

**RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 KODU KULLANILARAK  
ULUSLARARASI STANDARTLAŖTIRMA PROBLEMİ ISP  
NO.31'İN ANALİZİ**

**ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARD PROBLEM  
ISP NO.31 BY USING RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4  
COMPUTER CODE**

**AHMET ARİF ÖZLER**

**DOÇ. DR. ŖULE ERGÜN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Nükleer Enerji Mühendisliğı Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ Olarak hazırlamıştır.

2018

AHMET ARIF ÖZLER' in hazırladığı "RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 Kodu Kullanılarak Uluslararası Standartlaştırma Problemi ISP No.31'in Analizi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Cemil KOCAR

Başkan



Doç. Dr. Şule ERGÜN

Danışman



Prof. Dr. Ayhan YILMAZER

Üye



Dr. Öğretim Üyesi Erol ÇUBUKÇU

Üye



Dr. Öğretim Üyesi Senem ŞENTÜRK LÜLE

Üye



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

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

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

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

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

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

24 / 10 / 2018

  
(İmza)

Ahmet Arif ÖZLER  
Öğrencinin Adı SOYADI

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

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

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

## ETİK

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

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

beyan ederim.

24.10/2018

AHMET ARİF ÖZLER

## ÖZET

# RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 KODU KULLANILARAK ULUSLARARASI STANDARTLAŞTIRMA PROBLEMİ ISP NO.31'İN ANALİZİ

**Ahmet Arif ÖZLER**

**Yüksek Lisans, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERGÜN**

**Eylül 2018, 54 sayfa**

Ağır kazalarda meydana gelebilecek olayları incelemek amacıyla uluslararası "Ağır Yakıt Hasarı (SFD)" programı kapsamında Cora deneyleri hayata geçirilmiştir. Cora-13 radyasyonsuz deneyi yakıtın hasar mekanizması hakkında bilgi vermesinin yanında, kaza analiz kodlarının değerlendirilmesi ve geçerliliklerinin onaylanmasında da kullanılır. Cora-13 (ISP31) deneyi, demetin elektrikli ısıtıcı ile hasar alana kadar ısıtılmasının ardından su basma işlemi ile soğutulmasıyla biter. İşlemler sonrasında demetin bütünlüğü, oluşan hidrojen miktarı, oksitlenme miktarı ve demet sıcaklığı parametreleri incelenmiştir.

Bu tezde RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 bilgisayar kodu kullanılarak Cora-13 deneyinin benzeşimi yapılmıştır. Benzeşimde Idaho Ulusal Mühendislik Laboratuvarı (INEL) tarafından oluşturulmuş girdi dokümanı baz model olarak kullanılmıştır. Girdi verileri genelde deney düzeneği verileri ile aynıdır. Modelin buhar debisi ve SCDAP bölümünde değişiklikler yapıp hesaplama sonuçları, deney sonuçları ile karşılaştırılarak kodun değişikliklere nasıl tepki verdiği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** RELAP, SCDAP, PWR, oksitlenme, hidrojen, ISP31, Cora, Cora-13.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARD PROBLEM ISP NO.31 BY USING RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 COMPUTER CODE**

**Ahmet Arif ÖZLER**

**Master of Science, Department of Nuclear Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şule ERGÜN**

**September 2018, 54 pages**

Under the scope of international “Sever Fuel Damage (SFD)” program, Cora experiments are actualized to study the events of the severe accidents. Cora-13 out of pile experiment enlightened us about fuel failure mechanism, In addition, its results helps to enhance and validate severe accident codes. In Cora-13 (ISP-31) experiment bundle was heated with electrical heater until damaged and finished with cooled by quench process. After that processes bundle integrity, amount of generated hydrogen, amount of oxidation and bundle temperature parameters were investigated.

In this thesis RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 computer code was used to simulate Cora-13 experiment. Input document, which is prepared by Idaho National Engineering Laboratory (INEL), used as base model. Input variables are mostly identical with experiment variables. Steam flow rate and SCDAP part of model was modified and calculation results of simulation was compared with the results of experiment, thereafter response of the code to changes are determined.

**Key Words:** RELAP, SCDAP, PWR, oxidation, hydrogen, ISP31, Cora, Cora-13.

## TEŞEKKÜR

Danışmanım Doç. Dr. Şule ERGÜN ve Prof. Dr. Niyazi Sökmen'e çalışmalarımda bana verdikleri destek ve gösterdikleri ilgi için teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak en zor zaman yanımda olup beni destekleyen ve sonsuz sevgilerini daima hissettiren aileme teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
Kısaltmalar .....	x
1 GİRİŞ .....	1
2 ULUSLARARASI STANDARTLAŞTIRMA PROBLEMİ NO.31 (ISP No. 31) ...	3
2.1 Cora Deneyleeri .....	3
2.2 ISP No. 31'in Amacı .....	3
2.3 Literatür Taraması .....	4
3 CORA TESİSİNİN ÖZELLİKLERİ.....	6
3.1 Demet Tasarımı .....	7
3.1.1 Yakıt Çubuğu Benzeşimi .....	8
3.1.2 Kontrol Çubukları .....	9
3.1.3 Kaplama ve Kaplama Yalıtımı.....	10
3.1.4 Yüksek Sıcaklık Zırhı .....	10
4 TEST KURALLARI VE BAŞLANGIÇ SINIR KOŞULLARI .....	11
5 RELAP/SCDAPSİM/MOD3.4 KODU İLE DENEYİN MODELLENMESİ.....	13
5.1 RELAP/SCDAPSİM/MOD3.4 Kodu .....	13
5.1.1 Malzeme Oksitlenme Modeli.....	13
5.1.2 Yakıt Çubuğu Zarfı Deformasyon Modeli.....	15
5.2 Demetin Genel Modellemesi .....	17
5.2.1 Birinci Bileşen: Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan yakıt çubukları).....	19
5.2.2 İkinci Bileşen: Dış Bölge Benzeşim Çubuğu .....	19



5.2.3	Üçüncü Bileşen: Kontrol Çubuğu .....	19
5.2.4	Dördüncü Bileşen: Kaplama .....	19
5.2.5	Beşinci Bileşen: Sıcak Benzeşim Çubuğu .....	20
5.2.6	Altıncı Bileşen: Yüksek Sıcaklık Zırhı .....	20
5.2.7	Demet, Çubuklar ve Kaplamanın Eksenel ve Radyal Nodalizasyon .	21
5.3	Demetin Termal Hidrolik Modellemesi.....	22
5.3.1	Hacim Bileşenleri .....	23
5.3.2	Bağlantı Bileşenleri .....	24
5.4	Sınır Koşulları.....	26
5.4.1	Demetin Güç Geçmişi.....	26
5.4.2	Basınç, Sıcaklık ve Debi .....	26
5.5	Modellemede Kullanılan Kabuller ve Girdi Parametreleri .....	26
6	DENEY VE BENZEŞİM SONUÇLARI .....	28
6.1	Deney Sonuçları.....	28
6.1.1	Gaz Ön Isıtma Safhası .....	28
6.1.2	Geçiş Safhası .....	28
6.1.3	Soğutma Safhası .....	28
6.1.4	Bileşen Sıcaklıkları .....	29
6.1.5	Belirli Yüksekliklerdeki Sıcaklıklar .....	33
6.1.6	Hidrojen Oluşumu .....	33
6.1.7	Deney Sonrası Kütle Dağılımı.....	34
6.1.8	Demetin Oksitlenmesi.....	35
6.1.9	Deney Sonrası İnceleme .....	36
6.1.10	Başlıca Sonuçlar .....	36
6.2	Benzeşim Sonuçları .....	37
6.2.1	Enerji Dengesi .....	37

6.2.2	Akışkan Sıcaklığı .....	39
6.2.3	Kaplama ve Demet Sıcaklıkları.....	40
6.3	Deney ve Benzeşim Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	42
6.3.1	Hidrojen Üretimi.....	43
6.4	Hassasiyet Analizi .....	45
6.4.1	Baz Model.....	46
6.4.2	Oksit Kabuk Kararlılığı Modeli .....	46
6.4.3	Zarf Deformasyon Modeli .....	46
6.4.4	Buhar Debisi Modeli.....	46
6.4.5	Modellerin Karşılaştırılması .....	46
6.5	Diğer Kodlar ile Karşılaştırma.....	48
7	SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	51
	KAYNAKLAR.....	53
	ÖZGEÇMİŞ .....	54

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 3-1</b> SFD Cora Tesisi Ana Bileşenleri [2].....	7
<b>Şekil 3-2</b> Test Demeti Çubuk Konumları.....	8
<b>Şekil 3-3</b> Test Demeti Tasarımı .....	9
<b>Şekil 4-1</b> Argon Akışı .....	11
<b>Şekil 4-2</b> Buhar Akışı .....	12
<b>Şekil 4-3</b> Su Verme Tankı Seviyesi.....	12
<b>Şekil 4-4</b> Demet Gücü.....	12
<b>Şekil 5-1</b> SCDAP Bileşenleri.....	18
<b>Şekil 5-2</b> Hidrodinamik Modelleme .....	23
<b>Şekil 6-1</b> Su Verme Silindiri Hareketi ve Demet Gücü [2] .....	29
<b>Şekil 6-2</b> Demet Girişi Gaz Sıcaklığı [2].....	29
<b>Şekil 6-3</b> Isıtılan Çubuk Eksenel Sıcaklık Dağılımı .....	30
<b>Şekil 6-4</b> Isıtılmayan Çubuk Eksenel Sıcaklık Dağılımı.....	31
<b>Şekil 6-5</b> Kılavuz Tüpü Eksenel Sıcaklık Dağılımı .....	31
<b>Şekil 6-6</b> Kontrol Çubuğu Eksenel Sıcaklık Dağılımı .....	32
<b>Şekil 6-7</b> Kaplama İç Yüzey Eksenel Sıcaklık Dağılımı .....	32
<b>Şekil 6-8</b> Sabit Yükseklikte Bileşen Sıcaklıkları (750 mm yükseklik).....	33
<b>Şekil 6-9</b> Hidrojen Oluşumu [2] .....	34
<b>Şekil 6-10</b> Demet İçi Eksenel Kütle Dağılımı [2].....	35
<b>Şekil 6-11</b> Elektrik ve Oksitlenme Isı Üretimi .....	37
<b>Şekil 6-12</b> Enerji Dengesi .....	38
<b>Şekil 6-13</b> Kümülatif Enerji Dengesi.....	39
<b>Şekil 6-14</b> Demet Giriş ve Çıkış Sıcaklıkları.....	40
<b>Şekil 6-15</b> Ana Kanal Buhar Sıcaklıkları .....	40
<b>Şekil 6-16</b> Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan Çubuk) Eksenel Sıcaklık Dağılımı.....	41

<b>Şekil 6-17</b> Sabit Yükseklikte Bileşen Sıcaklıkları (750 mm yükseklik).....	41
<b>Şekil 6-18</b> Kaplama ve HTS Sıcaklıkları (750 mm yükseklik).....	42
<b>Şekil 6-19</b> Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan Çubuk) Sıcaklığı (750 mm yükseklik).....	43
<b>Şekil 6-20</b> Benzeşim Çubuğu (Isıtılan Çubuk) Sıcaklığı (750 mm ve 550 mm yükseklik).....	43
<b>Şekil 6-21</b> Hidrojen Oluşum Hızı .....	44
<b>Şekil 6-22</b> Kümülatif Hidrojen Miktarı .....	44
<b>Şekil 6-23</b> Demete Verilen Buhar.....	46
<b>Şekil 6-24</b> Yakıt Çubuğu Sıcaklığı (750 mm yükseklik).....	47
<b>Şekil 6-25</b> Kümülatif Hidrojen Miktarı .....	48
<b>Şekil 6-26</b> Yakıt Çubuğu Sıcaklığı Karşılaştırması (750 mm yükseklik).....	49
<b>Şekil 6-27</b> Kümülatif Hidrojen Miktarı .....	50

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 3-1</b> Isıtılan ve Isıtılmayan Çubuk Özellikleri [2] .....	8
<b>Çizelge 3-2</b> Kontrol Çubuğu Özellikleri [2] .....	9
<b>Çizelge 3-3</b> Kaplama Özellikleri [2] .....	10
<b>Çizelge 5-1</b> Yakıt Çubuğu Geometrisi [2].....	19
<b>Çizelge 5-2</b> Dış Bölge Benzeşim Çubuğu Geometrisi.....	19
<b>Çizelge 5-3</b> Kontrol Çubuğu Geometrisi .....	19
<b>Çizelge 5-4</b> ZrO <sub>2</sub> Fiber Katman Özellikleri .....	20
<b>Çizelge 5-5</b> Sıcak Benzeşim Çubuğu Geometrisi .....	20
<b>Çizelge 5-6</b> Yüksek Sıcaklık Zırhı Radyal Katmanları.....	21
<b>Çizelge 5-7</b> Buhar Gaz Karışımı Termodinamik Özellikleri .....	21
<b>Çizelge 5-8</b> Demetin Radyal Nodalizasyonu.....	22
<b>Çizelge 5-9</b> Hidrodinamik Bileşenler .....	22
<b>Çizelge 5-10</b> Hacim Bileşenlerinin Özellikleri.....	24
<b>Çizelge 5-11</b> Demet Dışı Hacim Bileşenleri .....	24
<b>Çizelge 5-12</b> Zamana Bağımlı Bağlantı Bileşenleri.....	25
<b>Çizelge 5-13</b> Hacim Bileşenlerinin Zamana Bağlı Sıcaklık Değişimi.....	25
<b>Çizelge 5-14</b> Benzeşim Çubuğu Güç Geçmişi .....	26
<b>Çizelge 5-15</b> SCDAP Modelleme Seçenekleri .....	27
<b>Çizelge 6-1</b> Ölçülen ZrO <sub>2</sub> Kalınlıkları [2] .....	36
<b>Çizelge 6-2</b> Hassasiyet Analizi Modelleri .....	45

## Kısaltmalar

Ag	Gümüş
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
Cd	Kadmiyum
HTS	Yüksek Sıcaklık Zırhı
In	İndiyum
INEL	Idaho Ulusal Mühendislik Laboratuvarı
ISP	Uluslararası Standartlaştırma Problemi
KFK	Karlsruhe Nükleer Araştırma Merkezi
LWR	Hafif Su Reaktörü
PWR	Basıncılı Su Reaktörü
RELAP	Reaktör Sapma ve Sızıntı Analiz Programı
SCDAP	Ağır Kor Hasarı Analiz Paketi
SA	Ağır Kaza, Ciddi Kaza
SFD	Ağır Yakıt Hasarı
UO <sub>2</sub>	Uranyum dioksit
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonyum dioksit
Zry	Zirkaloy
Zry-4	Zirkaloy-4

# 1 GİRİŞ

Hafif Sulu Reaktörlerde (LWR) ağır kazalar kor erimesi, fizyon ürünü salınımı ve biriken hidrojenin patlaması gibi olaylara neden olabilmektedir. Özellikle Fukushima Daiichi nükleer kazasından sonra ağır kaza analizi programlarının önemi daha iyi bir şekilde anlaşılmıştır. Santral kararması, soğutucu kaybı kazası gibi ağır kaza senaryolarının benzeşiminin yapılmasıyla elde edilen sonuçların incelenmesi ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasından elde edilen bilgiler; kaza yönetimi ve nükleer reaktör tasarımında kullanılmaktadır.

Cora deneylerinin genel amacı önlenemeyen ağır kaza durumunda kor erimesinin incelenmesidir. Deneyler basınçlı su reaktörleri (PWR), kaynar su reaktörleri (BWR) ve Rus tipi basınçlı su reaktörlerinin (VVER) kor modellemesinde kullanılmıştır. Cora deneyleri temel olarak su vermeden ve su verme işlemi ile bitirilen olmak üzere ikiye ayrılır. Su vermeden bitirilen deneylerde; güç kesildikten sonra demet sıcaklığı argon gazı vasıtasıyla yavaş yavaş düşürülür. Su verme işlemi ile bitirilen deneylerde ise; demet altında bulunan su tankı yükseltilerek kora su basılması benzeşimi yapılır.

Cora-13 deneyini diğer Cora deneylerinden ayıran özellik; su verme işleminin demet gücü kesilmeden önce başlanması ve oksitlenmenin katkısıyla yüksek sıcaklıklara ulaşılmasıdır.

Demet içinden buhar geçerken, demet hasar oluşana kadar elektrikli ısıtıcı ile ısıtılır. Enerji kesilmeden 30 saniye önce, soğutma işlemini modellemek için kullanılan su tankı, yükselmeye başlar bu şekilde demet çok yüksek sıcaklıklara çıkar. Deneyde demet sıcaklığı, Zirkaloy-4 (Zry-4) oksitlenmesi, hidrojen oluşumu, malzemeler arası kimyasal reaksiyon, malzeme erimesi ve kor içindeki yer değişimi olayları incelenmiştir.

Deney; reaktör soğutma sisteminin termal-hidrolik tepkisini, kor hasarındaki safhaları tanımlamak için tasarlanmıştır; RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 kodu ile modellenmiştir. Kodun RELAP5 bölümü hidrodinamik modelleri, SCDAP bölümü ise ağır hasar modellerini barındırır. SCDAP hidrodinamik hacmin akış alanını ve yoğunlaşmayan gazların (hidrojen ve fizyon ürünleri) taşınımaları konusunda RELAP'e etki ederken, RELAP oksitlenmenin kısıtlanması konusunda SCDAP'e etki eder [1].

Bu çalışmada; sınır koşulları (buhar debisi) ve SCDAP parametrelerinde (oksit kabuk kararlılığı ve zarf deformasyon değerlerinde) değişikliğe gidilerek farklı modellerle hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama sonuçları, deney ve başka kodların sonuçları ile karşılaştırılarak; değiştirilen değerlerin sonuçlara ne şekilde etki ettiği belirlenmiştir.

Sıcaklık ölçerlerin, yüksek sıcaklık nedeniyle, deneyin erken safhalarında bozulmasından dolayı, benzeşim 4850. saniyeye yani su verme işlemi öncesine kadar modellenmiştir.



## 2 ULUSLARARASI STANDARTLAŞTIRMA PROBLEMİ NO.31 (ISP No. 31)

### 2.1 Cora Deneyleri

Cora Deneyleri Karlsruhe Nükleer Araştırma Merkezi'nde (KFK) ağır yakıt hasarı (SFD) programı kapsamında yapılmakta olan radyoaktif olmayan deneylerdendir [2]. Deneyler Hafif Su Reaktörleri (LWR) yakıt elemanlarının tam erime safhasına kadar SFD durumunda verdikleri tepkiye dair bilgi edinmek amacıyla yapılmıştır.

Yapılmış olan 19 Cora testinin üç tanesi (Cora 12, Cora 13, Cora 17) test demetine alttan su verme işlemi ile tamamlanmıştır. Bu üç deney ağır kaza durumunda kora su basılmasının modellenmesidir. Su verme işlemi soğuma öncesinde sıcaklık artışı ve hidrojen üretiminin tepe noktasına ulaşmasına neden olmuştur.

Cora 13 basınçlı su reaktörü (PWR) demeti testinde 16 adet elektrikle ısıtılan benzeşim çubuğu, 7 adet ısıtılmayan yakıt çubuğu, 2 adet kontrol çubuğu kullanılmıştır. Cora 12 deneyine göre daha erken su verme işleminin başlaması Cora 13 deneyinde daha yüksek sıcaklık değerlerinin görülmesine neden olmuştur [3].

Yakıt çubuğu hasarı ve kor degradasyonuna en çok etki eden mekanizmalar yakıt elemanları arasındaki kimyasal etkileşim ve su buharının yakıt zarf malzemesini oksitlemesidir. Çalışmamızda üstünde en çok durulan konu zarf oksitlenmesi ve oksitlenme sonucu ortaya çıkan ısı ve hidrojenidir.

### 2.2 ISP No. 31'in Amacı

Genel olarak kor malzemesi erimesi her kor malzemesinin kendi erime sıcaklığına bağlıdır, fakat farklı malzemelerin birbirleriyle temas etmesi ve kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan alaşımlar malzeme erime sıcaklıklarına etki eder. Sıcaklık 1500 K'e yaklaştıkça zirkaloy-paslanmaz çelik reaksiyonu hız kazanır ve 1500 K'de yapısal tahribat meydana gelir. Güçlü oksitlenme meydana gelen zirkaloy ara tutucularda 2000 - 2100 K'e kadar tahribat oluşmaz [4].

Uluslararası Standartlaştırma Problemi No. 31 (ISP31) amacı ısınma ve erime esnasında PWR tipi yakıt elemanlarının davranışlarını analiz etmenin yanında Ağır Kaza Kodlarının güvenilirliğinin sınanmasıdır.

Aşağıdaki fiziksel değişkenler ve olaylar karşılaştırılarak yakıt elemanlarının

davranışları hakkında bilgi toplanabilir:

- Seçilen benzeşim, yakıt ve kontrol çubuklarının sıcakları,
- Ekzotermik Zirkonyum/Buhar etkileşimi sonrası sıcaklığın yükselmeye başlama zamanı,
- Zirkaloy zarf oksidasyonundaki artış miktarı,
- (Ag, In, Cd) soğurucu kontrol çubuklarının ve inconel ara tutucuların sıcaklıkları,
- Erimiş Zirkaloy, UO<sub>2</sub> ve ZrO<sub>2</sub> 'nin çözünme miktarı,
- Tıkanıklık miktarı ve konumu,
- Hidrojen oluşum miktarı ve zamanlaması.

### 2.3 Literatür Taraması

Cora-13 deneyinin modellenmesi ve analizine ilişkin bazı çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların bazıları Cora-13 deneyi karşılaştırma raporunda [5] yer almaktadır.

