

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK MODÜLER ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRÜ ACİL TAHLİYE
SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ VE DENEYSEL ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Mahmut Cüneyt KAHRAMAN

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

ŞUBAT 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KÜÇÜK MODÜLER ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRÜ ACİL TAHLİYE
SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ VE DENEYSEL ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

**Mahmut Cüneyt KAHRAMAN
(301182006)**

Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE

ŞUBAT 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AND EXPERIMENTAL
ANALYSIS OF THE EMERGENCY DRAINING SYSTEM OF A SMALL
MODULAR MOLTEN SALT REACTOR**

Ph.D. THESIS

**Mahmut Cüneyt KAHRAMAN
(301182006)**

Department of Energy Science and Technologies

Energy Science and Technology Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE

FEBRUARY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301182006 numaralı Doktora Öğrencisi Mahmut Cüneyt KAHRAMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KÜÇÜK MODÜLER ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRÜ ACİL TAHLİYE SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ VE DENEYSEL ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Üner ÇOLAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şule ERGÜN
Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Sibel BAŞAKÇILARDAN KABAKÇI
Yalova Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet BOZKURT
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Aralık 2023
Savunma Tarihi : 08 Şubat 2024





Canım Babama,



ÖNSÖZ

Bu uzun ve titiz araştırma sürecinin ardından doktora tezimi tamamlamış olmaktan duyduğum memnuniyeti ifade etmek isterim. Bu araştırma sürecinde, bana destek olan kişi ve kurumlara teşekkür etmek istiyorum.

Doktora araştırma sürecimin başından itibaren bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, yönlendirmeleri ile bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasına katkı sağlayan değerli tez danışmanım Doç. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE'ye içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme komitesinde yer alan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Üner ÇOLAK'a ve Prof. Dr. Şule ERGÜN'e, araştırmanın hedeflerine ulaşması adına sağladıkları yönlendirmeler ve deneyim paylaşımları için şükranlarımı sunuyorum.

Doktora çalışmamın önemli bir bölümünü oluşturan Çek Cumhuriyeti, Prag'daki deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine destek veren TÜBİTAK'a, özellikle de Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu 2214-A kapsamında sundukları destek için şükranlarımı iletiyorum. Prag'da birlikte çalıştığımız Prof. Dr. Radek SKODA'ya, Dr. Jan SKAROHLID'e ve Dr. Tomas KORINEK'e, deney düzeniğinin kurulmasında ve deneylerin gerçekleştirilmesindeki değerli katkıları için içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu uzun ve zorlu süreçte, sadece teknik bilgi ve deneyim değil, aynı zamanda maddi ve manevi destek de gerekmektedir. Her an yanımda olan aileme içten teşekkürlerimi iletmek isterim. İlkokuldan bugüne kadar eğitim tercihlerimin arkasında duran ve maddi manevi desteğini esirgemeyen, ağustos ayında kaybettiğim babamı saygı ve minnetle anıyorum; O olmasaydı, bu tez bu noktaya gelmezdi. Aynı şekilde, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan anneme, bana hep destek olan abilerime sonsuz teşekkürler. Son olarak Prag'da araştırmalarımı yürütürken, hayatının ilk aylarını babasından uzak geçiren Sevgili kızım Vera'ya ve bu süreçte kızımızı tek başına büyüten eşim Gülşen'e teşekkür ederim. Sizin desteğinizle bu araştırma başarıyla tamamlanmıştır.

Aralık 2023

Mahmut Cüneyt KAHRAMAN
(Nükleer ve Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Dünden Bugüne Ergimiş Tuz Reaktörleri	2
1.2 Acil Tahliye Sistemi	6
1.3 Araştırmanın Hedefleri	8
1.4 Çalışmanın Ana Hatları	9
2. NÜMERİK YÖNTEM	11
2.1 Katı Tıpa ve Tahliye Borusunun Tasarım Parametreleri	11
2.2 Isı Transfer Mekanizmaları	16
2.3 Entalpi-Gözenek Yöntemi	18
2.4 Sınır Şartları	19
2.4.1 Katı tıpa modelinin sınır şartları	20
2.4.2 Tahliye süresinin hesaplanmasında kullanılan modelin sınır şartları ...	21
2.5 HAD Kodu ve Sonlu Hacim Yöntemi	22
3. ACİL TAHLİYE SİSTEMİNİN DENEYSEL ANALİZİ	25
3.1 Deneylerin Yapılması ve Sonuçların Analizi	25
3.1.1 Deney setinin kurulması	25
3.1.1.1 HITEC tuzu	25
3.1.1.2 Tahliye borusu	27
3.1.1.3 Isıtıcılar	29
3.1.1.4 Sıcaklık ölçerler	31
3.1.1.5 Basınçlandırma sistemi	33
3.1.1.6 Soğutma sistemi	34
3.1.1.7 Yalıtım malzemesi	34
3.1.2 Deney başlangıç ve sınır şartları	34
3.1.3 Deneylerin gerçekleştirilmesi	36
3.1.4 Deney sonuçları ve analizi	38
3.2 HAD Modelinin Oluşturulması ve Sonuçlarının Analizi	40
3.2.1 HAD modelinin oluşturulması	40
3.2.1.1 Tıpa borusunun geometrisi	40
3.2.1.2 Problemin başlangıç ve sınır şartları	41
3.2.2 Simülasyon sonuçları ve geçiş bölge parametresinin tespiti	42

4. KATI TIPANIN FARKLI İŞLETME KOŞULLARINDAKİ DAVRANIŞININ ANALİZİ.....	47
4.1 İdeal Ağ Boyutunun Seçilmesi.....	48
4.2 Simülasyon Model Boyutunun Belirlenmesi	48
4.3 Optimal Tahliye Borusu Duvar Kalınlığının Belirlenmesi	49
4.4 Katılma Fazı.....	50
4.5 İşletme Öncesi Fazı	53
4.6 Reaktör İşletme Fazı.....	56
4.7 Kaza Fazı.....	58
5. TAHLİYE BORUSUNUN TASARIMI VE TAHLİYE SÜRESİNİN HESAPLANMASI.....	61
5.1 Tahliye Süresinin Analitik Hesaplanması	61
5.2 Tahliye Süresinin Nümerik Yöntemlerle Hesaplanması.....	65
5.2.1 Taylor serisi yöntemi ile çözüm	65
5.2.2 Heun yöntemi ile çözüm	66
5.3 Tahliye Süresinin HAD Yöntemiyle Hesaplanması.....	66
5.4 Tahliye Borusunun Tasarımı	68
5.4.1 Boru çapının tahliye süresine etkisi	68
5.4.2 Boru uzunluğunun tahliye süresine etkisi	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
6.1 Çalışmanın Sonuçları ve Uygulama Alanı	71
6.2 Çalışmanın Sınırları.....	73
6.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	74
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	81

KISALTMALAR

ATS	: Acil Tahliye Sistemi
ETR	: Ergimiş Tuz Reaktörü
ETRD	: Ergimiş Tuz Reaktörü Deneyleri
ETHR	: Ergimiş Tuz Hızlı Reaktörü
FLiBe	: Lityum Florür-Berilyum Florür Tuzu
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KMETR	: Küçük Modüler Ergimiş Tuz Reaktörü
ORNL	: Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı
VOF	: Volume of Flow



SEMBOLLER

$A_{geçiş}$	: Geçiş bölge parametresi
C_p	: Sabit sıcaklıktaki özgül ısı
C_f	: Fanning sürtünme katsayısı
D	: Çap
E	: Enerji
g	: Yer çekim ivmesi
H	: Entalpi
h	: Duyulur entalpi
k	: Isı transfer katsayısı
L	: Gizli ısı
$M_{düşüş}$	: Momentum düşüşü
m	: Kütle
P	: Basınç
$Q(t)$	: Güç yoğunluğu
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
u	: İç enerji
V	: Hacim
$\vec{v}$	: Akışkan hızı
$\vec{v}_p$	: Çekilme hızı
z	: Yerden yükseklik
β	: Sıvı oranı
ρ	: Yoğunluk
π	: Pi sayısı
μ	: Dinamik vizkozite
ν	: Kinematik vizkozite
ϵ	: Küçük bir değer ifadesi
ΔH	: Oransal gizli entalpi
Δp_c	: Ani daralmaya bağlı basınç kaybı

Δp_f : Akışkan-duvar sürtünme basınç kaybı
 Δt : Zaman aralığı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : ETR Projeleri ve Teknik Özellikler.....	5
Çizelge 2.1 : ETHR ve KMETR tasarımlarının karşılaştırılması.....	12
Çizelge 2.2 : Kullanılan malzemelerin malzeme özellikleri.....	14
Çizelge 3.1 : FLiBe ve HITEC tuzlarının termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	26
Çizelge 3.2: Hastelloy-N [49] ve AISI 4145 [50] alaşımını oluşturan elementler	28
Çizelge 3.3: Hastelloy-N ve AISI 4145 alaşımlarının termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.....	28
Çizelge 3.4: Tekrarlanan deneylerde tespit edilen erime süresi	39
Çizelge 3.5: Farklı ağ büyüklüğündeki katı oranı ve sıcaklık değişimi	41
Çizelge 3.6: Farklı geçiş bölgesi parametrelerindeki erime sürelerinin deney sonucu ile kıyaslanması.....	43
Çizelge 4.1: Farklı ağ büyüklüğündeki katı oranı ve sıcaklık değişimi	48
Çizelge 5.1: KMETR ve HAD modelinin geometrik olarak kıyaslanması	61
Çizelge 5.2 : Taylor serisi ile tahliye süresinin hesaplanması.	65
Çizelge 5.3 : Heun yöntemi ile tahliye süresinin hesaplanması	66



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Farklı enerji kaynaklarının 2022 yılı dünya toplam enerji tüketimindeki payı [5].....	1
Şekil 1.2: ETRD’de kullanılan reaktörün görünümü [15]	3
Şekil 1.3 : ETHR’nin şematik gösterimi [19].....	4
Şekil 1.4 : FUJI’nin şematik gösterimi [20]	5
Şekil 2.1 : ETHR’nin şematik gösterimi (3000 MW _{th}) [19].....	11
Şekil 2.2 : KMETR’nin şematik gösterimi (100 MW _{th}) [39]	12
Şekil 2.3 : FLiBe tuzunun faz diyagramı [40]	13
Şekil 2.4 : Bozunum ısısı kaynaklı yakıt-tuzunun sıcaklığının zamana bağlı değişimi	15
Şekil 2.5 : Çalışmada kullanılan (a) Reaktör geometrisi, (b) Katı tıpa geometrisi....	16
Şekil 2.6 : Katı tıpanın etkisinde kaldığı ısı transfer mekanizmaları.....	17
Şekil 2.7: Model sınır şartları	20
Şekil 2.8 : Tahliye modelinin sınır şartları	21
Şekil 2.9: Geometrinin ayrıklaştırılması.....	22
Şekil 2.10: HAD kodunun çözüm adımları.	23
Şekil 3.1: Deney seti ve deneyde kullanılan ekipmanlar	26
Şekil 3.2: HITEC tuzu	27
Şekil 3.3: Tıpa kısmının da yer aldığı tahliye borusunun bir bölümü	28
Şekil 3.4: Deneyin başlangıcında tuzun erimesi için kullanılan fırın.....	29
Şekil 3.5: Tıpanın üst bölgesinde kullanılan ısı bantları.....	30
Şekil 3.6: Isıtıcıların güç düzenleyicileri	30
Şekil 3.7: Tıpanın üst bölgesinde kullanılan ısı kartuşu	31
Şekil 3.8: Deney düzeneğindeki ısı çiftlerinin konumlandırılması	32
Şekil 3.9: ADAM-6018 veri toplama modülü	32
Şekil 3.10: Azot iletim boruları	33
Şekil 3.11: Basınçlandırma tüpü ve basınçlandırma sistemi	33
Şekil 3.12: Tıpa soğutma sistemi.....	35
Şekil 3.13: Tahliye borusuna taş yünü ile ısı yalıtımının uygulanması	35
Şekil 3.14: 1. deney süresince zamana bağlı sıcaklık değişimleri	36
Şekil 3.15: 2. deney süresince zamana bağlı sıcaklık değişimleri	37
Şekil 3.16: 3. deney süresince zamana bağlı sıcaklık değişimleri	38
Şekil 3.17: Erimenin başlamasından tıpanın açılmasına kadar geçen sürede sistemin sıcaklık değişimi.....	39
Şekil 3.18: (a)Tıpa borusu modeli (b) 1/4 tıpa geometrisi ve boyutları	42
Şekil 3.19: Modelin (a) Başlangıç şartları (b) Sınır şartları.....	43
Şekil 3.20: Tahliye borusundaki sıvı oranının zamana bağlı değişimi.....	44
Şekil 3.21: Tahliye borusundaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi	45
Şekil 3.22: Tahliye borusundaki hızın zamana bağlı değişimi	46
Şekil 4.1: Katılaşma fazındaki sıvı oranının 3 boyutlu ve 2 boyutlu modellerde değişimi	49

Şekil 4.2 : Farklı duvar kalınlıklarında erime ve katılaşma oranları.	50
Şekil 4.3: Katılaşma fazında zamanla sıvı oranının değişimi	51
Şekil 4.4: Katılaşma fazında katı tıpanın sıcaklığının zamanla değişimi	52
Şekil 4.5: Katılaşma fazında zamanla sıvı oranının değişimi	52
Şekil 4.6: Katılaşma fazında zamanla sıcaklığın değişimi	53
Şekil 4.7: İşletme öncesi fazında sıcaklığın zamana bağlı değişimi.....	54
Şekil 4.8: İşletme öncesi fazında katı tıpanın sıvı kütlesinin zamana bağlı değişimi	55
Şekil 4.9: İşletme öncesi fazında katı tıpanın sıcaklığının zamana bağlı değişimi....	55
Şekil 4.10: Reaktör işletme fazında sıcaklığın zamana bağlı değişimi.....	56
Şekil 4.11: Reaktör işletme fazında katı tıpanın sıvı kütlesinin zamana bağlı değişimi.....	57
Şekil 4.12: Reaktör işletme fazında katı tıpanın sıcaklığının zamana bağlı değişimi	58
Şekil 4.13 : Kaza fazında zamanla sıvı oranının değişimi	59
Şekil 4.14 : Kaza fazında sıcaklığın zamana bağlı değişimi.....	59
Şekil 4.15 : Kaza fazında katı tıpanın sıvı kütlesinin zamana bağlı değişimi	60
Şekil 4.16 : Kaza fazında katı tıpanın sıcaklığının zamana bağlı değişimi	60
Şekil 5.1 : Analitik çözümde kullanılan değişkenler.	62
Şekil 5.2 : Yakıt-tuzunun tahliyesinin zamana bağlı değişimi	67
Şekil 5.3 : Tahliye süresinin boru çapına bağlı değişimi	69
Şekil 5.4 : Tahliye süresinin boru uzunluğuna bağlı değişimi.....	69

KÜÇÜK MODÜLER ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRÜ ACİL TAHLİYE SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞ DİNAMİĞİ VE DENEYSEL ANALİZİ

ÖZET

Acil tahliye sistemi (ATS), tahliye borusu, katı tıpa, tıpa soğutma sistemi ve tahliye tankından oluşan ergimiş tuz reaktörlerinde (ETR) kullanılan pasif güvenlik sistemlerinden biridir. Bu sistemin en önemli elemanlarından olan katı tıpa, normal çalışma koşullarında bir soğutucu sistemi yardımıyla katı formda tutulan bir tuzdur ve reaktör ile tahliye tankı arasında bariyer görevi görmektedir. Katı tıpanın görevi kaza anında pasif olarak eriyip açılarak reaktördeki yakıt tuzunun tahliyesini başlatmaktır. Katı tıpanın, normal çalışma şartlarında katı kalarak tıpa görevini görmesi ve reaktördeki yakıt tuzunun istenmeyen tahliyesini engellemesi de gerekmektedir.

Bir ETR tipi nükleer güç santralinde güç kesintisi kazası nedeniyle soğutmanın devamlılığının sağlanamadığı durumda, bozunum ısısı kaynaklı olarak reaktör içinde sıcaklık artacaktır. ATS çalışma senaryosuna göre reaktör içinde yükselen sıcaklık ile katı tıpa eriyecek ve yakıt tuzunun tahliyesi başlayacaktır. Reaktörü ve tahliye tankını birbirinden ayıran tıpa eriyince, yakıt tuzu tahliye borusundan tahliye tankına yerçekimi etkisi ile akacak ve bozunum ısısı tahliye tankından pasif ısı uzaklaştırıcı sistemler aracılığıyla çekilecektir. Bu senaryoda dikkat edilmesi gereken nokta, acil tahliye sisteminin reaktörü tahliye etme süresinin nükleer güvenlik prensipleri çerçevesinde hesaplanmasıdır. Bu bağlamda, reaktör içi sıcaklık reaktör malzemesi dayanım sıcaklığına erişmeden hem tıpanın erimesi hem de tahliyenin tamamlanması gerekmektedir.

Bu tez kapsamında, 100 MW termal güçteki küçük modüler ergimiş tuz reaktöründe (KMETR) katı tıpanın erime ve katılaşma süreleri hesaplanmış, tıpanın eriyerek açılması sonrasında tahliye süresi belirlenmiş ve sonuç olarak tıpanın pasif güvenlik sistemi olarak kabul edilip edilemeyeceği değerlendirilmiştir. Hesaplamalar deneysel olarak doğrulanmış hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak ANSYS Fluent kodu ile yapılmıştır.

İlk aşama olarak, kaza sonrası reaktör içi sıcaklığın malzeme dayanım sıcaklığına ulaşma süresi hem literatürdeki çalışmalar hem de bu araştırma kapsamında yapılan hesaplamalar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Analizler reaktörün 900 saniye içerisinde tahliye edilmesi gerektiğini göstermiştir.

İkinci aşama olarak, HAD sonuçlarının güvenilirliğini belirlemek için nümerik kodun doğrulaması yapılmıştır. Bu kapsamda Çek Teknik Üniversitesi'nin Nükleer Enerji Laboratuvarında kurulan deney setinde HITEC tuzu kullanılarak, erime süresi deneysel olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmanın birebir modeli ANSYS Fluent kodunda oluşturularak, farklı geçiş bölgesi parametreleri için erime süreleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Geçiş bölgesi parametresi olarak 10^5 değeri kullanıldığında hesaplamaların hem daha düşük hata oranı ile sonuç verdiği hem de kodun daha stabil çalışarak kolay yakınsadığı

belirlenmiştir. Bu nedenle, bu araştırma kapsamındaki diğer nümerik hesaplamalar belirlenen bu geçiş bölgesi parametresi değeri ile yapılmıştır.

Üçüncü aşama olarak KMETR geometrisine uygun model ve malzemeler kullanılarak katılaşma ve erime simülasyonları farklı reaktör işletme koşulları için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan HITEC tuzu yerine FLiBe tuzu ve AISI 4145 alaşım çelik yerine Hastelloy-N alaşımı kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, katı tıpa tuzunun katılaşarak katı tıpa formu almasının 2700 saniye sürdüğü ve kazaya cevap olarak katı tıpanın erimesinin 400 saniyede tamamlandığı belirlenmiştir. Erime, duvar tarafından başlamış ve tıpanın duvar ile teması kalmayana kadar devam etmiştir. Duvar teması kalmayan tıpa, yer çekimine bağlı olarak düşerek açılmıştır.

Son aşamada, reaktör içerisindeki yakıt tuzunun tamamının reaktörden tahliye tankına tahliye süresi hesaplanmıştır. 3 farklı yöntem kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Oluşturulan diferansiyel denklem öncelikle analitik olarak sonrasında ise Taylor serisi ve Heun nümerik yöntemleri ile çözülmüştür. Son olarak, ANSYS Fluent kodu ile simülasyon yapılarak tahliye süresi bulunmuştur. Analitik çözüm referans alındığında, simülasyonun %3 fark ile tahliye süresini hesapladığı görülmüştür. Analitik yöntem dikkate alındığında tahliyenin 166 saniyede tamamlandığı görülmüştür.

Çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, katı tıpa erime süresi 400 s ve tahliyenin tamamlanma süresi 166 s dikkate alındığında tahliyenin 566 saniyede tamamlandığı ve bu sürenin limit zaman olarak belirlenen 900 saniyenin altında kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, acil tahliye sisteminin çalışma gerekliliklerini taşıdığı ve sistemin pasif olarak çalışabildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ETR'lerde güvenlik analizi için HAD uygulaması, tamamlayıcı yaklaşımların kullanıldığı doğrulama çalışmaları ile kanıtlanmıştır. Deneysel çalışmalar ve analitik çözümler, HAD modelleri tarafından üretilen sonuçların karşılaştırılması ve doğrulanması için ölçüt olarak hizmet etmiştir. Bu başarılı doğrulamalar, HAD metodolojisinin ETR'lerde güvenlik değerlendirmeleri için güvenilir bir şekilde kullanılabileceğine dair kanıtlar oluşturmakta ve literatüre önemli katkı sunmaktadır.

THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EMERGENCY DRAINING SYSTEM OF A SMALL MODULAR MOLTEN SALT REACTOR

SUMMARY

The mitigation of the environmental impact of energy production and consumption and ensuring sustainable energy production requires the abandoning of carbon-emitting energy sources. Nuclear energy, being a base load energy source, stands out in this context. In light of the lessons learned from the Fukushima accident, the safety systems of advanced nuclear power plants are predominantly based on passive systems. This approach aims to prevent accidents even in the event of loss of power.

Molten Salt Reactors (MSRs), one of the advanced nuclear power plants, are also equipped with passive safety systems. The Emergency Draining System (EDS) is one of the passive safety systems utilized in MSRs. It consists of a draining pipe, freeze plug, cooling system, and draining tank. The freeze plug, a crucial component of this system, is a salt kept in solid form under normal operating conditions, thanks to a cooling system, and serves as a barrier between the reactor and the draining tank. In the event of an accident, the solid plug's role is to passively melt, open, and to initiate the draining of the fuel salt in the reactor. It is essential for the freeze plug to maintain its solid form under normal operating conditions to prevent unwilling draining of fuel salt from the reactor.

In the case of a loss of power accident in a MSR, where the continuity of cooling cannot be maintained, the temperature inside the reactor will increase due to decay heat. According to the EDS operating scenario, the rising temperature inside the reactor will cause the freeze plug to melt, initiating the draining of fuel salt. Once the plug between the reactor and the draining tank melts, the fuel salt will flow through the draining pipe to the draining tank due to gravity, and decay heat will be removed from the draining tank through passive heat removal systems. In this scenario, it is crucial to calculate the time required for the EDS to drain the reactor in accordance with nuclear safety principles. In this context, the plug must melt and the draining must be completed before the reactor material reaches the degradation temperature.

Within the scope of this thesis, the EDS was designed for a Small Modular Molten Salt Reactor (SMMSR) with a thermal power of 100 MW. Large-scale MSRs consist of modules with multiple heat exchangers, pumps, and freeze plugs. The number of modules varies depending on the reactor power. A single heat exchanger, a pump, and a freeze plug are sufficient for the EDS developed within the scope of this research. However, for nuclear safety redundancy principle, it was decided to use two plugs and two draining pipes instead of a single plug. This ensures that if one of the plugs fails to open for any reason, the draining will still occur through the second draining pipe. In this thesis, the melting and solidification time of the freeze plug in SMMSR with a thermal power of 100 MW were calculated. The draining time after the plug opening was determined, and ultimately, whether the plug could be accepted as a passive safety

system was evaluated. The calculations were performed using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method with the ANSYS Fluent code.

In the first step, the time for the post-accident reactor temperature to reach the material degradation temperature was calculated, considering both the studies in the literature and the calculations conducted in this research. The analyses showed that the reactor needed to be drained within 900 seconds.

As the second step, verification of the numerical code was performed to determine the reliability of the CFD results. For this purpose, an experiment setup was established in the Nuclear Energy Laboratory of the Czech Technical University and the melting and solidification time for freeze plug made out of HITEC salt was experimentally calculated. It was observed that the solidification time is 1000 seconds. Once it was ensured that the solid plug form was created, the cooling system was turned off, and the heating process started with the heaters. The melting process was completed when the plug lost contact with the wall of the pipe and fell off due to gravity. In three repeated experiments, melting time was found as 1239, 1340, and 1290 seconds, respectively. The average melting time was determined as 1290 seconds. A one-to-one model of the experimental study was created in the ANSYS Fluent code and melting time was calculated for several mushy zone parameters. The results were compared with the experimental results. Selecting small mushy zone parameters such as 10^3 - 10^4 resulted in an average error rate of approximately 40%. Conversely, using large mushy zone parameters such as 10^6 - 10^7 yielded lower error rates. However, high mushy zone parameter values resulted in unstable code behavior and convergence difficulties. When the mushy zone parameter was set to 10^5 , it was determined that the calculations provided results with both lower error rate and stable convergence. Therefore, other numerical calculations in this research were conducted with this specified mushy zone parameter value.

In the third step, simulations of solidification and melting were performed using a model and materials suitable for the SMMSR geometry under different reactor operating conditions. FLiBe salt and Hastelloy-N alloy were used instead of the HITEC salt and AISI 4145 alloy used in the experiments. The reason for using HITEC salt instead of FLiBe salt for the experiments is the low melting temperature of HITEC salt. Thus, there was no need to work at high temperatures, and the use of high-capacity heaters was eliminated. Additionally, the use of materials with lower material strength temperature became possible. Initially, it was established that the simulation outcomes were independent of the model's mesh structure and dimensions. Subsequently, potential operational conditions encountered by the plug were investigated under four primary headings. In the solidification phase, the liquid salt was cooled with air for 2700 seconds. At the end of this phase, plug formation with an average thickness of 44 mm was achieved. Due to the wall effect of cooling, it was evident that the plug exhibited greater thickness on the wall side. Following the formation of the solid form, the evaluation of the plug was analyzed in the simulation until the reactor commenced full power operation. During the second phase, no unwilling melting occurred. Subsequently, while the reactor was operating at full power, the variation in the liquid/solid ratio of the plug was examined, proving that the plug thickness decreased but there was no unwilling opening. Finally, the accident phase was investigated. Melting started from the wall side, continuing until the plug lost contact with the wall. Upon losing contact with the wall, the plug fell off to the draining tank due to gravity. The plug opening time was calculated as 400 seconds.

In the final step, the time required for the complete draining of the fuel salt from the reactor to the draining tank was calculated. Draining time was calculated using three different methods, and the results were compared. First, the differential equation was created and solved analytically, then the equation was solved using Taylor series and Heun numerical methods, and finally, the draining time was calculated using the ANSYS Fluent code. When the analytical solution was considered as a reference, it was observed that the simulation calculated the draining time with a 3% difference. Considering the analytical method, it was found that the draining was completed in 166 seconds.

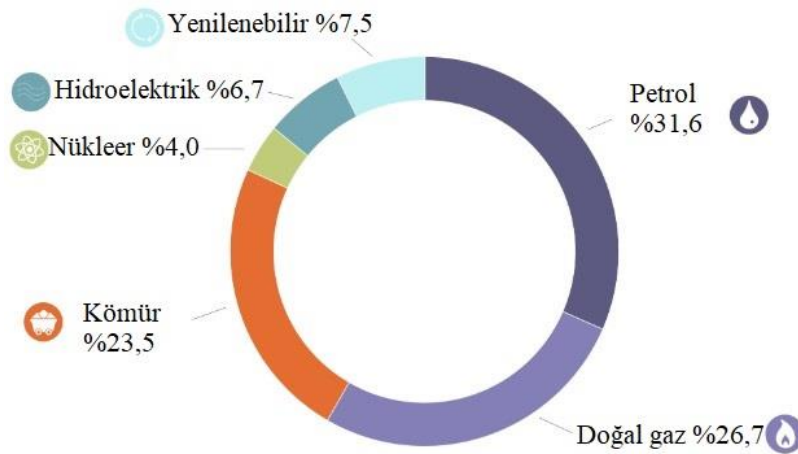
In addition to these calculations, the effect of the diameter and length of the draining pipe on the draining time was also examined. When pipe diameters range from 38 to 100 mm, the draining time decreased as expected with increasing the diameter. However, it was noted that as the diameter increased, the melting time of the plug increased. Therefore, 38 mm was selected. Additionally, draining times were calculated for varying pipe lengths ranging from 0.5 to 3 m. It was determined that as the pipe length increased, the draining time decreased. Conversely, it was also noted that excessively long draining pipe would pose positioning challenges. Therefore, the pipe length of 2 m was selected.

The results showed that the draining of the reactor was completed in 566 seconds. This value is below the specified time limit of 900 seconds. Consequently, it was concluded that the developed EDS meets the operational requirements and can passively operate. Furthermore, the application of CFD for safety analysis in MSRs has been substantiated through validation studies that employs complementary approaches. Experimental studies and analytical solutions have served as benchmark for comparing and verifying the results generated by the CFD models. The successful validation studies performed in this thesis offers encouraging evidence that the CFD methodology can be reliably employed for safety assessments in MSRs, thereby making a significant contribution to the existing literature in this field.



1. GİRİŞ

Küresel ısınma, dünyanın 21. yüzyılda karşılaştığı en büyük çevresel problemlerden biri olarak kabul edilebilir. 8 milyarı aşan dünya nüfusunun [1] enerji tüketimi her geçen gün artmakta, bu durum da karbon salımlarını ve buna bağlı olarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Yapılan orta vadeli projeksiyonlara göre, dünya nüfusu %30 artışla 2100 yılına kadar 10,4 milyara ulaşacaktır [2]. Ayrıca, yaşam standartlarının yükselmesi, günümüzde elektriğe ulaşamayan bölgelerin elektrikle buluşması ve soğutma-ısıtma sistemlerinin yaygınlaşması elektrik talebini daha da artıracaktır [3]. Her iki durum da enerji tüketiminin yakın gelecekte azalmayacağını bilakis artacağını göstermektedir. Küresel ısınmayı yavaşlatmak ve ortalama sıcaklık artışını sınırlamak için 2015 yılında 195 ülkenin onayıyla kabul edilen Paris İklim Anlaşması 2016 yılında yürürlüğe girmiş ve bir çok farklı vizyon sunmuş olmakta birlikte, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelere göre 2 °C'lık bir artış ile sınırlamayı hedeflemektedir [4]. Anlaşma ayrıca temiz enerjiye geçişin gerekliliğinin de altını çizmektedir. Hedeflere paralel olarak dünya ülkelerinin enerji politikaları gözden geçirildiğinde, Şekil 1.1'de ifade edildiği gibi hali hazırda dünya genelinde tüketilen enerjinin büyük bir kısmının karbon salımlı fosil yakıtlardan üretildiği görülmektedir [5].



Şekil 1.1 : Farklı enerji kaynaklarının 2022 yılı dünya toplam enerji tüketimindeki payı [5]

Enerji ve çevre ilişkisinin yanı sıra, üzerinde durulması gereken diğer bir konu da enerji ve politika ilişkisidir. 2022’de Rusya’nın Ukrayna’yı işgali ile başlayan enerji krizi, ülkelerin enerji politikalarını tekrardan gözden geçirmelerini zorunlu hale getirmiş ve birçok ülke doğalgaza ve Rusya’ya olan enerji bağımlılığını azaltmak istemiştir.

Yukarıda belirtilen her iki problemin çözümü de ülkelerin fosil kaynak kullanımını azaltarak, temiz ve yenilenebilir enerji kullanımını artırması noktasında ortaklaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kapasitesi dünya genelinde artsa da yenilenebilir enerjinin emre amade bir enerji kaynağı olmaması sebebiyle ciddi bir dezavantaja sahip olduğu bilinmektedir. Bu enerji kaynakları, uygun hava şartları olmadığında kurulu gücün çok uzağında enerji üretebilmektedir. Nükleer enerji, hem emre amade enerji kaynağı olması hem de karbon salımı yapmaması ile önemli bir alternatiftir.

Diğer taraftan, Fukuşima Daiichi nükleer güç santralinde yaşanan kazadan sonra, 2011 yılından 2013 yılına kadar nükleer güç üretimi azalmıştır [6]. Fukuşima kazasından öğrenilen dersler neticesinde tasarlanan yeni nesil nükleer santraller, nükleer enerjiye olan güvenin tekrar kazanılmasında önemli rol oynayacaktır. Yeni nesil nükleer santraller, enerji kullanımına dayalı yeni aktif güvenlik sistemlerinin yanı sıra, herhangi bir güç kaybı durumunda kendiliğinden devreye girebilecek pasif güvenlik sistemleri ile de donatılmıştır [7], [8]. Yeni nesil reaktörler için çok farklı tasarımlar üzerine çalışılsa da verimlilik, güvenlik ve atık yönetimi gibi parametreler üzerinden yapılan değerlendirmeler sonucunda 6 reaktör tasarımı ön plana çıkmıştır. Bu tasarımlardan biri sıvı yakıtı ile diğer teknolojilerden ayrılan Ergimiş Tuz Reaktörüdür (ETR) [9].

