

NÜKLEER REAKTÖRLERDE KULLANILAN BUHAR  
ÜRETİCİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE  
BUHAR ÜRETİCİ MODELLEMESİ İÇİN  
MATEMATİKSEL TEKNİKLER

Servet TATLİCAN  
Yüksek Lisans Tezi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

1992

Anadolu Üniversitesi  
Anadolu Üniversitesi  
Merkez Kütüphane

NUKLEER REAKTÖRLERDE KULLANILAN  
BUHAR ÜRETİCİLERİNİN KARSILAŞTIRILMASI VE BUHAR ÜRETİCİ  
MODELLEMESİ İÇİN MATEMATİKSEL TEKNİKLER

Servet Tatlıcan

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman : Doc. Dr. L. Berrin Erbay

Subat-1992

( ii )

Servet Tatlıcan ' ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı " Nükleer Reaktörlerde Kullanılan Buhar Üreticilerinin Karsılaştırılması ve Buhar Üretici Modellemesi İçin Matematiksel Teknikler " başlıklı bu çalışma , jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir .

Üye : **Prof.Dr.Kemal TANER**

Üye : **Doç.Dr.Berrin ERBAY** (Danışman)

Üye : **Yrd.Doç.Dr.Zekeriya ALTAÇ**

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu ' nun  
.....EKİM.....1992.. gün ve .329.-7.. sayılı kararıyla  
onaylanmıştır .

Prof. Dr. Rüstem Kaya  
Enstitu Müdürü

## ÖZET

Hafif Su Reaktörlerinde ( LWR ) kullanılan buhar Üreticilerinin fiziksel tasviri, yaklaşımlar ve yaklaşımlar için gereken unsurlar bu tezde verilmeye çalışılmaktadır. Yüksek Sıcaklık Gaz Reaktörleri ( HTGR ) ve Sıvı Metal Soğutuculu Hızlı Üretken Reaktörler' de ( LMFBR ) kullanılan buhar Üreticileri karşılaştırılarak anlatılmaktadır.

Gel-geç ( once-through ) ve U-borulu buhar Üreticilerinin belirgin dizayn karakteristikleri verilmektedir. Daha detaylı olarak da bir ( PWR ) basınçlı su reaktörü tesisinin geçici rejim esnasında buhar Üretici performanslarının analizlerinde kullanılan matematiksel yöntemlerin yeteneklerine değinilmektedir.

Tezde, basınçlı su reaktörü ( PWR )' ndeki buhar Üretici geçici rejim özelliklerinin bilinen modelleme statüsü ve buhar Üretici Unitelerinin geçici rejim davranışını öngören mevcut nümerik yöntemlerin düzenli bir değerlendirilmesi verilmektedir.

## SUMMARY

The need for and the approaches to modeling of transients in steam generator units in Light Water Reactors ( LWR ) are identified and discussed. In this thesis steam generator units in High-Temperature-Gas-Cooled-Reactors ( HTGR ) and Liquid-Metal-Fast-Breeder-Reactors ( LMFBR ) are explained with the comparisons.

Typical design characteristics for both once-through and U-tube steam generators are presented. Then present capabilities of the analysis of steam generator performance during PWR ( Pressurized Water Reactor ) plant transients are indicated in detail.

Also, a state of the review of the available analytical tools for transient behaviour of PWR ( Pressurized Water Reactor ) steam generator units is presented as a brief review of the current status of the modeling steam generator transients in Pressurized Water Reactors.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
SEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
SEMBOLLER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. BUHAR ÜRETİCİ ( SG ) TIPLERİNİN TANIMI .....	2
2.1. Basıncılı Su Reaktörleri ( PWR ) Buhar Üreticileri .....	2
2.1.A. Tek geçişli buhar üreticileri .....	2
2.1.B. U-Borulu buhar üreticileri .....	5
2.2. HTGR Buhar Üreticileri .....	8
2.3. LMFBR Buhar Üreticileri .....	14
3. BUHAR ÜRETİCİ MODELLEMESİ İÇİN MATEMATİK TEKNİKLER .....	19
3.1. Temel Korunum Denklemleri .....	19
3.2. Yersel Ayrıklaştırma Teknikleri .....	27
3.2.A. Sonlu fark formülasyonu .....	28
3.2.B. Kontrol hacmi yaklaşımı .....	30
3.2.C. Hareketli sınır formülasyonu .....	32
3.3. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri .....	34
3.4. Isı İletimi Denklemine Sayısal Çözümü .....	41

3.5. Devirdaim Döngülerinin Simülasyonu .....	43
4. DEĞERLENDİRME VE SONUC .....	45
4.1. Buhar Üretici Modellemesi İçin Verilen Matematik Tekniklerin Değerlendirmesi .....	45
4.2. Sonuç .....	49
EKLER I .....	50
II .....	51
III .....	52
IV .....	60
V .....	64
VI .....	66
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	75

## SEKILLER DIZINI

	<u>Sayfa</u>
Sekil 2.1. Babcock Wilcox OTSG .....	3
Sekil 2.2. Westinghouse Seri 51 Buhar Üretici .....	6
Sekil 2.3. Westinghouse Model D Buhar Üretici .....	9
Sekil 2.4. Combustion Eng. Buhar Üretici .....	10
Sekil 2.5. HTGR Buhar Üretici .....	13
Sekil 2.6. CRBRP Buhar Üreticisi Sistemi Hidrolik Profili .....	16
Sekil 2.7. CRBRP Buhar Üretici Modülü .....	18
Sekil 2.8. Yer Uzayında Doğrudan İki-Nokta Türetme Seması .....	28
Sekil 2.9. Uç-Nokta Fark Seması .....	42



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Cizelge 2.1. Westinghouse Buhar Üreticisi İçin Tipik Dizayn Parametreleri .....	11
Cizelge 2.2. HTGR İçin Nominal Santral İşletme Şartları .....	15
Cizelge 4.1. Mevcut Bazı Termal-Hidrolik Kodların Karakteristikleri .....	48

## KISALTMALAR, SEMBOLLER LİSTESİ

KISALTMA	TANIMLAMA
OTSG	Gel-gec buhar üreticisi
Nod	Düğüm noktası
PWR	Basıncılı-su reaktörü
CHF	Kritik ısı akısı
UTSG	U-borulu buhar üreticisi
IE	Integral ekonomizer
Down-Comer	Ocak gazlarını çekis borusu
HTGR	Yüksek sıcaklık gaz grafit reaktörü
EES	Ekonomizer-buharlaştırıcı-kızdırıcı
SH	Kızdırıcı ( Aşırı ısıtmayı yapan unsurlar )
BWR	Kaynar su reaktörü
LMFBR	Sıvı metal soğutuculu hızlı üretken reaktör
CRBRP	Clinch-River üretken reaktör tesisi
ICE	Kesin sürekli akışkan Eulerian metodu
ACE	Geliştirilmiş sürekli akışkan Eulerian metodu

SEMBOL	TANIMLAMA
$\rho$	Akışkan yoğunluğu
$v$	Akışkan hızı
-	
$P$	Basınc
$\tau$	Kayma gerilme tensörü
$g$	Yerçekimi ivme vektörü
-	

KISALTMALAR, SEMBOLLER LİSTESİ ( DEVAM )

SEMBOL	TANIMLAMA
q	Isı akısı
e	Akışkanın toplam özgül enerjisi
U	Akışkanın iç enerjisi
ø	Akışkanın potansiyel enerjisi
C <sub>p</sub>	Isı kapasitesi
k	Boru metalinin ısı iletkenliği
h	Isı transfer katsayısı
T	Sıcaklık
T <sub>b</sub>	Bulk ( yığın ) sıcaklığı
T <sub>s</sub>	Boru yüzey sıcaklığı
G	Bir akış alanından kütle akış oranı olarak kütle hızı
τ <sub>w</sub>	Duvar kayma gerilmesi
q <sub>w</sub>	Duvar ısı akısı
M <sub>w</sub>	Akış alanı için ıslak çevre
δ	Bosluk ( void ) fraksiyonu ( kesri )
x	Kuruluk fraksiyonu ( kesri )
ρ <sub>m</sub>	Momentum yoğunluğu
ø <sup>2</sup> <sub>TP</sub>	Ampirik iki fazlı sürtünme çarpanı
L	Karakteristik uzunluk

KISALTMALAR, SEMBOLLER LİSTESİ ( DEVAM )

SEMBOL	TANIMLAMA
c	Yerel ses hızı
u	Akışkanın transport hızı
I	Birim matris
J <sub>n</sub>	t ' de değerlendirilen dönüşümün Jacobian' ı
h <sub>i</sub>	İleri zaman entalpisi
p <sub>i</sub>	İleri zaman basıncı

"Önümüzdeki on yılda , Nükleer Reaktörler Türkiye'nin gündemine daha fazla gireceğe benzemektedir. Yapılmış ve yapılmakta olan konvansiyonel enerji üretim tesislerinin ikibinli yıllarda ülkemiz enerji gereksinimini karşılayamayacağı şimdiden açıkça kestirilebilmektedir.

Bir Nükleer güç üretimi tesisinin en önemli enstrümanlarından biri hiç şüphesiz, nükleer enerjiden güvenli ısı çekilebilmesini sağlayan buhar üreticileridir.

« Nükleer Reaktörlerde kullanılan buhar üreticilerinin karşılaştırılması ve sayısal analiz için matematiksel teknikler » başlıklı yüksek lisans tez çalışmasının , araştırma , değerlendirme çıkış yolu bulma aşamalarında sürekli yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. L. Berrin ERBAY'ın metnin yazımı ve düzenlenmesinde yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım Elektronik Müh. Tarkan ÇAKICI'ya teşekkür ederim .

Servet TATLİCAN  
Şubat 1992

## 1. GİRİŞ:

Nukleer reaktörlerde buhar üreticilerinin simülasyonu ve modellenmesi, buhar üretici ünitelerinde yer alan proseslerin fiziksel tarifini ve temel kavramlar bu tezde verilecektir. Nukleer buhar sağlama sistemlerinin, özellikle hafif su reaktörlerindeki türlerinin ( LWR ) simülasyonunun çeşitli yönlerinde kullanılan metodların karşılaştırmasını yapmak bu tezin amacıdır.

Son araştırmalar özellikle HTGR'lerin ve LMFBR'lerin LWR'lerdeki gibi buhar üreticilerinin simülasyonuna yönelmiş bulunmaktadır.

## 2. BUHAR ÜRETİCİ ( SG ) TIPLERİNİN TANIMI:

Bu bölümde nükleer güç santrallerindeki buhar üretici dizaynlarının tanıtımı; temel tanımlar, yapı dizaynı, ısı transfer karakteristikleri ve çalışma parametreleri kıyaslamalarını belirtmek amacıyla verilecektir.

Basıncılı su reaktörleri ile çokca kullanılan iki tip buhar üreticisi vardır:

A. Tek-Gecişli Buhar Üreticileri ( OTSG' ler ).

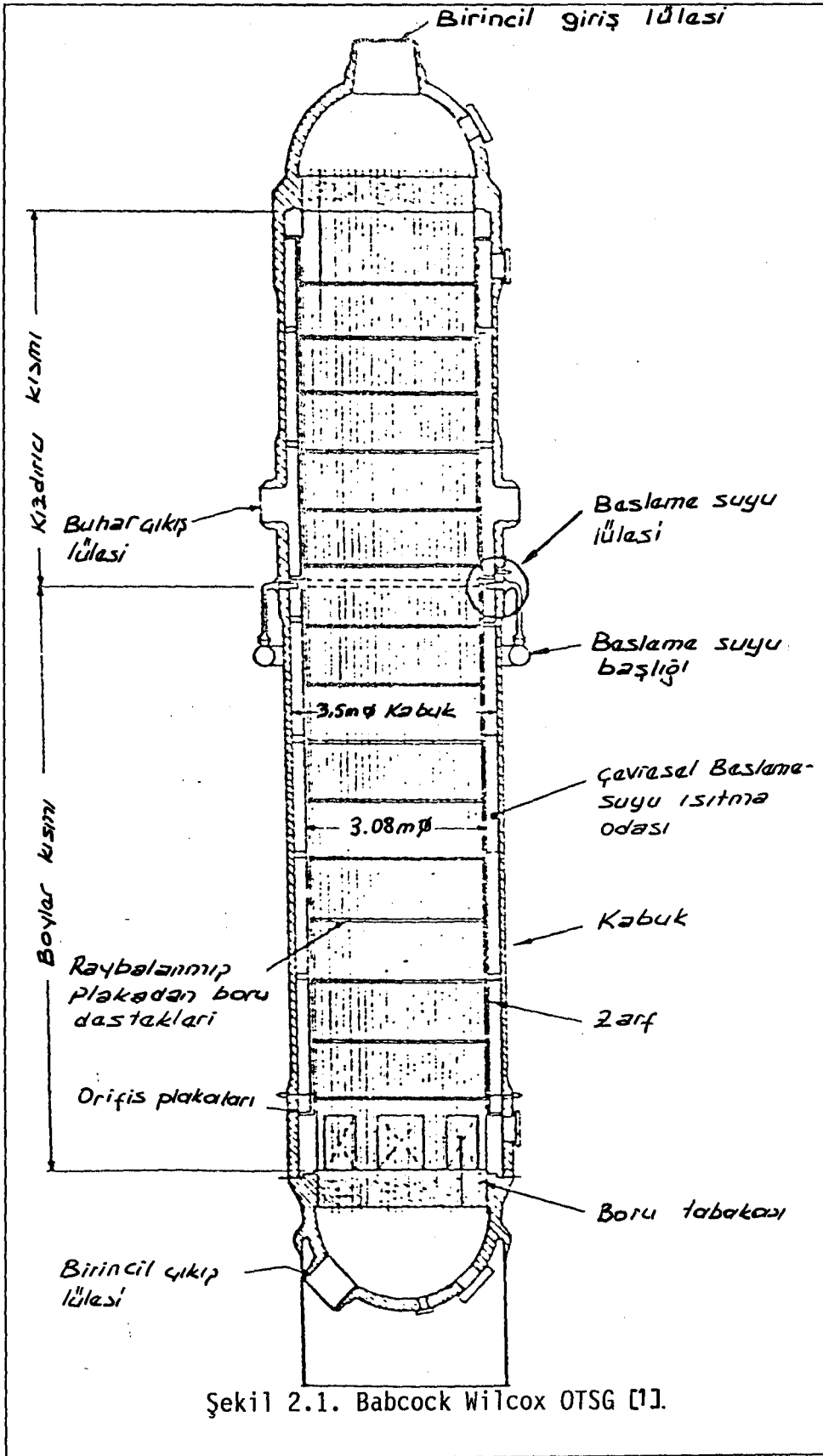
B. U-Borulu Buhar Üreticileri.

Bu iki tip buhar üreticisi detaylarıyla açıklanacak, HTGR ve LMFBR sistemlerinde kullanılanlar ile karşılaştırılmaya gidilecektir.

### 2.1. Basıncılı Su Reaktörleri ( PWR ) Buhar Üreticileri:

#### 2.1.A. Tek Gecişli Buhar Üreticileri:

Babcock ve Wilcox tek geçişli buhar üretici ( OTSG ) üniteleri Babcock-Wilcox PWR santrallerinde kullanılmak üzere aşırı soğutulmuş besleme suyundan kızgın buhar üretir. Böyle bir tip buhar üreticisi Şekil 2.1.' de gösterilmiştir. Bu buhar üreticinin dizaynı; borular ve kabuktan oluşur. Bu borular karşıt akış ( with straight ), birincil akışlar için kullanılan dik borulardır. Reaktör soğutucusu aşağı yukarı 16000 borudan aşağı doğru akar ve buhar üretimi için kabuk tarafına ısı transfer eder [1]. Reaktör soğutucu tarafı ( buhar üreticinin birinci tarafı ) yarım küresel giriş ve çıkış kafaları, boru demetleri ve boru iç yüzeylerini içerir. İkincil soğutucu, buhar üreticinin kabuk tarafında, kabuk, boru tutucular ve dış boru yüzeyleri ile sınırlı mekanda bulundurulur.





Boru demeti, ikincil tarafı besleme suyu ısıtıcı odası buhar halka kanal ve boru ısı değiştirici bölgelerine ayıran silindirik bir perde ile çevrelenmiştir. Besleme suyu giriş menfezleri seviyesinde silindirik perde' deki açıklıklar, besleme suyu ısıtma odasındaki besleme suyunun kısa-devre ısınmasına olanak sağlar. Besleme suyunun giriş püskürtücüsü aspirasyonla ısıtma odasına by-pass buhar akışı çeker. Karışmadan sonra, normal çalışma şartlarındaki boru demeti bölgesine giristen önce besleme suyu doyma noktasına ulaşır. Isıtıcı odadaki su seviyesi, boru demetindeki kaynar suyun basınç yüksekliği ve by-pass akış açıklıkları boyunca basınç düşümünü dengeleyecek bir yüksekliği koruyacak şekilde tutulur.

OTSG için birincil taraf ısı transferi, normal reaktör çalışmaları sırasında, bütün ısı değiştirici uzunluğu boyunca aşırı soğutulmuş zorlanmış konveksiyondur. Isı değiştirgecinin ikincil tarafı su ısı transfer bölgelerine ayrılabilir: Akış tipi kaynama bölgesi, alt boru levhasından by-pass akış seviyesi yakınında normal olarak oluşan kritik ısı akısının seviyesine kadar olan uzunluğu içerir. Akış tipi kaynama bölgesinde buharın kuruluğu sıfır civarından hemen hemen bire değişir. İkincil taraftaki başlıca ısı transfer mekanizmaları çekirdek kaynama ve zorlanmış konveksiyon buharlaşmasıdır. Boru duvar sıcaklığı ve akış şartları kararlı bir kızgın sıvı tabakasının boru yüzeyi boyunca şekillenmesine izin verdiğinde çekirdek kaynama oluşur. Kızgın tabakada şekillenen kabarcıklar ayrılır ve doymuş ya da aşırı soğutulmuş sıvı içinde söner; bu şekilde kabarcık oluşum ısısını transfer

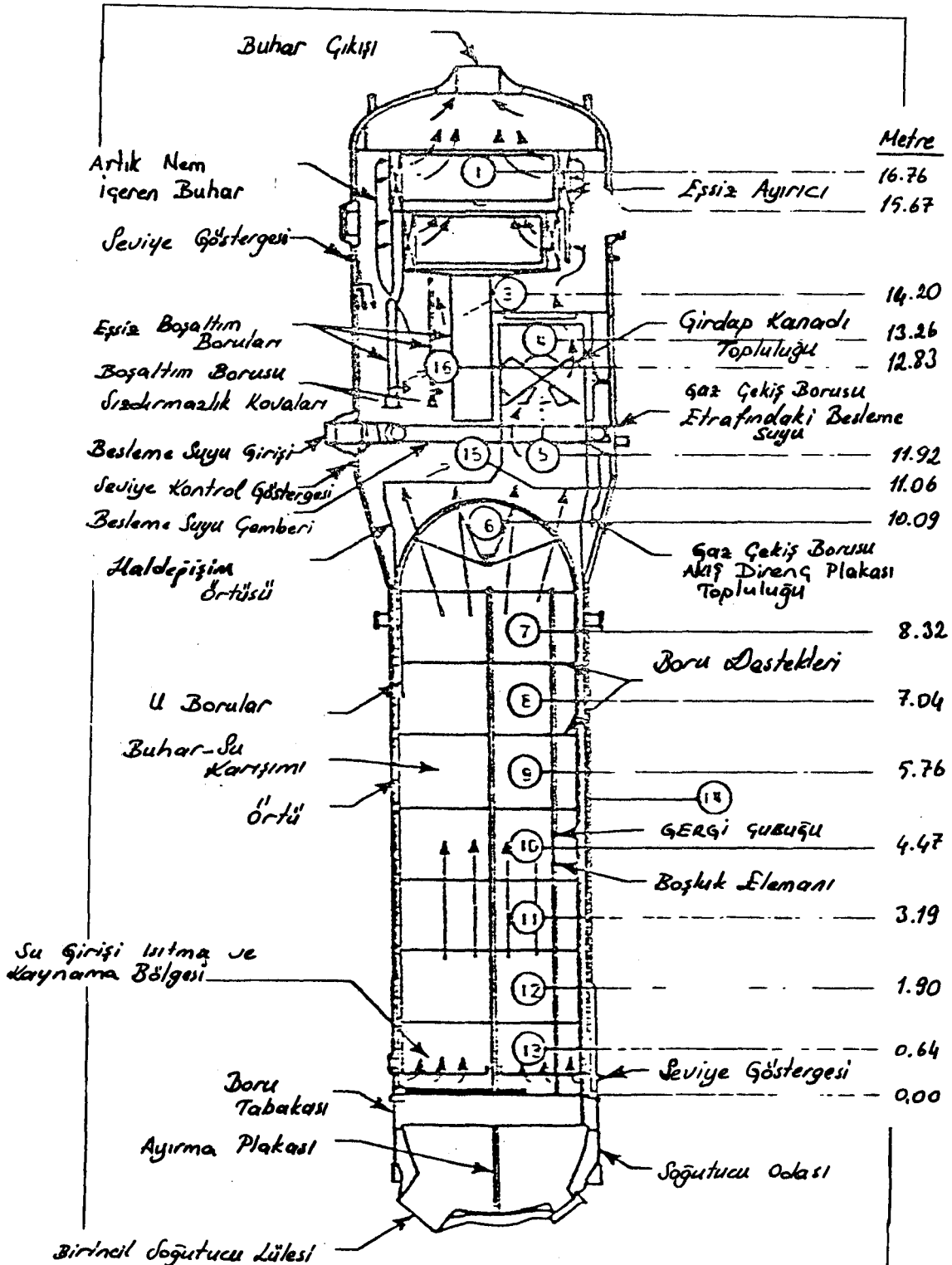
eder. Çekirdek kaynama ve zorlanmış konveksiyon buharlaşması, birlikte bir OTSG Ünitesinin akış kaynama bölgesinde ısı transferine önemli katkılarda bulunabilirler.