Karşılaştırma raporunda öncelikle ATHLET-CD kodu ile benzeşim yapılmıştır. Bu benzeşimin amacı katılımcıların basitleştirilmiş benzeşimleri için sınır koşullarının sağlanmasıdır. ATHLET-CD'nin yanında, SCDAP/RELAP5, ICARE2/V2/MOD1, KESS-III, FRAS-SFD, MELCOR 1.8.0 kodları ile modelleme yapılmıştır. Katılımcılar ve kullandıkları kod ve modellerin başlıca özellikleri aşağıda verilmektedir:

- **AEA:** SCDAP/RELAP5/MOD2.5 kodu 2 paralel akış kanalı 3 adet çapraz bağlantı ile birbirine bağlanmıştır. Isıtılmayan tek çubuk merkezde olmak üzere 6 adet bileşen tanımlanmıştır.
- **CEA:** ICARE2/V2/MOD1 kodu kullanılarak tek kanal içinde 7 adet çubuk modellenmiştir. Ara tutucular, pencereler ve baypas kanalı modellenmemiştir.
- **ECN:** SCDAP/RELAP5/MOD3 kodu kullanılarak yapılan modellemede baypas kanal ve çapraz bağlantılar modellenmemiş, tek kanal 15 eksenel bölüme ayrılmıştır.
- **IKE:** KESS-III kodu kullanılarak tek kanal içinde 4 halkaya bölünmüş demet modellenmesi yapılmıştır.
- **JAE:** SCDAP/RELAP5 kodu kullanılarak tek kanalda 6 bileşen olacak şekilde modelleme yapılmıştır.

- **KAE:** SCDAP/RELAP5/MOD2.5 kodu ile 2 kanal ve çapraz bağlantı kullanılarak modelleme yapılmıştır. Çubuk sayıları azaltılarak 6 SCDAP bileşeni tanımlanmıştır.
- **NRI:** FRAS-SFD kodu ile tek çubuk kullanılarak basitleştirilmiş bir model ile analiz yapılmıştır. Zarf malzemesi hasarı kod içinde devre dışı bırakılarak modelleme yapılmıştır.
- **SNL:** MELCOR 1.8.0 kodu kullanılarak yapılan analizde 2 paralel akış kanalı modellenmiştir.
- **VTT:** SCDAP/RELAP5/MOD2.5 kodu kullanılmıştır. Çapraz birleştirilmiş iki kanal modellenmiştir. 4 SCDAP bileşeni kullanılmıştır bundan dolayı merkezde ve 2. halkada bulunan ısıtılmayan çubuk sıcaklıkları eşit hesaplanmıştır.

AEA, CEA ve IKE dışındaki katılımcıların hidrojen oluşumu hesaplamaları bulunmamasından dolayı tezde bu üç katılımcının sonuçları karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır.

Karşılaştırma içine MELCOR kodu [6] ve SCDAP/RELAP5/MOD3 kodu [7] dahil edilmiştir.

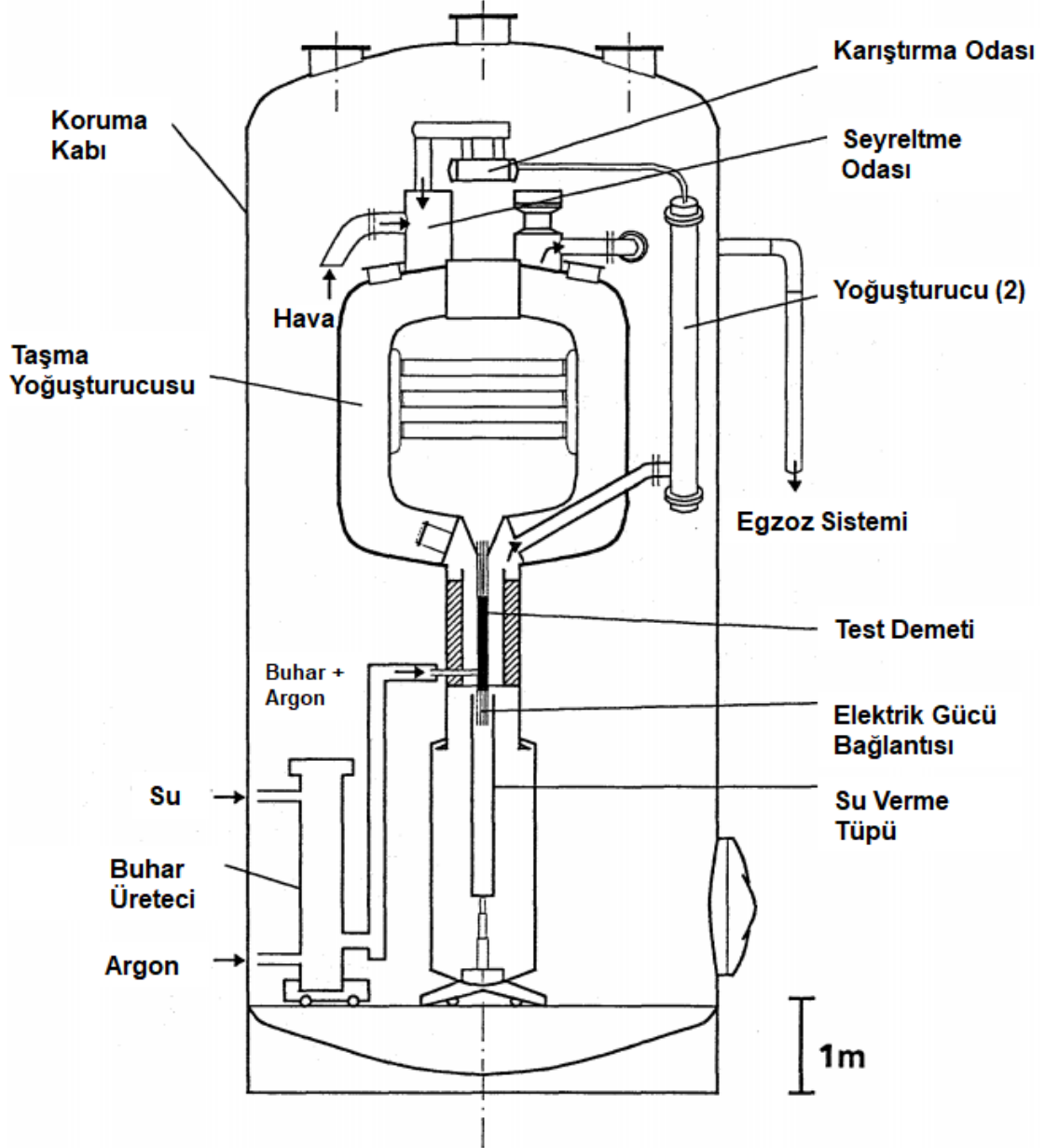
### 3 CORA TESİSİNİN ÖZELLİKLERİ

Deneylerde kor bozunma ısısının benzeşimi elektrikli ısıtıcılar ile yapılmıştır. Test demetinde kullanılan malzemeler (yakıt peleti, ayrıştırma gridleri, kontrol çubukları, kılavuz tüpleri vb.) ticari LWR'ler ile benzerdir.

Yakıt çubuğu demeti tesisin merkezinde konumlandırılmış ve Zry-4 kaplama (1,2 mm kalınlıkta) ve ZrO<sub>2</sub> fiber kaplama (19 mm kalınlıkta) ile çevrelenmiştir. Demet, güç kaynağı sistemine üst ve alt bitim noktalarından bağlanmıştır.

**Şekil 3-1**'de görüldüğü üzere deneyin başlangıcında demetin altında su verme silindiri, su seviyesi sıfır seviyesinin 220 mm altında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Sıfır seviyesi ise yakıt peletlerinin alt bitim noktasıdır.

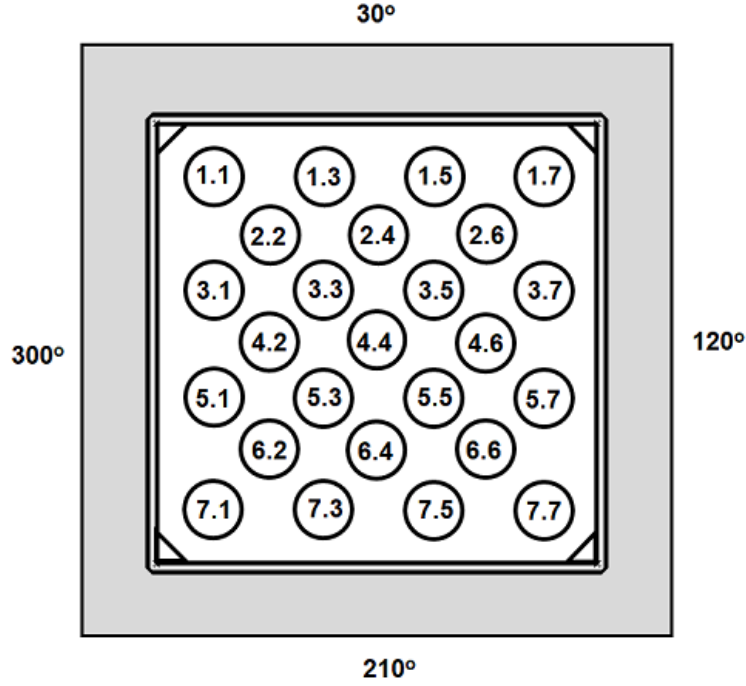
Buhar jeneratöründe üretilen buhar sıfır seviyesinden yakıt demetine giriş yapar. Demette kullanılmayan buhar iki paralel yoğuşturucuda yoğuşturulur. Oluşan hidrojen hava ile seyreltilip gaz tahliye sistemine yönlendirilir.



**Şekil 3-1** SFD Cora Tesisi Ana Bileşenleri [2]

### 3.1 Demet Tasarımı

Test demetindeki çubuk konumları **Şekil 3-2**'de görülmektedir. Test demeti Cora 13 deneyi için 16 tane elektrikle ısıtılan, 7 tane ısıtılmamış yakıt çubuğu ve 2 tane kontrol çubuğu içermektedir. PWR tipi demet, çubuklar arası mesafe 14,3 mm olacak şekilde 3 ara tutucu (üstteki ve alttaki Zirkaloy-4 ortadaki Inconel 718) ile sabitlenmiştir. Ara tutucular -5 mm, 496 mm ve 880 mm yükseklikindedirler. Buhar 120 ile 210 derece arasından, 180 dereceden, demetin alt bitiş noktasından giriş yapar.



**Şekil 3-2** Test Demeti Çubuk Konumları

### 3.1.1 Yakıt Çubuğu Benzeşimi

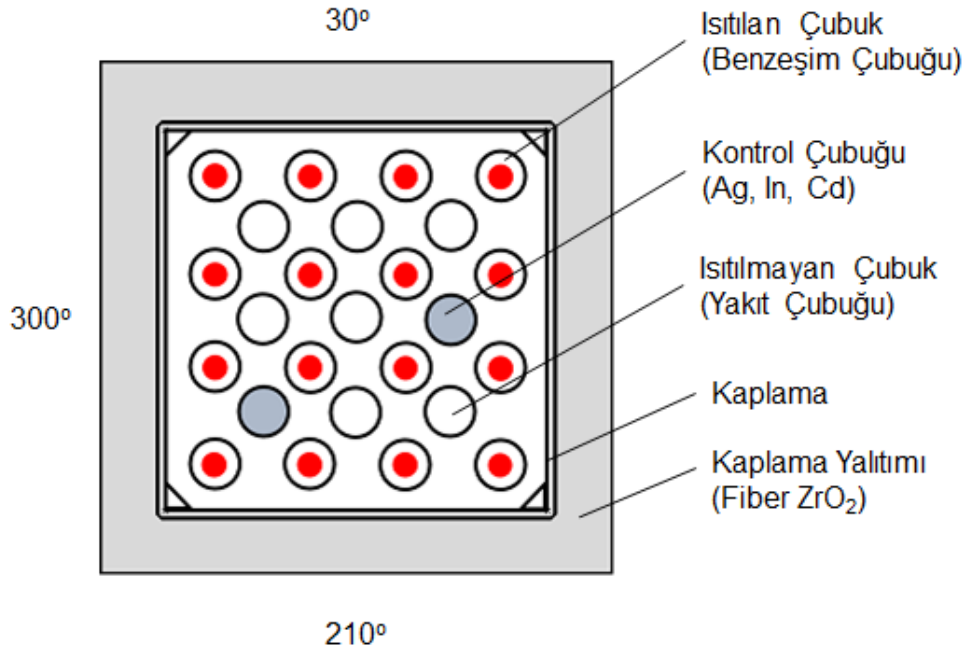
**Şekil 3-3**'de içi kırmızı olan 16 adet ısıtılan çubuğun 4'ü 2. halkada geri kalanları ise 4. halkada bulunmaktadır. 7 adet ısıtılmayan çubuğun 1'i merkezde kalan 6 adedi ise 2 kontrol çubuğu ile 3. halkada yer almaktadır.

**Çizelge 3-1** Isıtılan ve Isıtılmayan Çubuk Özellikleri [2]

Parametre	Isıtılmayan Yakıt Çubuğu	Isıtılan Benzeşim Çubuğu
Çubuk Sayısı	7	16
Yakıt Malzemesi	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Pelet Zenginliği	0,2 %	0,2 %
Zarf Malzemesi	Zry-4	Zry-4
Yakıt Peleti Dış Çapı	9,1 mm	9,1 mm
Zarf İç Çapı	9,3 mm	9,3 mm
Zarf Dış Çapı	10,75 mm	10,75 mm
Plenum Hacmi	87×10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>	12×10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>

Isıtılan yakıt çubuklarının ortasından 6 mm çapında tungsten ısıtıcı çubuğu geçmektedir. Tungsten ısıtıcının 1024 mm aktif uzunluğu vardır. Isıtılmayan çubuklar PWR reaktörlerindeki yakıt çubukları ile benzer konfigürasyona sahiptir. Isıtılmayan çubuklardan elde edilen sıcaklık verileri genel olarak çubuk merkezine

yerleştirilen sıcaklık ölçerlerden alınırken; ısıtılan çubukların sıcaklık ölçümleri zarf yüzeyinde yapılmıştır.



Şekil 3-3 Test Demeti Tasarımı

### 3.1.2 Kontrol Çubukları

Özellikleri Çizelge 3-2'de verilen iki kontrol çubuğu demete 3. halkada yerleştirilmiştir. Soğurucu malzeme paslanmaz çelik ile kaplanmış ve Zry-4 kılavuz tüp ile çevrelenmiştir.

Çizelge 3-2 Kontrol Çubuğu Özellikleri [2]

Parametre	Kontrol Çubuğu
Çubuk Sayısı	2
Soğurucu Malzeme	80 Ag, 15 In, 5 Cd (ağ. %)
Zarf Malzemesi	Paslanmaz Çelik
Zarf İç Çapı	10,2 mm
Zarf Dış Çapı	11,2 mm
Parametre	Kılavuz Tüp
Malzeme	Zry-4
Dış Çap	13,8 mm
Tüp Duvarı Kalınlığı	0,8 mm

### 3.1.3 Kaplama ve Kaplama Yalıtımı

Kaplamanın temel işlevi buharı demet içinde yönlendirmektir. Kaplama malzemesi Zry-4 buharla etkileşime girerek oksitlenme sonucu ortaya çıkan enerjiye katkıda bulunur. **Şekil 3-3**'de gösterilen kaplamayı saran kaplama yalıtımı düşük ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği ile kaplamanın demet sıcaklığına yakın seyretmesini sağlar [2]. **Çizelge 3-3**'de kaplamanın genel özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3-3** Kaplama Özellikleri [2]

<b>Parametre</b>	<b>Kaplama</b>	<b>Kaplama Yalıtımı</b>
Malzeme	Zry-4	Fiber ZrO <sub>2</sub>
Kalınlık	1,2 mm	19 mm
Yükseklik	36 mm – 1231 mm	36 mm – 1036 mm

### 3.1.4 Yüksek Sıcaklık Zırhı

Isı kaybını minimize etmek amacıyla kaplama yüksek sıcaklık zırhı (HTS) ile çevrelenmiştir. 114 mm kalınlığındaki HTS'de genel olarak seramik elyaf malzeme kullanılmıştır. HTS boşlukla ayrılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dış katman ve ZrO<sub>2</sub> iç katmandan oluşmaktadır.



## 4 TEST KURALLARI VE BAŞLANGIÇ SINIR KOŞULLARI

Test aşağıda belirtilen 3 safhaya ayrılmıştır.

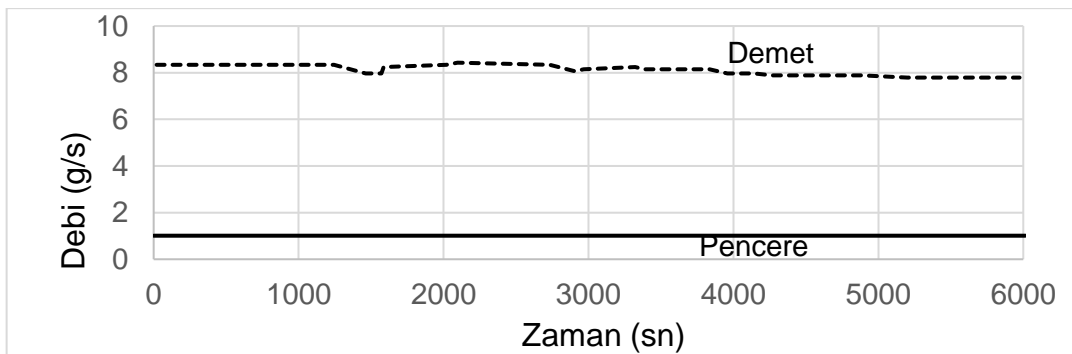
- 0 – 3000 sn: Gaz Ön Isıtma Safhası
- 3000- 4900 sn: Geçiş Safhası
- 4900 sn sonrası: Soğutma Safhası

Gaz ön ısıtma safhası genel olarak sabit sıcaklık ve debide argon gazı verilerek demet sıcaklığını arttırmak için gereklidir.

Geçiş safhası demete güç ve buhar verilmeye başlanan ve kazanın soğutma öncesi kısmının benzeşimini yapan safhadır. **Şekil 4-4**'teki güç verilmesi ve artışı demet sıcaklığını doğrudan etkilerken, **Şekil 4-2**'deki buhar debisi demet girişi sıcaklığında önemli etkiye sahiptir. Geçiş safhası bitmeden hemen önce su tankı hareket ettirilmeye başlar.

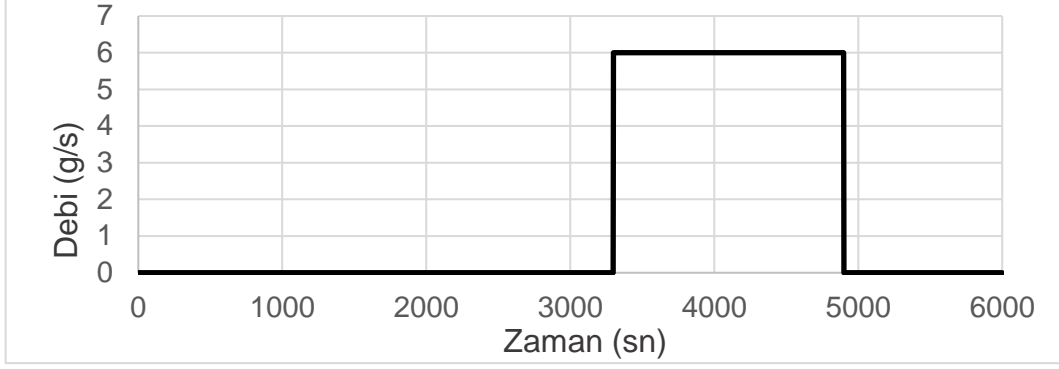
Soğutma safhasında su tankındaki su demete temas eder ve demeti tamamen kaplayana kadar yükselir. Güç ve buhar akışı kesilir oksitlenme sona erer.

**Şekil 4-1**'de görüldüğü üzere argon akışının bir kısmı demeti gözlemlemek için açılmış pencereyi temiz tutmak için pencereye yönlendirilmiştir. Argon oluşan hidrojen miktarını hesaplamak amacıyla kullanılmıştır.



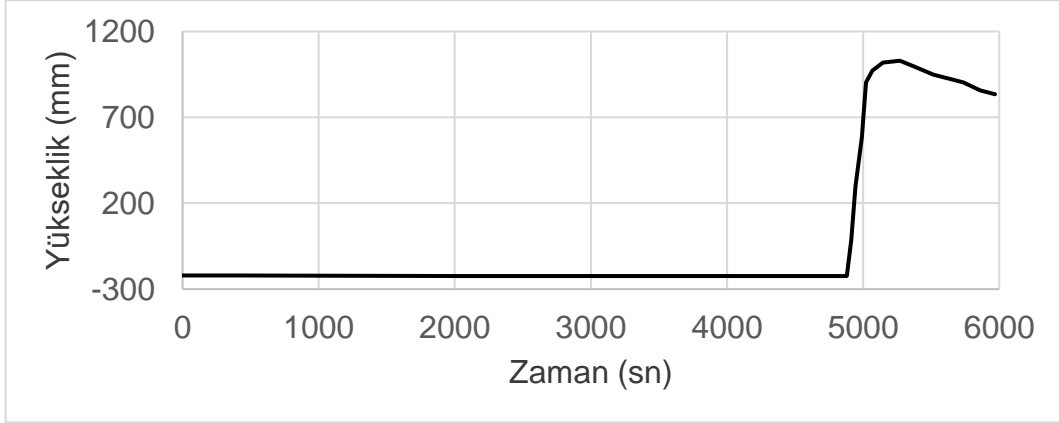
**Şekil 4-1** Argon Akışı

**Şekil 4-2**'de görüldüğü üzere buhar akışı 3300. saniyede başlar ve demet girişi sıcaklığının artmasına neden olur.



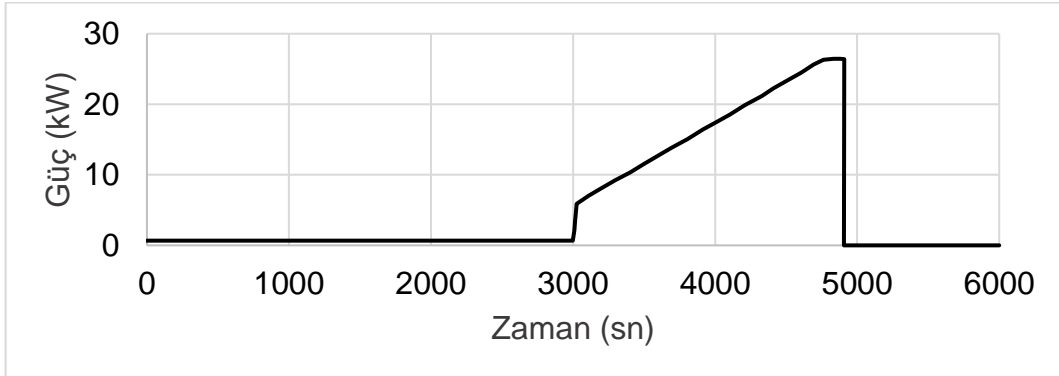
**Şekil 4-2** Buhar Akışı

**Şekil 4-3**'te su verme tankı su seviyesinin artışı göstermektedir. Deneyin geçiş safhasında doğrusal bir artış göstermiş en yüksek seviyeye çıkınca su seviyesi buharlaşmadan dolayı hızlı bir şekilde azalmıştır. Su verme tankı 1 cm/saniye ortalama hız ile yükseltilmiştir [2].



