



Overview of the literature on condensation

Kemal Bilen^{1*}, İsmail Erdoğan², A. Feridun Özgüç³

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye

²Turkish Aerospace Industries (TAI), 06980, Kahramankazan, Ankara, Türkiye

³Faculty of Mechanical Engineering, İstanbul Technical University, Gümüşsuyu, 34437, Beyoğlu, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Condensation of various fluids inside and outside of different bodies was examined
- A total of 134 studies were examined
- A table containing detailed information about reviewed studies was prepared

Keywords:

- Condensation
- Condensation of various fluids
- Condensation in various geometries
- Vertical plate
- Nusselt number

Article Info:

Review Article

Received: 25.08.2023

Accepted: 19.03.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1349776

Correspondence:

Author: Kemal Bilen

e-mail:

kemal.bilen@aybu.edu.tr

phone: +90 532 608 9092

Graphical/Tabular Abstract

The fact that more heat transfer occurs in heating and cooling systems where phase change takes place has led researchers to study in this field. Technological developments have caused to the necessity for phase change to occur in many geometries from plain surfaces to curved surfaces, from wide channels to micro-channels. Therefore, within the scope of this review, studies on condensation, which is frequently encountered in various geometries in the practice, have been comprehensively examined. For this purpose, several sources are examined within the study and numbers and percentages of these studies briefed in Table 1 in view of the used fluid are shown in Figure A.

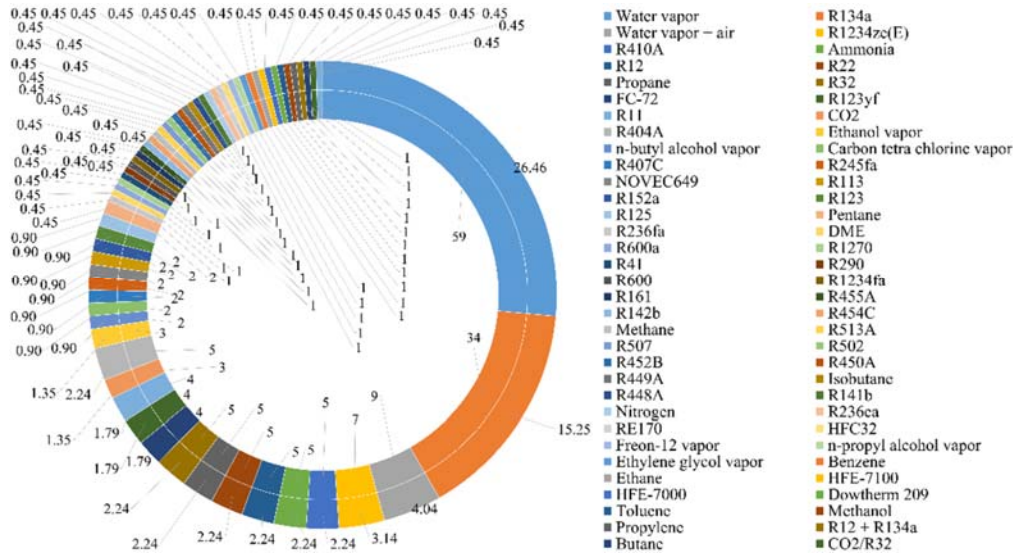


Figure A. Numbers and percentages of the previous studies briefed in Table 1 with respect to the used fluid.

Purpose: To comprehensively review condensation of various fluids inside and outside of different geometries.

Theory and Methods: For statistical analyzing, a Table 1 is prepared including type of studies, kind of used model/geometry, used fluid, kind of flow, and strong aspects of the studies. In addition to the statistical analysis, the correlations developed for Nusselt number or heat transfer coefficient in the reviewed studies are given in Table 2 in the order of Table 1.

Results: In this study, in which both theoretical and experimental researches are examined, a total of 134 sources, including 3 books, 1 technical note, 11 review studies, and 119 research articles, are reviewed. Among these sources, there is a wide range of studies from Nusselt's pioneering article on the condensation published in 1916 to basic studies examining the condensation mechanism. All cases in these studies are statistically analyzed with the help of a table, then various graphs are formed and interpreted. In addition, a total of 28 correlations developed for Nusselt number or heat transfer coefficient in the reviewed studies covering the period between 1959 and 2023 are tabulated with their limitations.

Conclusion: All cases in the reviewed studies are statistically analyzed with the help of Table 1 formed in this review study. Then various graphs are formed by the help of this table and these graphs are interpreted. In addition, a total of 28 correlations developed for Nusselt number or heat transfer coefficient in the reviewed studies covering the period between 1959 and 2023 are summarized in Table 2 with their limitations. These tables are taught to be useful for researchers working in the general condensation field.



Yoğuşma konusundaki literatüre genel bakış

Kemal Bilen^{1*}, İsmail Erdoğan², A. Feridun Özgüç³

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06010, Keçiören, Ankara, Türkiye

²Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ), 06980, Kahramankazan, Ankara, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Gümüşsuyu, 34437, BeYOğlu, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Çeşitli akışkanların, farklı geometrilerin içinde ve dışında yoğuşması incelenmiştir
- Toplam 134 adet çalışma incelenmiştir
- İncelenen çalışmalarla ilgili detaylı bilgiler içeren bir tablo hazırlanmıştır

Makale Bilgileri

Derleme Makaleleri

Geliş: 25.08.2023

Kabul: 19.03.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1349776

Anahtar Kelimeler:

Yoğuşma,
Çeşitli akışkanların
yoğuşması,
çeşitli geometrilerde
yoğuşma,
düşey levha,
Nusselt sayısı

ÖZ

Faz değişiminin gerçekleştiği ısıtma ve soğutma sistemlerinde daha fazla ısı geçişinin meydana gelmesi, araştırmacıları bu alanda çalışmaya yönlendirmiştir. Teknolojik gelişmeler ise faz değişiminin; düzlemsel yüzeylerden eğrisel yüzeylere, geniş kanallardan mikro kanallara kadar birçok geometride meydana gelmesi zorunluluğuna yol açmıştır. Bu nedenle bu literatür araştırması kapsamında; pratikte, çeşitli geometrilerde sıklıkla karşılaşılan yoğuşma üzerine yapılan çalışmalar, kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Hem teorik hem de deneysel araştırmaların incelendiği bu çalışmada; 3 kitap, 1 teknik not, 11 literatür araştırma makalesi ve 119 araştırma makalesi olmak üzere toplam 134 adet kaynak gözden geçirilmiştir. İncelenen kaynaklar arasında, Nusselt'in 1916 yılında yayımladığı yoğuşma alanındaki öncü makalesinden yoğuşmanın mekanizmasının incelendiği temel çalışmalara kadar geniş bir yelpazede yer alan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardaki; düzlemsel bir yüzey üzerindeki yoğuşmadan bir kürenin yüzeyindeki yoğuşmaya, dış akışta yoğuşmadan iç akışta yoğuşmaya, su buharının tek başına yoğuşmasından kolayca yoğuşmayan bir gazın varlığında gerçekleşen yoğuşmaya kadar tüm durumlar, oluşturulan bir tablo yardımıyla istatistiksel olarak analiz edilmiş, çeşitli grafikler oluşturulmuş ve yorumlanmıştır. Ayrıca, gözden geçirilen ve 1959 ila 2023 tarih aralığını kapsayan çalışmalarda Nusselt sayısı veya ısı taşınım katsayısı için geliştirilmiş toplam 28 adet korelasyon, bu alanda çalışan araştırmacılara yararlı olacağı düşüncesiyle kısıtlamalarıyla birlikte tablo halinde verilmiştir.

Overview of the literature on condensation

HIGHLIGHTS

- Condensation of various fluids inside and outside of different bodies was examined
- A total of 134 studies were examined
- A table containing detailed information about reviewed studies was prepared

Article Info

Review Article

Received: 25.08.2023

Accepted: 19.03.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1349776

Keywords:

Condensation,
condensation of various
fluids,
condensation in various
geometries,
vertical plate,
Nusselt number

ABSTRACT

The fact that more heat transfer occurs in heating and cooling systems where phase change takes place has led researchers to study in this field. Technological developments have caused to the necessity for phase change to occur in many geometries from plane surfaces to curved surfaces, from wide channels to micro-channels. Therefore, within the scope of this review, studies on condensation, which is frequently encountered in various geometries in the practice, have been comprehensively studied. In this study, in which both theoretical and experimental researches were examined, a total of 134 sources, including 3 books, 1 technical note, 11 review studies, and 119 research articles, are reviewed. Among the sources examined, there are studies placed in a wide range of from Nusselt's pioneering article on the condensation published in 1916 to fundamental studies examining the condensation mechanism. All cases in these studies, from condensation on a plane surface to condensation on a sphere surface, from condensation in external flow to condensation in internal flow, from condensation of steam alone to condensation in the presence of a non-condensable gas, are statistically analyzed with the help of a table, then various graphs are formed and interpreted. In addition, a total of 28 correlations developed for Nusselt number or heat transfer coefficient in the reviewed studies covering the period between 1959 and 2023 are tabulated with their limitations in order to be useful for researchers studying in this field.

1. Giriş (Introduction)

Herhangi bir ısıtma veya soğutma sisteminde, faz değişimi olması halinde, faz değişimi olmaması haline göre daha fazla ısı geçişinin gerçekleşmesi, araştırmacıları faz değişimi alanında çalışma yapmaya sevk etmiştir. Teknolojik gelişmeler ise faz değişiminin; düzlem yüzeylerden eğrisel yüzeylere, geniş kanallardan mikro kanallara kadar birçok geometride meydana gelmesi zorunluluğuna yol açmıştır. Bu nedenle bu çalışmada; çeşitli akışkanların farklı geometrilerde yoğunlaşmasını konu alan bazı kitaplar, teknik not, literatür araştırma makaleleri ve araştırma makaleleri gözden geçirilmiştir.

Endüstriyel sistemlerde buhar, yoğunlaşma sıcaklığının altındaki bir yüzey ile temas ettiğinde buharın bıraktığı gizli ısı söz konusu yüzeye geçer ve buhar sıvı fazına geçerek yoğunlaşma gerçekleşir. Bu yoğunlaşma olayı, yüzeyin yapısına bağlı olarak iki ayrı türde gerçekleşir. Bunlardan birincisi, tüm yüzeyin bir sıvı filmi ile kaplandığı ve bu sıvı filminin yerçekimi etkisi altında aktığı film tipi yoğunlaşmadır. Bu yoğunlaşma türünden farklı olarak, ıslanmayı engelleyecek yapıya sahip bir yüzey söz konusu ise bu durumda ikinci bir yoğunlaşma türü olan damlacıklı yoğunlaşma meydana gelecektir. Bu nedenle, yoğunlaşma türüne bağlı olarak yoğunlaşma halinde ısı geçiş mekanizmasının bilinmesi pratikteki birçok uygulama açısından oldukça önemlidir. Bu hususlar göz önünde tutularak bu literatür araştırması çalışması kapsamında; bir faz değişimi olan ve ısı sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan yoğunlaşmayı konu alan çalışmalar detaylıca incelenmiştir.

Bu literatür araştırma çalışması kapsamında; Nusselt'in yoğunlaşma ile ilgili 1916 yılında yapmış olduğu öncü çalışmadan [1], günümüze kadar yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve yoğunlaşma üzerine yapılan çalışmaların zaman içerisinde gelişimi sistematik bir şekilde sunulmaya çalışılmıştır. Konu ile ilgili olarak; düşey düzlemsel bir levha üzerinde durgun ve saf bir buharın laminar film yoğunlaşmasından, çok-girişli kanallarda yoğunlaşmaya; geçici rejimde gerçekleşen yoğunlaşmadan, yoğunlaşma esnasında akış görselleştirmeye kadar geniş bir yayın yelpazesi gözden geçirilerek bilgi sunulmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada yer alan kanallar, özellikle çok-girişli kanallar, boyutları itibarıyla literatürde çeşitli şekillerde adlandırılmaktadır. Ancak, mikro kanal terminolojisi açısından, araştırmacılar arasında bir uzlaşmaya doğru gidilmektedir. Buna göre, literatürde kabul görmeye en yakın olan sınıflandırma şu şekilde verilmektedir [2]: a) Mikro-ölçekli kanallar: 0,001-0,1 mm, b) Mezo-ölçekli kanallar: 0,1 mm-1 mm, c) Makro-ölçekli kanallar: 1 mm-6 mm ve d) Geniş kanallar: > 6 mm. Literatürde makro-ölçekli kanallar, mini kanallar olarak da adlandırılır ve bu boyutlardaki kanallar, pratikte kompakt ısı değiştiricileri yapımında kullanılır. Yine pratikte; iç çapı 3,3 mm, dış çapı 4,7 mm olan çelik silindirik kanalların dış yüzeyi ince bir bakır filmi ile kaplanarak elde edilen kaplamalı silindirik kanallar, klasik soğutma sistemlerinde yoğunlaştırıcı kanalları olarak yaygın bir şekilde kullanılır ve bu silindirik kanallar pratikte bundy boru olarak adlandırılır.

Bu literatür araştırma çalışması, Bilen [3] tarafından hazırlanan doktora tezi esas alınarak hazırlanmıştır. Buna göre; tezdeki literatür araştırması kısmına, yoğunlaşma alanında 2007 yılından sonra yayımlanan araştırma ve literatür inceleme çalışmaları dahil edilmiştir.

Yoğunlaşma üzerine çok sayıda araştırma makalesi yayımlanmıştır. Bu araştırma çalışmalarından bahsetmeden önce, yoğunlaşma ile ilgili bazı literatür araştırma çalışmaları özetlenmiştir. Buna göre; Cavallini vd. [4] tarafından yapılan ve 1916-2002 tarih aralığını kapsayan ve 97 kaynak içeren inceleme çalışmasında, pürüzsüz veya kanatlı silindirik

kanal veya silindir demetlerinin içinde veya dışında çeşitli soğutucu akışkanların laminar veya türbülanslı yoğunlaşması incelenmiştir. Awad vd. [5] tarafından yapılan ve 1916-2014 tarih aralığını kapsayan ve 119 kaynak içeren inceleme çalışmasında, mikro ve mini kanallarda akış halindeki yoğunlaşmada ısı geçişi araştırılmıştır. Kim ve Mudawar [6] tarafından yapılan ve yine 1916-2014 tarih aralığını kapsayan 135 kaynak içeren inceleme çalışmasında ise mini ve mikro kanallarda akış halindeki yoğunlaşma ve kaynamada basınç düşüşü araştırılmıştır. Diğer taraftan, yine Kim ve Mudawar [7] tarafından yapılan ve 1916-2014 tarih aralığını kapsayan 161 kaynak içeren diğer bir inceleme çalışmasında, mini ve mikro kanallarda akış halindeki yoğunlaşma ve kaynamada ısı geçişi araştırılmıştır. Yun ve Jeong [8], mini ve mikro kanallarda iki fazlı akış halindeki basınç düşüşü üzerine, 1916-2016 tarih aralığını kapsayan 74 kaynak içeren bir inceleme çalışması yapmışlardır. Kharangate ve Mudawar [9], 1916-2017 tarih aralığını kapsayan 250 kaynak içeren inceleme çalışmasında, kaynama ve yoğunlaşma ile ilgili nümerik çalışmaları gözden geçirmişlerdir. Rifert vd. [10], 1916-2019 tarih aralığını kapsayan 104 kaynak içeren inceleme çalışmasında, pürüzsüz yatay ve düşey düzlemsel kanallarda akış halindeki film yoğunlaşmasında ısı geçişini konu alan deneysel çalışmaları sunmuşlardır. El-Fil vd. [11], damlacıklı yoğunlaşmanın teori, modelleme, deneyler ve uygulamalar ile gözden geçirildiği ve 1916-2020 tarih aralığını kapsayan 206 kaynak içeren bir inceleme çalışması sunmuşlardır. Keniar vd. [12], 1916-2020 tarih aralığını kapsayan 112 kaynak içeren, mikro kanallarda akış halindeki yoğunlaşmanın analitik ve sayısal modellerinin eleştirel bir incelemesini sunmuşlardır. El-Kadi vd. [13], mini ve mikro kanallarda akış halindeki yoğunlaşmada ısı geçişi alanındaki son gelişmeleri içeren ve 1916-2021 tarih aralığını kapsayan 161 kaynak içeren bir inceleme çalışması sunmuşlardır. Son olarak; Dorao ve Fernandino [14], pürüzsüz yatay silindirik kanallarda tek ve iki bileşenli akış yoğunlaşması arasındaki ısı taşınım katsayısı benzerliği üzerine 1916-2022 tarih aralığını kapsayan 42 kaynak içeren bir inceleme çalışması sunmuşlardır.

Literatürde yer alan ve yukarıda özetlenen inceleme çalışmaları göz önüne alındığında bu çalışma, şu yönleriyle öne çıkmaktadır. İncelenen çalışmaların sayısı, temel çalışma olup olmadığı, hangi geometriyi kapsadığı gibi hususlara göre sınıflandırılarak kapsamlı bir şekilde özetlenmiş olması, bu çalışmanın diğer çalışmalardan önemli bir farkı olarak gösterilebilir. Yine, incelenen çalışmaların; teorik, deneysel, hem teorik hem deneysel olması; kapsadığı geometri; çalışmada kullanılan akışkan; iç akış, dış akış, hem iç akış hem dış akışın incelenmiş olması; geometrinin düşey ya da yatay olması; laminar, türbülanslı veya laminar ve türbülanslı akışın bir arada olması gibi kriterlere göre detaylı bir istatistiksel analizinin yapılmış olması da bu çalışmanın diğer çalışmalardan önemli bir farkı olarak değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, incelenen çalışmaların bazılarında geliştirilen korelasyonların, kısıtlamalarıyla birlikte bir tablo halinde sunulmuş olması, bu çalışmanın benzer çalışmalardan diğer bir önemli farkı olarak gösterilebilir. Bu çalışmanın Türkçe oluşu da literatürden önemli bir fark olarak görülmektedir.

2. Metodoloji (Methodology)

Yoğunlaşma ile sınırlanmış bu literatür araştırmasında, literatürde yer alan yoğunlaşma ile ilgili çalışmalar değerlendirilerek kategorize edilmiştir. Literatürde yoğunlaşma ile ilgili teorik, deneysel ve hem teorik hem de deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu literatür araştırması çalışmasında aşağıdaki sıralama takip edilmiştir.

- Aynı kategorideki çalışmalar aynı paragrafta tanıtılmıştır. Yani; incelenen çalışmanın temel bir çalışma olup olmadığı, temel çalışmalarda hangi kabullerin yapıldığı, teorik veya deneysel çalışmalarda yoğunlaşmanın hangi geometride gerçekleştiği, bu

geometrinin içinde mi yoksa dışında mı gerçekleştiği gibi hususlar göz önüne alınarak incelenen çalışmalar sınıflandırılmış ve özetlenmiştir.

- Yapılan bu sınıflandırma göz önüne alınarak makalelerin özeti sıralanmış ve her bir sınıflandırmanın yer aldığı bölümün sonunda bu bölümle ilgili çeşitli yorumlar yapılmıştır.
- İncelenen literatür araştırması makaleleri ve araştırma makaleleri, yayımlanma sırasına göre Tablo 1’de ayrıca özetlenmiştir. Tüm çalışmaların tek bir tabloda özet halinde sunulmasının, bu çalışmaların karşılaştırılmasında kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.
- Tablo 1’de özetlenen çalışmalardan elde edilen veriler, ‘4.1 Gözden Geçirilen Literatürün İstatistiksel Analizi’ bölümünde grafikler halinde verilerek bu verilerin karşılaştırılması sağlanmıştır.
- İstatistiksel analize ek olarak, incelenen çalışmalarda Nusselt (Nu) sayısı ve ısı taşınım katsayısı (h) için geliştirilmiş korelasyonlar, kısıtlamalarıyla birlikte Tablo 1’deki sırasına göre Tablo 2’de verilmiştir.

İncelenen araştırma makalelerinin genel çıktıları, ‘5. Sonuçlar ve Öneriler’ bölümünde irdelenmiştir. Ayrıca, bu konuda çalışma yapacak araştırmacılar için çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

3. Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmaların Sınıflandırılması (Classification of Studies on Condensation)

Bilindiği gibi yoğuşma ile ilgili çalışmalara, Nusselt tarafından 1916 yılında yapılan teorik bir çalışma temel teşkil etmektedir [15]. Bu çalışmada; eş sıcaklıklı düşey bir düzlemsel yüzey üzerinde sabit özelliklere sahip saf bir buharın laminer film yoğuşması incelenmiştir. Bu teorik çalışmada, sıvı filmindeki aşırı soğuma ve sıvı-buhar arayüzey etkileşimi ihmal edilmiştir. Nusselt tarafından yapılan bu öncü çalışmadan günümüze kadar yoğuşma ile ilgili birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmış olup sadece buharlaşma, kaynama ve yoğuşmayı konu alan çeşitli kitaplar yazılmıştır [15-17]. Konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmaları; yoğuşma mekanizmasının incelendiği temel çalışmalar, düzlemsel yüzeylerde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, silindirik kanallarda meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düzlemsel kanallarda meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düşey kanatçıklar üzerinde oluşan yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, çok-girişli kanallarda meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar ve geçici rejimde yoğuşmanın incelendiği çalışmalar olmak üzere temelde yedi kısma ayırmak mümkündür. Buna karşılık özellikle son zamanlarda, ısıtma ve soğutma sistemlerinin küçültülmesi gereksiniminden dolayı yoğuşma konusundaki çalışmalarda çok-girişli mini kanallar üzerine odaklanılmış durumdadır.

3.1. Yoğuşma Mekanizmasının İncelendiği Temel Çalışmalar (Fundamental Studies on Condensation Mechanism)

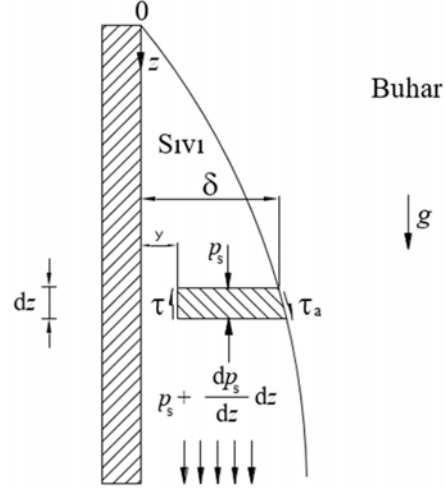
Yoğuşma mekanizmasının incelendiği çalışmalara kaynaklık eden temel çalışma, Nusselt tarafından 1916 yılında yapılmış olup bu çalışmada [1]; doyma sıcaklığındaki durgun ve saf bir buhar ortamında bulunan eş sıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde meydana gelen laminer film yoğuşması incelenmiştir. Söz konusu çalışmada kullanılan modelin şematik görünümü Şekil 1’de verilmiştir.

Nusselt tarafından yapılmış bu öncü çalışmanın en önemli çıktıları; doyma sıcaklığındaki durgun ve saf bir buhar ortamında bulunan eş sıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde meydana gelen laminer film yoğuşmasında oluşacak sıvı filminin kalınlığının ve yerel ısı taşınım katsayısının düşey koordinat boyunca değişimini veren Eş. 1 ve Eş. 2 denklemleridir.

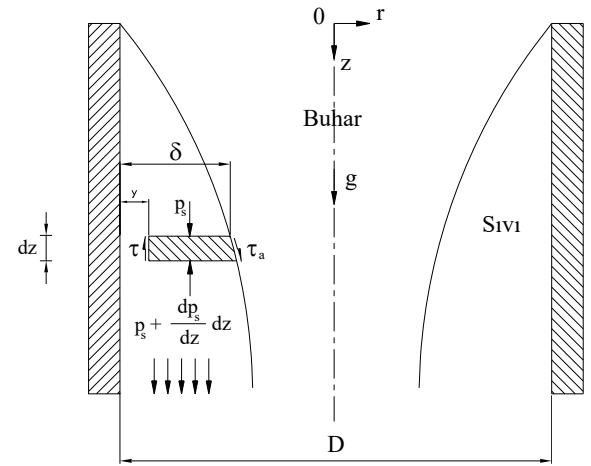
$$\delta = \left[\frac{4\mu_s k_s (T_d - T_y) x}{h_{sb} \rho_s (\rho_s - \rho_b) g} \right]^{1/4} \quad (1)$$

$$h_x = \left[\frac{h_{sb} \rho_s (\rho_s - \rho_b) g k_s^3}{4\mu_s (T_d - T_y) x} \right]^{1/4} \quad (2)$$

Nusselt’in bu öncü çalışmasının sonuçları, en başta silindirik sistemler olmak üzere birçok geometrinin dışındaki ve içindeki yoğuşma problemlerine adapte edilmiştir. Bunların en önemlileri arasında silindirik geometriler gelmektedir. Buna göre, eş sıcaklıklı silindirik bir düşey kanalın içerisinde saf bir buharın laminer film yoğuşmasının şematik gösterimi ise Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Eş sıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde saf bir buharın laminer film yoğuşmasının şematik görünümü (Schematic view of laminar film condensation of pure steam on an isothermal vertical plane surface (adapted from Bilen, 2007)) [3].



Şekil 2. Eş sıcaklıklı düşey silindirik bir kanalın iç yüzeyinde saf bir buharın laminer film yoğuşmasının şematik görünümü (Schematic view of laminar film condensation of pure steam in the inner surface of a isothermal vertical cylindrical channel) [3].

Nusselt’in yoğuşma ile ilgili bu öncü çalışmasından sonra Rohsenow [18] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, Nusselt’in çalışmasına benzer olarak yine doyma sıcaklığındaki durgun ve saf bir buhar ortamında bulunan eş sıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde meydana gelen laminer film yoğuşması incelenmiştir. Nusselt’in incelemesinden farklı olarak, oluşan sıvı filmine her aşamada T_d sıcaklığındaki akışkanın ilavesi dikkate alındığında sıvı filmi içerisinde lineer sıcaklık dağılımı yerine lineer olmayan gerçek ve

yeni bir sıcaklık dağılımı alınması gerektiği ifade edilmiştir. Söz konusu çalışmada elde edilen bu yeni sıcaklık dağılımı neticesinde, yoğuşma esnasında daha büyük bir ısı taşınım katsayısı ve dolayısıyla daha büyük bir film kalınlığının oluşacağı gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmadaki teorik inceleme neticesinde, literatürde oldukça temel bir bağıntı olarak kabul edilen ve Eş. 3 ile gösterilen bir yeni (düzeltilmiş) buharlaşma gizli ısısı yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

$$h'_{sb} = h_{sb} + 0,68c_p\Delta T \quad (3)$$

Rohsenow vd. [19] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, doyma sıcaklığındaki hareketli ve saf bir buhar ortamında bulunan eşsıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde meydana gelen laminar ve türbülanslı film yoğuşmasında, sıvı-buhar ara-yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmesinin (buhar hızının) yoğuşma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıvı filmini inceltici etkisinden dolayı ara-yüzeydeki kayma gerilmesi dikkate alındığında, daha büyük ısı taşınım katsayılarının elde edildiği gösterilmiştir.

Mills ve Seban [20] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, doyma sıcaklığındaki durgun, saf ve düşük basınçtaki su buharı ortamında bulunan eşsıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde meydana gelen laminar film yoğuşmasında, sıvı-buhar ara-yüzeyindeki ısıl direncin yoğuşma üzerindeki etkisi incelenerek bu şartlar altında yoğuşma katsayısı tespit edilmiştir. Sıvı-buhar faz değişiminin olduğu durumlarda denge halinde net yoğuşma akısı molar olarak Eş. 4 ile ifade edilir. Burada, w , net yoğuşma akısını; f , yoğuşma veya buharlaşma katsayısını; I , yağın hız (bulk velocity) düzeltme katsayısını; n , molar derişikliği ve c , ortalama moleküler hızı göstermektedir. Ayrıca, denge halinde geçerli olan bu bağıntıdaki ilk terim, buhar fazından sıvı fazına geçen moleküler akıyı gösterirken, ikinci terim sıvı fazından buhar fazına geçen moleküler akıyı göstermektedir.

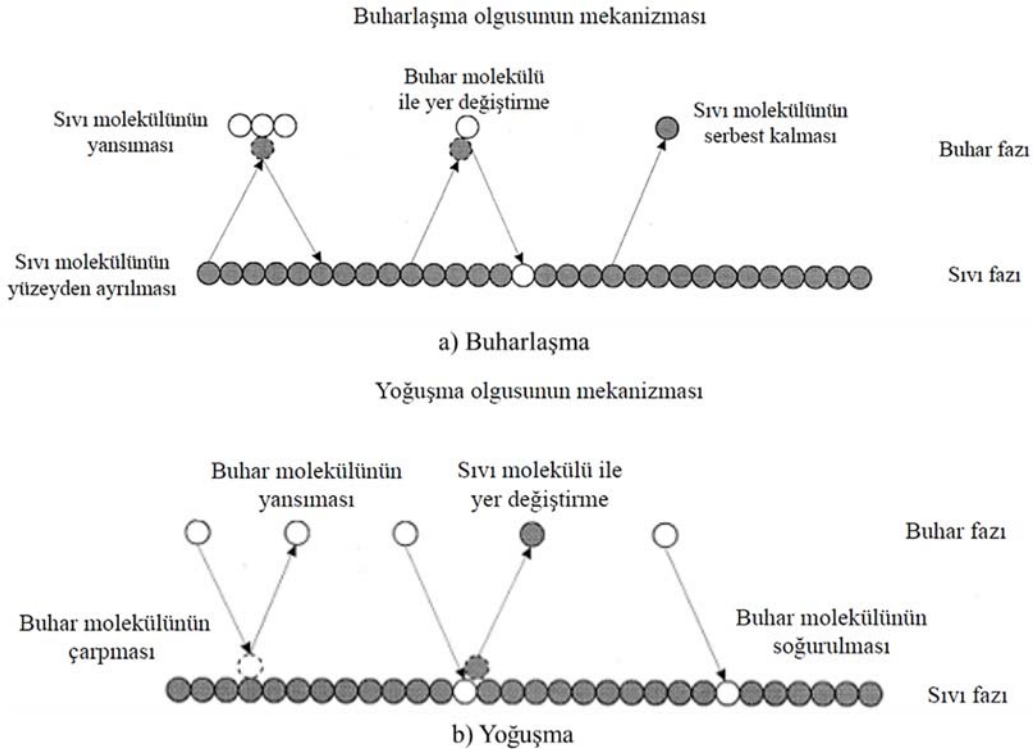
$$w = f \left(I \frac{n_b c_b}{4} - \frac{n_s c_s}{4} \right) \quad (4)$$

Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki ısıl dirençten hareketle düşük basınçlardaki su buharı için yoğuşma katsayısının (birikme katsayısı) 0,45 ila 1 arasında elde edildiği bu çalışmada, ara-yüzeydeki ısıl direncin ihmal edilebileceği ve ihmal edilmediği durumlarda Nusselt'in çözümlenmesinden önemli bir farkın oluşmayacağı gösterilmiştir.

