk işlemi
roughc	Zarf yüzey pürüzlülüğü
cldwdc	Süneklik için soğuk işlem faktörü
gfrac(1)	Helyum gazının toplam gaza oranı
gfrac(6)	Havanın toplam gaza oranı
gappr0	Boşluk gazı basıncı
tgas0	Boşluk gazı sıcaklığı
pitch	İki yakıt çubuğunun merkezleri arasındaki uzaklık
pdrato	İki yakıt çubuğunun merkezleri arasındaki uzaklığın yakıt çubuğu dış çapına oranı
rnbnt	Yakıt demeti içinde balonlama yapabilecek çubuk sayısının toplam çubuk sayısına oranı
totnb	Yakıt demetinde bulunan toplam çubuk sayısı
RodAvePower	Çubuk –ortalama çizgisel ısı üretim oranı
AxPowProfile	Eksenel güç şekli
CladPower	Zarftaki birim hacim başına ısı üretiminin yakıttaki birim hacim başına bölgesel olarak ortalanmış ısı üretimine oranı
nthermex	Tablet yarıçap değişimi hesaplaması için yakıt ısı genleşme modelleri 0=: her halkadaki radyal ısı genleşmeden kaynaklı yarıçap değişimini ekleyerek hesaplıyor 1=: çözümün yapıldığı halkasal bölge içindeki her düğümden gelen, radyal ısı genleşmeye bağlı, yarıçap değişimlerinin toplamının en büyük değerini alarak veya geçerli halkada dairesel ısı genleşmeye bağlı yarıçap

Çizelge A.1 devam ediyor.	
	değişimini alarak hesaplıyor.
tref	Yakıt ve yakıt zarfı entalpisinin hesaplanmasında kullanılacak referans sıcaklığı seçeneği.
internal	Alt seçenekler vasıtasıyla bir veya daha fazla yakıt içsel gaz modeli belirleme seçeneği. Seçeneği açmak iç 'on' yazılmalıdır.
internal seçenekleri	alt Plenum gazı sıcaklığının hesaplanması için kullanılan, yakıt çubuğu plenumu ile yakıt zarfında oluşacak balon arasındaki zamana bağlı gaz akışını modellemek için kullanılan, yakıt çubuğunda bulunan gaz basıncının zamanla değişimini gösteren, fisyon ürünü gazların zamana bağlı salımının belirlenmesinde kullanılan alt seçenekler mevcuttur.
presfgr (internal seçeneği)	alt Fisyon gazı salımının zamana bağlı geçmişini belirleme alt seçeneği 0=: fisyon gazı salımı yok, 1=: <i>relfrac</i> kullanarak gaz salımını belirleme, 2=: FRAPCON-3.4'deki FRAPFGR modeliyle başlatılan geçiş rejimi gaz salımı modelini kullanma anlamını taşımaktadır.
metal	Metal-su reaksiyonu için bir model belirleme seçeneği (yakıt oksidasyonu). Seçeneği açmak iç 'on' yazılmalıdır.
metal alt seçenekleri	Yakıt zarfının iç yüzeyinde hesaplamaların başlangıcında oksit kalınlığı tanımlama, yakıt zarfının dış yüzeyinde hesaplamaların başlangıcında oksit kalınlığı tanımlama, FRAPTRAN 1.0 akma gerilmesi modeli (<i>itransient=0</i>) ile birlikte kullanılmak üzere zarfta hidrojen konsantrasyonu tanımlama, metal-su reaksiyonunu COBILD programı ve MATPRO'da kullanılan Cathcart korelasyonu tanımlanarak modellenmesi, metal-su reaksiyonunun Baker-Just korelasyonu tanımlanarak modellenmesi, hesaplamanın başlangıcında kullanılmak üzere tanımlanan oksit kalınlığının koruyucu ya da koruyucu değil olarak tanımlanmasında kullanılan alt seçenekler mevcuttur.
odoxid (metal alt seçeneği)	Yakıt zarfının dış yüzeyinde hesaplamaların başlangıcındaki oksit kalınlığını tanımlama alt seçeneği. Bu seçeneğin kullanılması için <i>odoxid>0</i> girilmelidir. Girilen değer eksenel düğüm sayısına (<i>naxn</i>) eşit olmalıdır. Bu tanımdan sonra <i>oxideod</i> değerleri girilmelidir.
oxideod	Yakıt zarfının dış yüzeyinde hesaplamaların başlangıcı için tanımlanan oksit kalınlığı. Tüm düğümler için değer girilmelidir.
cexh2a (metal alt seçeneği)	FRAPTRAN 1.0 akma gerilmesi modeli (<i>itransient=0</i>) ile birlikte kullanılmak üzere zarfta hidrojen konsantrasyonu tanımlama alt seçeneği. Veri bloğu \$çözümü için tanımlanan her düğüm için toplam hidrojen değeri girilmelidir.
cathca	Metal-su reaksiyonunun COBILD programı ve MATPRO'da

