

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 027201 (444-453)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 027201 (444-453)

DOI: 10.35414/akufemubid.1002711

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Çalışma Parametrelerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu ile Kritik Isı Akısının Tahmini

Ayşe Nur ESEN

İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: ayse.esen@bilgi.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4211-7728>

Geliş Tarihi: 30.09.2021

Kabul Tarihi: 19.04.2022

Öz

Çekirdekli kaynamadan ayrılma, ısı akısı değeri, kritik ısı akısı denilen sınır değere ulaştığında meydana gelir ve ısı transferinin azalması ile ısıtılan yüzeyin zarar görmesine neden olabilecek ani sıcaklık artışına neden olur. Bu çalışmada dikey bir borudaki aşırı soğutulmuş akışta kritik ısı akısının meydana geldiği çekirdekli kaynamadan ayrılma koşulları hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu tahmin edilmiştir. Gelişmiş duvar kaynama modeli ANSYS Fluent 2019 R3 yazılımı ile uygulanmıştır. Sabit bir basınçta değişen kütle akısı ve giriş sıcaklığı koşullarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Modeli doğrulamak için mevcut literatürden deneysel veriler toplanmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen HAD sonuçlarına göre kritik ısı akısı değerinin aşırı soğutma seviyesi ve kütle akısı ile arttığı belirlenmiştir. Hesaplanan kritik ısı akısı değerleri ile deneysel veriler arasındaki ortalama sapma %16'dır. Elde edilen sonuçlar uygulanan modelin kritik ısı akısını tahmin etmede başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler

Çekirdekli kaynamadan ayrılma; İki fazlı akış; Kritik ısı akısı; Türbülans

Estimation of Critical Heat Flux in Different Operating Parameters by Computational Fluid Dynamics Simulation

Abstract

Departure from nucleate boiling occurs when the heat flux value reaches the limit value called the critical heat flux, and it causes a sudden increase in temperature that can cause damage to the heated surface with the decrease of heat transfer. In this study, a computational fluid dynamics simulation of departure from nucleate boiling where critical heat flux occurs in a subcooled flow in a vertical pipe has been predicted. An improved wall boiling model has been applied using ANSYS Fluent 2019 R3 software. Simulations are carried out under varying mass flux and inlet temperature conditions at a constant pressure. Experimental data were collected from the literature to validate the model and the simulation results were compared with the experimental data. According to the simulation results, it was determined that the critical heat flux value increased with the subcooling level and mass flux. The average deviation between the calculated critical heat flux values and the experimental data is 16%. The results proved that applied model was qualified to predict critical heat flux accurately.

Keywords

Departure from nucleate boiling; Two phase flow; Critical Heat Flux; Turbulence

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

Kaynama, doyma sıcaklığındaki bir sıvıya buhar oluşumunu sağlayacak şekilde ısı eklenmesi işlemi olarak tanımlanır. Kaynama ısı transferi sıvıdan buhara faz değişikliği ile meydana gelen bir ısı transferi türüdür, kaynamalı akış sıvı ve buhar karışımından oluşur ve iki fazlı akış olarak adlandırılır (Tong and Tang 1997). Kaynama, sıvının sıcaklığına bağlı olarak aşırı soğutulmuş veya doymuş kaynama

olarak tanımlanır. Aşırı soğutulmuş kaynamada sıvı sıcaklığı doyma sıcaklığından daha düşüktür; ancak duvar sıcaklığı çok yüksek olduğundan kaynama gerçekleşir. Duvara uygulanan aşırı miktarda ısı akısı sonucunda oluşan buhar filminin düşük ısı iletkenliği nedeniyle ısı transferi azalır ve duvar sıcaklığındaki ani sıcaklık artışından dolayı ısıtılan yüzey zarar görür. Isıtılmış yüzey sıcaklığında keskin bir artışa neden olan ısı akısı değerine kritik ısı akısı (CHF) denir. Isı akısı CHF değerine ulaştığında, buhar

sınınin yerini alır ve duvara bitişik alanı kaplar. Bu nedenle enerji doğrudan duvardan buhara aktarılır ve çekirdekli kaynamadan ayrılma (DNB) meydana gelir. Aşırı soğutulmuş kaynamanın endüstride birçok uygulaması vardır. Nükleer reaktör çekirdeğinde meydana gelen ısı transferi nedeniyle CHF veya DNB'nin belirlenmesi nükleer reaktör tasarımındaki temel güvenlik parametrelerinden birisidir. Nükleer reaktörlerin tasarımı ve işletimi sırasında, CHF değeri önceden hesaplanmalıdır. Nükleer reaktörlerde yakıt çubuğunu saran zarf, radyoaktif yakıtı çevreleyen ilk bariyerdir. CHF değerine ulaşırsa yakıt çubuğu yüzeyindeki sıcaklık aniden yükselir ve zarf malzemesi zarar görür. Nükleer reaktörlerde sıcaklık sapmalarını ve sonrasındaki ısı transfer yüzeyindeki bozulmayı önlemek için CHF değerinin altında çalışılması önemlidir. Geçmiş yıllarda kritik ısı akısının deneysel ve yarı deneysel yöntemlerle belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır (Celata *et al.* 1993, Chen 2012, Tong 1967, Waterhead 1963, Weisman and Pei 1983). Önerilen korelasyonların çoğu kritik ısı değerini tahmin etmede yüksek bir doğruluğa sahiptir, ancak genellikle geometri, çalışma koşulları, sıvı türü gibi parametrelere bağlıdır. Araştırmacılar, kritik ısı akısı değerini elde etmek için deneylerinde farklı koşullar kullanmak zorundadır. Bu araştırmalar uzun süreler ve yüksek maliyetler gerektirdiği gibi sıcaklık dağılımı, kabarcık davranışı gibi bazı parametrelerin belirlenmesi çok karmaşıktır. Son yıllarda kritik ısı akısının sayısal simülasyon ile tahmini ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Deneysel yöntemlerle karşılaştırıldığında sayısal simülasyonun avantajları vardır. Farklı geometriler, malzemeler ve test koşulları kullanıldığında sayısal simülasyon maliyeti önemli ölçüde azalır.

