

**IRIS KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRÜNÜN (SMR)
RELAP5/SCDAPSİM SİSTEM KODU İLE MODELLENMESİ**

**MODELLING OF IRIS SMALL MODULAR REACTOR (SMR)
BY USING RELAP5/SCDAPSİM SYSTEM CODE**

HASAN ÇELİKKAYA

DOÇ. DR. ŞULE ERGÜN

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. FATİH AYDOĞAN

İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

HASAN ÇELİKKAYA' nın hazırladığı **"İRIS Küçük Modüler Reaktörünün (SMR) RELAP5/SCDAPSIM Sistem Kodu İle Modellenmesi"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

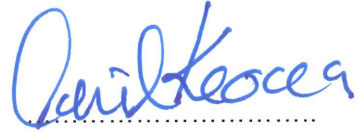
Prof. Dr. Ayhan YILMAZER
Başkan



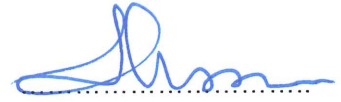
Doç. Dr. Şule ERGÜN
Danışman



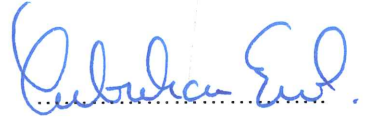
Prof. Dr. Cemil KOCAR
Üye



Prof. Dr. İlker TARI
Üye



Dr. Öğretim Üyesi Erol ÇUBUKÇU
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin / raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

12/09 /2018


Hasan ÇELİKKAYA

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü tezle ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılmaması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim

12/09/2018

İmza


ÖZET

IRIS KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRÜNÜN (SMR) RELAP5/SCDAPSİM SİSTEM KODU İLE MODELLENMESİ

Hasan ÇELİKKAYA

Yüksek Lisans, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERGÜN

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih AYDOĞAN

Eylül 2018, 47 sayfa

Kompakt tasarımları, düşük ilk yatırım maliyeti, konvansiyonel enerji santrallerine göre daha kısa kurulum süreleri, nükleer silahsızlanma antlaşması ile uyumlu olması, gelişmekte olan ülkelerin elektrik iletim hatları ile uyumlu olması, modüler şekilde kurulumlarının yapılması, iyileştirilmiş pasif güvenlik sistemlerinin bulunması gibi birçok sebepten dolayı 2000'li yıllardan itibaren küçük modüler reaktörler üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde, Amerika Enerji Bakanlığı ve Nükleer Enerji Araştırma Girişimi (NERI, Nuclear Energy Research Initiative) sponsorluğunda, Westinghouse şirketi öncülüğünde nükleer sanayi, araştırma laboratuvarları ve üniversitelerden oluşan uluslararası bir konsorsiyum tarafından tasarlanan soğutucu pompalar, buhar üreteçleri, basınçlandırıcı gibi reaktör güç ünitesi ana elemanlarını reaktör koruma kabı içerisinde içerecek şekilde integral, modüler inşa özelliğine sahip, basınçlı, hafif sulu 1000 MW_{th}, 335 MWe güce sahip IRIS Küçük Modüler Reaktörü (SMR) RELAP5/SCDAPSİM sistem kodu ile modellenmiştir.

IRIS SMR reaktörünün integral yapısı sayesinde reaktör basınç kabı içerisinde yer alan birincil döngüye 4 inçten (10,16 cm) (Kimyasal ve Hacim Kontrol Sistemi Bağlantısı) çapından büyük herhangi bir boru bağlantısı bulunmamaktadır. Bu tezin amacı, IRIS küçük modüler reaktörünün koruma, soğutucu sistemleri ve güvenlik sistemlerini RELAP5/SCDAPSIM sistem kodu kullanarak modellemek ve reaktör Kimyasal ve Hacim Kontrol Sistemi bağlantısında gerçekleşebilecek küçük kırık sonucu oluşan küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası sırasındaki davranışı incelemektir.

Bu kapsamda oluşturulan modelde reaktör birinci ve ikinci döngü bileşenleri ve koruma kabı soğutma sistemi haricindeki pasif güvenlik sistemleri modellenmiştir.

Küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası analizi sonuçlarına göre 2000. saniyede kırığın oluşması ile reaktör basınç kabından koruma kabına akış başlamış ve reaktör basıncı düşmeye başlamıştır. 2017. saniyede basınçlandırıcı su seviyesi, 2021. saniyede reaktör basıncı kritik seviyelerinin altına düşmüştür. Reaktör basıncının kritik seviyenin altına düşmesiyle, reaktör kapatılmış, Acil Durum Isı Çekme Sistemi (EHRS) devreye girmiştir. EHRS'nin devreye girmesiyle besleme suyu izolasyon vanası ve buhar hattı izolasyon vanası kapanmıştır. 2036. saniyede reaktör basıncını düşüren EHRS'ye yardımcı olmak için Otomatik Basıncısızlaştırma Sistemi (ADS) devreye girmiştir. 3530. saniyede basınç kabı ve koruma kabı arasındaki basınç farkının 13,79 kPa'ın altına düşmesiyle Yerçekimi ile Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi devreye girmiştir. Bu çalışmada koruma kabı soğutma sistemi modellenmediğinden ve EHRS tasarım değerlerine ait tasarım verileri elde edilemediğinden basınç ve koruma kabı basınçları beklenenden yüksek bir seviyede eşitlenmiş olup basıncın eşitlendiği seviye koruma kabı tasarım basıncının (1,4 MPa) yaklaşık 0,3 MPa altındadır.

Anahtar Kelimeler: IRIS, küçük modüler reaktörler, RELAP5/SCDAPSIM, integral basınç kabı, küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası, sarmal tip buhar üretici, pasif güvenlik sistemleri

ABSTRACT

MODELLING OF IRIS SMALL MODULAR REACTOR (SMR) BY USING RELAP5/SCDAPSIM SYSTEM CODE

Hasan ÇELİKKAYA

Master of Science, Department of Nuclear Engineering

Supervisor: Associate Prof. Dr. Şule ERGÜN

Co-Supervisor: Associate Prof. Dr. Fatih AYDOĞAN

September 2018, 47 Pages

Due to many reasons such as its compact design, low initial investment costs, shorter installation times compared to conventional nuclear power plants, compatibility with nuclear disarmament treaty, compatibility of developing countries electrical transmission lines, modular installation, and improved passive safety systems, intensive studies have been made on small modular reactors since 2000. In this thesis, the IRIS reactor and a small break loss of coolant accident that may occur at this reactor were analyzed. IRIS has been designed under the sponsorship of the US Department of Energy and Nuclear Energy Research Initiative (NERI) with the lead of the Westinghouse Company, and it was designed by an international consortium of nuclear industry, research laboratories and universities. IRIS has 1000 MWth and 335 MWe power, it is a pressurized light water reactor. IRIS reactor has integral design consists of main reactor power unit such as main coolant pumps, steam generators and pressurizer in the pressure vessel and it is modeled with RELAP5/SCDAPSIM system code.

By virtue of the integral structure of the IRIS SMR, there is no pipe connection larger than 4 inches (10.16cm) (Chemical and Volume Control System connection) to primary loop inside the reactor pressure vessel. The aim of this thesis is to model the IRIS reactor core, coolant system and safety system using RELAP5/SCDAPSIM system code and to analyze the behavior of the reactor during small break loss of coolant accident that can occur at the reactor Chemical and Volume Control System connection. In this model, reactor primary and secondary loop components, pressure vessel and passive safety systems except containment cooling system are modeled.

According to the results of the analysis of small break loss of coolant accident, the mass flow started from pressure vessel to containment and reactor pressure started to decrease when the break occurred at 2000th second. The pressurizer water level and reactor pressure dropped their critical level at 2017th second and 2021th second, respectively. With the decrease of the reactor pressure below the critical level, the reactor was shutdown, Emergency Heat Removal System (EHRS) was activated. With the activation of EHRS, the main feed water isolation valve and main steam isolation valve were closed. Automatic Depressurization System was activated in order to assist EHRS to reducing the reactor pressure at 2036th second.

Long Term Gravity Driven Makeup System was activated when the pressure difference between reactor pressure vessel and containment reached below the 13,79 kPa. In this study, containment cooling system is not modeled and EHRS design data was not found that's why the pressure of the containment and the pressure vessel was become equal more than expected level; however this level is still 0.3 MPa lower than to containment design pressure (1.4 MPa).

Keywords: IRIS, small modular reactors, RELAP5/SCDAPSIM, integral pressure vessel, small break loss of coolant accident, helical coil steam generator, passive safety systems

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığım ilk zamanlarda RELAP5 ve SCDAP ile güvenlik analizi konusunda çalışmamı teşvik eden değerli danışmanım Doç. Dr. Şule ERGÜN'e yaptığım bu çalışmada ve tüm zamanlarda verdiği destekler için teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Ekibinde araştırmacı olmam için beni University of Idaho'ya davet eden ve IRIS SMR çalışmamı teşvik eden, aramızdaki zaman farkına rağmen hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer eş danışmanım Doç. Dr. Fatih AYDOĞAN'a verdiği destekler için teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince kendisiyle keyifli bir öğrenme süreci yaşadığım ve RELAP5 eğitiminin temelini aldığım değerli Hocam Prof. Dr. C. Niyazi SÖKMEN'e en içten teşekkürlerimi borç bilirim.

RELAP5/SCDAPSIM kodunu daha iyi kullanabilmem için stajyerlik başvurumu kabul eden ve bu süre zarfında RELAP5 ve SCDAP'i etkin bir şekilde kullanmama yardımcı olan Innovative System Software LLC şirketi sahibi Chris ALLISON'a teşekkür ederim.

Bölümümüzün değerli hocalarına, değerli jüri üyelerine ve başta Dr. Osman Şahin ÇELİKTEN olmak üzere araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ve benim bugünlere gelmemde maddi manevi her türlü desteği veren biricik annem Aysel ÇELİKKAYA ve babam Bekir ÇELİKKAYA'ya ve kardeşlerim Tuba, Muhammed Hüseyin ve Musa'ya sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi iletiyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER	viii
ŞEKİLLER	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Küçük Modüler Reaktörler (SMRs)	1
1.2 RELAP5/SCDAPSIM Sistem Kodu	2
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Literatür Taraması	3
1.4 Tezin Şeması	4
2. IRIS SMR TASARIMI VE RELAP5/SCDAPSIM MODELİ	5
2.1 Modelleme ile ilgili genel bilgiler	8
2.2 İntegral Reaktör Soğutma Sistemi	11
2.2.1 IRIS SMR Basınç Kabı (PV)	16
2.2.2 Reaktör Kuru ve Yakıt Demeti	16
2.2.3 Reaktör Soğutucu Pompaları	17
2.2.4 Buhar Üreteçleri	18
2.2.5 Basınçlandırıcı	20
2.3 Pasif Nükleer Güvenlik Sistemleri	21
2.3.1 Pasif Acil Durum Isı Çekme Sistemi (EHRS)	22
2.3.2 ADS ve Koruma Kabı Basınç Düşürme Sistemi	22

2.3.3	Acil Durum Boronlama Sistemi (EBS)	23
2.3.4	Yerçekimi İle Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi (LGMS).....	23
2.3.5	IRIS SMR Güvenlik Sistemlerinin Devreye Girme Koşulları.....	24
3	IRIS SMR RELAP5/SCDAPSIM MODELİ SONUÇLARI	25
3.1	IRIS SMR RELAP Modeli Kararlı Hal Hesaplamaları	25
3.2	Küçük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası (SB-LOCA) Analizi	30
3.2.1	SB-LOCA Tanıtımı.....	30
3.2.2	SB-LOCA Analiz Sonuçları	31
4	SONUÇLAR.....	44
	KAYNAKLAR.....	46
	ÖZGEÇMİŞ	47

ÇİZELGELER

Çizelge 2-1 IRIS SMR Tasarım Özellikleri [8].....	5
Çizelge 2-2 Tasarım İle Güvenlik Yaklaşımının Etkileri [3]	7
Çizelge 2-3 Tasarım İle Güvenlik Yaklaşımının Etkileri [3] (Devam)	8
Çizelge 2-4 RELAP5/SCDAPSIM Model Tanıtımı	10
Çizelge 2-5 RELAP5/SCDAPSIM Model Tanıtımı (Devam)	10
Çizelge 2-6 Reaktör Basınç Kabı Özellikleri [2]	16
Çizelge 2-7 IRIS SMR Buhar Üretecinin Özellikleri	18
Çizelge 2-8 IRIS SMR Güvenlik Sistemleri Devreye Girme Koşulları [12]	24
Çizelge 3-1 Kararlı Hal Hesaplaması Sonuçları ve Tasarım Değerleri	27
Çizelge 3-2 Kırığın Oluşmasıyla Meydana Gelen Sistem Olayları.....	31

ŞEKİLLER

Şekil 2-1 IRIS SMR İntegral Tasarımı [9]	6
Şekil 2-2 RELAP5/SCDAPSIM Birincil Döngü Nodalizasyonu (Basınçlandırıcı Hariç).....	12
Şekil 2-3 Birincil Döngü ve İkincil Döngü Nodalizasyonu.....	13
Şekil 2-4 Koruma Kabı ve Otomatik Basınçsızlaştırma Sistemi Nodalizasyonu ...	14
Şekil 2-5 Acil Durum Isı Çekme Sistemi Nodalizasyonu.....	15
Şekil 2-6 Makaralı Tip (Spool Type) Pompa	17
Şekil 2-7 Buhar Üretici Kesiti ve Buhar Üretici Yerleşim Planları	19
Şekil 2-8 IRIS SMR Basınçlandırıcı Kesiti [3]	20
Şekil 2-9 IRIS SMR Pasif Güvenlik Sistemleri [3]	21
Şekil 3-1 Basınçlandırıcı Basıncı.....	25
Şekil 3-2 Basınç Kontrollü Vana Akışı	26
Şekil 3-3 Basınçlandırıcı Basıncı.....	26
Şekil 3-4 Reaktör Gücü	28
Şekil 3-5 Reaktör Birincil ve İkincil Döngü Basıncı	28
Şekil 3-6 Reaktör Kor Giriş ve Çıkış Sıcaklıkları.....	29
Şekil 3-7 Basınç Kabı ve Kor Akış Hızı	29
Şekil 3-8 Buhar Çıkış Sıcaklığı	30
Şekil 3-9 Kırık Akış Hızı (İlk 1000 saniye)	32
Şekil 3-10 Kırık Akış Hızı (Simülasyon süresi boyunca).....	32
Şekil 3-11 Basınçlandırıcı Su Seviyesi	33
Şekil 3-12 Basınçlandırıcı Basıncı (Simülasyon süresi boyunca).....	34
Şekil 3-13 Basınçlandırıcı Basıncı (2000-3000 saniye arası)	34
Şekil 3-14 İkincil Döngü Basıncı (Simülasyon süresi boyunca)	35
Şekil 3-15 İkincil Döngü Basıncı (2000-3000 saniye arası)	35
Şekil 3-16 Koruma Kabı Basıncı.....	36
Şekil 3-17 Koruma Kabı ve Basınç Kabı Basıncı.....	37
Şekil 3-18 LGMS Kütle Akış Hızı.....	37
Şekil 3-19 Kor Kütle Akış Hızı (Simülasyon süresi boyunca).....	38
Şekil 3-20 Kor Kütle Akış Hızı (2000-3000 saniye arası).....	38
Şekil 3-21 Kor Giriş Sıcaklığı (Simülasyon süresi boyunca).....	39
Şekil 3-22 Kor Giriş Sıcaklığı (2000-3000 saniye arası)	39

Şekil 3-23 Kor Çıkış Sıcaklığı (Simülasyon süresi boyunca)	40
Şekil 3-24 Kor Çıkış Sıcaklığı (2000-3000 saniye arası)	40
Şekil 3-25 Kor Çıkışı Boşluk Oranı	41
Şekil 3-26 Yakıt Çubuğu En Üst Hacim Elemanı Boşluk Oranı	41
Şekil 3-27 Yakıt Çubuğu Zarf Sıcaklığı En Üst Hacim Elemanı (Simülasyon süresi boyunca).....	42
Şekil 3-28 Yakıt Çubuğu Zarf Sıcaklığı En Üst Hacim Elemanı (2000-3000 saniye arası)	43



SİMGE VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ADS	Otomatik Basıncısızlaştırma Sistemi (Automatic Depressurization System)
BWR	Kaynar Su Reaktörü (Boiling Water Reactor)
CRDM	Kontrol Çubuğu Sürücü Mekanizması (Control Rod Drive Mechanism)
CVCS	Kimyasal Ve Hacim Kontrol Sistemi (Chemical and Volume Control System)
EBS	Acil Durum Boronlama Sistemi (Emergency Boration System)
EBT	Acil Durum Bor Tankı (Emergency Boration Tank)
EHRS	Acil Durum Isı Çekme Sistemi (Emergency Heat Removal System)
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)
IRIS	Uluslararası Yenilikçi ve Güvenli Reaktör (International Reactor Innovative and Secure)
LGMS	Yerçekimi ile Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi (Long-term Gravity Makeup System)
MFIV	Besleme Suyu İzolasyon Vanası (Main Feedwater Isolation Valve)
MSIV	Buhar Hattı İzolasyon Vanası (Main Steam Isolation Valve)
PHWR	Basıncılı Ağır Su Reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor)
PWR	Basıncılı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor)
PV	Basınç Kabı (Pressure Vessel)
RELAP5	Reaktör Sapma ve Sızıntı Analizi Programı (Reactor Excursion and Leak Program)
RCP	Reaktör Soğutucu Pompa (Reactor Coolant Pump)
RCS	Reaktör Soğutma Sistemi (Reactor Coolant System)
RWST	Yeniden Yakıt Yükleme Su Tankı
SB-LOCA	Küçük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası (Small-Break Loss-of-Coolant Accident)
SG	Buhar Üretici (Steam Generator)
SMR	Küçük Modüler Reaktör (Small Modular Reactor)
SP	Basınç Baskılama Havuzu (Suppression Pool)

1. GİRİŞ

Bu bölümde küçük modüler reaktörler, RELAP5/SCDAPSIM sistem kodu, tezin amacı, daha önce yapılmış benzer çalışmaların anlatıldığı literatür taraması ve tezin şeması gibi tez ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

1.1 Küçük Modüler Reaktörler (SMRs)

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından benimsenen sınıflandırmaya göre; Küçük Reaktörler kurulu elektrik üretim güçleri 300 MWe'ten az olan reaktörler, Orta Reaktörler ise kurulu elektrik üretim güçleri 300 ile 700 MWe arasında olan reaktörlerdir [1].

IAEA, küçük ve orta güç reaktörleri genel olarak SMRs (Small and Medium Reactors) kısaltması ile tanımlamaktadır. Günümüzde küçük ve orta güç reaktörlerinin bulunduğu enerji aralığında üretim kapasitesi bulunan modüler yapıdaki reaktörler de genel olarak küçük modüler reaktörler (SMR) olarak adlandırılırlar. Özetle IAEA tarafından kullanılan kısaltma ile küçük modüler reaktörler için kullanılan SMR kısaltması aynı olmasına rağmen SMR kısaltması günümüzde daha çok Küçük Modüler reaktörler için kullanılmaktadır.

Küçük ve orta güç üretimi olan reaktör kavramı günümüzde popülerlik kazanmasına rağmen yeni bir kavram değildir. Fisyon ile açığa çıkan enerjinin kontrollü bir şekilde kullanılmasının yaygınlaşması ile bu enerji aralıklarında güce sahip askeri, deneysel, test ve güç üretimi amaçlı birçok reaktör prototipi tasarlanmış ve imal edilmiştir. 1960'a kadar imal edilen ve birinci nesil olarak adlandırılan bu reaktörler ile elde edilen kazanımlar sonucu daha yüksek güce sahip reaktör tasarımları ortaya çıkmıştır. Günümüzde nükleer enerji santrallerinin büyük bir kısmı yüksek güce sahip Basınçlı Su Reaktörleri (PWR), Kaynar Su Reaktörleri (BWR) ve Basınçlı Ağır Su Reaktörlerinden (PHWR) oluşmaktadır.

Bu çalışmada, bundan sonra SMR kısaltması küçük modüler reaktörler için kullanılacaktır.

