



Theoretical analysis of film condensation of water vapor, R134a, R600a, and R1234yf on an isothermal vertical plane surface

Kemal Bilen^{1*}, İsmail Erdoğan²

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

Highlights:

- Condensation, a phase change phenomenon, was examined theoretically
- Laminar, wavy laminar, and turbulent film condensation of water, R134a, R600a, and R1234yf on an isothermal vertical plate were investigated
- Water excelled in heat transfer coefficient while the refrigerants displayed comparable behavior

Keywords:

- Film condensation
- Water vapor
- Refrigerant
- Isothermal vertical plate
- Heat transfer coefficient

Article Info:

Research Article

Received: 07.10.2024

Accepted: 15.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1563105

Correspondence:

Author: Kemal Bilen

e-mail:

kemal.bilen@aybu.edu.tr

phone: +90 532 608 9092

Graphical/Tabular Abstract

In this theoretical study, laminar, wavy laminar, and turbulent film condensation of the stagnant and pure vapors of water, R134a, R600a, and R1234yf fluids on an isothermal vertical plane surface were separately investigated for saturation temperatures of 42, 45, 50, and 55 °C. In this study, where film condensation was examined both hydrodynamic and thermal aspects; variation of the liquid film thickness, amount of vapor condensed per unit time per unit width, and local and average heat transfer coefficients along the vertical direction were obtained. Water excelled in heat transfer coefficient while the refrigerants displayed similar behaviors as seen in Figure A.

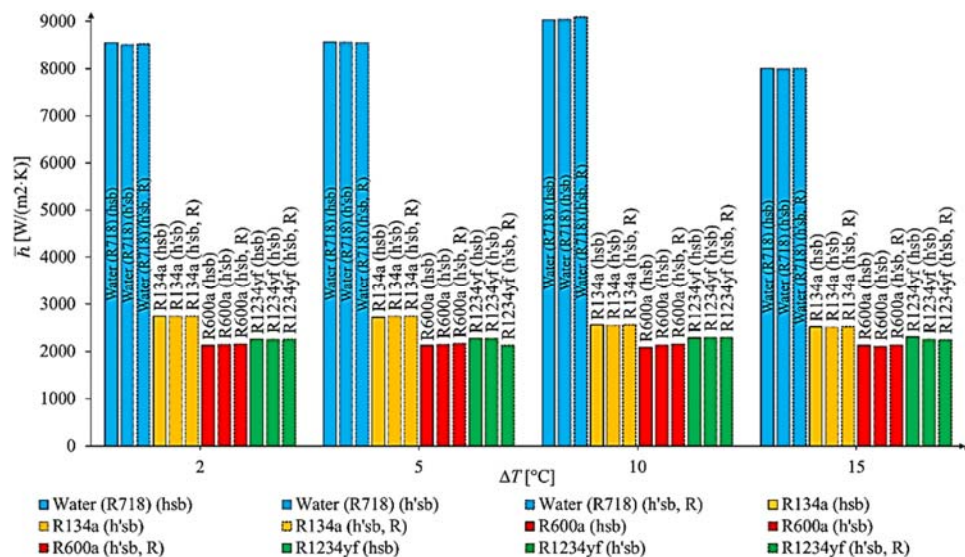


Figure A. Effect of fluid type, latent heat of vaporization, and ΔT on $\bar{h}$ in laminar film condensation

Purpose: Since the phase change occurring on planar vertical surfaces is frequently encountered in practice, in this study, laminar, wavy laminar, and turbulent film condensation of water vapor used intensively in daily life, and vapor of R134a, R600a, and R1234yf refrigerants used commonly in thermal systems, on isothermal vertical plane surfaces were investigated in detail.

Theory and Methods: In the theoretical analysis of the condensation problem examined, the continuity equation and the laws of conservation of momentum and energy were applied to the selected control volumes in the liquid film formed by the condensation of pure vapor and in the stagnant vapor medium.

Results: Considering all the cases examined together, in laminar film condensation, water provided 24.08% more performance than R1234yf in terms of liquid film thickness, 147.32% less performance than R134a in terms of condensed fluid per unit time per unit width, and 88.68% more performance in terms of local heat transfer coefficient at the end of the plate and average heat transfer coefficient.

Conclusion: It was observed that water provided greater values in terms of all analyzed parameters except amount of vapor condensed in unit time per unit width, for which R134a gave the greatest value. It was determined that water vapor was followed by R600a, and R134a and R1234yf, which exhibit similar behaviors, followed R600a, respectively. Ultimately, it was observed that the corrected latent heats of vaporization did not have a significant effect on the investigated parameters.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Su buharı, R134a, R600a ve R1234yf'nin eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzeydeki film yoğuşmasının teorik analizi

Kemal Bilen^{1*}, İsmail Erdoğan²

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

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Faz değişimi olayı olan yoğuşma teorik olarak incelendi
- Eşsıcaklıklı bir dikey plaka üzerinde su, R134a, R600a ve R1234yf'nin laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşması incelendi
- Su, ısı taşınım katsayısında üstünlük sağlarken soğutucu akışkanlar, benzer davranışlar sergiledi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.10.2024

Kabul: 15.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1563105

Anahtar Kelimeler:

Film tipi yoğuşma,
su buharı,
soğutucu akışkan,
eşsıcaklıklı düşey levha,
ısı taşınım katsayısı

ÖZ

Bu teorik çalışmada; su, R134a, R600a ve R1234yf akışkanlarının durgun ve saf buharlarının, eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzeydeki laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşması ayrı ayrı incelenmiştir. Film yoğuşmanın, hem hidrodinamik hem de ısı bakımından incelendiği bu çalışmada; sıvı filmi kalınlığının, birim zamanda birim genişlikte yoğuşan buhar miktarının ve yerel ve ortalama ısı taşınım katsayılarının düşey doğrultu boyunca değişimi; 42, 45, 50 ve 55 °C doyma sıcaklıkları için elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca; sıvı filmdeki sıcaklığın doğrusal değiştiği kabulüyle elde edilen ve Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının da yukarıdaki parametrelere etkisi belirlenmiştir. Laminar ve dalgalı laminar film yoğuşmasında Nusselt'in çözümlemesinden yararlanılmış olup; dalgalı laminar film yoğuşmasında ayrıca Kutateladze, türbülanslı film yoğuşmasında ise Labuntsov yaklaşımı kullanılmıştır. İncelenen tüm durumlar birlikte göz önüne alındığında, laminar film yoğuşmasında su, sıvı filmi kalınlığı bakımından R1234yf'ye göre %24,08 daha fazla; birim zamanda birim genişlikte yoğuşan akışkan bakımından R134a'ya göre %147,32 daha az, levhanın sonundaki yerel ve ortalama ısı taşınım katsayıları bakımından ise %88,68 daha fazla performans sağlamıştır. Dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşmasında ise su; ortalama ısı taşınım katsayısı bakımından R600a'ya göre sırasıyla, %76,51 ve %79,23 daha fazla performans sağlamıştır. Son olarak; düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının, incelenen parametrelere önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Theoretical analysis of film condensation of water vapor, R134a, R600a, and R1234yf on an isothermal vertical plane surface

H I G H L I G H T S

- Condensation, a phase change phenomenon, was examined theoretically
- Laminar, wavy laminar, and turbulent film condensation of water, R134a, R600a, and R1234yf on an isothermal vertical plate were investigated
- Water excelled in heat transfer coefficient while the refrigerants displayed comparable behavior

Article Info

Research Article

Received: 11.08.2024

Accepted: 15.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1531814

Keywords:

Film condensation,
water vapor,
refrigerant,
isothermal vertical plate,
heat transfer coefficient.

ABSTRACT

In this theoretical study, laminar, wavy laminar, and turbulent film condensation of the stagnant and pure vapors of water, R134a, R600a, and R1234yf fluids on an isothermal vertical plane surface were examined separately. In this study, where film condensation was examined both hydrodynamic and thermal aspects; variation of the liquid film thickness, amount of vapor condensed per unit time per unit width, and local and average heat transfer coefficients along the vertical direction were obtained for saturation temperatures of 42, 45, 50, and 55 °C. In the study also, the effect of the corrected latent heats of vaporization, which were obtained by assuming that temperature in the liquid film changes linearly and suggested one by Rohsenow, on the above parameters was determined. Nusselt's solution was benefited for laminar and wavy laminar film condensation, and Kutateladze's approach was also used for wavy laminar film condensation, and Labuntsov's approach was used for turbulent film condensation. Considering all the cases examined together, in laminar film condensation, water provided 24.08% more performance than R1234yf in terms of liquid film thickness, 147.32% less performance than R134a in terms of condensed fluid per unit time per unit width, and 88.68% more performance in terms of local heat transfer coefficient at the end of the plate and average heat transfer coefficient. Meanwhile, in wavy laminar and turbulent film condensation, water provided 76.51% and 79.23% more performance than R600a in terms of average heat transfer coefficient, respectively. Ultimately, it was observed that the corrected latent heats of vaporization did not have a significant effect on the investigated parameters.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *kemal.bilen@aybu.edu.tr, erdoganismaail39@gmail.com/ Tel: +90 532 608 9092

1. Giriş (Introduction)

Isıl sistemlerde, faz değişimi olması halinde, faz değişimi olmaması haline göre daha fazla ısı geçişinin gerçekleşmesi, araştırmacıları faz değişimi alanında çalışma yapmaya yönlendirmiştir. Böylece faz değişim mekanizmasının bilinmesi ve ısı geçişinin iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu gerçek göz önünde bulundurularak bu teorik çalışmada; bir faz değişimi olan ve ısıtma ve soğutma sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan yoğuşma, incelenmiştir.

Isıl sistemlerde buhar, yoğuşma sıcaklığından daha düşük sıcaklığa sahip bir yüzey ile temas ettiğinde buharın gizli ısısı söz konusu yüzeye geçer ve buhar sıvı fazına geçerek yoğuşma meydana gelir. Yoğuşma, yüzeyin yapısına bağlı olarak iki ayrı türde meydana gelir. Bunlar; film yoğuşma ve damlalı (damlacıklı) yoğuşmadır. Buna göre; yoğuşma yüzeyinin tümünün bir sıvı filmi ile kaplandığı ve bu sıvı filminin yerçekimi etkisi altında düşey yönde aktığı yoğuşma türü film tipi yoğuşmadır. Buna karşılık, ıslanmayı kısmen engelleyecek yapıya sahip bir yüzeyde oluşan damlalı yoğuşmadır. Bu nedenle, yoğuşma çeşidine bağlı olarak yoğuşma esnasındaki ısı geçiş mekanizmasının bilinmesi önemlidir. Bahsedilen öneminden dolayı bu çalışmada; durgun ve saf haldeki çeşitli akışkanların buharının, eşsıcaklıklı, düzlemsel ve düşey bir yüzey üzerindeki laminar, dalgalı laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşması teorik olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Akışkan olarak; suyun yanı sıra soğutma sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan R134a ile R600a ve giderek yaygınlaşan R1234yf soğutucu akışkanları tercih edilmiştir. Buharlaştırma gizli ısısı için önerilen üç farklı değer için bir arada incelenmesi ve günlük hayatta en çok kullanılan akışkan olan su ile soğutma sistemlerinde en çok tercih edilen soğutucu akışkanların aynı çalışmada incelenmesi, bu çalışmayı literatürdeki benzer çalışmalardan ayırmaktadır.

Bu çalışma kapsamındaki teorik analiz sonuçları; buhar hızının ihmal edilebilmesi şartıyla, yaklaşık olarak 3,2 mm (yaklaşık 1/8") değerinden daha büyük hidrolik çapa sahip düşey silindirik kanalların içindeki ve dışındaki film yoğuşması için de geçerlidir. Bu durum, yaklaşık 3,2 mm'den daha büyük iç çapa (hidrolik çapa) sahip kanalların eğrilik yarıçapının ihmal edilebileceği prensibinden ileri gelmektedir. Örneğin; klasik soğutma sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ve pratikte bundy boru olarak adlandırılan yoğuşurucu boruları, buhar hızının ihmal edilebilmesi şartıyla, bu kategoride incelenebilir.

Bu çalışma kapsamında; eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzey üzerinde su buharı ile R134a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının buharının film yoğuşması teorik olarak incelenmiştir. Bu akışkanların, eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzey üzerindeki laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşmasının hidrodinamik ve ısı bakımından incelendiği bu çalışmada; sıvı filmi kalınlığının, Reynolds sayısının (Re sayısının), yerel Nusselt sayısının (Nu sayısının), yerel ısı taşınım katsayısının yüzey boyunca değişimi ve birim zamanda birim genişlik için yoğuşan buhar miktarı tespit edilmiştir.