**Şekil 4-3** Su Verme Tankı Seviyesi

**Şekil 4-4**'te demet gücünün 6'dan 27 kW'a doğrusal olarak artırıldığı görülmektedir [2].



**Şekil 4-4** Demet Gücü

## 5 RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 KODU İLE DENEYİN MODELLENMESİ

### 5.1 RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 Kodu

Bu bölümde RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 kodunda kullanılan malzeme oksitlenme modeli, yakıt çubuğu deformasyon modellerinin açıklamalarını içermektedir.

#### 5.1.1 Malzeme Oksitlenme Modeli

Kor içinde miktarının fazla olması, oksitlenmenin yüksek derecede ekzotermik olması ve oksitlenmiş zirkaloyun termal ve mekanik özelliklerinin büyük farklılık göstermesinden dolayı zirkaloy oksitlenmesi önemli bir yere sahiptir. Zirkaloy oksitlenmesini düşük (523-673 K arası) ve yüksek (1.273-2.100 K arası) olmak üzere ikiye ayrılıp farklı alt kodlar ile modelleme yapılmıştır.

Düşük sıcaklıklarda oksitlenme normal koşullarda çalışan bir nükleer reaktör için yapılır. Geçiş öncesi ve sonrası oksitlenme şeklinde 2 aşamadan oluşan düşük sıcaklık oksitlenmesinde, aşamalar geçiş oksit katmanı kalınlığı noktası ile (genellikle  $1,9 \times 10^{-6}$  m) birbirinden ayrılır. Geçiş öncesi oksitlenme oranı oksit katman kalınlığı ile ilişkilidir. Geçiş sonrası oksitlenme oranı ise bozulmamış iç katmana bağlıdır.

Yüksek sıcaklık (1.273-2.100 K arası) oksitlenmelerinde soğutucu buhara dönüşür ve oksitlenme LWR işletme sıcaklıklarına göre çok hızlı gerçekleşir. Oksitlenme soğutucu tarafında gerçekleşeceği gibi yakıtın zarfa içten teması ve zarfa oksijen geçişi ile yakıt tarafında da gerçekleşebilir.

Zirkaloyun buhar ortamında, yüksek sıcaklıkta oksitlenmesinden 3 farklı katman oluşur: sünek  $\beta$  katmanı (iç kısım), oksijence dengeli  $\alpha$ -Zr(O) (arada bulunur), ZrO<sub>2</sub> katmanı (zirkaloy buhar arasında bulunur).

Malzeme oksitlenme modeli ile ısı üretimi, hidrojen oluşumu ve buhar miktarındaki azalma hesaplanır. Bu model oksitlenme oran denklemini (Denklem 5.1) ısı iletim modeli ile bulunan bileşen sıcaklıkları ile kullanır. Malzeme oksitlenmesi Denklem 5.1'de görüldüğü gibi parabolik davranması beklenir.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{A}{\delta} e^{\left(\frac{-B}{T}\right)} \quad (5.1)$$

- $\delta$  = kütle artışı veya katman kalınlığı (kg/m<sup>2</sup> veya m)  
 $T$  = sıcaklık (K)  
 $t$  = zaman (sn)  
 $A, B$  = parabolik oran sabiti (MATPRO'dan alınır)

$\Delta t$  zaman aralığında, sabit sıcaklık için Denklem 5.1'in çözümü Denklem 5.2'de verilmiştir.

$$\delta = \sqrt{2Ae^{\left(\frac{-B}{T}\right)}\Delta t + \delta_0^2} \quad (5.2)$$

Literatür taramalarına göre oksitlenme oranı 1850 K sıcaklıkta kesintiye uğramıştır [8]. Bundan dolayı A ve B sabitleri 1853 K'den sonra farklı değerler almaktadır.

$\delta_0$  zaman aralığının başlangıcındaki kalınlık ya da kütle miktarıdır. Zirkaloy oksitlenmesinde; oksijen kütle artışı,  $\alpha$  ve ZrO<sub>2</sub> katman büyümesini hesaplamak için 3 ayrı parabolik denklem çözülür. Diğer tüm malzemeler için sadece oksijen kütle artışı denklemi çözülür.

Oksitlenmeden kaynaklı ısı üretimi ( $Q_{0X}$ ), hidrojen üretim miktarı ( $\dot{H}_2$ ) ve buhar azalma oranı ( $\dot{H}_2O$ ) oksit kütle artışı kullanılarak Denklem 5.3, 5.4 ve 5.5 kullanılarak hesaplanır.

$$Q_{0X} = \frac{M}{M_{O_2}} h_r S \frac{dw}{dt} \quad (5.3)$$

$$\dot{H}_2 = \frac{1}{8} S \frac{dw}{dt} \quad (5.4)$$

$$\dot{H}_2O = \frac{9}{8} S \frac{dw}{dt} \quad (5.5)$$

- $M_{O_2}$  = Oksijenin molekül ağırlığı  
 $M$  = Malzemenin molekül ağırlığı  
 $h_r$  = reaksiyon ısısı (j/kg)  
 $S$  = orijinal yüzey alanı (m<sup>2</sup>)  
 $w$  = birim yüzey alanındaki oksijen kütle artışı (kg/m<sup>2</sup>)

Oksitlenme işlemi aşağıda verilen üç sınırlamaya tabi tutulmaktadır.

1. Sınırlama: Malzemenin tamamen oksitlenmesi durumunda oksitlenme işlemi durdurulur (Zirkaloy  $ZrO_2$ 'ye dönüşmesi veya Demirin  $FeO_2$ 'ye dönüşmesi). Malzemenin oksijen alım limiti Denklem 5.6 ile hesaplanmaktadır.

$$w \leq \frac{M_{O_2}}{M} \rho \frac{V}{S} \quad (5.6)$$

$M_{O_2}$  oksijenin,  $M$  malzemenin moleküler ağırlığı;  $\rho$  ve  $V$  ise malzeme yoğunluğu ve hacmidir.

2. Sınırlama: Oksitlenme oranını buhar miktarı sınırlandırmaktadır. Denklem 5.5 kullanılarak Denklem 5.7'deki koşul elde edilmiştir.  $\dot{m}$  oksitlenen yüzeye etki eden buharın debisidir.

$$\frac{dw}{dt} \leq \frac{8 \dot{m}}{9 S} \quad (5.7)$$

3. Sınırlama: Zarf malzemesi içinde oluşan hidrojen buharın zarfın iç kısımlarına yayılmasını sınırlandırır. Su buharının molar kütlesi, su buharının kısmi basıncı ile orantılı olduğu için Denklem 5.8'deki sınırlama su buharının kısmi basıncı ile orantılıdır.

$$\frac{dw}{dt} \leq \frac{m_{O_2}}{2m_{H_2O}} \frac{N_{H_2O}}{A} = \frac{8}{9} \left( \frac{hD_v}{k_{(H_2O)}} \right) \left( \frac{P_{(H_2O)}}{RT} \right) \left( \frac{k_{(H_2O)}}{\rho_{(H_2O)} C_{p(H_2O)} D_v} \right)^{(1/3)} \quad (5.8)$$

$D_v$ , kütle difüzyonu hesabında, yoğunlaşmayan gaz olarak hidrojenin yanında diğer yoğunlaşmayan gazlar da kullanılmaktadır.

### 5.1.2 Yakıt Çubuğu Zarfı Deformasyon Modeli

Eğer zarf şişer ve kırılırsa oksitlenme kaynaklı ısınma deforme olmamış zarfın verdiği oksitlenme ısısının 2,6 katına çıkar [9]. 2,6 kat ısı üretimi, zarf yarıçapının 1,3 katına çıkması ve kırılma sonrası çift taraflı oksitlenme kaynaklı ısı üretimi kaynaklıdır.

RELAP/SCDAP kodu ağır kazalarda görülebilen, elastik-plastik deformasyonu hesaplamak için mekanik model olan sosis deformasyon modelini kullanır.

Zarfın sosis deformasyon süreci gerilime bağlı olarak işler. Öncelikle çevresel,

eksenel ve radyal gerilim hesaplanır.

$$\sigma_h = \frac{p_g r_i - p_c r_o}{r_o - r_i} \quad (5.9)$$

$$\sigma_a = \frac{p_g r_i^2 - p_c r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (5.10)$$

$$\sigma_r = -0,5(p_c + p_g) \quad (5.11)$$

$\sigma_h$  = çevresel gerilme (Pa)

$\sigma_a$  = eksenel gerilme (Pa)

$\sigma_r$  = radyal gerilme (Pa)

$p_g$  = gaz basıncı (Pa)

$p_c$  = soğutucu basıncı (Pa)

$r_i$  = iç yarıçap (m)

$r_o$  = dış yarıçap (m)

Denklem 5.12 kullanılarak hesaplanan efektif gerilim  $\sigma_e$  ;çevresel, eksenel ve radyal gerilim hesabında kullanılır.

$$\sigma_e = [ACS(\sigma_h - \sigma_a)^2 + AAS(\sigma_a - \sigma_r)^2 + ARS(\sigma_r - \sigma_h)^2]^{0,5} \quad (5.12)$$

Eğer efektif gerilim gerçek efektif sünme geriliminden fazla ise plastik deformasyon hesabı yapılır. Plastik deformasyondaki gerilim artışı Prandtl-Reuss denklemleri kullanılarak hesaplanır.  $d_{ep}$ , gerçek efektif gerilim değerindeki artış sıfır ya da pozitiftir.

$$d\varepsilon_{h,p} = d_{ep}[A_1(\sigma_h - \sigma_a) + A_2(\sigma_h - \sigma_r)]/\sigma_e \quad (5.13)$$

$$d\varepsilon_{a,p} = d_{ep}[A_3(\sigma_a - \sigma_r) + A_1(\sigma_a - \sigma_h)]/\sigma_e \quad (5.14)$$

$$d\varepsilon_{r,p} = d_{ep}[A_2(\sigma_r - \sigma_h) + A_3(\sigma_r - \sigma_a)]/\sigma_e \quad (5.15)$$

$\varepsilon_h$ , toplam çevresel boyut değişimi;  $\varepsilon_{h,t}$ , termal deformasyon ve  $d\varepsilon_{h,p}$ , çevresel boyut değişimindeki fark göz önünde bulundurularak Denklem 5.16 kullanılarak hesaplanır.

$$\varepsilon_h = \varepsilon_{h,e} + \varepsilon_{h,t} + \varepsilon_{h,p0} + d\varepsilon_{h,p} \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_{h,e} = \text{elastik deformasyon kaynaklı çevresel boyut değişimi} \\ \frac{\sigma_h - \nu(\sigma_a + \sigma_r)}{E}$$

$$\varepsilon_{h,t} = \text{termal deformasyon kaynaklı çevresel boyut değişimi } (\alpha\Delta T)_h$$

$$\varepsilon_{h,p0} = \text{zaman adımının başında plastik deformasyon kaynaklı çevresel boyut değişimi}$$

$$\nu = \text{Poisson oranı}$$

$$E = \text{elastisite modülü (Pa)}$$

Radyal ve aksenal gerinim hesabı Denklem 5.16'daki çevresel boyut değişimi hesaba benzer şekilde yapılır. Çevresel boyut değişimi yeni yarıçap ve zarf kalınlığı hesaplamak için kullanılır. Bulunan yeni yarı çap ve zarf kalınlıkları Denklem 5.9'da gerilim hesabında kullanılır. Her bileşen için hesaplanan çevresel gerilim yakınsanırsa iterasyon bitirilir. Zarfın kırılması MATPRO aracılığı ile hesaplanan hasar geriliminin, çevresel gerilim ile karşılaştırılması ile saptanır. Eğer zarf kırılmış ve çevresel boyut değiştirme eşiğinden fazla ise çift taraflı oksitlenme gerçekleşmeye başlar.

## 5.2 Demetin Genel Modellemesi

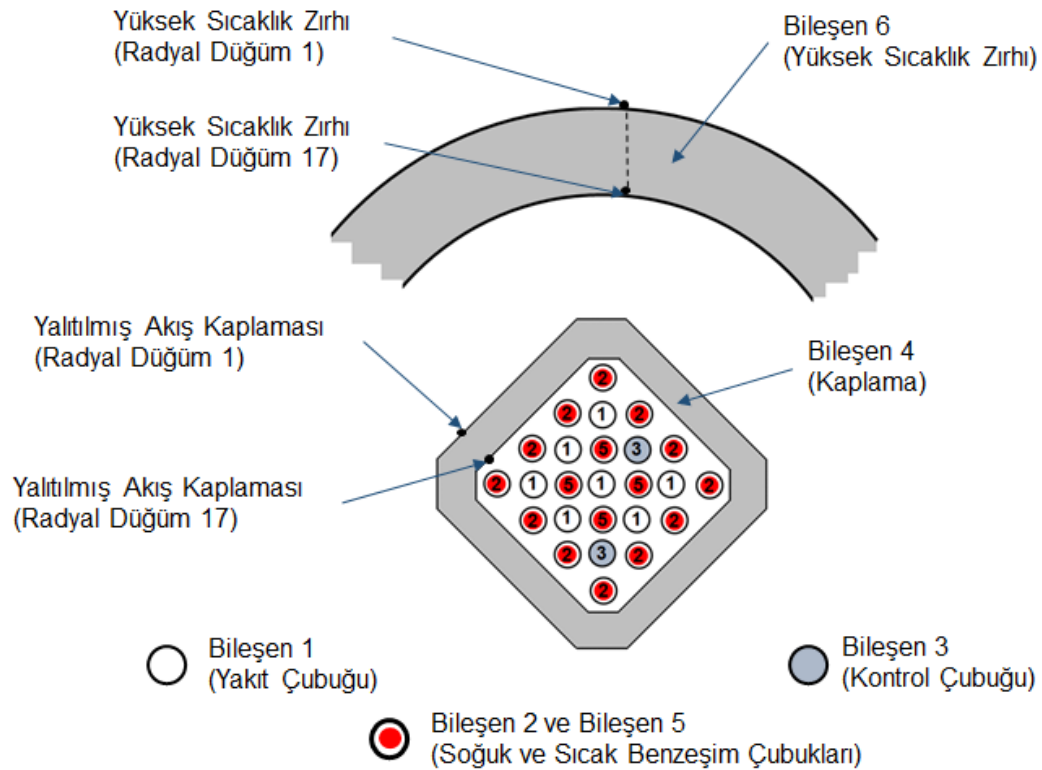
Bu bölüm test demetinin modellenmesi için oluşturulan girdilerin detaylı açıklamasını içermektedir. Bu çalışmada INEL tarafından hazırlanan girdi dokümanı baz model olarak kullanılmıştır.

RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 kodu reaktör sistemlerinin normal ve kaza koşullarındaki durumlarını analiz etmek amacıyla tasarlanmıştır. Kodda kullanılan modeller aşağıda listelenmiştir:

- Malzeme oksitlenme modeli: Isı üretimi, hidrojen üretimi ve harcanan buhar miktarını malzeme sıcaklığından faydalanarak hesaplar.
- İleri oksitlenme modeli: Su verme deneylerinde oksitlenmiş yakıt çubuğunun kırılmasından kaynaklı ileri oksitlenme modeli kullanılmıştır.
- Yakıt Çubuğunun sıvılaşması ve yer değiştirmesi modeli: Oksitlenmemiş Zr'nin  $UO_2$ 'yi eritip zarf dışına gedik açarak sızması ve yer çekiminin etkisiyle çökmesi sırasında ısı transferi ve oksitlenme modellenmiştir.

SCDAP kısmında modellenen altı bileşen **Şekil 5-1**'de gösterilmiştir.

- **Birinci Bileşen:** Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan Çubuk)
- **İkinci Bileşen:** Benzeşim Çubuğu (Isıtılan Çubuk)
- **Üçüncü Bileşen:** Kontrol Çubuğu
- **Dördüncü Bileşen:** Kaplama
- **Beşinci Bileşen:** Sıcak Benzeşim Çubuğu (Isıtılan Çubuk)
- **Altıncı Bileşen:** Yüksek Sıcaklık Zırhı



**Şekil 5-1** SCDAP Bileşenleri



### 5.2.1 Birinci Bileşen: Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan yakıt çubukları)

Aralarında 0,0143 m boşluk olan 7 adet PWR yakıt çubuğu modellenmiştir.

**Çizelge 5-1** Yakıt Çubuğu Geometrisi [2]

Plenum Uzunluğu (m)	Plenum Boşluğu Hacmi (m <sup>3</sup> )	Yakıt Çubuğu Yarıçapı (m)	İç Zarf Yarıçapı (m)	Dış Zarf Yarıçapı (m)
0,066	2,425×10 <sup>-5</sup>	4,6×10 <sup>-3</sup>	4,655×10 <sup>-3</sup>	5,375×10 <sup>-3</sup>

Yakıt boşluğunda kullanılan helyum gazının kütlesi 1,391×10<sup>-5</sup> kg, basıncı 0,416×10<sup>6</sup> Pa'dır. Oksitlenme buharın nüfus etme oranına bağlı olarak limitlenmiştir.

### 5.2.2 İkinci Bileşen: Dış Bölge Benzeşim Çubuğu

Modellemede 12 adedi dış bölgede olmak üzere 16 adet benzeşim çubuğu kullanılmıştır. Bu kısımda dış bölgedeki benzeşim çubuklarının özellikleri verilmiştir. Çubukların arasında 0,0143 m mesafe vardır.

**Çizelge 5-2** Dış Bölge Benzeşim Çubuğu Geometrisi

Plenum Uzunluğu (m)	Plenum Boşluğu Hacmi (m <sup>3</sup> )	Isıtıcı Kablo Yarıçapı (m)	Yakıt Çubuğu Yarıçapı (m)	İç Zarf Yarıçapı (m)	Dış Zarf Yarıçapı (m)
0,010	7,45×10 <sup>-5</sup>	0,003	4,6×10 <sup>-3</sup>	4,655×10 <sup>-3</sup>	5,375×10 <sup>-3</sup>

Yakıt boşluğunda kullanılan helyum gazının kütlesi 1,24×10<sup>-5</sup> kg, basıncı 2,20×10<sup>5</sup> Pa'dır. Oksitlenme buharın nüfus etme oranına bağlı olarak limitlenmiştir.

### 5.2.3 Üçüncü Bileşen: Kontrol Çubuğu

Aralarındaki mesafe 0,0143 m olmak üzere 2 adet Ag-In-Cd Kontrol Çubuğu kullanılmıştır.

**Çizelge 5-3** Kontrol Çubuğu Geometrisi

Kontrol Çubuğu Soğurucusunun Dış Yarıçapı (m)	Paslanmaz Çelik Kılıfın Dış Yarıçapı (m)	Zirkaloy Kılavuz Tüpü İç Yarıçapı (m)	Zirkaloy Kılavuz Tüpü Dış Yarıçapı (m)
4,43×10 <sup>-3</sup>	5,1×10 <sup>-3</sup>	6,1×10 <sup>-3</sup>	6,9×10 <sup>-3</sup>

### 5.2.4 Dördüncü Bileşen: Kaplama

Kaplama akış alanı kalınlığı 6,9×10<sup>-3</sup> m, yüzey çevre uzunluğu 0,324 m dir. Dış kısımdan başlamak üzere kaplamada ZrO<sub>2</sub> Fiber (18 mm kalınlıkta) ve Zirkonyum

Alaşım (Zircaloy) (1 mm ve 1,1 mm kalınlıklarında) modellenmiştir. **Çizelge 5-4**'te ZrO<sub>2</sub> Fiber katmanının manuel tanımlanmış özellikleri gösterilmektedir.

**Çizelge 5-4** ZrO<sub>2</sub> Fiber Katman Özellikleri

Sıcaklık (K)	Özgöl Isı (j/kg.K)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	İletkenlik (W/m.K)
300	506	480	0,095
550	506	480	0,115
700	506	480	0,120
873	506	480	0,135
1083	506	480	0,168
1173	506	480	0,182
1248	506	480	0,195
1700	506	480	0,280
2100	506	480	0,375
2500	506	480	0,458

### 5.2.5 Beşinci Bileşen: Sıcak Benzeşim Çubuğu

Modellemede 4 benzeşim çubuğu i halkada tanımlanmıştır. **Çizelge 5-5** i bölge (sıcak) benzeşim çubuklarının özellikleri verilmiştir. Çubuklar arası mesafe 0,0143 m olarak tanımlanmıştır.

**Çizelge 5-5** Sıcak Benzeşim Çubuğu Geometrisi

Plenum Uzunluğu (m)	Plenum Boşluğu Hacmi (m <sup>3</sup> )	Elektrik Isıtıcı Kablo Yarıçapı (m)	Yakıt Çubuğu Yarıçapı (m)	İ Zarf Yarıçapı (m)	Dış Zarf Yarıçapı (m)
0,010	7,45×10 <sup>-5</sup>	0,003	4,6×10 <sup>-3</sup>	4,655×10 <sup>-3</sup>	5,375×10 <sup>-3</sup>

Yakıt boşluğunda kullanılan helyum gazının kütlesi 1,24×10<sup>-5</sup> kg, basıncı 2,20×10<sup>5</sup> Pa'dır. Oksitlenme buharın nüfus etme oranına bağlı olarak limitlenmiştir.

### 5.2.6 Altıncı Bileşen: Yüksek Sıcaklık Zırhı

Yüksek Sıcaklık Zırhı akış alanı kalınlığı 6,52×10<sup>-2</sup> m, yüzey çevre uzunluğu 0,961 m dir. **Çizelge 5-6** Yüksek Sıcaklık Zırhını dıştan içe doğru katman malzemelerinin radyal koordinatlarını göstermektedir.

**Çizelge 5-6** Yüksek Sıcaklık Zırhı Radyal Katmanları

<b>Katman Malzemesi</b>	<b>Malzeme İndeksi</b>	<b>Radyal Koordinat (m)</b>
Paslanmaz Çelik 3304	18	0,0020
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	0,0770
Buhar Gaz Karışımı	9	0,0920
Paslanmaz Çelik 3304	18	0,1020
ZrO <sub>2</sub> Fiber	10	0,1395
Zirkonyum Alaşım	1	0,1400

Dıştaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve içteki ZrO<sub>2</sub> katmanını ayıran boşluk, buhar-gaz karışımı olarak tanımlanmış ve termal özellikleri benzeşimde **Çizelge 5-7**'deki değerler ile tanımlanmıştır.