Yine, Marek ve Straub [21] tarafından yapılan bir çalışmada ise, suyun buharlaşma ve yoğuşma katsayılarının tespiti amaçlanmıştır. Çalışmada; buharlaşma ve yoğuşma katsayılarının fiziksel tanımları, sırasıyla Eş. 5 ve Eş. 6'da verilmiştir. Bu tanımlamaların şematik gösterimi ise sırasıyla Şekil 3a ve Şekil 3b'de verilmiştir. Eş. 5 ve Eş. 6'dan görüleceği üzere; mükemmel bir buharlaşmada buharlaşma katsayısının 1, mükemmel bir yoğuşmada ise, yoğuşma katsayısının 1 olacağı açıktır. Buharlaşma esnasında buhar fazı ile etkileşen herhangi bir sıvı molekülü, ya buhar ortamından geri yansır, ya bir buhar molekülü ile yer değiştirir veya buhar fazı tarafından soğurur. Diğer taraftan, yoğuşma esnasında sıvı fazı ile etkileşen herhangi bir buhar molekülü, ya sıvı yüzeyinden geri yansır, ya bir sıvı molekülü ile yer değiştirir veya sıvı fazı tarafından soğurur. Mükemmel bir buharlaşma ve yoğuşmada hedeflenen, bu üçüncü durumlardır. Buharlaşma ve yoğuşmanın, ara-yüzeydeki moleküler mekanizmasının da incelendiği çalışmada; literatürdeki çalışmalardan hareketle, suyun yoğuşma katsayısının buharlaşma katsayısına göre genellikle daha yüksek olduğu ve her ikisinin de basınç ve sıcaklığın artması ile azaldığı ifade edilmiştir.

$$\chi_E = \frac{\text{Buhar fazına geçen molekül sayısı}}{\text{Sıvı fazından yayılan molekül sayısı}} \quad (5)$$

$$\chi_C = \frac{\text{Sıvı fazı tarafından absorbe edilen molekül sayısı}}{\text{Sıvı fazı ile etkileşen molekül sayısı}} \quad (6)$$



Şekil 3. Buharlaşma ve yoğuşmaya ilişkin tanımlamaların şematik gösterimi (Schematic view relating definitions of evaporation and condensation) [21].

Rohsenow [22] tarafından yapılan bir çalışmada; çeşitli geometrilere sahip cisimler (düşey levha, düşey silindir, yatay silindir, düşey koni, dönele yatay disk) üzerinde, taban sıcaklığı sabit düşey kap içerisinde ve yatay silindir demetleri üzerinde meydana gelen film tipi yoğunlaşma teorik olarak incelenmiş ve her bir cisme ait denklemler verilmiştir. Bu çalışmada, yaklaşık 3,2 mm ve daha küçük çaptaki düşey silindir içerisinde meydana gelen yoğunlaşmada silindirin eğrilik yarıçapının göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Churchill [23] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada, sıvı filmi içindeki aşırı soğuma ve sıvı-buhar ara yüzey etkileşimi göz önüne alınarak düşey düzlemsel yüzey ile düşey silindirik bir kanalın iç ve dış yüzeylerindeki yoğunlaşma, eğrilik yarıçapı etkisi de göz önüne alınmak suretiyle teorik olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar kapalı formda sunulmuştur. Bu çalışmada düşey bir silindirin iç yüzeyinde meydana gelen yoğunlaşmada elde edilen Nu_D sayısı Eş. 7 ile gösterilmiştir.

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = \frac{2\left(1 - \frac{2}{3}K^{1/4}\right)^{1/4}}{\left\{1 + \frac{1}{2}\left[\frac{K}{\left(1 - \frac{2}{3}K^{1/4}\right)}\right]^{1/4}\right\}K^{1/4}} \quad (7)$$

Bu bağıntıda yer alan K , Eş. 8'le belirlenir.

$$K = \frac{4k(T_d - T_y)vz}{h_{sb}g(\rho_s - \rho_b)R^4} \quad (8)$$

Eş. 7'de parantezler içerisinde yer alan ifadelerin oranı, silindirin iç eğrilik yarıçapının ısı geçişi üzerindeki azaltıcı etkisini göstermektedir. Bu oran, $Nu_D < 26$ veya $K > 35 \cdot 10^6$ için ısı geçişi üzerinde %5'den daha fazla bir azalmaya neden olmaktadır.

Sadasivan ve Lienhard [24] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, laminer film kaynamasında ve yoğunlaşmasında, buharlaşma gizli ısı üzerinde duyulur ısı geçişinden ileri gelen düzeltme yapılmış ve elde edilen sonuçların önceki çalışmalar ile tam bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısı Eş. 9'da gösterilmiştir.

$$h'_{sb} = h_{sb} + C\Delta T \quad (9)$$

Eş. 9'da yer alan ve düzeltilmiş buharlaşma gizli ısı katsayısı C için, literatürdeki çalışmalardan hareketle bir eğri uydurulmuştur. Böylece, film yoğunlaşması olması halinde buharlaşma gizli ısı için Eş. 10'un kullanılması önerilmiştir.

$$h'_{sb} = h_{sb} + \left(0,683 - \frac{0,228}{Pr}\right)c_p\Delta T \quad (10)$$

Winterton [25] tarafından yapılan teorik bir çalışmada ise, düşey bir levha üzerinde meydana gelen doğal taşınım ile ısı geçişi, boyutsal çözümlenme yoluyla incelenmiştir. Yapılan bu inceleme neticesinde, Nu , Grashof (Gr) ve Prandtl (Pr) sayılarının nasıl elde edildiği ve buradan hareketle aynı levha üzerinde meydana gelen doğal taşınım ile ısı geçişi, film kaynaması ve film yoğunlaşmasına ait Nu sayılarının, klasik inceleme ile bulunan Nu sayılarına yaklaşık eşit olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, düşey bir levha üzerinde gerçekleşen laminer film yoğunlaşmasına ilişkin elde edilen yerel Nu sayısı Eş. 11'de gösterilmiştir. Eş. 11, klasik inceleme ile elde edilen denklemden farklı olarak sadece 0,94 katsayısını içermemektedir.

$$Nu_L = \left[\frac{\rho_s g h_{sb} (\rho_s - \rho_b) L^3}{\mu k \Delta T}\right]^{1/4} \quad (11)$$

Vargas ve Bejan [26] tarafından yapılan teorik ve deneysel bir çalışmada ise; düşey bir düzlem üzerinde meydana gelen film yoğunlaşmasında, yüzey üzerindeki sıvı filminin bir mekanik aygıt

vasıtasıyla süpürülmesi durumunda ortaya çıkan optimizasyon problemi incelenmiştir. Maksimum ısı geçişinin sağlanmasının böylece maksimum yoğunlaşma elde edilmesinin amaçlandığı bu çalışmada, süpürme süresi azaldıkça elde edilen yoğunlaşma arttığı gözlemlenmiştir.

Beceren ve Kılıç [27] tarafından yapılan ve iki fazlı kapalı bir termosifonun teorik olarak incelendiği bir çalışmada; termosifonun yoğunlaşma kısmında teorik olarak gerçekleştirilecek maksimum ısı geçişinin, doyma sıcaklığı ile değişimi elde edilmiş ve elde edilen bu sonuçlar literatürdeki teorik ve deneysel sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Bu çalışma sonuçlarının, literatürdeki deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Chen vd. [28] tarafından, önceki teorik ve deneysel çalışmaların derlenerek bir simülasyon oluşturulduğu çalışmada; mikro kanallardaki yoğunlaşma ve iki fazlı akışta baskın olan kuvvetin kütleli veya kaldırma kuvvetinden ziyade yüzey gerilimi olduğu ifade edilmiştir. Literatürdeki deneysel sonuçlardan yola çıkarak, kanal çapındaki düşüşle birlikte, yoğunlaşma akış yapısında kesintili/dalgalı akış formunun baskın olduğu ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, mevcut dairesel akış yoğunlaşma modellerinin, mikro kanallardaki yoğunlaşma akışlarında gerçekte meydana gelen fiziksel mekanizmaları doğru bir şekilde temsil etmeyeceği vurgulanmış ve bunu yerine deneysel verilere dayalı yarı-teorik modellerin veya korelasyonların kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Su vd. [29] tarafından; literatürde, farklı geometrilerde çeşitli akışkanların yoğunlaşmasına ilişkin geliştirilen korelasyonların ve teorik modellerin bazı akışkanlar için karşılaştırıldığı bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, mevcut korelasyonların özellikle R134a soğutucu akışkan için oluşturulduğu belirtilmiştir. Ayrıca, oluşturulan teorik modellerin de R134a akışkanının davranışını iyi tahmin ettiği fakat amonyak (NH_3) gibi diğer akışkanlar için oldukça farklı sonuçlar verebileceği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, teorik modellerin genel geçerliliği için birçok akışkana ait veri oluşturulması ve bu verilerin doğrulanması gerektiği belirtilmiştir. Wang ve Rose [30], mini kanallarda laminer yoğunlaşma sırasında gerçekleşen ısı geçişinin teorisine bir teorik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada; yerçekimi kuvveti ve akış doğrultusundaki kesme gerilmesi ve yüzey gerilmesi nedenleriyle gerçekleşen akışa dik yöndeki basınç düşüşü de hesaba katılmıştır. Çalışmada, farklı kanal geometrileri, farklı kanal boyutları, sıvı-buhar ara-yüzey sıcaklık farkları ve kütleli akıları için nümerik çözümler elde edilmiştir. Sonuçların, literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Çalışmada geliştirilen model ile herhangi bir akışkan, geometri ve sıcaklık farkı için kanal içindeki ortalama ısı taşınım katsayısının iyi bir şekilde tahmin edilebileceği belirtilmiştir.

Yoğunlaşma mekanizmasının incelendiği temel çalışmalardan anlaşılacağı üzere bu konuda; yoğunlaşma katsayısının tespitinden sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanmaların yoğunlaşma üzerindeki etkisinin tespitine kadar detaylı çalışmalar yapılmıştır. Ancak, hem simetrik olmayan geometriler için incelemelerin hem de termodinamik özelliklerin sıcaklıkla değişiminin dikkate alındığı incelemelerin bulunmadığı görülmektedir. Yoğunlaşma alanında çalışma yapacak araştırmacıların bu hususları dikkate almaları önerilir.

3.2. Düşey Düzlemsel Yüzeylerde Gerçekleşen Yoğunlaşma Üzerine Yapılan Çalışmalar

(Studies on Condensation on Vertical Plain Surfaces)

Literatürde, düşey düzlemsel sistemlerde yoğunlaşma konusunda yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar da; eşsıcaklıklı düşey yüzeylerde meydana gelen saf buhar yoğunlaşmasının incelendiği çalışmalar, eşsıcaklıklı olmayan düşey yüzeylerde meydana gelen saf buhar yoğunlaşmasının incelendiği çalışmalar, yoğunlaşmayan bir gazın

varlığında düşey bir yüzey üzerinde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, sürekli olmayan rejimde düşey yüzeylerde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düşey düzlemsel yüzeylerde meydana gelen yoğuşmada sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanmaların incelendiği çalışmalar ve düşey düzlemsel kanatçıklar üzerinde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar olarak sınıflandırılabilir. Buna göre; durgun bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı ve düşey bir plaka üzerinde kızgın buharın yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışma, Shang ve Wang [31] tarafından yapılmıştır. Elde edilen iki boyutlu sınır tabaka denklemlerinin, klasik Falkner-Skan yöntemi yerine, boyutsuz hız bileşeni metodu ile adi diferansiyel denklemlere dönüştürüldüğü bu çalışmada, buhar ve sıvı filmi için fiziksel özelliklerin sıcaklık ile değişimleri dikkate alınarak sıvı filmi ve buhar tarafında oluşan film bölgesi için boyutsuz hız ve sıcaklık profilleri elde edilmiştir.

Yine, durgun bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı ve düşey bir plaka üzerinde doymuş su buharının laminer film yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışma, Poorts ve Miles [32] tarafından yapılmıştır. Sürekli rejimde, sıvı-buhar ara-yüzeyindeki yüzey gerilimi ihmal edilerek sıvı filmi ve buhar bölgeleri için ayrı ayrı elde edilen iki boyutlu sınır tabaka denklemleri, sınır tabaka yaklaşımı ile basitleştirilmiş ve sayısal olarak çözülmüştür. Akışkanın fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin göz önüne alındığı bu çalışmada, sayısal çözüm çeşitli sabit yüzey sıcaklıkları için tekrarlanmış ve sonuçlar literatürdeki benzer çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Stuhltrager vd. [33] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, düşey bir levha üzerinde meydana gelen yoğuşma incelenmiş ve elde edilen zamana bağlı ve iki boyutlu Navier-Stokes ve enerji denklemleri sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Yoğuşmanın, akış parametreleri açısından incelendiği bu çalışmada; hız alanı, sıvı filminde oluşan girdaplar ve basıncın yüzey boyunca değişimi elde edilmiştir. Yine, Stuhltrager vd. [34] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, düşey bir levha üzerinde meydana gelen yoğuşma, akış dinamikleri ve ısı geçişi açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçların, R11 soğutucu akışkanına uyarıldığı bu çalışmada; sıvı filminin yapısının zamanla değişimi elde edilmiştir. Durgun bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı ve düşey bir levha üzerinde doymuş saf buharın yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışma da, Chen [35] tarafından yapılmıştır. Akışkan fiziksel özelliklerinin sabit kabul edildiği bu çalışmada; ara-yüzeydeki kayma gerilmesi dikkate alınarak, sıvı filmi ve buhar bölgesindeki sınır tabaka için geçerli denklemler elde edilmiş ve bu denklemler boyutsuzlaştırılarak çözülmüştür.

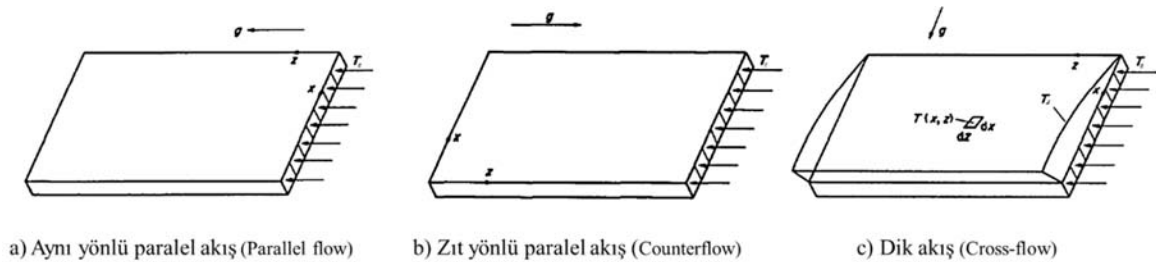
Koh vd. [36] tarafından yapılan ve yine durgun bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı düşey bir levha üzerinde doymuş saf buharın yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışmada; sıvı-buhar ara-yüzeyindeki kayma gerilmesinin ısı geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki kayma gerilmesinin dikkate alınması durumunda aşağı doğru akmakta olan sıvı filminin, buhar ortamında bir harekete neden olacağı ve böylece momentumunun bir kısmını yitireceği (sıvı filminin ortalama hızında bir azalma olacağı)

ifade edilen çalışmada, bu duruma yoğuşma miktarını azaltacağı ve böylece ısı geçişinde bir azalmaya yol açacağı gösterilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, Pr sayısının 10 veya daha fazla olması ve yine Pr sayısının 1 veya çok daha küçük olması durumlarında ara-yüzeydeki kayma gerilmesinin ısı geçişi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu gösterilmiştir. Koh [37] tarafından yapılan diğer teorik bir çalışmada; durgun buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı ve düşey bir levha üzerinde doymuş saf buhar yoğuşması integral metotla incelenmiş ve böylece elde edilen sınır tabaka denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürülmüştür. Her bir faza ait fiziksel özelliklerin etkisini gösteren $[(\rho\mu)_s/(\rho\mu)_b]^{1/2}$ teriminin elimine edilebileceğinin gösterildiği bu çalışmada elde edilen ısı geçiş sonuçlarının, sınır tabaka denklemlerinin tam çözümü ile elde edilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu parametrenin film kaynaması problemlerinde önemli bir rol oynamasından dolayı bu parametreye yer verilmesi şartıyla, bu çalışmada geliştirilen integral yöntemine laminer film kaynamasına da uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Durgun bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı ve düşey bir plaka üzerinde doymuş buhar yoğuşmasının, sıvı-buhar ara-yüzeyindeki kayma gerilmesi etkisinin ihmal edilerek incelendiği teorik bir çalışma da Sparrow ve Gregg [38] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada; yeni bir benzerlik dönüşümü yöntemi kullanılarak sınır tabaka denklemlerinin adi diferansiyel denklemlere dönüşümü yapılmış ve Pr sayısının 1'den küçük olması durumunda imlenmeden kaynaklanan terimin, ısı geçişi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Literatürde, eşsıcaklıklı düşey yüzeylerde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmaların yanı sıra eşsıcaklıklı olmayan düşey yüzeylerde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar da yer almaktadır. Buna göre Yang [39] tarafından yapılan böyle bir teorik çalışmada; elde edilen sınır tabaka denklemleri için bir asimptotik seri çözüm yöntemi geliştirilmiş ve bu çözümün, yüzey boyunca homojen olmayan emmenin olduğu (yoğuşmaya benzer kabul edilebildiğinden) ve yerçekiminin değişken olduğu sistemlere de uygulanabileceği belirtilmiştir.

Brouwers [40] tarafından yapılan ve yine eşsıcaklıklı olmayan düşey bir düzlemsel yüzey üzerinde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği teorik bir çalışmada; McAdam (Ad) sayısı ve geçiş birimi sayısından (NTU) yararlanılarak inceleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar kapalı formda sunulmuştur. Söz konusu düzlemsel yüzeyin, diğer tarafına monte edilmiş olan çok-girişli bir ısı değiştiricisi tarafından soğutulduğu bu çalışmada Şekil 4'de gösterildiği gibi; saf buhar ile soğutucu akışkanın, paralel ve aynı yönlü, paralel ve zıt yönlü ve dik akış durumları için ayrı ayrı inceleme yapılmıştır.

Yine literatürde, saf buhar yoğuşmasının incelendiği çalışmaların yanı sıra, yoğuşmayan bir gazın varlığında gerçekleşen yoğuşmanın mekanizmasının incelendiği hem deneysel hem de teorik çalışmalara da rastlamak mümkündür. Buna göre; Park vd. [41] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, üzerinden bir sıvı filmi akmakta olan düşey düzlemsel bir yüzeyde saf su buharı yoğuşması ve su buharı-hava



Şekil 4. İncelenen yüzeyin, çeşitli akış düzenlemeleriyle soğutulmasının şematik gösterimi (Schematic view of the surface cooled by various flow arrangements) [40].

karışımının yoğuşmasında sıvı-buhar ara-yüzeyinde meydana gelen dalgalanmaların film yoğuşması üzerindeki etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca, toplam ısı geçiş katsayısının, hava kütleli oranına, karışım hızına ve sıvı filmine ait Reynolds (Re) sayısına bağlı değişiminin tespit edildiği bu çalışmada; buhar tarafındaki ısı taşınım katsayısının, sıvı filmine ait Re sayısı büyüdükçe arttığı, buna karşılık karışım hızı artarken düştüğü saptanmıştır.

Slegers ve Seban [42] tarafından yapılan benzer bir çalışmada; düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde, düşük derişikliklerde hava içeren su buharının laminer film yoğuşması deneysel olarak incelenmiştir. Film Re sayısının, dalga oluşum sınırının altında tutulduğu bu çalışmada, hava derişikliği arttıkça ortalama ısı akısının azaldığı ve düşük derişikliklerde hava içeren su buharının, literatürde aynı şartlardaki yoğuşma için öngörülen değerden yaklaşık %20 daha fazla ısı akısı sağladığı tespit edilmiştir.

Denny ve Jusonis [43] tarafından yapılan, yoğuşmayan bir gazın ve buhar hızının laminer film yoğuşması üzerindeki etkisinin konu edildiği teorik bir çalışmada; 6 ayrı akışkan buharının, sabit sıcaklıklı düşey bir yüzey üzerinde, çeşitli hızlarda ve çeşitli doyma sıcaklıklarında, kütleli olarak %0,1 ve %1 derişikliklerinde hava içermeleri durumunda yoğuşmaları ısı geçişi açısından incelenmiştir. Buna göre; sadece düşük derişiklerde (~ %0,1) ve yüksek buhar hızlarında (~ 3 m/s), Nusselt'in teorisindeki saf buhar yoğuşmasına göre ısı geçişinin arttığı ve ayrıca bu ısı geçiş oranının, düşey mesafe ile azaldığı saptanmıştır. Ayrıca, sabit gaz derişikliklerinde buhar hızı azaldıkça bu oranın azaldığı ve sabit buhar hızında yoğuşmayan gaz derişigi arttıkça bu oranın yine azaldığı tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada sonuçlar, nümerik ve yarı-deneysel olmak üzere iki farklı yöntem ile elde edilmiş ve sonuçların uyumlu olduğu gösterilmiştir. Al-Diwan ve Rose [44] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; su buharının düşey bir levhadaki doğal taşınım yoluyla yoğuşmasında; hava, argon, neon ve helyum gibi yoğuşmayan gazların etkisi incelenmiştir. Buna göre; hava, argon ve neon gibi, moleküler ağırlığı su buharına göre daha fazla olan gazların ortamdaki varlığı, Nusselt'in teorisindeki saf buhar yoğuşmasına göre ısı geçişini azalttığı ve bu gazların derişikliklerinin artmasının bu ısı geçiş oranını azaltıcı yönde etki gösterdiği saptanmıştır. Ayrıca söz konusu çalışmada, moleküler ağırlığı su buharına göre daha küçük olan helyum gazının, bu ısı geçiş oranını daha fazla azalttığı belirlenmiştir.

Yoğuşmayan bir gazın, yoğuşma üzerindeki etkisini inceleyen teorik bir çalışma da Sparrow ve Lin [45] tarafından yapılmıştır. Durgun bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı düşey bir levha üzerinde meydana gelen laminer film yoğuşmasına, ortama bulunan yoğuşmayan bir gazın etkisini konu alan bu çalışmada; ortama bulunan düşük derişikliklerdeki yoğuşmayan gazın bile ara-yüzeyde birikerek buradaki yoğuşan gazın kısmi basıncının azalmasına yol açtığı ve bunun da yoğuşma miktarını azalttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen sonuçların, kaynaklarda yer alan aynı konudaki deneysel çalışmalar ile oldukça uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Minkowyc ve Sparrow [46] tarafından yapılan ve oldukça kapsamlı olan teorik bir çalışmada; yoğuşmayan bir gaz olan havanın, eşsıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzeyde su buharının yoğuşması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada ayrıca; ara-yüzeydeki ısı direnç, buharın kızgınlık derecesi, sıcaklık ve derişiklik gradyanlarından ileri gelen doğal taşınım, ısı yayılım ve kütleli yayılım ile sıvı filmi ve su buharı-hava bölgesindeki fiziksel özelliklerin değişiminin de yoğuşma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yoğuşma ortamındaki kütleli olarak %0,5'lik bir hava derişikliğinin ısı geçişini %50 oranında azalttığı tespit edildiği bu çalışmada, düşük basınç seviyelerinde bu etkinin daha da arttığı gösterilmiştir. Isı geçişindeki bu düşüşün temel nedeninin gaz-buhar sınır tabakasındaki

yayılmadan kaynaklanan direnç olduğunun vurgulandığı bu çalışmada, sıvı-buhar ara-yüzeyindeki ısı direncin bu düşüş üzerinde ikincil bir etken olduğu da vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada; saf buhar yoğuşmasında ısı geçişi üzerinde fazla etkili olmayan buhar kızgınlık derecesinin, ortamda yoğuşmayan bir gaz olması durumunda oldukça önemli hale geldiği belirlenmiştir. Denny ve Mills [47] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; eşsıcaklıklı olmayan düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde, buhar hızı ve akışkan fiziksel özelliklerindeki değişim dikkate alınarak saf buharın laminer film yoğuşması incelenmiştir. Başta su buharı olmak üzere, Pr sayıları birden büyük olan 10 farklı akışkanın incelendiği bu çalışmada, sınır tabaka içerisindeki korunum denklemlerinin sonlu farklar yardımıyla çözüldüğü bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Söz konusu çalışmada su buharı için, buhar hızı arttıkça, yerel ısı taşınım katsayısında %30'a varan bir artış olduğu saptanmış ve bu artışın, yoğuşma doğrultusunda ilerledikçe azaldığı belirlenmiştir. Literatürde, yoğuşma esnasında sıvı-buhar ara-yüzeyinde oluşan dalgalanmanın incelendiği çok sayıda teorik çalışmaya da rastlamak mümkündür. Buna göre Miyara [48] tarafından, yoğuşma esnasında sıvı-buhar ara-yüzeyinde oluşan dalgalanmanın yoğuşmaya etkisi sonlu farklar metodu ile sayısal olarak incelenmiştir. İncelemenin iki boyutlu yapıldığı bu çalışmada; ısı geçişindeki iyileşmenin, film kalınlığının azalmasına ve sıvı filmi içerisindeki taşınım teriminin de göz önüne alınmasına bağlı olduğu saptanmış ve Pr sayısı arttıkça ısı geçişindeki iyileşmenin de arttığı belirlenmiştir.

Durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen ve eşsıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde dalgalı laminer film yoğuşmasında sıvı filminin kararlılığını ve ısı geçiş mekanizmasını konu alan bir teorik çalışma da Marschall ve Lee [49] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada; yoğuşma neticesinde oluşan ve yerçekimi etkisi altında akmakta olan sıvı filminin, kritik Re sayısının çok küçük olması nedeniyle hemen her zaman kararsız bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, sıvı filmi içerisindeki sıcaklık düşüşünün sabit kalması şartıyla, yoğuşma yoluyla meydana gelen kütle geçişinin sıvı filminin kararlılığı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen ve eşsıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde laminer dalgalı film yoğuşmasında sıvı filminin kararlılığını konu alan teorik bir çalışma da Ünsal ve Thomas [50] tarafından yapılmıştır. Yapılan bazı kabullerle sıvı-buhar ara-yüzeyindeki şartların, sadece sıvı fazın özellikleri ile ifade edildiği bu çalışmada; yüzey gerilimi, viskozite ve ara yüzeyde yoğuşma yoluyla gerçekleşen kütle geçişi sıvı filminin kararlılığı üzerinde olumlu etkiye sahip iken, yerçekimi ivmesinin sıvı filmi akışında kararsızlığa yol açtığı tespit edilmiştir. Yine, Ünsal ve Thomas [51] tarafından yapılan ve benzer şartlar altındaki bir yüzeyde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği teorik bir çalışmada; boyutsuz akım fonksiyonu ve sıcaklık ifadeleri, oluşan dalga sayısına göre asimptotik seriye açılmış ve kararsız durumdaki film kalınlığının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Bu bağntıdan ve ara-yüzeydeki enerji dengesinden yararlanarak, ortalama bir kalınlık ve salınımlardan oluşan film kalınlığı için lineer olmayan bir denklem elde edilmiştir.

Al-Nimr ve AlKam [52] diğer çalışmalardan farklı olarak, Nusselt'in incelemesini, gözenekli bir ortama daldırılan ve eşsıcaklıklı olmayan düşey levhadaki yoğuşma problemine adapte etmiştir. Bu deneysel çalışmada; x , yoğuşma yönündeki uzunluğu göstermek üzere, ince bir gözenekli ortamdaki sıvı filmi kalınlığı olan δ_g , $x^{1/4}$ ile doğru orantılı olarak değişirken kalın bir gözenekli ortamdaki sıvı filmi kalınlığının ise $x^{1/2}$ ile doğru orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada; gözenekli ortamın, sıvı filmi kalınlığını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Kutateladze ve Gogonin [53] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen düşey

düzlemsel bir yüzey üzerinde, yatay silindirik bir kanalın dış yüzeyinden ve yatay bir silindir demeti üzerinden buhar akışı halinde meydana gelen film yoğuşması ayrı ayrı incelenmiş ve aralarında büyük benzerlik olduğu gösterilmiştir. Xu vd. [54] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen eşsıcaklıklı düşey bir levha üzerinde, saf buharın film yoğuşması sayısal olarak incelenmiş ve sıvı filmi kalınlığının, sıvı filmi içerisindeki hız dağılımının, sıvı filmi içerisindeki sıcaklık dağılımının ve yoğuşan akışkanın debisinin levha boyunca değişimi elde edilmiştir. Wang vd. [55] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; literatürden, düşey bir levha üzerinde, yoğuşmayan bir gazın varlığında saf ve durağan buharın, türbülanslı doğal taşınım koşullarında film yoğuşmasına ilişkin 1027 adet veriyi kullanarak ortalama ısı taşınım katsayısı için kapsamlı bir korelasyon önerilmiştir. Zhao vd. [56] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; düşey bir levha üzerinde, hareketli olan hava + su buharı karışımındaki su buharının, türbülanslı doğal taşınım koşullarında film yoğuşması incelenmiştir. Çalışma sonucunda; hava + su buharı karışımındaki hava derişikliğinin artırılmasının, ısı taşınım katsayısını önemli ölçüde artırdığı, ek olarak akış hızının artırılmasının gaz filmi ısıl direncinin, sıvı filmi ısıl direncine oranını önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, deneysel sonuçlar kullanılarak ısı taşınım katsayısı için bir korelasyon geliştirilmiştir.

Düşey düzlemsel yüzeylerde film yoğuşmasının incelendiği çalışmalardan görüldüğü üzere bu konuda; laminar ve laminar + türbülanslı yoğuşmanın analizinden gaz ve sıvı filmlerinin ısıl direncinin yoğuşma üzerindeki etkisinin tespitine kadar kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Ancak, literatürde; yoğuşmanın gerçekleştiği düzlemsel yüzeyin sabit ısı akışı ile ısıtıldığı incelemelerin ve termodinamik özelliklerin sıcaklıkla değişiminin dikkate alındığı incelemelerin bulunmadığı görülmektedir. Yoğuşma alanında çalışma yapacak araştırmacıların bu hususları da dikkate almaları tavsiye edilir.

3.3. Silindirik ve Küresel Yüzeylerde Gerçekleşen Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmalar (Studies on Condensation on Cylindrical and Spherical Surfaces)

Literatürde, düşey düzlemsel yüzeylerde gerçekleşen yoğuşmanın yanı sıra silindirik yüzeylerde gerçekleşen yoğuşma konusunda da yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Buna göre literatürde; silindirik kanalların içindeki ve dışındaki yoğuşmanın ve küresel yüzeylerdeki yoğuşmanın incelendiği hem teorik hem de deneysel çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu çalışmalar; buharın yerçekimi ivmesi yönünde akması durumundaki yoğuşmanın incelendiği, buharın yerçekimi ivmesinin tersi yönde akması durumundaki yoğuşmanın (reflux condensation) incelendiği, saf buharın yoğuşmasının incelendiği, buharla birlikte yoğuşmayan bir gazın varlığında gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği ve yoğuşmanın gerçekleştiği yüzeyde bir akışkanın yerçekimi ivmesi yönünde akması durumundaki yoğuşmanın incelendiği çalışmalar olarak sınıflandırılabilir.

Chou ve Chen [57] tarafından yapılan ve silindirik kanallardaki yoğuşmanın incelendiği teorik bir çalışmada; eşsıcaklıklı bir akışkan içerisine daldırılan düşey bir silindir içerisinde yerçekimi ivmesinin tersi yönde akmakta olan saf buharın yoğuşması için genel bir analitik model geliştirilmiştir. Bu çalışmada boyutsuz film kalınlığı, film Re sayısı ve sıvı filmi için ısı taşınım katsayısı formüle edilmiş ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Yine bu çalışmada, Bi sayısının artmasıyla sıvı filmi kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen Nu sayısının film Re sayısı ile değişiminin, literatürdeki deneysel ve teorik sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğunun gösterildiği bu çalışmada, Re sayısının küçük değerlerinde daha büyük ısı taşınım katsayılarının elde edilmesinin kısmen, sıvı filmi üzerinde oluşan dalgalanmalardan

kaynaklandığı ifade edilmektedir. Kim ve No [58] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; 46 mm çapında düşey silindirik bir kanal içerisinde yüksek basınçlı (7,5 MPa) buharın türbülanslı film yoğuşması incelenmiştir. Sıvı filmi içerisindeki ısı taşınım katsayısını hesaplamak için belirli düşey mesafelerde; kanalın ekseninden, iç yüzeyine oldukça yakın bir noktadan ve dış yüzeyinden olmak üzere üç ayrı noktadan sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İki fazlı akış için basınç düşüşünün de ölçüldüğü bu deneysel çalışmada, yerel ısı akısının basınç ile değişimi de tespit edilmiştir. Ayrıca türbülanslı film yoğuşması için yeni bir model geliştirilmiştir.

