

**COBRA-TF YAZILIMI İLE SOĞUTUCU KAYBI
KAZASINDA AKIŞIN YENİDEN SAĞLANMASI FAZININ
MODELLENMESİ VE MODEL BELİRSİZLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**COBRA-TF SOFTWARE MODELLING OF REFLOOD
PHASE IN LOSS OF COOLANT ACCIDENT AND
INVESTIGATION OF MODEL UNCERTAINTIES**

REFİK KARAGÖZ

DOÇ. DR ŞULE ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

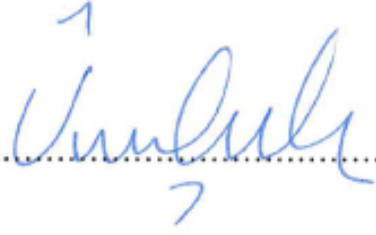
Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

REFİK KARAGÖZ'ün hazırladığı “COBRA-TF Yazılımı İle Soğutucu Kaybı Kazasında Akışın Yeniden Sağlanması Fazının Modellenmesi ve Model Belirsizliklerinin İncelenmesi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Üner ÇOLAK

Başkan



Doç. Dr. Şule ERGÜN

Danışman



Prof. Dr. C. Niyazi SÖKMEN

Üye



Prof. Dr. Ayhan YILMAZER

Üye



Prof. Dr. İlker TARI

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak / /2019 tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Aileme...

Doktor oldum bendeniz,

Hasta sağlam geliniz,

Vizitem çok ucuzdur,

Bin lira veriniz.

(Meslekler müsameresi, Bolu Atatürk İlkokulu, 1985)

ETİK

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

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

beyan ederim.

22 / 05/ 2019



REFİK KARAGÖZ

YAYINLANMA 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 kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak 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 haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

22 / 05 /2019



REFİK KARAGÖZ

ÖZET

COBRA-TF YAZILIMI İLE SOĞUTUCU KAYBI KAZASINDA AKIŞIN YENİDEN SAĞLANMASI FAZININ MODELLENMESİ VE MODEL BELİRSİZLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Refik KARAGÖZ

Doktora, Nükleer Enerji Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERGÜN

Nisan 2019, 123 sayfa

En-iyi tahmin yazılımları nükleer enerji alanında güvenlik, analiz, lisanslama ve araştırma-geliştirme konularında sıklıkla kullanılan düşük maliyetli, hızlı ve güvenilir araçlardır. Endüstri, üniversiteler ve resmi kurumlar tarafından kabul gören bu yazılımlar ile gerçek sistemleri temsilen yapılan modellemelerin farklı şartlarda gerçekleştirilen ve geniş çerçeveli deneysel bulgularla karşılaştırılarak doğrulanması önem arz etmektedir. Dolayısıyla en-iyi tahmin yazılımlarının çözüm yöntemlerini iyileştirecek, performanslarını ve deneysel veri karşısındaki tutarlılıklarını artıracak değişikliklerin yapılması, bünyesinde çalışarak fiziksel olayların tahmin edilmesinde kullanılan ve bilim çevrelerince her geçen gün iyileştirilen veya yenilenen modellerin de uyarlanması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında çeşitli termal-hidrolik analizlerde sıkça kullanılan COBRA-TF (COolant Boiling in Rod Arrays-Two Fluid) yazılımı ile Basınçlı Su Reaktörlerinde (BSR) Soğutucu Kaybı Kazası (SKK) esnasında meydana gelen Akışın Yeniden Sağlanması (AYS) fazı incelenmiş ve önemli güvenlik ölçütlerinden yakıt yüzeyi sıcaklık davranışının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. COBRA-TF yazılımının AYS modellerine ait zayıflıkların tespit edilmesi, bu zayıflıklara sebep olan bileşenlerin

ortaya çıkarılması, düzeltici ve iyileştirici modellerin yazılıma uygulanarak FLECHT-SEASET (Full Length Emergency Core Heat Transfer-System Effects and Separate Effects Tests) ve RBHT (Rod Bundle Heat Transfer) deneyleri karşısında daha iyi sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir.

Yapılan çalışmada COBRA-TF yazılımının ısı transferi davranışını bütünüyle etkileyecek öneme sahip Minimum Film Kaynama Sıcaklığı (T_{min}) modeli ile hesaplanan değerlerin deneysel veri ile tutarsız olduğu ve elde edilen sonuçların ise buna göre olumsuz bir şekilde etkilendiği tespit edilmiştir. Daha gelişmiş bir modelin uygulanması ile T_{min} değerleri ve yakıt sıcaklık değerlerinde ve davranışında iyileşme sağlanmıştır. Bu değişiklikten sonra yapılan analizler neticesinde orijinal COBRA-TF yazılımında çalışmakta olan dairesel akış rejiminde film tabakasından ve soğutma suyu yüzeyinden damlacık ayrılma modellerinin de bazı deneysel şartları tahmin etmekte zorlandığı anlaşılmıştır. Bu sebeple mevcut damlacık ayrılma modellerine farklı modeller de eklenerek COBRA-TF yazılımına ayrı ayrı uygulanmıştır. Yeni sürüm COBRA-TF tahminleri ile FLECHT-SEASET ve RBHT'nin çeşitli deney verileri ile karşılaştırılmış, önemli ölçüde iyileştirilen sonuçlar yakıt ıslanma, yakıt yüzeyi sıcaklığı ve buhar sıcaklığı bazında sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: COBRA-TF, Minimum Film Kaynama Sıcaklığı, Film Damlacık Ayrılma Modeli, Soğutma Suyu Yüzeyinden Damlacık Ayrılma Modeli, FLECHT-SEASET ve RBHT Deneyleri.

ABSTRACT

MODELLING OF REFLOOD PHASE OF A LOSS OF COOLANT ACCIDENT WITH COBRA-TF CODE AND ANALYSIS OF MODEL UNCERTAINTIES

Refik KARAGÖZ

Doctor of Philosophy, Nuclear Energy Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şule ERGÜN

April 2019, 123 pages

Best estimate codes used in the safety analysis, licensing, research and development fields frequently are cost efficient, quick and reliable tools. For these codes which are widely used by the industry, universities and public institutions, it is very important to validate the physical models against experimental data which are obtained for wide range of conditions. Therefore, the modifications which improve solution methods, increase the accuracy in code predictions and performance are required by developing new models and adapting them to the codes.

In this dissertation, reflow phase of postulated Loss of Coolant Accident in Pressurized Water Reactors is analyzed and modifications were performed to analyze the maximum clad temperature behaviour, one of the most important safety criterion. After specifying

weaknesses of reflood models in COBRA-TF and underlying components causing them and applying corrective and improving models to the code it is aimed to obtain better results with respect to FLECHT-SEASET (Full Length Emergency Core Heat Transfer-System Effects and Separate Effects Tests) and RBHT (Rod Bundle Heat Transfer) experimental data.

In the study, it is observed that COBRA-TF calculates the Minimum Film Boiling Temperature (T_{min}) inconsistently when it's compared with the experimental data. Since T_{min} model affects the heat transfer behaviour completely, applying a more advanced T_{min} model, better code results and consistent fuel temperature behaviour were obtained. As the results of the analysis carried out after this modification, it is observed that the film entrainment in annular film flow and quench front entrainment generated on cooling fluid surface models existing in COBRA-TF have weaknesses on estimating some experimental conditions. Therefore, adding different models to available entrainment calculation had been applied to COBRA-TF code, additionally. The results of using new models, FLECHT SEASET and RBHT experimental data were compared, and significantly modified results were obtained in calculating quench front, fuel clad temperature and vapor temperature.

Keywords: COBRA-TF, Minimum Film Boiling Temperature, film entrainment model, quench front model, FLECHT SEASET, RBHT Experiments.

TEŞEKKÜR

Doktora tez sürecinde tüm katkılarından ama ondan daha önemlisi teşviklerinden dolayı en özel teşekkürüm kıymetli Doç. Dr. Şule ERGÜN Hocama... Tez döneminde ki yönlendirmelerinden ve katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Üner ÇOLAK ve Sayın Prof. Dr. Cemil KOÇAR hocalarıma, tez savunmasındaki değerli fikirleri ve tezin son haline gelmesindeki katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Cemal Niyazi SÖKMEN, Sayın Prof. Dr. Ayhan YILMAZER ve Sayın Prof. Dr. İlker TARI Hocalarıma saygıyla teşekkürlerimi sunarım. Ve pek tabii lisans, yüksek lisans ve doktora boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen diğer tüm hocalarıma, asistan arkadaşlarıma da çok teşekkür ediyorum. Sizinle beraber olmak çok güzel...

Nihayetinde içimde doğuştan var olan cevherin mimarı, eğitim hayatımın her daim sonsuz desteği Annem ve Babama da minnet ile teşekkürü borç biliyorum. Ve tüm bu çalışmalarım boyunca desteklerine karşılık kendilerine yeteri kadar vakit ayırmadığım beni evde sabırla bekleyen Eşim ve iki evladım Ömer ve Ali'me de çok teşekkür ediyorum...

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	14
1.1. Soğutucu Kaybı Kazası.....	15
1.2. Tezin Amacı ve Yöntem	18
2. LİTERATÜR TARAMASI VE COBRA-TF	21
2.1. Benzer Çalışmalar	22
2.2. COBRA-TF Yazılımı.....	23
2.2.1. Çok-Fazlı Akışın Modellenmesi	24
2.2.1.1. Çift-Fazlı Akış İntegral Denklemleri	24
2.2.1.2. Zaman Ortalamalı Denklemler	27
2.2.1.3. Yüzeyler Arası Geçiş Terimleri	29
2.2.1.4. Korunum Denklemleri	30
2.2.2. Sayısal Çözüm	32
2.2.3. COBRA-TF Isı Transferi Paketi	34
2.2.3.2. Minimum Film Kaynama Sıcaklığı	38
2.2.4. Damlacık Ayrılma ve Yeniden Bağlanma Olayları	43
2.2.4.1. Literatürde Damlacık Ayrılma ile İlgili Çalışmalar	46
2.2.4.2. Tezde Değerlendirilen Damlacık Ayrılma Çalışmaları	48
2.2.4.3. Orijinal COBRA-TF Sürümü Damlacık Ayrılma Modelleri	50
2.2.4.4. Eski COBRA-TF Sürümü Damlacık Ayrılma Modelleri	53
3. AYS DENEYLERİ VE COBRA-TF MODELLEMELERİ	56
3.1. AYS Deneyleri.....	56
3.1.1. FLECHT SEASET Deneyleri	57

3.1.2. RBHT Deneyleri	59
3.2. COBRA-TF Kod Girdileri	62
3.2.1. RBHT Deneyleri için COBRA-TF Modellemesi	62
3.2.2. FLECHT SEASET Deneyleri için COBRA-TF Modellemesi	64
4. Tmin MODEL DEĞİŞİKLİĞİ VE DENEYSEL VERİ İLE KARŞILAŞTIRMA.....	66
4.1. Mevcut Tmin Modelinin Geçerliliği	66
4.2 COBRA-TF Tmin Modelinin İyileştirilmesi	69
4.3 Yeni Tmin Modeli Sonuçları.....	71
5. DAMLACIK AYRILMA MODEL DEĞİŞİKLİKLERİ VE DENEY VERİSİ İLE KARŞILAŞTIRMA	81
5.1. COBRA-TF Çift-Kanal 31504 Tasarımı	81
5.2. Orijinal COBRA-TF'deki Damlacık Ayrılma Modellerinin Geçerliliği	82
5.3. COBRA-TF Ayrılma Modellerinin İyileştirilmesi	83
5.4. Damlacık Ayrılma Model Değişikliklerinin Sonuçları.....	84
6. YORUMLAR.....	96
7. KAYNAKLAR	99
EKLER.....	103
EK 1 – Örnek COBRA-TF Kod Girdisi (RBHT 1383).....	103
EK 2 – Örnek COBRA-TF Kod Girdisi (FLECHT SEASET 31504).....	111
EK 3 – Phyton Yazılımı.....	118
EK 6 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu.....	120
ÖZGEÇMİŞ	120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Temsili Reaktör Kazanı, Soğutucu Kaybı Kazası, Akışın Yeniden Sağlanması Fazı ve Damlacıklar.	16
Şekil 1.2. Yüksek ve Düşük AYS Fazı Hızlarına Göre Akış Rejimleri [3].....	18
Şekil 2.1. Çift-Faz Hacim Gösterimi [16].....	25
Şekil 2.2. Skaler ve Eksenel Hesaplama Hücreleri.....	33
Şekil 2.3. Kaynama eğrisi (1atm).	36
Şekil 2.4. COBRA-TF’te Isı Transferi Seçim Şeması.	36
Şekil 2.5. Yukarı Eş-Yönlü Dairesel Film Tabakasından Damlacık Ayrılma Gösterimi.	44
Şekil 2.6. Dairesel Film Kaynama Rejiminde Damlacıkların Ayrılmasını Gösteren Fotoğraf [34].	45
Şekil 2.7. Soğutma Suyu Yüzeyinden Ayrılan Damlacıkların Gösterimi.	46
Şekil 2.8. Deneysel ve Holowach Modelinin Film Damlacık Ayrılma Değerlerinin Film Reynolds Sayısına Göre Değişimi [32].	51
Şekil 2.9. Holowach Modelinin Buhar Üretimi Reynolds Sayısına Göre Deneysel Veri/Hesaplanan Damlacık Ayrılma Oranı: Soğutma Suyu Yüzeyinden.....	52
Şekil 3.1. FLECHT SEASET Yakıt Demetinin Enine Kesiti [49].	58
Şekil 3.2. FLECHT SEASET Deney Akış Şeması [51].	58
Şekil 3.3. FLECHT SEASET Güç Bozunumu Eğrisi [49].	59
Şekil 3.4. RBHT Deney Akış Şeması [50].	60
Şekil 3.5. RBHT Çubuk Demeti Enine Kesiti [50].....	61
Şekil 3.6. RBHT Isıtıcı Çubuklara Uygulanan Eksenel Güç Profili [50].	61
Şekil 3.7. RBHT Geometrisinin COBRA-TF ile Modellenmesi [4].	63
Şekil 3.8. FLECHT SEASET Modellemesinde Uygulanan Güç Profili.	65
Şekil 4.1. T _{min} Eğrisinin Çizim Mantığı.	67
Şekil 4.2. Deney Verisi ve Orijinal COBRA-TF’e Ait T _{min} Değerleri.....	68
Şekil 4.3. RBHT-1383 Deney Verisi ve T _{min} Modeli İyileştirilmiş COBRA-TF Sürümü sonuçları.....	70
Şekil 4.4. FLECHT-SEASET 31504 Deney Verisi ve T _{min} Modeli İyileştirilmiş COBRA-TF Sürümü Tahminleri.	71

Şekil 4.5 COBRA-TF Tmin Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Islanma Sonuçları: RBHT-1096, 1383, FS-31922,31504.....	74
Şekil 4.6 COBRA-TF Tmin Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Islanma Sonuçları: RBHT-1407, 1300, 1223, 1285.	75
Şekil 4.7. COBRA-TF Tmin Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: RBHT-1096,1383,1223,1285,FS-31504.	76
Şekil 4.9. COBRA-TF Tmin Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: FS-31922, 31504.	78
Şekil 4.10. COBRA-TF Tmin Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: FS-31922, 31504.	79
Şekil 4.11. COBRA-TF Tmin Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: RBHT-1223, 1285.	80
Şekil 5.1. FLECHT-SEASET-31504 Tek ve Çift-Kanal Modelleme Sonuçları.	82
Şekil 5.2. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Islanma Sonuçları: RBHT-1096,1383,FS-31922,31504.....	88
Şekil 5.3. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Islanma Sonuçları: RBHT-1407,1300,1223,1285.	89
Şekil 5.4. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: RBHT-1096,1383.	90
Şekil 5.5. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: FS-31922,31504.	91
Şekil 5.6. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: RBHT-1407,1300.	92
Şekil 5.7. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: RBHT-1223,1285.	93
Şekil 5.8. RBHT-1383 Buhar Sıcaklığı (2,93m)	94
Şekil 5.9. FLECHT SEASET 31504 Buhar Sıcaklığı (3,05 m).....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1: RBHT 1383 Deneyi Sınır ve Başlangıç Koşulları [50].....	64
Çizelge 3.2: FLECHT SEASET 31504 Deneyi Sınır ve Başlangıç Koşulları [49].....	65
Çizelge 4.1. Deney Verisi Bilgileri.....	72
Çizelge 5.1. Farklı Tmin ve Damlacık Ayrılma Modelleri İle Elde Edilen Yeni Sürümler.	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_F	Akış alanı
C_D	Sürüklenme katsayısı
$c_{p,w}$	Duvar özgül ısı
D_H	Hidrolik çap
N_μ	Viskozite sayısı
P	Basınç
Re	Reynolds sayısı
Re_f	Film akışına dayalı Reynolds sayısı
Re_g	Buhar akışına dayalı Reynolds sayısı
Re_{gc}	Buhar damlacık karışımı akışına dayalı Reynolds sayısı
$Re_{v,gen}$	Buhar üretimi akışına dayalı Reynolds sayısı
S_E	Damlacık Ayrılma akısı (kg/m ² s)
T_{sat}	Doyma sıcaklığı
$U_{v,bqf}$	Soğutma suyu seviyesinin altında üretilen buhar hızı
$U_{v,crit}$	Soğutma suyu seviyesinden üretilen kritik buhar hızı
U_{vl}	Sürekli sıvı ile buhar arasındaki göreceli hız
U_{ve}	Ayrılan damlacık ile buhar arasındaki göreceli hız
$V_{entr,w}$	Dalgacıktan ayrılan sıvının hacmi
P_H	Isıtılan çevre
P_w	Islak çevre
We	Weber sayısı
g	Yerçekimi ivmesi

h_{fg}	buharlaşma entalpisi
\dot{m}	kütle akış hızı
\bar{u}_g	ortalama gaz (buhar) hızı
\bar{u}_{gc}	ortalama gaz koru hızı
w_g	buhar kütle akış hızı
w_e	Ayrılan damlacık kütle akış hızı
α_v, α	Buhar oranı
λ	Dalgaboyu
μ	Dinamik viskozite
ρ	Yoğunluk
σ	Yüzey gerilimi
τ_i	Yüzeyler arası kesme kuvveti

Alt indisler:

e	Ayrılan
f	Akışkan
g	Buhar
gc	Buhar koru
sat	Doyma noktası
hom	Homojen kabarcıklanma
w	Duvar

Kısaltmalar

COBRA-TF	COolant Boiling in Rod Arrays-Two Fluid
BSR	Basınçlı Su Reaktörü

EİT	En İyi Tahmin Yazılımı
SKK	Soğutucu Kaybı Kazası
AYS	Akışın Yeniden Sağlanması Fazı
EYZS	En Yüksek Zarf Sıcaklığı
FLECHT-SEASET	Full Length Emergency Core Heat Transfer-System Effects and Separate Effects Tests
RBHT	Rod Bundle Heat Transfer
MFK	Minimum Film Kaynama
T_{min}	Minimum Film Kaynama Sıcaklığı
ADS	Acil Durum Soğutma Sistemleri
DDFK	Dağınık Damlacıklı Film Kaynama
YA	Yakıt Ayırıcı (YA)
FEBA	Flooding Experiments with Blocked Arrays
HSR	Hafif Su Reaktörleri
TDFK	Ters Dairesel Film Kaynama
OTD	Olay Tanımlama ve Derecelendirme
PÇ	Paslanmaz Çelik
KIA	Kritik Isı Akısı
İİK	Isı İletimi Katsayısı

1. GİRİŞ

Nükleer santraller çalışmalarını sırasında çevresine, insanlara ve doğaya bir zarar gelmemesi için birtakım güvenlik sistemleri ile donatılırlar. Bu güvenlik sistemleri normal çalışma şartları ve muhtemel en kötü kaza senaryolarını da içerecek şekilde, resmi mevzuatta belirlenen güvenlik ölçütlerine uygun bir şekilde tasarlanırlar. Nükleer santral tasarımlarına yön veren en kötü kaza senaryoları tasarıma esas kazalar olarak adlandırılır. Kurulum veya işletme sürecinde ilgili kurumlara planlı veya plansız olumsuzluklar karşısında önemli risklerin ortaya çıkmayacağı, sorunların güvenlik sistemleriyle nasıl bertaraf edileceği ve resmi güvenlik ölçütlerinin ihlal edilmeyeceği ile ilgili teknik raporlar ve analizler sunulmakta, aksi halde tesisin işletimi için gerekli lisanslar verilmemektedir.

Su soğutmalı nükleer reaktörlerdeki tasarıma esas kazalardan biri, reaktör kazanı ile ana pompa arasındaki soğutma borusunun kırılarak içerideki suyun boşalmasıyla meydana gelen soğutucu kaybı kazasıdır (SKK). Reaktördeki suyun daha düşük basınçtaki koruma kabına boşalması ile açıkta kalan nükleer yakıtların Acil Durum Soğutma Sistemleri (ADSS) ile hızlı bir şekilde tekrar su verilerek soğutulması, kamusal bir radyasyon olayının yaşanmaması adına erime veya dağılmaya karşı bütünlüklerinin korunması gerekir.

Yakıt yüzey sıcaklığı SKK esnasında 1000°C'nin üzerine çıkmakla beraber yaklaşık 800°C üzerinde yakıt zarf malzemesinde meydana gelen değişiklikler ile oksitlenme, kırılabilir bir oksit tabaka oluşumu ve basıncın düşmesi ile yakıtın içerisindeki daha yüksek basınçtan dolayı yüzeyde balon oluşumu gibi istenmeyen olaylar yaşanmaktadır. Bunların neticesinde yakıt bütünlüğünün bozulması ile bir kamusal radyasyon olayının yaşanmaması için yakıt yüzey sıcaklığının farklı ülkeler ve farklı reaktör tasarımlarında değişmekle birlikte genel olarak 1204°C'nin aşılması ölçütü nükleer güvenlik açısından uygulanmaktadır. Bununla beraber oksitlenme oranı, hidrojen üretimi, yakıt demetinin geometrisi, uzun dönem soğuma olayları ve ADS sistemlerinin özellikleriyle ilgili başka ölçütler de uygulanmaktadır. [1]

Nükleer enerji üretiminde bahsi geçen güvenlik ölçütlerinin ihlal edilmeyeceğinin garanti altına alındığını ilgili kurumlara lisanslamaya temel teşkil edecek teknik analizler ile sunmak gerekmektedir. Gerçeğe uygun veri girdileri ve en-iyi tahmin yazılımları ile yapılan analizler endüstri, güvenlik ve ilgili kurumlar açısından büyük önem taşımakta olup bu yolla geleneksel yöntemlere göre güvenlik ölçütleri bazında daha anlamlı, hızlı, güvenilir ve düşük maliyetli sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu yazılımlar nükleer sahada karşılaşılabilecek en kötü kaza durumlarının senaryolaştırılarak nükleer güvenlik ile ilgili önem arz eden olay, bileşen veya değişkenlerin güvenli limitler içerisinde kaldığını gerçeğe yakın veriler, ortam ve sınır koşulları ile ortaya koyan dünya çapında bilim çevreleri ve düzenleyici kurumlar tarafından da kabul görmüş araçlardır.

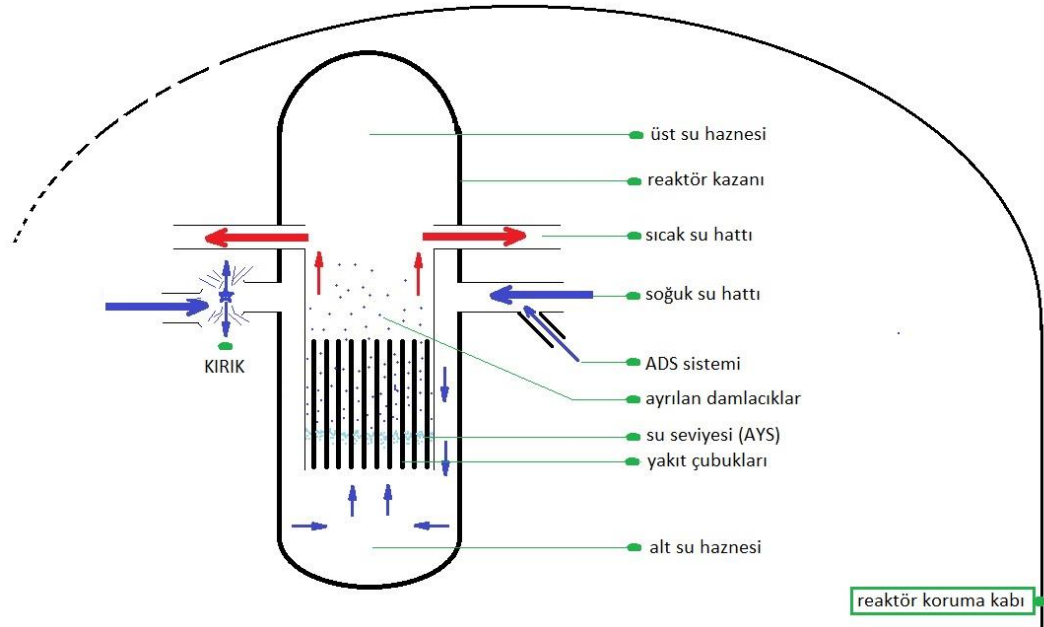
1.1. Soğutucu Kaybı Kazası

Şekil 1.1’de bir basınçlı su reaktörüne ait temsili mavi oklarla gösterilen soğuk su girişi, reaktör kazanının alt su haznesinden geçerek reaktör kuru boyuna ısınan suyun kırmızı oklarla sıcak hat üzerinden ısı üreticisine gidişi ile ilgili akış verilmiştir. Tasarıma esas kazalardan Soğutucu Kaybı Kazası (SKK) reaktör korunu soğutmak üzere soğuk su hattı üzerinden giren suyun boruda meydana gelebilecek ani bir çift taraflı tam kırık sebebiyle reaktör kabına boşalması ile başladığı varsayılır ve 3 fazdan oluşur [1,2]:

- 1- **Suyun Boşalması Fazı:** Reaktördeki su kütlesi meydana gelen kırıktan dolayı yüksek basınçlı kazandan, düşük basınçlı koruma kabı içerisine 30 s gibi çok kısa bir süre içerisinde patlama şeklinde boşalır ve basınç düşer. Reaktör kapatılmasına rağmen, fisyon ürünleri sebebiyle nükleer yakıtlardaki ısı üretimi devam ettiğinden soğutucunun kaybı ile beraber yakıt çubukları ısınmaya devam eder.
- 2- **Yeniden Dolun Fazı:** Reaktör içerisindeki suyun boşalmasıyla yaşanan soğutucu kaybı yakıt çubuklarının sıcaklığının artmasına sebep olur. Eğer herhangi bir müdahale olmazsa yakıtlarda basıncın düşmesi ve sıcaklığın artması ile erime ve bozulma başlayacaktır. Bu noktada ısınmaya devam eden yakıtların bütünlüğünü korumak çok önemlidir. Reaktör kazanındaki basıncın düşmesiyle Acil Durum Reaktör Soğutma Suyu devreye girerek reaktör içerisine farklı basınçlarda hızlı bir şekilde su basmaya başlar. Şekil 1.1’de mavi oklar ile gösterilen ADSS ile sisteme basılan soğutma suyu reaktör kazanının alt haznesinden itibaren

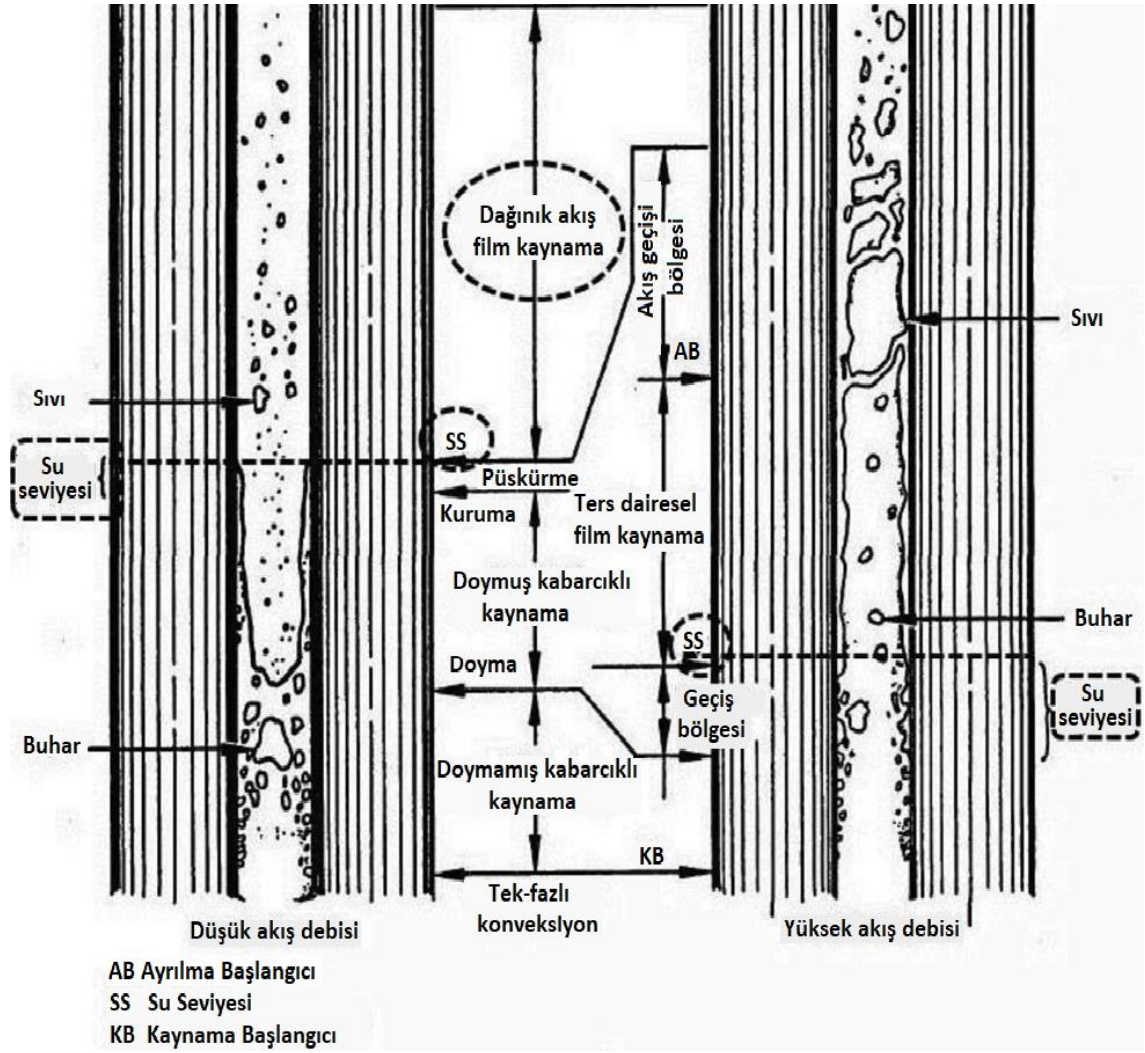
yükselmeye başlar. Yeniden dolun fazı, soğutma suyunun reaktör alt haznesini doldurarak yakıt çubuklarının alt kısmına yükselinceye kadar sürer.

- 3- **Akışın Yeniden Sağlanması (AYS):** Soğutma suyu reaktörün alt su haznesini doldurduktan sonra yakıtların alt kısmından itibaren yükselmeye, sıcak yakıtları soğutmaya başlar. Alt kısımlarda soğutma suyunun sıcak yakıtlar ile buluşmasıyla sıvı damlacıklar ve buhardan oluşan çift fazlı bir karışım meydana gelir. Bu karışım, yüksek buhar oluşumu ile üst kısımlara doğru kısmi bir soğutma etkisi meydana getirir. Yakıtların sıcak olan üst kısımlarında su ile zarf malzemesi arasında kimyasal tepkimeler meydana gelebilir. Su seviyesi yükseldikçe yakıtların üst kısmı dağınık çift-fazlı karışım ve ayrılan damlacıkların etkisiyle kısmen soğumaya devam eder. Yakıt yüzeyinde oluşan maksimum zarf sıcaklığı yükselen suyun altında kalmasıyla son bulmuş olur. Ortalama yakıt sıcaklıkları yaklaşık olarak 1188 K ve maksimum yakıt yüzeyi sıcaklığı (zarf) %95 güven aralığında 1353 K kadardır. SKK'nın bu fazında belirli bir yükseklikte yakıt elemanı yüzeyindeki maksimum oksitlenme miktarı başlangıca göre %10 ve toplam oksitlenme ise %1'den küçüktür [2].



Şekil 1.1. Temsili Reaktör Kazanı, Soğutucu Kaybı Kazası, Akışın Yeniden Sağlanması Fazı ve Damlacıklar.

AYS fazında, soğutma suyu hızının düşük veya yüksek olmasına bağlı olarak Şekil 1.2’de verilen özellikle iki akış ve bu akışlarda meydana gelen kaynama rejimleri gözlenir. Düşük akış şartlarında yakıt sıcaklığı minimum film kaynama sıcaklığının üzerinde, lokal buhar oranı da %80’in üzerinde ise üretilen ısı enerjisi buhar ve içindeki dağınık damlacıklı karışıma aktarılır. Buhar oranının yüksek olduğu bu rejime dağınık damlacıklı akış bölgesi, kaynamaya ise dağınık damlacıklı kaynama denir. Soğutucu sıvı doyma sıcaklığına hızlıca ulaşır. Su seviyesi ile dağınık damlacıklı akış arasında irili ufaklı sıvı kütlelerinin bulunduğu geçiş bölgesi bulunur. Dağınık rejimdeki damlacıklar bu geçiş bölgesindeki su kütlelerinin parçalanması, buhar üretimi ile kabarcıkların püskürmesi ve damlacıkların ayrılması sonucunda oluşurlar. Dağınık damlacıklı rejimde yakıttan buhar ve damlacıkların olduğu karışıma ısı transferi zayıf olduğundan maksimum yakıt yüzeyi sıcaklığı gözlenir. Diğer rejim ise akış hızının yüksek olduğu durumda su seviyesinin üzerinde oluşan ters dairesel akıştır. Yakıt yüzeyi ince bir buhar tabakasıyla kaplı olup kanalın geri kalan kısmı doymamış sıvıyla doludur. Soğutma suyu, doyma sıcaklığına ulaştığında sıvı kütleleri farklı boyuttaki şekillere parçalanır, bunun neticesinde dağınık rejim oluşur veya oluşmaz. Ters dairesel kaynama bölgesinde ısı transferi yüksek olduğundan yakıt yüzeyi sıcaklığı fazla yükselemeden düşer, bu yüzden maksimum yakıt yüzeyi sıcaklığı daha düşüktür [4, 5,6].



Şekil 1.2. Yüksek ve Düşük AYS Fazı Hızlarına Göre Akış Rejimleri [3].

1.2. Tezin Amacı ve Yöntem

Nükleer enerji üretimi alanında olası en kötü nükleer kaza senaryolarından Soğutucu Kaybı Kazasının bir çeşidi, reaktör basınç kabına giren soğuk su beslemesinde büyük bir kırık oluşarak soğutucu kütlelerinin hızla, daha düşük basınçta tutulan koruma kabının içerisine boşalması ile başlayan, yakıt çubuklarında soğutucu kaybindan kaynaklanan sıcaklık artışının güvenlik limitleri içerisinde kalması adına acil durum mekanizmalarının çalışarak tüm yakıtların tamamen su altında kalması ve daha uzun dönemli bir soğumaya bırakılması fazları olarak tanımlanır. Soğutucu kaybindan dolayı kuruyan yakıt çubuklarının en alttan üste kadar yeniden su altında kalması Akışın Yeniden Sağlanması fazıdır ve yakıt bütünlüğünün korunması için yakıt yüzeyindeki sıcaklık limitinin aşılmaması önemli bir güvenlik ölçütüdür.

Gerçek bir sistemin temsili için tasarlanan en-iyi tahmin yazılımlarının çıktılarını deneysel veriler ile karşılaştırılmakta ve gelecek analizler için güvenilirlik, eksiklik veya zayıflık, olgunluk gibi açılardan incelenerek yol gösterici olmaktadır. AYS fazındaki ısı transferi, buhar oranları, akış hızı, sıcaklık gibi değişkenleri hesaplayan modülleri ve bu modüller içerisinde hesaplamalarda kullanılan akış rejimi ilişkileri, yaklaşımlar, denklemler, akışkan özellikleri gibi unsurlar bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, kullanılan modellerde ait limitler, kullanıcı tarafından tanımlanan sayısal çözümde kullanılan örgüleme modeli, sayısal çözüm yaklaşımı, başlangıç ve sınır koşulları gibi faktörler de sonuca etki etmektedir. En-iyi tahmin kodları gerçek sistemlere ait tahmin çalışmalarında bazen çok iyi sonuçlar üretirken bazı koşullarda da tüm bu sayılanlardan dolayı zayıf kalmakta veya bazı verilerin tahmininde kabul edilebilir sonuçlar üretirken başka deney düzeneklerine ait verilerde üzerinde daha ileri çalışma gerektirecek sonuçlar üretebilmektedir.

COBRA-TF, en-iyi tahmin yazılımlarından biri olup alt-kanal termal-hidrolik hesaplamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, literatürde Basınçlı Su Reaktörlerinin AYS fazının analiz çalışmalarında kullanılan COBRA-TF yazılımının deneysel FLECHT-SEASET ve RBHT düzeneklerine ait verilerin tahmininde karşılaşılan belirsizliğin en düşük seviyeye düşürülmesi amaçlanmıştır. Öncelikle yazılımın AYS fazındaki sayısal tahminlerine ait zayıflıklarının ortaya çıkarılması, bunlara sebep olan unsurların belirlenmesi ve sonuçta belirsizliklerin/tutarsızlıkların giderilerek daha iyi sonuçların elde edilmesine yönelik yazılım içerisinde yapılacak müdahalelerin, güncellemelerin ve/veya eklemelerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

2. Bölümde en-iyi tahmin yazılımlarının tahminlerinin iyileştirilmesine yönelik literatürdeki benzer çalışmalara örnekler verilmiştir. Çok fazlı akış modelleme, COBRA-TF yazılımının sayısal çözüm yöntemleri, ısı transferi paketi ve damlacık ayrılma modellerindeki gelişmeler ve literatürdeki çalışmalar da bu bölümde özetlenmiştir.

Tez kapsamında COBRA-TF yazılımında yapılan model değişikliklerinin doğrulanması amacıyla kullanılan deney verileri ve tesisatları ile ilgili bilgiler ile beraber yapılan deneylerin COBRA-TF ile modelleme kod girdilerinden 3. Bölümde bahsedilmiştir.