Azhar (2019) çalışmasında dikey boruda iki fazlı akış için Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) kaynama modelinin ANSYS Fluent yazılımında kullanımını Bartolemei ve Gorburov (1969)'un deneysel verileriyle karşılaştırarak doğrulamıştır. Dong vd. (2018) ANSYS Fluent 2016 yazılımı ile CHF tahmini dikey boruda iki fazlı akış için gerçekleştirmiştir. Çalışmada farklı ağ tiplerinin ve türbülans modellerinin CHF değerine etkisi incelenmiştir ve simülasyon sonuçları Becker vd. (1983) ile

karşılaştırılmıştır. Eksen simetrik ağ kullanılması, Y+ değerinin 50'den düşük olduğu ağların kullanılmaması önerilmiştir. k- ω ve k- ϵ türbülans modellerinin kabul edilebilir olduğu gösterilmiştir. Guerrero vd. (2017) dikey boruda iki fazlı akışın modellenmesinde akışkan hacmi (VOF) ve Eulerian modellerinin karşılaştırmasını yapmıştır. Eulerian model performansının ağdan bağımsız olduğu ve VOF modelinden daha az hesaplama zamanı gerektirdiği gösterilmiştir. Filho vd. (2015) aşırı soğutulmuş kaynamayı analiz etmek için Eulerian çok fazlı modelini ANSYS Fluent yazılımıyla uygulamış ve Bartolemei ve Chanturiya (1967)'nin deneysel verileriyle karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonuçları düşük ısı akısı ve yüksek basınç şartlarında deneysel verilerle uyumun daha iyi olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, suyun dikey borudaki akışı için çekirdekli kaynamadan ayrılmanın incelenmesi ve kritik akının hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaçla gelişmiş duvar kaynama modeli (CHF modeli) ANSYS Fluent 2019 R3 hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile uygulanmış ve modelin doğrulanması için hesaplanan CHF değerleri Waterhead (1963) tarafından yayınlanan deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Matematiksel Modeller

Bu çalışmada dikey boruda iki fazlı akışın modellenmesinde Eulerian iki fazlı modeli kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde iki fazlı akış simülasyonlarında üç temel model uygulanır: akışkan hacmi (VOF) modeli, karışım modeli ve Eulerian modeli (Kim 2018). Fazlar arası arayüz geometrisinin önemli olduğu slug akışı, katmanlı akış ve halka akış gibi gaz sıvı akış rejimlerinde ise VOF modeli önerilmektedir (Int Kyn. 1). Düşük boşluklu dağınık kabarcıklı akış rejimi için karışım modeli veya Eulerian modeli faz değişiminin tam olarak dikkate alınması nedeniyle iki fazlı akış için daha uygundur. Aşırı soğutulmuş kaynamalı akış, düşük boşluk kesirli dağılmış kabarcıklı iki fazlı akış olarak kabul edildiğinden, Eulerian modeli makul sayısal simülasyon maliyeti nedeniyle tercih edilir (Kim 2018).

Eulerian modeli karmaşık bir iki fazlı akış modelidir. Her faz için bir dizi momentum ve süreklilik denklemi çözülür. Eulerian iki fazlı modelin yanısıra fazlar arası kütle, momentum ve enerji transfer modelleri uygulanmıştır. CHF mekanizması, gelişmiş duvar kaynama modeli (CHF modeli) ile modellenmiştir.

2.1.1 Korunum Denklemleri

Eulerian iki fazlı modeli sıvı ve buhar fazları için ayrı ayrı kütle, momentum ve enerji denklemlerini içerir.

•Kütle denklemi:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) = S_l + \dot{m}_{Vl} - \dot{m}_{lV} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_v) = S_v + \dot{m}_{lV} - \dot{m}_{vL} \quad (2)$$

•Momentum denklemi:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l \vec{v}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l \vec{v}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_l + \alpha_l \rho_l \vec{g} + \dot{m}_{Vl} \vec{v}_v - \dot{m}_{lV} \vec{v}_l + \vec{F}_l \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v \vec{v}_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_v \vec{v}_v) = -\alpha_v \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_v + \alpha_v \rho_v \vec{g} + \dot{m}_{lV} \vec{v}_l - \dot{m}_{vL} \vec{v}_v + \vec{F}_v \quad (4)$$

•Enerji denklemi:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l h_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l h_l) = -\alpha_l \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{q}_l + S_l + Q_{Vl} + \dot{m}_{Vl} h_v - \dot{m}_{lV} h_l \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v h_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_v h_v) = -\alpha_v \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{q}_v + S_v + Q_{lV} + \dot{m}_{lV} h_l - \dot{m}_{vL} h_v \quad (6)$$

Denklemlerde l ve v sırasıyla sıvı ve buhar fazları, α hacim oranı, ρ yoğunluk, \vec{v} hız, S kaynak terimi, p basınç, $\bar{\tau}$ gerilim tensörü, \vec{g} yerçekimi, h spesifik entalpi, \dot{m} bir fazdan diğerine arayüzey kütle transfer, Q bir fazdan diğerine enerji transferi ve \vec{q} ısı akısıdır. \vec{F} kuvveti, sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, duvar yağlama kuvveti, sanal kütle kuvveti ve türbülans dağılım kuvveti olmak üzere beş kuvvetten oluşur.

2.1.2 Kritik Isı Akısı Modeli

Aşırı soğutulmuş kaynamalı akışta, enerji doğrudan duvardan sıvıya aktarılır. Bu enerjinin bir kısmı taşınım ısı akısı ile sıvının sıcaklığının artmasına ve

bir kısmı buharlaşma ısı akısı ile buhar oluşmasına neden olur. Arafaz ısı transferi ayrıca ortalama sıvı sıcaklığının artmasına da neden olur, ancak doymuş buhar yoğunlaşır. Buna ek olarak, kabarcık ayrılmasından sonra duvar çevresini dolduran sıvı ile ilgili döngüsel ortalama geçici enerji transferini modelleyen söndürme ısı akısı vardır. Bu temel mekanizmalar, Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) olarak adlandırılan modelin temelleridir (Kurul and Podowski 1991).

