

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ ISI
ALICILARIN AKIŞ KAYNAMA PERFORMANSININ DENEYSEL
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Zeynep KÜÇÜKAKÇA MERAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

OCAK 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ ISI
ALICILARIN AKIŞ KAYNAMA PERFORMANSININ DENEYSEL
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Zeynep KÜÇÜKAKÇA MERAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nezaket PARLAK

OCAK 2024

Zeynep KÜÇÜKAKÇA MERAL tarafından hazırlanan “**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ ISI ALICILARIN AKIŞ KAYNAMA PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ** ” adlı tez çalışması 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : Unvan Adı SOYADI
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Nezaket PARLAK (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : Unvan Adı SOYADI
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : Unvan Adı SOYADI
(Gerekliyse) Üniversitesi

Jüri Üyesi : Unvan Adı SOYADI
(Gerekliyse) Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum **“TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ ISI ALICILARIN AKIŞ KAYNAMA PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ”** başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(02/01/2024).

Zeynep KÜÇÜKAKÇA MERAL





Biricik kızım İpek Ece'ye



TEŞEKKÜR

Öncelikle bilimsel fikir ve tecrübelerinden yararlandığım, tüm sabrı ile beni çalışmaya sevk eden danışman hocam Prof. Dr. Nezaket Parlak'a, tüm titizliği ile çalışmalarımı takip eden deneysel tecrübesinden yararlandığım tez izleme jürisinde bulunan Dr. Öğr. Üyesi Hasan Küçük'e, tez izleme jürisinde bulunan yeni fikirleri ile ve yaptığımız çalışmayı beğenerek bizi cesaretlendiren sayın Prof. Dr. Elif Öğüt'e (KOÜ), yaptığım çalışmada laboratuvar olanaklarını ve bilimsel tecrübelerini bizimle paylaşan Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki, Prof. Dr. Ali Osman Kurt'a, mesai arkadaşlarım Öğr.Gör.Fuat Kayış, Dr. Öğr. Üyesi Deniz Gültekin ve Arş. Gör. Erhan Duru'ya, manevi desteklerini esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma, Doktora tez projeleri kapsamında (Proje no: 2018-2-9-50) maddi destek sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığına, bugünlere gelmemde en büyük emekleri olan canım Annem ve Babama, çalışma süresince bilimsel desteği olan canım ablam Doç. Dr. Gökçe Candan'a ve kardeşlerim Dr. Bilge Nur Küçükakça ve Öğr.Gör.Tolga Meral'e, maddi, manevi ve bilimsel desteğini esirgemeyen eşim Tayfun Meral'e ve bu doktora teziyle birlikte büyüttüğüm en değerli varlığım, biricik kızım İpek Ece' ye teşekkür ederim.

Zeynep KÜÇÜKAKÇA MERAL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Mini ve Mikro Kanallarda Tek Fazlı Akış ve Isı Geçişi	6
2.2. Akış Kaynaması ve Isı Geçişi	11
2.3. Mini ve Mikrokanallı Isı Alıcısı Üretimi, Malzeme Özellikleri ve Optimizasyon Çalışmaları	15
2.4. Akış Kaynaması Görüntüleme Yöntemleri	25
3. MİKROKANANALLI ISI ALICILARININ ÜRETİMİ.....	33
3.1. Toz Metalurjisi	34
3.1.1. Toz karakterizasyonu	35
3.1.2. Fiziksel özellikleri	35
3.1.3. Kimyasal özellikleri	36
3.1.4. Teknolojik özellikleri	37
3.1.5. Bakır tozu genel özellikleri	38
3.1.6. Kalıpla presleme	39
3.1.7. Sinterleme	40
3.1.8. Sinterleme atmosferi	42
3.2. Deney Tasarımı	43
3.2.1. Tam faktöriyel deney tasarımı	44
3.2.2. Kesirli faktöriyel deney tasarımı	44
3.2.3. Taguchi metodu.....	45
3.2.4. Taguchi metodu kullanarak sinterleme deney tasarımının belirlenmesi..	46
3.3. Deneysel Sonuçlar	47
3.4. Varyans Analizi (ANOVA).....	51
3.5. Karakterizasyon.....	55
3.5.1. Isı iletim katsayısı	55
3.5.2. Pürüzlülük ölçümü	56
3.5.3. Sertlik ölçümü	57
3.5.4. Islanabilirlik	58
3.5.5. Yoğunluk tayini.....	59
3.6. Isı Alıcısı Tasarımı	60