COBRA-TF yazılımındaki minimum film kaynama modelinin geçerliliği ile ilgili analizler, tespitler ile literatürdeki diğer modellerin değerlendirilmesinin yer aldığı 4. Bölümde ayrıca yapılan model değişikliği ve elde edilen sonuçlar da verilmiştir.

5. Bölümde ise 4. Bölümde elde edilen gelişmeler sonucunda COBRA-TF'in dairesel akış rejiminde film tabakasından ve soğutma suyu yüzeyinden damlacık ayrılma modellerinin geçerliliği, değerlendirmeler, yapılan iyileştirmeler ve elde edilen sonuçların deneysel veri ile karşılaştırmalarına yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI VE COBRA-TF

Nükleer teknolojide kullanılan en-iyi tahmin yazılımları bilgisayar teknolojilerinin ve hesaplama kapasitelerinin gelişmesi ile birlikte basit fiziksel olayların modellenmesinden başlayarak zaman geçtikçe daha karmaşık, çok boyutlu ve genel kapsamlı analizleri daha hızlı ve gerçeğe yakın bir şekilde yapar hale gelmiştir. Nükleer sistemler için analiz yazılımlarının geliştirilmesi nükleer endüstrinin geliştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu yazılımlar tasarımcıların daha güvenli ve daha verimli nükleer tesisler üretmelerine yardımcı olmaktadır [7]. Nükleer endüstride sistem yazılımlarına belirli bir bileşen veya daha geniş kapsamlı analizler için, farklı senaryolara, sabit şartlara veya zamana bağlı olaylar gibi birbirinden farklı amaçlardan dolayı ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple birbirlerinden özellikleri ve hitap ettikleri alanlar açısından farklı ülkeler, üniversiteler, firmalar ve gruplar tarafından birçok yazılım üretilmiştir.

Tasarıma esas SKK gibi çift-fazlı akış şartlarının baskın olduğu durumlar için önce iki-akışkan modeli geliştirilmiş, böylece buhar ve su ayrı akışkanlar olarak tanımlanmıştır. Bu durum fazlar arası hız ve termal farklar açısından gerçeğe daha uygun olduğundan buhar içerisine doymamış su uygulanması veya AYS fazı gibi süreçlerin daha iyi modellenmesine katkı sağlamıştır. Diğer taraftan yoğuşamayan gazlar, yakıt ve diğer kor içerisindeki destek ve kontrol elemanları üzerinde oluşan film tabakası veya kor içerisinde buhar fazı ile hareket eden damlacıkların sürekli sıvı fazı ile aynı hız ve sıcaklıkta olduğunu kabul etmek gerçek ortam şartlarına uymamaktadır. Bu yüzden sıvı ve buhar alanlarına ek olarak damlacık alanının da eklendiği modeller geliştirilmiştir [9].

Çift fazlı termal-hidrolik olayları ifade etmekte buhar ve sürekli sıvı alanına ek olarak sıvı damlacıkların da üçüncü alan olarak tanımlandığı modeller büyük miktarda damlacığın üretildiği ve ısı transferine katkı sağladığı ortamlarda önemli bir üstünlük sağlar. SKK sürecinde suyun reaktörden boşalması ve AYS fazında dağınık damlacıklı film rejiminde önemli miktarda sıvı damlacık üretildiği, bunların da yakıtların kuru kısımlarının soğutulmasında önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla üç alanlı en-iyi tahmin yazılımları yakıt sıcaklıkları ve ıslanma davranışı gibi termal hidrolik olayların doğru bir şekilde tahmin edilmesinde daha gerçekçidirler [3,7].

Sistem güvenliği analizlerinde yaygın olarak kullanılan RELAP5 ve CATHARE gibi seriler çift fazlı termal-hidrolik akışı sıvı ve gaz olmak üzere çift alan ile modellemekte, COBRA-TF, CATHARE3 ve SPACE yazılımları ise sıvı damlacıkların da dâhil olduğu üç alan ile ifade ederek kullanırlar. Ayrıca tek boyutlu termal-hidrolik modelleme imkanı sunan RELAP/MOD3 ile 3 boyutlu COBRA-TF'in birleşiminden üretilen MARS gibi, veya benzer şekilde COBRA-TRAC veya kendi içinde farklı şartlar için kullanılan RELAP5-3D ve RELAP5-3D/SCDAP gibi sürümler de bulunmaktadır [3].

2.1. Benzer Çalışmalar

Literatürde farklı en-iyi tahmin kodlarının farklı deneysel veriler ile geçerliliği ve performansını artırma amaçlı çalışmalar bulunmaktadır. Kore Atom Enerjisi Kurumu bünyesinde yapılan çalışmada RELAP5/MOD3.1 en-iyi tahmin kodundaki SKK-AYS modelinin becerilerini ortaya çıkarmaya yönelik bir çalışma yapılmıştır. Karşılaştırma için FLECHT SEASET verilerinin kullanıldığı çalışmada farklı akış ve ısı transferi modellerinde bazı zayıflıklar tespit edilmiş ve bu tespitler kaynak koduna yapılan iyileştirme müdahaleleriyle belirli oranda giderilmiştir. Çalışma, aynı zamanda istatistiki belirsizlik hesaplama bilgisi de içermektedir [10].

Diğer bir çalışmada COBRA-TF kodunun SKK senaryosu AYS aşaması için Dağınık Damlacıklı Film Kaynama (DDFK) modelindeki iyileştirme ve iyileştirme ihtiyaçları, sayısal çözüm modeli ve Yakıt Ayırıcılarının (YA) ısı transferine etkisi konuları detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. Mevcut DDFK modelinin iyileştirilmesi adına koda ek bir alan eklenerek kütle, momentum ve enerji denklemlerine uygulaması ve ayrıca kodun YA modülünde değişiklik yapılmıştır. Orijinal ve iyileştirilmiş kod ile yapılan çalışmalar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Yakıt çubuğu yüzey sıcaklığı, buhar sıcaklığı ve AYS esnasındaki yakıt çubuklarının ıslanma davranışında gelişme kaydedilmiştir [5,6].

Kore Atom Enerjisi Kurumu bünyesinde yapılan başka bir çalışmada COBRA-TF'in sıvı damlacık sürüklenme modeli değerlendirilerek iyileştirmeye yönelik kodun orijinal sürüklenme modeli değiştirilmiştir. FLECHT SEASET verisinin karşılaştırıldığı

çalışmada AYS fazı yakıt ıslanma zamanının oldukça iyi bir şekilde tahmin edildiği fakat lokal en yüksek yakıt sıcaklığının fazla etkilenmediği rapor edilmiştir [11].

RELAP5-3D kodunun Amerika’da acil durum soğutma sistemi lisanslama mevzuatı olan Ek-K’nın yürürlükteki şartlarının (güç, yeniden akış oranı vb gibi.) değişmesi sonrasındaki yeni duruma adapte olmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada da AYS yeniden akış oranı ve ısı transferi katsayılarına bazı müdahaleler yapılarak yeni lisanslama mevzuatına uygun hale getirilmiştir [12].

Yine Kore Atom Enerjisi Kurumu tarafından, MARS kodunun büyük kırıklı SKK senaryosunun sonuçları özelinde en yüksek zarf sıcaklığı (EYZS) ve Acil Durum Soğutma Sistemi performansı üzerine çalışılmıştır. Kodun AYS aşaması EYZS tahmininin FLECHT SEASET verisinin altında kaldığı belirlenmiştir. FLECHT ve RBHT verilerinin kullanıldığı çalışmanın farklı kod koşusu yakıt boyu koordinat durumları için EYZS ve yakıt ıslanma zamanı değerleri elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır [13].

2016 Yılında yapılan bir çalışmada termal-hidrolik en-iyi tahmin yazılımı RELAP5’in FEBA (Flooding Experiments with Blocked Arrays) deneysel verileri karşısında maksimum yakıt yüzeyi zarf sıcaklığını düşük, soğutma suyu ile alttan ıslanma davranışını ise çok erken tahmin ettiği belirtilmiştir. Çalışmada tek değişken hassasiyeti analizleri yapılarak AYS ile ilgili film kaynama ısı transferi ve dağılık akış yüzeyler arası sürtünme modellerinin sonuçları olumsuz etkilediği anlaşılmıştır. İlgili modellerde yapılan iyileştirmeler RELAP5 yazılımına uygulanarak sonucunda elde edilen tahminler FEBA verileri ile karşılaştırılmış, daha iyi yakıt sıcaklığı ve ıslanma davranışı tahminlerinin elde edildiği rapor edilmiştir [14].

2.2. COBRA-TF Yazılımı

Nükleer sistemlerin alt-kanal analizlerinde en-iyi tahmin yazılımı olarak yaygınca kullanılan COBRA-TF (COolant Boiling in Rod Arrays-Two Fluid) bir Fortran-77 yazılımıdır. 1980 Yılında Pacific Northwest Laboratuvarında yakıt demeti analizlerinde

kullanılmak üzere geliştirilmeye başlanmış ve günümüze kadar güncellenmeye devam etmiştir. SKK analizlerinde çift-faz akışı su ile gaz halindeki buharı iki-akışkan olarak ve sıvı film, buhar ve sıvı damlacık olarak üç bağımsız alan şeklinde modeller. COBRA-TF Hafif Su Reaktörlerinin (HSR) daha doğru bir şekilde analiz edilmesi için akış rejimine bağlı çift-faz ısı transferi, fazlar arası ısı transferi, sürüklenme, damlacık ayrılma ve yakıt ıslanma takibi gibi birçok bileşenden oluşan geniş bir termal-hidrolik model çeşitliliğine sahiptir. Üç boyutlu ve geniş reaktör termal-hidrolik modelleme yetenekleri ile COBRA-TF, HSR tiplerinin zamana bağlı yakıt demeti analizlerinde ve BSR tiplerinin tüm SKK analizlerinde sıkça kullanılmaktadır [15].

Bu tez çalışmasında “Orijinal Sürüm” olarak adlandırılan ve iyileştirilme çalışmalarında temel olarak alınan COBRA-TF sürümü, en son Mark J. Holowach tarafından bir doktora tezi ile yeni sürüklenme ve damlacık ayrılma modellerinin uygulandığı sürümdür.

2.2.1. Çok-Fazlı Akışın Modellenmesi

Çift fazlı akış nükleer reaktör güvenlik analizlerinde sayısal olarak birçok en-iyi tahmin yazılımı tarafından modellenmektedir. Bu yazılımlardan RELAP ve TRAC gibi seriler çift-fazlı akışı sıvı ve buhar fazını ayrı akışlar halinde modellemekteyken, COBRA-TF sıvı, buhar ve sıvı damlacıklar olarak üç alan şeklinde modellemektedir. Yoğuşamayan gaz alanı da ayrı bir alan olarak modellenmektedir [5]. Bu durum üç boyutlu olarak alt-kanalların tanımlanmasında dokuz adet korunum denklemi ile ifade edilmekte olup ilgili denklemler özet olarak bu bölümde verilmiştir.

2.2.1.1. Çift-Fazlı Akış İntegral Denklemleri

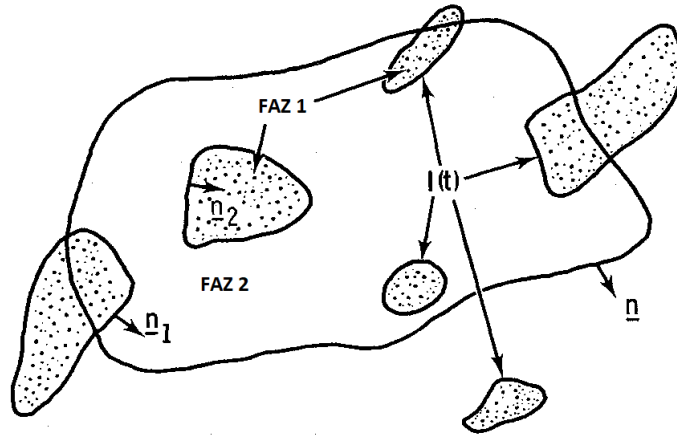
Çok-fazlı akış:

- Tüm en-iyi tahmin yazılımlarında fazların zaman-ortalama korunum denklemleri ile modellenir,
- Karmaşık davranışından dolayı modellemek ve kesin çözüm bulmak oldukça zordur.

EİT yazılımları fazların kesin davranışını ve hareketini tam olarak hesaplamayı hedeflemez. Belirli bir değişkenin zamana bağlı salınımlarının aldığı değerleri hesaplamak yerine bu değerlerin ortalaması analizler için yeterli olmaktadır. Bu yüzden değişkenlere Euler zaman-ortalama uygulanarak zaman-ortalama korunum denklemleri türetilmiştir. Ortalama denklemler her faz için ayrı (iki-akışkan) korunum

denkleminin kullanılması ile türetilir ve bunların çözümü için fazlardan uygun kapatma modelleri/denklemleri gereklidir. Aşağıda çift faz için Leibnitz'in integral teoremi kullanılarak türetilen kütle, momentum ve enerji korunumu için kesin integral denklemleri verilmiştir [16].

Şekil 2.1'de ilgili çift-faz hacim gösterimi verilmiş olup $I(t)$ fazlar arası yüzeyi, $V(t)$ ise hacmi ifade etmektedir.



Şekil 2.1. Çift-Faz Hacim Gösterimi [16].

Konuma (x) bağlı kütle korunum denklemi:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho d\underline{x} = 0 \quad (2-1)$$

Leibnitz ve Gauss teoremi uygulandığında ise kütle korunum denklemi aşağıdaki hale gelir;

$$\int_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\underline{x} + \int_{V(t)} \rho (\underline{n} \cdot \underline{U}) dV + \int_{S(t)} (\rho_{1I} - \rho_{2I}) (\underline{n}_1 \cdot \underline{U}_I) ds = 0 \quad (2-2)$$

Denklemden U akışkan hızını, ρ yoğunluğunu ve S ise $V(t)$ hacmindeki $I(t)$ oranını temsil eder.

Akışa etki eden tüm kuvvetlerin korunumunu ifade eden momentum korunum denklemi:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \underline{U} d\underline{x} = \int_{V(t)} \rho \underline{f} d\underline{x} + \int_{\partial V(t)} \underline{t} ds + \int_{S(t)I(t)} \underline{\Sigma} dl \quad (2-3)$$

Denklemden, f kütle kuvveti, t stres vektörü ve Σ yüzey gerilimini ifade eder. Leibnitz Teoremi uygulandıktan sonra momentum denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \underline{U}) d\underline{x} + \int_{V(t)} \underline{n} (\rho \underline{U} \underline{U}) ds \\ = \int_{V(t)} \rho \underline{f} d\underline{x} + \int_{\partial V(t)} \underline{t} ds + \int_{S(t)I(t)} \underline{\Sigma} dl - \\ \int_{S(t)} (\rho_{1I} \underline{U}_{1I} - \rho_{2I} \underline{U}_{2I}) (\underline{n}_I \cdot \underline{U}_I) ds \end{aligned} \quad (2-4)$$

Enerjinin korunumunu ifade eden denklem:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \left(e + \frac{1}{2} |\underline{U}|^2 \right) d\underline{x} = \int_{\partial V(t)} -\underline{Q} \cdot \underline{n} ds + \int_{V(t)} \dot{Q} d\underline{x} \\ + \int_{V(t)} \rho \underline{f} \cdot \underline{U} d\underline{x} + \int_{\partial V(t)} \underline{t} \cdot \underline{U} ds \\ + \int_{S(t)I(t)} \underline{\Sigma} \cdot \underline{U}_I dl \end{aligned} \quad (2-5)$$

Denklemden e özgül iç enerji, Q iletim ısı akısı vektörü, \dot{Q} hacimsel ısı üretim oranını ifade eder. Leibnitz Teoremi uygulandıığında enerji denklemi:

$$\begin{aligned}
\int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} |\underline{U}|^2 \right) \right] d\underline{x} &= \int_{\partial V(t)} \underline{n} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} |\underline{U}|^2 \right) \underline{U} \right] ds \\
&= - \int_{\partial V(t)} \underline{Q} \cdot \underline{n} ds + \int_{V(t)} \dot{Q} d\underline{x} + \int_{V(t)} \rho \underline{f} \cdot \underline{U} d\underline{x} + \int_{\partial V(t)} \underline{t} \cdot \underline{U} ds \\
&+ \int_{S(t)I(t)} \underline{\Sigma} \cdot \underline{U}_I dl \\
&- \int_{S(t)} \left[\rho_{1I} \left(e + \frac{1}{2} |\underline{U}|^2 \right)_{1I} - \rho_{2I} \left(e + \frac{1}{2} |\underline{U}|^2 \right)_{2I} \right] (\underline{n}_1 \cdot \underline{U}_I) ds
\end{aligned} \tag{2-6}$$

Kesin integral denklemleri bu haliyle iki fazlı akışın çözümünde kullanılamaz, fakat fazlar arası yüzeydeki etkileşimin ifade edilmesi ile ilgili yüzeyler arası geçiş koşullarının türetilmesinde kullanılır. Bu koşullar kütle, momentum ve ısı transferi gibi yüzeyler arası etkileşim terimleri ile ilgili kapatma ilişkilerinde gereklidir. Çift-faz akış denklemlerinin elde edilmesi için öncelikle tek-faz denklemlerinin türetilmesi ve iki akışkan modeli için bu denklemlerin de ortalama denklemlerinin türetilmeleri gerekir. Tek-faz denklemlerine ortalama işlemi uygulandıktan sonra iki akışkan davranışının ifade edilmesi için geçiş koşulları kullanılacaktır [4].

2.2.1.2. Zaman Ortalamalı Denklemler

Elde edilen kütle, momentum ve enerji denklemlerine diverjans (Divergence) teoremi uygulanarak tek-faz akış için diferansiyel denklemler elde edilir. Bu denklemler ile tek-faz akış modellenebilir. Çift-faz akış için ise denklemlere ortalama ve geçiş koşulları uygulanması gerekir.

EİT yazılımları sürekli salınım halindeki kesin değerleri hesaplamak için değil ortalama sonuçları elde etmek üzere kullanıldığından değişkenlere ve denklemler zaman ortalaması uygulanması gerektiği daha önce belirtilmişti. Parçalı türev içeren parçalı sürekli bir fonksiyonun zaman ortalamalı çok-fazlı akış değişkeni aşağıdaki ortalama yöntemi kullanılarak elde edilir.

$$\bar{f}(\underline{x}, t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} f(\underline{x}, t') dt' \quad (2-7)$$

Tek-faz denklemlerine ortalama yöntemi uygulanarak ve Thurgood [16] tarafından detayları verilen dönüştürme işlemlerinden sonra fazları ifade eden aşağıdaki denklemler elde edilir.

k-fazı zaman ortalama kütle denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{U}_k) = \Gamma_k \quad (2-8)$$

Veya diğer bir ifadeyle aşağıdaki gibi tanımlanır:

[k-fazındaki kütle değişim oranı] + [k-fazından dışarı kütle akış oranı] = [Diğer fazlardan k-fazına kütle geçiş oranı]

k-fazı zaman ortalama momentum denklemi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k \underline{U}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{U}_k \underline{U}_k) \\ = \alpha_k \rho_k \underline{g} - \alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\underline{\tau} + \underline{T}_k^T)] + \underline{M}_k^\Gamma + \underline{M}_k^d \end{aligned} \quad (2-9)$$

[k-fazı momentum değişim oranı] + [k-fazı dışına momentum çıkış oranı] =

[Yerçekimi kuvveti] + [Basınç gradiyent kuvveti] + [Viskoz ve türbülant kuvvetler] + [k-fazına kütle aktarımı sebebiyle momentum değişimi] + [Yüzeyler arası sürüklenme kuvveti]

k-fazı zaman ortalama enerji denklemi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \underline{U}_k) \\ = -\nabla \cdot [\alpha_k (\underline{Q}_k + \underline{q}_k^T)] + \Gamma_k h_k^i + q''_{k_i} + \alpha_k \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned} \quad (2-10)$$

Enerji denklemindeki terimler şu şekilde tanımlanır[4]:

[Entalpi değişim oranı] + [Entalpi çıkış oranı] = [Kondüksiyon ve türbülant ısı akısı] + [k-fazına kütle iletimi sebebiyle geçen enerji] + [Yüzeyler arası ısı transferi] + [Basınç kaynaklı iş]

2.2.1.3. Yüzeyler Arası Geçiş Terimleri

Fazlar arasında etkileşim içeren kütle, momentum ve enerji geçiş terimleri farklı şekillerde ifade edilerek tanımlanırlar. Bu terimler sıvı, buhar ve damlacık alan denklemlerinin türetilmesinde kullanılırlar. Fazlar arası kütle aktarımını ifade eden terim [4]:

Γ''' : Birim hacimde üretilen veya yoğuşan ortalama buhar oranı. Hem sıvı hem de damlacık alanından buhar üretimi olacağı için:

η : Ayrılan damlacıklardan toplam buhar üretimi oranı.

Γ'''_e : Birim hacimde üretilen veya yoğuşan ortalama buhar miktarının ayrılan damlacıklardan kaynaklanan oranı, $\Gamma'''_e = \eta \Gamma'''$.

Γ'''_1 : Birim hacimde üretilen veya yoğuşan ortalama buhar miktarının ayrılan sürekli sıvıdan kaynaklanan oranı, $\Gamma'''_1 = \eta \Gamma'''$.

Sürekli sıvı alanı ve ayrılan damlacık alanları kendileri arasında ayrılma ve yeniden bağlanma ile kütle aktarımını gerçekleştirebilir veya faz değişimine uğrayarak kütle kaybedebilirler.

S''' : Birim hacimde ayrılan damlacıkların ortalama net oranı.

Bu tanımlar ile kütle aktarım terimleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \Gamma_v &= \Gamma''' \\ \Gamma_l &= -\Gamma_l''' - S''' = -(1 - \eta)\Gamma''' - S''' \\ \Gamma_e &= -\Gamma_e''' + S''' = -\eta\Gamma''' + S''' \end{aligned} \quad (2-11)$$

2-11'de v , l ve e harfleri sırasıyla buhar, sürekli sıvı ve ayrılan damla alanlarını temsil eder.

Yüzeyler arası momentum geçiş terimleri ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned}\underline{M}_v^d &= -\underline{\tau}_{vl}''' - \underline{\tau}_{ve}''' \\ \underline{M}_l^d &= -\underline{\tau}_{vl}''' \\ \underline{M}_e^d &= -\underline{\tau}_{ve}'''\end{aligned}\quad (2-12)$$

$\underline{\tau}_{vl}'''$: buharın birim hacimdeki sürekli sıvı (v_l) üzerindeki ortalama sürüklenme kuvveti.

$\underline{\tau}_{ve}'''$: buharın birim hacimdeki ayrılan damlacık (v_e) üzerindeki ortalama sürüklenme kuvveti.

Sürekli sıvı, buhar ve damlacık alanları arasında gerçekleşen kütle akışından kaynaklı momentum değişimi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}\underline{M}_v^\Gamma &= (\Gamma''' \underline{U}) \\ \underline{M}_l^\Gamma &= (\Gamma_l''' \underline{U}) - (S''' \underline{U}) \\ \underline{M}_e^\Gamma &= (\Gamma_e''' \underline{U}) - (S''' \underline{U})\end{aligned}\quad (2-13)$$

İfadelerde geçen \underline{U} hızı temsil etmektedir.

2.2.1.4. Korunum Denklemleri

Çift-faz akışta buhar, sürekli sıvı, damlacık ve yoğuşamayan gaz alanlarını temsil eden nihai kütle korunum denklemleri aşağıda verilmektedir [4];

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_g \rho_g + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{U}_g) = \Gamma'''_g + \nabla \cdot \vec{G}_g^T \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_v \rho_v + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{U}_v) = \Gamma''' + \nabla \cdot \vec{G}_v^T \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_l \rho_l + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{U}_l) = -\Gamma''' - S''' + \nabla \cdot \vec{G}_l^T \quad (2-16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_e \rho_e + \nabla \cdot (\alpha_e \rho_e \vec{U}_e) = -\Gamma'''_e + S''' \quad (2-17)$$

Denklemlerdeki terimler ise şu şekilde ifade edilir:

[Kütle değişim oranı] + [Konveksiyon ile kazanılan kütle oranı] = [Kimyasal reaksiyon veya yüzeyler arası geçiş ile kazanılan kütle oranı] + [Damlacıkların ayrılması ile kazanılan kütle oranı] + [Buhar akıntıları sebebiyle kaybedilen kütle oranı]

Sürekli sıvı ile ayrılan damlacıklar ve buhar fazı ile de yoğuşamayan gaz karışımı kendi aralarında termal dengede (aynı sıcaklıkta) oldukları varsayıldığından her ikili için bir enerji korunum denklemi bulunmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_v \rho_v h_v + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v h_v \vec{U}_v) = \Gamma''' H_g + q_{iv} + Q_{wv} - \nabla \cdot (\alpha_v \underline{q}_v^T) + \alpha_v \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l + \alpha_e) \rho_l h_l + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l h_l \vec{U}_l) + \nabla \cdot (\alpha_e \rho_l h_l \vec{U}_e) = \\ \Gamma''' H_f + q_{il} + Q'''_L - \nabla \cdot (\alpha q_l^T) + (\alpha_l + \alpha_e) \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned} \quad (2-19)$$

Denklemlerdeki terimler ise şu şekilde ifade edilmektedir:

[Enerji değişim oranı] + [Konveksiyon] = [Faz değişiminden kaynaklanan enerji nakli] + [Yüzeyler arası ısı transferi] + [Duvar ısı akısı] + [Türbülant ısı akısı] + [Basınç türevi]

Her üç alan için momentum denklemleri damlacık ve sürekli sıvı alanına ait hız değerleri farklı olacak şekilde tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \alpha_v \rho_{vg} \vec{U}_v + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_{vg} \vec{U}_v \vec{U}_v) \\ = -\alpha_v \nabla P + \alpha_v \rho_{vg} \vec{g} + \vec{\tau}_{wv}''' - \vec{\tau}_{lv}''' - \vec{\tau}_{ev}''' - (\Gamma''' \vec{U}_v) \end{aligned} \quad (2-20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \alpha_l \rho_l \vec{U}_l + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{U}_l \vec{U}_l) \\ = -\alpha_l \nabla P + \alpha_l \rho_l \vec{g} + \vec{\tau}_{wl}''' + \vec{\tau}_{lv}''' - (\Gamma_l \vec{U}_l) - (S''' \vec{U}_e) \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \alpha_e \rho_l \vec{U}_e + \nabla \cdot (\alpha_e \rho_l \vec{U}_e \vec{U}_e) \\ = -\alpha_e \nabla P + \alpha_e \rho_l \vec{g} + \vec{\tau}_{we}''' + \vec{\tau}_{ev}''' - (\Gamma_e \vec{U}_e) - (S''' \vec{U}_e) \end{aligned} \quad (2-22)$$

[Momentum değişim oranı] + [konveksiyon sebebiyle momentum değişim oranı] = [Basınç gradiyenti] + [Yerçekimi kuvveti] + [Duvar kesme kuvveti] + [Sürekli sıvı ile buhar ara yüzeyindeki sürüklenme kuvveti] + [Buhar ve damlacık yüzeyleri arasındaki sürüklenme kuvveti] + [Yüzeyler arası momentum geçişi] + [Damlacık ayrılmaya bağlı momentum geçişi]

Kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin çözülebilmesi için ilave fiziksel kapatma denklemleri gerekir. Fiziksel kapatma denklemleri üç alan arasındaki kütle ve momentum geçişleri, duvar yüzeylerinde sürüklenme kuvveti, sürekli sıvı bölgesindeki türbülant terimlerin değerleri ve damlacık ayrılma gibi olayların modellemeleridir.

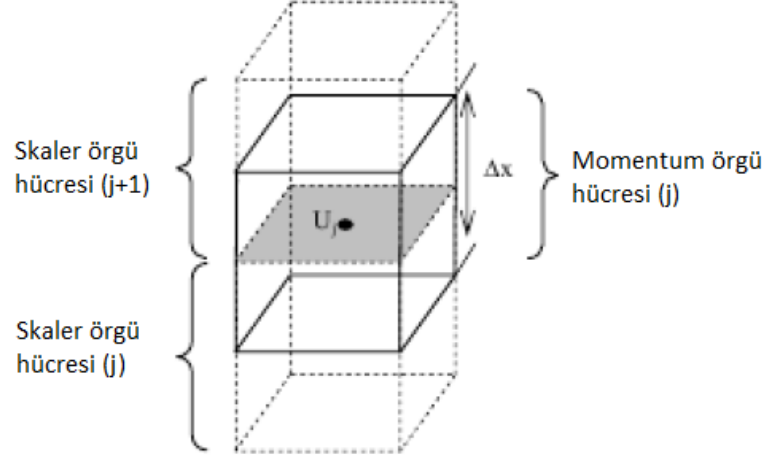
Korunum denklemlerine ek olarak COBRA-TF ayrılan damlacıkların yüzey alanını hesap etmek üzere bir yüzeyler arası alan denklemi de çözer.

$$\frac{dA_{i,d}'''}{dt} + \nabla \cdot (A_{i,d}''' \underline{U}_e) = A_{i,E}''' + A_{i,\Gamma}''' \quad (2-22)$$

Hesaplanan yüzeyler arası alan enerji denklemlerinde buhar ile damlacık fazları arasındaki ısı hesaplarında ve momentum denklemlerinde kullanılır.

2.2.2. Sayısal Çözüm

Sıvı, buhar ve damlacık alanlarına ait kütle, momentum ve enerji denklemleri fiziksel kapatma modelleri ile beraber belirli geometri, çalışma ve sınır koşullarına uyarlanarak sayısal olarak çözülecek hale getirilmiştir. Modellenen geometri skaler ve momentum (eksenel ve çapraz) iç içe farklı şekillerde tanımlanan hesaplama hacimlerine bölünmüş olarak sayısal çözüm için hazır hale getirilir. Küçük hacimlerden oluşan hesaplama örgüsünün oluşturulma aşamasında kullanıcı tarafından belirlenen bölümler, kanallar ve kanal bağlantı bilgileri gibi basit model bilgileri dikkate alınır. Şekil 2.2'de örnek hesaplama hücresi verilmiştir [15].



Şekil 2.2. Skaler ve Eksenel Hesaplama Hücreleri.

Korunum denklemleri ve uygulanacak hesaplama örgüsünün modellenmesinden sonra denklemler sonlu-farklar yöntemi ile çözülecek hale getirilmektedir. Sonlu-farklar şeklinde ifade edilen denklemleri COBRA-TF SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması kullanarak sayısal olarak çözer. Çözüm algoritmasının adımları özet olarak şu şekildedir[8]:

- 1- Basınç için bir başlangıç değeri tahmin edilmesi,
- 2- Akışkan hız değerlerini elde etmek üzere momentum denkleminin çözülmesi,
- 3- Basınç değerinin düzeltilmesi için kütle ve enerji denkleminin çözülmesi,
- 4- Düzeltilmiş basınç değerinin hesaplanması,
- 5- Düzeltilen basınç değeri ile akışkan hız değerlerinin yeniden hesaplanarak düzeltilmesi,
- 6- Akış alanını etkileyen diğer enerji denklemlerinin çözümü,
- 7- Düzeltilmiş basınç değerinin yeni tahmin olarak atanması ve 1-6. adımların yakınsama ölçütü elde edilinceye kadar devam etmesi.

Algoritma genel olarak her zaman adımı için momentum denklemlerinin çözümü, kütle, enerji denklemlerinin çözümü ve sistem basınç matrisinin çözümünden oluşur. Önce fazlara ait hız değerlerini etmek için momentum denklemleri çözülür. Kütle ve enerji denklemleri lineer hale getirilir ve bunun sonucunda bir Jakobi matrisi elde edilir. Aşağıda lineer hale getirilen yoğunlaşmayan gaz, buhar, sıvı ve damlacık kütle ve enerji matrisi örnek olarak verilmiştir. Kütle ve enerji denklemleri çözüldükten sonra basınç

matrisi çözülerek yeni zaman adımındaki her hesaplama hücresi için basınç değerleri bulunur. Ardışık yineleme işlemleri yakınsama ölçütü sağlanana kadar devam eder [4].

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial E_{cg}}{\partial \alpha_g} & \frac{\partial E_{cg}}{\partial \alpha_v} & \frac{\partial E_{cg}}{\partial \alpha_v H_v} & \frac{\partial E_{cg}}{\partial (1-\alpha_v)H_l} & \frac{\partial E_{cg}}{\partial \alpha_e} & \frac{\partial E_{cg}}{\partial P_j} & \frac{\partial E_{cg}}{\partial P_{i=1}} & \dots & \frac{\partial E_{cg}}{\partial P_{i=NCON}} \\ \frac{\partial E_{cl}}{\partial \alpha_g} & \frac{\partial E_{cl}}{\partial \alpha_v} & \frac{\partial E_{cl}}{\partial \alpha_v H_v} & \frac{\partial E_{cl}}{\partial (1-\alpha_v)H_l} & \frac{\partial E_{cl}}{\partial \alpha_e} & \frac{\partial E_{cl}}{\partial P_j} & \frac{\partial E_{cl}}{\partial P_{i=1}} & \dots & \frac{\partial E_{cl}}{\partial P_{i=NCON}} \\ \frac{\partial E_{ev}}{\partial \alpha_g} & \frac{\partial E_{ev}}{\partial \alpha_v} & \frac{\partial E_{ev}}{\partial \alpha_v H_v} & \frac{\partial E_{ev}}{\partial (1-\alpha_v)H_l} & \frac{\partial E_{ev}}{\partial \alpha_e} & \frac{\partial E_{ev}}{\partial P_j} & \frac{\partial E_{ev}}{\partial P_{i=1}} & \dots & \frac{\partial E_{ev}}{\partial P_{i=NCON}} \\ \frac{\partial E_{el}}{\partial \alpha_g} & \frac{\partial E_{el}}{\partial \alpha_v} & \frac{\partial E_{el}}{\partial \alpha_v H_v} & \frac{\partial E_{el}}{\partial (1-\alpha_v)H_l} & \frac{\partial E_{el}}{\partial \alpha_e} & \frac{\partial E_{el}}{\partial P_j} & \frac{\partial E_{el}}{\partial P_{i=1}} & \dots & \frac{\partial E_{el}}{\partial P_{i=NCON}} \\ \frac{\partial E_{ce}}{\partial \alpha_g} & \frac{\partial E_{ce}}{\partial \alpha_v} & \frac{\partial E_{ce}}{\partial \alpha_v H_v} & \frac{\partial E_{ce}}{\partial (1-\alpha_v)H_l} & \frac{\partial E_{ce}}{\partial \alpha_e} & \frac{\partial E_{ce}}{\partial P_j} & \frac{\partial E_{ce}}{\partial P_{i=1}} & \dots & \frac{\partial E_{ce}}{\partial P_{i=NCON}} \\ \frac{\partial E_{cv}}{\partial \alpha_g} & \frac{\partial E_{cv}}{\partial \alpha_v} & \frac{\partial E_{cv}}{\partial \alpha_v H_v} & \frac{\partial E_{cv}}{\partial (1-\alpha_v)H_l} & \frac{\partial E_{cv}}{\partial \alpha_e} & \frac{\partial E_{cv}}{\partial P_j} & \frac{\partial E_{cv}}{\partial P_{i=1}} & \dots & \frac{\partial E_{cv}}{\partial P_{i=NCON}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\alpha_g \\ d\alpha_v \\ d(\alpha_v H_v) \\ d((1-\alpha_v)H_l) \\ d\alpha_e \\ dP_j \\ dP_{i=1} \\ \vdots \\ dP_{i=NCON} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} E_{cg} \\ E_{cl} \\ E_{ev} \\ E_{el} \\ E_{ce} \\ E_{cv} \end{Bmatrix} \quad (2-23)$$

2.2.3. COBRA-TF Isı Transferi Paketi

COBRA-TF'in ısı transferi paketi, bağıntı kütüphanesi ve hesaplama hücresindeki buhar oranı, basınç, kütle akışı, yüzey sıcaklığına göre kaynama eğrisi tahmini yapan bir seçim mantığından oluşur. Şekil 2.3'de kaynama eğrisi ve ilgili rejimler, Şekil 2.4'de ise ısı transferi rejimi seçim mantığı verilmiştir. Isı transferi paketi duvardan akışkana ve fazlar arası ısı transferi hesabı yapmaktadır. Fazlar için farklı enerji denklemleri kullanıldığından farklı sıcaklıklardaki (non-equilibrium) akışın hesaplanması, fazlara ait sıcaklığı elde etmek için yüzeyler arası ısı transferi ve ısı transferi alanı hesabının yapılması mümkün olmaktadır. Aşağıda AYS fazı ile ilgili ısı rejimleri özetlenmektedir [4].

1. Tek-Faz Buhar

Hesaplama hücresindeki yerel Reynolds sayısının değerine göre akışın türbülanslı olup olmadığı anlaşılır. Akış türbülanslı ise Dittus-Boelter bağıntısı [17] ve FLECHT-SEASET 161-çubuk testlerinden elde edilen değerin yüksek olanı alınır. Akış laminer ise yine FLECHT-SEASET verisine dayalı olarak Nusselt değeri 10 olarak alınır ve ısı transferi katsayısı hesaplanır [18].

2. Tek-Faz Sıvı

COBRA-TF tek-faz sıvı rejiminde ısı transferi katsayısını Reynolds sayısının değerine göre akış türbülanslı ise Dittus-Boelter bağıntısı, laminar ise en yüksek Nusselt 7,86 olan Sparrow [19]'un bağıntısı kullanarak hesaplar.

3. Kabarcıklı Kaynama

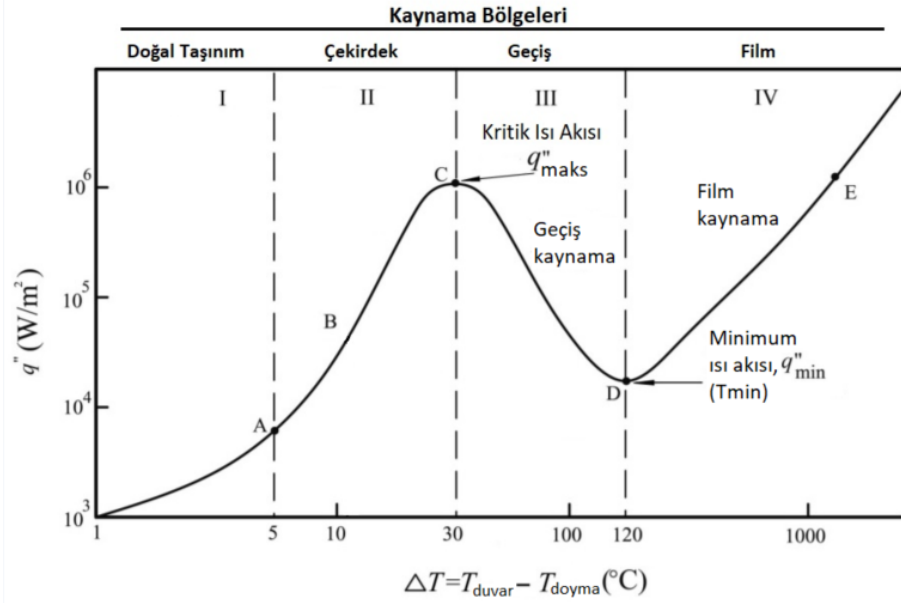
Duvar sıcaklığı doyma sıcaklığı ile Kritik Isı Akısı (KIA) sıcaklığı arasına yükseldiğinde duvardan akışkana ısı transferi için Chen [20] bağıntısı kullanılır. Bağıntı doymuş kabarcıklı kaynama ve basınçlı konveksiyon buharlaşmaya uygulanabilirken düşük duvar sıcaklığında tek fazlı konveksiyon ve düşük akış oranında havuz kaynama bölgelerine otomatik olarak geçebilmektedir. Ayrıca duvar ısı transferinde hem basınçlı konveksiyon hem de havuz kaynamayı hesaba katarak her iki u durumu da kapsamaktadır [21].