**Çizelge 5-7** Buhar Gaz Karışımı Termodinamik Özellikleri

<b>Sıcaklık (K)</b>	<b>Özgül Isı (j/kg.K)</b>	<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>İletkenlik (W/m.K)</b>
300	520	1,624	0,0177
550	520	0,886	0,0267
700	520	0,609	0,0373
873	520	0,464	0,0454
1083	520	0,375	0,0501
1173	520	0,437	0,0547
1248	520	0,401	0,0620
1700	520	0,385	0,0677
2100	520	0,229	0,0709
2500	520	0,192	0,0783

### 5.2.7 Demet, Çubuklar ve Kaplamanın Eksenel ve Radyal Nodalizasyon

Demet 10 eksenel düğümden oluşmakta ve grid ara tutucular 0,01 m, 0,5 m ve 0,9 m yüksekliklerde konumlandırılmıştır. Üst ve alt ara tutucuların yükseklikleri 0,042 m, orta ara tutucu ise 0,038 m yüksekliğindedir. Üst ve alt ara tutucular Zirkaloy Alaşım ortadaki ise Inconel malzemedendir yapılmıştır.

**Çizelge 5-8**'de demetin radyal nodalizasyon ayrıntıları verilmektedir. Yakıt ve benzeşim çubukları 6 radyal düğüm ile ayrılmıştır. Yakıt çubuğunun 4 düğümü pelet için, 2 düğüm ise zarf için tanımlanmıştır. Kontrol çubuğu 5 radyal düğümle ayrılmıştır. Kaplama ve Yüksek Sıcaklık Zırhı 17 radyal düğüme ayrılmıştır.

**Çizelge 5-8 Demetin Radyal Nodalizasyonu**

Düğüm Sayısı	Yakıt Çubuğu (m)	Benzeşim Çubuğu (m)	Kontrol Çubuğu (m)
1	0,0	0,0	0,0
2	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$4,43 \times 10^{-3}$
3	$3,883 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$5,10 \times 10^{-3}$
4	$4,6 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$6,10 \times 10^{-3}$
5	$4,655 \times 10^{-3}$	$4,655 \times 10^{-3}$	$6,90 \times 10^{-3}$
6	$5,375 \times 10^{-3}$	$5,375 \times 10^{-3}$	-

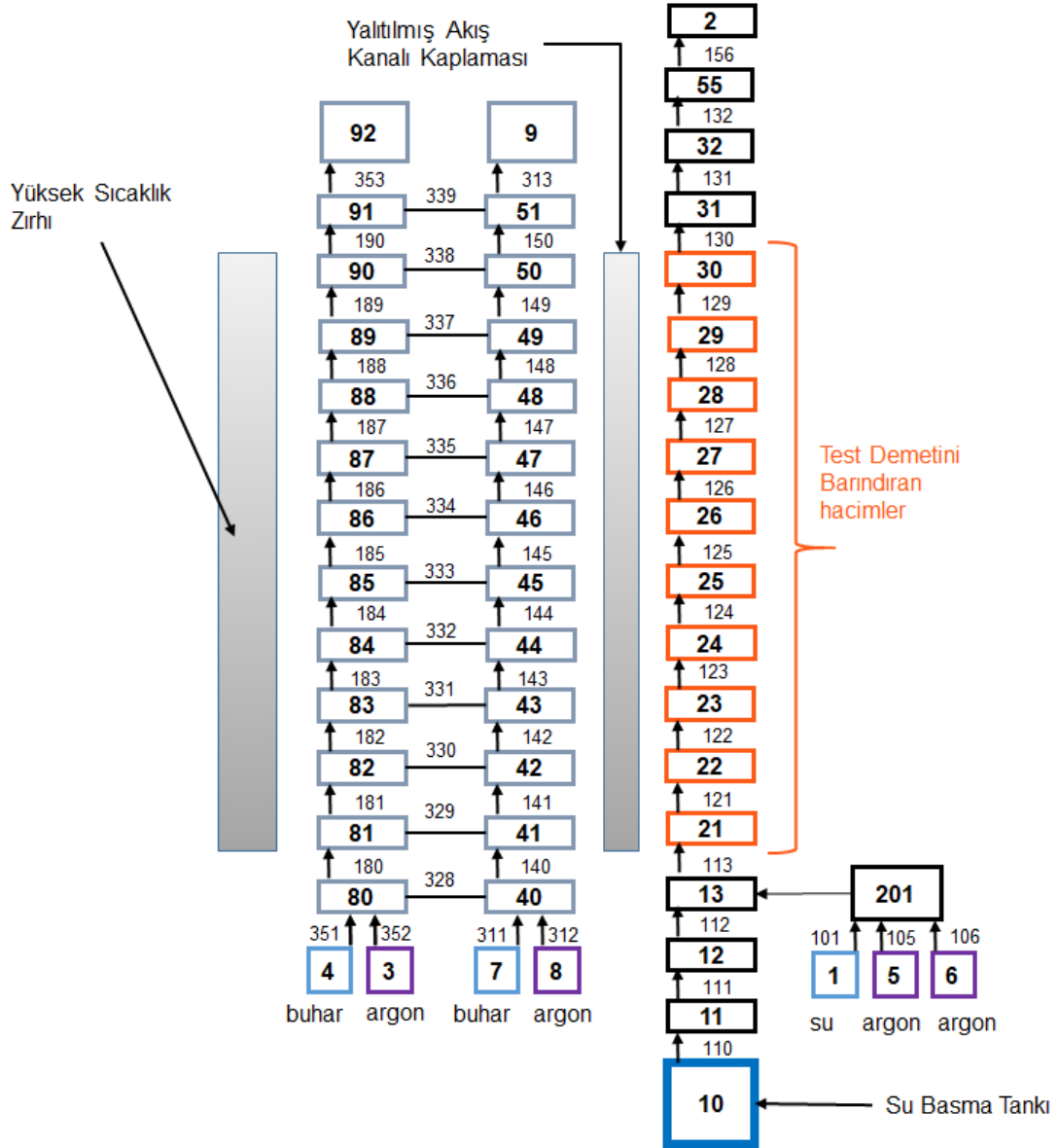
### 5.3 Demetin Termal Hidrolik Modellemesi

RELAP5 termal hidrolik modelleri hidrodinamik bileşenler aracılığıyla tanımlanır. Temel bileşen numaraları ve türleri **Çizelge 5-9**'da gösterilmiştir. Farklı türde bileşenler (snglvol, tmdpvöl, sngljun, tmdpjün) tabloda görülmektedir. Modelde tanımlanan termal hidrolik akış kanalları snglvol'lerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. 021 ile 030 arası tekil hacimler bağlanarak demet içi akışı modellemede kullanılmıştır. 041 ile 050 arası tekil hacimler bağlanarak kaplamaya komşu ve 081 ile 090 arası tekil hacimler bağlanarak yüksek sıcaklık zırhına komşu yan geçit kanalı tanımlanmıştır.

**Çizelge 5-9 Hidrodinamik Bileşenler**

<b>Bileşen Numarası</b>	<b>013</b>	<b>021</b>	<b>031</b>	<b>032</b>	<b>055</b>	<b>002</b>
<b>Bileşen Adı</b>	lwpln3	test1	uppln	uppln	upplnm	snkvol
<b>Bileşen Türü</b>	snglvol	snglvol	snglvol	snglvol	snglvol	tmdpvöl
<b>Bileşen Numarası</b>	<b>001</b>	<b>005</b>	<b>006</b>	<b>201</b>	<b>011</b>	<b>012</b>
<b>Bileşen Adı</b>	srcv1	srcv2	srcv3	supout1	lwpln1	lwpln2
<b>Bileşen Türü</b>	tmdpvöl	tmdpvöl	tmdpvöl	snglvol	snglvol	snglvol
<b>Bileşen Numarası</b>	<b>010</b>	<b>110</b>	<b>111</b>	<b>112</b>	<b>113</b>	<b>121</b>
<b>Bileşen Adı</b>	quench	qunchj	lwplj1	lwplj1	lwplj3	testj1
<b>Bileşen Türü</b>	tmdpvöl	tmdpjün	sngljün	sngljün	sngljün	sngljün
<b>Bileşen Numarası</b>	<b>131</b>	<b>132</b>	<b>156</b>			
<b>Bileşen Adı</b>	testout	tstout2	uplnj2			
<b>Bileşen Türü</b>	sngljün	sngljün	sngljün			

**Şekil 5-2** hidrodinamik modellemeyi göstermektedir. Yüksek sıcaklık zırhı ve kaplama kanalı arasında kalan akış iki paralel kanal ile modellenmiştir. Paralel kanallar tekil bağlantı ile bağlanarak modellenmiştir.



**Şekil 5-2** Hidrodinamik Modelleme

### 5.3.1 Hacim Bileşenleri

Hacim bileşenleri tekil ve zamana bağlı hacim olmak üzere iki çeşittir. Modellemedeki demet ve yan geçit kanalı tekil hacim bileşenlerinin bağlanması ile oluşturulmuştur. **Çizelge 5-10**'da temel hacim bileşenlerinin akış alanları, uzunlukları ve diğer özellikleri listelenmiştir. 021'den 030'a kadar tekil hacimler

bağlanarak yakıt çubukları, kontrol çubukları ve kaplama arasında kalan alandaki akış modellenmiştir. Deney düzeneğinin alt ve üst plenumları da tekil hacimler bağlanarak modellenmiştir.

**Çizelge 5-10** Hacim Bileşenlerinin Özellikleri

	021-030	031	032	055	002	013
<b>Hacim Tipi</b>	Tekil	Tekil	Tekil	Tekil	Zamana Bağımlı	Tekil
<b>Akış Alanı (m<sup>2</sup>)</b>	$5,664 \times 10^{-3}$	$5,664 \times 10^{-3}$	$5,664 \times 10^{-3}$	$1,757 \times 10^{-1}$	$3,826 \times 10^{-1}$	$1,268 \times 10^{-2}$
<b>Uzunluk (m)</b>	$1,0 \times 10^{-1}$	$2,09 \times 10^{-1}$	$2,09 \times 10^{-1}$	$6,66 \times 10^{-1}$	1,0	$0,50 \times 10^{-1}$
<b>Cidar Pürüzlüğü (m)</b>	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
<b>Hidrolik Çap (m)</b>	$1,79 \times 10^{-2}$	$1,79 \times 10^{-2}$	$1,79 \times 10^{-2}$	$1,721 \times 10^{-1}$	-	$3,97 \times 10^{-2}$
<b>Basınç (Pa)</b>	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,195 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$
<b>Sıcaklık (K)</b>	-	-	-	-	900	-

Buhar ve argon kaynaklarının, su basma tankı ve tankı demete bağlayan hacim bileşenlerinin özellikleri **Çizelge 5-11**'de gösterilmiştir. 201 numaralı tekil hacim buhar ve argonu karıştırarak 013 numaralı tekil hacim aracılığı ile demete aktarır.

**Çizelge 5-11** Demet Dışı Hacim Bileşenleri

	201	001	005	010	011	012
<b>Hacim Tipi</b>	Tekil	Zamana Bağımlı	Zamana Bağımlı	Zamana Bağımlı	Tekil	Tekil
<b>Akış Alanı (m<sup>2</sup>)</b>	$5,896 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$1,35 \times 10^{-2}$	$1,268 \times 10^{-3}$
<b>Uzunluk (m)</b>	30	1,0	1,0	1,0	$1,9 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-1}$
<b>Cidar Pürüzlüğü (m)</b>	0	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$
<b>Hidrolik Çap (m)</b>	-	-	-	-	$5,545 \times 10^{-2}$	$3,969 \times 10^{-2}$
<b>Basınç (Pa)</b>	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^5$
<b>Sıcaklık (K)</b>	300	*	*	*	450	490

### 5.3.2 Bağlantı Bileşenleri

Ana kanalı oluşturan hacimleri bağlamak için kullanılan bağlantı bileşenleri 121 ile 130 arasında tanımlanmıştır. Zamana bağımlı 105 ve 106 numaralı argon bağlantı

bileşeni ve 101 numaralı bir buhar bağlantı bileşeni tanımlıdır. **Şekil 5-2**'de görüldüğü üzere 001, 005 ve 006 numaralı zamana bağımlı hacimler 101, 105, 106 numaralı tekil bağlantılar ile 201 numaralı tekil hacme bağlanmıştır.

**Çizelge 5-12**'de ana kanala bağlanan sırasıyla buhar ve iki adet argon bağlantısı verilmiştir. Argon bağlantısının ikiye ayrılmasının nedeni sınır koşullarının belirlenmesi için deneme yapılmasıdır.

**Çizelge 5-12** Zamana Bağımlı Bağlantı Bileşenleri

101		105		106	
Zaman (sn)	Gaz debisi (kg/s)	Zaman (sn)	Gaz debisi (kg/s)	Zaman (sn)	Gaz debisi (kg/s)
0	$1,5 \times 10^{-5}$	0	00	0	$8,0 \times 10^{-3}$
3300	$1,5 \times 10^{-5}$	3420	0,0	3420	$8,0 \times 10^{-3}$
3301	$6,15 \times 10^{-3}$	3540	$8,0 \times 10^{-3}$	3540	0,0
4700	$6,15 \times 10^{-3}$	4000	$8,0 \times 10^{-3}$	4000	0,0
4701	$7,0 \times 10^{-3}$	5100	$8,0 \times 10^{-3}$	5100	0,0
4900	$7,0 \times 10^{-3}$	6000	0,0	6000	$8,0 \times 10^{-3}$
4901	0,0	15000	0,0	15000	$8,0 \times 10^{-3}$
8000	0,0				

**Çizelge 5-13**'te belirtilen 001 (buhar girişi) ve 010 (su verme tankı) basınçları  $0.22 \times 10^6$  Pa olarak tanımlanmıştır.

**Çizelge 5-13** Hacim Bileşenlerinin Zamana Bağlı Sıcaklık Değişimi

001		010	
Zaman (sn)	Sıcaklık (K)	Zaman (sn)	Sıcaklık (K)
0	703	0	300
3000	703	2900	311
4500	773	4100	316
4880	773	4500	337
4900	393	5000	345
6000	393	5080	345
-	-	5170	303
-	-	5250	299
-	-	6000	303

## 5.4 Sınır Koşulları

### 5.4.1 Demetin Güç Geçmişi

Demet bileşeni için SCDAP güç çarpanı, aksenal güç profili verisi, bileşen güç verisi, radyal güç profiline ihtiyaç duymaktadır. Zamana bağlı güç girdisi **Çizelge 5-14**'te verilmektedir. Güç girdisi deney değerlerinden daha düşüktür. İç bölgede bulunan 4 adet benzeşim çubuğu sağlanan gücün 25% dış kısımda kalan 12 adet benzeşim çubuğu ise 75%'ini almaktadır. Aksenal güç profili sabittir.

**Çizelge 5-14** Benzeşim Çubuğu Güç Geçmişi

Zaman (sn)	Güç (W)
0	0,0
3000	0,0
3020	$4,8 \times 10^3$
4780	$2,45 \times 10^4$
4800	$2,45 \times 10^4$
4900	$2,45 \times 10^4$
4905	0,0
5100	0,0

### 5.4.2 Basınç, Sıcaklık ve Debi

Giriş sınır koşullarını oluşturan 013 numaralı bileşene 201 numaralı hacim bağlanmaktadır. **Çizelge 5-12**'de debileri verilen bağlantılar aracılığıyla giriş sınır koşulları tanımlanmıştır.

Giriş koşulları için 0,22 MPa basınç kullanılmış, sıcaklık ise 001 numaralı (su girişi) bileşende zamana bağlı olarak tanımlanmıştır.

## 5.5 Modellemede Kullanılan Kabuller ve Girdi Parametreleri

Kabuller ve girdi parametrelerinin seçimi sonuçları önemli derecede etkilemektedir. Genel olarak varsayılan değerler kullanılmıştır. Baz modelde **Çizelge 5-15**'te seçilen modelleme parametreleri kullanılmıştır. Görüldüğü üzere çevresel boyut değişikliği eşiğinin varsayılan değeri olan 0,07 yerine 0,14 kullanılmıştır. Eğer zarf çevresel boyut değişikliği bu değerden fazla olur ve yakıt çubuğu zarfında kırılma gerçekleşirse çift taraflı oksitlenme başlar [10][11].



**Çizelge 5-15 SCDAP Modelleme Seçenekleri**

<b>Oksit Kabuk Kararlılığı</b>	
Oksit kabuk hasar sıcaklığı	2500 K (varsayılan)
Zarf oksitlenme oranı	0,60 (varsayılan)
Çevresel boyut değişikliği eşiği (çift taraflı oksitlenme için)	0,14
<b>Metalik Erime</b>	
Yerel oksitlenmeyi sonlandıran damlalarla kaplanmış yüzey alanı oranı	0,2 (varsayılan)
Sıvılaşmış veya çökmüş yakıt çubuğu zarfının donması için gerekli yüzey sıcaklığı.	0,0
Yakıt çubuğunun dış yüzeyinden çöken zarf malzemesinin hızı (m/sn)	0,5 (varsayılan)
<b>Zarf Deformasyonu</b>	
Kırılma gerinimi	0,18 (varsayılan)
Geçiş gerinimi	0,15
Gerinim limiti	0,248
Basınç düşümü etiketi	0

## 6 DENEY VE BENZEŞİM SONUÇLARI

### 6.1 Deney Sonuçları

Bu bölümde Cora-13 deneyinden elde edilen başlıca sonuçlar gösterilmiştir [2]. Deney 3 safhaya ayrılarak incelenmiştir. Bunlar:

1. 0 – 3000 sn: Gaz ön ısıtma safhası;
2. 3000 – 4900 sn: Geçiş safhası;
3. 4900 sn: Soğutma safhası.

Isıtılan çubuklar için her yüksekliğe demetin iç ve dış halkasında olmak üzere iki adet ısı ölçer yerleştirilmiştir.

#### 6.1.1 Gaz Ön Isıtma Safhası

Gaz ön ısıtma safhasında buharın yoğunlaşmasını önleyecek sıcaklığı sağlamak amacıyla debisi 8 g/sn olan ısıtılmış argon verilmiş ve demete 0,65 kW elektrik enerjisi verilmiştir. Basınç 0,22 MPa'da sabit tutulmuştur.

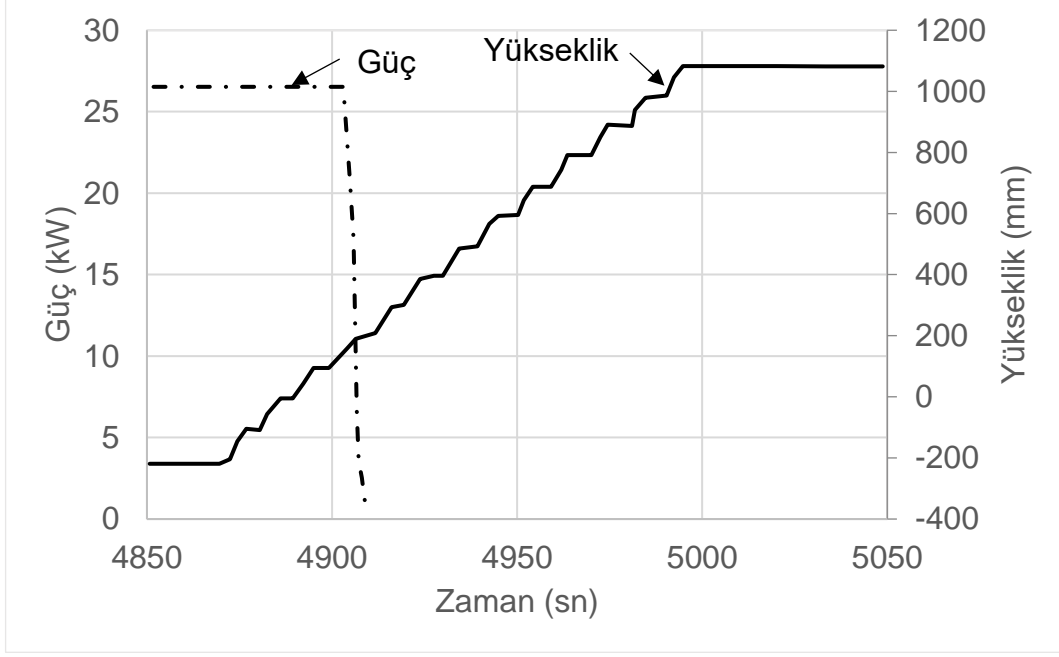
#### 6.1.2 Geçiş Safhası

Geçiş Safhasında 6 kW'tan 27 kW'a sabit oranda elektrik gücü artırılarak sıcaklık artışı gerçekleştirilmiştir. 3300. saniyede 6 g/sn'lik buhar akışı başlamıştır.

#### 6.1.3 Soğutma Safhası

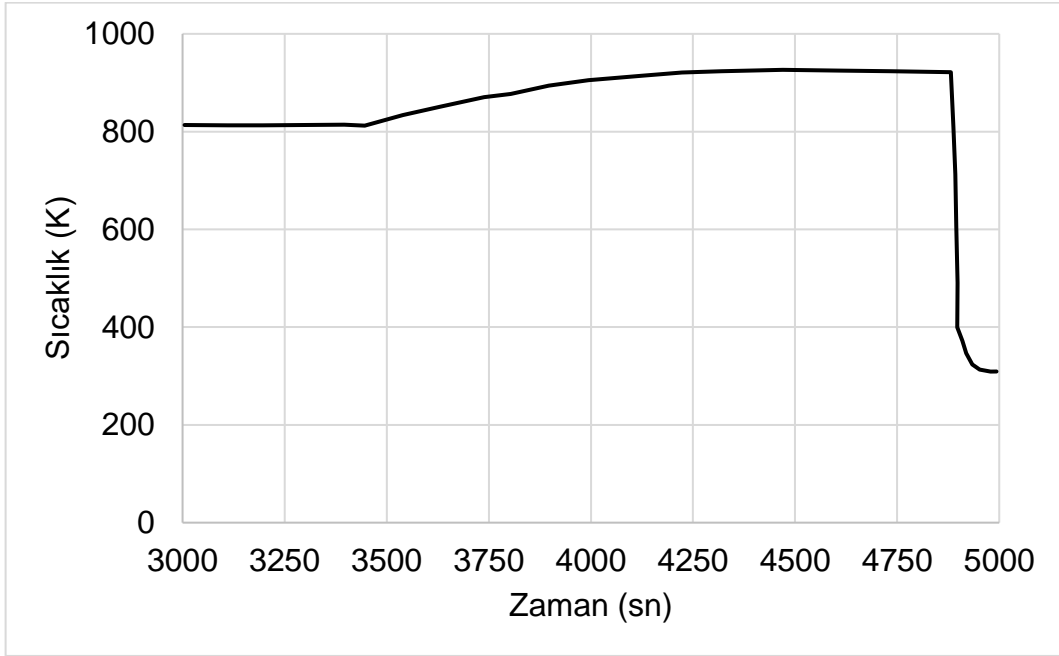
Soğutma Safhası 4870. saniyede su verme silindirinin yükselmeye başlaması ve elektrik gücünün 4900. saniyede kapatılması ile başlamıştır. Su verme silindiri 1 cm/sn ortalama hız ile yükselmektedir. Gücün kapandığı anda su seviyesi 150 mm yüksekliğe ulaşmıştır. Gücün kesilmesinden 90 saniye sonra su verme silindiri 1100 mm'ye yükselmiştir. **Şekil 6-1**'de güç ve su verme silindiri üst kısmının konumu verilmiştir.