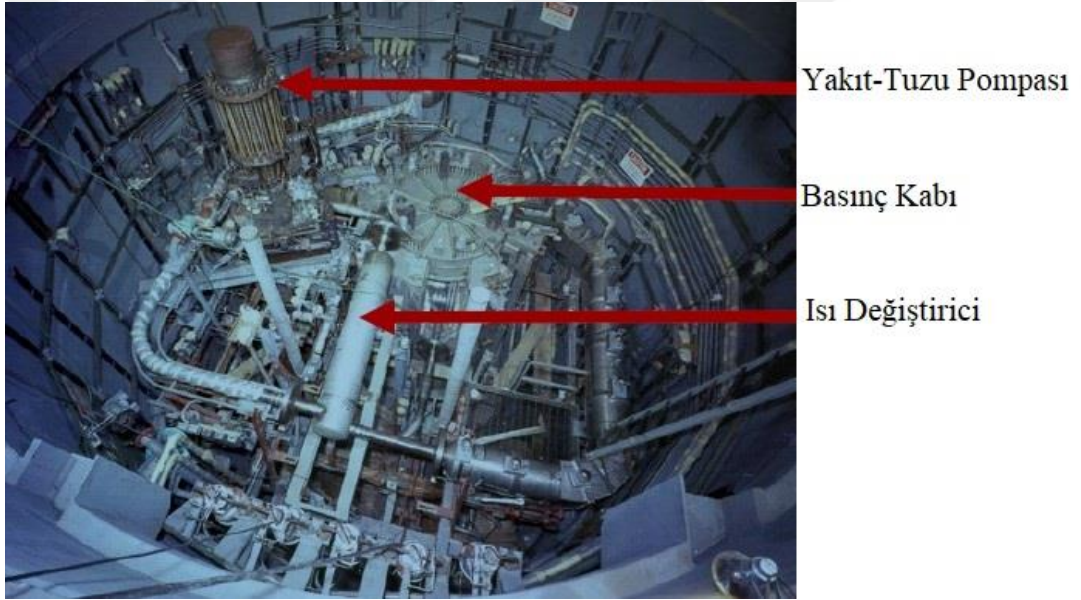
1.1 Dünden Bugüne Ergimiş Tuz Reaktörleri

Ergimiş tuzlar, solar enerji sistemlerinde [10] ve nükleer hibrit enerji sistemlerinde [11], [12] enerji depolama ortamı ve ETR güç üretimi sistemlerinde soğutucu akışkan olarak [13] kullanılmaktadır.

Ergimiş tuzların nükleer santrallerde kullanılma fikri ilk olarak Amerikan Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı (ORNL) çalışmalarında görülmüştür. Bugünkü çalışmaların temeli 1940’ların sonunda ORNL’de yapılan çalışmalara dayanmaktadır. 1970 yılına

kadar ORNL’de iki farklı projede ETR tasarımı yapılmış ve işletilmiştir. Bu projeler, Uçak Reaktörü Deneyleri ve Ergimiş Tuz Reaktör Deneyleridir (ETRD) [14].

ETRD’de 8 MW_{th} güçte, grafit yavaşlatıcı kullanan, reaktör çıkış sıcaklığı 700 °C olan bir reaktör tasarlanmıştır (Şekil 1.2). 1966 yılında tam güçte işletilen reaktör 1969 yılında kapatılmıştır. 2500 saat boyunca tam güçte çalışan reaktöre, çalışması sırasında yakıt yüklemesi yapılabilmektedir. Bu deneyler sonucunda, ergimiş tuzların nükleer güç teknolojilerinde kullanımına ilişkin birçok soru yanıt bulmuştur. Tuz kaynaklı korozyonun, tolerans sınırları içerisinde olduğu (krom değeri artışı 3 yılda sadece 38-85 ppm olarak kayıtlara geçmiştir), reaktörün çalışması sırasında ergimiş tuzun kararlı davrandığı ve reaktör malzemesi olarak seçilen Hastelloy-N alaşımının beklenildiği gibi iyi performans sergilediği tespit edilmiştir [14].

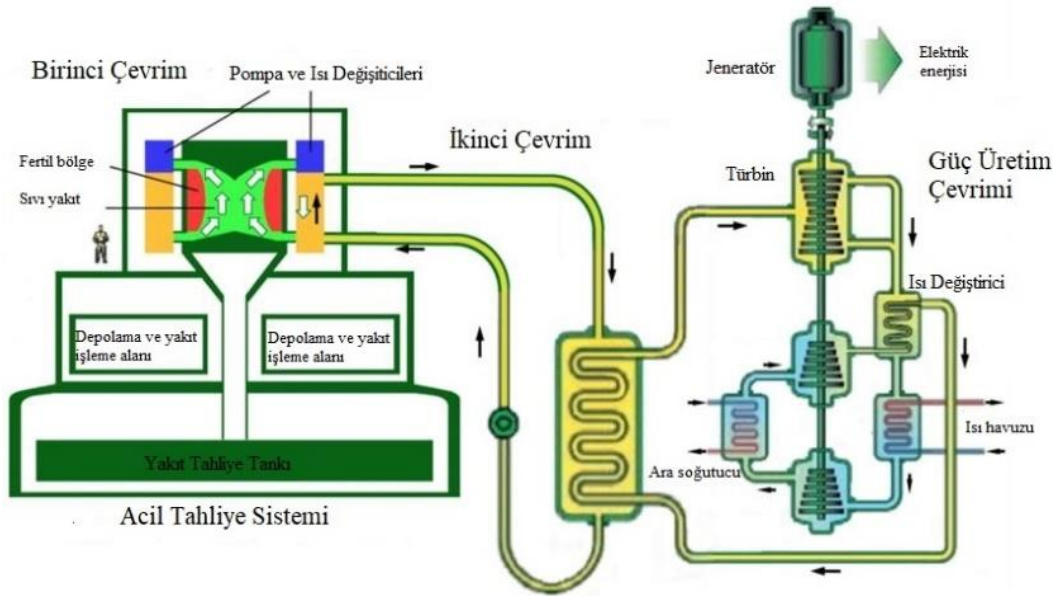


Şekil 1.2: ETRD’de kullanılan reaktörün görünümü [15]

ORNL’deki ETR ile ilgili çalışmalar su soğutmalı reaktörlerin daha güvenli ve kolay işletilebilir oldukları düşüncesiyle ve maddi nedenler ile sonlandırılmıştır. Ancak, su soğutmalı reaktörlerde kaza durumunda, yüksek sıcaklıktaki su buharı zirkonyum zarf ile reaksiyona girerek hidrojen üretimine sebep olabilmektedir. Bu durum 2011’de Fukuşima kazasında olduğu gibi uygun önlemler alınmaz ise hidrojen patlamasını tetikleyebilmektedir [16].

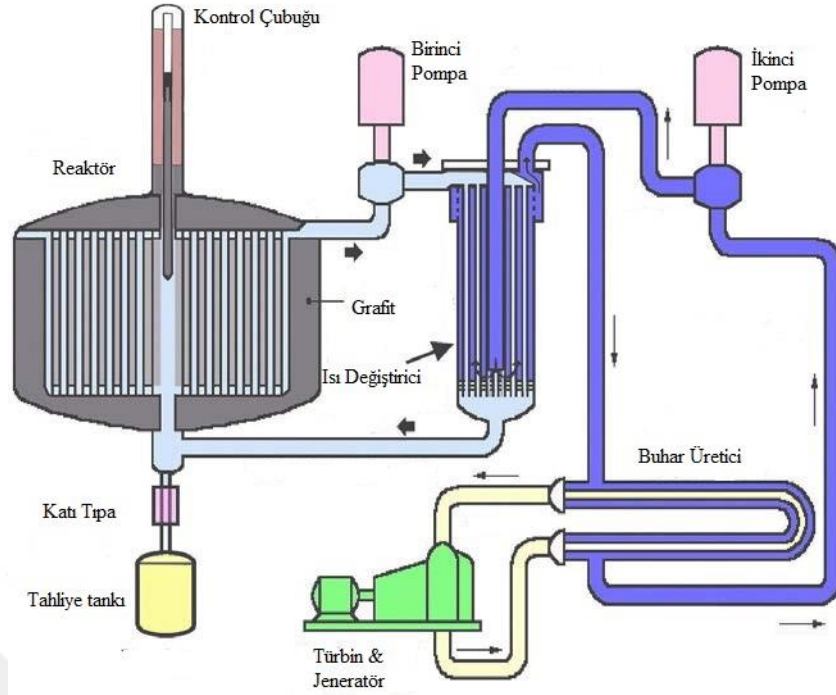
En kapsamlı ETR çalışmalarından biri, 2015 yılında 15 farklı enstitünün katılımı ile hazırlanan EURATOM SAMOFAR ve devamında SAMOSAFAER projeleri kapsamında yapılmıştır. Proje, yakıtın sıvı ve soğutucu akışkanın tuz olduğu hızlı

nötron spektrumlu 3000 MW_{th} güçteki Ergimiş Tuz Hızlı Reaktörü'nün (ETHR) yüksek güvenli olarak geliştirilmesini amaçlamıştır. Lityum, toryum ve uranyum florürden oluşan sıvı yakıt ve soğutucunun yüksek kaynama noktasına sahip olması reaktörün atmosfer basıncında çalışmasına olanak sağlamıştır [17]. Toryum yakıt çevrimi ile çalışacak reaktör üretken tiptedir. Başlangıç fisil yakıt olarak ²³³U, zenginleştirilmiş uranyum veya uranyum ötesi element seçeneklerinden biri kullanılabilir. ETHR'nin günlük yakıt arıtma, hızlı nötron spektrumu ve tuz sirkülasyonu özelliklerine sahip olması, yakıtın yüksek oranda yanmasına ve daha az yüksek seviyeli atık oluşmasına olanak sağlamaktadır [18]. Şekil 1.3'de ETHR'nin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.3 : ETHR'nin şematik gösterimi [19]

Japonya'da ise, ETRD'ye benzer bir tasarım fikri ile FUJI reaktörü geliştirilmektedir. FUJI, 450 MW_{th} güçte, soğutucu akışkan olarak FLiBe tuzunu kullanan, toryum-uranyum yakıt çevrimi ile çalışacak termal bir reaktördür. ETHR'den farklı olarak FUJI'de yavaşlatıcı kullanılarak termal nötron spektrumu elde edilecektir. Ayrıca reaktivite kontrolü için, kontrol çubukları gibi geleneksel reaktivite kontrol sistemleri tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra yakıt tuzunun reaktör çıkış sıcaklığı 980 K gibi yüksek bir değer olduğu için, güç üretiminin yanı sıra hidrojen üretimi ve tuzdan arındırma uygulamaları da planlanmıştır [20]. Şekil 1.4'de FUJI reaktörünün şematik gösterimi paylaşılmıştır.



Şekil 1.4 : FUJI'nin şematik gösterimi [20]

Yukarıda bahsedilen iki tasarımın yanı sıra ABD ve Kanada başta olmak üzere diğer ülkelerde de özel enerji firmaları tarafından ETR tasarımları geliştirilmektedir. Çizelge 1.1'de farklı projeler ve temel teknik özellikleri özetlenmiştir [21].

Çizelge 1.1 : ETR Projeleri ve Teknik Özellikler

İsim	Organizasyon	Soğutucu	Yavaşlatıcı	Ülke
IMSR-400	Terrestrial Enerji	Flörür Tuzu	Grafit	Kanada
LFTR	Flibe Enerji	Flörür Tuzu	Grafit	ABD
Mk1 PB-FHR	California Üniversitesi	Flörür Tuzu	Grafit	ABD
MSFR	CNRS	Ergimiş Tuz	Yok	Fransa
MSR-FUJI	ITMSF	Flörür Tuzu	Grafit	Japonya
MSTW	Seaborg Teknoloji	Ergimiş Tuz	Grafit	Danimarka
SmAHTR	ORNL	Flörür Tuzu	Grafit	ABD
ThorCon	Thorcon	Ergimiş Tuz	Grafit	ABD

Ülkemizde de, 2017 yılında TÜBİTAK öncülüğünde düzenlenen çalıştay sonucunda, toryum tabanlı, hızlı spektrumlu, üretken ve düşük güçte çalışan ETR'nin tasarım çalışmalarına başlanmasına karar verilmiştir [22].

Son yıllarda ETR teknolojilerinin geliştirilmesinde görülen bu momentumun sebebi, ETR'lerin sahip olduğu avantajlardır. Yakıtın sıvı halde olması, yakıtın erimesiyle oluşacak kaza riskini ortadan kaldırmaktadır [23]. Ayrıca, yakıt ile tuzun homojen karışmasından dolayı yüksek verimde ısı transferi sağlanmaktadır. Tuzun yüksek kaynama noktasına sahip olması, reaktörün atmosfer basıncında çalışabilmesini bu da daha kolay reaktör kabı imalatını ve daha düşük radyasyon kaçağı olasılığını gündeme getirmektedir [24]. Son olarak, reaktörün negatif sıcaklık katsayısına sahip olması, reaktivite kontrolünün pasif olarak yapılabilmesini mümkün kılmaktadır [25], [26].

1.2 Acil Tahliye Sistemi

Acil Tahliye Sistemi (ATS), bir kaza durumunda, pasif olarak devreye girerek ETR'deki yakıt-tuzunun kritik altı olacağı bir ortama tahliye edilmesini ve bu ortamda pasif olarak soğutulmasını sağlayan bir sistemdir [27]. ATS, katı tıpa, tıpa soğutma sistemi, tahliye borusu ve tahliye tankından oluşmaktadır. Katı tıpa, reaktörün normal çalışması sırasında katı kalarak istenmeyen bir tahliyeyi engellemektedir. Tıpanın katı kalabilmesi için tıpanın soğuk hava ile devamlı soğutulması gerekmektedir. Kaza durumunda veya gerekli bakım durumlarında, reaktör kapatılır, tıpa soğutması durdurulur ve reaktör içerisindeki bozunum ısısı ile tıpanın pasif olarak erimesi sağlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus yakıt-tuzunun sıcaklığı, malzeme dayanım sıcaklığına erişmeden önce tahliyenin tamamlanması gerekliliğidir. Eriyen tıpanın tahliye borusunun duvarları ile bağlantısı kesildiğinde tıpa açılır ve yakıt-tuzunun reaktörden tahliye tankına tahliyesi başlar. Tahliye tankı pasif soğutma sistemleri ile donatılmıştır ve yakıt tuzunun kritik altı kalmasını garanti edecek şekilde tasarlanmıştır. Bozunum ısısı, pasif olarak tahliye tankından uzaklaştırılarak uzun dönemli soğutma garanti altına alınmıştır. Sistemin çalışma prensibinden dolayı, ATS'ler sadece sıvı-yakıtlı ETR'lerde kullanılabilir [28]. ATS'nin en kritik elemanı, gerektiğinde tahliyenin başlamasını pasif olarak sağlayacak olan katı tıpadır [29]. Katı tıpanın tasarımı yapılırken, aşağıdaki iki önemli hususun sağlandığından emin olunmalıdır.

- ✓ Normal çalışma durumunda, reaktördeki ani sıcaklık dalgalanmalarından etkilenmeyerek katı kalabilmeli ve tıpa görevini sürdürmelidir.
- ✓ Kaza durumunda, reaktör içi sıcaklık, malzeme dayanım sıcaklığına erişmeden erimeli ve tahliyenin başlamasını sağlamalıdır.

ATS için ETRD çalışmalarından bugüne farklı tasarımlar üzerine çalışılmıştır. ORNL’de yapılan deneysel çalışmada yatay ve düzleştirilmiş tasarım üzerine odaklanılmış, sistem aynı zamanda ısıtıcı ile desteklenmiştir. Isıtıcının erimeyi hızlandırması ile tıpanın 300 saniye içinde eridiği görülmüştür [30], [31]. Tiberga ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada tek ve çoklu tıpa tasarımlarının erimeye olan etkisini incelemişler ve tekli tıpa tasarımının kaza durumunda daha çabuk açılacağı sonucuna varmışlardır [17]. Bu çalışmada ayrıca istenmeyen bir açılmanın engellenebilmesi için reaktör-tıpa mesafesi tespit edilmiş ve bu mesafenin en az 10 cm olması gerektiği bildirilmiştir. Kuncoro (2020) araştırmasında tıpanın farklı açılarda olmasının erime süresine etkisini hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile incelemiş, tıpanın yatayla -30° yaptığı açıda en hızlı erimenin gerçekleştiğini göstermiş ve bu zamanı 200 saniye olarak bulmuştur [32]. İlham ve Okawa (2022) yaptıkları çalışmada erime zamanını önce HAD simülasyonları ile hesaplamışlar, sonrasında ısı iletim teorisinden yola çıkarak oluşturdukları analitik denklemi çözümleyerek erime süresini bulmuşlardır [33]. Sonuç olarak, HAD sonuçları ile analitik çözümün sonuçlarının uyumlu olduğunu bularak, katı tıpanın erime süresinin hesaplanmasında HAD metodunun kullanılabileceğini ispatlamışlardır. Diğer bir çalışmada Jiang ve diğ. (2020) katı tıpanın üzerine kanatlar koyarak ısı transferini artırmayı amaçlamışlardır. Yalnız, bu yeni tasarım erimenin değil, tıpanın oluşum aşaması (katılaşması) için etkili olmuş, tuzun katılaşması hızlanırken, oluşan tıpanın erimesi ısı kaybından dolayı gecikmiştir [34].

Katı tıpa erime zamanının yanı sıra, tıpa eridikten sonra, yakıt-tuzunun reaktörden tahliye tankına tahliye süresinin de hesaplanması gerekmektedir. Böylece, kaza durumunda reaktör kapatıldıktan ne kadar süre sonra tahliyenin tamamlanacağı belirlenebilecektir. Literatürde, yakıt-tuzunun tahliye süresinin hesaplanmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Tano ve diğ. (2020), ETHR tasarımı için yaptıkları çalışmada, kaza durumunda tıpların tamamının açılması veya bir kısmının açılması üzerine 3 farklı senaryo oluşturmuşlardır [35]. Her bir senaryo için yakıt-tuzunun sıcaklık ve hız analizlerini yaparak, bu parametrelerin tahliye süresini

nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Az sayıda tıpanın açılması senaryosunda, tahliye süresinin arttığı ve yakıt-tuzunun reaktör içerisinde daha uzun süre bulunmasına bağlı olarak reaktör içi sıcaklığın yükseldiği belirlenmiştir. Diğer bir çalışmada Wang ve diğ. (2016) korunum denklemlerini analitik olarak çözerek tahliye süresini hesaplamışlardır [36]. Ayrıca, yazarlar bu çalışmada farklı tıpa çaplarının ve tahliye borusunun uzunluğunun tahliye süresine etkisini de incelemişlerdir. Boru uzunluğu 2 m iken ve tıpa çapı 0,01 m'den büyük olduğunda, tahliye süresinin önemli derecede arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, tıpa çapı 0,2 m iken, boru uzunluğunun artması ile tahliye süresinin kısaldığı ifade edilmiştir.

1.3 Araştırmanın Hedefleri

Literatür tarandığında, tahliye süresi ile ilgili çalışmaların iki grup altında toplandığı görülmektedir. Birinci grup, katı tıpanın erime süresini ve erimesini etkileyen parametreleri araştıran çalışmalardır. İkinci grup ise tıpa eridikten sonra yakıt-tuzunun tahliyesini inceleyen çalışmalardır. Bu çalışmalarda, araştırmacılar farklı reaktör tasarımlarını referans almışlardır (ETHR, ETRD, FUJİ, vb.). Bu tasarımlar hep yüksek güçteki reaktör tasarımlarıdır. Hem erime süresinin hem de tahliye süresinin aynı tasarım için çalışıldığı bir araştırma bulunmamaktadır. Ayrıca, Küçük Modüler Ergimiş Tuz Reaktöründe (KMETR) kullanılacak ATS için de literatürde bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu doktora tez çalışmasında, literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesine yönelik bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle 100 MW_{th} güçteki KMETR için ATS tasarlanmış ve bu tasarıma uygun olarak katı tıpa ve tahliye borusu modellenmiştir. Nümerik olarak katı tıpanın erime süresinin tespitinden sonra yakıt-tuzunun tamamının reaktörden tahliye tankına tahliye süresinin hesaplanması planlanmıştır. Bu bağlamda, bir kaza durumunda reaktör içerisindeki yakıt-tuzunun tamamının tahliye süresinin tespiti hedeflenmiştir. Bu şekilde, tıpanın aktif bir sisteme ihtiyaç duymadan sadece bozunum ısısı kaynaklı eriyip erimeyeceği ve bozunum ısısı kaynaklı malzeme bozunumu olmadan tahliyenin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği bulunmak istenmiştir. Katı tıpa özelinde ATS'nin pasif bir güvenlik sistemi olarak kullanılıp kullanılamayacağı, bu soruların cevabında gizlidir. Ayrıca, analizlerde kullanılan ANSYS Fluent HAD kodunun katılaşma-erime modellerinde ne kadar doğrulukla sonuç verdiğinin tespit edilmesi için HAD sonuçlarının doğrulanması

amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, bir deney sistemi kurulması ve katılaşma-erime deneyleri yapılması planlanmıştır. Özellikle HAD kodlarında erime-katılaşma modülünde kullanılan ve katı-sıvı fazları arası bölgenin davranışını belirleyen geçiş bölgesi parametresinin doğru değerinin tespiti üzerine odaklanılmıştır.

1.4 Çalışmanın Ana Hatları

Tezin 2. Bölümünde çalışmada kullanılan nümerik yöntem ve kullanılan HAD kodu ANSYS Fluent tanıtılmış, ayrıca matematiksel modelin nasıl oluşturulduğu, fiziki şartların modele nasıl uygulandığı ve entalpi-gözenek yöntemi detaylandırılmıştır.

3. Bölümde bu çalışmada kullanılan ANSYS Fluent kodunun doğrulanmasına yönelik yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiş ve deney sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması ve doğru geçiş bölgesi parametresinin tespiti aktarılmıştır.

4. Bölümde, katı tıpanın tasarımına yönelik çalışmalar paylaşılmıştır. Bu kapsamda sonuçların ağ yapısından ve model boyutundan bağımsızlık çalışması, optimum duvar kalınlığının belirlenmesi çalışması, tıpanın karşılaşması muhtemel farklı çalışma şartlarında (Katılaşma Fazı, İşletme Öncesi Fazı, Reaktör İşletme Fazı ve Kaza Fazı) tıpanın sıcaklık ve sıvı-katı oranı değişimlerinin incelenmesi ve katılaşma ve erime süreleri hesabı detaylandırılmıştır.

5. Bölümde ise katı tıpa eridikten sonra, yakıt-tuzunun reaktörden tahliye tankına tahliye süresi ve süreye etki eden tahliye borusu geometri parametrelerine dair analitik, nümerik ve HAD yöntemleri ile ayrı ayrı yapılan incelemeler anlatılmıştır.

6. Bölümde ise, sonuçlar tartışılmış, çalışmanın sınırları ve gelecek çalışmalar için öneriler paylaşılmıştır.

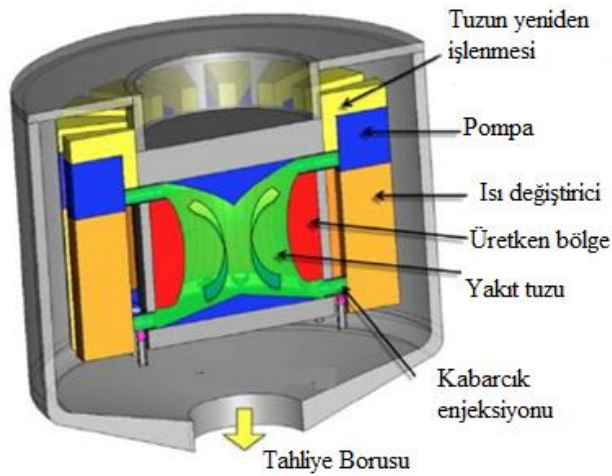


2. NÜMERİK YÖNTEM

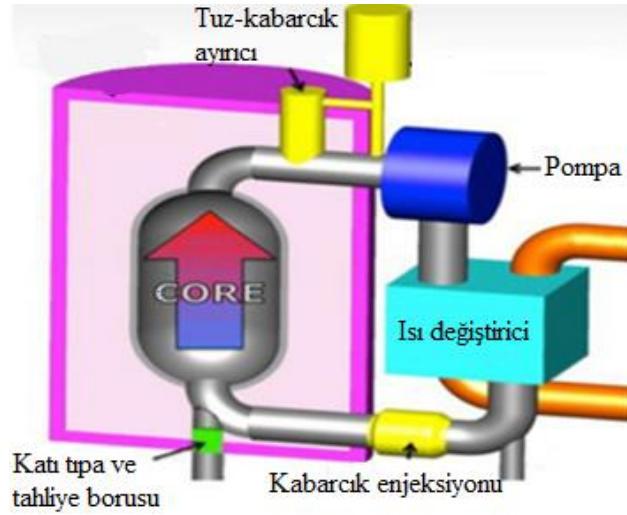
Bu bölümde, öncelikle matematiksel modelin temelini oluşturan KMETR'nin geometrisi ve geometriye bağlı ATS tasarımına nasıl karar verildiği açıklanmıştır. Daha sonra, oluşturulan matematiksel model, erime ve katılaşma için önemli olan korunum denklemleri ve entalpi-gözenek yöntemi detaylandırılmıştır.

2.1 Katı Tıpa ve Tahliye Borusunun Tasarım Parametreleri

KMETR, SAMOSAFAER projesi ile tasarlanan $3000 \text{ MW}_{\text{th}}$ güçteki hızlı spektrumlu ETHR'nin daha düşük güçteki küçük modüler tasarımıdır. 16 modülden oluşan ETHR'nin her modülünde bir adet pompa, ısı değiştirici ve atık yönetim sistemi bulunmaktadır. Modül sayısı reaktör gücü ile paralel olarak artırılıp azaltılabilmektedir. Bu çalışmanın konusu olan KMETR, $100 \text{ MW}_{\text{th}}$ güçte tek bir modülden oluşmaktadır. Dolayısıyla, reaktörde tek bir pompa, ısı değiştiricisi ve atık yönetim sistemi bulunmaktadır [37]. Bu bağlamda, KMETR ETHR'den hacimce 9 kat, güç olarak 30 kat daha küçüktür. ETHR'nin ve KMETR'nin şematik gösterimi sırasıyla Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu iki tasarımın temel teknik özellikleri Çizelge 2.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.1 : ETHR'nin şematik gösterimi ($3000 \text{ MW}_{\text{th}}$) [19]



Şekil 2.2 : KMETR'nin şematik gösterimi (100 MW_{th}) [39]

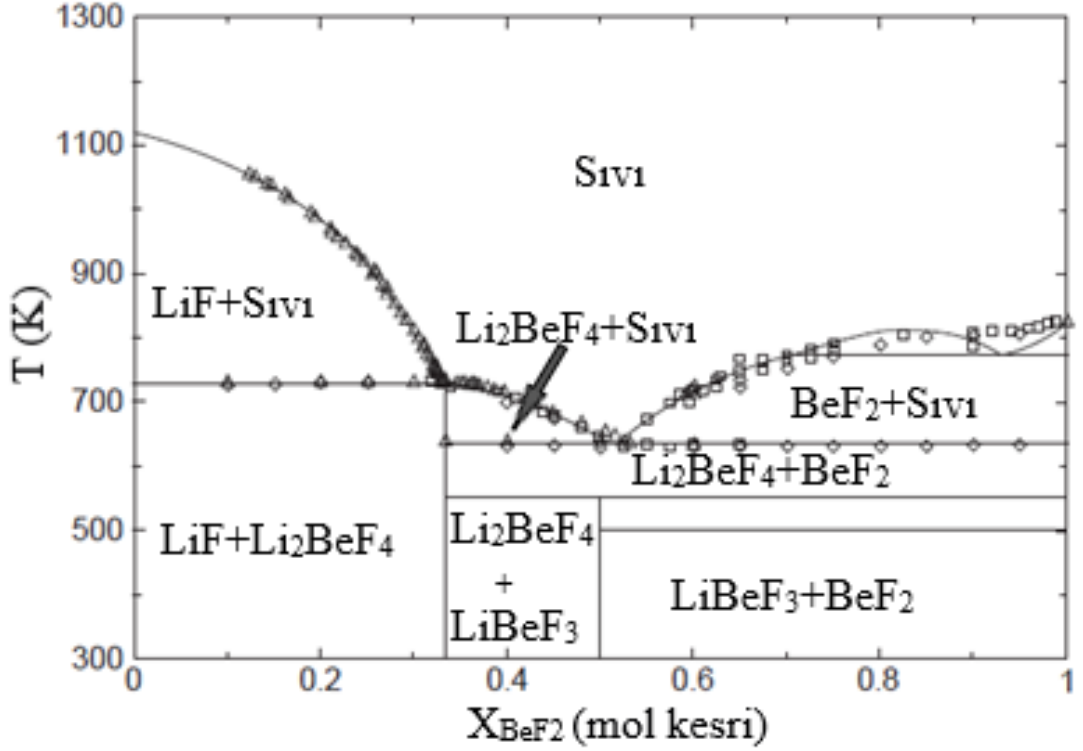
Çizelge 2.1 : ETHR ve KMETR tasarımlarının karşılaştırılması

Özellikler	ETHR	KMETR
Termal Güç (MW)	3000	100
Yakıt Tuzu Miktarı (m ³)	18	1,8
Modül Sayısı	16	1
Tıpa Sayısı	16	2
Tahliye Borusu Sayısı	16	2
Bozunum Isısı (MW _{th})	150	5
Kalp Yarıçapı (m)	1,1275	0,556
Kalp Yüksekliği (m)	2,255	1,112

ETHR'de acil tahliye sistemi, her modülün altında bir tıpa olacak şekilde tasarlanmıştır. Tıplar eriyip açıldığında, her modülden tahliye olan yakıt-tuzu reaktör altındaki toplayıcı da toplanmakta ve sonrasında tahliye borusu aracılığıyla tahliye tankına ulaşmaktadır [38]. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen KMETR'de ise daha basit bir sistem düşünülmüştür. Reaktörün altına yerleştirilen tahliye borusu reaktör içerisindeki tahliyeyi sağlayacak ve normal çalışma şartlarında tahliyeyi engellemek için boru içerisinde katı tıpa yer alacaktır. KMETR tek modülden olduğundan tek tahliye borusu ve tek katı tıpa yeterli olabileceken, nükleer güvenlikteki yedeklik prensibi gereği ikişer tane katı tıpa ve tahliye borusu planlanmıştır. Böylece, herhangi bir nedenle bir tıpa açılmaz ise diğer tıpa sayesinde tahliye gerçekleşecektir. Ayrıca sistemde iki tane tahliye borusunun olması, tahliye süresini de kısaltacaktır.

KMETR'de, ETHR'de olduğu gibi soğutucu akışkan ve tıpa malzemesi olarak %67,2 lityum florür ve %32,8 berilyum florür tuzundan oluşan ötektik FLiBe tuzu kullanılmaktadır. FLiBe tuzunun faz diyagramı Şekil 2.3'de gösterilmektedir. ETR

teknolojilerinde florür tuzuna alternatif olarak klorür tuzu da kullanılmaktadır. İki tuzun farklı avantajları bulunmasına rağmen, florür tuzunun nükleer uygulamalarda daha fazla kullanılmış olması ve toryum çevriminde klorür tuzuna göre üretkenlik oranının daha yüksek olması (1,040'a karşılık 1,126) üretken reaktörler için florür tuzunu daha avantajlı kılmaktadır [19]. Bu sebeple ETHR'de olduğu gibi KMETR'de de florür tuzunun kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.3 : FLiBe tuzunun faz diyagramı [40]

Reaktör yapısal malzemesi olarak ORNL'de geliştirilen Hastelloy-N alaşımı kullanılacaktır. Bu malzeme, ETRD'de uzun süre deneylerde kullanılarak test edilmiş ve malzemenin korozyona karşı etkili olduğu kanıtlanmıştır [41]. Ayrıca, Hastelloy-N alaşımının yüksek erime sıcaklığına sahip olması, herhangi bir kaza durumunda malzeme bozunumunu geciktirecek bir etki yapacaktır. Bu sebeple, reaktör malzemesinde olduğu gibi tahliye borusu için de Hastelloy-N alaşımı kullanılacaktır. Hem FLiBe tuzunun hem de Hastelloy-N alaşımının önemli fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çalışılacağı için fiziksel özellikler sıcaklığa bağlı formülleştirilmiştir. Formüller, sistemin çalışacağı tüm sıcaklıklar için geçerlidir.