4. Doymamış Kabarcıklı Kaynama

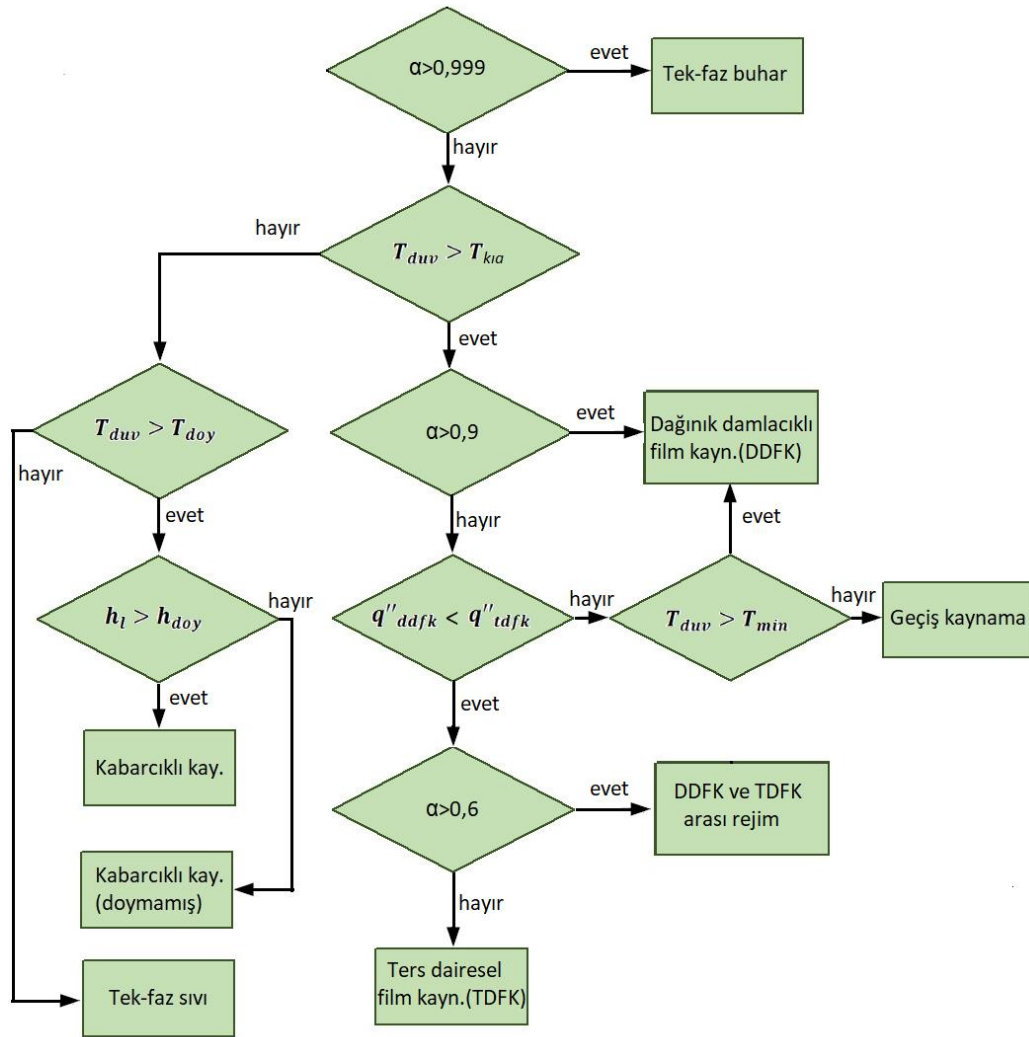
Doymuş kabarcıklı kaynama rejiminde kullanılan Chen bağıntısı termal dengede olmayan kabarcıklı kaynama rejimine de uygulanabilmektedir. Kanal boyunca soğuk sıvıya sıcak kabarcıklardan ısı akışı olduğundan sıvı akışkan sıcaklığı artar. Bu rejimde

- 1- Sıvıya konveksiyon,
- 2- Duvarda buhar retimi,
- 3- Duvara yakın bölgede ve
- 4- Sıvı içerisinde yoğuşma tipi ısı transferi eşitleri bulunur.

1 ve 2 için Chen bağıntısı kullanılıyor. 4 direk olarak enerji denklemlerinden ilgili hücredeki akışkan için elde edilir. 3 için Hancox-Nicoll bağıntısı [22] kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Kaynama eğrisi (1atm).



Şekil 2.4. COBRA-TF'te Isı Transferi Seçim Şeması.

5. Kritik Isı Akısı ve Sıcaklığı

Şekil 2.3'deki kaynama eğrisinde görülen KIA ve sıcaklığının bulunduğu noktayı belirlemek üzere COBRA-TF Zuber [23] bağıntısını kullanır.

6. Geçiş Kaynama

Geçiş kaynama, duvar üzerinde buhar tabakası şeklinde film kaynama ile kabarcıklı kaynama veya sıvının temas edebildiği ıslak duvar karışımı şeklinde tanımlanıyor. Islak duvar kısmı KIA değeri duvara giden damlaları saptayan McCoy ve Hanratty [24] modelini kullanan Ganic ve Rohsenaw [25] ile hesaplanır. Geçiş kaynama duvar ısı akısı, ıslak duvar kısmı ile kuru duvar film kaynama ısı akılarının toplamı ile bulunur.

7. Ters Dairesel Film Kaynama

COBRA-TF'te buhar oranı 0,9'un altında olduğu durumda Dağınık Damlacıklı Film Kaynama (DDFK) ile Ters Dairesel Film Kaynama (TDFK) rejimlerine ait ısı akısı değerleri hesaplanır. Eğer TDFK ısı akısı değeri büyük ise buhar oranının 0,6'dan küçük olduğu durumda kaynama rejiminin tamamen TDFK olduğu varsayılarak iyileştirilmiş Bromley [26] bağıntısı ile ısı transferi katsayıları hesaplanır. Buhar oranı 0,6'dan büyük ise ısı transferi katsayısı DDFK ile TDFK rejimleri için hesaplanan ısı akıları arasında rampa uygulanarak bulunmaktadır.

8. Dağınık Damlacıklı Film Kaynama (DDFK)

DDFK rejimi duvar sıcaklığı KIA sıcaklığı üzerinde ve T_{min} üzerinde ve buhar oranı 0,9'un üzerine çıktığında seçilmektedir. Aynı şekilde DDFK buhar oranı 0,6 ile 0,9 arasındayken de duvar sıcaklığı T_{min} 'den büyük ve DDFK ısı akısı TDFK ısı akısından büyük ise seçilmektedir. DDFK rejiminde buhara konveksiyon ve ışınım şeklinde, buhar içerisindeki dağınık damlacıklara radyasyon ile ve damlacıkların duvara çarpması sonucunda kaynama şeklinde ısı transferleri gerçekleşir. Buhara konveksiyon ile ısı transferi tek-faz buhar bölümünde, ışınım yoluyla ısı transferi bir sonraki bölümde açıklandığı gibi hesaplanır.

COBRA-TF damlacıkların yakıtla temas etmesi ile gerçekleşen ısı transferini RBHT ve FLECHT-SEASET için farklı bağıntılar (Sun [4] ve Forslund-Rohsenow [27]) kullanarak hesap etmektedir.

2.2.3.2. Minimum Film Kaynama Sıcaklığı

Soğutucu kaybı kazasının başlamasıyla nükleer yakıtların artmaya devam eden yüzey sıcaklığı AYS fazında sisteme aşağıdan yukarıya doğru acil durum soğutma suyunun basılması ile düşürülür. Başlangıçta yakıt sıcaklıklarının yüksek olması ve yakıt ile su arasında film şeklinde bir buhar tabakası oluşması sebebiyle film kaynama rejimi gözlenir. Oluşan film, soğutucu sıvının yakıtlara doğrudan temas etmesini engellediğinden yakıtlar ile akışkan arasındaki ısı transferi sınırlı olup yakıt sıcaklıkları yavaş bir şekilde düşer ve T_{min} değerine ulaşır. T_{min} değeri yüksek yakıt yüzeyi sıcaklığının etkisiyle oluşan film kaynama ile daha düşük yüzey sıcaklığında meydana gelen geçiş ve kabarcıklı kaynama rejimlerinin ayrıldığı sıcaklık değeridir. Yüzeydeki sıcaklık T_{min} değerine düştüğünde artık buhardan oluşan film tabakası kaybolmaya başlar ve sıvı akışkan sıcak yakıt yüzeyine temas eder. Böylece geçiş ve kabarcıklı kaynama rejimlerinin oluştuğu ve sıcak yakıtların hızla soğuduğu gözlenir

Şekil 2.3’de verilen kaynama eğrisi sıcak duvar yüzeyindeki sıcaklık ve ilgili basınçtaki akışkanın doyma sıcaklığı farkına göre üretilen ısı akısı değerlerinin çiziminden oluşmaktadır. Şekilde T_{min} noktasının, D noktası ile belirtilen lokal minimum şeklinde oluştuğu, yüzeyde oluşan buhar tabakası sebebiyle film kaynama ve geçiş kaynama rejimlerinin ayrıldığı noktadaki sıcaklık değeri olarak tanımlanmaktadır. Sıcak yakıtların AYS fazında soğutulması söz konusu olduğunda öncelikle kaynama eğrisindeki film kaynama rejimi oluşur (IV). Yüzey sıcaklığı yavaş yavaş azalır D Noktasındaki Minimum Film Kaynama Sıcaklığına gelindiğinde yakıt yüzeyi ile sıvı soğutucu arasındaki buhar tabakası kısmen kaybolmaya başlar, sıvı aralıklarla yüzeye temas eder ve ısı transferi film kaynama rejimine göre nispeten artar (III). Geçiş bölgesinden kabarcıklı kaynama bölgesine geçişte ısı akısının maksimuma ulaştığı C noktasındaki Kritik Isı Akısı (KIA) ve bu noktadaki KIA sıcaklığı görülmektedir. Yüzey soğudukça

T_{min} noktasından itibaren geçiş ve kabarcıklı kaynama rejimlerinde ısı transferinin artmasıyla beraber yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde düşer (II).

Nükleer reaktörlerde daha önce bahsi geçen SKK esnasında soğuk boru hattının kırılarak soğutma suyunun reaktör kabına boşalması senaryosunda sistem otomatik olarak kapanmakta fakat yakıt çubuklarındaki nükleer reaksiyonların azalarak devam etmesi sebebiyle ısı üretimi de devam etmektedir. Sıcaklığı artan yakıtların tekrar su altına alınıncaya kadar geçen kaza süreçlerinde yukarıda bahsi geçen kaynama rejimleri gözlenmektedir. Akışın yeniden sağlanması fazındaki yakıt sıcaklığı davranışının deney verileri ile uyumlu sonuçlar elde edecek şekilde modelleme konusunda MFK sıcaklığının hesaplandığı modelin çok önemli olduğu görülmektedir.

Literatürdeki çalışmalar MFK sıcaklığının basınç, sıvı akışkanın doyma sıcaklığına sayısal olarak yakınlığı (soğukluk derecesi) ve yüzey malzemesinin özelliklerine göre değiştiğini göstermektedir. T_{min} mevcut COBRA-TF içerisinde iki şekilde hesaplanmaktadır. Öncelikle, homojen kabarcıklanma sıcaklığına eşit olduğu varsayılan duvara anlık temas sıcaklığı ile hesaplanır. Homojen kabarcıklanma sıcaklığı da basınca bağlı olarak hesaplanır;

$$T_{hom} = 705.44 - 4.722 \times 10^{-2}(P_{krit} - P) + 2.3907 \times 10^{-5}x(P_{krit} - P)^2 - 5.8193 \times 10^{-9}x(P_{krit} - P)^3 \quad (2-24)$$

Suyun kritik basıncı, P_{krit} , 3203,6 psi'dir. Homojen kabarcıklanma sıcaklığı T_{hom} bu durumda Fahrenheit cinsinden çıkar. Duvar yüzeyinin termal özelliklerinin etkisi ise bir temas sıcaklığı düzeltmesi uygulanarak dâhil edilmektedir.

$$T_{min,hom} = T_{hom} + (T_{hom} - T_l) \left[\frac{(k_p C_p)_l}{(k_p C_p)_w} \right]^{1/2} \quad (2-25)$$

İkinci yöntemde Berenson [28] ifadesinin iyileştirilmiş hali olan Henry modeli ile hesaplanır [29];

$$T_{min,henry} = T_B + 0,42(T_B - T_l) \left\{ \left[\frac{(k_p C_p)_l}{(k_p C_p)_w} \right]^{1/2} \left[\frac{H_{fg}}{C_{pw}(T_B - T_{sat})} \right] \right\}^{0,6} \quad (2-26)$$

$$T_{min}^B = T_{sat} + 0,127 *$$

$$\frac{\rho_v H_{fg}}{k_v} \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{(\rho_f + \rho_g)} \right]^{2/3} \left[\frac{g_c \sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[\frac{\mu_v}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (2-27)$$

Sonuç olarak, COBRA-TF'in orijinal sürümünde ısıtılan yüzeyler için Minimum Film Kaynama sıcaklığının hesaplanmasında aşağıdaki mantık kullanılmaktadır:

$$T_{edfk} = maks \left\{ \begin{array}{l} min \left\{ \begin{array}{l} maks \left\{ \begin{array}{l} T_{min,hom} \\ T_{min,henry} \end{array} \right. \\ 1200 F \\ 900 F \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2-28)$$

Bu durumda orijinal COBRA-TF yazılımında T_{min} en düşük 900 F (482,2 °C) ve en yüksek 1200F (648,9 °C) değerlerini almaktadır.

$$482 \text{ °C (900 °F)} < T_{min} < 650 \text{ °C (1200 °F)} \quad (2-29)$$

Literatürdeki geometri, basınç, sıcaklık ve kullanılan malzemeler açısından nükleer reaktör şartlarına ve tez kapsamına uygun konuyla ilgili yapılan sınırlı sayıda çalışmalar bulunmaktadır. T_{min} değerinin kullanılan malzeme özellikleri, yüzey koşulları, oksitlenme, akışkanın termal özellikleri ve soğukluk derecesi, basınç, akış özellikleri açısından bağımlılığı farklı kişi ve gruplar tarafından araştırılmıştır. Minimum Film Kaynama noktası ile ilgili çalışmalarda ilk olarak Berenson'un [28] 1961 yılında daha önce Zuber [23] tarafından yayınlanan ısı akısı yaklaşımını kullanarak deneysel olarak yatay yüzeyde kaynama için türettiği T_{min} ifadesi göze çarpmaktadır,

$$T_{min}^B = T_{sat} + 0,127 \frac{\rho_v H_{fg}}{k_v} \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{(\rho_f + \rho_g)} \right]^{2/3} \left[\frac{g_c \sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[\frac{\mu_v}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (2-30)$$

Daha sonra Henry, Berenson'un ifadesini, T_{min} 'i etkilediği düşünülen akışkan sıcaklığı, termal akışkan ve malzeme özellikleri gibi parametreleri de içeren aşağıdaki hale getirmiştir [29].

$$T_{min,henry} = T_{min}^B + 0,42(T_{min}^B - T_l) \left\{ \left[\frac{(k_p C_p)_l}{(k_p C_p)_w} \right]^{1/2} \left[\frac{H_{fg}}{C_{pw}(T_{min}^B - T_{sat})} \right] \right\}^{0,6} \quad (2-31)$$

Her iki eşitlikte de buhar özellikleri film sıcaklığında, sıvı özellikleri besleme suyu sıcaklığında ve duvar özellikleri ise yakıt yüzey sıcaklığında alınmaktadır.

Minimum Film Kaynama noktası ile ilgili Bajorek ve Peterson'un yaptığı çalışmada nükleer reaktör şartlarını da kapsayan yüksek basınç altında önce deneysel olarak yakıt yüzeyinde kullanılan malzemenin özellikleri ($k_p C_p$), basınç, akışkanın soğukluk derecesi, yüzey oksitlenmesi ve pürüzlülüğü etkileri incelenmiştir. Deneysel olarak 316 paslanmaz çelik, 1018 karbon çeliği ve zirkonyum-4 alaşımı kullanılmıştır. 0.1 MPa ile 3.0 MPa arasında gerçekleştirilen deneylerde soğutma suyunun T_{min} 'e etkisi doyma sıcaklığından 34 °C altına kadar ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada T_{min} 'i etkileyen parametrelerin incelenmesi ve yüzey pürüzlülüğü terimini de içerecek şekilde aşağıdaki ifade türetilmiştir [30],

$$T_{min} = T_i + 0,095(T_i - T_{\infty}) \left(\frac{R_a}{R_{ref}} \right)^{0,283} \left(\frac{k_p C_p}{k_p C_w} \right)^{0,170} \left(\frac{h_{fg}}{c_w(T_i - T_{sat})} \right)^{0,957} \quad (2-32)$$

Burada T_i terimi aşağıda gösterilen homojen kabarcıklaşma sıcaklığı T_{hom} ile Berenson'un T_{min}^B sıcaklığından küçük olan değeri ifade eder.

$$T_{hom} = T_{krit} \left[0,905 + 0,095 \left(\frac{T_{sat} + 273,15}{T_{krit}} \right)^8 \right] \quad (2-33)$$

$$T_{min}^B = T_{sat} + 0,127 \frac{\rho_v H_{fg}}{k_v} \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{(\rho_f + \rho_g)} \right]^{2/3} \left[\frac{g_c \sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[\frac{\mu_v}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (2-34)$$

Yüzey pürüzlülüğünün, R_a , bilinmediği durumlar için pürüzlülük etkisinin dikkate alınmadığı diğer bir ifade aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

$$T_{min} = T_i + 0,239(T_i - T_\infty) \left(\frac{k_l \rho_l c_l}{k \rho c_w} \right)^{0,250} \left(\frac{h_{fg}}{c_w(T_i - T_{sat})} \right)^{0,832} \quad (2-35)$$

Yakın zamanda Ebrahim ve beraberindekilerin yaptığı diğer bir çalışmada atmosfer basıncında deneysel olarak T_{min} 'i etkileyen soğutucu sıcaklığı, yüzey termal özellikleri ve pürüzlülük parametreleri araştırılmış ve yüksek çözünürlüklü kameralar kullanarak film kaynama olayı görsel olarak da incelenmiştir. Gözlemlenen parametreler yardımıyla T_{min} için genel bir ilişki geliştirilmiş ve elde edilen sonuç aslında Berenson'un ifadesinin üstel çarpan değerlerinin deneysel veriye en-küçük-kareler yöntemi ile en iyi uyuşan hali olarak yayınlanmıştır [31].

$$T_{min}^B = T_{sat} + \quad (2-36)$$

$$0,127 \frac{\rho_v H_{fg}}{k_v} \left[\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{(\rho_f + \rho_g)} \right]^{2/3} \left[\frac{g_c \sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[\frac{\mu_v}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/3}$$

$$T_{min} = T_{min}^B + \frac{3}{2} (T_{min}^B - T_\infty) \left(1 + \frac{R_a}{R_{ref}} \right)^{0,22} \left(\frac{k \rho c_f}{k \rho c_w} \right)^{0,14} \left(\frac{h_{fg}}{c_w(T_{min}^B - T_{sat})} \right)^{0,44} \quad (2-37)$$

(*l*:sıvı, *w*:duvar, *sat*:doyma noktası)

2.2.4. Damlacık Ayrılma ve Yeniden Bağlanma Olayları

Basınçlı Su Reaktörlerinde SKK esnasındaki soğutucu suyun termal-hidrolik açıdan üç farklı alan olarak modellenerek hesaplamalarda kullanıldığı daha önce belirtilmişti. İlki yakıt demeti elamanları üzerindeki film halinde bulunan veya acil durum soğutma amaçlı reaktöre hızla enjekte edilip yakıt demeti boyunca yukarı doğru yükselen “sürekli sıvı” alanı, ikincisi “damlacık” halinde bulunan su kütlesi ve üçüncüsü de “buhar” halinde bulunan alandır. Sürekli sıvı alanından damlacık alanına ayrılma ve damlacıkların sürekli sıvı alanına yeniden bağlanmaları şeklinde kütle geçişlerinin gerçekleştiği varsayıldığından bu olayların kütle, momentum ve ısı transferi açısından hesaplamalarda yer alması gerekmektedir. COBRA-TF’de bu geçişlerin aşağıdaki şekillerde gerçekleştiği varsayılmaktadır [15]:

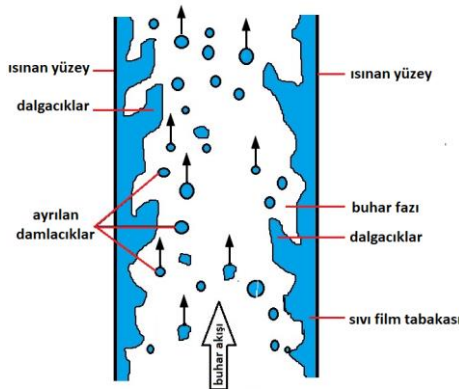
- 1- Yakıt yüzeyi üzerindeki sıvı film tabakasından ayrılan damlacıklar,
- 2- Yakıtların alttan ıslanması esnasında ıslanma kökenli soğutucu su yüzeyinden ayrılan damlacıklar,
- 3- Yakıtların yukarıdan soğutulması için sisteme aşağı yönlü verilen soğutma suyundan ayrılan damlacıklar,
- 4- Yakıt ayıraçlarına çarparak parçalanmış damlacıklar.

İlk üç durumda sürekli sıvı alanından damlacık alanına farklı yollarla geçiş söz konusudur. SKK esnasında reaktördeki soğutucu boşaldıktan sonra sıcak yakıtlar yukarıdan sisteme enjekte edilerek soğutulabilir. Bu durumda 3. maddede yer alan aşağı doğru akan soğutma suyundan sıcak yakıtlardan dolayı sıvının saçılması veya yukarı hareket eden buhar sebebiyle ayrılma söz konusu olur [15]. Dördüncüde ise damlacık alanına herhangi bir geçiş olmamakla birlikte parçalanma kaynaklı damlacık sayısı ve damlacıkların yüzey alanında bir değişiklik gerçekleşmekte, bu durum ise yakıtların soğumasında önem arz etmektedir.

SKK esnasındaki AYS senaryosunda çift fazlı akış ortamının anlaşılması ve doğru bir şekilde modellenmesi için sıvı fazından damlacık alanının ayrılarak yüksek hızlı buhar fazı ile yakıt demetinin yukarı kısımlarına sürüklenmesi olayı önem arz etmektedir. Damlacık ayrılma olayları fazlar arası kütle, momentum ve enerji transferi mekanizmalarını önemli ölçüde etkilemektedir. AYS sürecinde özellikle soğutma suyu

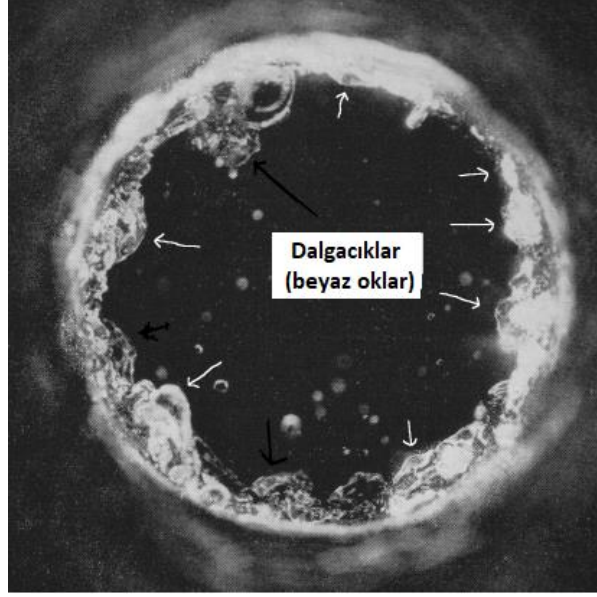
seviyesinin hareketi, konumu, akış rejimi, sıvı kütlesinin aktarımı ve dağılımı, kritik ısı akısı, dağınık damlacıklı akışın yakıt demetinin üst kısımlarındaki soğutucu etkisi önemli rol oynar [32].

Yüzeyin sıvı bir film tabakası tarafından kaplandığı ve merkezde yüksek hızlı buhar içerisinde dağılmış sıvı damlacıkların sürüklendiği akış dairesel çift-fazlı akış, bu akışta gerçekleşen kaynama da dairesel film kaynama olarak tanımlanır. Yüzey sıvı film ile kaplı olduğu için ısı transferi katsayısı yüksektir [33]. Fakat hızla yukarı yönlü hareket eden buhar sıvı film tabakası üzerinde basınç değişimlerine ve buna bağlı küçük dalgaların oluşmasına sebep olur. Oluşan dalgacıklar hızla akan buharın etkisiyle sıvı fazdan koparak damlalar halinde sürüklenirler. Dikey dairesel film kaynama olayı şematik olarak Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



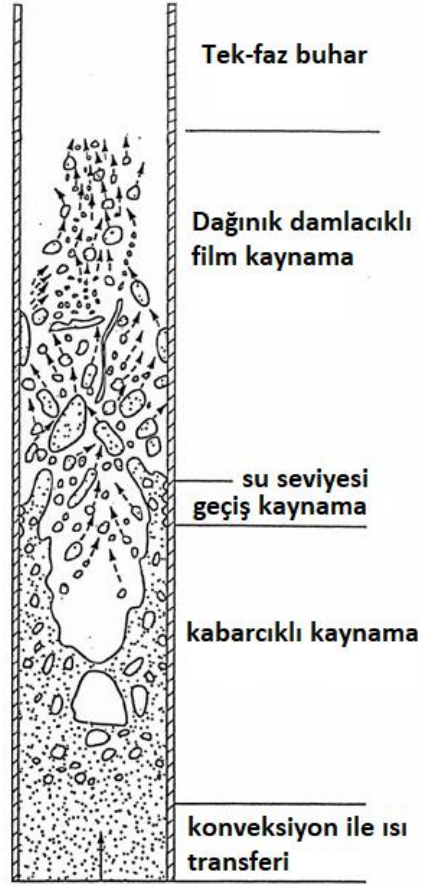
Şekil 2.5. Yukarı Eş-Yönlü Dairesel Film Tabakasından Damlacık Ayrılma Gösterimi.

Damlacıkların ayrılması ve film tabakasının zamanla incelerek yerini buhara bırakmasıyla ısı transferi katsayısında ciddi bir düşüş meydana gelir. Dolayısıyla damlacıkların sıvı film tabakasından ayrılması ile yaşanan fazlar arası geçiş kütle, momentum ve enerji denklemlerini anlamlı bir şekilde etkilemektedir. Dairesel film kaynama rejiminde oluşan dalgacıklara ait Hewitt ve Hall-Taylor [34] tarafından elde edilen fotoğraf Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Dairesel Film Kaynama Rejiminde Damlacıkların Ayrılmasını Gösteren Fotoğraf [34].

AYS esnasında soğutucu kaybı yaşayan reaktöre farklı hızlarda basılan acil durum soğutma suyunun enjeksiyonu, su alt kısımdan yukarıya doğru yükselerek tüm yakıtları kaplayıncaya kadar devam eder. Bu esnada önce film kaynama ve yakıtlar soğudukça geçiş kaynama, sonrasında ise kabarcıklı kaynama rejimi gözlenir. Bu olaylar çok miktarda buhar üretimine ve buharın yüksek hızla hareket ederek sıvı fazından damlacıkların koparak ayrılmasına sebep olur. Film kaynama bölgesinde sıcak yakıt yüzeyinde oluşan buhar tabakasından dolayı soğutucu su ortada alttan gelen çift fazlı bir karışım halindedir. Bu karışım yanlardaki sıcak film tabakasından ve alttan geçiş ve kabarcıklı kaynama rejimlerinden gelen yüksek hızlı buhar sebebiyle parçalanarak damlacıkların oluşmasına ve yukarıya doğru buharla beraber sürüklenmelerine sebep olur. Daha alttaki su seviyesi bölgesinde de alttan ve yanlardan kabarcıklı ve geçiş kaynama rejimlerinden gelen buhar kütlelerinden dolayı sıvı fazından kopan sıvı damlalar buharla beraber yukarı kısımlara sürüklenirler. Soğutma suyu yüzeyinden ayrılan damlacıklar ve ilgili rejimler Şekil 2.7’de temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Soğutma Suyu Yüzeyinden Ayrılan Damlacıkların Gösterimi.

Diğer taraftan damlacık alanından sürekli sıvı alanına yeniden bağlanma süreci ile sıvı kütlesi geçişinin ise aşağıdaki şekillerde gerçekleştiği varsayılmaktadır;

- 1- Ayrılan damlacıkların sıvı film alanına yeniden bağlanması,
- 2- Yanal akış ile bağlanma,
- 3- Alan değişimleri sebebiyle çarparak bağlanma,
- 4- Katı yüzey ve sıvı birikintilerine bağlanma.

2.2.4.1. Literatürde Damlacık Ayrılma ile İlgili Çalışmalar

Berna ve diğerlerinin 2014 yılında yaptığı çalışmada çift-fazlı dairesel akış, dairesel film kaynama ve özellikle damlacık ayrılma konusundaki literatürdeki çalışmalar derlenip değerlendirilmiştir. Dairesel film kaynama ve damlacık ayrılma olaylarını etkileyen sıvı film özellikleri, buhar-sıvı arayüzü ve sıvı damlacıkların film katmanından ayrılma mekanizmaları derinlemesine incelenmiştir. Sıvı film kalınlığı, yüzeyde oluşan

dalgacıkların hızı ve frekansı gibi değişkenler ayrı ayrı geniş bir deneysel veri kümesiyle karşılaştırılarak hem yatay hem de dikey akışları içeren farklı akışkan çeşitleri ve ortam şartlarında film tabakasından damlacık ayrılma modeli için genel bir model türetilmiştir [35]. Yine aynı ekip 2015 yılında ayrılan damlacıkların davranışı ve özelliklerini inceleyerek konuyla ilgili değişkenler için yeni modeller sunmuştur [36]. Her iki çalışmada önerilen modeller akışın zamana bağlı geçiş koşulları için değil fakat zamandan bağımsız, tam gelişmiş veya sabit denge durumuna ulaşmış akış şartları için geliştirilmiştir.

2009 yılında Sawant, Ishii ve Mori tarafından farklı çaplardaki test elemanları ile hava-su ve organik Freon-113 akışkanlarını kullanarak farklı basınç ve buhar-su akış koşullarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde sıvı film ekstraksiyon yöntemi ile damlacık ayrılma oranı, miktarı ve yeniden bağlanma miktarı ölçülmüştür [39]. Çalışmada ayrıca yine aynı ekip tarafından yukarı eş-yönlü dairesel akış için 2008 yılında geliştirilen damlacık ayrılma modeli [40] iyileştirilerek, damlacık ayrılma için kritik gaz ve sıvı akış hızı ile bir başlangıç değerini hesaba katacak hale getirilmiştir. Farklı akışkan çiftleri ile elde edilen tahminler farklı deneysel veri kümeleri ile karşılaştırıldığında tatminkâr sonuçlar elde edilmesine rağmen buhar-su verisi ile elde edilen sonuçların önemli bir çelişki içerdiği ifade edilmiştir.

Ri Zhang, Haixiao Liu ve Mingyang Liu tarafından 2015 yılında yayınlanan bir çalışmada dikey tüplerde zamandan bağımsız, tam gelişmiş veya sabit denge durumuna ulaşmış dairesel akışta film tabakasından ayrılan damlacıklar diğer çalışmalardan farklı olarak olasılık kurgusuna göre modellenmiştir. Merkezdeki türbülent buhar akışında oluşan anaforların film tabakası üzerinden damlacıkları koparması, çapı, taşınması ve filme yeniden bağlanması farklı deneysel veriler kullanılarak istatistiki bir modele uyarlanmış fakat elde edilen sonuçların doğruluğu, modelin karmaşıklığı ve uygulama alanının sınırlı olmasından dolayı daha ileri yöntemlerin geliştirilmesi önerilmiştir [38].

Liu ve Bai tarafından 2017 yılında yayınlanan çalışmada yatay kanallarda yine zamandan bağımsız, olgunlaşmış veya sabit denge durumuna ulaşmış dairesel akış şartlarında fazlar arası yüzeylerde oluşan dalgacıkların ayrılmaya etkisi incelenerek yeni bir model

önerilmiştir. Yeni model ara-yüzlerde oluşan dalgacıkların kritik dalga-boyu, dalga genişliği, hızı ve sonuçta damlacık ayrılma olayına anlamlı bir şekilde etki eden gaz ve sıvı faz akış hızları, hidrolik çap, yüzey gerilimi ve basıncı da hesaba katarak geliştirilmiştir. Literatürdeki mevcut deneysel modeller ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçların hava-su ve buhar-su bazlı dairesel akışlarda $\pm\%25$ sapma ile kullanılabilceği rapor edilmiştir [37].

2.2.4.2. Tezde Değerlendirilen Damlacık Ayrılma Çalışmaları

Damlacık ayrılma ile ilgili literatür özeti olarak verilen bu çalışmalar ve burada değinilmemiş benzerlerinden elde edilen sonuçlar tez kapsamında incelenen büyük kırıklı SKK sürecindeki AYS fazı şartlarına akış yönü, zamana bağımlılık ve deneysel veri ile tutarlılık açısından uygun görünmemektedir. Tez kapsamındaki amaca katkı sağlayabilecek sınırlı sayıda damlacık ayrılma çalışmalara özet olarak bu bölümde değinilmiştir.

Oak Ridge National Laboratory tarafından 2016 yılında yapılan bir çalışmada COBRA-TF'in CTF olarak adlandırılan yeni versiyon içindeki damlacık ayrılma ve yeniden bağlanma modelleri ile diğer kapatma modellerinin deneysel veri karşısındaki tutarlılığı araştırılmıştır [41]. Yapılan çalışmada Wurtz [42] tarafından Riso National Laboratory'de yapılan çalışmadan elde edilen ve literatürde Riso verisi olarak geçen sıvı film akış hızı, damlacık akış hızı, film kalınlığı ve çift-faz basınç kaybının ölçüldüğü tüp ve dairesel geometrilerde buhar/su ile yapılan 250'den fazla deneyin sonuçları kullanılmıştır. Yayımlanan damlacık ayrılma sonuçlarına göre dairesel film rejiminde CTF'in tahminlerinin düşük buhar oranı dışındaki değerlerde oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. CTF yazılımı aynı deneysel çalışma kapsamında önerilen Wurtz'e ait film tabakasından damlacık ayrılma modelini temel almaktadır. Bu tez kapsamında ise CTF yazılımında kullanılan Wurtz temelli filmden damlacık ayrılma modeli ile eski COBRA-TF olarak geçen sürümde kullanılan model aynıdır. Dolayısıyla rapor edilen sonuçlar tezin devamında geçen eski film ayrılma modelinin geçerliliği açısından önem arz etmektedir.

Eski COBRA-TF sürümünde kullanılan film damlacık ayrılma modeli Sugawara [43] tarafından sıvı ve buhar yoğunlukları kullanılarak basınç değişimlerine uygun hale getirilerek iyileştirilmiştir.

$$S_E = 1,07 \left(\frac{\tau_i \Delta h}{\sigma} \right) \left(\frac{u_v \mu_l}{\sigma} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0,4} \quad (2-38)$$

Denklemden τ_i yüzeyler arası kesme kuvvetini, u_v hız, μ_l viskozite ve ρ ise yoğunluğu temsil eder.

Hidrodinamik eşdeğer dalga yüksekliği Δh 'nin kum pürüzlülük parametresi k_s ile hesaplanma mantığı değiştirilmiştir. 2-41'de görüldüğü gibi. gibi Δh buhar koru ile hesaplanan Reynolds sayısının alacağı değere göre uyarlanmıştır.

$$k_s = 0,57t_f + 21,73 \times 10^3 t_f^2 - 38,8 \times 10^6 t_f^3 + 55,68 \times 10^9 t_f^4 \quad (2-40)$$

Denklemden geçen t_f ortalama film kalınlığıdır.

$$\begin{aligned} \Delta h &= k_s & Re_G &> 10^5, \\ \Delta h &= k_s [2,136 \log(Re_G) - 9,68] & Re_G &< 10^5, \\ \Delta h &> 0 \end{aligned} \quad (2-41)$$

Yüzeyden damlacık ayrılma konusunda ise yine eski COBRA-TF sürümünde kullanılan modelin iyileştirilmiş hali Yonomoto [44] tarafından yayınlanmıştır. Yonomoto temelde sıvı damlacıkların doğuş ölçütünü değiştirmiştir. Eski modelde kritik buhar oluşum hızı U_{crit} ve Weber sayısına bağlı olan damlacık oluşumu, jet kararsızlığı teorisi kullanılarak aşağıdaki hale getirilmiştir:

$$\begin{aligned} (\alpha u)_{v,crit} &= \left(\frac{3,57}{C_D} \right) \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_v^2} \right)^{1/4} N_{\mu v}^{1/6} \\ N_{\mu v} &= \frac{\mu_v}{\left(\rho_v \sqrt{\sigma / g \Delta \rho} \right)^{0,5}} \end{aligned} \quad (2-42)$$

$$C_D = \begin{cases} Re < 1000 \Rightarrow \frac{24}{Re} (1 + 0,15Re^{0,687}) \\ Re \geq 1000 \Rightarrow 0,44 \end{cases}$$

$$Re = \frac{\rho_v j_v d}{\mu_v}$$

Sonuç olarak Weber sayısının yerini yüzey gerilimi ile viskozite sayısı almış ve yüzeyden ayrılan damlacık akısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S_E = (\alpha_v^2 u_v)^2 \left(\frac{3,57}{C_D} \right)^{-2} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_v^2} \right)^{-1/2} N_{\mu v}^{-1/3} w_v \quad (2-43)$$

Denklemden α_v , buhar oranı, u buhar hızını, C_D sürüklenme katsayısını temsil eder.