Demetin alt kısmı su verme silindirindeki su ile soğumaktadır. Bu sebeple silindirdeki su seviyesi düşmektedir. Silindir suyundaki buharlaşma oranı genellikle 0,15 g/sn nin altındadır fakat son 200 saniyede (4890. saniyeden sonra) 1 g/sn değerine ulaşmıştır [2].



**Şekil 6-1** Su Verme Silindiri Hareketi ve Demet Gücü [2]

**Şekil 6-2**'de demet girişi gaz sıcaklığında 3400. saniyedeki artış buhar eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca buhar eklenmesi gaz hızında artışa neden olmuştur.



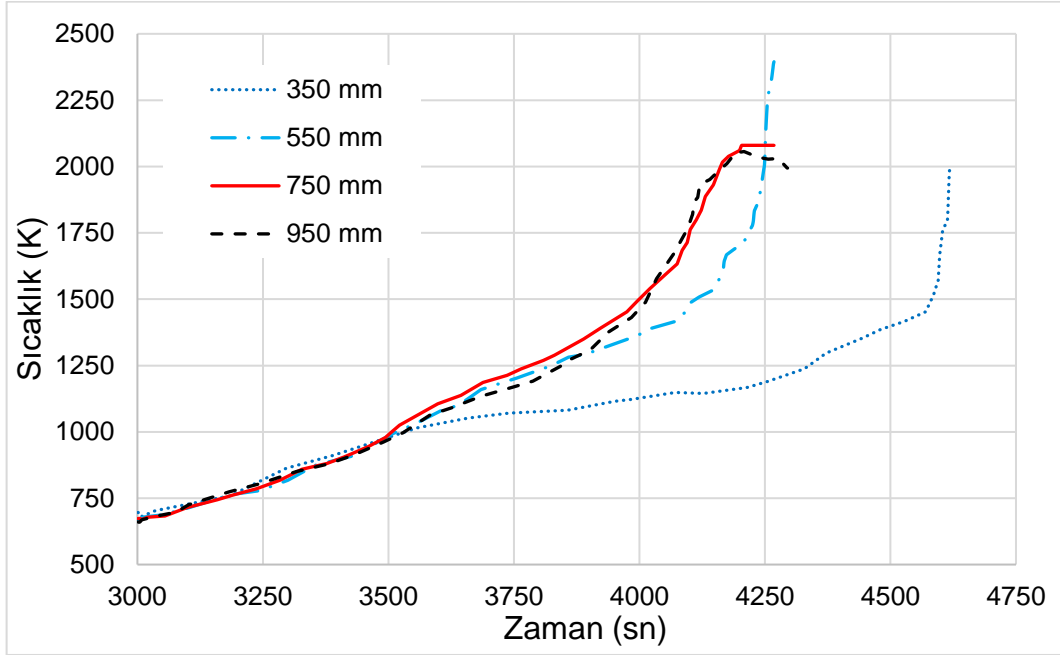
**Şekil 6-2** Demet Girişi Gaz Sıcaklığı [2]

#### 6.1.4 Bileşen Sıcaklıkları

Isıtılan çubuklar için sıcaklık verilen elektrik gücüyle orantılı olarak artmaktadır.

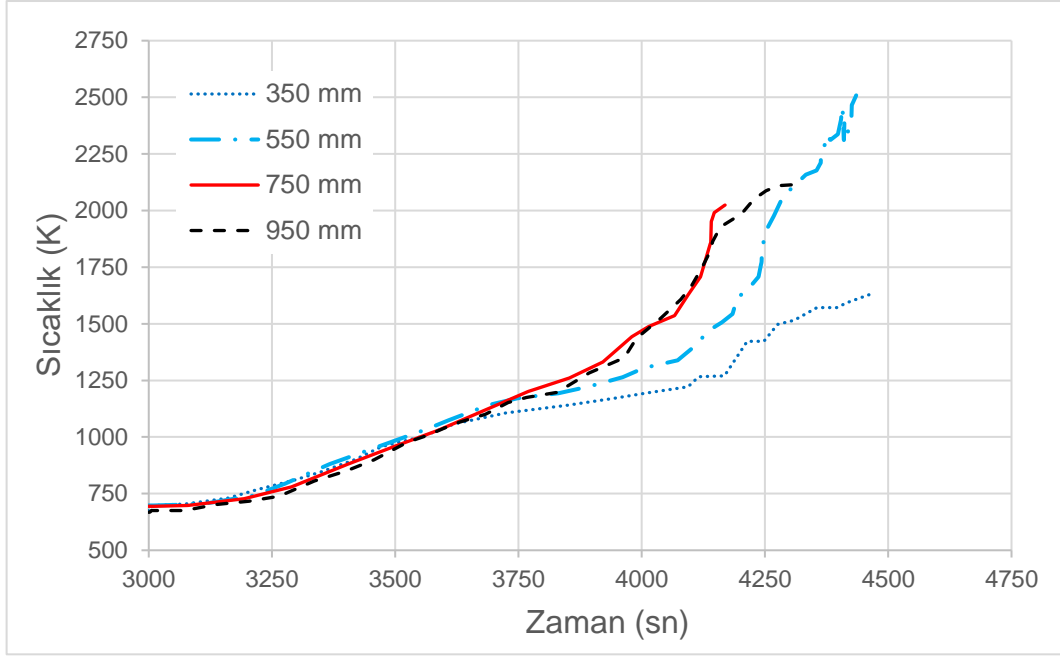
**Şekil 6-3**'te 1200 K'nin üzerine çıkılmasından sonra ekzotermik Zry/Buhar

reaksiyonu kaynaklı sıcaklık artışında hızlanma görülmektedir. Sıcaklık artışındaki hızlanma 950 mm ve 750 mm arasında başlamış aşağı ve yukarı yönde yayılmıştır.



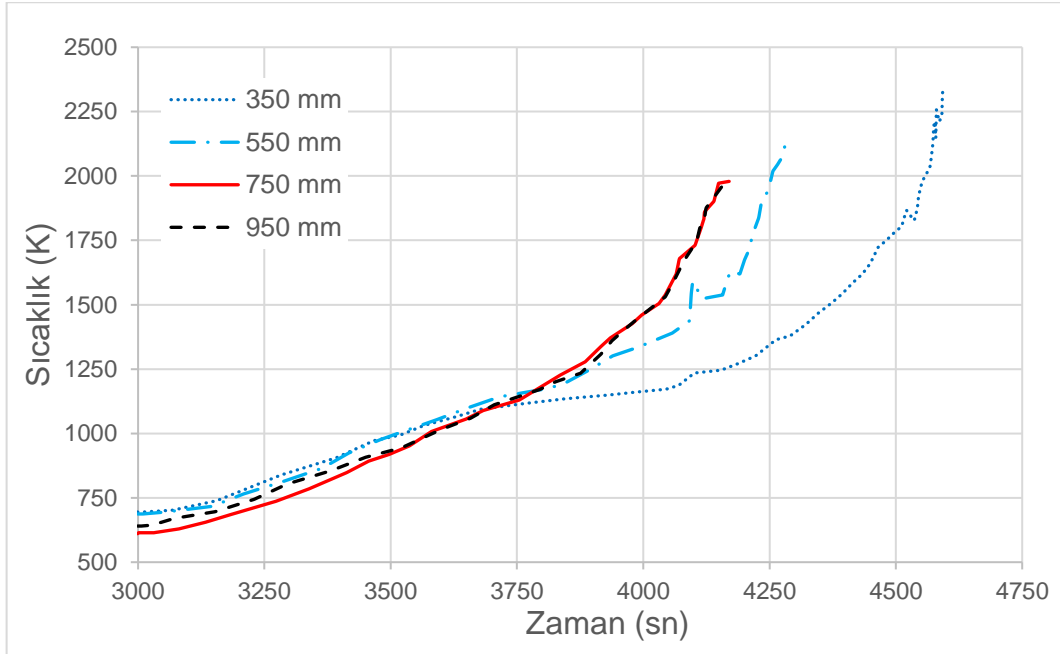
**Şekil 6-3** Isıtılan Çubuk Eksenel Sıcaklık Dağılımı

**Şekil 6-4**'te görüldüğü üzere ısıtılmayan çubukların sıcaklık değerleri genel olarak ısıtılan çubuklar ile aynı davranışı göstermektedir. Sıcaklık artışındaki hızlanma 850 mm yükseklikte başlar. 950 mm yükseklikteki sıcaklık hızlı bir şekilde artarken sıcaklık ölçer bozulmuştur. Ara tutucular için sıcaklık değişimi ısıtılmayan çubuklarla benzerlik göstermektedir.



**Şekil 6-4** Isıtılmayan Çubuk Eksenel Sıcaklık Dağılımı

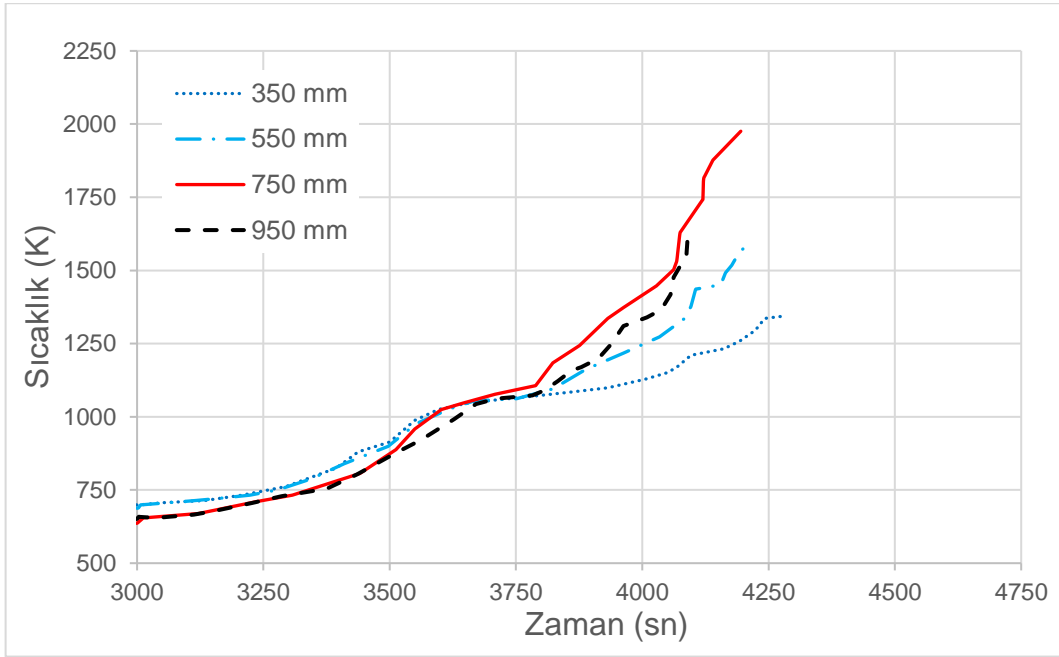
Kılavuz tüplerinde 1150 mm yükseklikteki sıcaklık ısıtılmayan çubuklara göre bir miktar fazladır [2]. **Şekil 6-5**'te görüldüğü üzere genel olarak sıcaklık ölçerler kılavuz çubukta daha çabuk bozulmuştur. Bunun nedeni malzemeler arası kimyasal reaksiyonun daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi ve kılavuz tüpünün bütünlüğünü kaybetmesidir.



**Şekil 6-5** Kılavuz Tüpü Eksenel Sıcaklık Dağılımı

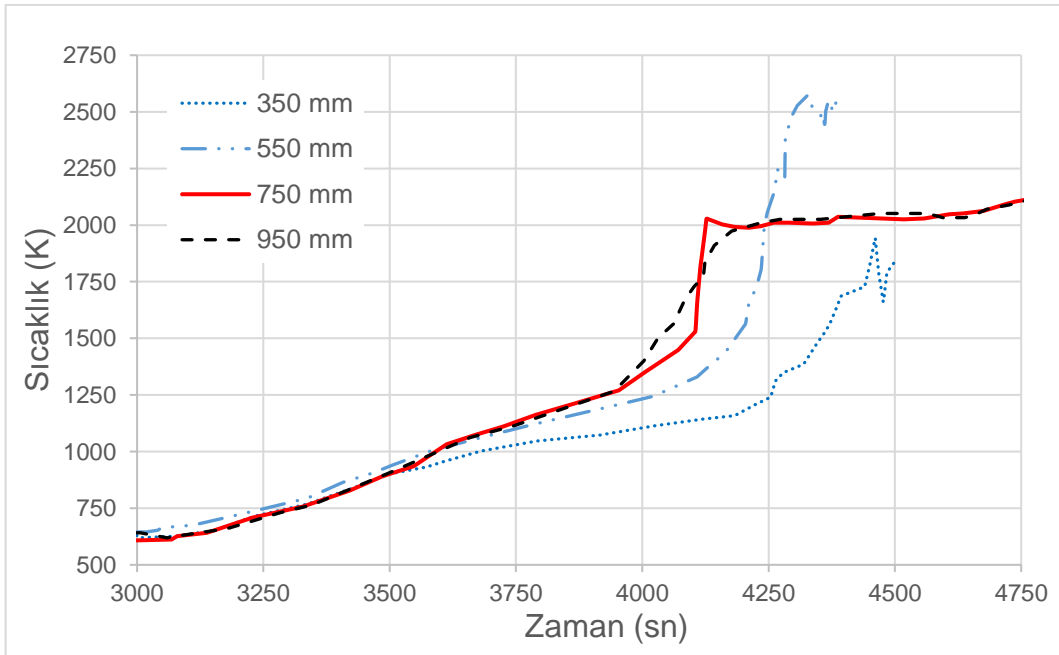
Kontrol çubuklarında sıcaklık değerleri **Şekil 6-6**'da gösterilmektedir. Kılavuz tüpleri ile yakın değerlerdedir. Fakat 3600. saniyede 1100 K'e ulaşan sıcaklıkta

soğurucunun erimesinden dolayı sıcaklık artışını bir miktar geciktirmiştir.



**Şekil 6-6** Kontrol Çubuğu Aksenal Sıcaklık Dağılımı

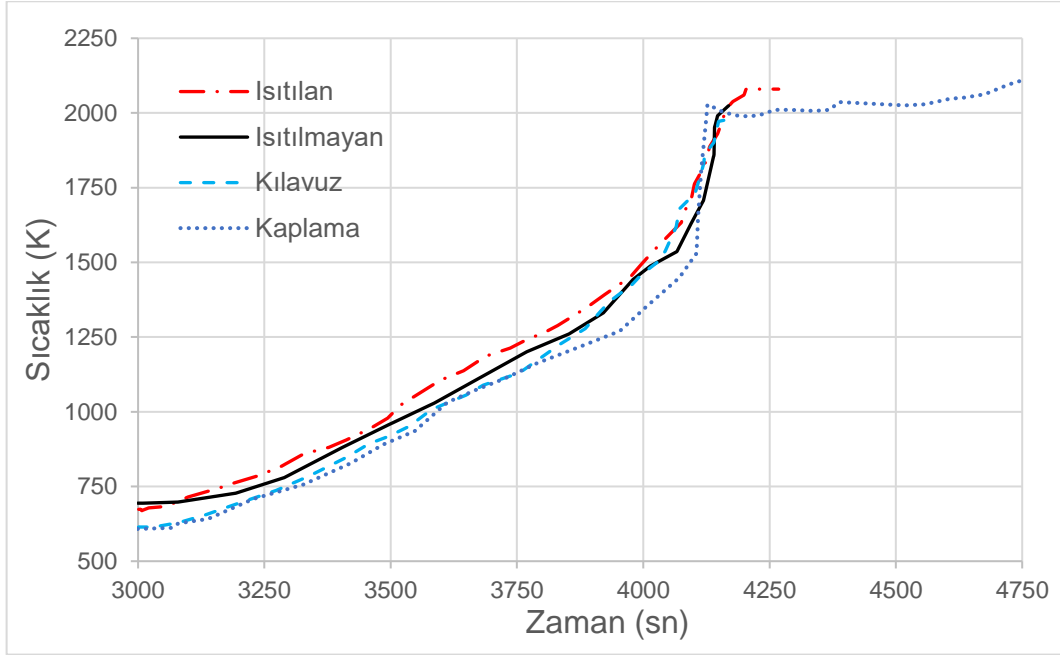
Kaplama iç yüzeyinde seramik kaplı sıcaklık ölçerler ile yapılan ölçümler **Şekil 6-7**'de gösterilmektedir. 4200. saniyedeki sıcaklık artışının sonuna kadar ısıtılmayan çubukların sıcaklık değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Ölçümler 750 ve 950 mm'de 4200. saniyeden su vermenin başlangıcına kadar neredeyse sabit sıcaklık değerleri göstermektedir.



**Şekil 6-7** Kaplama İç Yüzey Aksenal Sıcaklık Dağılımı

### 6.1.5 Belirli Yüksekliklerdeki Sıcaklıklar

Sıcaklık dağılımı eğilimlerini iyi anlayabilmek için belirlenmiş yüksekliklerde farklı bileşenler için sıcaklık değerlerini tek grafikte incelemek gerekmektedir.



**Şekil 6-8** Sabit Yükseklikte Bileşen Sıcaklıkları (750 mm yükseklik)

**Şekil 6-8'**de 750 mm yükseklikte ısıtılan (benzeşim), ısıtılmayan (yakıt) çubukları, kılavuz tüpü, kontrol çubuğu ve kaplama iç yüzey sıcaklıkları verilmiştir. Bütün bileşenlerin sıcaklıkları birbirine yakın takip etmiştir. Kaplamada 4200. saniyeden sonra 2100 K'de plato oluşumunun başladığı görülmektedir.

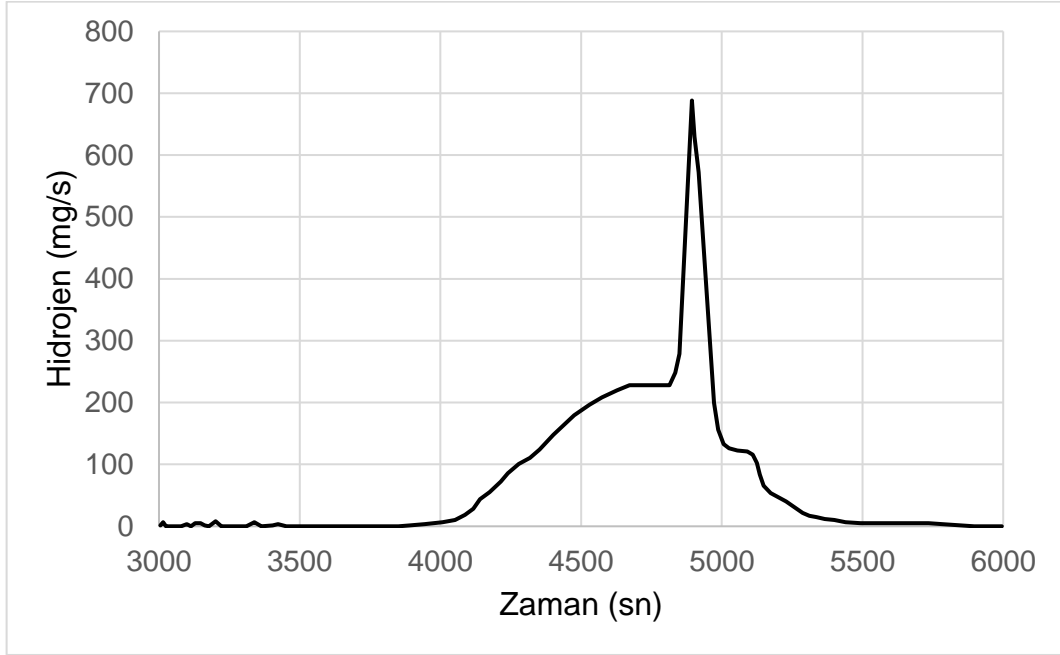
1350 mm yükseklikte ısıtılan ve ısıtılmayan çubuklar için sıcaklık değerleri birbirine yakındır. 870 K'e kadar sıcaklık artışı olmuş ardından sıcaklık 300 saniye kadar sabit kalmıştır. Ardından sıcaklık 1250 K'e kadar hızla artmış ve su verme safhasına kadar sabit kalmıştır. Sadece gaz sıcaklığını ölçen sıcaklık ölçer bozulmamıştır. 4100. saniyeye kadar (demette erimenin başlangıcı) gaz ve kılavuz tüpü sıcaklıkları benzerlik göstermektedir.

### 6.1.6 Hidrojen Oluşumu

Deney sırasında oluşan hidrojen genelde test bölümünün üstünde ve karışım çemberi olmak üzere iki yerde ölçülür. **Şekil 6-9'**da görüldüğü üzere su verme sırasında oluşan hidrojen miktarı (700 mg/sn) en yüksek değerdir.

Su verme esnasındaki hidrojen oluşumundaki sıçramanın kaynağı metal zirkonyumun yoğun şekilde oksitlenmesidir. Demet su ile kaplandıktan sonra hidrojen üretimi olmaz bundan dolayı 5000. saniye sonrasında **Şekil 6-9'**da

gösterilen kuyruk üretilen hidrojenin sistemdeki taşınımındaki gecikmeden kaynaklıdır [5]. Kuyruktaki 30 gr hidrojen, başlangıçtaki hidrojen üretimine dahil edilerek düzeltme yapılmalı ve hesaplamalar buna göre değerlendirilmelidir.