Kompakt tasarımları, düşük ilk yatırım maliyeti, konvansiyonel enerji santrallerine göre daha kısa kurulum süreleri, nükleer silahsızlanma antlaşması ile uyumlu olması, gelişmekte olan ülkelerin elektrik iletim hatları ile uyumlu olması, modüler şekilde kurulumlarının yapılması, büyük kırıklı soğutucu kaybı kazalarının

tasarımlarla önlenmiş olması ve iyileştirilmiş pasif güvenlik sistemlerinin bulunması gibi birçok sebepten dolayı 2000'li yıllardan itibaren küçük modüler reaktörler üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır.

İntegral tasarımların başlıca avantajları reaktör soğutma sistemi (RCP) ana elamanlarının basınç kabı içerisinde barındırmasıdır [2]. Bu durum integral reaktör basınç kabının ince ve uzun olarak tasarlanmasına sebep olmuş ve soğutucunun, yükseltici bölgesindeki hareketinde özellikle kazası sırasında baca etkisinin (chimney effect) avantajlarından yararlanmasına yardımcı olmuştur [2].

1.2 RELAP5/SCDAPSIM Sistem Kodu

RELAP5 ve SCDAP/RELAP5 kodları ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri, Idaho Ulusal Laboratuvarı (INL) tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan RELAP5/SCDAPSIM sistem kodu ise INL tarafından geliştirilen kod temel alınarak Innovative System Software LLC tarafından geliştirilmiş sürümdür.

RELAP5/SCDAPSIM reaktör soğutma sistemi ısı akışkan hesaplamalarında kullanılan en iyi tahmini yapabilen (best estimate) kodlardan biridir. SCDAP ise daha çok ağır kaza (severe accident) koşullarında kor, kor varili, yakıt demetleri, basınç kabı gibi bileşenlerin davranışlarının incelenmesinde kullanılır. Bu çalışmada ağır kaza koşulları incelenmediğinden SCDAP modu kullanılmamıştır.

1.2 Tezin Amacı

IRIS SMR, Amerika Enerji Bakanlığı ve NERI sponsorluğunda, Westinghouse şirketi öncülüğünde nükleer sanayi, araştırma laboratuvarları ve üniversitelerden oluşan uluslararası bir konsorsiyum tarafından [3] tasarlanan soğutucu pompalar, buhar üreteçleri, basınçlandırıcı gibi reaktör güç ünitesi ana elemanlarını reaktör koruma kabı içerisinde içerecek şekilde integral, modüler inşa özelliğine sahip, basınçlı hafif sulu 1000 MW_{th}, 335 MWe güce sahip bir reaktördür.

IRIS SMR'nin integral yapısı sayesinde reaktör basınç kabı (PV) içerisinde yer alan birincil döngüye 4 inç (10,16 cm) çaptan büyük herhangi bir boru bağlantısı bulunmamaktadır [4]. Birincil döngüde bağlantı çapının bu şekilde sınırlandırılması reaktörde büyük kırıklı soğutucu kaybı kazasının (LB-LOCA) gerçekleşmesi olasılığını ortadan kaldırmıştır.

IRIS SMR’de, rahatlama vanası (relief valve) arızalarından kaynaklanacak kazalar haricinde, küçük kırıklı soğutucu kaybı kazasına (SB-LOCA) sebep olabilecek iki bağlantı borusu bulunmaktadır. Bunlardan biri 4 inç çapa sahip olan ve pompa deşarj bölgesinde yer alan kimyasal hacim ve kontrol sistemi (CVCS) bağlantısı, diğeri ise 2 inç (5,08 cm) çapa sahip olan ve düşey iniş bölgesinde yer alan direkt basınç kabı enjeksiyon (direct vessel injection) bağlantısıdır [3].

Bu tezin amacı; IRIS küçük modüler reaktörünün korunu, soğutucu sistemleri ve güvenlik sistemlerini RELAP5/SCDAPSIM sistem kodu kullanarak modellemek ve reaktörde CVCS bağlantısında gerçekleşebilecek küçük kırık sonucu oluşan soğutucu kaybı kazası sırasındaki davranışı incelemektir.

1.3 Literatür Taraması

IRIS Küçük Modüler Reaktörü genel tanıtımı, reaktör bileşenleri, pasif güvenlik sistemleri hakkında bazı çalışmalar bulunmakla birlikte reaktörün geliştirilmesine ait teknik ilerleme final raporu da bulunmaktadır.

IRIS SMR teknik ilerleme final raporunda reaktörün kor tasarımı, birincil döngü integral tasarımı, pasif güvenlik sistemleri ve reaktör ana bileşenlerinin tercih nedenleri ile ilgili tasarıma ait bazı bilgiler bulunmaktadır[3].

Bajs vd. tarafından yapılan çalışmada soğutucu kaybı kazaları dışındaki geçiş durumları için RELAP5 Modeli [5] oluşturulmuş ve oluşturulan modelin doğrulanması için simülasyonun kararlı hal hesaplamaları tasarım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Grgić vd. tarafından yapılan çalışmada IRIS SMR’da gerçekleşebilecek kaza durumları için RELAP5/GOTHIC modeli [6] geliştirilmiştir. Bu çalışmada reaktör birincil döngü ve ikincil döngü bileşenleri RELAP5 kodu ile modellenmiş, koruma kabı ise GOTHIC kodu ile modellenmiştir.

Del Nevo vd. tarafından yapılan çalışmada IRIS SMR küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası RELAP5 ve MELCOR kodları ile incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre basınç kabı ve koruma kabı basınçları RELAP5 kodu ile 1820 saniyede, MELCOR Kodu ile 1120 saniyede eşitlenmiştir [4].

Khatry ve Aydoğan tarafından yapılan çalışmada, küçük modüler reaktörlerde gerçekleşebilecek tasarıma esas kaza olan küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası IRIS SMR için incelenmiştir[7]. Çalışma, oluşturulan modelin iyileştirilmesi gerektiğini göstermiştir.

1.4 Tezin Şeması

Bu tez dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde küçük modüler reaktörler, RELAP5/SCDAPSIM sistem kodu, tezin amacı, daha önce yapılmış benzer çalışmaların anlatıldığı literatür taraması ve tezin şeması gibi tez ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde IRIS SMR'nin tanıtımı yapılarak RELAP5/SCDAPSIM sistem kodu ile nasıl modellendiği anlatılmıştır. Üçüncü bölümde IRIS SMR için oluşturulan RELAP5/SCDAPSIM modelinin kararlı hal hesaplamaları ve gerçekleşebilecek küçük kırık sonucu oluşan soğutucu kaybı kazası sırasındaki davranışı incelenmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise sonuçlar ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

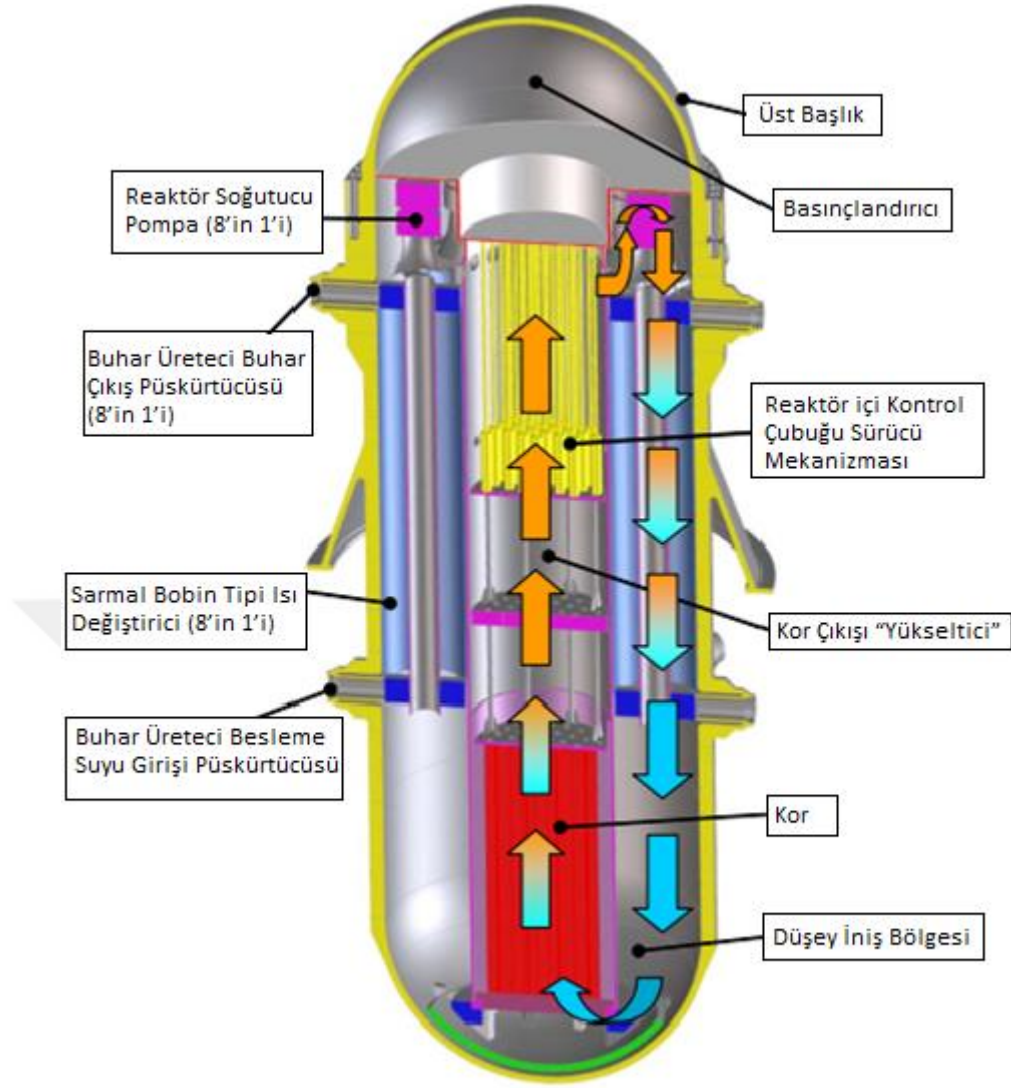
2. IRIS SMR TASARIMI VE RELAP5/SCDAPSİM MODELİ

Bu bölümde IRIS SMR'nin tasarım özellikleri tanıtılarak RELAP5/SCDAPSİM sistem kodu ile nasıl modellendiği anlatılmaktadır.

IRIS SMR integral yapısı ile kontrol çubukları sürücü mekanizmasını ve konvansiyonel basınçlı hafif sulu reaktörlerde borular ile reaktör kabına bağlı soğutucu pompalar, buhar üreteçleri, basınçlandırıcı gibi reaktör güç ünitesi ana elemanlarını basınç kabı içerisinde barındıran integral bir tasarıma sahiptir. IRIS SMR 1000 MWth, 335 MWe gücüne sahip orta enerjili bir reaktör olmasına rağmen, integral ve modüler yapısı sayesinde birçok çalışmada küçük modüler reaktör olarak sınıflandırılmıştır. IRIS SMR'nin tasarım özellikleri Çizelge 2-1'de, integral yapısı ise Şekil 2-1'de verilmiştir.

Çizelge 2-1 IRIS SMR Tasarım Özellikleri [8]

Reaktör Gücü	1000 MWth (335 MWe)
Reaktör Kor Giriş Sıcaklığı	292 °C
Reaktör Kor Çıkış Sıcaklığı	330 °C
Maksimum Yakıt Zenginlik Oranı	~5%
Yakıt değişim Aralığı	3,5 yıl
Reaktivite Kontrolü	Kontrol Çubukları, Borik Asit
Reaktör Çalışma Basıncı	15,513 MPa
Reaktör Soğutucu Pompa Sayısı	8
Buhar Üretici Sayısı	8
Nükleer Güvenlik Sistemi Tipi	Pasif



Şekil 2-1 IRIS SMR İntegral Tasarımı [9]

IRIS SMR'nin integral tasarımı hem birincil döngüdeki boruların kısa olması dolayısıyla tasarıma esas kaza olasılığının azaltılmasına hem de basınç kabının daha uzun tasarlanmasına ve haliyle reaktör içerisindeki doğal sirkülasyonun artmasına yardımcı olmuştur. IRIS integral tasarımında "Tasarım ile Güvenlik" (design by safety) yaklaşımı benimsenmiş ve bu şekilde bir integral reaktör tasarlanmıştır [9].

Tasarım ile Güvenlik Yaklaşımı benimsenerek reaktör güç ünitesi ana elemanlarının bu şekilde reaktör koruma kabı içerisine yerleştirilmesi güvenlik açısından birçok iyileştirmeye katkı sunmuştur. Bu iyileştirmeler Çizelge 2-2'de verilmiştir.

Çizelge 2-2 Tasarım İle Güvenlik Yaklaşımının Etkileri [3]

IRIS Karakteristiği	Tasarım	Nükleer Etkisi	Güvenliğe	Etkilenen Kaza
İntegral Yapı		Birincil döngüde uzun boruların bulunmaması		Büyük ve Küçük Kırıklı Soğutucu Kaybı kazası (LOCA)
Büyük ve Uzun Basınç Kabı		Arttırılmış su miktarı Arttırılmış doğal sirkülasyon Kontrol çubuğu sürücü mekanizmasına ev sahipliği yapması		- LOCA - Birincil döngüden ısı transferinin azalması - Pasif soğutmanın iyileştirilmesi - Kontrol Çubuğu Kümesi Fırlaması; kontrol çubuğunun başlıktan fırlamasının elimine edilmesi
Koruma Kabı İçinden Isının Çekilmesi		Kütle kaybı ile değil, yoğunlaşma ile birincil döngünün basınçsızlaştırılması Buhar Üreteci ve Acil Durum Isı Transferi Sistemi ile etkili ısı transferi		LOCA LOCA Etkili soğumaya ihtiyaç duyan bütün durumlar Reaktörün kapatılmadığı beklenen geçiş durumları
Küçültülmüş Boyutlar, Yüksek Koruma Kabı Tasarım Basıncı		Birincil döngüde oluşabilecek kırılmalarda daha düşük tahrik kuvveti		LOCA
Çoklu Soğutucu Pompalar		Tek pompa hatasının öneminin azaltılması		Rotor kilitlemesi, mil kırılması

Çizelge 2-3 Tasarım İle Güvenlik Yaklaşımının Etkileri [3] (Devam)

IRIS Karakteristiği	Tasarım	Nükleer Güvenliğe Etkisi	Etkilenen Kaza
Yüksek Tasarım Basıncına Sahip Buhar Üretcinin Bulunması	Buhar Üreteci Güvenlik Vanalarının olmaması Birincil Döngü ikincil Döngünün tasarımı aşacak şekilde aşırı basınçlanmasına neden olamaz Besleme/Buhar Sistemi Borularının Full Reaktör Soğutma Sistemi Basıncına göre tasarım edilmesi borularda gerçekleşebilecek hataların olasılığını azaltır	- Buhar Üreteci tüp kırılması - Buhar hattı kırılması - Besleme hattı kırılması	
Tek Geçişli Buhar Üreteci	Sınırlı Su Kütlesi	- Buhar hattı kırılması - Besleme hattı kırılması (sadece bu kaza potansiyel olarak negatif yönde etkilenmektedir.)	

2.1 Modelleme ile ilgili genel bilgiler

IRIS SMR RELAP5/SCDAPSIM Modeli için oluşturulan nodalizasyon oluşturulurken [3], [4] ve [8] referans numaralı makalelerde kullanılan nodalizasyonlardan yararlanılmıştır. Tasarıma ait mülkiyet hakkından dolayı bazı verilerde eksiklikler bulunduğundan bazı kabuller yapılarak modelleme yapılmıştır. Pompalar için yapılan kabuller 2.2.3 Reaktör Soğutucu Pompaları bölümünde,

pasif güvenlik sistemleri için yapılan kabuller ise 3.2.1 SB-LOCA Tanıtımı bölümünde verilmiştir.

Sistem tümüyle modellenmeden önce kor ve yakıt demetleri, buhar üreteçleri, pompalar ve basınçlandırıcı uygun sınır koşulları belirlenerek ayrı ayrı modellenmiştir. Daha sonra oluşturulan modelin bileşenleri tümüyle birleştirilip sistem modellenmesi incelenmiş ve basınçlandırıcı bağlı olduğu durumda sistemin dengeye ulaşmadığı görülmüştür. Bu problem ile ilgili ayrıntılar ve problemin çözümünde uygulanan metot basınçlandırıcı bölümünde anlatılmıştır.

Birincil ve ikincil döngü için oluşturulan nodalizasyon Şekil 2-2 ve Şekil 2-3'te, koruma kabı, otomatik basınçsızlaştırma sistemi, basınç baskılama havuzu, acil durum boronlama sistemi ve yerçekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemi için oluşturulan nodalizasyon Şekil 2-4'te, acil durum ısı çekme sistemi (EHRS) için oluşturulan nodalizasyon ise Şekil 2-5 verilmiştir. Şekillerde bulunan numaraların hangi bileşene ait olduğu ise Çizelge 2-4'te verilmiştir.

Reaktör soğutma sistemi, RELAP5/SCDAPSIM Hidrodinamik Bileşenleri [10] kullanılarak modellenmiştir. Isı transferinin olduğu ve güç üretiminin olduğu bölgelerde ilgili hidrodinamik bileşenlere ait RELAP5/SCDAPSIM Isı Yapı Bileşenleri [10] kullanılmıştır.

Birincil döngüde bulunan temel bileşenlere ait modelleme ilgili bileşenin tanıtımı sırasında detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Küçük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası analizi sırasındaki sistem davranışları incelenirken ikincil döngüde bulunan bütün bileşenlere (türbin, kondenser, besleme suyu pompası vb.) ihtiyaç duyulmadığından, ikincil döngü tamamen modellenmemiş besleme suyu girişi ve buhar çıkışı için sınır koşulları belirlenmiştir. Besleme suyu sınır koşulu modellenirken zamana bağlı hacim elemanı ve bağlantı elemanı kullanılmıştır. Zamana bağlı hacim elemanı basınç ve sıcaklık sınır koşullarını, zamana bağlı bağlantı elemanı ise kütle akış hızının belirlenmesine yardımcı olmuştur. Buhar çıkış hattı sınır koşulu belirlenirken de zamana bağlı hacim elemanı kullanılmıştır.

Pasif güvenlik sistemlerine ait modelleme ilgili bölümde anlatılmıştır.