2.2.4.3. Orijinal COBRA-TF Sürümü Damlacık Ayrılma Modelleri

Orijinal COBRA-TF sürümünde çalışmakta olan mevcut damlacık ayrılma modelleri 2002 yılında M. J. Holowach tarafından doktora tezi kapsamında yapılan çalışma ile COBRA-TF'e uygulanmıştır. Çalışmada eski sürümdeki damlacık ayrılma modellerinin deneysel veriye dayalı olduğu, zamana bağlı değişmeyen denge, sabit durum şartları için türetildiği ve boyutsuz değişken grupları ile modellendiği, dolayısıyla zamana bağlı değişen nükleer reaktör şartlarına uymamakla beraber sadece belirli değişken aralıklarında iyi sonuçlar verebildiği belirtilmiştir. Bu gerekçeler ile damlacık ayrılma modelleri fiziksel şartlara ve deneysel sonuçlara daha uygun hale getirerek iyileştirmek amacıyla değiştirilmiş ve COBRA-TF'e uygulanmıştır. Aynı çalışmada, damlacık ayrılma modellerinin değiştirilmesine ek olarak damlacık sürüklenme ve akış rejimi seçim mantığı da değiştirilerek iyileştirilmiştir[32].

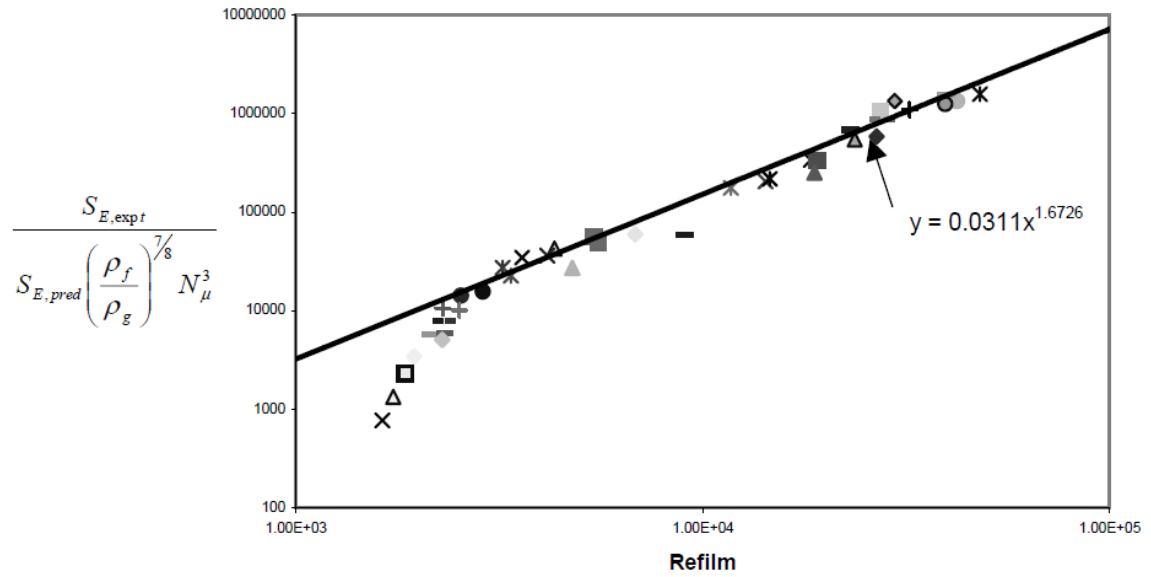
Çalışmada hafif su reaktörlerinin ortam şartlarına özel damlacık ayrılma olaylarından iki tanesine yoğunlaşmıştır. İlki yakıt demeti boyunca yukarıya doğru eş-yönlü hareket eden filmde, yukarı doğru hızla yükselen buhar akışının kopardığı “film damlacık ayrılma” olayıdır. İkincisi ise alttan sıcak yakıtların akışkan ile temas etmesi sebebiyle üretilen buharın hızla yukarı yükselmesi esnasında soğutma suyu yüzeyinden kopardığı damlacıkların ayrılması olayını ifade eden “yüzey damlacık ayrılma” olayıdır. Ayrıca, yakıt yüzeylerinden aşağıya doğru film tabakası halinde akan kütleden yukarı yönlü buhar

akışı sebebiyle ayrılan damlacıkları ifade eden “ters-yönlü film ayrılma” modelinde ise herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Holowach tarafından yapılan çalışmada film damlacık ayrılma oranı öncelikle Kelvin-Helmholtz kararsızlık analizi temel alınarak bağımsız fiziksel değişkenleri içerecek şekilde aşağıdaki şekilde türetilmiştir. Bu ifadeden elde edilecek değer yukarı ve eş-yönlü dairesel akışta elde edilecek mümkün olan en yüksek ayrılma akısı olarak düşünülmüştür.

$$S_E = \frac{V_{entr,w} \rho_f (\bar{u}_{gc} - \bar{u}_f)}{\lambda^3 \sqrt{1 - \alpha_l}} \quad (2-44)$$

Denklemden \bar{u}_{gc} buhar hızını, \bar{u}_f film hızını, ρ_f sıvı film yoğunluğu, V_{entr} ayrılan damlacık hacmini ve λ ise film yüzeyinde oluşan dalga boyunu temsil eder.



Şekil 2.8. Deneysel ve Holowach Modelinin Film Damlacık Ayrılma Değerlerinin Film Reynolds Sayısına Göre Değişimi [32].

Sonraki adımda türetilen denklemden elde edilen değerler deneysel veri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.8). Bu aşamada kullanılan deneysel verinin Hewitt ve Pulling ve Keeys tarafından yayınlandığı aktarılmıştır. Sıvı ve buhar yoğunluklarının oranı ve viskozite sayısı ile tanımlanan basınç düzeltme çarpanı film Reynolds sayısı ile beraber

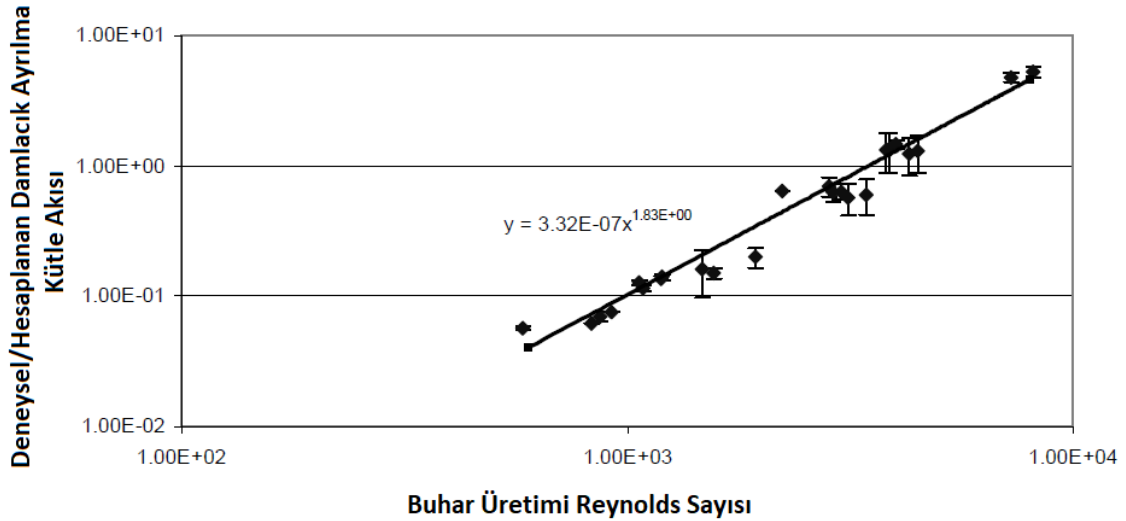
türetilen fiziksel denkleme uygulanmış ve deneysel veri değerleri yardımıyla film damlacık ayrılma akısı için aşağıdaki nihai ifade elde edilmiştir [42].

$$S_E = 0,0311 Re_{film}^{1,67} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{7/8} N_\mu^3 \frac{V_{entr,w} \rho_f (\bar{u}_{gc} - \bar{u}_f)}{\lambda^3 \sqrt{1 - \alpha_l}} \quad (2-45)$$

Yakıt demeti boyunca yukarıya doğru yükselen soğutma suyu yüzeyinden ayrılan damlacık kütlesi oranı film ayrılma modeline benzer şekilde modellenmiştir. Berkeley California Üniversitesi ve REFLEX deneysel verileri öncelikle türetilen ortalama fiziksel modelde kullanılacak hale indirgenmiş, daha sonra bu veri kümeleri fiziksel yüzey ayrılma modeline uyarlanmıştır. Aşağıda ortalama fiziksel model, fiziksel model hesaplama ve deneysel değerlerin grafik çizimi ve deneysel verilerin uygulandığı nihai yüzey damlacık ayrılma akısı modeli verilmiştir [45].

Ortalama değer üreten fiziksel model:

$$S_E = 0,088 \frac{\lambda_{crit} \rho_f P_H^{1/2} (U_{v,crit}^2 + U_{v,bqf}^2)^{1/2}}{A_F} \quad (2-46)$$



Şekil 2.9. Holowach Modelinin Buhar Üretimi Reynolds Sayısına Göre Deneysel Veri/Hesaplanan Damlacık Ayrılma Oranı: Soğutma Suyu Yüzeyinden.

Deneysel veri uyarlanmış yüzey damlacık ayrılma modeli:

$$S_E = C_1 \frac{\lambda_{krit} \rho_f P_H (U_{v,krit}^2 + U_{v,bqf}^2)^{1/2}}{A_F} Re_{v,üre}^{C_2} \quad (2-47)$$

$$C_1 = 1,46 \times 10^{-8}$$

$$C_2 = 1,83$$

Elde edilen film ve yüzey damlacık ayrılma modelleri daha sonra iki-akışkan ve üç-alanlı COBRA-TF yazılımına uyarlanmıştır.

2.2.4.4. Eski COBRA-TF Sürümü Damlacık Ayrılma Modelleri

Orijinal COBRA-TF sürümünün damlacık sürüklenme, akış rejimi seçim mantığı ve bir önceki bölümde özetlenen damlacık ayrılma modelleri Holowach tarafından değiştirilerek güncel haline getirilmiştir. Bu bölümde ise damlacık ayrılma modellerinin bahsi geçen son değişiklikten önceki durumları özetlenmiştir.

Orijinal sürümden önceki COBRA-TF'te yukarı yönde film ve buhar akışının eş-yönlü hareket ettiği ters dairesel film kaynama esnasında yakıt üzerindeki film tabakasından ayrılan damlacık miktarı Wurtz [42] modelini temel almış ve Paleev ve Filippovich tarafından aşağıdaki hale getirilmiştir [15].

$$S_E = 0,41 \left[\frac{k_s \tau_i \vec{U}_v \mu_l}{\sigma^2} \right] P_w \Delta X \quad (2-48)$$

Pürüzlülük k_s ve yüzeyler arası kesme stresi τ_i ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_s = 0,57 t_f + 21,73 \times 10^3 t_f^2 - 38,8 \times 10^6 t_f^3 + 55,68 \times 10^9 t_f^4$$

$$\tau_i = \frac{f_i \rho_v u_{vi}^2}{2} \quad (2-49)$$

$$t_f = D_h \alpha_l / 4$$

Yüzeyler arası sürtünme çarpanı f_i , kararlı film akışta Wallis [47] bağıntısı, kararsız film akışta ise Henstck ve Hanratty [47] bağıntısı ile hesaplanmaktaydı.

Soğutma suyu yüzeyinden ayrılan damlacık akışı orijinal COBRA-TF'in eski sürümünde Kataoka, Ishii ve Mishima [48] tarafından, üretilen buharın etkisiyle yüzeyden koparak ayrılma şeklinde tasarlanan modeli temel almakta olup COBRA-TF'te aşağıdaki gibi modellenmiştir.

$$S_E = \left(\alpha_v \frac{U_v}{U_{krit}} \right)^2 \dot{m}_v \quad (2-50)$$

Modelin COBRA-TF'teki hali aşağıda verilmiştir:

$$S_E = 1,5 * \min \left[2,5, \left(\frac{U_v}{U_{krit}} \right)^2 \right] \dot{m}_v \quad (2-51)$$

U_{krit} ise çapı Weber kriteri ile tanımlanan damlacığı yerçekimi karşısında kaldırmak için gerekli dikey buhar hızıdır.

$$U_{krit} = \left(\frac{4We_d}{3C_{D,d}} \right)^{1/4} \left(\frac{\sigma g^2 \Delta \rho}{\rho_v^2} \right)^{1/4} \quad (2-52)$$

$$We_d = \frac{\rho_v u_v^2 D_d}{\sigma}$$

Literatürde Weber sayısı için farklı değerler yayınlanmış olup COBRA-TF'te bu değer 2,0, sürüklenme katsayısı C_D ise 0,45 olarak kullanılmıştır.

Son olarak aşağıdaki ifadeyle ayrılan damlacık oranından hesaplama hücreğine giren damlacık akış oranı çıkarılmış ve düşük sıvı buhar oranını hesaba katan başka bir çarpan ilave edilmiştir.

$$S_E = \max[0, S_E - \dot{m}_e] * \min[1, 5\alpha_L] \quad (2-53)$$

SKK senaryosunda kritik güvenlik ölçütlerinin aşılmasını engelleyecek sistemlerin AYS fazındaki davranışı nükleer reaktör tasarımlarına yön veren son derece önemli bir unsurdur. Bu sebeple bir yandan AYS fazının derinlemesine analiz edilerek tüm yönleriyle anlaşılması amacıyla deneysel araştırmalar gerçekleştirilmekte, diğer yandan elde edilen deneysel veriler ışığında süreçlerin modellenerek en-iyi tahmin yazılımlarıyla kolay ve ucuz bir şekilde aynı sonuca ulaşmak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu bölümde farklı çevrelerce nükleer sistem analizi amacıyla kullanılan onlarca en-iyi tahmin yazılımından biri olan COBRA-TF'in geniş ortam şartları, sınır ve başlangıç koşullarındaki tahminlerinin iyileştirilmesi konusunda yapılan literatür taraması özet olarak sunulmuştur. Tarama sonucunda benzer iyileştirme çalışmalarının yaygın bir şekilde yapılmakta olduğu ve tespit edilen eksikliklerin bağlantılı olduğu yazılım/model bileşenleri ile ilgili örnek olabilecek çalışmalar özetlenmiştir. Sonraki bölümlerde tez kapsamında kullanılacak deneysel veri ile ilgili detaylar ve COBRA-TF tahminlerinin deneysel veri ile örtüşmediği şartlar, davranışlar, tutarsızlığa sebep olan bileşenlerin tespit edilmesi ve iyileştirilmesi konuları ayrıntılarıyla verilmiştir.

3. AYS DENEYLERİ VE COBRA-TF MODELLEMELERİ

Soğutucu Kaybı Kazası esnasında reaktör içerisindeki suyun boşalması sonucu sıcaklığı artan nükleer yakıtlara AYS fazında soğutucu su uygulanır. Doymamış su akışı ile sıcak yakıtların soğutulması zamana bağlı oldukça karmaşık bir ısı transferi sürecidir. Nükleer reaktör gibi karmaşık bir geometri içerisinde buhar üretimi sonucu yaşanan faz değişimi ve buna ilişkin kütle, momentum ve enerji transferi olayları söz konusu olmaktadır. Güvenlikle ilgili kaygılar ile beraber bahsi geçen fiziksel olaylar zincirinin detaylarıyla anlaşılması ve muhtemel riskleri azaltmak için gerekli önlemlerin alınması konusunda çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, meydana gelen fiziksel olayların modellenmesi ve geliştirilen modellerin en-iyi tahmin yazılımlarıyla doğrulanması amacıyla kullanılan oldukça değerli bilgiler elde edilmektedir.

3.1. AYS Deneyleri

Tez kapsamında COBRA-TF ile yapılan AYS modellemelerini doğrulamak amacıyla yakıt ayırıcı içeren yakıt demeti deneylerinden birçok araştırmacı, grup ve kuruluşça yaygın bir şekilde kullanılmakta olan iki adet deneysel veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki tasarıma esas SKK esnasındaki AYS fazı ile ilgili 1970'lerde FLECHT-SEASET (Full-Length Emergency Core Heat Transfer Separate Effects and Systems Effects Tests) adıyla bloklanmamış ve tam-boy yakıt demeti ile acil durum reaktör ısı transferi olaylarının Westinghouse ve Amerikan Nükleer Düzenleme Kurumu (NRC) tarafından araştırıldığı deneylerdir. Farklı değişkenlerin etkileri ve sistemin fiziksel kütle dengesi, akış özellikleri ve ısı transferi üzerindeki tepkilerini incelemek amacıyla BSR tipi reaktörlerde nükleer yakıt demetini temsilen (Westinghouse 17x17 demetine benzer) kullanılan elektrik ısıtıcılı çubuklar basınçlı veya doğal taşınımlı akış uygulanarak AYS deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yakıt çubuğu zarf (yüzey) sıcaklığı, ıslanma zamanı, ısı transferi katsayısı, giriş su hızı, genel kütle dengesi, test bölümünde basınç diferansiyeli ve buhar oranı, duvar ve buhar sıcaklığı, çıkış buhar ve sıvı miktarı verilerini kapsamaktadır [49].

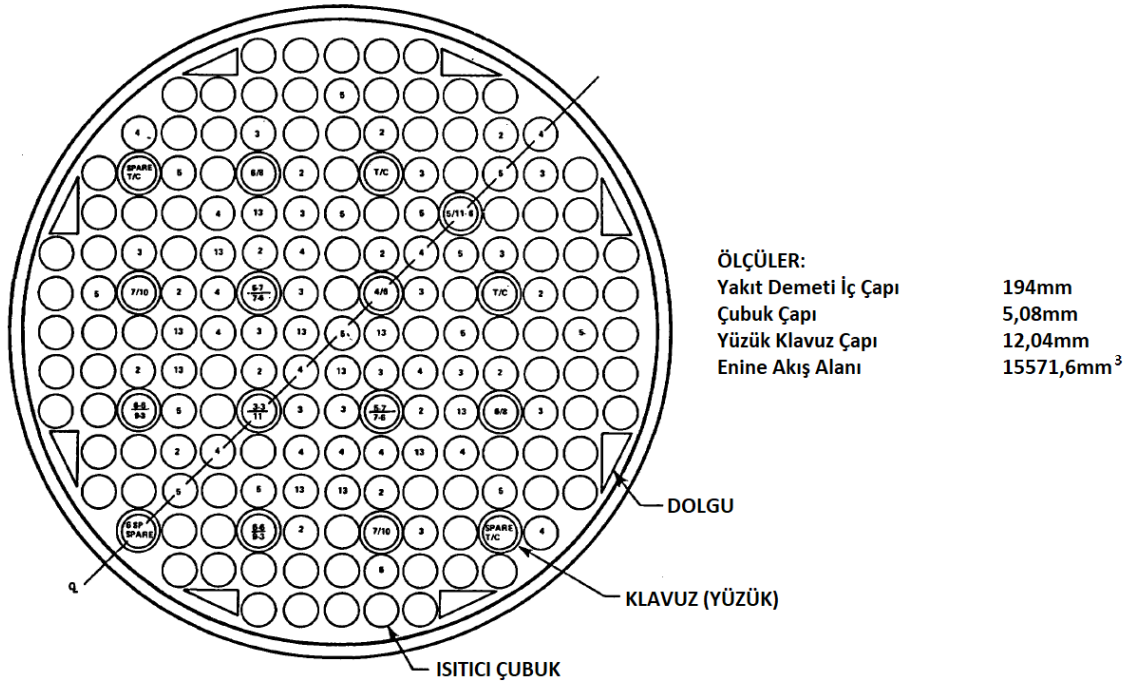
Yakın zamanda Amerikan Nükleer Düzenleme Kurumu ve Penn State Üniversitesi tarafından gerçekleştirilen RBHT (Rod Bundle Heat Transfer) deneyleri bu tez kapsamında COBRA-TF modellerinde yapılan değişiklikleri doğrulama amacıyla kullanılacak ikinci veri kümesidir. Geniş sınır ve başlangıç koşullarında yapılan deneyler

sonucunda elde edilen veri dairesel ve dağınık damlacıklı rejim gibi akış şartları ve ısı transferi olaylarını AYS sürecinde yazılım doğrulama ve yakıt ayıracı etkilerini inceleme fırsatı sunmaktadır. Kullanılacak ikinci veri aynı zamanda tez kapsamında yapılan çalışmaların bağımsız bir deney kümesi ile karşılaştırılarak doğrulanması imkânı sağlayacaktır [50].

Bu bölümde FLECHT-SEASET ve RBHT çalışmalarına ait detaylar ve tez kapsamında kullanılacak deneyler ile ilgili açıklamalar yer almaktadır. Kullanılacak deneyler COBRA-TF yazılımında yapılan iyileştirme çalışmalarının sonuçlarını ortaya koyacak şartlarda seçilmiştir. Ayrıca bölüm sonunda her iki deney çalışması arasındaki farklar sunulmuştur.

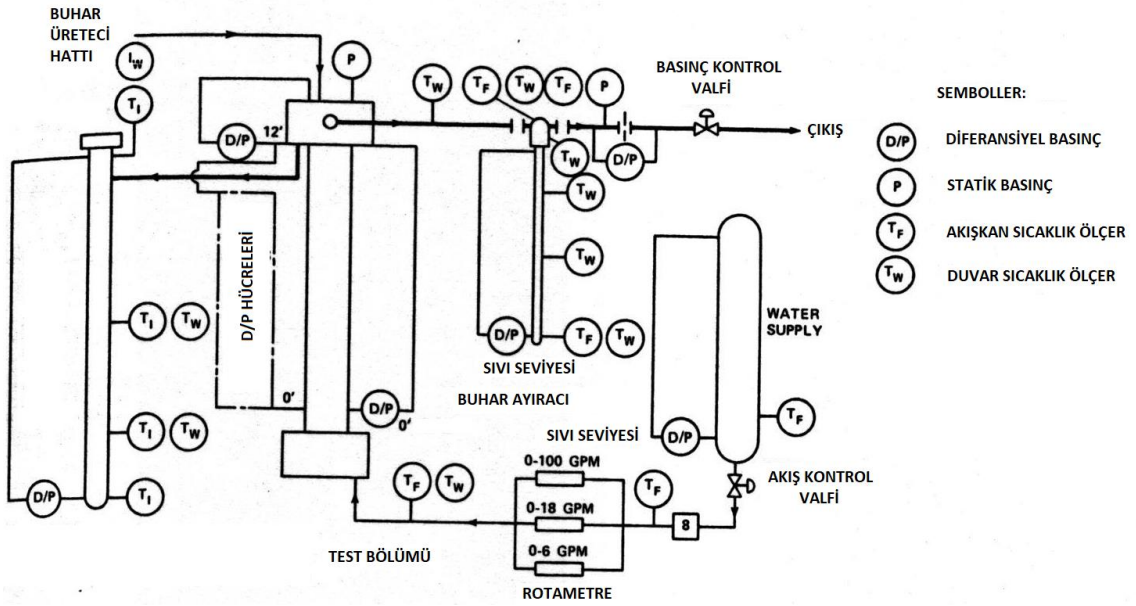
3.1.1. FLECHT SEASET Deneyleri

Tipik bir BSR yakıt demeti boyutlarında tasarlanan ısıtıcılı çubuklar ile gerçekleştirilen FLECHT SEASET deneylerinde pompa veya doğal taşınımli akış uygulanarak AYS fazı ve buhar soğuma şartları sağlanmıştır. AYS tahminlerini geliştirmek için bir veritabanı oluşturmak amacıyla yapılan deneylerde 161 adet içten elektrikle ısıtılmalı çubuktan oluşan demette akışı engelleyecek blok kullanılmamıştır. Çubuklara eksenel yönde maksimum/ortalama oranı 1,6 olan kosinüs güç uygulanmıştır. Yakıt demeti boyunca Paslanmaz Çelikten (PÇ) 50 cm aralıklarla 8 adet yakıt ayıracı kullanılmıştır [49]. Yakıt demetinin enine kesiti ve bazı ölçüler Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. FLECHT SEASET Yakıt Demetinin Enine Kesiti [49].

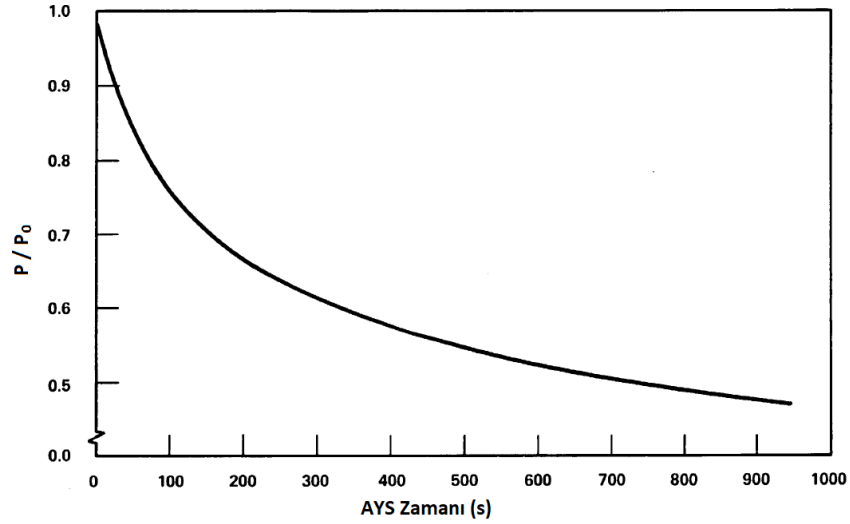
Deney düzeneği yakıt demetinin altında alt-su haznesi, yukarıda üst-su haznesi ve buhar sıvı ayırıcı, sıvı biriktirme tankı ve su enjeksiyon sistemi barındırmaktadır. Tam çevrim deney düzeneği Şekil 3-2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. FLECHT SEASET Deney Akış Şeması [51].

Isıtıcı çubuklar 1383 K sıcaklığa, yakıt demeti ise 413 kPa basınca erişebilmektedir. Ayrılan damlacık boyutu, dağılımı ve hızları yüksek hızlı siyah-beyaz filmler ile ölçülmüştür [4].

Yakıt demetine uygulanan maksimum/ortalama güç değeri 1,6 olan kosinüs güç dağılımı FLECHT SEASET deneylerinde gerçek sistemlerde reaktörün kapanmasıyla beraber fizyon ürünlerinin enerji üretimine devam etmesini temsilen deney başlangıcı ile beraber zamana bağlı bozunarak azalacak şekilde uygulanmıştır. Şekil 3-3'de güç bozunumu eğrisi verilmiştir. Deneyde kullanılan ısıtıcı çubuklar içerisinde radyal güç dağılımı sabittir.



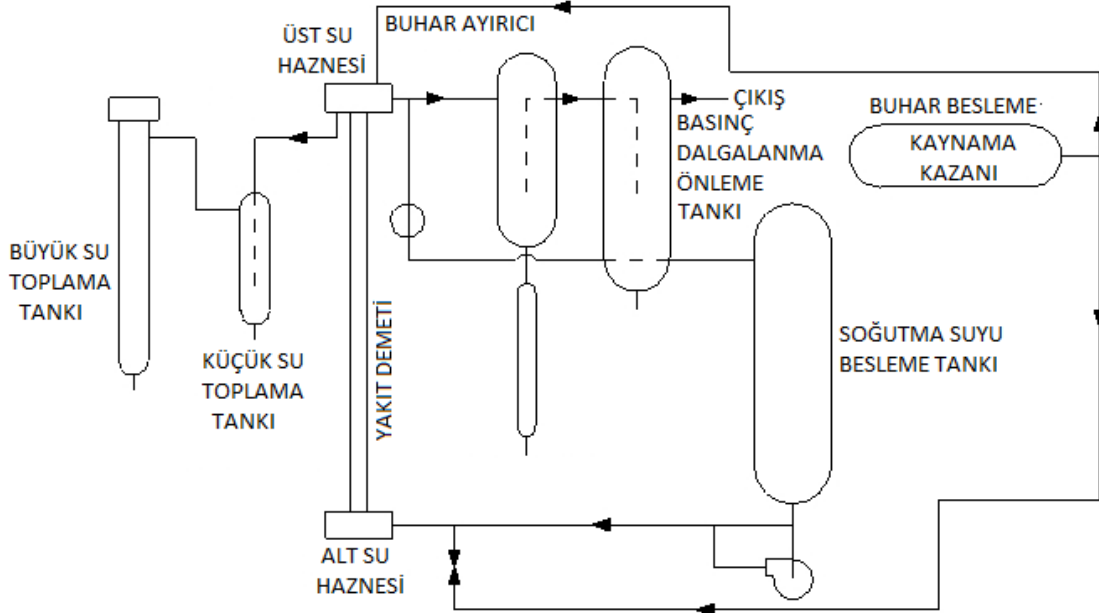
Şekil 3.3. FLECHT SEASET Güç Bozunumu Eğrisi [49].

3.1.2. RBHT Deneyleri

RBHT programı bilgisayar yazılımları ile model geliştirme ve doğrulama amacıyla geniş çevre ve ortam koşullarını içeren AYS fazındaki termal-hidrolik davranışı incelemek ve yüksek kalitede deneysel veri elde etmek için gerçekleştirilmiştir. AYS fazı deneyleri geniş bir basınç, akış hızı, giriş sıcaklığı ve güç aralığında yapılmış olup gelişmiş veri toplama donanım ve cihazları kullanılmıştır. Film kaynama zamanının artırılarak AYS sürecinin uzatılması ile model geliştirme ve doğrulama işlemlerinin daha kolay olacağı düşünüldükçe ısıtıcı çubuklara sabit güç değerleri uygulanmıştır. Deney tesisatı sistemli bir şekilde birbirinden bağımsız etkilerin incelenerek çift-faz akış, damlacık enjeksiyonu olan ve olmayan buhar üretimi, ters dairesel film kaynama ve dağınık damlacıklı film

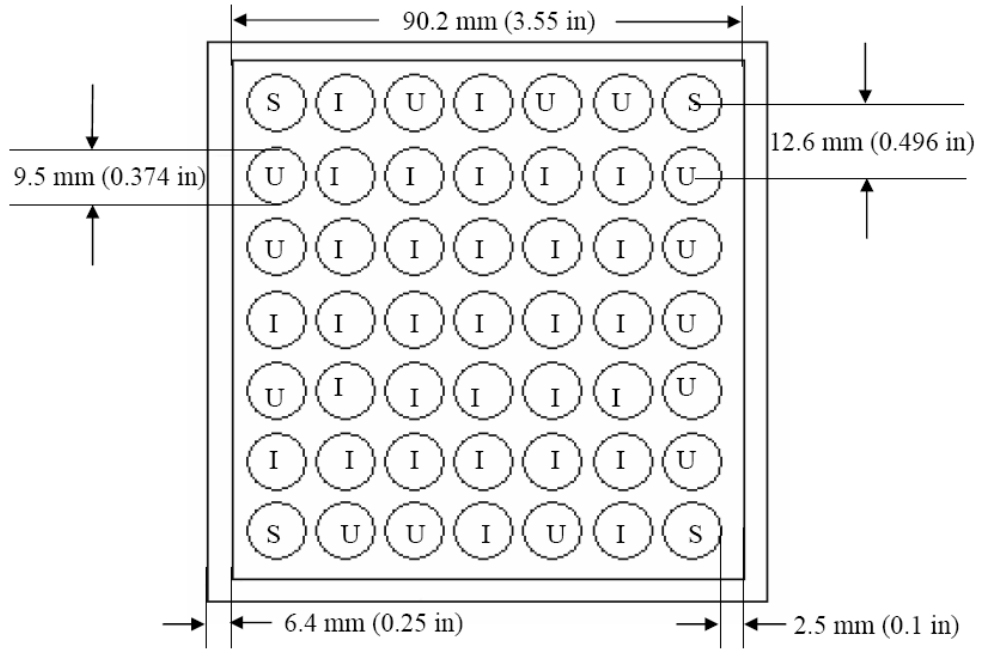
kaynama testlerinden temel yakıt demeti ısı transferi verisi elde edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Deneyler 100 kPa ile 4.2 MPa basınç aralığında, geniş akış hızları ve ısı transferi şartlarında yapılmıştır.

RBHT Deney tesisatı Şekil 3.4'te gösterilen alt ve üst su hazneleri ile beraber aradaki ısıtıcı çubuk demetinin yer aldığı test bölümü, soğutucu su ve buhar besleme tankı, sıvı buhar ayırıcı, sıvı toplama tankları, basınç dalgalanma önleme sistemi ve buhar çıkış hattından oluşmaktadır. Deney tesisatı tek yönlü çalışmakta olup alt su haznesinden giren akışkan yukarı doğru ısıtıcı çubuklar boyunca yükselmektedir. Alt su haznesinde soğutucu su AYS fazı için biriktirilip üst su haznesinde ise çubuk demetinden çıkan çift fazlı karışıma faz ayırma işlemi uygulanmaktadır.

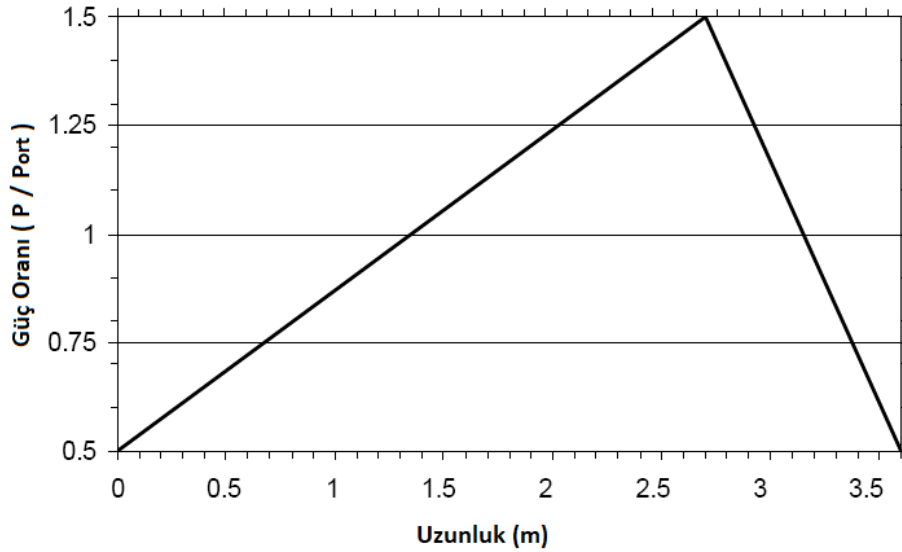


Şekil 3.4. RBHT Deney Akış Şeması [50].

Şekil 3-5'te tipik 17x17 BSR nükleer yakıt demetini temsilen deneylerde kullanılan ısıtıcı çubuk demetinin enine kesiti ve ölçüleri verilmiştir. Demette bulunan 45 adet ısıtıcı çubuğa ilave olarak köşelerde 4 adet ısıtıcı içermeyen ve demete yapısal destek sağlayan çubuklar bulunmaktadır. Çubuklar 3,66 m uzunluğundadır ve dış kısmı inconel 600 alaşımdan oluşmaktadır. Isıtıcılara uygulanan güç profili radyal yönde sabit, aksinel yönde ise üst tarafta tepe noktasına ulaşır, maksimum/ortalama güç değeri 1,5'tir. Aksinel yönde uygulanan güç profili Şekil 3-6 da verilmiştir [50].



Şekil 3.5. RBHT Çubuk Demeti Enine Kesiti [50].



Şekil 3.6. RBHT Isıtıcı Çubuklara Uygulanan Eksenel Güç Profili [50].

FLECHT SEASET ve RBHT deneylerinin her ikisi de AYS fazı yakıt demeti testleridir fakat analizlerde, yazılım modelleme ve doğrulama çalışmalarında hesaba katılması gereken bazı farklılıklar bulunmaktadır. RBHT deneylerinde çubuklara uygulanan güç profili demetin üst tarafında maksimuma ulaşacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca FLECHT SEASET deneylerinde uygulanan güç seviyesi bozularak azalmaktadır. RBHT’de ise sabit güç uygulandığından AYS deney süreçleri daha uzundur. Tez

kapsamında COBRA-TF tahminleri ile karşılaştırma yapmak için seçilen 2 adet FLECHT SEASET ve 6 adet RBHT deney bilgileri ve açıklamaları 4. Bölümde verilmiştir.

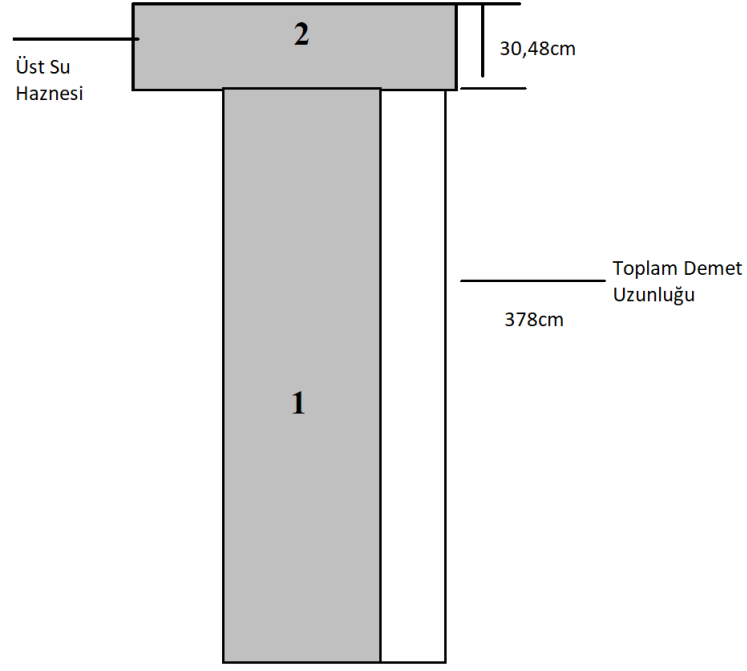
Ayrıca FLECHT SEASET ve RBHT deney verilerine ait ölçüm hataları ilgili dokümanlarda rapor edilmiştir. RBHT Deneylerinin gerçekleştirilmesi ve veri elde etme süreçlerinde kullanılan ölçüm cihazları ve veri kayıt sistemleri ile ilgili hata analizleri ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Yayınlanan analizlere göre deney düzeneğinde buhar ile farklı yüzeylerde ve konumlarda kullanılan sıcaklık ölçen cihazlar için 10 – 1371 °C aralığında $\pm 1,11$ °C, veri kayıt sistemleri için ise farklı kanallar için 0,2 ile 0,4 °C arası ölçüm hatası rapor edilmiştir [50]. Aynı durum FLECHT SEASET deneylerinde sıcaklık ölçümlerinde kullanılan cihazlar ve kayıt sistemleri için -17,8 – 1316 °C aralığında en yüksek $\pm 4,16$ °C olarak belirtilmiştir [49].