3.7. Tel Erezyon Yöntemi	61
4. ÇİFT FAZLI AKIŞ TEORİSİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA	67
5. ISI ALICILARININ AKIŞ KAYNAMA DENEYLERİ VE TEORİSİ	75
5.1. Test Bölgesi	76
5.2. Belirsizlik Analizi	78
5.3. Hesaplamalarda Kullanılan Bağını ve Denklemler	78
5.3.1. Basınç düşümü	81
6. AKIŞ KAYNAMASI DENEYSEL SONUÇLARI VE TARTIŞMA	85
6.1. Mikrokanallı Isı alıcılarında Kaynama Akışındaki Basınç Düşümü ve Isı Transferinin Deney Sonuçları	85
6.1.1. Deneysel olarak ölçülen duvar sıcaklıkları	86
6.1.2. Kaynama akışındaki deneysel olarak belirlenen ısı taşınım Katsayıları ..	87
6.1.3. Basınç düşümü	92
7. SONUÇ	97
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	109



KISALTMALAR

BAP	: Bilimsel Araştırma Projeleri
ISO	: International Organization for Standardization
SEM	: Scanning Electron Microscope
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X-Ray Diffraction





SİMGELER

A	: Alan [m^2]
D	: İç çap [m]
E	: Enerji [$kJ.s^{-1}$]
F	: Kuvvet [N]
f	: Darcy sürtünme faktörü
g	: Yerçekimi ivmesi [$m.s^{-2}$]
Gr	: Graetz sayısı
H	: Mikrokanal yüksekliği
h	: Isı taşınım katsayısı
K	: Toplam ısı geçiş katsayısı [$W. m^{-2}.K^{-1}$]
k	: Isı iletim katsayısı [$W. m^{-1}.K^{-1}$]
L	: Mikrokanal uzunluğu
l	: Uzunluk
m	: Kütle debisi [kg/s]
P	: Basınç [Pa]
Pe	: Peclet sayısı
Po	: Poiseuilli sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
R	: Isıl direnç
r	: Yarıçap [m]
Re	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık [K]
t	: Zaman [s]
u	: Akışkan hızı [$m.s^{-1}$]
U	: Akışkanın ortalama hızı [$m.s^{-1}$]
V	: Hız vektörü



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Kandlikar ve Grande (2003), tarafından yapılmış kanal boyutu sınıflandırması.....	6
Tablo 2.2. Tek fazlı mini ve mikrokanallı ısı alıcılarında yapılan çalışmaların literatür özeti	11
Tablo 2.3. Malzeme etkisi üzerine yapılan çalışmalarının özeti	24
Tablo 2.4. Akış kaynaması akış için yapılan görüntüleme çalışmaları	30
Tablo 3.1. EDS analizi	37
Tablo 3.2. Sinterleme parametreleri ve seviye değerleri.....	46
Tablo 3.3. L8 Ortogonal dizi.....	47
Tablo 3.4. Image programında elde edilen gözenek değerleri	52
Tablo 3.5. Sinyal/gürültü analizi	53
Tablo 3.6. Varyans analizinin gerçekleştirilmesi	54
Tablo 3.7. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	57
Tablo 3.8. Ortalama Vickers Sertlik.....	58
Tablo 3.9. Isı alıcılarının temas açısı değerleri.....	58
Tablo 3.10. Isı alıcılarının yoğunluk değerleri	59
Tablo 3.11. . Isı alıcılarının maksimum ve minimum genişlik ve yükseklikleri	65
Tablo 5.1. Deney tesisatında kullanılan cihaz ve sensör listesi.....	76
Tablo 5.2. Deneysel olarak ölçülen değerler	77
Tablo 5.3. Belirsizlik değerleri	78
Tablo 5.4. Kaynama akışı için literatürde bulunan çalışmamıza yakın bağıntılar ...	83
Tablo 6.1. Deneysel sonuçlar ile korelasyonlardan elde edilen ortalama sapma	96