Film kaynama, CHF ( critical heat flux: kritik ısı akısı ) geçildikten sonra oluşur. Normalde OTSG' nin by-pass akış seviyesi yakınındadır. OTSG' de kritik ısı akısı yüksek kurulumlarda meydana geldiğinden film kaynama bölgesi normal şartlarda boyca kısadır. Film kaynama ısı transferinde, ısı akısı, boru yüzeyi boyunca bir buhar filminin oluşması nedeniyle, kritik ısı akısından kararlı film kaynamaya geçiş sırasında aniden azalır. Isı transferi buhar filmi boyunca konveksiyonla ve doymuş kordaki sıvı damlalarının buharlaşmasıyla oluşur ( EK-I ve EK-II ).

#### 2.1.B. U-Borulu Buhar Üreticileri:

U-borulu buhar Üretici dizaynları Westinghouse ve Combustion Engineering PWR santrallerinde kullanılmaktadır. Bir Westinghouse seri 51 U-borulu buhar Üreticisinin bir sematik diyagramı Şekil 2.2' de gösterilmektedir.

Buhar Üretici 3388 içiçe U-borulu bir dik tüp ve kabuk ısı değiştirgecidir. Bir ayırma plakası, alt yarı küresel başlığı, bir giriş odası ve bir çıkış odasına böler. Reaktör soğutucusu birinci soğutucu akışkan giriş menfezi boyunca buhar Üretici giriş odasına dolar. Boru demeti bölgesinde, reaktör soğutucusu önce U-boruların içinden yukarı ve sonra aşağı doğru akar. Soğutucu akışkan çıkış odasından, tahliye menfezleri boyunca dışarı çıkar.



Şekil 2.2. Westinghouse Seri 51  
Buhar Üreticisi [1].

İkincil tarafta, bir sargı kabuk bölgesini; boru demeti bölgesi ve aşağı çekiş bölgesi olarak ikiye böler. Besleme suyu, buhar-su ayırıcı aygıtından dönen devirdaim suyu ile karışmak üzere bir halka kanal boyunca "down-comer" a girer. Su, ayırma plakası ve kabukla şekillenen "down-comer" da aşağı doğru akar. Down-comer' in dibinde, besleme suyu boru demetine girer ve yukarı akar. Boru demetinin alt kısmında sıkıştırılmış sıvı doyma noktasına ısıtılır. Isı, doymuş bir buhar ve su üretmek için üst tüp demeti bölgesinde doymuş suya eklenir. Buhar-su ayırıcı, girdaplı vanalar ve düzensiz eğimli ayırıcıların bir kombinasyonu ile birleştirilir. Düzensiz zikzak ayırıcılarda kalan buharın nemi, normal çalışma şartlarında % 25' den azdır [1,2].

OTSG dizaynının aksine, UTSG' nin buhar çıkışı, normal çalışma şartlarında kızgın olmamaktadır. Benzer şekilde, tipik U-borulu üretici operasyonlarında çekirdek kaynamadan ayrılma beklenmez. Böylece, bir UTSG Ünitesinin ikincil taraf ısı transfer bölgeleri; sıvı-faz zorlanmış konveksiyon, çekirdek kaynama ve zorlanmış konveksiyon buharlaşma bölgelerinden oluşacaktır.

UTSG Ünitelerinde yük izleme manevraları, ikincil basınç, Birincil soğutucu akışkan giriş sıcaklığı ve besleme suyu akış oranındaki değişiklikler üzerinden tamamlanır. Birincil taraftan ikincil tarafa ısı transferi oranı, soğutucu sıcaklığı ve ikincil doyma sıcaklığı arasındaki farkla orantılıdır. Sonuç itibarıyla doyma sıcaklığı ikincil basıncın bir fonksiyonudur ve ikincil basınçta bir değişim, toplam

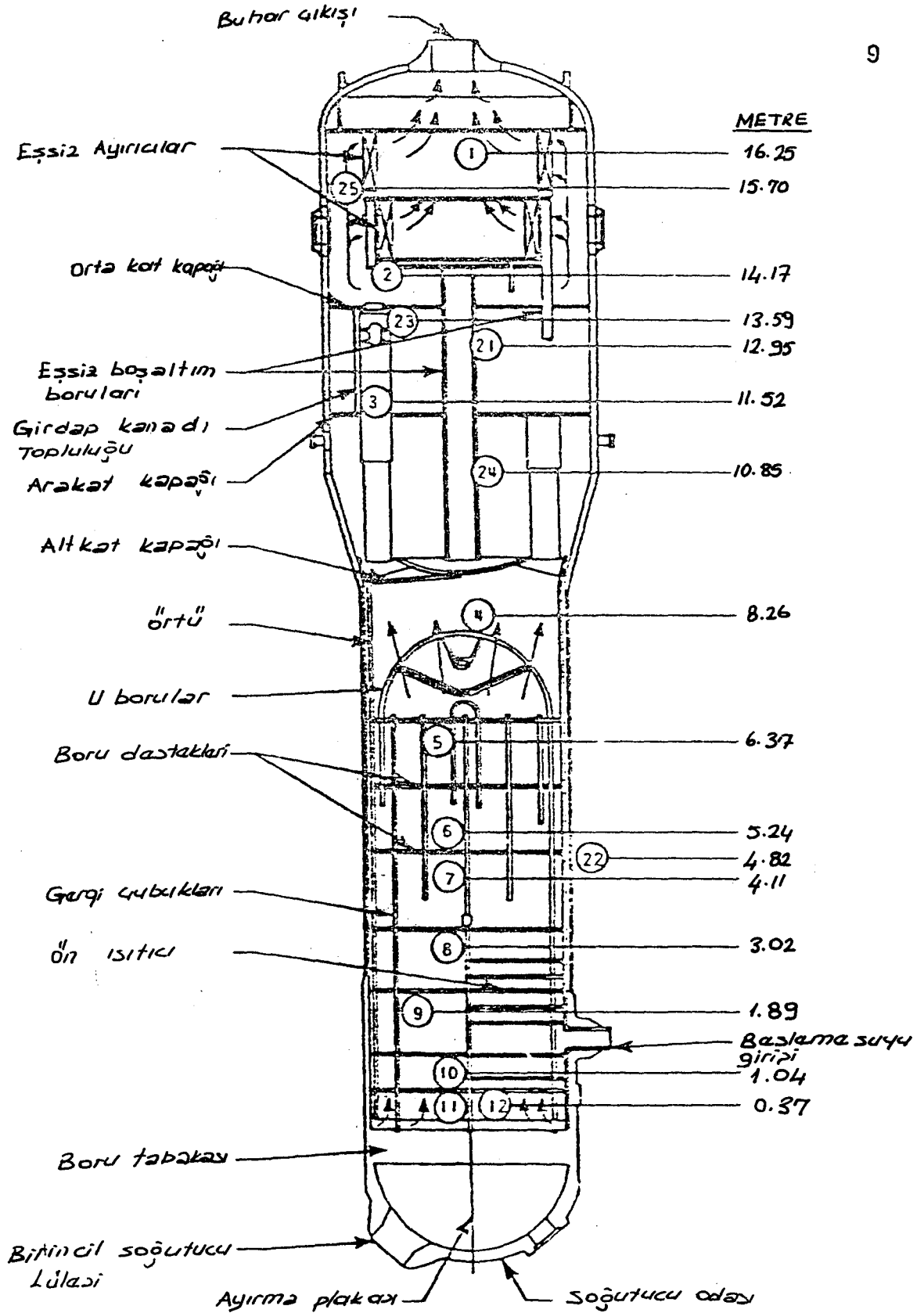
ısı transfer oranında bir değişme ile sonuçlanır. Sonuçta ikincil basınçta bir azalma ile tamamlanan birincil soğutucu giriş sıcaklığı ve besleme suyu akış oranının her ikisindeki artışlar ile bir yük talep artışı bağlanabilir.

Seri 51 buhar üreticilerine karşıt olarak, Westinghouse Electric Corporation tarafından dizayn edilen en son model D buhar üreticileri bir ön ısıtma bölgesi veya Şekil 2.3.' de gösterildiği gibi bir integral ekonomizer ( IE ) içerir. Benzer olarak, Şekil 2.4.' deki gibi bir integral ekonomizer Combustion Engineering Inc.' in en son U-borulu buhar üreticilerinde bulunmaktadır. Her iki buhar üreticisi içinde besleme suyu, soğuk kol tarafındaki boru demetlerinin en alt kısmında yarı küresel bir ön ısıtıcı bölgesinden buhar üreticisine girer. Combustion Engineering U-borulu dizaynında besleme suyu integral ekonomizer bölgesinde, iki giriş menfezi boyunca olduğu kadar, üst kabuk bölgesindeki down-comer giriş menfezi boyunca da buhar üreticisine girer.

Çizelge 2.1.' de seri 51 ve model D U-borulu buhar üreticileri için dizayn verilerinin bir karşılaştırması verilmektedir.

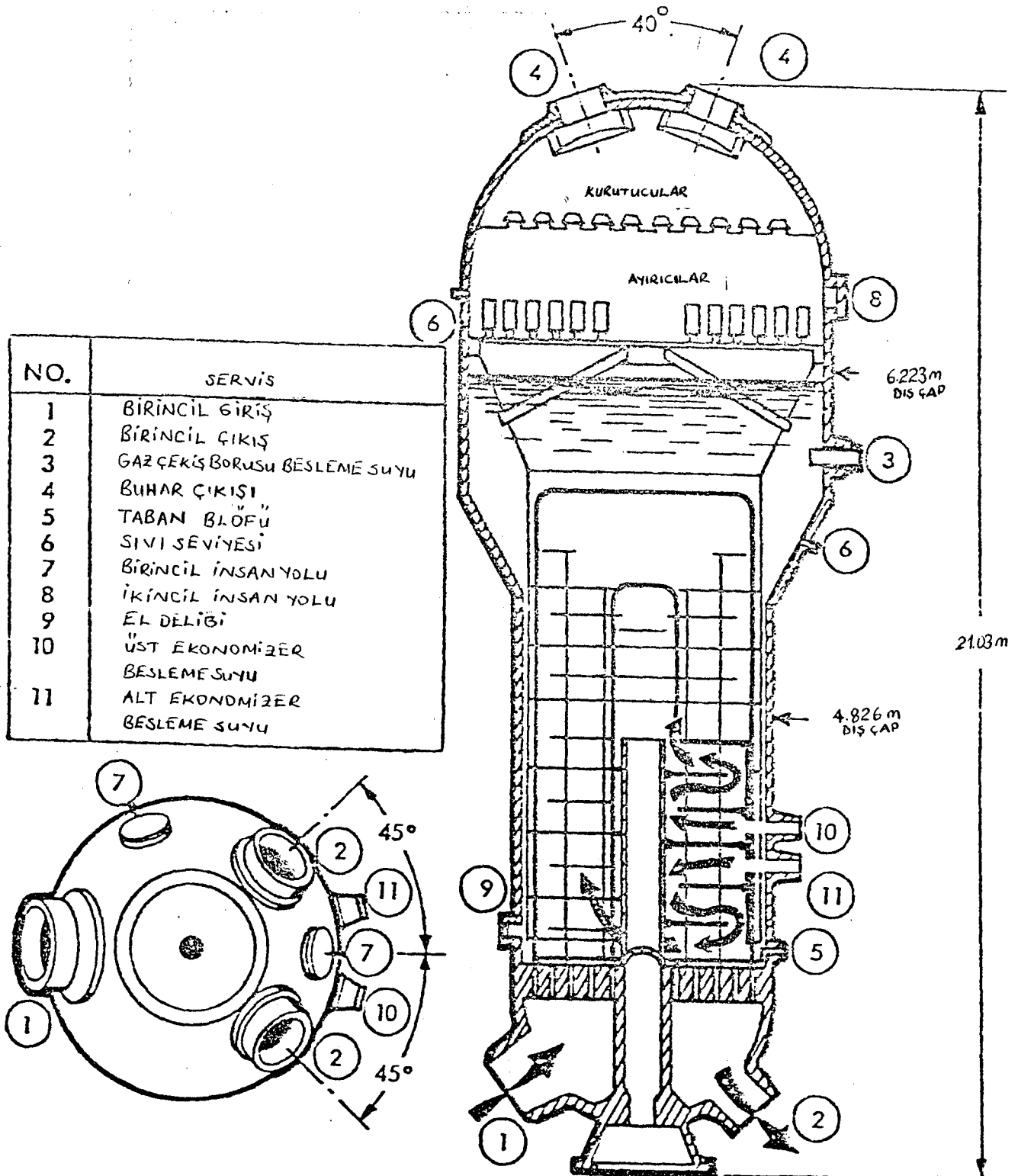
## 2.2. HTGR Buhar Üreticileri:

The General Atomic Corp. tarafından inşa edilen Fort St. Vrain Nükleer Enerji İstasyonu, beton reaktör haznesi içinde iki tane paralel buhar üreticisinden meydana gelir. Her buhar üretici Ünitesi, müşterek bir yarı çember besleme suyu giriş ısıtıcısı kullanarak aşırı ısıtılmış ana buharı paralel olarak üreten altı tane birbirinin aynı olan doğru-tip



Şekil 2.3. Westinghouse Model D

Buhar Üreticisi [1].



Şekil 2.4. Combustion Engineering  
Buhar Üreticisi [1].

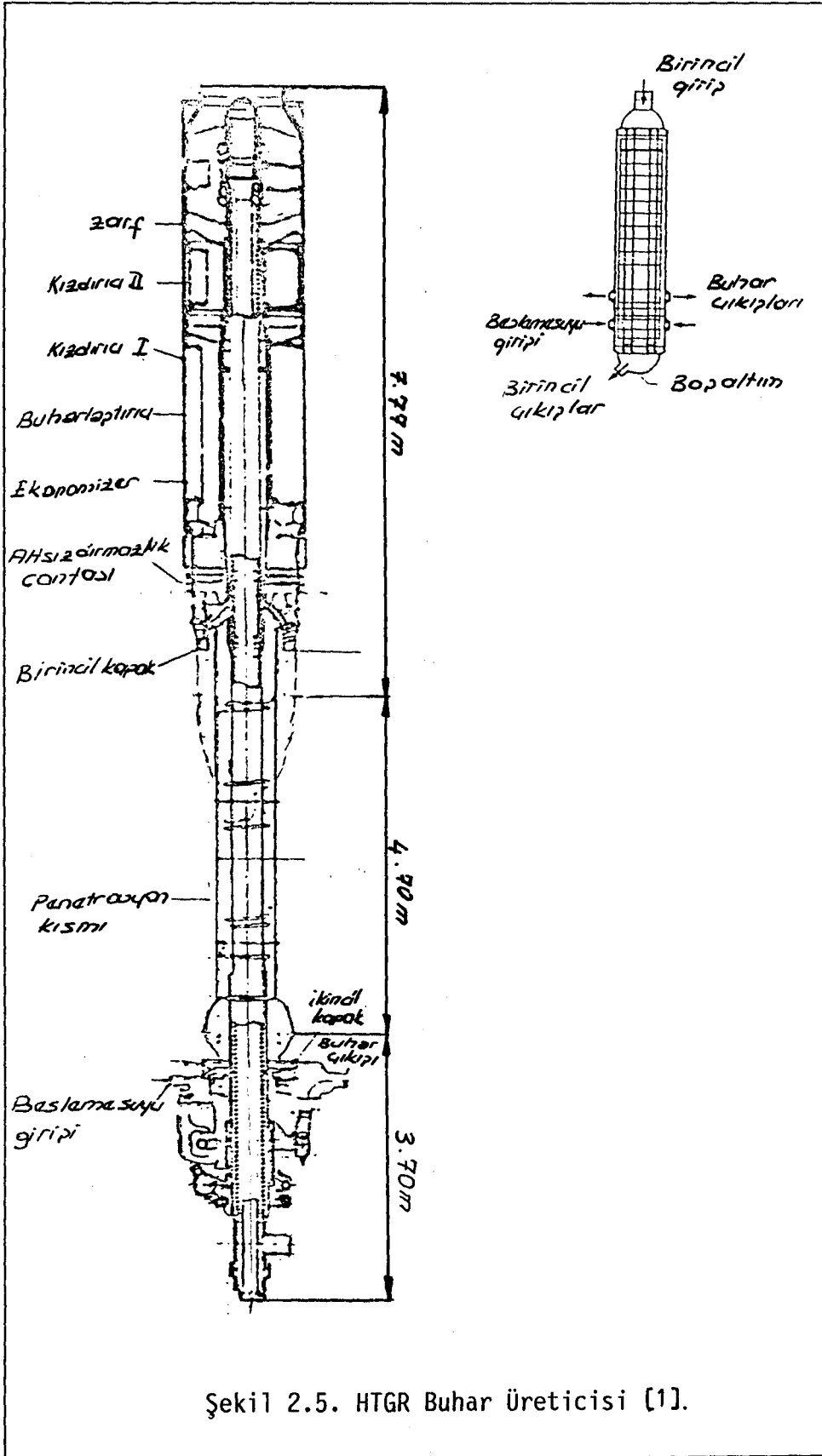
Cizelge 2.1. Westinghouse Buhar Üreticileri  
İçin Tipik Dizayn Parametreleri [7].

	SERİ 51	MODEL D
Güç	838 Mwt	856 Mwt
Birincil Akış	4223 kg/s	4472 kg/s
Soğutucu Giriş Sıcaklığı	593.32 K	598.1 K
Soğutucu Çıkış Sıcaklığı	557.7 K	564.82 K
Birincil Çalışma Basıncı	15.52 MPa	15.52 MPa
Besleme Suyu Sıcaklığı	493.7 K	499.82 K
Buhar Akış Oranı	453.60 kg/s	476.28 kg/s
Buhar Basıncı	5.49 MPa	6.89 MPa
Buhar Sıcaklığı	543.15 K	558.15 K
Birincil Basınc Düşüsü	206.89 kPa	227.58 kPa
Sirkülasyon Oranı	3.25	2.4
Isı Transfer Alanı	4775.21 m <sup>2</sup>	4487.21 m <sup>2</sup>
Tüp Sayısı	3388	4578
Tam Güçte İkincil Kütle	47628 kg	47174.40 kg



( uçtan uca ) buhar üreticisi modüllerinden meydana gelir. Besleme suyu akışı, bağımsız buhar üreticisi modüllerine akış kumanda valfleri vasıtasıyla dağıtılır. Bu istim modülleri ayrıca, yüksek basınçlı tirbünden gelen egsoz buharını tekrar ısıtan entegre tekrar ısıtıcılarını içerir. Egsoz buharı, çekici helyum sirkülatörleri içinde enerjiyi tükettikten sonra tekrar ısıtıcı girişine girer, ve orta basınçlı tirbün girişine akmadan önce tekrar ısıtıcı içerisinde asırı ısıtılır [1,7].