Çizelge 2-4 RELAP5/SCDAPSIM Model Tanıtımı

Bileşen	Model No.	Şekil No.
Düşey İniş Bölgesi	101	2-3
Alt Plenum	104	2-3
Kor Giriş Hacmi	106	2-3
Kor ve Yakıt Demetleri	110	2-3
Bypass	115	2.3
Kor Çıkış Hacmi	120	2.3
Alt Yükseltici	121	2.3
Üst Yükseltici	123	2.3
Basınçlandırıcı	130	2.3
Pompalar	191 → 198	2.3
Buhar Üretici Birincil Döngü	211	2.3
Besleme Suyu Sınır Modeli	356	2.3
Besleme Suyu Boruları	304, 305, 306, 307, 251	2.3
Besleme Suyu Başlığı	261	2.3
Buhar Üretici İkincil Döngü	271	2.3
Buhar Hattı Başlığı	281	2.3
Buhar Hattı Boruları	291, 350, 352, 353, 354	2.3
Buhar Hattı İzolasyon Vanası	355	2.3
Buhar Hattı Sınır Modeli	358	2.3
Otomatik Basınçsızlaştırma Sistemi	682, 684	2.4
Basınç Baskılama Havuzu	829, 830	2.4
Basınç Baskılama Sistemi Hava Tankı	850	2.4
Basınç Baskılama Havuzu ve Hava Tankı arasındaki boru	849	2.4
Hava Tahliye Borusu	821	2.4
Reaktör Boşluğu (Cavity)	800, 890	2.4
Koruma Kabı Kuyusu (Drywell)	815, 810	2.4
Acil Durum Isı Çekme Sistemi Devreye Alma Vanası	357	2.5

Çizelge 2-5 RELAP5/SCDAPSIM Model Tanıtımı (Devam)

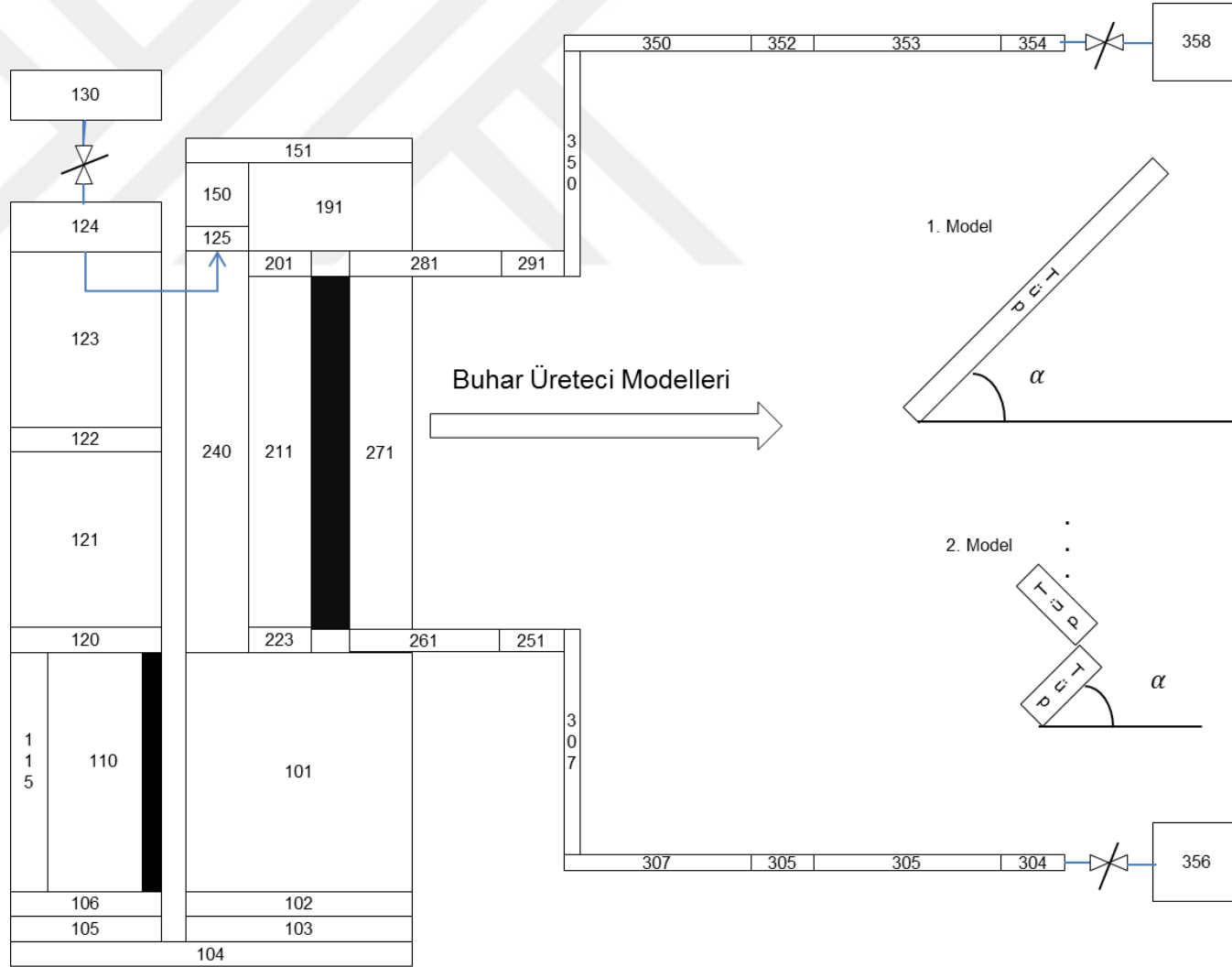
Bileşen	Model No.	Şekil No.
Acil Durum Isı Çekme Sistemi	501 → 511	2.5
Yeni Yakıt Yükleme Su Depolama Tankı	590	2.5
Bor Tankı	610	2.5
Yerçekimi İle Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi	645, 655	2.5
Küçük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası Vanası	804	2.4

2.2 İntegral Reaktör Soğutma Sistemi

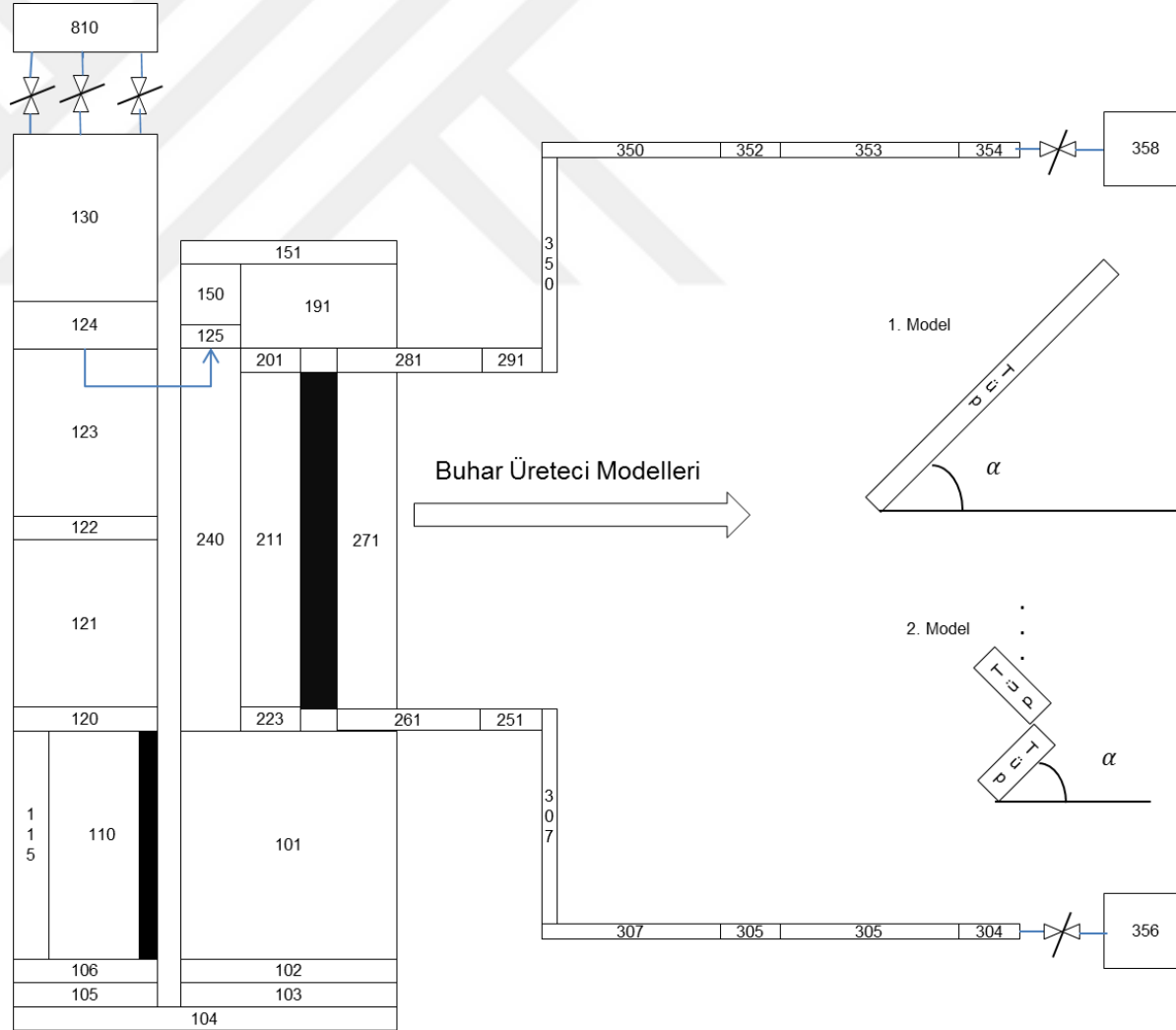
Reaktör Soğutma Sistemini içeren IRIS integral yapısı Şekil 2-1’de verilmiştir. IRIS SMR’nin konvansiyonel reaktörlerden en önemli farkı soğutma sistemi ana elemanlarından buhar üreteçleri, ana soğutma pompası ve basınçlandırıcının reaktör basınç kabı içerisinde yer alması ve reaktör basınç kabı, birincil döngü içerisine 4 inçten (10,16 cm) büyük borunun giriş ve çıkışının bulunmamasıdır.

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

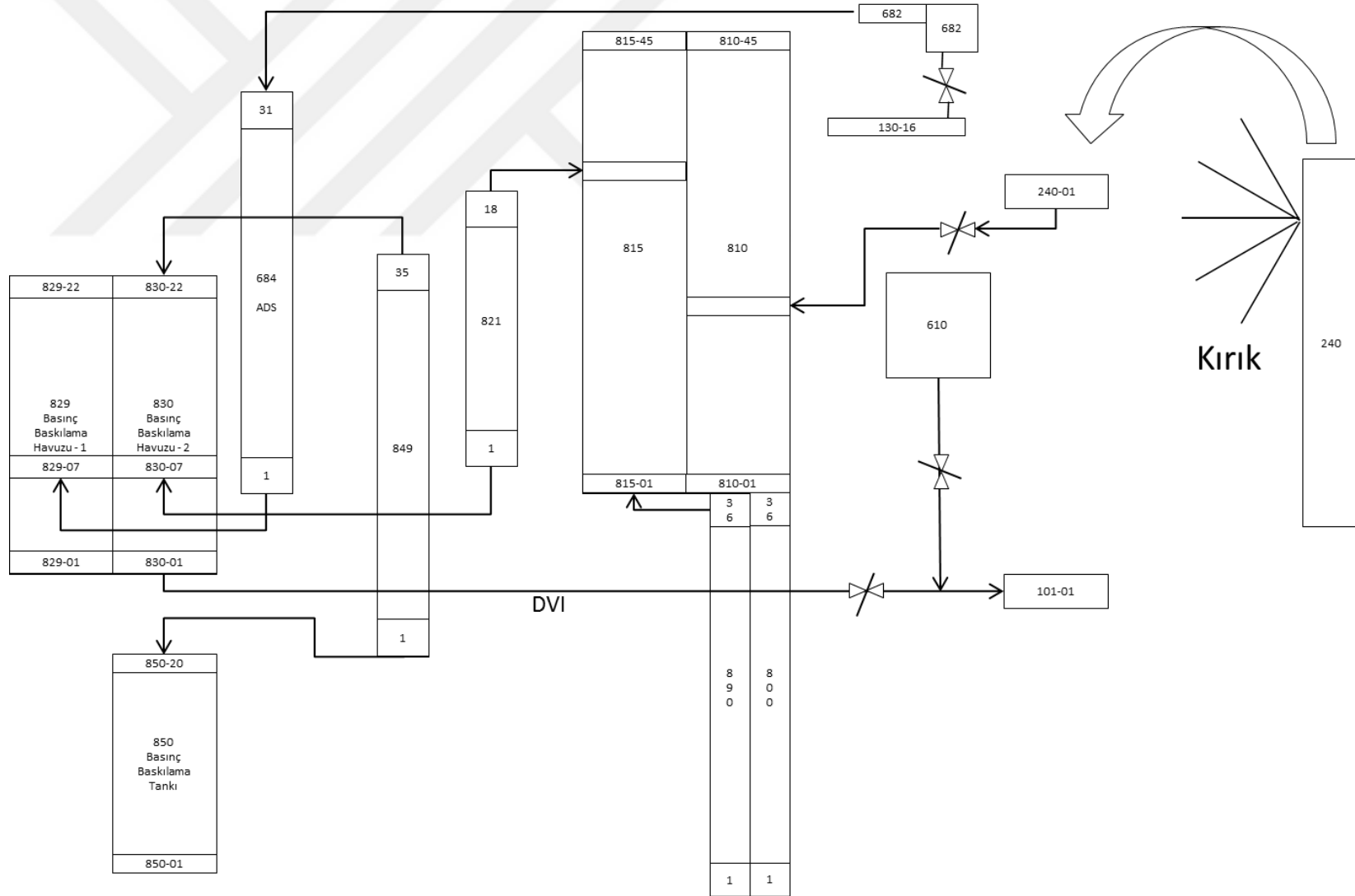
Reaktör soğutma sistemi, RELAP5/SCDAPSIM Hidrodinamik Bileşenleri kullanılarak modellenmiştir. Isı transferinin olduğu ve güç üretiminin olduğu bölgelerde ilgili hidrodinamik bileşenlere ait Isı Yapı Bileşenleri kullanılmıştır. Reaktör soğutma sistemi bileşenlerine ait modeller ilgili bileşenin tanıtımı sırasında anlatılmıştır.



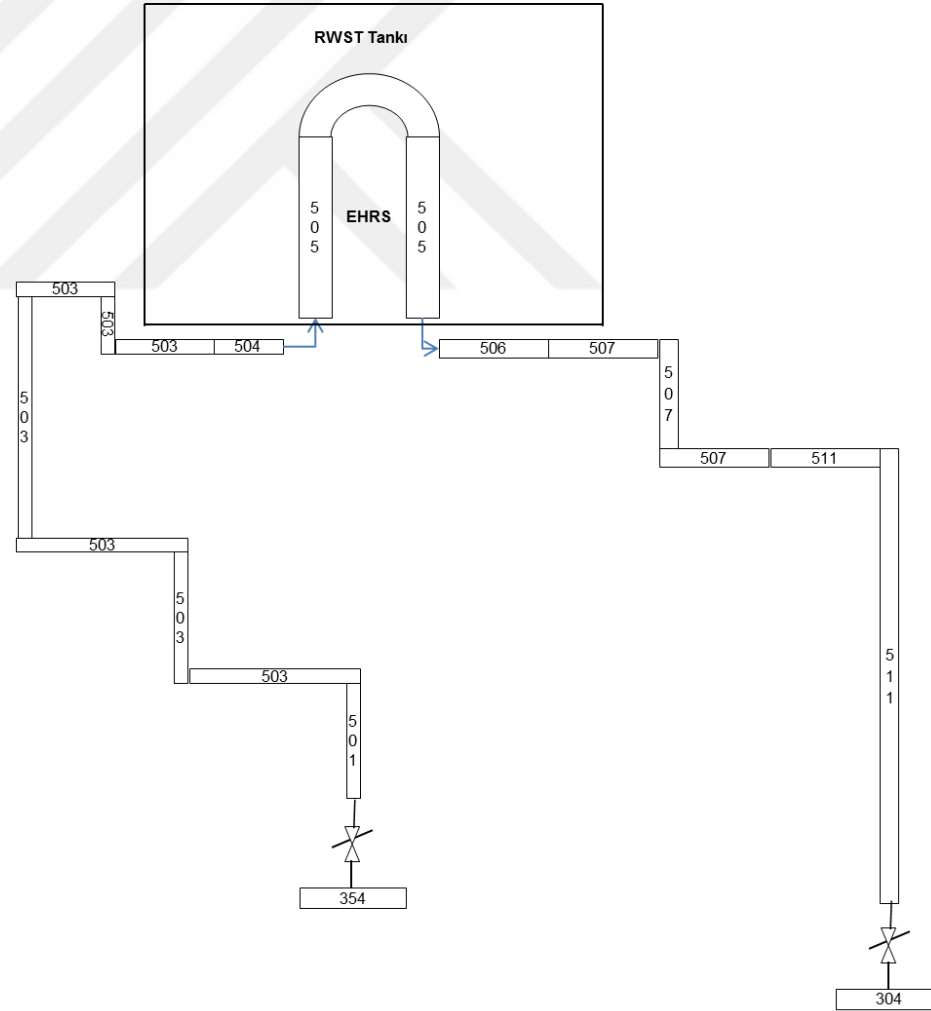
Şekil 2-2 RELAP5/SCDAPSIM Birincil Döngü Nodalizasyonu (Basınçlandırıcı Hariç)



Şekil 2-3 Birincil Döngü ve İkincil Döngü Nodalizasyonu



Şekil 2-4 Koruma Kabı ve Otomatik Basıncısızlaştırma Sistemi Nodalizasyonu



Şekil 2-5 Acil Durum Isı Çekme Sistemi Nodalizasyonu

2.2.1 IRIS SMR Basınç Kabı (PV)

Karbon çelikten üretilen IRIS SMR basınç kabı bünyesinde reaktör güç ünitesi elemanlarını ve kontrol çubuğu sürücü mekanizmasını barındırdığından uzun bir tasarıma sahiptir (Bakınız Şekil 2-1). Basınç kabı bünyesinde kor, kor varili, yakıt demetleri, kor destek yapıları, kontrol çubukları ve kontrol çubuğu sürücü mekanizması, paslanmaz çelik yansıtıcı, 8 tane soğutucu pompa ve desteği, 8 tane buhar üretici ve desteği ve basınçlandırıcı bulunmaktadır. Basınç kabı tasarım özelliklerine ait veriler Çizelge 2-6’te verilmiştir.

Çizelge 2-6 Reaktör Basınç Kabı Özellikleri [2]

Parametre	Değer
Uzunluk	22,21 m
İç Çap	6,2 m
Cidar	280 mm
Minimum Zarf kalınlığı	6 mm
Tasarım Basıncı	17,24 MPa
Malzeme	Karbon Çelik, SA 508, GR.3, Cl,2
Zarf Malzemesi	SS

2.2.2 Reaktör Kuru ve Yakıt Demeti

IRIS SMR’de Wethinghouse 17x17 XL Robust Yakıt Demeti ve AP1000 yakıt demeti benzeri bir tasarım bulunmaktadır [3]. IRIS SMR’de 89 adet yakıt demeti ve her yakıt demetinde 0,374 inç (0,9525 cm) çapa sahip 264 adet yakıt çubuğu bulunmaktadır. Kor paslanmaz çelikten üretilen yansıtıcı ile çevrilidir. Korda bulunan bu yansıtıcının görevi reaktör üzerindeki nötron akısını azaltarak basınç kabının ömrünü uzatmak ve nötron ekonomisine katkıda bulunmaktır.

Kor ve Yakıt Demeti RELAP5/SCDAPSIM Modeli

Kor bölgesi nodalizasyonda iki bölgeye ayrılmıştır. Bypass bölgesi 115 nolu kartta, aktif kor bölgesi ise 110 nolu kartta RELAP5/SCDAPSIM PIPE bileşeni ile modellenmiştir. Aktif kor bölgesi 24 adet hacim elemanına bölünmüş ve bu hacim elemanları PIPE bileşeni içerisinde bulunan iç bağlantı elemanları (internal junction) ile birbirlerine bağlanmıştır. Bu iç bağlantı elemanları sayesinde yakıt

demetleri içinde bulunan ayraçlardan kaynaklanan basınç düşümleri modellenmiştir. Aktif kor bölgesinde yakıt demetleri RELAP5/SCDAPSİM Isı Yapı bileşenleri kullanılarak modellenmiştir.

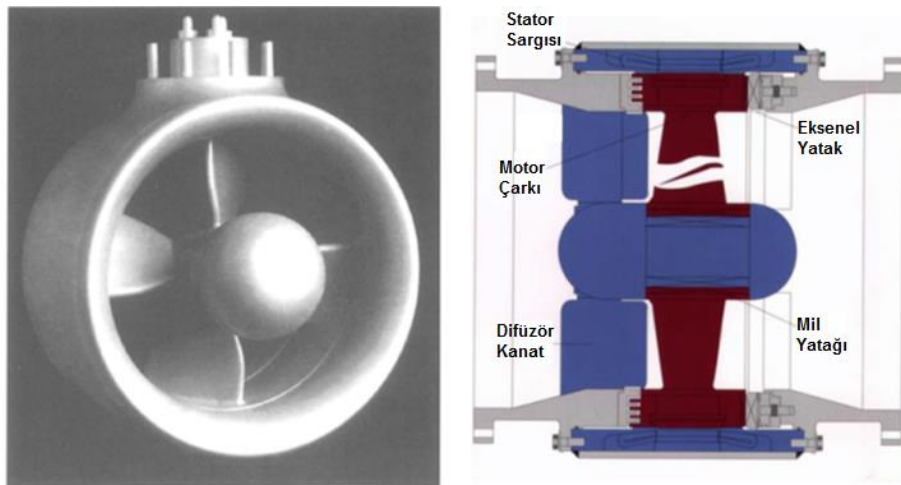
Reaktörde kullanılan yansıtıcı malzemenin aşırı ısınması engellemek için bulunan soğutucu kanallar, yansıtıcı tasarımına ait bilgiler olmadığından modellenmemiştir. Bu hesaplamaların daha konservatif olmasına sebep olmuştur.

Reaktörde gerçekleşebilecek beklenmedik durumlarda veya kazalarda reaktör bileşenlerinin devreye girmesi (reaktörün kapanması, güvenlik sistemlerinin devreye girmesi vb.), modeldeki TRIP kartları kullanılarak tanımlanmıştır.