Çizelge A.1 devam ediyor.	
(metal alt seçeneği)	kullanılan Cathcart korelasyonu tanımlanarak modellenmesi alt seçeneği. Bu modellemenin yapılması için catcha=1 değeri girilmelidir.
baker (metal alt seçeneği)	Metal-su reaksiyonunun Baker-Just korelasyonu tanımlanarak modellenmesi alt seçeneği. Modellemenin bu seçenekle yapılabilmesi için baker=1 değeri girilmelidir.
ProtectiveOxide (metal alt seçeneği)	Hesaplamanın başlangıcında kullanılmak üzere tanımlanan oksit kalınlığının koruyucu ya da koruyucu değil olarak tanımlanmasında kullanılan alt seçenek. 0=: oksit kalınlığı koruyucu olarak tanımlama, 1=: oksit kalınlığı koruyucu değil olarak tanımlama.
deformation	Aşağıda listelenen alt seçenekleri tanımlama seçeneği. Bu seçenek için deformation=0 değeri tanımlanmalıdır. (Herhangi bir seçenek tanımlanmadığında, FRACAS-I alt seçenekleri (modfd=0, modkf=2) kullanılmaz).
deformation seçenekleri	alt Yakıt zarfı hasarının etkin zarf plastik ebat değişimi, kararsız ebat değişiminden büyük olduğunda gerçekleşmesi için BALON alt programının kullanılmamasını tanımlayan alt seçenek (modfd=0, nbalsw=1) ve yakıt şişmesinin zamana bağlı değişiminin ve bu değişimin zamanın fonksiyonu olarak tanımlanması için alt seçenekler mevcuttur.
mechan	Mekanik model seçeneği mechan=1 değeri FEA modelinin, mechan=2 değeri, FRACAS-I modelinin seçilmesini sağlar.
mechan seçenekleri	alt Yakıt ve yakıt zarfı arasındaki Coulomb sürtünme katsayısı, FEA için kullanılacak rupture model, Maximum effective plastic strain, mesh refinement alt seçenekleri mevcuttur.
heat	Yakıt merkezinde boşluk tanımlama seçeneği. Bu seçeneğin kullanılması için heat='on' değeri girilmelidir.
heat alt seçenekleri	Merkezinde boşluk tanımlanacak olan yakıtların miktarı ile ilgili alt seçenek; örneğin merkez sıcaklığını ölçmek üzere, ısı çifti kullanılacak yakıtların sayısı.
coolant	Soğutucunun basıncı, kütle akısı ve entalpisinin tanımlanması seçeneği. Bu seçeneğin kullanılması için coolant='on' olarak tanımlanmalıdır. Bu seçenek kullanıldığında, "heat" seçeneği ve bu seçeneğin tüm alt seçenekleri kullanılmaz.
coolant seçenekleri	alt Yakıtı soğutan akışkan kanalının geometrisinin tanımlanmasında kullanılan, girilen soğutucu koşullarının tanımlandığı, soğutucu kanalı girişinde soğutucunun entalpisinin zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili, soğutucu kanalı çıkışında soğutucunun entalpisinin zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili, soğutucu basıncının zamanla değişiminin tanımlanması için kullanılan, soğutucu kütle akısının zamanla değişiminin tanımlanması için kullanılan, kor ortalama soğutucu entalpisinin zamanla değişiminin tanımlanması ile ilgili,