Bu buhar üretici modülünün düzeni Şekil 2.5.' de gösterilmektedir. Bu modül doğru-tipi, helisel sargılı boru ve kabuk ısı değiştiricilerinden meydana gelir. Bu durumda ikincil soğutucu borular içinde akar ve birincil soğutucu ( helyum gazı ) boru yüzeyinde aşağı doğru akar. Ana buhar devresi, dikey bölümler halinde yerleştirilmiş iki boru demetinden meydana gelir. Alttaki demet, içinde besleme suyunun önısıtıldığı, kaynatıldığı ve helyum akışına karşı akım olan yukarı doğru bir helisel akış yolu içinde önasırı ısıtıldığı Ekonomizer-Buharlaştırıcı-Kızdırıcı ( EES ) demetidir. Bu EES demeti, ısı değiştiricisinin yüzeyini oluşturan 54 adet ayrı borudan meydana gelir [1]. Bu EES demetinin üzerinde, birincil soğutucu ile aynı akım akışına sahip olmak üzere düzenlenen Kızdırıcı II ( SH-II ) demeti vardır. Tekrar ısıtma buhar devresi bu SH-II demetinin üzerinde bulunur. Tekrar ısıtma buhar devresi, ana buhar demetlerine benzeyen ve karşı akım akışına sahip olan helisel sarılmış tekrar ısıtma borularından meydana gelir. Birincil soğutucu bir tek geçişle önce tekrar ısıtıcı üzerinden ve



Şekil 2.5. HTGR Buhar Üreticisi [1].

daha sonra SH-II ve EES demetleri üzerinden akar [1,2].

Çizelge 2.2.' de gösterildiği gibi bir HTGR buhar üreticisi işletme şartları, bir PWR buhar üreticisinininkinden oldukça farklıdır. Basıncı suyla karşılaştırıldığında zaman zaman helyum gazı zayıf bir iletken olduğundan, HTGR' deki birincil soğutucu sıcaklığı ve akış hızı PWR standartlarına göre çok yüksektir. Aşırı ısıtılmış ana buharın çıkış basıncı da PWR tesislerinde olabilecekten çok daha yüksektir. Bu, HTGR tesislerine önemli daha yüksek termal randıman sağlar.

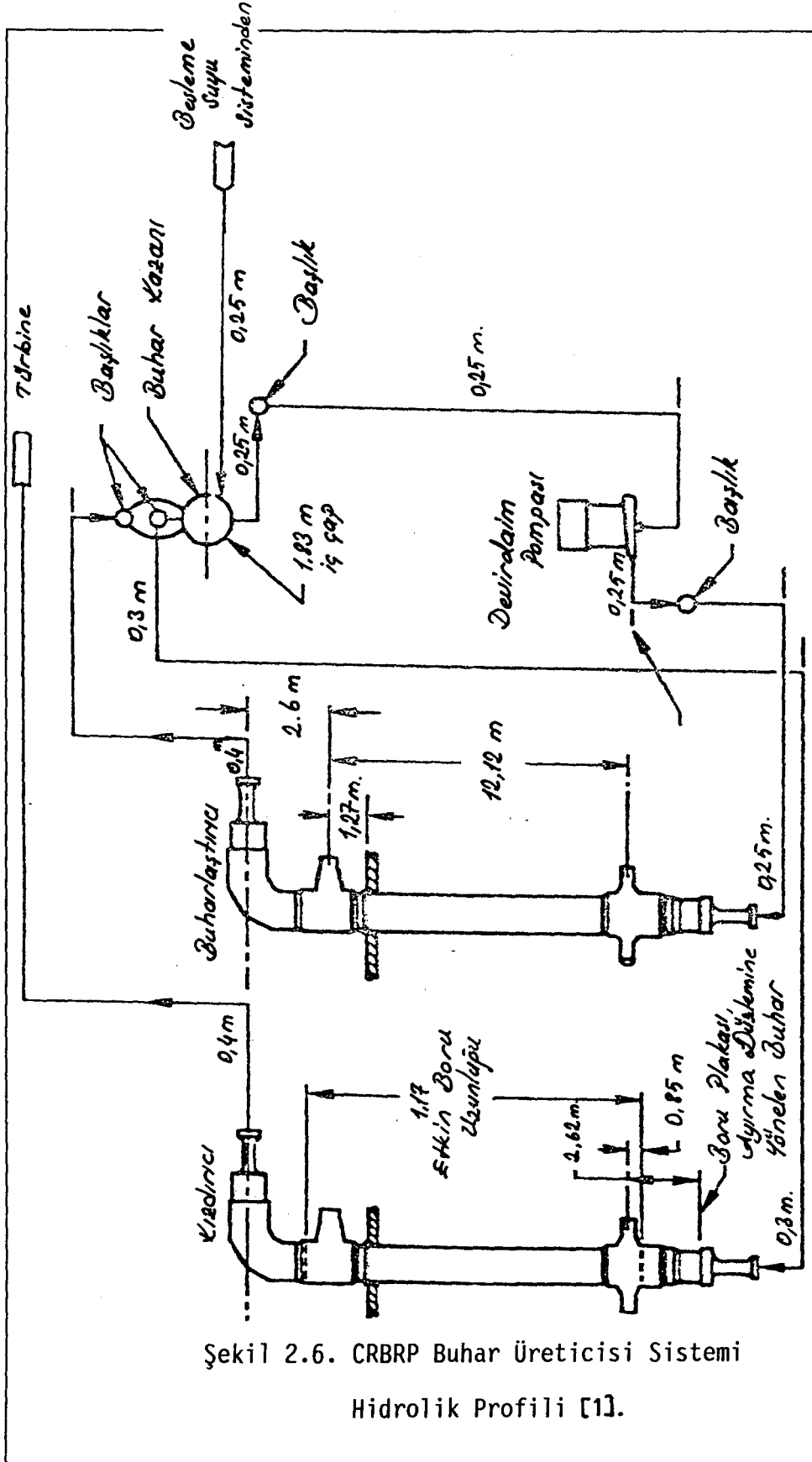
Bu farklılara rağmen, HTGR buhar üreticisindeki ısı transferi modellemesine, bir basıncı su reaktöründekine benzer bir şekilde yaklaşmak mümkün olabilir. Özellikle, birincil soğutucu ısı transferi tek fazlı zorlanmış konveksiyondur ve ikincil iki fazlı ısı transferi bir karşı akış değiştiricisi içinde olur. İkincil taraf iki fazlı akışın daha yüksek basıncı ve birim alana düşen kütle akış hızı, PWR buhar üreticisi şartlarından daha yakın olarak kaynar su reaktör (BWR) şartlarına benzer. Bu, PWR buhar üreticilerinin modellemesine en iyi uyan korelasyonlardan farklı olan kaynama ısı transferi korelasyonlarının kullanılmasını gerektirebilir.

### 2.3. LMFBR Buhar Üreticisi:

Westinghouse Clinch River Breeder Reaktör Tesisi (CRBRP) Şekil 2.6.' da gösterildiği gibi bağlama başlıkları ve bir buhar tamburu ile bağlanmış birbirinin aynı olan buharlaştırıcı ve buhar üreticisi modüllerinden meydana gelir [1].

Cizelge 2.2. HTGR için Nominal Santral İşletme Şartları [1].

	Tam Yuk %100 Buhar Akışı	Ceyrek Yuk %25 Buhar Akışı
<u>Yuk</u>		
Uretici Çıkışı ( MW )	342.00	81.20
İstasyon Çıkışı ( MW )	330.20	67.40
<u>Helyum</u>		
Debi (kg/s)	429.67	122.65
Çıkış Basıncı (MPa)	4.73	4.06
Giriş Sıcaklığı (K)	1048.15	942.04
Çıkış Sıcaklığı (K)	667.59	571.48
Basınc Düşüşü (kPa)	24.83	2.55
<u>Besleme Suyu / Ana Buhar</u>		
Debi (kg/s)	290.47	72.62
Çıkış Basıncı (MPa)	17.32	16.68
Giriş Sıcaklığı (K)	479.26	421.48
Çıkış Sıcaklığı (K)	813.70	810.93
Basınc Düşüşü (kPa)	4068.89	310.34
<u>Tekrar-ısıtma Buharı</u>		
Debi (kg/s)	282.97	70.17
Çıkış Basıncı (MPa)	4.14	1.04
Giriş Sıcaklığı (K)	629.26	572.04
Çıkış Sıcaklığı (K)	812.04	810.93
Basınc Düşüşü (kPa)	289.65	75.86

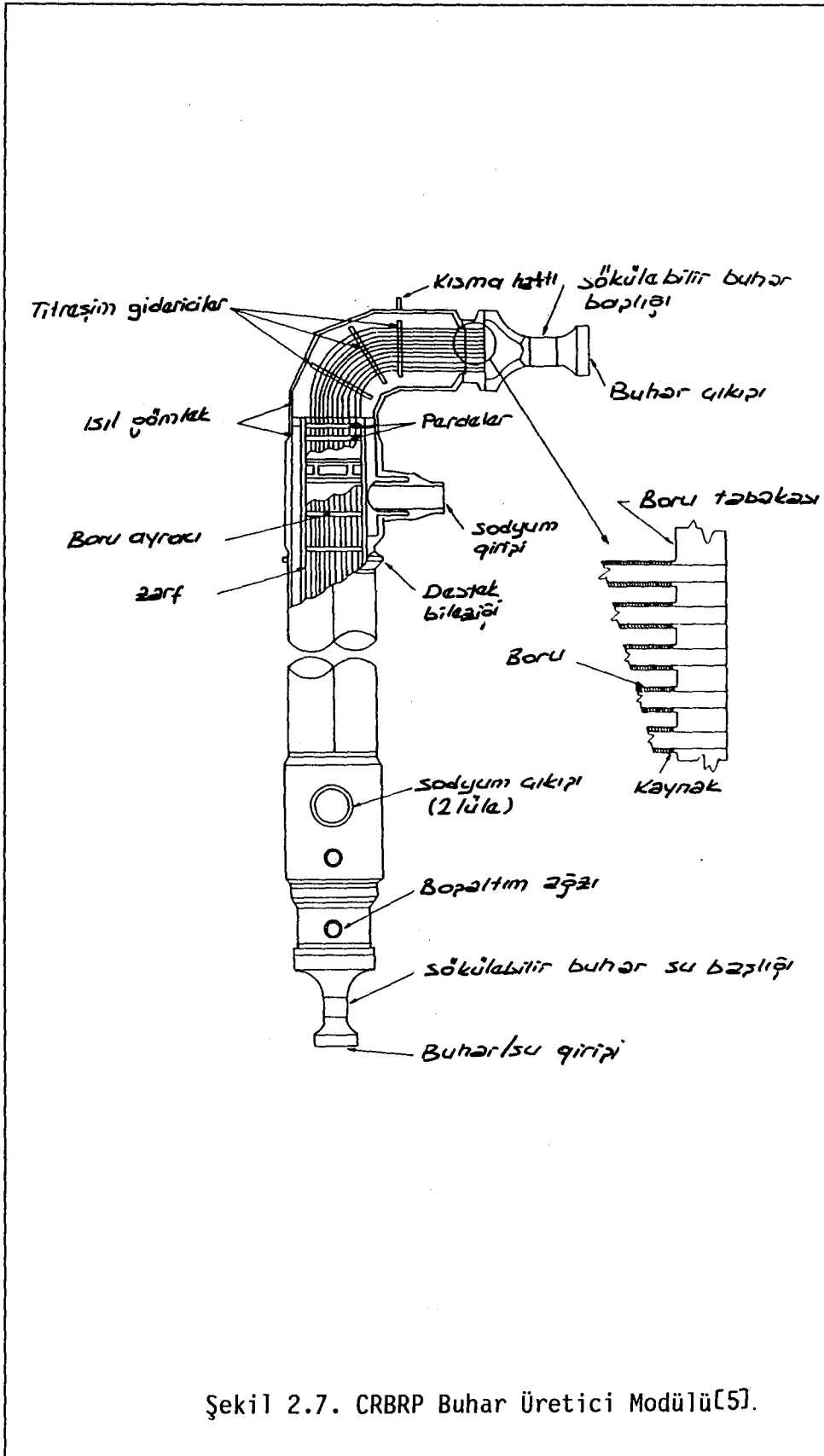


Şekil 2.6. CRBRP Buhar Üreticisi Sistemi  
Hidrolik Profili [1].

Buharlaştırıcı modülü, bir tekrar sirkülasyon pompası ile buhar tamburundan çekilen besleme suyundan % 50 kalitede doymuş buhar üretir [1]. Buharlaştırıcı modülünden gelen çıkış buharı, buhar tamburu üzerindeki bir bağlama başlığına akar. Bu, OTSG' deki by-pass akışlı besleme suyu ısıtılmasına benzer şekilde buhar tamburu içindeki temas eden besleme suyunun ısınmasına sebep olur. Buhar Üreticisi, buhar başlığı içindeki doymuş buhardan aşırı ısınmış buhar üretir.

Bu buhar Üreticisi modülü, Şekil 2.7.' de gösterildiği gibi bir düz-boru ve kabuk karşı-akış ısı değiştiricisinden meydana gelir. Likit sodyum birincil soğutucusu kabuk tarafı üzerinde aşağı doğru akar. İkincil akışkan bir 757-boru demeti içinden yukarı akar [1]. Boru ve kabuk tarafları, bir "hokey sopası" şeklinde ısı değiştiricisi üzerinde uzatılır. Bu kavis sodyum birincil soğutucusu içine su sızıntısı halinde meydana çıkacak hidrojen gazının akmasını sağlar.

CRBRP buhar Üreticisi sisteminin modellenmesi birçok yönlerden OTSG' ninkine benzer. CRBRP sisteminin modüler tasarımda olmasına rağmen özellikle doğru ( uçtan-uça ) akış ve temasla besleme suyunun ısınması kavram olarak benzer. CRBRP sisteminin ikincil debisi ve basıncı OTSG' ninkilerden daha yüksektir. Kaynama ısı transferi korelasyonları bu nedenle bir OTSG modelinde kullanılardan farklı olabilir. HTGR durumunda olduğu gibi, CRBRP' nin yüksek aşırı ısıtma sıcaklığı, PWR tesislerinkinden daha yüksek bir termal randıman sağlar.



### 3. Buhar Üretici Modellemesi İçin Matematik Teknikler

#### 3.1. Temel Korunum Denklemleri:

Bölüm 2'de tartışıldığı gibi, nükleer buhar üreticileri, detaylarda bazı değişikliklerle kabuk ve boru tipi karsıt akışlı ısı değiştirgeçleri olarak karakterize edilebilirler. Böylece nükleer buhar üreticilerini temsil etmek için, birincil ve ikincil taraftaki akışlar ve birincil taraftan ikincil tarafa boru boyunca ısı transferi için de korunum denklemlerine ihtiyacımız vardır. Birincil ve ikincil tarafların ikisinde de akışkan özelliklerini tasvir etmek için durum denklemlerine ihtiyacımız vardır (EK-III). Besleme suyunu ısıtmak için buharın downcomer bölgesinden çekildiği tek geçisli buhar üreticilerinde bazı ek kavramlar, by-pass akışın tanımı için bu temel denklemlerin uygulanmasında gerekecektir. Doymuş suyun tekrar dolandırıldığı ve besleme suyu ile karıştırıldığı U-borulu buhar üreticilerinde benzer kavramlar tekrar dolama döngüsünün modellenmesi için verilmelidir. Bird ve arkadaşlarının notasyonlarını kullanarak akışkanlar için kütle, momentum ve enerji korunumu için temel denklemleri aşağıdaki şekilde sunabiliriz [1,2].

$$\frac{\delta p}{\delta t} = - \nabla \cdot ( \rho \underline{v} ) \quad ( 1 )$$

$$\frac{\delta}{\delta t} ( \rho \underline{v} ) = - \nabla \cdot ( \rho \underline{v} \cdot \underline{v} ) - \nabla p - \nabla \underline{\tau} + \rho \underline{g} \quad ( 2 )$$



$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho e) = -\nabla \cdot (\rho e \underline{v}) - \nabla \cdot \underline{q} - \nabla \cdot (\rho \underline{v}) - \nabla \cdot (\underline{\tau} \underline{v}) \quad (3)$$

Burada;

$\rho$  : Akışkan Yoğunluğu [kg/m<sup>3</sup>]

$\underline{v}$  : Akışkan Hızı [m/s]

$p$  : Basınc [Pa]

$\underline{\tau}$  : Kayma Gerilme Tensörü [Pa]

$\underline{g}$  : Yerçekimi İvme Vektörü [m/s<sup>2</sup>]

$\underline{q}$  : Isı akısı [W/m<sup>2</sup>]

$e$  : İc, Kinetik ve Potansiyel Enerjileri İçeren

Akışkanın Toplam Özgül Enerjisi [J/kg]; denklem

olarak,

$$e = U + \frac{v^2}{2} + \phi \quad (4)$$

PWR buhar üreticilerinde, genellikle birincil ve ikincil akışlar için durum denklemleri buhar tabloları şeklinde düzenlenmiştir. Durum denklemleri şöyle ifade edilebilir:

$$p = p(e, \rho) \quad (5)$$

$$T = T(e, \rho) \quad (6)$$

Burada,  $T$  akışkanın yığın (bulk) sıcaklığıdır.

Birincil taraftan ikincil tarafa ısı akısı,  $q$ , borularda sıcaklık cinsinden, ısı iletimi denklemiyle tanımlanır.

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = - \nabla \cdot \underline{q} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (7)$$

Akışkan-katı arayüzeyinde uygulanan Newton soğuma kanunu ile Denklem ( 7 ) çiftlenir;

$$q = h ( T_b - T_s ) \quad (8)$$

Burada,

$\rho$ : Yoğunluk	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$ : Isı Kapasitesi	[J/kg K]
$k$ : Boru Metalinin Isıl İletkenliği	[W/m K]
$h$ : Isı Transfer Katsayısı	[W/m <sup>2</sup> K]
$T_b$ : Bulk Sıcaklık	[K]
$T_s$ : Boru Yüzey Sıcaklığı	[K]

Denklemler ( 1-3 ) ve Denklemler ( 5-8 ) 7 bilinmeyenli 7 denklem seti verir. Böylece uygun başlangıç ve sınır şartları ile, buhar üretici karakteristikleri bu denklemlerin çözümünden saptanabilir.

Çoğu buhar üretici modelinde, kinetik ve potansiyel enerji terimleri, enerji korunum denkleminde viskoz ısınma terimi ile birlikte ihmal edilir ve sonuçta Denklem ( 3 ) H entalpisi için korunum denklemi ile yer değiştirir.

$$\frac{\delta}{\delta t} ( \rho H ) = - \nabla ( \rho H \underline{v} ) - \nabla \cdot \underline{q} + \frac{\delta \rho}{\delta t} \quad (9)$$

Buhar Üreticinin her iki tarafında akış, akışkan özelliklerinin akış alanı boyunca sabit kabul edildiği tek boyutlu tek kanal akışına yaklaştırılır. Denklem ( 1 ) - ( 3 ) kesit alanı A olan akış alanı üzerinden integre edilebilir.

$$\frac{\delta}{\delta t} p = - \frac{\delta G}{\delta Z} \quad ( 10 )$$

$$\frac{\delta}{\delta t} G = - \frac{\delta}{\delta Z} ( v G ) - \frac{\delta p}{\delta Z} - \frac{\tau_w M}{A} - p g \quad ( 11 )$$

$$\frac{\delta}{\delta t} ( p e ) = - \frac{\delta}{\delta Z} ( G e ) - \frac{q_w M}{A} - \frac{\delta ( p v )}{\delta Z} \quad ( 12 )$$

Burada,

G : Kütle Hızı, Bir Akış Alanından Kütle Akış Oranı Olarak,  $\frac{2}{[kg/m s]}$

$$G = p v \quad ( 13 )$$

$\tau_w$  : Duvar Kayma Gerilmesi [Pa]

$q_w$  : Duvar Isı Akışı  $\frac{2}{[W/m]}$

$M_w$  : Akış Alanı İçin Islak Çevre [m]

Denklem ( 10 ) - ( 12 )' de Z koordinatı yerçekimi yönü olarak alınır. Denklem ( 12 )' de akışkan boyunca aksenal ısı iletimi ihmal edilir ve böylece  $q_w$  Denklem ( 8 )'  $\frac{2}{W}$

deki gibi boru duvarı boyunca radyal ısı akısını temsil eder. Benzer şekilde, boru duvarlarında aksenal ısı iletimi ihmal edilir ve Denklem ( 7 ) radyal ısı iletimi denklemi ile yer değiştirebilir.