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Bakır partiküllerinin EDS analizi	37
Şekil 3.2. Bakır tozunun termal analiz grafiği	38
Şekil 3.3. Kare geometriyle özel tasarım kalıp	40
Şekil 3.4. Bakır tozunun sinterleme prosesi (Meral ve Parlak, 2018).	41
Şekil 3.5. a. 5 µm tane boyutuna sahip bakır toz kullanılarak üretilen numunenin(L4) SEM mikroyapısı .b. 50 µm tane boyutuna sahip bakır toz kullanılarak üretilen numunenin(L7) SEM mikroyapısı	48
Şekil 3.6. a. 700 0C de sinterlenerek üretilen numunenin (L1) mikroyapısı n b. 900 0C de sinterlenerek üretilen numunenin (L2) mikroyapısı	48
Şekil 3.7. a. 30 dakika sinterlenerek üretilen numunenin SEM mikroyapısı (L6) b. 60 dakika sinterlenerek üretilen numunenin SEM mikroyapısı (L7)....	49
Şekil 3.8. Image programında gözenek ölçümü.....	50
Şekil 3.9. 5µm toz boyutunda 60dk 50bar 900 0C de sinterlenmiş numunenin SEM cihazında alınmış mikroyapısı.....	51
Şekil 3.10. 5µm toz boyutunda 60dk 50bar 900 0C de sinterlenmiş tekrarlanan numunenin SEM cihazında alınmış mikroyapısı	51
Şekil 3.11. Taguchi tasarımının önerdiği seviye değerleri	53
Şekil 3.12. Maxwell modelinden elde edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması	56
Şekil 3.13. Solidworks programında tasarlanan ısı alıcısı	60
Şekil 3.14. Solidworks programında tasarlanan ısı alıcısının A kesit resmi.....	60
Şekil 3.15. L1 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	61
Şekil 3.16. L2 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	62
Şekil 3.17. L3 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	62
Şekil 3.18. L4 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	63
Şekil 3.19. L5 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	63
Şekil 3.20. L6 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	64
Şekil 3.21. L7 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	64
Şekil 3.22. L8 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü	65
Şekil 4.1. Yatay bir boruda taşınımın kaynama sırasında akış deseni (Carey, 1962).67	
Şekil 4.2. (a) Kabarcık çekirdeğinin etrafındaki sıcaklık ve basıncı (b) akıştaki bir kabarcığın önünde durma noktasının şematik gösterimi (Kandlikar ve ark. 1997).	69

Şekil 4.3. 3 x 40 mm kanalında 1 atm basınçta su ile alınır deneysel verilerle farklı çekirdeklenme kriterleri karşılaştırması, Kandlikar ve ark. (1997) tarafından kesilmiş / durgunluk modeli.....	73
Şekil 5.1. Deney düzeneği şeması.....	76
Şekil 5.2. a. Test Bölümü b. Montaj	77
Şekil 5.3. Katı model ve kesiti	77
Şekil 6.1. Farklı kütle akılarındaki duvar sıcaklığı değişimleri (277 ve 430 kg/m ² s arasında)	86
Şekil 6.2. Farklı efektif ısı akılarında duvar sıcaklığının zamanla değişimi (46.5 ve 61.5 W/cm ²) Kütle akıları sabit G=277kg/m ² s.....	87
Şekil 6.3. Kütle akısına göre ısı taşınım katsayısı değişimi.....	88
Şekil 6.4. Isı taşınım katsayısının kütle akısına göre değişimi	89
Şekil 6.5. Isı taşınım katsayısının buhar kalitesine göre değişimi	90
Şekil 6.6. Isı taşınım katsayısı ısı akısı ile değişimi (G=391.9 kg/m ² s).....	91
Şekil 6.7. Gözeneklilik değişiminin ısı taşınım katsayısına etkisi.....	92
Şekil 6.8. Basınç düşümünün buhar kalitesi ile değişimi	93
Şekil 6.9. Basınç düşümü kararsızlığı.....	93
Şekil 6.10. Zamana göre değişen akış görselleri.....	94
Şekil 6.11. a. Buhar giriş portu	95
Şekil 6.12. b. Çıkış portu.....	95
Şekil 6.13. Deneysel ısı taşınım katsayılarının mevcut korelasyonlardan elde edilen verilerle karşılaştırılması	96