2.2.3 Reaktör Soğutucu Pompaları

IRIS SMR'de basınç kabının üst kısmında, buhar üreteçlerinin üstünde yer alan 8 adet Makaralı Tip (Spool Type) düşey ana soğutucu pompa bulunmaktadır. Bu tür pompalar daha çok yüksek basınca ve düşük basma yüksekliğine ihtiyaç duyan deniz teknolojilerinde kullanılmaktadır [11]. IRIS SMR'de bu tür bir pompa seçilmesinde pompanın basınç kabı içinde yer alması ve herhangi bir basınç kabına ihtiyaç duymaması ve basınç kabı dışına en az şekilde bağlantıya ihtiyaç duyacak olması gibi nedenler göz önünde bulundurulmuştur.

Reaktörde kullanılan makaralı tip pompada Şekil 2-6'de görüldüğü gibi iki ortak merkezli silindir bulunmaktadır. İçteki silindir halkasında pompa çarkı bulunan rotor, dıştaki silindir halkasında ise stator bulunmaktadır. Pompa yapısında şaft bulunmadığından şaft kırılması kazası elimine edilmiştir.



Şekil 2-6 Makaralı Tip (Spool Type) Pompa

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

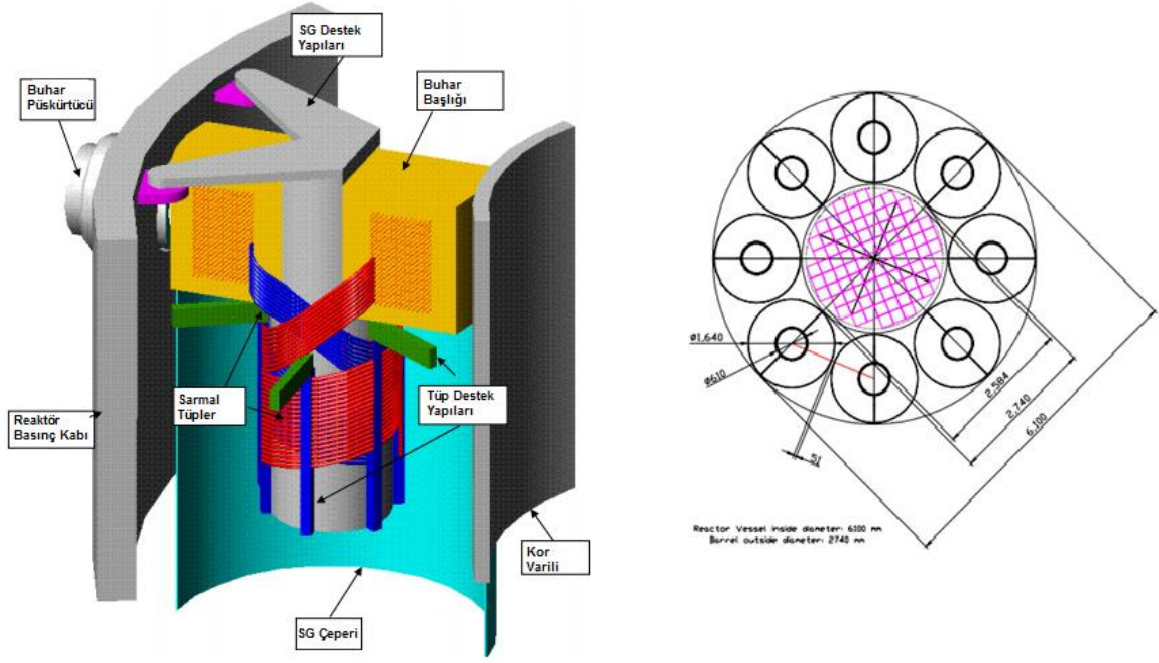
Ana soğutucu pompalar RELAP5/SCDAPSIM PUMP (pompa) bileşeni kullanılarak modellenmiştir. Pompa ile ilgili detaylı veri bulunmadığından, hesaplamalarda Westinghouse Tek Fazlı pompa modeli kullanılmıştır.

2.2.4 Buhar Üreteçleri

IRIS SMR'de basınç kabı ile kor varili arasında konumlanan 8 adet sarmal tip tek geçişli buhar üretici bulunmaktadır. Buhar üreteçlerinde bulunan tüplerin dışından birincil döngü akışı, tüplerin içinden ise ikincil döngü akışı sağlanmaktadır. Buhar üreticinin özellikleri Çizelge 2-7'te, buhar üretici ve bunların yerleşim planı Şekil 2-7'de verilmiştir.

Çizelge 2-7 IRIS SMR Buhar Üreticinin Özellikleri

Güç	125 MW
Tüp dış çapı	17,46 mm
Tüp kalınlığı	2,11 mm
Tüp iç çapı	13,24 mm
Tüp sayısı	656
Demet ortalama uzunluk	32 m
Buhar Üretici toplam uzunluğu	8,5 m
Birincil Döngü Giriş sıcaklığı	328,4°C
Birincil Döngü Çıkış sıcaklığı	292°C
Besleme Suyu sıcaklığı	223.9°C
Buhar sıcaklığı	317°C
Birincil Döngü basıncı	15.5 MPa
Buhar Çıkış basıncı	5,8 MPa
Birincil döngü akışı	589 kg/s
İkincil Döngü akışı	62,5 kg/s



Şekil 2-7 Buhar Üretici Kesiti ve Buhar Üretici Yerleşim Planları

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

Bu tasarımda kullanılan 8 buhar üretici tek bir buhar üretici olarak modellenmiştir. Buhar üreticinin birincil döngüsü PIPE bileşeni ile 25 hacim elemanı içerecek şekilde modellenmiştir. Buhar üretici tüp kısmı ise PIPE bileşeni, besleme suyu besleme başlığı ve buhar hattı buhar başlığı ise tek hacim (SINGLE VOLUME) bileşeni ile modellenmiştir.

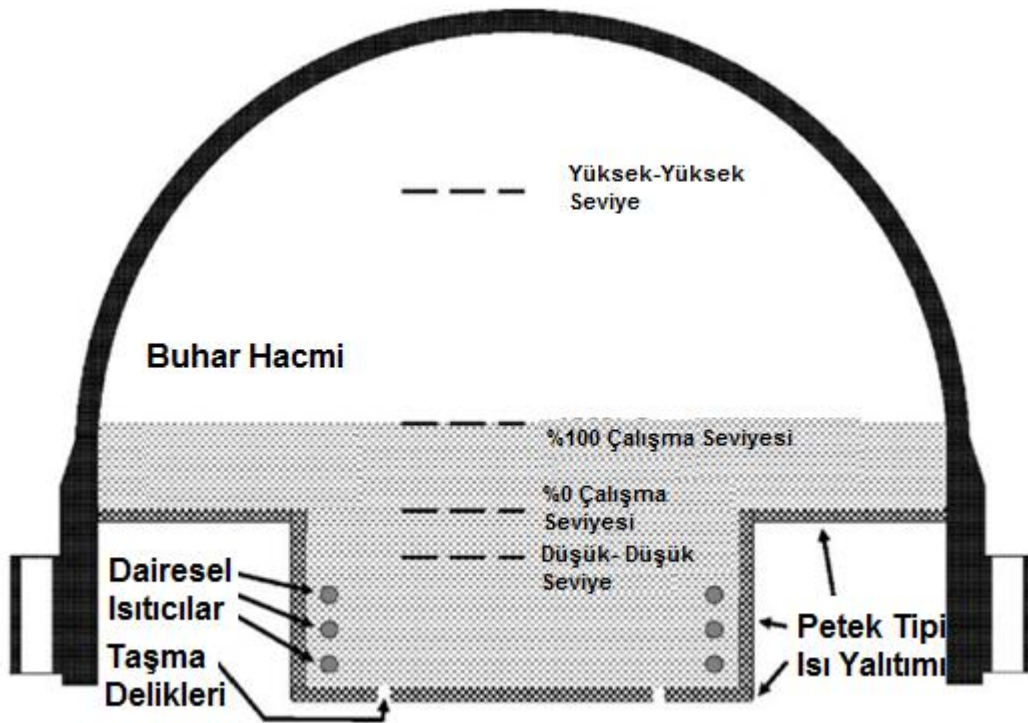
Buhar üreticinin tüp kısmı modellenirken iki model uygulanmıştır. Birinci modelde Şekil 2-3'te verildiği gibi bir tüpün yatay eksen ile yaptığı açı hesaplanıp boru (PIPE) bileşenine tanımlanarak, açı eğimine sahip 656 tüp tek bir tüp olacak şekilde modellenmiştir. İkinci modelde ise 3,5, ... 23, 25 numaralı hacim elemanları yatayla α açısına sahip iken, 2,4, ... 22, 24 numaralı hacim elemanları $180-\alpha$ açısına sahip olacak şekilde 656 tüp tek bir tüp olarak modellenmiştir. Her iki modelde de elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynıdır.

Her iki modelde de ikincil döngüde PIPE bileşeni kullanılarak 656 tüp tek bir tüp modellenmiştir. Birincil döngü ve ikincil döngü arasında bulunan ısı transferi hesabı için ise 8 buhar üreticinde bulunan 32 metre uzunluğu sahip 656 tüpün toplam uzunluğu hesaplanarak Isı Yapı Bileşeni kartına işlenmiştir.

2.2.5 Basınçlandırıcı

IRIS SMR’de basınçlandırıcı basınç kabı içinde kabın üst başlık bölümünde yer almaktadır. İçinde doymuş su ve doymuş buhar bulunan basınçlandırıcının görevi sistem basıncını çalışma basıncında sabit tutmak ve reaktörde gerçekleşebilecek geçiş durumlarında birincil döngüye taşma hacmi sağlamaktır. IRIS SMR’da kullanılan basınçlandırıcı Şekil 2-8’de verilmiştir.

IRIS SMR’de kullanılan basınçlandırıcının hacmi 49 m^3 ’ü buhar hacmi olmak üzere 71 m^3 ’tür ve basınçlandırıcı buhar hacmi termal gücü IRIS SMR’nin 3 katı olan AP1000’de kullanılan basınçlandırıcının buhar hacminin 1,6 katına eşittir [8].



Şekil 2-8 IRIS SMR Basınçlandırıcı Kesiti [3]

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

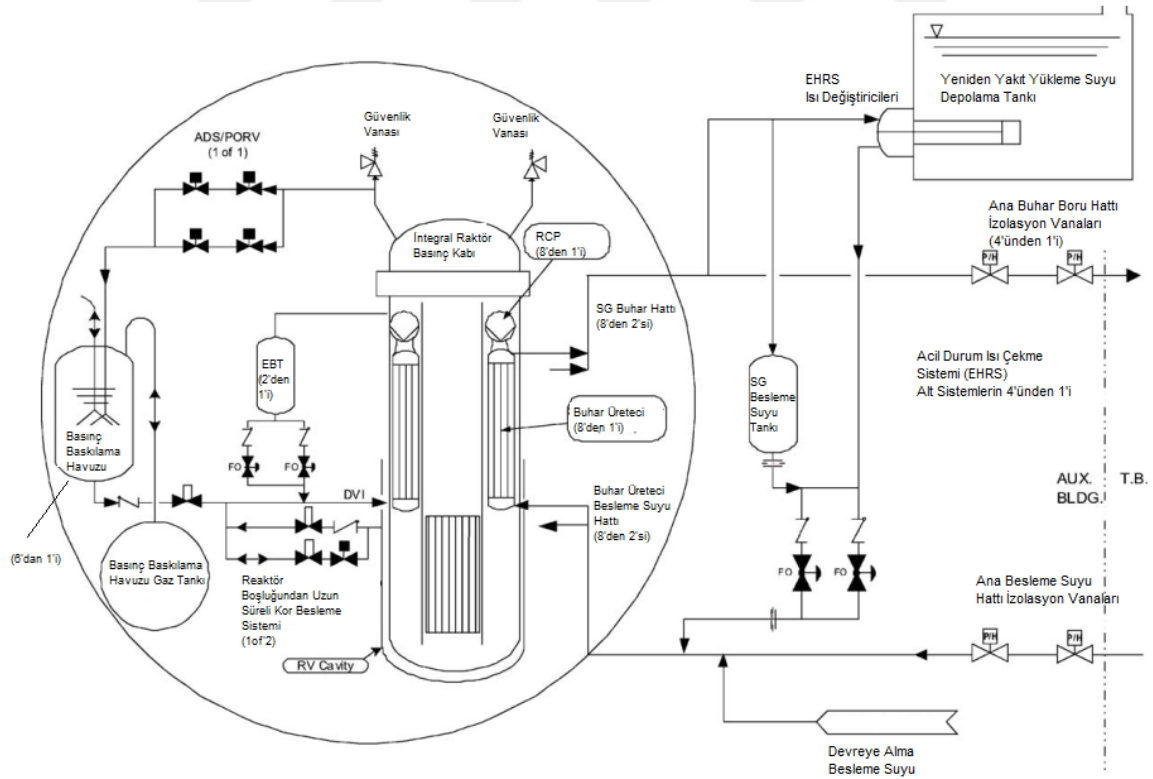
IRIS SMR modellenirken reaktör birincil ve ikincil döngü bileşenleri tümüyle modellenip modeller birleştirildikten sonra sistemin incelenmesi sırasında sistemin dengeye ulaşmadığı görülmüştür. Bu problem karşısında sisteme ilk etapta basınçlandırıcı yerine zamana bağlı hacim elemanı bir kontrol vanasıyla eklenmiştir. Zamana bağlı hacim elemanı (130) ile basınçlandırıcı sistem çalışma

sınır koşulları belirlenmiş, kontrol vanasıyla (426) ile de sistem basıncı üzerine çıkıldığında vananın açılması ile bu hacim elemanına taşma sağlanmıştır.

Model için hazırlanan girdi dosyası bu şekilde hazırlanmış ve RELAP5/SCDAPSIM ile 2500 saniye koşulmuş ve 1000 saniye mertebesinde sistemin dengeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde program tarafından oluşturulan yeniden başlatma “.r” (restart) dosyasının kullanıldığı ikinci bir girdi dosyası hazırlanmış ve bu dosyada 426 numaralı vana kapatılmış ve zamana bağlı hacim elemanı yerine boru (PIPE) bileşeni ile 130 model numaralı basınçlandırıcı entegre edilmiştir. Birincil ve ikincil döngü bileşenleri modellendikten sonra sistem modeli incelendiğinde sistemin dengeye ulaştığı gözlemlenmiştir.

2.3 Pasif Nükleer Güvenlik Sistemleri

IRIS SMR pasif nükleer güvenlik sistemleri acil durum ısı çekme sistemi (EHRS), otomatik basınçsızlaştırma sistemi, koruma kabı basınç düşürme sistemi, koruma kabı soğutma sistemi, acil durum boronlama sistemi ve yerçekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sisteminden (LGMS) oluşmaktadır.



Şekil 2-9 IRIS SMR Pasif Güvenlik Sistemleri [3]

2.3.1 Pasif Acil Durum Isı Çekme Sistemi (EHRS)

Acil durum ısı çekme sistemi, reaktörde gerçekleşebilecek olay ve kaza durumlarında reaktörün kapatılmasını takriben devreye giren pasif soğutma sağlayan ve birincil döngünün basıncını soğutucu kaybı olmaksızın düşüren bir sistemdir. EHRS sistemi reaktörün ikincil döngüsünde yer alan besleme suyu boruları ile buhar boru hattına vanalarla bağlıdır. Reaktörün kapatılmasını takiben EHRS vanaları açılarak devreye girer ve ana besleme suyu vanası (MFIV) ve ana buhar hattı vanası (MSIV) kapatılır. EHRS'nin devreye girmesiyle ikincil döngü EHRS döngüsü olur.

EHRS sisteminin soğutulması reaktör atık su tankından (RWST) bir adet U-Tipi ısı değiştirici ile sağlanır.

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

EHRS, 510 numaralı PIPE bileşeniyle, RWST ise 590 numaralı PIPE bileşeni ile modellenmiştir. Bu iki bileşen arasındaki ısı transferini tanımlamak için ısı yapı (HEAT STRUCTURE) bileşenleri tanımlanmıştır. EHRS ile ilgili detaylı veri bulunmadığından boru çapları ve malzemesi buhar üretici ile aynı alınmış ve EHRS'de toplam tüp uzunluğu 3000 metre olarak kabul edilmiştir.

2.3.2 ADS ve Koruma Kabı Basınç Düşürme Sistemi

Basınçlandırıcıya bir vana ile bağlı olan Otomatik Basıncsızlaştırma Sistemi (ADS) reaktör basıncının belirli bir seviyenin altına düşmesiyle devreye girer ve reaktördeki buharın basınç baskılama havuzuna tahliyesini sağlayıp EHRS'ye sistem basıncını düşürmede yardımcı olur. Bu şekilde reaktör basıncının koruma kabı basıncına eşitlenmesine, basınç koruma kabı basıncının tasarım değeri altında kalmasına ve dolayısıyla reaktör basınç kabı içerisindeki su kütlesinin koruma kabı içerisine akışını azaltmaya yardımcı olur.

Koruma kabı basınç düşürme sistemi ise 6 tane basınç baskılama havuzundan ve bunların gaz tanklarından oluşur. Basınç baskılama havuzları kordan yüksek bir konumda bulunmaktadır. Bu şekilde bir konumlandırma sayesinde gerçekleşebilecek küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası sırasında, koruma kabı ve basınç kabı basınçlarının eşitlenmesi sonrasında yerçekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemine su sağlar.

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

RELAP5/SCDAPSIM boru bileşeni (PIPE) ile modellenen ADS, basınçlandırıcıya normal çalışma şartlarında kapalı olan bir vana bileşeni (VALVE) ile bağlanmıştır. Sistem basıncı belirli bir seviyenin altına düştüğü zaman vana açılır (TRIP kartları ile tanımlanmıştır) ve ADS devreye girer. ADS koruma kabı içinde yer alan basınç baskılama havuzunu bağlanmıştır.

Reaktörde bulunan basınç baskılama havuzu 2 tane RELAP5/SCDAPSIM boru bileşeni (PIPE) ile modellenmiştir. Basınç baskılama havuzunun basıncı koruma kabı basıncına eşit olarak alınmıştır.

2.3.3 Acil Durum Boronlama Sistemi (EBS)

Acil Durum Boronlama Sistemi, kontrol çubukları ile reaktörün kapatılmasına alternatif olarak beklenen geçiş durumlarında ve kaza durumlarında birincil döngüye direkt basınç kabı enjeksiyon borusu ile bor enjekte ederek reaktivitenin kontrol edilmesine yardımcı olur.

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

EBS, RELAP5/SCDAPSIM boru (PIPE) bileşeni ile modellenmiş ve direkt basınç kabı enjeksiyon hattına (DVI) normal çalışma şartlarında kapalı olan bir vana ile bağlanmıştır. Sistem basıncı belirli bir değerin altına düştüğünde vana açılır ve DVI ile düşey iniş bölgesine borlu su akışı sağlanır.

2.3.4 Yerçekimi İle Çalışan Uzun Süreli Soğutma Sistemi (LGMS)

Yer çekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemi (LGMS) basınç kabı ve koruma kabı arasındaki basınç farkının 13,79 kPa'ın altına düşmesiyle devreye girerek basınç baskılama havuzunda bulunan suyun direkt basınç kabı enjeksiyon hattı (DVI) ile korun soğutulmasında kullanılmasını sağlar.

RELAP5/SCDAPSIM Modeli

LGMS, RELAP5/SCDAPSIM (PIPE) bileşeni ile modellenmiş ve direkt basınç kabı enjeksiyon hattına (DVI) ve basınç baskılama havuzuna normal çalışma şartlarında kapalı olan vana bileşenleri (VALVE) ile bağlanmıştır. Basınç kabı ve koruma kabı arasındaki basınç farkı belirlenen değerin altına düştüğünde vanalar

açılır ve basınç baskılama havuzundan DVI ile düşey iniş bölgesine akışı sağlanarak korun soğutulması sağlanır.

2.3.5 IRIS SMR Güvenlik Sistemlerinin Devreye Girme Koşulları

IRIS SMR’de gerçekleşebilecek geçiş ve kaza durumlarında güvenlik sistemlerinin devreye girmeye koşulları Çizelge 2-8’da verilmiştir.