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left( k r \frac{\delta T}{\delta r} \right) \quad ( 14 )$$

Denklem ( 14 )' deki duvar kayma gerilmesi genellikle Sürtünme Faktörü cinsinden temsil edilir.

$$\tau_w = f \frac{\rho v^2}{2} = f \frac{G^2}{2 \rho} \quad ( 15 )$$

Denklem ( 8 )' deki h ısı transfer katsayısı akış şartlarına bağlı olarak çeşitli ampirik korelasyonlar üzerinden elde edilir.

Sunulan akışkan akışı için korunum denklemleri OTSG veya U-borulu Unitelerinin birincil tarafında asırı soğutulmuş su akısına doğrudan uygulanabilir. Bu denklemler genel korunum denklemleridir ve temelde kaynamalı ısı transfer prosesine giren ikincil taraftaki iki fazlı karışım akışları için hala geçerli olacaktır. Bununla beraber, bir şekilde düzeltilmiş formlarda akışın iki fazlı doğasını hesaba katmak için korunum denklemleri kullanmanın daha uygun olduğu bulunmuştur.

En kaba model ( iki fazlı akış için ) homojen modeldir. Bu modelde sıvı ve buhar fazların ikisinde homojen karıştırıldığı ve aynı hızla hareket ettiği varsayılır. Bu model çeşitli iki-fazlı akış kavramını hesaba katmak için çok sayı-

da ampirik korelasyonların kullanımıyla ele alınır. Böyle bir örnek RELAP kodudur [8,9]. Bu kod, başlangıç şartlarının tayinine ve homojen model kullanarak LWR sistemlerinin transient analizlerini gerçekleştirmek için iki-fazlı ampirik korelasyonlara dayanır [1]. Çoğu buhar üretici modelleri aynı tekniğe dayanmaktadır. Daha geniş çapta kullanılan iki fazlı akış modeli "ayrık akış" veya "kayma akış modeli" dir, burada herbir faz tek bir yoğunluk ve özgül enerji olduğu kadar tek bir hız ve akış alanına sahip kabul edilir. Çoğu kayma akış analizi, sürtünme veya yüzey gerilim etkileri gibi fazlar arasındaki bütün ara-yüzey etkilerini de ihmal eder. Her bir faz için tek bir hızın tanıtılması yüzünden sistemin ekstra serbestlik derecesi boşluk kesri  $\delta$ 'nin kullanımı için hesaba katılır [1,2]. Bu modelde, süreklilik denklemleri şöyle yazılabilir:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left[ (1 - \delta) \rho_f + \delta \rho_g \right] = - \frac{\delta}{\delta Z} \left[ (1 - \delta) \rho_f v_f + \delta \rho_g v_g \right] \quad (16)$$

veya

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} = - \frac{\delta G}{\delta Z} \quad (17)$$

Burada  $\rho = (1 - \delta) \rho_f + \delta \rho_g$  yerel yoğunluğu tanımlanmıştır.

Toplam kütle hızı G

$$G = (1 - \delta) \rho_f v_f + \delta \rho_g v_g$$

şeklinde yazılabilir.

Burada f sıvı, g buhar fazlarını temsil eder,  $\delta$  boşluk kesri genellikle, x kuruluğunun, kayma oranının ve diğer parametrelerin bir fonksiyonu şeklinde ampirik olarak elde edilir. Şu halde Denklem (11)'de verilen hareket denklemini kayma akış modeline göre tekrar yazılabilir [1,2].

$$\frac{\delta G}{\delta t} = - \frac{\delta}{\delta Z} \left[ (1 - \delta) \rho_f v_f^2 + \delta \rho_g v_g^2 \right] -$$

$$\frac{\delta p}{\delta Z} - \frac{\tau_w M}{A} - \rho \delta \quad (18)$$

$$\frac{\delta G}{\delta t} = - \frac{\delta}{\delta Z} \left( \frac{G^2}{\rho_m} \right) - \frac{\delta p}{\delta Z} - \frac{\tau_w M}{A} - \rho g$$

Burada momentum yoğunluğu  $\rho_m$ ,

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{(1 - x)^2}{1 - \delta} \frac{1}{\rho_f} + \frac{x^2}{\delta} \frac{1}{\rho_g} \quad (19)$$

denkleminle verilir.

Duvar kayma gerilmesi  $\tau_w$  ise,

$$\tau_w = \frac{G^2}{2 \rho_f} f \frac{\phi^2}{TP} \quad (20)$$

denklemleri ile elde edilebilir. Burada  $\frac{\phi^2}{TP}$  ampirik iki fazlı sürtünme çarpanıdır. Benzer olarak, Denklem (12)'de verilen enerji ifadesi modifiye edilebilir [1].

$$\frac{\delta}{\delta t} \left[ (1 - \delta) \rho_f e_f + \delta \rho_g e_g \right] = - \frac{q_w M_w}{A} -$$

$$\frac{\delta}{\delta Z} \left[ (1 - \delta) \rho_f v_f e_f + \delta \rho_g v_g e_g \right]$$

$$- \frac{\delta}{\delta Z} \left[ p (1 - \delta) v_f + p \delta v_g \right] \quad (21)$$

SATAN, TRANFLO ve RELAP'ın son çalışmaları Denklem (10), (18), (21) ile temsil edilen ayrık iki-fazlı akış hesaplamaları için bölüme sahiptir [8,9,10].

İki-fazlı akışlarda varolan gerçek şartlar, homojen ve ayrık akış modellerine karşı gelen ortalama bir yerde olacaktır. Son yıllarda, modeller sıvı ve buhar fazları arasındaki etkileşimleri hassas bir şekilde hesaba katmak için geliştirilmiş bulunmaktadır. Bu modeller genellikle, "drift flux" (sürüklenme akışı veya çok alan modeli) olarak bilinir. KACHINA, TRAC ve THOR kodları gibi [11], hazırlanmış ve geliştirilmekte olan, özellikle LOCA analizi

icin doğrudan çok boyutlu geometrilerde çok alanlı modelleri icerecek kodlar vardır [1,4]. Buhar Üreticilerinin dinamik cevabının önemli rol oynadığı, LWR santrallerindeki daha yavaş öngörülen transient'ler için bu kodların gerekli olmadığı sanılmaktadır. Bugünkü anlayışımız, buhar üretici transient analizinde, bir kayma akış modeline kıyasla, homojen akış modelin kullanımının etkilerini hesaba katan genel bir çalışmanın gerçekleştirilmemiş olmasıdır.

### 3.2. Yersel Ayırıklaştırma Teknikleri:

Denklem ( 10 )' dan ( 12 )' ye verilen tek-fazlı korunum denklemleri veya Denklem ( 10 ), ( 18 ) ve ( 21 ) ile temsil edilen iki-fazlı modeller, aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem ile karakterize edilebilirler [1].

$$\frac{\delta f_1 ( Z , t )}{\delta t} = \frac{\delta f_2 ( Z , t )}{\delta Z} + f_3 ( Z , t ) \quad ( 22 )$$

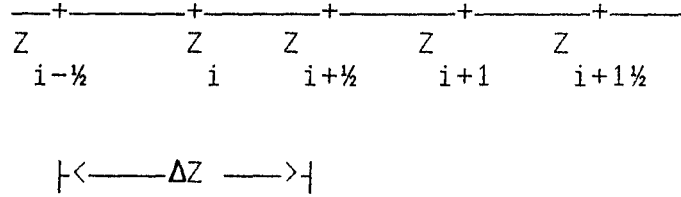
Bu denklemle temsil edilen denklem sistemlerini çözmek için uzun yıllar boyunca çeşitli teknikler geliştirilmiş bulunmaktadır. Çoğu sayısal teknik uzay ve zamanın her ikisinde de bazı ayırık denklem formlarına dayanır. Bu kısımda ilk önce, akışkan akışı için korunum denklemlerinde kullanılan çeşitli yerel ayırıklaştırma teknikleri tartışılacaktır. Bunu zaman bağımlılığını türetmek için kullanılan sayısal teknikler hakkında tartışmalar izleyecektir.

#### 3.2.A. Sonlu Fark Formülasyonu:

Denklem ( 22 )' deki gibi kısmi diferansiyel denklemlerle-



rin, sayısal çözümü için en genel teknik sonlu fark metodudur. Basit bir formülasyon aşağıda tanımı verilen yer uzayında doğrudan iki-nokta türetme şeması üzerinden elde edilebilir.



Sekil 2.8.Yer Uzayında Doğrudan İki-Nokta Türetme Şeması [1].

Örneğin Geriye yönelik türetim;

$$\frac{\delta f}{\delta Z} \Bigg|_{Z_{i+1/2}} = \frac{f_{2,i+1/2} - f_{2,i-1/2}}{\Delta Z} \quad (23)$$

Buna göre Denklem ( 22 )

$$\frac{df}{dt} \Bigg|_{1,i+1/2} = \frac{f_{2,i+1/2} - f_{2,i-1/2}}{\Delta Z} + f_{3,i+1/2} \quad (24)$$

Çok daha kullanışlı bir model, yer türevini merkez noktada değerlendirerek ve merkez noktada fonksiyonların değerleri için sınır değerlerin bir ortalaması kullanılarak elde edilebilir.

$$f_{1,i} = \frac{1}{2} ( f_{1,i+1/2} + f_{1,i-1/2} ), \quad l = 1,2,3 \quad (25)$$

Böylece,

$$\frac{df_{1,i+\frac{1}{2}}}{dt} = \frac{f_{2,i+1} - f_{2,i}}{\Delta Z} + \frac{1}{2} (f_{3,i+\frac{1}{2}} + f_{3,i-\frac{1}{2}}) \quad (26)$$

Son sonlu fark formülasyonlarında, daha uygun semalar, korunum denklemlerinin akışkan-akış doğasını daha iyi hesaba katabilir şekilde denenmektedir. Örneğin Implicit Continuous Fluid Eulerian (ICE) metotta süreklilik ve enerji denklemleri (Denklemler (10) - (12)) merkez noktada  $Z_i$  'de değerlendirilir [1]. Oysa, hareket denklemi (denklemler (11)) şebeke sınırı  $Z_{i+\frac{1}{2}}$  'de değerlendirilir.

Burada korunum denklemleri şöyle yazılabilir:

$$\frac{\delta p_i}{\delta t} = \frac{G_{i+\frac{1}{2}} - G_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta Z} \quad (27)$$

$$\frac{dG_{i+\frac{1}{2}}}{dt} = \frac{(G^2/\rho)_i - (G^2/\rho)_{i+1}}{\Delta Z} + \frac{P_i - P_{i+1}}{\Delta Z} - \left[ \frac{\tau_{wM}}{A} + \rho g \right]_{i+\frac{1}{2}} \quad (28)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho e)_i = \frac{(G e)_{i-\frac{1}{2}} - (G e)_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta Z} - \frac{q_{wM}}{A} + \frac{(\rho v)_{i-\frac{1}{2}} - (\rho v)_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta Z} \quad (29)$$

Fonksiyonların sebeke merkezindeki değerleri onun sınır değerlerine bağlamak için kullanılan " baskın hücre " meto-  
 dunda iceren denenmiş çeşitli yaklaşımlar arasında en son  
 öneri ZIP metodu olarak görülmektedir [1,4]. Böylece, ZIP  
 metodu kullanılarak, Denklem ( 28 )' deki konvektif momentum  
 terimi şöyle yazılabilir [1] ( EK-VI ).

$$\left( \frac{G^2}{\rho} \right)_i - \left( \frac{G^2}{\rho} \right)_{i+1} = G_{i+\frac{1}{2}} \left( \frac{G}{\rho_i} - \frac{G}{\rho_{i+1}} \right) \quad ( 30 )$$

Denklem ( 28 ) yeniden yazılarak:

$$\frac{dG_{i+\frac{1}{2}}}{dt} = \frac{P_i - P_{i+1}}{\Delta Z} + R_{i+\frac{1}{2}} \quad ( 31 )$$

Burada;

$$R_{i+\frac{1}{2}} = \frac{G_{i+\frac{1}{2}} \left[ \frac{G_{i-\frac{1}{2}}}{\rho_i} - \frac{G_{i+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+1}} \right]}{\Delta Z} - \left[ \frac{\tau_w M_w}{A} + \rho g \right]_{i+\frac{1}{2}}$$

Yukarıda tartışılan üç sonlu fark semasının tamamı so-  
 nuçta bir vektör gösterimine konulabilir [1].

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \quad ( 32 )$$

### 3.2.B. Kontrol Hacmi Yaklaşımı:

Akış denklemlerinin yerel ayrıklaştırımı için sık kulla-

nılan tekniklerden biri, Denklem ( 22 )' nin akis yollarındaki nodlar veya giriş hacim elemanları Üzerinden integrasyonuna dayanır ve bütün bir güç santralının simülasyonu gibi oldukça kompleks geometrili sistemleri temsil etmek için geliştirilmiştir. Üzerlerinde ortalama akis özelliklerinin hesaplandığı kontrol hacimleri ve nodlar bağlantılarıyla birbirlerine bağlanırlar. Böylece kontrol hacmi metodu, en azından kontrol hacminin boyutunun sıfıra yaklaştığı limit halde Bölüm 3.2.A.' da tartışılan sonlu fark semalarına eşdeğer olarak dikkate alınabilir. Kontrol hacmi yaklaşımında denklemlerin bazıları düzgün kontrol hacimleri üzerinden integre edilebilirler; halbuki, diğerleri düzenli kontrol hacimleri arasında bağlantıları içeren hacimler Üzerinden integre edilecektir. Örneğin RELAP [1,9] kodunda süreklilik enerji denklemleri Denklem ( 10 ) ve ( 12 ) düzenli kontrol hacimleri Üzerinden integre edilir. Halbuki hareket Denklemi ( 11 ) kontrol hacimleri arasında bağlantılar üzerinden integre edilir. Bu yaklaşım ICE metoduna benzerdir. Böylece Denklem ( 10 ) ve ( 12 ) aşağıdaki denklemlere dönüştürülecektir.

$$\frac{dF_{1,i}}{dt} = f_{2,i+\frac{1}{2}} - f_{2,i-\frac{1}{2}} + F_{3,i} \quad ( 33 )$$

Burada;

$$F_{1,i} = \int_{z_{i-\frac{1}{2}}}^{z_{i+\frac{1}{2}}} f_1 dz \quad , \quad l=1, 3$$

Momentum denklemi, denklem ( 11 )

$$\frac{dF_{1,i+\frac{1}{2}}}{dt} = f_{2,i+1} - f_{2,i} + F_{3,i+\frac{1}{2}} \quad ( 34 )$$

Burada;

$$F_{1,i+\frac{1}{2}} = \int_{z_i}^{z_{i+1}} f_l dz \quad , \quad l=1, 3$$

Cesitli ağırlaştırma şemaları kontrol hacminin merkezindeki nicelikleri, bunların sınırdaki değerleri ile bağlamak için önerilmektedir. Bu ağırlaştırma şemalarının bazı ileri aydınlatma ve/veya değerlendirme gerektirebilir.

Kontrol hacmi yaklaşımının sınır limit hallerinde, bir buhar Üretici Ünitesi bir veya iki-nodlu lumped parametre tarifleriyle temsil edilebilirler. [ Toplam kuvvet santralinde bir bileşen gibi sonlu fark formülasyonu ile kontrol hacmi yaklaşımının bir bileşeninde LMFBR sistem analizi için SSC kodunda önerilmektedir ]. Denklem ( 33 ) ve ( 34 ) ile temsil edilen kontrol hacmi yaklaşımındaki korunum denklemleri Denklem ( 32 )'deki form gibi kurulabilir.

### 3.2.C. Hareketli Sınır Formülasyonu:

Özel olarak buhar üreticisi modellenmesine uygulanmakta olan tekniklerden biri ikincil taraf hacmini akış rejimlerine göre birkaç bölgeye ayırmaktan ibarettir. Böylece bu bölge zamana bağlı olacaktır. Hareketli sınır formülasyonlarında, Denklem ( 22 ) herbir rejim üzerinden yani  $\left[ z_i(t) \right]$ ,

$z_i(t)$  aralığı üzerinden integre edilecektir. Leibnitz

diferansiyel formülü kullanılarak [1.6]:

$$\int_{z_i(t)}^{z_{i+1}(t)} \frac{\delta f_1(z, t)}{\delta t} dz = \frac{d}{dt} \int_{z_i}^{z_{i+1}} f_1(z, t) dz +$$

$$f_1(z_{i+1}, t) \frac{dz_{i+1}(t)}{dt} - f_1(z_i, t) \frac{dz_i(t)}{dt} \quad (35)$$

elde ederiz. Burada, sağ taraftaki birinci terim şöyle hesaplanacaktır:

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} f_1 dz = \langle f_1 \rangle (z_{i+1} - z_i) \quad (36)$$

Denklem (36)' da  $\langle f_1 \rangle$ ,  $f_{1,i}$  ve  $f_{1,i+1}$ ' in

ağırlıklı ortalamasıdır. Bu ortalama prosesi için ağırlaştırma faktörünün uygun bir seçiminde bazı araştırmalar rapor edilmiş bulunmaktadır. Yersel türev terimleri:

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\delta f_2}{\delta z} dz = f_2(z_{i+1}, t) - f_2(z_i, t) \quad (37)$$

ile basitçe yer değiştirebilir. Denklem ( 35 ), ( 37 ) boyunca Denklem ( 22 )' de yerleştirilirse tekrar vektör formu elde edilebilir. Doğal sınırlara, yani akıs veya ısđ transfer rejimlerine göre karşı gelen bölge sınırlarının seçiminden ötürü, hareketli sınır formülasyonu kaba bir tarife izin verir. Bununla beraber, istenirse, bu formülasyonda herbir akıs rejimi için birden fazla nod kullanmak mümkündür. Baslıca kaba yersel tanımlama nedeniyle bu metod, transfer fonksiyonuna yaklaşımları gibi lineerleştirilmiş dinamik modellerle ilgili kullanılmaktadır.

### 3.3. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri:

Orijinal korunum denklemlerinin yerine Denklem ( 32 ) ile verilen formdaki birbirine bağlı bir adi diferansiyel denklem seti elde etmek için dikkatimizi Denklem ( 32 )' nin çözümüne çevirelim. Uzun yıllar, zamanda sonlu türetme Denklem ( 32 )' nin sayısal integrasyonu için en önemli arac olagelmistir. Explicit ve implicit formülasyonların her ikisi de geliştirilmektedir. Bazısı Jacobi yaklaşımı ile bağlantıdadır ( EK-IV ). Halbuki diğerleri daha doğru yaklaşımlar kullanmıştır. Çok yaygın kullanılan teknikler üzerinde kısa bir tartışma şimdi belirtilecektir.

Bu denklemlerin çözümü için gerekli kompüter zamanı doğrudan simulasyonda istenen zaman adımlarının sayısı ile orantılıdır. Böylece mümkün olduğu kadar az zaman adımıyla verilen bir zaman aralığını simüle etmek için şiddetli bir dürtü vardır. Fakat, şüphesiz, zaman adımı gelişigüzel seçilemez, doğruluk ve kararlılık sınırlamalarına maruzdur.

Örneğin, bir explicit zaman-integrasyon tekniği zaman adım boyutlarına kararlılık ilgileriyle sınırlıdır.

$$t < \frac{L}{c + |u|} \quad [1,6]$$

Burada L: Bir karakteristik uzunluk

c: Yerel ses hızı

u: Akışkan transport hızı

İki fazlı akışlar sıkıştırılabilir akışkanlar olarak davrandıkları ve oldukça büyük yerel ses hızları ile karakterize edilebildikleri için fazla hesaplama zamanına sebep olurlar ve gerekli zaman adım boyutu oldukça küçük olabilir.