Çalışmada; akışkanlar için aynı doyma sıcaklıkları (yoğuşma sıcaklıkları) esas alınmış olup, akışkan cinsinden kaynaklanan doyma basıncı (yoğuşma basıncı) farklılıkları dikkate alınmamıştır. Böylece; aynı doyma sıcaklığında (T_d) ve aynı sıcaklık farkı altında ($\Delta T = T_d - T_y$) cereyan eden film yoğuşmasında, akışkan çeşidinin, yukarıda bahsedilen parametrelere etkisi teorik olarak belirlenmiştir. Hesaplamaların, farklı doyma sıcaklıkları, dolayısıyla farklı doyma basınçları için tekrarlandığı bu çalışmada Nusselt çözümlemesine ilaveten ayrıca; sıvı filmi içerisindeki sıcaklık dağılımının doğrusal olduğu kabulü ile elde edilen düzeltilmiş buharlaştırma gizli ısısının

Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaştırma gizli ısısının yukarıdaki parametrelere etkisi de belirlenmiştir.

Düzlemsel düşey yüzeylerde meydana gelen faz değişimiyle pratikte sıklıkla karşılaşıldığından bu teorik çalışmada; günlük hayatta yoğun bir şekilde kullanılan su buharı ile ısı sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılan R134a, R600a ve R1234yf akışkanlarının buharının; eşsıcaklıklı düzlemsel düşey yüzeylerdeki laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film tipi yoğuşması detaylıca incelenmiştir. Bu çalışmanın literatüre katkısı ve yenilikçi yönü, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Literatürde film tipi yoğuşmada, genellikle ihmal edilen aşırı soğumanın etkisi bu çalışmada ayrıca incelenmiştir. Diğer bir ifade ile bu çalışmada, teoriden elde edilen düzeltilmiş buharlaştırma gizli ısısının etkisi de incelenmiştir.
- Yine literatürde, teoriden elde edilen düzeltilmiş bu buharlaştırma gizli ısısı kullanılmadığı gibi Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaştırma gizli ısısı da genellikle kullanılmaz. Bu çalışmada, Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaştırma gizli ısısı da ayrıca incelenmiştir.
- Literatürde; teoriden elde edilen ve Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaştırma gizli ısılarının ayrı ayrı göz önüne alınarak, laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film tipi yoğuşmanın, birçok akışkan için incelendiği bu çalışmaya benzer herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2. Literatür Araştırması (Literature Review)

Bilindiği üzere, film tipi yoğuşma ile ilgili çalışmalara, Nusselt tarafından 1916 yılında yapılan teorik bir çalışma öncülük etmektedir [1]. Bu çalışmada; termodinamik özellikleri sabit kabul edilen saf bir buharın düzlemsel düşey bir yüzey üzerindeki film yoğuşması incelenmiştir. Nusselt'in bu çalışmasında, sıvı filminin aşırı soğuması ve sıvı ile buharın ara-yüzeydeki etkileşimi dikkate alınmamıştır. Nusselt'in bu öncü çalışmadan bugüne kadar bu alanda birçok teorik ve/veya deneysel ve/veya sayısal çalışmalar yapılmıştır. Konu ile ilgili literatürdeki ilgili çalışmaları; yoğuşmanın mekanizmasının incelendiği temel çalışmalar, düzlemsel yüzeylerde gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düzlemsel kanallarda gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, silindirik kanallarda gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, çok-girişli kanallarda gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düşey kanatçıklar üzerinde gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar ve geçici rejimdeki yoğuşmanın incelendiği çalışmalar olmak üzere temelde yedi kısma ayırmak mümkündür. Kapsamı göz önünde bulundurularak bu çalışmada sadece; yoğuşmanın mekanizmasının incelendiği temel çalışmalar ve düzlemsel düşey yüzeylerde gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar üzerinde durulacaktır.

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

Nusselt'in yoğuşma ile ilgili öncü çalışmasından sonra Rohsenow [2], teorik bir çalışmada, Nusselt'in bu öncü çalışmasına benzer şekilde yine doyma sıcaklığındaki durgun ve saf bir buharın düzlemsel düşey bir yüzey üzerinde gerçekleşen laminar film yoğuşması analiz edilmiştir. Çalışmada; Nusselt'in analizinden farklı olarak, sıvı filmine düşey yönde sürekli olarak T_d sıcaklığındaki sıvının ilavesi dikkate alındığında sıvı filmi içerisinde doğrusal sıcaklık dağılımı yerine doğrusal olmayan gerçek bir sıcaklık dağılımı alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bahse konu olan çalışmada elde edilen bu yeni sıcaklık dağılımı sayesinde, yoğuşma sırasında daha büyük bir ısı taşınım katsayısının ve yine daha büyük bir sıvı film kalınlığının elde edileceği gösterilmiştir. Çalışma neticesinde ayrıca, bu alanda temel bir bağıntı olarak kabul gören ve Eş. 1 ile gösterilen eni bir

(düzeltilmiş veya değiştirilmiş) buharlaşma gizli ısı sayısal olarak hesaplanmıştır.

$$h'_{sb} = h_{sb} + 0,68c_p\Delta T \quad (1)$$

Rohsenow vd. [3] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada; doyma sıcaklığındaki, hareketli ve saf bir buharın, eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzey üzerinde laminar ve türbülanslı film yoğuşması, sıvı ile buharın ara-yüzeyinde oluşan kayma gerilmesinin (dolayısıyla buhar hızının) yoğuşma üzerindeki etkisi dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışmada; ara-yüzeydeki kayma gerilmesinin sıvı filmini inceltici etkisinden dolayı, daha büyük ısı taşınım katsayılarının elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Mills ve Seban [4] tarafından yapılan bir çalışmada; düşük basınçlara karşılık gelen doyma sıcaklığındaki durgun ve saf su buharının, eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzey üzerinde gerçekleşen laminar film yoğuşmasında, sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki ısıl direncin etkisi deneysel olarak incelenmiş ve yoğuşma katsayısı bulunmuştur. Sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki ısıl direncin dikkate alındığı bu çalışmada düşük basınçlardaki su buharının yoğuşmasında yoğuşma katsayısı (birikme katsayısı) 0,45 ila 1 arasında elde edilmiş olup, sıvı ile buharın ara-yüzeydeki bu ısıl direncin ihmal edilebileceği gösterilmiştir. Böylece, söz konusu ısıl direncin dikkate alınması durumunda Nusselt'in çözümlemesi ile arada önemli bir farkın oluşmayacağı sonucuna varılmıştır.

Rohsenow [5] tarafından yapılan teorik bir çalışmada ise çeşitli cisimler (düşey levha, düşey silindir, yatay silindir, düşey koni, dönel yatay disk) üzerinde, taban sıcaklığı sabit düşey bir kap içerisinde ve yatay boru demetleri üzerinde gerçekleşen film tipi yoğuşma incelenmiş ve her bir cisim üzerindeki yoğuşmaya ilişkin denklemler oluşturulmuştur. Çalışmada, yaklaşık 3,2 mm ve daha küçük çaptaki düşey silindirler içerisinde gerçekleşen film tipi yoğuşmada söz konusu silindirlerin eğrilik yarıçapının dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Churchill [6] tarafından yapılan yine teorik bir çalışmada ise sıvı filmi içerisindeki aşırı soğuma ve sıvı ile buharın ara-yüzeydeki etkileşimi dikkate alınarak düzlemsel düşey bir yüzey ile düşey bir borunun iç ve dış yüzeylerindeki yoğuşma, eğrilik yarıçapı etkisi de dikkate alınmak suretiyle incelenmiş ve ulaşılan sonuçlar kapalı formda sunulmuştur. Sadasivan ve Lienhard [7] tarafından yapılan teorik bir çalışmada, laminar film kaynamasında ve laminar film yoğuşmasında, buharlaşma gizli ısı için duyulur ısı geçişinden kaynaklanan bir düzeltme yapılmış ve ulaşılan sonuçların, önceki çalışmalar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Duyulur ısı geçişinin etkisini de içeren düzeltilmiş bu buharlaşma gizli ısı Eş. 2'de gösterilmiştir.

$$h'_{sb} = h_{sb} + C\Delta T \quad (2)$$

Çalışmada ayrıca, Eş. 2'de yer alan C katsayısı için, literatürdeki çalışmalardan yararlanılarak bir eğri uydurulmuştur. Böylece, film yoğuşmasında buharlaşma gizli ısı için Eş. 3 elde edilmiştir.

$$h'_{sb} = h_{sb} + \left(0,683 - \frac{0,228}{Pr}\right)c_p\Delta T \quad (3)$$

Winterton [8] tarafından yapılan bir çalışmada ise, düşey bir levha üzerinde doğal taşınım yoluyla gerçekleşen ısı geçişi, boyutsal çözümleme yoluyla teorik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda; Nu, Gr ve Pr boyutsuz sayılarının nasıl elde edildiği ve buradan hareketle aynı levha üzerinde doğal taşınım yoluyla gerçekleşen ısı geçişine, film kaynamasına ve film yoğuşmasına ilişkin Nu sayılarının, klasik inceleme yoluyla bulunan Nu sayılarına yaklaşık eşit olduğu gösterilmiştir. Çalışmada; düşey bir levha üzerinde meydana gelen laminar film yoğuşmasına ait yerel Nu sayısı, Eş. 4'de

gösterildiği gibi elde edilmiştir. Eş. 4, Nusselt'in incelemesinden [1] farklı olarak sadece 0,943 katsayısını içermemektedir.

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

2.2. Düzlemsel Düşey Yüzeylerde Gerçekleşen Yoğuşma Üzerine Yapılan Çalışmalar (Studies on Condensation on Vertical Plain Surfaces)

Literatürde, düzlemsel düşey yüzeylerde gerçekleşen yoğuşma alanında yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar; eşsıcaklıklı yüzeylerde gerçekleşen saf buhar yoğuşmasının incelendiği çalışmalar, eşsıcaklıklı olmayan yüzeylerde gerçekleşen saf buhar yoğuşmasının incelendiği çalışmalar, yoğuşmayan bir gazın varlığında düşey bir yüzeyde gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düzlemsel düşey yüzeylerde gerçekleşen yoğuşmada sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki dalgalanmaların incelendiği çalışmalar, sürekli olmayan rejimde düşey yüzeylerde gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar ve düzlemsel düşey kanatlar üzerinde gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar şeklinde sınıflandırılabilir.

Buna göre; durgun ve kızgın bir buharın, eşsıcaklıklı düşey bir plaka üzerinde yoğuşmasını içeren teorik bir çalışma, Shang ve Wang [9] tarafından yapılmıştır. Elde edilen iki boyutlu sınır tabaka denklemlerinin, klasik Falkner-Skan yöntemi yerine, boyutsuz hız bileşeni metodu kullanılarak adi diferansiyel denklemlere dönüştürüldüğü çalışmada, buhar ve sıvı filmi için termodinamik özelliklerin sıcaklık ile değişimleri göz önüne alınarak sıvı filmi ve buhar ortamlarında oluşan film bölgesi için boyutsuz hız ve sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Yine; durgun ve doymuş su buharının, eşsıcaklıklı düşey bir plaka üzerinde laminar film yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışma, Poots ve Miles [10] tarafından yapılmıştır. Kararlı halde, sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki yüzey gerilimi ihmal edilerek hem sıvı filmi hem de buhar bölgesi için bulunan iki boyutlu sınır tabaka denklemleri, sınır tabaka yaklaşımı ile basitleştirilmiş ve nümerik olarak çözülmüştür. Akışkanın termodinamik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin dikkate alındığı bu çalışmadaki nümerik çözüm, farklı yüzey sıcaklıkları için tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Durgun ve doymuş saf buharın, eşsıcaklıklı düşey bir levha üzerinde yoğuşmasını konu alan teorik bir çalışma da, Chen [11] tarafından yapılmıştır. Akışkanın termodinamik özelliklerinin sabit kabul edildiği bu çalışmada; sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki kayma gerilmesi göz önüne alınarak, sıvı filmi ve buhar bölgesindeki sınır tabaka denklemleri bulunmuş ve bu denklemler boyutsuzlaştırıldıktan sonra çözülmüştür. Koh vd. [12] tarafından yapılan ve yine durgun ve doymuş saf buharın, eşsıcaklıklı düşey bir levha üzerinde yoğuşmasını inceleyen teorik bir çalışmada; sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki kayma gerilmesinin ısı geçişi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Koh [13] tarafından yapılan teorik bir çalışmada ise; durgun ve doymuş saf buharın eşsıcaklıklı düşey bir levha üzerindeki yoğuşması, integral metotla incelenmiş ve böylece oluşturulan sınır tabaka denklemleri cebirsel denklemlere indirgenmiştir. Buhar ve sıvı fazlarının termodinamik özelliklerinin etkisini gösteren $[(\rho\mu)_s/(\rho\mu)_b]^{1/2}$ teriminin ihmal edilebileceğinin gösterildiği bu çalışmadaki ısı geçişine ilişkin sonuçların, sınır tabaka denklemlerinin analitik çözümüyle ulaşılan sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Durgun ve doymuş saf buharın eşsıcaklıklı düşey bir plaka üzerinde yoğuşmasının, sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki kayma gerilmesi etkisinin ihmal edilerek araştırıldığı teorik bir çalışma da Sparrow ve Gregg [14] tarafından yapılmıştır. Söz konusu çalışmada; yeni bir

benzerlik dönüşümü (similarity transformation) yöntemi kullanılarak birer kısmi diferansiyel denklem olan sınır tabaka denklemlerinin adi diferansiyel denklemlere dönüşümü yapılmış ve ivmelenmeden kaynaklanan terimin, Pr sayısının 1'den küçük olması durumunda ısı geçişine önemli bir etkisinin olacağı bulunmuştur.