Çizelge 2-8 IRIS SMR Güvenlik Sistemleri Devreye Girme Koşulları [12]

	Sinyal	Ayar Değeri
S — Sinyali	Basınçlandırıcı Düşük Basıncı Buhar Hattı Düşük Basıncı Yüksek Koruma Kabı Basıncı	12,754 MPa 2,757 Mpa 138 kPa
Acil Soğutma Sisteminin devreye girmesi	Koruma Kabında Yüksek Basınç ve Reaktörün Kapatılması	138 KPa
Kor Boronlama Sisteminin devreye girmesi	Yüksek Koruma Kabı Basıncı + Basınçlandırıcı Yüksek ve Düşük Basıncı	138 kPa 12,753 MPa ve 16,959 MPa
Basınç rahatlatma sisteminin devreye girmesi	Koruma Kabı Yüksek Basıncı + Basınçlandırıcı	138 kPa + 12,754 MPa
Yerçekimi odaklı uzun süreli soğutma sisteminin devreye girmesi	Koruma Kabı ve Reaktör Basınç Kabı Arasında Düşük Basınç Farkı	13,79 kPa

3 IRIS SMR RELAP5/SCDAPSIM MODELİ SONUÇLARI

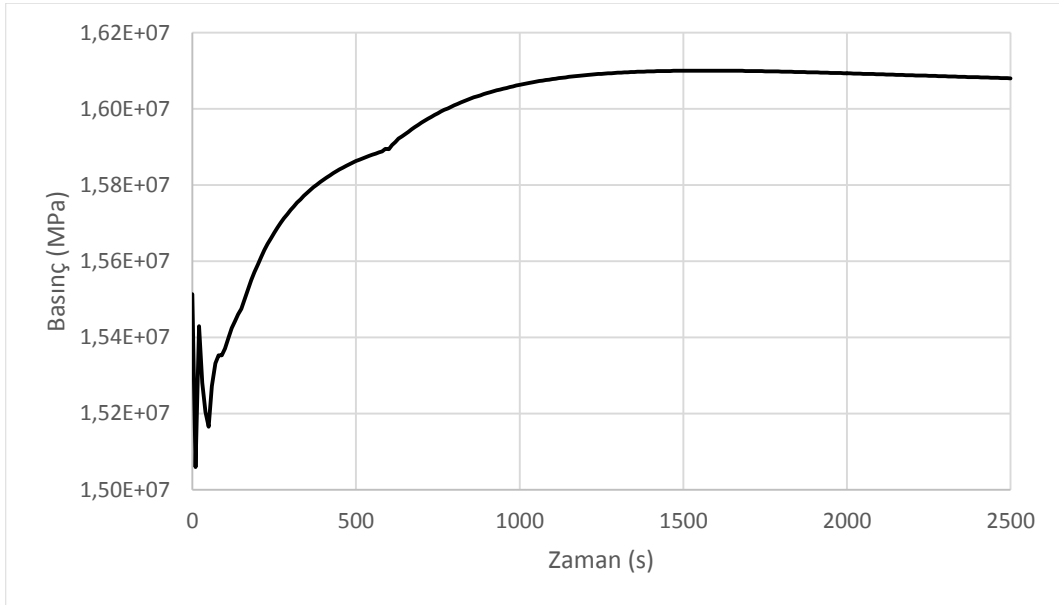
3.1 IRIS SMR RELAP Modeli Kararlı Hal Hesaplamaları

3.1.1 Buhar Üretici Modelleri

IRIS SMR buhar üretici modellenirken iki farklı model için girdi dosyası hazırlanmıştır. Modelde buhar üreticinin birincil döngüde yer alan bölümü modeli aynı iken buhar üreticinin ikincil döngüde yer alan sarmal tüplerden oluşan kısmı için iki farklı model oluşturulmuştur. Modeller Şekil 2-3'de Birincil ve İkincil Döngü RELAP5/SCDAPSIM nodalizasyonunda verilmiştir. Birinci modelde yatay eksen ile belirli bir açı yapan bir tüp nodalizasyonu belirlenmiş, ikinci modelde ise sarmal tüpün tek boyutta görünümü temel alınarak nodalizasyon belirlenmiştir. Her iki modelde de elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynıdır.

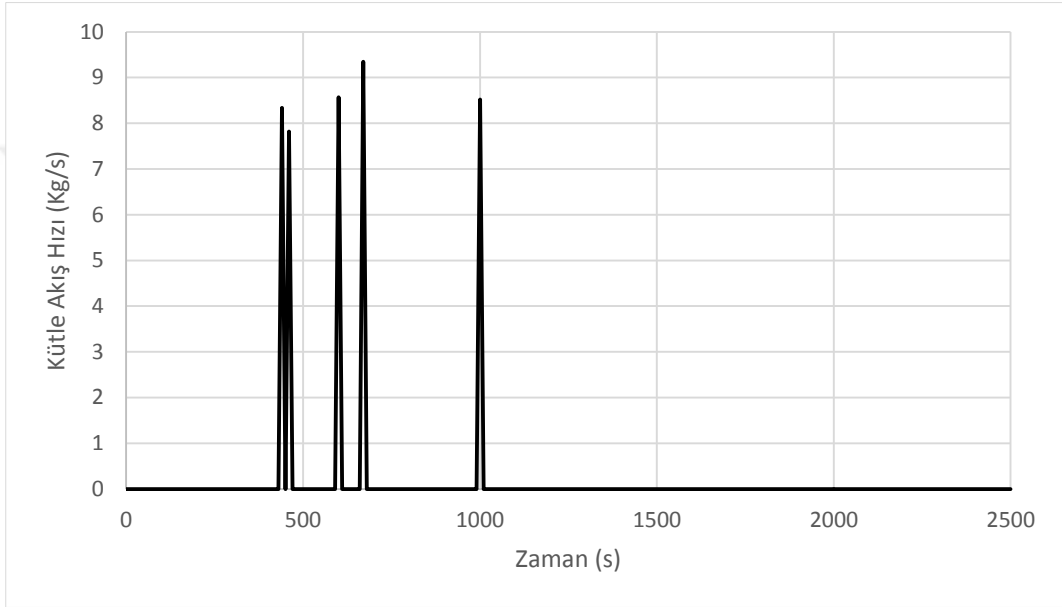
3.1.2 Basınç Hatası ve Çözümü

IRIS SMR modellenirken reaktör birincil ve ikincil döngü bileşenleri tümüyle modellenip modeller birleştirildikten sonra sistemin incelenmesi sırasında sistemin dengeye ulaşmadığı görülmüştür. Basınç reaktör çalışma basıncının üstüne çıkmıştır. Bu durum Şekil 3-1'de verilmiştir.

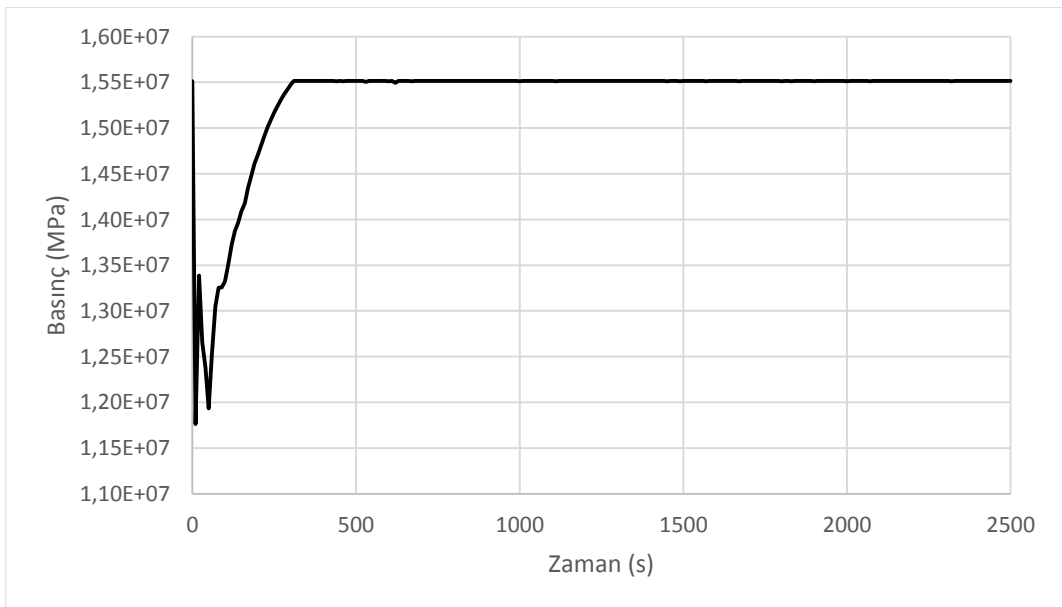


Şekil 3-1 Basınçlandırıcı Basıncı

Bu sorunun çözümü için basınçlandırıcı yerine zamana bağlı bir hacim elemanı, basınç kontrollü bir vana ile yükselticiye bağlanmıştır. Vanadan akış kesildiği zaman hesaplanan ve 1250. saniyede oluşturulan veriler, yeniden başlatma dosyasında (restart) kullanılarak, zamana bağlı hacim elemanı yerine basınçlandırıcı bu vanadaki akış kesilerek bağlanmıştır. Şekil 3-2’de kullanılan basınç kontrollü vanadaki akış hızı verilmiştir. Vanadaki akış yaklaşık 1000 saniye civarında kesilmiştir. Vananın kullanılmasıyla birlikte basınçlandırıcı basıncı kararlı hale gelmiştir. Bu durum ile ilgili grafik Şekil 3-3’de verilmiştir.



Şekil 3-2 Basınç Kontrollü Vana Akışı



Şekil 3-3 Basınçlandırıcı Basıncı

3.1.3 Kararlı Hal (Steady State) Hesaplamaları

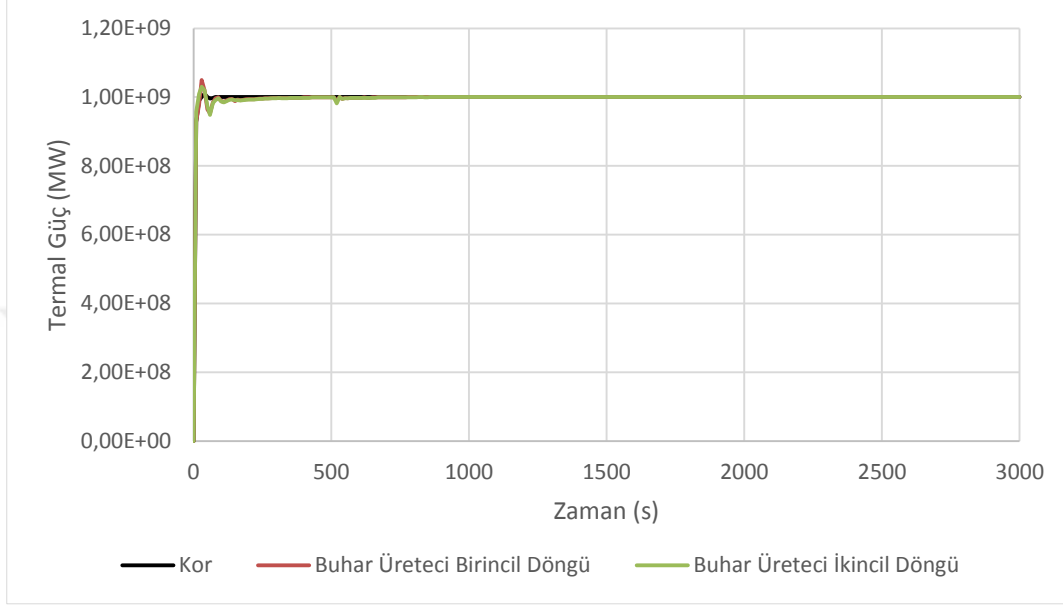
Basınçlandırıcı kaynaklı problemin çözümü sonrasında Şekil 2-3'te verilen nodalizasyon kullanılarak modelleme yapılmıştır. Sistemin kararlı hale geldiğini görmek için RELAP5/SCDAPSIM kodu 3000 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Elde edilen reaktörün kararlı hale geldiği durumdaki sonuçlar Çizelge 3-1'de verilmiştir.

Çizelge 3-1 Kararlı Hal Hesaplaması Sonuçları ve Tasarım Değerleri

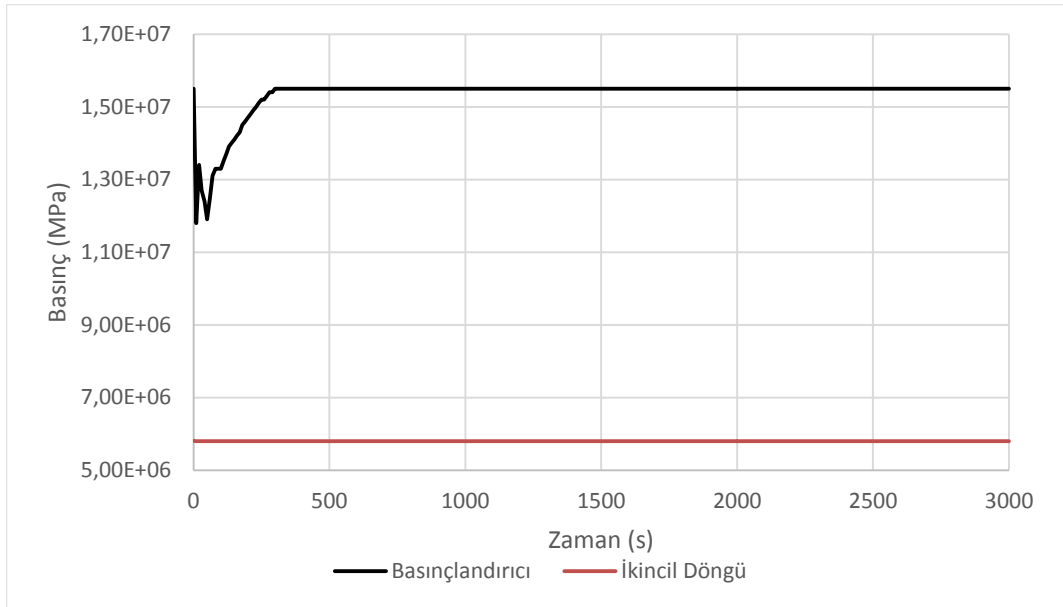
Parametre	Birim	Tasarım Değerleri [5]	RELAP5/SCDAPIM
Basınçlandırıcı Basıncı	MPa	15,5	15,546
Basınç Kabı Akışı	Kg/s	4707	4696,6
Kor Akışı	Kg/s	4504	4495,7
Kor Giriş Sıcaklığı	K (°C)	565,2 (292,05)	564,95 (291,8)
Kor Çıkış Sıcaklığı	K (°C)	601,5 (328,35)	601,53 (328,38)
Buhar Üreteci Basıncı	MPa	5,8	5,8
Buhar Çıkış Sıcaklığı	K (°C)	590,2 (317,05)	590,6 (317,45)
Toplam Buhar Akışı	Kg/s	502,8	502,8
Dp Kor	kPa	52	52,22
Dp Buhar Üreteci İkincil Döngü	kPa	296	295,4
Buhar Üreteci Gücü	MW	1001,47	1001,5

Şekil 3-4'te reaktörün kararlı hale geldiği anda kor, buhar üreteci birincil döngü ve ikincil döngüde termal güç miktarları verilmiştir. Şekil 3-5'de birincil döngü ve ikincil

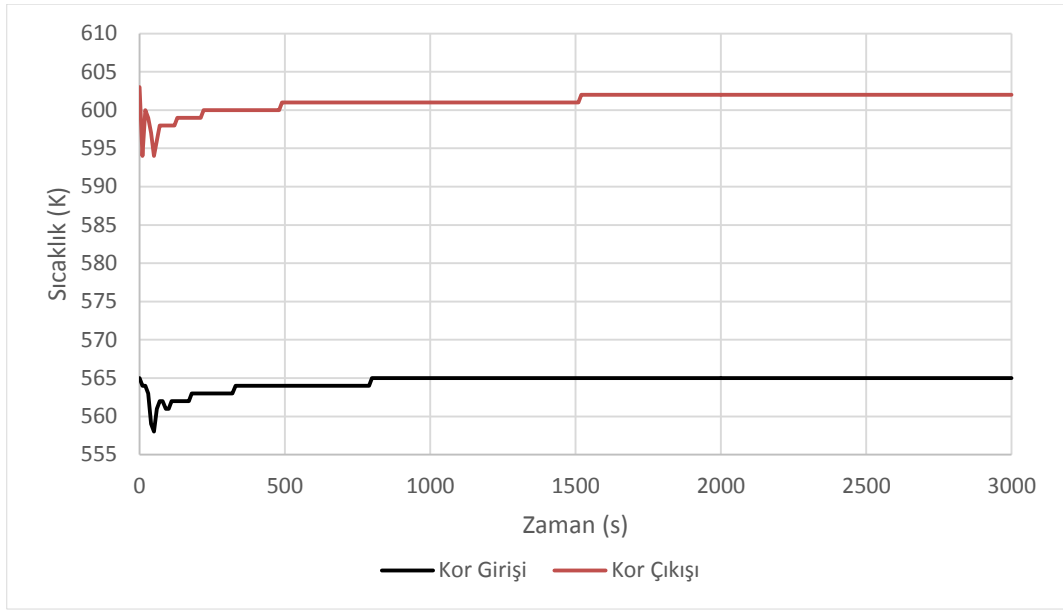
döngü basınçları verilmiştir. Şekil 3-6'da kor giriş ve çıkış sıcaklıkları verilmiştir. Şekil 3-7'de basınç kabı ve kor akış hızları ve Şekil 3-8'de ikincil döngü buhar çıkış sıcaklığı verilmiştir. Bu sonuçlara göre sistemin kararlı hale geldiği gözlemlenmiş ve 2000 saniyeden itibaren küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası sırasındaki sistem davranışları incelenmiştir.



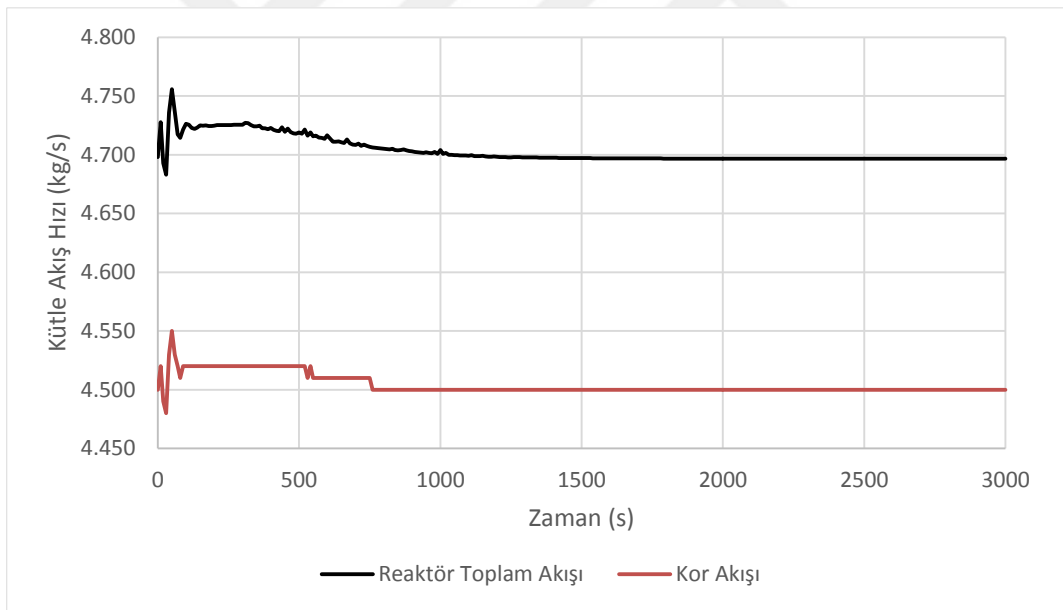
Şekil 3-4 Reaktör Gücü



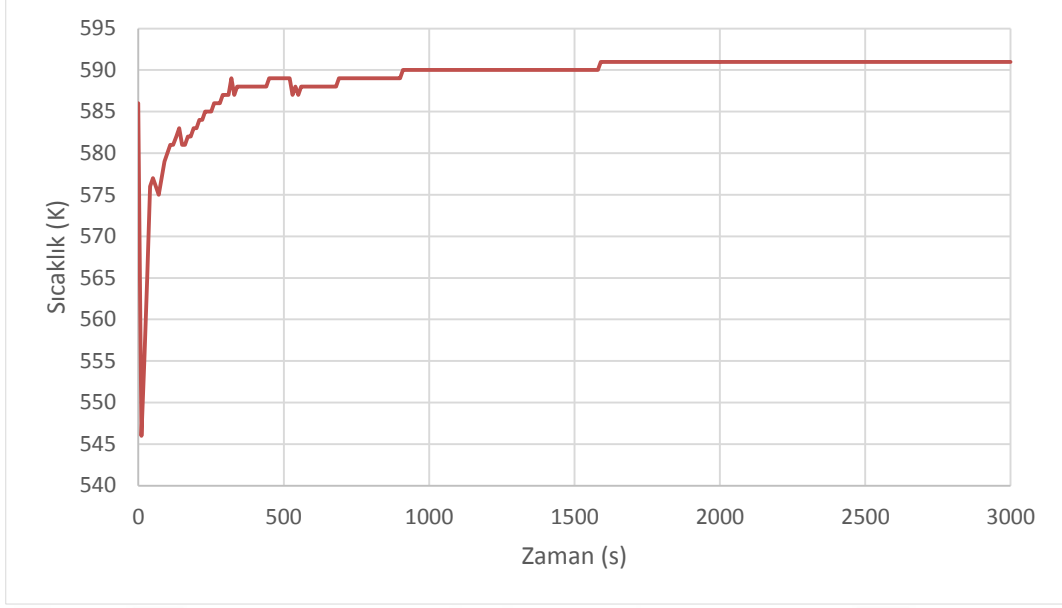
Şekil 3-5 Reaktör Birincil ve İkincil Döngü Basıncı



Şekil 3-6 Reaktör Kor Giriş ve Çıkış Sıcaklıkları



Şekil 3-7 Basınç Kabı ve Kor Akış Hızı



Şekil 3-8 Buhar Çıkış Sıcaklığı

3.2 Küçük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası (SB-LOCA) Analizi

3.2.1 SB-LOCA Tanıtımı

İntegral yapısı ile büyük kırıklı soğutucu kaybı elimine edilen IRIS SMR’de, küçük kırıklı soğutucu kaybına neden olacak en büyük bağlantı borusu 4 inç (10,16cm) çapında olan CVCS bağlantısıdır. Bu çalışmada bu bağlantı borusunun kırılması sonucu (kırık alanı $0,0081 \text{ m}^2$) gerçekleşebilecek küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası incelenmiştir. Kaza sistemin kararlı hale gelmesi için oluşturulan yeniden başlatma (.restart) dosyasından başlatılmıştır. Kaza 8000 saniye boyunca incelenmiştir. Kaza esnasında gerçekleşen olaylar Çizelge 3-2’de verilmiştir.