Kararlılık kriteri geliştirilmiş implicit semaları harekete geçirmek için şiddetli bir gereklilik vardır. Örneğin, aşağıda tartışılan Jacobian metodunda, kriter  $t < L / |u|$  olur. Böyle implicit oldukça geniş zaman adımları kullanımına izin verir ve böylece buna bağlı olarak hesaplama zamanını azaltır. Bununla beraber ( sistemin daha yüksek frekanslı davranışı simüle edilemediğinden ) bazı bilgi eksiklikleri ile sonuca ulaşılır ( daha yüksek mod osilasyonları implicit teknikle söndürülür ). Buhar üretici modellemeye ilgili LWR transienler için, tamamen implicit semalar veya bazı yarı-implicit semalarının daha uygulanabilir olduğu umulmaktadır [1].

Porsching ve arkadaşlarının geliştirdiği ( FLASH ve sonra RELAP kodlarında kullanılan ) teknik bir Jacobian formülasyonuna dayanır [1]. Böylece;



$$\frac{X_{n+1} - X_n}{\Delta t} = f(X_{n+1}) \approx f(X_n) + J_n (X_{n+1} - X_n) \quad (38)$$

elde ederiz veya,

$$X_{n+1} = X_n + \Delta t (I - \Delta t J_n)^{-1} f(X_n) \quad (39)$$

Burada;

$$\Delta t : t_{n+1} - t_n$$

I : Birim matris

J :  $t_n$  'de değerlendirilen transformasyonun Jacobian' ı.

Denklem (39) artık  $X_n$  'den başlayarak  $X_{n+1}$  için

çözülebilir veya uygulamada  $\Delta X_{n+1} = X_{n+1} - X_n$  için

$$(I - \Delta t J_n) \Delta X_{n+1} = \Delta t f(X_n) \quad (40)$$

denklemden çözüm elde edilebilir. Denklem (38)' de tamamen implicit sema, RELAP4 kodundaki "θ - farkı" nı içermek için modifiye edilmiş bulunmaktadır. Böylece;

$$\left( \frac{X_{n+1} - X_n}{\Delta t} \right) = \theta f(X_{n+1}) + (1 - \theta) f(X_n) \quad (41)$$

Burada  $0 \leq \theta \leq 1$ . Denklem (41)  $\theta = 0$  için tamamen

explicit Eulerian şemasını,  $\theta = 1$  için tamamen implicit ve  $\theta = 0.5$  için Crank-Nicholson veya zaman merkezli şemayı temsil eder.

Jacobian yaklaşımının bir diğer çeşidi, bir öngörücü ( implicit ) doğrultucu yaklaşım boyunca  $f ( X_{-n+1} )$  üzerinde

bir iterasyondan oluşur. Böylece,

$$f_{-n+1}^{j+1} ( X_{-n+1} ) = f_{-n+1}^j ( x_{-n+1} ) + J_{n+1}^j ( X_{-n+1}^j - X_{-n+1}^{j-1} ) \quad ( 42 )$$

yazabiliriz.

SSC kodunda önerilen diğer bir şema zamanda basit extrapolasyona dayanır. Böylece,

$$f_{-n+1} ( X_{-n+1} ) = f_{-n} ( X_{-n} ) + \left[ f_{-n} ( X_{-n} ) - f_{-n-1} ( X_{-n-1} ) \right] \left[ \frac{t_{n+1} - t_n}{t_n - t_{n-1}} \right] \quad ( 43 )$$

$\Delta X_{-n+1}$  için Denklem ( 40 )' in çözümünde Porching

ve arkadaşları, matris boyutlarını azaltmak için bir metod kullanmaktadırlar. Böylece kütle akış oranında  $\Delta W_{n+1}$  dilimi

cinsinden,  $\Delta M_{n+1}$  kütle dilimi ve  $\Delta U_{n+1}$  enerji dilimini

elemek için korunum denklemlerinin lineerleştirilmiş bir şeklini kullanmaktadırlar. Böylece Denklem ( 40 )' in matris denklemini yalnızca  $\Delta W_{n+1}$  için ters çevrilebilir ve  $\Delta U_{n+1}$  ve

$\Delta M_{n+1}$  sonuçta  $\Delta W_{n+1}$  ' den elde edilir [1].

ICE metodda, Denklem ( 41 ),  $f ( X_{n+1} )$  ' i değerlendirmek için Jacobian yaklaşımını kullanmaksızın  $X_{n+1}$  için doğrudan üzülür. Böylece Denklem ( 27 ) ve ( 31 ) söyle tekrar yazılır.

$$\frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} = \theta \left( \frac{G_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - G_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta Z} \right) + (1 - \theta) \left( \frac{G_{i-\frac{1}{2}}^n - G_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta Z} \right) \quad (44)$$

$$\frac{G_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - G_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = \theta \left( \frac{P_i^{n+1} - P_{i+1}^{n+1}}{\Delta Z} \right) + (1 - \theta) \left( \frac{P_i^n - P_{i+1}^n}{\Delta Z} \right) + R_{i+\frac{1}{2}}^n \quad (45)$$

$$P_i^{n+1} = P_i^n + \left( \frac{\delta P}{\delta p} \right)_i^n (p_i^{n+1} - p_i^n) \quad (46)$$

sekinde verilen durum denkleminle çiftleştirilir. Denklem ( 42 ) ve ( 45 ) arasında  $G_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}$  terimleri elenebilir, c nokta fark-denklemin sonuçta;

$$\frac{P_i^{n+1}}{\left(\frac{\delta P}{\delta p}\right)_i^n} = \theta \left(\frac{\Delta t^2}{\Delta Z}\right) \left(P_{i+1}^{n+1} - 2P_i^{n+1} + P_{i-1}^{n+1}\right) + S_i^n \quad (47)$$

denklemini haline gelir [1].

Bu üç-nokta fark denklemi  $P_i^{n+1}$  için çözülebilir ve Denklem (46)  $P_i^{n+1}$  'i verir. Böylece Denklem (44) ve

(45) boyunca ve enerji denkleminin Denklem (29)'a benzer bir zaman ayrıklaştırılmış formu, bütün bilinmeyen nicelikler  $t_{n+1}$  zamanı için değerlendirilebilir ve sonraki zaman

adımına geçilebilir. ICE metodun çeşitli akışkan dinamiği problemlerini tarif etmek için kararlı bir sayısal şema olduğu ispatlanmış bulunmaktadır (EK-VI).

ICE yönteminde kullanılan durum denkleminde (Denklem (46)) basıncın enerjiye bağımlılığı yalnızca dolaylı yol-

dan  $\left(\frac{\delta P}{\delta p}\right)_i^n$  türevi cinsinden hesaba katılır. Doğrudan

ısınama etkilerinin önemli olduğu transiyentler için ICE formülasyonunu düzeltme ihtiyacı son zamanlarda fark edilmiş bulunmaktadır. COBRA IV kodu ile birleştirilmiş bulunan Advanced Continuous Fluid Eulerian (ACE) seması böyle bir örnektir. ACE metotta denklem (46) akışkan yoğunluğunun yalnızca entalpisinin bir fonksiyonu olarak, arada akışkan sıkıştırılabilirliğini ve böylece basınç dalgası etkilerini ihmal ederek verilen bir durum denklemiyle yer değiştirilir (EK-VI).

ACE metotta sayısal sema yalnızca bir homojen akış modeli ve bir explicit momentum denklemi türetimine sınırlıdır. COBRA IV kodunun bir ileri versiyonu için gelisme, ICE metodu çerçevesinde durum denkleminde doğrudan ısıtma etkileri ve sıkıştırılabilirliğin ikisininide içeren sayısal bir semadır.

Buhar Üretici transientlerinde ısı-iletiminin etkileri kadar akışkan sıkıştırılabilirliğinin implicit türetimini içeren ICE formülasyonunda benzer bir gelistirme rapor edilmiş bulunmaktadır.

Bu modelde, buhar üreticilerinin birincil ve ikincil taraflarını çiftlestiren ısı iletimi ve akışkan akışı için korunum denklemleri iki adımlı iteratif bir teknik kullanarak çözülür. Birinci adımda, kütle, momentum ve durum denklemleri Denklem ( 47 )' yi elde etmek için ICE metotta olduğu gibi implicit şekilde birleştirilir. Tekniğin ikinci kısmı kütle ve enerji ve durum denklemlerinin implicit bir birlesmesini kullanır [1,4,6].

$$P_i^{n+1} = P_i^n + \left( \frac{\delta P}{\delta p} \right)_i^n (p_i^{n+1} - p_i^n) + \left( \frac{\delta P}{\delta h} \right)_i^n (h_i^{n+1} - h_i^n) \quad ( 48 )$$

Bir ileri zaman entalpisi  $h_i^L$  her bir yerel sebeke için çözülür. Bu çözümün birinci kısmıyla birlesir, yeni bir matris denkleminde sonuclanır.

$$\frac{P_i^L}{\left(\frac{\delta P}{\delta \rho}\right)_i^n} = \theta \left( \frac{\Delta t^2}{\Delta Z} \right) \left( P_{i+1}^L - 2P_i^L + P_{i-1}^L \right) - \left( \frac{\delta P}{\delta h} \right)_i^n \left( h_i^L - h_{i-1}^L \right) \quad (49)$$

Denklem (49)' dan elde edilen  $P_i^L$  ileri zaman

basıncı daha sonra çözümün ikinci kısmında kullanılır ve proses ileri-zaman basınçları yakınsayıncaya kadar tekrarlanır.

Daha basit buhar üretici modellerinin bazılarında, kütle, momentum ve enerji denklemleri arasında tam bir çiftleşmeden sık sık kaçınılır. Tercihen kütle ve enerji denklemleri peşpeşe çözülür, oysa momentum denklemi bazı yaklaşık transient veya sürekli hal formunda ayrılır.

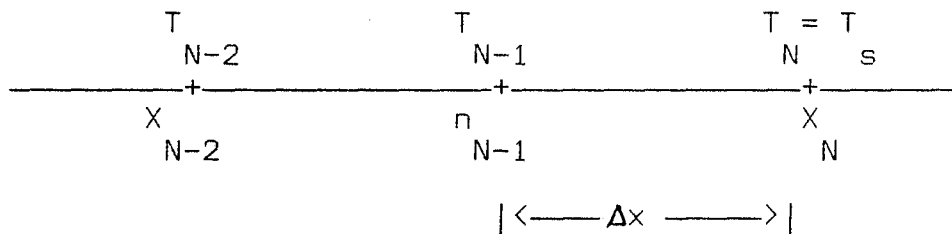
Buhar Üretici modellerinin lineerleştirilmiş bir formu ile birleşen transfer fonksiyonu tekniklerinin uygulaması ve hareketli sınır formulasyonları; Kerlin; Chen, Arwood, Korlin, Secker ve Gilbert tarafından araştırılmıştır [1]. Karakteristikler metodu ve Lax-Wendroff metodu gibi genel ısıl-hidrolik analizler için geliştirilen diğer sayısal metodlar, gelecekte buhar üretici modellemesi için belirli bir kısım uygulama potansiyeline sahip olabilecektir (EK-V).

### 3.4. Isı İletimi Denkleminin Sayısal Çözümü:

Zamana bağlı ısı iletimi denklemi ( Denklem ( 14 ) ), Newton' un soğuma kanunu ile beraber, buhar üreticilerinin birincil ve ikincil taraflarını temsil eden, örneğin Denklem

( 10 )' dan ( 12 )' ye, akışkan denklemleri arasında bir bağlantı sağlar. Isı iletim denklemi, bazı basit analitik yaklaşımlar kullanılmasına rağmen, genellikle standart sonlu fark formülasyonu ile çözülür.

Zamana bağlı ısı iletimi denkleminin sonlu-fark çözümünde, explicit bir zaman-ayrıklaştırma seması, üç-nokta fark seması veya boru duvarında ayrık sıcaklık dağılımı için tri-diagonal matris denkleminde Denklem ( 14 )' e yer vermek için kullanılır. Birincil ve ikincil tarafların çiftleşmesinde içerilen gerçek adımları, daha detaylı açıklamak için ikincil tarafa yakın boru duvarında birkaç radyal ızgara dikkate alabiliriz.



Sekil 2.9. Üç Nokta Fark Şeması [1].

Burada  $T_s$  ikincil tarafda boru duvarı yüzey sıcaklığı olarak değerlendirilecektir. Gauss eleme seması boyunca tri-diagonal matrisi ters çevirmede, sol taraf sınır koşulleri elenme adımını çalıştırmak için kullanılır. Geriye yürütme yerleştirme adımı aşağıdaki gibi bir denklemle ilerletilebilir;

$$T_{N-1} = a T_N + b = a T_s + b \quad ( 50 )$$

Denklem ( 50 ) duvar ısı akısı  $q$  için tekrar şu şekilde düzeltilebilir:

$$q = \frac{k ( T_{N-1} - T_s )}{\Delta x} = \frac{k ( a - 1 )}{\Delta x} T_s + \frac{b k}{\Delta x}$$

veya

$$q = A T_s + B \quad ( 51 )$$

şeklinde yazılır. Burada  $A$  ve  $B$ , yüzey sıcaklığı  $T_s$  saptanmadan önce elde edilebilir. Denklem ( 51 ) artık, iki bilinmeyen,  $q$  ve  $T_s$  için Newton' un soğuma kanunu

Denklem ( 8 ) ile, birincil ve ikincil tarafları arasındaki ki gereken bağı sağlayarak peşpeşe çözülebilir.

### 3.5. Devirdaim Döngülerinin Simülasyonu:

Doğal sirkülasyon döngüleri, Bölüm 2' de tanımlandığı üzere, kaynar su reaktör kalpleri ( BWR ) ve sıvı metal soğutuculu hızlı üretken reaktör ( LMFBR ) buhar üretici sistemlerinde olduğu gibi, çeşitli ( PWR ) basınçlı su reaktörleri buhar üretici sistemlerinde de oluşur. Özelde, Westinghouse seri 51 ve Model D buhar üreticileri, Combustion Engineering U-boru buhar üreticileri ve Wilcox OTSG, besleme suyu ısıtması ile irtibatlı doğal devirdaim yolları içerir.

Genel doğal sirkülasyon döngülerinin kararlılık ve performans karakteristikleri, son on yıldır analitik yoldan çalışılmaktadır. Böyle çalışmalarda en büyük amaç, kaynar devirdaim döngülerinde çok parametrelili geri-besleme etkile-



rinden sonuçlanan dinamik kararsızlıkları öngörme ihtiyacı olmaktadır. Akustik ve geçiş-film kaynama kararsızlıklarını içeren çok sayıda kararsızlık tipleri teşhis edilmekte ise de, kaynama kanalında düşük frekanslı salınan void fraksiyonu-akış oranı kararsızlığı, yoğunluk dalgası kararsızlığı şeklinde adlandırılan en önemli tip kararsızlık olarak gözönüne alınır. Bu kararsızlık mekanizması kütle ve enerji korunumu üzerinden buhar üretim oranının akış oranına bağımlılığı; devirdaim kanalları, faz ayırıcı ve kaynama kanallarında kütle-momentum korunumu boyunca kanal basıncı düşümü ve akış oranının buhar hacmine bağımlılığını içerir.

#### 4. Değerlendirme ve Sonuç

##### 4.1. Buhar Üretici Modellemesi İçin Verilen Matematik Tekniklerin Değerlendirmesi:

Nükleer buhar üreticileri, ayrıntılarda belli değişikliklerle kabuk ve boru tipi karşıt akışlı ısı değiştirgeçleri olarak kabul edilebilirler.

Buhar Üretici modellemesi yapılırken, üretici tipine bakılmaksızın öncelikle birincil ve ikincil taraftaki akışların ve borular boyunca ikincil tarafa olan ısı transferinin değerlendirilmesi için korunum denklemlerine gereksinim duyulur ( Denklem ( 1 - 3 ) ). PWR buhar üreticilerinde genelde birincil ve ikincil akışlar için durum denklemleri buhar tabloları halinde düzenlenmiştir ( Denklem ( 5 - 6 ) ).

Reaktör kalbinden çekilen ısıyı bünyesinde bulunduran birincil taraftan ikincil tarafa ısı akısı  $q$ , borularda sıcaklık cinsinden ısı iletim denklemleri ve Newton soğuma kanunu ifadelerinden bulunabilir ( Denklem ( 7 -8 ) ). Bu denklemlerde aksel ısı iletimi ihmal edilebilir ve sadece radyal formlar kullanılabilir ( Denklem ( 14 ) ).

Görüldüğü gibi, ( 1 )' den ( 8 )' e kadar olan denklemler, bilinmeyen sayısı kadar denklem seti oluşturduğundan buhar üreticinin karakteristikleri, uygun başlangıç ve sınır şartları ile belirtilen denklemlerin çözümünden elde edilebilecektir. Ancak pek çok buhar üretici modelinde, kinetik, potansiyel enerji terimleri ( Denklem ( 4 )' deki  $V^2 / 2$  ve  $\phi$  terimleri ) ile viskoz ısınma terimi enerji korunum denkleminde ( denklem ( 3 ) ) ihmal edilir; daha basit ve

kullanışlı olan  $H$  entalpisi için korunum denklemine, Denklem ( 9 )' a ulaşılır.

Ayrıca buhar üretici modellemesinde akış, akışkan özelliklerinin akış alanı boyunca değişmez kabul edildiği tek boyutlu, tek kanal akışına yaklaştırılmaya çalışılır ve temel korunum denklemleri belli bir kesit alanı üzerinden integre edilebilir ( Denklemler ( 10 - 12 ) ). Dikkat edilecek olursa, belli kesit alanı üzerinden integrasyonla elde edilen Denklemler ( 10 - 12 ), ister gel-geç ( OTSG ) isterse U-borulu buhar üreticisi olsun, birincil tarafta bulunan asırı soğutulmuş su akışına doğrudan uygulanabilir. Oysa buhar üreticilerinin ikincil tarafı kaynamalı ısı transferi prosesine girdiğinden, ikincil taraftaki akışın iki-fazlı doğasını da değerlendirme gerekliliği doğar. Bu işi yaparken kullanılabilecek en kaba model, sıvı ve buhar fazlarının homojen karıştırıldığı ve aynı hızla hareket ettiği varsayımına dayanan homojen modeldir. Herbir fazın tek bir yoğunluk, özgül enerji, hız ve akış alanına sahip kabul edildiği daha geniş çaplı model, kayma akış modelidir. Homojen model, iki fazlı akış kavramını hesaplarda değerlendirme amacıyla, çok sayıda ampirik korelasyonlara dayalıdır. Hemen belirtmek gerekir ki, buhar üretici ünitelerinin geometrik karmaşası, yerel akış yapısı ile birincil taraftan ikincil tarafa olan ısı transferindeki termal eşleşmeler gibi sebebler yüzünden, buhar üretici ünitelerinin transient ( gecici rejim ) davranışını öngören birtakım nümerik araçlara, kodlara gereksinim duyulur. RELAP kodu bu kodlara

bir örnek teskil edebilir. RELAP kodu da dahil mevcut bazı termal-hidrolik kodların karakteristikleri Çizelge 4.1.' de verilmeye çalışılmıştır. RELAP kodu, başlangıç şartlarının belirlenmesi ve homojen model kullanarak hafif su reaktörlerinin geçici rejim ve kaza analizlerini gerçekleştirmek için kullanılır. Ayrıca RELAP ve SATAN' ın son çalışmalarında, kayma akış modeline bağlı modifiye edilmiş, ayrık iki-fazlı akış hesaplamalarını temsil eden Denklemler ( 18 ) ve ( 21 ) de bir önceki bölümde değerlendirilmiştir.