Bu çalışmada kullanılan CHF modeline göre duvara yakın bölgede iki fazlı akışta, ısıtılmış duvardan aktarılan ısı akısı, sıvı faza aktarılan ısı akısı (q_l) ve buhar fazına aktarılan ısı akısı (q_v) olarak ikiye ayrılır. Duvardan sıvı faza aktarılan ısı akısı taşınım (q_c), söndürme (q_a) ve buharlaşma (q_e) ısı akısı olarak üçe ayrılır. Çekirdekli kaynamadan ayrılmayı kritik ısı akısı koşullarında modellemek için çözüm sürecine buhar sıcaklığını dahil etmek gerekir. Bu gibi durumlarda enerjinin bir kısmı doğrudan duvardan buhara aktarılır. Böylece, toplam ısı akısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q_w = f(\alpha_l)(q_c + q_e + q_Q) + (1 - f(\alpha_l))q_v \quad (7)$$

Denklemden $f(\alpha_l)$ sıvı fazın baskın olduğu olduğu ısıtılmış duvarın alan kesridir. Isı akıları aşağıdaki denklemler ile tanımlanır.

$$q_c = h_c(T_w - T_l)(1 - A_b) \quad (8)$$

$$q_Q = \frac{2k_l}{\sqrt{\pi \lambda_l t}}(T_w - T_l) \quad (9)$$

$$q_e = V_d N_w \rho_v h_{lv} f \quad (10)$$

$$q_v = h_v(T_w - T_v) \quad (11)$$

Denklemlerde T_w , T_l ve T_v sırasıyla duvar, sıvı ve buhar sıcaklığı, h_c ve h_v ısı transfer katsayıları, k_l ısıl iletkenlik, λ_l difüzyivite, h_{lv} gizli buharlaşma ısı, ρ_v buhar yoğunluğu, V_d kabarcık ayrılma çapına göre kabarcığın hacmi, t periyodik zaman, A_b kabarcık ile kaplanmış etki alanı, N_w çekirdek bölgesi yoğunluğu ve f kabarcık ayrılma frekansdır.

Çekirdek bölgesi yoğunluğu duvar ısısına bağlı bir korelasyonla ifade edilir.

$$N_w = C^n (T_w - T_{sat})^n \quad (12)$$

Denklemden T_{sat} doyma sıcaklığıdır. n ve C deneysel parametreleri için Lemmert ve Chawla modeli ($n=1.805$ ve $C=210$) kullanılmıştır (Lemmert and Chawla 1977).

Kabarcık ayrılma çapı, kabarcıkların çekirdeklenme bölgesinden ayrıldığı andaki maksimum kabarcık çapıdır. Çekirdeklenme bölgesi yoğunluğu ile birlikte kabarcık ayrılma çapı, en zorlu duvar kaynatma kapatma modellerinden biridir. Bu çalışmada Tolubinski ve Kostanchuk (1970) modeli kullanılmıştır.

$$D_w = \min(0.0014, 0.0006e^{-T_{sub}/45}) \quad (13)$$

Etki alanı kabarcık ayrılma çapına ve çekirdek bölgesi yoğunluğuna bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A_b = \min\left(1, K \frac{N_w \pi D_w^2}{4}\right) \quad (14)$$

K sabiti Del Valle ve Kenning (1985) modelinden hesaplanmıştır.

$$K = 4.8e^{\left(-\frac{J_{a_{sub}}}{80}\right)} \quad (15)$$

$J_{a_{sub}}$ aşırı soğutulmuş Jacob sayısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$J_{a_{sub}} = \frac{\rho_l C_{pl} T_{sub}}{\rho_v h_{lv}} \quad (16)$$

Kabarcık ayrılma frekansı Cole (1960) korelasyonu ile hesaplanmıştır.

$$f = \frac{1}{T} = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3\rho_l D_w}} \quad (17)$$

Bu çalışmada kullanılan modelde CHF buharın hacim oranı aşağıda verilen değerlere ulaştığında oluşur (Tentner *et al.* 2006).

$$f(\alpha_v) = 1 - f(\alpha_l) = \begin{cases} 0 & \alpha_v < \alpha_{v,1} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{\alpha_v - \alpha_{v,1}}{\alpha_{v,2} - \alpha_{v,1}}\right)\right) & \alpha_{v,1} \leq \alpha_v \leq \alpha_{v,2} \\ 1 & \alpha_v > \alpha_{v,2} \end{cases} \quad (18)$$

Denklemden α hacim oranıdır. Modelde buhar hacim oranları $\alpha_{(v,1)} = 0.90$, $\alpha_{(v,2)} = 0.95$ 'tir. Kritik ısı akısı

buhar kesri bu değer aralığına ulaştığında meydana gelecektir.

2.1.3 Arayüzey Momentum Transferi

Sıvı ve buhar arasındaki ara yüzey momentum transferi sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, duvar yağlama kuvveti ve sanal kütle kuvveti ve türbülans dağılım kuvvetini içerir. İki fazlı akışta, ikincil fazın damlacıklar veya kabarcıklar oluşturduğu varsayılır.

Sürüklenme kuvveti, farklı hızlar nedeniyle damlacıkların veya kabarcıkların maruz kaldığı kuvveti ifade eder.

$$\vec{F}_D = \frac{C_D \mu_l A_i Re}{8d} (\vec{v}_V - \vec{v}_l) \quad (19)$$

Denklemden C_D sürüklenme kuvveti sabitidir ve Ishii modeli ile modellenmiştir (Ishii 1987). μ_l sıvı fazın viskozitesi, A_i arayüzey alan konsantrasyonu, Re ortalama kabarcık çapı d 'ye bağlı Reynolds sayısıdır.

Kaldırma kuvveti, sıvı fazındaki hız gradyanları nedeniyle buhar fazına etki eden kuvveti temsil eder.

$$\vec{F}_L = -C_L \rho_l \alpha_v (\vec{v}_l - \vec{v}_V) \times (\nabla \times \vec{v}_l) \quad (20)$$

Denklemden C_L kaldırma kuvveti sabitidir ve Moraga modeli ile modellenmiştir (Moraga *et al.* 1999).