Literatürde, eşsıcaklıklı düşey yüzeylerde gerçekleşen yoğunlaşmanın incelendiği çalışmalara ilave olarak eşsıcaklıklı olmayan yüzeylerde gerçekleşen durgun ve saf buhar yoğunlaşmasının incelendiği çalışmalar da yer almaktadır. Buna göre, Yang [15] tarafından yapılan teorik bir çalışmada; eşsıcaklıklı düşey bir yüzeydeki sınır tabaka denklemleri, geliştirilen asimptotik bir seri çözüm yöntemi kullanılarak elde edilen çözümün, incelenen problem, yoğunlaşma problemine benzer olduğundan, yüzey boyunca homojen olmayan soğutmanın olduğu ve değişken yerçekiminin etki ettiği sistemlere de uygulanabileceği vurgulanmıştır. Brouwers [16] tarafından yapılan ve yine eşsıcaklıklı olmayan düzlemsel düşey bir yüzey üzerinde gerçekleşen yoğunlaşmanın incelendiği teorik bir çalışmada; McAdam sayısı (Ad) ve transfer birimi sayısından (NTU) yararlanılarak analiz yapılmış ve ulaşılan sonuçlar kapalı formda verilmiştir. Söz konusu plakanın diğer yüzeyinin, çok-girişli kanallardan oluşan bir ısı değiştiricisi kullanılarak soğutulduğu çalışmada, saf buhar ve soğutucu akışkanın kullanıldığı ısı değiştiricisinde; aynı yönlü paralel akım, zıt yönlü paralel akım ve dik akım düzenlemeleri ayrı ayrı incelenmiştir.

Literatürde, su tutabilen (hidrofilik) plakalar üzerindeki laminar film yoğunlaşmasını inceleyen çalışmalara da rastlanmaktadır. Buna göre; durgun ve doymuş saf buharın, eşsıcaklıklı, düşey, su tutabilen ve aşırı soğutulmuş bir plaka üzerindeki laminar film yoğunlaşmasının; atalet kuvvetinin, sıvı ile buharın ara-yüzeyindeki kayma gerilmesinin ve taşınım teriminin etkisinin göz önüne alınarak yerçekiminin varlığında incelendiği teorik bir çalışma, Liu ve Cheng [17] tarafından yapılmıştır. Faz değişimine yönelik Lattice Boltzmann metodunun kullanıldığı söz konusu çalışmada; sıvı filmi kalınlığının, sıvı filmi içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının ve ısı geçiş karakteristiklerinin, klasik Nusselt teorisi ve var olan sınır tabaka çözümleri ile uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Böylece, Lattice Boltzmann metodunun doğruluğu gösterilmiştir.

Yine literatürde, değişken ısı iletim katsayısına sahip Newtoniyen olmayan (non-Newtonian) akışkanların düşey plakalar üzerindeki laminar film yoğunlaşmasını inceleyen çalışmalara da rastlanmaktadır. Buna göre; Newtoniyen olmayan pseudo-plastic akışkanının durgun ve doymuş saf buharının; eşsıcaklıklı düşey bir plaka üzerindeki laminar film yoğunlaşmasının; hız gradyanının bir kuvvet fonksiyonu olan sıvının ısı iletim katsayısının etkisinin göz önüne alınarak incelendiği teorik bir çalışma, Si vd. [18] tarafından yapılmıştır. Söz konusu çalışmada; fonksiyonun derecesi olan n 'nin ve film kalınlığına bağlı tanımlanan η parametresinin etkisini içeren ikili benzer çözüm,

Runge-Kutta ve shooting metotları ile bulunmuştur. Sonuçlar; hız ve sıcaklık sınır tabakalarının, n 'nin azalmasıyla incelendiğini göstermiştir. Ayrıca, sıvı filmi kalınlığının azalmasıyla ısı geçişinin arttığı görülmüştür.

Son olarak literatürde; kullanımı giderek yaygınlaşan nanoparçacıkların, yoğunlaşma üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalarla da karşılaşmaktadır. Buna göre; durgun ve doymuş saf buharın, eşsıcaklıklı düşey bir plaka üzerindeki laminar film yoğunlaşmasına, nanoparçacıkların etkisinin incelendiği teorik bir çalışma, Avramenko vd. [19] tarafından yapılmıştır. Buhar içerisindeki nanoparçacık derişikliğinin ve nanoakışkan yoğunluğunun etkisini de içeren Nusselt çözümlemesinin kullanıldığı söz konusu çalışmada; difüzyon parametresi, nanoparçacık derişikliği ve nanoparçacık ile buhar yoğunlukları oranının her birindeki artışın, normalize edilmiş Nu sayısını artırdığı tespit edilmiştir.

Literatürde; yoğunlaşmanın, kapsamlı bir şekilde incelendiği derleme makalelerine de rastlanmaktadır. Buna göre, Bilen vd. [20] tarafından hazırlanan derleme bir çalışmada; çeşitli geometrilerde karşılaşılan yoğunlaşma üzerine yapılan çalışmalar, kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Nusselt'in 1916 yılında yayımladığı öncü makalesinin de aralarında yer aldığı toplam 134 adet, teorik ve/veya deneysel araştırmanın incelendiği çalışmada; yoğunlaşmanın mekanizmasının incelendiği temel çalışmalardan, durgun ve saf bir buharın düşey düzlemsel bir levha veya küre üzerinde laminar film yoğunlaşmasına; dış akışta yoğunlaşmadan, iç akışta yoğunlaşmaya; su buharının tek başına yoğunlaşmasından, kolayca yoğunlaşmayan bir gazın varlığında gerçekleşen yoğunlaşmaya; düşey veya yatay tek-girişli kanallardaki yoğunlaşmadan, çok-girişli kanallarda yoğunlaşmaya; geçici rejimde gerçekleşen yoğunlaşmadan, yoğunlaşma esnasında akış görselleştirmeye kadar tüm durumlar, oluşturulan bir tablo yardımıyla istatistiksel olarak analiz edilmiş, çeşitli grafikler oluşturulmuş ve yorumlanmıştır.

2.3. Su ve R134a, R600a ve R1234yf Soğutucu Akışkanları (Water and R134a, R600a, and R1234yf Refrigerants)

Bu çalışmada akışkan olarak; su ile R134a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanları tercih edilmiştir. Bu akışkanların tercih edilmesinde; suyun, günlük hayattaki tartışılmaz önemi, yaygınlığı ve endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olması, R134a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının ise; ısıtma, soğutma, iklimlendirme ve ısı pompası sistemlerinin en önemli çalışma akışkanları olması önemli bir rol oynamıştır. Bu soğutucu akışkanlar, buharlaşma yardımıyla herhangi bir ortamdan çektikleri ısıyı, yoğunlaşma yardımıyla diğer bir ortama aktarırlar. Böylece sırasıyla soğutma ve ısıtma gerçekleşmiş olur. Bu çalışmaya konu olan akışkanların bazı termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. İncelenen akışkanların bazı termofiziksel özellikleri (Some thermophysical properties of the fluids studied) [21-23]

Özellik	Su (R718)	R134a	R600a	R1234yf
Yapısı	Saf	Saf	Saf	Saf
Kimyasal formülü	H ₂ O	CH ₂ FCF ₃	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	CF ₃ CF=CH ₂
Mol kütlesi [g/mol]	18,01	102,03	58,12	114,04
Kritik sıcaklık [°C]	373,95	101,06	134,66	94,70
Kritik basınç [bar]	220,64	40,59	36,29	33,82
Kaynama sıcaklığı [°C], (1 atm'de)	99,97	-26,07	-11,75	-29,45
Buharlaşma gizli ısı [kJ/kg], (42 °C'da)	2401,188	160,87	309,06	130,35
Atmosfer ömrü [yıl]	0,02	14	0,01	0,02
ODP	0	0	0	0
GWP ₁₀₀	0	1,36	<1	<1
Güvenlik sınıfı	A1	A1	A3	A2L

Sıvı filmindeki sıcaklık dağılımı doğrusal olduğuna göre; yüzeydeki ısı akısı, Fourier ısı iletim yasası kullanılarak Eş. 12'deki gibi yazılabilir.

$$q_y'' = k_s \frac{T_d - T_y}{\delta} \quad (12)$$

Eş. 12, yani Fourier ısı iletim yasası kullanılarak yazılan yüzeydeki ısı akısı; Newton'un soğuma yasası kullanılmak suretiyle, Eş. 13'deki gibi de yazılabilir.

$$q_y'' = h_z (T_d - T_y) \quad (13)$$

Eş. 12 ve Eş. 13 birlikte göz önüne alındığında, $h_z = k_s/\delta$ olacağından; yerel ısı taşınım katsayısı ve yerel Nu sayısı sırasıyla Eş. 14 ve Eş. 15'deki gibi ifade edilebilir. Eş. 14 ila Eş. 17'de, z 'nin sıfıra yaklaşması durumunda yerel ve ortalama ısı taşınım katsayılarının, benzer şekilde, yerel ve ortalama Nu sayılarının sonsuza gideceğine dikkat edilmelidir.

$$h_z = \frac{k_s}{\delta} = \left[\frac{g \rho_s (\rho_s - \rho_b) k_s^3 h_{sb}}{4 \mu_s (T_d - T_y) z} \right]^{1/4}, \quad (0 < z \leq L) \quad (14)$$

$$Nu_z = \frac{h_z z}{k_s} = \left[\frac{g \rho_s (\rho_s - \rho_b) h_{sb} z^3}{4 \mu_s k_s (T_d - T_y)} \right]^{1/4}, \quad (0 < z \leq L) \quad (15)$$

Eş. 14'den görüldüğü gibi; h_z , $z^{-1/4}$ ile değiştiğinden, integral neticesinde, levhanın tümü için ortalama ısı taşınım katsayısı olan $\bar{h}_L = 4h_z/3$ olacaktır. Bu durumda; L yüksekliğindeki levhanın tümü için ortalama ısı taşınım katsayısı ve ortalama Nu sayısı ise sırasıyla Eş. 16 ve Eş. 17'deki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{h}_L = 0,943 \left[\frac{g \rho_s (\rho_s - \rho_b) k_s^3 h_{sb}}{\mu_s (T_d - T_y) L} \right]^{1/4}, \quad (0 < z \leq L) \quad (16)$$

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L L}{k_s} = 0,943 \left[\frac{g \rho_s (\rho_s - \rho_b) h_{sb} L^3}{\mu_s k_s (T_d - T_y)} \right]^{1/4}, \quad (0 < z \leq L) \quad (17)$$

Sıvı filmi içerisindeki ortalama sıcaklığın T_m olduğu göz önüne alınır ve yoğunlaşan akışkanın aşırı soğuması da dikkate alınırsa, buharlaşma gizli ısısı olan h_{sb} yerine Eş. 18'deki gibi düzeltilmiş bir buharlaşma gizli ısısının alınması gerekir.

$$h'_{sb} = h_{sb} + c_{p,s} (T_d - T_m) \quad (18)$$

Ancak, Eş. 18'de yer alan ortalama sıcaklığın, yoğunlaşmanın gerçekleştiği geometri göz önüne alınarak hesaplanması gerekmektedir. Düzlemsel düşey levha üzerinde gerçekleşen yoğunlaşmada, sıvı filmi içerisindeki sıcaklık dağılımının doğrusal kabul edilmesiyle sıvı filmindeki ortalama sıcaklık, yüzey sıcaklığı ve doyma sıcaklığına bağlı olarak, Eş. 19'deki gibi bulunur [24].

$$T_m = \frac{5}{8} T_d + \frac{3}{8} T_y \quad (19)$$

Eş. 19'un dikkate alınmasıyla düşey levhada gerçekleşen yoğunlaşma için düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısı, h'_{sb} , Eş. 20'deki gibi yazılabilir.

$$h'_{sb} = h_{sb} + \frac{3}{8} c_{p,s} (T_d - T_y) \quad (20)$$

Ancak Rohsenow (1956), enerji denklemindeki kütle taşınımı kaynaklı ısı geçişinin de dikkate alınmasıyla, düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısının, $h'_{sb,R}$, Eş. 21'de verilen şekliyle kullanılmasını önermiştir.

$$h'_{sb,R} = h_{sb} + 0,68 c_{p,s} (T_d - T_y) = h_{sb} (1 + 0,68 Ja) \quad (21)$$

Bu çalışmadaki hesaplamalarda; buharlaşma gizli ısısı olan h_{sb} ile Eş. 20 ve Eş. 21'de verilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısıları (h'_{sb} ve $h'_{sb,R}$) ayrı ayrı kullanılarak çözümler elde edilmiştir. Böylece bu çalışmada; sıvı filmi içerisindeki aşırı soğumanın dikkate alınmasının etkisi ve bu etki göz önüne alınırken, sıvı filmi içerisindeki sıcaklık dağılımının doğrusal kabul edilip-edilmemesinin etkisi tespit edilmiştir.

Eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir levha üzerinde meydana gelen laminar film yoğunlaşmasında sıvı filmi için Re sayısı, Eş. 22'deki gibi tanımlanır [26].

$$Re_\delta = \frac{u_m D_h}{\nu_s} = \frac{u_m (4\delta b/b)}{\nu_s} = \frac{4\rho_s (\delta b) u_m}{\rho_s \nu_s b} = \frac{4\dot{m}}{\mu_s b} = \frac{4\Gamma}{\mu_s} \quad (22)$$

Yoğuşma neticesinde oluşan sıvı filmi, sıvı filmine ilişkin Re sayısı dikkate alınarak literatürde; laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı bölge olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Bu bölgeler, Re sayısına bağlı olarak sırasıyla; $Re_\delta \lesssim 30$, $30 \lesssim Re_\delta \lesssim 1800$ ve $Re_\delta \gtrsim 1800$ ile ifade edilir. Laminer bölgedeki ortalama ısı taşınım katsayısı için Nusselt tarafından önerilen Eş. 16 kullanılırken, dalgalı laminar ve türbülanslı bölgelerde ise sırasıyla, Kutateladze ve Labuntsov tarafından ayrı ayrı önerilen Eş. 23 ve Eş. 24'deki Re sayılarının kullanıldığı, teorik analiz neticesinde bulunan Eş. 25 ile hesaplama yapılır [27]. Dalgalı laminar bölgedeki ortalama ısı taşınım katsayısı, Nusselt çözümlemesinin bu bölge için de geçerli olacağı düşüncesi ile Nusselt tarafından önerilen Eş. 16 kullanılarak da bulunmuştur.

$$Re_\delta = \left[\frac{3,70 k_s L (T_d - T_y)}{\mu_s h_{sb} (\nu_s^2/g)^{1/3}} + 4,8 \right]^{0,82} \quad 30 \lesssim Re_\delta \lesssim 1800 \quad (23)$$

$$Re_\delta = \left[\frac{0,069 k_s L (T_d - T_y)}{\mu_s h_{sb} (\nu_s^2/g)^{1/3}} Pr_s^{0,5} - 151 Pr_s^{0,5} + 253 \right]^{4/3} \quad Re_\delta \gtrsim 1800 \quad (24)$$

$$\bar{h}_L = \frac{Re_\delta \mu_s h'_{sb}}{4L (T_d - T_y)} \quad (25)$$

Bu çalışmada ayrıca, dalgalı laminar bölgedeki ortalama ısı taşınım katsayısı için Eş. 16 ve Eş. 25 kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

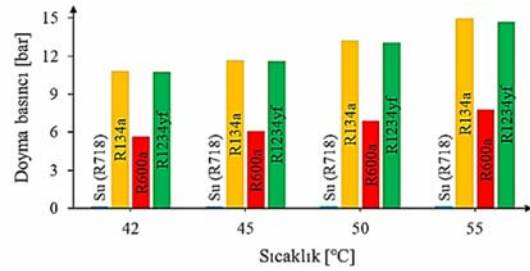
Su buharı, R134a, R600a ve R1234yf soğutucu akışkanlarının film tipi yoğunlaşmasının incelendiği bu çalışmada; doyma sıcaklığı olarak sırasıyla 42, 45, 50 ve 55 °C sıcaklıkları seçilmiştir. Bu seçimin nedenleri şu şekilde açıklanabilir: Soğutma sistemlerindeki yoğunlaşma ünitelerinde yaygın olarak kullanılan R134a, R600a ve R1234yf akışkanları, genel olarak 42 °C'da yoğunluklarından bu sıcaklık, referans doyma sıcaklığı olarak alınmıştır. Yüzeyin sıcaklığı ise, pratikte yoğunlaşmanın 2 °C sıcaklık farkı altında gerçekleştiği olgusundan hareketle referans doyma sıcaklığı göz önüne alınarak 40 °C olarak belirlenmiş ve incelenen tüm durumlar için bu değerde sabit tutulmuştur. Yoğuşmanın gerçekleştiği sıcaklık farkının, yoğunlaşmadaki temel parametreler üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla akışkanlar için doyma sıcaklıkları; 40 °C olan referans doyma sıcaklığına ilaveten, yaz mevsimi koşullarında, yoğunlaşma sıcaklığının artacağı göz önüne alınarak 45, 50 ve 55 °C olarak belirlenmiştir. Böylece; akışkan doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki 2, 5, 10 ve 15 °C sıcaklık farklarının, incelenen temel parametreler üzerindeki etkisi belirlenebilmiştir.

Bu çalışmada incelenen akışkanların, yukarıda bahsedilen doyma sıcaklıklarına karşılık gelen doyma basınçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İncelenen akışkanların doyma sıcaklıklarına karşılık doyma basınçları
(Saturation pressures corresponding saturation temperatures of the fluids studied) [22].

T_d [°C]	p_d [bar]*			
	Su (R718)	R134a	R600a	R1234yf
42	0,082	10,772	5,596	10,711
45	0,096	11,599	6,044	11,538
50	0,123	13,179	6,849	13,023
55	0,157	14,915	7,729	14,647

* Etken basınç



Tablo 2 incelendiğinde, doyma basıncı bakımından soğutucu akışkanlar arasında R600a'nın önemli bir üstünlüğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 2'de ayrıca; incelenen akışkanların doyma basınçlarının, doyma sıcaklıkları ile değişimi de gösterilmiştir. Yoğuşmanın, genel olarak düşük basınçlarda gerçekleştirilme gereksinimi göz önüne alınarak incelendiğinde; soğutucu akışkanlar arasında, doyma basıncı bakımından R600a'nın önemli bir avantaja sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Su buharı da dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında, su buharının daha avantajları olduğu görülecektir. Bu bağlamda; 42 °C doyma sıcaklığında gerçekleşecek yoğuşmada, R134a'nın su buharına göre, yaklaşık 132 kat daha yüksek basınç ihtiyacı duyacağı açıktır. Böylece, aynı yoğuşma sıcaklığı için en düşük doyma basıncına sahip olması nedeniyle ilk sırada tercih edilecek akışkanın su olduğu açıktır. Bununla birlikte, soğutma sistemlerindeki doyma sıcaklıkları göz önüne alındığında, vakum altında yoğuşması gerekeceğinden su buharı bu avantajını yitirmektedir. Teorik analiz kapsamında; film yoğuşmasındaki laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı bölgeler ayrı ayrı incelenmiş olup elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

4.1. Laminer Film Yoğuşmasına İlişkin Sonuçlar (Results on Laminar Film Condensation)

Çalışmanın bu kısmında, laminar film tipi yoğuşmada; sıvı filmi kalınlığının, birim genişlikte birim zamanda yoğuşan akışkan miktarının, yerel ısı taşınım katsayısının ve ortalama ısı taşınım katsayısının düşey doğrultu boyunca değişimi incelenmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Buna göre laminar film tipi yoğuşmada; akışkan türünün, sıvı filmi kalınlığının düşey doğrultu boyunca değişimine etkisi, farklı buharlaşma gizli ısıları için Şekil 2a, 2b ve 2c'de gösterilmiştir. Şekil 2a incelendiğinde; suyun, en büyük sıvı filmi kalınlığına neden olduğu görülebilir. Şekil 2a'dan ayrıca, tüm akışkanlar için sıvı filmi kalınlığının, doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki farkın (yoğuşmadaki sıcaklık farkının) artmasıyla doğal olarak arttığı görülmektedir. Şekil 2a ile varılan sonuçlar, düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanıldığı Şekil 2b ve 2c için de geçerlidir. Şekil 2a, 2b ve 2c birlikte incelendiğinde, buharlaşma gizli ısısındaki değişimin, sıvı filmi kalınlığı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülebilir. Zaten, laminar film yoğuşması için Nusselt'in çözümlemesi sonucunda bulunan Eş. 10 incelendiğinde; sıvı filmi kalınlığının, sıvı filminin aktığı yön olan z ile doğrusal olmayan bir şekilde artacağı görülmür. Yoğuşan her akışkan molekülü, sıvı filmine katılacağı için doğal olarak sıvı filminin, düşey doğrultuda kalınlaşması beklenir.

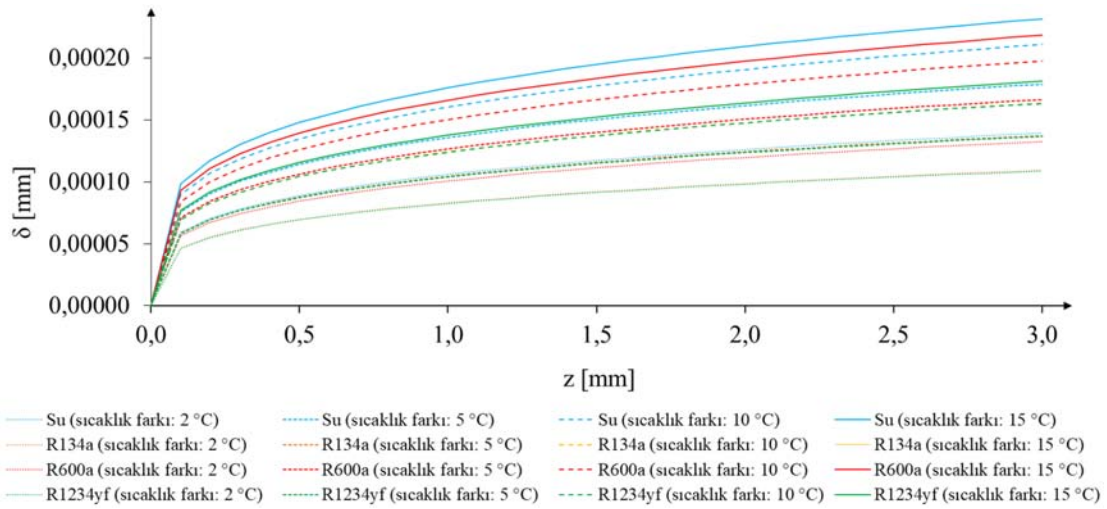
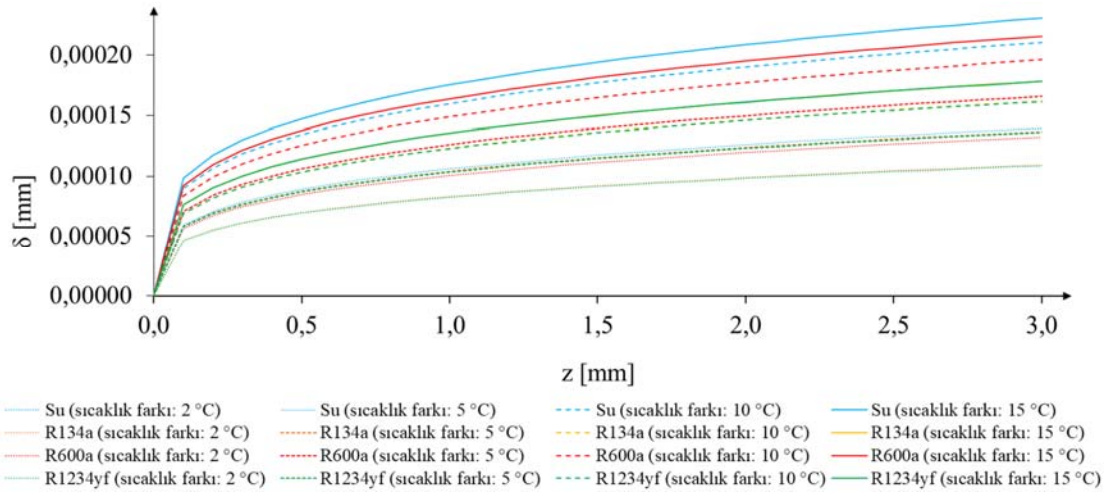
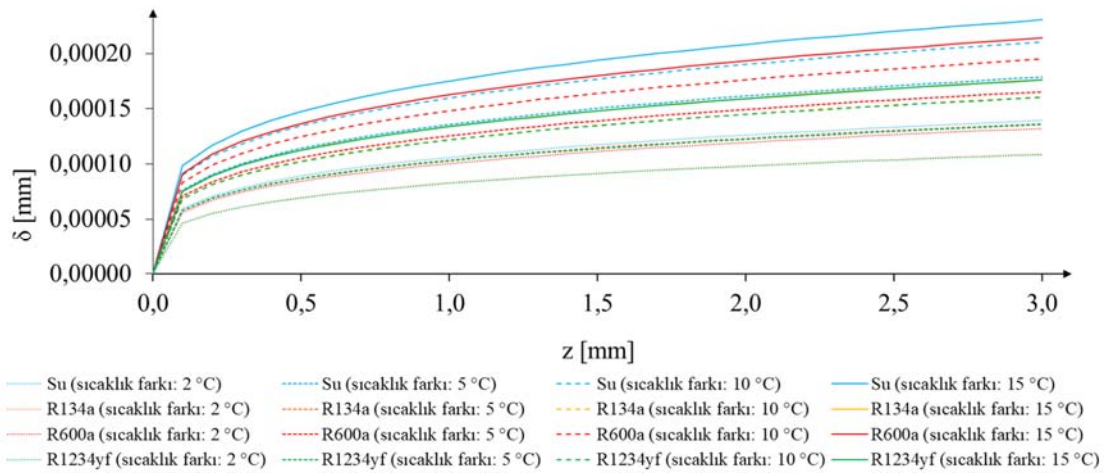
Yine laminar film tipi yoğuşmada; akışkan türünün, birim genişlikte birim zamanda yoğuşan akışkan miktarının düşey doğrultu boyunca değişimine etkisi ise, farklı buharlaşma gizli ısıları için Şekil 3a, 3b