Çizelge 2.2 : Kullanılan malzemelerin malzeme özellikleri

Fiziksel Özellikler	FLiBe tuzu [42]	Hastelloy-N [41]
Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Oda sıcaklığında: 2168 Erime sıcaklığında: 2056 2243-0,255×T	8860
Özgül Isı Kapasitesi (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Katı fazda: 1997 Sıvı fazda: 2386	419-578
Isıl İletkenlik (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6269697+0,0005×T	11,5-23,6
Erime Sıcaklığı (K)	732	1573-1673

Katı tıpanın açılma süresi, ATS'nin tasarımı için en önemli parametrelerden biridir. Açılma süresi, reaktörün kapatıldığı andan, tıpanın bozunum ısıısına bağlı olarak erimeye başlayarak tahliye borusu ile temasını yitirmesi ve yer çekimine bağlı olarak tahliye tankına düşmesi arasında geçen zamanı ifade etmektedir. Tıpanın düşmesi, tahliyeyi başlatacağından burada esas alınan tıpanın tamamen erimesi değil, tahliye borusu ile temasının kalmayarak düşüp açılmasıdır. Diğer taraftan, tıpanın açılması için bir zaman limiti de tanımlanmalıdır. Açılma zamanının limiti, fisyon ürünlerinin bozunumundan oluşan ısıya bağlı olarak artan reaktör içi sıcaklığın Hastelloy-N alaşımının malzeme dayanım sıcaklığına erişme süresi olarak tanımlanmaktadır. Brovchenko ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada bu sıcaklığı 1473 K olarak belirlemiştir [26]. Reaktör içi sıcaklığın ne kadar süre içerisinde bu sıcaklığa erişeceği, zamanın fonksiyonu olarak denklem 2.1'e göre bulunabilmektedir [35].

$$Q(t) = 6,45908 \times 10^6 - 6,9200 \times 10^5 \ln(t) \quad (2.1)$$

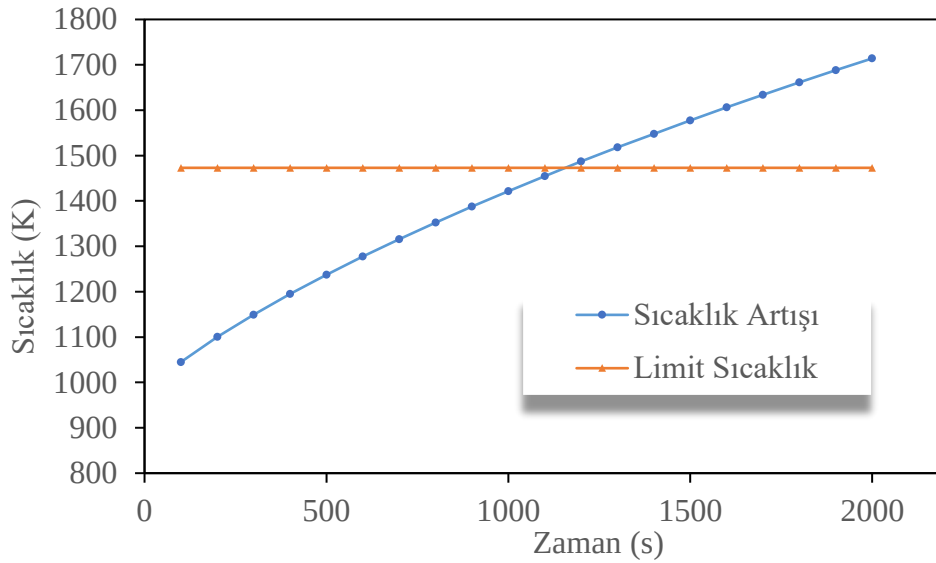
Burada, $Q(t)$ W.m⁻³ biriminde güç yoğunluğu ve t reaktörün kapanmasından sonra saniye cinsinden geçen zamanı göstermektedir. Isı kaybının olmadığı kabul edildiğinde, güç yoğunluğu ile sıcaklığın zamanla değişim oranı denklem 2.2'de gösterildiği gibi basitleştirilebilir.

$$Q(t) = \rho c_p \frac{dT(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Burada, ρ yoğunluğu, c_p sabit sıcaklıktaki özgül ısıyı ve T sıcaklığı göstermektedir. Denklem 2.1, denklem 2.2'ye uygulanarak yeniden düzenlenirse, sıcaklığın zamana bağlı değişimi K cinsinden denklem 2.3'te gösterilen formda bulunabilir.

$$T(t) = -5 \times 10^{-5}t^2 + 0,4771t + 1009,1 \quad (2.3)$$

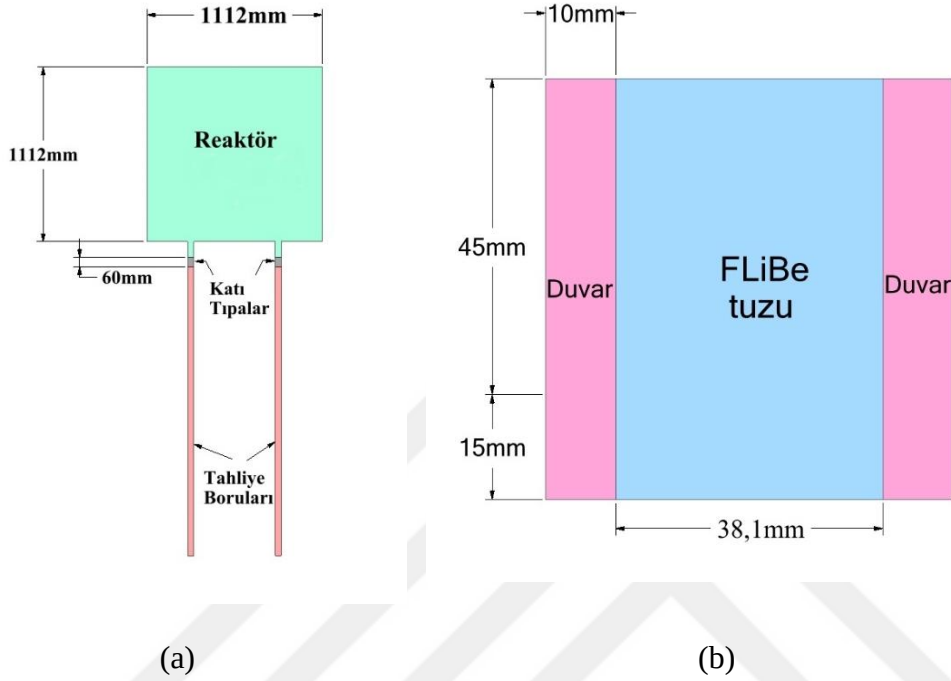
Denklem 2.3 zamana bağlı çözüldüğünde, Şekil 2.4’de görüldüğü gibi yakıt-tuzunun sıcaklığı malzeme dayanım sıcaklığı olan 1473 K’e 1100 saniye içinde ulaşacaktır. Bu hesaplama, ısı kaybının olmadığı ve yakıt-tuzunun özgül ısı ve yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişmediği varsayımıyla yapılmıştır. Diğer taraftan, literatür tarandığında, araştırmacıların farklı hesaplamalar ile farklı süreler bulduğu görülmüştür. Örneğin, Brovchenko ve diğ. (2013) kaza sonrasında tahliyenin 480 saniye içerisinde başlaması gerektiğini belirtmişken [26] ORNL’de yapılan çalışmalarda ise tıpanın 900 saniyeden daha kısa sürede erimesi gerektiği vurgulanmıştır [43]. Diğer bir çalışmada, Tiberga ve diğ. (2019) literatürdeki bu farklılığın altını çizerek, referans bir değer olarak 1000 saniyeyi dikkate almışlardır [17]. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi bu çalışmada erime süresi 1100 saniye olarak hesaplanmış olsa da literatürdeki bu farklılıklar dikkate alınarak tutucu bir yaklaşım ile %15’den fazla güvenlik marjı ile tahliyenin 900 saniye içinde tamamlanması gerektiğine karar verilmiştir.



Şekil 2.4 : Bozunum ısısı kaynaklı yakıt-tuzunun sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Referans alınan ve Çizelge 2.1’de detaylandırılan reaktör geometrisi ve katı tıpa geometrisi Şekil 2.5a ve Şekil 2.5b’de sırasıyla gösterilmiştir. Reaktör geometrisi, katı tıpanın erimesi için olmasa da erime sonrası tahliye süresini etkileyen önemli bir parametredir. Reaktör yüksekliği, yakıt-tuzunun hacmi referans alınarak belirlenmiştir. Katı tıpanın yüksekliği 60 mm, çapı ise ETRD’de olduğu gibi 38,1 mm olarak seçilmiştir [30]. Tıpanın, sadece alt kısımdaki 15 mm’lik kısmı hava ile soğutulurken, tıpanın katı forma geçmesi ve sonrasında katı formda kalması

sağlanmaktadır. Tahliye borusu duvar kalınlığı ise 5-10-15 mm'lik kalınlıklar için çalışılmış ve optimal olarak 10 mm duvar kalınlığı seçilmiştir. Seçimin nasıl yapıldığı Bölüm 4.3'de detaylandırılmıştır.



Şekil 2.5 : Çalışmada kullanılan (a) Reaktör geometrisi, (b) Katı tıpa geometrisi

2.2 Isı Transfer Mekanizmaları

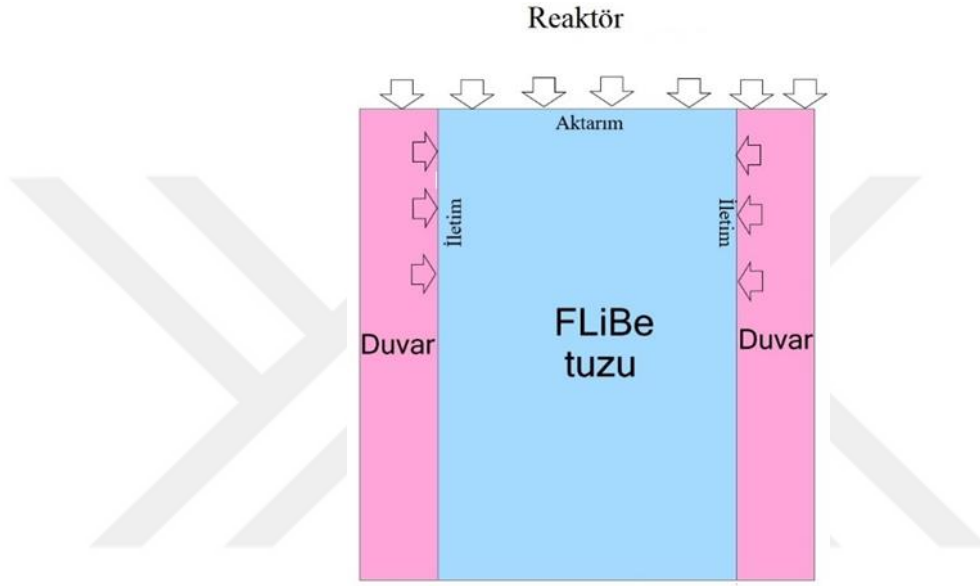
Bir kaza durumunda, katı tıpanın sıcaklığın etkisiyle pasif olarak erimesi beklendiğinden, reaktörden katı tıpa ısı transferi önem arz etmektedir. Bu başlık altında katı tıpanın erimesini sağlayacak olan ısı transfer mekanizmaları incelenmiştir.

Öncelikle ısı transferini etkileyeceğinden, reaktördeki ve tahliye borusundaki akışın özellikleri belirlenmelidir. Shafer (2018) yaptığı çalışmada reaktör kapandıktan 15 saniye sonrasında reaktör içi akış hızının $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ 'e düştüğünü ve yaklaşık olarak bu hızda sabit kaldığını belirlemiştir [44]. Reynold sayısı bu hız dikkate alınarak, denklem 2.4'e göre hesaplandığında $1,102 \times 10^3$ olarak bulunmuş ve akışın laminar akış olduğu tespit edilmiştir.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.4)$$

Burada, ρ yakıt-tuzunun yoğunluğunu, v yakıt-tuzunun hızını, D tahliye borusu çapını ve μ yakıt-tuzunun dinamik viskozitesini göstermektedir.

Çizelge 2.2’de görüldüğü üzere FLiBe tuzunun termal iletkenliği Hastelloy-N alaşımının termal iletkenliğine göre daha düşüktür. Bu nedenle reaktördeki bozunum ısıısının duvar üzerinden iletim ile transfer edilmesi beklenmektedir. Diğer bir taraftan, reaktörün altından ve tıpanın üst bölgesinden katı tıpayla aktarım ile ısı transferi de beklenmektedir. Aktarım ve iletimle olan ısı transferleri Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Katı tıpanın etkisinde kaldığı ısı transfer mekanizmaları

Richardson sayısı, denklem 2.4’te verilen Reynolds ve denklem 2.5’te verilen Grashov sayıları kullanılarak denklem 2.6’ya göre reaktör kapandığı durum için hesaplandığında, 650 gibi 1’den çok yüksek bir değere ulaşır. Bu durumda, kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile iletim ısı transferi daha önemli olacaktır. Bu kabul Reynolds sayısının 3000 değerinin altındaki akışlar için geçerlidir [45].

$$Gr = \frac{g\beta(T_{duvar} - T_{\infty})L^3}{v^2} \quad (2.5)$$

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (2.6)$$

Burada, g yer çekim ivmesini, β ısı genleşme katsayısını, T_{duvar} duvar yüzey sıcaklığını, T_{∞} yığın sıcaklığını, L borunun uzunluğunu ve v kinematik viskoziteyi göstermektedir.

Aktarım ile ısı transferinin baskın olmayacağı bilinse de daha hassas hesaplama yapmak ve daha doğru sonuçlara ulaşabilmek adına aktarım ile ısı transferi de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, hesaplama maliyetinin artmaması ve aynı zamanda daha tutucu bir yaklaşım benimsemek adına radyasyon ile ısı transferi dikkate alınmamıştır.

2.3 Entalpi-Gözenek Yöntemi

Tez kapsamında kullanılan ANSYS Fluent kodu, katılaşma ve erime süreçlerini analiz edebilmek için entalpi-gözenek yöntemini kullanmaktadır. Bu tür problemlerin çözümünde, katı ve sıvı fazın yanı sıra geçiş bölgesi (mushy zone) olarak adlandırılan bir bölge de dikkate alınmaktadır. Sıvı oranının 0 ile 1 arasında değiştiği bu bölge gözenekli olarak kabul edilmektedir. Bu bölgede katılaşma oranı arttıkça gözenekli yapı azalmaktadır. Malzeme tamamen katılaştığında hızı 0 olmaktadır. Burada tespit edilmesi gereken parametre, katılaşma ile birlikte malzeme hızının sıfıra ne kadar kısa sürede düşeceği. Bu değer, geçiş bölge parametresi ile belirlenmektedir. Bu değer çok yüksek seçilmesi, malzeme hızının çok çabuk sıfıra düşmesine neden olurken, aksi durumda malzeme hızının sıfıra düşmesi gecikmektedir [46]. Bu sebeple analizlerde doğru sonuçlar alınabilmesi için geçiş bölge parametresi uygun değerlerde seçilmelidir. Bu tez kapsamında değerlendirilen katı tıpanın erime süresi nükleer güvenliğinin sağlanmasında çok önemli bir parametre olduğu için erime sürecinin doğru simüle edilmesi elzem bir konudur.

Katılaşma ve erime analizlerinde, enerji, momentum ve tür korunum denklemleri, yukarıda açıklanan geçiş bölgesi dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Enerji denklemi, denklem 2.7’de gösterildiği gibi entalpi kullanılarak çözülmektedir [47].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} H) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) \quad (2.7)$$

Burada, ρ yoğunluğu, $\vec{v}$ akışkan hızını, H entalpiyi, k ısı transfer katsayısını ve T sıcaklığı göstermektedir.

Entalpi değeri, denklem 2.8’de gösterildiği gibi duyulur entalpi h ve oransal gizli entalpi ΔH kullanılarak bulunmaktadır.

$$H = h + \Delta H \quad (2.8)$$

Duyulur entalpi denklem 2.9’da oransal gizli entalpi ise denklem 2.10’da ifade edilmiştir.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (2.9)$$

Burada h_{ref} referans entalpiyi, T_{ref} referans sıcaklığı ve c_p sabit sıcaklıktaki özgül ısıyı göstermektedir.

$$\Delta H = \beta L \quad (2.10)$$

Burada β sıvı oranı L ise gizli ısıdır. Sıvı oranı, sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki şartlara göre belirlenmektedir (denklem 2.11).

$$\begin{aligned} \text{Eğer } T < T_{katılaşma}, \quad \beta &= 0 \\ \text{Eğer } T > T_{sıvılaşma}, \quad \beta &= 1 \\ \text{Eğer } T_{katılaşma} < T < T_{sıvılaşma}, \quad \beta &= \frac{T - T_{katılaşma}}{T_{sıvılaşma} - T_{katılaşma}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Denklem 2.7’deki sıcaklık değeri denklem 2.10 ve denklem 2.11 kullanılarak yapılan iterasyon ile tespit edilebilir.

Geçiş bölgesinde azaltılmış gözeneklilik dikkate alınarak momentum düşüşü denklemi denklem 2.12’de gösterilmiştir.

$$\vec{M}_{düşüş} = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{geçiş} (\vec{V} - \vec{V}_p) \quad (2.12)$$

Burada, ε terimi $\beta=0$ durumunda ifadenin belirsiz olmaması için çok küçük bir değeri, $A_{geçiş}$ geçiş bölgesi parametresini, $\vec{V}_p$ katılaşmış malzemenin domainden dışarı çekilme hızını ifade etmektedir. FLiBe tuzu Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi ayrık erime noktasına sahip olduğundan tür denklemlerine burada yer verilmemiştir.

2.4 Sınır Şartları

Bu bölümde, önce katı tıpa için oluşturulan modelin sınır şartları, sonrasında da tahliye için oluşturulan modelin sınır şartları paylaşılmıştır.

2.4.1 Katı tıpa modelinin sınır şartları

Katı tıpanın farklı çalışma şartları (normal çalışma, fazi-kaza fazi vb.) göz önüne alınarak farklı sınır koşulları belirlenmelidir. Modelin sınır koşulları Şekil 2.7’de görülmektedir. Hesaplama maliyetlerini azaltmak için model 2 boyutlu ve simetrik olarak oluşturulmuştur. Duvarların adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Giriş ve üst duvarın sınır şartları farklı çalışma durumuna göre değişmektedir. Reaktörün çalışmaya başlamasından önce, girişin ve üst duvarın sıcaklıklarının 550 °C olacağı ön görülmüştür. Bunun sebebi, tuzun aniden katılaşmasını engellemek için reaktör çalışmıyor olsa bile, reaktörün ve ATS’nin sıcaklığının tuzun erime sıcaklığının (Çizelge 2.2) üstünde tutulması gerekliliğidir. Tutucu bir yaklaşımla erime sıcaklığının yukarısında bir sıcaklık tercih edilmiştir.



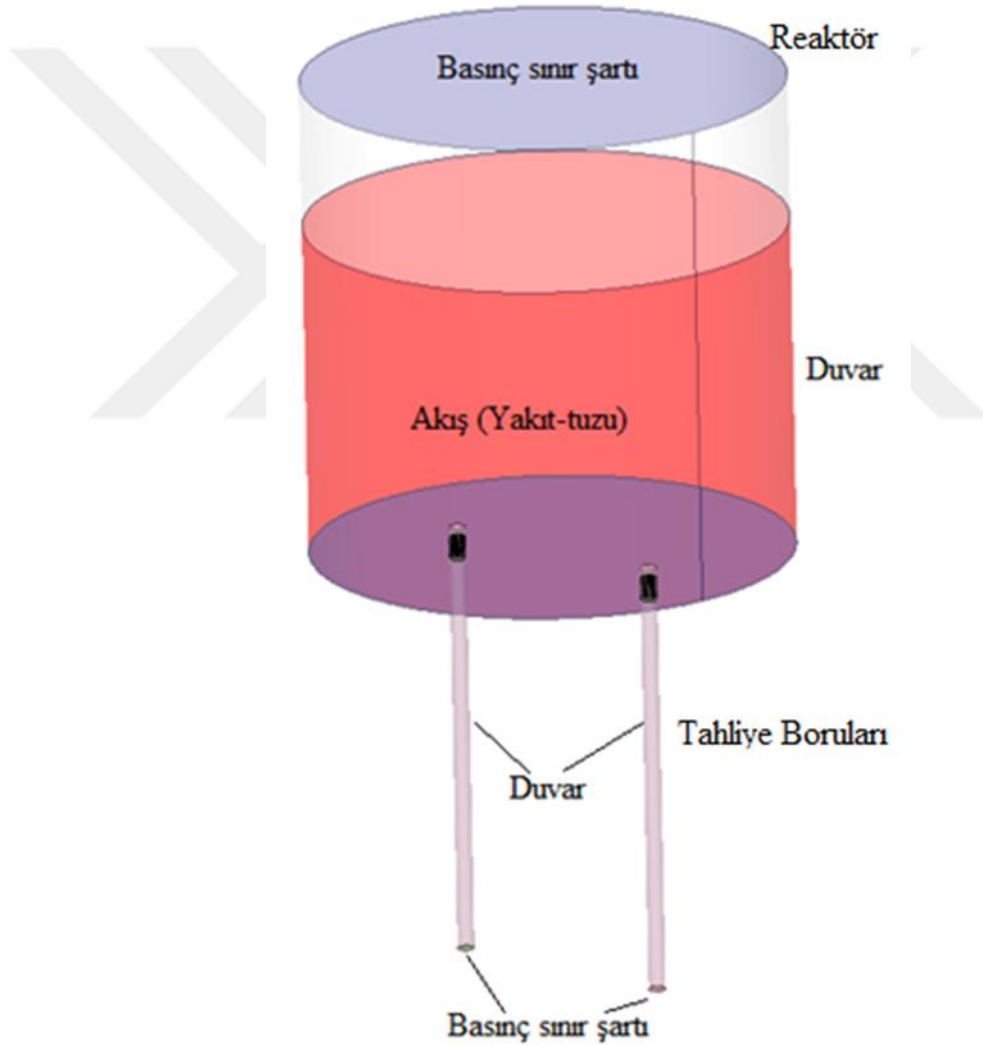
Şekil 2.7: Model sınır şartları

Reaktör çalışırken, reaktör giriş ve çıkış sıcaklığının ortalaması olan 700 °C, giriş ve üst duvar sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Kaza durumunda, soğutma kesileceğinden bozunum ısısı kaynaklı sıcaklık artışı olacaktır. Bu durumda katı tıpa giriş sıcaklığının ve üst duvar sıcaklığının zamana bağlı değiştiği ve bu değişimin Şekil 2.4’de gösterildiği gibi olduğu kabul edilmiştir. Tahliye bölümünün sıcaklığı

bilinmediğinden bu bölgenin adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Hava ile soğutulan duvarın sıcaklığı 25 °C'dir ve her faz için ısı transfer katsayısı Richardson (1962) referans alınarak hesaplanmıştır [30].

2.4.2 Tahliye süresinin hesaplanmasında kullanılan modelin sınır şartları

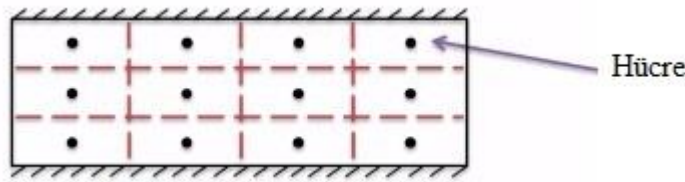
Yakıt tuzunun reaktörden tahliyesini analiz etmek için reaktör ve tahliye borusu beraber modellenmiştir. Hem reaktör hem de tahliye borusu atmosferik basınçtadır. Başlangıçta, reaktör tamamen yakıt tuzu ile doludur. Sistem, hesaplama maliyetlerini azaltmak için çeyrek kısmında ve 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Duvarlar için standart pürüzlülük modeli seçilmiştir. Sınır şartları Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : Tahliye modelinin sınır şartları

2.5 HAD Kodu ve Sonlu Hacim Yöntemi

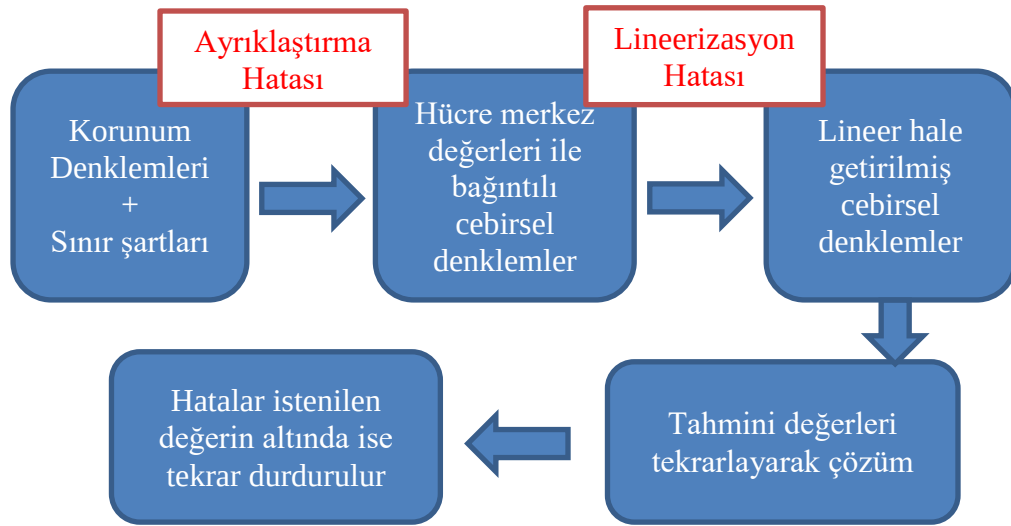
HAD kodları korunum denklemlerini çözmek için tercih edilen nümerik bir yöntem olan sonlu hacim yöntemini kullanır. Sonlu hacimler yönteminde ana geometri, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi hücelere bölünerek ayrıklaştırma yapılmakta ve her hücrenin merkezinde hız ve basınç değerleri komşu hücelere bağlı olarak çözülmemektedir. Ayrıklaştırma sırasında oluşturulan ağ kalitesine göre ayrıklaştırma hatası oluşması kaçınılmazdır. Çözüm için, kütle, momentum ve varsa enerji korunum denklemleri HAD kodu (bu çalışma için ANSYS Fluent) içinde cebirsel denkleme dönüştürülmektedir. Enerji denkleminin aktif olmadığı bir model için örnek vermek gerekirse, her hücrenin merkezindeki basınç ve iki hız bileşeni bilinmeyen için 3 denklem gereklidir. Bu denklemler, kütle korunumundan ve iki momentum denkleminde elde edilmektedir. Örneğin, Şekil 2.9'daki geometri 12 hücreye bölünmüştür ve toplam 36 bilinmeyen için 36 cebirsel denklem oluşturulmaktadır.



Şekil 2.9: Geometrinin ayrıklaştırılması

Momentum korunum denklemi, cebirsel denkleme dönüştürüldüğünde lineer olmayan denkleme dönüşmektedir. Lineer olmayan denklemlerin çözümü her zaman mümkün değildir. Bu nedenle denklemleri lineer hale getirmek için özel yöntemler uygulanmalıdır. Lineerizasyon hatası bu aşamada ortaya çıkmaktadır. Ardından tahmini değerler verilerek başlatılan çözüm işlemi bilinmeyen değerlerdeki hatalar istenilen değerin altına ininceye kadar devam ettirilmektedir.

Ayrıklaştırma hatasını düşürmek için daha iyi bir ağ yapısı oluşturulmalıdır. Lineerizasyon hatasını düşürmek için ise çözüm daha fazla tekrarlanmalıdır. Ancak, ayrıklaştırma hatası ile lineerizasyon hatası arasında ters bir ilişki vardır. Ağ yapısı iyileştirildiğinde, ayrıklaştırma hatası düşecektir ama diğer taraftan lineerizasyon hatası artacaktır. Yukarıda bahsedilen çözüm adımları Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: HAD kodunun çözüm adımları



3. ACİL TAHLİYE SİSTEMİNİN DENEYSEL ANALİZİ

Bu bölümde, Çek Teknik Üniversitesi'nin Nükleer Enerji Laboratuvarında tez kapsamında kurulan acil tahliye sistemi deney düzeneğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Ayrıca, HAD yöntemi ile katı tıpanın çalışma şartları incelenmeden önce HAD yönteminin doğrulanmasına yönelik yapılan çalışmalar ile HAD yönteminde katılma ve erime problemlerinde kullanılan geçiş bölgesi parametresinin uygun değerinin deney sonuçları kullanılarak belirlenmesine yönelik çalışmalar anlatılmıştır.

3.1 Deneylerin Yapılması ve Sonuçların Analizi

Deneyler, ergimiş tuzun soğutma sistemi tarafından katı forma geçirilerek tıpa haline getirilmesi ve sisteme ısı uygulanarak tıpanın erimesi olmak üzere iki aşamadan oluşmuştur. Uygulama kolaylığı ve bütçe sınırlaması nedeniyle, testler yapılırken ergimiş tuz reaktörlerinde kullanılan tuz ve malzemeler yerine, erime sıcaklığı daha düşük tuz ve buna bağlı olarak düşük kapasiteli ısıtıcılar ve daha düşük sıcaklık dayanımı olan malzemeler kullanılmıştır.

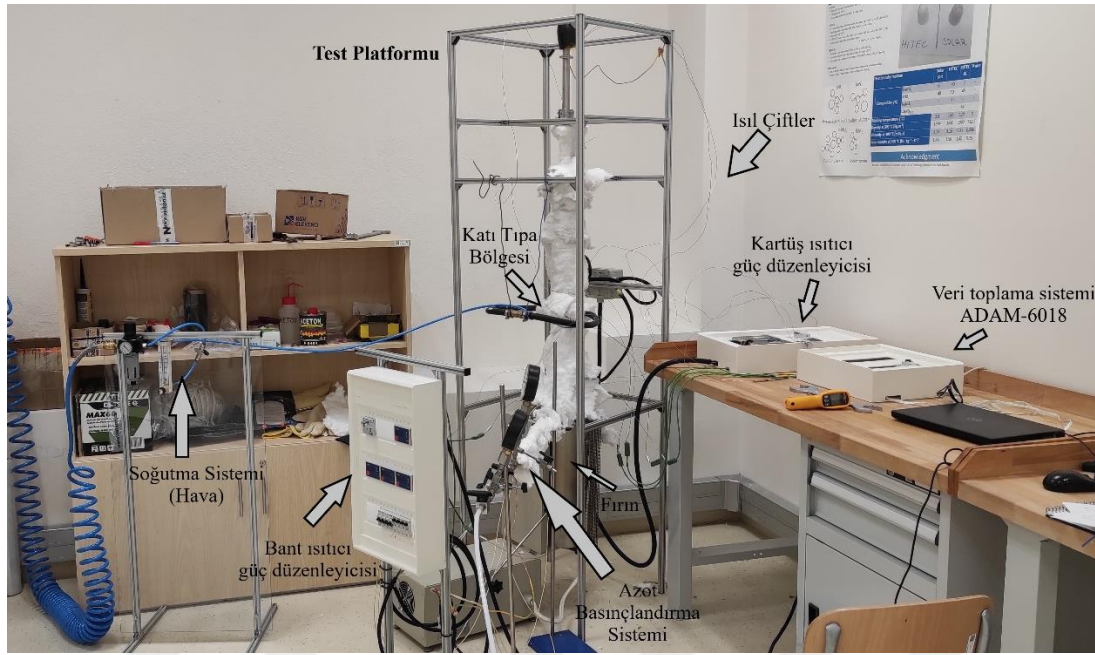
3.1.1 Deney setinin kurulması

Şekil 3.1'de deney seti ve kullanılan ekipmanlar gösterilmektedir. Bu ekipmanlar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1.1.1 HITEC tuzu

Deneylerde ergimiş tuz reaktörlerinde kullanılan lityum florür (LiF) ve berilyum florürün (BeF_2) karışımından elde edilen FLiBe tuzu yerine, NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3 tuzlarının %40 - %7 - %53 kütleli karışımı ile elde edilen HITEC tuzu kullanılmıştır. HITEC tuzu deneysel çalışma sırasında aşağıdaki avantajları sağladığı için tercih edilmiştir.

- Düşük erime sıcaklığından dolayı daha düşük kapasiteli ısıtıcıların kullanımına imkân sunması.