Buraya kadar buhar üretici modellemesinde kullanılacak temel korunum denklemlerinin bir değerlendirmesi yapılmıştır. Teorik modelleme yapılırken yaygın yöntem; korunum eşitliklerini bir düğüm ( nod ) / hacim yapısı kullanarak boşlukta soyutmaktır. Daha sonra çözüm için çoğunlukla belli bir ilk durumdan hareketle, zaman basamak serileri üzerinden aynı işlemi tekrarlayan sayısal düzen kullanılmaktadır. Bölüm 3'te verilen, tek ya da iki fazlı modelleri karakterize eden diferansiyel denklemin çözümü çeşitli tekniklerle yapılabilir. Bunlar: Sonlu Fark Formülasyonu, Kontrol Hacmi Yaklaşımı ve özel olarak buhar üretici modellemesine uygulanan Hareketli Sınır Formülasyonu' dur. Bu formülasyonlar yerel ayrıklaştırma teknikleridir ve zaman bağımlılığını türetim için kullanılan sayısal tekniklerle tartışılmıştır. Sayısal integrasyon yöntemleri de vektör gösteriminde verilen eşleşmiş adi diferansiyel denklem formundaki Denklem ( 32 )' nin çözümüne yönelik olarak verilmiştir.

Cizelge 4.1. Mevcut Bazı Termal-Hidrolik Kodların Karakteristikleri [1,4].

Kod	Dizayn Amaçları	Termal Hidrolik Modeller	Yorumlar
RELAP4 MOD3  RELAP4 MOD5	LWR Geçici Rejim (Transient) Termal-Hidrolik Analizi	1) Bir boyutlu adi kontrol hacmi ve akış ilişkisi ağı 2) Porsching'in implicit çözüm metodu, homojen akış.	MOD5 iki-fazlı kayma ve değişken kritik akış opsiyonlarına sahiptir.
COBRA-III-C   COBRA-IV	LWR altkanal (subchannel) sürekli rejimi ve geçici rejim termal-hidrolik analizi	1) Bir boyutlu sonlu-fark modeli; COBRA-IV, ICE yöntemini ve genelleştirilmiş sınır şartlarını kullanır; 2) Bitişik kanallar arasında çapraz akışlı iki-fazlı altkanal akışı; 3) İki-fazlı kayma modeli.	1) Çok kanallı akış; 2) LOCA analizi.
TRAC	Genel LWR sistemleri sürekli rejim ve geçici rejim termal-hidrolik analizi	1) Bir-boyutlu kontrol hacmi ve akış bağlantı ağı 2) Modüler eleman modellemesi; 3) ICE kapalı çözüm yöntemi; 4) Üç-boyutlu reaktör kabı.	1) Çekme-akışı modeli; 2) Reaktör kabı (kalp) için üç-boyutlu iki akışkan modeli; 3) LWR LOCA analizi; geçici rejim kendi kendine başlatma yeteneği.
TRANFLD	LWR buhar üreticilerinin ve basınç kaplarının geçici rejim termal-hidrolik analizi	1) Bir boyutlu, basit kontrol hacmi ve akış-bağlantı ağı; 2) Kapalı çözüm tekniği.	1) Buhar üretici modeli. 2) Kritik akış modeli. 3) UTSG buhar veya su salıverme. 4) Analiz.

Matematik tekniklerin değerlendirmesinden ICE ( Implicit Continuous Fluid Eulerian ) metodu akışkan dinamiği problemlerini tanımlama açısından kararlı bir sayısal sema olduğu sonucuna gidilebilir. Ancak ICE formülasyonunu da düzeltmek gerektiği son yıllarda fark edilmiş ve COBRA IV kodu ile birleştirilmiş ( Advanced Continuous Fluid Eulerian ) ACE seması geliştirilmiştir.

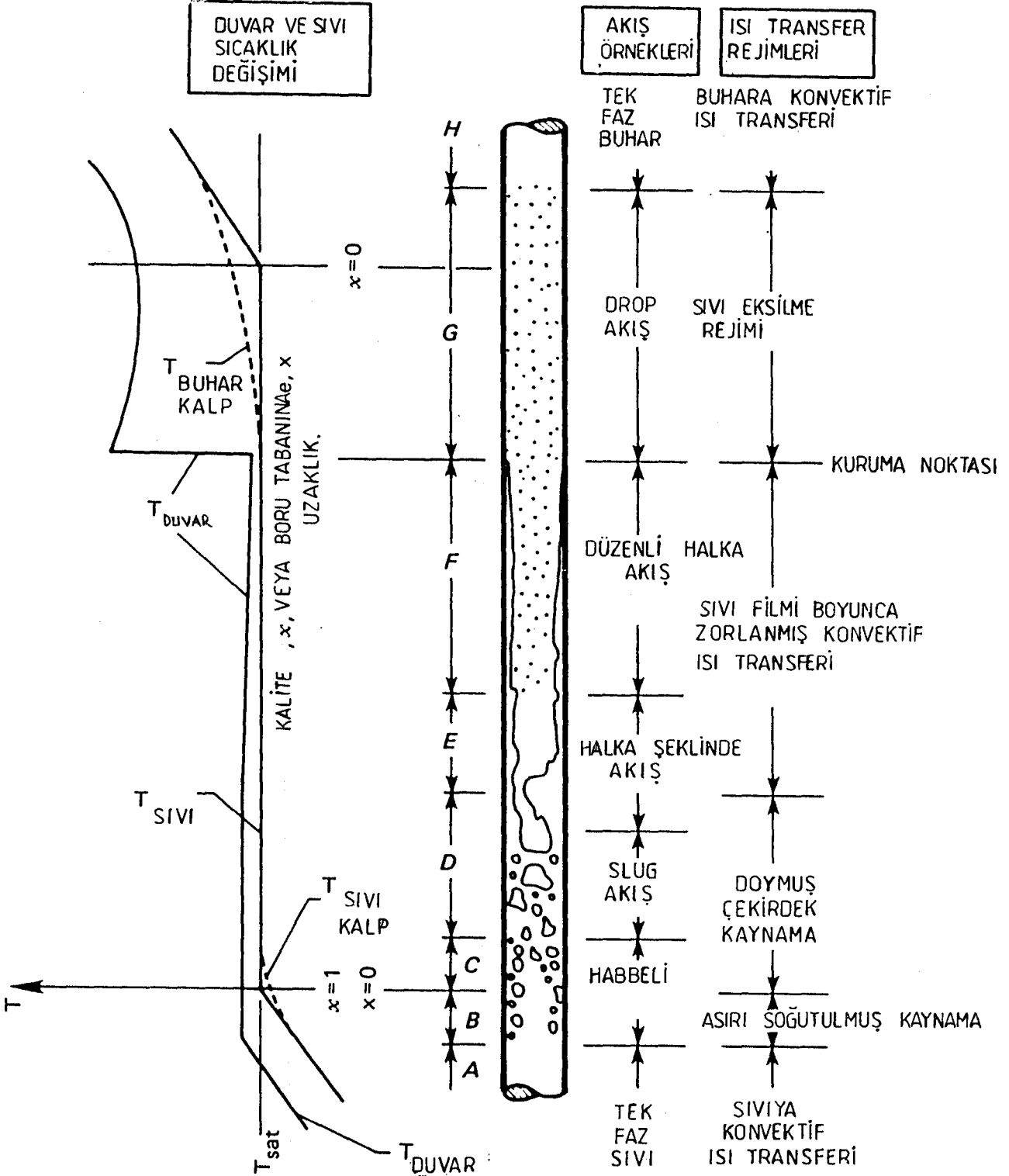
#### 4.2. Sonuç:

Buhar Üreticileri, reaktör sistemlerinin özellikle de hafif su reaktör sistemlerinin tamamlayıcı unsurları olarak hak ettikleri ilgi derecesini henüz görmeye başlamıştır. Performans özelliklerinin ( akış dağılımı, birikinti, basınç düşümü ) önemi gittikçe daha fazla hissedilmekte ve emniyet analizleri, tasarım ve koruma gereksinimlerini belirlemektedir. Buhar Üretici bütünlüğünün açıklanması ve gösterimi birincil sistemin ( reaktör kalbinden doğrudan ısı çekilen sistem ) çalıştırılması açısından hayati öneme sahiptir.

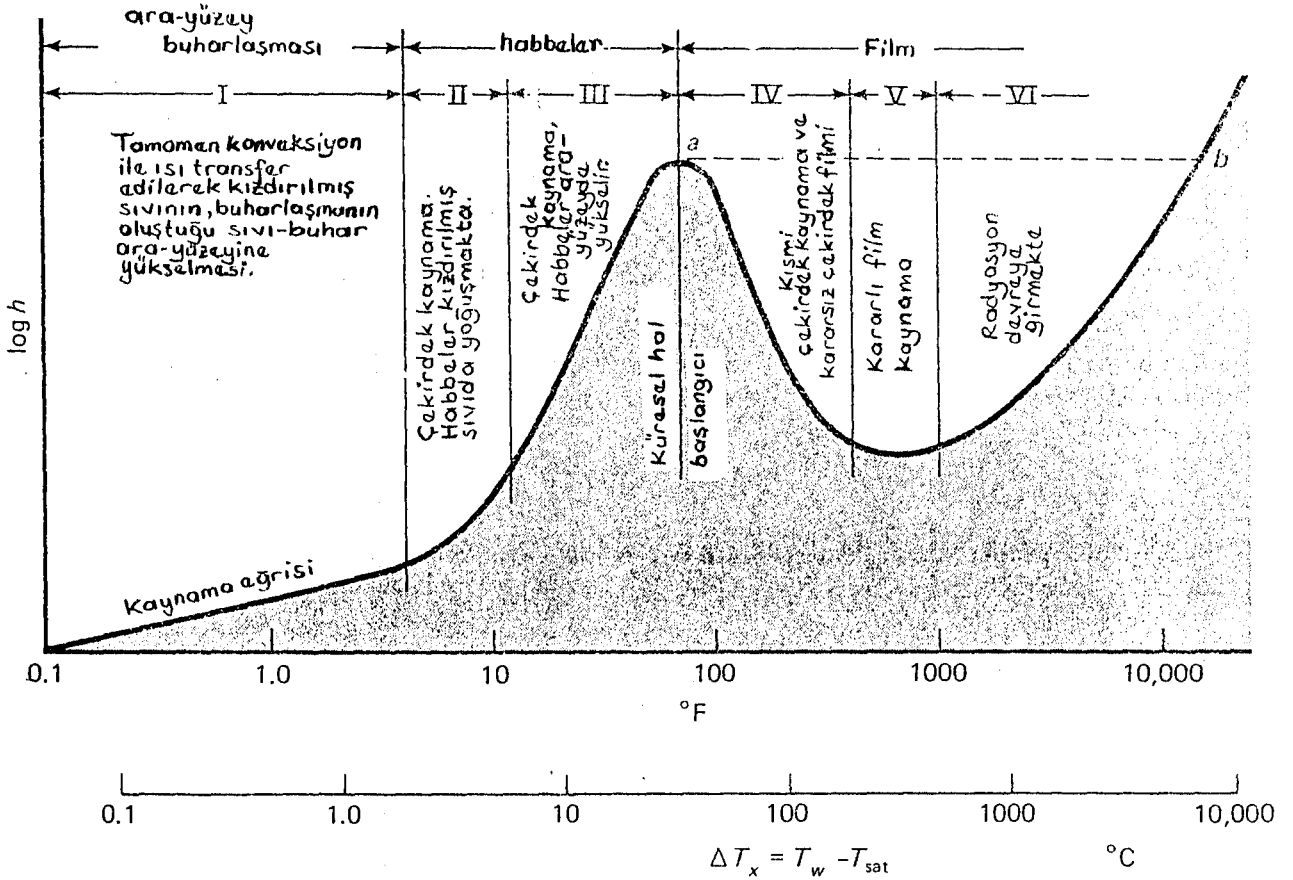
İyileştirilmiş ısı transferi ve iki-fazlı akış karakteristiklerini içeren, gelişkin ve daha esnek buhar üretici Unitelerinin dizaynı sonunda başarılacaktır.

Gelişmiş buhar Üretici tasarımında amaç, zaten mevcut olan karmaşıklıkta gereksiz artışlar yapmaksızın, üreticinin performans ve emniyetini artırmaya yönelik olacaktır.

EK-I. Bir Boru İcinde Sabit Bir Duvar Isı Akısı İle İki-Fazlı Akışın Gelişimi [14].



EK-II. Kaynama Rejimleri; Elektrikle Isıtılan Bir Platin  
Telden Elde Edilen Isı Akısı Verileri [13].





EK-III. Hayali Bir Kontrol Hacmi Uzerine Kütle, Momentum ve Enerji Korunumu Ifadeleri [16].

III-1. Kütle Korunumu

Bir kontrol hacim için kütle korunumu kanunu

$$\frac{\delta M_{CV}}{\delta t} = \sum \dot{m}_{giren} - \sum \dot{m}_{cikan} \quad (III-1)$$

seklindedir. Burada  $M_{CV}$  kontrol hacmi icinde anlık tutulan küttedir.  $\dot{m}$  ile gösterilen terimler ise, kontrol hacmine giren ve cikan akısla ilgili kütle akış oranlarıdır. Konvektif ısı transferinde, bir katı duvar civarında akış alanındaki hız ve sıcaklık dağılımlarıyla ilgilenilir, dolayısıyla bir akış alanı icindeki sabit bir  $(x, y)$  eksen takımı yakınında sonsuz küçük  $\Delta x \Delta y$  kontrol hacmi göz önüne alınır (Sekil III-1). Üç boyutlu akış alanında kontrol hacmi  $\Delta x \Delta y \Delta z$  dikdörtgen prizması şeklinde alınabilir.  $u, v$   $(x, y)$  noktasındaki yerel hız bileşenleri olarak alınırsa, kütle korunum denklemi

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho \Delta x \Delta y) = \rho u \Delta y + \rho v \Delta x - \left[ \rho u + \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} \Delta x \right] \Delta y - \left[ \rho v + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} \Delta y \right] \Delta x \quad (III-2)$$

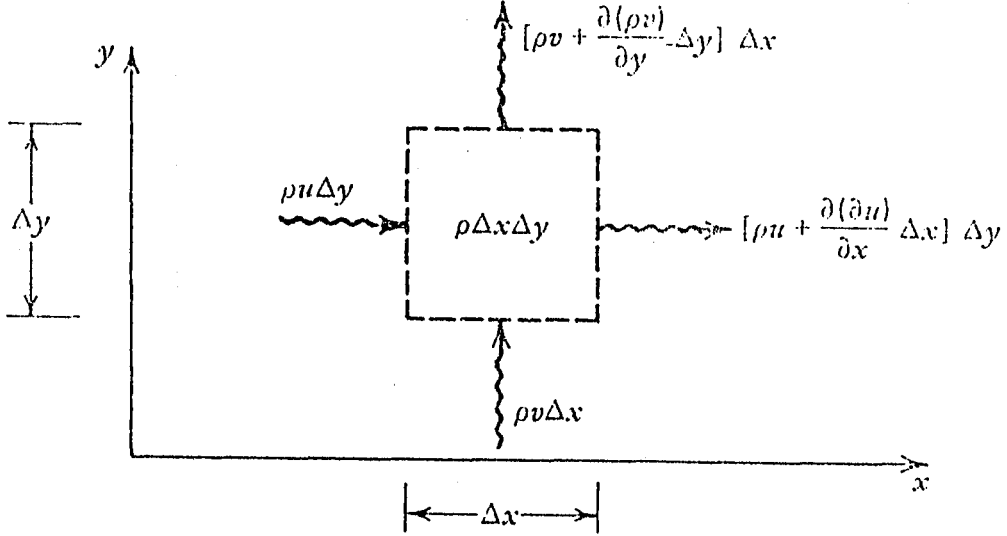
yazılabilir veya Denklem (III-2)  $\Delta x \Delta y$ ' ye bölünerek

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} = 0 \quad (III-3)$$

Genel denklem

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \underline{v} = 0 \quad (III-4)$$

## EK-III. ( DEVAM )



Sekil III-1. İki boyutlu bir kartezyen sistemde kütle korunumu.

### III-2. Kuvvet Dengeleri ( Momentum Denklemleri )

Tahrik sistemleri dinamiğinden, bir kontrol hacmi üzerine kuvvet dengeleri aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$\frac{\delta}{\delta t} (M v)_n = \sum_n F + \sum_n (\dot{m} v)_{\text{giren}} - \sum_n \dot{m} v_{\text{çıkan}} \quad (\text{III-5})$$

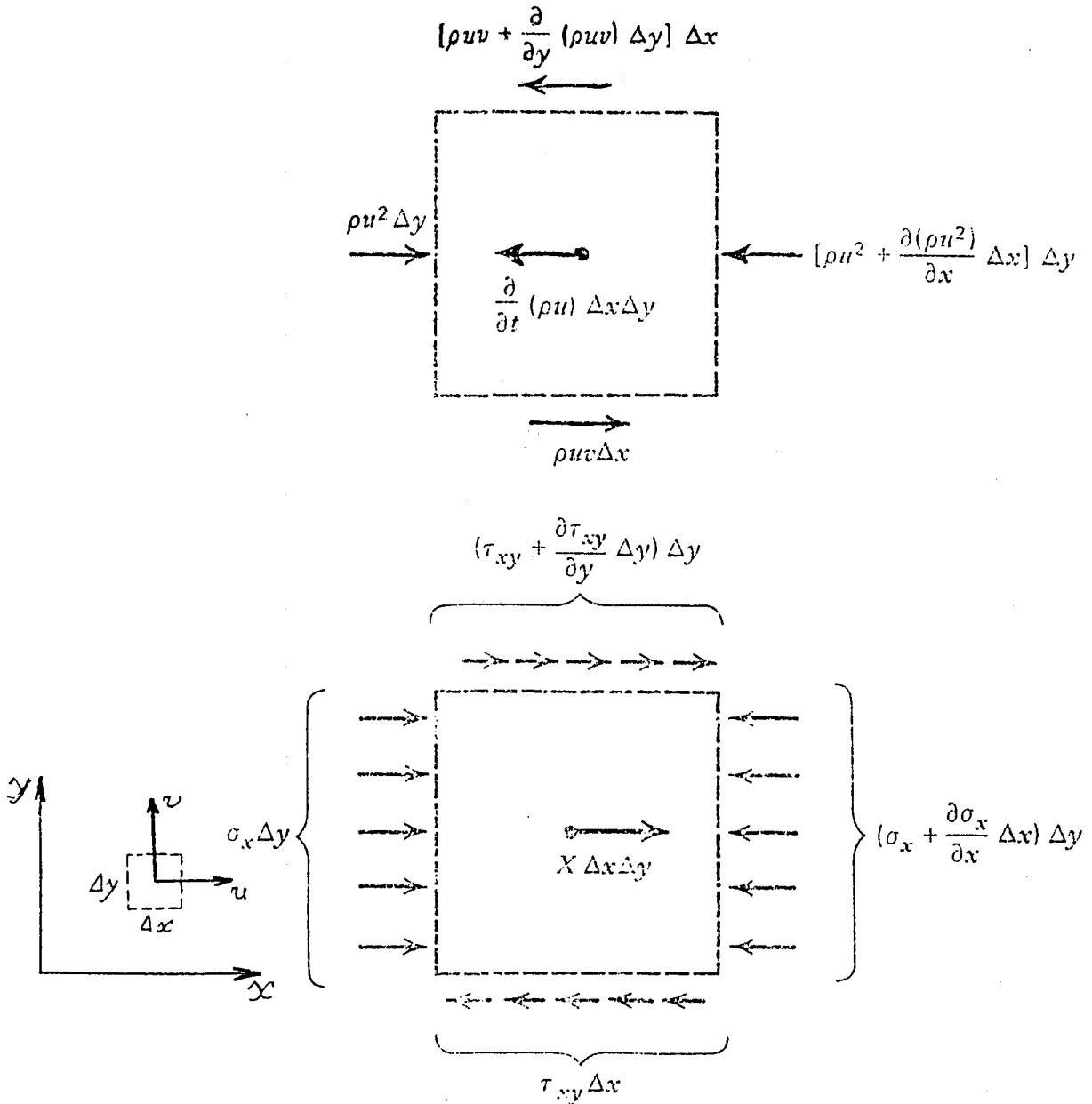
Denklem (III-5)' te  $n$  analiz için secilen yön,  $(v, F)_n$  akışkan hızı ve kuvvetlerinin  $n$  yönündeki iz düşümleridir.

Denklem (III-5), literatürde momentum prensibi olarak bilinir.