3.2. COBRA-TF Kod Girdileri

DeneySEL veri ve orijinal COBRA-TF sürümü tahminleri üzerine bu çalışmada yapılan iyileştirmeler ile sağlanan gelişmelerin karşılaştırmalı olarak sunulması için FLECHT SEASET ve RBHT deneylerini modelleyen kod girdileri hazırlanmıştır. FLECHT SEASET ve RBHT deneyleri için ayrı ayrı hazırlanan kod girdileri genel hatlarıyla bu bölümde açıklanmış fakat her bir deney düzeneği ile farklı şartlarda birçok deney gerçekleştirildiğinden, tez çalışmasında kullanılan kod girdileri sınır ve başlangıç koşulları açısından farklılıklar içermektedir. Bu farklılıklar ile iyileştirilen COBRA-TF sürümünden elde edilen sonuçların geniş ve değişik açılarla doğrulanmasını hedeflemektedir. Karşılaştırmalarda kullanılan deneylere ait özellikler ile sınır ve başlangıç koşullarına ilgili bölümlerde değinilmiştir.

3.2.1. RBHT Deneyleri için COBRA-TF Modellemesi

Analizlerde kullanılan COBRA-TF kod girdilerinde yakıt demeti tek kanal olarak tanımlanmıştır. RBHT tasarımında tek kanal modeli 45 adet ısıtıcı ve köşelerde 4 adet ısıtıcı içermeyen 7x7 çubuk düzeninden oluşmaktadır. Şekil 3-7’de model gösterimi verilmiştir. Birinci bölümde 3,66 m (144 inç) uzunluğundaki ısıtıcılı ve 12,7 cm (5 inç) ısıtıcı içermeyen çubuklar ve ikinci bölümde ise üst su haznesi modellenmiştir.



Şekil 3.7. RBHT Geometrisinin COBRA-TF ile Modellenmesi [4].

COBRA-TF kod girdisinde ısıtıcılı ve ısıtıcı içermeyen çubuklar ile çubuk demeti etrafını saran çerçevenin modellenmesi için 3 adet geometri kullanılmıştır. Isıtıcı çubuklar silindirik *hrod* tipi ile içten dışa doğru bor nitrür, monel K-500 alaşımı, yine bor nitrür ve inconel 600 alaşımı malzemeleri ile tanımlanmıştır. Isıtıcısız çubuklar ise *tube* geometrisi ve inconel 600 malzemesi ile oluşturulmuştur. Çubuk demetinin etrafını saran çerçeve, enine kesit alanı ve ıslak çevre uzunluğu 4 adet kenarın toplamına denk bir duvar (*wall*) olarak tanımlanmıştır.

Dikey yönde toplam 32 adet hesaplama hücresi daha hassas sonuçlar elde edilmesi için rafine seçeneği ile oluşturulmuştur. Demette 7 adet yakıt ayırıcı olacak şekilde tanım yapılmıştır. Dikey yönde demete uygulanan sabit güç profili Şekil 3-8’de verilmiştir. RBHT-1383 Nolu deney için modellenen AYS fazı COBRA-TF kod girdisi Ek-1’de, 1383 deneyi sınır ve başlangıç koşulları ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.

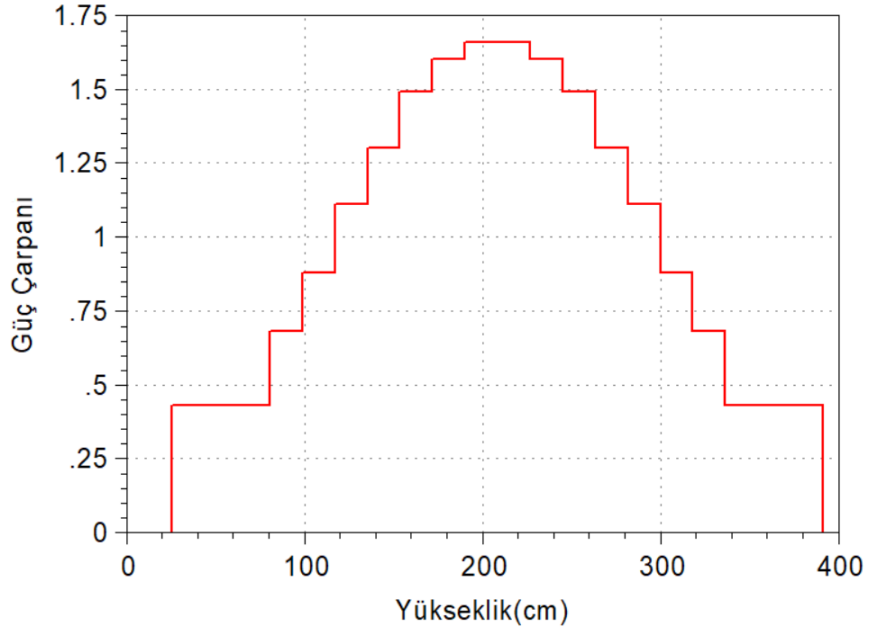
Parametre	Değer
Üst Hazne Basıncı	0,27 MPa
Başlangıç Yakıt Yüzeı Sıcaklığı (2.74m)	1040 K
Çubuk Maksimum Gücü	1,3 kW/m
Soğutma Suyu Hızı	25,4 mm/s
Soğutma Suyu Sıcaklığı	393 K

Çizelge 3.1: RBHT 1383 Deneyi Sınır ve Başlangıç Koşulları [50].

3.2.2. FLECHT SEASET Deneyleri için COBRA-TF Modellemesi

Analizlerde kullanılan COBRA-TF kod girdilerinde yakıt demeti tek kanal olarak tanımlanmıştır. FLECHT SEASET tasarımında tek kanal modeli 161 adet ısıtıcı ve 16 adet ısıtıcı içermeyen çubuk demetinden oluşmaktadır. İki bölümden oluşan modelin birinci bölümünde 1 kanal olup ısıtıcı kısmı ve tüm çubukları içermektedir. Isıtıcı çubuklar silindir geometride *hrod* tipi ile içten dışa doğru bor nitrür, monel K-500 alaşımı, yine bor nitrür ve Paslanmaz Çelik 316 (PÇ-316) malzeme özellikleri kullanılarak tanımlanmıştır. Isıtılmayan çubuklar *tube* tipi ile tanımlanıp paslanmaz çelik 316 malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çubuk demetinin etrafını saran çerçeve, enine kesit alanı ve ıslak çevre uzunluğu 4 adet kenarın toplamına denk bir duvar (*wall*) olarak PÇ-316 malzeme özellikleri ile tanımlanmıştır.

Radyal yönde 18 adet, dikey yönde toplam 28 adet hesaplama hücresi daha hassas sonuçlar elde edilmesi için rafine seçeneği ile oluşturulmuştur. Demette eşit aralıklarla 8 adet yakıt ayırıcı tanımı yapılmıştır. Dikey yönde demete uygulanan sabit güç profili Şekil 3-9'da verilmiştir. FLECHT SEASET 31504 deneyi sınır ve başlangıç koşulları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir. 31504 Deneyi COBRA-TF modellemesi ise Ek-2'de verilmiştir.



Şekil 3.8. FLECHT SEASET Modellemesinde Uygulanan Güç Profili.

Parametre	Değer
Üst Hazne Basıncı	0,28 MPa
Başlangıç Yakıt Yüzeyi Sıcaklığı (2.74m)	1136 K
Çubuk Maksimum Gücü	2,3 kW/m
Soğutma Suyu Hızı	25,6 mm/s
Soğutma Suyu Sıcaklığı	324 K

Çizelge 3.2: FLECHT SEASET 31504 Deneyi Sınır ve Başlangıç Koşulları [49].

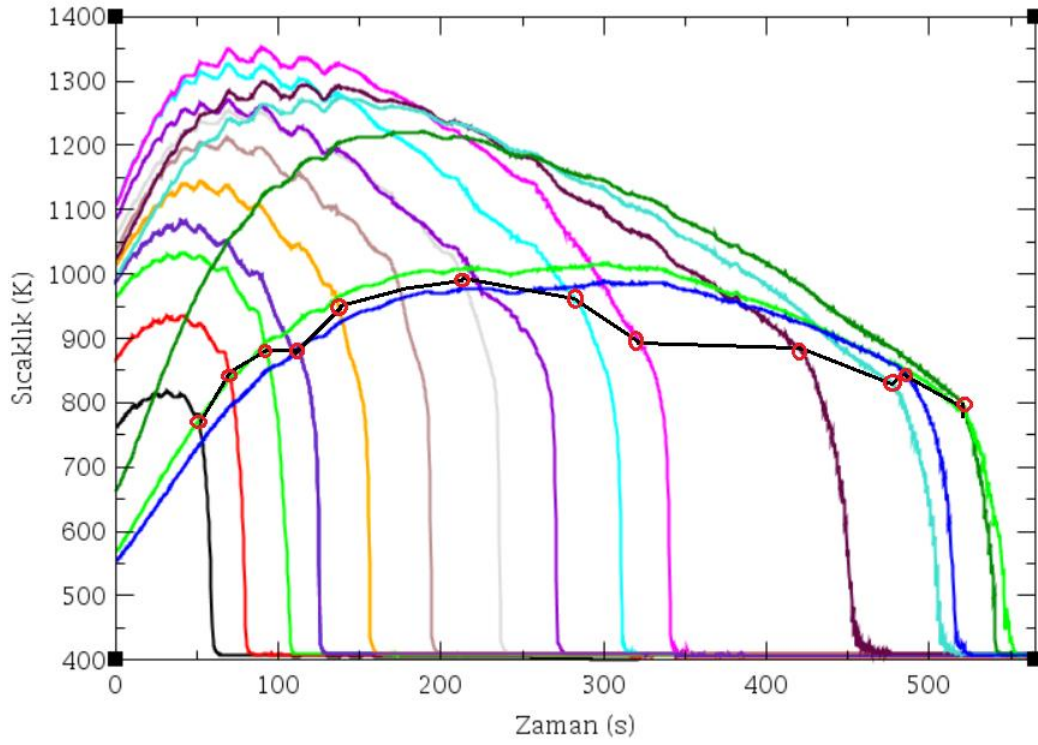
4. T_{min} MODEL DEĞİŞİKLİĞİ VE DENEYSEL VERİ İLE KARŞILAŞTIRMA

SKK sürecinde artan yakıt yüzeyi (zarf) sıcaklığının AYS fazında yakıtlara uygulanan soğutucu su ile güvenli bölgede kalması sağlanır. Nükleer reaktör tasarımlarına temel teşkil eden senaryo kısa süre içerisinde ani basınç değişimi, sıcak yakıtlar, doymamış su ile soğutma işlemi, yüksek oranda üretilen buhar, saçılan sıvı damlacıklar ve çift fazlı akış gibi aşırı değerler ve karmaşanın hâkim olduğu bir ortamdır. Modellemelerde sıcak yakıtların hızla soğutulması esnasında zaman ve konuma göre hangi kaynama rejiminin geçerli olduğunun belirlenmesinde kullanılan Minimum Film Kaynama (T_{min}) sıcaklığı, yakıtların sıcaklık ve soğutucu su ile ıslanma davranışının doğru bir şekilde tahmin edilmesinde önemli bir rol oynar. Tasarım analizlerinde T_{min} değeri, AYS fazında üretilen buhar miktarını ve buna bağlı olarak yakıtların tamamen su altında kalma süresini etkilemektedir. Bu sebeple T_{min} değerinin yanlış hesaplanması reaktöre basılacak soğutma suyunun süresi ve miktarından dolayı Acil Durum Soğutma Sistemlerinin tasarımını da doğrudan etkilemektedir. Bu bölümde orijinal COBRA-TF yazılımının literatür taramasında detayları verilen T_{min} modeli ile ilgili tespit edilen sorunlar, iyileştirme çalışmaları ve sonrasında elde edilen yeni sürüm tahminlerinin deney verisi ile karşılaştırmaları verilmiştir.

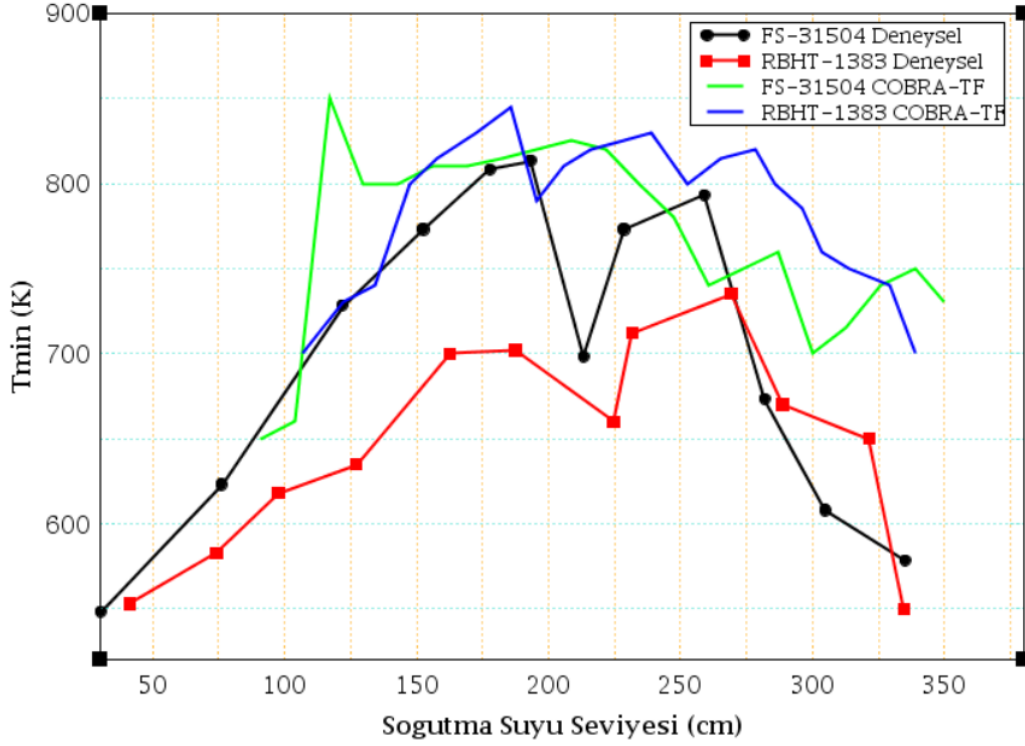
4.1. Mevcut T_{min} Modelinin Geçerliliği

Orijinal COBRA-TF içerisindeki minimum film kaynama modeline göre T_{min} en az 482°C değerini alabilmektedir. Fakat aynı şartlarda konuyla ilgili yapılan çalışmalar ve deneylerde T_{min} değerinin daha düşük değerler alabildiği bilinmektedir. T_{min} değeri yazılımda kaynama eğrisindeki geçiş kaynama ve film kaynama bölgelerini ayırmakta kullanıldığından, zamana ve pozisyona bağlı olarak ısı transferi ve yakıt yüzeyi ıslanma değerlerini güçlü bir şekilde etkiler. T_{min} değerinin gerçek değerlerden yüksek tahmin edilmesi yakıt yüzeyinde geçiş ve kabarcıklı kaynama rejimlerinin oluşmasına, dolayısıyla yakıtın hızla ıslanarak sıcaklığın düşmesine sebep olmaktadır. T_{min} değerinin düşük hesaplanması durumunda ise film kaynama rejiminin baskın olduğu, dolayısıyla yakıtın ıslanmasının gecikerek yakıt yüzeyi sıcaklığının daha yüksek hesaplandığı görülmektedir. COBRA-TF tarafından hesaplanan T_{min} değerlerinin gerçeğe daha yakın hesaplanması AYS fazının daha iyi modelleneceğini göstermektedir.

Şekil 4.1’de bir COBRA-TF koşusundan elde edilen yakıt yüzey sıcaklığı eğrileri verilmiştir. Eğrilerden yakıt ıslanma zamanlarının sıcaklığın ani düştüğü nokta olduğu, dolayısıyla minimum film kaynama noktalarına tekabül ettiği varsayılabılır. Her iki deney seti için soğutma suyu seviyesinin hemen üzerinde elde edilen bu T_{min} değerleri Şekil 4.2’deki gibi çizildiğinde FLECHT-SEASET ve RBHT verilerine ait eğriler arasındaki sıcaklık farkının 110°C ’ye kadar çıktığı görülmektedir. Diğer taraftan bu iki deneyin COBRA-TF çıktıları da aynı şekil üzerinde görüldüğü gibi RBHT deneysel T_{min} verisinin oldukça üzerinde seyrettiği göze çarpmaktadır. Bunun sebebi orijinal COBRA-TF sürümündeki Minimum Film Kaynama Modelinin T_{min} değerlerini yüksek tahmin etmesidir.



Şekil 4.1. T_{min} Eğrisinin Çizim Mantığı.



Şekil 4.2. Deneysel Verisi ve Orijinal COBRA-TF'e Ait T_{min} Değerleri.

FLECHT-SEASET 31504 kodlu deney orijinal COBRA-TF ile modellendiğinde elde edilen T_{min} değerleri Şekil 4.2'de görüldüğü gibi deneysel veri ile tutarlı çıkmaktadır. T_{min} değerlerinin COBRA-TF tarafından gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanması yakıt çubuklarından akışkana olan ısı transferi rejiminin ve dolayısıyla yakıt ıslanma davranışının da doğru tahmin edilmesi anlamına gelmektedir. Nitekim orijinal COBRA-TF sürümünün FLECHT-SEASET 31504 kodlu deney verisi karşısındaki tahminleri oldukça iyi çıkmaktadır. Diğer taraftan RBHT deneysel verilerinin tahmin edilmesinde tam tersi bir durum söz konusudur. Şekil 4.2'de RBHT-1383 verisi ve tahminlerine bakıldığında bazı yerlerde 150 K'e kadar çıktığı görülmektedir. T_{min} değerleri COBRA-TF tarafından yüksek tahmin edildiğinde yakıt yüzeyinde geçiş kaynama bölgesi hâkim olmakta ve yakıtlar acil durum soğutma suyu tarafından erkenden ıslanmış gibi sonuç çıkmaktadır. Hızlı bir şekilde ıslanan çubuk yüzeyindeki sıcaklık eğrileri deneysel veriye göre daha çabuk düşmekte, yakıt yüzeyi sıcaklığı yanlış hesaplanmasıyla birlikte tüm çözüm değerleri olumsuz olarak etkilenmektedir. RBHT modellemesinde T_{min} tahminleri daha düşük hesaplanarak deneysel veriye yaklaşırdı, yakıt yüzeyinde

oluşacak film kaynama rejiminden dolayı yakıt ıslanma davranışının da gecikerek deneysel veriye yaklaşması beklenirdi.

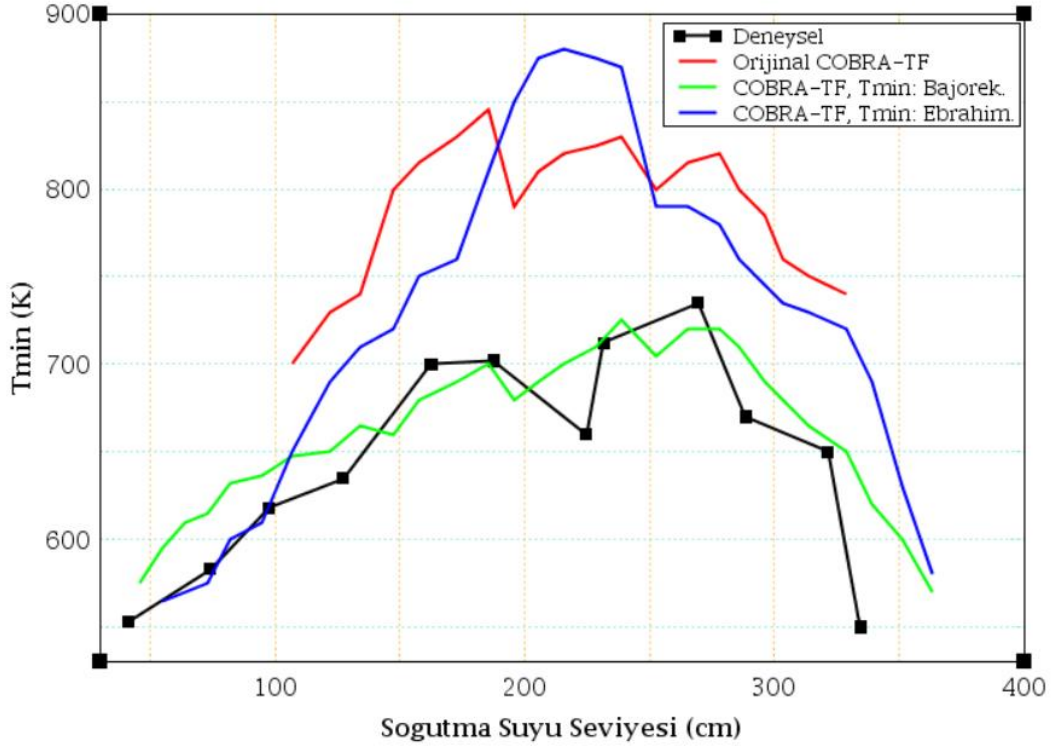
4.2 COBRA-TF T_{min} Modelinin İyileştirilmesi

COBRA-TF'in MFK modelindeki sorun daha önce başkaları tarafından da fark edilmiş ve T_{min} değeri sabit olarak girilecek şekilde iyileştirilmiştir. Nitekim orijinal COBRA-TF sürümü T_{min} değerinin sabit bir değer olarak belirlenmesine izin vermektedir. T_{min} değerini modelleme boyunca sabit kalacak bir değer olarak vermek, sistem basıncı, sıcaklık ve akışkan parametreleri değişen bir ortamda her ne kadar gerçeği yansıtmasa da mevcut modele göre daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Fakat bahsi geçen değişkenler T_{min} değerini etkilediği ve bu değer modelleme boyunca deneysel verilere göre yaklaşık 200°C kadar değişkenlik gösterdiği için yeni bir model uygulamanın daha sağlıklı sonuçlar elde etmeye katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Konuyla ilgili zafiyet farklı çalışmalarda da belirtilmiş ve orijinal COBRA-TF MFK modelinin geliştirilmesi gerektiği Ergün ve diğerleri tarafından 2008 yılında yayınlanan makalelerde belirtilmiştir [5,6].

Bajorek ve diğerleri tarafından 2002 yılında yayınlanan deneysel ve parametrik T_{min} araştırma ve modelleme çalışması nükleer enerji üretimi, akışkan ve yakıt malzemeleri, özellikleri ve ortam şartları açısından uygun bir şekilde yapılmıştır [30]. Bajorek ve Ebrahim tarafından yayınlanan makalelerdeki denklemlerle tanımlanan her iki MFK modeli COBRA-TF içerisine uyarlanmış ve sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

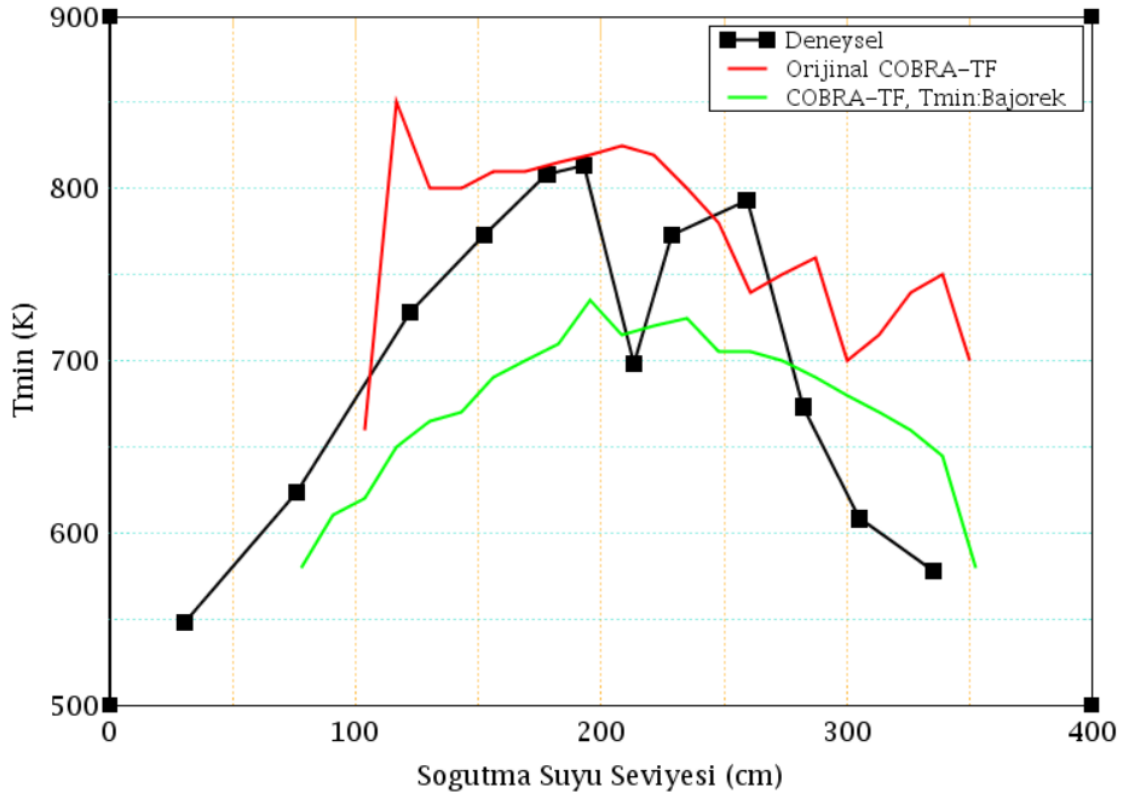
Şekil 4.3'te RBHT-1383 deneyinden elde edilen deneysel veriler üzerine orijinal COBRA-TF sürümü, Bajorek'in T_{min} modeli [30] ve Ebrahim'in [31] yayınladığı T_{min} modellerinin çalıştığı COBRA-TF sürümlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Orijinal COBRA-TF sürümü ve Ebrahim'in T_{min} modeli sonuçlarının genel olarak deneysel verinin oldukça üstünde seyrettiği ve deneysel veri ile aradaki farkın 140 K kadar üzerine çıktığı görülmektedir. Ebrahim ve diğerleri tarafından yapılan MFK modeli ile yapılan koşu sonuçları orijinal COBRA-TF sonuçlarına yakın çıkmıştır. İlgili model atmosfer

basıncına uygun bir şekilde geliştirilmiş fakat RBHT ve FLECHT-SEASET deneyi yüksek basınç altında gerçekleştirilmiştir. Basıncın yüksek olması T_{min} değerinin fazlaca yükselmesine ve orijinal sürümde elde edilen seviyelere çıkararak genel davranışın da eski sürüme yakın çıkmasına neden olmuştur. 3 MPa'a kadar geniş bir basınç aralığı için geliştirilen Bajorek T_{min} modelinin çalıştığı yeni COBRA-TF sürümüne ait sonuçların ise deneysel veri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. RBHT-1383 Deney Verisi ve T_{min} Modeli İyileştirilmiş COBRA-TF Sürümü sonuçları.

Şekil 4.4'de 31504 kodlu FLECHT-SEASET deneyine ait T_{min} eğrileri verilmiştir. Orijinal COBRA-TF yazılımının T_{min} modeli rakamsal çıktılarının deneysel verinin biraz üzerinde seyrettiği görülmektedir. Bajorek T_{min} modelinin çalıştığı sürüm ise deneysel verinin biraz altında görünmekle beraber her iki sürüm sonuçları da deneysel veri ile genel olarak uyumludur.



Şekil 4.4. FLECHT-SEASET 31504 Deney Verisi ve T_{min} Modeli İyileştirilmiş COBRA-TF Sürümü Tahminleri.

4.3 Yeni T_{min} Modeli Sonuçları

Orijinal COBRA-TF sürümünün iyileştirilmesi amacıyla Bajorek ve diğerlerinin 2002 yılında yayınladığı T_{min} modeli mevcut COBRA-TF sürümüne uygulanmıştır. Sonuçları değerlendirmek amacıyla orijinal COBRA-TF ile yeni T_{min} modelinin çalıştığı sürüm farklı basınç, soğutma suyu akış hızları ve sıcaklıklarındaki FLECHT-SEASET (FS) ve RBHT deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.1.'de yapılan koşullara ait şartlar verilmiştir. Sonuçlar, yakıtların soğutma suyu ile zamana karşı ıslanma davranışı ile yakıt boyunca farklı yüksekliklerdeki yakıt yüzeyi sıcaklık eğrileri açısından incelenmesini içermektedir.

Çizelge 4.1. Deney Verisi Bilgileri.

Test No.	Basınç [kPa (psia)]	Yakıt Başl. Sıcaklığı [°C (°F)]	Yakıt Demeti Maks. Gücü [kW/m (kW/ft)]	Akış Hızı [m/s (in/s)]	Soğutma Miktarı [°C (°F)]
RBHT-1096	137,9 (20)	760 (1400)	1,32 (0.4)	0,0254 (1,0)	11,1 (20)
RBHT-1383	275,8 (40)	760 (1400)	1,32 (0.4)	0,0254 (1,0)	11,1 (20)
FS-31922	137,9 (20)	883 (1621)	1,32 (0.4)	0,0271 (1,07)	96 (170)
FS-31504	275,8 (40)	871 (1600)	2,31 (0.7)	0,0254 (1,0)	78 (140)
RBHT-1407	275,8 (40)	871 (1600)	2,31 (0.7)	0,076 (3,0)	22,8 (41)
RBHT-1300	275,8 (40)	871 (1600)	2,31 (0.7)	0,076 (3,0)	75,6 (136)
RBHT-1223	275,8 (40)	871 (1600)	2,31 (0.7)	0,152 (6,0)	11,1 (20)
RBHT-1285	275,8 (40)	871 (1600)	2,31 (0.7)	0,152 (6,0)	83,3 (150)

Çizelge 4.1.'de verilen deney çiftleri birbirine kendi aralarında yakın şartlarda olup soğutma suyu sıcaklıkları açısından birbirlerine göre nispeten daha sıcak ve soğuk olacak şekilde seçilmiştir. Böylelikle soğutma suyu sıcaklığının yeni uygulanan modeller üzerindeki etkisi de incelenebilecektir. Bunun yanında, çiftler arası soğutma suyu akış hızları da, ilk iki durumda 2,54 cm/s iken aşağıya doğru diğer RBHT çiftlerinde 3x2,54 ve 6x2,54 cm/s olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca kendi aralarında basınç, yakıt demeti güç üretimi ve soğutma suyu sıcaklığı farkı bulunan FLECHT-SEASET deneyleri de eklenerek RBHT deneyleri ile karşılaştırma imkânı sunulmuştur. RBHT-1096 ve 1383 deneyleri ile FS deney şartları da basınç, akış hızı ve güç üretimi parametreleri açılarından benzerlik göstermektedirler.

Hesaplanan yakıt ıslanma verisi, yani alttan yakıt çubukları boyunca yükselen soğutma suyunun seviyesi, genelde COBRA-TF çıktı dosyasından, hazırlanan basit bir Python yazılımı ile çekilmiştir (Ek-2).

Şekil 4.5. ile 4.6.'da verilen yakıt ıslanma eğrilerine bakıldığında genel olarak orijinal COBRA-TF koşullarına ait RBHT sonuçlarının T_{min} değerlerinin yüksek hesaplanmasına bağlı olarak deneysel veriyi tutturma konusunda geciktiği, yani çabucak ıslandığı anlaşılmaktadır. T_{min} modeli değiştirilen yeni COBRA-TF sürümü sonuçlarının RBHT deneylerini çok iyi tahmin ettiği veya orijinal sürüme göre ciddi bir gelişme kaydedildiği görülmektedir. Orijinal sürüm koşulları FLECHT-SEASET verilerini yeni sürüme göre

yakıt ıslanma zamanı açısından daha iyi bir şekilde tahmin etmektedir. Yeni sürüm RBHT-1285 ve FS koşullarında ise yakıt ıslanma eğrisinin deneysel veriye göre gecikmiş olduğu görülmektedir. Yakıt ıslanma eğrilerinde soğutma suyu sıcaklığı ve akış hızına göre çok açık bir farklılık göze çarpmayıp genel olarak deneysel veri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

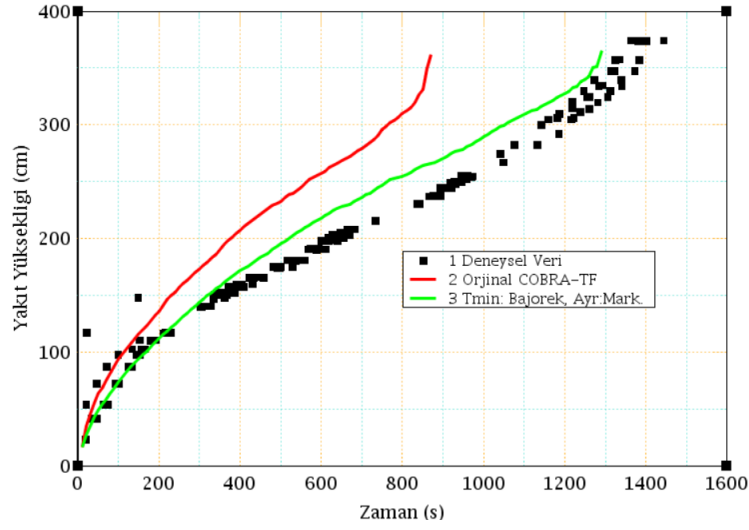
Deneysel veri ile orijinal ve yeni COBRA-TF sürümleri tarafından elde edilen yakıt yüzeyi sıcaklık eğrileri Şekil 4.7-8-9-10 ve 11’de verilmiştir. Sıcaklık değerleri, genel olarak 3,66 m uzunluğundaki yakıt çubuklarının yarısından daha yukarıdaki noktalardan, yani deneylerde maksimum gücün uygulandığı konumlara yakın olan yakıt demetinin ikinci yarısından ve yakıt sabitleme elemanlarının dışında kalacak şekilde zamana bağlı olarak çizilmiştir. Fakat yakıtların nispeten alt kısımlarındaki sıcaklık davranışının deneysel veriye göre karşılaştırması bazı deneyler için Şekil 4.7’de verilmiştir.

Şekil 4.7-8-9-10 ve 11’de verilen yakıt yüzeyi sıcaklık eğrilerinde de yakıt ıslanma davranışına uygun sonuçlar görülmektedir. Orijinal COBRA-TF yakıt sıcaklığı sonuçları, RBHT verilerine göre yakıt ıslanma eğrilerine uygun bir şekilde zamanlama açısından gecikmiştir. Yeni sürümde ise, RBHT-1285 dışındaki tüm RBHT sonuçlarında minimum film kaynama sıcaklığı tahminleri deneysel veri ile eski modele göre daha yakın çıktığından yakıt ıslanma zamanı açısından önemli bir gelişme sağlanmıştır. RBHT-1285 modellemesinde de T_{min} sonuçları deneysel veri ile uyumlu çıkmasına rağmen yakıt ıslanma zamanı gecikerek uzamıştır. Maksimum yakıt yüzeyi sıcaklıklarında önemli ve olumsuz bir değişiklik olmamıştır, aksine bir miktar iyileşme kaydedilmiştir.

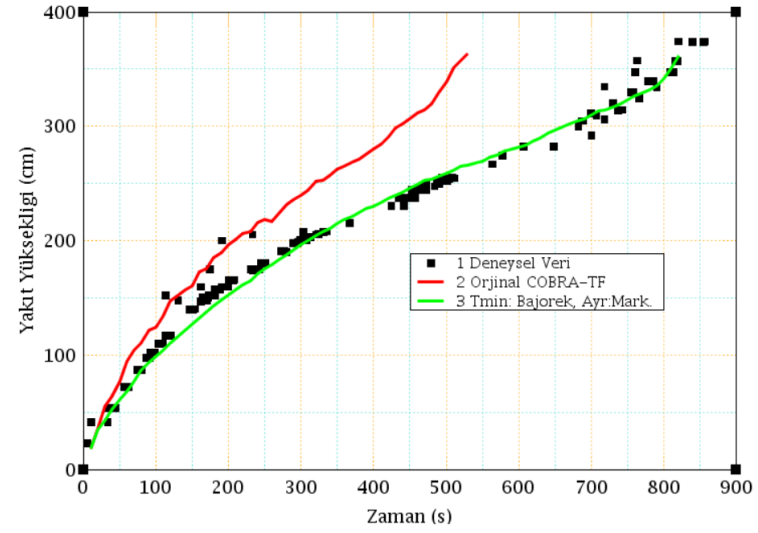
Diğer taraftan, FLECHT-SEASET sonuçları ise orijinal sürümde T_{min} değerleri deneysel veriden daha yüksek hesaplanmasına rağmen zamanlama açısından yeni sürüme göre daha iyi sonuç vermiştir. Yeni sürümden elde edilen FLECHT-SEASET sonuçlarına bakıldığında T_{min} değerlerinin deneysel veri ile oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. Orijinal sürümde özellikle yakıt demetinin yukarı kesimlerinde veriden 100-150 K yüksek hesaplanan T_{min} değerleri ile ıslanma zamanı tutuyorken, yeni sürümde deneysel veri ile uyumlu T_{min} değerlerine rağmen ıslanma zamanlarının 180 s kadar geciktiği gözlemlenmektedir.

Şekil 4.5 COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Islanma Sonuçları: RBHT-1096, 1383, FS-31922,31504.