Şekil 3.1: Deney seti ve deneyde kullanılan ekipmanlar

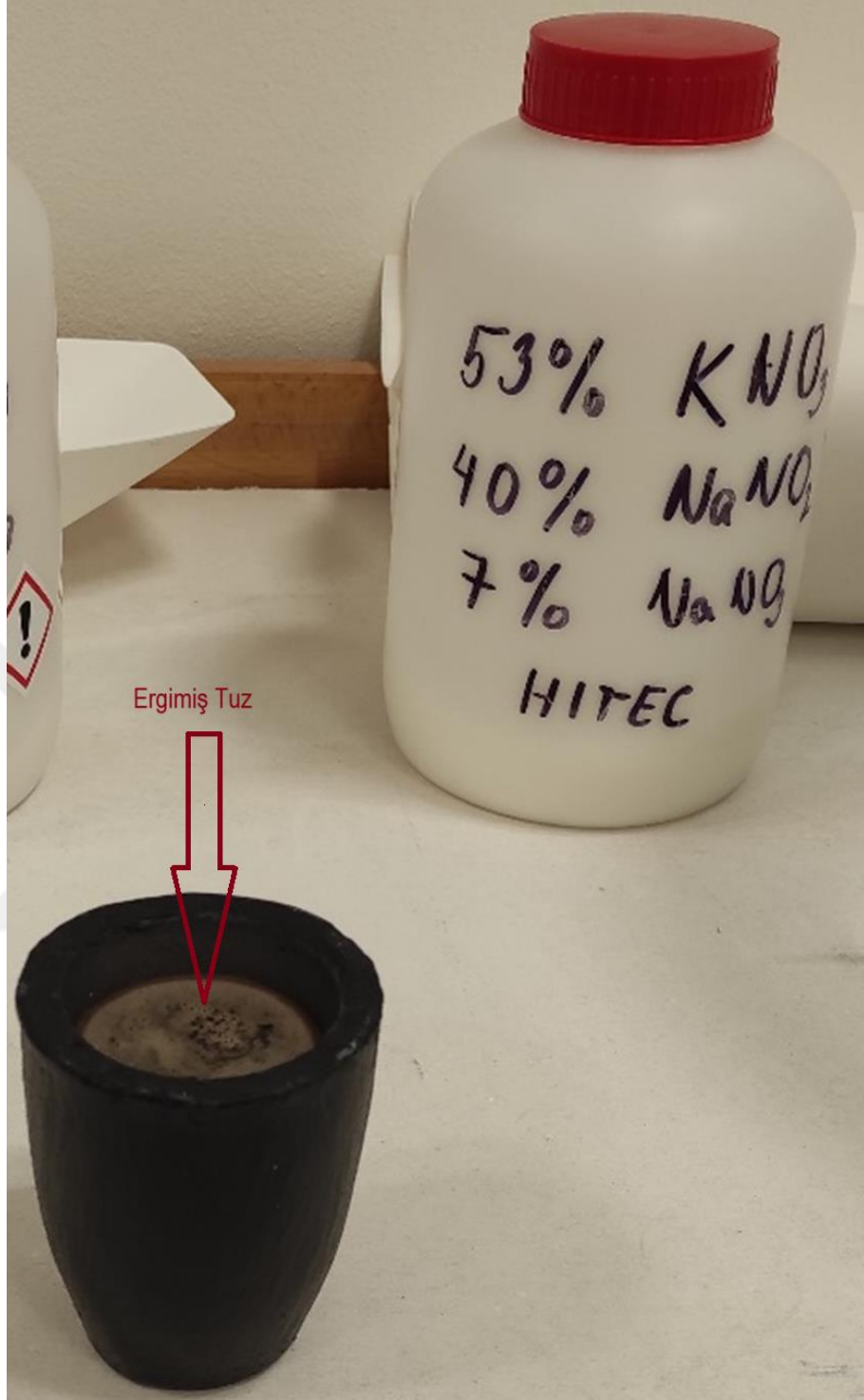
- İstenilen sıcaklıklara daha kısa sürede ulaşılması ile zaman tasarrufu sağlaması.
- Daha düşük yalıtım gereksinimi oluşturması.
- Daha düşük sıcaklık dayanımına sahip malzeme kullanabilme imkânı sağlaması.
- Deney güvenliğinin daha kolay sağlanabilmesi.

HITEC tuzu, ısıl iletkenlik ve özgül ısı gibi termo-fiziksel özellikleri bakımından FLiBe tuzuna benzemektedir. FLiBe ve HITEC tuzlarının termo-fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan HITEC tuzunun saklandığı numune kabı ve tuzun eritilmiş hali Şekil 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 : FLiBe ve HITEC tuzlarının termo-fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Fiziksel Özellikler	FLiBe tuzu**	HITEC tuzu***
Erime Sıcaklığı (K)	732	415
Özgül Isı Kapasitesi* (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	2415	1561
Isıl İletkenlik* (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,866	0,600

*200 °C’deki özellikler verilmiştir **[42] ***[48].



Şekil 3.2: HITEC tuzu

3.1.1.2 Tahliye borusu

Deneylerde tahliye boru malzemesi olarak Amerika Birleşik Devletleri Oak Ridge Ulusal Laboratuvarında ETR'ler için özel olarak geliştirilen Hastelloy-N alaşımı yerine, AISI 4145 alaşım çelik kullanılmıştır. Tıpa kısmının da yer aldığı tahliye borusunun bir bölümü Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Tıpa kısmının da yer aldığı tahliye borusunun bir bölümü

Alaşımları oluşturan elementler ve yüzde oranları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Hastelloy-N ve AISI 4145 alaşımlarının termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması ise Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Hastelloy-N [49] ve AISI 4145 [50] alaşımını oluşturan elementler

Element	Hastelloy-N (%)	AISI 4145 (%)
Demir, Fe	maksimum 4,0	96,795-97,72
Krom, Cr	7,0	0,80-1,10
Manganez, Mn	maksimum 0,8	0,75-1,00
Karbon, C	0,06	0,43-0,48
Molibden, Mo	16,0	0,15-0,25
Silisyum, Si	maksimum 1,0	0,15-0,30
Kükürt, S	-	<0,04
Fosfor, P	-	<0.035
Vanadyum, V	maksimum 0,5	-
Kobalt, Co	maksimum 0,02	-
Bakır, Cu	maksimum 0,35	-
Tungsten, W	maksimum 0,5	-
Alüminyum, Al + Titanyum, Ti	maksimum 0,5	-
Nikel, Ni	Denge için 71	-

Çizelge 3.3: Hastelloy-N ve AISI 4145 alaşımlarının termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması

Fiziksel Özellikler*	Hastelloy-N**	AISI 4145***
Özgül Isı Kapasitesi (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	578	473
Isıl İletkenlik (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	23,6	42,6

*700 °C’deki özellikler verilmiştir. **[41],***[51]

3.1.1.3 Isıtıcılar

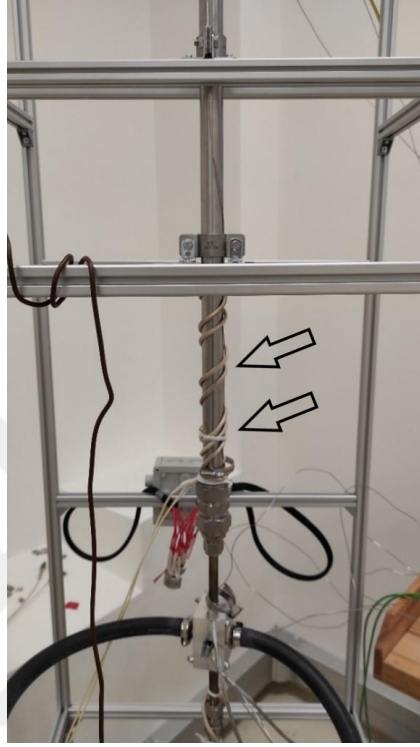
Deney sırasında ergimiş tuz reaktöründe üretilen ısı, ısıtıcılar yardımı ile simüle edilmiştir. Isıtıcılar ayrıca tahliye borusunun sistem çalışma sıcaklığına getirilmesinde ve her bir deney öncesinde daha önceki deneyler nedeniyle tıpa içinde katı halde kalmış olabilecek tuzların eritilmesinde de kullanılmıştır. Ayrıca, erime fazında, reaktör içerisindeki bozunum ısını simüle etmek için kullanılmışlardır.

Deneyin başlangıcında, katı tuzun erimesi için tahliye borusunun altına yerleştirilen ve Şekil 3.4’de gösterilen Clasic CZ markasının 4013T model fırını kullanılmıştır. Fırının ulaşabileceği maksimum çalışma sıcaklığı 1573 K’dir. Fırında eriyen ve sıvı faza geçen tuz, basınçlandırılarak tıpa bölgesine gönderilmiştir. Isı bantlarının yanı sıra, tıpanın üst ve alt bölgesinde Şekil 3.7’de gösterilen ısı kartuşları kullanılmıştır.



Şekil 3.4: Deneyin başlangıcında tuzun erimesi için kullanılan fırın

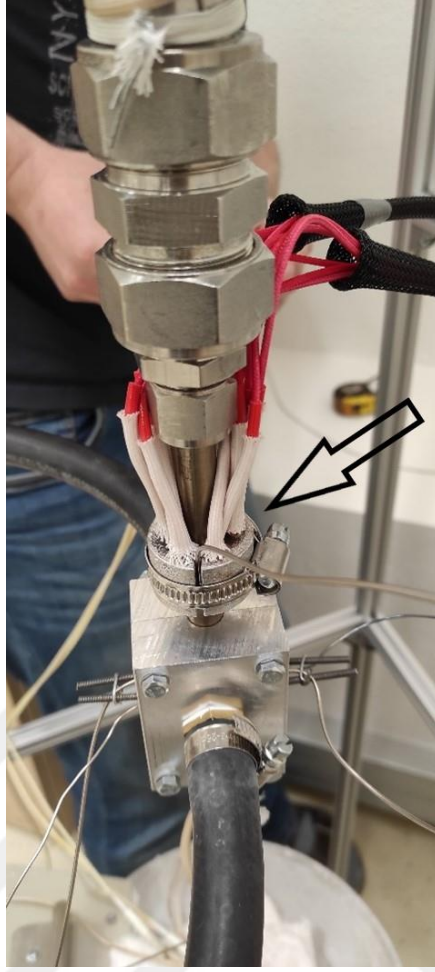
Tuzu basınçlandırmak için kullanılan azotun sistem sıcaklığına getirilmesi için basınçlandırma sistemi borusuna ve tıpanın üstünde ve altında kalan bölgelere düzgün ısı dağılımı sağlayan, Şekil 3.5’de gösterilen ısı bantları yerleştirilmiştir. Isı bantları, istenilen sıcaklığa Şekil 3.6’de gösterilen güç düzenleyiciler sayesinde getirilmiştir.



Şekil 3.5: Tıpanın üst bölgesinde kullanılan ısı bantları



Şekil 3.6: Isıtıcıların güç düzenleyicileri



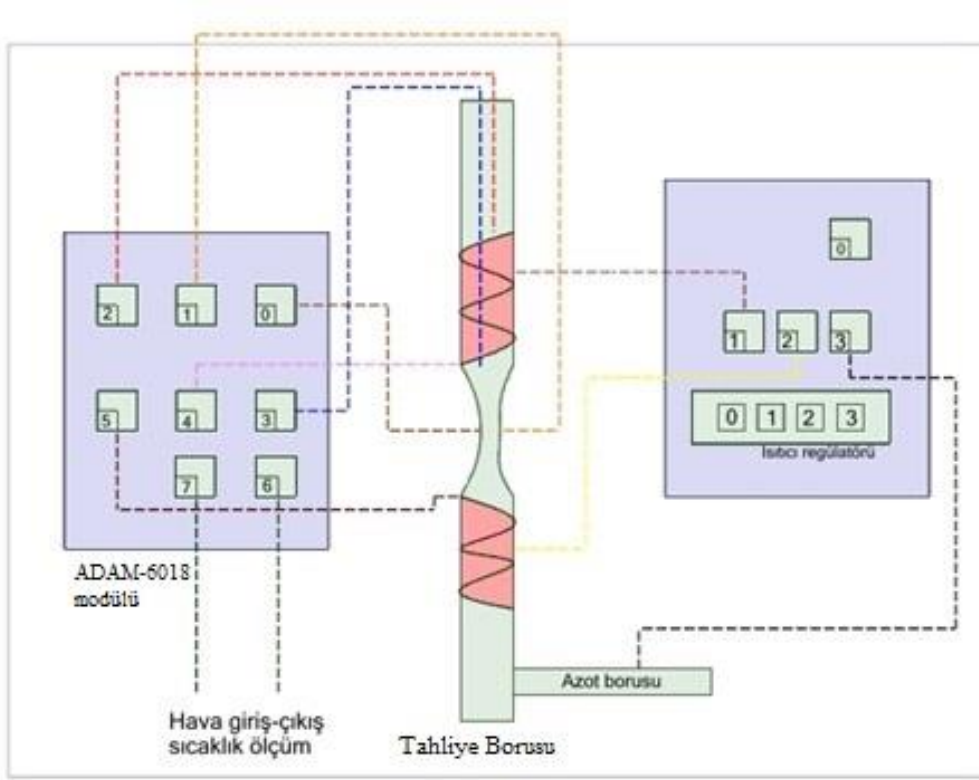
Şekil 3.7: Tıpanın üst bölgesinde kullanılan ısı kartuşu

3.1.1.4 Sıcaklık ölçerler

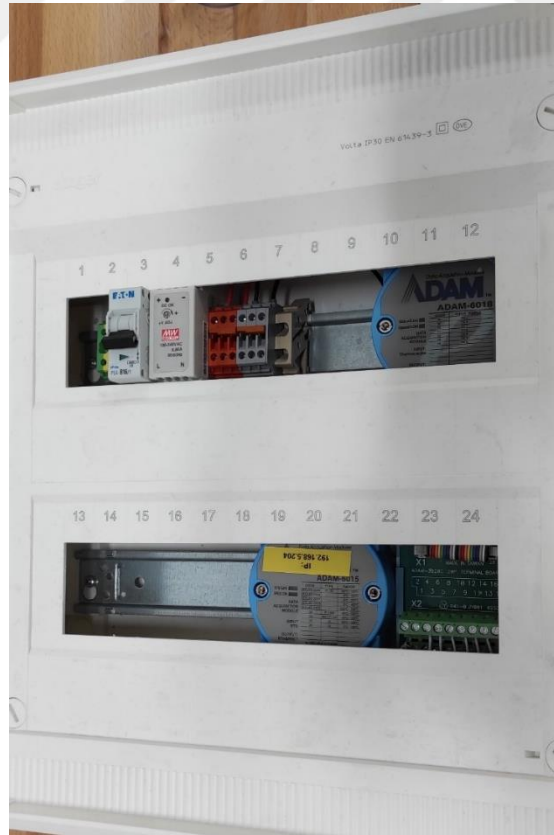
Deney boyunca sıcaklık değerlerinin okunabilmesi için K tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Bu tip ısıl çiftlerin seçilme sebebi, daha yaygın kullanım alanına ve daha geniş sıcaklık ölçüm aralığına ($-200/1250\text{ }^{\circ}\text{C}$) sahip olmalarıdır [52].

Bir tanesi tıpa seviyesi diğeri borunun üst bölgesine olmak üzere 2 tanesi boru içine, 2 tanesi boru dışında tıpa yüzeyine, 2 tanesi boru dışında tıpanın üst ve alt bölgelerine ve 2 tanesi soğutma için kullanılan hava giriş-çıkış bölgesine yerleştirilmek üzere toplam 8 adet ısıl çift kullanılmıştır. Isıl çiftlerin tam konumları Şekil 3.8’de gösterilmektedir.

Isıl çiftler ile okunan değerler, Şekil 3.9’de gösterilen ADAM-6018 [53] veri toplama modülü ile dijital ortama anlık olarak aktarılmıştır.



Şekil 3.8: Deney düzeneğindeki ısı çiftlerinin konumlandırılması



Şekil 3.9: ADAM-6018 veri toplama modülü

3.1.1.5 Basınçlandırma sistemi

Fırında ısıtılarak eritilen tuzun tıpa seviyesine basılması ve katılaşma fazında bu seviyede kalabilmesi için bir basınçlandırma sistemi tasarlanmıştır. Deneylerde, basınçlandırıcı akışkan olarak azot kullanılmıştır. Boruya basılacak olan azot, öncesinde ısıtılarak tuzun anlık donması engellenmiştir. Isı kaynağı olarak bantlı ısıtıcı kullanılmıştır. Şekil 3.10 azot iletim borularını, Şekil 3.11 sırasıyla azot tüpü ve basınç regülasyon hattını göstermektedir.



Şekil 3.10: Azot iletim boruları



Şekil 3.11: Basınçlandırma tüpü ve basınçlandırma sistemi

3.1.1.6 Soğutma sistemi

Basınçlandırma sistemi ile tıpa seviyesine gönderilen ergimiş tuz, soğutma sistemi ile soğutularak katılaşması sağlanmıştır. Bu amaçla kurulan soğutma sisteminde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Havanın giriş sıcaklığı 295 K ve debisi 300 litre/dakika'dır.

Soğutma sisteminin giriş-çıkış sıcaklıklarını ölçmek için iki adet ısı çifti kullanılmış, bunlar tıpa öncesine ve sonrasına yerleştirilmiştir. Soğutma sistemi Şekil 3.12'de gösterilmektedir.

3.1.1.7 Yalıtım malzemesi

Deney sırasında yüksek sıcaklıklara ulaşılacağı için (maksimum 573 K) ısı kaçıışı kaçınılmaz olacağından sistem yalıtılmıştır. Ayrıca, yalıtım ile erime-katılaşma süresini daha doğru hesaplamak hedeflenmiştir. Yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır. Yalıtım kalınlığını belirlemek için hesaplama yapmak yerine, anlık sıcaklık ölçümü ile yalıtım malzemesi-ortam sıcaklığı arasındaki fark maksimum 5 °C olacak şekilde yalıtım uygulanmıştır. Bunun sebebi, borunun farklı bölgelerinde farklı ısı kaynaklarının uygulanmış olmasıdır. Şekil 3.13'de tahliye borusuna yapılan ısı yalıtım uygulaması görülmektedir.

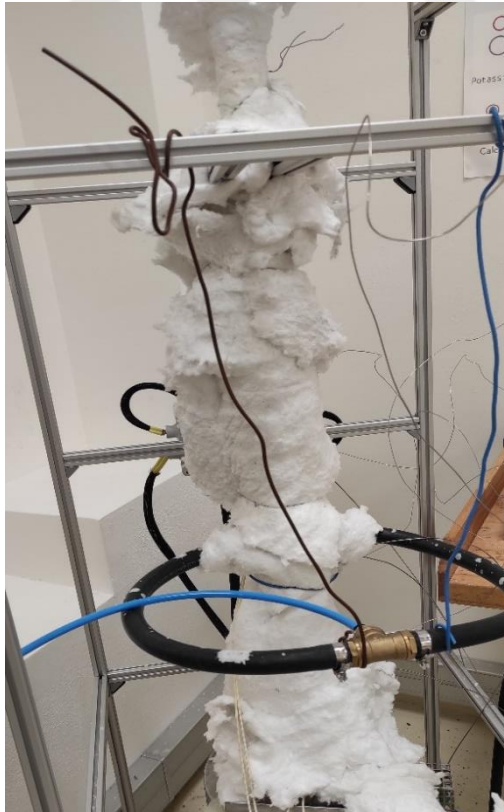
3.1.2 Deney başlangıç ve sınır şartları

Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinden deney başlangıç sıcaklık değeri ortam sıcaklığı olan 296 K olarak belirlenmiştir. Borunun alt bölümünde bulunan ve katı fazdaki tuzun erimesi için kullanılan fırının sıcaklığı 573 K'ye ayarlanmış ve deney boyunca bu sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Böylece tuzun erime sıcaklığı olan 415 K değerine kısa sürede ulaşarak tuzun erimesi ve sıvı faza geçmesi sağlanmıştır. Tıpanın üstünde ve altında bulunan ısıtıcı bant ve ısıtıcı kartuşların sıcaklığı 508 K'ye ayarlanmıştır. Buradaki amaç, tıpa bölgesine ulaşan tuzun, ani katılaşmasını engelleyecek boru iç sıcaklığına erişmektir.

Basınçlandırma sistemi iletim borularına yerleştirilen ısıtıcı bant sıcaklığı ise 393 K'ye sabitlenmiştir. Bu sayede, ortam sıcaklığında bulunan azot boruya gönderildiğinde, ergimiş tuz sıcaklığını düşürmeyecek ve ani katılaşmaya sebep olmayacaktır. Borular taş yünü ile yalıtıldığından, boruların adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Soğutma, borunun sadece tıpa bölgesine uygulanmıştır. Soğutmada kullanılan havanın giriş sıcaklığı 295 K ve debisi 300 litre/dakika olacak şekilde soğutma yapılmıştır.



Şekil 3.12: Tıpa soğutma sistemi

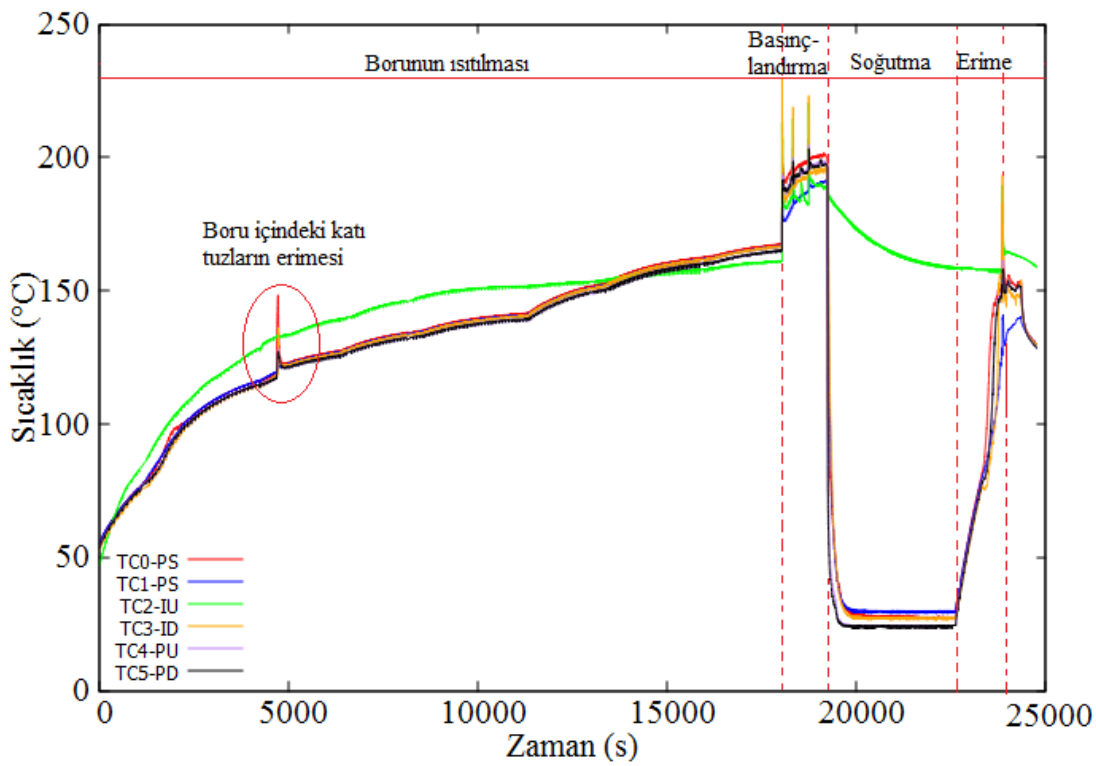


Şekil 3.13: Tahliye borusuna taş yünü ile ısı yalıtımının uygulanması

3.1.3 Deneylerin gerçekleştirilmesi

Deneyin başlangıcında, sistemde yeterli tuzun olduğuna ve tüm bağlantıların düzgün yapıldığına, herhangi bir sızıntının olmadığına emin olunmak için gerekli kontroller yapılmıştır.

2. adım olarak ısıtıcılar aktif hale getirilerek yukarıda belirtilen sıcaklıklara ayarlanmıştır. Böylece rezervuardaki katı tuzun erimesi ve boru sıcaklığının tuzun erime sıcaklığının üzerine çıkması sağlanmıştır. Bu aşamada, boru iç yüzeylerinde önceki deneylerden kalan katı fazdaki tuzlar erimiştir. Bu durum Şekil 3.14’de kırmızı halka içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 3.14: 1. deney süresince zamana bağlı sıcaklık değişimleri

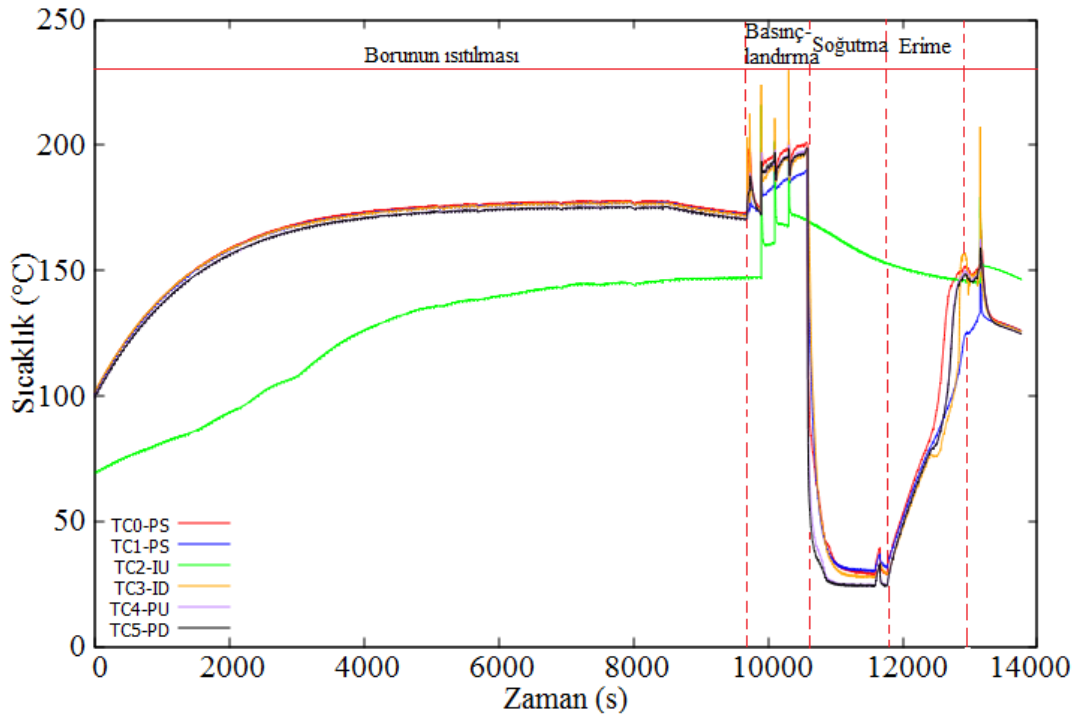
Boru iç sıcaklığının tuzun erime sıcaklığının üzerine çıktığından emin olunduktan sonra, 3. aşamaya geçilmiştir. Bu aşamada, rezervuarda eriyen tuz, tıpa seviyesine basınçlandırarak gönderilmiştir. Yeterli basınç sağlandığından emin olunabilmesi için basınçlandırma işlemi 3 kez tekrarlanmıştır. Rezervuarda 573 K'ye ısıtılan tuz, tıpa seviyesine gönderildiğinde, sıcaklık değerlerinde ani zirveler görülmüştür. Bu tuzun tıpa seviyesine geldiğinin kanıtı olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.14).

Sıvı formdaki tuz, tıpa seviyesine gelince 4. aşamaya geçilmiştir. Bu aşamada soğutma sistemi aktif hale getirilmiştir. Soğutma 1000 saniye boyunca devam etmiştir. Bu süre

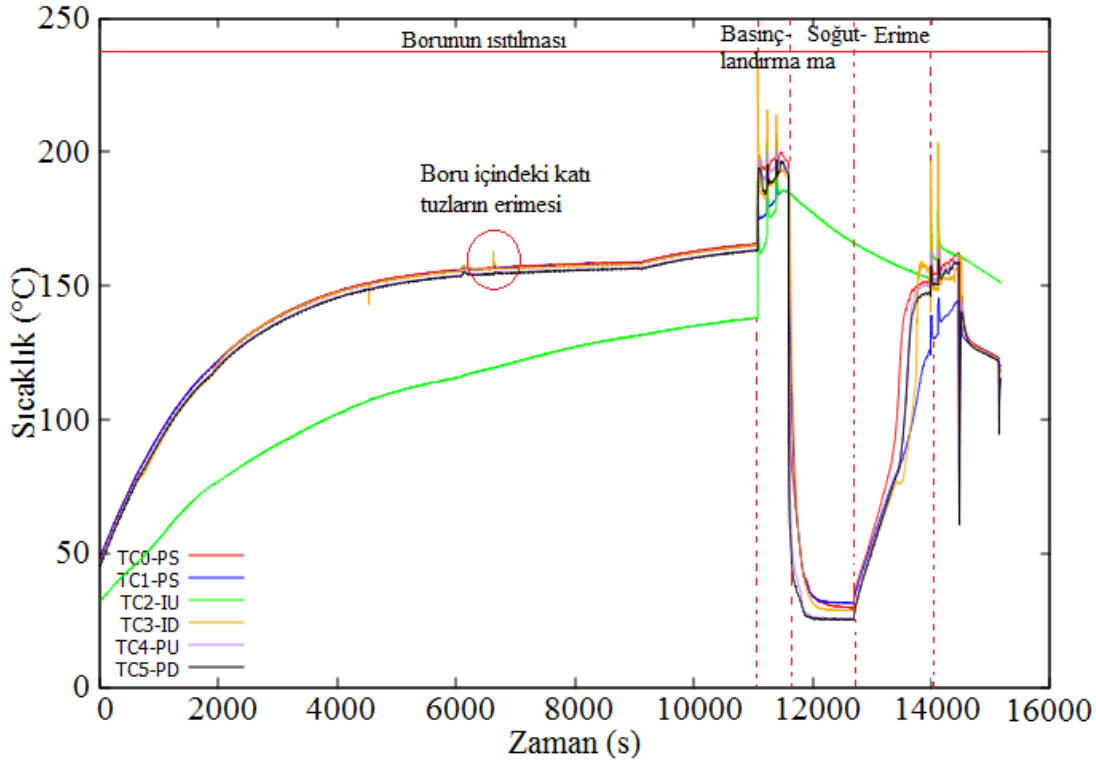
sonunda soğutma durdurularak, basınçlandırma yapılmış ve katı tıpanın oluşup oluşmadığı takip edilmiştir. Sıcaklık değişiminin görülmemesi ve akış sesinin duyulmaması ile katı tıpanın oluştuğu anlaşıncaya bir sonraki aşamaya geçilmiştir.

Son aşamada, soğutma sistemi kapatılmış, tüm ısıtıcılar aktif ve sıcaklık değerleri 508 K'ye sabitlenmiştir. Boru şeffaf olmadığından erimenin gözle takip edilmesi mümkün olmamıştır. Bunun yerine sıcaklık değerlerinin değişimi ve akış sesi ile erimenin gerçekleştiği an tespit edilmiştir. Şekil 3.14'de "erime" etiketi ile işaretlendiği üzere boru içerisindeki ani sıcaklık değişimi ve zirve oluşumu erimenin gerçekleştiğini göstermektedir. Şöyle ki, tıpa eriyince, soğutma sırasında uygulanan basınç sebebi ile tıpa altındaki sıvı formdaki tuz tıpa seviyesine gelmektedir. Sıvı tuz, soğutulmadığı için aniden sıcaklık yükselmesine neden olmaktadır. Şekilde görülen ani sıcaklık yükselmeleri, tıpanın eriyerek açıldığının kanıtı olarak kabul edilmiştir.

Tüm ısıtıcılar kapatılarak deney sonlandırılmıştır. Deney aynı şartlarda 3 kez tekrarlanmıştır. Diğer iki deney için zamana bağlı sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 3.15'de ve Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.15: 2. deney süresince zamana bağlı sıcaklık değişimleri



Şekil 3.16: 3. deney süresince zamana bağlı sıcaklık değişimleri

3.1.4 Deney sonuçları ve analizi

Deney ile sıvı formdaki tuzun katılaştırılması ve sonrasında erimesi sağlanmıştır. Hem katılaşma hem de erime işlemleri için katılaşma ve erime süreleri hesaplanmıştır.

Katılaşma süresi soğutma sisteminin aktif hale geldiği andan, tıpa içerisinde katı formun oluştuğu ana kadar geçen süredir. Boru şeffaf olmadığı için katılaşma süreci gözlem yolu ile takip edilememiştir. Ancak, belirli zaman aralıklarında soğutma sistemi durdurularak basınçlandırma yapılmıştır. 900. saniyede henüz tam bir katılaşma oluşmamışken 1000. saniyede katı form tespit edilmiştir. Bu yüzden katılaşma süresi 1000 saniye olarak kabul edilmiştir.

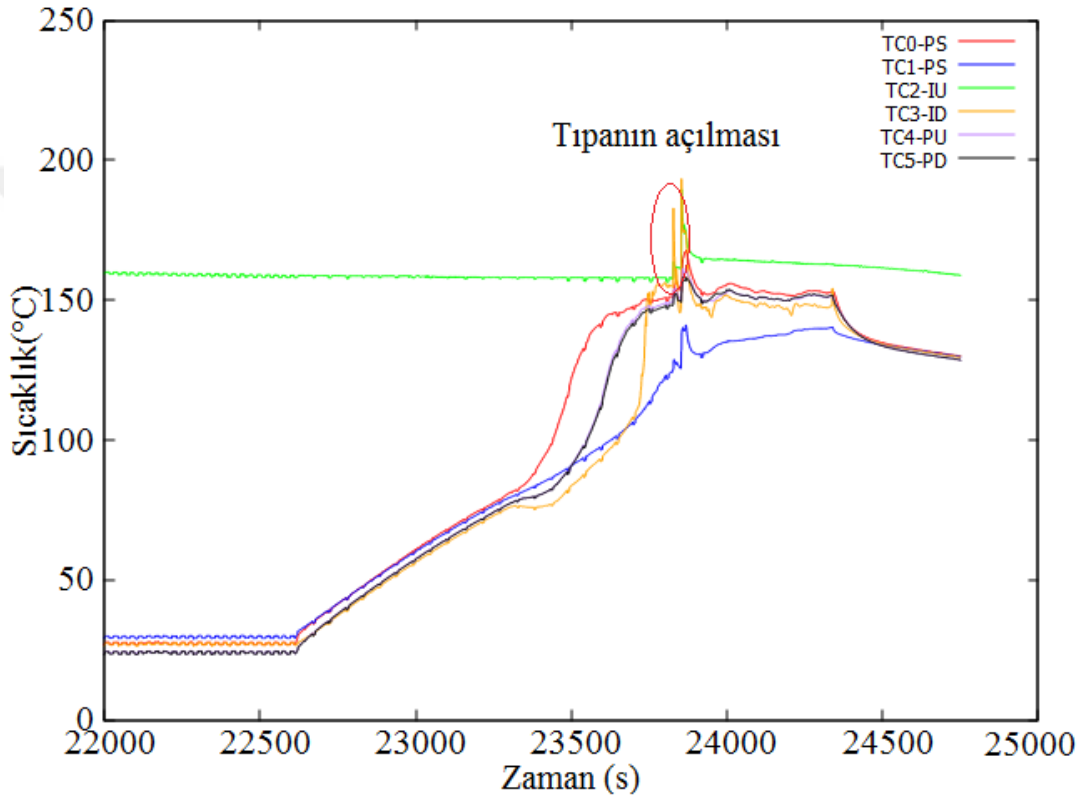
Erime süresi ise soğutma sisteminin kapatıldığı andan tıpanın eriyerek yer çekimine bağlı olarak düşüp açıldığı ana kadar geçen süredir. Tıpa açıldığında, boru içi sıcaklık zirve yapmakta ve akış sesi duyulmaktadır.