Çizelge A.1 devam ediyor.	
	soğutucu sıcaklığı doyma sıcaklığında ile gerçekleşen kaynamanın ısı transferi katsayısının tanımlanması ile ilgili, kritik ısı akısı korelasyonunun tanımlanması ile ilgili, kritik ısı akısının geçilmesinden sonra kullanılacak ısı transferi katsayısı korelasyonlarının tanımlanması ile ilgili, kritik ısı akısının soğuk duvar etkisi gözönünde bulundurularak hesaplanması ile ilgili, kritik ısı akısının, üretilen gücün akış yönünde değişimi göz önünde bulundurularak hesaplanması ile ilgili, kritik ısı akısının, yakıt çubuğunun bükülmesi göz önünde bulundurularak hesaplanması ile ilgili, yakıt çubuğunun bir kısmında film kaynamasının modellenmesi ile ilgili alt seçenekleri mevcuttur.
geomet (coolant seçeneği)	alt Yakıtı soğutan akışkan kanalının geometrisinin tanımlanmasında kullanılan alt seçenek. Bu alt seçeneğin kullanılması için geomet=1 değeri girilmelidir, ardından da dhe, dhy ve achn değerleri girilmelidir.
dhe	Akış kanalının ısıtma-eş çapı ($4 \cdot \text{akış alanı} / \text{ısıtılan çevre}$).
dhy	Akış kanalının hidrolik çapı ($4 \cdot \text{akış alanı} / \text{ıslanan çevre}$).
achn	Akış kesit alanı ($\text{pitch}^2 - \pi \cdot (d/2)^2$)
lowpl (coolant seçeneği)	alt Soğutucu kanalı girişinde soğutucunun entalpisinin zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili alt seçenek.
hinta	Giriş entalpisi-zaman veri çiftleri. Problem modelleme süresinin tamamı için değer girilmelidir (lowpl değeri ile tanımlanan veri sayısı kadar).
pressu (coolant seçeneği)	alt Soğutucu basıncının zamanla değişiminin tanımlanması için kullanılan alt seçenek. Bu seçeneğin kullanılması için pressu>0 değeri girilmelidir; pressu, basınç-zaman veri çiftlerinin sayısı olarak girilmelidir.
pbh1	Soğutucu basıncı ve zaman veri çiftleri. Problem modelleme süresinin tamamı için, pressu değeri kadar veri girilmelidir.
massfl (coolant seçeneği)	alt Soğutucu kütle akısının zamanla değişiminin tanımlanması için kullanılan alt seçenek. Bu seçeneğin kullanılması için massfl>0 değeri girilmelidir; massfl, akı-zaman veri çiftlerinin sayısı olarak girilmelidir.
gbh	Kütle akısı ve zaman veri çiftleri. Problem modelleme süresinin tamamı için, massfl değeri kadar veri girilmelidir.
heat	Isı transferi katsayısının zarf dış yüzeyi için tanımlanması seçeneği. Bu seçeneğin kullanılması için, heat='on' değeri tanımlanmalıdır.
heat alt seçenekleri	Isı transferi katsayısının, soğutucu sıcaklığının ve basıncın tanımlanmasıyla ilgili, soğutucu basıncının tanımlanmasıyla ilgili, ilk bölgenin üst kısmı için ısı transferi katsayısının tanımlanması ile ilgili, tanımlanan bölgeler için ısı transferi katsayısının zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili, ilk bölgede soğutucu sıcaklığının zamanla değişiminin tanımlanması ile ilgili alt seçenekler mevcuttur.

Çizelge A.1 devam ediyor.	
reflood	Zarf yüzey ısı transferi katsayısının, FLECHT korelasyonları kullanılarak soğutucu kaybı kazasının yeniden akış fazı için modellenmesi ile ilgili seçenek. Bu seçeneğin kullanılması için reflood='on' girilmelidir. Bu seçenek kullanıldığında, time, inlet, reflo ve pressure alt seçenekleri tanımlanmalıdır.
reflood seçenekleri	alt Geometri parametrelerinin tanımlanması için, kor yeniden akışın başladığı zamanın tanımlanması için kullanılan, yeniden akış soğutucusunun kalbe giriş sıcaklığının zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili, yeniden akış soğutucusunun akış hızının zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili, reaktör kazanı basıncının zamanla değişiminin tanımlanmasıyla ilgili, yeniden akış süresince yakıt yüzeyinden gerçekleşecek radyasyon ısı transferinin modellenmesi ile ilgili, FLECHT ve tek fazlı buhar soğutması modellerinin birbirleri yerine kullanılması ile ilgili, tümlenmiş su seviyesinin çizgi halinde ilerlemesinin modellenmesi için kullanılan, yeniden akış suyunun kalp dışına taşınma miktarının tanımlanmasıyla ilgili, genel FLECHT korelasyonları yerine FRAP-T4 FLECHT korelasyonunun kullanılması için alt seçenekler mevcuttur.
radiation	Yakıt zarfı yüzeyinden akışı çevreleyen kılıfa radyasyon ısı transferinin hesaplanmasıyla ilgili alt seçenek. Bu seçeneğin kullanılması için radiation='on' değeri kullanılmalıdır. Eğer akış kanalını çevreleyen bir kılıf yoksa bu seçenek kullanılmamalıdır.
radiation seçenekleri	alt Akış kılıfının iç çapının tanımlanmasıyla ilgili ve akış kılıfının sıcaklıkla değişimin tanımlanmasıyla ilgili alt seçenekler mevcuttur.