IRIS SMR tasarımına ait bazı veriler elde edilemediğinden bu verilerin değerleri için kabuller yapılarak modelleme yapılmıştır. Koruma kabı soğutma sistemine ilişkin veri elde edilemediğinden bu sistem modellenememiş ve kaza bu şekilde incelenmiştir. EHRS ile ilgili detaylı bilgi bulunmadığından tüp çapları buhar üretici tüp çaplarına eşit alınmış, EHRS’de 3000 m uzunluğunda tüp bulunduğu kabul edilmiştir. Buna ek olarak koruma kabı basınç düşürme sistemi elemanları olan basınç baskılama havuzu ve bunlara ait gaz tanklarındaki başlangıç koşulları koruma kabı başlangıç koşullarına eşit alınmıştır.

Çizelge 3-2 Kırığın Oluşmasıyla Meydana Gelen Sistem Olayları

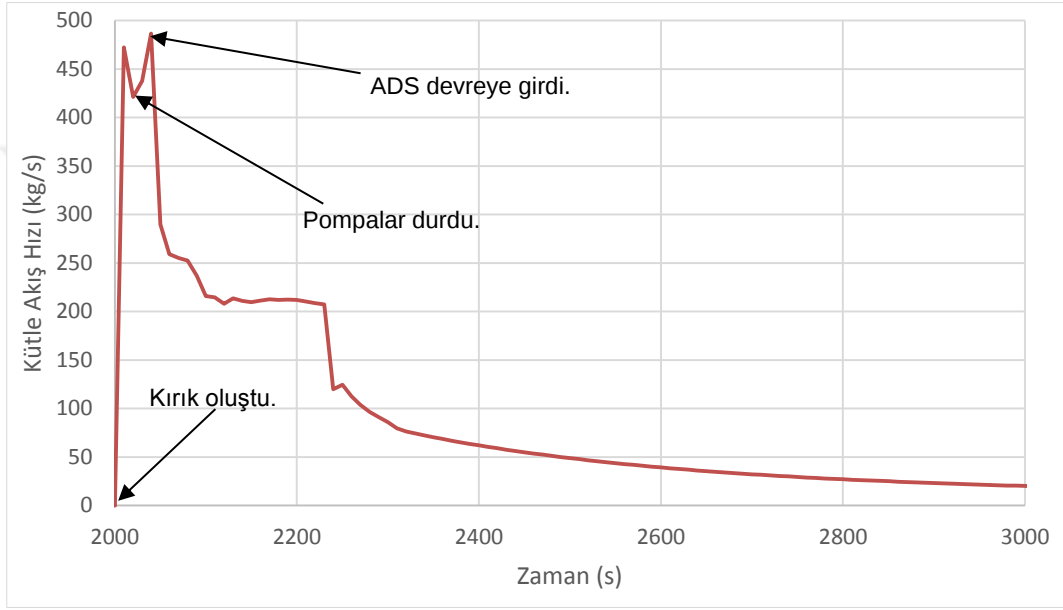
Zaman(sn)	Olaylar
2000,0	Kırılma anı Kırıktan akış başlamasıyla basınç kabı basıncı düşmeye başlıyor. (Boşalma Fazının Başlaması)
2017,1	Basınçlandırıcıda düşük su seviyesi sinyali
2021,7	Reaktör kapatıldı.
2021,7	Pompalar kapatıldı.
2021,7	EHRs devreye girdi.
2021,7	Besleme suyu vanası izolasyon kapatıldı.
2021,7	Ana buhar hattı vanası izolasyon kapatıldı
2036,3	ADS devreye girdi.
3530,9	Basınç kabı ve koruma kabı arasındaki basınç farkının 13,79 kPa altına düşmesiyle LGMS devreye girdi. LGMS ile basınç baskılama havuzundan Basınç kabı düşey iniş bölgesine doğru akış başladı.
3580,0	Basınç Kabı ve Koruma Kabı Basıncı eşitlendi.
4000,0	Kırık akışı durma aşamasına geldi. EHRs'nin yardımıyla basınç kabı ve koruma kabı basıncı düşmeye başladı (RV/CV Depressurization) LGMS ile uzun süreli soğutma sağlandı. (Long term cooling)
10000,0	Kaza simülasyonu sona erdi.

3.2.2 SB-LOCA Analiz Sonuçları

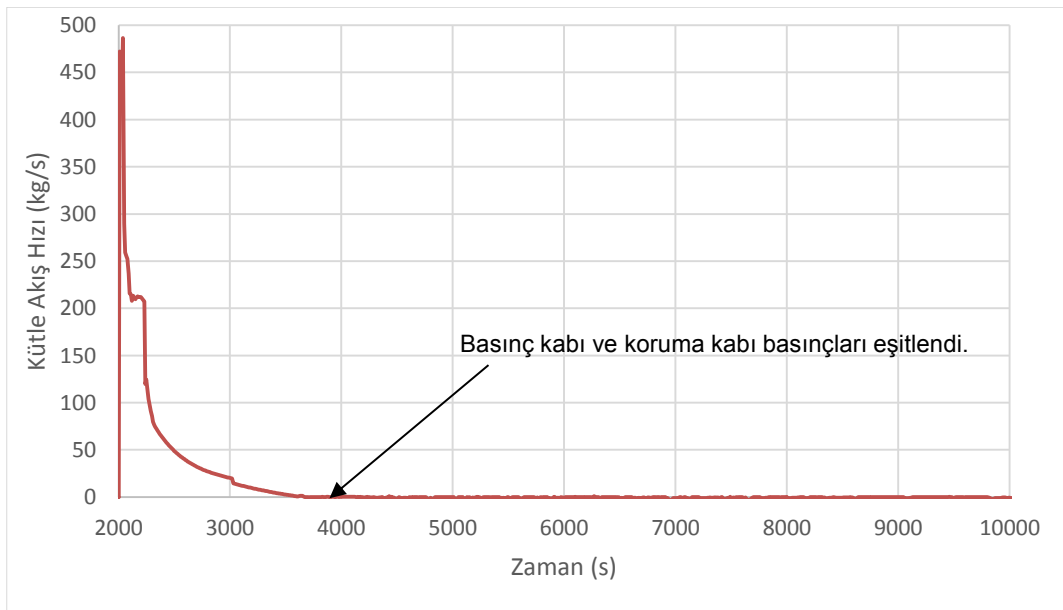
IRIS SMR'de gerçekleşen soğutucu kaybı kazası 3 ana fazdan oluşmaktadır. İlk faz kırığın oluşmasıyla reaktör basınç kabının basıncının azalması ve koruma kabı basıncına eşitlendiği zamana kadar olan boşalma (blowdown) fazıdır. İkinci faz reaktör basınç kabı ve koruma kabının basınçlarının düşmeye başladığı fazdır. Üçüncü Faz ise uzun süreli soğutmanın sağlandığı fazdır.

804 numaralı vana bileşeni ile modellenen kırık sistem kararlı hale (steady state) gelene kadar kapalıdır. Kararlı hal yeniden başlatma dosyası kullanılarak, 2000,0. Saniyede 804 numaralı vana ile modellenen kırık ile basınç kabından koruma kabına akış başlamıştır.

Şekil 3-9'dan da görüleceği gibi kırık akışı 10. saniye civarında 472 kg/s'ye ulaşmış ve sonrasında azalmaya başlamıştır. 21,7. Saniyede pompanın durmasıyla birlikte pompanın oluşturduğu emiş kuvveti de azalmaya başlamış ve kırıktaki akış hızı en yüksek miktarı olan 486 kg/s'ye yükselmiştir. 36,3. saniyede EHRS'ye reaktör basıncını düşürmede yardımcı olan ADS'nin devreye girmesiyle kırıktan çıkan kütle miktarı azalmaya başlamıştır. Şekil 3-10'dan da görüleceği üzere koruma kabı ve basınç kabı basıncının eşitlemesiyle birlikte kırıktaki akış durma noktasına gelmiştir.

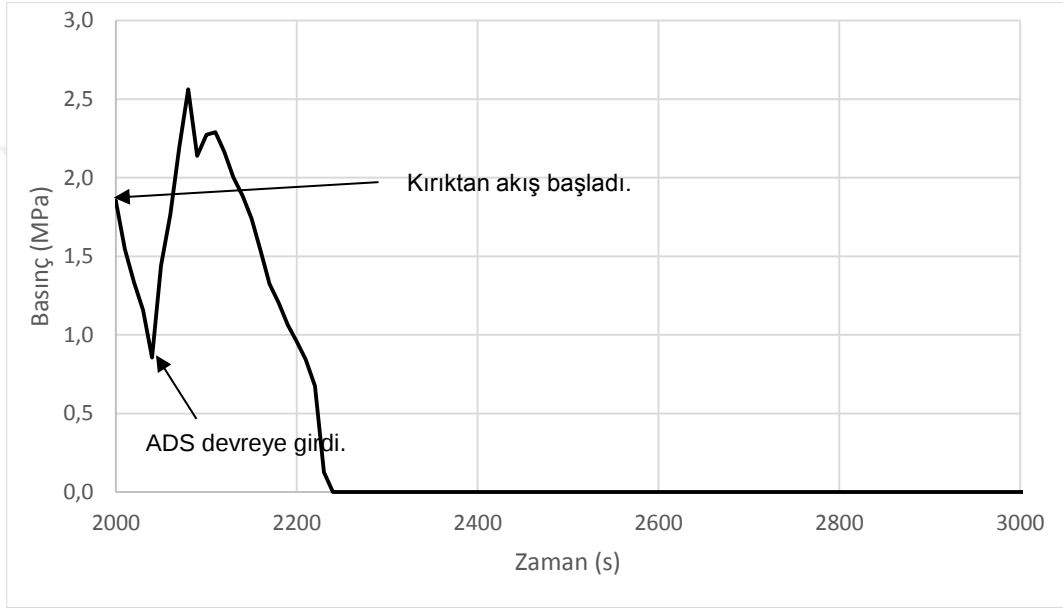


Şekil 3-9 Kırık Akış Hızı (İlk 1000 saniye)



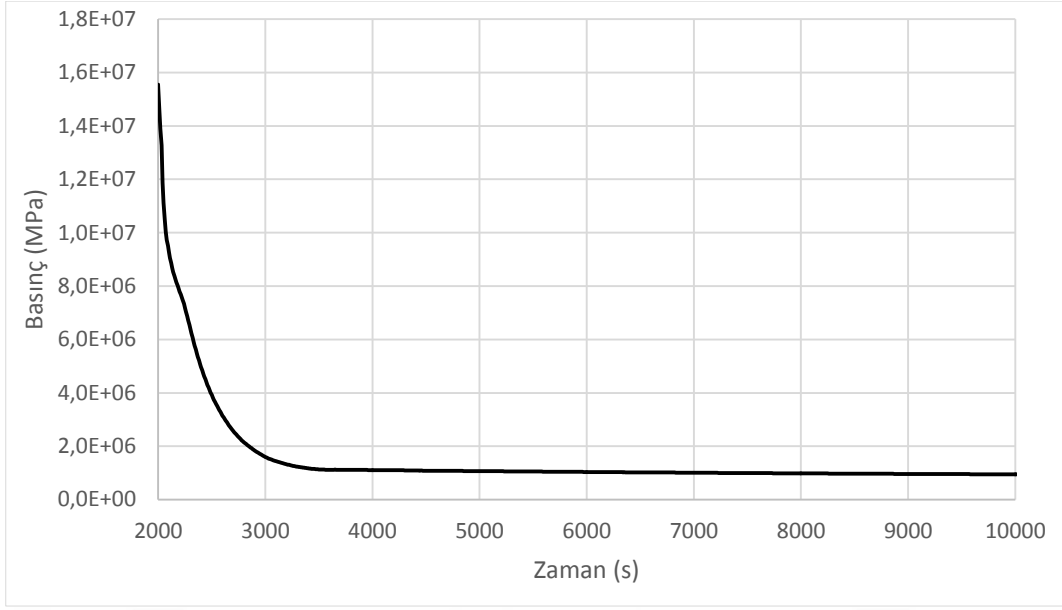
Şekil 3-10 Kırık Akış Hızı (Simülasyon süresi boyunca)

Şekil 3-11'de basınçlandırıcı su seviyesi verilmiştir. Kırığın oluşmasıyla basınçlandırıcıdaki su seviyesi azalmaya başlamış, kırık oluşumundan sonraki 17,1. saniyede basınçlandırıcı su seviyesi kritik değerin altına düşmüştür. 2036,3. saniyede ADS'nin devreye girmesiyle basınçlandırıcıya doğru akış başlamış ve basınçlandırıcıdaki su seviyesi tekrar artmaya başlayarak 2,6 m seviyesine ulaşmıştır. ADS borusundaki basıncın yükselmeye başlamasıyla basınçlandırıcıya akış azalmış ve su seviyesi düşmeye başlamış ve 2230 saniye civarında basınçlandırıcıdaki su seviyesi sıfır seviyesine düşmüştür.



Şekil 3-11 Basınçlandırıcı Su Seviyesi

Kırığın oluşmasıyla basınç kabından koruma kabına akış başlamış ve bu da Şekil 3-12'den görüleceği gibi basınçlandırıcı basıncının azalmasına sebep olmuştur. Kırık oluşumundan sonra geçen 21,7. saniyede reaktör basıncı kritik değer olan 13,789 MPa'nın altına düşmüş ve reaktör kapatılmıştır. Reaktörün kapatılmasıyla birlikte pompalarda kapatılmıştır. Sırasıyla EHRS ve ADS'nin devreye girmesiyle basınç kabı/koruma kabı basıncı (PV/CV) etkin bir şekilde düşmeye başlamıştır.



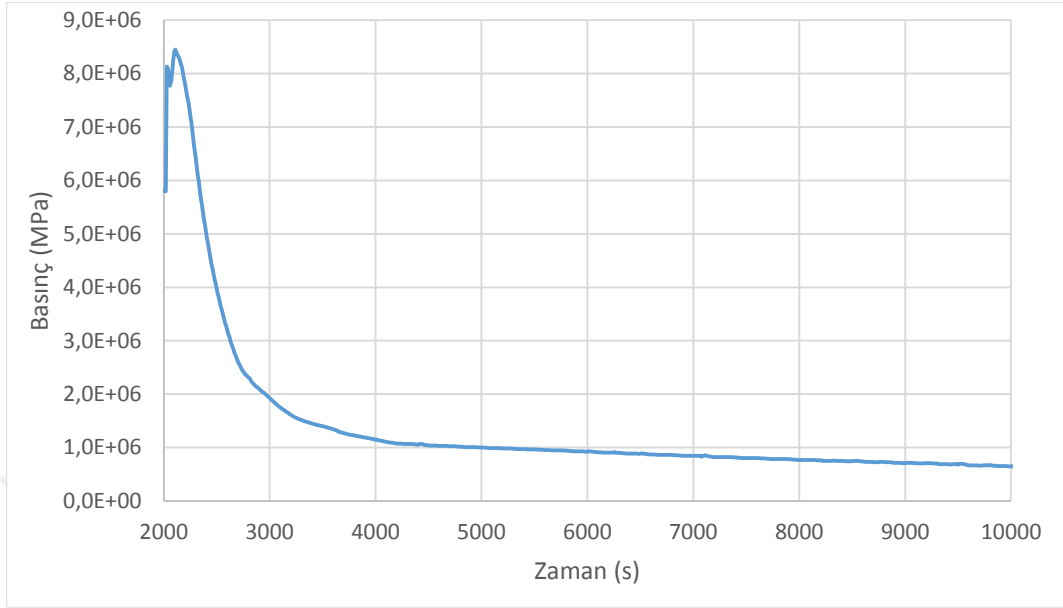
Şekil 3-12 Basmaçlandırıcı Basmaç (Simülasyon süresi boyunca)



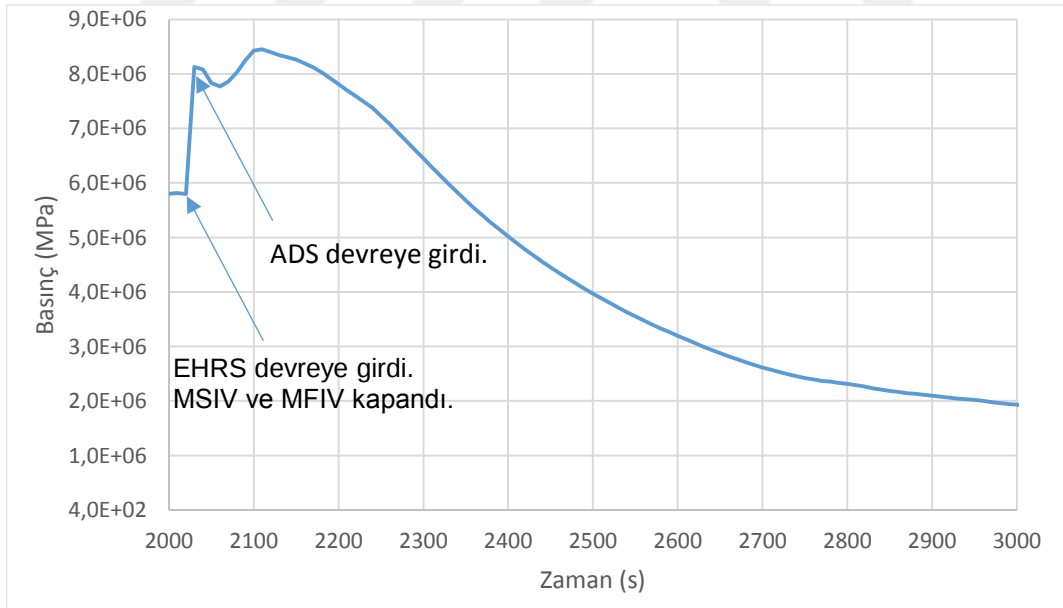
Şekil 3-13 Basmaçlandırıcı Basmaç (2000-3000 saniye arası)

Şekil 3-15'ten de görüldüğü gibi ikincil döngü basmaç reaktörün ve pompaların kapatılmasına kadar aynı kalmış, reaktörün kapatılmasıyla EHRS devreye girmiş ve ana buhar hattı ve ana besleme suyu izolasyon vanaları kapatılmıştır. EHRS birincil döngü ısısını çekmede ilk etapta yeterli olmadığı için basmaç bir süre yükselmiştir. EHRS'ye birincil döngü basmaçını düşürmede yardımcı olan ADS'nin devreye girmesiyle ikincil döngü basmaç düşmeye başlamıştır. EBS'den DVI

yardımla birincil döngüye çalışma basıncından daha yüksek basınçta borlu su iletmeye bir süre artmış olsa da tekrar azalmaya başlamıştır.