Düşey silindirik bir kanal içerisinde ayrı ayrı gerçekleşen yoğuşma ve buharlaşmayı konu alan bir diğer deneysel çalışma da, Sun ve Hewitt [59] tarafından yapılmıştır. Çapı 9,5 mm olan düşey silindirik bir kanal içerisindeki faz değişiminin incelendiği bu çalışmada, yoğuşma için soğutma, buharlaşma için ise ısıtma işlemi su ile gerçekleştirilmiştir. İki fazlı akışın, test ünitesine yerçekimi ivmesinin aksi yönde girdiği bu çalışmada, ısı taşınım katsayısının buharın kuruluk derecesi ile değişimi elde edilmiştir. Thumm vd. [60] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; düşey silindirik bir kanal içerisinde akmakta olan buharın film yoğuşmasında film Re sayısının, Pr sayısının ve ara-yüzeydeki kayma gerilmesinin yoğuşma üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Söz konusu silindirik kanal, dış yüzeyinden su ile soğutulurken buhar, kanal içerisinde aşağıdan yukarı doğru akmaktadır. Bu çalışmada kayma gerilmesinin, çeşitli Pr sayıları için ısı geçiş parametreleri üzerindeki etkisi grafikler halinde verilmiştir. Pan [61], buhar hızını yani ara-yüzeydeki kayma gerilmesini ve ara-yüzeydeki kütle geçişini dikkate alarak düşey silindirik bir kanal içerisindeki yoğuşma olayını teorik olarak incelemiştir. Buhar akışının hem yukarı hem de aşağı yönlü ele alındığı bu çalışmada; ara-yüzeydeki kayma gerilmesinin ve ara-yüzeydeki kütle geçişinin, çalışma akışkanının termodinamik özelliklerine ve çalışma sıcaklığına güçlü bir şekilde bağlı olduğu tespit edilmiştir.

No ve Park [62] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, yoğuşmayan bir gazın varlığında düşey silindirik bir kanal içerisindeki su buharının yoğuşması; kütle geçiş etkisi, giriş etkisi ve ara-yüzeydeki dalgalanmanın yoğuşma üzerindeki etkisi dikkate alınarak incelenmiş ve bunun için bir çözüm modeli geliştirilmiştir. Bir algoritmanın geliştirildiği ve mühendislik uygulamalarına kolayca adapte edilebilecek bu çalışma sonuçlarının literatürdeki deneysel çalışmalarla oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Dış yüzeyine düşey yönde üçgen kanallar açılmış düşey silindirik bir kanalın dışında ve içinde eşzamanlı olarak gerçekleşen yoğuşma ve buharlaşma olayı, Park ve Choi [63] tarafından üç boyutlu olarak incelenmiştir. Söz konusu teorik çalışmada; kanalın dış yüzeyinde yoğuşma olurken, yoğuşma sonucu açığa çıkan ısı enerjisi aracılığıyla eşzamanlı olarak kanalın iç yüzeyinde ise buharlaşma gerçekleşmektedir. Dış tarafına üçgen oluklar açılan silindirik kanalın dış yüzeyinde meydana gelen yoğuşmada, yüzeyinde oluklar olmayan yani düz kanalın dış yüzeyinde gerçekleşen (Nusselt'in çözümlenmesine göre gerçekleşen) yoğuşmaya göre 5 ila 10 kat daha büyük ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların, literatürdeki diğer sonuçlar ile de uyumlu olduğu ifade edilmektedir. Du ve Wang [64] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; sıvı-buhar ara-yüzeyinde dalgalanmaların olması halinde, değişik çaplardaki düşey mini kanallardaki film yoğuşması ele alınmıştır. Sıvı-buhar ara-yüzeyinde oluşan dalgalalar; sıvı filmi inceltici etkilerinden, ara-yüzeydeki faz değişim alanını arttırdıklarından ve taşınım etkilerinden dolayı özellikle mini kanallarda ısı geçişini artırıcı bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, ara-yüzeydeki dalgaların çoğunlukla sıvı filmi inceltici etkisinden dolayı, normal boyutlardaki kanallara nazaran, mini kanallarda ısı geçişini iyileştirme yönünde daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ancak mini kanallarda, ara-yüzeydeki dalgalanmaların faz

değişim alanını artırıcı etkisinin, diğer etkilerinin yanında önemli bir rol oynamadığı ifade edilmiştir. Seban ve Hodgson [65] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; Nusselt'in, yukarı doğru akan buharın düşey bir levha üzerindeki yoğunlaşmasını konu alan çalışması, düşey silindirik bir kanala adapte edilmiş ve sayısal bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir.

Fiedler ve Auracher [66] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; R134a soğutucu akışkanının 7 mm iç çapındaki ve değişik eğimlerdeki silindirik bir kanal içerisindeki yukarı doğru akışı esnasındaki yoğunlaşmada basınç düşüşü incelenmiştir. Bu çalışmada, yoğunlaşma geriye akmaya başlamasından önce meydana gelen basınç düşüşünün, kanalın eğim açısına çok fazla bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada, basınç düşüşünü oluşturan bileşenlerden yerçekimi kaynaklı bileşenin, akışkanın yoğunluğuna bağlı olarak diğer bileşenlere göre daha fazla önem kazandığı da gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada; önceki deneysel çalışmalardan hareketle, geriye akışlı yoğunlaşmada, test ünitesinin yatay ile 40°'lik bir açı yapması durumunda, düşey üniteye nazaran 2 kat ısı geçişi sağladığı belirtilmiştir. Shah [67] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; çeşitli akışkanların yatay, eğimli ve düşey silindirik kanallardaki yoğunlaşmada önceki deneysel çalışmalardan yararlanılarak ısı taşınım katsayısının tespitine yönelik bir korelasyon geliştirilmiştir. Çok geniş bir deneysel çalışma aralığının değerlendirmeye alındığı bu çalışmada, silindirik çapları 7 ila 40 mm aralığında olup akışkanın kuruluk derecesi 0 ila 1 arasında değişmektedir. Freon türü soğutucu akışkanlardan su buharına kadar birçok akışkanın verileri kullanılarak geliştirilen korelasyon Eş. 12'de gösterilmiştir.

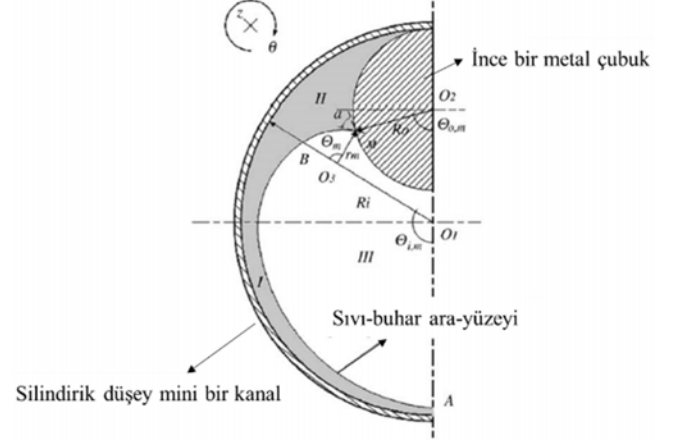
$$h_{tp,m} = h_L \left(0,55 + \frac{2,09}{Pr_s^{0,38}} \right) \quad (12)$$

$h_{tp,m}$ 'nin, iki fazlı akışa ait ortalama ısı taşınım katsayısını, h_L 'nin ise bütün akışkanın sıvı fazında akması durumuna karşılık gelen ısı taşınım katsayısını gösterdiği bu bağlantı, kuruluk derecesinin 1 ila 0 arasında lineer olarak değiştiği (girişte 1, çıkışta 0 olacak şekilde lineer olarak değiştiği) bütün yatay, eğimli ve düşey silindirik kanallardaki Newton tipi akışlarda kullanılabilmektedir. Toplam 473 veri kullanılarak elde edilen bu korelasyonun kullanılması durumunda meydana gelebilecek sapmanın, $\pm\%15$ sınırları içerisinde kaldığı ifade edilmektedir.

Wang ve Du [68] tarafından yapılan bir çalışmada, eğimli ve silindirik bir mini kanalda su buharının laminer film tipi yoğunlaşması deneysel olarak incelenmiştir. Teorik incelemenin, eksenal ve çevresel yönde olmak üzere iki boyutlu yapıldığı söz konusu çalışmada; eğim açısının, silindirik mini kanalların çapı arttıkça yoğunlaşmayı azaltıcı bir etkisinin olduğu hem deneysel hem de teorik açıdan gösterilmiştir. Du ve Zhao [69] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; Şekil 5'de gösterildiği gibi, iç yüzeyine eksenal yönde ince bir metal çubuğun kaynatıldığı düşey silindirik mini bir kanal içerisindeki film tipi yoğunlaşma halinde ısı geçişi incelenmiştir. Düşey kanal içerisinde kılcal etki oluşturmaya yönelik bu çalışmada, kanal içerisine kaynatılan metal çubuğun yol açtığı tespit edilmiştir. Yoğuşan akışkanın metal çubuğu ıslatmasının toplam ısı geçiş katsayısı üzerinde az da olsa etkili olduğunun gösterildiği bu çalışmada, aynı iç çapa sahip olmak üzere, içerisinde metal çubuk olan yoğunlaşma ünitesinin, içerisinde herhangi bir şey bulunmayan klasik dairesel yoğunlaşma ünitesine nazaran yoğunlaşma esnasında daha fazla ısı geçişi sağladığı tespit edilmiştir.

Rufer ve Kezios [70] tarafından yapılan ve eğimli silindirik bir kanaldaki katmanlı akış halinde meydana gelen yoğunlaşmanın konu edildiği teorik bir çalışmada; özellikle kanalın eğimi dikkate alınarak

ısı karakteristikler ve basınç düşüşü için çeşitli bağıntılar geliştirilmiştir. Ayrıca, kütleli debi, kanalın eğim açısı ve çapının yoğunlaşma esnasında kanal içerisinde oluşacak sıvı seviyesine etkisi bir örnek üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5. İncelenen problemin şematik gösterimi I. Silindirik cidardaki ince sıvı filmi II. Kılcal bölge III. Buhar akış bölgesi (Schematic of the physical problem. I. Thin liquid film inside tube wall II. Meniscus zone III. Vapor flow zone) [69].

Soliman vd. [71], eğimli silindirik bir kanal içerisindeki halkasal akış halinde gerçekleşen yoğunlaşmada, sürtünme, momentum ve yerçekimi arasındaki etkileşimi teorik olarak ve oldukça ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Buhar akışının ve buhar akışını çevreleyen sıvı filmi akışının da türbülanslı akış kabul edildiği bu halkasal akışın teorik incelenmesi neticesinde, yerel ısı taşınım katsayısı için elde edilen bağıntının, literatürdeki deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ayrıca; sürtünme kuvveti, momentum ve yerçekimi etkisinin, cidardaki kayma gerilmesi üzerindeki etkisi de belirlenmiştir. Jung vd. [72] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, aralarında R600a soğutucu akışkanının da bulunduğu 6 farklı yanıcı soğutucu akışkanın, 19 mm dış çapındaki düzlemsel düşey silindirik bir kanalın dış tarafındaki yoğunlaşmada ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmada elde edilen ısı taşınım katsayıları, Nusselt'in klasik çözümlemesinden elde edilen teorik ısı taşınım katsayıları ile mukayese edilmiş ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bilen ve Özgüç [73] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; R134a soğutucu akışkanının düşey silindirik bir kanaldaki ve 3-girişli, 5-girişli, 6-girişli ve 14-girişli düşey mini kanallardaki laminer film yoğunlaşması incelenmiştir. Çalışma sonucunda, Eş. 13'de gösterildiği gibi yoğunlaşmadaki ortalama Nu sayısı için ve dolayısıyla ortalama ısı taşınım katsayısı için bir korelasyon geliştirilmiş ve bu korelasyonun literatürdeki benzer korelasyonlarla, örneğin Shah tarafından geliştirilen korelasyonla oldukça uyumlu olduğu gösterilmiştir.

$$\overline{Nu}_l = \frac{\overline{h}_i D_h}{k_s} = 0,1211 Re_{es}^{0,7073} Pr_s^{1/3} \quad (13)$$

Bohdal vd. [74] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; R134a soğutucu akışkanı ile R404A, R407C ve R410A akışkanlarının zeotropik çözeltilerinin yoğunlaşma karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, iç çapı 0,90 ila 3,30 mm arasında değişen kanallarda elde edilen sonuçlar benzer çalışmaların sonuçları ile kıyaslanmıştır. Literatürdeki yerel ısı taşınım katsayısı ve akış direnç katsayısı korelasyonlarından elde edilen değerlerin özellikle zeotropik çözeltilerin test sonuçlarından $\pm\%50$ mertebelerinde saptığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca yeni korelasyonlar türetilmiş ve deneysel sonuçların bu korelasyonlardan elde edilen değerler ile

mukayesesi de yapılmıştır. Geliştirilen bu yeni korelasyonlar sayesinde sapmaların $\pm\%25$ mertebelerine indiği gözlemlenmiştir. Türetilen bu korelasyonlar, iki fazlı dairesel ve dairesel-katmanlı akış yapıları için doğrulanmıştır.

Da Riva ve Del Col [75] tarafından R134a soğutucu akışkanının yoğunlaşma karakteristiği üzerine yapılan teorik bir çalışmada, film kalınlığı ve ısı taşınım katsayısının akış boyunca değişimi incelenmiştir. Çalışmadaki analizler, mini kanallarda yatay akış, düşey akış ve yer çekimli veya yerçekimsiz ortam gibi farklı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile yerçekimi, yüzey gerilmesi ve kesme gerilmesinin yoğunlaşma üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Çalışmada elde edilen nümerik sonuçlar, literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Düşük kütleli akılardaki yoğunlaşma yerçekimi etkisinin baskın olduğunun, yüksek kütleli akılardaki yoğunlaşma ise kesme gerilmesinin etkisinin giderek arttığının tespit edildiği bu çalışmada yüzey geriliminin dairesel akıştaki yoğunlaşma ihmal edilebilir bir etkisinin olduğu belirtilmiştir.

Da Riva vd. [76], R134a soğutucu akışkanı ile yapmış oldukları teorik bir çalışmada, yatay mini kanallardaki yoğunlaşma türbülansın etkisi üzerine odaklanmışlardır. Yoğunlaşmadaki film tabakasının laminar veya türbülanslı kabul edildiği analizlerin sonuçlarını literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Buna göre; düşük kütleli akılarda, literatürde yer alan deneysel çalışmalarda ısı taşınım katsayılarının bu çalışmadaki laminar film tabakası kabulü altındaki analizler ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Buna karşılık, kütleli akıdaki artışın ısı taşınım katsayısına etkisinin deneysel sonuçlarla uyumlu olabilmesi için bu çalışmadaki sayısal modellemenin, türbülanslı film tabaka kabulü ile yapılması gerektiği ortaya konulmuştur.

Garimella vd. [77] tarafından basınç düşüşü üzerine yapılan deneysel bir çalışmada, yatay bir mikro kanalda çoklu akış rejimi koşullarında R134a soğutucu akışkanının yoğunlaşması incelenmiştir. Çalışmada hidrolik çapları 0,5 ila 4,91 mm arasında değişen beş farklı dairesel mikro kanal kullanılmıştır. Her bir kanal geometrisi için %100 buhardan %100 sıvı fazına kadar farklı kuruluk derecelerinde deneyler yapılmış ve kütleli akı 150 ila 750 kg/(m²-s) aralığında değiştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar ve daha önce yazarlar tarafından yapılan diğer çalışmalar birleştirilerek, R134a soğutucu akışkanının buhardan sıvıya bütün yoğunlaşma süreci boyunca uğradığı basınç düşüşü, geliştirilen korelasyonlarla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu korelasyonlar kullanılarak ölçümlerin %82'sinin, $\pm\%20$ hata ile tahmin edilebildiği gösterilmiştir.

Ji vd. [78] tarafından R134a soğutucu akışkanının çekirdekli havuz kaynama ve film tipi yoğunlaşma durumları deneysel olarak incelenmiştir. Standard yüzeye sahip yatay silindirik bir kanal ve aynı kanalın yüzeyi iyileştirilmiş üç farklı alternatifi ile yaptıkları çalışmada ısı taşınım katsayıları tespit edilmiştir. Kaynama için doyma sıcaklığı 6 °C, yoğunlaşma için ise 40 °C olarak belirlenmiştir. Isı akısı 8 ila 86 kW/m² arasında değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Kanat kullanılarak iyileştirilmiş olan yüzeyin, diğer iki yüzeye kıyasla en düşük yoğunlaşma ve kaynama ısı taşınım katsayılarına neden olduğu görülmüştür. Piramit ve girintili yüzeyler ise 70 kW/m² ve üzeri ısı akılarında birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verirken, düşük ısı akılarında hem yoğunlaşma hem kaynama açısından en iyi performans girintili yüzeyler göstermiştir. İyileştirilmiş yüzeylerin standard yüzeye kıyasla, ısı taşınım katsayılarını kaynamada 1,9 ila 4,8 kat arasında, yoğunlaşmada ise 14,8 ila 19,3 kat arasında artırdığı görülmüştür. Kuczynski vd. [79], deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, R134a ve R404A soğutucu akışkanları kullanılarak hidrodinamik kararsızlıkların ısı taşınımına etkisini incelemişlerdir. Dairesel kesitli yatay mini kanallarda yapılan bu çalışmada, test sistemindeki akış kontrol valfinin belirli frekanslarda açılıp kapatılması ile periyodik

dengesizlik oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan hidrodinamik kararsızlık altında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hal değişimi sırasındaki ısı taşınım miktarının düştüğünü göstermiş ve bu durumun açma-kapama frekansı azaldıkça daha da kötüye gittiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda, akışkan tipinin ve kanal çapının hidrodinamik kararsızlığın sönümlenmesine önemli etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Matkovic vd. [80], dairesel mini bir kanalda R134a ve R32 soğutucu akışkanlarının yoğunlaşmadaki ısı taşınım üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hidrolik çapı 0,96 mm olan kanalda yapılan çalışmada yerel ısı taşınım katsayısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Doyma sıcaklığı 40 °C olarak belirlenirken, kütleli akı 100 ila 1200 kg/(m²-s) arasında değiştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için 30 adetten fazla termoeleman kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, makro ölçekteki pürüzsüz silindirik kanallardaki yoğunlaşma için oluşturulmuş modellemeler ile varılan sonuçlara kıyasla farklı bir eğilim göstermediği ifade edilmiştir. Buradan hareketle, kütleli akının yeterince yüksek olması ve kanalın dairesel olması koşuluyla, geleneksel silindirik kanallarda yoğunlaşma için kullanılan korelasyonların mini kanallı kondansatörlerin tasarımında da kullanılabilceği savunulmuştur.

Mederic vd. [81] tarafından n-pentan akışkanı ile 0,56 mm iç çapa sahip dairesel bir kanalda yoğunlaşma üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yoğunlaşma sırasında oluşan farklı akış rejimlerinin ısı taşınımına olan etkisi araştırılmıştır. Dairesel akış ve dairesel akışı takip eden kabarcıklı akış olmak üzere iki farklı akış yapısı incelenmiştir. Aynı zamanda, görselleştirme tekniği kullanılarak akıştaki yerel boşluk oranı da çıkarılmış ve bu boşluk oranı kullanılarak ısı taşınım katsayıları bulunmuştur. Sonuçlar, oluşan kabarcıkların ısı taşınımını azaltacak yönde etki ettiğini göstermiştir.

Mitrovic [82], dış yüzeyi kılcal yapıya sahip yatay silindirik bir kanal etrafında gerçekleşen doğal taşınım ile yoğunlaşma üzerine yaptığı deneysel bir çalışmada; R12, R134a ve bu iki soğutucu akışkandan elde edilen karışımların yoğunlaşmasını incelemiştir. Deneyler sonucunda, R134a akışkanının R12'ye kıyasla daha yüksek yoğunlaşma ısı taşınım katsayısına sahip olduğu bulunmuştur. Aynı sıcaklık farkı altında, kanatçıklı yapıya sahip silindirik kanal ile elde edilen ısı taşınım katsayısının pürüzsüz silindirik kanala kıyasla iki katına kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, saf akışkan yoğunlaşması ile karşılaştırıldığında, bu iki akışkanın karışımının yoğunlaşmasının, buhar tarafındaki taşıma direnci nedeniyle daha düşük ısı taşınımına sebebiyet verebildiği ortaya konulmuştur. Sıcaklık farkının yüksek olduğu durumlarda, bu iki akışkanın karışımı saf bileşenleri gibi davranmış ve tam yoğunlaşma meydana gelmiştir. Ayrıca, basıncın ısı taşınımındaki etkisinin de büyük ölçüde karışımın bileşimine bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Keniar ve Garimella [83] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; hidrolik çapı 1,55 mm olan dairesel ve hidrolik çapı 0,98 mm olan kare mikro kanallarda R134a, R245fa ve R1234ze(E) soğutucu akışkanlarının yoğunlaşması, çeşitli kütleli akılarda ve farklı doyma sıcaklıklarında incelenmiştir. Bu çalışma ile R245fa'nın yüksek kütleli akılarda, benzer koşullarda benzer ısı taşınım katsayılarına sahip olan R134a ile R1234ze(E)'den daha yüksek bir ısı taşınım katsayısına ve basınç gradyanına sahip olduğu bulunmuştur.

Sikora ve Bohdal [84] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; 0,5, 1,2, 2,0 ve 2,5 mm hidrolik çaplara sahip dairesel mini kanallar içinde, bir karışım olan NOVEC649 soğutucu akışkanının yoğunlaşması incelenmiştir. Çalışmada; ortalama ve yerel buhar kuruluk derecesi için ısı taşınım katsayısı ve birim uzunluk için basınç düşüşünün yerel değerleri elde edilmiştir. Bohdal ve Kruzel [85]; R404A, R407C ve R410A soğutucu akışkanlarının farklı hidrolik çaplara sahip AISI 304 ve AISI 316L'den mal'ül dairesel mini kanallarda yüksek basınç altındaki yoğunlaşmasını çeşitli koşullar altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada elde edilen veriler kullanılarak, ısı taşınım

katsayısı için yeni ve genel bir korelasyon geliştirilmiştir. Wen vd. [86], yüzey geriliminin, yerçekiminin ve türbülansın çeşitli çaplardaki yatay dairesel mini veya makro kanallarda R1234ze(E) soğutucu akışkanının yoğunlaşması üzerine etkilerini inceleyen teorik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada; ısı taşınım katsayısının, kütlele akı, buharın kuruluk derecesi ve mini veya makro kanalın çapının artması ile arttığı ifade edilmiştir. Sıvı filmi kalınlığının kesme kuvveti arttıkça azaldığının tespit edildiği bu çalışmada, yüzey geriliminin ise sıvı filmi ile duvar yüzeyi arasındaki ısı geçişini artırmada önemli bir rol oynadığını bulmuşlardır. Sonuç olarak, 1 mm'den küçük çaplı kanallar için yüzey geriliminin, ısı taşınım katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık yer çekiminin, 1 mm'den küçük çaplı kanallardaki etkisi önemsizken, çapı 1mm'den büyük olan kanallarda ise ısı taşınım katsayısı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlara ilaveten sıvı filmi içindeki türbülansın yerel ısıl direncini azalttığı ifade edilmiştir.

Patel vd. [87]; akışkan türü, kütlele akı, buharın kuruluk derecesi ve doyma sıcaklığının yoğunlaşmadaki yerel ısı taşınım katsayısı ve sürtünme kaynaklı basınç düşüşü üzerindeki etkisini görmek için yaptıkları deneysel bir çalışmada; hidrolik çapı 1 mm olan dairesel yatay bir mini kanalda R1234yf ve R134a soğutucu akışkanlarının yoğunlaşması incelenmiştir. Çalışmada; kütlele akı 200 ila 800 kg/(m²-s) aralığında iken doyma sıcaklıkları 35 ve 40 °C olarak seçilmiştir. Bu deneysel çalışma sonucunda; yoğunlaşmadaki ısı taşınım katsayısının ve sürtünme kaynaklı basınç düşüşünün, buharın kuruluk derecesi ve kütlele akıdaki artışla arttığı, buna karşılık doyma sıcaklığındaki artışla azaldığı bulunmuştur. Chen [88] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; durağan ve saf su buharının, yatay silindirik bir kanal veya silindirik demeti üzerinde laminar film yoğunlaşması incelenmiştir. Sıvı filmi içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının elde edildiği çalışmada; teorik olarak bulunan ısı taşınım katsayısı değerleri literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve teorik sonuçların pratikte kolayca uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Hu [89] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; düşük hızlı saf bir buharın eşsıcaklıklı bir kürenin dış yüzeyinde türbülanslı film yoğunlaşması, birleşik doğal ve zorlanmış taşınım koşulları altında incelenmiştir. Çalışmada; boyutsuz ve yerel sıvı filmi kalınlığı ile ısı taşınım katsayısı analiz edilmiş olup elde edilen sonuçlar, laminar film yoğunlaşmasını inceleyen önceki teorik çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre; yüksek buhar hızlarında, türbülanslı film yoğunlaşmadaki ısı taşınım katsayısının laminar film yoğunlaşmasındakine kıyasla daha büyük olduğu gösterilmiştir. Chang [90] tarafından yapılan bir teorik çalışmada; düşük hızlı, saf ve doymuş bir buharın eşsıcaklıklı düşey bir silindirin dış yüzeyi boyunca film yoğunlaşması, bileşik doğal ve zorlanmış taşınım koşulları altında incelenmiştir. Çalışmada; sıvı filmi kalınlığının artmasıyla zorlanmış akış parametrelerinin etkisinin de arttığı gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca, buhar hızının artmasının yoğunlaşan su buharı miktarını artırdığını ancak sıvı filmi içerisindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu bulunmuştur.

Silindirik ve küresel yüzeylerde film tipi yoğunlaşmanın araştırıldığı çalışmalardan görüldüğü üzere bu konuda; buharın yerçekimi ivmesinin tersi yönde akması durumundaki yoğunlaşmanın analizinden silindirik demeti üzerindeki yoğunlaşmanın analizine kadar kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu konuda; zamana bağlı çalışmaların, termofiziksel özelliklerin sıcaklıkla değişiminin dikkate alındığı çalışmaların, küre dizilerini içeren çalışmaların ve damlacıklı yoğunlaşmayı ihtiva eden çalışmaların bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle, silindirik ve küresel yüzeylerdeki yoğunlaşma alanında çalışacak araştırmacıların bu hususları dikkate almaları önerilir.

3.4. Düzlemsel Kanallarda Gerçekleşen Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmalar

(Studies on Condensation in Plain Channels)

Zhao ve Liao [91] tarafından yapılan kapsamlı bir teorik çalışmada, üçgen kesitli düşey mini kanallardaki yoğunlaşma, ısı geçişi ve basınç

düşüşü açısından incelenmiştir. Kılcallık, ara-yüzeydeki kayma gerilmesi, ara-yüzeydeki ısıl direnç, yerçekimi ve eksenel yöndeki basınç düşüşünün dikkate alındığı bu çalışmada, herhangi bir kesitteki akış; kılcal bölge, ince sıvı filmi bölgesi ve buhar bölgesi olmak üzere üç kısma ayrılarak incelenmiştir. Çalışmadaki teorik analizde, eşkenar üçgen kesitli bir kanalın esas alınması nedeniyle oluşan simetri dolayısıyla kanalın 1/6'sını incelemek yeterli olmuştur. Elde edilen denklemlerin sayısal olarak çözüldüğü bu çalışmada; yerel ısı taşınım katsayısının herhangi bir kesitte çevresel yöndeki değişimi, herhangi bir kesit için ortalama ısı taşınım katsayısının kanal boyunca değişimi, sıvı filmi kalınlığının herhangi bir akış kesitinde çevresel yöndeki değişimi ve basınç gradyanının kanal boyunca değişimi grafikler halinde sunulmuştur. Ayrıca bu grafikler; 1, 1,5 ve 2 mm kenar uzunluğuna sahip eşkenar üçgen kesitli kanallar için elde edilerek, kanal boyutlarının ısı geçişi ve basınç düşüşü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üçgen kesitli kanalların, aynı hidrolik çapa sahip silindirik kanallara göre özellikle giriş bölgesinde daha yüksek ısı taşınım katsayıları sağladığının tespit edildiği bu çalışmada; kanalın kenar uzunluğu azaldıkça, yine özellikle giriş bölgesinde çok daha yüksek ısı taşınım katsayıları elde edildiği ancak, eksenel yönde ilerlendikçe ısı taşınım katsayılarının keskin bir düşüş gösterdiği saptanmıştır. Öngörülebileceği gibi, kanal kenar uzunluğu azaldıkça basınç düşüşünün arttığı da yine bu çalışmada tespit edilmiştir.

Literatürde, hem dairesel kanallarda hem de dairesel olmayan kanallarda yoğunlaşmanın birlikte incelendiği çalışmalara da rastlamak mümkündür. Buna göre; Narain vd. [92] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, eğim açısı 0 ila 90° arasında olan dikdörtgen kesitli bir kanal ile düşey silindirik bir kanal içerisindeki akışkanın saf bir buharın film yoğunlaşması incelenmiştir. Bu çalışmada; eğimli olan dikdörtgen kanalın, diğer yüzeylerinde yoğunlaşma olmadığı kabulüyle sadece alt yüzeyindeki yoğunlaşma incelenirken, silindirik kanalın tüm iç yüzeyindeki yoğunlaşma incelenmiştir. Ara-yüzeydeki kayma gerilmesini asimptotik formda veren yeni bir yaklaşım önerildiği bu çalışmada, belirli bir aralıkta, klasik kesin çözüm sonuçları ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. R11 soğutucu akışkanının, yarıçapı 2 cm olan düşey bir silindir içerisindeki yoğunlaşmasında daha önceki deneylerde elde edilen sonuçlar ile yine R11 akışkanının, kenar uzunluğu 4 mm olan düşey bir kanaldaki yoğunlaşmasında bu çalışma kapsamında elde edilen teorik sonuçlar mukayese edilmiş ve kanalda daha büyük ısı taşınım katsayılarının elde edildiği gösterilmiştir.