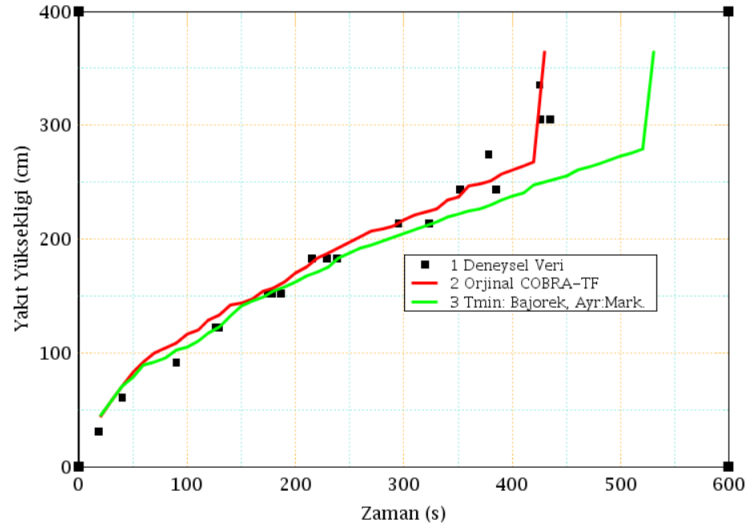
RBHT-1096 Yakıt Islanma Eğrisi



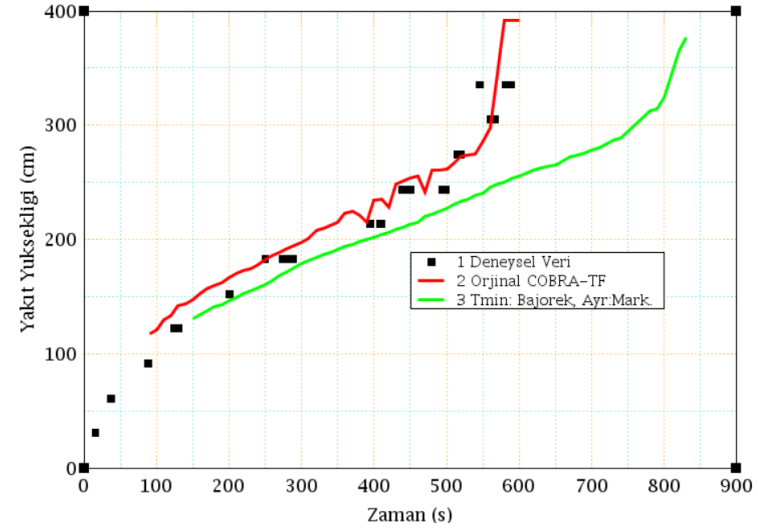
RBHT-1383 Yakıt Islanma Eğrisi



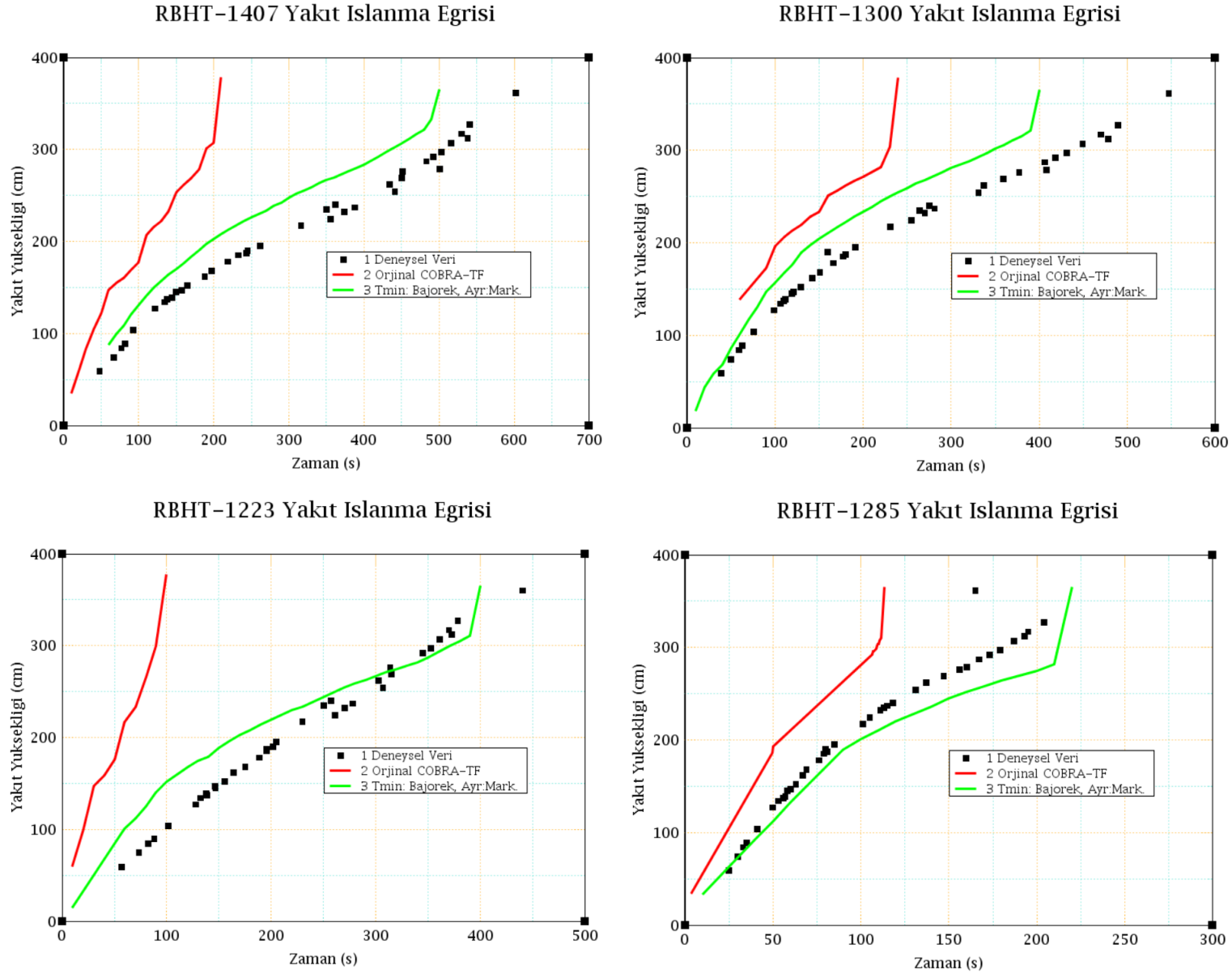
FS-31922 Yakıt Islanma Eğrisi



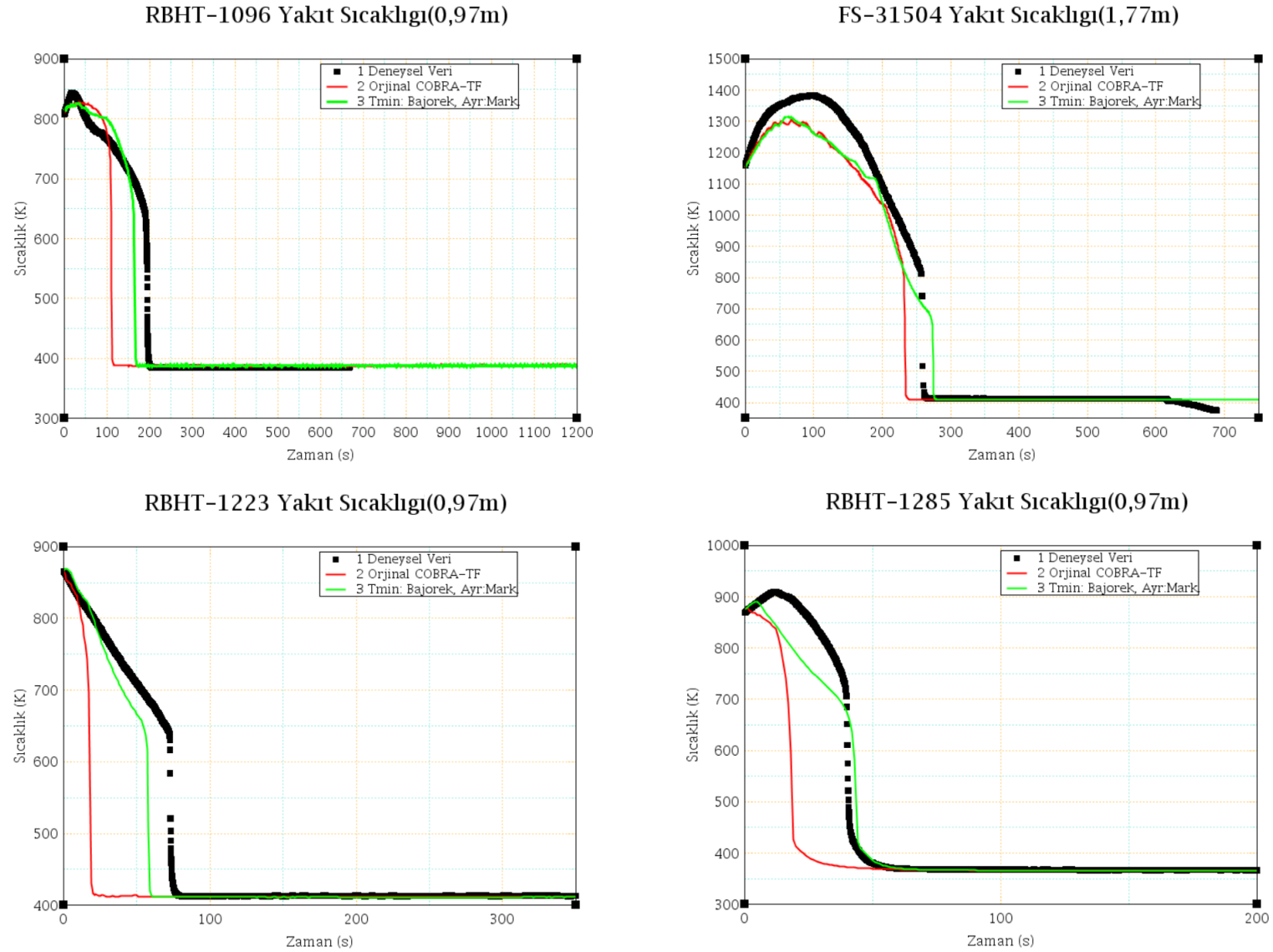
FS-31504 Yakıt Islanma Eğrisi



Şekil 4.6 COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Isınma Sonuçları: RBHT-1407, 1300, 1223, 1285.

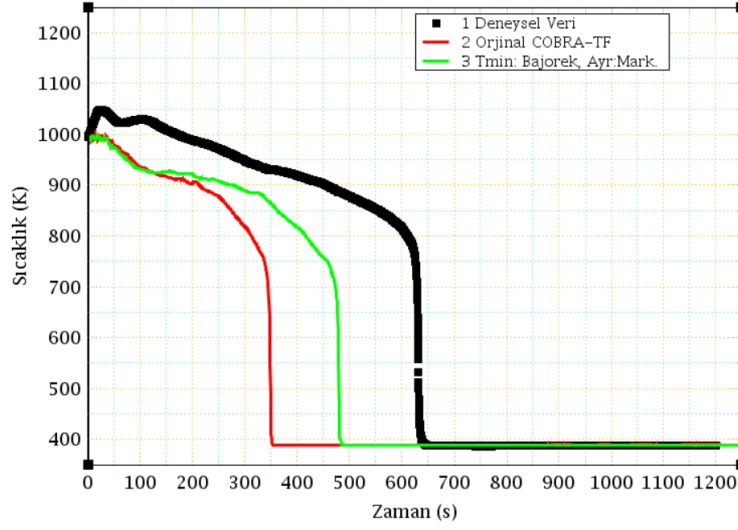


Şekil 4.7. COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: RBHT-1096,1383,1223,1285,FS-31504.

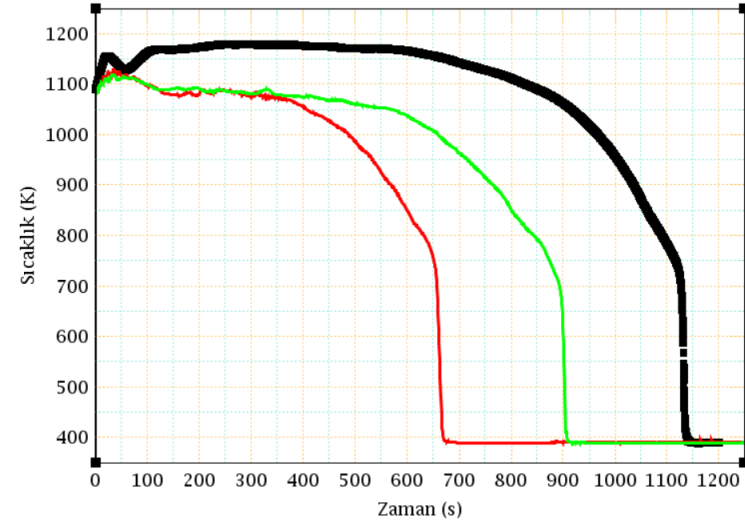


Şekil 4.8. COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: FS-31922, 31504.

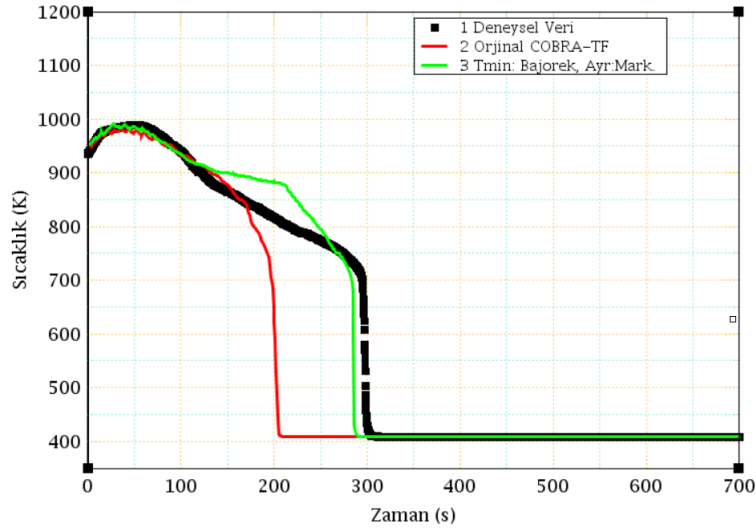
RBHT-1096 Yakıt Sıcaklığı(1,87m)



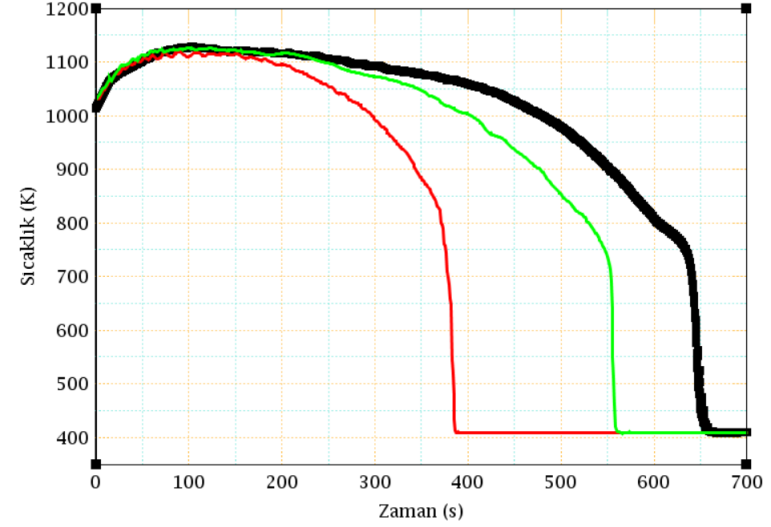
RBHT-1096 Yakıt Sıcaklığı(2,69m)



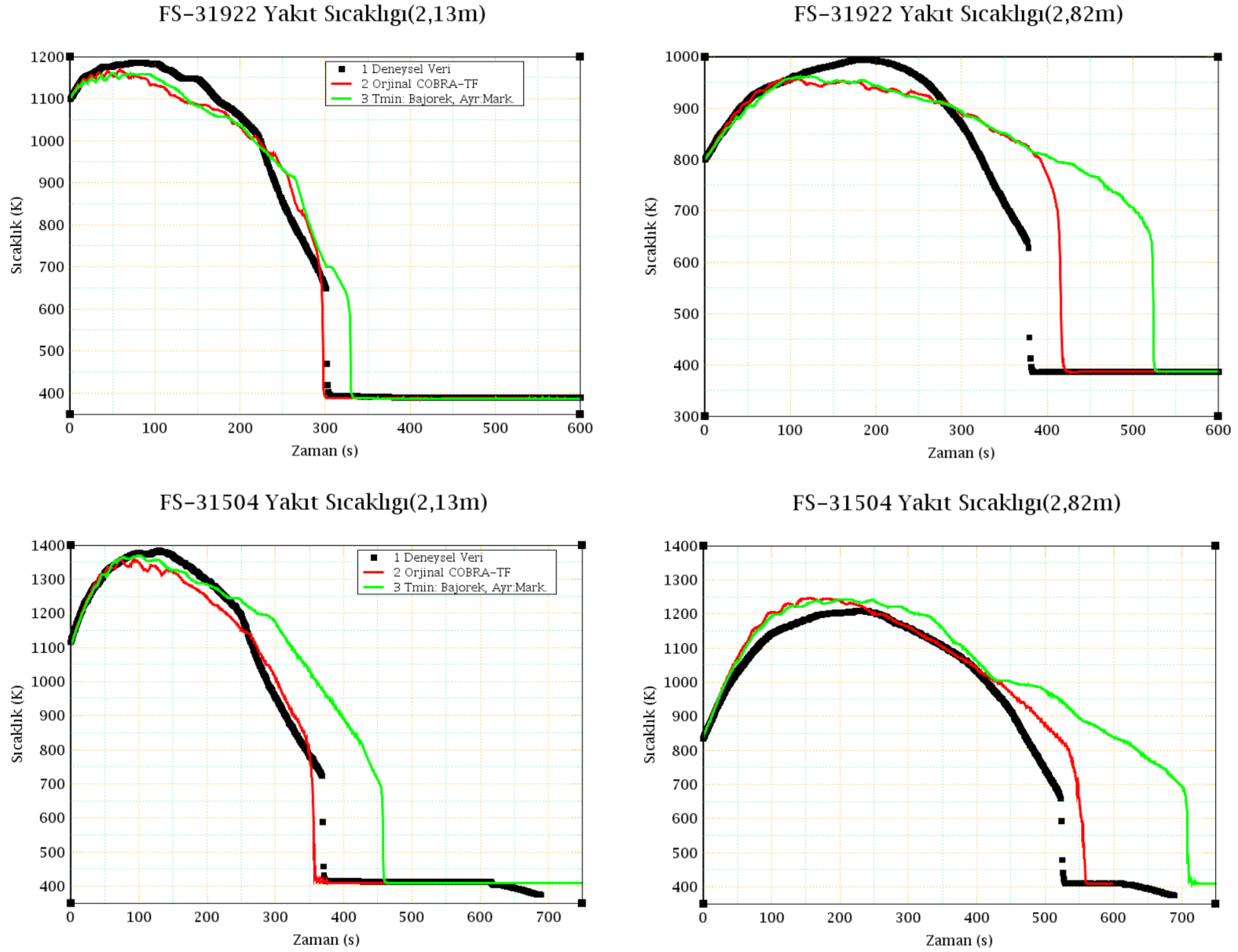
RBHT-1383 Yakıt Sıcaklığı(1,87m)



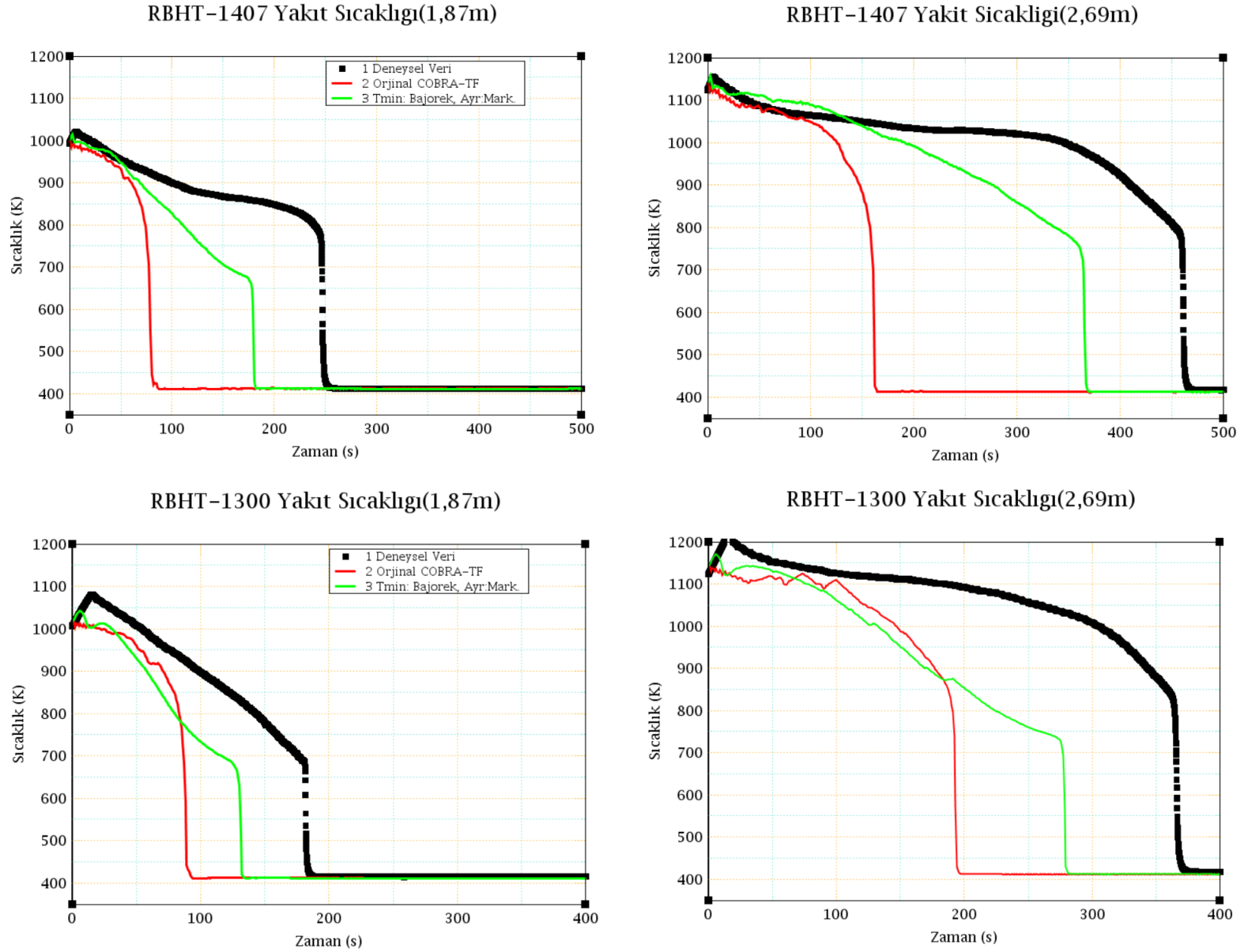
RBHT-1383 Yakıt Sıcaklığı(2,69m)



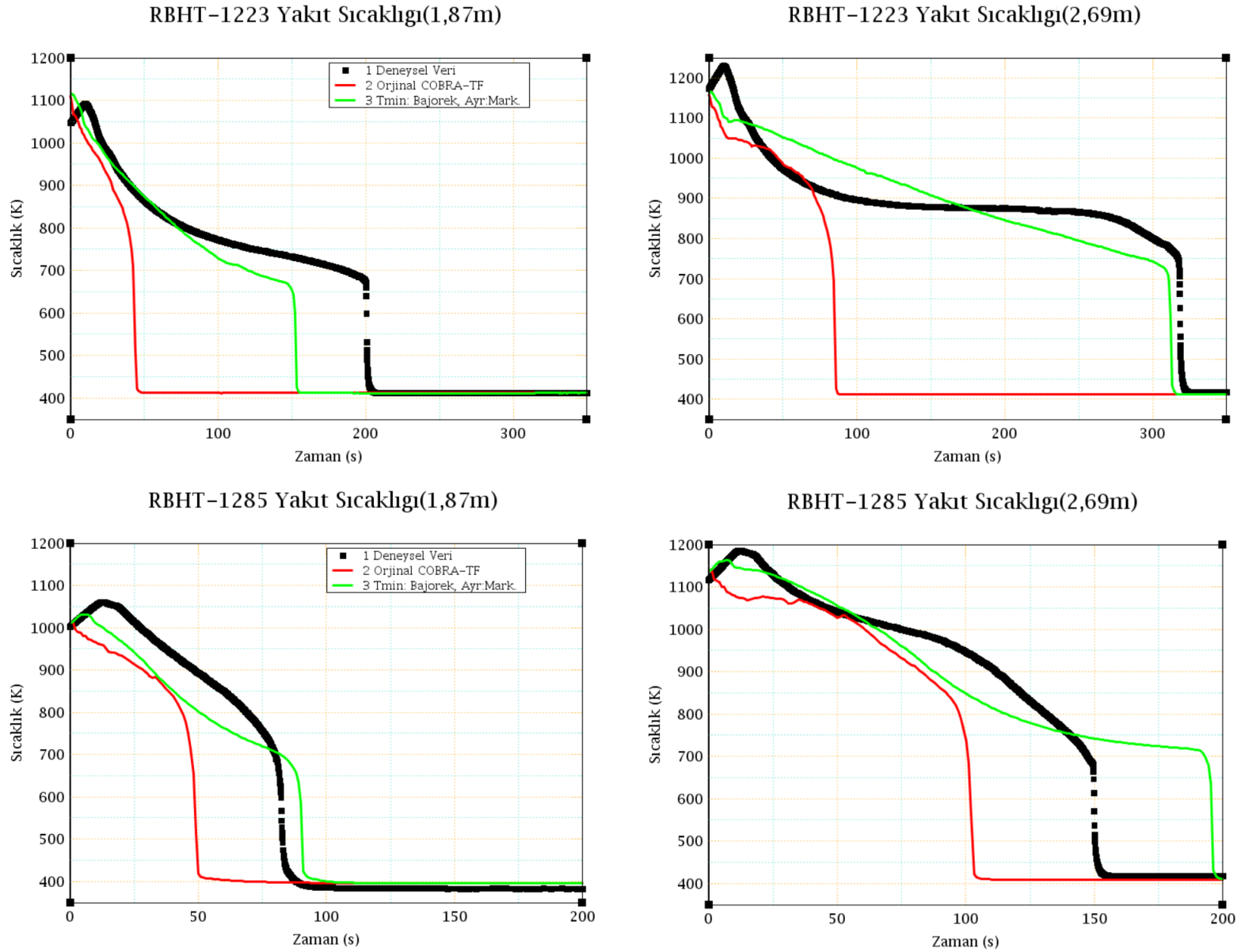
Şekil 4.9. COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: FS-31922, 31504.



Şekil 4.10. COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: FS-31922, 31504.



Şekil 4.11. COBRA-TF T_{min} Model Değişikliği, Yakıt Çubuğu Yüzey Sıcaklığı Sonuçları: RBHT-1223, 1285.



5. DAMLACIK AYRILMA MODEL DEĞİŞİKLİKLERİ VE DENEY VERİSİ İLE KARŞILAŞTIRMA

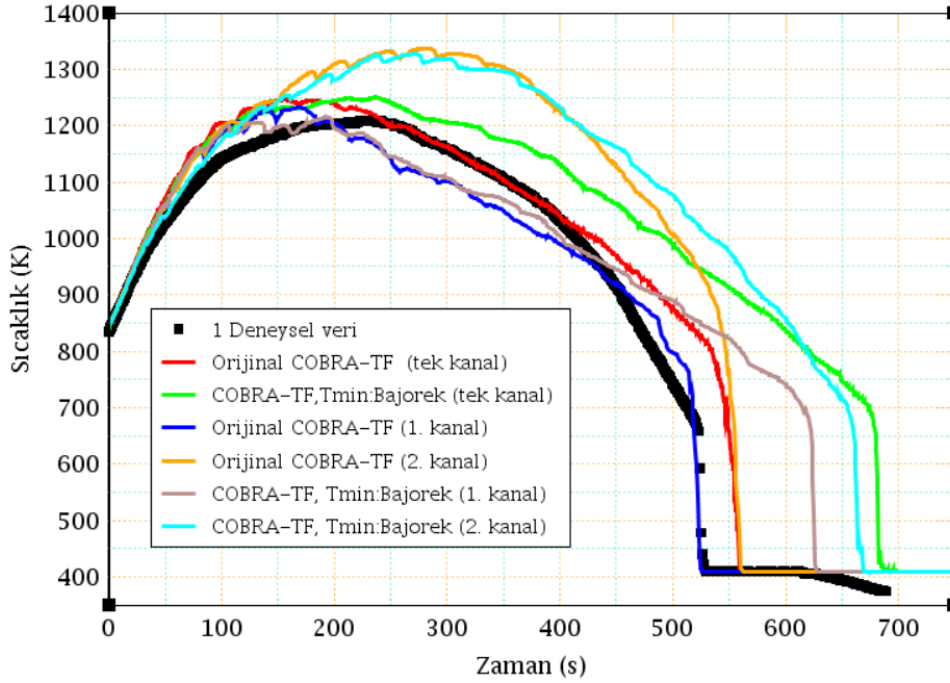
Bir önceki bölümde COBRA-TF Minimum Film Kaynama modelinde yapılan değişiklik ile elde edilen T_{min} değerleri deneysel veri ile daha uyumlu hale getirilmişti. T_{min} model değişikliği ile sağlanan bu gelişme, yeni sürüm COBRA-TF yazılımının RBHT deneysel verileri karşısındaki ıslanma zamanları ve yakıt sıcaklığı tahminlerini iyileştirirken FLECHT-SEASET verilerini tahmin etme noktasında zamana karşı gözle görülür bir gecikmeye ve eskiye göre bozulan bir davranışa sebep olmuştur. T_{min} değerlerinin düzelmesine rağmen FLECHT-SEASET koşullarında karşılaşılan bu sorun öncelikle tek kanal olarak tasarlanan kod girdilerinin deneysel şartları yansıtamadığı, ya da COBRA-TF yazılımının başka paketlerinde bazı sorunlar olabileceğini göstermiştir.

5.1. COBRA-TF Çift-Kanal 31504 Tasarımı

FLECHT-SEASET özelinde kullanılan deney düzeneği 161 yakıt çubuğundan oluşmakta iken bu yakıt demeti COBRA-TF modellemelerinde, hesaplamaların kolaylaştırılması ve tasarımın basitleştirilmesi için tek bir kanal olarak tasarlanmıştır. Fakat deneysel verilerin elde edilmesi esnasında kullanılan bazı sıcaklık ölçerler aynı yükseklikte olmalarına rağmen demetin iç ve dış tarafında ayrı ayrı konumlandırılmışlardır. Böylece yakıt demetinin iç ve dış tarafındaki termal-hidrolik farklılıklar ile bu konumlara ait ölçüm farklılıkları da elde edilmiştir. Buna karşın, modellenen kod girdisinin de bir iç ve dış olmak üzere çift-kanal şeklinde tasarlanması, bu farklı kanallardaki deneysel veri ile karşılaştırmada görülen, özellikle FLECHT-SEASET sonuçlarındaki gecikme ve uzamayı açıklayabileceği düşünülmüş ve çift-kanal kod girdisi hazırlanmıştır.

Şekil 5.1’de FS-31504’ün tek ve çift-kanal COBRA-TF modellemesi ile deney sonuçları 2,82 m’deki sıcaklık değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Orijinal ve iyileştirilmiş COBRA-TF sürümlerinin her ikisinde de iç kanal maksimum yakıt sıcaklığı sonuçları deneysel verinin oldukça üstünde, dış kanalda deneysel veri ile daha uyumlu çıkmıştır. Yakıt ıslanma zamanları ise dış kanallarda tek kanal tahminlerine göre deneysel veriye daha yakın olup iç kanal tahminlerinde yine gecikerek uzamıştır. Yeni sürüm çift-kanal koşullarının özellikle iç kanal sıcaklık tahminleri deneysel verinin 150 K kadar üzerinde,

yakıt ıslanma zamanları ise 140 s kadar gecikmeli gerçekleşmiştir. Sonuç olarak çift-kanal FLECHT SEASET koşullarının deneysel veri karşısındaki tahminlerin iyileştirilmesine katkı sağlamadığı anlaşılmıştır.



Şekil 5.1. FLECHT-SEASET-31504 Tek ve Çift-Kanal Modelleme Sonuçları.

5.2. Orijinal COBRA-TF'deki Damlacık Ayrılma Modellerinin Geçerliliği

T_{min} modelinin iyileştirilmesinden sonra FLECHT-SEASET tahminlerinin bozulmasının kod girdisinin tasarımı ile ilgili olmadığı anlaşıldıktan sonra sorunun COBRA-TF içerisindeki hangi model veya değişkenden kaynaklanmış olabileceği ile ilgili bir araştırma yapılmıştır. En iyi tahmin yazılımlarının belirli durumlara uygulanabilirliği ve belirsizliklerin giderilmesinde sarf edilecek emeğin öncelikle hangi alanlara yoğunlaşması gerektiğinin belirlenmesini tespit etmek amacıyla yapılan bazı Olay Tanımlama ve Derecelendirme (OTD: Phenomena Identification and Ranking Table) çalışmaları taranmıştır.

F. Aydoğan tarafından yapılan doktora tezi [51] kapsamında COBRA-TF modellerindeki belirsizliklerin tespiti, NRC tarafından BSR tipi reaktörlerdeki büyük kırıklı Soğutucu

kaybı kazalarındaki termal-hidrolik olaylar için geliştirilen OTD [52] ile benzer şekilde COBRA/TRAC yazılımlarının termal hidrolik geçiş analizleri ile ilgili OTD çalışmalarının [16] her birinde literatürdeki birçok çalışmada yüksek belirsizlik içeren ve yakıt ıslanma tahminindeki gecikmenin sebebi olabilecek bileşenin damlacık ayrılma modellerinin olabileceği kanısı oluşmuştur. Ayrıca bu çalışma kapsamında COBRA-TF yazılımı ile yapılan hassasiyet analizinde, hesaplanan damlacık ayrılma ve sürüklenme değerlerindeki küçük değişikliklerin yakıt ıslanma ve sıcaklık davranışlarına etkisi incelenmiştir. Özellikle damlacık ayrılma modellerine yapılan müdahalelerin sonuçlara olan etkisinin yüksek hassasiyet içerdiği görülmüştür.

2006 Yılında Ergün tarafından yapılan doktora tezinde [4] ve 2008 yılında Ergün ve diğerleri tarafından yayınlanan makalelerde [5,6] COBRA-TF yazılımına mevcut sıvı, buhar ve damlacık alanlarına ek olarak küçük damlacık alanının eklenmiş ve elde edilen yeni sürüm ile ilgili detaylar ve sonuçlar yayınlanmıştır. Deneysel veri karşısında COBRA-TF tahminlerinin iyileştirildiği çalışmada daha iyi sonuçların elde edilmesi için damlacık ayrılma modellerine yoğunlaşılması bu modellerin geliştirilmesi tavsiye edilmiştir.

Ayrıca orijinal COBRA-TF sürümünde çalışan film ve soğutma suyu yüzeyinden damlacık ayrılma modelleri belirli deneysel veri kümeleri kullanılarak geliştirilmiştir. Bu sebeple orijinal sürümün, RBHT gibi farklı deney şartlarında gerçekleştirilerek elde edilen verilerin tahmininde zayıf kalmış olabileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak bahsi geçen tüm sebeplerden dolayı damlacık ayrılma modellerine odaklanmaya karar verilmiştir.

5.3. COBRA-TF Ayrılma Modellerinin İyileştirilmesi

Holowach tarafından yapılan çalışmada eski COBRA-TF'te çalışan damlacık ayrılma modelleri, deneysel veriye dayalı olduğu gerekçesi ile değiştirilerek mevcut orijinal sürüm elde edilmiştir. Yapılan çalışmada önce fiziksel bir model geliştirilerek sonuçların kabaca tahmin edilmesi, sonra belirli deneysel veri kümeleri kullanarak veri-uyarlama (data-fitting) uygulaması ile sonuçların daha gerçekçi bir şekilde elde edilmesi

amaçlanmıştır. Fakat son aşamada kullanılan veri uyarlama aşaması, fiziksel model ile başarmak istenen gerçek şartlarla tutarlı olması hedefini sorgulanır hale getirmiştir. Bu şekilde elde edilen modellerin FLECHT-SEASET gibi sadece kullanılan deney şartlarına yakın durumlar için iyi sonuçlar ürettiği, fakat RBHT gibi farklı sınır koşulları ve şartlarda gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının tahmin edilmesinde zafiyet yaşandığı düşünülmüştür. Dolayısıyla Holowach tarafından değiştirilen soğutma suyu yüzeyinden ve film damlacık ayrılma modelleri ayrı ayrı eski ayrılma modellerine dönülerek aradaki farkın görülmesi önem arz etmektedir.

Diğer taraftan eski COBRA-TF sürümünde çalışan ayrılma modellerinin [42,48] iyileştirilmiş sürümleri olan film ayrılma Sugawara [43] ve yüzeyden ayrılma Yonomoto [44] modellerinin, eski bir COBRA-TF sürümünde daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [11]. Orijinal COBRA-TF sürümünde yapılan T_{min} model değişikliğinin üzerine deneysel veri ile daha tutarlı tahminler elde etmek amacıyla Holowach tarafından değiştirilen film ve su yüzeyinden damlacık ayrılma modelleri, eski film ve yüzey ayrılma modelleri ile Sugawara ve Yonomoto'nun ayrılma modelleri farklı kombinasyonlarda COBRA-TF'e uygulanmıştır. Böylece deneysel veri ile karşılaştırma amacıyla, bir önceki bölümde T_{min} model sonuçlarının karşılaştırmasında kullanılan senaryolar ile bu bölümde elde edilen ayrılma modeli ikililerinden hangisinin daha uyumlu sonuç verdiği anlaşılacaktır.

5.4. Damlacık Ayrılma Model Değişikliklerinin Sonuçları

Yenilenen T_{min} modeli ve farklı damlacık ayrılma modellerinin birleşiminden 9 farklı sürüm elde edilmiştir. Yeni COBRA-TF sürümlerinden hangisinde deneysel veri ile uyumun daha iyi olduğu veya hangi modellerin farklı deney şartlarına daha uygun olduğunu belirlemek amacıyla elde edilen ve farklı modellerden oluşan sürümler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.1. Farklı T_{min} ve Damlacık Ayrılma Modelleri İle Elde Edilen Yeni Sürümler.