**Şekil 6-9** Hidrojen Oluşumu [2]

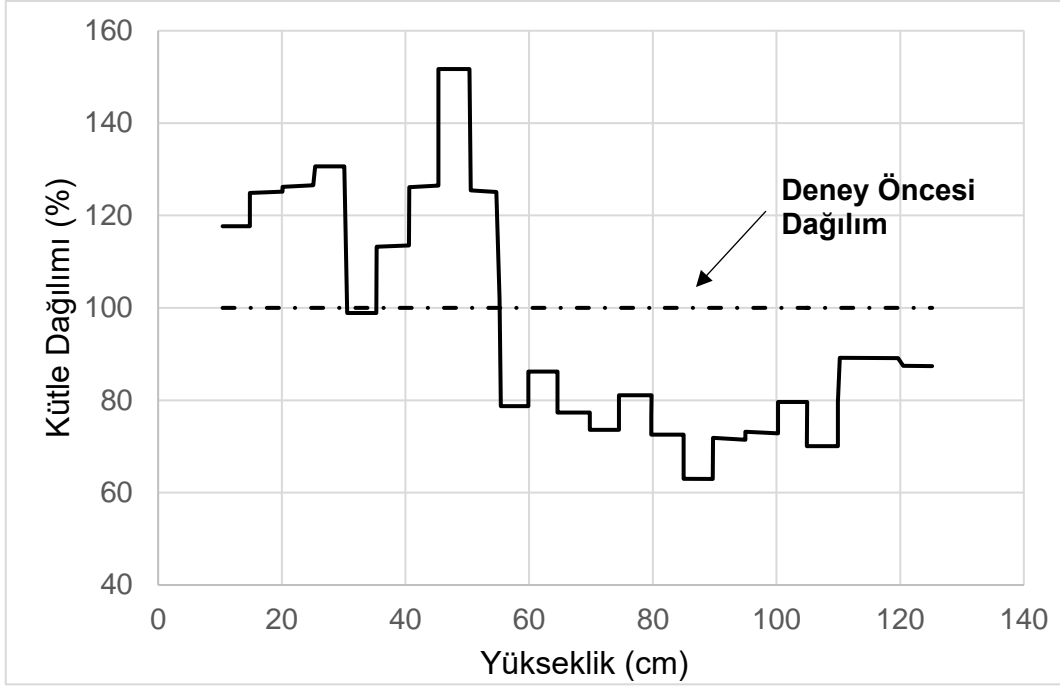
Oluşan hidrojenin 48%'i 4870. saniyeden sonra (su verme safhasının başlamasından sonra) üretilmiştir. Toplamda üretilen hidrojen 210 g ve oksitlenme enerjisi 31,9 Mj olarak hesaplanmıştır. Harcanan buhar oranı 21% olarak hesaplanmıştır [2].

#### 6.1.7 Deney Sonrası Kütle Dağılımı

**Şekil 6-10**'da deney öncesi ve sonrası demet içi kütle dağılımı oranlarında görüldüğü üzere deney öncesinde 100% olan kütle oranı, genel olarak 500 mm altında 50%'den daha fazladır. Bu üst yarısında eriyen malzemelerin demetin alt yarısında katılaştığını gösterir.

UO<sub>2</sub> ve Zirkonyum etkileşimi gerçekleşmiş, 848 mm'deki grid ara tutucu etkileşim sürecine girmiştir. Kısmi akış blokajı en fazla 498 mm'de tespit edilmiştir. Erimiş birçok malzemenin bu yükseklikte birikmesinin temel nedeni sıcaklığın katılaşmayı sağlayacak kadar düşük olmasıdır.





**Şekil 6-10** Demet İçi Eksenel Kütle Dağılımı [2]

### 6.1.8 Demetin Oksitlenmesi

Hafif sulu reaktörlerde, Zirkonyum oksitlenmesinden kaynaklı enerji, 1500 K civarında bozunma ısısına yakın değerlere ulaşır. 1800 K'de bu değer bozunma ısısının on katına çıkabilir [4].

148 mm yükseklikte ölçülen  $ZrO_2$  kalınlığı birkaç  $\mu m$ 'de kalmış, 248 mm yükseklikte  $100\mu m$ 'ye ulaşmış, 348 mm'de lokal olarak zarfın tamamen  $ZrO_2$ 'ye dönüştüğü tespit edilmiştir. Pilling-Bedworth faktörüne göre (1,5 – 1,56)  $725\mu m$  kalınlığındaki zarf  $1100\mu m$  kalınlığında  $ZrO_2$ 'ye dönüşebilmektedir [2].

Sıcaklık ve buhar oksitlenme olması için gerekli koşulları sağlayan kriterlerdendir. 1300 mm'de (ısıtılmayan yükseklikte) dahi metal kalıntıları kalmamıştır, bu nedenden eksik buhar beslemesi araştırma konusu olamaz [2].

**Çizelge 6-1**'de 448 mm yüksekliğe kadar alınan kalınlık ölçülerinin en düşük, ortalama ve en yüksek değerleri verilmiştir. 348 mm'de zarf malzemesinin tamamen oksitlenmeye başladığı ve daha yüksek konumlarda yıkıcı mekanizma devreye girdiği için değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır.

**Çizelge 6-1** Ölçülen ZrO<sub>2</sub> Kalınlıkları [2]

<b>Yükseklik (mm)</b>	<b>En Düşük (µm)</b>	<b>Ortalama (µm)</b>	<b>En yüksek (µm)</b>
148	8	16,3	24
248	25	63,2	120
348	130	520	1150
398	420	910	1150
448	650	1120	1150

ZrO<sub>2</sub> kalınlığı demet merkezinden köşeye doğru en yüksek değerine ulaşmaktadır. Ayrıca ZrO<sub>2</sub> kalınlığına etki eden sıcaklığın en fazla olduğu yer eriyen malzemenin verdiği ısı ve demetteki tıkanıklıkla ilişkilendirilebilir [2].

Kaplama ise 448 mm üstünde tamamen oksitlenmiş ya da parçalanmıştır. Kaplamanın dış yüzeyinde buharın olmaması nedeniyle oksit kalınlığı 50 ile 150 µm arasında kalmıştır. Bu tür durumlarda buhar tamamen harcanmıştır ve oksitlenme sıcaklıkla ilişkilendirilemez [2].

#### **6.1.9 Deney Sonrası İnceleme**

İncelemeler sonucu demetin üst yarısında soğurucu çubuklar ve zirkonyum kılavuz tüpleri ve zirkonyum zarf malzemesinin çoğu erimiştir. Eriyen malzemeler farklı katılma sıcaklıklarından dolayı farklı yüksekliklerde katılmıştır. Inconel ara tutucu sıvı ve katı malzemeler için yakalayıcı görevi görmüştür.

Deneyde eriyen metallerin türünü yüksekliklere göre sınıflandırma aşağıdaki gibidir:

- Üst bölümdeki yüksek sıcaklık nedeniyle malzemelerin buhar ile etkileşimi hızlı gerçekleşmiştir bunun sonucu olarak eriyen bütün malzemeler seramiktir. Büyük miktarda zirkonyum zarf ve UO<sub>2</sub> peleti yok olmuştur [2].
- 498 mm (inconel ara tutucularda) genel olarak katılmış seramik malzemeler bulunmaktadır. 400 mm altında, 1500 K üzerindeki soğurucu alaşımı gümüş, zirkonyum alaşımına temas ederek erimiştir [2].
- 400 mm altında genel olarak bütün erimiş malzemeler metaldir.

#### **6.1.10 Başlıca Sonuçlar**

Zirkonyum-Buhar reaksiyonu kaynaklı sıcaklık artışı 1400 K'de demetin sıcak (üst) bölümünde başlamış, reaksiyon yukarı ve aşağı doğru yayılmıştır. En yüksek

sıcaklıklar geçiş ve su verme safhasında 2100 K ve 2600 K'dir [2].

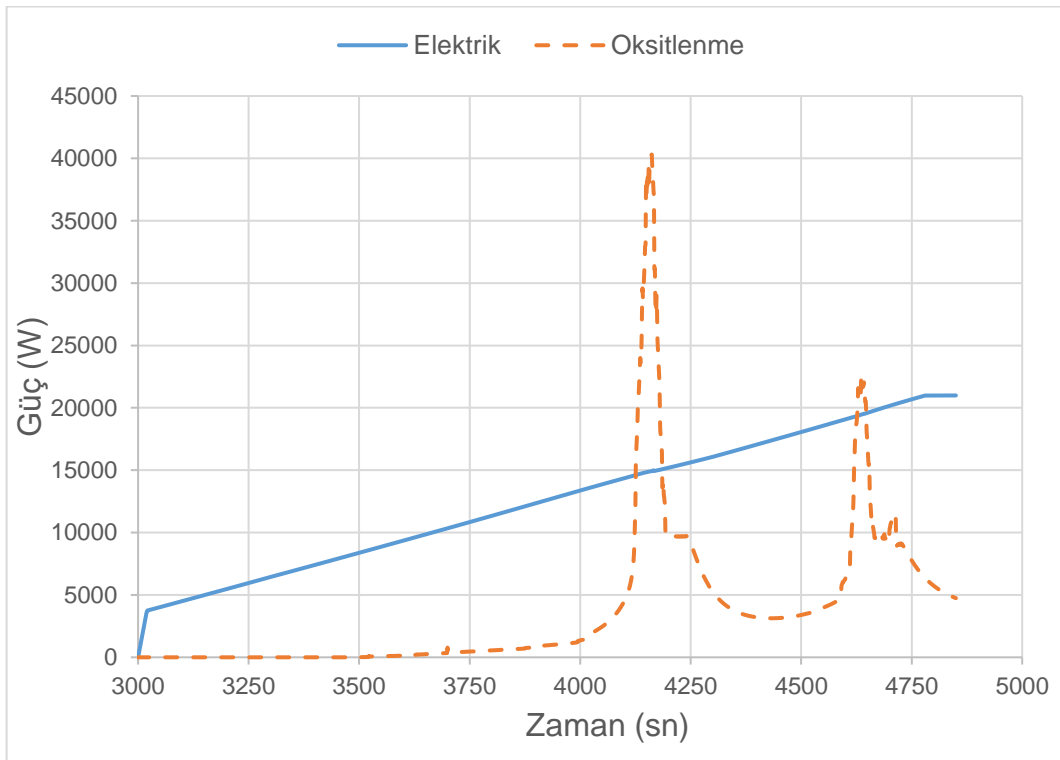
Bozulma süreci, soğurucu malzeme (Ag, In, Cd) eriğinin dağılması, yer değiştirmesi ve katılaşması ile başlar. Eriyik malzeme zirkonyum ile etkileşime girerek (Ag, In, Zr) eriğiğini oluşturur, bu erimiş malzeme ise içindeki zirkonyum nedeniyle  $UO_2$ 'yi eritebilir. Oksitlenmemiş zirkonyum zarfı yüksek sıcaklık nedeniyle ilk olarak demetin üst kısmında erir.

Kalın  $ZrO_2$  tabakası koruyucu tabaka görevi görerek metal zirkonyum erimesinin büyük oranda engeller. Oksitlenmemiş zirkonyum  $UO_2$  ve  $ZrO_2$  kabuğunu eriterek oksit tabakanın lokal olarak kırılmasına neden olur.

## 6.2 Benzeşim Sonuçları

### 6.2.1 Enerji Dengesi

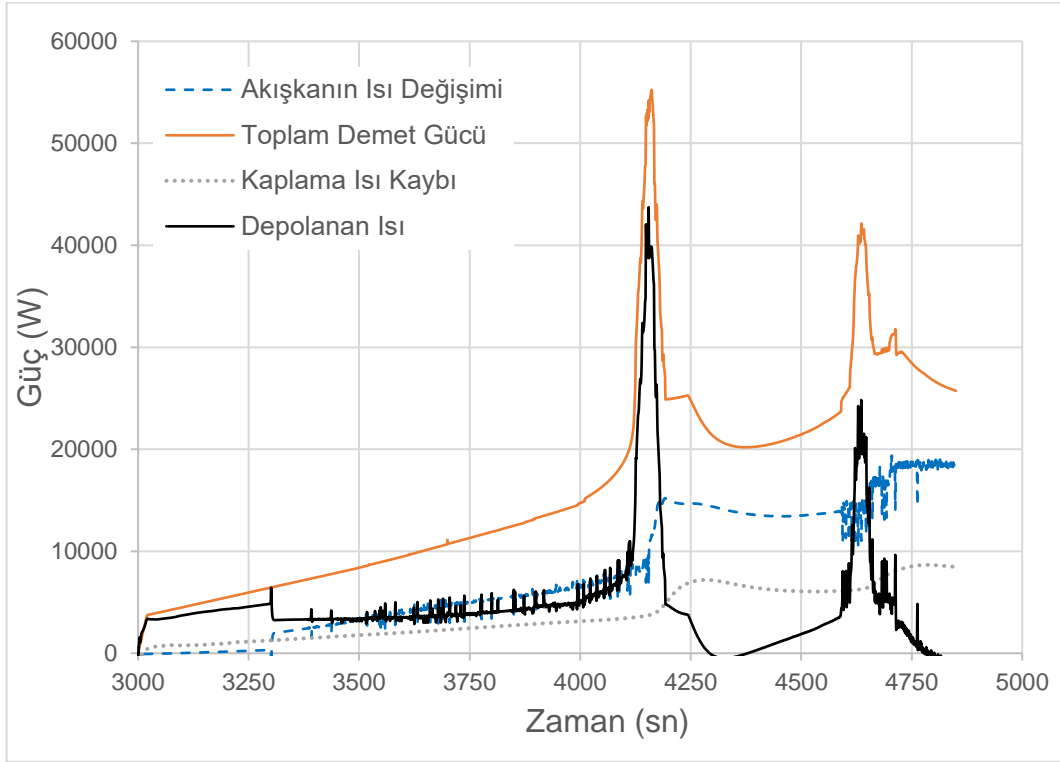
Enerji dengesi hesaplamalarında üretilen güç ile (elektrik + oksitlenme) kayıp ısı (kaplamadan kayıp, konveksiyon yolu ile kayıp) arasındaki farka kor malzemelerinde biriken enerji eşit olmalıdır. **Şekil 6-11**'de oksitlenmenin toplam güce ne kadar etki ettiği görülmektedir.



**Şekil 6-11** Elektrik ve Oksitlenme Isı Üretimi

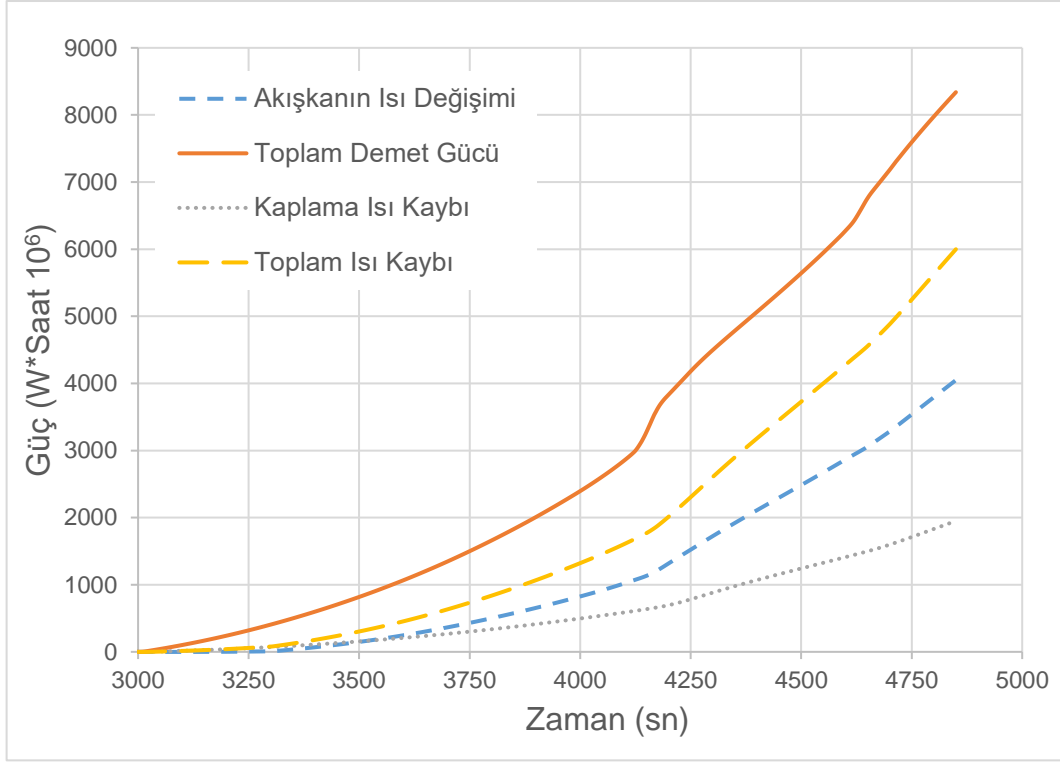
**Şekil 6-12**'de enerji dengesinde toplam demet gücünden kayıplar çıkarılarak depolanan enerji değeri elde edilmiştir. 4250. saniyeden sonra depolanan enerjinin

eksi değerlere düştüğünün görülmesi kaplamadan ısı kaybının fazla olduğuna işaret etmektedir.



**Şekil 6-12 Enerji Dengesi**

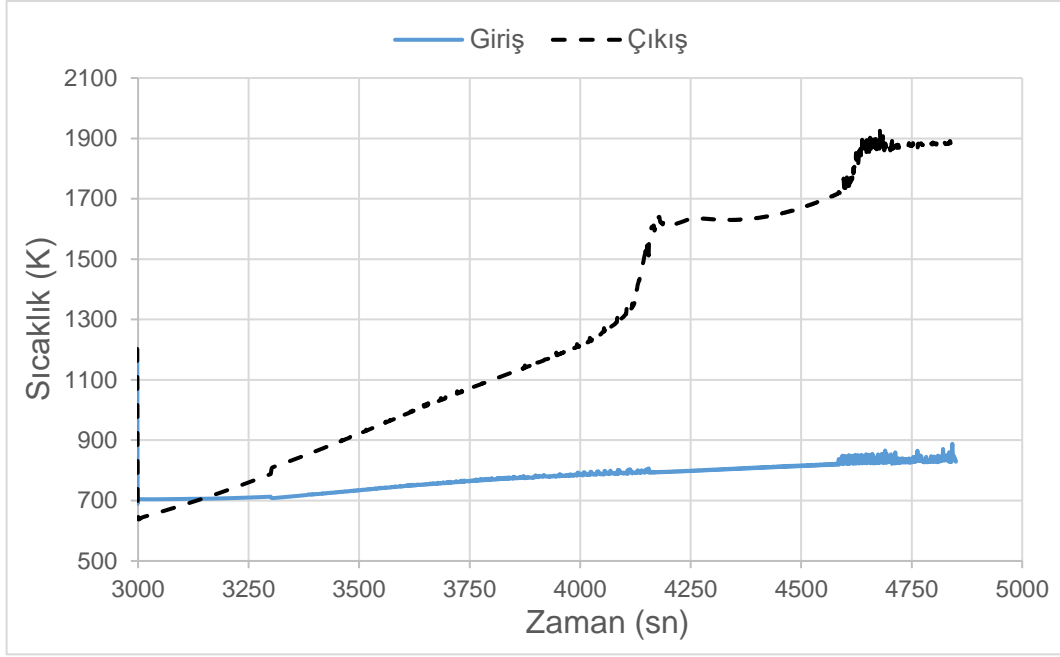
Akışkan yolu ile kaybedilen ısı demet girişi ve çıkışı arasındaki entalpi farkından elde edilmiştir. **Şekil 6-13** Kümülatif Enerji Dengesi verileri integral alınarak hesaplanmıştır. 4160. saniyedeki oksitlenme tepesi oluşumu güçteki artışın hızlanması şeklinde görülebilir. Toplam ısı üretimini, akışkan ve kaplamadan kaybedilen ısı izlemektedir.



**Şekil 6-13** Kümülatif Enerji Dengesi

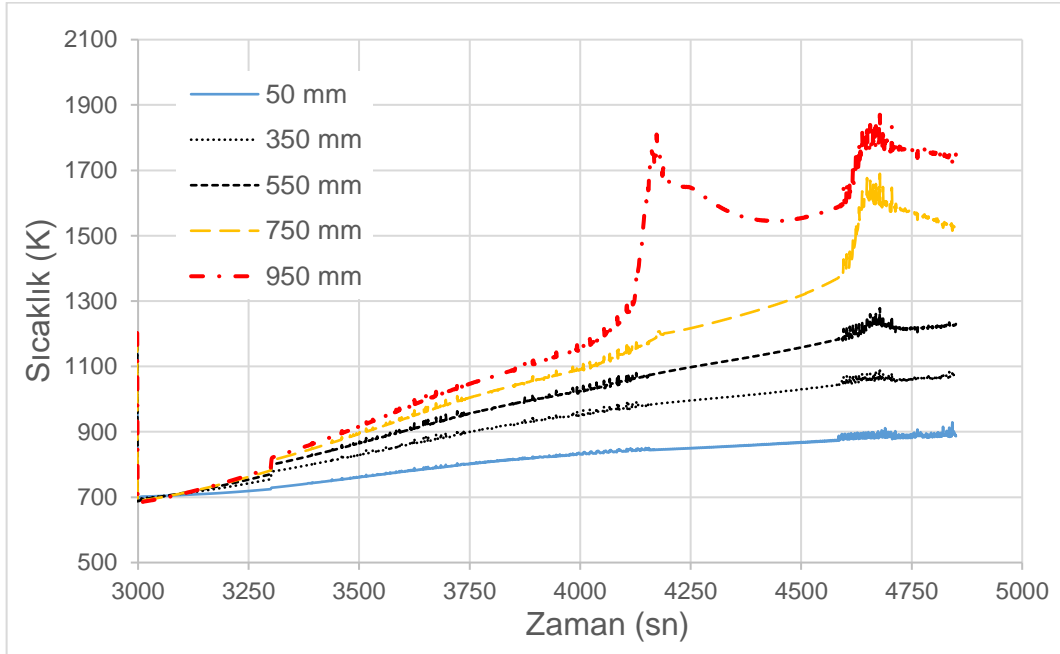
### 6.2.2 Akışkan Sıcaklığı

Demet giriş sıcaklığı, girdi verisi olduğu için deneysel veri ile aynı olmalıdır. Modelimizde buhar ve argon olmak üzere iki adet zamana bağımlı hacim buhar üreticine bağlanmıştır. **Şekil 6-14**'de görüldüğü üzere 3300. saniyede verilen buhar ile demet girişi sıcaklığı artış göstermiştir. Fakat başlangıç ve son sıcaklık değerleri deneysel verilerden daha düşüktür.