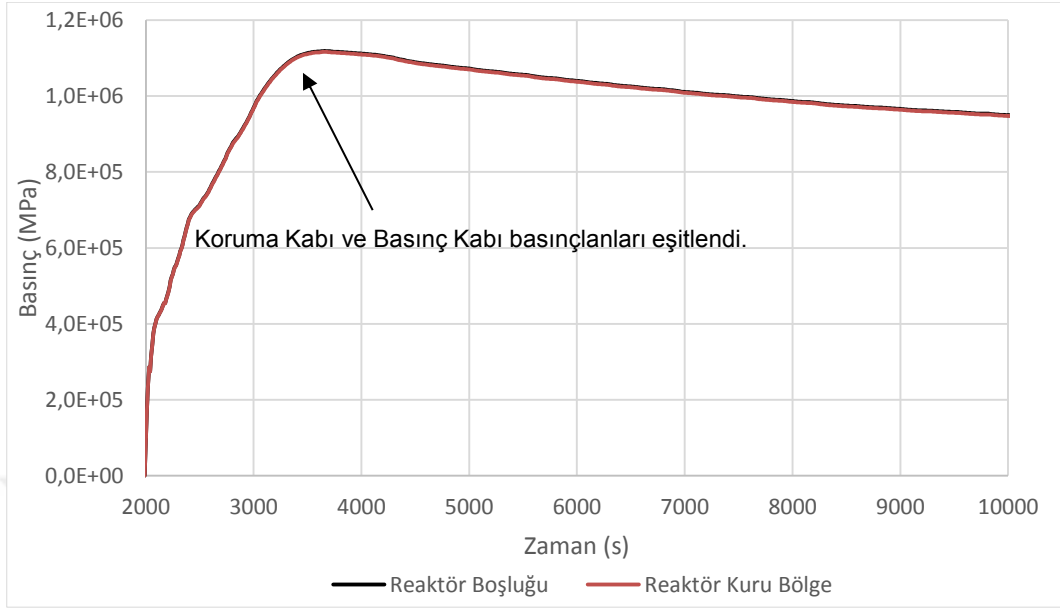
Şekil 3-14 İkincil Döngü Basıncı (Simülasyon süresi boyunca)



Şekil 3-15 İkincil Döngü Basıncı (2000-3000 saniye arası)

Şekil 3-16'da koruma kabı basıncı verilmiştir. Kırığın oluşması ile reaktör basınç kabından koruma kabına kütle akışı başlamıştır. Bu durum koruma kabının basıncının yükselmesine sebep olmuştur. Koruma kabı ve basınç kabı arasındaki basınç farkı 13,79 kPa'a düşüncü LGMS vanaları açılmış, basınç baskılama

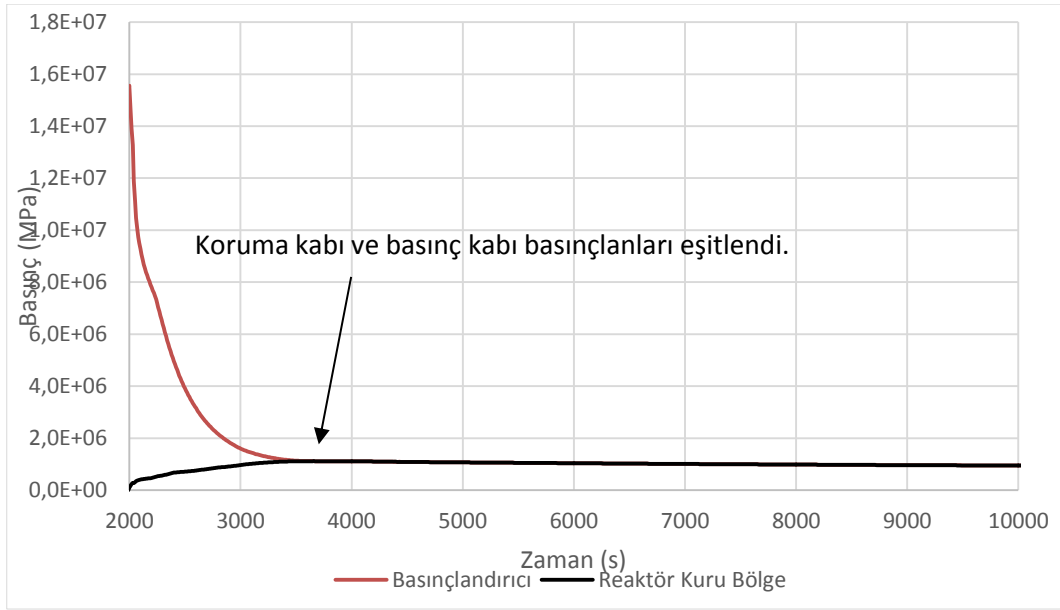
havuzundan basınç kabı düşey iniş bölgesine LGMS boruları vasıtasıyla DVI hattı kullanılarak borlu su akışı sağlanmıştır.



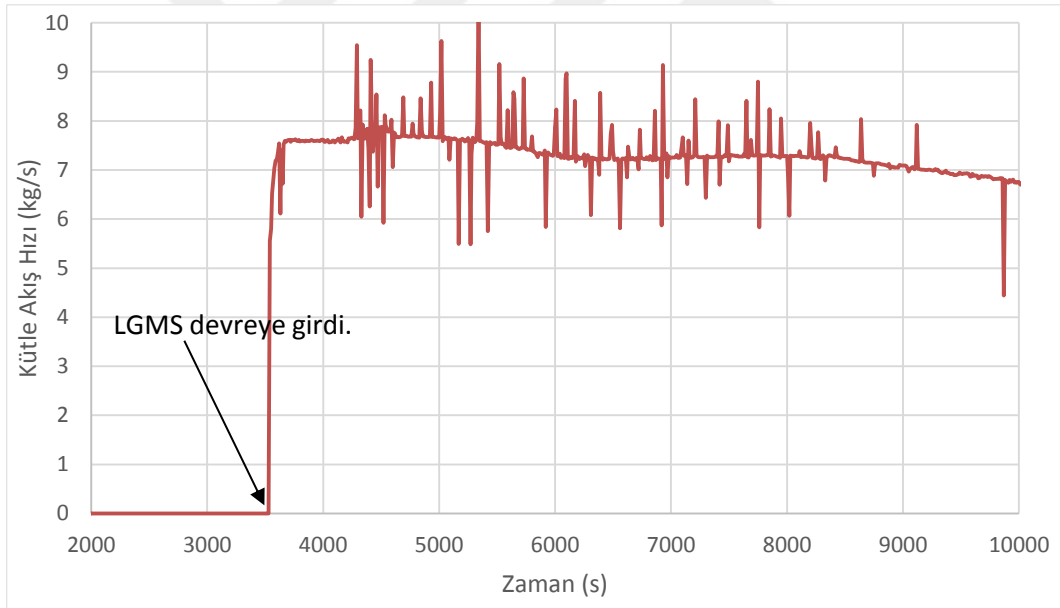
Şekil 3-16 Koruma Kabı Basıncı

Şekil 3-17'den de görüleceği gibi koruma kabı basıncı ve basınç kabı basıncı 1,1 MPa'da eşitlenmiş ve EHRS yardımıyla koruma kabı/basınç kabı basıncı düşmeye başlamıştır.

Şekil 3-18'de LGMS akış hızı verilmiştir. 3560. saniyede basınç kabı ve koruma kabı arasındaki basınç farkı 13,79 kPa'ın altına inmiş ve yerçekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemi devreye girmiştir. Bu sistemin devreye girmesiyle uzun süreli yerçekimi ile soğutma sistemi boruları vasıtasıyla basınç baskılama havuzundan reaktör düşey iniş borusuna akış başlamıştır.

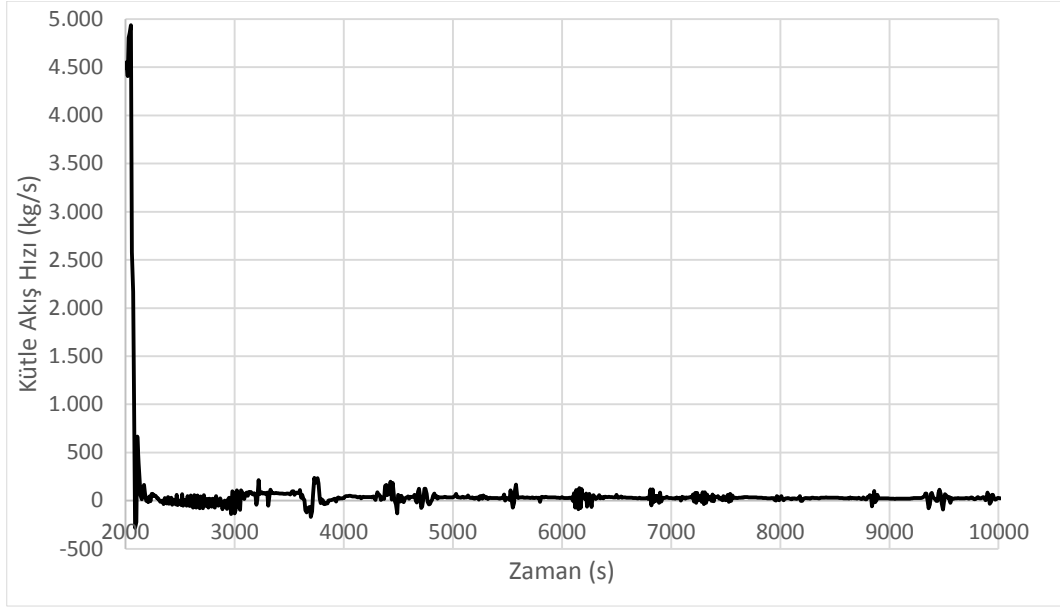


Şekil 3-17 Koruma Kabı ve Basınç Kabı Basıncı

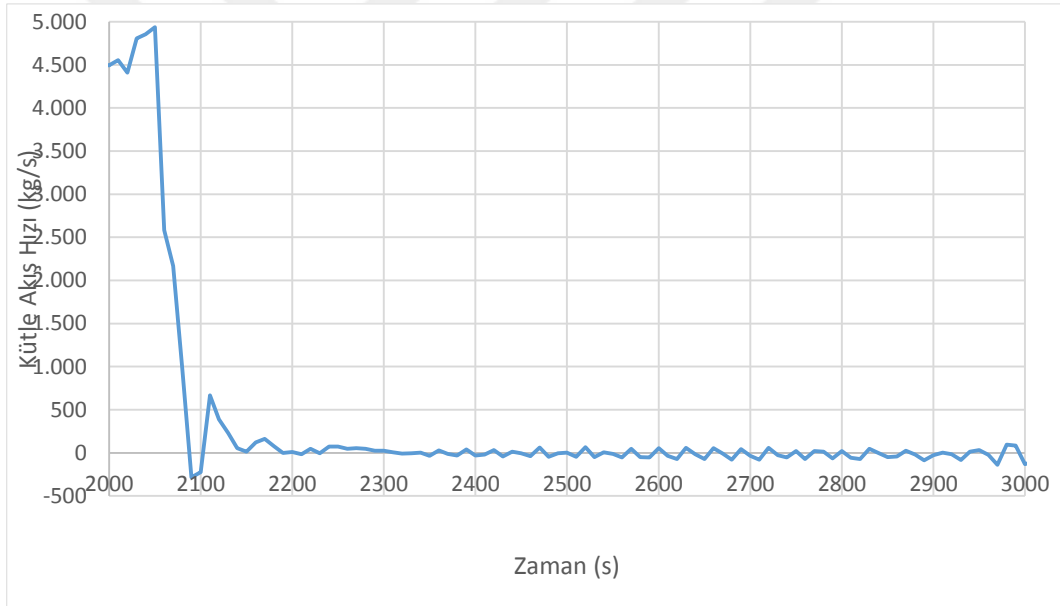


Şekil 3-18 LGMS Kütle Akış Hızı

Şekil 3-19 ve Şekil 3-20'de kor kütle akış hızı verilmiştir. Kırığın oluşmasıyla oluşan basınç farkı kordan kırığa doğru akışı bir süre hızlandırırsa da pompaların kapatılmasıyla akış düşmeye başlamıştır.

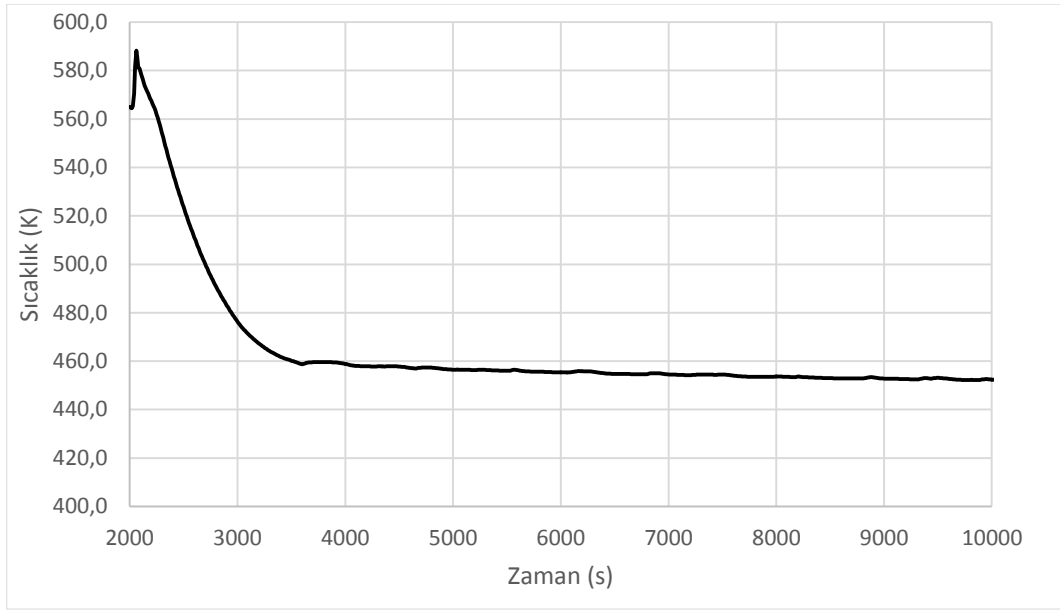


Şekil 3-19 Kor Kütle Akış Hızı (Simülasyon süresi boyunca)

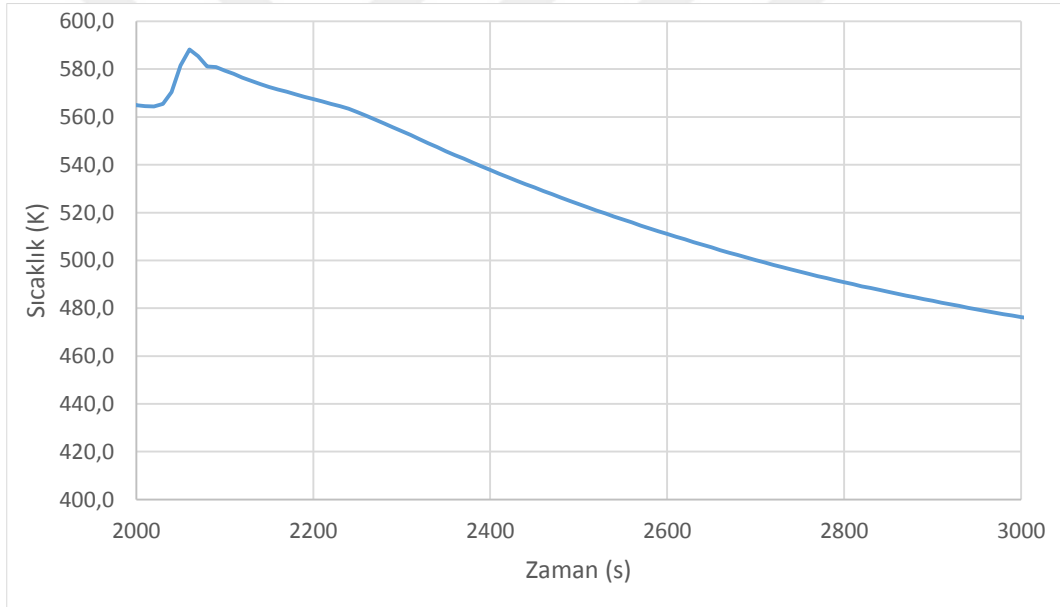


Şekil 3-20 Kor Kütle Akış Hızı (2000-3000 saniye arası)

Şekil 3-21 ve Şekil 3-22’de kor giriş sıcaklıkları verilmiştir. Kor giriş sıcaklıkları pompaların kapatılana kadar aynı kalmış, pompaların kapatılmasıyla artmaya başlamış ve ikincil döngü ana besleme suyu izolasyon vanasının kapatılmasıyla artış hızlanmış ve sıcaklık 588 K’e yükselmiştir. Birincil döngü basıncının ADS ile etkin bir şekilde düşürülmesiyle kor giriş sıcaklığı düşmeye başlamıştır.

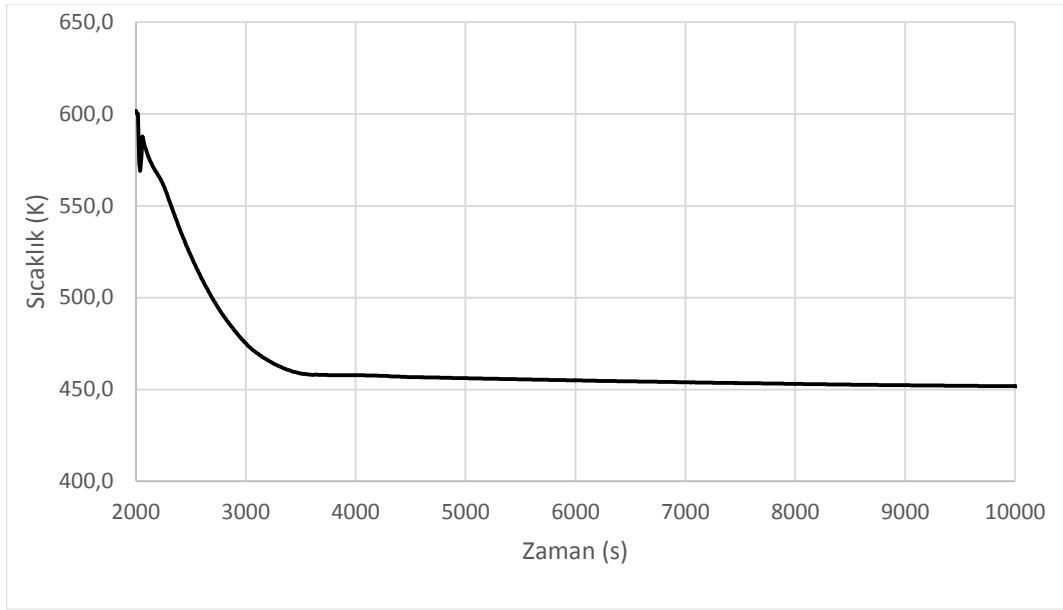


Şekil 3-21 Kor Giriş Sıcaklığı (Simülasyon süresi boyunca)

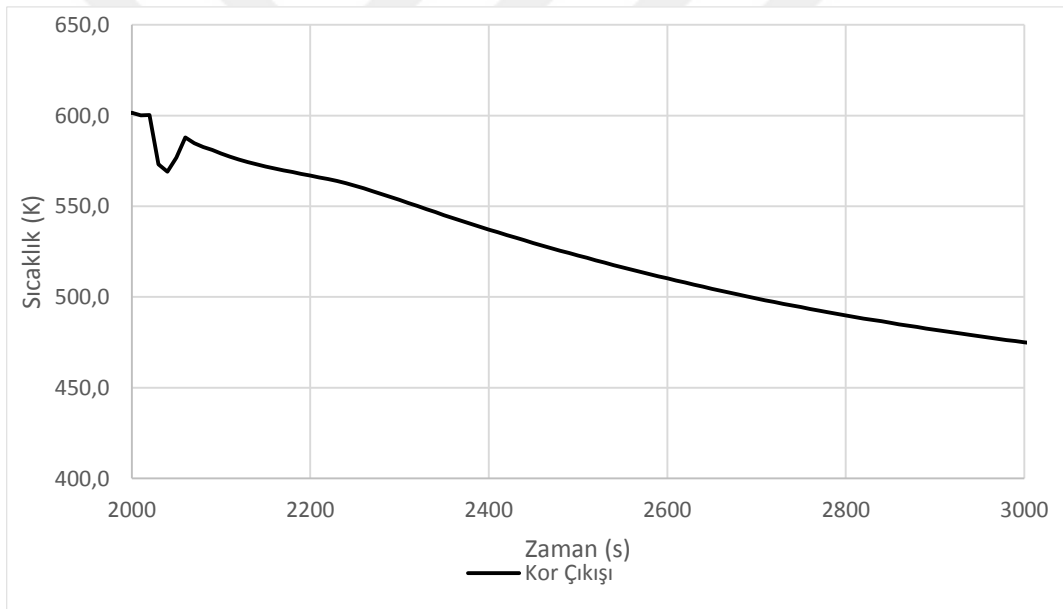


Şekil 3-22 Kor Giriş Sıcaklığı (2000-3000 saniye arası)

Şekil 3-23 ve Şekil 3-24'te kor çıkış sıcaklığı vermiştir. Ana besleme suyu izolasyon vanalarının kapatılmasıyla kor giriş sıcaklığında görülen artış ve kor çıkış sıcaklığının da kısa bir süre artmasına sebep olmuştur. Bu artış sistem çalışma sıcaklığını geçmemiştir. ADS'nin etkin bir şekilde basıncı düşürmesiyle azalmaya başlamıştır.