EK.B FRAPCON-3.4a Veri Hazırlama

Çizelge B.1 FRAPCON-3.4a Veri Değişkenleri Ve Tanımları

Veri değişkeni	Değişken tanımı
dco	Yakıt zarfı dış çapı
thkcld	Yakıt zarfı duvar kalınlığı
thkgap	Tablet-zarf arası boşluk genişliği
totl	Etkin yakıt boyu
cpl	Soğuk plenum boyu
dspg	Plenum yayı dış çapı
dspgw	Yay teli çapı
vs	Plenum yayı sarım sayısı
hplt	Tablet boyu
rc	Yakıt tableti iç çapı
hdish	Çukur derinliği
dishsd	Tablet uç çukuru omuz genişliği
enrch	Yakıt tabletinin U-235 zenginliği
imox	MOX modelleme seçenekleri: 0=: UO_2 yakıt, >0: MOX yakıt, 1=: Duriez/Ronchi/NFI Mod ısı iletkenlik korelasyonu, 2=: Halden ısı iletkenlik korelasyonu kullanılacak anlamına gelmektedir.
comp	Plutonyum (Pu)'un yakıt içindeki ağırlığının yüzdesi
moxtyp	MOX'da kullanılan Pu tipi: 1=: reaktör kalitesinde 2=: silah kalitesinde
enrpu39	Yakıt tableti Pu-239 içeriği
enrpu40	Yakıt tableti Pu-240 içeriği
enrpu41	Yakıt tableti Pu-241 içeriği
enrpu42	Yakıt tableti Pu-242 içeriği
fotmtl	Oksit yakıt tabletinde Oksijen - metal atom oranı
gadln	Uranyum-Gadolinium yakıt tabletlerinde Gadolinium'un ağırlık oranı
ifba	Kordaki IFBA yakıtlarının yüzdesi
b10	ZrB_2 'deki B-10 zenginliği
zrb2thick	Tablet üstündeki ZrB_2 kalınlığı
zrb2den	ZrB_2 yoğunluğu
ppmh2o	Fabrika çıkış tabletlerde nem ağırlığı
ppmn2	Fabrika çıkış tabletlerde Nitrojen ağırlığı
den	Yakıt yoğunluğu
deng	Tabletler için açık gözeneklilik kesri
roughf	Tablet yüzey pürüzlülüğü

Çizelge B.1 devam ediyor.	
rsntr	Yoğunlaşma kaynaklı tablet yoğunluğu değişimi
tsint	Tabletlerin sinterlendiği sıcaklık
icm	Zarf 2 =: Zircaloy-2 4 =: Zircaloy-4 5 =: M5 6 =: ZIRLO™ çeşidi
cldwks	Zarf soğuk işlemi
roughc	Zarf yüzey pürüzlülüğü
catexf	Zarf yapı faktörü
chorg	Fabrika çıkışı Hidrojen oranı
fgpav	Boşluk gazı basıncı
idxgas	Gaz çeşidi 1 =: Helyum 2 =: Hava 3 =: Nitrojen 4 =: Fisyon gazı 5 =: Argon 6 =: Kullanıcı girişli karışım
amfair	Havanın toplam gaza oranı
amfarg	Argon gazının toplam gaza oranı
amffg	Fisyon gazının toplam gaza oranı
amfhe	Helyum gazının toplam gaza oranı
amfh2	Hidrojen gazının toplam gaza oranı
amfh2o	Su buharının toplam gaza oranı
amfkry	Kripton gazının toplam gaza oranı
amfn2	Nitrojen gazının toplam gaza oranı
amfxe	Xenon gazının toplam gaza oranı
iplant	Santral çeşidi -2 =: PWR -3 =: BWR -4 =: HBWR
nsp	p2, tw, go değişkenleri için 0 =: bütün zaman aralıklarında kullanılacak tek bir değer, 1 =: her değişken için her zaman adımında ayrı bir değer girilmeli anlamındadır.
p2	Soğutma sistemi basıncı
tw	Soğutucu giriş sıcaklığı
go	Soğutucu kütle akısı
pitch	İki yakıt çubuğunun merkezleri arasındaki uzaklık
icor	Zarfta tortu oluşumu 0/1 =: sabit 2 =: zamana bağlı
crdt	Başlangıç tortu kalınlığı