Panday [93] tarafından yapılan teorik bir çalışmada ise; hem silindirik bir kanal içerisinde hem de birbirine paralel düşey iki levha arasında meydana gelen yoğunlaşma, sonlu farklar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İncelemenin iki boyutlu yapıldığı ve atalet ve taşınım terimlerinin de göz önüne alındığı bu çalışmada; yüzeyler eşsıcaklıklı, akışkan özellikleri sabit, sıvı-buhar ara-yüzeyi düzgün ve dalgasız kabul edilerek hareket halindeki saf buhar yoğunlaşması araştırılmıştır. Bu çalışma, literatürdeki, silindirik bir kanal içerisinde türbülanslı film yoğunlaşmasının iki boyutlu olarak ele alınıp sıvı ve buhar fazlarına ait sınır tabaka denklemlerinin birlikte sayısal olarak çözüldüğü ilk çalışma olma özelliğini de taşımaktadır. Bu çalışmada; 24 mm iç çapındaki düşey silindirik bir kanal için çözüm yapılmış ve yüksek hızlarda oluşan türbülansın, ısı taşınım katsayısını artırdığı ve bu durumun yatay ve düşey silindirik kanallarda fazla bir farklılık göstermediği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada ayrıca; R123/R134a soğutucu akışkan karışımının, aralarındaki açıklık 6 mm olan 3 m boyundaki düşey iki plaka arasındaki yoğunlaşması incelenmiş ve ortalama ısı taşınım katsayısının, karışımındaki R134a kütlele oranına bağlı olarak değişimi grafik olarak sunulmuştur. Böylece, karışımındaki R134a kütlele oranı arttıkça ortalama ısı taşınım katsayısının da arttığı sonucuna varılmıştır.

Silindirik, kare ve dikdörtgen kesitli kanallarda R134a soğutucu akışkanının yoğunlaşması esnasında oluşan iki fazlı akış rejimlerini konu alan deneysel bir çalışma, Coleman ve Garimella [94] tarafından

yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada, yoğuşma ünitesindeki soğutma, hava ile sağlanmıştır. Kütleli akının 150 ila 750 kg/(m²·s) aralığında değiştiği ve 6 farklı boyuttaki (silindirik, $D_h = 4,91$ mm; kare, $D_h = 4$ mm; dikdörtgen 4 6 ve 6 4, $D_h = 4,8$ mm; dikdörtgen 2-4 ve 4-2 $D_h = 2,67$ mm) kanalların kullanıldığı deneylerde akış rejimleri; tıkaç, dalgalı, halkasal ve dağılmış akış olmak üzere dört guruba ayrılmıştır. Test ünitesinin yatay yerleştirildiği bu çalışmada; birbirine yakın hidrolik çapa sahip test ünitelerinde akış rejimleri arasındaki geçişlerin, test ünitesinin geometrisine veya bir kanalın boyutları arasındaki orana çok bağlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Yine, Coleman ve Garimella [95] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, silindirik ve dikdörtgen kesitli mini kanallardaki hava-su karışımına ait iki fazlı akış rejimleri gözlemlenmiştir. Test ünitelerinin yatay olarak yerleştirildiği ve ısı geçişine karşı yalıtıldığı bu çalışmada; 1,3 ila 5,5 mm hidrolik çapındaki kanallar kullanılmış ve kanal hidrolik çapı ile kanal geometrisinin akış rejimleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların; 10 mm ve daha büyük hidrolik çapa sahip kanallara tatbik edilebileceği ancak, hidrolik çapın ve yüzey geriliminin akış rejimleri üzerindeki etkisinden dolayı bu çalışmadakilerden daha küçük hidrolik çaplara sahip kanallara tatbik edilmesinin uygun olmayacağı da belirtilmiştir. Hidrolik çapın ve dolayısıyla yüzey geriliminin akış rejimleri üzerindeki etkisi grafikler halinde gösterilmiştir. Test ünitesinin yalıtılması nedeniyle, faz değişiminin gerçekleştiği durumlara doğrudan adapte edilemeyecek olan bu çalışmada, yaklaşık aynı hidrolik çapa sahip silindirik ve dikdörtgen kanallardaki akış rejimlerinin mukayesesi grafik olarak gösterilmiştir.

R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasını konu alan deneysel bir çalışma da Yan vd. [96] tarafından yapılmıştır. R134a soğutucu akışkanının plakalı bir ısı değiştiricisinde yoğuşmasının incelendiği bu çalışmada, belirli bir basınç ve belirli bir ısı akısında değişik kütleli debiler için yerel ısı taşınım katsayısının kuruluk derecesi ile değişimi grafik olarak sunulmuştur. Benzer işlemler, belirli bir kütleli debi ve belirli bir basınçta değişik ısı akıları için ve belirli bir kütleli debi ve belirli bir ısı akısında değişik basınçlar için tekrarlanmıştır. Soğutucu akışkan kütleli akısı arttıkça, ısı taşınım katsayısı ve basınç düşüşünün de arttığı tespit edildiği bu çalışmada; düşük kütleli akılarda, buharın kuruluk derecesindeki küçük artışların, ısı taşınım katsayısında büyük artışlara neden olduğu belirlenmiştir. Isı taşınım katsayısı için elde edilen grafiklerin benzerleri basınç düşüşü için de elde edilmiştir. Chen vd. [97] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, dikdörtgen kesitli mikro kanallarda FC-72 soğutucu akışkanının yoğuşması, Volume of Fluid (VOF) modelleme yöntemi ile incelenmiştir. Kullanılan nümerik model, öncelikle literatürdeki deneysel çalışmaların sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Daha sonra, FC-72 soğutucu akışkanının mikro kanallardaki iki fazlı akışı, bu nümerik model kullanılarak incelenmiş akışkanın akış deseni (akış modeli) yapısı, akış alanı, sıcaklık alanı ve dalgalı akım yapısı analiz edilmiştir. Çalışmada, buharın akış boyunca giderek küçülen çapta sürekli bir sütun oluşturduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, cidardaki ısı akısını azaltmanın ya da kütleli akıyı artırmanın bu buhar sütununun uzunluğunu artırdığı ve kabarcık büyüklüğünü azalttığı gözlemlenmiştir.

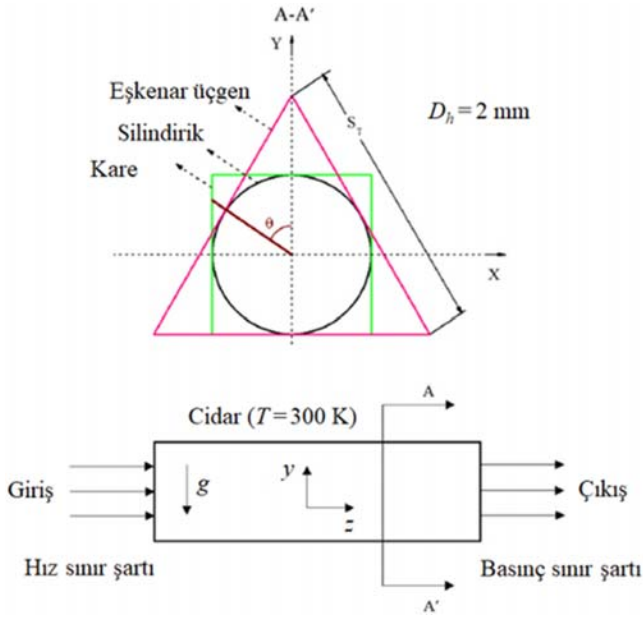
Del Col vd. [98], 1,18 mm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli mini bir kanalda R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasını deneysel olarak incelemiş ve literatürdeki dairesel kesitli kanallardaki çalışmalar ile kıyaslamışlardır. Yoğuşmadaki ısı taşınım katsayılarının karşılaştırıldığı bu çalışmada; düşük kütleli akılarda, aynı hidrolik çaplara karşılık gelen kare kesitli kanalların dairesel kesitli kanallara kıyasla ısı taşınımını iyileştirdiği, buna karşılık yüksek kütleli akılarda ise benzer bir iyileşmenin görülmediği belirtilmiştir. Bu duruma sebep olarak, yoğuşmanın, düşük kütleli akılarda yüzey gerilimi hâkimiyetinde gerçekleşmesi, yüksek kütleli akılarda ise

kesme gerilmesinin baskın olması gösterilmiştir. Del Col vd. [99] tarafından yapılan diğer bir deneysel çalışmada ise; yine kare kesitli mini kanallarda R134a ve R32 soğutucu akışkanlarının yoğuşması incelenmiş ve 15 ila 90° arasında değişen kanal eğim açılarının yoğuşma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, nispeten düşük kütleli akılardaki aşağı yönlü yoğuşmada kanal eğim açısının ısı taşınım katsayısını etkilediğini göstermiştir. Çalışmada ayrıca, Buckingham'ın Pi teoremi yardımıyla bir korelasyon geliştirilerek kanal eğim açısının, hangi kütleli akı değerinden itibaren ısı taşınımını etkilemeye başladığı öngörülme çalışılmıştır. Derby vd. [100] yapmış oldukları deneysel bir çalışmada; kare, üçgen ve yarım daire kesitli mini kanallarda R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasını incelemişlerdir. Çalışmada; çeşitli kütleli akı, kuruluk derecesi, doyma basıncı ve ısı akılarında 1 mm hidrolik çapa sahip kanallar kullanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Yoğuşmadaki ısı taşınım katsayısının incelendiği deneylerde, kütleli akı ve kuruluk derecesinin etkisinin yüksek olduğu fakat ısı akısı ve doyma basıncının kayda değer bir etki oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, mini kanalların farklı geometrik yapılarda olmasının literatürdeki benzer çalışmaların aksine ısı taşınım katsayısı üzerinde kayda değer etkiye sahip olmadığı öne sürülmüştür. Buna neden olarak testlerin, üç taraflı soğutma sınır şartı ile yapılmış olması gösterilmiştir.

Ganapathy vd. [101] tarafından mikro kanallarda R134a soğutucu akışkanının yoğuşması üzerine yapılan teorik bir çalışmada, VOF modeli kullanılmış ve kanal hidrolik çapı 100 µm olarak alınmıştır. Çalışmadaki modellemede; kütleli akı 245 ila 615 kg/(m²·s) arasında değiştirilirken, cidarlardaki ısı akısı 200 ila 800 kW/m² arasında değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda; sürtünme kaynaklı basınç düşüşünün ve Nu sayısının, literatürdeki deneysel korelasyonlardan hesaplanan değerleriyle kıyaslanmasıyla, sürtünme kaynaklı basınç düşüşü için %8,1'lik bir mutlak hata bulunurken, Nu sayısı için mutlak hata %16,6 mertebesinde bulunmuştur. Gu vd. [102], teorik bir çalışmada; Şekil 6'da sınır koşullarıyla birlikte şematik gösterimi verilen dairesel, kare ve üçgen kesitli yatay mini kanallarda, R1234ze(E) soğutucu akışkanının yoğuşmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda; aynı buhar kuruluk derecesinde, aynı hidrolik çapa sahip kare ve üçgen kesitli kanallardaki boşluk oranının, dairesel kesitli kanallardan daha düşük olduğu bulunmuştur. Buna ilaveten, kare ve dairesel kesitli kanallarda, üçgen kesitli kanallara nazaran daha yüksek ısı taşınım katsayısı gözlemlenmiş, kanal geometrisinin basınç gradiyeni üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Rahman vd. [103] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, 20 kanallı çok-girişli yatay dikdörtgen kesitli mini kanallar içerisinde R134a soğutucu akışkanının yoğuşması incelenmiştir. Test ünitesinin uzunluğunun 852 mm olduğu bu çalışmada; kanal hidrolik çapı 0,64 ila 0,81 mm aralığında, doyma sıcaklığı 30 ila 35 °C aralığında ve kütleli akı 50 ila 200 kg/(m²·s) aralığında değiştirilmiştir. Kanatlı ve kanatsız çok-girişli mini kanallarda R134a akışkanının yoğuşmasının incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlardan hareketle ısı taşınım katsayısı için yeni bir korelasyon geliştirilmiş ve literatürde yer alan 750 adet veri kullanılarak bu korelasyonun doğrulanması yapılmıştır. Lei ve Chen [104] yaptıkları teorik bir çalışmada; uzunlukları 10 mm, hidrolik çapları 0,577 mm ve eğrilik yarıçapları 0,03 ve 0,05 mm olan kavisli üçgen ve kavisli kare kesitli mikro kanallarda R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasını incelemişlerdir. Kütleli akının 50 ila 300 kg/(m²·s) aralığında ve doyma sıcaklığının 312,54 K olduğu bu çalışmada, kütleli akı ve ısı akısının ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Artan kütleli akının, ısı taşınımını güçlendirdiği ve cidar ısı akısının yoğuşmadaki ısı taşınım katsayısı üzerinde az etkili olduğu ifade edilmiştir. Kavisli mikro kanalların düz olanlara kıyasla ısı taşınımını arttırmada üstünlük gösterdiği, bununla birlikte daha büyük kavisli mikro kanalların daha iyi performans göstereceği

aktarılmıştır. Son olarak, üçgen kesitli mikro kanalların kare kesitli mikro kanallara kıyasla daha iyi bir ısı geçişi sağladığı belirtilmiştir.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan eşkenar üçgen, silindirik ve kare kanalların, sınır koşullarıyla birlikte şematik gösterimi (Schematic view of equilateral triangle, circular, and square channels used in the study with boundary conditions) [102].

Peng vd. [105] yaptıkları teorik bir çalışmada, yarım daire kesitli ve yüzey sıcaklığı sabit tutulan mini bir kanal içerisindeki R134a akışkanının yoğuşmasını incelemişlerdir. Yarım daire kesitli kanalın aynı ıslak çevreye sahip dairesel kanaldaki ısı taşınım katsayısı ve akış özellikleri bakımından karşılaştırıldığı bu numerik çalışmada sıvı filminin, dairesel kanala kıyasla yarım daire kesitli kanalda daha düzensiz olduğu gösterilmiştir. Bir ısı değiştiricisinin kullanıldığı bu çalışmada ayrıca, mevcut koşullarda yerleştirme yönünün, ısı taşınım katsayısı üzerinde en fazla %4'lük bir değişime yol açtığı gözlemlenmiştir. Li vd. [106] yaptıkları teorik ve deneysel bir çalışmada; R22 akışkanının, sıvı azot kullanılarak gerçekleştirilen yoğuşmasında ısı taşınım katsayısı ve basınç düşüşünü incelemişlerdir. Gövde borulu bir ısı değiştiricisinin kullanıldığı bu çalışmada; R22 akışkanının giriş basıncının, dolayısıyla giriş sıcaklığının ve kütle akışının Nu sayısı üzerindeki etkisi, sürtünme kaynaklı basınç gradiyeni ve yoğuşmadaki akış rejimleri dikkate alınarak detaylıca analiz edilmiştir. Çalışmada; nümerik metod ile elde edilen ısı taşınım katsayıları, deneylerdekinden daha yüksek olarak bulunmuşken sürtünme kaynaklı basınç düşüşünde durum tam tersi olarak tespit edilmiştir. Akers vd. [107] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, saf bir buharın yatay silindirik bir kanal içerisindeki yoğuşmasında ısı geçişi incelenmiştir. Çalışma sonucunda; Nu sayısı için, Tablo 2'de yer alan ve yoğuşma alanında yaygın olarak bilinen bir korelasyon geliştirilmiştir. Cavallini ve Zecchin [108] tarafından yapılan yine deneysel bir çalışmada, saf bir buharın düşey silindirik bir kanal içerisindeki yoğuşmasında ısı geçişi incelenmiştir. Çalışma sonucunda; Nu sayısı için, Tablo 2'de yer alan ve yoğuşma alanında yine yaygın olarak bilinen bir korelasyon geliştirilmiştir.

Murphy vd. [109] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; propan buharının düşey mini kanallardaki yoğuşması, ısı geçişi ve basınç düşüşü bakımından incelenmiştir. Çalışmada; propanın doyma sıcaklığının yükselmesiyle ısı taşınım katsayısının arttığı buna karşılık sürtünme kaynaklı basınç gradiyeninin doyma sıcaklığına daha az duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Literatürde var olan korelasyonların

bu çalışma için yeterince doğru sonuçlar vermediğinin vurgulandığı bu çalışma sonucunda; Nu sayısı için, Tablo 2'de yer alan bir korelasyon geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen ve yoğuşmadaki ısı taşınım katsayısı ile sürtünme kaynaklı basınç düşüşü için oluşturulmuş iki modelin, çalışmanın deneysel sonuçlarının tahmininde önemli gelişmeler sağladığı ifade edilmiştir. Bashar vd. [110] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; R134a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının buharının, pürüzsüz veya mikro kanatçıklı yatay mini kanallardaki yoğuşması, ısı geçişi ve basınç düşüşü bakımından incelenmiştir. Çalışma sonucunda; önceki deneysel çalışmaların sonuçlarından da yararlanılarak, R134a, R1234yf, R123 ve R1234ze(E) akışkanlarının pürüzsüz silindirik kanallarda gerçekleşen yoğuşmasındaki Nu sayısı için Tablo 2'de yer alan bir korelasyon geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen bu korelasyonun, hem bu çalışmanın hem de önceki çalışmaların sonuçlarıyla, ortalama \pm %15'lik bir tolerans dahilinde uyumlu olduğu gösterilmiştir. Çalışmanın deneysel sonuçları, literatürde yer alan pürüzsüz veya mikro kanatlı mini kanallardaki yoğuşma için önerilen korelasyonlarla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu vurgulanmıştır.

Shah [111] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; literatürdeki verilerden yararlanılarak, içerisinde suyun, çeşitli soğutucu akışkanların, kimyasal maddelerin ve kriyojeniklerin yer aldığı 51 adet akışkan buharının, aralarında dairesel, dikdörtgen ve üçgen yatay veya düşey kanal veya çok-girişli kanalın yer aldığı çok sayıda kanalda gerçekleşen yoğuşmalarında ısı taşınım katsayısı için kapsamlı bir korelasyon geliştirilmiştir. Literatürde yer alan 130 çalışmanın verileri kullanılarak oluşturulan bu korelasyon, yazarın önceki korelasyonunun [67] geliştirilmiş versiyonudur. Geliştirilen bu korelasyon, kendisine temel teşkil eden 8298 veriyi, yaklaşık %17,9'luk bir ortalama mutlak sapmayla vermiştir. Ahn vd. [112] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; su buharının, yoğuşmayan bir gazın varlığında, yatay ile 3° eğime sahip silindirik bir kanaldaki yoğuşması, ayrıklı koşullarında araştırılmıştır. Çalışmada; kanalın yukarı kısmında oluşan film tipi yoğuşmanın, kanal cidarına yakın hava tabakası tarafından bozulduğu gözlemlenirken kanalın alt kısmında yoğuşmuş olan akışkanın, taşınım ile ısı geçinde az etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, yoğuşmadaki ısı taşınım katsayısını küçülten faktör için deneysel bir korelasyon geliştirilmiştir. Wang vd. [113] tarafından yapılan bir çalışmada; CO₂/R32 karışımının ve R32 akışkanının, gözenekli ve çok-girişli mini bir kanaldaki yoğuşması, deneysel ve teorik bakımdan araştırılmıştır. Çalışmada; ısı taşınım katsayısının, CO₂'nin kütle oranının artmasıyla önce hızlıca azaldığı daha sonra yavaşça yükseldiği görülmüştür. Isı taşınım katsayısının en düşük değerinin, CO₂'nin kütle oranının 0,55 olduğu durumda ortaya çıktığı belirlenmiştir. Yüksek buhar kuruluk derecesi ve yüksek kütle debininin, ısı taşınım katsayısını artırıcı bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Moser vd. [114] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; çeşitli akışkanların silindirik bir kanal içerisindeki yoğuşmalarına ilişkin literatürde yer alan bazı korelasyonlardaki eşdeğer Re (Re_{es}) sayısı tanımlamasının hatalı olduğu ve bu nedenle yeni bir Re_{es} sayısı belirlenmektedir. Momentum ile ısı geçişi arasındaki analogiye dayanılarak tanımlanan bu Re_{es} sayısının kullanıldığı model aracılığıyla, 18 kaynaktan alınan 1197 deneysel veri için Nu sayısının ortalama %13,64 sapma ile belirlendiği gösterilmiştir. Shin ve Kim [115] tarafından yeni bir ölçüm metodu kullanılarak, R134a akışkanının mini bir yatay kanal içerisinde yoğuşmasındaki ısı geçişine ilişkin deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda; Nu sayısına ve iki fazlı akıştaki sürtünme kaynaklı basınç gradiyenine ilişkin deneysel sonuçlar, literatürde yer alan bazı korelasyonlar kullanılarak bulunan sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Wang ve Rose [116] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; R134a akışkanının doymuş buharının çeşitli yatay mini eşsıcaklıklı kanallar içerisindeki film

yoğuşmasındaki ısı geçişi incelenmiştir. Kanal geometrisinin yoğuşma üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada; belirli bir kütlelesel akı için, kanalların belirli bir kesitindeki sıvı filmi profili ve kanal boyunca farklı mesafelerdeki kesitler için ortalama ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır.

Stevanovic vd. [117] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; su buharının düşey silindirik kanallar içerisinde film yoğuşmasındaki basınç değişimi incelenmiştir. Çalışmada; sıvı-buhar ara-yüzeyindeki sürtünme katsayısı olan f_{12} için kütle, momentum ve enerji denge denklemlerine dayanan ve literatür ile uyumlu olan bir korelasyon önerilmiştir. Çalışmada ayrıca; yer çekimi, sürtünme ve ivmelenme kaynaklı basınç düşüşlerinin toplam basınç düşüşü üzerindeki etkisi analiz edildiği gibi sıvı damlacıklarının, sıvı filmi yüzeyinden buhar ortamına geçişinin de toplam basınç düşüşü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

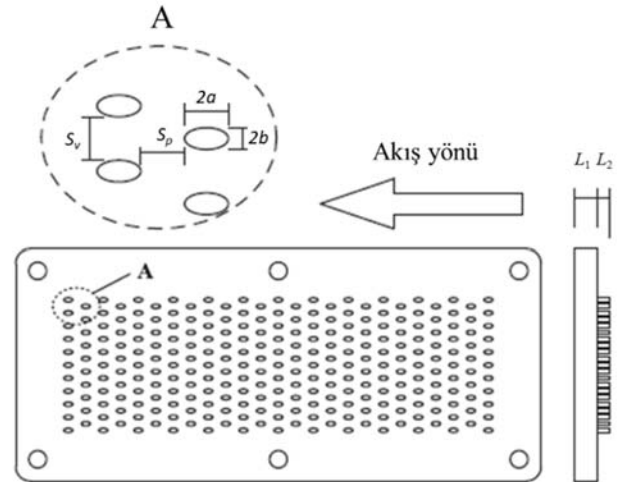
Düzlemsel kanallardaki yoğuşmanın incelendiği çalışmalardan görüleceği gibi bu alanda; tek-girişli kanallardan çok-girişli kanallara, farklı geometriye sahip kanallardan eğimli kanallara, düşey kanallarda kulcallığın etkisinin dikkate alınmasında sıvı-buhar ara-yüzeyindeki ısı ve hidrodinamik etkileşimin dikkate alınmasına kadar detaylı çalışmalar yapılmıştır. Ancak, literatürde; basınç ve sıcaklığın akış doğrultusundaki değişiminin, termodinamik özellikler üzerindeki etkisinin dikkate alındığı incelemeleri içeren çalışmaların bulunmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, düzlemsel kanallardaki yoğuşma alanında çalışma yapacak araştırmacıların bu hususları dikkate almaları tavsiye olunur.

3.5. Kanatçıklı Düşey Yüzeylerde Gerçekleşen Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmalar (Studies on Condensation on Vertical Surfaces with Fins)

Literatürde, düzlemsel yüzeylerde ve kanallardaki yoğuşma probleminin incelendiği çalışmalar yer aldığı gibi, kanatçıklar üzerindeki yoğuşmayı konu alan çalışmalar da yer alır. Buna göre; Sarma vd. [118] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; taban sıcaklığı sabit tutulan ve durgun ve doymuş saf bir buhar ortamına yerleştirilmiş olan düşey bir kanatçık üzerinde meydana gelen yoğuşma incelenmiştir. Teorik incelemeyle elde edilen denklemlerin dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemi ile çözüldüğü bu çalışmada, kanatçık profili (sabit dikdörtgen kesitli profil, üçgen kesitli profil vs.) değiştirilerek bu durumun film kalınlığı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Yine düşey kanatçıklar üzerinde gerçekleşen laminer film yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışma da, Chen vd. [119] tarafından yapılmıştır. Taban sıcaklığı ve kesit alanı sabit olan düşey bir kanatçığın, doyma sıcaklığındaki saf ve durgun bir buhar ortamına yerleştirildiğinin kabul edildiği bu çalışmada; ucu yalıtılmış kanatçık modeli kullanılarak sıvı filmi içerisinde ve buhar bölgesinde oluşan sınır tabakalar ayrı ayrı incelenmiştir. Nusselt'in yaptığı temel çalışmanın, düşey kanatçık üzerindeki laminer film yoğuşmasına tatbik edilmesinin uygun olmayacağına tespit edildiği bu çalışmada, Jacob (Ja) sayısı azaldıkça bu iki çalışma arasındaki farkın da arttığı belirlenmiştir. Düşey düzlemsel bir kanatçık üzerinde meydana gelen laminer film yoğuşmasına, yoğuşmayan bir gazın etkisi, Chen vd. [120] tarafından, merkezi sonlu farklar kullanılmak suretiyle sayısal olarak incelenmiştir. Yine taban sıcaklığı ve kesit alanı sabit olan düşey kanatçığın, çeşitli derişikliklerde yoğuşmayan bir gaz içeren durgun bir buhar ortamına yerleştirildiğinin kabul edildiği bu çalışmada, yine ucu yalıtılmış kanatçık modeli kullanılmıştır. Yoğuşmayan gazın, düşük derişikliklerdeki varlığının bile, kanatçık veriminde belirgin bir düşüşe neden olduğunun tespit edildiği bu çalışmada; boyutsuz yerel ısı taşınım katsayısının kanatçık boyunca sabit olmadığı da belirlenmiştir.

Literatürde yar alan sıradışı çalışmalardan biri, Dhir ve Lienhard [121] tarafından yapılan ve eksenel simetriye sahip cisimler üzerinde, su

buharının, üniform olmayan yerçekimi etkisi altında gerçekleşen laminer film yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışmadır. Bu çalışmada; yerçekimi ivmesinin üniform alınabileceği düşey düzlemsel yüzey ile yerçekimi ivmesinin üniform alınmayacağı yatay bir silindir, bir yatay silindirin üst yarısı, bir yatay silindirin alt yarısı, dönel yatay disk, düşey koni, küre ve dönel düzlemsel yüzey üzerinde meydana gelen laminer film yoğuşmasında Nu sayısı için birer bağıntı geliştirilmiştir. Zhang vd. [122] tarafından, Şekil 7'de gösterilen eliptik kesit alanına sahip iğne kanatçıklı bir plaka üzerinde FC-72 soğutucu akışkanının yoğuşmasının incelendiği deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyler, hem normal yerçekimi hem de mikro yerçekimi altında düz plaka ve eliptik kesit alanına sahip on farklı iğne kanatçıklı plaka ile yapılmıştır. Çalışmada; iğne kanatçık geometrisinin, ısı iletkenliğinin, kütlelesel debinin ve yerçekiminin yoğuşmadaki ısı taşınım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda; eliptik iğne geometrisinin düz plakaya kıyasla çok daha iyi bir ısı taşınımını sağladığı, iğne büyüklüğü azaldıkça ve ısı iletkenlik arttıkça yoğuşma hızının iyileştiği tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, yoğuşmadaki ortalama ısı taşınım katsayısının, kütlelesel debinin artmasıyla arttığı tespit edilmiş olup mikro yerçekimi altında sıvı-gaz ara-yüzeyinde belirgin dalgalanma ve yükselmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Çalışmada kullanılan eliptik kesit alanına sahip iğne kanatçıklı plakanın şematik gösterimi
(Schematic representation of the elliptical pin-fin plate used in the study) [122].

Kanatçıklı düşey yüzeylerde meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalardan görüldüğü üzere bu konuda; düşey bir kanatçığın durgun ve saf buhar ortamında tek başına incelenmesinden üniform olmayan yerçekimi etkisi altında gerçekleşen laminer film yoğuşmasına kadar çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu konuda; hem içinde hem de dışında kanatçıklar bulunan kanalların içinde ve dışında eş zamanlı olarak gerçekleşen faz değişimlerinin incelendiği çalışmalara rastlanılmamaktadır. Bu nedenle, kanatçıklı düşey yüzeylerdeki yoğuşmayı inceleyecek araştırmacıların bu hususu dikkate almaları yararlı olacaktır.

3.6. Çok-girişli Kanallarda Gerçekleşen Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmalar (Studies on Condensation in Multi-port Channels)

Çok-girişli kanallarda iki fazlı akış halinde yapılan çalışmalar; kanal boyunca yalnız basınç düşüşünün incelendiği çalışmalar ve basınç düşüşü ile ısı geçişinin birlikte incelendiği çalışmalar olmak üzere iki grupta toplanabilir. Buna göre; Yang ve Webb [123] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; 4-girişli, dikdörtgen kesitli, içerisinde

mikro kanatçıklar olan ($D_h = 1,564$ mm) ve olmayan ($D_h = 2,637$ mm) yatay mini kanallarda R12 soğutucu akışkanının tek fazlı akışı ve zorlanmış taşınım yoluyla yoğunlaşması ayrı ayrı incelenmiştir. Bu deneysel çalışmada, test ünitesindeki soğutma işlemi su ile yapılmıştır. Bu tarz kapalı devreli deneysel çalışmalarda deney tesisatı genellikle; pompa, debi ölçer, ısıtıcı (kızdırıcı), test ünitesi, ikincil yoğunlaştırıcı ve sıvı toplama kabı olmak üzere altı ana parçadan oluşmaktadır. Bu çalışmada; tek fazlı sıvı akışına ait ısı taşınım katsayısının, kanatçıklı ve kanatçıksız test ünitelerinde Re sayısı ile değişimi ayrı ayrı elde edilmiş ve kanatçıklı test ünitesinde daha iyi bir ısı geçişi sağlandığı saptanmıştır. Yoğuşma halinde, ısı taşınım katsayısı açısından iyileştirme oranının, ısı geçiş alanı bakımından iyileştirme oranından daha büyük olduğu ancak tek fazlı sıvı akışı halinde bu oranların yaklaşık olarak eşit olduğu tespit edilmiştir. İçten mikro kanatçıklı kanaldaki yoğunlaşmada, kanatçıksız kanala göre daha yüksek ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Her iki kanalda da kütleli akı ve kuruluk derecesi arttıkça yoğunlaşmadaki ısı taşınım katsayısının da arttığı ifade edilmiştir. Yine, Yang ve Webb [124] tarafından yapılan ve aynı deney tesisatının kullanıldığı bir diğer çalışmada; 4-girişli, dikdörtgen kesitli, içerisinde mikro kanatçıklar olan ($D_h = 1,564$ mm) ve olmayan ($D_h = 2,637$ mm) yatay mini kanallarda R12 soğutucu akışkanının, iki fazlı akışı ve tek fazlı akışı halinde adyabatik şartlar altında basınç düşüşü incelenmiştir. Kütleli akı artarken basınç düşüşünün de arttığı ve aynı kütleli akı değeri için içten mikro kanatçıklı üniteye kanatçıksız üniteye göre iki misli bir basınç düşüşünün gerçekleştiği belirlenmiştir. Söz konusu deneysel çalışmada; tek fazlı akış halinde, kanatçıksız mini kanaldaki sürtünme katsayısının, Blasius denklemine göre hesaplanan değerden %14, kanatçıklı ise %36 fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca iki fazlı akış halinde, kütleli akı ve kuruluk derecesi arttıkça basınç düşüşünün de arttığı ve beklendiği gibi aynı kütleli akı ve kuruluk derecesi için, içten kanatçıklı kanaldaki basınç düşüşünün pürüzsüz kanala göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yine çok-girişli kanallarda yoğunlaşmayı konu alan bir diğer deneysel çalışma, Koyama vd. [125] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada; 600 mm etkin yoğunlaşma uzunluğuna sahip, 1,114 mm hidrolik çapında 8-girişli ve 0,807 mm hidrolik çapında 19-girişli yatay mini kanallarda, saf R134a soğutucu akışkanın buharının zorlanmış taşınım yoluyla yoğunlaşması incelenmiştir. Basınç düşüşünü ve ısı geçişini birlikte kapsayan söz konusu çalışmada; basınç, yüzey sıcaklığı, ısı akısı, yerel ısı taşınım katsayısı ve kuruluk derecesinin yoğunlaşma ünitesi boyunca değişimi değişik kütleli akılar için elde edilmiştir. Yine öngörülebileceği gibi, 19-girişli yoğunlaşma ünitesinde, 8-girişli yoğunlaşma ünitesine göre daha fazla basınç düşüşünün gerçekleştiğinin tespit edildiği bu çalışmada; en yüksek ısı taşınım katsayısının, test ünitesinin, yoğunlaşmanın başladığı noktayı içeren bölümünde olduğu gözlenmiştir.