Türbülanslı dağılım kuvveti, dağınık akışlarda türbülanslı bir difüzyon görevi görür. Buharı duvarın çevresinden borunun merkezine uzaklaştırmada önemli bir rol oynar. Bu çalışmada Burns modeli ile modellenmiştir (Burns *et al.* 2004).

$$\vec{F}_{td} = C_{TD} K_{VI} \frac{D_l}{\sigma_{VI}} \left(\frac{\nabla \alpha_v}{\alpha_v} - \frac{\nabla \alpha_l}{\alpha_l} \right) \quad (21)$$

Denklemden K_{VI} arayüzey değişim sabitidir. $C_{TD}=1$ ve $\sigma_{VI}=1$ kabul edilmiştir.

Buhar fazı sıvı faza göre hızlandığında sanal kütle etkisi hesaba katılmalıdır. Sanal kütle kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\vec{F}_{vm} = 0.5 \alpha_v \rho_l \left(\frac{\partial \vec{v}_l}{\partial t} + (\vec{v}_l \cdot \nabla) \vec{v}_l - \left(\frac{\partial \vec{v}_V}{\partial t} + (\vec{v}_V \cdot \nabla) \vec{v}_V \right) \right) \quad (22)$$

Duvar yağlama kuvveti, buhar fazı kabarcıklarını duvardan akışa iter.

$$\vec{F}_{wl} = C_{wl}\rho_l\alpha_V|(\vec{v}_l - \vec{v}_V)|_Z^2\vec{n}_w \quad (23)$$

Denklemden C_{wl} duvar yağlama sabiti, \vec{n}_w birim normal vektördür.

2.1.4 Arayüzey Enerji Transferi

Arayüzey enerji transferi, yakın duvar bölgesinde sıvı fazdan buhar fazına ısı transferini ve aşırı soğutulmuş bölgede buhar ve sıvı fazları arasındaki ısı transferini içerir. Kabarcıklar duvardan ayrılıp aşırı soğutulmuş bölgeye hareket ederken, kabarıktan sıvıya ısı transferi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$q_{lt} = h_{sl}(T_{sat} - T_l) \quad (24)$$

Denklemden h_{sl} hacimsel ısı transfer katsayısıdır. Bu çalışmada ısı transfer katsayısının belirlenmesinde Ranz-Marshall modeli uygulanmıştır (Ranz and Marshall 1952).

Buhar fazına ısı transferi Lavieville modeli ile hesaplanmıştır (Lavieville *et al.* 2006). Bu modelde buharın doyma sıcaklığını hızlı buharlaşma ve yoğunlaşma ile koruduğu varsayılır.

$$q_{vt} = \frac{\alpha_V\rho_V C_{p,V}}{\delta t} (T_{sat} - T_V) \quad (25)$$

Denklemden δt zaman skalası, ve $C_{p,v}$ izobarik ısı kapasitesidir.

2.1.5 Arayüzey Kütle Transferi

Arayüzey kütle transferi, yakın duvar bölgesindeki sıvının buharlaşması ve kitlesel akıştaki sıvı fazın buharlaşması veya buharın yoğunlaşması olarak ikiye ayrılabilir. Yakın duvar bölgesindeki sıvı buharlaşması aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$m_E = \frac{q_E}{h_{lv} + C_{p,l}\Delta T_{sub}} \quad (26)$$

Kitlesel akıştaki kütle transferi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$m = m_{lt} + m_{vt} = \frac{q_{lt} + q_{vt}}{h_{lv}} \quad (27)$$

2.1.6 Türbülans Modeli

Çok fazlı akışlarda momentum denklemlerinde modellenen parametre sayısı fazla olduğundan, çok fazlı akış simülasyonlarında türbülans modellemesi son derece karmaşıktır. Bu çalışmada RNG k-ε

türbülans modeli kullanılmıştır (Yakhot and Orszag 1986).

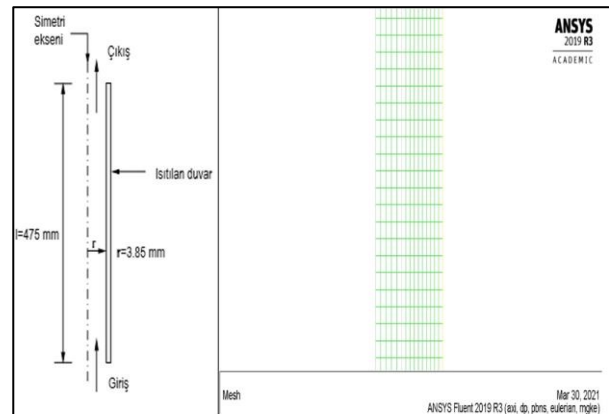
Duvara yakın bölge viskoz alt tabaka, tampon tabaka ve tam türbülanslı tabaka olmak üzere üç alt tabakaya bölünür (Pope 2000). Türbülans modeli uygun duvar fonksiyonu ile birlikte kullanılmalıdır. Duvar fonksiyonları, duvarla türbülans bölgesi arasında viskozite etkilerini ilişkilendirmek amacıyla kullanılır. Bu çalışmada standart duvar fonksiyonu RNG k-ε türbülans modeli ile birlikte kullanılmıştır. Standart duvar fonksiyonu, viskoz alt tabakada ve tampon tabakada denklemleri çözmek için deneysel bir korelasyon kullanır. CHF simülasyonlarında $Y^+ > 50$ olacak şekilde türbülans modellemesinin yapılması önerilmektedir (Dong *et al.* 2018).

2.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu

Sayısal analiz ANSYS Fluent 2019 R3 akademik yazılımı ile yapılmıştır.

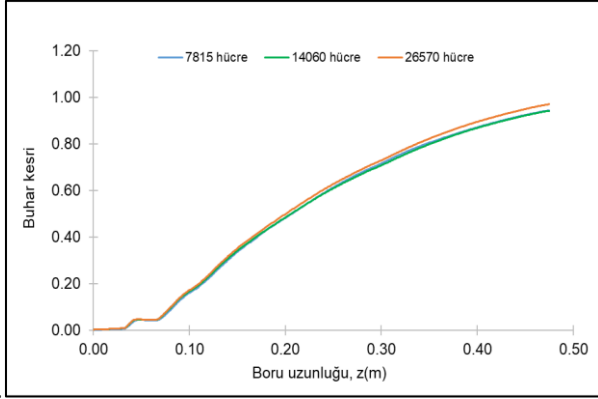
2.2.1 Geometri ve Sınır Koşulları

HAD simülasyon yöntemini doğrulamak için Waterhead (1963) tarafından yayınlanan yukarı akışlı bir dikey borudaki CHF deney verileri kullanılmıştır. Bu verilerin doğrulama için seçilmesinin nedeni deney koşullarının ve ölçülen CHF değerlerinin açıkça tanımlanmış olmasıdır. HAD simülasyonu için akış geometrisi 7.7 mm iç çapında ve 475 mm uzunluğunda bir boru olarak oluşturulmuştur. Boru, akışın yönü yukarı doğru olacak şekilde dikey yönlendirilmiştir. Isı akısı boru duvarına uygulanmaktadır (Şekil 1). Simülasyon süresinden tasarruf etmek için HAD alanı iki boyutlu eksen simetrik sınır koşulları uygulanarak modellenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. (a) Akış geometrisi ve HAD alanı.