ve 3c'de gösterilmiştir. Şekil 3a incelendiğinde; R134a'nın, en büyük yoğuşma miktarını sağladığı görülebilir. Şekil 3a'dan ayrıca, tüm akışkanlar için yoğuşan akışkan miktarının, doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki farkın artmasıyla doğal olarak arttığı görülmektedir. Şekil 3a ile varılan sonuçlar, düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanıldığı Şekil 3b ve 3c için de geçerlidir. Şekil 3a, 3b ve 3c birlikte incelendiğinde; buharlaşma gizli ısısındaki değişimin, yoğuşan akışkan miktarı üzerinde az da olsa etkisinin olduğu, en yüksek yoğuşma miktarını h_{sb} ile ifade edilen buharlaşma gizli ısısının sağladığı Şekil 3a'dan görülebilir. Zaten, laminar film yoğuşması için Nusselt'in çözümlemesi sonucunda bulunan Eş. 9 ve Eş. 10 birlikte incelendiğinde; birim zamanda birim genişlikte yoğuşan akışkan miktarının da, z ile doğrusal olmayan bir şekilde artacağı görülmür. Yoğuşan her akışkan molekülü, sıvı filmine katılacağı için doğal olarak birim zamanda birim genişlikte yoğuşan akışkan miktarının da düşey doğrultuda artması beklenir.

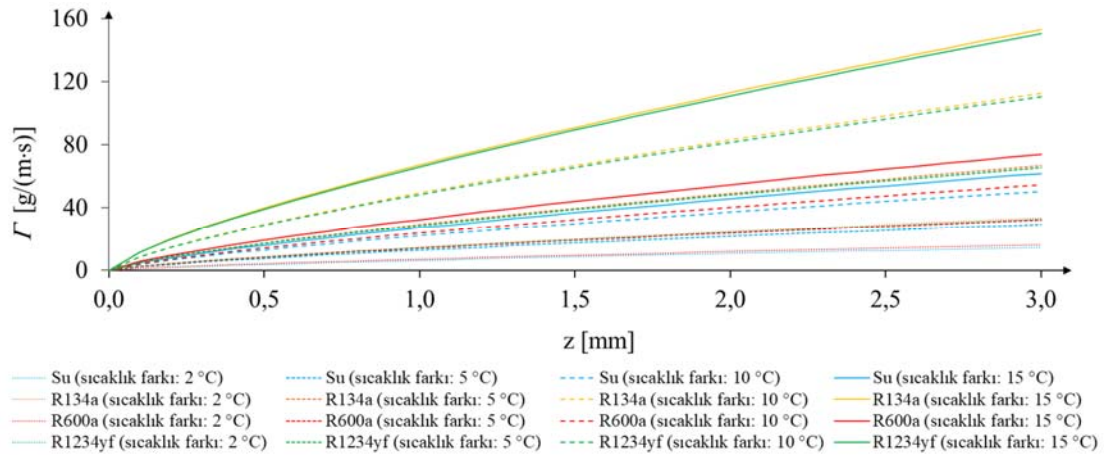
Yine laminar film tipi yoğuşmada; akışkan türünün, yerel ısı taşınım katsayısının düşey doğrultu boyunca değişimine etkisi ise Şekil 4a, 4b ve 4c'de gösterilmiştir. Şekil 4a incelendiğinde; suyun, en büyük yerel ısı taşınım katsayısına sahip olduğu görülebilir. Şekil 4a'dan ayrıca, tüm akışkanlar için yerel ısı taşınım katsayısının, doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki farkın artmasıyla, sıvı filmi kalınlığının artması nedeniyle azaldığı görülmektedir. Şekil 4a ile varılan sonuçlar, düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanıldığı Şekil 4b ve 4c için de geçerlidir. Şekil 4a, 4b ve 4c birlikte incelendiğinde, buharlaşma gizli ısısındaki değişimin, yerel ısı taşınım katsayısı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülebilir.

Nusselt'in çözümlemesinden hareketle, laminar film yoğuşmasındaki ortalama ısı taşınım katsayısının düşey doğrultu boyunca değişimi Şekil 5a, 5b ve 5c'de gösterilmiştir. Şekil 5a incelendiğinde; en yüksek ortalama ısı taşınım katsayısının, su buharının yoğuşmasında ortaya çıktığı görülebilir. Şekil 5a ile varılan sonuçlar, düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanıldığı Şekil 5b ve 5c için de geçerlidir. Şekil 5a, 5b ve 5c birlikte incelendiğinde; en yüksek ortalama ısı taşınım katsayısının, Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısının kullanılması durumunda yani Şekil 5c'de elde edildiği görülebilir.

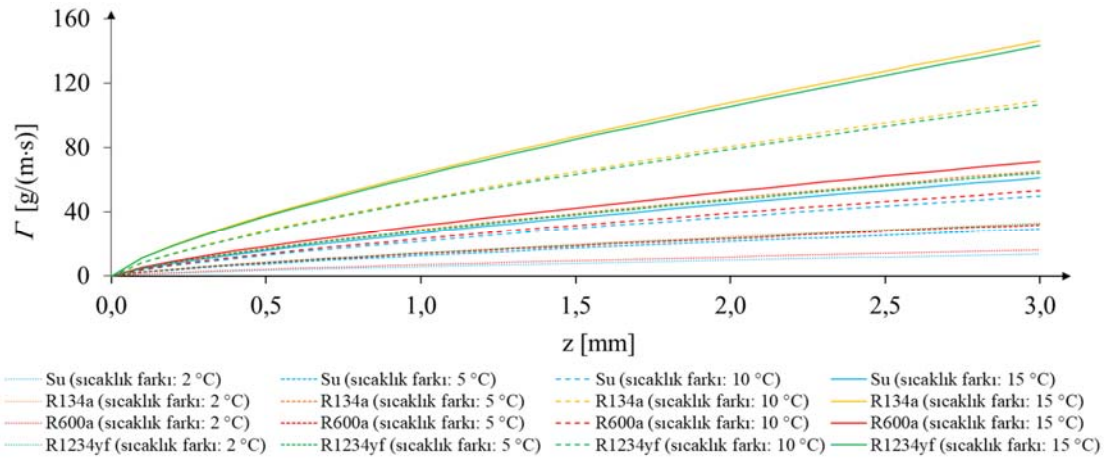
Zaten, laminar film yoğuşması için Nusselt'in çözümlemesi sonucunda bulunan Eş. 14 ve Eş. 16 incelendiğinde; yerel ve ortalama ısı taşınım katsayılarının, sırasıyla, z ile ve levha yüksekliği ile doğrusal olmayan bir şekilde azalacağı görülmür. Buna göre, düşey doğrultu boyunca artan sıvı filmi kalınlığı, buhar ortamı ile yüzey arasındaki ısı direnci artırdığı için doğal olarak ısı taşınım katsayısının düşey doğrultu boyunca azalması beklenir. Ayrıca, yoğuşma yönündeki koordinat ekseninin başlangıcında ısı taşınım katsayısının tanımsız olacağı açıktır.

a) $r = h_{sb}$ b) $r = h'_{sb}$ c) $r = h'_{sb,R}$

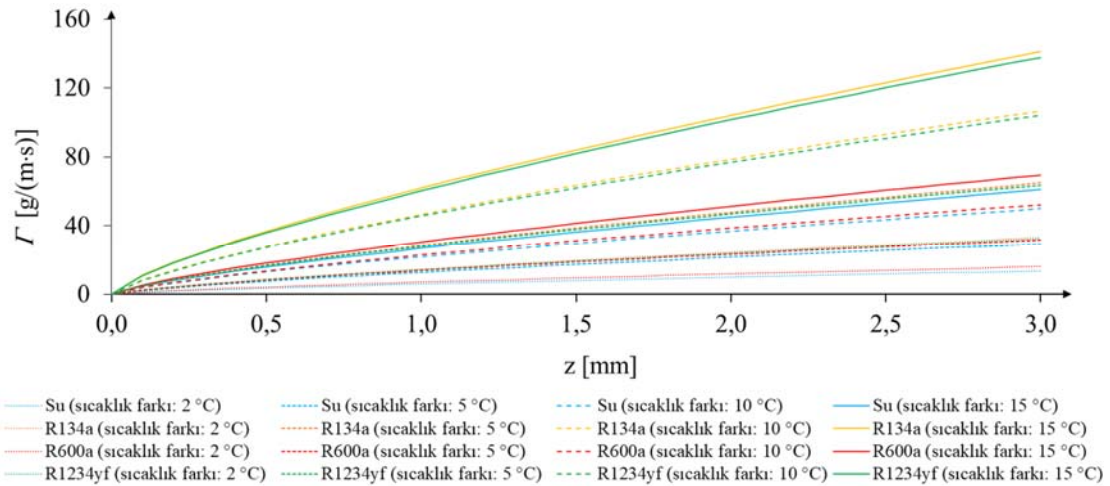
Şekil 2. Laminer film yoğuşmasında akışkan çeşidinin, sıvı filmi kalınlığı üzerindeki etkisi ($T_y = 40$ °C) (Effect of fluid type on liquid film thickness in laminar film condensation)