Literatürde, çok-girişli kanallardan imal edilmiş yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcıları konu alan çalışmalara da rastlanmaktadır. Buna göre; Zhao vd. [126] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; hidrolik çapı 1 mm olan 10-girişli paralel mini kanallardan oluşan bir buharlaştırıcıda CO₂'in buharlaşması incelenmiştir. Dıştan kanatçıklı olan buharlaştırıcının dışardan hava akımı ile ısıtıldığı bu çalışmada, çeşitli hava debilerinde ve çalışma akışkanının farklı kütleli debilerinde, girişteki farklı kuruluk derecelerinde ve farklı doyma sıcaklıklarında buharlaştırıcının performansının tespiti amaçlanmıştır. Toplam ısı geçiş katsayısının, hava debisine büyük oranda bağlı olduğunun tespit edildiği bu çalışmada, hava tarafındaki su buharının yoğunlaşmasını, bu taraftaki ısı geçiş katsayısı üzerinde büyük etkisinin olduğu da gözlenmiştir. Ayrıca, CO₂ ve hava arasındaki ortalama sıcaklık farkı büyüdükçe yoğunlaşan su buharı miktarı artacağından, doğal olarak toplam ısı geçiş katsayısı da artmaktadır. Illan-Gomez vd. [127] tarafından çok-girişli mini kanallarda yapılan deneysel bir çalışmada, R134a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının yoğunlaşması incelenmiş ve ısı taşınım katsayısı ile basınç düşüşü tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneyler sırasında kütleli akı 350 ila 940 kg/(m²·s)

arasında değiştirilirken, doyma sıcaklıkları 30 ila 55 °C arasında değiştirilmiştir. Çalışmada; akışkanın yoğunluğu, ısı iletim katsayısı ve viskozitesinin ısı taşınım katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. Çalışmada ayrıca, R134a akışkanının R1234yf'ye kıyasla ısı taşınım katsayısı açısından daha büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, adyabatik ve adyabatik olmayan şartlarda yapılan ölçümlerde, basınç düşüşü açısından R1234yf akışkanının bir miktar daha iyi olduğu ve R134a akışkanına kıyasla %5 ila %7 arasında daha az basınç düşüşüne yol açtığı gözlemlenmiştir. Jige vd. [128] tarafından çok-girişli ve dikdörtgen kesitli mini kanallarda yapılan deneysel bir çalışmada; R134a, R32, R1234ze(E) ve R410A soğutucu akışkanlarının yoğunlaşma karakteristikleri incelenmiştir. Farklı kütleli akı ve doyma sıcaklıklarında yapılan deneylerde, yoğunlaşmadaki sürtünme kaynaklı basınç düşüşü ve ısı taşınım katsayısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonuçları; hidrolik çapın azaltılmasının, verilen bir kütleli akı ve kuruluk derecesi için basınç düşüşünü artırdığı göstermiştir. Çalışmadaki en yüksek basınç düşüşü, R1234ze(E) akışkanının kullanılması durumunda saptanmıştır. Bununla birlikte, yoğunlaşmadaki ısı taşınım katsayısının yüksek kütleli akılarda, kütleli akı ve kuruluk derecesi azaldıkça azaldığı, düşük kütleli akılarda ise neredeyse değişmediği gözlemlenmiştir. Çalışmada; R32 akışkanının, R134a ve R1234ze(E) akışkanlarına kıyasla 1,2 ila 1,5 kat daha iyi bir ısı taşınım katsayısı sağladığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, deneysel verilerden yola çıkılarak basınç düşüşü ve ısı taşınım katsayısı için korelasyonlar geliştirilmiştir. Park vd. [129]; R1234ze(E), R134a ve R236fa soğutucu akışkanlarının çok-girişli düşey mini kanallarda yoğunlaşmasını deneysel olarak karşılaştırıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Alüminyumdan imal edilmiş ve 1,45 mm hidrolik çapa sahip dikdörtgen kesitli çok-girişli kanalların yer aldığı test ünitesinin kullanıldığı çalışmada kanal cidar sıcaklıkları doğrudan ölçülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlarda, kuruluk derecesi arttıkça yoğunlaşmadaki ısı taşınım katsayısının azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda, kütleli akı azaldıkça ya da doyma sıcaklığı arttıkça ısı taşınım katsayısında düşüş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte deneysel çalışma aralığında; ısı taşınım katsayısının, ısı akısı ve akışkan giriş koşullarından etkilenmediği tespit edilmiştir. Deneylerde R1234ze(E) akışkanı; R134a akışkanına kıyasla, %15 ila %25 arasında değişen oranlarda daha kötü bir ısı taşınım katsayısı sağlarken, R236fa akışkanı ile yakın sonuçlar vermiştir. Çalışma sonucunda, literatürdeki korelasyonlarla tam uyumlu sonuçlar vermese de deneysel sonuçları iyi temsil edebilen bir korelasyon da geliştirilmiştir.

Çok-girişli mini kanallarda yapılan bir diğer deneysel çalışmada Sakamatapan vd. [130], R134a soğutucu akışkanının yoğunlaşmasını incelemişlerdir. Deneylerde, 1,1 mm hidrolik çapa sahip 14-girişli bir mini kanal ve 1,2 mm hidrolik çapa sahip 8-girişli bir mini kanal kullanılmış olup kütleli akı 340 ila 680 kg/(m²·s) aralığında değiştirilirken, doyma sıcaklığı 35 ila 40 °C aralığında değiştirilmiş ve ısı akısı 15, 20 ve 25 kW/m² olarak seçilmiştir. Çalışmada öncelikli olarak deneyler sırasındaki akış deseni, literatürdeki akış desenleri üzerinden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar, ortalama ısı taşınım katsayısının artan buhar kuruluk derecesi, kütleli akı ve ısı akısı ile arttığını, artan doyma sıcaklığı ile azaldığını ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda, literatürdeki korelasyonlar kullanılarak bu çalışmanın deneysel sonuçlarının %40'tan daha az bir hata ile sağlanması yapılmıştır.

Wu ve Cheng [131] tarafından trapez kesitli mikro kanal dizisiyle yapılan deneysel bir çalışmada yoğunlaşma sırasındaki akış desenleri incelenmiştir. Akışı görüntülemek için kanalın üst yüzeyi dayanıklı cam (pyrex) ile kapatılmıştır. Hidrolik çapı 82,8 µm ve uzunluğu 30 mm olan kanallarda akışkan olarak su buharı kullanılmış ve su buharının giriş basıncı 125 ila 415 kPa arasında değiştirilirken çıkış basıncı 100 kPa'da sabit tutulmuştur. Deneyler esnasında; tam

damlacıklı akış, damlacıklı/dairesel/enjeksiyonlu/dalgalı-kabarcıklı akış ve tam dalgalı-kabarcıklı akış düzenleri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda; akış düzeninin, verilen bir giriş basıncı ve kütleli akı için, zamana ve konuma bağlı olduğu ortaya konulmuş olup buhar enjeksiyon akışının periyodik olarak belirip kaybaldığı ve bu akış düzeninin mikro kanallarda yoğunlaşma kararsızlıklarına sebep olduğu tespit edilmiştir. Singh vd. [132] tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; R134a ve R410A soğutucu akışkanlarının doymuş buharının çok-girişli ve dikdörtgen kesitli çeşitli yatay mini kanallarda yoğunlaşmasındaki ısı geçişi incelenmiştir. Çalışma sonuçları; R134a'nın tüm koşullarda R410A'ya göre daha yüksek bir ısı taşınım katsayısı sağladığını göstermiştir. Çalışmada elde edilen verilerden hareketle, yatay mini kanallardaki ısı taşınım katsayısı için yeni bir korelasyon önerilmiş olup bu korelasyonun, kendisine temel teşkil eden verileri, ortalama %5,40 mutlak bir hata ile sağladığı gösterilmiştir.

Bilen ve Özgüç [73] tarafından yapılan deneysel çalışma; içerisinde R134a soğutucu akışkanının laminer film yoğunlaşmasının, hem ısı hem de hidrodinamik bakımdan incelendiği kanallar, çok-girişli kanallar kullanılarak yapılan çalışmalara örnek olarak Şekil 8'de gösterilmiştir.

Çok-girişli kanallardaki yoğunlaşmanın incelendiği çalışmalardan görüleceği gibi; literatürde, ya içten kanatçıklı ya dıştan kanatçıklı ya da kanatçiksiz çok-girişli kanallarda gerçekleşen yoğunlaşma, ısı ve hidrodinamik bakımdan incelenmiştir. Ancak bu konuda; hem içten hem de dıştan kanatçıklı olan çok-girişli kanallardaki veya farklı geometriye sahip kanalların yan yana getirilmesi ile oluşturulan çok-girişli kanallardaki yoğunlaşmayı inceleyen çalışmaların bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle, çok-girişli kanallardaki yoğunlaşmayı inceleyecek araştırmacıların bu hususları dikkate almaları faydalı olacaktır.

3.7. Geçici Rejimde Gerçekleşen Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmalar (Studies on Transient Condensation)

Literatürde yer alan geçici rejimdeki laminer film yoğunlaşması ile ilgili çalışmalara, Sparrow ve Siegel [133] tarafından yapılan teorik bir çalışma öncü olarak gösterilebilir. Bu çalışmada; Şekil 9a'da gösterildiği gibi, durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen ve başlangıçta buharın doyma sıcaklığına sahip olan düşey bir plakanın sıcaklığının aniden düşürülmesi neticesinde plaka üzerinde geçici rejimde meydana gelen laminer film yoğunlaşması incelenmiştir. Bu çalışmada; geçici rejimdeki ısı taşınım katsayısı, yine geçici rejimdeki film kalınlığı ve sistemin kararlı hale gelebilmesi için geçmesi gereken süre için birer bağıntı geliştirilmiştir. Buna göre; herhangi bir z mesafesinde yoğunlaşmanın kararlı hale ulaşabilmesi için geçmesi gereken süre olan t_{ss} , Eş. 14 ile bulunmuştur.

$$t_{ss} = \left[\frac{h'_{sb} \rho_s \mu_s}{k g \Delta T (\rho_s - \rho_b)} Z \right]^{1/2} \left(1 + \frac{1}{8} \frac{c \Delta T}{h'_{sb}} \right) \quad (14)$$

Sistemin sürekli hale ulaşabilmesi için geçmesi gereken bu süreden hareketle, sürekli hale ulaşılmadan önce herhangi bir andaki ve herhangi bir yerdeki sıvı filmi kalınlığı ile yerel ısı taşınım katsayısı sırasıyla Eş. 15 ve Eş. 17 ile ifade edilmiştir. Bu eşitliklerde geçen parametrelerin nasıl hesaplanacağı, Eş. 16 ve Eş. 18'de gösterilmiştir.

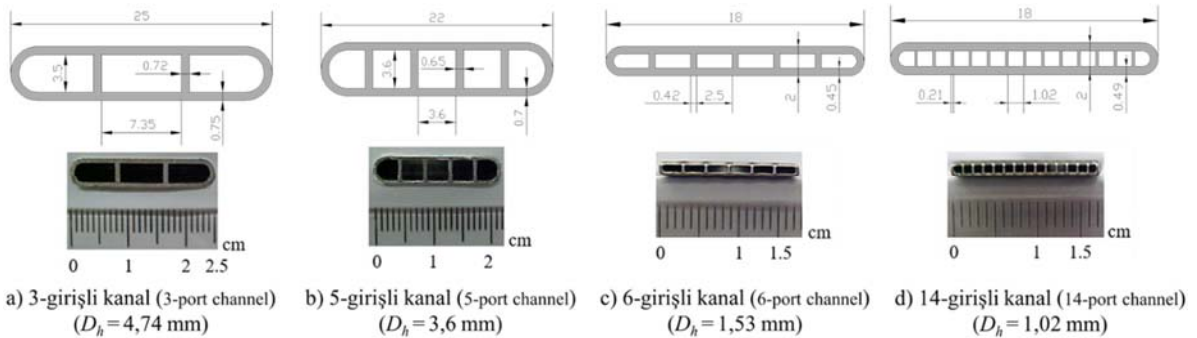
$$\delta = \delta_{ss} \left(\frac{t}{t_{ss}} \right)^{1/2}, \quad t \leq t_{ss} \quad (15)$$

$$\delta_{ss} = \left[\frac{4 k v \Delta T}{h'_{sb} (\rho - \rho_b) g} Z \right]^{1/4}, \quad t \geq t_{ss} \quad (16)$$

$$h_z = \frac{k (\partial T / \partial y)_{y=0}}{T_d - T_y} = h_{z,ss} \left(\frac{t_{ss}}{t} \right)^{1/2}, \quad t \leq t_{ss} \quad (17)$$

$$h_{z,ss} = \left[\frac{k^3 h'_{sb} (\rho - \rho_b) g}{4 v \Delta T Z} \right]^{1/4}, \quad t \geq t_{ss} \quad (18)$$

Yine, düzlemsel düşey bir plaka üzerinde geçici rejimdeki laminer film yoğunlaşmasının teorik olarak incelendiği bir çalışma Chung [134] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada; durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen düşey düzlemsel plakanın üniform olan sıcaklığı veya yerçekimi ivmesi zamana bağlı hale getirilmek suretiyle geçici rejim şartı sağlanmıştır. Değişken yüzey sıcaklığının, Pr sayısının 1 değerinden küçük olması durumunda ısı geçişi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunun tespit edildiği bu çalışmada, değişken yerçekimi ivmesinin, Pr sayısının geniş bir aralığında ($0,001 \leq Pr \leq 100$) ısı geçişi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Trevino ve Mendez [135] tarafından yapılan bir çalışmada; Şekil 9b'de gösterildiği gibi, bir yüzeyinden sabit bir ısı akısı ile soğutulan düşey bir plakanın diğer yüzeyindeki saf buharın geçici rejimdeki yoğunlaşması teorik olarak incelenmiştir. Bu çalışmada; eşsıcaklıklı olmayan düşey plaka üzerinde yoğunlaşmanın başladığı andan itibaren ($t \geq 0$) plaka sıcaklığındaki ve sıvı filmi kalınlığındaki değişim için birer bağıntı geliştirilmiştir. Zamana bağlı yoğunlaşmanın incelendiği çalışmalardan anlaşılacağı üzere bu çalışmalarda; durgun ve saf bir buhar ortamına yerleştirilen ve buharın doyma sıcaklığındaki düşey bir plakanın sıcaklığının aniden düşürülmesinin, benzer bir problemde yer çekimi ivmesinin zamana bağlı olarak alınmasının ve söz konusu plakanın sabit ısı akısı ile ısıtılmaya başlanmasının, plaka üzerinde geçici rejimde gerçekleşen laminer film yoğunlaşması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ancak, damlacıklı yoğunlaşmaya uygun bir malzeme ile kaplanmış yüzeylerde gerçekleşecek olan zamana bağlı damlacıklı yoğunlaşmayı içeren çalışmaların bulunmadığı görülmektedir. Bu nedenle, geçici rejimde meydana gelen yoğunlaşmayı inceleyecek araştırmacıların bu hususu dikkate almaları yararlı olacaktır.



Şekil 8. Çalışmada kullanılan çok-girişli kanalların, şematik gösterimi ve fotoğrafları
(Schematic view and photograph of multi-port channels used in the study) [73].

Tablo 1. Yoğuşma üzerine 1916 ila 2023 yılları arasında yapılan çalışmaların bazıları
(Some of the studies on condensation from 1916 to 2023).

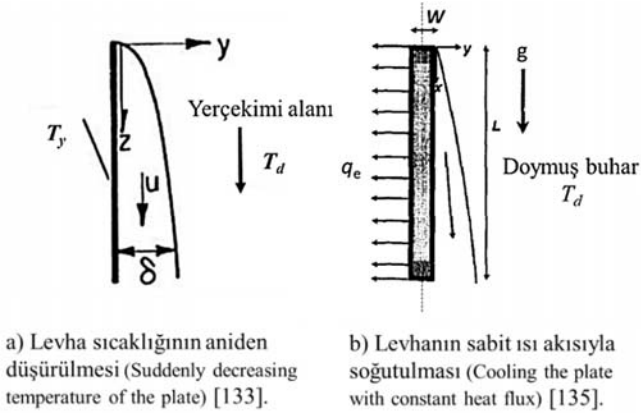
Sıra no	Yazar(lar)	Yıl	Yöntem/Makale tipi	İncelenen model/geometri(ler)	Akışkan(lar)		Dış akış/İç akış	Güçlü yönü
					Saf	Karışım		
1	Collier	1981	Kitap	—	—	—	—	—
2	Kakaç	1991	Kitap	—	—	—	—	—
3	Carey	1992	Kitap	—	—	—	—	—
4	Onbaşıoğlu	2003	Teknik not	—	—	—	—	—
5	Cavallini vd.	2003	Literatür araştırması	—	—	—	—	97 referans içerir.
6	Awad vd.	2014	Literatür araştırması	—	—	—	—	119 referans içerir.
7	Kim ve Mudawar	2014	Literatür araştırması	—	—	—	—	135 referans içerir.
8	Kim ve Mudawar	2014	Literatür araştırması	—	—	—	—	161 referans içerir.
9	Yun ve Jeong	2016	Literatür araştırması	—	—	—	—	74 referans içerir.
10	Kharangate ve Mudawar	2017	Literatür araştırması	—	—	—	—	250 referans içerir.
11	Rifert vd.	2019	Literatür araştırması	—	—	—	—	104 referans içerir.
12	El-Fil vd.	2020	Literatür araştırması	—	—	—	—	206 referans içerir.
13	Kenar ve Garimella	2020	Literatür araştırması	—	—	—	—	114 referans içerir.
14	El-Kadi vd.	2021	Literatür araştırması	—	—	—	—	161 referans içerir.
15	Dorao ve Ferdinando	2022	Literatür araştırması	—	—	—	—	42 referans içerir.
16	Nusselt	1916	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Öncü çalışma olması
17	Rohsenow	1956	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Temel çalışma
18	Rohsenow vd.	1956	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Laminer + türbülanslı akış bir arada
19	Sparrow ve Gregg	1959	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Buhar hareketli
20	Sparrow ve Siegel	1959	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Buhar hareketli
21	Akers vd.	1959	Deneyisel	Yatay silindirik kanal	Propan	—	İç akış	Zamana bağlı inceleme
22	Chen	1961	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
23	Chen	1961	Teorik	Yatay silindir yüzeyi Yatay silindir demeti	Su buharı	—	Dış akış	Buhar hareketli
24	Koh	1961	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Birim genişlik başına
25	Koh vd.	1961	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	yoğuşan akışkan debisi için
26	Chung	1963	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	korelasyon geliştirilmiş.
27	Sparrow ve Lin	1964	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Silindir demeti yüzeyindeki
28	Minkowycz ve Sparrow	1966	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	yoğuşma incelenmiş.
29	Rufer ve Kezios	1966	Teorik	Yatay silindirik kanal	R22	—	İç akış	Birim genişlik başına
30	Yang	1966	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	yoğuşan akışkan debisi için
31	Mills ve Seban	1967	Deneyisel	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	korelasyon geliştirilmiş.
32	Poots ve Miles	1967	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Temel çalışma
33	Soliman vd.	1968	Teorik	Eğimli silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Buhar hareketli
34	Denny ve Mills	1969	Teorik	Düşey levha	Su buharı Etil alkol buharı n-propil alkol buharı n-butil alkol buharı Etilen glikol buharı Gliserol buharı Karbon tetra klor buharı Propan buharı Amonyak buharı	—	Dış akış	Zamana bağlı inceleme
35	Rohsenow	1970	Teorik	Düşey levha Düşey silindir Yatay silindir yüzeyi Düşey koni Dönel yatay disk	Su buharı	—	Dış akış	Saf buhar + hava bir arada Ara-yüzey direnci mevcut. Termofiziksel özellikler değişken
								Termofiziksel özellikler değişken
								Yerel ısı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
								Eşsıcaklıklı olmayan yüzey
								Temel çalışma
								Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.

36	Slegers ve Seban	1970	Deneyisel	Düşey levha	—	Su buharı + hava	Dış akış	Saf buhar + hava bir arada
37	Dhir ve Lienhard	1971	Teorik	Düşey levha Yatay silindirik yüzeyi Dönel yatay disk Düşey koni Küre Dönel düzlemsel yüzey	Su buharı	—	Dış akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
38	Cavallini ve Zecchin	1971	Deneyisel	Düşey silindirik yüzeyi	R11	—	Dış akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
39	Denny ve Jusionis	1972	Teorik	Düşey levha	Su buharı Etil alkol buharı n-butil alkol buharı Karbon tetra klor buharı Freon-12 buharı Amonyak buharı	—	Dış akış	Saf buhar + hava bir arada Buhar hareketli
40	Al-Diwany ve Rose	1973	Deneyisel	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Saf buhar + hava bir arada
41	Marschall ve Lee	1973	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
42	Ünsal ve Thomas	1978	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
43	Kutateladze ve Gogonin	1979	Deneyisel	Düşey levha Yatay silindirik yüzeyi Yatay silindirik demeti Yatay silindirik kanal	Su buharı	—	Dış akış	Buhar hareketli
44	Shah	1979	Teorik	Eğimli silindirik kanal Düşey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
45	Ünsal ve Thomas	1980	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
46	Seban ve Hodgson	1982	Teorik	Düşey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Sıvı ve buharın akış yönleri farklı
47	Churchill	1986	Teorik	Düşey levha Düşey silindirik kanal	Su buharı	—	Dış akış ve iç akış	Hem dış akış hem de iç akış çalışılmış. Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
48	Sadasivan ve Lienhard	1987	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Aşırı soğuma dikkate alınmış.
49	Sarma vd.	1988	Teorik	Düşey kanatçıklı levha	Su buharı	—	Dış akış	Kanatlı yüzey çalışılmış.
50	Brouwers	1989	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Eşsıcaklıklı olmayan yüzey
51	Stuhltrager vd.	1993	Teorik	Düşey levha	R11	—	Dış akış	Zamana bağlı inceleme
52	Chen vd.	1994	Teorik	Düşey kanatçıklı levha	Su buharı	—	Dış akış	Kanatlı yüzey çalışılmış. Kanat üzerindeki yoğunlaşma incelenmiş.
53	Beceren ve Kılıç	1995	Teorik	Düşey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Termosifon uygulamasında yoğunlaşmanın incelenmesi.
54	Stuhltrager vd.	1995	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş. Saf buhar + hava bir arada
55	Park vd.	1996	Deneyisel	Düşey levha	Su buharı	Su buharı + hava	Dış akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
56	Trevino ve Mendez	1996	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Zamana bağlı inceleme
57	Yang ve Webb	1996	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R12	—	İç akış	Kanatlı yüzey çalışılmış.
58	Yang ve Webb	1996	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R12	—	İç akış	Kanatlı yüzey çalışılmış.
59	Al-Nimr ve AlKam	1997	Deneyisel	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Yoğunlaşmadaki basınç düşüşü incelenmiş. Gözenekli ortamdaki yüzey incelenmiş.
60	Narain vd.	1997	Teorik	Dikdörtgen kesitli yatay kanal Düşey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Sıvı-buhar ara yüzeyindeki etkileşim incelenmiş.
61	Shang ve Wang	1997	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Kızgın buharın yoğunlaşması incelenmiş. Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
62	Chen vd.	1998	Teorik	Düşey kanatçıklı levha	Su buharı	—	Dış akış	Saf buhar + hava bir arada
63	Moser vd.	1998	Teorik	Düşey silindirik kanal Yatay silindirik kanal	R11 R12 R22 R125 R134a R410a R113	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş. Yeni bir Re_{es} sayısı tanımlanmış.
64	Chou ve Chen	1999	Teorik	Düşey silindirik kanal Yatay silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Sıvı ve buharın akış yönleri farklı
65	Coleman ve Garimella	1999	Deneyisel	Kare kesitli yatay kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	İki fazlı akış ile yoğunlaşma arasında benzeşim kurulmuş.
66	Mitrovic	1999	Deneyisel	Yatay silindirik yüzeyi	R12 R134a	R12 + R134a	Dış akış	Buhar karışımlarının yoğunlaşması incelenmiş. Kılcal yüzeylerdeki yoğunlaşma incelenmiş.
67	Vargas ve Bejan	1999	Teorik ve deneyisel	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Zamana bağlı inceleme Belirli periyotlarla stüptürülen yüzeydeki yoğunlaşma incelenmiş.

68	Yan vd.	1999	Deneysel	Düsey silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
69	Kim ve No	2000	Deneysel	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Yüksek basınçlı buhar yoğunlaşması incelenmiş. Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
70	Wang ve Du	2000	Teorik ve deneysel	Eğimli silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Eğimli kanallardaki yoğunlaşma incelenmiş.
71	Marek ve Straub	2001	Teorik ve deneysel	Düsey levha	Su buharı	—	Dış akış	Yoğuşma katsayısı bulunmuş.
72	Sun ve Hewitt	2001	Deneysel	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Eş zamanlı yoğunlaşma ve buharlaşma incelenmiş.
73	Miyara	2001	Teorik	Düsey levha	—	Su buharı + hava	Dış akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
74	Pan	2001	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Buhar hareketli Sıvı-buhar ara yüzeyindeki etkileşim incelenmiş.
75	Park ve Choi	2001	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	Dış akış ve iç akış	Oluklu yüzeylerdeki yoğunlaşma incelenmiş.
76	Thumm vd.	2001	Deneysel	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Sıvı ve buharın akış yönleri farklı
77	Winterton	2002	Teorik	Düsey levha	Su buharı	—	Dış akış	Doğal ısı taşınımı ile film tipi yoğunlaşma arasında analogi kurulmuş.
78	No ve Park	2002	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Saf buhar + hava bir arada
79	Zhao ve Liao	2002	Teorik	Üçgen kesitli düsey kanal	Su buharı	—	İç akış	Üçgen kanallardaki yoğunlaşma incelenmiş.
80	Du ve Wang	2003	Teorik	Düsey silindirik kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
81	Coleman ve Garimella	2003	Deneysel	Yatay silindirik kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
82	Du ve Zhao	2003	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Kılcallığın yoğunlaşma üzerindeki etkisi incelenmiş.
83	Koyama vd.	2003	Deneysel	Yatay silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Çok-girişli kanallardaki yoğunlaşma incelenmiş.
84	Panday	2003	Teorik	Düsey silindirik kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
85	Zhao vd.	2003	Deneysel	Düsey levha	CO ₂	—	Dış akış	Buhar karışımlarının yoğunlaşması incelenmiş.
86	Fiedler ve Auracher	2004	Deneysel	Düsey silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
87	Jung vd.	2004	Deneysel	Düsey silindir yüzeyi	R600a R1270 R290 R600 RE170 HFC32	—	Dış akış	Sıvı ve buharın akış yönleri farklı
88	Shin ve Kim	2004	Deneysel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
89	Garimella vd.	2005	Deneysel	Düsey silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Yeni bir ölçüm tekniği kullanılmış.
68	Yan vd.	1999	Deneysel	Düsey silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Yoğuşmadaki basınç düşüşü incelenmiş.
69	Kim ve No	2000	Deneysel	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
70	Wang ve Du	2000	Teorik ve deneysel	Eğimli silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Yüksek basınçlı buhar yoğunlaşması incelenmiş.
71	Marek ve Straub	2001	Teorik ve deneysel	Düsey levha	Su buharı	—	Dış akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
72	Sun ve Hewitt	2001	Deneysel	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Eğimli kanallardaki yoğunlaşma incelenmiş.
73	Miyara	2001	Teorik	Düsey levha	—	Su buharı + hava	Dış akış	Yoğuşma katsayısı bulunmuş.
74	Pan	2001	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Eş zamanlı yoğunlaşma ve buharlaşma incelenmiş.
75	Park ve Choi	2001	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	Dış akış ve iç akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
76	Thumm vd.	2001	Deneysel	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Buhar hareketli Sıvı-buhar ara yüzeyindeki etkileşim incelenmiş.
77	Winterton	2002	Teorik	Düsey levha	Su buharı	—	Dış akış	Oluklu yüzeylerdeki yoğunlaşma incelenmiş.
78	No ve Park	2002	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Sıvı ve buharın akış yönleri farklı
79	Zhao ve Liao	2002	Teorik	Üçgen kesitli düsey kanal	Su buharı	—	İç akış	Doğal ısı taşınımı ile film tipi yoğunlaşma arasında analogi kurulmuş.
80	Du ve Wang	2003	Teorik	Düsey silindirik kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Saf buhar + hava bir arada
81	Coleman ve Garimella	2003	Deneysel	Yatay silindirik kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Üçgen kanallardaki yoğunlaşma incelenmiş.
82	Du ve Zhao	2003	Teorik	Düsey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
83	Koyama vd.	2003	Deneysel	Yatay silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
84	Panday	2003	Teorik	Düsey silindirik kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Çok-girişli kanallardaki yoğunlaşma incelenmiş.
85	Zhao vd.	2003	Deneysel	Düsey levha	CO ₂	—	Dış akış	Buhar karışımlarının yoğunlaşması incelenmiş.
86	Fiedler ve Auracher	2004	Deneysel	Düsey silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.