Sekil (III-2)' de, bir  $(x, y)$  noktası yakınında  $\Delta x \Delta y$  büyüklüğünde sonlu kontrol hacmi verilmektedir. Özel bir form Denklem (III-5)' in bu kontrol hacme uygulanmasıyla elde

EK-III. ( DEVAM )

edilir. Ustteki çizimde  $\Delta x \Delta y$  kontrol hacmi ve kontrol hacmi üzerinden momentum transferi ile ilgili etki tepki kuvvetleri gösterilmektedir. Altteki çizimde ise birim hacim ( X ) başına x gövde kuvveti,  $\tau_{xy}$  kayma gerilmesi ve  $\sigma_x$  normal gerilmesi verilmektedir.



Sekil III-2. İki boyutlu akıstaki hayali bir kontrol hacmi x yönünde kuvvet dengesi.

EK-III. ( DEVAM )

Tüm bu kuvvetlerin x eksenine izdüşümü

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\delta}{\delta t} ( \rho u \Delta x \Delta y ) + \rho u^2 \Delta y - [ \rho u^2 + \frac{\delta}{\delta x} ( \rho u^2 ) \Delta x ] \Delta y \\
 & + \rho uv \Delta x - [ \rho uv + \frac{\delta}{\delta y} ( \rho uv ) \Delta y ] \Delta x \\
 & + \sigma_x \Delta y - ( \sigma_x + \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} \Delta x ) \Delta y - \tau_{xy} \Delta x \\
 & + ( \tau_{xy} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} \Delta y ) \Delta x + X \Delta x \Delta y = 0 \quad (\text{III-6})
 \end{aligned}$$

elde edilir.  $\Delta x \Delta y \rightarrow 0$   $\Delta x \Delta y$ ' e ifade bölünerek

$$\rho \frac{Du}{Dt} + u \left[ \frac{D\rho}{Dt} + \rho \left( \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} \right) \right] = - \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} + X \quad (\text{III-7})$$

bulunur. Momentum korunumu Denklemi (III-4)' e bağlı olarak Denklem (III-7)

$$\rho \frac{Du}{Dt} = - \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} + X \quad (\text{III-8})$$

seklini alır. Denklemlerdeki normal ve kayma gerilmeleri

$$\sigma_x = P - 2 \mu \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} \right) \quad (\text{III-9})$$

$$\tau_{xy} = \mu \left( \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right) \quad (\text{III-10})$$

ifadeleriyle verilir. Genel momentum denklemi genel notasyon olarak

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = - \nabla p + \mu \nabla^2 v + F \quad (\text{III-11})$$

## EK-III. ( DEVAM )

seklindedir. Burada  $F ( X , Y , Z )$  birim hacim vektörü başına gövde kuvvetidir.

## III-3. Enerji Korunumu

Sekil (III-3)' deki gibi  $\Delta x \Delta y$  sonlu boyutta bir kontrol hacmi için Termodinamik I. yasa

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{array}{l} \text{kontrol hacmi} \\ \text{içindeki enerji} \\ \text{birikimi miktarı} \end{array} \right]_1 \\
 & = \left[ \begin{array}{l} \text{akışkan akışı} \\ \text{ile net ısı} \\ \text{transferi} \end{array} \right]_2 + \left[ \begin{array}{l} \text{iletimle} \\ \text{net ısı} \\ \text{transferi} \end{array} \right]_3 \\
 & + \left[ \begin{array}{l} \text{ic ısı} \\ \text{Üretimi} \\ \text{miktarı} \end{array} \right]_4 - \left[ \begin{array}{l} \text{kontrol hacimden} \\ \text{çevreye net} \\ \text{ısı transferi} \end{array} \right]_5
 \end{aligned}$$

sekinde yazılabilir. Bu ifade Sekil (III-3)' de belirtilen enerji akış diyagramlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$[ ]_1 = \Delta x \Delta y \frac{\delta}{\delta t} ( p e )$$

$$[ ]_2 = - ( \Delta x \Delta y ) \left[ \frac{\delta}{\delta x} ( p u e ) + \frac{\delta}{\delta y} ( p v e ) \right]$$

$$[ ]_3 = - ( \Delta x \Delta y ) \left( \frac{\delta q}{\delta x} \begin{array}{c} \text{''} \\ \text{x} \end{array} + \frac{\delta q}{\delta y} \begin{array}{c} \text{''} \\ \text{y} \end{array} \right)$$

$$[ ]_4 = ( \Delta x \Delta y ) q \begin{array}{c} \text{''} \\ \text{''' } \end{array}$$

EK-III. ( DEVAM )

$$\left[ \right]_5 = (\Delta x \Delta y) \left( \sigma \frac{\delta u}{x \delta x} - \tau_{xy} \frac{\delta v}{\delta y} + \tau_{yx} \frac{\delta v}{\delta x} \right) \\ + (\Delta x \Delta y) \left( u \frac{\delta \sigma}{\delta x} - u \frac{\delta \tau}{\delta y} + v \frac{\delta \sigma}{\delta y} - v \frac{\delta \tau}{\delta x} \right) \quad (III-12)$$

Burada  $e$ ,  $q_x$ ,  $q_y$  ve  $q$  sırasıyla, iç enerji,  $x$  yönündeki ısı akısı,  $y$  yönündeki ısı akısı ve iç ısı üretimi miktarını göstermektedir.

(III-12) Açınımları, Denklem (III-9) ve (III-10) kullanılarak,

$$\rho \frac{De}{Dt} + e \left( \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \underline{v} \right) = - \nabla \cdot \underline{q''} + q'' - \rho \nabla \cdot \underline{v} + \mu \Phi \quad (III-13)$$

enerji korunumu kanunu içine toplanır.

Denklem (III-13)' de,  $q''$ ,  $(q''_x, q''_y)$  ısı akısı vektörü ve  $\Phi$  ise iki-boyutlu sıkıştırılmaz akış için viskoz ayrılma fonksiyonudur.  $\Phi$  fonksiyonu,

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\delta u}{\delta x} \right)^2 + \left( \frac{\delta v}{\delta y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right)^2 \quad (III-14)$$

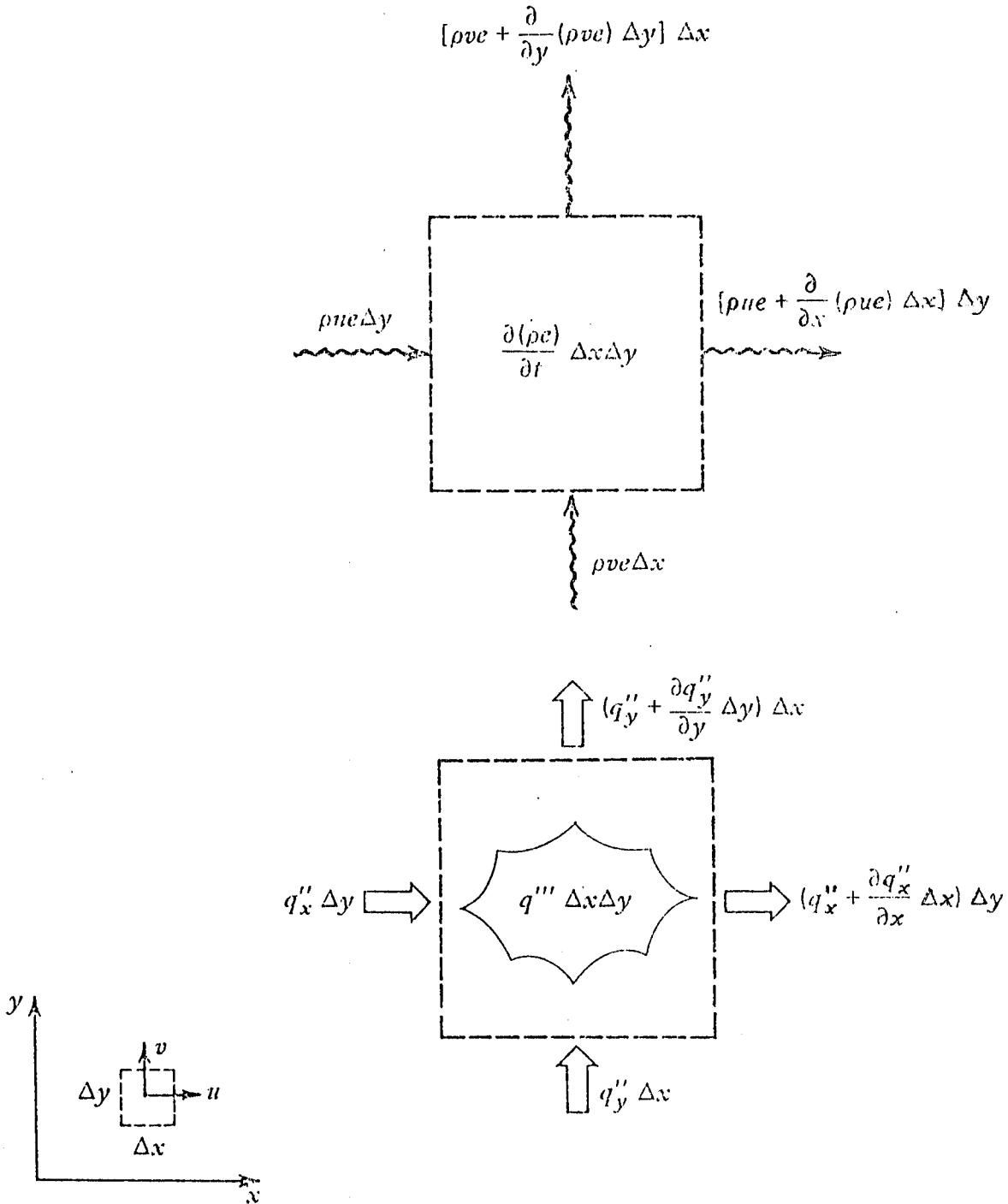
şeklindedir. Denklem (III-13)' ün sol tarafında parantez içindeki ifade, Denklem (III-4) nedeniyle sıfıra eşittir.

Entalpi terimi cinsinden Denklem (III-13)' ü yazma için  $h = e + (1/\rho) p$  termodinamik tanımlaması kullanılır, dolayısıyla

$$\frac{Dh}{Dt} = \frac{De}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} - \frac{p}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} \quad (III-15)$$

denkleme ulaşılır.

## EK-III. ( DEVAM )



Sekil III-3. İki boyutlu akışta hayali bir kontrol hacim üzerine termodinamik 1. yasanın uygulanması.

## EK-III. ( DEVAM )

Ayrıca, Fourier ısı iletim denkleminde yararlanarak,  $(q''_x, q''_y)$  yönlü ısı akısı yerel sıcaklık gradyanları cinsinden türetilebilir.

$$q'' = -k \nabla T \quad (\text{III-16})$$

Denklemler (III-13), (III-14) ve (III-15) birleştirilerek istenen

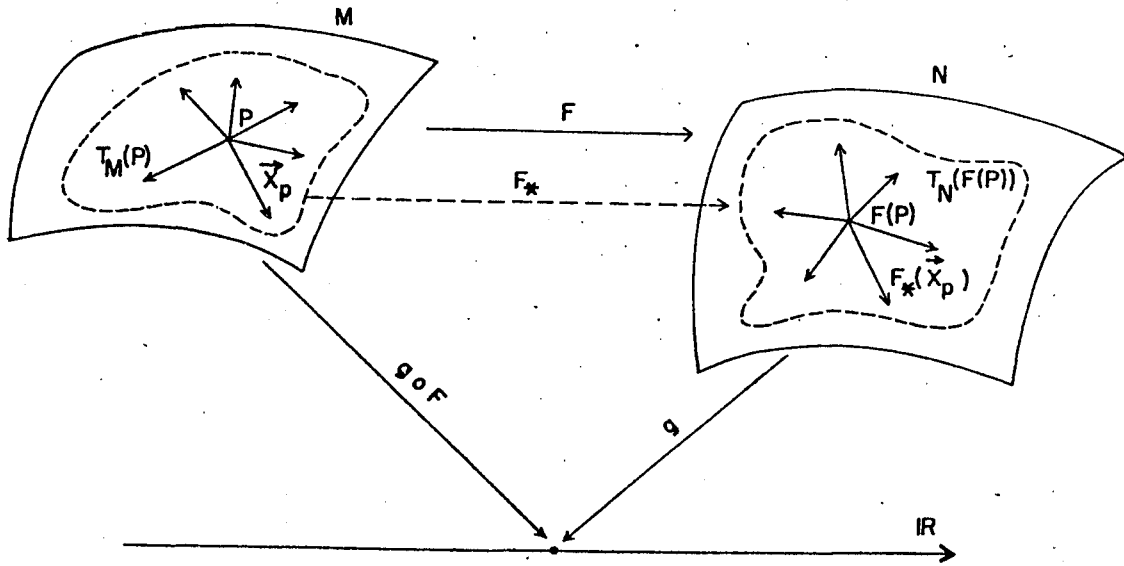
$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q'''' + \frac{DP}{Dt} + \mu \Phi - \frac{P}{\rho} \left( \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \underline{v} \right) \quad (\text{III-17})$$

elde edilir. Sonuçta kütle korunumu denklemi (Denklem III-4) yerine yazılarak Termodinamik I. yasa

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q'''' + \frac{DP}{Dt} + \mu \Phi \quad (\text{III-18})$$

denkleme indirgenir.



EK-IV. Bir  $F$  Dönüşümünün Jakobiyeni [12].

$F: M \rightarrow N$  diferensiyellenebilir bir dönüşüm olsun. Bu dönüşüm yardımıyla

$$F_*: T_M(P) \rightarrow T_N(F(P))$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_p &\longrightarrow F_* \vec{X}_p: C^\infty(N, \mathbb{R}) \longrightarrow \mathbb{R} \\ g &\longrightarrow [F_* \vec{X}_p](g) = \vec{X}_p[goF] \end{aligned}$$

bir  $F_*$  dönüşümü tanımlansın. Bu  $F_*$  dönüşümüne  $F$  dönüşümünün

diferensiyeli veya Jakobiyeni denir.

$g \in C^\infty(N, \mathbb{R})$  ve  $goF \in C^\infty(M, \mathbb{R})$  dır.

$F_* \vec{X}_p \in T_N(F(P))$  için

$$[F_* \vec{X}_p](g) = \vec{X}_p[goF]$$

dir.

## EK-IV. ( DEVAM )

F öyle bir dönüşümdür ki,  $P \in M$  noktasındaki bir  $X_P$  tanjant vektörüne  $F(P) \in N$  noktasındaki bir  $F^*(X_P)$  tanjant vektörünü karşılık getirir. Öyle ki, bu tanjant vektör  $g \in C^\infty(N, \mathbb{R})$  fonksiyonunu,  $X_P$  tanjant vektörünün  $(g \circ F) \in C^\infty(M, \mathbb{R})$  fonksiyonunu eslediği reel sayıya esler.

$P \in M$  noktasının bir  $U$  açık komsuluğu üzerinde bir yerel koordinat sistemi  $\{x_1, \dots, x_n\}$  ise,

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P : C^\infty(M, \mathbb{R}) \longrightarrow \mathbb{R}$$

$$f \longmapsto \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P (f) = \frac{\delta f}{\delta x_i} \Big|_P, \quad 1 \leq i \leq n$$

ayrıca,

$$\left\{ \frac{\delta}{\delta x_1} \Big|_P, \dots, \frac{\delta}{\delta x_n} \Big|_P \right\} T_M(P) \text{ nin bir bazıdır.}$$

Herhangi bir  $V_P \in T_M(P)$ ,

$$V_P : C^\infty(M, \mathbb{R}) \longrightarrow \mathbb{R}$$

vektörü

$$V_P = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P$$

$$v_i = V_P[x_i] \in \mathbb{R}$$

şeklinde yazılabilir.

$F(P) \in N$  noktasının bir  $F(U) \subset V$  olacak şekildeki  $V$  açık komsuluğu üzerinde bir yerel koordinat sistemi

EK-IV. ( DEVAM )

$\{ y_1, \dots, y_m \}$  ise  $\left\{ \frac{\delta}{\delta y_1} \Big|_{F(P)}, \dots, \frac{\delta}{\delta y_m} \Big|_{F(P)} \right\}, T_N(F(P))$

nin bir bazıdır.

$F$  lineer dönüşümüne karşılık gelen matrisi bulmak için  $*$  ilgili iki baz arasındaki lineer dönüşümün matrisini bulmak yeterlidir.

$$F_* \left( \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P \right) \in T_N(F(P)) \text{ tanjant vektörü}$$

$$F_* \left( \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P \right) = \sum_{j=1}^m a_j \frac{\delta}{\delta y_j} \Big|_{F(P)}$$

ile gösterilebilir.

$$\begin{aligned} F_* \left( \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P \right) [y_j] &= \left( \sum_{k=1}^m a_k \frac{\delta}{\delta y_k} \Big|_{F(P)} \right) [y_j] = \sum_{k=1}^m a_k \frac{\delta y_j}{\delta y_k} \Big|_{F(P)} \\ &= a_j \end{aligned}$$

bulunur.

Öte yandan,

$$\begin{aligned} F_* \left( \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P \right) : C^\infty(N, \mathbb{R}) &\longrightarrow \mathbb{R} \\ y_j &\longrightarrow \left[ F_* \left( \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P \right) \right] (y_j) \\ &= \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P (y_j \circ F) = \frac{\delta(y_j \circ F)}{\delta x_i} \Big|_P = \frac{\delta f_j}{\delta x_i} \Big|_P = a_j \end{aligned}$$

olur. Buradan,

$$F_* \left( \frac{\delta}{\delta x_i} \Big|_P \right) = \sum_{j=1}^m \frac{\delta f_j}{\delta x_i} \Big|_P \frac{\delta}{\delta y_j} \Big|_{F(P)}$$

## EK-IV. ( DEVAM )

bulunur. Bu ise  $F$  dönüşümüne karşılık gelen matrisi verir.

Bu matris,

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^1 & \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^1 & \dots & \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^m \\
 \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^2 & \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^2 & \dots & \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^m \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^n & \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^n & \dots & \frac{\delta f}{\delta x} \Big|_P^m
 \end{bmatrix}^T$$

olur. Bu matrise  $F$  dönüşümünün Jakobiyeni ( Jacobian ) ya da Jakobiyen matrisi denir.

### EK-V. Lax-Wendroff Metodu [12].

Lax-Wendroff sonlu fark seması, aşağıdaki gibi bir Taylor serileri açılımından elde edilebilir.

$$u_j^{n+1} = u_j^n + \Delta t \frac{u}{t} + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \frac{u}{tt} + O[(\Delta t)^3] \quad (V-1)$$

Dalga denklemlerini kullanarak

$$\begin{aligned} \frac{u}{t} &= -c \frac{u}{x} \\ \frac{u}{tt} &= c \frac{u}{xx} \end{aligned} \quad (V-2)$$

Denklem (V-1)

$$u_j^{n+1} = u_j^n - c \Delta t \frac{u}{x} + \frac{1}{2} c^2 (\Delta t)^2 \frac{u}{xx} + O[(\Delta t)^3] \quad (V-3)$$

şeklindedir.

Sonuçta  $\frac{u}{x}$  ve  $\frac{u}{xx}$  ikinci mertebe tam merkezi fark

açınımlarıyla yer değiştirirse, çok bilinen Lax-Wendroff seması elde edilir.

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \frac{c \Delta t}{2 \Delta x} (u_{j+1}^n - u_{j-1}^n) + \frac{c^2 (\Delta t)^2}{2 (\Delta x)^2} (u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n) \quad (V-4)$$

Bu explicit ikinci mertebe  $O[(\Delta x)^2, (\Delta t)^2]$  kesinti hata ifadesi ile ikinci mertebeden tam doğrudur ve  $|\nu| \leq 1$  olduğunda kararlıdır.

$$u_t + c u_x = -c \frac{(\Delta x)^2}{6} (1 - \nu)^2 u_{xxx} - \frac{c (\Delta x)^3}{8} \nu (1 - \nu)^2 u_{xxxx} + \dots \quad (V-5)$$

EK-V. ( DEVAM )

Amplifikasyon faktörü

$$G = 1 - \sqrt{1 - \cos \beta} - i\sqrt{1 - \cos \beta} \sin \beta \quad (V-6)$$

izafi faz hatası

$$\frac{\phi}{e} = \frac{\tan^{-1} \left\{ \frac{-\sqrt{1 - \cos \beta} \sin \beta}{1 - \sqrt{1 - \cos \beta}} \right\}}{-\beta \sqrt{1 - \cos \beta}} \quad (V-7)$$

ile verilir. Lax-Wendroff seması  $\sqrt{.5} < \sqrt{1 - \cos \beta} < 1$ ' den büyük dalga sayıları için dikkate değer faz hatası verir.