$$a) r = h_{sb}$$

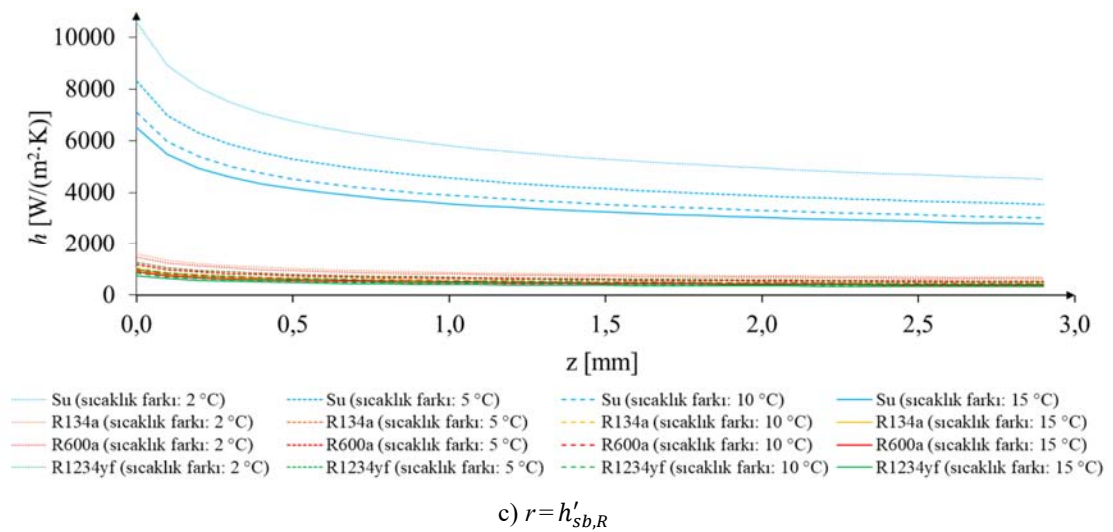
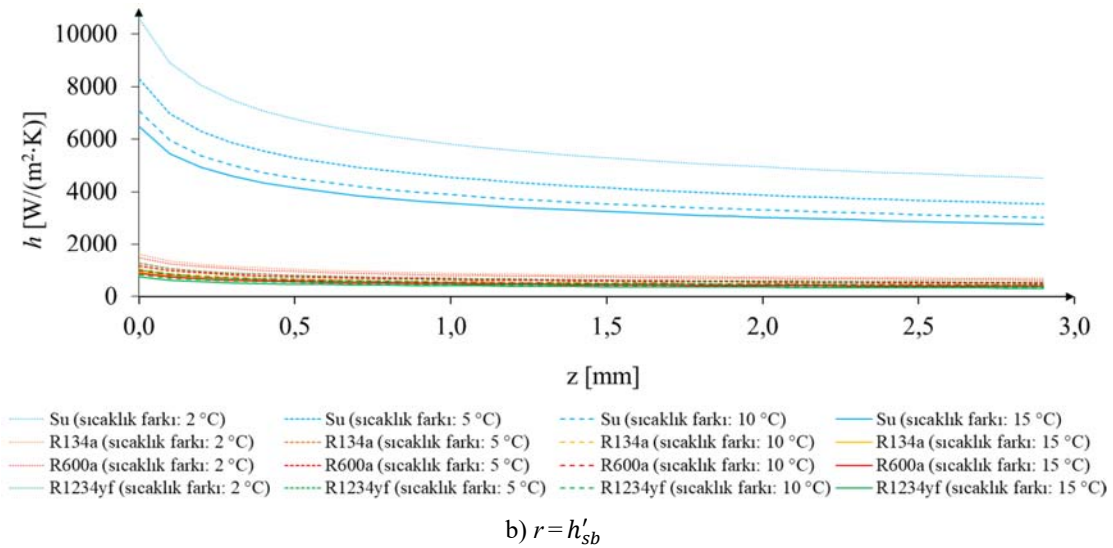
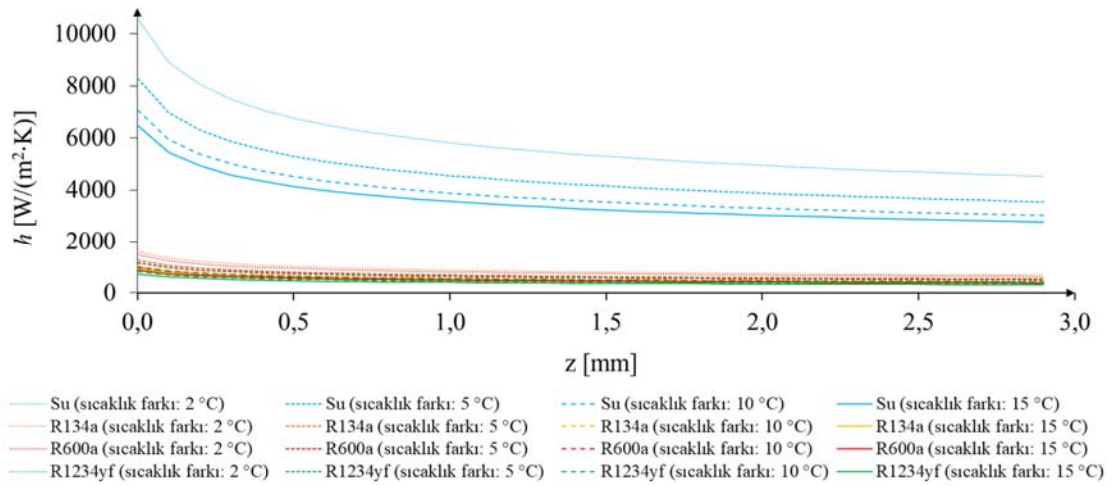


$$b) r = h'_{sb}$$

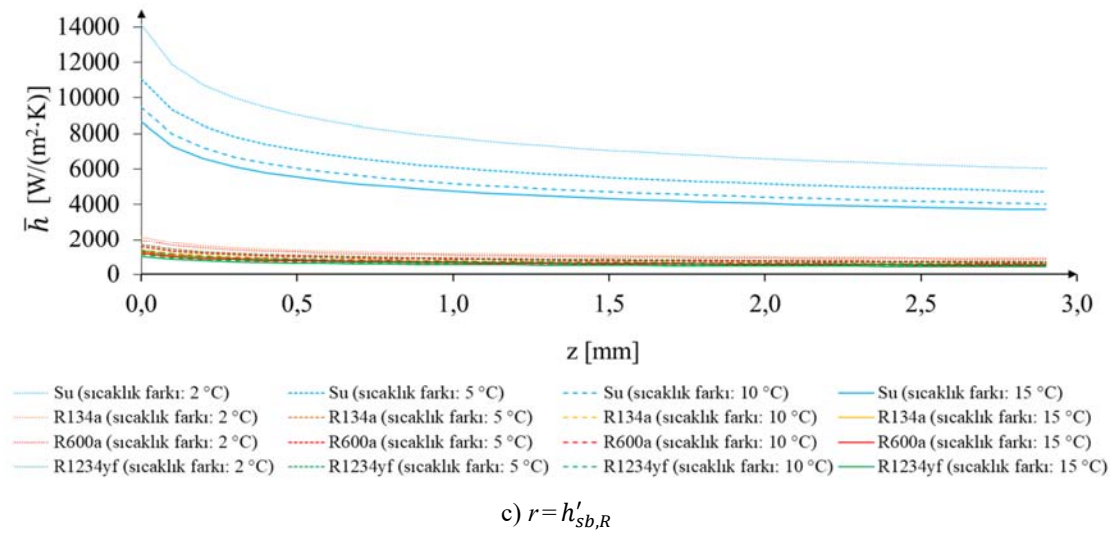
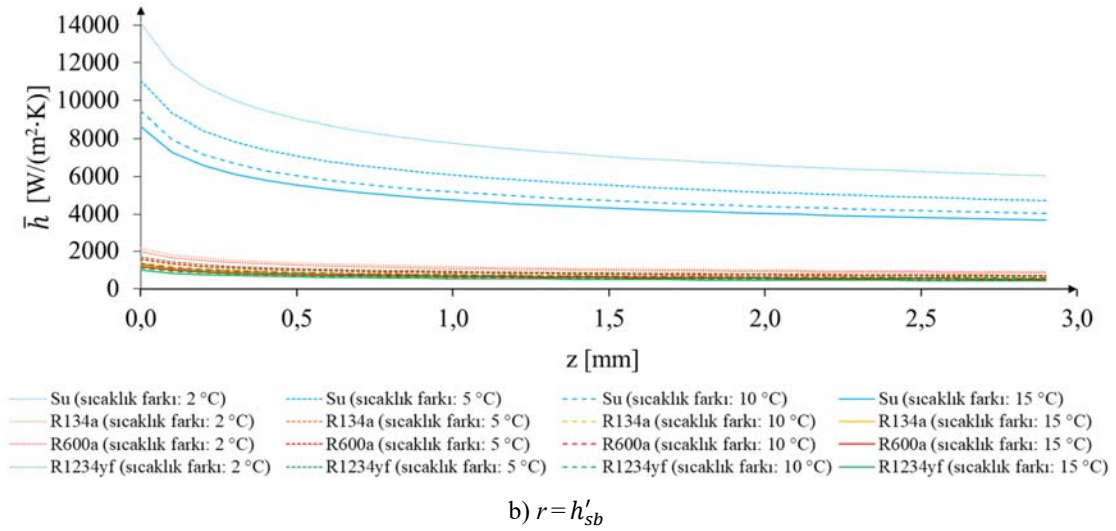
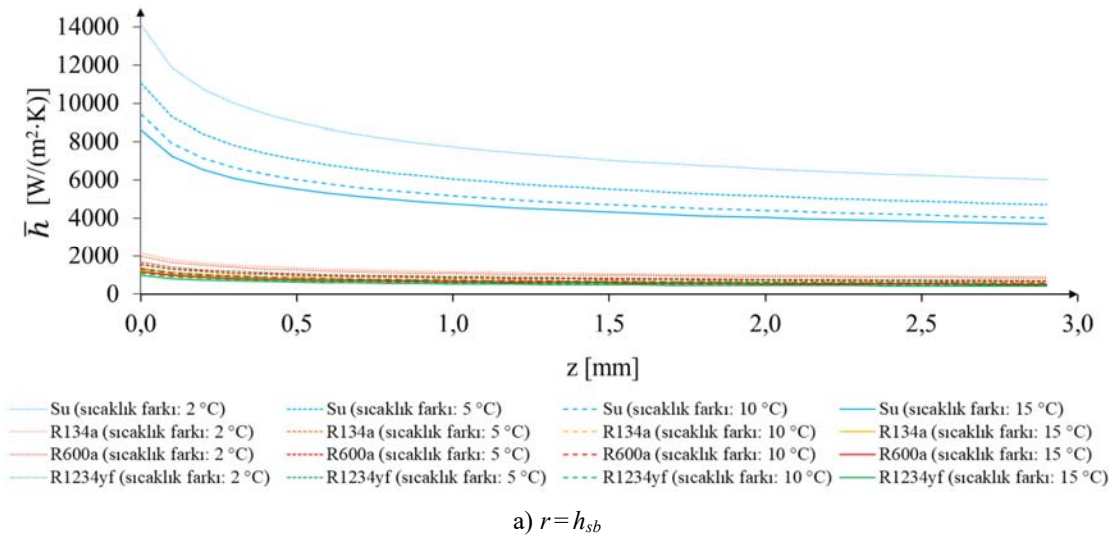


$$c) r = h'_{sb,R}$$

Şekil 3. Laminer film yoğuşmasında akışkan çeşidinin, birim genişlikte birim zamanda yoğuşan akışkan miktarı üzerindeki etkisi (Effect of fluid type on the amount of fluid condensed per unit time in unit width in laminar film condensation)



Şekil 4. Laminer film yoğunlaşmasında akışkan çeşidinin, yerel ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi
(Effect of fluid type on local heat transfer coefficient in laminar film condensation)



Şekil 5. Laminer film yoğuşmasında akışkan çeşidinin, ortalama ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi
(Effect of fluid type on average heat transfer coefficient in laminar film condensation)

Çalışmanın bu kısmında ise, Şekil 5a, 5b ve 5c’de ayrı ayrı gösterilen, ortalama ısı taşınım katsayısının laminar film yoğuşmasında; akışkan türü, doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki fark ve buharlaşma gizli ısı ile değişimi, Şekil 6’da bir arada sunulmuştur. Şekil 6’dan görüleceği üzere; laminar film yoğuşmasındaki tüm durumlarda, en yüksek ortalama ısı taşınım katsayısı değerlerini su vermektedir.

4.2. Dalgalı Laminer Film Yoğuşmasında Ortalama Isı Taşınım Katsayısı ($\bar{h}$)

(Average Heat Transfer Coefficient in Wavy Laminar Film Condensation)

Çalışmanın bu kısmında ise, dalgalı laminar film tipi yoğuşmada; ortalama ısı taşınım katsayısının, akışkan türü, doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki fark ve buharlaşma gizli ısı ile değişimi incelenmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Dalgalı laminar film yoğuşması için inceleme; hem Nusselt’in çözümlemesine göre hem de literatürde Incropera ve DeWitt [27] tarafından önerilen Eş. 23 ile verilen Re sayısı kullanılarak yapılmış olup bulunan ortalama ısı taşınım katsayısının, bahsedilen parametrelere göre değişimi Şekil 7a, 7b ve 7c’de gösterilmiştir. Şekil 7a incelendiğinde; dalgalı laminar film yoğuşmasında tüm durumlar için en yüksek ortalama ısı taşınım katsayısının, Kutateladze’nin önerdiği Eş. 23’ün kullanılmasıyla su buharının yoğuşmasında ortaya çıkmıştır. Şekil 7a ile varılan sonuçlar, düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanıldığı Şekil 7b ve 7c için de geçerlidir. Şekil 7a, 7b ve 7c birlikte incelendiğinde; en yüksek ortalama ısı taşınım katsayısının, Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanılması durumunda elde edildiği görülebilir.