87	Jung vd.	2004	Deneyisel	Düşey silindir yüzeyi	R600a R1270 R290 R600 RE170 HFC32	—	Dış akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
88	Shin ve Kim	2004	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Yeni bir ölçüm tekniği kullanılmış.
89	Garimella vd.	2005	Deneyisel	Düşey silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Yoğuşmadaki basınç düşüşü incelenmiş.
90	Hu	2005	Teorik	Küre	Su buharı	—	Dış akış	Türbülanslı akışın yoğuşma üzerindeki etkisi incelenmiş.
91	Wu ve Cheng	2005	Deneyisel	Trapez kesitli yatay kanal	Su buharı	—	İç akış	Mikro kanallardaki yoğuşma incelenmiş.
92	Mederic vd.	2006	Deneyisel	Yatay silindirik kanal	n-pentan akışkanı	—	İç akış	Yoğuşmadaki akış yapısına bağlı ısı analizi yapılmış.
93	Wang and Rose	2006	Teorik	Kare kesitli yatay kanal Üçgen kesitli yatay kanal Ters üçgen kesitli yatay kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal Yatay silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğuşma çalışılmış.
94	Chen vd.	2008	Teorik ve deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	FC-72	—	İç akış	Mini kanallardaki yoğuşma üzerine literatür incelemesi
95	Chang	2008	Teorik	Düşey silindir yüzeyi	Su buharı	—	Dış akış	Ara-yüzey direnci mevcut. Buhar hareketli
96	Stevanovic vd.	2008	Teorik	Düşey silindirik kanal	Su buharı	—	İç akış	Üç boyutlu modelleme içeriyor. Yoğuşmadaki basınç düşüşü incelenmiş.
97	Xu vd.	2008	Teorik	Düşey levha	Su buharı	—	Dış akış	Laminer film yoğuşmasının sayısal incelenmesi
98	Bilen ve Özgüç	2009	Deneyisel	Düşey silindirik kanal Dikdörtgen kesitli çok-girişli düşey kanal Kare kesitli çok-girişli düşey kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğuşma çalışılmış. Çok-girişli kanallardaki yoğuşma incelenmiş. Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
99	Matkovic vd.	2009	Deneyisel	Yatay silindir yüzeyi	R134a R32	—	Dış akış	Birden fazla akışkan buharının yoğuşması çalışılmış.
100	Su vd.	2009	Teorik	Yatay silindirik kanal	R134a Amonyak	—	İç akış	Farklı korelasyonların karşılaştırılması
101	Da Riva ve Del Col	2011	Teorik	Yatay silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Ara-yüzeydeki kayma gerilmesi ve yüzey gerilimi incelenmiş.
102	Del Col vd.	2011	Deneyisel	Kare kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğuşma çalışılmış.
103	Park vd.	2011	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli düşey kanal	R1234ze(E) R134a R236fa	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
104	Wang ve Rose	2011	Teorik	Kare kesitli yatay kanal Üçgen kesitli yatay kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal Kare kesitli yatay kanal Kare kesitli yatay kanal Kare kesitli yatay kanal Kare kesitli yatay kanal	R134a R22 Amonyak R152a Propan CO ₂ R410A	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
105	Da Riva vd.	2012	Teorik	Yatay silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Türbülanslı akışın yoğuşma üzerindeki etkisi incelenmiş.
106	Derby vd.	2012	Deneyisel	Kare kesitli yatay kanal Üçgen kesitli yatay kanal Yarım daire kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğuşma çalışılmış.
107	Kuczynski vd.	2012	Deneyisel	Yatay silindirik kanal	R134a R404A	—	İç akış	Birden fazla akışkan buharının yoğuşması çalışılmış.
108	Ganapathy vd.	2013	Teorik	Yatay silindirik kanal	R134a	—	İç akış	Mikro kanallardaki yoğuşma incelenmiş.
109	Sakamatapan vd.	2013	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal Kare kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Çok-girişli kanallardaki yoğuşma incelenmiş.
110	Chen vd.	2014	Teorik	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	FC-72	—	İç akış	Sıvı-buhar ara-yüzeyindeki dalgalanma incelenmiş.
111	Del Col vd.	2014	Deneyisel	Kare kesitli yatay kanal Kare kesitli yatay kanal	R134a R32	—	İç akış	Eğimli kanallardaki yoğuşma incelenmiş.
112	Illan-Gomez vd.	2014	Deneyisel	Kare kesitli yatay kanal	R134a R1234yf R134a	—	İç akış	Birden fazla akışkan buharının yoğuşması çalışılmış. Yoğuşmadaki basınç düşüşü incelenmiş.
113	Bohdal vd.	2015	Deneyisel	Yatay silindirik kanal	R404A R407C	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
114	Ji vd.	2015	Deneyisel	Yatay silindirik kanal	R134a R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğuşma çalışılmış.
115	Jige vd.	2016	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R32 R1234ze(E) R410A	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
116	Rahman vd.	2018	Deneyisel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
117	Wen vd.	2018	Teorik	Yatay silindirik kanal	R1234ze(E)	—	İç akış	Ara-yüzeydeki kayma gerilmesi ve yüzey gerilimi incelenmiş.
118	Gu vd.	2019	Teorik	Yatay silindirik kanal Kare kesitli yatay kanal Üçgen kesitli yatay kanal	R1234ze(E)	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğuşma çalışılmış.
119	Murphy vd.	2019	Deneyisel	Düşey silindirik kanal	Propan	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
120	Zhang vd.	2019	Deneyisel	Eliptik iğne-kanatçıklı plaka	FC-72	—	Dış akış	Kanatlı kanal içerisindeki yoğuşma çalışılmış.
121	Bohdal ve Kruzel	2020	Deneyisel	Düşey silindirik kanal	R404A R407C R410A	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.

122	Bashar vd.	2020	Deneysel	Yatay silindirik kanal Mikro kanatçıklı yatay silindirik kanal	R134a R1234yf R123 R1234ze (E)	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
123	Li vd.	2020	Teorik ve deneysel	Düsey silindirik kanal	R22	—	İç akış	Yoğuşmadaki basınç düşüştü incelenmiş.
124	Lei ve Chen	2020	Teorik	Kavisli kare kesitli yatay kanal Kavisli üçgen yatay kesitli kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
125	Patel vd.	2020	Deneysel	Yatay silindirik kanal	R1234yf R134a	—	İç akış	Birden fazla akışkan buharının yoğunlaşması çalışılmış. Yoğuşmadaki basınç düşüştü incelenmiş.
126	Sikora ve Bohdal	2020	Deneysel	Yatay silindirik kanal	NOVEC649	—	İç akış	Yoğuşmadaki basınç düşüştü incelenmiş. Birden fazla akışkan buharının yoğunlaşması çalışılmış.
127	Keniar ve Garimella	2021	Deneysel	Yatay silindirik kanal Kare kesitli yatay kanal	R134a R245fa R1234ze(E)	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
128	Peng vd.	2022	Teorik	Yarım daire kesitli yatay kanal	R134a	—	İç akış	Birden fazla geometrideki yoğunlaşma çalışılmış.
129	Singh vd.	2022	Deneysel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R134a R410A	—	İç akış	Nu sayısı için korelasyon geliştirilmiş.
130	Ahn vd.	2022	Deneysel	Eğimli silindirik kanal	—	Su buharı + hava	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
131	Shah	2022	Teorik	Yatay silindirik kanal Kare kesitli yatay kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal Yarım daire kesitli yatay kanal Üçgen kesitli yatay kanal Fiçı biçiminde yatay kanal Düsey silindirik kanal Kare kesitli düsey kanal Dikdörtgen kesitli düsey kanal Yarım daire kesitli düsey kanal Üçgen kesitli düsey kanal Fiçı biçiminde düsey kanal	Su buharı, R11, R12, R22, R32, R41, R113, R123, R125, R134a, R141b, R142b, R152a, R161, R236ea, R245fa, R404A, R410A, R448A, R449A, R450A, R502, R507, R513A, R452B, R454C, R455A, R1234fa, R1234yf, R1234ze(E), DME, bütan, propan, CO ₂ , metan, FC-72, isobütan, propilen, benzen, etanol, methanol, tolüen, Dowtherm 209, HFE-7000, HFE-7100, etan, pentan, NOVEC649, amonyak, nitrojen	—	İç akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
132	Zhao vd.	2023	Deneysel	Düsey levha	—	Su buharı + hava	Dış akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
133	Wang vd.	2023	Teorik	Düsey levha	—	Su buharı + hava	Dış akış	Isı taşınım katsayısı için korelasyon geliştirilmiş.
134	Wang vd.	2023	Teorik ve deneysel	Dikdörtgen kesitli yatay kanal	R32	CO ₂ /R32	İç akış	Isıl direnç için korelasyon geliştirilmiş.



Şekil 9. Çalışmalarda kullanılan modellerin şematik gösterimi (Schematic view of the models used in the studies) [133, 135].

Yoğuşma alanındaki literatüre genel bir bakış ekseninde hazırlanan bu çalışmada buraya kadar, Nusselt'in yoğuşma ile ilgili yapmış olduğu öncü çalışmadan günümüze kadar yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve konuyla ilgili çalışmaların zaman içerisindeki gelişimi sistematik bir şekilde sunulmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında; düşey düzlemsel bir levha üzerinde durgun ve saf bir buharın laminar film yoğuşmasından, çok-girişli kanallarda yoğuşmaya; geçici rejimde gerçekleşen yoğuşmadan, yoğuşma esnasında akış görselleştirmeye kadar geniş bir yelpazede bilgi sunulmaya çalışılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında ise incelenen bu kaynakların kapsamlı ve çeşitli bakımlardan istatistiksel bir analizi yapılmıştır.

4. Gözden Geçirilen Kaynakların Kapsamlı Bir Analizi (A Comprehensive Analysis of Reviewed References)

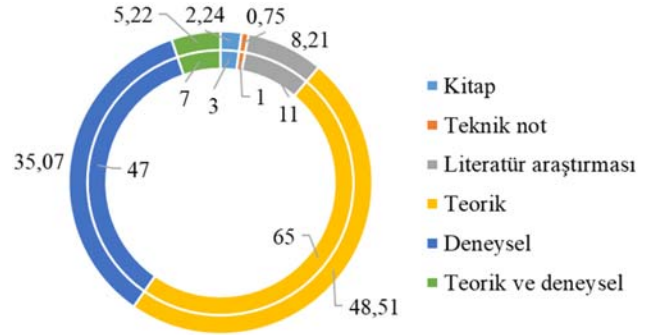
Bu çalışmada; yoğuşma üzerine 1916 ila 2023 yılları arasında yapılan ve Tablo 1'de yayımlanma sırasına göre verilen çeşitli kitap, teknik not, literatür araştırma çalışmaları, araştırma makaleleri ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçların geniş bir özeti yer almaktadır. Tablo 1'den; yoğuşma ile ilgili literatürde teorik çalışmaların daha fazla bulunduğu, çalışmalarda en çok tercih edilen akışkanın su buharı olduğu ve su buharının tek başına yer aldığı, en çok iç akış üzerine çalışmaların olduğu ve çalışmalarda en fazla düşey levhanın kullanıldığı görülmektedir.

4.1. Gözden Geçirilen Kaynakların İstatistiksel Analizi (Statistical Analysis of Reviewed References)

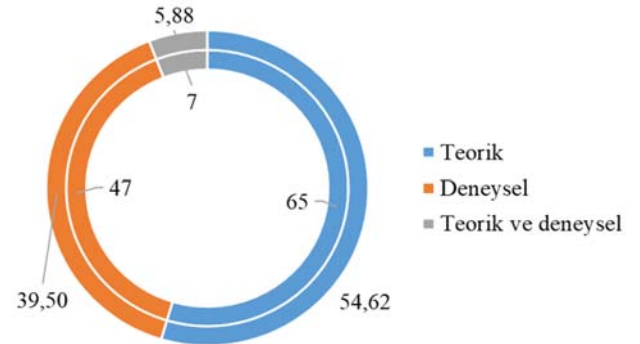
Bu kısımda; Tablo 1'den yararlanılarak, bu literatür araştırması makalesi kapsamında incelenen tüm çalışmaların yayım yılından kaynak sayısına, çalışmalarda incelenen geometriden akışkan çeşidine, akış çeşidinden çalışmaların güçlü yönüne kadar kapsamlı bir değerlendirme yapılmış ve çeşitli grafikler elde edilmiştir.

Yoğuşma üzerine literatürde; çeşitli kitap, teknik not, literatür araştırma makaleleri ve araştırma makalelerine rastlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen çalışmaların sayısı ve toplam içerisindeki yüzdelik dağılımı, Tablo 1'den yararlanılarak Şekil 10'da gösterilmiştir. Yoğuşmanın kapsamlı bir şekilde incelendiği bu literatür araştırması çalışmasında; 3'ü kitap, 1'i teknik not, 11'i literatür araştırma makalesi ve 119 tanesi araştırma makalesi olmak üzere toplam 134 kaynaktan yararlanılmıştır. Buna göre; Şekil 10'dan da anlaşılacağı üzere yararlanılan kaynakların yüzde %2,24'ü kitap, %0,75'i teknik not, %8,21'i literatür araştırma makalesi ve %88,81'i araştırma makalesidir. İncelenen araştırma makalelerinin bir tahlilinin

yapıldığı Şekil 11'den anlaşılacağı üzere bu araştırma makalelerinin; %54,62'si teorik, %39,50'si deneysel, %5,88'i ise hem teorik hem de deneysel çalışmalardır.



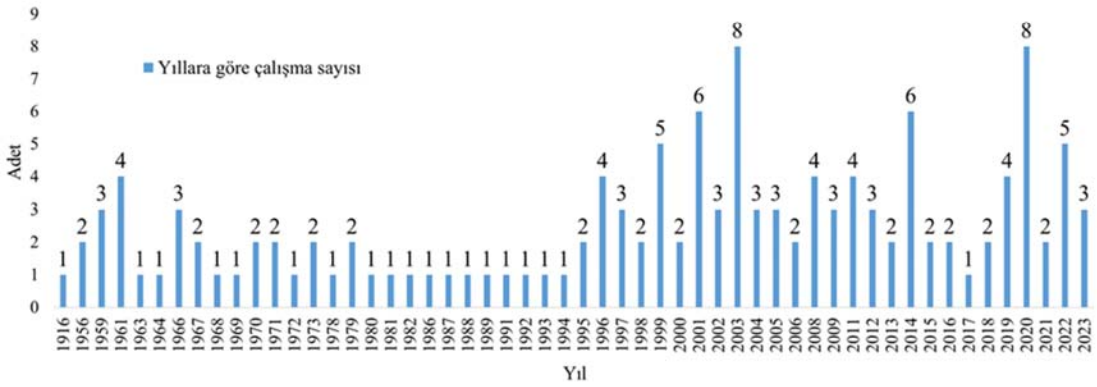
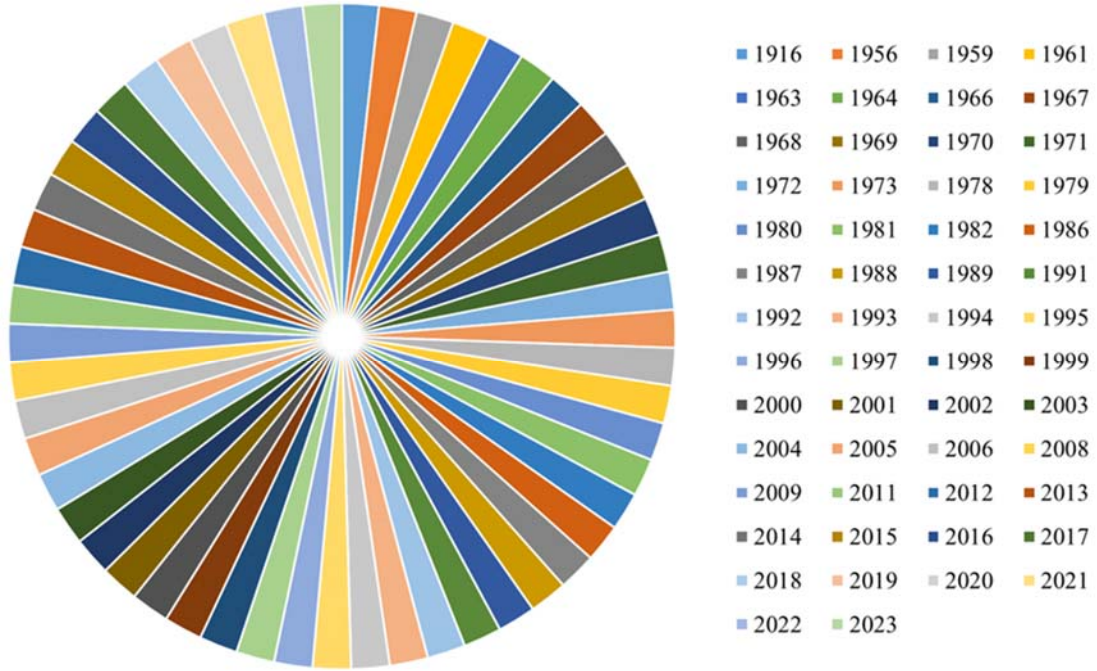
Şekil 10. Tablo 1'de özetlenen önceki çalışmaların, çalışmanın türüne göre sayıları ve yüzdelik dağılımları (Number and percentage distribution of the previous studies summarized in Table 1 in view of the study type).



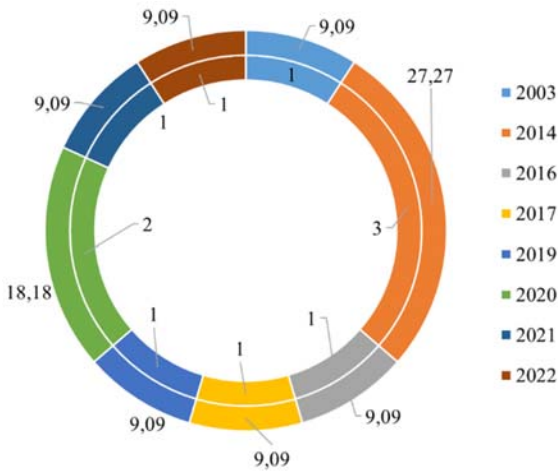
Şekil 11. Tablo 1'de özetlenen önceki araştırma makalelerinin, çalışmanın türüne göre sayıları ve yüzdelik dağılımları (Number and percentage distribution of the previous research studies summarized in Table 1 in view of the study type).

Yoğuşma üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle 1996 yılı ile birlikte kayda değer bir artış sağlanmıştır. Literatürde yer alan ve Tablo 1'de özetlenen önceki çalışmaların, yayımlanma yılına göre sayısı ve yüzdelik dağılımı, Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12'den anlaşılacağı üzere; yoğuşma alanındaki çalışmalar yıllar içerisinde artış ve azalış göstermiştir. Yine Şekil 12'den görüleceği üzere; bu alandaki çalışmalar, 2000'li yılların başında büyük bir ivme yakalamıştır. Buna göre, bu çalışmaya konu olan kaynakların yaklaşık %12,69'u 2001, 2002 ve 2003 yıllarında literatüre kazandırılmışken bu oran 2020, 2021 ve 2022 yılları için toplam %11,19 civarındadır.

Diğer taraftan, bu çalışma kapsamında incelenen literatür araştırması çalışmalarının sayısı ve yüzdeliklerinin yıllara göre dağılımı yine Tablo 1'den yararlanılarak Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13'den görüleceği üzere, bu çalışmaya konu olan önceki literatür araştırması çalışmaları 11 tane olup 2003 ila 2022 yılları arasında yapılmıştır. Bu literatür araştırması çalışmalarının 4 tanesi yani %36,36'sı son 3 yılda yapılmıştır. Yoğuşma üzerine yapılmış literatür araştırması çalışmaları, referans sayısı ve sayfa sayısına göre Şekil 14'de analiz edilmiştir. Yararlanılan referansların sayısı ve içeriği göz önüne alındığında bu literatür araştırması çalışmasının, literatürde önemli bir yer tutacağı açıktır. Bu çalışmada 134 adet referans kullanılmış olup çalışma, literatürdeki benzer çalışmalarda yer almayan çeşitli istatistiksel grafiklerle zenginleştirilmiştir.

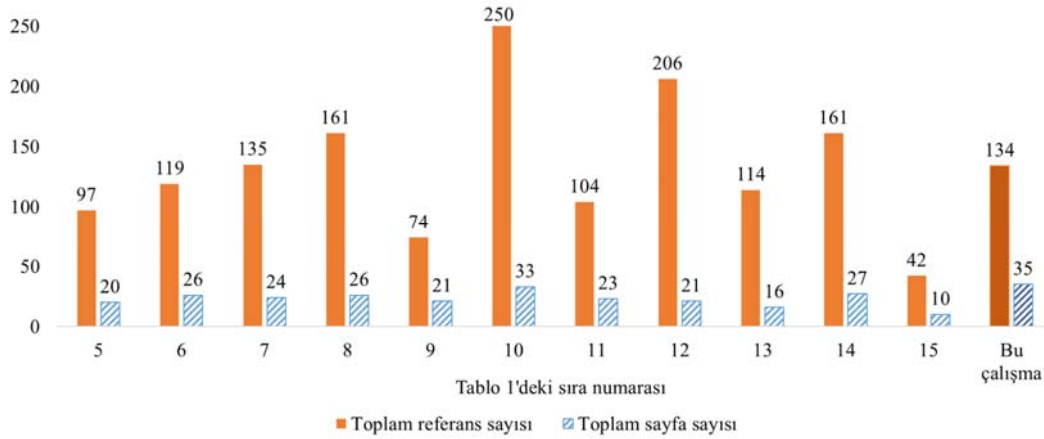


Şekil 12. Tablo 1’de özetlenen önceki çalışmaların, yayımlanma yılına göre sayıları ve yüzdelik dağılımları (Number and percentage distribution of the previous studies summarized in Table 1 in view of the publication years).

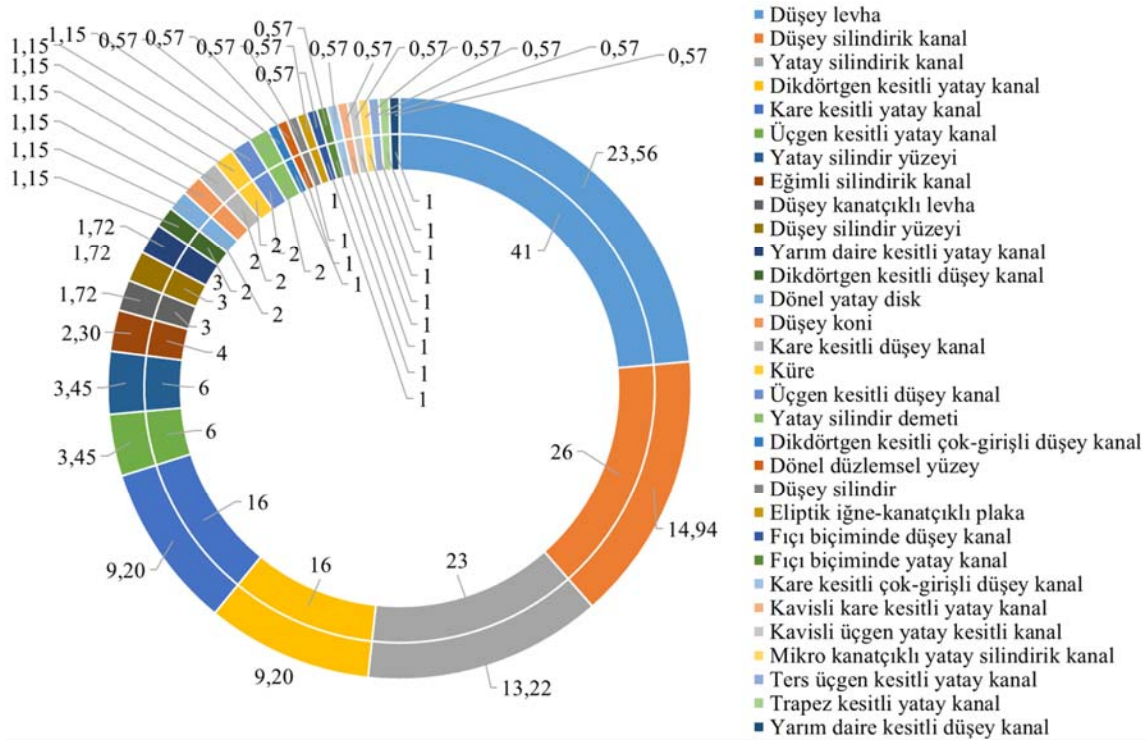


Şekil 13. Tablo 1’de özetlenen önceki literatür çalışmalarının, yayımlanma yılına göre sayıları ve yüzdelik dağılımları (Number and percentage distribution of the previous review studies summarized in Table 1 in view of the publication years).

Bu literatür araştırması kapsamında incelenen araştırma makalelerinde yer alan geometrilerin çeşidi ve yüzdelik dağılımı Tablo 1’den yararlanılarak Şekil 15’de verilmiştir. Şekil 15’den görüleceği üzere, bu çalışmaya konu olan araştırma makalelerinde en çok düşey levha incelenmiş olup bunu sırasıyla düşey silindirik kanal, yatay silindirik kanal ve dikdörtgen kesitli kanal takip etmektedir. Bu husus, bu geometrilerin pratikteki kullanım yaygınlığı ile de uyumludur. Diğer taraftan, bu literatür araştırmasında yer alan araştırma makalelerinde incelenen akışkan çeşidi ve her bir çeşidin yüzdelik dağılımı, Tablo 1’den yararlanılarak Şekil 16’da verilmiştir. Şekil 16’dan anlaşılacağı üzere, bu çalışmaya konu olan araştırma makalelerinde en çok su buharı incelenmiş olup su buharını sırasıyla R134a buharı, su buharı + hava ve R1234ze(E) takip etmektedir. Yine bu husus da, bu akışkanların uygulamadaki kullanım yaygınlığı ile uyumludur. Şekil 16’dan çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise bu çalışmada incelenen araştırma makalelerinin yaklaşık %90,75’inde yani 108 tanesinde herhangi bir akışkanın tek başına yoğunlaşması incelenmişken yaklaşık %7,56’sında yani 9 tanesinde, su buharının kolayca yoğunlaşmayan bir gaz olan havanın varlığında (su buharı + hava) yoğunlaşması incelenmiştir. Ek olarak, yaklaşık %1,69’unda yani 2 çalışmada ise CO₂/R32 ve R12/R134a soğutucu akışkanlarının karışımının yoğunlaşması incelenmiştir.



Şekil 14. Tablo 1'de özetlenen önceki literatür araştırması çalışmalarının, referans sayıları ve sayfa sayıları (Number of the references and pages of the previous review studies summarized in Table 1, respectively)



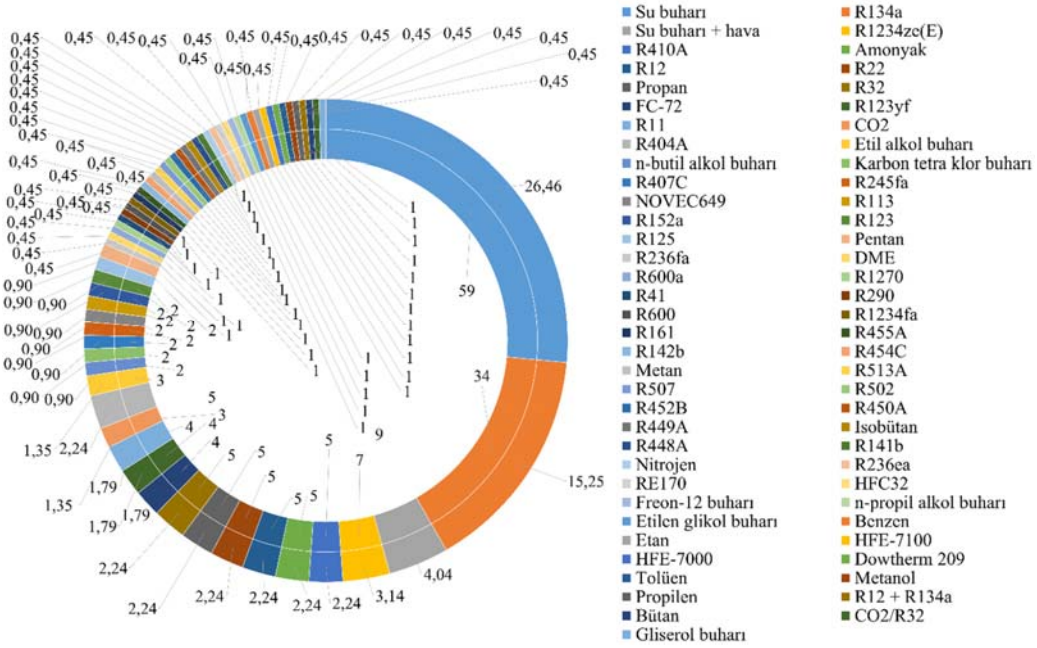
Şekil 15. Tablo 1'de özetlenen önceki araştırma makalelerinde incelenen geometrilerinin çeşidi ve yüzdelik dağılımları (Number and percentage distribution of the previous research studies briefed in Table 1 with respect to the examined geometries).

Son olarak; bu literatür araştırması çalışmasında yer alan araştırma makalelerinde, faz değişiminin (özel olarak yoğunlaşmanın) incelenen geometrinin dışında mı yoksa içinde mi gerçekleştiğine ilişkin istatistiksel analiz yine Tablo 1'den yararlanılarak Şekil 17'de verilmiştir. Şekil 17'den görüleceği üzere, bu çalışmaya konu olan araştırma makalelerinde en çok iç akış incelenmiş olup bunu dış akış takip etmektedir. Bununla birlikte bazı araştırma makalelerinde hem dış akış hem de iç akış incelenmiştir. Bu araştırma makalelerinin bazılarında özel olarak, incelenen geometrinin dışında yoğunlaşma gerçekleşirken içinde eş zamanlı olarak buharlaşmanın gerçekleştiği veya bunun tam tersi durumlar da yer almaktadır. Yine pratikte, bu durumların hepsiyle karşılaşılabilir. Şekil 10 ila Şekil 17'de yer alan ve incelenen çalışmaların; teorik, deneysel, nümerik, teorik ve/veya deneysel, deneysel ve/veya nümerik bir çalışma olduğu,

çalışmada incelenen geometri, inceleme konusu akışkan, çalışmanın doğal ve/veya zorlanmış taşınım içeren bir inceleme olduğu, incelenen akışın iç ve/veya dış akış olduğu, akışın laminar ve/veya türbülanslı akış olduğu ve incelemenin zamana bağlı olup olmadığı bilgisi, yoğunlaşma alanında çalışma yapacak araştırmacılara yol göstermek için verilmiştir.

4.2 Gözden Geçirilen Kaynaklarda Geliştirilen Korelasyonların Analizi (An Analysis of Correlations Developed in the Reviewed References)

Bu çalışmadaki istatistiksel analize ek olarak, incelenen çalışmalarda Nu sayısı ve h için geliştirilmiş korelasyonlar Tablo 1'deki sırasına göre Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'den de görüleceği gibi, 1959 ila



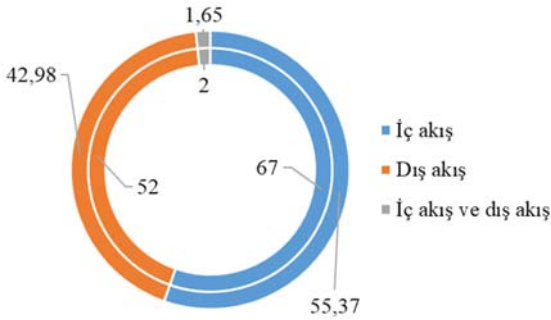
Şekil 16. Tablo 1'de özetlenen önceki araştırma makalelerinde incelenen akışkanların çeşidi ve yüzdelik dağılımları (Number and percentage distribution of the previous studies briefed in Table 1 with respect to the used fluid).

2023 tarih aralığını kapsayan toplam 28 korelasyondan 17 tanesi deneysel çalışmalarda, 11 tanesi ise teorik çalışmalarda elde edilmiştir. Su buharı, R134a ve R1234yf gibi çeşitli akışkanların; düşey levha, silindir ve küre gibi çeşitli geometrilerin yüzeyindeki ve çeşitli kanalların içerisindeki yoğunlaşmalarına yönelik geliştirilen bu korelasyonların yer aldığı Tablo 2; Re, Pr ve Gr sayısı, buhar kuruluk derecesi, kütle akı, sıcaklık ve basınca ilişkin kısıtlamalar ile birlikte literatürü genel olarak özetlemektedir. Böylece Tablo 2'nin, yoğunlaşma alanında çalışmalar gerçekleştirecek araştırmacılara yararlı olacağı düşünülmektedir.