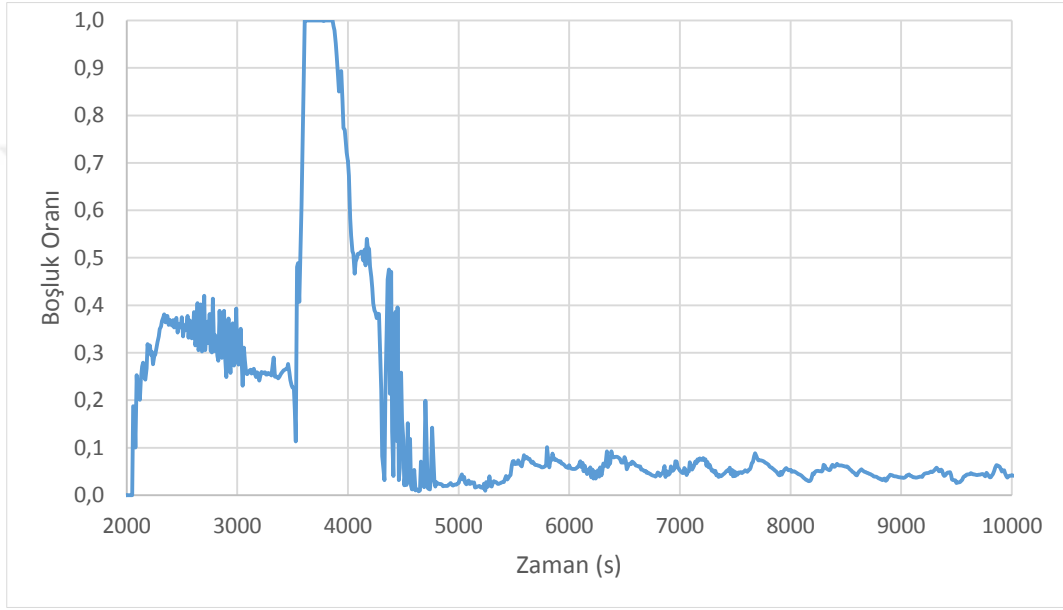
Şekil 3-23 Kor Çıkış Sıcaklığı (Simülasyon süresi boyunca)



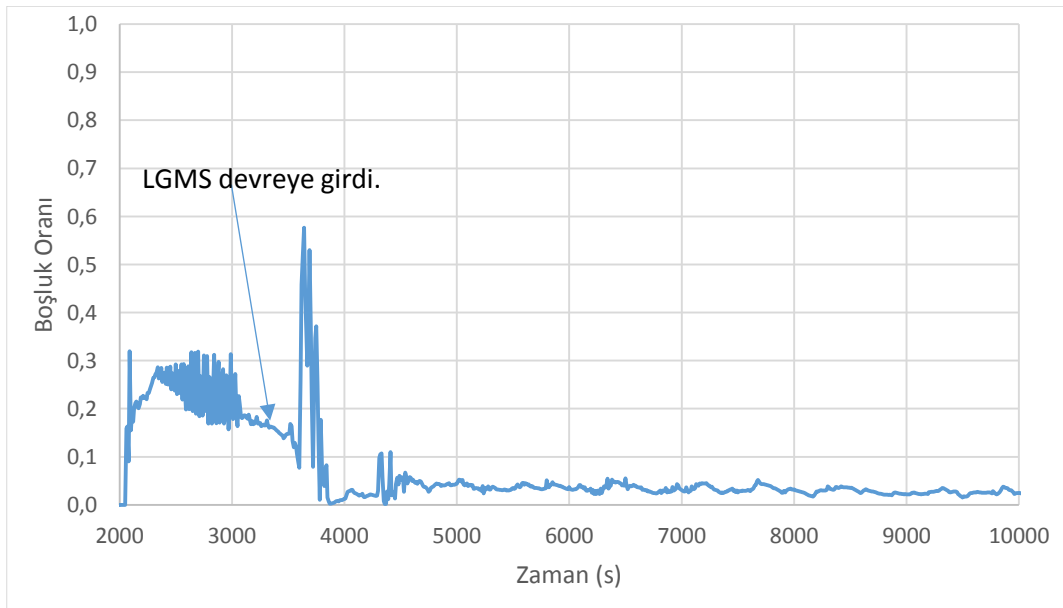
Şekil 3-24 Kor Çıkış Sıcaklığı (2000-3000 saniye arası)

Şekil 3-25'te kor çıkışında bulunan hacim elemanının boşluk oranı (void fraction) verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi basınç kabı ve koruma kabı basınçlarının eşitlenmesiyle LGMS devreye girmiş ve basınç baskılama havuzundan kora akış başlamıştır. LGMS'nin devreye girmesiyle kora kor basıncından yüksek basınçta ve düşük sıcaklıkta borlu su akışı başlamıştır. Bu durum belirli bir süre boyunca kor çıkışı hacim elemanı boşluk oranının artmasına sebep olmuştur. Şekil 3-26'da ise aktif kor bölgesi modelinin en üst hacim elemanına ait boşluk oranı verilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi aktif kor bölgesindeki boşluk oranı LGMS'nin devreye

girmesiyle 0,58'e ulaşmıştır. Bu kapsamda yakıt çubuklarının en üst kısmındaki boşluk oranını gözlemlemek için daha önce 24 hacim elemanına bölünen kor PIPE bileşeninin en üstte bulunan 24. Hacim elemanı ikiye bölünmüş ve 13,87 cm uzunluğunda iki hacim elemanı oluşturulmuş ve SB-LOCA analizi yeniden modellenmiştir. Bu şekilde bir değişimle kor en üst hacim elemanındaki boşluk oranı 0,99 olmuştur. Bu durum daha küçük uzunluklarda bir nodalizasyon ile modelleme yapılması durumunda korun 10 cm civarındaki üst kısmında sadece buhar olduğu gözlemlenebileceğini göstermektedir.



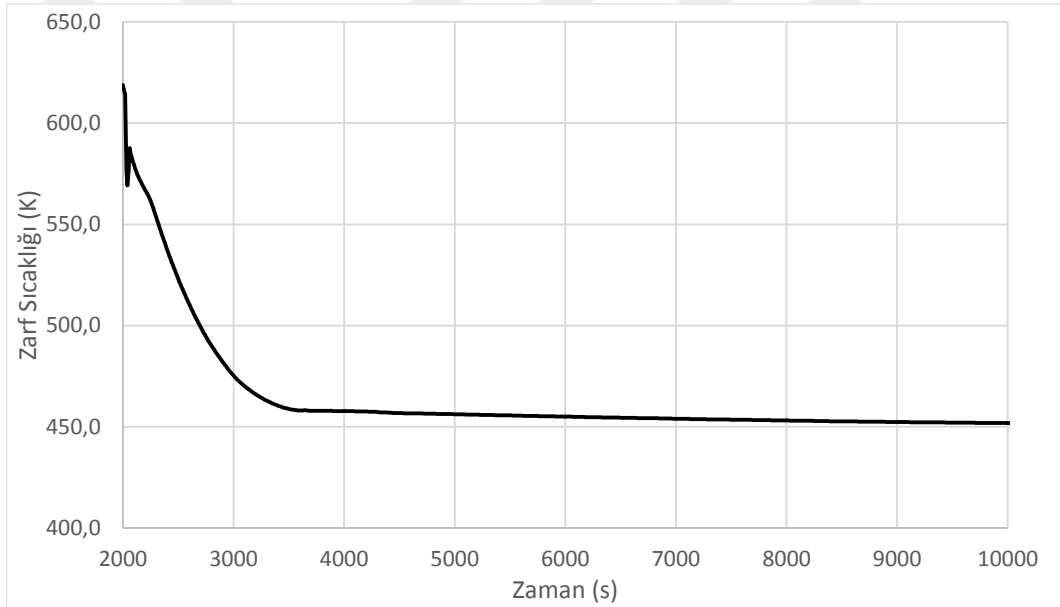
Şekil 3-25 Kor Çıkışı Boşluk Oranı



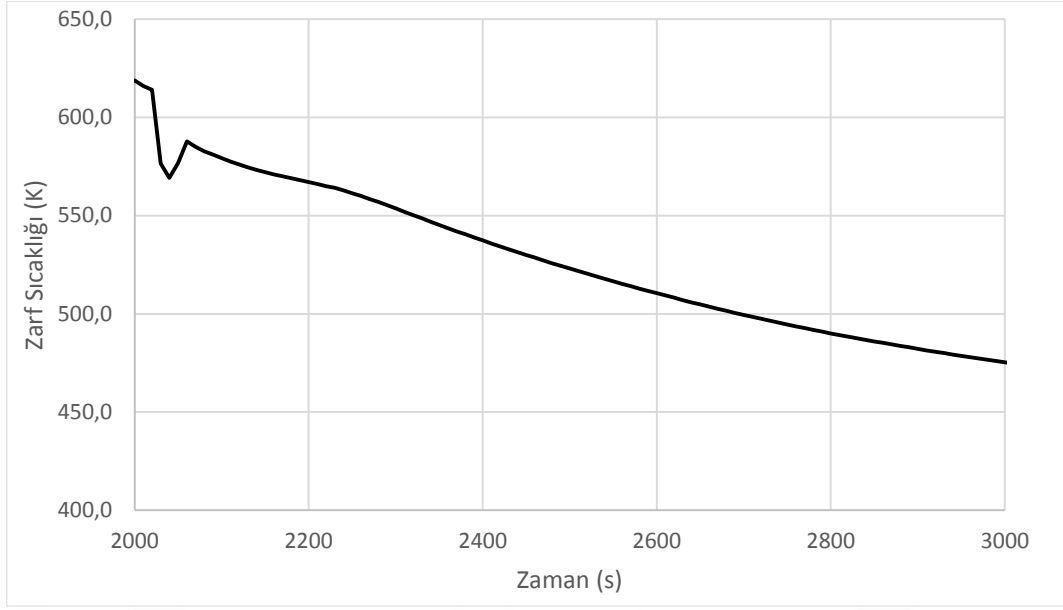
Şekil 3-26 Yakıt Çubuğu En Üst Hacim Elemanı Boşluk Oranı

Şekil 3-27 ve 3-28’de yakıt çubuğu en üst hacim elemanına ait yakıt zarf malzemesi sıcaklığı verilmiştir. Zarf sıcaklığı kırığın oluşmasıyla düşmeye başlamış, ana besleme suyu izolasyon vanasının kapatılmasıyla birincil döngüden ikincil döngüye ısı transferinin azalması nedeniyle artan kor giriş sıcaklığı ile yeterli miktarda soğutulma sağlanmadığı için artmaya başlamış, ADS’nin sistem basıncını düşürmeye başlamasıyla tekrar düşmeye başlamıştır. Basınç kabı ve koruma kabı basınçlarının eşitlenmesiyle 458 K’e kadar düşen zarf sıcaklığı EHRS’nin basınç kabı ve koruma kabı sisteminin ısısını çekmesiyle kademeli olarak azalmaya başlamış ve 451 K’e kadar düşmüştür.

2000. saniyede kırığın oluşmasıyla başlayan simülasyon 10000 saniyede tamamlanmıştır.



Şekil 3-27 Yakıt Çubuğu Zarf Sıcaklığı En Üst Hacim Elemanı (Simülasyon süresi boyunca)



Şekil 3-28 Yakıt Çubuğu Zarf Sıcaklığı En Üst Hacim Elemanı (2000-3000 saniye arası)

4 SONUÇLAR

Bu çalışmada reaktör ana bileşenlerini basınç kabı içerisinde barından IRIS Küçük Modüler Reaktörünün RELAP5/SCDAPSIM modeli oluşturulmuş ve küçük kırıklı soğutucu kaybı kazası sırasındaki sistem davranışları incelenmiştir.

Yapılan çalışmada birincil döngü ve ikincil döngü ana bileşenleri modellenip modeller birleştirilince basınçlandırıcı basıncının reaktör çalışma basıncının üzerinde kaldığı görülmüştür. Bu sorunun çözümü için basınçlandırıcı yerine zamana reaktör basınç ve sıcaklık çalışma değerleri ile bir sınır hacmi oluşturulmuş ve sınır hacmi üst yükseltici bölgesine basınç kontrollü bir vana ile bağlanmıştır. Bu şekilde sistem basıncı dengelenmiş ve basınçlandırıcı sisteme entegre edilmiş ve sistemin kararlı hale geldiği görülmüştür.

Kararlı hale gelen sistemin RELAP5/SCDAPSIM tarafından oluşturulan yeniden başlatma (.restart) dosyası kullanılarak 2000. Saniyede kimyasal ve hacim kontrol sistemi borusunda $0,0081 \text{ m}^2$ büyüklüğünde kırık oluşturulmuş ve oluşan soğutucu kaybı kazası sırasındaki sistem davranışları incelenmiştir. Kırığın oluşmasıyla basınç kabından koruma kabına doğru akış başlamış ve bu akış sistemin basıncını düşürmeye başlamıştır. Basıncın belirli bir değerin altına düşmesiyle reaktör kapatılmış, sırasıyla EHRS ve ADS devreye girmiş ve reaktör basıncı etkin bir şekilde düşürülmüştür. Reaktör koruma kabı ve basınç kabı basınçlarının eşitlenmesiyle yerçekimi ile çalışan uzun süreli soğutma sistemi devreye girmiştir. Model oluşturulurken IRIS SMR tasarımına ait bazı veriler elde edilemediğinden modelde bazı kabuller yapılmış, ayrıca koruma kabı soğutma sistemi modellenmemiştir. Bu durum koruma kabı ve basınç kabının beklenenden daha yüksek bir değerde eşitlenmesine sebep olmuştur. Ancak koruma kabı ve basınç kabının basıncının eşitlendiği bu değer koruma kabı tasarım değerinin (1,4 MPa [6]) yaklaşık 0,3 MPa altındadır.

IRIS SMR tasarımına ait pasif sistemler ile ilgili veriler elde edildiği takdirde yapılan bu çalışma girdi dosyasında gerekli değişiklikler yapılarak bu çalışma tekrarlanarak sistem davranışları yeniden incelenebilir veya tasarımda esaslı diğer kaza olan DVI hattında gerçekleşebilecek kırık ile SB-LOCA sırasındaki sistem davranışları incelenebilir. Bunlara ek olarak ikincil döngüde gerçekleşebilecek, bu çalışmayla hazırlanmış olan modelde buhar üreteçleri ayrı ayrı modellenerek,

buhar üretici tüplerinde gerçekleşebilecek kırık sonucu gerçekleşebilecek kaza, EHRIS'nin yanlış bir şekilde açılması, ana besleme suyu veya buhar hattının kırılması gibi olaylar sırasındaki sistem davranışları da incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] IAEA, "Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling," *Iaea*, no. January, pp. 1–870, **2007**.
- [2] F. Aydogan, G. Black, M. A. Taylor Black, and D. Solan, "Quantitative and Qualitative Comparison of Light Water and Advanced Small Modular Reactors," *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.*, vol. 1, no. 4, p. 041001, **2015**.
- [3] I. R. Innovative, F. Technical, and P. Report, "International reactor innovative and secure final technical progress report," *Nucl. Energy*, **2003**.
- [4] A. Del Nevo, A. Manfredini, F. Oriolo, S. Paci, and L. Oriani, "Integrated Analysis for a Small Break Loca in the Iris Reactor Using Melcor and Relap5 Codes," pp. 1–17, **2004**.
- [5] T. Bajs, D. Grgić, V. Šegon, L. Oriani, and L. E. Conway, "Development of Relap5 Nodalization for Iris Non-Loca Transient Analyses," *Nucl. Math. Comput. Sci. A Century Rev.*, pp. 1–14, **2003**.
- [6] D. Grgić, T. Bajs, L. Oriani, and L. E. Conway, "Coupled RELAP5 / GOTHIC Model for IRIS Reactor SBLOCA Analysis (Paper 3301)," *Icapp2003*, no. Paper 3301, pp. 1–11, **2003**.
- [7] J. Khatry and F. Aydogan, "Design Basis Accident Analysis of a Small Modular Reactor," *J. Therm. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 1241–1258, 2017.
- [8] M. D. Carelli *et al.*, "Integral Layout of the Iris Reactor," in *Assembly*, **2003**, no. 148701966, pp. 1–9.
- [9] M. D. Carelli *et al.*, "The design and safety features of the IRIS reactor," in *11th International Conference on Nuclear Engineering*, **2003**, vol. 230, no. 1–3, pp. 151–167.
- [10] H. J., "RELAP/SCDAPSIM Input Manual Mod3.4, Mod3.5 & Mod4.0, Innovative System Software." **2012**.
- [11] J. M. Kujawski, D. M. Kitch, and L. E. Conway, "IRIS Spool-Type Reactor Coolant Pump, ICONE10-22572.," pp. 1–4, **2002**.
- [12] T. Bajs, "Model za analizu prijelaznih pojava u lakovodnom reaktoru integralne izvedbe.pdf," **2003**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Hasan ÇELİKKAYA
Doğum Yeri : Bingöl
Medeni Hali : Bekar
E-posta : hselikkaya@gmail.com
Adresi : Bahçelievler Mah. Yeni Cad. 25/3 Merkez/Bingöl

Eğitim Bilgileri

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Yabancı Dil Bilgisi

İngilizce : İyi (TOEFL 85/120, Ağustos 2017)

İş Deneyimi

- 05/2014 – 12/2014
Radyolojik ve Nükleer Madde İçerikli Afet ve Acil Durumlara İlişkin Eğitim ve
Bilinçlendirme Konulu Ar-Ge Projesi
Görevi: Proje Bursiyeri
- 02/2016 – 08/2016
University of Idaho, Mechanical Engineering
Görevi: Araştırmacı
- 08/2015 – Halen
Fırat Kalkınma Ajansı
Görevi: Uzman

Deneyim Alanları

- Radyolojik ve Nükleer Durumlara Müdahale
- RELAP5 ve SCDAP ile Kaza Analizi
- Yatırım Destek ve Fizibilite Çalışmaları

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-

.





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:12/09/2018

Tez Başlığı / Konusu: IRIS KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRÜNÜN (SMR) RELAP5/SCDAPSIM SİSTEM KODU İLE MODELLENMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 47 sayfalık kısmına ilişkin, 11/09/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.


12/09/2018
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Hasan ÇELİKKAYA
Öğrenci No: N13121750
Anabilim Dalı: NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ
Programı: NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.


Doç. Dr. Şule ERGÜN
(Unvan, Ad Soyad, İmza)