Deneylerin tekrarlanması prensibi çerçevesinde, aynı şartlarda deneyler 3 kez tekrarlanarak, erime süreleri belirlenmiştir. Çizelge 3.4'de 3 farklı deneyde tespit edilen erime süreleri görülmektedir. Erime fazındaki sıcaklık değişimi Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Grafiğe göre, ilk başta boru yüzeyinin sıcaklığının arttığı (kısmi

erime), sonrasında ise tıpanın boru yüzeyi ile teması kalmayarak yer çekimi ile düştüğü anlaşılmaktadır. Tıpanın açılması ile boru içerisindeki ısıtıcı çiftlerin basınçlandırılmış sıvı tuza maruz kalması sonucu sıcaklık değerlerinde ani zirve değeri görülmüştür.

Çizelge 3.4: Tekrarlanan deneylerde tespit edilen erime süresi

	1. Deney	2. Deney	3. Deney
Erime başlangıcı (s)	22615	11600	12700
Tıpanın açılma anı (s)	23854	12940	13990
Erime süresi (s)	1239	1340	1290



Şekil 3.17: Erimenin başlamasından tıpanın açılmasına kadar geçen sürede sistemin sıcaklık değişimi

Erime süreleri analiz edildiğinde, ortalama erime süresinin 1290 saniye olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarında 50,5 saniyelik standart sapma vardır. %90 güven aralığı referans alındığında, erimenin 1205-1375 saniye arasında gerçekleşmesi beklenmektedir.

Deneyde kullanılan ölçüm aletlerinin doğruluk oranı, deney sonuçlarının güvenilirliğini etkilemektedir. Bu nedenle, deney sonuçlarını yorumlarken, ölçüm aletlerinin doğruluk oranı göz önünde bulundurulmalıdır. Deneyde kullanılan ölçüm aletleri ve doğruluk oranları aşağıda verilmiştir.

- **K tipi ısıl çift:** Sıcaklık ölçümlerinde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan K tipi ısıl çift doğruluk payı $\pm 0,42$ °C'dir [54]. Kullanılan ısıl çift, ölçülen sıcaklık değerlerinde $\pm 0,42$ °C'lik bir belirsizliğe sahiptir.
- **Veri toplama sistemi-ADAM 6018:** Isıl çift ile okunan değerın dijital ortama aktarılması için kullanılmıştır. Bu modülün doğruluk payı $\pm 0,1$ 'dir [53]. Bu, veri aktarımı sırasında ölçülen verilerin $\pm 0,1$ 'lik bir doğrulukla kaydedildiği anlamına gelmektedir.
- **Debimetre-FL2065:** Soğutma sisteminde hava debisini ölçmek için kullanılmıştır. Bu ölçüm aletinin doğruluk payı ± 3 'tür [55]. Hava debisi ölçümü sırasında ölçülen değerlerin ± 3 'lük bir belirsizlik içerdiği anlamına gelmektedir.

Deney sonuçları ve ölçüm cihazlarının ölçüm belirsizlikleri harmanlanarak değerlendirildiğinde, deneyin tekrarlanabildiği ve elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.

3.2 HAD Modelinin Oluşturulması ve Sonuçlarının Analizi

Bu araştırmada, ANSYS Fluent HAD kodu kullanılarak tuzun erime ve katılaşma davranışı incelenmiş, erime ve tahliye süreleri hesaplanmıştır. Sonuçların güvenilirliğinin ölçülmesi ancak kodun doğrulanması ile mümkün olmaktadır. ANSYS Fluent, ısı transferi problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [35]. Ancak, katılaşma ve erime problemlerinin çözümü için kullanılan entalpi-gözenek yöntemi ve bu yöntem için önemli bir parametre olan geçiş bölgesi değerinin tespit edilmesi ile ilgili literatürde fazla bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple, HAD kodunda deney düzeneğinin bire bir modeli oluşturularak, deney sonuçları ile nümerik sonuçların kıyaslanması amaçlanmıştır. Nümerik yöntemin hata oranı belirlenerek literatüre katkı sunulması da hedeflenmiştir.

3.2.1 HAD modelinin oluşturulması

3.2.1.1 Tıpa borusunun geometrisi

Deneylerde kullanılan tıpa borusu SpaceClaim bilgisayar destekli tasarım programı ile 2 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan geometriye uygun olarak, Şekil 3.18a'da görüldüğü üzere borunun tıpa bölümü düzleştirilmiştir. Hesaplama

maliyetlerini azaltmak için erime problemi gerçek geometrinin ¼'ünde çözülmüştür. Şekil 3.18b'de tıpa borusunun ölçüleri verilmiştir.

Model ağ yapısı 77425 hücreden oluşmaktadır. Sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğunun ispatlanması için, 0,05-0,10-0,20 mm'den oluşan üç farklı ağ boyutu kullanılarak oluşturulan 2 boyutlu modellerde, HITEC tuzunun erime süresi ve sıcaklığı değerlendirilmiştir. Başlangıçta tamamen katı formda olan HITEC tuzunun 1250. saniyedeki tıpa merkezi ve borunun tümü için sıcaklık ve katı oranı değerleri her ağ büyüklüğü için Çizelge 3.5'de gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere ağ büyüklüğünün sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Hem hesaplama maliyeti hem de hücre kalitesi ve ağ eğriliği beraber dikkate alındığında, kullanılacak model için 0,10 mm olan ağ boyutu uygun görülmüştür.

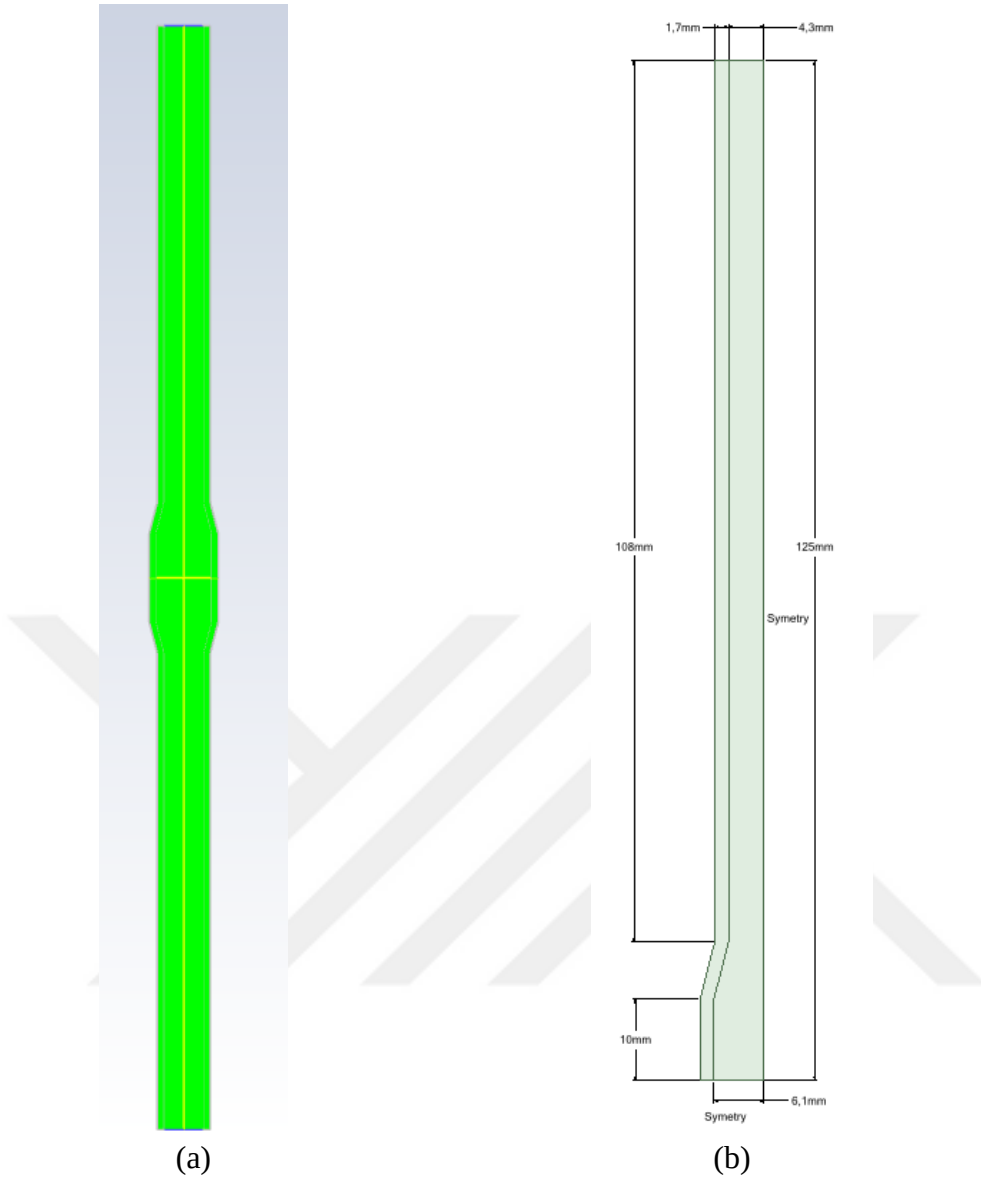
Çizelge 3.5: Farklı ağ büyüklüğündeki katı oranı ve sıcaklık değişimi

Ağ Büyüklüğü (mm)	Hücre Sayısı	Eğrilik	Hücre Kalitesi	Katı Oranı		Sıcaklık(K)	
				Alt	Tüm	Alt	Tüm
0,05	309750	0,59	0,997	0,200	0,843	691,23	723,80
0,10	77425	0,56	0,999	0,205	0,847	691,39	723,97
0,20	19938	0,57	0,992	0,180	0,842	691,10	723,77

3.2.1.2 Problemin başlangıç ve sınır şartları

Problemin başlangıç şartları, deneydeki soğutma fazı sonunda ısı çiftlerinde okunan değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Deneysel verilere göre tıpadaki tuz soğutma sonucu katı fazındadır ve sıcaklığı 293 K'dir. Tıpa seviyesindeki duvar sıcaklığı da Şekil 3.14'e göre 293 K'dir. Tıpanın üst bölümünde yer alan 2 numaralı ısı çiftte okunan değere göre, tıpanın üst bölgesinin sıcaklığı 413 K olarak belirlenmiştir. Bu bölümdeki tuz, erime sıcaklığına çok yakın katı formda bulunmaktadır.

Tıpanın üst bölümündeki boruda hem ısıtıcı kartuş hem de ısıtıcı bant bulunması sebebiyle ve ısıtıcıların sıcaklığının 508 K'ye sabitlenmesinden dolayı, duvar ve giriş sıcaklık sınır şartı 508 K olarak belirlenmiştir. Duvarların tamamına yalıtım uygulandığı için duvarların adyabatik olduğu kabul edilmiştir. Oluşturulan modelin başlangıç ve sınır şartları sırasıyla Şekil 3.19a'da ve Şekil 3.19b'de gösterilmiştir.



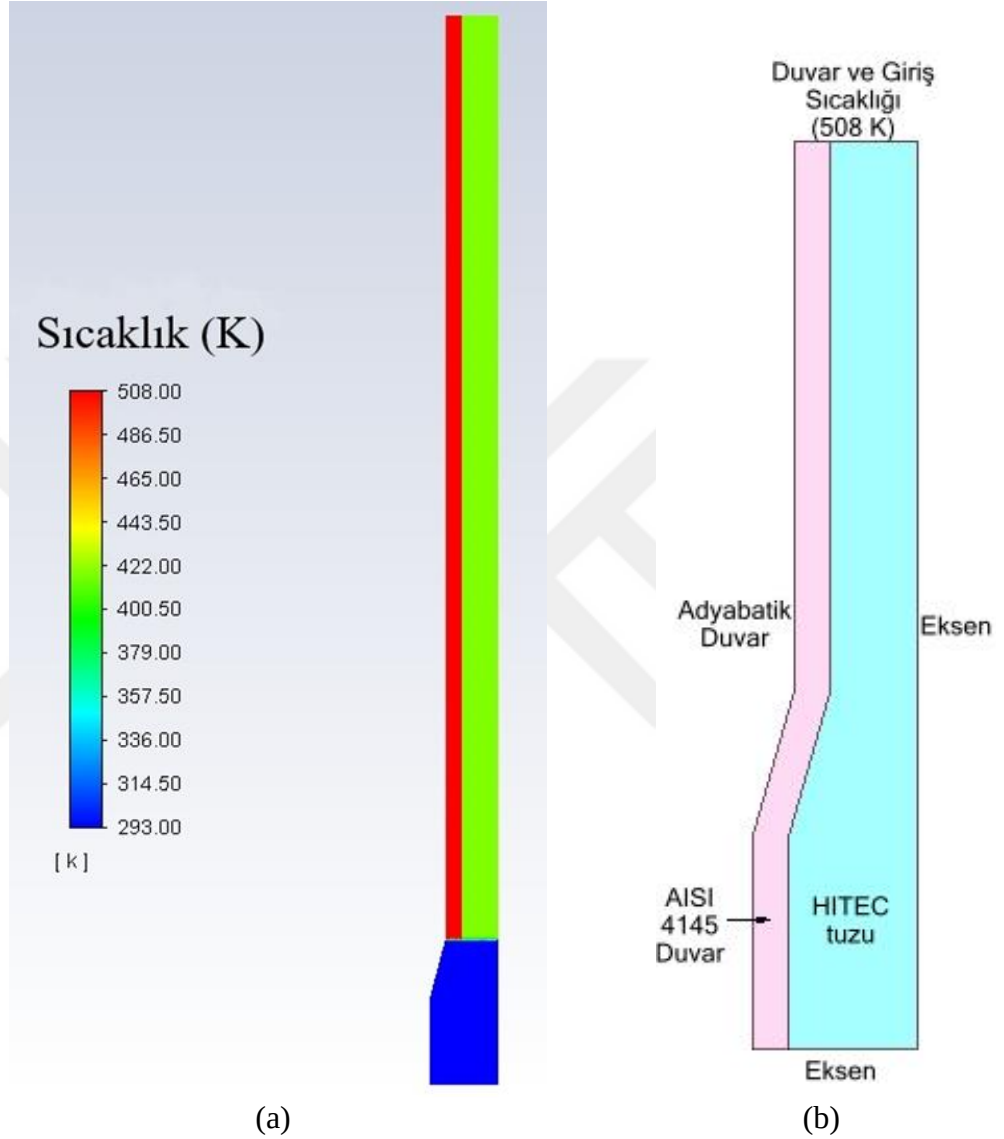
Şekil 3.18: (a)Tıpa borusu modeli (b) 1/4 tıpa geometrisi ve boyutları

3.2.2 Simülasyon sonuçları ve geçiş bölge parametresinin tespiti

ANSYS Fluent HAD kodunun 2019 R2 sürümü kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup, kodun donma-erime modülü kullanılmıştır. Katılaşma ve erimenin zamana bağlı bir fenomen olduğu göz önüne alındığında, geçiş (transient) simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı büyüklüğü 0,01 s olarak seçilmiş ve yakınsamayı garanti altına almak için zaman adımı başına 2500 iterasyon (yineleme) uygulanmıştır. Enerji ve katılaşma-erime denklemleri etkinleştirilmiştir. Model basınç tabanlı çözücü kullanılarak çözülmüştür. Yakınsama kriteri 10^{-6} olarak belirlenmiştir.

Katılaşma-erime analizi için entalpi-gözenek tekniği kullanılmıştır. Geçiş bölge parametresinin doğru tespit edilebilmesi için model sırasıyla 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 ve 10^7

geçiş bölgesi değerleri ile çözülerek erime süresi deneyde bulunan erime süresi ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, doğru geçiş bölgesi parametresinin tespiti amaçlanmıştır. Çizelge 3.6 simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile kıyaslamasını göstermektedir.



Şekil 3.19: Modelin (a) Başlangıç şartları (b) Sınır şartları

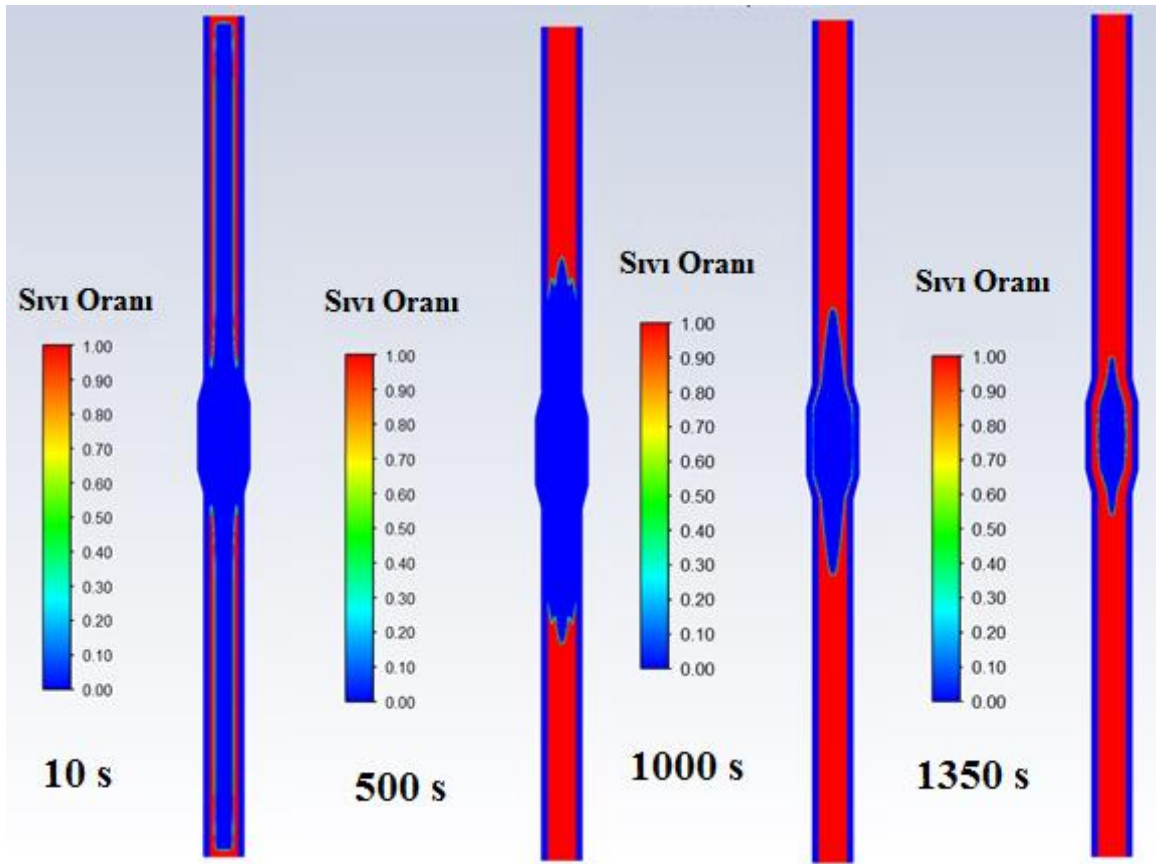
Çizelge 3.6: Farklı geçiş bölgesi parametrelerindeki erime sürelerinin deney sonucu ile kıyaslanması

	Deney	Geçiş Bölgesi Parametresi				
		10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Erime süresi (s)	1290	1846	1780	1354	1136	1329
Hata (%)	-	43	38	5	4	3

Düşük geçiş bölgesi parametresi seçildiğinde, erime süresinin yüksek hata yüzdesi ile hesaplandığı görülmüştür. Bunun sebebi, geçiş bölgesi parametresi 10^3 veya 10^4 gibi

küçük değerlerde seçildiğinde, katı formda hızı sıfır olan tuzun eriyerek sıvı forma geçerken hızının geç artmasıdır. Bu da duvardan tıpayı ısı transferini azalmakta ve erime süresini artırmaktadır. Diğer taraftan, 10^6 veya 10^7 gibi büyük geçiş bölgesi parametreleri seçildiğinde, hata payı azalsa da sistem kararsızlığı artmakta ve çözümün yakınsaması zorlaşmaktadır. Bu yüzden, deneyde kullanılan model için en uygun geçiş bölgesi parametresinin 10^5 olduğuna karar verilmiştir.

Belirlenen geçiş bölgesi parametresi ile yapılan çözümde elde edilen sıvı oranının zamanla değişimi Şekil 3.20’de gösterilmiştir.

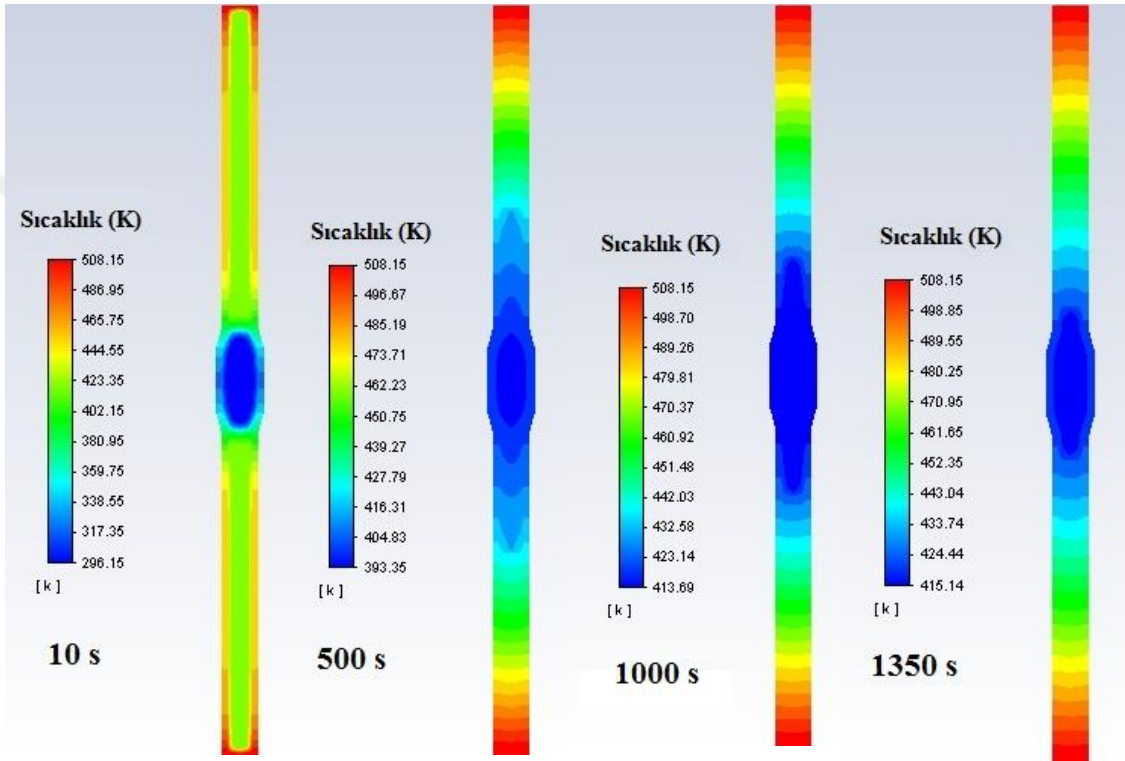


Şekil 3.20: Tahliye borusundaki sıvı oranının zamana bağlı değişimi

Başlangıçta boru içerisinde tamamen katı olan tuz, uygulanan ısı ile duvar tarafında erimeye başlamıştır. 500. saniyeye gelindiğinde, boru içerisindeki tuzun eridiği ancak tıpadaki tuzun katı formunu koruduğu görülmüştür. 1000. saniyede tıpadaki tuzun da duvar tarafından erimeye başladığı tespit edilmiştir. 1350. saniyede, tıpanın duvar ile temasının kalmadığı görülmüştür. Tıpanın merkezinde, sıvı oranı %29,5 olduğunda katı tuzun borudan yerçekimine bağlı olarak düşeceği değerlendirildiğinden,

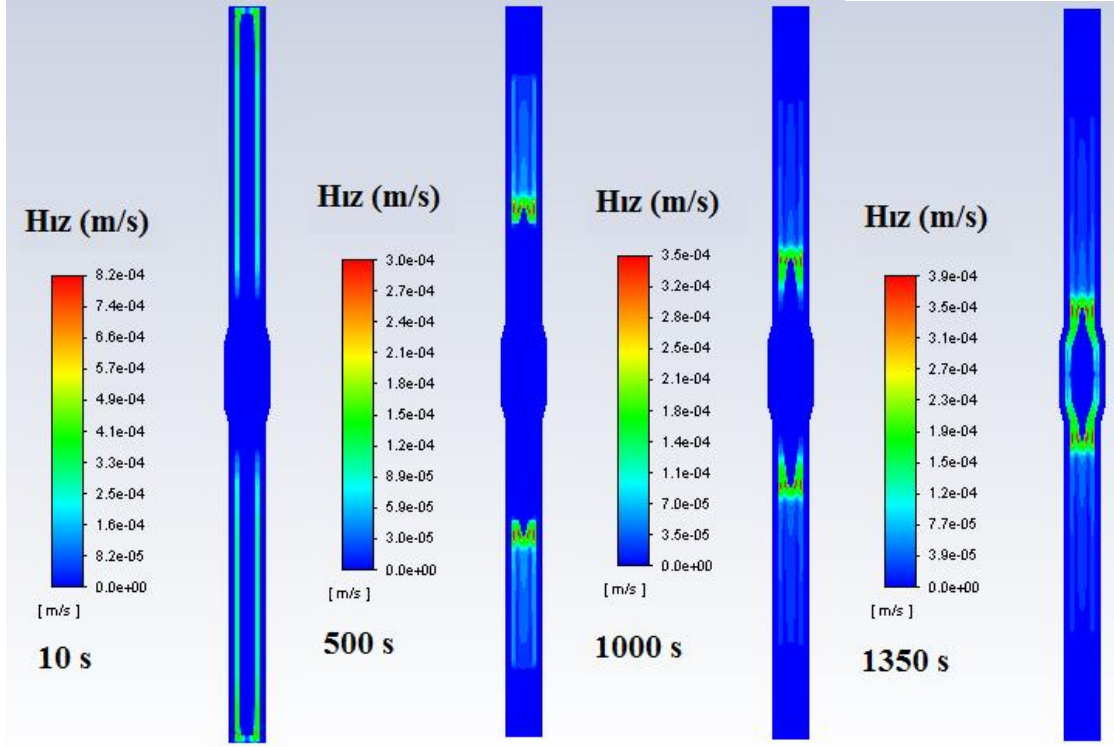
simülasyon bu anda durdurulmuş ve tıpanın açıldığı kabul edilmiştir. Yüzdelik oran, tıpa çapının boru çapına oranı ile hesaplanmıştır.

Şekil 3.21’de ise tahliye borusundaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Isıtıcıların konumu dolayısı ile borunun üst ve alt bölgesinden tıpayla doğru, duvarlardan boru merkezine doğru ısı akışı başlamıştır. 1000. saniyeye gelindiğinde, tıpanın sıcaklığının tuzun erime sıcaklığına eriştiği görülmüştür. Daha sonrasında bu sıcaklıkta erime başlamıştır.



Şekil 3.21: Tahliye borusundaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Şekil 3.22’de tahliye borusundaki hızın zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Katı fazdaki tuzun hızının sıfır olduğu görülmüştür. Erimenin olduğu bölgelerde, malzemenin hızının sıfırdan farklılaşarak ısı transferini hızlandırdığı belirlenmiştir.



Şekil 3.22: Tahliye borusundaki hızın zamana bağlı değişimi

4. KATI TİPANIN FARKLI İŞLETME KOŞULLARINDAKİ DAVRANIŞININ ANALİZİ

Bu bölümde HAD yöntemi kullanılarak tıpanın farklı işletme koşullarındaki katılaşma ve erime davranışları analiz edilmiş ve erime-katılaşma süreleri hesaplanmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında katı tıpanın normal işletme koşullarında kabul edilebilir bir davranış gösterip göstermediği ve pasif güvenlik sistemi olarak kabul edilip edilemeyeceği değerlendirilmiştir.

Tıpanın reaktör içerisinde karşılaşması muhtemel farklı işletme koşulları aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- ✓ **Katılaşma Fazı:** Reaktör çalışmaya başlamadan önce sıvı fazdaki tuzun soğutularak katılaştırıldığı ve tahliye borusunda tıpa görevi görmeye başladığı fazdır.
- ✓ **İşletme Öncesi Fazı:** Tuzun katılaştıktan sonra reaktörün tam güçte çalışmaya başlamasına kadar geçen zamanı kapsayan fazdır. Bu fazda, tuz katı halde kalarak tıpa görevi görmeli ve içerisindeki sıcaklık dağılımı dengeye ulaşmalıdır.
- ✓ **Reaktör İşletme Fazı:** Reaktörün tam güçte çalıştığı fazdır. Tıpanın katı formda kalması ve tıpa sıcaklığının ve sıvı/katı oranının kararlı hale gelmesi gerekmektedir.
- ✓ **Kaza Fazı:** Reaktörün kaza nedeniyle kapatıldığı fazdır. Tıpanın soğutma sisteminin otomatik olarak durması ve tıpanın bozunum ısısı nedeniyle erimesi gerekmektedir.

Bu dört farklı işletme koşulu, HAD kodu ANSYS Fluent (2019 R2 versiyonu) kullanılarak analiz edilmiştir. Enerji ve katılaşma-erime denklemleri aktif hale getirilmiştir. Bu süreç zamana bağlı bir değişimi içerdiğinden, simülasyon zamana bağlı olarak çalıştırılmıştır. Zaman adımı 0,01 saniye seçilmiş ve yakınsamanın garanti altına alınması için her bir zaman adımında 2500 çözüm tekrarı belirlenmiştir. Çözüm için, basınç bazlı çözücü kullanılmıştır, bunun sebebi katılaşma-erime modellerinin

yalnızca basınç bazlı çözücüler ile çalışabilmesidir. Geometri, 77600 ağ yapısına bölünmüş ve yakınsama kriteri 10^{-6} olarak seçilmiştir. Geçiş bölge parametresi bir önceki bölümde belirlendiği gibi 10^5 olarak alınmıştır.

Dört çalışma fazı incelenmeden önce, sonuçların ağ büyüklüğünden ve model boyutundan bağımsız olduğu ispatlanmış ve optimal tahliye borusu duvar kalınlığının tespiti yapılmıştır.

4.1 İdeal Ağ Boyutunun Seçilmesi

Ağ büyüklüğü HAD sonuçlarının doğruluğu için önemli bir parametredir. Bölüm 2.5'te detaylı olarak açıklandığı gibi küçük ağ boyutu ayırıklaştırma hatasını azaltırken hesaplama maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle, ideal ağ boyutunun seçilmesi önem arz etmektedir.

Bu bölümde, 0,10-0,15-0,20-0,30 mm'den oluşan dört farklı ağ boyutu kullanılarak oluşturulan 2 boyutlu modellerde, FLiBe tuzunun katılaşma süresi ve sıcaklığı değerlendirilmiştir. Başlangıçta tamamen sıvı formda olan FLiBe tuzunun 900. saniyedeki tıpa altı ve tıpanın tümü için sıcaklık ve katılaşma oranı değerleri her ağ büyüklüğü için Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere ağ büyüklüğünün sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Hem hesaplama maliyeti hem de hücre kalitesi ve ağ eğriliği beraber dikkate alındığında, kullanılacak model için 0,15 mm olan ağ boyutu uygun görülmüştür.