HFC : Hidroflorokarbon
HFE : Hidrofloroeter
NH₃ : Amonyak
NTU : Geçiş birimi sayısı (UA/C_{min})
PVC : Polivinilklorür
VOF : Akışkan hacmi, m³

5.2. Semboller (Symbols)

A : Dikdörtgen kesitin kısa kenarı, m
B : Dikdörtgen kesitin uzun kenarı, m
Bi : Biot sayısı (hL/k_c)
Bo : Bond sayısı (q_w''/Gh_{sb})
Bta : Aşırı kızdırmaya ilişkin parametre
c : Özgül ısı, J/(kg·K)
C : Isıl kapasite, W/K; hacimsel derişiklik, kg-i/m³ veya mol-i/m³
CO₂ : Karbondioksit
Cta : Nemin yoğunlaşmasına ilişkin parametre
D : Çap, silindir çapı, m
D_{AB} : Kütle yayılım katsayısı, m²/s
D_h : Hidrolik çap, m
f : Sürtünme faktörü
f_D : Çap faktörü
Fr : Froude sayısı [$G/((\rho_b(\rho_s - \rho_b)gd)^{1/2})$]
F_{yg} : Yoğuşmayan gaz tarafından bozunma faktörü
g : Yer çekimi ivmesi, m/s²
g_o, g_c : İngiliz birim sisteminde g için düzeltme faktörü [$4,16 \cdot 10^3 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/(\text{lb}_f \cdot \text{hr}^2)$]
G : Kütle akı, kg/(m²·s)
Ga : Galileo sayısı ($g\rho_s^2 D^3 / \mu_s^2$)
G_{es} : Eşdeğer kütle akı, kg/(m²·s)
Gr : Alternatif Gr sayısı [$g(\rho_s, y - \rho_{b, \infty})L^3 / (v^2 \rho_s, d)$]
Gr : Grashof sayısı [$g\beta(T_y - T_\infty)L^3 / \nu^2$]
h : Isı taşınım katsayısı, W/(m²·K)
h_c : Karışımın özellikleri kullanılarak hesaplanan h, W/(m²·K)
h_L : Tüm akışkanın sıvı fazında aktığı kabulüyle h, W/(m²·K)
h_i : Yerel ısı taşınım katsayısı, W/(m²·K)



Şekil 17. Tablo 1'de özetlenen önceki araştırma makalelerinde incelenen akışın çeşidi ve yüzdelik dağılımları (Type and percentage distribution of the previous research studies briefed in Table 1 with respect to the flow).

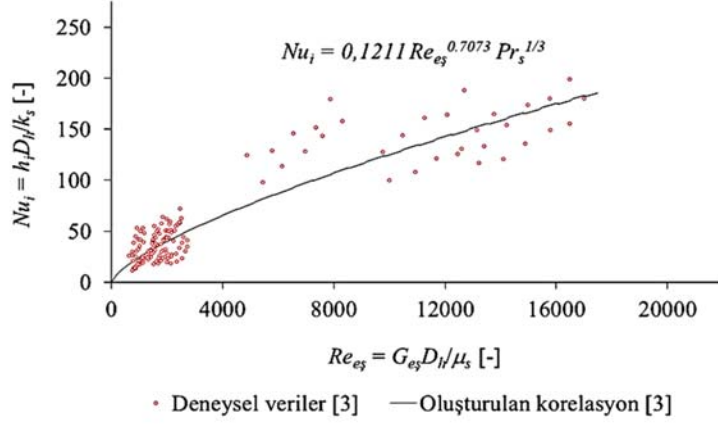
Tablo 2'de yer alan korelasyonların nasıl oluşturulduğuna ve literatürde yer alan bazı yaygın korelasyonlarla karşılaştırılmasına ilişkin örnek olması bakımından Şekil 18'deki grafikler verilmiştir.

5. Semboller (Symbols)

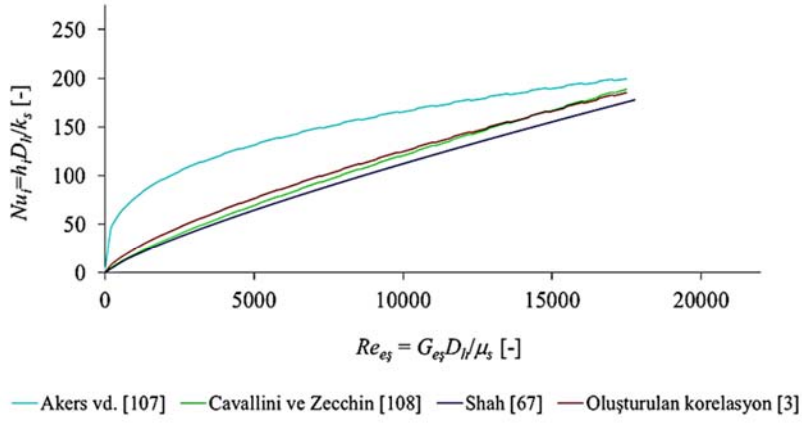
5.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

DME : Dimetileter
FC : Florokarbon

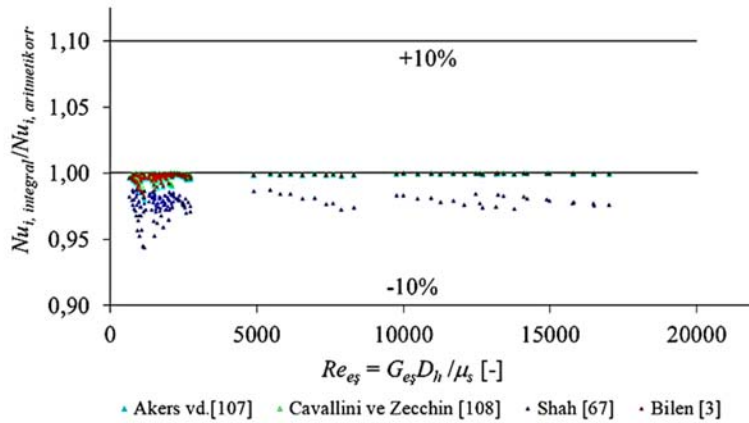
h_{sb} : Buharlaşma gizli ısısı, J/kg
 $h_{p,m}$: İki fazlı akışa ait ortalama ısı taşımın katsayısı, W/(m²·K)
 h'_{sb} : Düzeltmiř buharlaşma gizli ısısı, J/kg ($h_{sb} + c_p \Delta T$)
 H : Yükseklik, m
 Ja : Jacob sayısı [$c_{p,s}(T_d - T_y)/h_{sb} = Ph$]
 k : Isı iletim katsayısı, W/(m·K)



a) Deneysel veriler kullanılarak Nu sayısı için korelasyon oluşturulması (Forming correlation for Nu number using experimental data).



b) Nu sayısı korelasyonunun, literatürdeki yaygın korelasyonlarla karşılaştırılması. (Comparison of the Nu number correlation with widespread correlations in the literature).



c) Belirli bir kuruluk derecesi farkı için, $Nu_{integral}$ ve $Nu_{aritmetik, ort}$ sayılarının oranı (Ratio of the $Nu_{integral}$ and $Nu_{aritmetik, mean}$ numbers for a given difference in vapor quality).

şekil 18. Silindirik ve çok-girişli kanallardan elde edilen verilerle oluşturulan Nu sayısı korelasyonu, bu korelasyonun literatürle karşılaştırılması ve $Nu_{integral}$ ile $Nu_{aritmetik, ort}$ sayılarının oranı (Nu number correlation formed with data obtained from cylindrical and multi-port channels, comparison of this correlation with the literature, and ratio of $Nu_{integral}$ and $Nu_{arithmetic, mean}$ numbers) [3].

Tablo 2. 1959 ila 2023 yılları arasında yoğuşmanın incelendiği araştırma makalelerinde geliştirilen korelasyonlar
(Correlations developed in research papers examining condensation between 1959 and 2023).

Tablo 1'deki sıra no	Yazar(lar)	Yıl	Teorik/ Deneyisel	Korelasyon	Kısıtlama(lar)
21	Akers vd.	1959	Deneyisel	$Nu = \frac{hD_h}{k_s} = CRe_{es}^n Pr_s^{1/3}$ $Re_{es} > 5 \cdot 10^4 \text{ için } C = 0,0265, n = 0,8$ $Re_{es} < 5 \cdot 10^4 \text{ için } C = 5,03, n = \frac{1}{3}$ $Re_{es} = \frac{G_{es} D_h}{\mu_s} \text{ ve } G_{es} = G \left[(1-x) + x \left(\frac{\rho_s}{\rho_b} \right)^{1/2} \right]$ <p>Korelasyonu oluşturmada, sadece bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p>	<p>Yatay silindirik kanal</p> $8 \leq G \leq 438 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ $1,7 \leq G \leq 175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
22	Chen	1961	Teorik	$\frac{h_m}{h_{m,00}} = \left(\frac{1 + 0,68\zeta + 0,02\zeta\xi}{1 + 0,85\xi - 0,15\zeta\xi} \right)^{1/4}$ $\frac{\Gamma}{\Gamma_{00}} = \frac{h_m}{h_{m,00}} \cdot \frac{1}{(1 + 0,375\zeta + 0,020\zeta\xi - 0,0005\zeta\xi^2)}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	<p>Düşey levha</p> <p>$h_{m,00}$ ve Γ_{00}: $\zeta = 0$ ve $\xi = 0$'daki değerleri temsil eder.</p> $\zeta \leq 2, \xi \leq 20$ $Pr > 1$
23	Chen	1961	Teorik	$\frac{h_m^{(n)}}{h_{m,00}^{(1)}} n^{1/4} = [1 + 0,2\zeta(n-1)] \left(\frac{1 + 0,68\zeta + 0,02\zeta\xi}{1 + 0,95\xi - 0,15\zeta\xi} \right)^{1/4}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	<p>Yatay silindir yüzeyi</p> <p>Yatay silindir demeti</p> <p>Tek silindirik kanal: $\zeta \leq 2, \xi \leq 20$</p> <p>Çoklu silindirik kanal: $\xi \leq 0,1, \zeta(n-1) \leq 2$</p> $Pr > 1$
33	Soliman vd.	1968	Teorik	$\frac{h_z \mu_s}{k_s \rho_s^{1/2}} = 0,036 Pr_s^{0,65} \tau_0^{1/2}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p> $Nu = 0,81 \tau^{-0,193}$ $Nu = 0,69 \tau^{-0,20}$	<p>Eğimli silindirik kanal</p> $1 \leq Pr \leq 10$ $0,03 \leq x \leq 0,99$ $20 \leq v_b \leq 1000 \text{ fps}$
35	Rohsenow	1970	Teorik	$\tau = \frac{k \mu \Delta T}{(\rho - \rho_b) g \cos \theta h'_{sb} \left[\frac{g_0 \sigma}{g(\rho - \rho_b) \cos \theta} \right]^{3/2}}$ $Nu = \frac{0,90 \tau^{-1/6}}{1 + 1,1 \tau^{1/6}}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	<p>Düşey levha</p> <p>Düşey silindir</p> <p>Yatay silindir yüzeyi</p> <p>Düşey koni</p> <p>Dönel yatay disk</p> $\tau < 10^{-8} \text{ lb}_f/\text{ft}^2$ $10^{-6} > \tau < 10^{-8} \text{ lb}_f/\text{ft}^2$ $\theta < 15^\circ, \Delta T < 100^\circ \text{F}$ $k \Delta T \ll \mu h'_{sb}$
38	Cavallini ve Zecchin	1971	Deneyisel	$Nu = \frac{hD_h}{k_s} = 0,05 Re_{es}^{0,8} Pr_s^{0,33}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, hem bu çalışmada elde edilen veriler hem de literatürdeki veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	<p>Düşey silindir yüzeyi</p> $0,3 \leq x \leq 1$ $82 \leq G \leq 308 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
44	Shah	1979	Teorik	$\frac{h}{h_L} = (1-x)^{0,8} [1 + \Psi]$ $Z = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,8} \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{0,4}$ $\Psi = 1 + \frac{3,8}{Z^{0,95}}$ $h = h_L \left[(1-x)^{0,8} + \frac{3,8 x^{0,76} (1-x)^{0,04}}{(p/p_{cr})^{0,38}} \right]$ $\frac{h_L D}{k_s} = 0,023 Re_L^{0,8} Pr_s^{0,4}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, literatürdeki deneysel veriler kullanılmıştır.</p> <p>Korelasyonu oluşturmada, 473 adet veri kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	<p>Yatay silindirik kanal</p> <p>Eğimli silindirik kanal</p> <p>Düşey silindirik kanal</p> <p>Silindirik kanal: $Re_L > 350$</p> <p>Silindirik halkasal kanal: $Re_L > 3000$</p> $0,85 \leq x \leq 1$

			Düşey silindirik bir kanalın dışındaki yoğunlaşmada:	
			$Nu_D = \frac{hD}{k} \cong \frac{2 \left(1 + \frac{2}{3} K^{1/4}\right)^{1/4}}{\left\{1 - \frac{1}{2} \left[K / \left(1 + \frac{2}{3} K^{1/4}\right)\right]^{1/4}\right\} K^{1/4}}$	
47	Churchill	1986	Teorik	Düşey levha Düşey silindirik kanal $K > 30 \cdot 10^{-6}$ ya da $Nu_D < 22$ $K > 35 \cdot 10^6$ ya da $Nu_D < 26$
			Düşey silindirik bir kanalın içindeki yoğunlaşmada:	
			$Nu_D = \frac{hD}{k} \cong \frac{2 \left(1 - \frac{2}{3} K^{1/4}\right)^{1/4}}{\left\{1 + \frac{1}{2} \left[K / \left(1 - \frac{2}{3} K^{1/4}\right)\right]^{1/4}\right\} K^{1/4}}$	
			Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
61	Shang ve Wang	1997	Teorik	Düşey levha $5^\circ\text{C} \leq \Delta T_y \leq 100^\circ\text{C}$ $\Delta T_y = T_d - T_y$
			$Nu_{i,s,y} = - \left(\frac{1}{4} Gr_{i,s,d}\right)^{1/4} \left(\frac{d\theta_d}{d\eta_d}\right)_{\eta_d=0}$	
			Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
			$Nu = \frac{h_{tp} D}{k_s} = \frac{0,0994 C_1 Re_s^{C_2} Re_{es}^{1+0,875 C_1} Pr_s^{0,815}}{(1,58 \ln Re_{es} - 3,28) (2,58 \ln Re_{es} + 13,7 Pr_s^{2/3} - 19,1)}$	Düşey silindirik kanal Yatay silindirik kanal R11, R12, R22, R113 R125, R134a, R410a $10\,000 \leq Re_{es} \leq 188\,000$ $0,09 \leq x \leq 0,82$ $3,14 \leq D \leq 20\text{ mm}$
63	Moser vd.	1998	Teorik	
			$C_1 = 0,126 Pr_s^{-0,448}$ $C_2 = -0,113 Pr_s^{-0,563}$	
			Korelasyonu oluşturmada, literatürdeki deneysel veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 1197 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
			$Nu_i = \frac{h_a D_h}{k_s} = 4,118 Re_{es}^{0,4} Pr_s^{\frac{1}{3}}$	
			$f_{tp} Re^{0,4} Bo^{-0,5} \left(\frac{p_m}{p_{cr}}\right)^{-0,8} = 94,75 Re_{es}^{-0,0467}$	
68	Yan vd.	1999	Deneysel	Düşey silindirik kanal $p_{cr} = 4,064\text{ MPa}$ $T_d = 26,7^\circ\text{C}$ $0,08 \leq x \leq 0,8$
			$Re_{es} = \frac{G_{es} D_h}{\mu_s}, Bo = \frac{q_w''}{G_{hsb}}$	
			$G_{es} = G \left[1 - x_m + x_m \left(\frac{\rho_s}{\rho_b}\right)^{1/2}\right]$	
			Korelasyonu oluşturmada, sadece bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 126 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
			$h_2 = \frac{f_D}{(1-\alpha)} Re_2^{0,8} Pr_s^{0,4} \frac{k_s}{D}$	Düşey silindirik kanal Film tipi yoğunlaşma $2\,400 \leq Re_s \leq 18\,000$ $0,84 \leq Pr_s \leq 1,27$
69	Kim ve No	2000	Deneysel	
			$f_D = 0,0182 [1 - 0,24(1 - 4,47D^{0,5})]^4$	
			Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 107 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
			$U = \frac{G_h c_p}{Pr_h^{2/3}} (0,0185 - 3,467 \cdot 10^{-5} Re_h) (1 + 6,343 Cta)^{0,8} (1 - 0,75 Bta)^{0,65}$	
			$Re_h = \frac{G_h \delta_k}{\mu_h}, G_h = \frac{\dot{m}_h}{A_{hy}}$	
85	Zhao vd.	2003	Deneysel	Düşey silindirik kanal $Cta < 0,6$ $Bta < 0,45$
			$Cta = \frac{T_{h,g,yas} - T_{ref,d}}{T_{h,g,kr} - T_{ref,d}}, Bta = \frac{T_{ref,s} - T_{ref,d}}{T_{h,g,kr} - T_{ref,d}}$	
			Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 28 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
			$h_t = 0,79 \left[\frac{\rho_s (\rho_s - \rho_b) g k_s^3 h_{sb}}{\mu_s \Delta T D} \right]^{1/4}$	Düşey silindir yüzeyi $T_b = 39^\circ\text{C}$
87	Jung vd.	2004	Deneysel	
			Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	
			$\overline{Nu}_i = \frac{\bar{h}_i D_h}{k_s} = 0,1211 Re_{es}^{0,7073} Pr_s^{1/3}$	Düşey silindirik kanal ve düşey çok-girişli mini kanallar $280 \leq Re_s \leq 4\,424$ $3,55 \leq Pr_s \leq 3,63$ $0 \leq x \leq 1$ $13 \leq G \leq 236 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
98	Bilen ve Özgüç	2009	Deneysel	
			Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 140 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.	

104 Wang ve Rose	2011 Teorik	<p>Üçgen kesitli kanal için: $Nu = \left\{ \frac{8}{3} \left[\frac{2s^2}{b(b-s)} \right] \right\}^{1/4} \left(\frac{\rho h_{sb} \sigma b}{\mu k \Delta T} \right)^{1/4}$</p> <p>Kare kesitli kanal için: $Nu = \left\{ \frac{8}{3} \left[\frac{2\sqrt{3}s^2}{b(b-s)} \right] \right\}^{1/4} \left(\frac{\rho h_{sb} \sigma b}{\mu k \Delta T} \right)^{1/4}$</p> <p>Buradaki s ve b parametreleri, geometrik parametrelerdir. Korelasyonu oluşturmada, sadece bu teorik çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p> <p>$Nu_t = 25,084 Re_s^{0,258} Pr_s^{-0,495} p_r^{-0,288} \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0,266}$</p> <p>$h = \frac{Nu k_s}{d}, p_r = \frac{p_{cn}}{p_{cr}}$</p> <p>$\left(\frac{\Delta p}{L} \right)_{tpf} = \left(\frac{\Delta p}{L} \right)_s \left[0,003 p_r^{-4,72} E^{-0,992} + 143,74 \left(\frac{F^{0,671} H^{-0,019}}{We^{0,308}} \right) \right]$</p> <p>$E = (1-x)^2 + x^2 \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right) \left(\frac{f_{g,o}}{f_{s,o}} \right)$</p> <p>$F = x^{0,98} (1-x)^{0,24}$</p>	<p>Kare, üçgen ve dikdörtgen kesitli yatay kanallar</p> <p>$T_d = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$10 \leq G \leq 1300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$</p>
113 Bohdal vd.	2015 Deneysel	<p>$H = \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0,91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_s} \right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_s} \right)^{0,7}$</p> <p>$We = \frac{G^2 d}{\sigma \rho_g}$</p> <p>$f_t = 8 \left[\left(\frac{8}{Re_t} \right)^{12} \left\{ \left[2,457 \ln \left(\frac{Re_t}{7} \right) \right]^{0,97} + \left(\frac{37\,530}{Re_t} \right)^{16} \right\}^{-1,5} \right]^{1/12}$</p> <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır.</p> <p>$\left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_{cebrt} = \Phi_b^2 \left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_b =$</p> <p>$\left[x^{1,8} + (1-x)^{1,8} \frac{\rho_b f_{s,o}}{\rho_s f_{b,o}} + 0,65 x^{0,68} (1-x)^{0,43} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s} \right)^{0,75} \right] \left(\frac{2 f_{b,o} G^2}{D_h \rho_b} \right)$</p> <p>$f_{b,o} = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu_b} \right), Re_b = \frac{GD_h}{\mu_b} \leq 1\,500 \\ \frac{0,046}{\left(\frac{GD_h}{\mu_b} \right)^{0,2}}, Re_b = \frac{GD_h}{\mu_b} > 1\,500 \end{cases}$</p> <p>$f_{s,o} = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu_s} \right), Re_s = \frac{GD_h}{\mu_s} \leq 1\,500 \\ \frac{0,046}{\left(\frac{GD_h}{\mu_s} \right)^{0,2}}, Re_s = \frac{GD_h}{\mu_s} > 1\,500 \end{cases}$</p>	<p>Yatay silindirik kanal</p> <p>$20 \leq T_d \leq 40 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$100 \leq G \leq 1300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$</p>
115 Jige vd.	2016 Deneysel	<p>Dikdörtgen kesitli kanal için:</p> <p>$\lambda = 24(1 - 1,355\beta + 1,947\beta^2 - 1,701\beta^3 + 0,956\beta^4 - 0,254\beta^5)$</p> <p>$\beta = \frac{A}{B}$</p> <p>Dairesel kesitli kanal için: $\lambda=16$</p> <p>$Nu = \alpha Nu_D + (1 - \alpha) Nu_s$ Dairesel: $Nu_D = (Nu_{D,cebrt}^3 + Nu_{D,doğal}^3)^{1/3}$</p> <p>$Nu_{D,cebrt} = \frac{\Phi_{b,o}}{1-x} \sqrt{f_{b,o} \frac{\rho_s}{\rho_b} Re_s^{0,5} (0,6 + 0,06 Re_s^{0,4} Pr_s^{0,3})}$</p> <p>$\Phi_{b,o} = \sqrt{x^{1,8} + (1-x)^{1,8} \frac{\rho_b f_{s,o}}{\rho_s f_{b,o}} + 0,65 x^{0,68} (1-x)^{0,43} \left(\frac{\mu_s}{\mu_b} \right)^{1,25} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s} \right)^{0,75}}$</p> <p>$Nu_{D,doğal} = 0,51 \left[\frac{\rho_s h_{sb} \sigma D}{\mu_s k_s (T_d - T_y)} \right]$</p> <p>$Nu_s = \begin{cases} \frac{\left(\frac{f_{s,o}}{Z} \right) (Re_s - 1\,000) Pr_s}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{f_{s,o}}{Z}} (Pr_s^{2/3} - 1)}, Re_s \geq 2\,000 \\ 8,23(1 - 1,981\beta + 2,220\beta^2 - 0,894\beta^3), Re_s < 2\,000 \end{cases}$</p> <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır.</p> <p>Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır.</p>	<p>Dikdörtgen kesitli yatay kanal</p> <p>$T_d = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ ve</p> <p>$T_d = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$0,05 \leq x \leq 0,92$</p> <p>$100 \leq G \leq 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$</p>

116	Rahman vd. 2018	Deneyssel	$h_{tp} = Re_s^{0,11} Pr_s^{0,45} \left(\frac{p}{p_{cr}}\right)^{0,1} \left(\frac{x}{1-x}\right)^{0,09} \frac{\phi_b k_s}{X_{tt} d_h}$ $\phi_b^2 = 1 + CX_{tt} + X_{tt}^2$ $X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_s}{\mu_b}\right)^{0,1}$ $C = \lambda x^{0,35} (1-x)^{0,25} \left(\frac{p}{p_{cr}}\right)^{0,31} Re_{tp}^{0,09} We_{tp}^{0,09}$ <p>Dikdörtgen kesitli kanal için: $\lambda = 24(1 - 1,355\beta + 1,947\beta^2 - 1,701\beta^3 + 0,956\beta^4 - 0,254\beta^5)$, $\beta = A/B$ Dairesel kesitli kanal için: $\lambda=16$</p> $We_{tp} = \frac{g^2 d_h}{\rho_{tp} \sigma^2}, Re_{tp} = \frac{g d_h}{\mu_{tp}} \frac{1}{\mu_b} + \frac{1-x}{\mu_s} \frac{1}{\rho_{tp}} = \frac{x}{\rho_b} + \frac{1-x}{\rho_s}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 213 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p> $Nu = 0,0841 \frac{Pr_s Re_s^{1,349}}{T^+} F^{1,263}$ $F = \left(\frac{f_b}{8}\right)^{0,8} \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_b}\right)^{0,5} (1 + 2,85X^{0,523})$ $T^+ = \begin{cases} 0,707 Pr_s Re_s^{0,5} & Re_s < 50 \\ 5 Pr_s + 5 \ln[1 + Pr_s(0,09636 Re_s^{0,585} - 1)] & 50 < Re_s < 1125 \\ 5 Pr_s + 5 \ln(1 + 5 Pr_s) + 2,5 \ln(0,00313 Re_s^{0,812}) & Re_s > 1125 \end{cases}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	Dikdörtgen kesitli yatay kanal $20 \leq T_d \leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ $0,1 \leq x \leq 0,2$ $50 \leq G \leq 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
119	Murphy vd. 2019	Deneyssel	$Nu_L = 0,38 Re^{0,81} Ku^{0,47} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)^{-0,15}$ $Ku = \frac{q'' \rho_s}{r \rho_b G}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p> $Nu = (Nu_{cebrl}^2 + Nu_{dogal}^2)^{1/2}$ $Nu_{cebrl} = 0,38 \sqrt{f_b} \frac{\phi_b}{X_{tt}} \left(\frac{\mu_s}{\mu_b}\right) \left(\frac{x}{1-x}\right)^{0,1} Re_s^{0,9}$ $Nu_{dogal} = 0,35 Bo^{0,15} H(\alpha) \left(\frac{Ga Pr_s}{Ph_s}\right)^{0,25}$ $\phi_b^2 = 1 + CX_{tt}^n + X_{tt}^2$ $C = 21[1 - \exp(-0,28Bo^{0,5})][1 - 0,45 \exp(-0,02Fr^{1,2})]$ $n = [1 - 0,87 \exp(-0,001Fr)] Bo$ $X_n = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_s / \left(\frac{\Delta p}{\Delta z}\right)_b} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_s}{\mu_b}\right)^{0,1}$ $H(\alpha) = \alpha + [10(1-\alpha)^{0,1} - 8,9] \sqrt{\alpha(1-\sqrt{\alpha})}$ $\alpha = \left[1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \left(0,4 + 0,6 \sqrt{\frac{\rho_s + 0,4 \frac{1-x}{x}}{\rho_b + 0,4 \frac{1-x}{x}}}\right)\right]^{-1}$ $f_b = \frac{0,046}{Re_b^{0,2}}, Bo = \frac{g D_g^2 (\rho_s - \rho_b)}{\sigma}, Fr = \frac{G}{\sqrt{\rho_b (\rho_s - \rho_b) g D_g}}, Re_b = \frac{G D_g x}{\mu_b}$ $Re_s = \frac{G D_g (1-x)}{\mu_s}, Ga = \frac{g \rho_s^2 D_g^3}{\mu_s^2}, Pr_s = \frac{c_p \mu_s}{k_s}, Nu = \frac{h D_g}{k_s}$ $Ph_s = \frac{c_{p,s} (T_d - T_y)}{h_{s,b}} = Ja$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada ve literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 334 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	Düşey silindirik kanal $T_d = 47 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_d = 74 \text{ }^\circ\text{C}$ $75 \leq G \leq 150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ Düşey silindirik kanal $500 \leq q'' \leq 35\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ $100 \leq G \leq 1\,100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ $0,001 \leq Ku \leq 0,07$
121	Bohdal ve Kruzal	2020 Deneyssel	$Nu = 0,0815 Re_s^{0,73} Pr_s^{0,93} \left(\frac{1}{\beta}\right)^{0,05} \left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^{0,68}$ $\beta = W/H$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 384 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	Yatay silindirik kanal ve mikro kanatçıklı yatay silindirik kanal $1 \cdot 10^2 \leq Re_s \leq 1 \cdot 10^4$ $3 \leq Pr_s \leq 5$ $0,05 \leq x \leq 0,98$ $50 \leq G \leq 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
122	2020 Deneyssel		$Nu = 0,0815 Re_s^{0,73} Pr_s^{0,93} \left(\frac{1}{\beta}\right)^{0,05} \left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^{0,68}$ $\beta = W/H$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 384 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmamıştır.</p>	Dikdörtgen kesitli yatay kanal $T_d = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $T_d = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ $0,05 \leq x \leq 0,83$ $200 \leq G \leq 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
129	Singh vd. 2022	Deneyssel		

130	Ahn vd.	2022	DeneySEL	$\bar{h} = \frac{\bar{h}_{b,o,\text{üst}} F_{yg} (\pi - \theta_H) + \bar{h}_{b,o,\text{alt}} \theta_H}{\pi}$ $F_{yg} = \frac{h}{h_{b,o}} = \frac{1}{\exp \left[C_1 \left(\frac{w_h}{1-w_h} \right)^{C_2} Re_k^{C_3} Re_s^{C_4} Pr_b^{C_5} \right]}$ $Re_{k(i)} = \frac{4(\dot{m}_h + \dot{m}_{s,g} x(i))}{\pi D \mu_{k(i)}}$ $Re_{s(i)} = \frac{4\dot{m}_{s,g}(1-x(i))}{\pi D \mu_{s(i)}}$ <p>$C_1 = 5,4, C_2 = 0,36, C_3 = -0,36, C_4 = 0,26, C_5 = -0,18$ Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır.</p>	Eğimli silindirik kanal $6\,500 \leq Re_k \leq 166\,000$ $0,1 \leq p \leq 0,5$ MPa $10 \leq G_{b,g} \leq 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
131	Shah	2022	Teorik	$\frac{1}{h_k} = \frac{1}{h_c} + \frac{Y_b}{h_{b,o}}$ $Y_b = x c_{p,b} \frac{d(T_{cn} - T_{kn})}{dT}$ $h_{b,o} = 0,023 \left(\frac{Gx D}{\mu_b} \right)^{0,8} Pr_b^{0,4} \frac{k_s}{D}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, literatürde yer alan hem teorik hem de deneysel olarak elde edilen veriler kullanılmıştır. Korelasyonu oluşturmada, 2931 adet veri kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır.</p>	Yatay silindirik kanal Kare kesitli yatay kanal Dikdörtgen kesitli yatay kanal Yarım daire kesitli yatay kanal Üçgen kesitli yatay kanal Fıçı biçiminde yatay kanal Düşey silindirik kanal Kare kesitli düşey kanal Dikdörtgen kesitli düşey kanal Yarım daire kesitli düşey kanal Üçgen kesitli düşey kanal Fıçı biçiminde düşey kanal $0,0006 \leq p \leq 0,949$ MPa $1,1 \leq G \leq 1\,400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
132	Zhao vd.	2023	DeneySEL	$\frac{h}{h_{tc}} = \frac{0,097 - 0,505 \ln(C_h + 0,15)}{\Delta T^{(0,576 - 0,0578p)}}$ <p>$\Delta T = T_d - T_y$ Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır.</p>	Düşey levha $5,03 \leq \Delta T \leq 28,69$ °C $1 \leq v \leq 3$ m/s $29,6 \leq C_h \leq 70,4\%$
133	Wang vd.	2023	Teorik	$h_{r,L} = 0,4035 D_{A,B}^{2/3} \left(\frac{\rho_{b,\infty} - \rho_{b,y}}{w_{b,\infty} - w_{b,y}} \right) \left(\frac{\rho_{k,y} - \rho_{k,\infty}}{\mu_k} \right) \frac{h_{sb}}{(T_\infty - T_y)} \ln \left(\frac{1 - w_{b,y}}{1 - w_{b,\infty}} \right) \eta_c$ $\eta_c = \begin{cases} \text{Düzlemsel levha için} & 1,0 \\ \text{Dairesel kesitli kanal için} & \frac{Nu_D}{Nu_L} \end{cases}$ <p>Korelasyonu oluşturmada, bu deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılmıştır. Literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırma yapılmıştır.</p>	Düşey levha $5 \leq \Delta T \leq 109$ K $\Delta T = T_d - T_y$ $0,1 \leq p_r \leq 2$ MPa $0,10 \leq w_{yg} \leq 0,90$