Sırasıyla 7815, 14060 ve 26570 hücre sayısı içeren ağlarda ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır. Şekil 2’de sonuçların benzer olduğu görülmektedir. Ancak ağın genişlik/uzunluk oranı 1’den farklılaştıkça sayısal yöntemin yakınsaması zorlaştığından bu çalışmada 7815 hücre sayısı kullanılmıştır. Duvara bitişik olan hücre kalınlığı, her duvara bitişik hücrenin merkezi log-law tabakasında, $30 < Y^+ < 300$, olacak sekildedir.



Şekil 2. Ağ yapısından bağımsızlık çalışması.

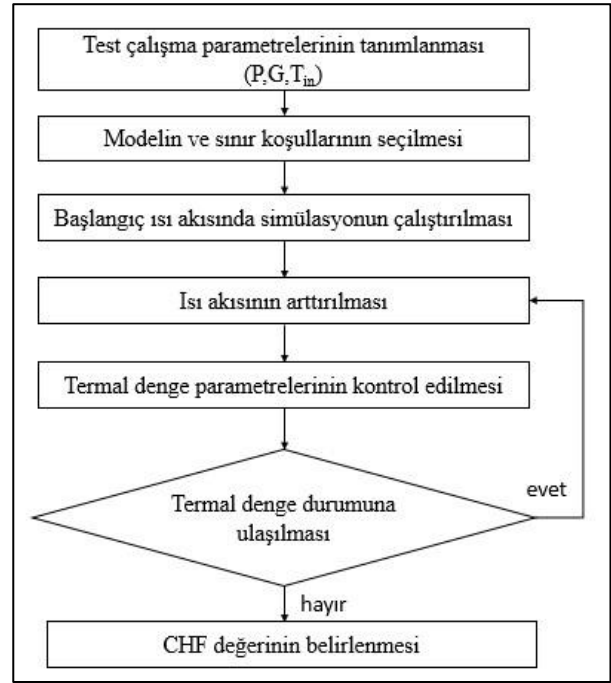
2.2.2 Sayısal Yöntem

Sabit basınçta ($P=13.8$ MPa) farklı çalışma koşullarında CHF değerleri hesaplanmıştır. Uygulanan modeli doğrulamak için üç grup test koşulu seçilmiştir (Çizelge 1). Her grup sabit kütle akısında ($G=940, 1670$ ve 2650 kg/m^2s) değişen giriş sıcaklığına sahiptir ($\Delta T_{sub}=T_{sat}-T_{in}=20,30,40,50,60,70,80,90,100$ K).

Çizelge 1. Başlangıç ve sınır koşulları

Konum	Parametre	Değer
Giriş	Kütle akısı (kg/m^2s)	940, 1670, 2650
	Sıcaklık (K)	508.68 - 588.68
	Doyma sıcaklığı (K)	608.68 K
Çıkış	Basınç (MPa)	13.8

Uygulanan HAD simülasyonu belirli bir ısı akısında kararlı termal denge durumu hesaplamasından oluşur (Şekil 3).



Şekil 3. HAD simülasyonu ile CHF belirlenmesi.

Her bir test için, giriş sınır koşulu sabit sıcaklıkta tam gelişmiş bir boru akışı olarak tanımlanmıştır. Giriş hızı sabit bir sıcaklığa sahip tam gelişmiş akış hızı profili olarak tanımlanmıştır. Tam gelişmiş giriş hızı dağılımı aşağıdaki denklemden hesaplanmıştır (Kim *et al.* 2016).

$$v(x, y) = \frac{8G}{7\rho_l} \left(\frac{r - \sqrt{x^2 + y^2}}{r} \right)^{1/7} \quad (28)$$

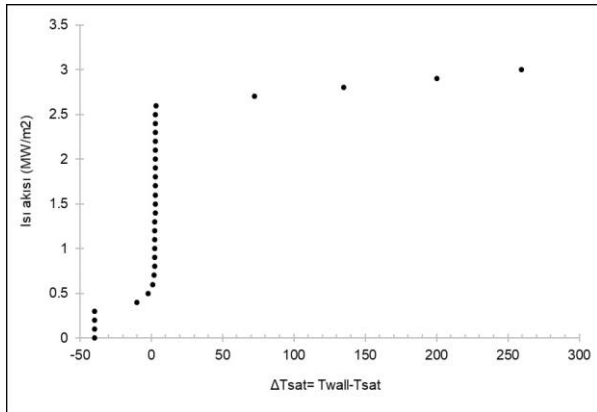
Denklemden G kütle akısı (kg/m^2s), ρ_l sıvı yoğunluğu (kg/m^3) ve r borunun iç yarıçapıdır (m). Böylece denklem kullanılarak, kütle akısı, sıvının yoğunluğu veya boru yarıçapı değiştirilerek istenen giriş akış koşulu sağlanabilir. Çıkış ise basınç durumuna ayarlanmıştır. Akış yönünde eşit ısı akısı duvar yüzeyi boyunca uygulanmıştır. Uygulanan ısı akısı 0.1 MW/m^2 aralıklarla DNB tetiklenene kadar arttırılmıştır. Duvar sıcaklığının ani bir artış gösterdiği ısı akısı değeri kritik ısı akısı olarak belirlenmiştir.

3. Bulgular

Örnek test ($P=13.8$ MPa, $G=1670$ kg/m²s, $T_{in}=558.68$ K, $\Delta T_{sub}=50$ K) için HAD yazılımı ile elde edilen sonuçlar ve değerlendirme verilmiştir. Diğer testler için de aynı yöntem uygulanmıştır.