Çizelge B.1 devam ediyor.	
crdtr	Tortu birikme oranı
flux	Yakıt özgül gücü (W/g) ve hızlı nötron akısı($n \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) arasındaki çevrim
im	Zaman adımlarının sayısı
problemtime	Her zaman adımının sonundaki kümülatif zaman
qmpy, time	Her zaman adımındaki çizgisel ısı üretim oranı (LHGR)
iq	Eksenel güç şekli bildiricisi (0= kullanıcı giriqli)
x	Bir güç şekli tanımlayan herbir qf dizisine ait yükseklik
qf, x	Eksenel akı şekli katsayıları
jn	Herbir eksenel güç şekli başına kullanılan nokta sayısı
jst	Her zaman adımı için şekil numarası ataması
fa	Kosinüs şeklinde eksenel güç dağılımı için tepe güç değerinin ortalama değere oranı
nr	Tabletteki radyal çeper sayısı
ngasr	Gaz salımı hesabı için tabletteki eşit hacimli radyal halkaların sayısı
ngasmod	Fisyon gaz salımı modeli 1 =: ANS 5.4, 2 =: Massih, 3 =: FRAPFGR kullanılacak anlamına gelmektedir.
na	Çubuk boyunca eşit uzunluktaki eksenel bölgelerin sayısı
nunits	1 =: İngiliz birimi 0 =: SI birim
crephr	İçsel sürünme (deformasyon) hesapları için kullanılacak zaman modelleme aralığı.
slim	Şişme sınırı
mechan	Mekanik model seçeneği 1 =: FEA modeli, 2 =: FRACAS-I modeli
nce	FEA modeli için zarftaki radyal eleman sayısı
frcoef	Zarf ve yakıt tableti arasındaki Coulomb sürtünme katsayısı
jdlpr	Çıktı kontrolü 0 = Bütün eksenel düğümlerde çıktı, 1 = tepe-güçteki eksenel düğümde çıktı, -1 = eksenel özet çıktısı anlamına gelmektedir.
nplot	Grafik çıktısı için dosya oluşturma seçeneği (File 66).
ntape	FRAPTRAN için başlangıç koşulları dosyası oluşturma seçeneği (File 22).
nread	Yeniden başlatma dosyasından başlat sinyali
nrestr	FRAPCON-3 için yeniden başlatma dosyası yazma sinyali

EK.C FRAPCON-3.4a Veri Değeri Tablosu

Çizelge C.1 FRAPCON Veri Değerleri

Veri değişkeni	Birimler (SI)	Veri değeri	Kaynak
dco	m	0.01072	[Sasajima H., et al., 1995]
thkcld	m	0.00062	[Sasajima H., et al., 1995]
thkgap	m	0.000095	[Sasajima H., et al., 1995]
totl	m	3.642	[Sasajima H., et al., 1995]
cpl	m	0.179	[Sasajima H., et al., 1995]
dspg	m	$7.299e^{-3}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
dspgw	m	0.0012	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
Vs	Boyutsuz	15	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
hplt	m	0.0152	[Sasajima H., et al., 1995]
rc	m	0.0	Delik yok
hdish	m	$3.299e^{-4}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
dishsd	m	$1.645e^{-3}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
enrch	Toplam U içinde U-235 atomu yüzdesi (%)	2.6	[Sasajima H., et al., 1995]
den	Kuramsal yoğunluğun yüzdesi (%)	95.11	[Sasajima H., et al., 1995]
deng	Kuramsal yoğunluğun yüzdesi (%)	0	Varsayım
roughf	m	$0.2e^{-6}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
rsntr	kg/m ³	74.11	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]

Çizelge C.1 devam ediyor.			
tsint	K	1973.15	Kabul [IAEA, 1998]
icm	Boyutsuz	4	[Sasajima H., et al., 1995]
cldwks	Boyutsuz	0.5	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
roughc	m	$5.00e^{-7}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
fgpav	Pa (oda sıcaklığında)	3200000	[Sasajima H., et al., 1995]
idxgas	Boyutsuz	6	[Sasajima H., et al., 1995]
amfair	Mol kesri	0.03	[Sasajima H., et al., 1995; Geelhood, K.J. et al., 2011c]
amfhe	Mol kesri	0.97	[Sasajima H., et al., 1995; Geelhood, K.J. et al., 2011c]
iplant	Boyutsuz	-2	PWR
nsp	Boyutsuz	0	Seçim
p2	Pa	15400000	[IAEA, 1987]
tw	K	562.15	[IAEA, 1987]
go	$kg/(s \cdot m^2)$	1169.7	Hesaplama [IAEA, 1987]
pitch	m	0.0126	[Ichikawa, M., 1997]
ngasmod	Boyutsuz	3	Seçim
icor	Boyutsuz	0	Varsayım
crdt	m	0.0	Varsayım
flux	$n \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} / (W/g)$	$2.3447e^{16}$	Hesaplama - [Sasajima H., et al., 1995; Fuketa, T. Et al., ..; PRIS, 2011; Garzarolli, F. et al., 1979]
im	Boyutsuz	45	Seçim
ProblemTime	Gün (d)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 50.0, 100.0, 150.0, 200.0, 250.0, 300.0,	Seçim: 85%