Çizelge 4.1: Farklı ağ büyüklüğündeki katı oranı ve sıcaklık değişimi

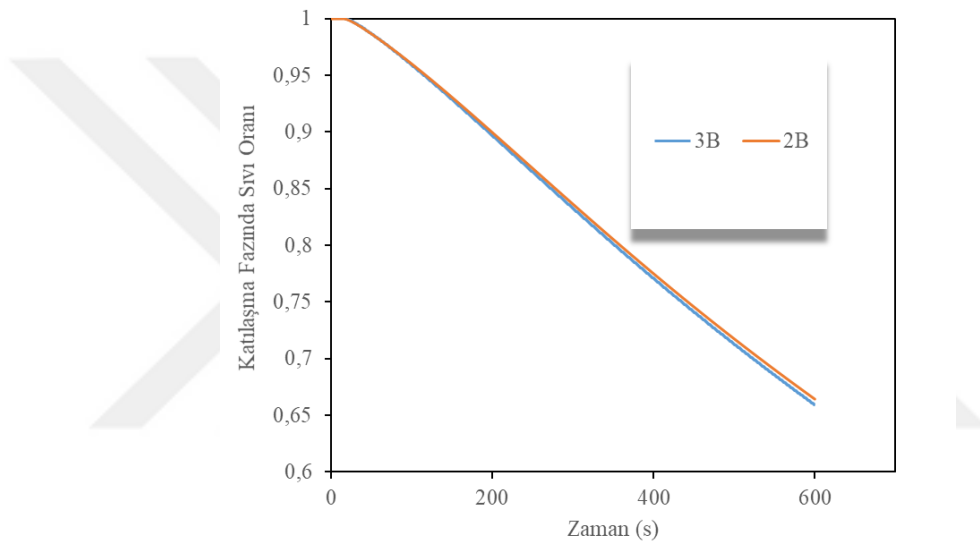
Ağ Büyüklüğü (mm)	Hücre Sayısı	Eğrilik	Hücre Kalitesi	Katı Oranı		Sıcaklık(K)	
				Alt	Tüm	Alt	Tüm
0,10	174593	0,26	0,76	0,99	0,47	876,90	975,10
0,15	77600	0,03	0,99	0,99	0,47	876,80	975,10
0,20	43946	0,03	0,98	0,99	0,47	876,60	975,00
0,30	19400	0,03	0,98	0,99	0,48	876,20	975,80

4.2 Simülasyon Model Boyutunun Belirlenmesi

HAD analizlerinin sunduğu en önemli avantaj problem geometrisinin 3 boyutlu olarak modellenebilmesidir. Ancak, 3 boyutlu modelleme simülasyon süresini oldukça artırmaktadır. Bu durumlarda boyut düşürme sıklıkla uygulanan bir yöntemdir. Boyut

düşürme yapılırken sonuçların hassasiyetindeki düşüşün minimum olmasına dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada 3 boyutlu geometri yerine 2 boyutlu geometrinin kullanılması ile hesaplama maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla 3B ve 2B olmak üzere iki model oluşturulmuş ve her biri için katılaşma fazı analiz edilmiştir. İki nümerik çözümün sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1, iki model için katılaşma fazındaki sıvı oranı değişimini göstermektedir. Her iki modelde de sıvı oranının zamanla değişimi çok benzer olduğundan, katı tıpa analizlerinin 2 boyutlu model ile yapılmasına karar verilmiştir.

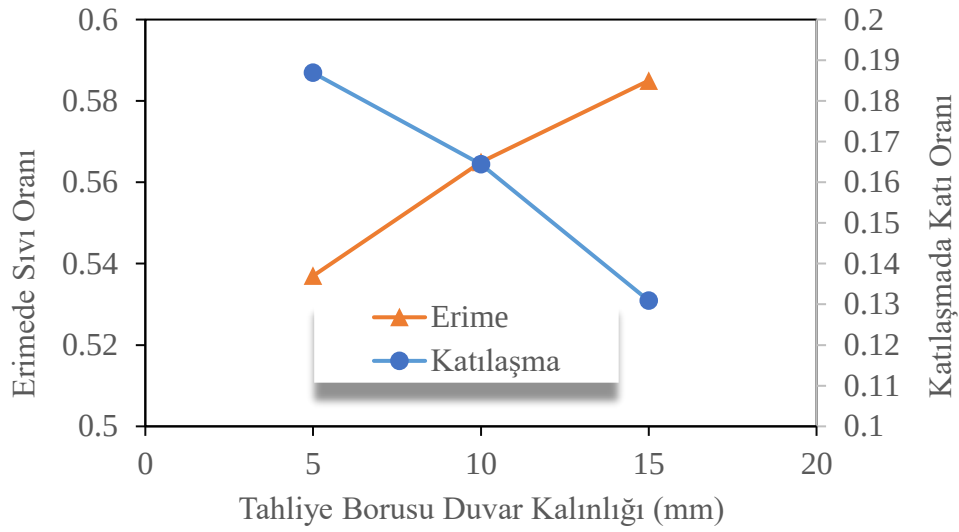


Şekil 4.1: Katılaşma fazındaki sıvı oranının 3 boyutlu ve 2 boyutlu modellerde değişimi

4.3 Optimal Tahliye Borusu Duvar Kalınlığının Belirlenmesi

Tahliye borusu duvar kalınlığı, katılaşma ve erime sürecini doğrudan etkilediği için önemli bir parametredir. Tahliye borusu malzemesi Hastelloy-N alaşımının ısı iletkenliği FLiBe tuzundan daha yüksek olduğundan bu durum, ısı transferinin ve erimenin duvar tarafından başlamasına neden olmaktadır. Bu sebeple, daha kalın duvar, duvardan katı tıpayı ısı transferini hızlandırmaktadır. Ancak, tıpanın soğutulması dış duvardan sağlandığından daha kalın duvar soğutma etkisini azaltmaktadır. Sonuç olarak, bu iki zıt durum dikkate alınarak, optimal duvar kalınlığının tespiti yapılmalıdır.

Bu çalışmada, 5-10-15 mm'lik muhtemel duvar kalınlıkları ile oluşturulan modeller hem katılaşma hem de erime fazları için çözülmüştür. Şekil 4.2'de simülasyon sonuçları paylaşılmıştır. 5 mm kalınlığındaki boruda soğutmanın ve tuzun katılaşmasının daha hızlı olduğu görülürken, 15 mm kalınlığındaki boruda ısı transferinin ve tıpanın erimesinin daha hızlı olduğu görülmüştür. Sonuçlardan katılaşma için 5 mm ve erime için 15 mm kalınlığındaki borunun kullanılmasının ideal olduğu görülmüştür. Her iki durum beraber dikkate alındığında, 10 mm kalınlığındaki borunun katı tıpa tasarımı için uygun olduğuna karar verilmiştir.



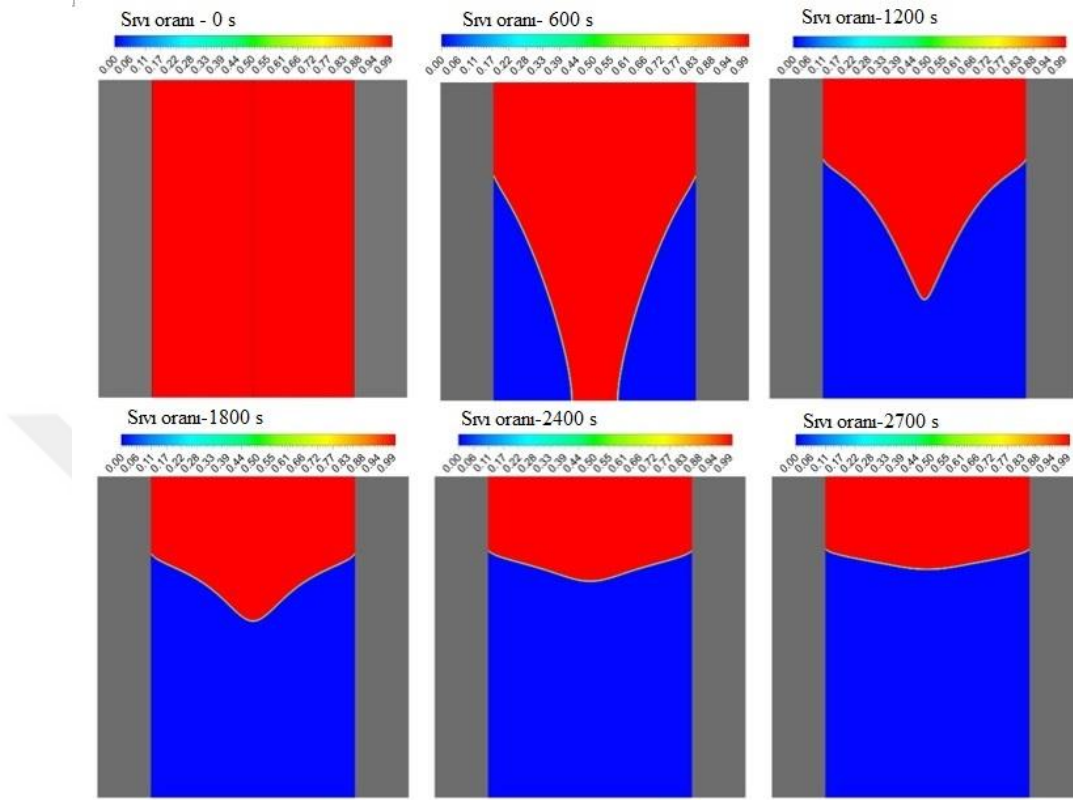
Şekil 4.2 : Farklı duvar kalınlıklarında erime ve katılaşma oranları

4.4 Katılaşma Fazı

Katılaşma fazının amacı, sıvı formdaki FLiBe tuzunun katılaşmasını sağlayarak, tahliye borusunu tıkamak ve katı tıpa formunu oluşturmaktır. Katılaşma fazı simülasyonu için soğutma sistemi aktive edilmiş ve soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Soğutulan duvar sıcaklığının 298 K olduğu kabul edilmiştir.

Havanın hacimsel debisi, katı formunun oluşmasını sağlayacak şekilde $102 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ olarak seçilmiştir. Bu fazda, reaktör çalışmıyor olsa bile, reaktörün ve ATS sıcaklığının, tuzun erime sıcaklığı olan 732 K'den yüksek olması gerektiğinden tutucu bir yaklaşım ile bu sıcaklık 823 K olarak seçilmiştir. 2700 saniye süresince 0,01 saniyelik zaman adımı ile soğutma uygulanmış ve simülasyon sürdürülmüştür.

Şekil 4.3 katılaşma fazında farklı zamanlardaki sıvı oranını göstermektedir. Başlangıçta tuzun tamamen sıvı olduğu ve soğutma sisteminin çalışması ile duvar tarafından başlayarak katı formun oluşmaya başladığı görülmektedir.

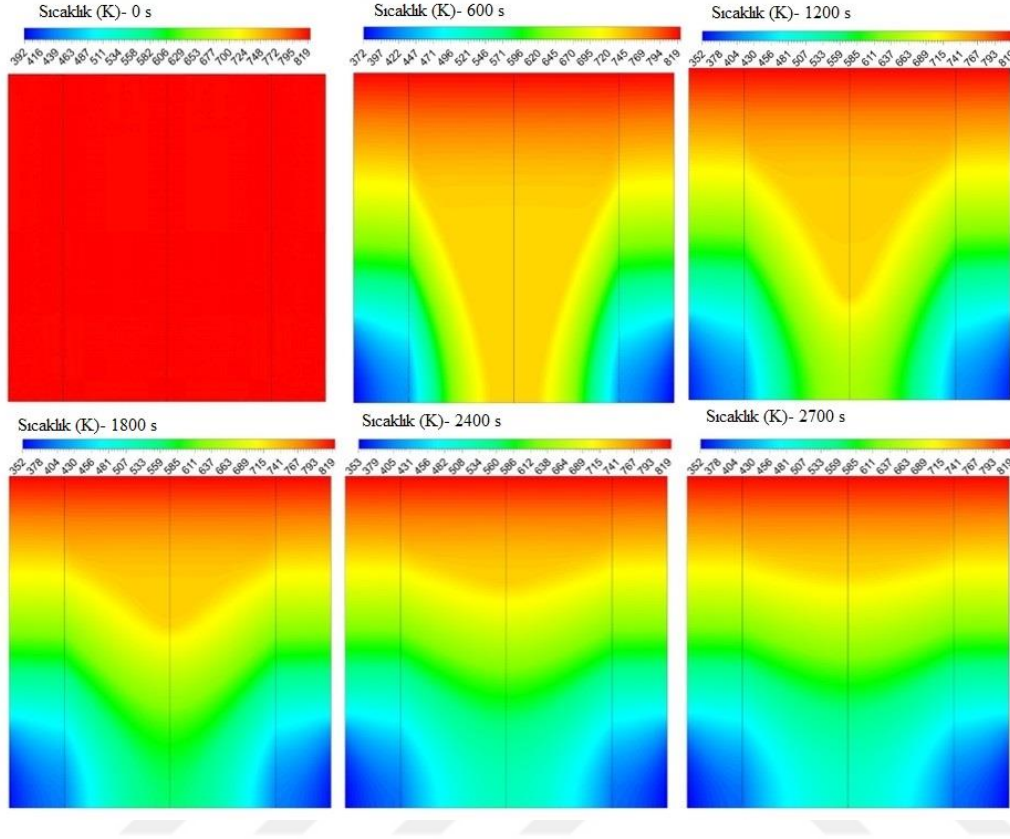


Şekil 4.3: Katılaşma fazında zamanla sıvı oranının değişimi

1200. saniye gelindiğinde borunun merkezinde katı formun oluştuğu ve borunun tıpa ile kapandığı görülmüştür. Buna rağmen tıpanın kalınlığını artırmak için soğutma devam ettirilmiştir. 2700 saniye sonrasında, duvar tarafında 46 mm kalınlığında, merkezde ise 42,5 mm kalınlığında katı form oluştuğu görülmüştür. Bu kalınlık farkı, duvar etkisi ile yani Hastelloy-N alaşımının yüksek ısı iletkenliği nedeniyle oluşmuştur.

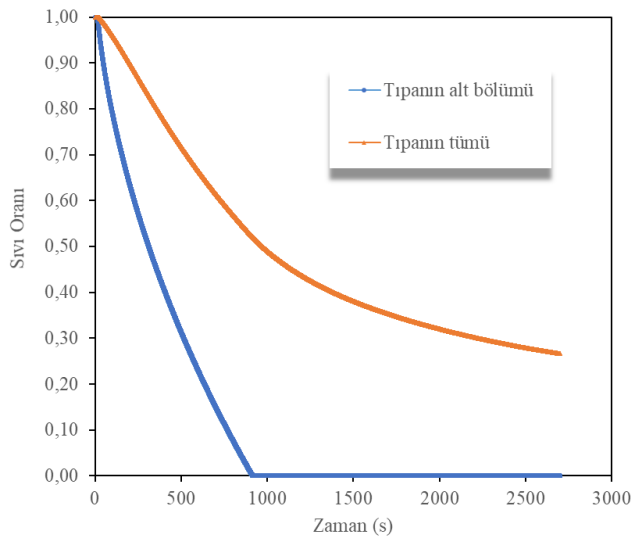
Şekil 4.4 katılaşma fazındaki tıpa içerisindeki sıcaklık değişimini göstermektedir. Başlangıçta, duvar ve tuz sıcaklığı 823 K olarak hesaplanmıştır. Soğutma sisteminin aktive edilmesi ile tuz soğumaya başlamış ve soğutma sisteminin alt bölüme yerleştirilmesi sebebiyle alt bölümde hızlı bir soğuma görülmüştür. Diğer taraftan 600. saniyeye gelindiğinde borunun merkezinde sıcaklığın katılaşma sıcaklığından yüksek olduğu tespit edilmiştir. 1200. saniyeye gelindiğinde soğutma devam ettirilmiş ve buna

bağlı olarak merkezde de sıcaklığın düştüğü görülmüştür. Soğutmanın devam etmesi ile duvardan merkeze tek tip bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.



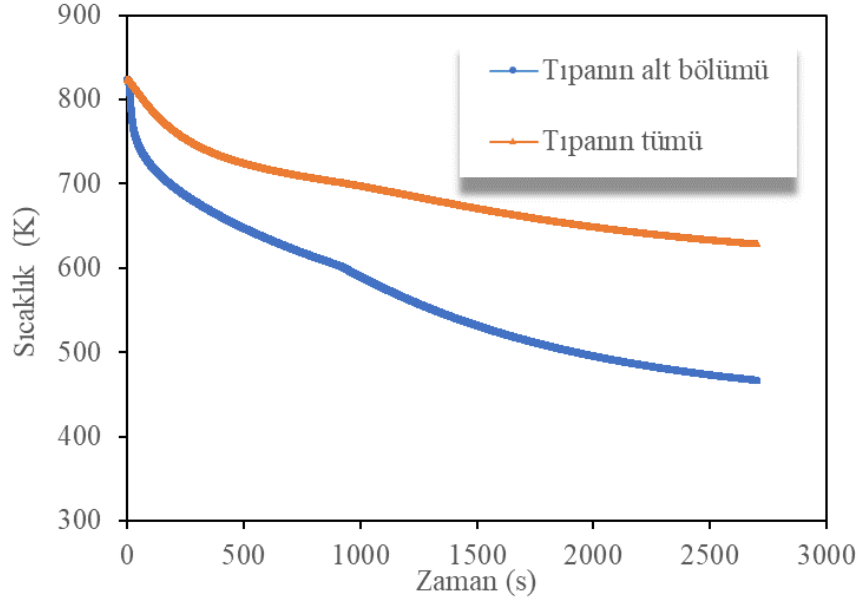
Şekil 4.4: Katılaşma fazında katı tıpanın sıcaklığının zamanla değişimi

Şekil 4.5, başlangıçta tamamen sıvı olan tuzun zamanla katı forma dönüşme oranını hem tıpanın tümünde hem de sadece alt bölümünde göstermektedir.



Şekil 4.5: Katılaşma fazında zamanla sıvı oranının değişimi

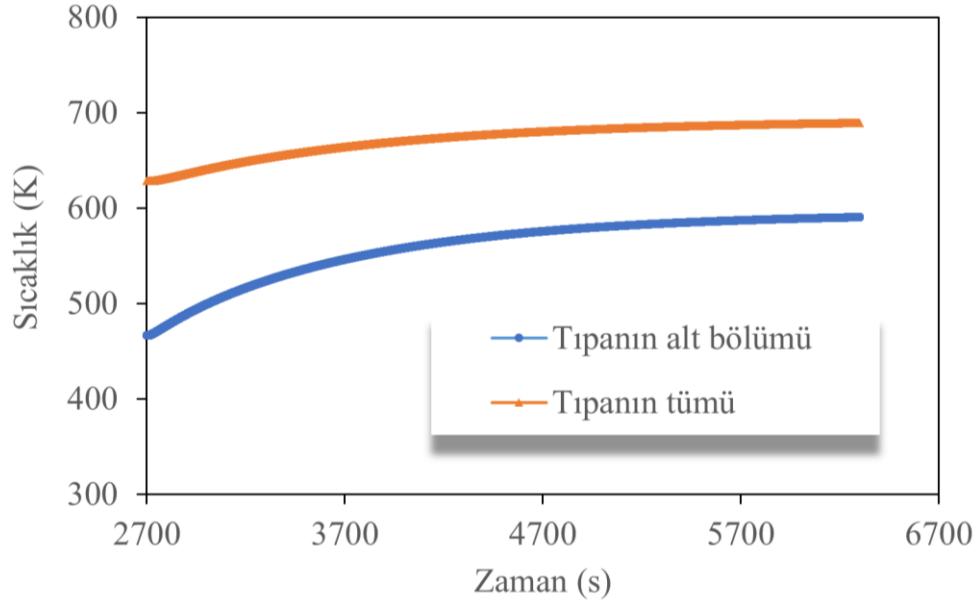
Tıpanın alt bölümün yaklaşık 900 saniye içerisinde tamamen katılaştığı görülmüştür. Tıpanın %70'inin ise 2700 saniye içinde katılaştığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 4.6'da tıpa içerisinde tuzun tamamının ve sadece alt bölümünün sıcaklığının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Alt bölümdeki sıcaklığın hızlı düşüşü, soğutma sisteminin alt bölüme konumlandırılmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 4.6: Katılaşma fazında zamanla sıcaklığın değişimi

4.5 İşletme Öncesi Fazı

İşletme öncesi fazının amacı katı forma dönüşmüş ve katı tıpa formunu almış olan FLiBe tuzunun katı formda kalabildiğinin kanıtlanmasıdır. Reaktörün tam güç çalışmaya ne kadar sürede geçeceği bilinmediğinden bu fazın simülasyonu katı tıpanın sıcaklığı dengelenene kadar devam ettirilmiştir. Soğutucu akışkan hava ve soğutulan duvar sıcaklığının 298 K olduğu kabul edilmiştir. Akışkanın hacimsel debisi, tıpadaki tuzun daha fazla katılaşmasını engellemek ve tıpanın açılma süresini uzatmamak için $13 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ 'e düşürülmüştür. Bölüm 4.4'de açıklandığı üzere reaktör sıcaklığı giriş sınır şartı olarak 823 K olarak kabul edilmiştir. Bu fazda tıpayı zaman-adımının 0,01 saniye olduğu toplam 3600 saniye soğutma sağlanmış ve sonrasında simülasyon durdurulmuştur. Çünkü bu andan itibaren, Şekil 4.7'de görüldüğü üzere sıcaklık hem tıpanın tümünde hem de alt bölümünde sabit kalmıştır. Katı form oluştuktan sonra reaktörün çalışması daha uzun sürecek bile olsa ısıl denge kurulduğundan tıpanın sıcaklığı ve faz oranı değişmeyecektir.

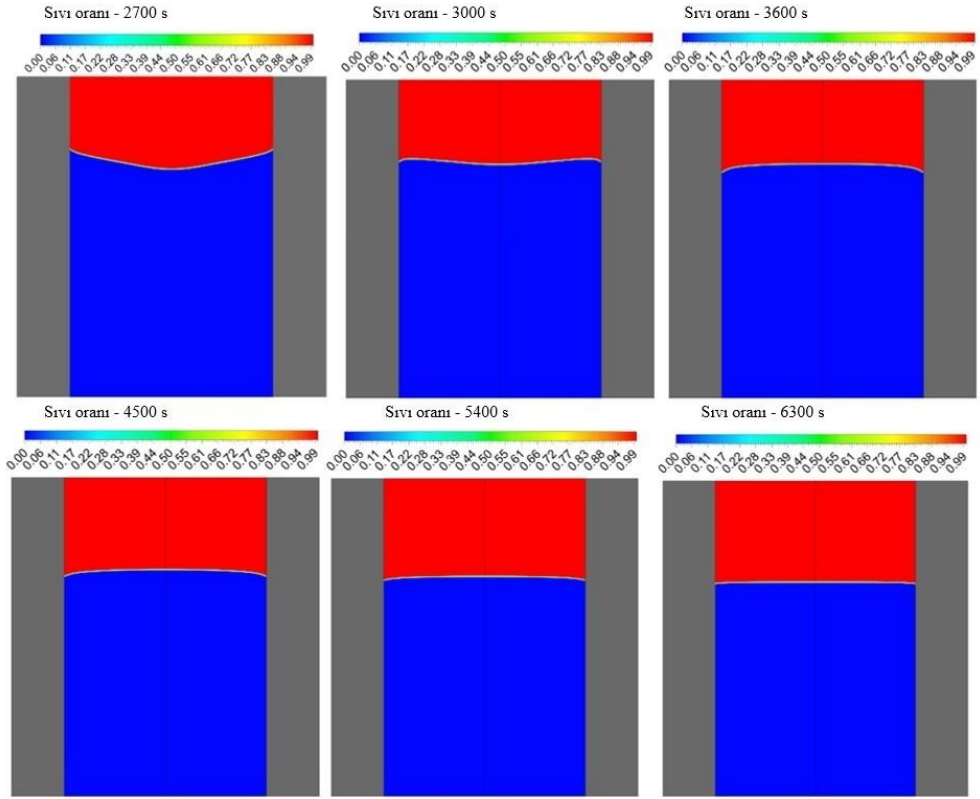


Şekil 4.7: İşletme öncesi fazında sıcaklığın zamana bağlı değişimi

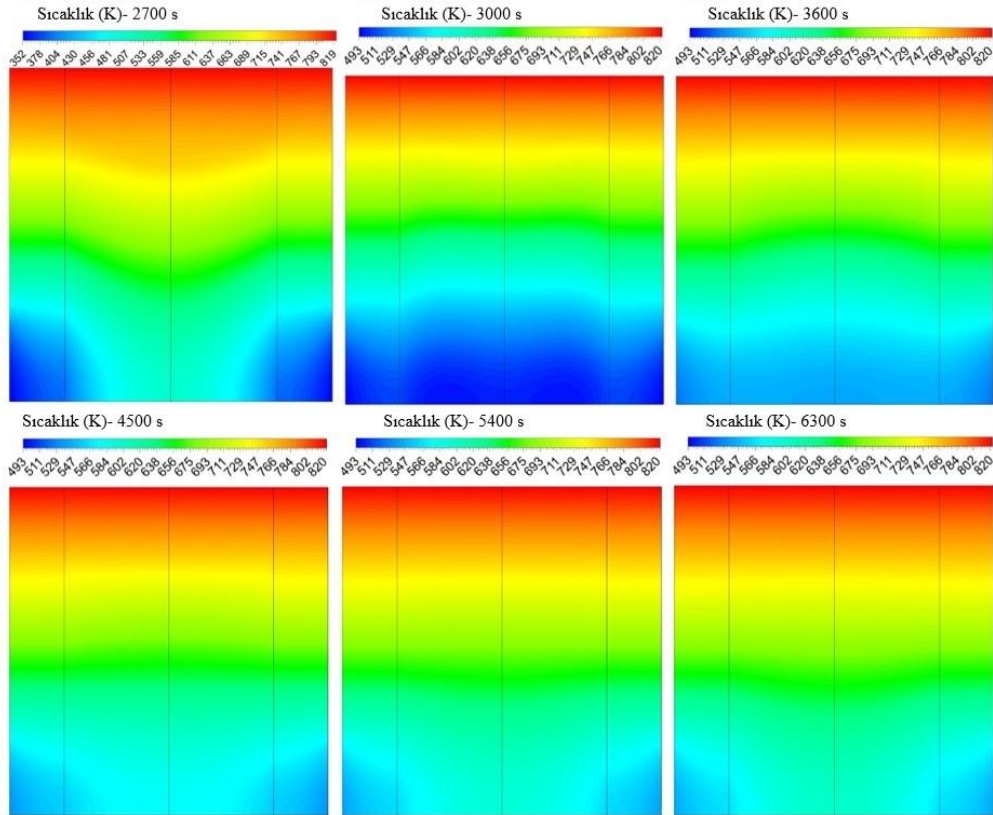
Şekil 4.8 çalışma öncesi fazda tahliye borusundaki sıvı oranının zamanla değişimini göstermektedir. Bu fazın başlangıcında (2700. saniyede) tıpanın %70'inin katı formda olduğu görülmüştür. Soğutucu akışkanın hacimsel debisinin düşürülmesinden dolayı tıpa, duvar tarafından 3000-3600 saniyeleri arasında erimiştir. Bu andan itibaren reaktör sıcaklığının etkisindeki tıpanın üst bölümü ile soğutma sisteminin etkisindeki tıpanın alt bölümü arasında ısıl denge kurulduğundan, 4500-5400 saniyeleri arasında duvar etkisi görülmemiştir. 6300. saniyeye gelindiğinde katı-sıvı faz dengesinin de kurulduğu ve katı tıpanın kalınlığının 40,5 mm olduğu görülmüştür.

Şekil 4.9 hem tıpanın tümünde hem de tıpanın alt bölümünde sıcaklığın zamanla değişimini göstermektedir. Duvardaki ısıl dengeden dolayı, soğutma sisteminin tıpanın merkezine etkisi 3000. saniyede görülmüştür. 3600. saniyede tıpa içerisinde sıcaklığın radyal yönde değişmediği ve tek tip olduğu belirlenmiştir. 4500. saniyeden sonra bu durumun eksen boyunca tıpanın üst bölgelerine doğru geliştiği görülmüştür.

Gerçekte reaktörün aktif hale gelmesi daha uzun zaman alacak olmasına rağmen 6300. saniyede bu faz sonlandırılmıştır. Çünkü simülasyon sonuçları, bu çalışma şartlarında tıpanın katı formda kaldığını ve sıcaklığın dengede olduğunu, böylece istenmeyen bir erimenin gerçekleşmeyeceğini göstermiştir.



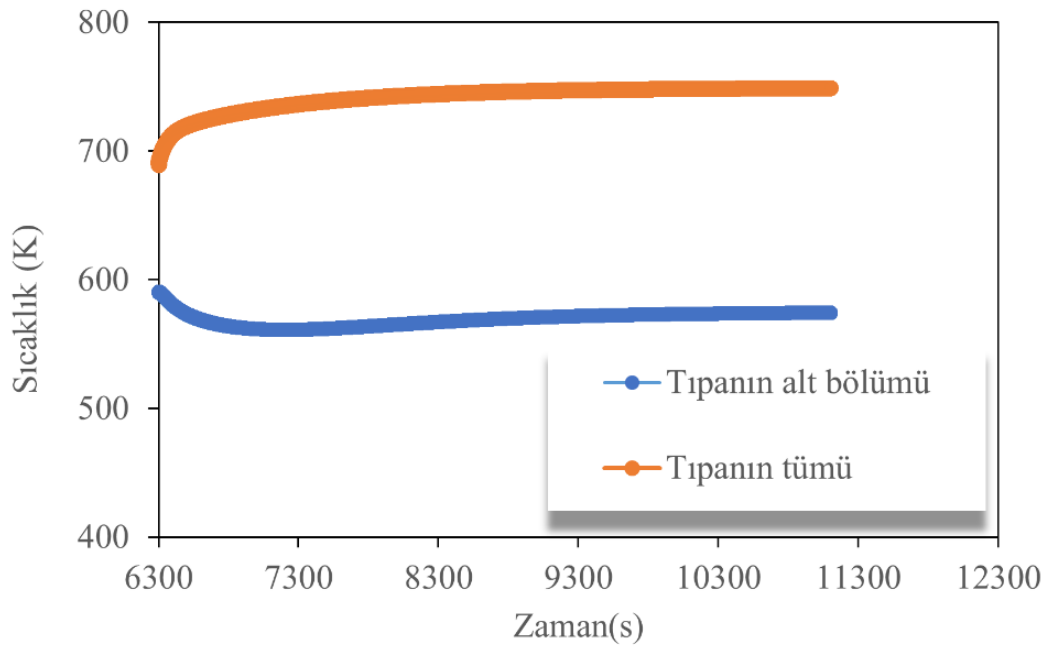
Şekil 4.8: İşletme öncesi fazında katı tıpanın sıvı kütlesinin zamana bağlı değişimi



Şekil 4.9: İşletme öncesi fazında katı tıpanın sıcaklığının zamana bağlı değişimi

4.6 Reaktör İşletme Fazı

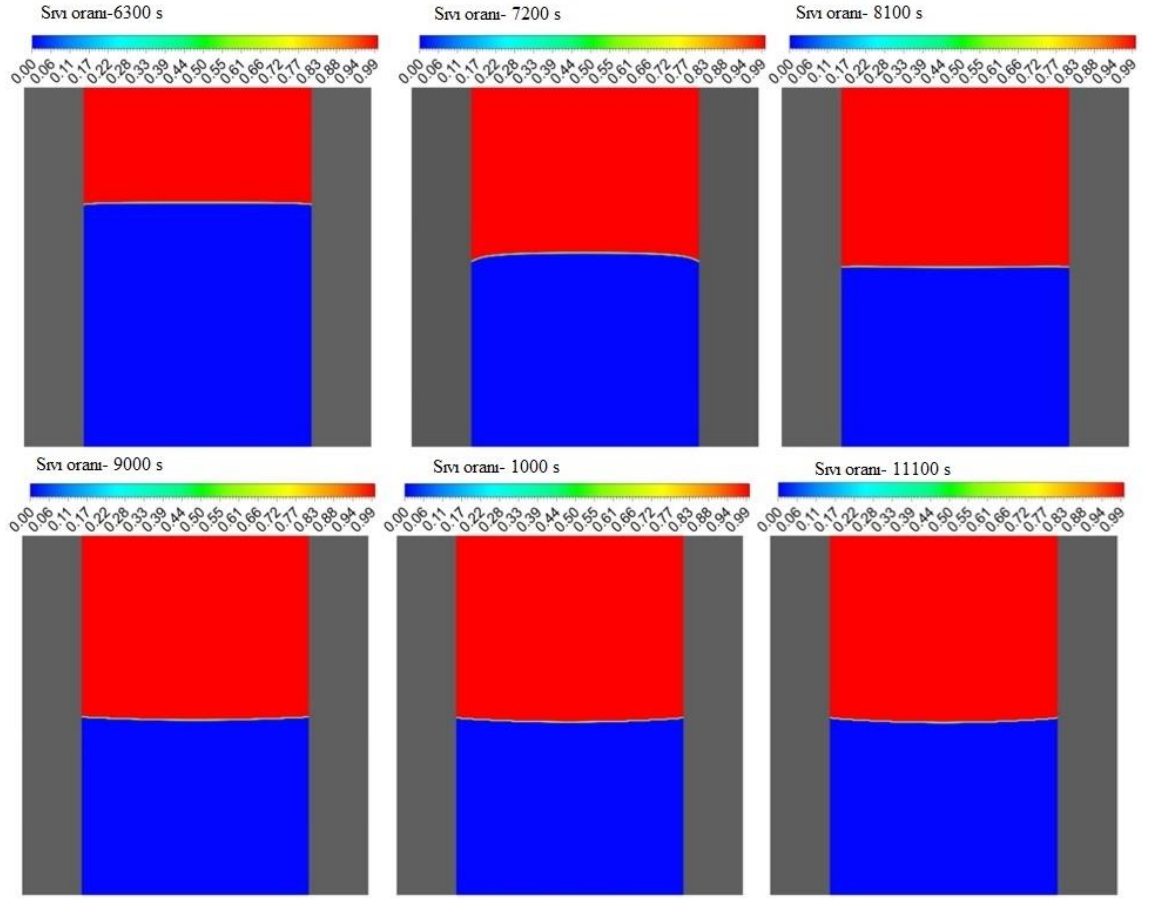
Reaktör işletme fazında reaktör tam güçte çalışırken, katı tıpa, katı formda kalmalı ve reaktör içi ani sıcaklık dalgalanmalarından etkilenerek erimemelidir. Bu fazda, reaktör içi sıcaklık, yakıt-tuzunun reaktör giriş-çıkış sıcaklığının ortalaması olarak 973 K alınmıştır. Bu giriş sınır şartı olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklık, tıpa erime sıcaklığının üstünde olduğu için soğutma sistemi aktif tutulmuştur. Soğutucu akışkan olarak hava seçilmiş ve soğutulan duvar sıcaklığının 298 K olduğu kabul edilmiştir. Bir önceki faza göre, reaktör sıcaklığı arttığı için soğutma kapasitesi de artırılmış, bu yüzden havanın hacimsel debisi $40,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Zaman adımının 0,01 saniye olduğu 4800 saniye boyunca soğutma sağlanmış ve simülasyon sürdürülmüştür. 4800 saniye sonrasında, Şekil 4.10'da da görüldüğü gibi sıcaklığın dengeye ulaştığı ve artık değişmediği belirlenmiş ve simülasyon sonlandırılmıştır.