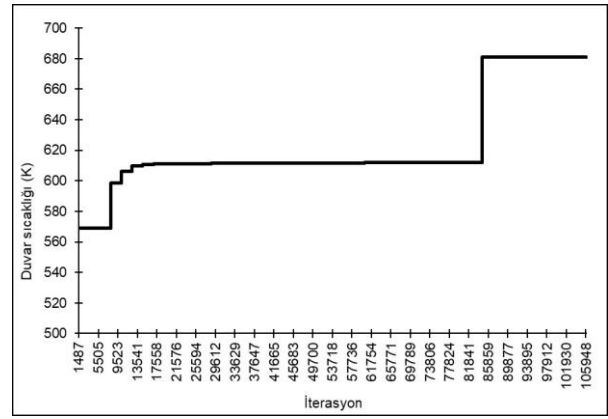
Uygulanan ısı akısına göre duvarın sıcaklığındaki ($\Delta T_{sat}=T_w-T_{sat}$) değişimi veren kaynama eğrisi Şekil 4'te verilmiştir. Başlangıçta ısı akısı arttırıldıkça duvar sıcaklığında az bir artış olduğu gözlenmiştir. 2.6 MW/m²'den büyük ısı akılarında duvar sıcaklığında ani ve hızlı bir artış gözlenmiştir. Böylece kritik ısı akısı 2.6 MW/m² olarak belirlenmiştir.

HAD simülasyonunda duvar sıcaklığının davranışı ısı transferinin üç modunu temsil etmektedir: tek fazlı ısı transferi, çekirdekli kaynamalı ısı transferi ve çekirdekli kaynamadan ayrılma. Düşük ısı akılarında (CHF'sinin %25'inden düşük değerlerde, ≈ 0.6 MW/m²), ısı transferi tek fazlı ısı transferidir. Bu bölgede, çekirdek kaynaması henüz tetiklenmediğinden ısı transferi katsayısı nispeten düşüktür. Isı akısı arttıkça, $\Delta T_{sat} \approx 2$ K'e yakın olduğu bölgede ısı transferi modu çekirdekli kaynamaya geçer. Daha sonra kaynama ısı transferinin hafifçe azaldığı ve nihayet çekirdekle kaynamadan ayrılmanın belirlendiği bölge gözlemlenir (Isı akısı > 2.6 MW/m²). Bu bölgede simülasyonda duvar sıcaklığında ani bir artış gözlemlenir.



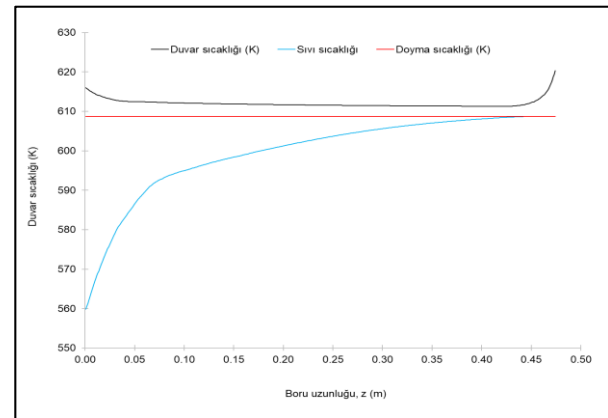
Şekil 4. Uygulanan ısı akısına göre duvarın sıcaklığındaki değişim.

Simülasyondaki iterasyon sayısına bağlı olarak duvar sıcaklığındaki değişim Şekil 5'te verilmiştir. Kritik ısı akısı değerine ulaşıldıktan sonra, ısı akısı arttırıldığında HAD simülasyonu kararsız hale gelmiştir ve duvar sıcaklığı ani bir şekilde artmıştır.

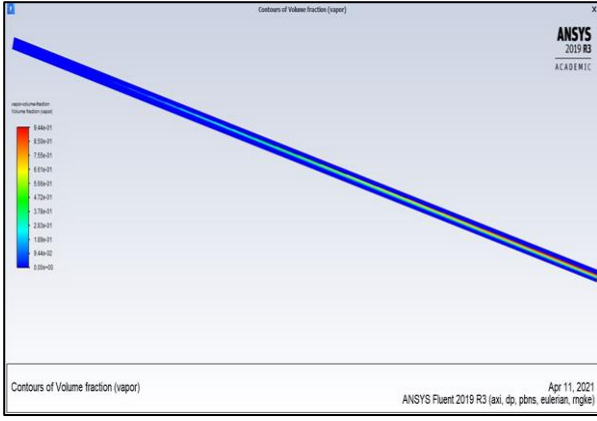


Şekil 5. İterasyon sayısına bağlı olarak duvar sıcaklığındaki değişim.

Boru uzunluğu boyunca sıcaklık değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Isıtılan uzunluk boyunca başlangıçta duvar sıcaklığı doyma sıcaklığından fazla olsa da sıvı hala aşırı soğutulmuş sıvıdır. Duvara bitişik hücredeki sıvının sıcaklığı $z \approx 0.40$ m'de doyma sıcaklığına ($T_{sat}=608.68$ K), erişir ancak boru merkezindeki sıvı hala aşırı soğutulmuş sıvıdır (Şekil 7). Isıtılan boru uzunluğun sonuna doğru ($z \approx 0.42$ m), buhar hacim oranı kritik değeri (0.90) aşar, duvar sıcaklığı aniden yükselir, buhar kızgın buhar olur. Duvar sıcaklığındaki ani artış, buhar hacim oranı ile doğrudan bağlantılıdır.

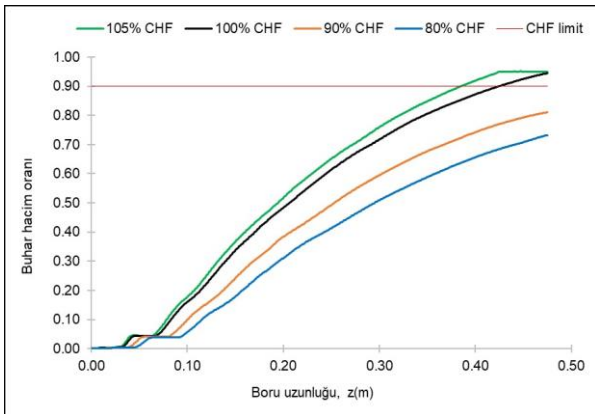


Şekil 6. Boru uzunluğu boyunca hesaplanan sıvı ve duvar sıcaklığı.