Ku	: Kutateladze sayısı [$q\rho_s/(r\rho_b G)$]
L	: Efektif ısı geçiş uzunluğu, kanal uzunluğu, uzunluk, m
\dot{m}	: Kütleli debi, kg/s
Nu	: Nusselt sayısı (hD/k_a veya hL/k_a)
p	: Basınç, Pa
Ph	: Faz değişim sayısı [$c_{p,s}(T_d - T_y)/h_{sb} = Ja$]
Pr	: Prandtl sayısı ($\nu/\alpha = \mu c_p/k$)
q	: Isı geçişi, W
q''	: Isı akısı, W/m ²
R	: Silindir yarıçapı, m
Re	: Reynolds sayısı ($\nu D/\nu$, $\nu L/\nu$, $\rho \nu D/\mu$ veya $\rho \nu L/\mu$)
t	: Zaman, s
T	: Sıcaklık, K, °C veya °F
U	: Toplam ısı geçiş katsayısı, W/(m ² ·K)
v	: Hız, m/s
w	: Bileşenlerin karışımdaki kütleli oranı, kg-bileşen/kg-karışım
W	: Genişlik, kalınlık, m
We	: Weber sayısı [$G^2 d/(\sigma \rho_g)$]
x	: Kuruluk derecesi (buhar kalitesi)
X	: Martinelli parametresi
X _{tt}	: Lockhart-Martinelli parametresi
z	: Eksenel koordinat, yoğunlaşma yönündeki konum, m
Z	: Korelasyon parametresi

5.3. Alt indisler (Subscripts)

a	: Akışkan
b	: Buhar
b, o	: Tüm akışın buhar olması kabulüyle
c	: Cisim
cr	: Kritik
ç	: Çıkış
çn	: Çiğ noktası
d	: Dış, doyma
D	: Dairesel
e	: Etkin
eş	: Eşdeğer
g	: Gaz, giriş
g, o	: Tüm akışın gaz olması kabulüyle
h	: Hava
i	: İç
k	: Karışım
kn	: Kaynama noktası
kr	: Kuru
l	: Lokal (yerel, yersel)
L	: Düzlem levha
min	: Minimum
öy	: Ön yüzey
p	: Sabit basınçta

r	: İndirgenmiş
s	: Sıvı, sürtünme
s, o	: Tüm akışın sıvı olması kabulüyle
ss	: Kararlı hal (sürekli rejim)
S	: Dalgalı akış
t	: Tahmini
T	: Toplam
$tç$: Teorik çözüm
tp	: İki fazlı
tpf	: İki fazlı akış
tt	: Türbülans sıvı-türbülans buhar
y	: Yüzey
$yaş$: Yaş
z	: Eksenel koordinat, yoğunlaşma yönündeki konum, m
0	: Cidar, yüzey
00	: Isıl kapasite ve ivmelenmenin ihmal edildiği durum
2	: Akış rejimi çeşidi
∞	: Serbest akım bölgesi

5.4. Üst indisler (Superscripts)

(n)	: Yatay boru demetinin düşey bir sırasına ait
\cdot	: Birim zamanda
$-$: Ortalama
$+$: Boyutsuz

5.5. Yunan harfleri (Greek letters)

α	: Boşluk oranı
β	: Kesitin kenarlarının oranı
Γ	: Birim genişlikten geçen sıvı debisi, kg/(m.s)
δ	: Sıvı filmi kalınlığı, m
δ_g	: Gözenekli ortamdaki sıvı filmi kalınlığı, m
δ_k	: Kanatçık aralığı, m
Δ	: Fark
ζ	: Isıl kapasite parametresi
η	: Sınır tabaka için boyutsuz koordinat
η_c	: Yoğuşturucu eğriliği için düzeltme faktörü
θ	: Yatay ile yapılan açı, °
θ_H	: Isı geçişine dâhil olan kısım, rad
μ	: Dinamik viskozite, Pa.s
ν	: Kinematik viskozite, m ² /s
ξ	: İvmelenme parametresi
λ	: Kanal geometrisine ilişkin sabit
ρ	: Yoğunluk, kg/m ³
σ	: Yüzey gerilimi, N/m
τ	: Kayma gerilmesi, Pa
ϕ, Φ	: İki fazlı akışta sürtünme temelli basınç düşüşü çarpanı
χ_C	: Yoğuşma katsayısı
χ_E	: Buharlaşma katsayısı

6. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Isıtma ve soğutma sistemlerinde, faz değişimi halinde, faz değişimi olmaması haline göre daha fazla ısı geçişinin gerçekleşmesi, araştırmacıları buharlaşma ve yoğunlaşma alanlarında çalışma yapmaya sevk etmiştir. Teknolojik gelişmeler ise faz değişiminin; düzlem yüzeylerden eğrisel yüzeylere, geniş kanallardan mikro kanallara kadar birçok geometride meydana gelmesi zorunluluğuna yol açmıştır. Bu nedenle bu çalışmada; çeşitli akışkanların farklı geometrilerde yoğunlaşmasını konu alan bazı kitaplar, teknik not,

literatür araştırma makaleleri ve araştırma makaleleri gözden geçirilmiştir.

Bu literatür araştırma çalışması kapsamında; Nusselt'in yoğunlaşma ile ilgili 1916 yılında yapmış olduğu öncü çalışmadan [1], günümüze kadar yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve bu alandaki araştırmaların zaman içerisinde gelişimi sistematik bir şekilde sunulmuştur. Bu bağlamda; düşey düzlemsel bir levha üzerinde durgun ve saf bir buharın laminar film yoğunlaşmasından, çok-girişli kanallarda yoğunlaşmaya; geçici rejimde gerçekleşen yoğunlaşmadan, yoğunlaşma esnasında akış görselleştirmeye kadar geniş bir yayın yelpazesi gözden geçirilerek kapsamlı bilgiler sunulmuştur. Buna göre; bu çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalardan farkı ve çalışma kapsamında konu ile ilgili incelenen kaynaklar, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bu literatür araştırması çalışması, önceki literatür araştırması makaleleriyle karşılaştırıldığında, içeriği ve yararlanılan kaynak sayısı bakımından farklılık gösterdiği söylenebilir. Bu bağlamda bu çalışmada; 11 adet literatür araştırması makalesi, 3 adet kitap, 1 adet teknik not, ve 119 adet araştırma makalesi gözden geçirilmiş ve çalışma, literatürde yer almayan çeşitli grafiklerle zenginleştirilmiştir.
- İncelenen çalışmaların %11,19'unun yani 10 tanesinin son üç yılda yayımlanmasına karşılık, %12,69'u 2000'li yılların başında yani 2001, 2002 ve 2003 yıllarında yayımlanmıştır.
- Literatürde yoğunlaşma üzerine çoğunlukla teorik çalışmalar yer almakta olup bu teorik çalışmaların, incelenen toplam çalışmalar içerisinde oranı %54,62'dir. Konu ile ilgili deneysel çalışmaların oranı ise %39,50 olup hem teorik hem de deneysel içerikli çalışmalar, %5,88'lik bir orana sahiptir.
- Gözden geçirilen araştırma makaleleri içerisinde ilk sırada %23,56'lık paya sahip olan düşey düzlemsel yüzeyler yer alırken bunu sırasıyla, %14,94 ile düşey silindirik kanal ve %13,22 ile yatay silindirik kanal takip etmektedir.
- İncelenen araştırma makalelerinde en çok tercih edilen akışkan, %26,46'lık paya sahip su buharı olup bunu sırasıyla, %15,25 ile R134a ve %4,04 ile su buharı + hava takip etmektedir.
- Yine, incelenen araştırma makalelerinde; %55,37 oranında iç akış çalışılmışken bunu %42,98 ile dış akış takip etmektedir. Geriye kalan çalışmalarda ise hem iç akış hem de dış akış çalışılmıştır.

Bu çalışmada edinilen bilgilerden hareketle, ileride yoğunlaşma alanında çalışmalar yapacak araştırmacılar için aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Literatürde yer alan deneysel çalışmalardan hareketle yoğunlaşma için günümüzün gelişmiş analiz programlarında çeşitli modellerin oluşturulması ve bu modellerin geçerliliği kanıtlandıktan sonra yeni deneysel çalışmalara ihtiyaç olmadan muhtelif durumların bu programlarda simülasyonunun yapılması, hem maliyet hem de zaman bakımından çok yararlı olacaktır.
- Günümüzde geliştirilen yeni akışkanlar göz önünde bulundurularak bu yeni akışkanların veya nano-akışkanların yoğunlaşmasının özellikle deneysel olarak incelenmesi faydalı olacaktır.
- Pratikte kullanılan ve literatürde yer almayan çeşitli yüzeylerin üzerinde veya çeşitli kanalların dışında ve/veya içinde gerçekleşen yoğunlaşmanın hem teorik hem de deneysel olarak çalışılması yararlı olacaktır.
- Literatürde yer alan ve saf buharın, çeşitli geometrilerin dışında yoğunlaşmasını inceleyen tüm deneysel çalışmalardan hareketle ortalama ısı taşınım katsayısı için genel bir korelasyon oluşturulması, benzer şekilde yine saf buharın, çeşitli geometrilerin içinde yoğunlaşmasını inceleyen tüm deneysel çalışmalardan hareketle yine ortalama ısı taşınım katsayısı için genel bir korelasyon oluşturulması yararlı olacaktır.

- Literatürde yer alan ve yoğunlaşmayan bir gazın varlığındaki saf buharın, çeşitli geometrilerin dışında yoğunlaşmasını inceleyen tüm deneysel çalışmalardan hareketle ortalama ısı taşınım katsayısı için genel bir korelasyon oluşturulması, benzer şekilde yine yoğunlaşmayan bir gazın varlığındaki saf buharın, çeşitli geometrilerin içinde yoğunlaşmasını inceleyen tüm deneysel çalışmalardan hareketle yine ortalama ısı taşınım katsayısı için genel bir korelasyon oluşturulması yararlı olacaktır.

Kaynaklar (References)

- Nusselt W., Surface condensation of water vapour, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 60 (27), 541-546, 1916.
- Onbaşıoğlu S.U., Soğutucu üretiminde mikro kanal teknolojisine doğru, *Termodinamik (Aylık Bilimsel Sektör Dergisi)*, Yıl:12, Sayı:133, 88-97, 2003.
- Bilen K., Dar Kanallarda Yoğuşma, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- Cavallini A., Censi G., Del Col D., Doretti L., Longo G. A., Rossetto L., Zilio C., Condensation inside and outside smooth and enhanced tubes – a review of recent research, *International Journal of Refrigeration*, 26 (4), 373-392, 2003.
- Awad M.M., Dalkılıç A.S., Wongwises S., A critical review on condensation heat transfer in microchannels and minichannels, *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 5 (1), 010904, 25, 2014.
- Kim S-M., Mudawar I., Review of databases and predictive methods for pressure drop in adiabatic, condensing and boiling mini/micro-channel flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 74-97, 2014.
- Kim S-M., Mudawar I., Review of databases and predictive methods for heat transfer in condensing and boiling mini/micro-channel flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 627-652, 2014.
- Yun J.H., Jeong J.H., A review of prediction methods for two-phase pressure loss in mini/micro-channels, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 24 (1), 1630002, 21, 2016.
- Kharangate C.R., Mudawar I., Review of computational studies on boiling and condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108 (A), 1164-1196, 2017.
- Rifert V., Sereda V., Gorin V., Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of experimental research, *Heat Mass Transfer*, 56, 691-713, 2019.
- El-Fil B., Kini G., Garimella S., A review of dropwise condensation: Theory, modeling, experiments, and applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160, 120172, 21, 2020.
- Keniar K., El Fil B., Garimella S., A critical review of analytical and numerical models of condensation in microchannels, *International Journal of Refrigeration*, 120, 314-330, 2020.
- El-Kadi K., Alnaimat F., Sherif S.A., Recent advances in condensation heat transfer in mini and micro channels: A comprehensive review, *Applied Thermal Engineering*, 197, 117412, 27, 2021.
- Dorao C.A., Bernardino M., The heat transfer coefficient similarity between binary and single component flow condensation inside plain pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186, 122450, 10, 2022.
- Carey V.P., *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., 1992.
- Collier J.G., *Convective Boiling and Condensation*, McGraw-Hill Inc., Great Britain, 1981,
- Kakaç S., *Boilers, Evaporators, and Condensers*, John Wiley & Sons Inc., United States of America, 1991.
- Rohsenow W.M., Heat transfer and temperature distribution in laminar-film condensation, *Journal of Fluids Engineering*, 78 (8), 1645-1648, 1956.
- Rohsenow W.M., Webber J.H., Ling A.T., Effect of vapor velocity on laminar and turbulent-film condensation, *Journal of Fluids Engineering*, 78 (8), 1637-1644, 1956.
- Mills A.F., Seban R.A., The condensation coefficient of water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10, 1815-1827, 1967.
- Marek R., Straub J., Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 39-53, 2001.
- Rohsenow W.M., Film condensation, *Applied Mechanics Reviews*, 23, 487-496, 1970.
- Churchill S.W., Laminar film condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29, 1219-1226, 1986.
- Sadasivan P., Lienhard J.H., Sensible heat correction in laminar film boiling and condensation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 545-547, 1987.
- Winterton R.H.S., Simple theory for laminar natural convection heat transfer (and film boiling and film condensation) or where do the Nusselt and Rayleigh numbers come from, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 30 (1), 1-7, 2002.
- Vargas J.V.C., Bejan A., Optimisation of film condensation with periodic wall cleaning, *International Journal of Thermal Sciences*, 38, 113-120, 1999.
- Beceran K., Kılıç A., Theoretical analysis of two-phase closed thermosyphon, *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, 48, 37-46, 1995.
- Chen S., Yang Z., Duan Y., Chen Y., Wu D., Simulation of condensation flow in a rectangular microchannel, *Chemical Engineering and Processing*, 76, 60-69, 2014.
- Su Q., Xu Y.G., Sheng W.H., Rose J.W., Microchannel condensation: correlations and theory, *International Journal of Refrigeration*, 32, 1149-1152, 2009.
- Wang H.S., Rose, J.W., Theory of heat transfer during condensation in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2525-2534, 2011.
- Shang D.-Y., Wang B., An extended study on steady-state laminar film condensation of a superheated vapor on an isothermal vertical plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (4), 931-941, 1997.
- Poots G., Miles R.G., Effects of variable physical properties on laminar film condensation of saturated steam on a vertical flat plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10, 1677-1692, 1967.
- Stuhltrager E., Miyara A., Uehara H., Flow dynamics and heat transfer of a condensate film on a vertical wall - II. Flow dynamics and heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (15), 2715-2722, 1995.
- Stuhltrager E., Naridomi Y., Miyara A., Uehara H., Flow dynamics and heat transfer of a condensate film on a vertical wall - I. Numerical analysis and flow dynamics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36 (6), 1677-1686, 1993.
- Chen M.M., An analytical study of laminar film condensation: Part I-Flat plates, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 48-54., 1961.
- Koh J.C.Y., Sparrow E.M., Hartnett J.P., The two phase boundary layer in laminar film condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2, 69-82, 1961.
- Koh J.C.Y., An integral treatment of two-phase boundary layer in film condensation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 83 (3), 359-362, 1961.
- Sparrow E.M., Gregg J.L., A boundary-layer treatment of laminar film condensation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 81 (1), 13-18, 1959.
- Yang K.-T., Laminar film condensation on a vertical nonisothermal plate, *Journal of Applied Mechanics*, 33 (1), 203-205, 1966.
- Brouwers H.J.H., Film condensation on non-isothermal vertical plates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32 (4), 655-663, 1989.
- Park S.K., Kim M.H., Yoo K.J., Condensation of pure steam and steam-air mixture with surface waves of condensate film on a vertical wall, *International Journal of Multiphase Flow*, 22 (5), 893-908, 1996.
- Slegers L., Seban R.A., Laminar film condensation of steam containing small concentrations of air, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 13, 1941-1947, 1970.
- Denny V.E., Jusonius V.J., Effects of noncondensable gas and forced flow on laminar film condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 315-326, 1972.
- Al-Diwany H.K., Rose J.W., Free convection film condensation of steam in the presence of non-condensing gases, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16, 1359-1369, 1973.
- Sparrow E.M., Lin S.H., Condensation heat transfer in the presence of a noncondensable gas, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 86 (3), 430-436, 1964.
- Minkowycz W.J., Sparrow E.M., Condensation heat transfer in the presence of noncondensables, Interfacial resistance, superheating, variable properties, and diffusion, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 9, 1125-1144, 1966.
- Denny V.E., Mills A.F., Nonsimilar solutions for laminar film condensation on a vertical surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12, 965-979, 1969.

48. Miyara A., Flow dynamics and heat transfer of wavy condensate film, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 492-500, 2001.
49. Marshall E., Lee C.Y., Stability of condensate flow down a vertical wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16, 41-48, 1973.
50. Ünsal M., Thomas W.C., Linearized stability analysis of film condensation, *ASME Journal of Heat Transfer*, 100, 629-634, 1978.
51. Ünsal M., Thomas W.C., Nonlinear stability of film condensation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 483-488, 1980.
52. Al-Nimr M.A., AlKam M.K., Film condensation on a vertical plate imbedded in a porous medium, *Applied Energy*, 56 (1), 47-57, 1997.
53. Kutateladze S.S., Gogonin I.I., Heat transfer in film condensation of slowly moving vapour, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22, 1593-1599, 1979.
54. Xu H., You X.-C., Pop I., Analytical approximation for laminar film condensation of saturated stream on an isothermal vertical plate, *Applied Mathematical Modelling*, 32 (5), 738-748, 2008.
55. Wang T., Tong L., Cao X., A universal correlation development for film-wise condensation in the presence of non-condensable gases on vertical walls under turbulent free convection, *Annals of Nuclear Energy*, 187, 109789, 2023.
56. Zhao Y., Diao H., Tian M., Xie L., Ge M., Wang Y., Wang S., Condensation characteristics of air-water vapor mixture on the surface of vertical flat plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 210, 124185, 2023.
57. Chou G.-H., Chen J.-C., A general modeling for heat transfer during reflux condensation inside vertical tubes surrounded by isothermal fluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2299-2311, 1999.
58. Kim S.J., No H.C., Turbulent film condensation of high pressure steam in a vertical tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 4031-4042, 2000.
59. Sun G., Hewitt G.F., Evaporation and condensation of steam-water in a vertical tube, *Nuclear Engineering and Design*, 207, 137-145, 2001.
60. Thumm S., Philipp C., Gross U., Film condensation of water in a vertical tube with countercurrent vapour flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 4245-4256, 2001.
61. Pan Y., Condensation characteristics inside a vertical tube considering the presence of mass transfer, vapor velocity and interfacial shear, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 4475-4482, 2001.
62. No H.C., Park H.S., Non-iterative condensation modeling for steam condensation with non-condensable gas in a vertical tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 845-854, 2002.
63. Park I.S., Choi D.H., Heat and mass transfer analysis for the condensing film flow along a vertical grooved tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 4277-4285, 2001.
64. Du X.-Z., Wang B.-X., Study on transport phenomena for flow film condensation in vertical mini-tube with interfacial waves, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2095-2101, 2003.
65. Seban R.A., Hodgson J.A., Laminar film condensation in a tube with upward vapor flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25 (9), 1291-1300, 1982.
66. Fiedler S., Auracher H., Pressure drop during reflux condensation of R134a in a small diameter tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 139-144, 2004.
67. Shah M.M., A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22, 547-556, 1979.
68. Wang B.-X., Du X.-Z., Study on laminar film-wise condensation for vapor flow in an inclined small/mini-diameter tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 1859-1868, 2000.
69. Du X.Z., Zhao T.S., Analysis of film condensation heat transfer inside a vertical micro tube with consideration of the meniscus draining effect, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 4669-4679, 2003.
70. Rufer C.E., Kezios S.P., Analysis of two-phase, one-component stratified flow with condensation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 88 (3), 265-275, 1966.
71. Soliman M., Schuster J.R., Berenson P.J., A general heat transfer correlation for annular flow condensation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 90 (2), 267-276, 1968.
72. Jung D., Chae S., Bae D., Oho S., Condensation heat transfer coefficients of flammable refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, 27, 314-317, 2004.
73. Bilen K., Özgüç A.F., Düşey dar kanallarda R134a akışkanının yoğunlaşmasının deneysel incelenmesi, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik Serisi*, 8 (1), 51-60, 2009.
74. Bohdal T., Charun H., Sikora M., Empirical study of heterogeneous refrigerant condensation in pipe minichannels, *International Journal of Refrigeration*, 59, 210-223, 2015.
75. Da Riva E., Del Col D., Effect of gravity during condensation of R134a in a circular minichannel, *Microgravity Science and Technology*, 23, 87-97, 2011.
76. Da Riva E., Del Col D., Garimella S.V., Cavallini A., The importance of turbulence during condensation in a horizontal circular minichannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 3470-3481, 2012.
77. Garimella S., Agarwal A., Killion J.D., Condensation pressure drop in circular microchannels, *Heat Transfer Engineering*, 26 (3), 28-35, 2005.
78. Ji W., Numata M., He Y., Tao W., Nucleate pool boiling and filmwise condensation heat transfer of R134a on the same horizontal tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 744-754, 2015.
79. Kuczynski W., Charun H., Bohdal T., Influence of hydrodynamic instability on the heat transfer coefficient during condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe mini-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 1083-1094, 2012.
80. Matkovic M., Cavallini A., Del Col D., Rossetto L., Experimental study on condensation heat transfer inside a single circular minichannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 2311-2323, 2009.
81. Mederic B., Lavieille P., Miscevic M., Heat transfer analysis according to condensation flow structures in a minichannel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 785-793, 2006.
82. Mitrovic J., Condensation of pure refrigerants R12, R134a and their mixtures on a horizontal tube with capillary structure: An experimental study, *Forschung im Ingenieurwesen*, 64, 345-359, 1999.
83. Keniar K., Garimella S., Experimental investigation of refrigerant condensation in circular and square micro- and mini- channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 176, 121383 12, 2021.
84. Sikora M., Bohdal T., Heat and flow investigation of NOVEC649 refrigerant condensation in pipe minichannels, *Energy*, 209, 118447, 9, 2020.
85. Bohdal T., Kruzel M., Refrigerant condensation in vertical pipe minichannels under various heat flux density level, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118849, 10, 2020.
86. Wen J., Gu X., Liu Y., Wang S., Li Y., Effect of surface tension, gravity and turbulence on condensation patterns of R1234ze(E) in horizontal mini/macro-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 153-170, 2018.
87. Patel T., Parekh A., Tailor P., Experimental analysis of condensation heat transfer and frictional pressure drop in a horizontal circular mini channel, *Heat Mass Transfer*, 56, 1579-1600, 2020.
88. Chen M.M., An Analytical Study of Laminar Film Condensation: Part 2—Single and Multiple Horizontal Tubes, *ASME. J. Heat Transfer*, 83 (1), 55-60, 1961.
89. Hu H.-P., Mixed convection turbulent film condensation on a sphere, *Applied Mathematics and Computation*, 170 (2), 1194-1208, 2005.
90. Chang T.-B., Mixed-convection film condensation along outside surface of vertical tube in saturated vapor with forced flow, *Applied Thermal Engineering*, 28 (5-6), 547-555, 2008.
91. Zhao T.S., Liao Q., Theoretical analysis of film condensation heat transfer inside vertical mini triangular channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2829-2842, 2002.
92. Narain A., Yu G., Liu Q., Interfacial shear models and their required asymptotic form for annular/stratified film condensation flows in inclined channels and vertical pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (15), 3559-3575, 1997.
93. Panday P.K., Two-dimensional turbulent film condensation of vapours flowing inside a vertical tube and between parallel plates: A numerical approach, *International Journal of Refrigeration*, 26, 492-503, 2003.
94. Coleman J.W., Garimella S., Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2869-2881, 1999.
95. Coleman J.W., Garimella S., Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a, *International Journal of Refrigeration*, 26, 117-128, 2003.
96. Yan Y.-Y., Lio H.-C., Lin T.-F., Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R134a in a plate heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 993-1006, 1999.
97. Chen Y., Shi M., Cheng P., Peterson G.P., Condensation in microchannels, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 12 (2), 117-143, 2008.

98. Del Col D., Bortolin S., Cavallini A., Matkovic M., Effect of cross sectional shape during condensation in a single square minichannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 3909-3920, 2011.
99. Del Col D., Bortolato M., Azzolin M., Bortolin S., Effect of inclination during condensation inside a square cross section minichannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 760-777, 2014.
100. Derby M., Lee H.J., Peles Y., Jensen M.K., Condensation heat transfer in square, triangular, and semi-circular mini-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 187-197, 2012.
101. Ganapathy H., Shoostari A., Choo K., Dessiatoun S., Alshehhi M., Ohadi M., Volume of fluid-based numerical modeling of condensation heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 62-72, 2013.
102. Gu X., Wen J., Zhang X., Wang C., Wang S., Effect of tube shape on the condensation patterns of R1234ze(E) in horizontal mini-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 121-139, 2019.
103. Rahman M.M., Kariya K., Miyara A., An experimental study and development of new correlation for condensation heat transfer coefficient of refrigerant inside a multiport minichannel with and without fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 50-60, 2018.
104. Lei Y., Chen Z., Numerical study of condensation heat transfer in curved square and triangle microchannels, *Heat Transfer Engineering*, 41 (9-10), 768-778, 2020.
105. Peng Z.-R., Zheng Q.-Y., Zhang X.-R., Numerical study of condensation process in semi-circular mini-channels for the printed circuit heat exchanger, *Heat Transfer Engineering*, 43 (8-10), 785-793, 2022.
106. Li S., Zhao Z., Zhang Y., Xu H., Zeng W., Experimental and numerical analysis of condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R22 in minichannels of a printed circuit heat exchanger, *Energies*, 13 (24), 6589, 19, 2020.
107. Akers W.W., Deans H.A., Crosser O.K., Condensing heat transfer within horizontal tubes, *Chem. Engg. Progress Symposium Series No.*, 55 (29), 171-176, 1959.
108. Cavallini A., Zecchin R., High velocity condensation of R-11 vapor inside vertical tubes, *Heat Transfer*, 385-396, 1971.
109. Murphy D.L., Macdonald M.P., Mahvi A.J., Garimella S., Condensation of propane in vertical minichannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 1154-1166, 2019.
110. Bashar M.K., Nakamura K., Kariya K., Miyara A., Condensation heat transfer of R1234yf in a small diameter smooth and microfin tube and development of correlation, *International Journal of Refrigeration*, 120, 331-339, 2020.
111. Shah M.M., Improved correlation for heat transfer during condensation in mini and macro channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123069, 2022.
112. Ahn T., Moon J., Kang J., Jeong J.J., Yun B., Steam condensation in the presence of non-condensable gas inside a nearly horizontal tube under separated flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 197, 123351, 2022.
113. Wang P., Li M., Dai B., Wang Q., Ma Y., Dang C., Tian H., Experimental and analytical investigation of CO₂/R32 condensation heat transfer in a microchannel, *International Journal of Refrigeration*, 145, 338-352, 2023.
114. Moser K.W., Webb R.L., Na B., A New Equivalent Reynolds Number Model for Condensation in Smooth Tubes, *ASME. J. Heat Transfer*, 120 (2), 410-417, 1998.
115. Shin J.S., Kim M.H., An experimental study of condensation heat transfers inside a mini-channel with a new measurement technique, *International Journal of Multiphase Flow*, 30 (3), 311-325, 2004.
116. Wang H.S., Rose J.W., Film condensation in horizontal microchannels: Effect of channel shape, *International Journal of Thermal Sciences*, 45 (12), 1205-1212, 2006.
117. Stevanovic V.D., Stanojevic M., Radic D., Jovanovic M., Three-fluid model predictions of pressure changes in condensing vertical tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (15-16), 3736-3744, 2008.
118. Sarma P.K., Chary S.P., Rao V.D., Condensation on a vertical plate fin of variable thickness, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31 (9), 1941-1944, 1988.
119. Chen H.-T., Lan Z., Wang T., Study of conjugate conduction-laminar film condensation for a vertical plate fin, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37 (16), 2592-2597, 1994.
120. Chen H.-T., Chang S.-M., Lan Z., Effect of noncondensable gas on laminar film condensation along a vertical plate fin, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 19, 374-381, 1998.
121. Dhir V., Lienhard J., Laminar film condensation on plane and axisymmetric bodies in nonuniform gravity, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 93 (1), 97-100, 1971.
122. Zhang L., Xu B., Shi J., Chen Z., Experimental study on condensation heat transfer of FC-72 in a narrow rectangular channel with ellipse-shape pin fins: Ground and microgravity experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 1272-1287, 2019.
123. Yang C.-Y., Webb R. L., Condensation of R-12 in small hydraulic diameter extruded aluminum tubes with and without micro-fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (4), 791-800, 1996.
124. Yang C.-Y., Webb R. L., Friction pressure drop of R-12 in small hydraulic diameter extruded aluminum tubes with and without micro-fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (4), 801-809, 1996.
125. Koyama S., Kuwahara K., Nakashita K., Yamamoto K., An experimental study on condensation of refrigerant R134a in a multi-port extruded tube, *International Journal of Refrigeration*, 26 (4), 425-432, 2003.
126. Zhao Y., Ohadi M.M., Franca F.H.R., Experimental heat transfer coefficients of CO₂ in a microchannel evaporator, *ASHRAE Transactions, Symposia*, 533-541, 2003.
127. Illan-Gomez F., Lopez B.A., Garcia C.J.R., Vera G.F., Experimental two-phase heat transfer coefficient and frictional pressure drop inside mini-channel during condensation with R1234yf and R134a, *Elsevier Journal of Refrigeration*, 51, 12-23, 2014.
128. Jige D., Inoue N., Koyama S., Condensation of refrigerants in a multiport tube with rectangular minichannels, *International Journal of Refrigeration*, 67, 202-213, 2016.
129. Park J.E., Vakili-Farahani F., Consolini L., Thome J.R., Experimental study on condensation heat transfer in vertical minichannels for new refrigerant R1234ze(E) versus R134a and R236fa, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 442-454, 2011.
130. Sakamatapan K., Kaew-On J., Dalkılıç A.S., Mahian O., Wongwises S., Condensation heat transfer characteristics of R-134a flowing inside the multiport minichannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 976-985, 2013.
131. Wu H.Y., Cheng P., Condensation flow patterns in silicon microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2186-2197, 2005.
132. Singh V., Kukreja R., Sehgal S.S., Condensation heat transfer of R134a and R410A in multiport rectangular microchannels with different aspect ratio, *International Journal of Thermal Sciences*, 179, 107696, 2022.
133. Sparrow E.M., Siegel R., Transient film condensation, *Journal of Applied Mechanics*, 26 (1), 120-121, 1959.
134. Chung P.M., Unsteady laminar film condensation on vertical plate, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 85 (1), 63-70, 1963.
135. Trevino C., Mendez F., Transient conjugate condensation process on a vertical plate with finite thermal inertia, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (11), 2221-2230, 1996.