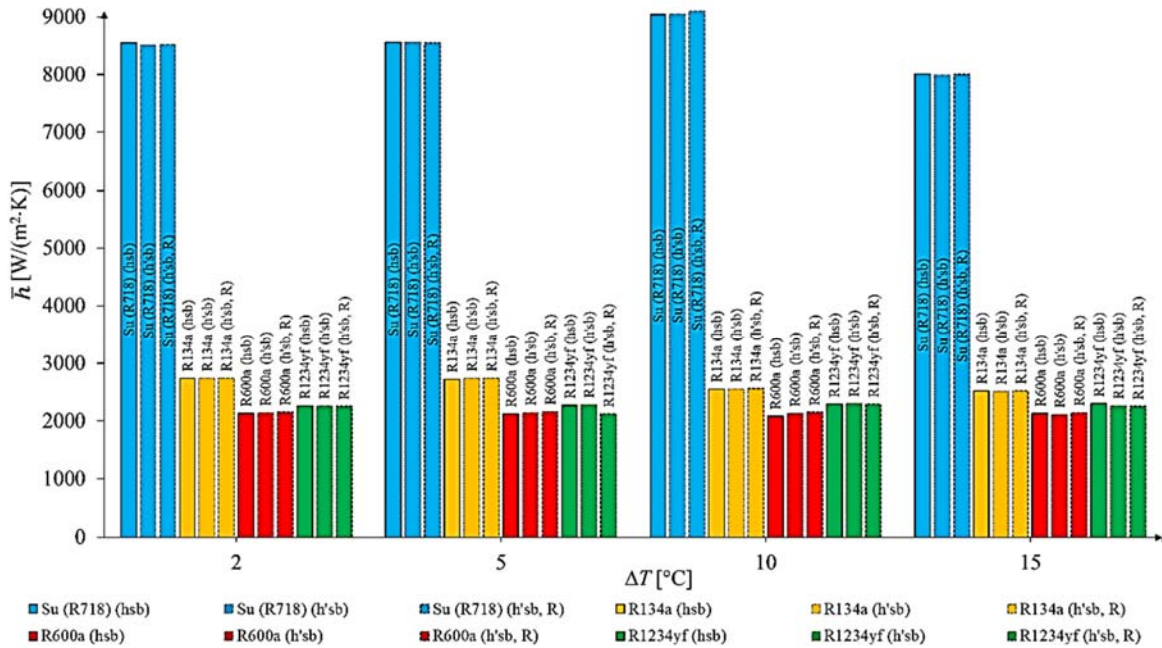
4.3. Türbülanslı Film Yoğuşmasında Ortalama Isı Taşınım Katsayısı ($\bar{h}$) (Average Heat Convection Coefficient in Turbulent Film Condensation)

Çalışmanın bu kısmında, türbülanslı film yoğuşmasında; ortalama ısı taşınım katsayısının, akışkan türü, doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki fark ve buharlaşma gizli ısı ile değişimi incelenmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Buna göre, türbülanslı film

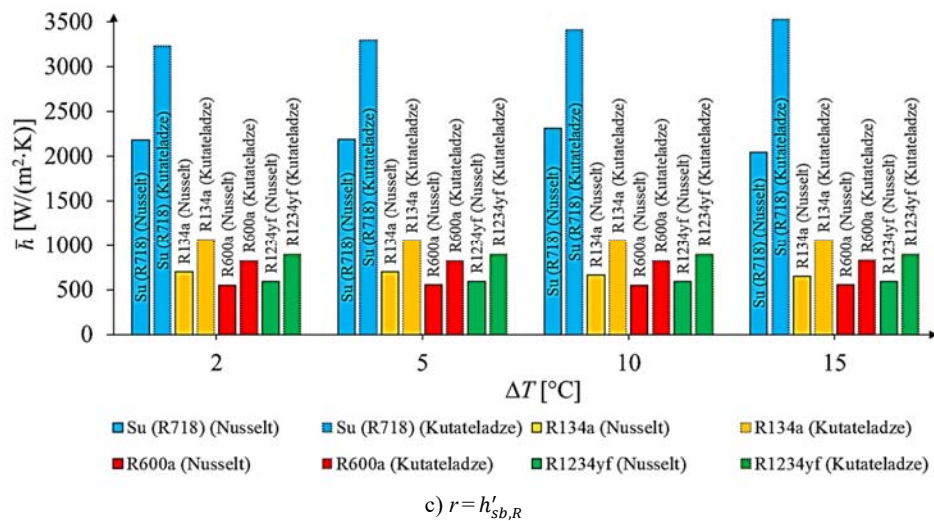
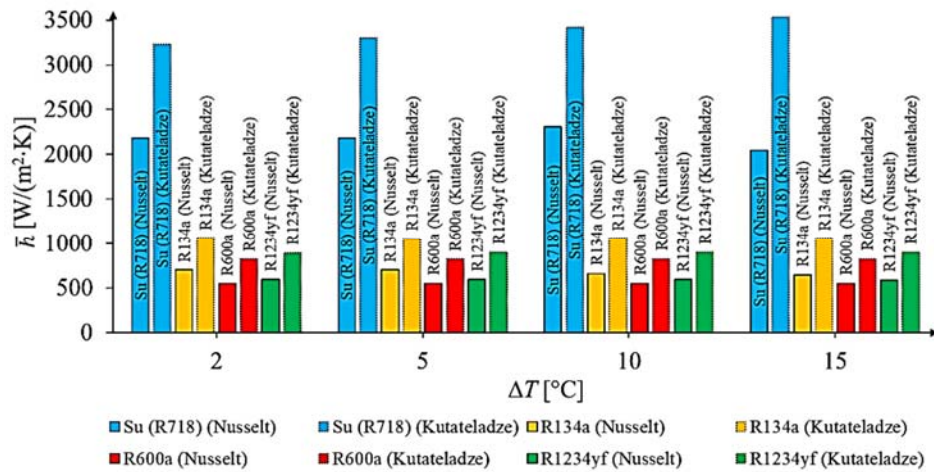
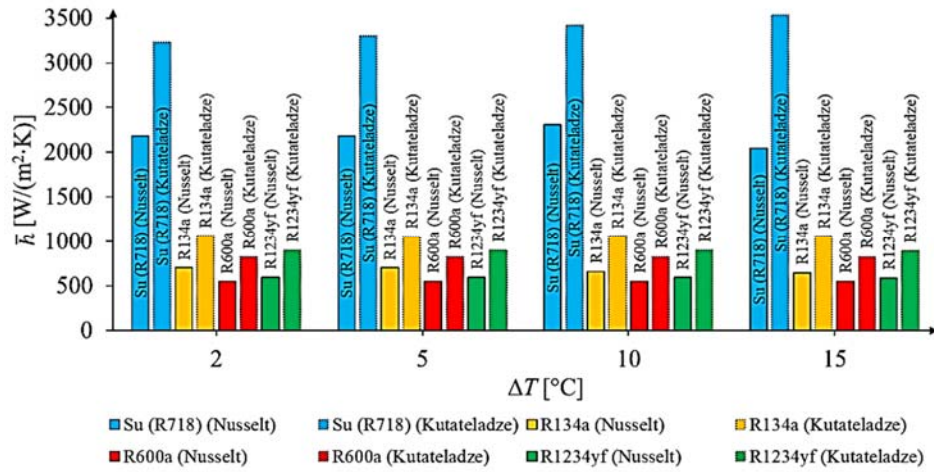
yoğuşması için literatürde önerilen Eş. 24 ile verilen Re sayısı kullanılarak bulunan ortalama ısı taşınım katsayısının çeşitli parametrelere göre değişimi Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde; türbülanslı film yoğuşmasında en yüksek ortalama ısı taşınım katsayısının, su buharının yoğuşmasında ve Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının kullanılması durumunda elde edildiği görülebilir.

Şekil 4 ile Şekil 8 incelendiğinde suyun; laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film tipi yoğuşma türlerinin tümünde, hem yerel hem de ortalama ısı taşınım katsayısı bakımından en yüksek değerleri sağladığı görülebilir. Buharlaşma gizli ısılarının, ortalama ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisinin de incelendiği bu çalışmada su buharının; laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşmasında; buharlaşma gizli ısılarının, ortalama ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi ise sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 6 ile Şekil 8’den hareketle; bu çalışmaya konu olan iki farklı düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının su buharının yoğuşmasında ortalama ısı taşınım katsayısı üzerinde, standart buharlaşma gizli ısılarına göre, en fazla %19,951’lik bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu maksimum etki, Şekil 7’de gösterildiği gibi; su buharının, 15 °C sıcaklık farkı altında gerçekleşen ve Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının dikkate alındığı dalgalı laminar film yoğuşmasında, Kutateladze’nin önerdiği Eş. 23 ile hesaplanan Re sayısı kullanılarak bulunan ortalama ısı taşınım katsayısı değerinde ortaya çıkmıştır. İncelenen tüm durumlarda; suyun en yüksek ısı taşınım katsayısını sağlamış olmasının temel nedeni, suyun buharlaşma gizli ısılarının, incelenen akışkanlar arasında en yüksek olmasındandır.

Çalışma kapsamında son olarak; laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film tipi yoğuşmada, ilgili Re sayısının elde edilebilmesi için gerekli levha yüksekliğinin çeşitli parametrelerle değişimi elde edilmiş olup sonuçlar Tablo 3’de gösterilmiştir. Bahse konu yoğuşma rejimlerinde ilgili Re sayıları sırasıyla $Re_l \approx 30$, $Re_{dl} \approx 1799$ ve $Re_t \approx 2000$ ’dir.



Şekil 6. Laminer film yoğuşmasında; akışkan çeşidi, buharlaşma gizli ısı ve sıcaklık farkının ortalama ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi (Effect of fluid type, latent heat of vaporization, and temperature difference on average heat transfer coefficient in laminar film condensation)



Şekil 7. Dalgalı laminar film yoğunmasında akışkan çeşidinin ve Nusselt ve Kutateladze yaklaşımlarının, ortalama ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi (tüm durumlar için $Re = 1799$ 'dur)

(Effect of fluid type and Nusselt and Kutateladze approximations on the average heat transfer coefficient in wavy laminar film condensation ($Re = 1799$ for all cases))

Tablo 3. Laminer, dalgalı laminer ve türbülanslı film tipi yoğuşmanın elde edilebilmesi için gerekli minimum levha yüksekliğinin çeşitli parametrelerle değişimi ($Re_l \approx 30$, $Re_{dl} \approx 1799$, $Re_t \approx 2000$)
(Variation of the minimum plate height required to obtain laminar, wavy laminar, and turbulent film type condensation with various parameters)

Akışkan	ΔT [°C]	L [m]											
		h_{sb} 'nin kullanılması durumunda				h'_{sb} 'nin kullanılması durumunda				$h'_{sb,R}$ 'nin kullanılması durumunda			
		Dalgalı laminer				Dalgalı laminer				Dalgalı laminer			
		Laminer	Nusselt	Kutateladze	Türbülanslı (Labuntsov)	Laminer	Nusselt	Kutateladze	Türbülanslı (Labuntsov)	Laminer	Nusselt	Kutateladze	Türbülanslı (Labuntsov)
Su (R718)	2	0,676	158,640	107,150	106,903	0,679	158,802	107,301	107,205	0,679	158,951	107,405	107,150
	5	0,262	61,501	40,752	40,740	0,263	61,703	40,883	40,870	0,264	61,862	40,983	40,970
	10	0,118	27,792	18,771	18,825	0,120	27,961	18,892	18,950	0,120	28,113	18,991	19,050
	15	0,085	19,971	11,563	11,626	0,086	20,174	11,671	11,740	0,086	20,324	11,760	11,835
R134a	2	0,035	8,272	5,464	6,210	0,035	8,342	5,502	6,260	0,035	8,392	5,543	6,298
	5	0,013	3,223	2,146	2,431	0,014	3,281	2,183	2,479	0,014	3,332	2,214	2,519
	10	0,007	1,624	1,028	1,156	0,007	1,683	1,060	1,203	0,007	1,746	1,092	1,241
	15	0,005	1,051	0,649	0,733	0,005	1,112	0,680	0,778	0,005	1,177	0,723	0,815
R600a	2	0,070	16,200	10,844	12,335	0,071	16,293	10,910	12,410	0,072	16,385	10,966	12,470
	5	0,028	6,321	4,243	4,821	0,027	6,414	4,301	4,896	0,027	6,505	4,361	4,957
	10	0,014	3,051	2,041	2,320	0,014	3,153	2,102	2,393	0,013	3,236	2,167	2,453
	15	0,009	1,963	1,313	1,488	0,009	2,062	1,371	1,560	0,009	2,131	1,422	1,619
R1234yf	2	0,028	6,372	4,234	4,816	0,028	6,436	4,272	4,857	0,028	6,472	4,303	4,890
	5	0,011	2,486	1,643	1,865	0,011	2,532	1,673	1,905	0,012	2,570	1,701	1,937
	10	0,005	1,182	0,787	0,886	0,005	1,241	0,811	0,926	0,006	1,287	0,845	0,958
	15	0,003	0,750	0,499	0,561	0,004	0,802	0,530	0,600	0,004	0,856	0,552	0,631

Tablo 3'de de görüldüğü gibi ve tahmin edildiği üzere minimum levha yüksekliği, laminer yoğuşmada ortaya çıkarken maksimum levha yüksekliği türbülanslı yoğuşmada ortaya çıkmıştır. Çalışmada incelenen iki farklı düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısının, levha yüksekliği üzerinde en fazla %15,625'lik bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu maksimum etki; R1234yf buharının, yine 15 °C sıcaklık farkı altında gerçekleşen ve Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısının dikkate alındığı laminer film yoğuşmasında, yani Nusselt çözümlemesi ile bulunan ortalama ısı taşınım katsayısı değerinde ortaya çıkmıştır.