Şekil 7. CHF değerinde buhar kesri dağılımı

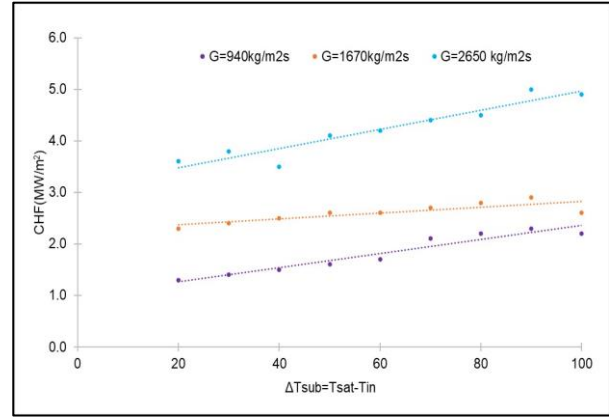
Uygulanan farklı ısı akılarında buhar hacim oranının boru uzunluğu boyunca değişimi Şekil 8'de verilmiştir. %100 CHF için hesaplanan kritik ısı akısını ($CHF=2.6 \text{ MW/m}^2$), %105 CHF ısı akısının $1.05 \times CHF$ olduğu değeri, %90 CHF ısı akısının $0.9 \times CHF$ olduğu değeri ve %80 CHF ısı akısının $0.8 \times CHF$ olduğu değeri göstermektedir. Hesaplanan buhar hacim oranının uygulanan ısı akısına bağlı olduğu ve CHF tahmini için bir parametre olarak kullanılabilceği görülmektedir (Vyskocil and Macek 2012). Hesaplanan buhar hacim oranı kritik değeri (0.90), %100 CHF değerinde $z \approx 0.43 \text{ m}$ 'de, %105 CHF değerinde $z \approx 0.40 \text{ m}$ 'de aşmaktadır. Uygulanan ısı akısı $\leq 90\%$ CHF olduğunda ise hesaplanan buhar hacim oranı kritik değerin (0.90) altında kalmaktadır.



Şekil 8. Farklı ısı akıları için ısıtılmış duvar boyunca buhar hacim oranı.

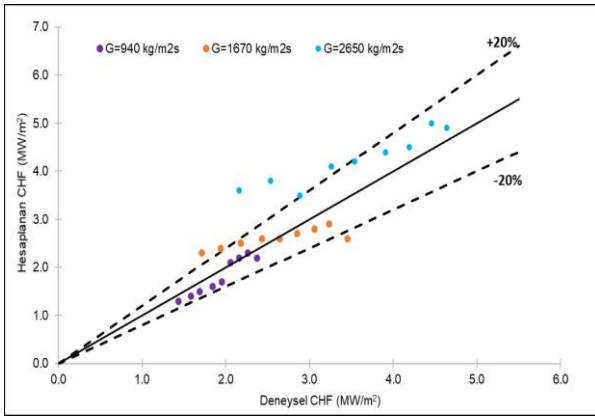
CHF tahmininin duvara yakın bölgede buhar hacim oranı ile ilgili olduğuna dikkat edilmelidir. Duvara yakın bölgede hesaplanan buhar hacim oranını etkileyen kaldırma kuvveti ve türbülanslı dağılım kuvveti gibi sayısal modeller değiştirilirse buhar hacim oranı değerleri farklı olabilir.

Sabit basınçta farklı kütle akısı ve giriş sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilen 27 test için kütle akısına ve suyun boruya giriş sıcaklığındaki değişime bağlı olarak hesaplanan CHF değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre, belirli bir kütle akısı değerinde suyun giriş sıcaklığı arttıkça CHF değeri azalır. Belirli bir giriş sıcaklığı değerinde ise artan kütle akısı ile CHF değerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Kütle akısına ve giriş sıcaklığına bağlı olarak CHF değişimi.

HAD simülasyonundan elde edilen sonuçlar Waterhead (1963) tarafından yayınlanan yukarı akışlı bir dikey borudaki CHF deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan CHF değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir. Düşük kütle akısında ($G=940 \text{ kg/m}^2\text{s}$) hesaplanan CHF değerleri deneysel değerler ile uyumludur ve %20'den daha az bir sapma ile belirlenmiştir. $G=1670 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de $\Delta T_{sub}=20 \text{ K}$ ve 30 K 'de hesaplanan ve deneysel CHF arasında sapma %20'den daha yüksektir. $G=2650 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'de $\Delta T_{sub}=20 \text{ K}$, 30 K ve 50 K 'de hesaplanan ve deneysel CHF arasında sapma %20'den daha yüksektir. CHF değerleri ile deneysel değerler karşılaştırıldığında ortalama %16'lık bir sapma hesaplanmıştır. Aşırı soğutulmuş akış koşullarında, karmaşık duvar kaynama olgusu dikkate alındığında genellikle yaklaşık %50 sapma ile elde edilen sonuçlar kabul edilir (Kim *et al.* 2016).



Şekil 10. Hesaplanan CHF değerlerinin deneysel değerler ile karşılaştırılması.

Hesaplanan CHF'sı deneysel değerden daha yüksek olması, hesaplanan buhar hacim oranının daha küçük olduğunu veya kritik buhar hacim oranının gerçek değerden daha yüksek olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, RPI duvar kaynama modeline dayalı CHF modelinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu, dikey bir boruda aşırı soğutulmuş akışta çekirdekli kaynamadan ayrılmayı incelemek ve kritik ısı akısını hesaplamak için ANSYS Fluent 2019 R3 yazılımı ile uygulanmıştır. Gerçekleştirilen 27 test için hesaplanan sonuçlar, mevcut çalışmada kullanılan modelin belirtilen çalışma koşullarında CHF'ni tahmin etmeye uygun olduğunu göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Homojen ısıtılan borular için, kaynama eğrisi yöntemi ve buhar hacim oranı hesabı kritik ısı akısını tahmin etmek için kullanılabilir.
- Duvar sıcaklığındaki artış, kritik buhar hacim oranından daha yüksek olan duvara yakın bölgedeki buhar hacim oranı tarafından tetiklenir.
- CHF değeri, sabit kütle akısında azalan giriş sıcaklığı ve sabit giriş sıcaklığında artan kütle akısı ile artmıştır.
- CHF tahmini doğruluğu çalışma koşullarından etkilenir.
- Uygulanan modelin düşük kütle akısında ve düşük giriş sıcaklıklarında yüksek doğrulukla CHF tahmini yaptığı gösterilmiştir.