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN GÖZENEKLİ ISI ALICILARIN AKIŞ KAYNAMA PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında mikrokanaallı ısı alıcıları için gözenekli bakır plakalar üretilmiştir. Üretim sürecinde farklı boyutlara sahip bakır tozları kullanılmış ve toz metalurjisi adımları takip edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı, süre, basınç ve toz boyutu arasındaki gözeneklilik seviyesini etkileyen parametrelerin belirlenmesi için Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Deneysel 5 μm ve 50 μm boyutunda bakır tozları kullanılmış olup, tozlar kalıpta 50 ve 60 bar olmak üzere iki farklı basınçta sıkıştırılarak 700 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 30 ve 60 dakika sinterlenmiştir. L8 ortogonal dizisi, Taguchi yönteminde en yüksek gözenekliliğe sahip yüzey hedeflenerek seçildi. Her tasarım parametresinin gözeneklilik üzerindeki etki oranları varyans analizi (ANOVA) ile belirlendi. Üretilen numunelerin mikroyapısı, termal ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edildi. Bu çalışma, geleneksel toz metalurjisi işlemiyle üretilen dikdörtgen kesitli paralel mikrokanaallara sahip ısı alıcılarında akış kaynaması üzerine yeni bir deneysel çalışma sunmaktadır. Mikrokanaallı ısı alıcıların boyutları 20 mm x 20 mm' dir. Testlerde kullanılan tüm ısı alıcıların kanal boyutları ve kanal sayıları aynıdır. Kaynama akış testleri, deiyonize su ile 238,2 ve 430,32 kg/m²s kütleli akıda gerçekleştirildi. Akışkan, ısı alıcıya 80°C' de tamamen sıvı olarak girer. Testler sabit ısı akısı koşulları altında gerçekleştirilmiştir ve ısı akıları 46,5 ve 61,5 W/cm²'dir. Deneysel çalışmalar, en yüksek gözenekliliğe sahip soğutucudaki ısı taşınım katsayılarının, saf bakır ısı alıcıya göre yüzde 28 ile 33,3 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Deneysel ısı taşınım katsayıları artan kütleli akıyla artar ve artan ısı akısı ve buhar kalitesiyle azalır. Öte yandan gözenekliliği en yüksek olan ısı alıcısının basınç düşümü değerleri saf bakır soğutucuya göre bir buçuk kat daha fazla ölçüldü. Mevcut bağıntı ve literatür verileri ile karşılaştırılarak mikro ölçekte akış kaynaması ve ısı transferi konusundaki bilgiye katkı sağlama amacı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, elde edilen verilerin, endüstriyel uygulamalardan laboratuvar araştırmalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılabilecek kapsamlı bir temel oluşturmasını hedeflenmiştir. Çalışma neticesinde hem akademik hem de endüstriyel bir perspektiften, mikrokanaallı ısı alıcıları üzerine yapılan araştırmalara yeni bir bakış açısı getirmek amaçlandı.



EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FLOW BOILING PERFORMANCE OF POROUS HEAT SINKS PRODUCED BY POWDER METALLURGY

SUMMARY

Porous copper plates were made for microchannel heat sinks in this thesis study. In the production process, copper powders of various sizes were used, and powder metallurgy steps were followed. Sintering temperature, time, pressure, and powder size were the factors influencing porosity level and volume, which were determined by using the Taguchi experimental design method. The experiments used copper powders of 5 μm and 50 μm sizes. The powders were compressed in the mold at 50 and 60 bars respectively, and they were sintered for 30 and 60 minutes at 700 °C and 900 °C. Utilizing the Taguchi method, the L8 orthogonal array was selected to target the surface with the highest porosity. Analysis of variance was used to calculate the effect ratios of each design element on porosity (ANOVA). The thermal, mechanical, and microstructure characteristics of the generated samples were examined and compared. This paper reports on a new experimental investigation on flow boiling in coolers with parallel microchannels and a rectangular cross-section created using a traditional powder metallurgy process. Microchannel coolers have 20 mm by 20 mm dimensions. Every cooler utilized in the testing has the same number and dimensions for the channels. Deionized water was used for the boiling flow tests, with mass flux of 238.2 and 430.32 kg/m²s. At 80°C, the liquid totally evaporates and enters the heat sink. The heat fluxes used in the tests were 46.5 and 61.5 W/cm², and they were conducted under constant heat flux conditions. According to experimental research, the heat transfer coefficients in the heatsink with the largest porosity are 28–33.3 percent greater than those in the heatsink made entirely of copper. The experimental heat transfer coefficients show that they go down with increasing heat flux and steam quality and up with flow rate. Conversely, the coolant sample exhibiting the largest porosity showed 1.5 times higher pressure drop values than the pure copper cooler. In this study, an experimental investigation was conducted on the effect of solid surface thermophysical properties on heat transfer properties in flow boiling in microchannels.

Within the scope of the study, heat and flow experiments were carried out on eight microchannel heat sinks with different porosity that we produced with the principle of powder metallurgy.

The computational domain used consists of a square fluid domain with a square solid domain in contact with the underside of the fluid domain.