Model No	T_{min} Modeli	Soğutma Suyu Yüzeyinden Damlacık Ayrılma Modeli (yüzey ayrılma)	Film Damlacık Ayrılma Modeli (film ayrılma)
2	Orijinal T_{min} modeli	Mark J. Holowach [45]	Mark J. Holowach [46]
3	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Mark J. Holowach [45]	Mark J. Holowach [46]
4	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Eski: Paleev ve Filippovich [15]	Eski: Kataoka, Ishii ve Mishima [48]
5	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Eski: Paleev ve Filippovich [15]	Mark J. Holowach [46]
6	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Mark J. Holowach [45]	Eski: Kataoka, Ishii ve Mishima [48]
7	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Taisuke Yonomoto [44]	Mark J. Holowach [46]
8	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Mark J. Holowach [45]	Satoru Sugawara [43]
9	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Taisuke Yonomoto [44]	Eski: Kataoka, Ishii ve Mishima [48]
10	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Eski: Paleev ve Filippovich [15]	Satoru Sugawara [43]
11	Yeni T_{min} Modeli (Peterson ve Bajorek) [30]	Taisuke Yonomoto [44]	Satoru Sugawara [43]

Şekil 5.2 ve 5.3’de farklı ortam ve sınır koşullarındaki RBHT ve FLECHT-SEASET deneylerini modellemek için geliştirilen COBRA-TF girdilerine ait yakıt ıslanma eğrilerini gösteren sonuçlar verilmiştir. RBHT-1096 ve 1383 modellerinin yakıt ıslanma eğrilerine bakıldığında Holowach'a ait yüzey ayrılma modeli içeren 3, 6, 8 numaralı sürümlere ait tahminlerin deney verisi ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. 3, 6, 8 dışındaki diğer sürümler ise 1096'da birbirine yakın sonuçlar verip orijinal sürüme daha yakinken, basıncın daha yüksek olduğu 1383'te orijinal sürümden daha iyi sonuçlar vererek deneysel veriye yaklaşmışlardır. FLECHT-SEASET sonuçlarına bakıldığında 31922'de 3, 5, 8 sürümleri deneysel veriden gecikerek uzaklaşmış olduğu ve diğer sürümlerin deneysel veri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir.

T_{min} modelindeki iyileştirmeden sonra FS-31504 koşullarındaki yakıt ıslanma davranışında karşılaşılan anormal gecikme ve bozulmanın, ayrılma modellerindeki değişikliklerden sonra özellikle bazı sürümlerle büyük oranda giderildiği anlaşılmaktadır. RBHT-1407, 1300, 1223 ve 1285 sonuçlarının hiçbirinde yeni ayrılma modellerinin uygulanmasıyla birlikte herhangi bir bozulma olmamış aksine her birinin yakıt ıslanma zamanında belirli bir gelişme yakalanmıştır.

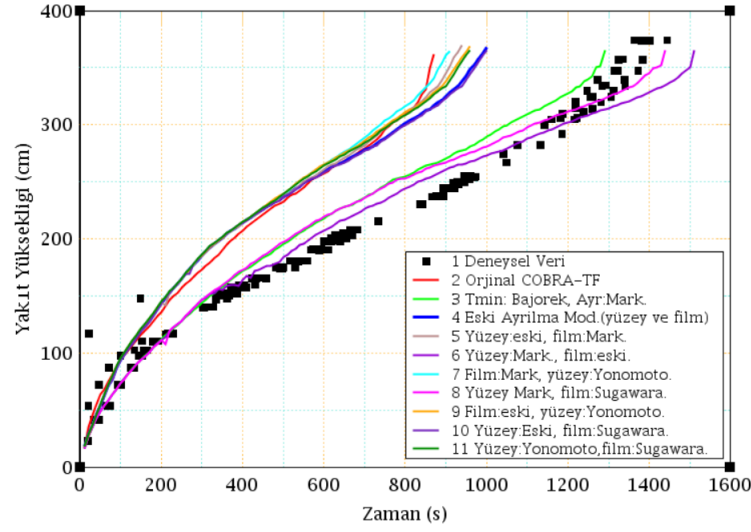
Şekil 4.5-6-7'de yakıt yüzeyi sıcaklık eğrileri verilmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı düşük olan FS-31504, FS-31922, RBHT-1300 ve RBHT 1285 koşullarında yüzeyden damlacık ayrılma modeli Yonomoto olan sürümlerin deneysel veriyi daha iyi tahmin ettiği görülmektedir. Yine soğutma suyu sıcaklığı ile beraber akış hızı da arttıkça yüzeyde Yonomoto çalışan sürümlerin ön plana çıkmaktadır. Genel olarak RBHT-1096 ve 1383 dışındaki tüm koşullarda 7, 9 ve 11 numaralı yüzeyde Yonomoto olan modeller ve yüksek hızlı durumlarda ise özellikle film ayrılma modeli Sugawara olan sürümler oldukça yakın tahmin etmiştir.

Soğutma suyu sıcaklığı nispeten yüksek ve akış hızı düşük olan RBHT-1096 ve 1383 koşullarında en iyi tahmini veren sürümler Holowach’a ait yüzeyden damlacık ayrılma modeli içeren 3, 6, ve 8 olmuştur. Aynı şekilde akış hızı ile beraber su sıcaklığının da düşük olduğu FS-31922 koşusunda ise 3, 5 ve 8 sürümleri deneysel veriden oldukça uzaklaşmış fakat diğer sürümler yakıt demetinin üst kısımlarına çıkıldıkça deneysel veri ile tamamen uyumlu sonuç vermiştir. Sonuçta düşük akış hızına sahip olup bu koşullarda en iyi tahmin veren ortak sürüm 6 numaralı sürüm olmuştur.

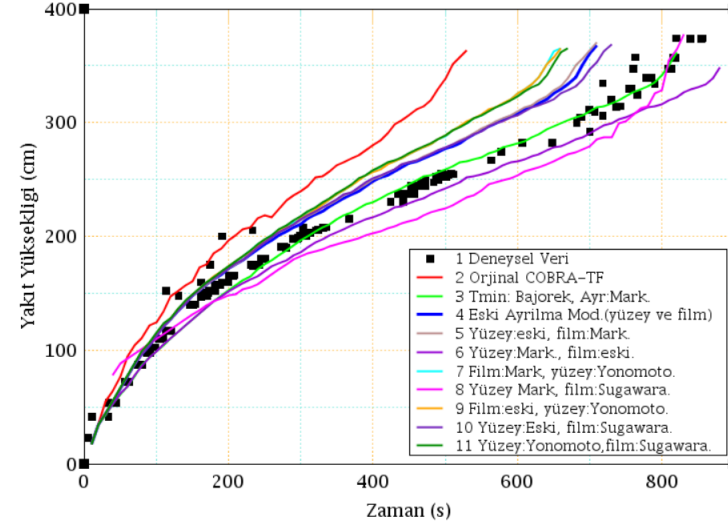
RBHT-1407, 1300 ve 1223 gibi soğutma suyu akış hızı yüksek olan durumlarda neredeyse tüm sürümler birbirlerine oldukça yakın olup orijinal sürüme göre ise deneysel veriyi daha iyi tahmin etmişlerdir. RBHT-1285 koşularında ise yeni sürümlerin tümü yakıt demetinin üst kısmına kadar deneysel veri ile oldukça tutarlı olup daha yukarılarda ıslanma ile ilgili bir gecikme yaşanmıştır. Maksimum yakıt sıcaklığı değerlerinde ise modellenen hiçbir deneyde olumsuz etki görülmemiş genel olarak iyileşme sağlanmıştır.

Şekil 5.2. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Islanma Sonuçları: RBHT-1096,1383,FS-31922,31504.

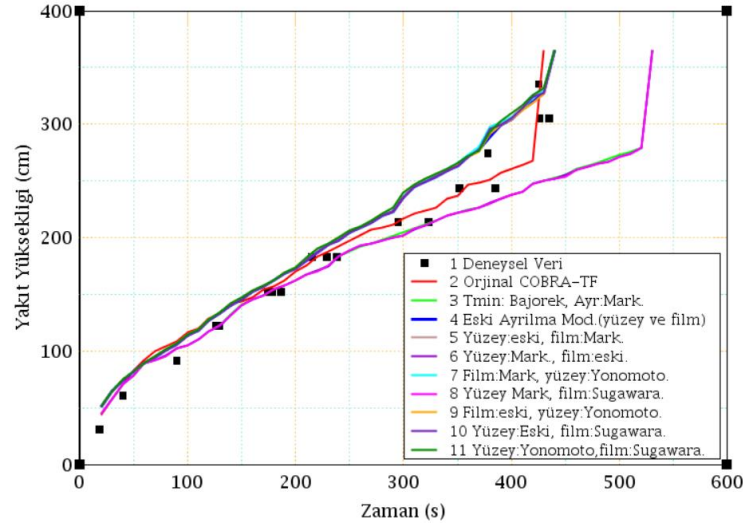
RBHT-1096 Yakıt Islanma Egrisi



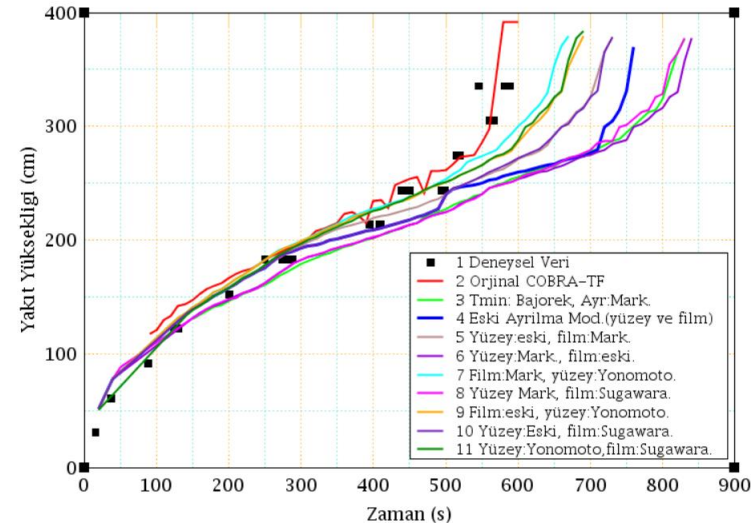
RBHT-1383 Yakıt Islanma Egrisi



FS-31922 Yakıt Islanma Egrisi

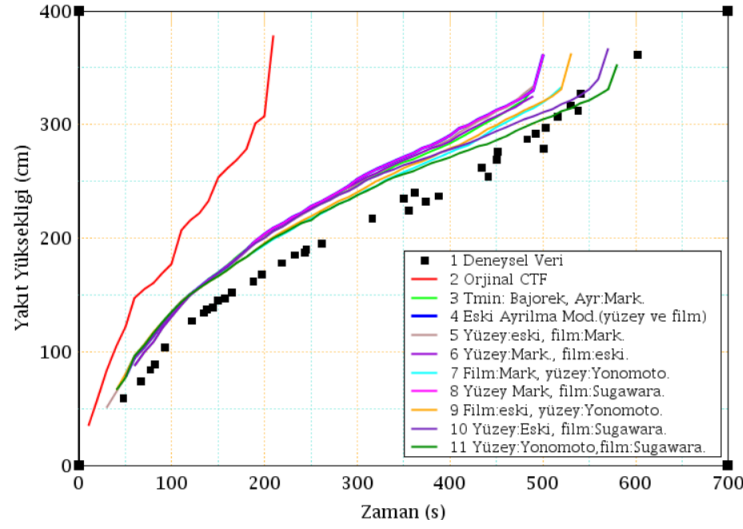


FS-31504 Yakıt Islanma Egrisi

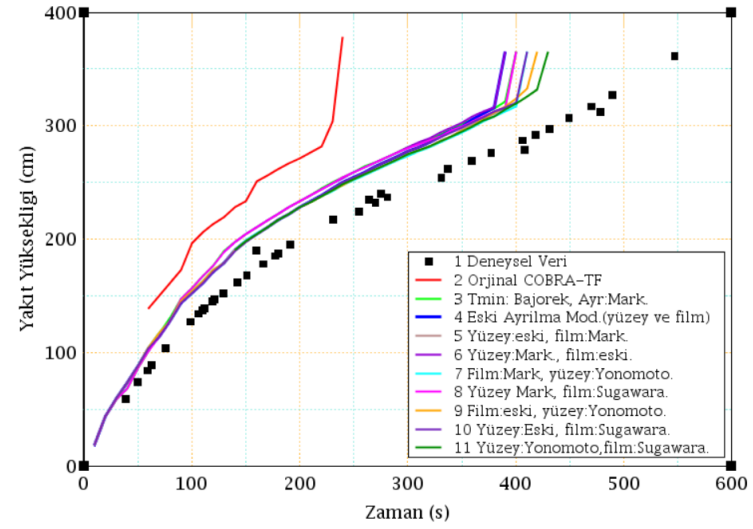


Şekil 5.3. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Islanma Sonuçları: RBHT-1407,1300,1223,1285.

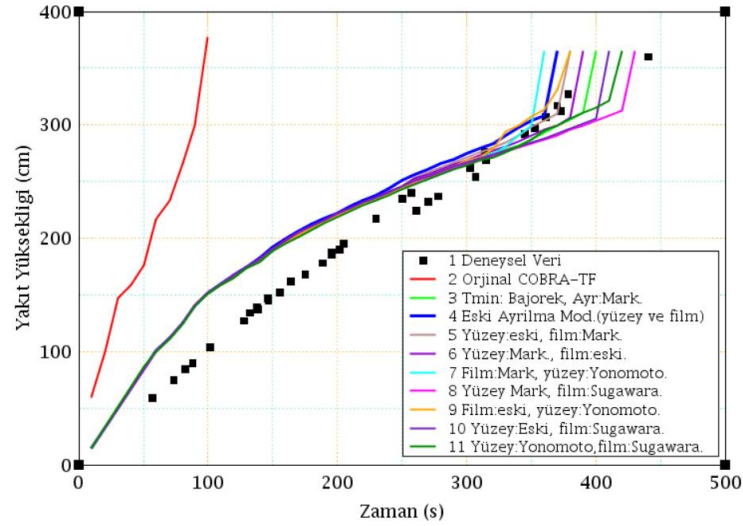
RBHT-1407 Yakıt Islanma Egrisi



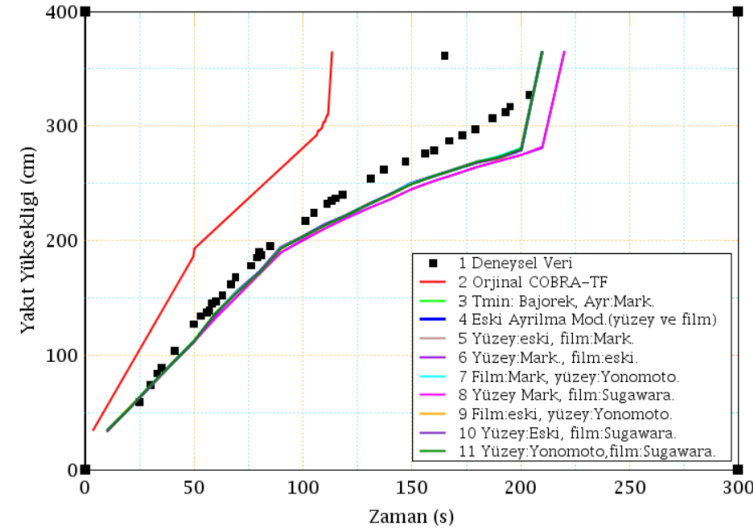
RBHT-1300 Yakıt Islanma Egrisi



RBHT-1223 Yakıt Islanma Egrisi

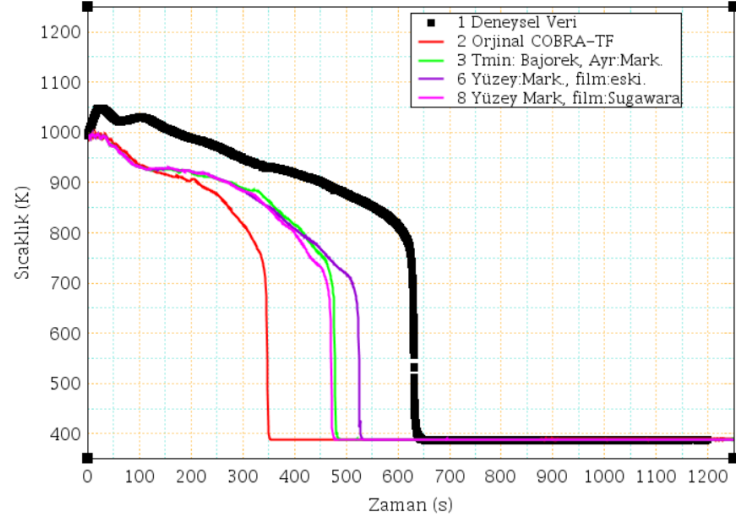


RBHT-1285 Yakıt Islanma Egrisi

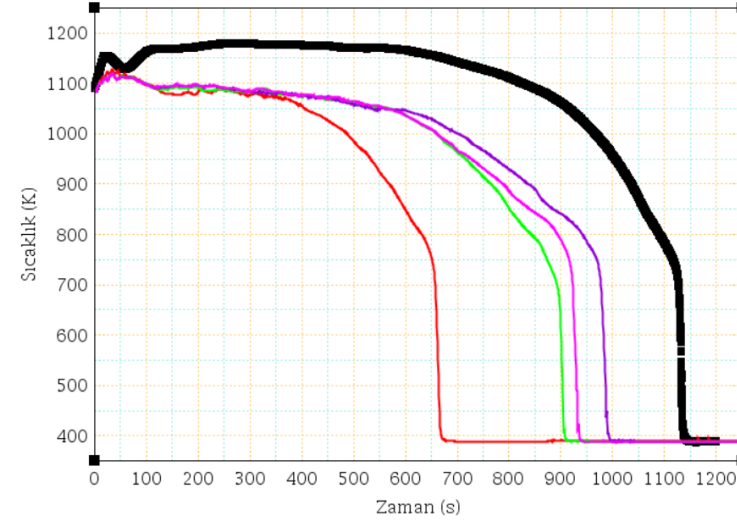


Şekil 5.4. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: RBHT-1096,1383.

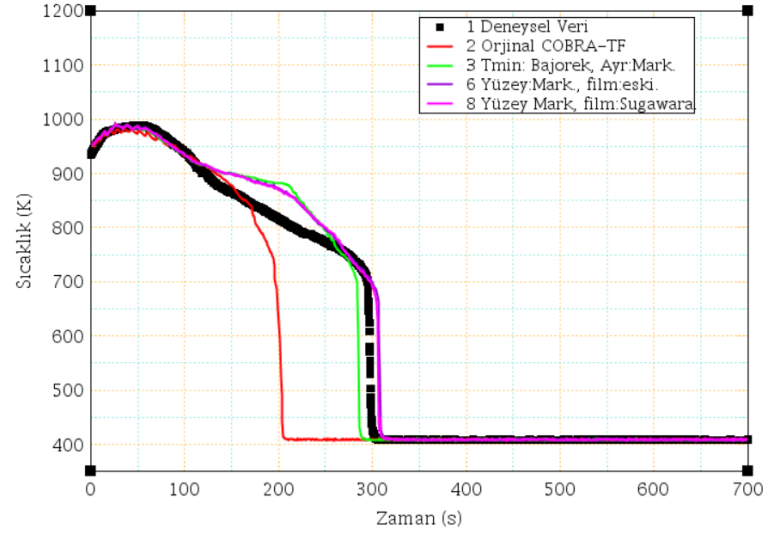
RBHT-1096 Yakıt Sıcaklığı(1,87m)



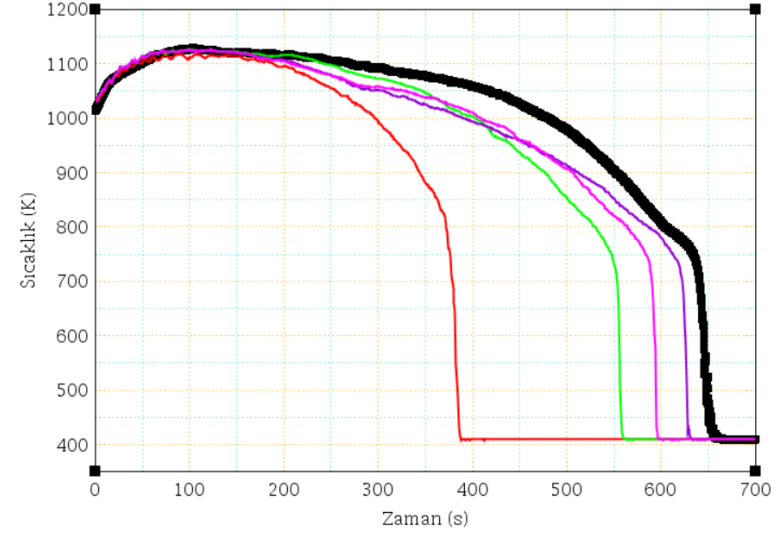
RBHT-1096 Yakıt Sıcaklığı(2,69m)



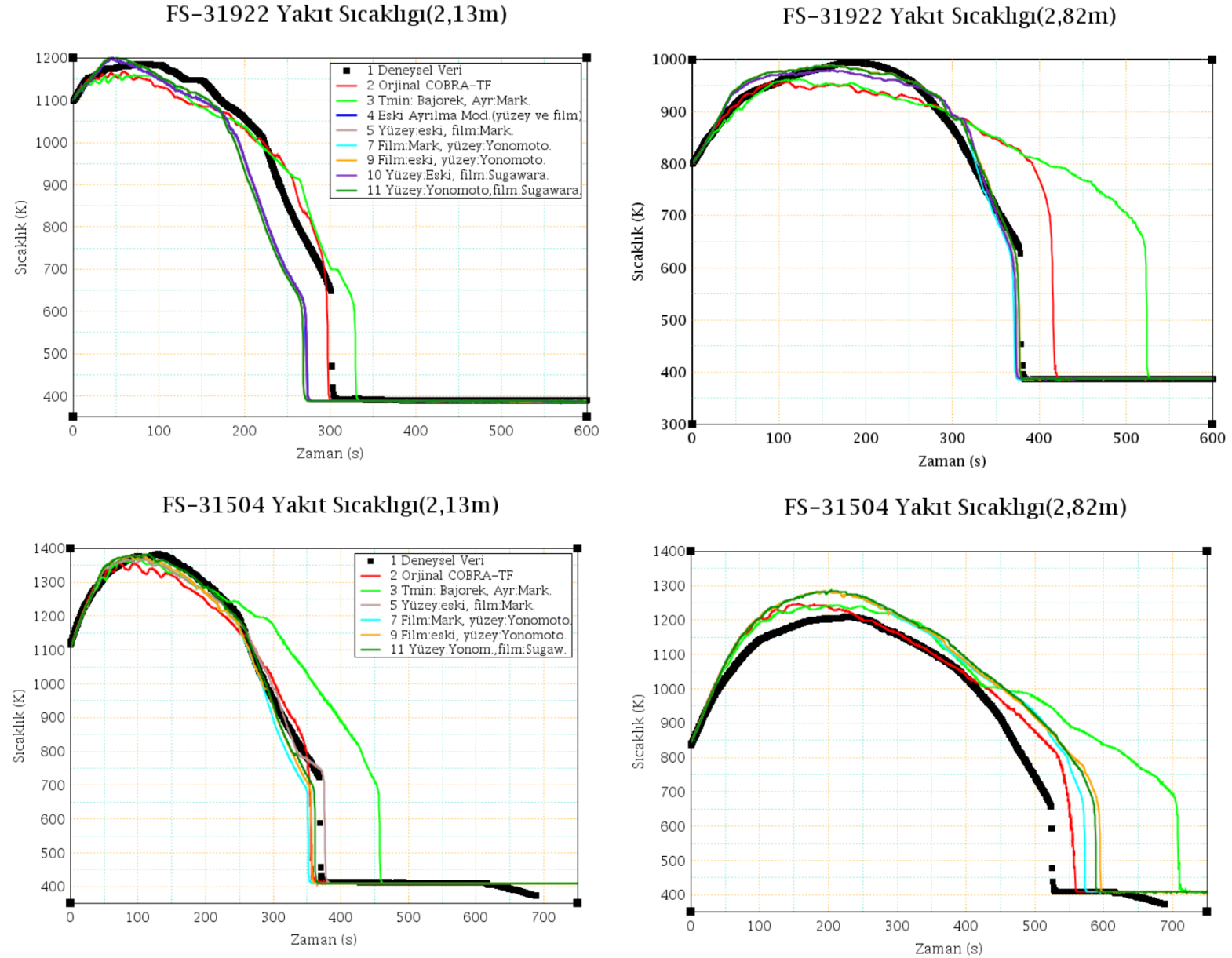
RBHT-1383 Yakıt Sıcaklığı(1,87m)



RBHT-1383 Yakıt Sıcaklığı(2,69m)

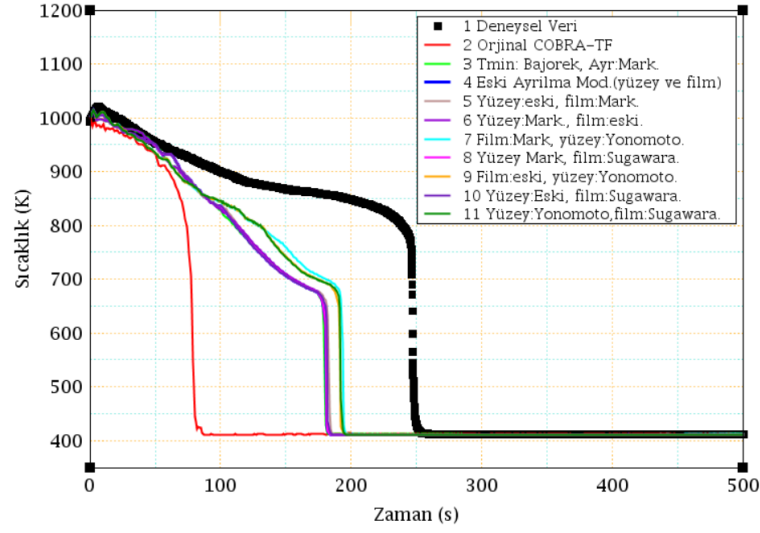


Şekil 5.5. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: FS-31922,31504.

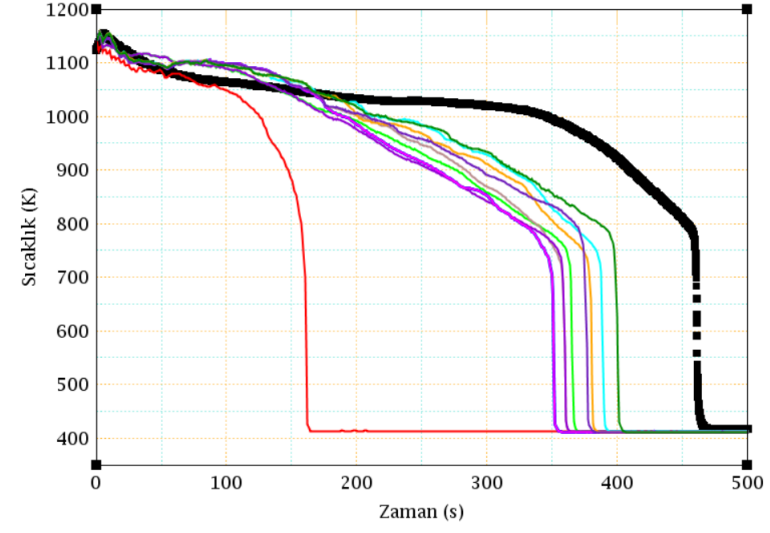


Şekil 5.6. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: RBHT-1407,1300.

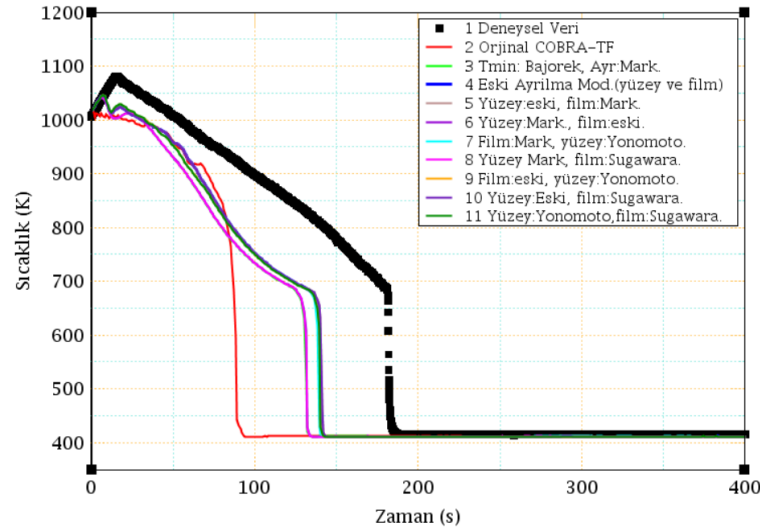
RBHT-1407 Yakıt Sıcaklığı(1,87m)



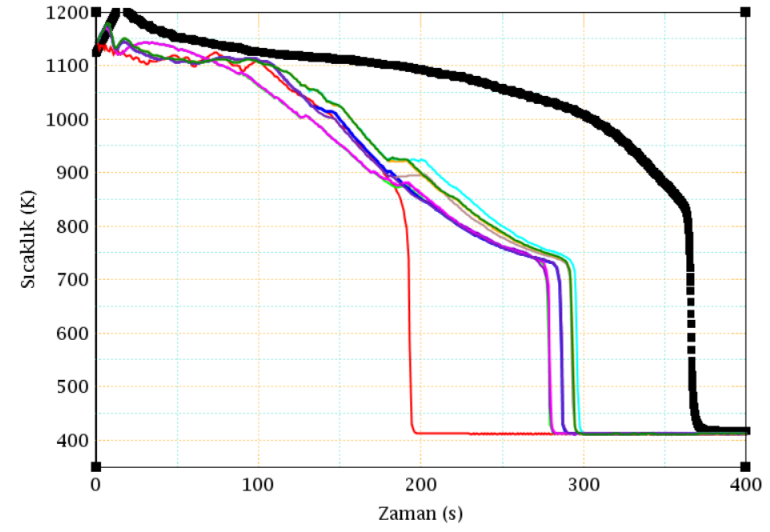
RBHT-1407 Yakıt Sıcaklığı(2,69m)



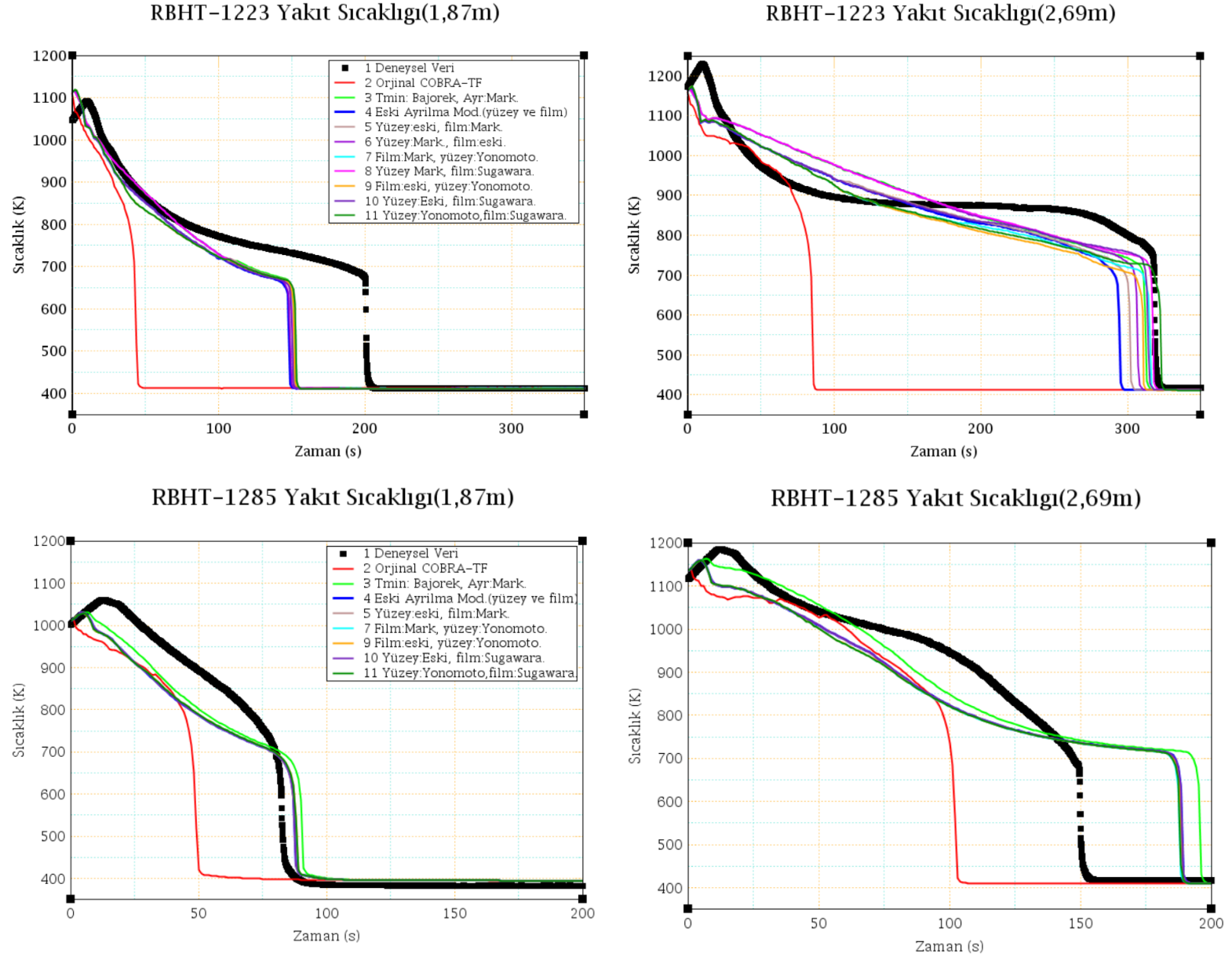
RBHT-1300 Yakıt Sıcaklığı(1,87m)



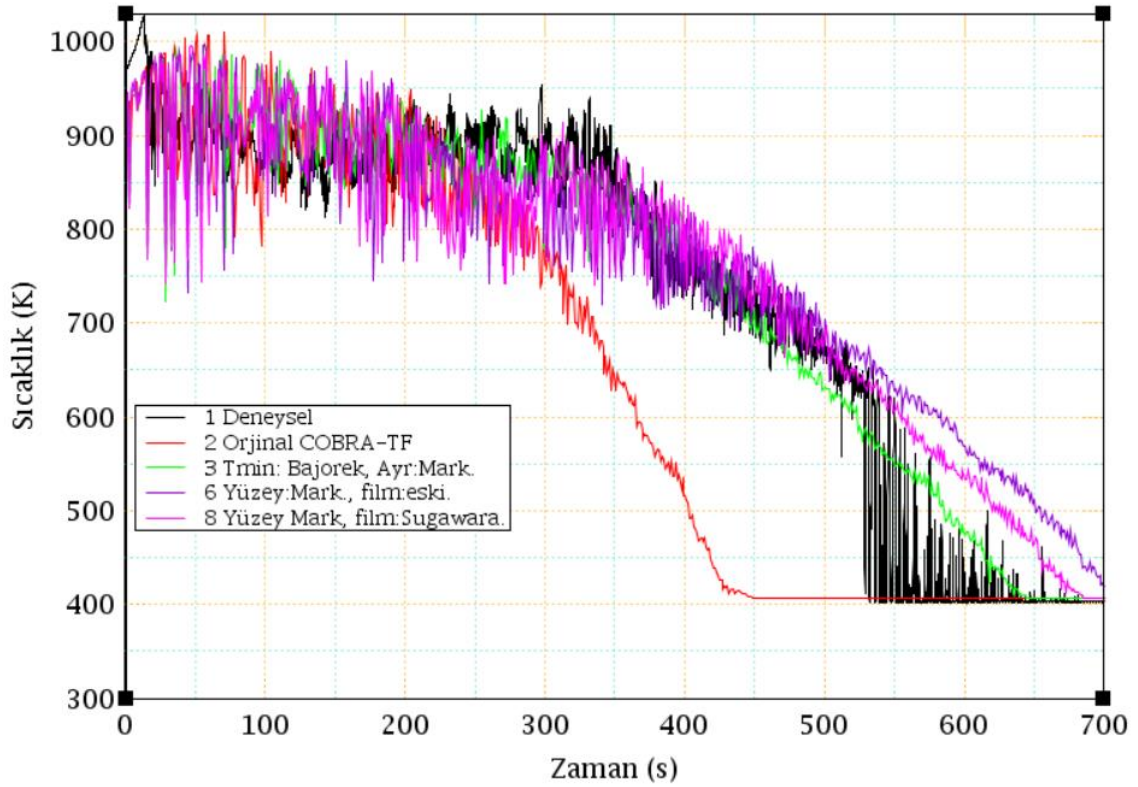
RBHT-1300 Yakıt Sıcaklığı(2,69m)



Şekil 5.7. COBRA-TF Damlacık Ayrılma Model Değişiklikleri, Yakıt Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları: RBHT-1223,1285.

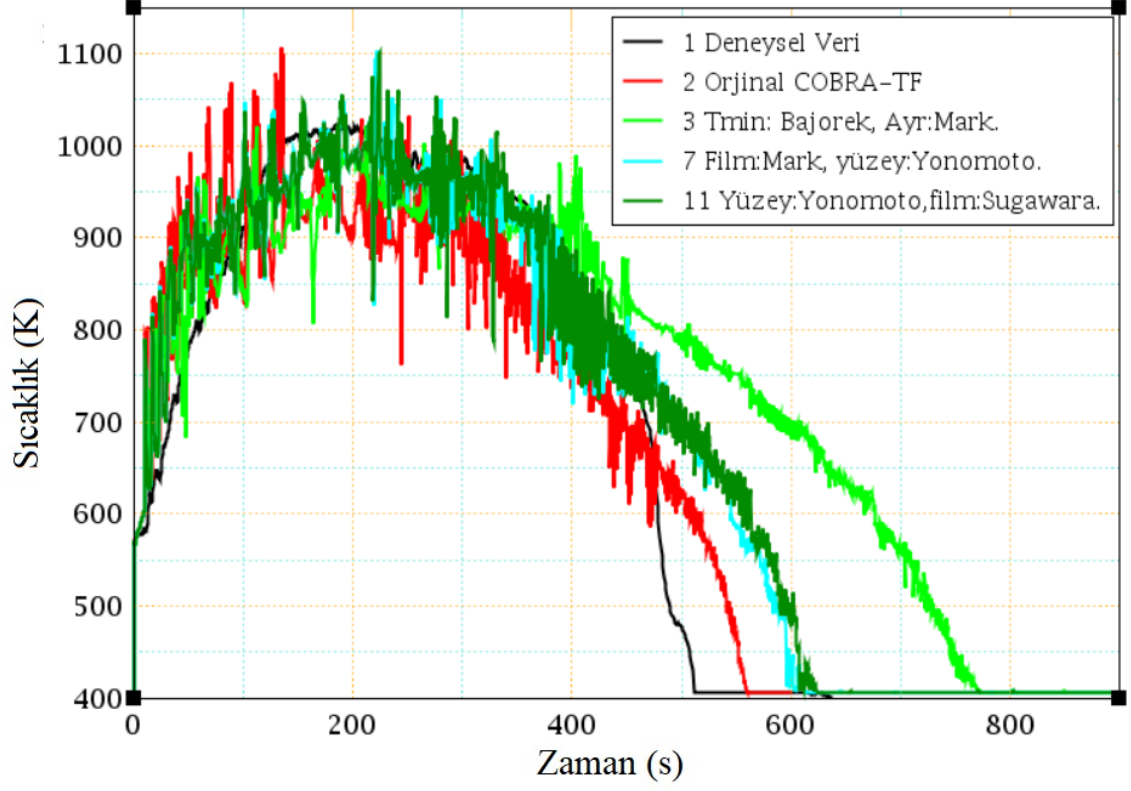


Şekil 5.8’de RBHT-1383 ve Şekil 5.9’da FLECHT-SEASET-31504 deneylerine ait zamana bağlı buhar sıcaklığı sonuçları verilmiştir. Her iki deneye ait buhar sıcaklığı eğrileri yakıt demetinin dördüncü çeyreklik bölümünde, yani en üst konumlarda deneysel veriden sapmanın artacağı konumlarda alınmıştır. COBRA-TF sürümlerine ait RBHT buhar sıcaklığı tahminleri deneysel veriye göre yakıt sıcaklıkları ile uyumlu veya daha iyi bir davranış sergilemektedir.