Çizelge C.1 devam ediyor.			
		350.0, 400.0, 450.0, 465.0, 500.0, 550.0, 600.0, 650.0, 700.0, 750.0, 800.0, 850.0, 900.0, 930.0, 950.0, 1000.0, 1050.0, 1100.0, 1150.0, 1200.0, 1250.0, 1300.0, 1350.0, 1395.0, 1400.0, 1450.0, 1500.0, 1550.0, 1600.0, 1650.0, 1700.0, 1750.0, 1800.0, 1850.0, 1860.0,	kapasite faktörüyle, 18 aylık, 4 çevrim (1860 gün)
qmpy, time	kW/m	1.0, 4.0, 7.0, 10.0, 10*13.9, 10*24.3, 10*21.7, 11*19.3,	[Sasajima H., et al., 1995]
iq	Boyutsuz	0	Seçim
x	m	0.000, 0.260, 0.520, 0.780, 1.040, 1.301, 1.561, 1.821, 2.081, 2.341, 2.601, 2.861, 3.121, 3.381, 3.642,	Seçim
qf, x	Boyutsuz	qf(1) = 0.4556, 0.6702, 0.8718, 1.0298, 1.1801, 1.2690, 1.3377, 1.3600, 1.3300, 1.2824, 1.1686, 1.0454, 0.8680, 0.6706, 0.4610, qf(16) = 0.5272, 0.7170, 0.8939, 1.0269, 1.1530, 1.2297, 1.2901, 1.3100, 1.2842, 1.2431, 1.1450, 1.0389, 0.8873, 0.7191, 0.5347, qf(31) = 0.6247, 0.7759, 0.9171, 1.0248, 1.1267, 1.1836, 1.2256, 1.2400, 1.2232, 1.1933, 1.1140, 1.0282, 0.9100, 0.7798, 0.6330, qf(46) = 0.5552, 0.6963, 0.8647, 1.0320, 1.1433, 1.2192, 1.2215, 1.2356, 1.2700, 1.2552, 1.2022, 1.1037, 0.9255, 0.7322, 0.5434, qf(61) = 0.5596, 0.7407, 0.9187, 1.0442, 1.1286, 1.1877, 1.1823, 1.1865, 1.2100, 1.2070, 1.1482, 1.0821, 0.9825, 0.8038, 0.6182, qf(76) = 0.8368, 0.9372, 1.0473, 1.0767, 1.0800, 1.0658, 1.0271, 1.0104, 1.0124, 1.0248, 1.0420, 1.0589, 1.0367, 0.9407, 0.8033, qf(91) = 0.5780, 0.6795, 0.8387, 1.0024, 1.1306, 1.2171, 1.2608, 1.2616, 1.2700, 1.2418, 1.1714, 1.0831, 0.9543, 0.7516, 0.5589, qf(106) = 0.7999, 0.8922, 1.0090, 1.0770, 1.1000, 1.0710, 1.0406, 1.0359, 1.0462, 1.0615, 1.0863, 1.0914, 1.0176, 0.9149,	[Geelhood, K.J. et al., 2011d]

Çizelge C.1 devam ediyor.			
		0.7565,	
jn	Boyutsuz	15,15,15,15,15,15,15,15	Seçim
jst	Boyutsuz	9*1, 5*2, 5*3, 5*4, 5*5, 5*6, 5*7, 6*8,	Seçim
fa	Boyutsuz	1	Seçim
nr	Boyutsuz	17	Seçim
ngasr	Boyutsuz	45	Seçim
na	Boyutsuz	11	Seçim
nunits	Boyutsuz	0	Seçim
jdpr	Boyutsuz	0	Seçim
nplot	Boyutsuz	1	Seçim
ntape	Boyutsuz	1	Seçim

EK.D FRAPTRAN-1.4 Veri Değeri Tablosu

Çizelge D.1 FRAPTRAN Veri Değerleri

Veri değişkeni	Birimler (SI)	Veri değeri	Kaynak
ProblemStartTime	sn	0	Seçim
ProblemEndTime	sn	5000	[Seul, K.W. et al., 1996]
ncards	Boyutsuz	1	FRAPCON çıktısı yanmaya bağlı veriler kullanılacak
unitin	Boyutsuz	1	Seçim
inp	Boyutsuz	1	Seçim
trest	sn	$1.607e^8$	FRAPCON çıktısı
unitout	Boyutsuz	1	Seçim
dtpoa	sn, sn	10.0	Seçim
dtplta	sn, sn	10.0	Seçim
dtmaxa	sn	0.1,0.0, 0.01,450.0, 0.1,1000.0, 0.1,5000.0,	Isıl hidrolik değişkenlere bağlı
dtss	sn	$1.0e^5$	Koda ait değer
prsacc	Boyutsuz	0.005	Koda ait değer
tmpac1	Boyutsuz	0.005	Koda ait değer
maxit	Boyutsuz	200	Koda ait değer
noiter	Boyutsuz	200	Koda ait değer
epsht1	K	0.001	Koda ait değer
naxn	Boyutsuz	11	FRAPCON girdisi
nfmesh	Boyutsuz	15	Seçim
ncmesh	Boyutsuz	2	Seçim
RodLength	m	3.642	[Sasajima H., et al., 1995]
RodDiameter	m	0.01072	[Sasajima H., et al., 1995]
gapthk	m	$9.5e^{-5}$	[Sasajima H., et al., 1995]
vplen	m^3	$1.26345e^{-5}$	Hesaplama [Sasajima H., et al., 1995]
ncs	Boyutsuz	15	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
spl	m	0.179	[Sasajima H., et al., 1995]