- Yüksek kütle akılarında giriş sıcaklığı doyma sıcaklığını yaklaştıkça hesaplanan ve deneysel CHF arasındaki sapmanın arttığı gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Bilgi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri birimi (BAP) tarafından 2019.01.010 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Doç. Dr. Elif Aslı Yetkin'e çalışmadaki katkılarından dolayı teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

- Azhar, M., 2019. Numerical Study of Nucleate Boiling Flows Using ANSYS Fluent. Proceedings of the 4th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer. Paper No ICMFHT 114.
- Bartolemei, G.G. and Chanturiya, V.M., 1967. Experimental study of true void fraction when boiling subcooled water in vertical tubes. *Thermal Engineering*, **14**, 123-128.
- Bartolemei, G.G. and Gorburov, V.I., 1969. Experimental study of vapour phase condensation in liquid subcooled below saturation temperature. *Heat Production*, **12**, 58-62.
- Becker, K.M., Ling, C.H., Hedberg S. and Strand G., 1983. An experimental investigation of post dryout heat transfer. KTH-NEL-33.
- Burns, A. D., Frank, T., Hamill, I. and Shi, J. M., 2004. The Favre averaged drag model for turbulent dispersion in Eulerian multi-phase flows. 5th International Conference on Multiphase Flow. Paper No 392.
- Celata, G. P., Cumo, M. and Mariani, A., 1993. Burnout in highly subcooled water flow boiling in small diameter tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **36(5)**, 1269–1285.
- Chen, Y., 2012. An Overview of Heat Transfer Phenomena. Kazi, S.N., InTechOpen, 193-218.
- Cole, R., 1960. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux. *AIChE Journal*, **6(4)**, 533–538.

- Del Valle, V. H. and Kenning, D. B. R., 1985. Subcooled flow boiling at high heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **28**, 1907–1920.
- Dong, X., Zhang, Z., Liu, D., Tian, Z. and Chen, G., 2018. Numerical Investigation of the Effect of Grids and Turbulence Models on Critical Heat Flux in a Vertical Pipe. *Frontiers in Energy Research*, **6(58)**, 1-11.
- Filho, F. A. B., Ribeiro, G. B. and Caldeira A. D., 2015. A verification and validation of the new implementation of subcooled flow boiling in a CFD code. International Nuclear Atlantic Conference.
- Guerrero, E., Muñoz, F. and Ratkovich, N. (2017). Comparison between Eulerian and VOF models for two-phase flow assessment in vertical pipes. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, **7(1)**, 73 - 84.
- Ishii, M., 1987. Two-fluid model for two phase flow. International Workshop on Two-phase Flow Fundamentals.
- Kim, S. J., Rao, D. V., Okhuysen, B., Johns, R. and Baglietto, E., 2016. A CFD simulation effort on the Departure from Nucleate Boiling (DNB) in sub-cooled flow. OECD/NEA & IAEA Workshop on Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety.
- Kim, S. J., 2018. A status review on DNB prediction using CASL baseline boiling model and possible suggestions regarding wall boiling closures. United States.
- Kurul, N. and Podowski, M. Z., 1991. On the modeling of multidimensional effects in boiling channels. Proceedings of the 27th National Heat Transfer Conference.
- Lavieville, J., Quemerais, E., Mimouni, S., Boucker, M. and Mechtoua, N., 2006. NEPTUNE CFD V1.0 Theory Manual, EDF.
- Lemmert, M. and Chawla, L. M., 1977. Heat Transfer Boiling. Hahne, E. and Grigull, U., Academic Press.
- Moraga, F. J., Bonetto, F. J. and Lahey, R. T., 1999. Lateral forces on spheres in turbulent uniform shear flow. *International Journal of Multiphase Flow*, **25(6-7)**, 1321–1372.
- Pope, S. B., 2000. Turbulent Flows. Cambridge: Cambridge University Press. 802.
- Ranz, W. E. and Marshall, W. R., 1952. Evaporation from drops. *Chemical Engineering Progress*, **48**, 141–146.
- Tentner, A., Lo, S., Loilev, A., Melnikov, V., Samigulin, M., Ustinenko, V. and Kozlov, V., 2006. Advances in computational fluid dynamics modeling of two-phase flow in a boiling water reactor fuel assembly. Proceedings of International Conference on Nuclear Engineering.
- Tolubinski, V. I. and Kostanchuk, D. M., 1970. Vapor bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling. Proceedings of the 4th International Heat Transfer Conference.
- Tong, L. S., 1967. Prediction of departure from nucleate boiling for an axially non-uniform heat flux distribution. *Journal of Nuclear Energy*, **21(3)**, 241–248.
- Tong, L. S. and Tang, Y.S., 1997. Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow, Second Edition. Hewitt, G.F. and Tien, C.L., Taylor and Francis, 1-5.
- Vyskocil, L. and Macek, J., 2012. CFD simulation of critical heat flux in a tube. Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Applications - Workshop Proceedings.
- Vyskocil, L. and Macek, J., 2015. CFD simulation of the departure from nucleate boiling. International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, 3915–3927.
- Waterhead, R. J., 1963. Nucleate Boiling Characteristics and the Critical Heat Flux Occurrence in Subcooled Axial-Flow Water Systems. United States.
- Weisman, J. And Pei, B. S., 1983. Prediction of Critical Heat Flux in Flow Boiling at Low Qualities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **26(10)**, 1463–1477.
- Yakhot, V. and Orszag, S. A., 1986. Renormalization group analysis of turbulence I Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, **1(1)**, 3–51.

İnternet kaynakları

- 1-
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th.html, (14.03.2022).