Şekil 5.8. RBHT-1383 Buhar Sıcaklığı (2,93m)

FLECHT-SEASET karşılaştırması sadelik açısından orijinal sürüm ile sadece T_{min} modelinin iyileştirildiği 3 no’lu sürüme ek olarak yakıt davranışı nispeten daha iyi olan 7 ve 11 no’lu sürümler için verilmiştir. Başlarda deneysel verinin üzerinde seyreden tahminlerin daha sonra uyumlu bir şekilde devam ettiği görülmektedir. 3 no’lu sürüme ait buhar sıcaklığı sonuçları yakıt sıcaklığı eğrilerinde olduğu gibi gecikmiş fakat 7 ve 11 nolu sürümlere ait sonuçlar orijinal COBRA-TF tahmini ve deneysel veriye göre daha uyumlu çıkmıştır.



Şekil 5.9. FLECHT SEASET 31504 Buhar Sıcaklığı (3,05 m)

6. YORUMLAR

Bu çalışmada nükleer santrallerin lisanslamasında kullanılan en-iyi tahmin yazılımlarından COBRA-TF'in, Büyük Kırıklı Soğutma Suyu Kazası senaryosunda yakıt yüzeyi sıcaklık davranışının daha iyi tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda literatürdeki çalışmalardan farklı olarak COBRA-TF yazılımının AYS modülündeki ısı transferi yaklaşımları, denklemler, tablolar gibi model unsurlarının incelemesi yapılarak deneysel veriler ile tutarsız olduğu durumlar belirlenmiştir. Deneysel veri ile örtüşmede zayıf kalan bu alanlar üzerinde yapılan çalışma ile COBRA-TF yazılımının yakıt yüzeyi sıcaklığı ve yakıt ıslanma zamanı parametreleri gibi Büyük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası senaryosu için büyük önem arz eden ve resmi lisanslama sürecinde temel teşkil eden güvenlik ölçütlerinin hem FLECHT-SEASET hem de RBHT deneysel verileri ile daha tutarlı bir şekilde sonuç üretmesi için iyileştirmeler yapılmıştır.

COBRA-TF kodu ile Büyük Kırıklı Soğutma Kaybı Kazasına ait tahminlerin iyileştirilmesine yönelik çalışma için aşağıdaki yöntemler sırasıyla uygulanmıştır:

- Büyük Kırıklı Soğutucu Kaybı Kazası farklı deney şartları ve sınır koşulları için COBRA-TF ile modellenmiştir.
- FLECHT-SEASET ve RBHT deneysel verilerinin ilgili kısımlarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır.
- Karşılaştırma sonuçlarına göre elde edilen yakıt ıslanma ve yakıt yüzeyi sıcaklık davranışlarında deneysel veriye göre tutarsız veya zayıf kalan modeller belirlenmiştir.
- Elde edilen bulgulara göre modellenen olayın fiziki şartları göz önünde bulundurularak ilgili denklemlerde, akış ve ısı transferi yaklaşımlarında kök-sebep araştırmaları, deneme çalışmaları ve kod koşulları ile iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.
- Orijinal COBRA-TF koşulları ve iyileştirilen kod koşullarından elde edilen değerler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

İlk aşamada orijinal COBRA-TF sürümü ile elde edilen yakıt ıslanma ve sıcaklık dağılımı sonuçlarının FLECHT-SEASET deneysel verileri karşısında Minimum Film Kaynama sıcaklığı (T_{min}) değerleri örtüşmemesine rağmen daha tutarlı olduğu, RBHT verileri karşısında ise oldukça zayıf kaldığı tespit edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı öncelikle mevcut T_{min} modeli daha yeni ve gelişmiş bir model ile değiştirilmiş ve yeni COBRA-

TF sürümü ile elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Yeni model ile çalışan COBRA-TF sürümü ile T_{min} değerlerinin deneysel veri karşısında önemli ölçüde düzeldiği görülmüştür. Elde edilen yeni sürüm COBRA-TF'in T_{min} değerleri ile RBHT deneysel verisi karşısında sıcaklık davranışında önemli ölçüde ilerleme sağlandığı görülmüştür. FLECHT-SEASET verisi ile yapılan karşılaştırmada ise daha iyi T_{min} değerleri elde edilmesine rağmen sıcaklık davranışı bozulmuştur.

İkinci aşamada orijinal COBRA-TF sürümünde çalışan film ve yüzeyden damlacık ayrılma modellerine yoğunlaşmıştır. Öncelikle bu modeller birer birer eski sürümlerine dönülmüş ve sonuçlar incelenmiştir. Mevcut ayrılma modellerinin türetilmesinde kullanılan deneysel veriden dolayı geçerliliklerinin kısıtlı olduğu, her iki deneysel veri karşısında tutarlı olmadığı anlaşılmıştır. Daha sonra eski ve orijinal film ve yüzeyden damlacık ayrılma modellerine alternatif modeller de eklenerek elde edilen COBRA-TF sürümlerinden elde edilen tahminler deneysel veri ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak yenilenen T_{min} modelinin basınç, malzeme ve akışkan özellikleri, yüzey pürüzlülüğü gibi değişkenlerini hesaba katarak her iki deney verisi karşısında hem yakıt ıslanma zamanı hem de en yüksek yakıt yüzeyi sıcaklığı açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan çift-kanal COBRA-TF modellemesinden elde edilen sonuçların tek kanala göre daha iyi tahminler üretmediği dolayısıyla tek-kanal modellemelerinin basitlik, hesaplama maliyeti ve elde edilen sonuçlar açısından daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Damlacık ayrılma modelleri ile ilgili yapılan çalışmada ise sistem basıncındaki akışkanın doyma noktasına daha yakın sıcaklıktaki soğutma suyu ve düşük akış hızı olan deneylerde Holowach'ın yüzeyden ayrılma modelleri ile çalışan sürümlerin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Doyma noktasına göre daha düşük sıcaklıkta soğutma suyu uygulanan ve akış hızı yüksek durumlarda ise yüzeyde Yonomoto ayrılma modelinin bulunduğu ve özellikle de Sugawara film damlacık ayrılma modeli olan sürümler daha iyi sonuçlar vermiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde nükleer endüstride kullanılan ve termal-hidrolik alanında önemli bir en-iyi tahmin yazılımı olan COBRA-TF'in fiziksel veya fiziksel-kısmi deneysel modellerine bazı müdahaleler yapıldığı görülmüştür. Bu

müdahaleler modellere ait değişkenlerin hedefteki deneysel veriye uyarlanması ve bu veriyi daha iyi tahmin etmesi amacıyla yapılagelmiştir. Fakat bu yöntem ile belirli bir deneysel veri kümesini tahmin etmek yerine gelecekte fiziksel olayları daha iyi temsil eden modellerin eklenmesi ile çok daha geniş şartlara hitap eden sürümler elde edilmesi mümkün olacağı düşünölmektedir. Ayrıca, RBHT-1285 sonuçlarındaki deneysel veriye göre gecikme sorunu COBRA-TF'in ters dairesel film kaynama bölgesinde gerçekleşmekte olup özellikle bu bölgenin ısı transferi modellerine ve genel olarak COBRA-TF'in ışınım ile ısı transferi ve tüm ısı paketi üzerine yoğunlaşmanın tahminlerin düzelmesinde etkili olacağı değerlendirilmiştir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-coolant Accident (LOCA) Conditions, NEA No. 6846, OECD, **2009**.
- [2] Study on Thermal-hydraulics During a PWR Reflood Phase, JAERI-Research 98-054, **1998**.
- [3] Division of Systems Research. Compendium of ECCS research for realistic LOCA analysis. Washington (DC): US Nuclear Regulatory Commission; **1988**.
- [4] Ş. ERGÜN, "*Modeling Of Dispersed Flow Film Boiling With Two Flow, Five Field Eulerian-Eulerian Approach And Affects Of Spacer Grids on Heat Transfer*" adlı doktora tezi, PennState University, ABD, **2006**.
- [5] Sule Ergun, Lawrence E. Hochreiter, John H. Mahaffy, Modifications to COBRA-TF to model dispersed flow film boiling with two flow, four field Eulerian–Eulerian approach – Part 1, Annals of Nuclear Energy 35 1663–1670, **2008**.
- [6] Sule Ergun, Lawrence E. Hochreiter, John H. Mahaffy, Modifications to COBRA-TF to model dispersed flow film boiling with two flow, four field Eulerian–Eulerian approach – Part 1, Annals of Nuclear Energy 35 1671–1676, **2008**.
- [7] Glenn A. Roth, Fatih Aydogan, Comprehensive Analyses of Nuclear Safety System Codes, Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2013, **2013**.
- [8] S.V. Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill, **1980**.
- [9] G. Yadigaroglu, R.A. Nelson, V. Teschendorff, Y. Murao, j. Kelly ve D. Bestion, Modeling of reflooding, Nuclear Engineering and Design 145 1-35, **1993**.
- [10] Bub Dong Chung, Young Jin Lee, Chan Eok Park, Sang Yong Lee, KAERI Young Seok Bang, Kwang Won Seul, Hho Jung Kim, KINS, "Improvements to the RELAP5/MOD3 Reflood Model and Uncertainty Quantification of Reflood Peak Clad Temperature", **1996**.

- [11] Kwi-Seok Ha, Jae-Jun Jeong, Suk Ku Sim, "Improvement of Liquid Droplet Entrainment Model in the COBRA-TF Code", **1997**.
- [12] Thomas K.S. Liang, Chin-Jang Chang, Huan-Jen Hung, "Development of LOCA Licensing Calculation Capability with RELAP5-3D in Accordance with Appendix K of 10 CFR 50", **2000**.
- [13] Moonkyu Hwang, Bub-Dong Chung, Korea Atomic Energy Research Institute, "MARS Code Reflood Model Improvements and Comparisons with Flecht-Seaset and RBHT Tests", **2011**.
- [14] Dong Li, Xiaojing Liu, Yanhua Yang, Improvement of reflood model in RELAP5 code based on sensitivity analysis, Nuclear Engineering and Design 303 163–172, **2016**.
- [15] CTF Theory Manual, The Pennsylvania State University, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Reactor Dynamics and Fuel Management Group, **2016**.
- [16] M. J. Thurgood, J. M. Kelly, T. E. Guidotti, R. J. Kohrt, K. R. Crowell: COBRA/TRAC -A Thermal-Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems, **1983**.
- [17]. Lee, S. L., Cho, S. K., Aghili, M., Sheen, H., J., "A Study of Droplet Hydrodynamics Across the Grid Spacer Geometry", Konuyla ilgili rapor, **1982**.
- [18]. Paik, C.Y., Hochreiter, L.E., Kelly, J.M., Kohrt, R.J., "Analysis of FLECHTSEASET 163-Rod Blocked Bundle Data Using COBRA-TF", NUREG/CR-4166, **1985**.
- [19]. Sparrow, E. M. et al., "Heat Transfer to Longitudinal Laminar Flow between Cylinders", J of Heat Transfer, 83. cilt, sayfa. 415, **1961**.
- [20]. Chen, J. C., "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow", Process Design and Development, 5, sayfa 322-327, **1967**.
- [21]. Sun, K. H., Gonzalez, J. M., Tien, C. L., "Calculations of Combined Radiation and Convection Heat Transfer in Rod Bundles Under Emergency Cooling Conditions", ASME Yayınları, **1975**.
- [22]. Hancox, W. T., Nicoll, W. B., "A General Technique for the Prediction of Void Distributions in Nonsteady Two-phased Forces Convection", Int. J. Heat and Mass Transfer, 14. cilt, **1971**.
- [23]. Zuber ve diğerleri, "The Hydrodynamic Crisis in Pool Boiling of Saturated and Subcooled Liquids", Bölüm II, No. 27 International Heat Transfer

Conference, Boulder, CO, **1961**.

[24]. McCoy, D. D., Hanratty, T. J., “Rate of Deposition of Droplets in Annular Two-phase Flow, 3. cilt, sayfa 319-331, **1977**.

[25]. Ganic, E. N., Rohsenow, W. M., “Dispersed Flow Heat Transfer”, Int. J. Heat Mass Transfer, 20. cilt, sayfa 855-866, **1977**.

[26]. Bromley, L. A., “Heat Transfer in Stable Film Boiling”, Chemical Engineering Progress, Vol. 46, No. 5, pp. 221-226, **1950**.

[27]. Forslund, R. P., Rohsenow, W. M., “Dispersed Flow Film Boiling”, Journal of Heat Transfer, **1968**.

[28] P. J. Berenson, Film-Boiling Heat Transfer From a Horizontal Surface, Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, **1961**.

[29] R.E. Henry. A Correlation for the Minimum Film Boiling Temperature. AICHE Sempozyumları, no:138, sayfa 81-90, **1974**.

[30]. Peterson, L. J., Bajorek, S. M., “Experimental Investigation of Minimum Film Boiling Temperature For Vertical Cylinders At Elevated Pressure”, Proceedings of ICONE10, 10 TH International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, VA, 14-18 Nisan, **2002**.

[31] Shikha A. Ebrahim, Shi Chang, Fan-Bill Cheung, Stephen M. Bajorek, ”Parametric investigation of film boiling heat transfer on the quenching of vertical rods in water pool”, Applied Thermal Engineering 140 (2018) 139–146, **2018**.

[32] M.J. Holowach, “*A Physical Model For Predicting Droplet Entrainment in Transient Two-phase Fluid Flow and Heat Transfer Systems Analysis Computer Codes*”, doktora tezi, Mechanical and Nuclear Engineering Department, PennState University, ABD, **2002**.

[33] Pravin Sawant, Mamoru Ishii, Michitsugu Mori, Prediction of amount of entrained droplets in vertical annular two-phase flow, International Journal of Heat and Fluid Flow 715–728, **2009**.

[34] Hewitt G., and Hall-Taylor: Annular Two-Phase Flow, Pergamon Press, New York, **1970**.

[35] C. Berna, A. Escrivá, J.L. Muñoz-Cobo ve L.E. Herranz, Review of droplet entrainment in annular flow: Interfacial waves and onset of entrainment, Progress in Nuclear Energy 14-43, **2014**.

[36] C. Berna, A. Escrivá, J.L. Muñoz-Cobo ve L.E. Herranz, Review of droplet entrainment in annular flow: Characterization of the entrained droplets, Progress

in Nuclear Energy 64-86, **2015**.

[37] Li Liu, Bofeng Bai, Generalization of droplet entrainment rate correlation for annular flow considering disturbance wave properties, Chemical Engineering Science 164 279–291, 2017.

[38] Ri Zhang, Haixiao Liu, Mingyang Liu, A probability model for fully developed annular flow in vertical pipes: Prediction of the droplet entrainment, International Journal of Heat and Mass Transfer 84 225–236, **2015**.

[39] Sawant, Ishii ve Mori, Prediction of amount of entrained droplets in vertical annular two-phase flow, International Journal of Heat and Fluid Flow 30 715–728, **2009**.

[40] Sawant, Ishii ve Mori, Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow, Nuclear Engineering and Design 238 1342–1352, **2008**.

[41] Aaron Wysocki, Robert Salko. Validation of CTF Droplet Entrainment and Annular/Mist Closure Models using Riso Steam/Water Experiments, Oak Ridge National Laboratory, **2016**.

[42] Jorgen Wurtz. An Experimental and Theoretical Investigation of Annular Steam-Water Flow in Tubes and Annuli at 30 to 90 bar. Tech. rep. Riso Report No. 372. Kopenag, Danimarka: Riso National Laboratory, **1978**.

[43] S. Sugawara, Droplet Deposition and Entrainment Modelling Based on the Three-Fluid Model, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japonya, **1988**.

[44] T. Yonomoto, A Study of Entrainment at a Break and in the Core during Small Break Loss-of-coolant Accidents in PWRs, JAERI-Research 96-024, **1996**.

[45] M.J. Holowach, L.E. Hochreiter, J.H. Mahaffy, F.B. Cheung, Modeling of droplet entrainment phenomena at a quench front, International Journal of Heat and Fluid Flow 24 902–918, **2003**.

[46] M.J. Holowach, L.E. Hochreiter, F.B. Cheung, A model for droplet entrainment in heated annular flow, International Journal of Heat and Fluid Flow 23 807–822, **2002**.

[47] Kwi-Seok Ha, JAe-Jun Jeong ve Suk Ku Sim, Improvement of Liquid Droplet Entrainment Model in the COBRA-TF Code, Journal of the Korean Nuclear Society, No:30-3, sayfa 181-193, **1998**.

[48] I. Kataoka, M. Ishii, K. Mishima, Generation and Size Distribution of Droplet

in Annular Two-Phase Flow, Journal of Fluids Engineering, 105, **1983**.

[49] FLECHT SEASET Program NRC/EPRI/Westinghouse Report No. 7 NUREG/CR – 1532, EPRI NP-1459, WCAP-9699, **1980**.

[50] L. E. Hochreiter, Fan-Bill Cheung, T. F. Lin, J. P. Spring, S. Ergun, A. Sridharan ve diğerleri, RBHT Reflood Heat Transfer Experiments Data and Analysis, NUREG/CR-6980, **2012**.

[51] F. Aydoğan, “*Development Of Uncertainty Methodology For COBRA-TF Void Distribution And Critical Power Predictions*”, doktora Tezi, PennState University, ABD, **2008**.

[52] Development of a PIRT for Thermal-Hydraulic Phenomena During a PWR LB LOCA by Idaho National Lab. For NRC, 1988.

EKLER

EK 1 – Örnek COBRA-TF Kod Girdisi (RBHT 1383)

```
*****
*****
* INPUT DECK
* RBHT Single Channel Model
* Reflood 1 in/sec
* No Radiation H.T.
* this input models the rbht experiment 40 psia
*
*****
*****
*
*****
*****
* Main Problem Control Data *
*****
*****
* ICOBRA
```

```

0
* DTSTEP    TIMET
0      0.0
* EPSO     OITMAX    IITMAX
.001    10      40
* INIT                      TEXT
1              ***** Reflood 1 in/sec Bundle Rod 7x7 *****
*
*****
*****
* Group 1 - Calculation Variables and Initial Conditions          *
*****
*****
*NGRP NGAS
1 1
* PREF    HIN    GIN  AFLUX    GHIN  VFRAC1 VFRAC2  RSBF
40.0  1170.    0.0  0.270    124.    0.0  .9999  1.0
*GTYPE    VFRAC
air      .0001
0
*****
*****
* Group 2 - Channel Description                                  *
*****
*****
*NGRP NCHA
2 2
* I  AN  PW  ABOT  ATOP  NMGP    NRRD  DROD
17.21971.74  0.  0.  0    45. .374
250.2471.74  7.22  0.
*
*****
*****
* Group 3 - Transverse Channel Connection (Gap) Data          *

```

```

*****
*****
*NGRP NK
  3  0
* K  IK  JK GAPN LNGT WKR FWAL IGPB IGPA FCT IGAP JGAP
*  1  1  21.952 1.38 2.0 0.0  0  0 1.0  0  0
*GMLT ETNR
* 16. 0.0
*NMGP
  0
*
*****
*****
* Group 4 - Vertical Channel Connection Data *
*****
*****
*NGRP NSEC NSIM IREB
  4  2  1  0
*ISEC NCHN NONO  DXS IVAR
  1  1  33  4.653  33
*JLEV  VARDX JLEV  VARDX JLEV  VARDX
  2   5.0  3   4.25  4   4.375  5   4.375  6   3.605
  7   3.605  8   3.605  9   3.605  10  4.79  11  4.79
 12   6.0  13   4.87  14   5.13  15   4.0  16   6.0
 17   5.0  18   4.0  19   4.0  20   4.0  21   5.0
 22   4.0  23   5.5  24   5.0  25   5.0  26   3.0
 27   4.0  28   3.0  29   4.0  30   6.0  31   4.0
 32   4.8  33   4.6  34   6.0
*  IKCHA          KCHB
  1  2          1
*  2  3          2
*ISEC NCHN NONO  DXS IVAR
  2  1  3  4.0
*  IKCHA          KCHB

```

```

2 2          1
*IWDE
1
*MSIM
50
*
*****
*****
* Group 7 - Local loss coefficient and Grid spacer data          *
*****
*****
*NGRP NCD NGT IFGQ IFSD IFES IFTP  NFBS
7 7 1 1 1 1 1 0 0 0
* nglcof
1
* CDL  J ICDM
1.2 3 1 2
1.2 9 1 2
1.2 13 1 2
1.2 17 1 2
1.2 22 1 2
1.2 26 1 2
1.2 31 1 2
*
* ING NGAL NGCL IGMT  GLOSS  GABLOC  GLONG  GPERIM
1 7 1 1 1.4 .2952 1.5 1.984
*NNGL
3 9 13 17 22 26 31
* 500. 803.1025.1135.1228.1239. 945.
*NCGL GMLT  NGROD NGSR
1 49. 1 1
* 2 33. 2 1
*
*****

```

* Group 8 - Rod and Unheated Conductor Data *

*NGRP NRRD NSRD NC NRTB NRAD NLTY NSTA NXF NCAN RADF

8 2 1 2 2 0 0 0 1

* NIFTY IAXP NRND DAXMIN RMULT RADIAL HGAP ISEC
HTMB TAMB

1 1 1 2 0.05 45. 1.0 5000. 1 0. 75.

*NSCH PIE

1 1.0

* 2 1 1 2 0.05 29.0 1.0 5000. 1

* 2 1.0

* NIFTY IAXP NRND DAXMIN RMULT RADIAL HGAP ISEC
HTMB TAMB

2 2 0 2 0.05 4. 0.0 5000. 1 0. 75.

*NSCH PIE

1 1.0

* NISTY HPERO HPERI RMULT NSLC NSLO HTAMB TAMBS

1 3 14.20 14.20 1.0 1 0 0.0 75.0

* INRT1 NST1 NRX1

1 2 0 11

*IRTB

1 2

* AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT AXIALT
TRINIT

0. 600.0 13.0 730. 37.21 1030. 55.00 1139.

65.00 1204.0 105.10 1399.0 111.00 1383.0 133.0 1069.

147.0 766.0 151.01 696.0 156.00 696.0

* INRT1 NST1 NRX1

2 0 1 7

*ISTB

1

* AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT AXIALT

TRINIT

0. 220.0 66.9 555. 113.0 725.0 133.0 549.0
149.1 289.0 155.0 220.0

*

* Group 9 - Conductor Geometry Description

*

*NGRP NFUE

9 3

* IFTYP DROD DIN NFUE IMOX IMTX

1 hrod .374 0.0 4 0

*NDER MATR TREG QREG NDER MATR TREG QREG NDER MATR

TREG QREG NDER MATR TREG QREG

3 2.0685 0.0 3 3.044 1.0 3 2.0545 0.0 3 1 .02 0.0

* IFTYP DROD DIN NFUE IMOX IMTX

2 tube .374 .209 1 0

*NDER MATR TREG QREG

3 1.0825 0.0

* IFTYP DROD DIN NFUE IMOX IMTX

3 wall 14.20 4.250 2 4 1

*NDER MATR TREG QREG

5 1.250 0.0 8 4 4. 0.0

*

* Group 10 - Axial Power Tables and Forcing Functions

*

*NGRP NMAT

10 4

```

* N NTDP  RCOLD          IMATAN
1 17  516.7
* TPROP  CPF1  THCF  TPROP  CPF1  THCF
  32.  .1010  8.1400   70.  .1030  8.340
 212.  .1110  9.090   392.  .1210  10.04
 500.  .1270  10.60   572.  0.131  10.98
 752.  .1410  11.93   932.  0.151  12.88
1000.  0.158  13.23  1112.  0.166  13.82
1292.  0.178  14.77  1472.  0.191  15.72
1500.  0.193  15.86  1652.  0.204  16.66
1832.  0.216  17.61  2012.  0.229  18.56
2192.  0.241  19.50
2 14  119.
 212.  .16587  67.37   392.  .22014  63.827
 572.  .26263  60.28   752.  .29590  56.737
 932.  .32194  53.19  1112.  .34233  49.646
1292.  .35829  46.10  1472.  .37078  42.555
1652.  .38056  39.01  1832.  .38822  35.464
2012.  .39421  31.92  2192.  .39891  28.375
2372.  .40259  24.83  2552.  .40546  21.284
3 10  528.8
 70.0  .10000  10.083   200.  0.107  11.333
 400.  .11400  13.00    600.  0.117  14.833
 800.  .120    16.50  1000.  0.125  18.333
1200.  .132    20.00  1400.  0.141  21.833
1600.  0.157   23.50  1800.  0.186  25.167
4  2  12.0
* TPROP  CPF1  THCF  TPROP  CPF1  THCF
 650.0  0.2   .058   800.  0.2   .077

```

```

*
*****
*****

```

* Group 11 - Axial Power Tables and Forcing Functions

*

```

*****
*****
*NGRP NAXP  NQ NGPF
  11  1  0
*  INAXN
  1  6
*    Y  AXIAL    Y  AXIAL    Y  AXIAL    Y  AXIAL
      0.  0.0  4.99   0.  5.   0.5  113.00   1.50
      149.00   0.5  149.01   0.0
*****
*****
* Group 13 - Boundary Conditions Data
      *
*****
*****
*NGRP NBND NKBD NFUN NGBD
  13  2  0  0  0  0
*IBD1 IBD2 ISPC NPFN NHFN  PVALUE  HVALUE  XVALUE
  1  1  2  0  0  0.245  215.66  40.0
*HMGA GVAL
124. 1.0.9999.0001
*NHFN NGFN
  0  0
*IBD1 IBD2 ISPC NPFN NHFN  PVALUE  HVALUE  XVALUE
  2  5  1  0  0  40.0  1170.0  40.0
*HMGA GVAL
124. 1.0.9999.0001
*NHFN NGFN
  0  0
*****
*****
* Group 14 - Output Options
*****
*****

```

```

*NGRP  N1 NOU1 NOU2 NOU3 NOU4 IPRP IOPT IRWR
  14  5  0  0  0  0  1  2  1
  0
  0
*MAXDP
9000
*   DTMIN      DTMAX      TEND      RTWFP      TMAX
    .000001    0.01000    1000.     1.0    999999.
*   EDINT      GFINT      SEDINT
    10.        1.         5.
*   DTMIN (if negative stop)
    -.001

```

EK 2 – Örnek COBRA-TF Kod Girdisi (FLECHT SEASET 31504)

```

*****
* INPUT DECK
* FLECHT-SEASET - Single-Channel model
*****
* Run Description:
* Test Run 31504 - 1.0 in/sec Reflood
* Fine Eulerian Mesh - 28 Axial Nodes

*****
* Main Problem Control Data
  *
*****
*   ICOBRA
  0
*   DTSTEP      TIMET
  0      0.0
*   EPSO      OITMAX      IITMAX
  .001      10      40
*   INIT      TEXT

```

```

1                * Reflood Transient *
*
*****
* Group 1 - Calculation Variables and Initial Conditions          *
*****
*NGRP NGAS
  1  1
*  PREF   HIN   GIN  AFLUX   GHIN  VFRAC1  VFRAC2  RSBF
    40.0 1169.77  0.0 0.4217  124.   0.0  .9999  1.0
*GTYPE    VFRAC
air       .0001
* TMINFLG  TMIN
    0
*
*****
* Group 2 - Channel Description
    *
*****
*NGRP NCHA
  2  3
*  I  AN  PW  ABOT  ATOP  NMGP   NRRD  DROD
    123.95251.8  0  0  0
    223.95251.8  0  0  0  161. .374
    345.6623.9623.95  0  0
*
*****
* Group 4 - Vertical Channel Connection Data
    *
*****
*NGRP NSEC NSIM IREB
  4  3  1  1
*ISEC NCHN NONO  DXS  IVAR
    1  1  4 2.5  0
*  IKCHA                KCHB

```

```

1 2 1
*ISEC NCHN NONO DXS IVAR
2 1 285.145 0
* I KCHA KCHA KCHB
2 3 1
*ISEC NCHN NONO DXS IVAR
3 1 4 3.0 0
* I KCHA KCHB
3 3 2
*IWDE
1
*MSIM
38
*
*****
* Group 7 - Local loss coefficient and Grid spacer data *
*****
*NGRP NCD NGT IFGQ IFSD IFES IFTP NFBS
7 8 1 1 1 1 1 0 0 0
1
* CDL J ICDM
1.2 1 2
1.2 5 2
1.2 9 2
1.2 13 2
1.2 17 2
1.2 21 2
1.2 25 2
1.2 29 2
*
* ING NGAL NGCL IGMT GLOSS GABLOC GLONG GPERIM
1 8 1 1 1.4 .2952 2.0 1.984
*NNGL
1 5 9 13 17 21 25 29

```

*NCGL GMLT NGROD NGSR

2 177. 2 1

*

* Group 8 - Rod and Unheated Conductor Data

*

*NGRP NRRD NSRD NC NRTB NRAD NLTY NSTA NXF NCAN RADF

8 3 0 2 2 0 0 0 1 0 0

* NIFTY IAXP NRND DAXMIN RMULT RADIAL HGAP ISEC
HTMB TAMB

1 1 1 1 0.20 161. 1.0 5000. 1 0 0

*NSCH PIE

2 1.0

* NIFTY IAXP NRND DAXMIN RMULT RADIAL HGAP ISEC
HTMB TAMB

2 2 0 0 0.05 16. 0.0 0. 1 0 0

*NSCH PIE

2 1.0

* NIFTY IAXP NRND DAXMIN RMULT RADIAL HGAP ISEC
HTMB TAMB

3 3 0 0 0.05 1. 0.0 0. 1 0 0

*NSCH PIE

2 1.0

* INRT1 NST1 NRX1

1 1 0 9

*IRTB

1

* AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT AXIALT
TRINIT

10.0 430.0 34.0 751.0 48.0 1274. 82.0 1560.0
106.0 1324.0 111.0 640.0 130.0 540.0 154.0 450.
166.0 300.0

* INRT1 NST1 NRX1

```

2 2 0 2
*IRTB
2 3
* AXIALT TRINIT AXIALT TRINIT
10.0 430.0 166.0 430.
*
*****
* Group 9 - Conductor Geometry Description
*
*****
*NGRP NFUE
9 3
* IFTYP DROD DIN NFUE IMOX IMTX
1 hrod .374 0.0 4 0
*NDER MATR TREG QREG NDER MATR TREG QREG NDER MATR
TREG QREG NDER MATR TREG QREG
2 2.0675 0.0 4 3.045 1.0 6 2.0465 0.0 5 1.028 0.0
* IFTYP DROD DIN NFUE IMOX IMTX
2 tube .474 .454 1 0
*NDER MATR TREG QREG
5 1 0.01 0.0
* IFTYP DROD DIN NFUE IMOX IMTX
3 wall 23.33 0.144 1 0
*NDER MATR TREG QREG
5 1 .144 0.0
*
*****
* Group 10 - Axial Power Tables and Forcing Functions
*
*****
*NGRP NMAT
10 3
* NNTDP RCOLD IMATAN
1 7 496.3 SS316

```



```

* TPROP CPF1 THCF TPROP CPF1 THCF
  0. .1050 7.5 400. .1220 9.22
  600. .1290 10.08 800. .1340 10.94
  1600. 0.148 14.38 1900. .1580 15.67
  2200. 0.168 16.96

```

```

* NNTDP RCOLD IMATAN
  2 14 129.2 BN

```

```

* TPROP CPF1 THCF TPROP CPF1 THCF
  212. .23203 14.59 392. .28633 14.43
  572. .32883 14.27 752. .36210 14.11
  932. .38814 13.95 1112. .40852 13.79
  1292. .42447 13.63 1472. .43696 13.47
  1652. .44673 13.31 1832. .45438 13.15
  2012. .46036 12.99 2192. .46505 12.83
  2372. .46872 12.67 2552. .47159 12.51

```

```

* NNTDP RCOLD IMATAN
  3 5 446.0 Kanthal

```

```

* TPROP CPF1 THCF TPROP CPF1 THCF
  0. .10900 9.7 1200. 0.180 14.86
  1400. .28000 15.72 1600. 0.178 16.58
  2200. .18500 19.16

```

*

* Group 11 - Axial Power Tables and Forcing Functions

*

```

*NGRP NAXP NQ NGPF

```

```

  11 1 23

```

```

* INAXN

```

```

  1 32

```

```

* Y AXIAL Y AXIAL Y AXIAL Y AXIAL
  10.0 0.43 31.6 0.43 31.61 0.68 38.8 0.68
  38.81 0.88 46.0 0.88 46.01 1.11 53.2 1.11

```

53.21	1.3	60.4	1.30	60.41	1.49	67.6	1.49
67.61	1.6	74.8	1.60	74.81	1.66	89.2	1.66
89.21	1.6	96.4	1.60	96.41	1.49	103.6	1.49
103.61	1.3	110.8	1.30	110.81	1.11	118.0	1.11
118.01	0.88	125.2	0.88	125.21	0.68	132.4	0.68
132.41	0.43	154.0	0.43	154.01	0.00	166.0	0.00

* YQ FQ YQ FQ YQ FQ YQ FQ

*constant power

* 0.0 1.0 1000. 1.0

*power decay

0.0	.5710	1.0	.9962	2.5	.9884	5.0	.9752
10.0	.9493	15.0	.9306	20.0	.9110	25.0	.8963
30.0	.8817	40.0	.8590	50.0	.8376	60.0	.8201
75.0	.7860	100.0	.7484	125.0	.7383	150.0	.7040
175.0	.6835	200.0	.6665	250.0	.6362	300.0	.6116
400.0	.5756	600.0	.5255	800.0	.4912		

*

* Group 13 - Boundary Conditions Data

*

*NGRP NBND NKBD NFUN NGBD

13 2 0 1 0

*NPTS

3

*ABSC ORDINT ABSC ORDINT ABSC ORDINT

0.0 0.0 0.1 0.971500. 0.97

*

*IBD1 IBD2 ISPC NPFN NHFN PVALUE HVALUE XVALUE

1 1 2 1 0 .83333 91.061 40.0

*HMGA GVAL

124. 1.0.9999.0001

*NHFN NGFN

0 0

```

*IBD1 IBD2 ISPC NPFN NHFN PVALUE HVALUE XVALUE
  3  5  1  0  0  40.0 1170.0  40.0
*HMGA GVAL
124. 1.0.9999.0001
*NHFN NGFN
  0  0
*
*****
* Group 14 - Output Options *
*****
*NGRP N1 NOU1 NOU2 NOU3 NOU4 IPRP IOPT IRWR
 14  5  0  0  0  0  1  2  1
*
  0
*NEND
  0
*MXDP
2000
*   DTMIN      DTMAX      TEND      RTWFP      TMAX
    .000001    0.01000    900.     1.0    999999.
*   EDINT      GFINT      SEDINT
    10.0     0.50     5.0
*   DTMIN (if negative stop)
    -.001

```

EK 3 – Phyton Yazılımı

```

import math
import bisect
import time
f = open('deck.out','r')
openedfile = f.readlines()
f.close()
maks=0




```

```

for i in range(len(openedfile)):
    if ('heater rod number 1' in openedfile[i]):
        simulation time = ' in openedfile[i]:
        tima=float(openedfile[i].split()[7])
        i+=12
        maks=int(openedfile[i-1].split()[0])
        mini=int(openedfile[i+maks-2].split()[0])
        i+=maks-1
        while (int(openedfile[i-1].split()[0]) != maks-1) :
            if ( openedfile[i-1].split()[5] == 'nucb' ):
                if openedfile[i-2].split()[5] != 'nucb' :
                    print(tima,float(openedfile[i-1].split()[1])*2.54)
                    i+=int(openedfile[i].split()[0])+maks
                    break
            mini+=1
        i-=1

```

EK 6 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu

	HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU
HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ NÜKLEER ENERJİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA	
Tarih: 23/05/2019	
<p>Tez Başlığı / Konusu: COBRA-TF YAZILIMI İLE SOĞUTUCU KAYBI KAZASINDA AKIŞIN YENİDEN SAĞLANMASI FAZININ MODELLENMESİ VE MODEL BELİRSİZLİKLERİNİN İNCELENMESİ</p> <p>Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 133 sayfalık kısmına ilişkin, 17/05/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından <i>Turnitin</i> adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6 'dır.</p> <p>Uygulanan filtrelemeler:</p> <ol style="list-style-type: none">1- Kaynakça dahil2- Alıntılar dâhil3- 5 kelmeden daha az örtüşme içeren metin kısımları dâhil <p>Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.</p> <p>Gereğini saygılarımla arz ederim.</p>	
Adı Soyadı: Refik Karagöz	Tarih ve İmza 23.05.2019
Öğrenci No: N08244620	
Anabilim Dalı: Nükleer Enerji Mühendisliği	
Programı: Nükleer Enerji Mühendisliği	
Statüsü: <input type="checkbox"/> Y.Lisans <input checked="" type="checkbox"/> Doktora <input type="checkbox"/> Bütünleşik Dr.	
<u>DANIŞMAN ONAYI</u>	
UYGUNDUR.	
Doç. Dr. Şule Ergün (Unvan, Ad Soyad, İmza) 	

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Refik KARAGÖZ
Doğum yeri : BOLU
Doğum tarihi : 1976
Medeni hali : Evli
Yazışma adresi : ANKARA
Telefon : +90 505 5371951
Elektronik posta adresi : refikkaragoz@gmail.com
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı.
Doktora : Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı.

İş Tecrübesi

2012-...: Bilişim Uzmanı, T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu, Hizmet Sunumu Genel Müdürlüğü.
2012 : Bilgi Teknolojileri Danışmanı, Helezon Bilgisayar Danışmanlık Ltd. Şti.
2009-2011: Teknik Destek Mühendisi, Servus Bilgisayar San. ve Tic A.Ş.
2009: Nükleer Mühendis, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
2005-2009: Programcı, T.C. Maliye Bakanlığı, Muhasebat Genel Müdürlüğü.