Çizelge D.1 devam ediyor.			
scd	m	$7.299e^{-3}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
swd	m	$1.199e^{-3}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
FuelPelDiam	m	0.00929	[Sasajima H., et al., 1995]
pelh	m	0.0152	[Sasajima H., et al., 1995]
rshd	m	$3.0e^{-3}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
dishd	m	$3.299e^{-4}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
dishv0	m^3	$9.345e^{-9}$	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
roughf	μm	2.0	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
frden	Boyutsuz	0.9511	[Sasajima H., et al., 1995]
tsntrk	K	1973.15	Kabul [IAEA, 1998]
CladType	Boyutsuz	4	[Sasajima H., et al., 1995]
coldw	Boyutsuz	0.5	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
roughc	μm	0.5	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
cldwdc	Boyutsuz	0.04	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
gfrac(1)	Mol kesri	0.97	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
gfrac(6)	Mol kesri	0.03	[Geelhood, K.J. et al., 2011c]
gappr0	N/m^2	3200000	[Sasajima H., et al., 1995]
tgas0	K	295.15	[Sasajima H., et al., 1995]
pitch	m	0.0126	[Ichikawa, M., 1997]
pdrato	Boyutsuz	1.175	Hesaplama [Sasajima H., et al., 1995; Ichikawa, M., 1997]
rnbnt	Boyutsuz	0.913	[Sasajima H., et al., 1995; IAEA, 1987]

Çizelge D.1 devam ediyor.			
			14*14=196 179/196=0.91327
totnb	Boyutsuz	179.0	[IAEA, 1987]
RodAvePower	kW/m, s	19.3,0.0, 17.7753,17.5, 16.79872,35.0, 16.06918,52.5, 15.4979,70.0, 14.96715,87.5, 14.49816,105.0, 14.09286,122.5, 13.7802,140.0, 13.45789,157.5, 13.19541,175.0, 12.9503,192.5, 12.5836,220.0, 12.22076,255.0, 11.90231,290.0, 11.61281,325.0, 11.3484,360.0, 11.13417,395.0, 10.91608,430.0, 10.73466,465.0, 10.5571,500.0, 10.50692,535.0, 10.23672,570.0, 10.11899,605.0, 0.0386,1000.0, 0.0253988,5000.0,	[Seul, K.W. et al., 1996]
AxPowProfile	Boyutsuz, m	0.7999,0.0, 0.8922,0.260, 1.0090,0.520, 1.0770,0.780, 1.1000,1.040, 1.0710,1.301, 1.0406,1.561, 1.0359,1.821, 1.0462,2.081, 1.0615,2.341, 1.0863,2.601, 1.0914,2.861, 1.0176,3.121, 0.9149,3.381, 0.7565,3.642,	Normal çalışmanın sonundaki şekil esas alınmıştır
CladPower	Boyutsuz	0.0123	
internal	Boyutsuz	'on'	Seçim

Çizelge D.1 devam ediyor.			
presfgr (internal alt seçeneği)	Boyutsuz	2	Seçim
metal	Boyutsuz	'on'	Seçim
odoxid (metal alt seçeneği)	Boyutsuz	11	FRAPCON çıktısı
oxideod	m	38.224e-6, 115.445e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 150.000e-6, 140.373e-6,	FRAPCON çıktısı
cehx2a (metal alt seçeneği)	ppm	291.16, 892.97, 1178.18, 1177.70, 1177.54, 1177.57, 1177.49, 1177.79, 1177.82, 1178.46, 1098.29,	FRAPCON çıktısı
baker (metal alt seçeneği)	Boyutsuz	1	Seçim
ProtectiveOxide (metal alt seçeneği)	Boyutsuz	0	Seçim
coolant	Boyutsuz	'on'	Seçim
geomet (coolant alt seçeneği)	Boyutsuz	1	Seçim
dhe	m	$8.1359e^{-3}$	Hesaplama [Sasajima H., et al., 1995; Ichikawa, M., 1997]
dhy	m	$8.1359e^{-3}$	Hesaplama [Sasajima H., et al., 1995; Ichikawa, M., 1997]
achn	m^2	$6.85e^{-5}$	Hesaplama [Sasajima H., et al., 1995;