Şekil 4.10: Reaktör işletme fazında sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Şekil 4.11 reaktör çalışırken boru içerisindeki tıpanın sıvı kütlesini belirli zamanlarda göstermektedir. Bu fazın başında (6300. saniyede), tıpanın %68'inin katı formda olduğu görülmüştür. Reaktör sıcaklığının artması nedeniyle, 6300-8100 saniyeleri arasında hızlı bir erime gözlenmiştir. 9000. saniye sonrasında katı-sıvı dengesi oluşmaya başlamıştır ve dengenin tamamen oluştuğu 11100. saniyede

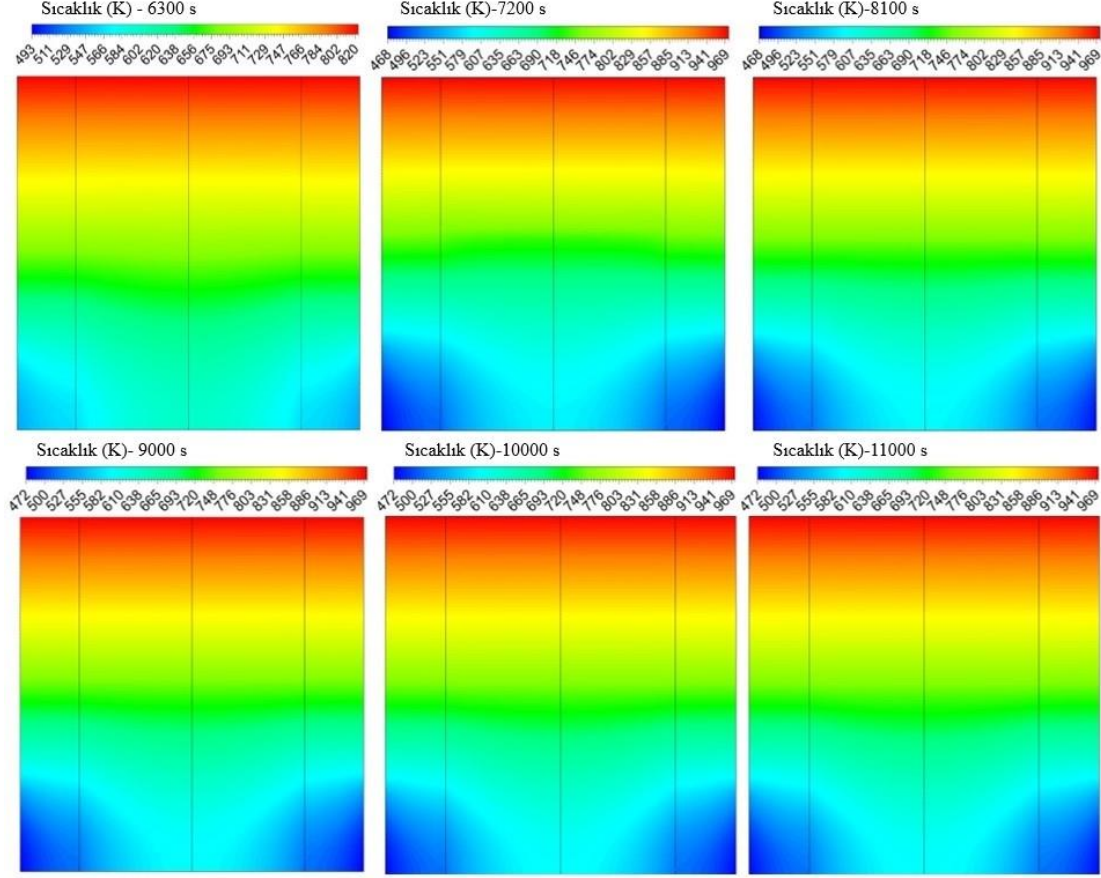
simülasyon sonlandırılmıştır. Bu fazın sonunda, duvar tarafında 29,5 mm, tıpa merkezinde ise 28,5 mm kalınlığında katı form görülmüştür.



Şekil 4.11: Reaktör işletme fazında katı tıpanın sıvı kütlesinin zamana bağlı değişimi

Bu sonuçlar, reaktör bu çalışma şartlarında çok daha uzun süre çalışacak olsa bile tıpanın katı formda kalarak yakıt-tuzunun istenmeyen tahliyesine engel olabileceğini kanıtlamıştır.

Şekil 4.12, tıpanın alt bölümünde ve tıpanın tümünde zamana bağlı sıcaklık değişimini göstermektedir. 6300-7200. saniyeleri arasında reaktör sıcaklığına bağlı olarak tıpa içinde hızlı bir sıcaklık artışı görülmüştür. Değişen reaktör sıcaklığının duvarın üst bölümüne etkisi ve artan soğutma kapasitesinin duvarın alt bölümüne etkisi 9000. saniyede denge bulmuştur. Bu andan itibaren, sıcaklık dağılımı tıpa boyunca dengeye ulaşmıştır.



Şekil 4.12: Reaktör işletme fazında katı tıpanın sıcaklığının zamana bağlı değişimi

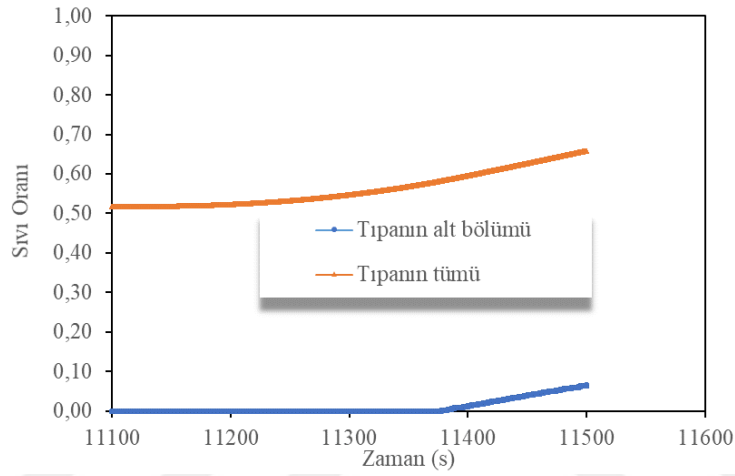
4.7 Kaza Fazı

Kaza fazında reaktör SCRAM sinyali ile kapatılacaktır. Ancak, reaktör içinde bozunum ısisına bağlı ısı üretimi devam edecektir. Güç kesintisi durumunda soğutma sağlanamayacağından, üretilen bozunum ısisı reaktör için sıcaklığın artmasına neden olacaktır. Aynı zamanda katı tıpanın katı kalmasını sağlayan soğutma sisteminin gücü de kesilecektir. Dolayısıyla, artan reaktör içi sıcaklık ve duran tıpa soğutma sisteminin etkisiyle, tıpa erimeye başlayacak ve yakıt-tuzunun reaktörden tahliye tankına tahliyesi başlayacaktır.

Kaza fazı simülasyonu, güç kesintisi ile başlatılmış ve katı tıpanın boru duvarı ile teması kalmayarak açılmasına kadar devam ettirilmiştir. Temas kaybolduğunda, yer çekimi etkisiyle tıpanın tahliye tankına düştüğü ve tahliyenin başladığı kabul edilmiştir. Reaktör sıcaklığının bozunum ısisına bağlı artışı Şekil 2.4’de gösterildiği gibi hesaplanarak, giriş sınır şartı olarak simülasyon tanımlanmıştır. Bu fazda

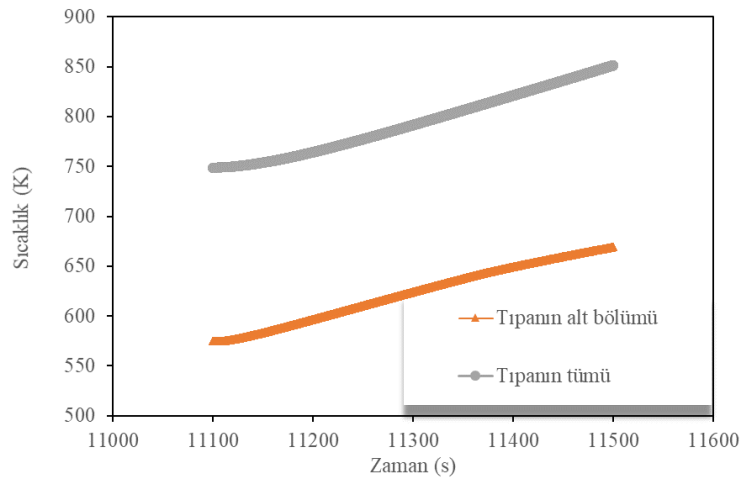
simülasyon 0,01 zaman-adımı ile tıpanın duvar ile teması kesilinceye kadar sürdürülmüştür.

Şekil 4.13, sıvı kütlesinin kaza fazındaki değişimini göstermektedir. Bu fazında başlangıçta (11100. saniyede) tıpanın %49'unun ve tıpanın alt bölümünün %100'ünün katı olduğu belirlenmiştir. Tıpadaki sıvı formun yaklaşık 11200. saniyede artmaya başladığı görülmüştür. Bu andan itibaren, erime hızlanmıştır ve sıvı oranı daha da artmıştır. 11400. saniyeye gelindiğinde tıpanın alt bölümünde duvar tarafında da erimenin başladığı görülmüştür.



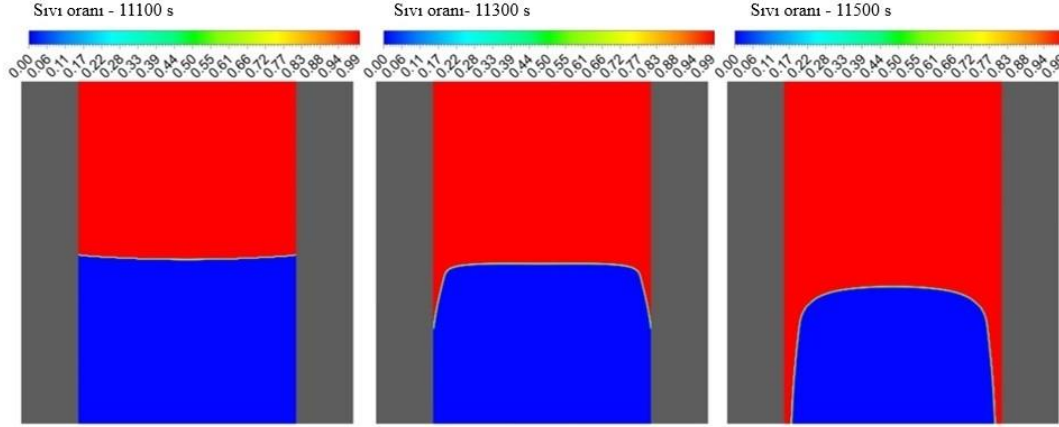
Şekil 4.13 : Kaza fazında zamanla sıvı oranının değişimi

Şekil 4.14 reaktördeki sıcaklığın artmasına bağlı olarak tıpanın alt bölümü ve tıpanın tümündeki sıcaklığın kaza süresince değişimini göstermektedir. Sıcaklığın kaza süresi boyunca arttığı görülmektedir. Bu artış Şekil 4.13'te görülen erimeye neden olmuştur.



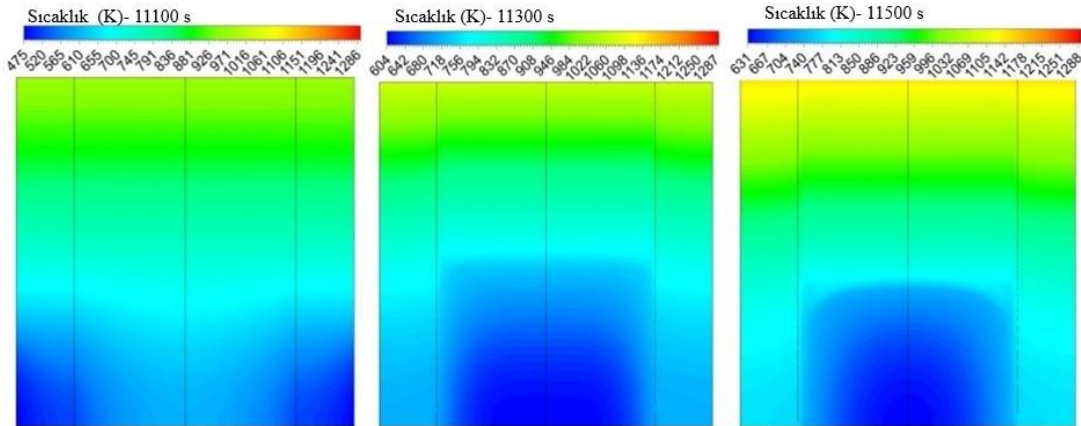
Şekil 4.14 : Kaza fazında sıcaklığın zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.15 kaza fazında sıvı oranının değişimini anlık resimlerle göstermektedir. 11300. saniyede erimenin duvar tarafından başladığı görülmektedir. Reaktör kapatıldıktan 400 saniye sonra, katı tıpanın duvar ile teması tamamen kaybolmuştur. Bu an, tıpanın açılma zamanı olarak kabul edilmiş ve simülasyon durdurulmuştur. Bu anda, tıpanın merkezinde 23,5 mm kalınlıkta katı form görülmüştür.



Şekil 4.15 : Kaza fazında katı tıpanın sıvı kütlesinin zamana bağlı değişimi

Şekil 4.16 kaza fazındaki tıpa içi sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Soğutmanın etkisi ile kaza fazının başlangıcında soğuk olan bölgeler soğutmanın kapatılması ve reaktör içi sıcaklığın artması ile ısınmıştır. Bu ısınma tıpanın erimesine neden olmuştur.



Şekil 4.16 : Kaza fazında katı tıpanın sıcaklığının zamana bağlı değişimi

5. TAHLİYE BORUSUNUN TASARIMI VE TAHLİYE SÜRESİNİN HESAPLANMASI

Bu bölümde, tahliye borusu tasarlanmış ve tahliye süresine etki eden parametreler analiz edilmiştir. Tahliye süresi, analitik olarak, nümerik yöntemler ve son olarak da HAD yöntemi ile ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

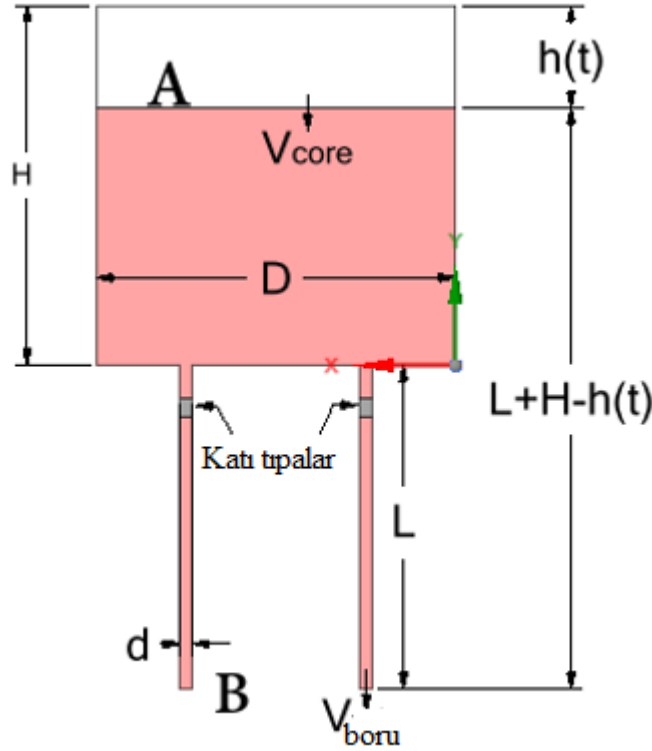
Araştırmada kullanılan KMETR'in geometrisi ile ilgili teknik bilgiler Çizelge 2.1'de paylaşılmıştır. 1,8 m³ yakıt-tuzunun 1,112 m yükseklikteki ve çaptaki reaktörden, iki tahliye borusu kullanılarak tahliye edilmesi hedeflenmiştir. Bu bölümde, hesaplama maliyetlerini azaltmak için iki yerine tek tahliye borusu kullanılarak, 1,8 m³ yerine 0,9 m³ yakıt-tuzunun tahliyesi hesaplanmıştır. Bu nedenle reaktör geometrisi, reaktörün hacmi 0,9 m³ olacak şekilde güncellenmiştir. Reaktör geometrisi hesaplanırken, yakıt-tuzunun tamamının reaktör içerisinde olduğu kabul edilmiştir. Enerji korunum denklemindeki potansiyel enerji terimi dikkate alınarak, yükseklik sabit tutulmuş, sadece reaktör çapı değiştirilmiştir. İlgili değerler Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: KMETR ve HAD modelinin geometrik olarak kıyaslanması

	KMETR	Model
Yakıt-tuzu Hacmi (m ³)	1,8	0,9
Reaktör Çapı (m)	1,112	1,015
Reaktör Yüksekliği (m)	1,112	1,112
Tahliye borusu Sayısı	2	1

5.1 Tahliye Süresinin Analitik Hesaplanması

Bu bölümde, Wang ve diğ. (2016)'nin yaptıkları çalışma referans alınarak, KMETR için oluşturulan model analitik olarak çözülmüştür [36]. Oluşturulan model için enerji ve kütle korunum denklemleri yazılmış, mekanik kayıplar eklenerek adi diferansiyel denklem üretilmiştir. İki boyutlu reaktör ve tahliye borusu geometrisi ve değişkenler Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : Analitik çözümde kullanılan değişkenler.

Kütle korumu denklem 5.1'e göre yazılmaktadır.

$$m = \rho V \quad (5.1)$$

Burada m kütle, ρ yoğunluk ve V hacmi ifade etmektedir. Şekil 5.1'deki A ve B düzeyleri için, noktasında, kütle korunumu kanunu uygulanıp zamana göre türevi alındığında denklem 5.2 elde edilmektedir.

$$-\rho\pi \frac{D^2}{4} \frac{dh(t)}{dt} = -\rho\pi \frac{d^2}{4} V_B \quad (5.2)$$

Burada D reaktör çapını, d tahliye borusu çapını, V_B B noktasındaki hızı ve $h(t)$ fonksiyonu yakıt-tuzunun tahliyesinin başlaması ile reaktörde oluşan boşluğun reaktör üst noktasına olan mesafesini zamana bağlı olarak ifade etmektedir. Reaktördeki yakıt-tuzunun hızı denklem 5.3 ile ifade edilmektedir.

$$V_A = \frac{dh(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Burada V_A , A noktasındaki hızı ifade etmektedir.

Tahliye borusundaki yakıt-tuzunun hızı denklem 5.4 ile ifade edilmektedir.

$$V_B = \frac{dh(t)}{dt} \left(\frac{D}{d} \right)^2 \quad (5.4)$$

Enerji korunumu denklem 5.5’de gösterildiği gibi yazılmaktadır.

$$E = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (5.5)$$

Burada E enerjiyi, h entalpiyi, g yerçekimini ve z yerden anlık yüksekliği ifade etmektedir. Entalpi açıldığında denklem 5.6 elde edilmektedir.

$$h = u + P/\rho \quad (5.6)$$

Burada u iç enerjiyi ve P basıncı ifade etmektedir. A ve B noktalarında, enerji korunumu uygulandığında, denklem 5.7 elde edilmektedir.

$$\frac{P_A}{\rho_A} + \frac{V_A^2}{2} + gz_A = \frac{P_B}{\rho_B} + \frac{V_B^2}{2} + gz_B + \sum \text{Mekanik Kayıplar} \quad (5.7)$$

Burada P_A , ρ_A ve z_A sırasıyla A noktasındaki basıncı, yoğunluğu ve yerden yüksekliği, P_B , ρ_B ve z_B ise sırasıyla B noktasındaki basıncı, yoğunluğu ve yerden yüksekliği ifade etmektedir.

Burada, reaktör ve tahliye borusundaki basınç aynı olmaktadır ve tıpanın açılmasından sonra oluşan bozunum ısısı ihmal edilmektedir. Yakıt-tuzunun, reaktörden tahliye borusuna akıştaki ani daralmaya bağlı basınç kaybı denklem 5.8’de gösterilmektedir.

$$\Delta p_c = 0,25 \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \rho V_B^2 \quad (5.8)$$

Burada Δp_c ani daralmaya bağlı basınç kaybını ifade etmektedir.

Akışkan-duvar sürtünme basınç kaybı hem reaktör hem de boru için uygulandığında, denklem 5.9 elde edilmektedir.

$$\Delta p_f = 4C_f \frac{L}{D} 0,5\rho V^2 \quad (5.9)$$

Burada Δp_f akışkan-duvar sürtünme basınç kaybını, L tahliye borusu uzunluğunu, C_f Fanning sürtünme katsayısını ifade etmektedir. $Re < 10^6$ durumu için Fanning sürtünme katsayısı, denklem 5.10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$C_f = \frac{16}{Re} + \frac{0,0076 \left(\frac{3170}{Re}\right)^{0,165}}{1 + \left(\frac{3170}{Re}\right)^7} \quad (5.10)$$

Kütle korunumunu kullanarak denklem 5.3 ve 5.4'e göre hesaplanan V_A ve V_B hızları, denklem 5.7'ye uygulandığında ve yeniden düzenlendiğinde denklem 5.11 elde edilmektedir.

$$0,5 \left(\left(\frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right) \left(\frac{dh(t)}{dt} \right)^2 - g(L + H - h(t)) + \sum \text{Mekanik Kayıplar} = 0 \quad (5.11)$$

Sonuç olarak denklem 5.12'de gösterildiği gibi homojen olmayan, lineer olmayan ve 1. dereceli adi diferansiyel denklem elde edilmektedir.

$$Cy'^2 + Ay - B = 0 \quad (5.12)$$

Bu denklemin başlangıç şartı $t = 0$ için, $h(0) = 0$ şeklindedir. Denklem 5.11 farklı boru çapı ve boru uzunluğu için düzenlendiğinde denklem 5.12'de farklı C-A-B katsayıları elde edilmektedir. Tahliye boru çapı (d) 38,1 mm (Bölüm 2.1'de kullanıldığı gibi), boru uzunluğu (L) ise 2 metre olarak seçildiğinde denklem 5.13'de gösterilen diferansiyel denklem elde edilmektedir

$$5,52 \times 10^5 y'^2 + 9,81y - 30,529 = 0 \quad (5.13)$$

Bu denklem analitik olarak çözüldüğünde, zamana bağlı denklem 5.14 elde edilmektedir.

$$y = h(t) = 7,45 \times 10^{-3}t - 4,467 \times 10^{-6}t^2 \quad (5.14)$$

Tahliyenin tamamlanma süresi, $h(t) = 1,112$ fonksiyonunu sağlayan t anıdır. Farklı t değerleri için denklem çözüldüğünde, tahliye boru çapının 38,1 mm ve boru uzunluğunun 2 m olduğu tahliye sisteminden tüm yakıt-tuzunun tahliyesinin 166 saniyede tamamlandığı görülmüştür.

5.2 Tahliye Süresinin Nümerik Yöntemlerle Hesaplanması

Bu bölümde, Taylor serisi ve Heun nümerik çözüm yöntemleri kullanılarak tahliye süresi hesaplanmıştır. Bölüm 5.1'deki geometri ($d = 38,1 \text{ mm}$ ve $L = 2 \text{ m}$) için yazılan denklem 5.13 her iki yöntem kullanılarak çözülmüş ve tahliye süresi bulunmuştur.

5.2.1 Taylor serisi yöntemi ile çözüm

Taylor serisi denklem 5.15'de gösterildiği gibi açılmaktadır.

$$y(t + \Delta t) = y(t) + y(t)' \Delta t + \frac{y(t)'' \Delta t^2}{2!} + \frac{y(t)''' \Delta t^3}{3!} + \dots \quad (5.15)$$

Burada t zamanı, Δt zaman ise aralığını göstermektedir.

Başlangıç şartı ve zaman aralığının verildiği denklem 5.16 ve denklem 5.17 kullanılarak denklem 5.13 çözüldüğünde, Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi tahliye süresi 166,5 saniye olarak bulunmuştur.

$$y(0) = h(t) = 0 \quad (5.16)$$

$$\Delta t = 0,5 \quad (5.17)$$

Çizelge 5.2 : Taylor serisi ile tahliye süresinin hesaplanması.

t	y(t)=h(t)	y'(t)	y''(t)	Δt
0	0	0,00743	-0,0000089	0,5
0,5	0,00372	0,00743	-0,0000089	0,5
1	0,00743	0,00742	-0,0000089	0,5
1,5	0,01114	0,00742	-0,0000089	0,5
2	0,01485	0,00742	-0,0000089	0,5
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
164	1,09971	0,00598	-0,0000089	0,5
164,5	1,1027	0,00597	-0,0000089	0,5
165	1,10568	0,00597	-0,0000089	0,5
165,5	1,10867	0,00596	-0,0000089	0,5
166	1,11165	0,00596	-0,0000089	0,5
166,5	1,11463	0,00596	-0,0000089	0,5

5.2.2 Heun yöntemi ile çözüm

Bu yöntem için kullanılan ana formül denklem 5.18’de verilmektedir.

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \left(\frac{k_1}{2} + \frac{k_2}{2}\right)\Delta t \quad (5.18)$$

Denklem 5.19 ile k_1 katsayısı hesaplanmaktadır.

$$k_1 = f(y_i) = y' \quad (5.19)$$

Denklem 5.20 ile k_2 katsayısı hesaplanmaktadır.

$$k_2 = f(y_i + k_1\Delta t) \quad (5.20)$$

Denklem 5.16’da gösterilen başlangıç şartı ile denklem 5.13 çözüldüğünde, Çizelge 5.3’de görüldüğü gibi tahliye süresi 166,5 saniye olarak bulunmuştur.

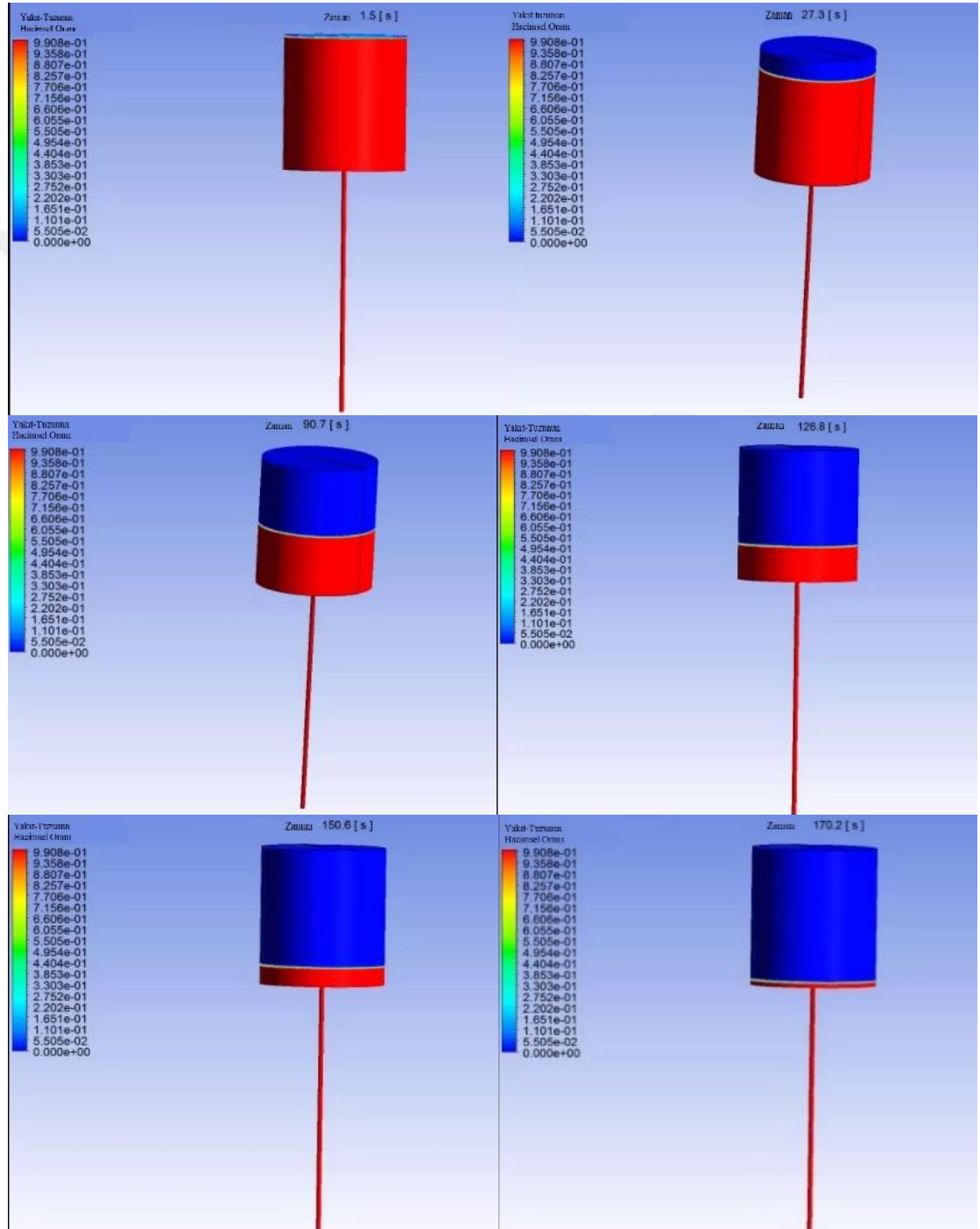
Çizelge 5.3 : Heun yöntemi ile tahliye süresinin hesaplanması

t	y(t)=h(t)	y'(t)=k1	k2	Δt
0	0	0,00743	0,0074291	0,5
0,5	0,00372	0,00743	0,0074247	0,5
1	0,00743	0,00742	0,0074202	0,5
1,5	0,01114	0,00742	0,0074158	0,5
2	0,01485	0,00742	0,0074114	0,5
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
164	1,09971	0,00598	0,0059731	0,5
164,5	1,1027	0,00597	0,0059687	0,5
165	1,10568	0,00597	0,0059642	0,5
165,5	1,10867	0,00596	0,0059598	0,5
166	1,11165	0,00596	0,0059553	0,5
166,5	1,11463	0,00596	0,0059509	0,5

5.3 Tahliye Süresinin HAD Yöntemiyle Hesaplanması

Bu bölümde, HAD yöntemini kullanarak tahliye süresi hesaplanmıştır. Sistemin geometrisi Bölüm 5.2.1 ve Bölüm 5.2.2 de kullanılan geometriler ile aynı tutulmuştur. Korunum denklemlerinin çözümü için ANSYS Fluent kodunun 2019-R2 versiyonu kullanılmıştır. Sistem, 3 boyutlu olarak modellenmiş ve hesaplama maliyetlerini

azaltmak için geometrinin çeyrek kısmına HAD yöntemi uygulanmıştır. Başlangıçta akışkan olarak, reaktör içerisinde yakıt-tuzu, tahliye borusunda ise hava bulunmaktadır. İki farklı akışkan kullanıldığından, çoklu-faz denklemleri aktif edilerek Volume of Flow (VOF) modeli kullanılmıştır. Bozunum ısısı ihmal edildiğinden enerji denklemleri aktif edilmemiştir. Akış türbülans akış olduğundan, $k - \varepsilon$ realizable türbülans modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.2 : Yakıt-tuzunun tahliyesinin zamana bağlı değişimi

Tahliye süreci zamana bağı bir değişimi içerdiğinden, simülasyon zamana bağı olarak çalıştırılmıştır. Zaman adımı 0,01 saniye seçilmiş, 2500 çözüm tekrarı yapılarak 10^{-6} olan yakınsama kriterine ulaşılmıştır. Çözüm, basınç bazlı çözücü kullanılarak elde edilmiştir. Reaktördeki yakıt-tuzu tamamen tahliye olduğunda simülasyon sonlandırılmıştır. Tahliye, oluşturulan animasyon ile gözlenmiştir. Animasyondan alınan anlık fotoğraflar, Şekil 5.2’de görülmektedir. Simülasyona göre, tahliye 171 saniyede tamamlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen her 3 yöntem ile elde edilen sonuçların kıyaslamasına göre analitik ve nümerik çözümün aynı sonucu verdiği, HAD nümerik çözümünün ise analitik çözüme göre %3 yaklaşık bir sonuç verdiği görülmüştür.