**Şekil 6-14** Demet Giriş ve Çıkış Sıcaklıkları

**Şekil 6-15**'te farklı yüksekliklerde ana kanaldaki buhar sıcaklıkları verilmiştir. 950 mm değerlerinde 4100. saniyeden sonra sıcaklıktaki artışın oksitlenme etkisiyle hızlandığı görülmektedir.

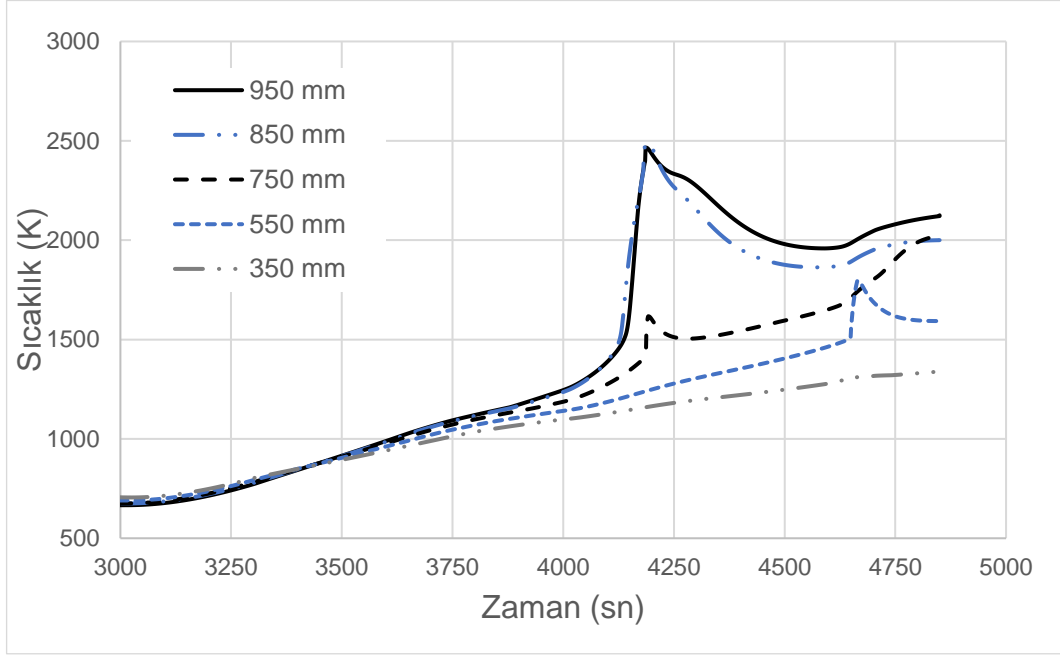


**Şekil 6-15** Ana Kanal Buhar Sıcaklıkları

### 6.2.3 Kaplama ve Demet Sıcaklıkları

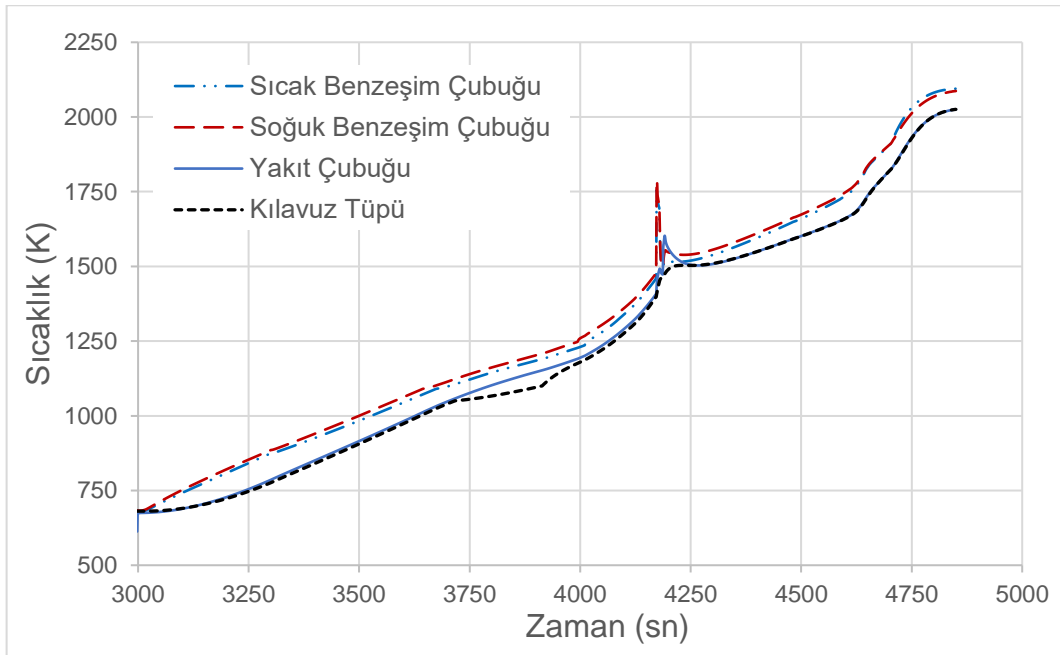
**Şekil 6-16**'da yakıt çubuğunda 650 mm'den sonrası sıcaklık artışında hızlanma görülmektedir. Demetin üst yarısında Buhar Zirkaloy reaksiyonu başlamış sıcak

bölge aşağı doğru yayılmıştır [12]. Hızlı sıcaklık artışından sonra kodun oksitlenmeyi limitleyen mekanizmaları devreye girmiştir.



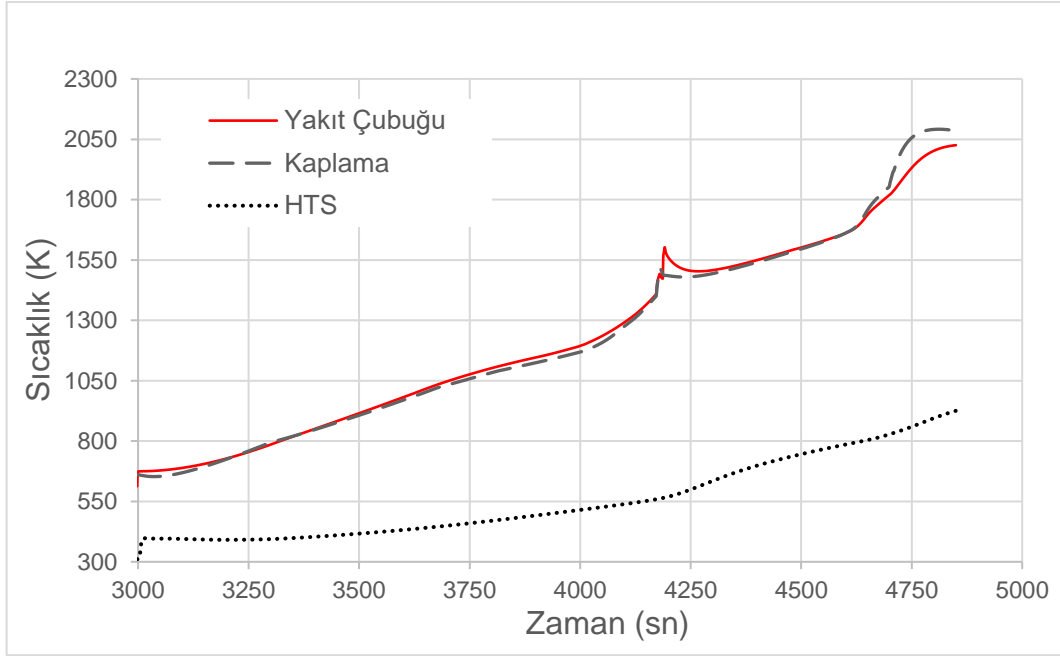
**Şekil 6-16** Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan Çubuk) Eksenel Sıcaklık Dağılımı

**Şekil 6-17** ve **Şekil 6-18**'de 750 mm yükseklikteki farklı bileşenlerin kılavuz tüpü, yakıt ve sıcak benzeşim çubuğu, kaplama ve yüksek sıcaklık zırhının (HTS) sıcaklıkları verilmiştir. En yüksek tepe sıcaklığına sıcak benzeşim çubuğu çıkmıştır. Yakıt ve Benzeşim çubuğu arasındaki sıcaklık farkı en fazla 125 K'dir.



**Şekil 6-17** Sabit Yükseklikte Bileşen Sıcaklıkları (750 mm yükseklik)

**Şekil 6-18**'de HTS sıcaklığının çok düşük hesaplanmış olması kaplamanın iyi yalıtım sağladığının göstergesidir. Fakat kaplama sıcaklığının ısıtılmayan yakıt çubuğuna yakın olması demete verilen gücün yeterli olmamasından kaynaklıdır. Kaplama ve HTS'deki sıcaklık artışı demete uyumlu şekilde ilerlemiştir.

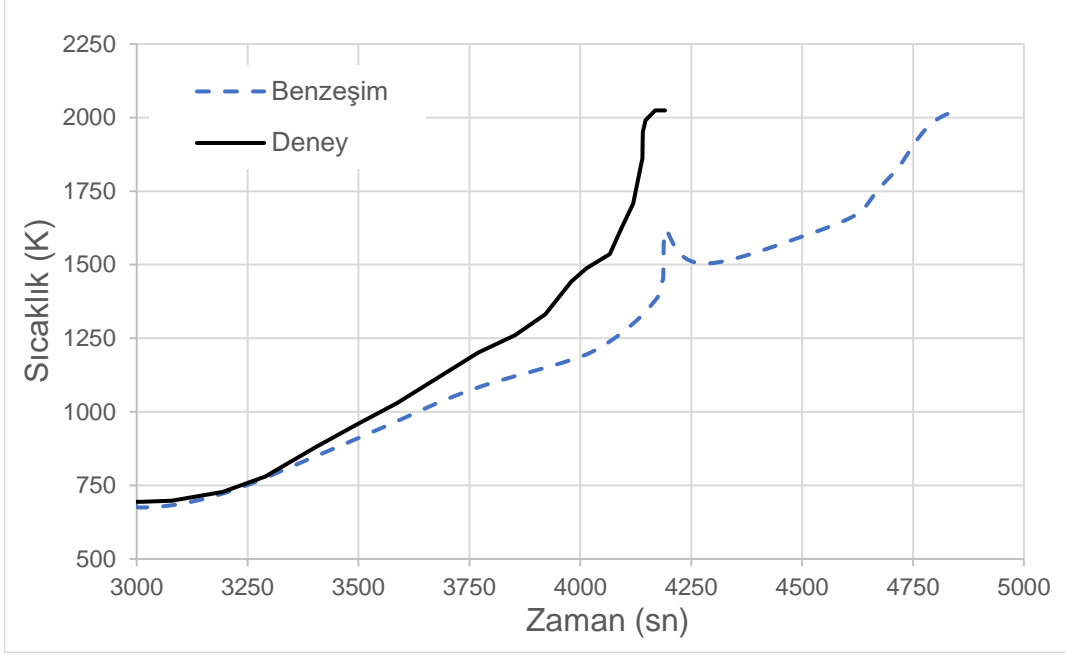


**Şekil 6-18** Kaplama ve HTS Sıcaklıkları (750 mm yükseklik)

### 6.3 Deney ve Benzeşim Sonuçlarının Karşılaştırılması

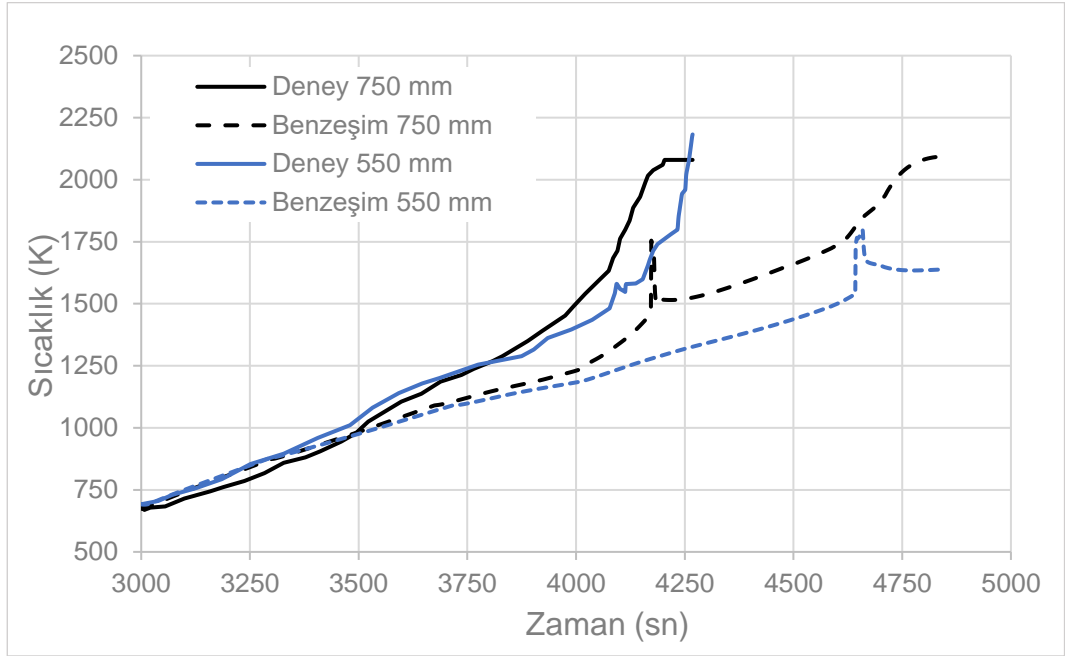
**Şekil 6-19**'da 750 mm yükseklikteki yakıt çubuğu sıcaklığını deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Deneyde 2000 K sıcaklıkta ısı ölçer bozulmuştur. 3200. saniye sonrası sıcaklık artışında hızlanma olmuş fakat benzeşimde sıcaklık geriden izlemektedir.





**Şekil 6-19** Yakıt Çubuğu (Isıtılmayan Çubuk) Sıcaklığı (750 mm yükseklik)

**Şekil 6-20**'de 4100. saniyeden sonra gerçekleşen sıcaklık artışındaki hızlanma kısa sürmüştür ve deney değerlerine yetişememiştir. Deneyde 3500. saniyede başlayan sıcaklık artışı hesaplamalarda bulunamamıştır.

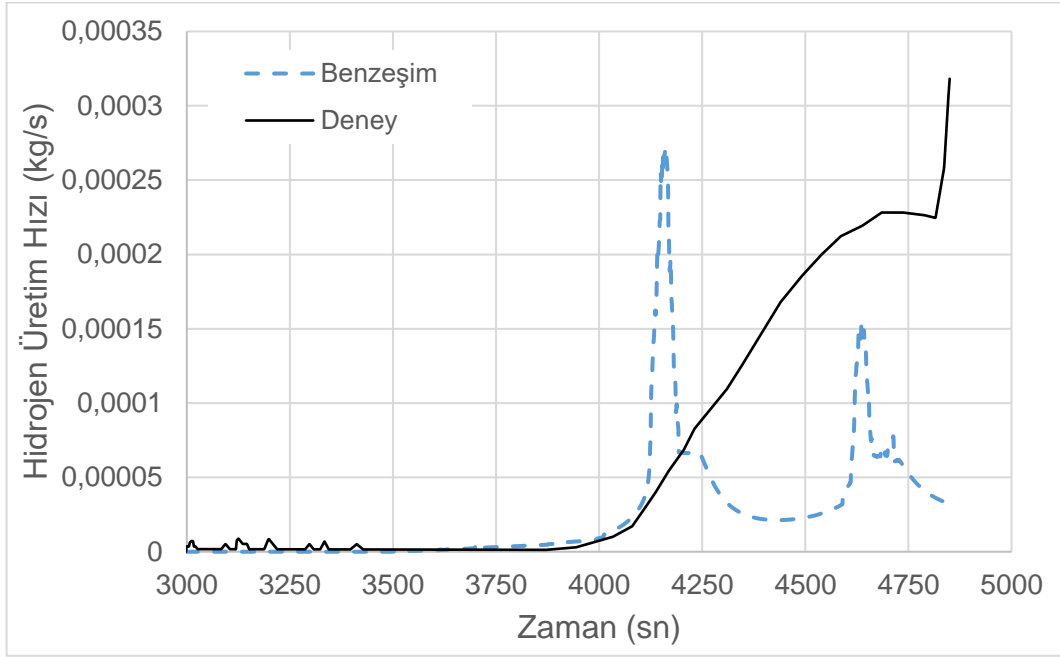


**Şekil 6-20** Benzeşim Çubuğu (Isıtılan Çubuk) Sıcaklığı (750 mm ve 550 mm yükseklik)

### 6.3.1 Hidrojen Üretimi

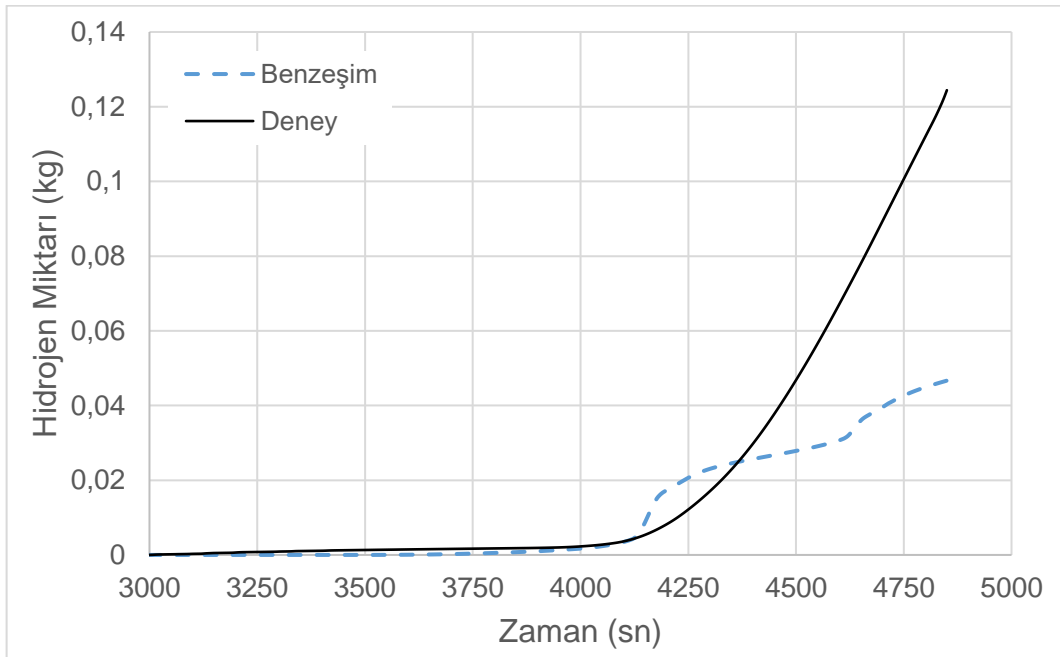
**Şekil 6-21**'de hidrojen oluşumunun 4100. saniyeye kadar deney sonuçları ile

uyumlu olduğu görülmektedir. Hızlı hidrojen üretimi tepe yaparak en yüksek değerine erken ulaşmış ve tekrar düşüşe geçmiştir.



**Şekil 6-21** Hidrojen Oluşum Hızı

**Şekil 6-22**'de 4160. saniyede deneye göre daha hızlı gerçekleşen hidrojen üretimi azalmaya başlamıştır. Benzeşimde, deneye göre sıcaklık değerlerinin düşük seyretmesi hidrojen üretim hızını azaltan temel parametredir.



**Şekil 6-22** Kümülatif Hidrojen Miktarı

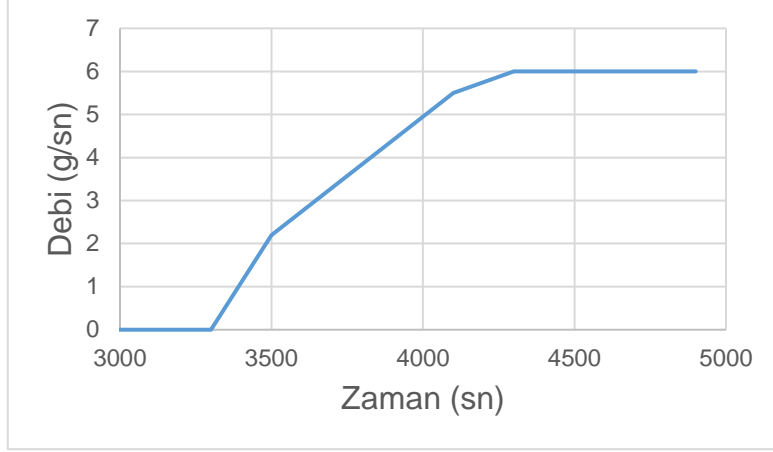
#### 6.4 Hassasiyet Analizi

Farklı modeller üzerinde çalışırken seçilen parametrelerin hidrojen oluşumuna ve yakıt çubuğu sıcaklığına olan etkileri değerlendirilmiştir. Buna göre öncelikli olarak oksit kabuk kararlılığı kartındaki değerleri varsayılan değerlere getirilmiştir. Çevresel boyut değişikliği eşiğinin 0,14'ten 0,07'ye indirilmesi kırılma gerçekleşmiş zarfta çift taraflı oksitlenmenin daha çabuk başlamasına neden olmuştur. Oksit kabuk hasar sıcaklığı ise oksitlenmenin duracağı sıcaklık olduğu için hidrojen üretimine ve tepe sıcaklığını sınırlayıcı etki yapar. Daha sonra bu değerleri koruyarak zarf deformasyonu kartındaki değerler değiştirilerek modelleme yapılmıştır. Değiştirilen değerler **Çizelge 6-2**'de gösterilmektedir.