Çizelge D.1 devam ediyor.			
			Ichikawa, M., 1997]
lowpl (coolant alt seçeneği)	Boyutsuz	25	Seçim
hinta	J/kg, s	1216.300E+03, 0.0, 1240.610E+03, 10.0, 1243.850E+03, 60.0, 1244.330E+03, 200.0, 1228.180E+03, 390.0, 1191.710E+03, 490.0, 1181.170E+03, 550.0, 1183.810E+03, 600.0, 1204.980E+03, 800.0, 1229.310E+03, 1060.0, 1282.740E+03, 2100.0, 1291.040E+03, 3000.0, 1287.830E+03, 3020.0, 1276.530E+03, 3130.0, 1260.870E+03, 3170.0, 1248.670E+03, 3330.0, 1248.400E+03, 3360.0, 1236.721E+03, 3380.0, 1159.150E+03, 3390.0, 1102.460E+03, 3440.0, 1138.550E+03, 3630.0, 878.511E+03, 4280.0, 889.843E+03, 4440.0, 833.615E+03, 4580.0, 675.367E+03, 5000.0,	Isıl hidrolik değişkenlere bağlı
pressu (coolant alt seçeneği)	Boyutsuz	50	Seçim
pbh1	N/m ² , s	15649720.0, 0.0, 15772450.0, 20.0, 15016780.0, 120.0, 14430040.0, 220.0, 13673680.0, 350.0, 12630510.0, 410.0, 12654640.0, 490.0, 12613270.0, 580.0, 12982830.0, 980.0, 13026270.0, 1080.0, 13064190.0, 1230.0, 13064880.0, 1370.0, 12935940.0, 1510.0, 12827010.0, 1760.0, 12837350.0, 1890.0, 12804250.0, 2010.0, 12474690.0, 2600.0, 12421600.0, 2790.0,	Isıl hidrolik değişkenlere bağlı

Çizelge D.1 devam ediyor.			
		12360230.0, 3000.0, 12357470.0, 3010.0, 9899493.0, 3020.0, 9112800.0, 3030.0, 8561220.0, 3060.0, 8566047.0, 3100.0, 8511578.0, 3120.0, 8439872.0, 3150.0, 8443320.0, 3220.0, 8931469.0, 3360.0, 8696358.0, 3400.0, 8748758.0, 3440.0, 8566047.0, 3500.0, 8597762.0, 3550.0, 8519851.0, 3590.0, 8557083.0, 3640.0, 8625341.0, 3770.0, 8583284.0, 3880.0, 8508131.0, 3980.0, 8472967.0, 4020.0, 8362652.0, 4150.0, 8326798.0, 4210.0, 8359204.0, 4290.0, 8356446.0, 4350.0, 8266125.0, 4440.0, 8099271.0, 4530.0, 7926902.0, 4610.0, 7777976.0, 4680.0, 7469091.0, 4830.0, 7288448.0, 4930.0, 7176064.0, 5000.0,	
massfl (coolant alt seçeneği)	Boyutsuz	50	Seçim
gbh	kg/m ² s, s	1223.8300, 0.00, 1367.4200, 10.00, 1368.5000, 20.00, 1364.8300, 90.00, 1362.0000, 260.00, 1360.5900, 350.00, 1154.8900, 360.00, 697.1100, 370.00, 484.1500, 380.00, 359.4100, 390.00, 216.9900, 410.00, 132.5600, 430.00, 81.9700, 450.00, 72.3300, 480.00, 76.9000, 510.00, 74.5600, 540.00,	Isıl hidrolik değişkenlere bağlı

Çizelge D.1 devam ediyor.			
		68.1800, 580.00, 63.3700, 640.00, 58.0300, 880.00, 55.2300, 1180.00, 54.3500, 1290.00, 54.5700, 1560.00, 53.8100, 1730.00, 53.9700, 1800.00, 52.3800, 1940.00, 52.9100, 2290.00, 52.9500, 2550.00, 52.7500, 2660.00, 55.3300, 3020.00, 81.8300, 3050.00, 22.7400, 3070.00, 15.0900, 3100.00, 47.1900, 3130.00, 25.8400, 3140.00, 14.6600, 3360.00, 62.1800, 3390.00, 23.3400, 3440.00, 60.8700, 3450.00, 29.8400, 3470.00, 15.4800, 3510.00, 46.1900, 3550.00, 16.2000, 3650.00, 19.2500, 4110.00, 15.1800, 4150.00, 15.9500, 4410.00, 18.9000, 4630.00, 11.4400, 4810.00, 13.8900, 4880.00, 11.8700, 4910.00, 11.4600, 5000.00,	

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatma Burcu TAŞ

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1985

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise : Nermin Mehmet Çekiç Anadolu Lisesi 1996-2003

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği 2003-2009

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi:

2011-.... : Araştırma Görevlisi, Enerji Sistemleri Mühendisliği,
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman/Türkiye.