5.4 Tahliye Borusunun Tasarımı

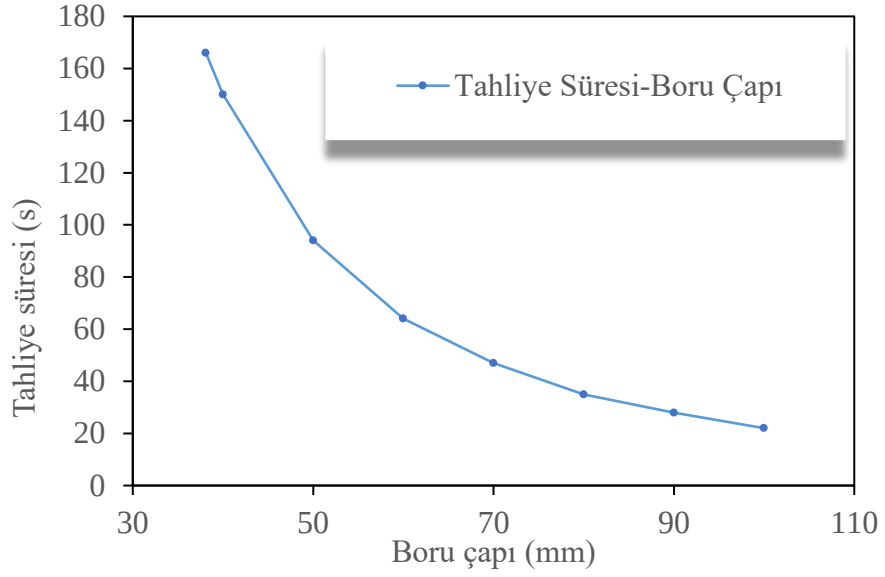
Bu bölümde, boru çapı ve boru uzunluğu gibi parametrelerin tahliye süresine etkisi incelenmiştir. Sonuçlardan yola çıkarak, tahliyenin en kısa sürede tamamlanması için en uygun tasarım belirlenmiştir.

Yukarıda tartışılan üç yöntemden hesaplama maliyeti en düşük olan Taylor serisi yöntemi ile analiz yapılmıştır. 5.2.1 Bunun için, denklem 5.11 farklı boru çapı ve boru uzunluğu için yeniden düzenlenerek, elde edilen adi diferansiyel denklem Taylor serisi yöntemi ile çözülmüş ve her farklı geometri için tahliye süresi hesaplanmıştır.

5.4.1 Boru çapının tahliye süresine etkisi

En küçüğü 38,1 mm olmak üzere on farklı boru çapı için tahliye süresi hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.3’de paylaşılmıştır.

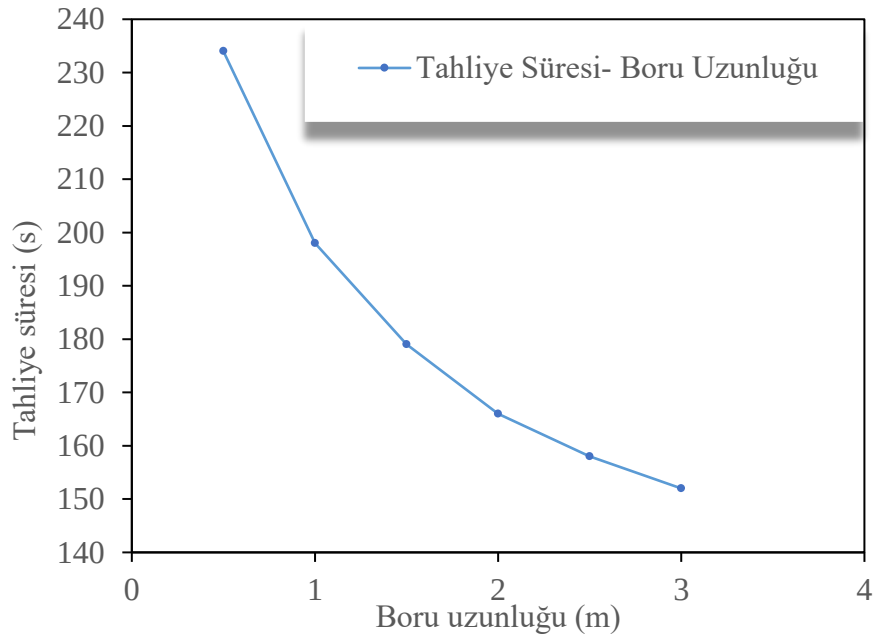
Çap 38,1 mm seçildiğinde, 166 saniye süren tahliye, çap 100 mm’ye çıkartıldığında 22 saniyede tamamlanmıştır. Bu sonuçlar tahliye süresi bakımından her ne kadar büyük çaplı boru kullanımını tavsiye etse de çap büyüdükçe duvarın erimeye olan etkisi azalacağından tıpanın erime süresinin artacağı dikkate alınmalıdır. Tıpanın erimesi ATS’nin pasif olarak çalışması için ön şart olduğundan, daha uzun tahliye süresine rağmen küçük çaptaki tahliye borusu tercih edilmiştir.



Şekil 5.3 : Tahliye süresinin boru çapına bağlı değişimi

5.4.2 Boru uzunluğunun tahliye süresine etkisi

En kısıası 0,5 m olmak üzere altı farklı boru uzunluğu ile tahliye süreleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.4’de paylaşılmıştır. Boru uzunluğu 0,5 mm seçildiğinde 234 saniye süren tahliye, uzunluk 3 m’ye çıkartıldığında 152 saniyede tamamlanmıştır.



Şekil 5.4: Tahliye süresinin boru uzunluğuna bağlı değişimi

Şekil 5.4 incelendiğinde, boru uzunluğu 2 m’nin üzerine çıkarıldığında, boru uzunluğunun tahliye süresine olan etkisinin azaldığı görülmüştür. Hem bu sebeple hem

de daha uzun tahliye borusunun sistemin konumlandırmasını zorlaştıracak olmasından dolayı ideal boru uzunluğu 2 m olarak seçilmiştir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde tüm çalışmanın özeti ve sonuçları paylaşılmıştır. Son olarak, bu çalışmanın sınırları belirtilerek bundan sonra yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

6.1 Çalışmanın Sonuçları ve Uygulama Alanı

Enerji üretimi ve kullanımının çevre üzerindeki etkisini azaltmak ve sürdürülebilir enerji üretimini sağlamak için karbon salımı yapan enerji kaynaklarının terk edilmesi gerekmektedir. Emre amade enerji kaynağı olan nükleer enerji bu bağlamda ön plana çıkmaktadır. Fukuşima kazasından öğrenilen dersler ışığında geliştirilen yeni nesil nükleer santrallerin güvenlik sistemleri daha çok pasif sistemlere dayandırılmaktadır. Bu şekilde, herhangi bir güç kaybı durumunda bile kazaların önlenmesi amaçlanmaktadır.

Yeni nesil nükleer santrallerden biri olan Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR) de pasif güvenlik sistemleri ile donatılmaktadır. Bu sistemlerden biri olan Acil Tahliye Sistemi (ATS), kaza durumunda otomatik olarak devreye girmektedir ve reaktörün kendini kapatması akabinde yakıt-tuzunun reaktörden tahliyesini amaçlamaktadır. Bu sistemin en önemli elemanlarından biri, normal çalışma koşullarında katı halde bulunarak tahliye borusunda bir nevi tıkaç görevi gören katı tıpadır. Santraldeki güç kaybı durumunda, reaktörün soğutma sistemi duracağından bozunum ısısı kaynaklı reaktör içi sıcaklık artacaktır. Artan sıcaklık malzeme dayanım sıcaklığına erişmeden tıpa eriyerek açılmalı ve tahliye gerçekleşmelidir. Bu nedenle katı tıpanın açılma süresi ve reaktörün tahliye süresi nükleer güvenlik açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, katı tıpanın açılma süresi ve reaktör tahliye süresi farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu tasarım parametrelerinin, tıpanın açılma süresine ve tahliye süresine etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda Bölüm 1’de ETR’ler ve ATS hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 2’de, hesaplama için kullanılan nümerik yöntem, dikkate alınması gereken ısı transfer mekanizmaları, kullanılan ANSYS Fluent hesaplamalı akış dinamiği (HAD) kodu ve sonlu hacim yöntemi detaylandırılmıştır.

Bölüm 3’te hem katı tıpanın katılaşma ve erime sürecini incelemek hem de HAD yönteminin doğrulanması adına Çek Teknik Üniversitesi'nin Nükleer Enerji Laboratuvarında kurulan deney setinde yapılan deneysel çalışmalar paylaşılmıştır. Bu kapsamda kurulan deney setinde HITEC tuzunun erime-katılaşma davranışları incelenmiştir. HITEC tuzundan oluşturulan katı tıpanın AISI 4145 malzemeli tahliye borusunda erime süresi hesaplanmıştır. Deney süreci, deneysel verilerden elde edilen sınır ve başlangıç koşulları ile ANSYS Fluent kodunda modellenmiş ve erime süresi farklı geçiş bölge parametreleri için hesaplanmıştır. Deney sonuçları, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney setinde tekrarlanan testlerde ortalama erime süresi 1290 saniye olarak bulunmuştur. HAD yöntemi ile yapılan hesaplamalarda ise farklı geçiş bölgesi parametrelerinde farklı değerler bulunmuştur. 10^3 gibi küçük geçiş bölge parametresinde, erime süresi 1846 saniye ile yüksek bir hata payı ile bulunmuştur. Parametre değeri büyüdükçe, hata oranı düşmüştür. Yalnız 10^7 gibi büyük geçiş bölgesi parametrelerinde simülasyon kararsızlaşmış, yakınsaması zorlaşmıştır. Bu sebeple, geçiş bölge parametresi 10^5 olarak seçilmiştir. Bu parametre ile erime süresi %5 hata ile bulunmuştur. Bölüm 3 sonunda elde edilen sonuçlar kullanılan simülasyon metodolojisinin ergimiş tuz reaktörü acil tahliye sistemi çalışmalarında farklı senaryoların denenmesi için uygun olduğunu göstermiştir.

Bölüm 4’te, Bölüm 3’te tespit edilen geçiş bölgesi parametresi ve uygulanan metodoloji kullanılarak Küçük Modüler Ergimiş Tuz Reaktörleri (KMETR) projesinde kullanılacak malzemeler ile katı tıpanın farklı reaktör işletme koşullarındaki davranışı incelenmiştir. Katı tıpanın katılaşma ve erime süresi hesaplanmıştır. Katılaşma fazı 2700 saniyede tamamlanmış ve ortalama 45 mm kalınlığında tıpa elde edilmiştir. Soğutma sisteminin devre dışı bırakılması ile başlayan ve bozunum ısısının hesaplanarak sınır şartı olarak sisteme tanımlanması ile kaza durumu simüle edilmiştir. Kaza fazında, tıpanın erimesi duvar etkisi ile duvar tarafından başlamış, sonrasında tıpanın duvar ile teması kalmayarak düşmesi ile tıpa açılmıştır. Tıpanın açılma süresi 400 saniye olarak hesaplanmıştır.

Bölüm 5’te tıpa açıldıktan sonra, reaktör içerisindeki yakıt tuzunun tahliye tankına tahliye borusu aracılığıyla tahliye süresi hesaplanmış ve tahliye etki eden tasarım

parametreleri araştırılmıştır. Öncelikle, tahliye süresi analitik olarak hesaplanmıştır. Sonrasında Taylor serisi ve Heun yöntemi gibi nümerik yöntemler kullanılmış, son olarak da HAD yöntemi esas alınarak ANSYS Fluent kodu kullanılarak tahliye süresi hesaplanmıştır. Analitik yöntem referans alındığında, HAD yönteminin %3 fark ile tahliye süresini hesapladığı görülmüştür. Analitik olarak yapılan çözümde tahliyenin 166 saniyede tamamlandığı görülmüştür. Tıpanın erimesi ve yakıt-tuzunun tahliyesi toplamda 566 saniye ile 900 saniye limit zamanın altında kalmıştır.

Sonuç olarak hem erime süresini hem de tahliye süresini hesaplamak için ANSYS Fluent kodunun kullanılabileceği sonuçlarla doğrulanarak ispatlanmıştır. Araştırmada kullanılan model için en uygun geçiş bölge parametresinin 10^5 olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, katı tıpanın reaktör normal çalışma şartlarında erimeden katı fazda kalarak tıpa görevini sürdürdüğü, kaza durumunda ise herhangi bir ısıtıcıya ihtiyaç duymadan reaktör bozunum ısısı ile eriyerek açıldığı görülmüştür. Böylece katı tıpanın pasif güvenlik sistemi olarak kullanılabileceği bu araştırma ile ispatlanmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmalar ve analitik çözümler aracılığıyla HAD yönteminin doğrulanması, bu alandaki literatüre önemli bir katkı sunmuştur. Elde edilen bulgular, ETR'ler için gelecekteki güvenlik analizlerinin HAD yöntemi kullanılarak güvenilir bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermiştir.

6.2 Çalışmanın Sınırları

Bu çalışmada ANSYS Fluent kodunun doğrulanması, deney sonuçları ile HAD yönteminin sonuçlarının karşılaştırılması ile yapılmıştır. ETR'de kullanılan FLiBe tuzunun yerine deneylerde HITEC tuzu kullanılmıştır. Bunun sebebi, FLiBe tuzunun erime sıcaklığının yüksek olması ve buna bağlı olarak çalışma sıcaklıklarının yüksek olmasıdır. Laboratuvar ortamında yüksek sıcaklıklarda çalışmak hem ekonomik olarak hem de güvenlik açısından ek zorunluluklar getirmektedir. Bütçe ve zaman sınırından dolayı bu durumdan kaçınılarak, doğrulama için daha düşük erime sıcaklığına sahip HITEC tuzu kullanılmıştır.

Ayrıca, deney çalışmalarında boru içerisindeki erime ve katılaşma süreci ısı çiftlerinde okunan değerler üzerinden takip edilmiştir. Kullanılan tahliye borusu şeffaf olmadığından, deney sırasında tıpanın kalınlığı ile eksen boyunca kalınlığın değişimi gibi değerler hakkında bilgi sahibi olunamamıştır.

6.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu araştırma kapsamında çalışmalar, HAD yönteminin ETR güvenlik analizleri için kullanılabilirliğini doğrulamış olmakla birlikte, literatüre farklı perspektiflerden katkı sağlanması amacıyla aşağıda belirtilen noktalar üzerinde çalışmalar gerçekleştirilerek daha derinlemesine bir anlayış elde edilebilir.

Deney düzeneğinde sadece tek bir katı tıpa geometrisiyle çalışılmıştır. Sonraki çalışmalarda, farklı katı tıpa geometrilerinin test edilerek elde edilen sonuçların detaylı bir şekilde analiz edilmesi önerilmektedir. Bu sayede, farklı geometrilerin erime ve tahliye süreçleri üzerindeki etkisi daha kapsamlı bir şekilde incelenebilir.

Ayrıca, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde yapılan sıcaklık ölçümleri ile katılaşma ve erime fazlarının tespit edilmiş olmasına rağmen, katı tıpanın davranışlarının daha detaylı bir şekilde incelenebilmesi, katı tıpa kalınlığının anlaşılabilmesi ve değişimin takip edilebilmesi için farklı deney düzenekleri kurulmalıdır. Şeffaf boru kullanılan deney düzeneklerinde, uygun malzeme bulunamaması ve şeffaf bölümden kaynaklanan ısı kaçışları gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu zorlukları aşmak için X-Ray radyografi veya Gama-Ray radyografi yöntemleri gibi alternatif yöntemlerin kullanılması önerilmektedir. Bu şekilde, soğutma sonucunda tıpa bölgesinde ve boru içinde oluşan tıpanın kalınlığı hakkında daha net bilgiler elde edilebilecektir. Kısmi erimeler durumunda istenmeyen tahliyenin olup olmadığı da tespit edilebilecektir.

Son olarak, parçacık görüntü hızı ölçümü yöntemi kullanılarak, erimeye başlayan parçacıkların hızının sıfırdan ne kadar kısa sürede arttığının tespit edilmesi, bu çalışmada bulunan geçiş bölgesi parametresinin ikinci bir yöntemle doğrulanması için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **World Population.** (2023). Erişim: 16 Mart 2023, <https://www.worldometers.info/>
- [2] **United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division** (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. (Rapor No: UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.)
- [3] **İşkan, Ü., Çetin, G., Kahraman, M. C., Direk, M.** (2023). R515A soğutucu akışkanlı tek kompresör ve iki buharlaştırıcılı deneysel soğutma sisteminde ejektör sürüklenme oranının ve yoğunlaşma sıcaklığının performans parametrelerine etkisinin incelenmesi, *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, vol. 3, no. 1, pp. 53–66, 2023.
- [4] **Avrupa Birliği Türkiye Delegasyonu.** (2015) Geleceğe Dair: Paris İklim Anlaşması, Erişim: 01 Şubat 2024, <https://www.iklimin.org/wp-content/uploads/2016/12/paris-iklim-anla%C5%9Fmas%C4%B1-EUD-Brochure.pdf>
- [5] **Energy Institute.** (2023). Statistical Review of World Energy 2023, 72nd Edition, Erişim: 01 Şubat 2024, <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>, p. 12, 2023.
- [6] **Paillere, H. & Donovan, J.** (2021). Nuclear Power 10 Years After Fukushima: The Long Road Back, Erişim: 10 Haziran 2023, <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-power-10-years-after-fukushima-the-long-road-back>
- [7] **F. I. GEN-4.** (2020). GIF 2020 Annual Report, Erişim: 01 Şubat 2024, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_177757/gif-annual-report-2020
- [8] **I. L. Pioro.** (2016). Handbook of Generation IV Nuclear Reactors.
- [9] **GIF Portal.** (2022). GIF Portal Erişim : 18 Mayıs 2022, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems
- [10] **Şentürk Lüle, S. & Asaditaheri, A.** (2022). Computational Fluid Dynamics Analysis of a Thermocline Thermal Storage Unit for Solar Thermal Applications, *Arabian Journal Science and Engineering*, vol. 47, no. 7, pp. 9005–9018, doi: 10.1007/s13369-021-06485-8.
- [11] **Lakeh, R. B. , Lavine, A. S., Kavehpour, H. P., Ganapathi, G. B., Wirz, R. E.** (2013). Effect of laminar and turbulent buoyancydriven flows on thermal energy storage using supercritical fluids, *Numerical Heat Transfer Part A Applications*, vol. 64, no. 12, pp. 955–973, doi: 10.1080/10407782.2013.811349.
- [12] **Alameri, S. A. & J. C. King.** (2015). A coupled nuclear reactor thermal energy storage system for enhanced load following operation, Erişim: 10 Ağustos 2023, <http://hdl.handle.net/11124/17109>

- [13] **Roper, R..** (2022). Molten salt for advanced energy applications: A review, *Annual Nuclear Energy*, vol. 169, p. 108924, doi: 10.1016/j.anucene.2021.108924.
- [14] **Holcomb, D.** (2017).History , Background , and Current MSR Developments Summary of Modules, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı
- [15] **Forsberg, C.** (2006). Molten Salt Reactor Experience Applicable to LS-VHTR Refueling, Erişim: 25 Aralık 2022, <http://web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/124832.pdf>
- [16] **Kahraman, M. C. & Steffen, P. M.** (2020).E xperimental investigation of par device for hydrogen recombination in reko-4 facility, *Isi Bilimi ve Tekniği Dergisi/ Journal of Thermal Science Technology.*, vol. 40, no. 2, pp. 359–366,doi: 10.47480/ISIBTED.817094.
- [17] **Tiberga, M., Shafer, D., Lathouwers, D., Rohde, M., Kloosterman, J. L.** (2019). Preliminary investigation on the melting behavior of a freeze-valve for the Molten Salt Fast Reactor, *Annual Nuclear Energy*, vol. 132, pp. 544–554, doi: 10.1016/j.anucene.2019.06.039.
- [18] **LeBlanc, D.** (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, no. 6, pp. 1644–1656, doi: 10.1016/j.nucengdes.2009.12.033.
- [19] **Merle, E.** (2017). Concept Of European Molten Salt Fast Reactor (MSFR), Erişim: 01 Şubat 2024, https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2017-05/emerle_gif-final23may2017.pdf
- [20] **IAEA.** (2016). Status Report – MSR-FUJI, Erişim: 01 Şubat 2024, <https://aris.iaea.org/PDF/MSR-FUJI.pdf>
- [21] **IAEA ARIS.** (2023) Erişim: 16 Mart 2023, <https://aris.iaea.org/sites/MSR.html>
- [22] **TÜBİTAK.** (2017). ETR Teknoloji Belirleme Çalıştayı Sonuç Bildirgesi, Erişim: 01 Şubat 2024, <https://mam.tubitak.gov.tr/tr/duyuru/ergimis-tuz-reaktoru-teknoloji-belirleme-calistayi>
- [23] **Serp J.** (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives, *Progress Nuclear Energy*, vol. 77, pp. 308–319, 2014, doi: 10.1016/j.pnucene.2014.02.014.
- [24] **Elsheikh, B. M.** (2013). Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors, *Journal of Radiation Research and Applied Science*, vol. 6, no. 2, pp. 63–70, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.jrras.2013.10.008.
- [25] **M. Brovchenko.** (2019). Neutronic benchmark of the molten salt fast reactor in the frame of the EVOL and MARS collaborative projects, *EPJ Nuclear Science and Technologies*, vol. 5, p. 2, 2019, doi: 10.1051/epjn/2018052.
- [26] **M. Brovchenko.** (2013). Design-related studies for the preliminary safety assessment of the molten salt fast reactor,” *Nuclear Science and Engineering*, vol. 175, no. 3, pp. 329–339 doi: 10.13182/NSE12-70.

- [27] **Kasten, P. R.** (1967). Safety Program For Molten Salt Breeder Reactors, Erişim :19 şubat 2024, <https://moltsalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-TM-1858.pdf>
- [28] **Zohuri, B.** (2021). Molten Salt Reactors and Integrated Molten Salt Reactors, in *Molten Salt Reactors and Integrated Molten Salt Reactors*, pp. 1–58. doi: 10.1016/c2020-0-04543-3.
- [29] **Chisholm, B. M., Krahn, S. L., Sowder, A. G.** (2020). A unique molten salt reactor feature – The freeze valve system: Design , operating experience , and reliability,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 368, no. August, p. 110803, doi: 10.1016/j.nucengdes.2020.110803.
- [30] **M. Richardson.** (1962). Development of a freeze valve for use in the MSRE, ORNL-TM-128, Erişim: 01 şubat 2024, <https://moltsalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-TM-0128.pdf>
- [31] **Robertson, R. C.** (1965). MSRE Design and operations report : Part I - Description of reactor design,” *Oak Ridge National. Lab.*, pp. 1–534.
- [32] **Kuncoro Aji, I.** (2020). Investigation of Basic Parameters in Developing High-Performance Freeze Valve for Molten Salt Reactor (Doktora Tezi). *Elektro-İletişim Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Tokyo.*
- [33] **Ilham, M. & Okawa, T.** (2022). Numerical Analysis of Simple Heat Equation To Predict the Opening Time of the Freeze Plug in Molten Salt Reactors, *International Conference of Nuclear Engineering Proceedings, ICONE*, vol. 4, pp. 1–5, doi: 10.1115/ICONE29-92284.
- [34] **Jiang, X. Y., Lu, H. J., Chen, Y. S., Fu, Y., Wang, N. X.** (2020). Numerical and experimental investigation of a new conceptual fluoride salt freeze valve for thorium-based molten salt reactor,” *Nuclear Science and Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 1–14, doi: 10.1007/s41365-020-0729-5.
- [35] **Tano, M., Rubiolo, P., Giraud, J., Ghetta, V.** (2018). Multiphysics study of the draining transients in the molten salt fast reactor,” *Proceedings 2018 International Congress Advance Nuclear Power Plants, ICAPP 2018*, no. April, pp. 469–478.
- [36] **Wang, S. , Massone, M., Rineiski, A., Merle-Lucotte, E.** (2016). Analytical Investigation of the Draining System for a Molten Salt Fast Reactor, *Nuthos-11The 11th International Topical Meeting of Nuclear Reactor Thermal Hydraulic Operation and Safety*
- [37] **Kahraman, M. C. & şentürk Lüle, S.** (2023). Numerical Investigation of Behaviour of Small Modular Molten Salt Reactor Freeze Plug Under Various Reactor Operating Conditions,” *Numerical Heat Transfer Part A Applications*, no. 2019, pp. 1–20.
- [38] **Allibert, M. , Brovchenko, M. , Delpech, S., Ghetta, V., Heuer, D., Laureau, A.** (2016). *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100149-3.00007-0.

- [39] **Merle, E.** (2017). Concept of Molten Salt Fast Reactor, Erişim: 10 Kasım 2023
https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/201705/07_elsa_merle_france.pdf
- [40] **Beneš, O. & Konings, R. J. M.** (2009). Thermodynamic properties and phase diagrams of fluoride salts for nuclear applications,” *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 130, no. 1, pp. 22–29, doi: 10.1016/j.jfluchem.2008.07.014.
- [41] **Kim, E. S. , Glazoff, M., Mckellar, M., Patterson, M. W.** (2011). Feasibility Study of Secondary Heat Exchanger Concepts for the Advanced High Temperature Reactor Piyush Sabharwall,” doi: 10.2172/1031673.
- [42] **Chapdelaine, L. J.** (2017). Experimental and Computational Study of Static Solidification of Molten Fluoride Salts for Reactor Coolant Application (Master Tezi), Nükleer Mühendislik Bölümü, Wisconsin Üniversitesi
- [43] **Guymon, R. H.** (1973). MSRE Systems and Components Performance by Molten Salt Reactor Experiment Staff,” *ORNL-TM-3039*, vol. 46, no. 21, pp. 341–356, doi: 10.7748/ns.18.2.18.s35.
- [44] **Shafer, T.** (2018). Design and Melting Behavior of the MSFR Freeze Plug (Master Tezi), Delft University of Technology.
- [45] **Iwatsu, R., Hyun, J. M., Kuwahara, K.** (1993). Mixed convection in a driven cavity with a stable vertical temperature gradient,” *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 36, no. 6, pp. 1601–1608, 1993, doi: 10.1016/S0017-9310(05)80069-9.
- [46] **Voller & C.Prakash, V. R.** (1987). A Fixed-Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems,” *International Journal of Heat Mass Transfer.*, vol. 30, pp. 1709–1720.
- [47] **ANSYS** (Versiyon 2019 R2). Fluent Theory Guide, Erişim: 01 Aralık 2023, https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secure/corp/v194/flu_th/flu_th_sec_melt_theory.html
- [48] **Parida D. R. & Basu, S.** (2023). On the specific heat capacity of HITEC-salt nanocomposites for concentrated solar power applications,” *RSC Adv*, vol. 13, no. 8, pp. 5496–5508, 2023, doi: 10.1039/d2ra07384f.
- [49] **Haynes International** (2002). Hastelloy® N alloy, Erişim: 11 Aralık 2023, <https://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/corrosion-resistant-alloys/brochures/n-brochure.pdf?sfvrsn=18>
- [50] **Steel, W. Y.** (2023). Datasheet- AISI 4145 Alloy Steel, Erişim :01 Şubat 2024, <https://www.westyorkssteel.com/alloy-steel/oil-and-gas/aisi-4145/>
- [51] **Matweb** (2023) AISI 4145 Steel. Erişim: 01 Şubat 2024, <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=2790f8e5ef46470995b7bfc2b59774f6>

- [52] **Yordanov, K., Zlateva, P., Hadzhidimov, I., Stoyanova, A.** (2018). Testing and clearing the high temperature module error from 0 to 1250°C for measurement with 16 K-type thermocouples, *20th Int. Symp. Electr. Appar. Technol. SIELA 2018 - Proc.*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447096.
- [53] **Kee, Y. Y. , Asako, Y., Ken, T. L., Sidik, N. A. C.** (2020). Uncertainty of temperature measured by thermocouple, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Science*, vol. 68, no. 1, pp. 54–62, doi: 10.37934/ARFMTS.68.1.5462.
- [54] **Advantech** (2022). User Manual ADAM-6000 Series, Erişim: 01 şubat 2024, <https://www.advantech.com/en/support/details/manual?id=1-95WMW>
- [55] **Acrylic Flowmeters** (2001). FL-2000 Series, Erişim: 01 şubat 2024, <https://in.omega.com/pptst/FL2000.html>





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

:Mahmut Cüneyt KAHRAMAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, FH Aachen, Nuclear Applications

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012-2013 yılları arasında Türk Silahlı Kuvvetlerinde takım komutanı olarak zırhlı birliklerde çalıştı.
- 2013-2014 yılları arasında SGS firmasında homologasyon mühendisi olarak çalıştı ve O-4 tipi araçlara testler gerçekleştirdi.
- 2016 yılında SCK.CEN Belçika Nükleer araştırma merkezinde kısa süreli araştırmacı olarak çalıştı ve MYRRHA araştırma reaktörü güvenlik analizlerini gerçekleştirdi.
- 2017 Aralık ayından itibaren Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak görev almaktadır.
- 2021 yılında IV. International Scientific Conference "Technogenic Systems and Environmental Risk" konferansında en iyi sunum ödülünü kazandı.
- 2023 yılında doktora araştırmalarını sürdürmek için TÜBİTAK 2214-A bursu ile Çek Teknik Üniversitesinde görev aldı ve doktora çalışması ile ilgili deneyler gerçekleştirdi.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kahraman, M.C., Şentürk Lüle, S., Çolak, Ü.** 2021. Freeze Plug Design In Molten Salt Reactor With Consideration Of Solidification - IV. International Scientific Conference "Technogenic Systems and Environmental Risk", April 19-20, 2021
- **Kahraman, M. C., Şentürk Lüle, S.** 2023. Numerical investigation of behaviour of small modular molten salt reactor freeze plug under various reactor operating conditions. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1-20.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kahraman, M. C., Steffen, P.** 2020. Experimental Investigation Of PAR Device For Hydrogen Recombination In REKO 4 Facility. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 40(2), 359–366.
- **Kahraman, M. C.** 2019. Nuclear Safety & Security & Safeguards. *GSCESD-2019 Graduate Student Conference On Energy And Sustainable Development*, 1(1), 19–20.
- **Kahraman, M. C.** 2021. Akkuyu Nuclear Power Plant- The First Nuclear Power Plant Project In Turkey. *4th Graduate Student Conference On Energy And Sustainable Development*, 1, 8.
- **Kahraman, M. C.** 2023. An Innovative Project “Multi-Purpose Nuclear Town.” *I. EELISA International Conference*.
- **Kahraman, M. C.** 2018. Hydrogen Recombination In REKO-4 Facility And Analysis Of Recombination. “*4th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT 2018)*”, 1.
- **Kahraman, M. C., Chege, B. W., Tkhorik, O., Waheed, M. F., Pavlov, A., James, I. U., Haroon, J., Komakech, I., Zaharov, I., Radchenko, V.** 2019. A study of the current and potential suppliers of actinium-225 for targeted alpha therapy. *Network Innovation of Nuclear Applications*, 4, 4–12.
- **İşkan, Ü., Üğüdü, B., Kahraman, M. C., Direk, M., Tunçkal, C.** 2022. Evaluation of the impact of the temperature and mass flow rate of the water, utilized in the R516A refrigeration system with dual evaporator and ejector, on the performance parameters. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(3), 7316–7329.
- **İşkan, Ü., Kahraman, M. C., Direk, M.** 2023. Comparison of R134a and R516A’s Performance at Different Air Velocities in Two Evaporator Ejector Cooling System. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 10(1), 69–76.
- **İşkan, Ü., Kahraman, M. C., Direk, M.** 2022. Analysis of Isentropic Efficiency in the Utilization of Alternative Low GWP Refrigerants in a Hermetic Reciprocating Compressor. *International Symposium on Energy Management and Sustainability*, 889–895.
- **İşkan, Ü., Çetin, G., Kahraman, M. C., Direk, M.** 2023. R515A soğutucu akışkanlı tek kompresör ve iki buharlaştırıcı deneysel soğutma sisteminde ejektör sürüklenme oranının ve yoğunlaşma sıcaklığının performans parametrelerine etkisinin incelenmesi. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 3(1), 53–66.
- **Direk, M., İşkan, Ü., Üğüdü, B., & Kahraman, M. C.** 2023. Experimental performance analysis of ejector heat pump water heater under transient conditions. *Science and Technology for the Built Environment*, 29(5), 523–532