## EK-VI. EICE Nümerik Çözüm Metodu [2].

Eulerian denklemleri

$$\frac{\delta p}{\delta t} = - \nabla G \quad (\text{VI-1})$$

$$\frac{\delta G}{\delta t} = - \nabla P + R \quad (\text{VI-2})$$

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} = - \nabla ( G h ) + Q + \frac{\delta P}{\delta t} \quad (\text{VI-3})$$

$$R = - \nabla \left( \frac{G^2}{\rho} \right) - \frac{2f}{D} \frac{G|G|}{h} - \rho g \quad (\text{VI-4})$$

Kanal akış denklemlerinin sayısal çözümleri, kaynak itibariyle Harlow ve Amsdon tarafından bütün akış uzlarında akışkan akış problemlerinin zamana bağlı çözümleri için geliştirilen ICE metoduna dayanır. Temel ICE formülasyonu implicit kütle ve momentum denklemleriyle yalnızca basınç ve yoğunlukla ilgili durum denklemlerini çiftleştirir. Halbuki enerji denklemi explicit olarak çözülür. Bu formülasyonun çeşitli akışkan dinamiği uygulamalarında kararlılığı ispatlanmıştır.

Temel ICE metodda Denklemler (VI-1 - VI-4), Şekil VI-1' de gösterilen yerel noktalar üzerinde sonlu farklarla ayrıklaştırılır.

Tam indisler hücre merkezli değerleri, yarım-tam indisler ise bağ yerlerindeki değerleri gösterir. ICE metodda kullanılan durum denklemlerinin ayrıklaştırılmış formu şöyledir:

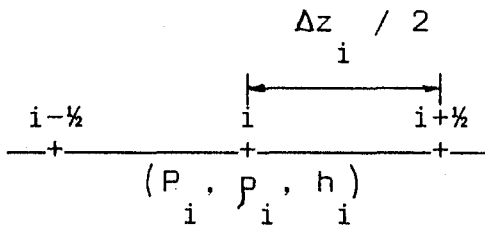
## EK-VI. ( DEVAM )

$$\bar{P}_i^n = P_i^n + \left( \frac{\delta P}{\delta p} \right)_i^n (p_i^{n+1} - p_i^n) \quad (\text{VI-5})$$

n: zaman üssü ( n: simdiki, n+1: bir sonraki )

$\bar{P}_i$ : ortalama ve ileri zamandaki basınç değeri

$\left( \frac{\delta P}{\delta p} \right)_i^n$ : Akışkan içinde yerel ses hızına bağlı sabit entalpi için bir akışkan durum türevi



Sekil VI-1.

Denklem VI-5 akışkan sıkıştırılabilirlik bağıntısı tarif eder fakat doğrudan enerji bağımlılığı içermez. ICE durum denklemlerinde enerji teriminin eliminasyonu Denklemler VI-1, VI-2, VI-5 ile temsil edilen hal, momentum ve kütle denklemlerini yaklaştırır.

Bu sistemin çözümüyle  $\bar{P}_i^{n+1}$ ,  $p_i^{n+1}$  ve  $G_{i-1/2}^{n+1}$  tesbit edilebilir.

Denklem VI-3 ile verilen enerji denkleminin açık formu  $h_i^{n+1}$ 'i hesaplamak için çözülebilir.

ICE zaman devrini tamamlamak için ayrı bir adımda  $\bar{p}$ 'nin ileri-zaman enerji için düzeltilmesi önerilmektedir. Bununla beraber implicit ICE hesaplamalarında nümerik kararsızlıklar yaratmaksızın, basınçlara böyle bir explicit düzeltme yapmak için açık bir metod yoktur. Önceki uygulamaların tekrarından



## EK-VI. ( DEVAM )

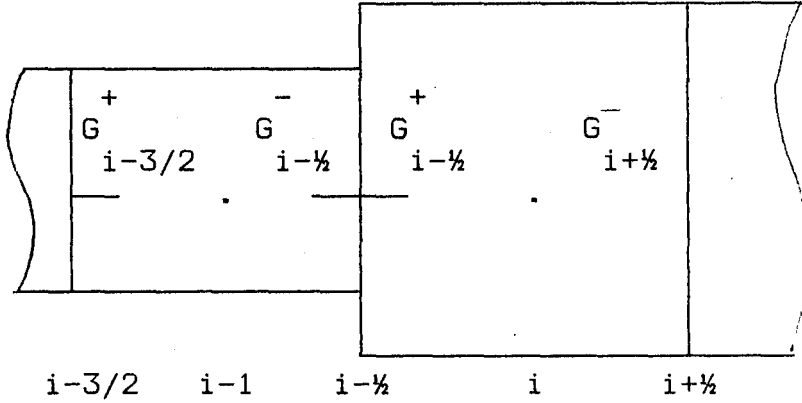
ICE metodunun tamamen akışkan dinamik doğası problemleri için geliştirildiği açıkça görülebilir. Böyle uygulamalarda  $\bar{P}$  için enerji düzeltmesi ihmal edilebilir. Doğrudan akışkanın ısıtılması nedeniyle, ısı etkilerden vazgeçilemeyen akış problemi halinde enerji bağımlılığını hesaba katacak şekilde ICE metodun düzeltilmesine gerek duyulur. COBRA-IV koduyla LOCA analizi için geliştirilmiş ACE metod böyle bir yaklaşımdır. EICE metodu, temel ICE metodundaki kütle-momentum-durum denklemlerinin birleşmesine dayanır ve durum denklemindeki implicit enerji bağımlılığını ıcarerek, ısı gelişmeyi hesaba katar. Sıkıştırılabilir akış transienti EICE metodunun temelidir. Bu özellik, buhar üretici sistemlerinde oluşan, ısıtılmamış olduğu kadar, ısıtılmış uzunluklara sahip akış kanallarının transient analizi için istenen bir özelliktir.

EICE formülasyonunda kullanılan sonlu fark denklemleri, aslında ICE metodunda kullanılan yer-zaman ayrıklaştırmasından oluşmaktadır. Akış yolu geometrisindeki değişikliklere izin vermek için, Şekil VI-2' deki gibi üniform olmayan model ve akış alanı süreksizlikleri kabul edilir.

Birleşme yerine karşı gelen kütle hız değerleri,  $i-1$  hücre tarafındaki  $G_{i-1/2}^-$  ve  $i$  hücre tarafındaki  $G_{i-1/2}^+$  olacak şekilde dizayn edilmiştir. Birleşme hattında kütle debinin sürekliliği

$$G_{i-1/2}^- \cdot A_{i-1} = G_{i-1/2}^+ \cdot A_i \quad (VI-6)$$

olmasını gerektirir.



Sekil VI-2. Akış alanının değişme modeli

Birleşme hattı kütleleşme hızı şu şekilde tanımlanır.

$$G_{i-1/2}^- = G_{i-1/2}^+ \quad (\text{VI-7})$$

$$G_{i-1/2}^+ = r_{i-1/2} G_{i-1/2}^- \quad (\text{VI-8})$$

Burada

$$r_{i-1/2} = \frac{A_{i-1}}{A_i}$$

EICE metodunda kütle-momentum-enerji için sonlu fark denklemleri şöyledir.

$$\begin{aligned} p_i^{n+1} = p_i^n + \frac{\theta \Delta t}{\Delta z_i} & \left( r_{i+1/2}^{n+1} G_{i+1/2}^{n+1} - G_{i+1/2}^{n+1} \right) \\ & + \frac{(1-\theta) \Delta t}{\Delta z_i} \left( r_{i-1/2}^n G_{i-1/2}^n - G_{i+1/2}^n \right) \end{aligned} \quad (\text{VI-9})$$

EK-VI. ( DEVAM )

$$G_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} = G_{i-\frac{1}{2}}^n + \frac{\phi \Delta t^n}{\Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} (P_{i-1}^{n+1} - P_i^{n+1}) + \frac{(1-\phi) \Delta t^n}{\Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} (P_{i-1}^n - P_i^n) + \Delta t^n R_{i-\frac{1}{2}}^n \quad (\text{VI-10})$$

$$\begin{aligned} (p h)_i^{n+1} &= (p h)_i^n + \frac{\theta \Delta t^n}{\Delta Z_i} (r_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} G_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} h_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - G_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} h_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}) \\ &+ \frac{(1-\theta) \Delta t^n}{\Delta Z_i} (r_{i-\frac{1}{2}}^n G_{i-\frac{1}{2}}^n h_{i-\frac{1}{2}}^n - G_{i+\frac{1}{2}}^n h_{i+\frac{1}{2}}^n) \\ &+ \Delta t^n Q_i^n + (P_i^{n+1} - P_i^n) \end{aligned} \quad (\text{VI-11})$$

Burada  $0 < \theta \leq 1$  ,  $0 < \phi \leq 1$

Ayrık zaman ve yer terimleri

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n \quad (\text{VI-12})$$

$$\Delta Z = Z_{i+\frac{1}{2}} - Z_{i-\frac{1}{2}} \quad (\text{VI-13})$$

$$\Delta Z_{i-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (r_{i-\frac{1}{2}} \Delta Z_i + \Delta Z_{i-1}) \quad (\text{VI-14})$$

$\theta$  ve  $\phi$ , orjinal ICE metodda kullanılan zaman ağırlık sabitlerine karşı gelirler. Zaman farkı  $R_{i-\frac{1}{2}}$  ve  $Q_i$  terimleri için bir önceki zaman değerlerini de kullanır.

Basıncı gradient teriminin  $R_{i-1/2}$  için yerel ayrıklaştırma şekli

$$R_{i-1/2} = \left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{a,i-1/2} + \left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{f,i-1/2} + \left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{g,i-1/2} + \left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{K,i-1/2} \quad (\text{VI-15})$$

Ayrık ivme terimi momentum akı terimi için ZIP metodu kullanılarak elde edilir. Bu metod düşük mertebeli kesinti (truncation) hatalarını elimine eder.

$$\left( \frac{G}{P_m} \right)_i = \frac{G_{i+1/2}^- G_{i-1/2}^+}{P_{m,i}} = \frac{r_{i-1/2} G_{i+1/2} G_{i-1/2}}{P_{m,i}} \quad (\text{VI-16})$$

Sonuç ivme terimi

$$\left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{a,i-1/2} = \frac{G_{i-1/2}}{\Delta Z_{i-1/2}} \left[ \frac{r_{i-3/2} \left| G_{i-3/2} \right|}{P_{m,i-1}} - \frac{r_{i-1/2} \left| G_{i+1/2} \right|}{P_{m,i}} \right] + \frac{G_{i-1/2} \left| G_{i-1/2} \right|}{(P_{m,i} + P_{m,i-1})} \cdot \frac{1}{\Delta Z_{i-1/2}} [r_{i-1/2}^2 - 1] \quad (\text{VI-17})$$

olarak verilir. Şekil kayıp terimi ise

$$\left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{K,i-1/2} = - \frac{G_{i-1/2} \left| G_{i-1/2} \right|}{\Delta Z_{i-1/2}} \cdot \frac{K_{i-1/2}}{(P_{m,i} + P_{m,i-1})} \quad (\text{VI-18})$$

Burada,  $K_{i-1/2}$  şekil kayıp katsayısıdır.

Geri kalan basıncı gradyanı terimleri iki-fazlı slip akış halinde ayrıklaştırılmış şekilde verilir.

EK-VI. ( DEVAM )

$$\left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{f,i-\frac{1}{2}} = - G_{i-\frac{1}{2}} G_{i-\frac{1}{2}} \times \left[ r_{i-\frac{1}{2}}^2 \frac{f_{l,i}}{P_{f,i} D_{h,i}} + \frac{f_{l,i-1}}{P_{f,i-1} D_{h,i-1}} \right] \phi_{TP}^2 \quad (VI-19)$$

$$\left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)_{g,i-\frac{1}{2}} = - \frac{1}{2 \Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} \left[ P_i \Delta Z_i g_i + P_{i-1} \Delta Z_{i-1} g_{i-1} \right] \quad (VI-20)$$

$$g_i = g \cdot Z_i / | Z_i |$$

EICE formülasyonunda kullanılan ayrık durum denklemleri aşağıdaki gibi hem basıncı, hem de enerji bağımlılığını içerir

$$P_i^{n+1} = P_i^n + \left( \frac{\delta P}{\delta P} \right) (P_i^{n+1} - P_i^n) + \left( \frac{\delta P}{\delta h} \right) (h_i^{n+1} - h_i^n) \quad (VI-21)$$

Buradaki türev ifadeleri 1967 Amerikan Makina Mühendisleri Birliği ( ASME )' nin buhar tablolarına dayanarak tesbit edilir. Akışkan korunum denklemleri, VI-9, VI-10, VI-11, VI-21 Denklemleri ile verilen durum denklemi, I sonlu fark hücreleri içeren akış kanalına uygulandığında, bir 4xI' lık es linear olmayan denklem seti temsil eder. EICE çözüm metodu, geniş transient şartlar boyunca sayısal kararlılık sağlarken, denklemlerin birleşik sisteminin etkin çözümünü sağlayan, orjinal ICE metoduna dayanan iki adımlı iteratif bir teknik kullanır. Iteratif çözüm metodunda, ileri zaman üssü n+1, L ile yer değiştirir. L bu durumda,  $\Delta t^n$  zaman aralığında iteratif ileri zaman değerlerini temsil eder.

## EK-VI. ( DEVAM )

Adım 1 aşağıdaki gibi verilen Poisson denklemlerini elde etmek için, kütle-momentum-durum denklemlerini birleştirerek formüle edilir.

$$\begin{aligned}
 \left( \frac{\delta p}{\delta P} \right)_i^n P_i^L &= \frac{\theta \phi (\Delta t)^n}{\Delta Z_i} \left[ \frac{1}{\Delta Z_{i+\frac{1}{2}}} P_{i+1}^L \right. \\
 &\quad - \left( \frac{1}{\Delta Z_{i+\frac{1}{2}}} + \frac{r_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} \right) P_i^L \\
 &\quad \left. + \frac{r_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} P_{i-1}^L \right] + S_i^n \\
 &\quad - \left( \frac{\delta p}{\delta h} \right)_i^n (h_i^L - h_i^n) \quad (VI-22)
 \end{aligned}$$

Burada;  $S_i^n$  önceki zaman terimlerini içerir ve

$$\begin{aligned}
 S_i^n &= \left( \frac{\delta p}{\delta P} \right)_i^n P_i^n + \frac{\Delta t^n}{\Delta Z_i} (r_{i-\frac{1}{2}}^n G_{i-\frac{1}{2}}^n - G_{i+\frac{1}{2}}^n) \\
 &\quad + \frac{\theta (1 - \phi) (\Delta t)^n}{\Delta Z_i} \left[ \frac{1}{\Delta Z_{i+\frac{1}{2}}} P_{i+1}^n \right. \\
 &\quad \left. - \left( \frac{1}{\Delta Z_{i+\frac{1}{2}}} + \frac{r_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} \right) P_i^n + \frac{r_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta Z_{i-\frac{1}{2}}} P_{i-1}^n \right]
 \end{aligned}$$

EK-VI. ( DEVAM )

$$+ \frac{\theta (\Delta t)^n}{\Delta Z_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}}^n R_{i-\frac{1}{2}}^n - R_{i+\frac{1}{2}}^n \right) \quad (\text{VI-23})$$

Denklem (VI-22)' de temsil edilen sistem,  $P_i^L$  ileri zaman basınçlarını çözmek için kullanılan ICE formuna benzerdir. Ancak ek olarak ısıl genleşme etkilerini hesaba katan ileri zaman entalpi terimini içerir. Denklem (VI-22)' nin çözümü için Adım 1 kanal sınırlarında tanımlanan kütle hız veya ileri zaman basıncı terimlerini kullanan standart Gauss eleme tekniği üzerinden elde edilebilir.  $G_{i-\frac{1}{2}}^L$  ve  $p_i^L$  için dağılımlar Denklem (VI-9) ve (VI-10)' un ayrı çözümlerinden saptanır.

Adım 2, Denklem (VI-9), (VI-10) ve (VI-21) baskın hücre bağıntısıyla verilen kütle-enerji-durum denklemlerinin implicit birleşmesiyle türetilir. Değişken baskın hücre bağıntısı

$$h_i = \left( \frac{1}{2} + \xi \right) h_{i-\frac{1}{2}} + \left( \frac{1}{2} - \xi \right) h_{i+\frac{1}{2}} \quad (\text{VI-24})$$

Burada  $-\frac{1}{2} < \xi < \frac{1}{2}$  ' dir. Adım 2' nin formülasyonu kuadratik şekle indirgenebilir.

$$a (h_i^L)^2 + b h_i^L + c = 0 \quad (\text{VI-25})$$

Bu denklemin katsayıları cebirsel olarak bulunur.

## KAYNAKLAR DIZINI

- [1] Akcasu,Z.Z.,Y.C.Feng, EPRI Project Manager S.P.Kalra,  
Review of Transient Modeling of Steam Generator  
Units in Nuclear Power Plants, NP-1576 Research  
Project 684-1, Interim Report, October 1980,  
Prepared by University of Michigan Department of  
Nuclear Engineering, 1-46 p.
- [2] Crump,W.Mark and John C.Lee,  
Nonlinear Transient Analysis of Light Water Reactor  
Steam Generators Using an Implicit Eulerian Method,  
American Nuclear Society ( 1981 ), 193-209 p.
- [3] Duffey,R.B.,  
The Thermal Hydraulics of Steam Generator for  
PWRs in Heat Transfer and Fluid Flow in Nuclear Systems,  
Pergamon Press, 1981, New York, 463-496 p.
- [4] Kalra,S.P.,  
Modeling Transients in PWR Steam Generator Units,  
NUCLEAR SAFETY , Vol. 25 , No.1 , January-February 1984,  
35-49 p.
- [5] Roberts, G.,  
Structural Material in Nuclear Power Systems. Plenum  
1981, 321-360 p.
- [6] Owen C. Jones Jr,



- Nuclear Reactor Safety Heat Transfer, Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Lab. 1981.
- [7] S. P. Kalra,  
Dynamic Thermal-Hydraulic Behavior of PWR U-Tube Steam Generators-Simulation Experiments and Analysis, Report EPRI-NP-1837-SR, 1981.
- [8] Y.H. Ransom, R. J. Wagner and J. A. Trapp,  
RELAP5/MOD1 Code Manual, Vols. 1 and 2, NRC Report NUREG/CR-1826 ( EGG-2070 ), EG & G, Inc., NTIS, March 1982.
- [9] W. H. Retting et al.,  
RELAP4-A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems User's Manual, Vols. 1-3, NRC Report ANCR-NUREG-1335, Aerojet Nuclear Co., Idaho National Engineering Laboratory NTIS, September 1976.
- [10] F. M. Bordelon,  
Comprehensive Space-Time Dependent Analysis of Loss-of-Coolant ( SATAN-4 Digital Code ), Report WCAP-7750, Westinghouse Electric Corp., August 1971.
- [11] D. R. Liles and J. H. Mahaffy,  
TRAC-PF-1; An Advanced Best-Estimate Computer Program for PWR Analysis, Los Alamos National Laboratory, to be published in 1983.

- [12] Hacısalihoğlu, H. H.,  
Diferansiyel Geometri, Gazi Üniversitesi Basın-Yayın  
Yüksekokulu Basımevi, 1983, Ankara, sf. 104-111.
- [13] Holman, J. P.,  
Heat Transfer, Mc Graw-Hill Kogakusha Ltd., Fourth  
Edition, 1976, p. 364.
- [14] Lienhard, H. J.,  
A Heat Transfer Textbook, Prentice-Hall Inc.,  
Englewood Cliffs, N. J., 1981, p. 424.
- [15] Anderson, A. D., Tannehill, C. J., Pletcher, H. R.,  
Computational Fluid Mechanics And Heat Transfer,  
Hemisphere Publishing Corp., 1984, New York, p. 101-102.
- [16] Bejan, A.,  
Convection Heat Transfer, A Wiley-Interscience  
Publication, 1984, New York, p. 1-16.