Laminer, dalgalı laminer ve türbülanslı akışlar; akış doğrultusundaki mesafeye bağlı olarak oluştuğundan, film tipi yoğuşma rejimleri de doğal olarak yoğuşma doğrultusundaki mesafeye bağlı bir şekilde oluşacaktır. Yani, daha küçük levha yüksekliklerinde laminer film tipi yoğuşma rejiminde kalınırken levha yüksekliği arttıkça sırasıyla dalgalı laminer ve türbülanslı film tipi yoğuşma rejimlerine erişilebilmektedir.

5. Simgeler (Symbols)

Ad : McAdam sayısı
 c : Özgül ısı, J/(kg·K)
 C : Isıl kapasite, W/K; hacimsel derişiklik, kg-i/m³ veya mol-i/m³
 D : Çap, silindir çapı, m
 D_h : Hidrolik çap, m
 g : Yer çekimi ivmesi, m/s²
 Gr : Alternatif Gr sayısı [$g(\rho_{s,y} - \rho_{b,\infty})L^3/(\nu^2 \rho_s d)$]
 Gr : Grashof sayısı ($g\beta(T_y - T_\infty)L^3/\nu^2$)
 h : Yerel ısı taşınım katsayısı, W/(m²·K)

$\bar{h}$: Ortalama ısı taşınım katsayısı, W/(m²·K)
 h_{sb} : Buharlaşma gizli ısısı, J/kg
 h'_{sb} : Düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısı, J/kg ($h_{sb} + c_p \Delta T$)
 $h'_{sb,R}$: Rohsenow düzeltilmiş buharlaşma gizli ısısı, J/kg ($h_{sb} + c_p \Delta T$)
 Ja : Jacob sayısı [$c_{p,s}(T_d - T_y)/h_{sb}$]
 k : Isı iletim katsayısı, W/(m·K)
 L : Levha yüksekliği, m
 $\dot{m}$: Kütlesel debi, kg/s
 Re : Reynolds sayısı ($\nu D/\nu$, $\nu L/\nu$, $\rho \nu D/\mu$ veya $\rho \nu L/\mu$)
 T : Sıcaklık, °C veya °F
 u : Hız, m/s
 y : Yatay koordinat, m
 z : Eksenel koordinat, yoğuşma yönündeki konum, m
 Nu : Nusselt sayısı (hD_h/k_a veya hL/k_a)
 p : Basınç, Pa
 Pr : Prandtl sayısı ($\nu/\alpha = \mu c_p/k$)
 q : Isı geçişi, W
 q'' : Isı akısı, W/m²
 r : Buharlaşma gizli ısısı, J/kg

5.1. Alt indisler (Subscripts)

a : Akışkan
 b : Buhar
 d : Doyma, dış
 dl : Dalgalı laminer
 l : Laminer
 L : Düzlem levha

m	: Ortalama
p	: Sabit basınçta
s	: Sıvı, sürtünme
t	: Türbülanslı
x	: Levha genişliği yönündeki koordinat, m
y	: Sıvı filmi kalınlığı yönündeki koordinat, m, yüzey
z	: Düşey koordinat (yoğuşma yönündeki konum), m

5.2. Kısaltmalar (Abbreviations)

A	: Refrigerants that have an occupational exposure limit of 400 ppm or greater.
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği)
$\text{CH}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	: 2-metilpropan (izobutan)
CH_2FCF_3	: 1,1,1,2-tetrafloroetan
$\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$	: 2,3,3,3-tetrafloro-1-propen
GWP_{100}	: Global Warming Potential (Küresel ısınma potansiyeli)
H_2O	: Su
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
NTU	: Geçiş birimi sayısı (UA/C_{min})
ODP	: Ozone Depletion Potential (Ozon tahribatı potansiyeli)

5.3. Üst indisler (Superscripts)

$\cdot$	: Birim zamanda
$-$	: Ortalama

Yunan harfleri (Greek letters)

Γ	: Birim genişlikten geçen sıvı debisi, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
δ	: Sıvı filmi kalınlığı, m
Δ	: Fark operatörü
μ	: Dinamik viskozite, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	: Kinematik viskozite, m^2/s
ρ	: Yoğunluk, kg/m^3
τ	: Kayma gerilmesi, Pa
χ_c	: Yoğuşma katsayısı
χ_E	: Buharlaştırma katsayısı
∂	: Kısmi türev operatörü

6. Sonuçlar (Conclusions)

Su, R134a, R600a ve R1234yf akışkanlarının durgun ve saf buharlarının, eşsıcaklıklı düzlemsel düşey bir yüzey üzerinde laminar, dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşmasının, hem hidrodinamik hem de ısı bakımından ayrı ayrı incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bu çalışmada incelenen yoğuşma rejimlerinin tümünde; sıvı filmi kalınlığı ve birim zamanda birim genişlikte yoğuşan buhar miktarı, z ile lineer olmayan bir şekilde artarken yerel ve ortalama ısı taşınım katsayıları azalmaktadır. Ayrıca; sıvı filmi kalınlığı ve yerel ve ortalama ısı taşınım katsayıları bakımından azami değerleri su sağlarken yoğuşma miktarı bakımından ise R134a sağlamaktadır.
- Yine, bu çalışmada incelenen yoğuşma rejimlerinin tümünde; yerel ve ortalama ısı taşınım katsayılarının en büyük değerleri, laminar film tipi yoğuşmada elde edilmiştir.
- Nusselt'in çözümlemesi ile elde edilen sonuçlardan hareketle; sıvı filmi kalınlığına bağlı olmaları nedeniyle, birim genişlikte birim zamanda yoğuşan buhar miktarı ile yerel ve ortalama ısı taşınım

katsayılarının da z ile lineer olmayan bir şekilde değiştiği görülmüştür.

- Nusselt'in çözümlemesinden farklı olarak; sıvı filmi içerisinde sıcaklık değişiminin olduğu ve bu değişimin doğrusal olduğu kabulüyle bulunan düzeltilmiş buharlaşma gizli ısıları kullanarak elde edilen sonuçlardan hareketle; düzeltilmiş bu buharlaşma gizli ısılarının, analiz edilen parametrelere önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Benzer durum, Rohsenow tarafından önerilen düzeltilmiş buharlama gizli ısıları için de geçerlidir.
- Çalışmada yer alan tüm akışkanlar ve incelenen tüm durumlar için; levha yüzey sıcaklığı sabit tutulup doyma sıcaklığının artırılmasıyla, analiz edilen tüm parametrelerde artış gözlemlenmiştir.
- Dalgalı laminar film tipi yoğuşmada; Kutateladze tarafından önerilen yaklaşım, Nusselt'in çözümlemesine göre, ortalama ısı taşınım katsayısı bakımından daha büyük değerler sağlamıştır. Bu nedenle; laminar film tipi yoğuşma için geliştirildiği bilinen Nusselt çözümlemesinin, dalgalı laminar film tipi yoğuşmada kullanılmasının sağlıklı sonuçlar vermeyeceği anlaşılmaktadır.
- Türbülanslı film tipi yoğuşma için Labuntsov tarafından önerilen yaklaşımın kullanılmasıyla, ortalama ısı taşınım katsayısı bakımından en büyük değerleri su buharının verdiği ve düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının, bu parametre üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.
- Çalışma sonucunda; yoğuşan akışkan miktarı bakımından en büyük değeri R134a'nın verdiği, geriye kalan parametreler bakımından ise en büyük değerleri suyun sağladığı, su buharını, R600a'nın takip ettiği, R600a'yı ise, benzer davranışlar sergileyen R134a ile R1234yf'nin, sırasıyla takip ettiği görülmüştür.
- İncelenen tüm durumlar birlikte göz önüne alındığında, laminar film yoğuşmasında su; sıvı filmi kalınlığı bakımından R1234yf'ye göre %24,08 daha fazla; birim zamanda birim genişlikte yoğuşan akışkan bakımından R134a'ya göre %147,32 daha az, levhanın sonundaki yerel ve ortalama ısı taşınım katsayıları bakımından ise %88,68 daha fazla performans sağlamıştır. Dalgalı laminar ve türbülanslı film yoğuşmasında ise su; ortalama ısı taşınım katsayısı bakımından R600a'ya göre sırasıyla, %76,51 ve %79,23 daha fazla performans sağlamıştır.

Bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara, aşağıdaki çalışmaları yapmaları önerilir:

- Teknolojik gelişmelerden yararlanılarak, film tipi yoğuşmada oluşan sıvı filmi içerisindeki sıcaklık dağılımının doğrusal değişimi yerine, çeşitli fonksiyonlarla temsil edilen ve doğrusal olmayan sıcaklık dağılımı esas alınıp yeni bir düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının, daha hassas bir şekilde bulunması araştırılabilir.
- Yine teknolojik gelişmelerden yararlanılarak, Rohsenow tarafından film tipi yoğuşma için önerilen düzeltilmiş buharlaşma gizli ısılarının, teorik olarak daha hassas bir şekilde bulunması araştırılabilir.
- Benzer şekilde, teknolojik gelişmelerden yararlanılarak yapılacak gelişmiş deneylerle, film tipi yoğuşmadaki buharlaşma gizli ısılarının gerçek değerinin, daha hassas bir şekilde bulunması araştırılabilir.
- Kimyasal yapıları dikkate alınarak gruplandırılacak çok sayıda akışkan, film tipi yoğuşmadaki temel parametreler bakımından karşılaştırılabilir.

Kaynaklar (References)

- Nusselt W., Surface condensation of water vapour, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 60 (27), 541-546, 1916.
- Rohsenow W. M., Heat transfer and temperature distribution in laminar-film condensation, Transactions of the ASME, 78, 1645-1648, 1956.
- Rohsenow W. M., Webber J. H., and Ling A. T., Effect of vapor velocity on laminar and turbulent-film condensation, Transactions of the ASME, 78, 1637-1644, 1956.

4. Mills A. F. and Seban R. A., The condensation coefficient of water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10, 1815-1827, 1967.
5. Rohsenow W. M., Film condensation, *Applied Mechanics Reviews*, 23, 487-496, 1970.
6. Churchill S. W., Laminar film condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29, 1219-1226, 1986.
7. Sadasivan P. and Lienhard J. H., Sensible heat correction in laminar film boiling and condensation, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 109, 545-547, 1987.
8. 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.
9. Shang D.-Y. and 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.
10. Poots G. and 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.
11. Chen M. M., An analytical study of laminar film condensation: Part I-flat plates, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 48-54, 1961.
12. Koh J. C. Y., Sparrow E. M., and Hartnett J. P., The two phase boundary layer in laminar film condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2, 69-82, 1961.
13. Koh J. C. Y., An integral treatment of two-phase boundary layer in film condensation, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 359-362, 1961.
14. Sparrow E. M. and Gregg J. L., A boundary-layer treatment of laminar film condensation, *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 13-18, 1959.
15. Yang K.-T., Laminar film condensation on a vertical nonisothermal plate, *Journal of Applied Mechanics*, 203-205, 1966.
16. Brouwers H. J. H., Film condensation on non-isothermal vertical plates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32 (4), 655-663, 1989.
17. Liu X. and Cheng P., Lattice Boltzmann simulation of steady laminar film condensation on a vertical hydrophilic subcooled flat plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 507-514, 2013.
18. Si X., Zhu X., Zheng L., Zhang X., and Lin P., Laminar film condensation of pseudo-plastic non-Newtonian fluid with variable thermal conductivity on an isothermal vertical plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 979-986, 2016.
19. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Tyrinov A. I., and Blinov D. G., Heat transfer at film condensation of stationary vapor with nanoparticles near a vertical plate, *Applied Thermal Engineering*, 73 (1), 391-398, 2014.
20. Bilen K., Erdoğan İ., Özgüç F., Overview of the literature on condensation, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40 (1), 713-748, 2024.
21. ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI), Chapter 29: Refrigerants, ASHRAE, Georgia, 2021.
22. ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI), Chapter 30: Thermophysical Properties of Refrigerants, ASHRAE, Georgia, 2021.
23. Internet, 2023, NASA, Steamy relationships: how atmospheric water vapor amplifies earth's greenhouse effect, <https://climate.nasa.gov/explore>.
24. Bilen K., Dar kanallarda yoğunlaşma, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
25. Genceli O. F., Çözümlü Isı Taşınımı Problemleri, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2002.
26. Çengel Y. A., Isı ve Kütle Transferi: Pratik bir yaklaşım, (Üçüncü basımdan çeviri, Çevirenler: Tanyıldızı V., Dağtekin İ.), Güven Bilimsel Yayıncılık, İzmir, 2011.
27. Incropera F. P. ve DeWitt D. P., Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, (Dördüncü basımdan çeviri, Çevirenler: Derbentli T. vd.), Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001.