**Çizelge 6-2** Hassasiyet Analizi Modelleri

Oksit Kabuk Kararlılığı	Baz Model	Oksit Kabuk Kararlılığı Modeli	Zarf Deformasyon Modeli
Oksit kabuk hasar sıcaklığı	2500 K (varsayılan)	2400 K	2400 K
Zarf oksitlenme oranı	0,60 (varsayılan)	0,60 (varsayılan)	0,60 (varsayılan)
Çevresel boyut değişikliği eşiği	0,14	0,07 (varsayılan)	0,07 (varsayılan)
<b>Zarf Deformasyonu</b>			
Kırılma gerinimi	0,18 (varsayılan)	0,18 (varsayılan)	0,18 (varsayılan)
Geçiş gerinimi	0,15	0,15	0,20 (varsayılan)
Gerinim limiti	0,248	0,248	0,248
Basınç düşümü etiketi	0	0	0

Baz modelde demete verilen buhar debisi **Şekil 4-2**'de gösterildiği gibi 3300. saniyede aniden 6 g/sn ye çıkar. Fakat deney raporunda buharın **Şekil 6-23**'teki gibi gecikmeli şekilde verildiği belirtilmiştir. Buhar debisindeki gecikme karşılaştırma yapılan diğer kod ve modellerde de tanımlanmıştır. Sınır koşulundaki bu değişim buhar debisi modeli olarak isimlendirilmiştir.



**Şekil 6-23** Demete Verilen Buhar

#### 6.4.1 Baz Model

Korda ilk bozunma zarf malzemesinin 4162. saniyede akmasıyla başlamıştır. Sıcak Benzeşim Çubuğunun 10. düğümde eriyen zarfın sıcaklığı 2500 K'dir. Modelde 0,04666 kg hidrojen oluştuğu tespit edilmiştir.

#### 6.4.2 Oksit Kabuk Kararlılığı Modeli

Korda ilk bozunma zarf malzemesinin 4159. saniyede akmasıyla başlamıştır. Sıcak Benzeşim Çubuğunun 10. düğümde eriyen zarfın sıcaklığı 2400,1 K dir. Modelde 0,07522 kg hidrojen oluştuğu tespit edilmiştir.

#### 6.4.3 Zarf Deformasyon Modeli

Korda ilk bozunma zarf malzemesinin 4126. saniyede akmasıyla başlamıştır. Sıcak Benzeşim Çubuğunun 10. düğümde eriyen zarfın sıcaklığı 2400,1 K dir. Modelde 0,0824 kg hidrojen oluştuğu tespit edilmiştir.

Genel olarak kordaki bozunma 950 mm'de başlayıp aşağı doğru yayılmıştır.

#### 6.4.4 Buhar Debisi Modeli

Modelde sınır koşulu olarak demete gecikmeli buhar verilmiştir. SCDAP parametrelerinden çevresel boyut değişikliği eşiği 0,014'ten 0,07'ye düşürülmüş ve oksit kabuk hasar sıcaklığı 2600 K'e çıkarılmıştır. Hidrojen üretim miktarı 0,0926 kg ile deney verilerine en yakın değer elde edilmiştir. İlk erime 4080. saniyede Sıcak Benzeşim Çubuğunun 10. düğümünde gerçekleşmiştir.

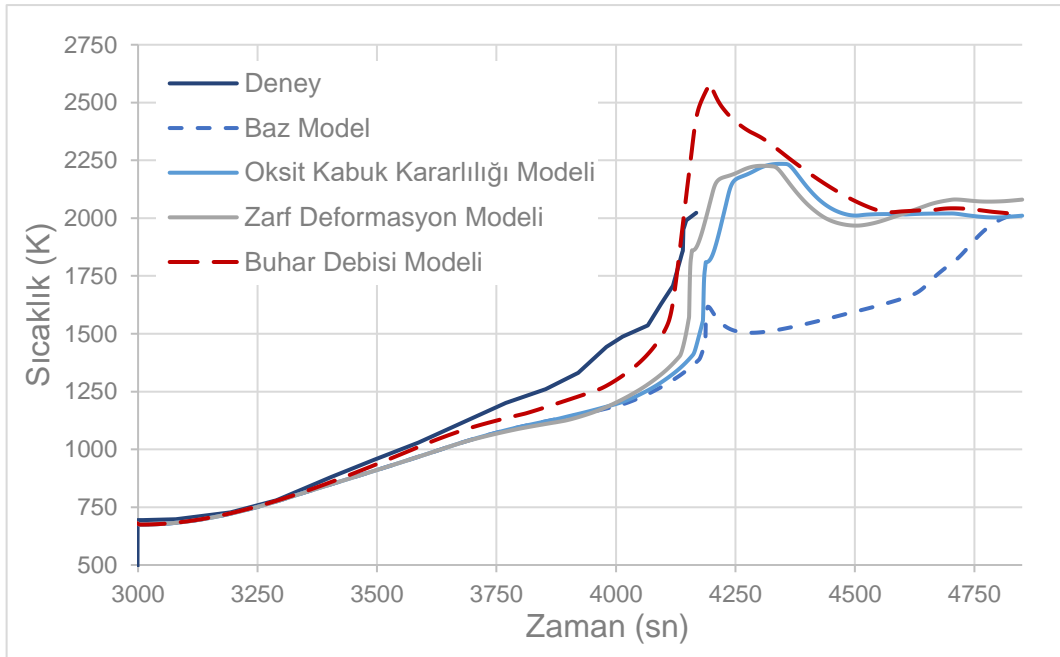
#### 6.4.5 Modellerin Karşılaştırılması

Modellerin karşılaştırmaları **Şekil 6-24** ve **Şekil 6-25**'teki ısıtılmayan çubuk sıcaklıkları ve kümülatif hidrojen miktarları yardımı ile yapılmıştır.

Buhar debisi modelinde diğer modellere oranla daha fazla ısı üretilip depolanmıştır. **Şekil 6-24**'te Buhar Debisi Modelinde kabuk ( $ZrO_2$ ) hasar sıcaklığının 2600 K'e artırılması demet sıcaklığının 2600 K'e kadar çıkmasını ve bu sıcaklığa kadar kabuğun oksitlenmeye devam etmesini sağlamıştır. Elde edilen sıcaklık değerleri deney verileriyle oldukça uyumludur. Buhar debisinin gecikmeli verilmesi demette oksitlemenin hızlanması için gerekli sıcaklık olan 1273 K'e daha çabuk ulaşılmasını sağlamıştır.

Oksit kabuk kararlılığı modelinde çift taraflı oksitlenmenin erken başlaması sıcaklık artışını hızlandırırken 2400 K'lik oksit kabuk kararlılığı sınırlaması 750 mm yükseklikteki maksimum sıcaklığı 2250 K'de sınırlandırmıştır.

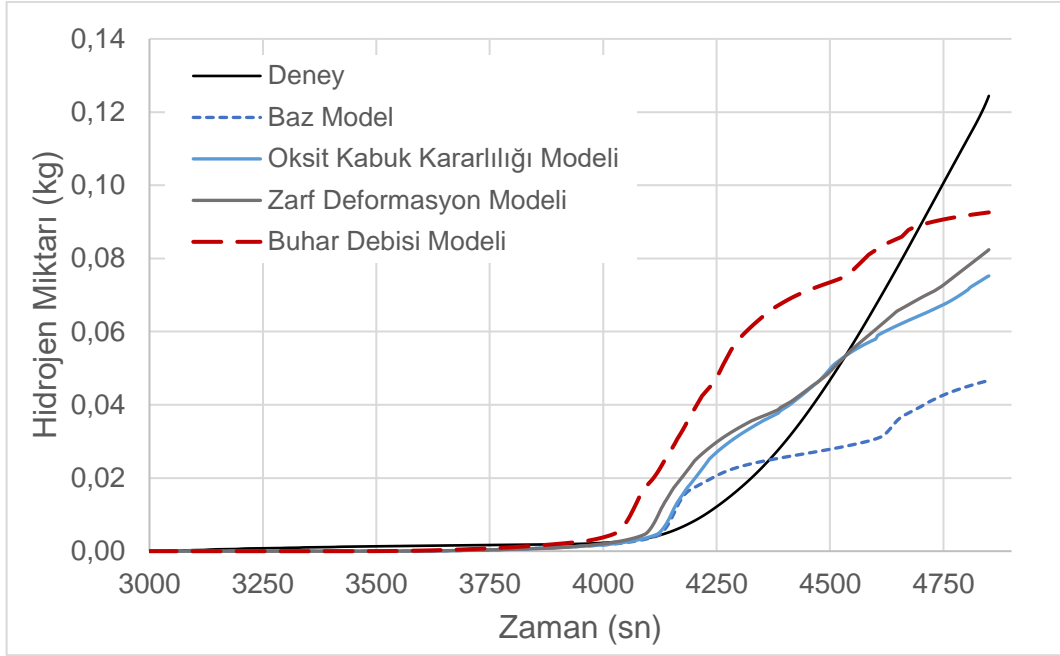
Zarf deformasyon modelinde yapılan geçiş gerinimi değerinin artırılması sosis tipi deformasyonun devam etmesini sağlamış. Zarf çapının artması oksitlenen yüzeyde artışa bu da hidrojen üretimine ve oksitlenme kaynaklı ısı artışına yol açmıştır.



**Şekil 6-24** Yakıt Çubuğu Sıcaklığı (750 mm yükseklik)

**Şekil 6-25**'te deney ölçümlerinde 4850. saniyeye kadar 0,124 kg hidrojen oluştuğu saptanmıştır. Oksit kabuk kararlılığı ve zarf deformasyon modellerinde değiştirilen parametreler sadece yüksek sıcaklıklarda hesaplamalara etkidiği için 1200 K sonrasında etkisini göstermiş, oksitlenmenin başladığı zamana buhar debisi modeli kadar etki etmemiştir.

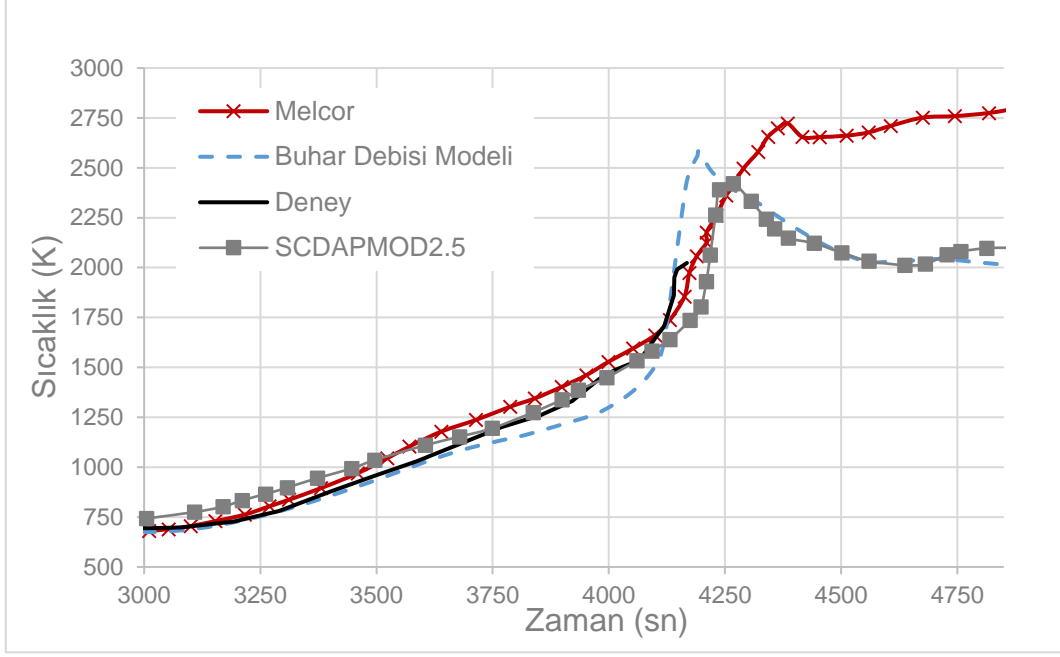
Çevresel boyut değışikliği eşiğinin 0,07 değeri ne dűřürűlmesi zarfta çift taraflı oksitlenmeyi öne çekerek, hidrojen miktarında artış sağlamıştış. Buhar debisi modelinde yüksek sıcaklık oksitlenmesinin ve çift taraflı oksitlenmenin erken başlaması daha fazla hidrojen oluşumu hesaplanmasını sağlamıştış.



**Şekil 6-25** Kümülatif Hidrojen Miktarı

### 6.5 Diğer Kodlar ile Karşılaştışma

Karşılaştışma için deney sonuçlarına en uyumlu model olan buhar debisi modeli kullanılmıştış. Karşılaştışmalarda kullanılan kodlardan Melcor modelimize göre yüksek sıcaklık değeri ve deney verilerine göre yüksek miktarda hidrojen miktarı hesaplanmıştır. Melcor hesaplamasında demet giriş sıcaklığı ve demete verilen güç, deney sınır koşullarına oldukça uyumlu olduğu için yakıt çubuğu sıcaklığını tutarlı bir şekilde hesaplamıştış.



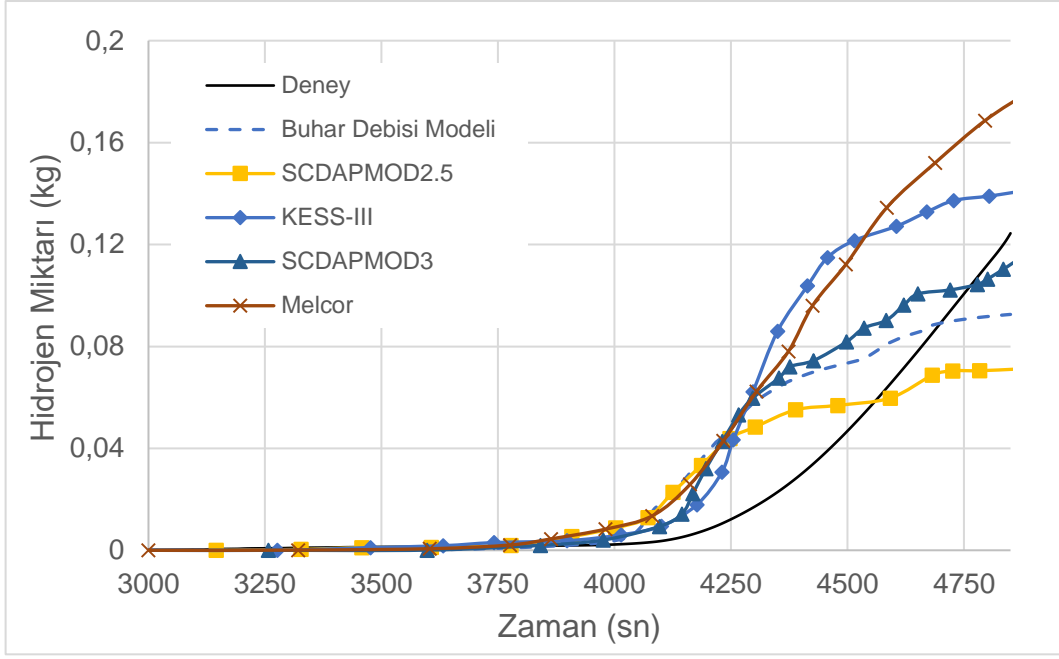
**Şekil 6-26** Yakıt Çubuğu Sıcaklığı Karşılaştırması (750 mm yükseklik)

Genel olarak bütün kodların hidrojen üretim hesabı sonuçları aynı eğilimdedir (**Şekil 6-27**).

SCDAP/MOD3 modeli hesaplamalarının deney sonuçlarına daha uyumlu olması gözlem pencerelerinin modellenmesi ve oksit kabuk hasarı sıcaklığı parametresini 2600 K olarak tanımlamasından kaynaklıdır.

SCDAPMOD2.5 modelinde buhar debisi gecikmeli verilmemiş ve hidrojen miktarı az hesaplanmıştır.

KESS-III kodunda zirkaloy ve ara tutucular arasında kimyasal reaksiyon modellenmediği için oksitlenme devam etmiş ve yüksek miktarda hidrojen üretimi hesaplanmıştır.



**Şekil 6-27** Kümülatif Hidrojen Miktarı



## 7 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

ISP-31'in temel amacı, kor degradasyonu ve fizyon ürünlerinin davranışlarını modelleyen ağır kaza kodlarının test edilmesini sağlamaktır. Cora deneyleri sonucu su vererek ve su vermeden bitirilen olmak üzere ikiye ayrılabilir. Cora-13 deneyinde ilk safhada demet hasar verilene kadar ısıtılmış, ardından su verme işlemi uygulanmıştır. Isınma ve su verme işlemleri arasında soğuyacak fırsat bulamayan demet yüksek sıcaklıklara çıkmıştır.

Cora-13 Deneyi RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 bilgisayar kodu ile modellenmiştir. INEL tarafından oluşturulan model Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği'nden alınmıştır. Sınır koşulları ve demet yapısı model içinde genel olarak deney düzeneğine uygun şekilde tanımlanmıştır. Sıcaklık ölçerlerin su verme işlemi öncesi bozulmasından dolayı modellemelere su verme safhası dahil edilmemiştir.

Modelin SCDAP kısmında yakıt, benzeşim, kontrol çubukları, kaplama ve yüksek sıcaklık zırhı modellenmiştir. SCDAP bileşenlerinin her biri 10 eksenel düğümünden meydana gelmektedir. Yakıt ve benzeşim çubukları 6'şar, kontrol çubukları beş, kaplama ve yüksek sıcaklık zırhı ise 17'şer radyal düğümünden meydana gelmiştir. Kaplamanın bazı radyal katmanlarının termodinamik özellikleri malzeme tablosu yardımıyla tanımlanmıştır.

Baz modelde iki taraflı oksitlemeyi sınırlandırmak amacıyla çevresel boyut değişikliği eşik değeri 0,14 olarak, demetin maksimum sıcaklığını ve oksitlenme miktarını etkileyen oksit kabuk hasar sıcaklığı 2500 K olarak tanımlanmıştır. Bunun yanında sosis tipi deformasyonundan lokal deformasyona geçiş için limit olarak verilen geçiş gerinimi 0,15 olarak tanımlanmıştır.

SCDAP parametreleri 1250 K üstündeki oksitlenme hesaplamalarına etkiyerek sonuçlarda bir miktar düzelme sağlamıştır fakat 1250 K altı sıcaklıklarda sınır koşullarında değişikliğe gitmek gerekmektedir. Bu sebeple demete gecikmeli verilen buhar, akışkan kaynaklı ısı kaybını azaltarak demetin daha çabuk ısınmasını sağlanmıştır ve ölçüm değerlerine daha uygun şekilde hesaplama sonuçları elde edilmiştir. Fakat hesaplama diğer kodlarla karşılaştırıldığında 1000 K üzerindeki sıcaklıklarda yeterli hassasiyette sonuç hesaplanamamıştır.

Oksitlenme temel olarak demet sıcaklığına bağlıdır. Hesaplamalarda demetin

yeterli sıcaklığa çıkamaması oksitlenme hızını olumsuz şekilde etkilemiştir. Demet sıcaklığının düşük seyretmesi ışınımlı ısı aktarımı yolu ile ısı kaybının fazla olmasından kaynaklanabilir. Kodda farklı oksitlenme modelleri denenmesi ve ışınımlı ısı aktarımı modeli üzerine çalışılması hesaplama sonuçlarını iyileştirebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] E. W. Coryell *et al.*, *SCDAP/RELAP5 Interface Theory*, vol. I, no. NUREG/CR-6150, INEL-96/0422. **1997**.
- [2] S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, G. Schanz, G. Schumacher, and L. Sepold, *Results of SFD Experiment CORA-13 (OECD International Standard Problem 31)*, **1993**.
- [3] S. Hagen, P. Hofmann, V. Noack, L. Sepold, G. Schanz, and G. Schumacher, *Comparison of the Quench Experiments CORA-12, CORA-13, CORA-17*, **1996**.
- [4] B. R. Sehgal, *Nuclear Safety in Light Water Reactors*. Academic Press, **2012**.
- [5] M. Firnhaber, K. Trambuer, S. Hagel, and P. Hofmann, *ISP-31 Cora-13 Experiment on Severe Fuel Damage Comparison Report*, **1993**.
- [6] J. Wang *et al.*, Comparison of Hydrogen Generation Rate between CORA-13 Test and MELCOR Simulation: Clad Solid-Phase Oxidation Models Using Self-Developed Code MYCOAC, *Nuclear Technology*, vol. 192, no. 1, 25–34, **2015**.
- [7] J. K. Hohorst and C. M. Allison, “Analysis of the Oecd-Loft Standard Problem using SCDAP / RELAP5 / MOD3,” p. 30, **1992**.
- [8] V. F. Urbanic and T. R. Heidrick, High-Temperature Oxidation of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 in Steam, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 75, pp. 251–261, **1978**.
- [9] E. . Coryell *et al.*, *SCDAP/RELAP5 Damage Progression Model Theory*, vol. 2, no. NUREG/CR-6150, INEL-96/0422. **1997**.
- [10] H. J., *RELAP/SCDAPSIM Input Manual*. **2012**.
- [11] E. W. Coryell *et al.*, *SCDAP/RELAP5 Development Assessment*, vol. 5, no. NUREG/CR-6150, INEL-96/0422. **1997**.
- [12] G. Schanz, S. Hagen, P. Hofmann, G. Schumacher, and L. Sepold, Information on the evolution of severe LWR fuel element damage obtained in the CORA program, *Journal of Nuclear Materials* , vol. 188, no. C, pp. 131–145, **1992**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ahmet Arif ÖZLER

Doğum Yeri : Tunceli

Medeni Hali : Bekar

E-posta : [arifozler@gmail.com](mailto:arifozler@gmail.com)

Adresi : Çamlık Mah. 416. Sokak No:8/5 Didim AYDIN

### Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (YDS: 81,25)

### İş Deneyimi

2014-2015 : Dokay Mühendislik, Nükleer Enerji Mühendisi

### Deneyim Alanları

RELAP/SCDAPSIM, Makine Öğrenmesi, ASP.Net MVC, Angular, Octave, ASP.Net Core, MSSql.

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar



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

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

Tarih:19/10/2018

Tez Başlığı / Konusu: RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 KODU KULLANILARAK ULUSLARARASI STANDARTLAŞTIRMA PROBLEMİ ISP NO.31'İN ANALİZİ (ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARD PROBLEM ISP NO.31 BY USING RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 COMPUTER CODE)

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 68 sayfalık kısmına ilişkin, 19/10/2018 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça dahil
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

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

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza 19.10.2018

Adı Soyadı: Ahmet Arif Özler

Öğrenci No: N10124474

Anabilim Dalı: Nükleer Enerji Mühendisliği

Programı: Nükleer Enerji Mühendisliği

Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Şule Ergün

(Unvan, Ad Soyad, İmza)