The solid space was heated at its lower boundary by applying a constant heat flux. While the experiments were being carried out, images were taken simultaneously with a high-speed camera. Flow visualization is provided with these images. It is not possible to present all the experimental data performed. For this reason, characteristic and unique experimental results are presented by comparing them with each other and with traditional correlation and literature studies. This study is important in that it takes

into account important thermophysical properties of the surfaces used, such as porosity, heat capacity and thermal conductivity of the solid material, which are ignored in most of the relationships available in the literature for flow boiling.

Although the effect of the physical properties of the surface on flow boiling has not yet been determined, the effect of porosity on flow boiling has been examined experimentally. In this study, the effects of surface thermophysical properties such as porosity on boiling heat transfer were examined by preparing porous structures with copper powders by sintering method. Experimental data on the boiling flow of two coolers produced by sintering with porosity values varying between 13% and 30% and a cooler made of pure copper material are presented. The results obtained from experimental research are listed below:

It has been observed that the experimental results obtained in this study are consistent with the experimental results in the literature. The heat transfer coefficient increased linearly with increasing mass flux in both flat and porous heat sinks. In all tests, it was observed that the heat transfer coefficient decreased as the thermal power increased. Likewise, with the increase in steam quality, the heat transfer coefficient also decreased. The pressure drop increased linearly with increasing steam quality. At all flow rates, the pressure drop increased as porosity increased.

Porous surfaces play an important role in improving heat transfer in boiling flow. At the highest mass flux ($430.32 \text{ kg/m}^2\text{s}$), a 33.31% higher heat transfer coefficient was achieved in the porous cooler compared to the pure surface cooler.

However, as the thermal power changes, the lowest heat transfer coefficient values are reached on the flat surface.

It can be said that increasing porosity affects the heat transfer coefficient more positively at low thermal power than at high thermal power.

A sample with small pores may have a high thermal conductivity, which is beneficial for boiling heat transfer. However, considering bubble escape resistance, porosity needs to be reduced. Therefore, the porosity of a sample must be appropriately selected.

Experimental results revealed boiling flow instabilities. It has been observed that the data in pressure drop measurements oscillate within a certain range. Flow images show reverse vapor flow at the inlet and outlet ports. This counterflow caused oscillations in pressure values.

Experimental data were compared with data obtained from eleven different correlations that are most commonly used and available in the literature. The error rate was calculated between -6.46% and 23.78%. The other two most consistent correlations are Tran (1996) and Papell (1963), with error rates ranging from 11.95% to 38.45%. The compatibility of the experimental results with the existing relationships in the literature has shown that flat coolers are more suitable than porous coolers. This study is important in that it takes into account important thermophysical properties of the surfaces used, such as density, heat capacity and thermal conductivity of the solid material, which are ignored in most of the correlations available in the literature for flow boiling in microchannels. By comparing with existing correlations and literature data, the aim of contributing to the knowledge on micro-scale double-phase flow and heat transfer has been achieved. In addition, it is aimed that the data obtained will form a comprehensive basis that can be used in a wide range of applications, from industrial applications to laboratory research. As a result of the study, it is aimed to bring a new

perspective to research on microchannel heat sinks from both an academic and industrial perspective.





1. GİRİŞ

Modern teknolojinin hızla evrim geçirdiği günümüzde, ısı aktarımı ve kontrolü gibi temel mühendislik konuları daha da önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, mikro ölçekte akış kaynaması ve ısı transferi, özellikle elektronik sistemlerin gelişimi, uzay keşfi ve enerji depolama teknolojileri gibi bir dizi uygulamada kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, bu alandaki çalışmaların çeşitli sorunları ve tutarsızlıkları beraberinde getirdiği gözlemlenmektedir.

Bu çalışma, mikrokanallı ısı alıcılarının, özellikle yüksek ısı yoğunluğuna sahip elektronik sistemlerde termal kontrolün etkin bir şekilde nasıl sağlanabileceğine ışık tutmaktadır. Mikrokanallı ısı alıcıları, küçük boyutlarına rağmen büyük miktarda ısı transfer etme potansiyeline sahip olmalarıyla dikkat çekerler. Mikrokanallı ısı alıcıları, bilgisayarlar, bilişim teknolojisi, havacılık, savunma, uzay, elektrikli araç bataryaları, yakıt hücreleri ve lityum iyon pillerinin soğutulması gibi birçok alanda kullanılabilecek etkili soğutma sistemleri sunma potansiyeli taşımaktadır. Tipik bir ısı alıcısı çok sayıda küçük çaplı soğutma sıvısı kanalı içerir. Isı alıcıları, mikrokanal içindeki akışkanın faz değiştirip değiştirmediğine göre tek fazlı veya akış kaynaması olarak sınıflandırılır.

Tek fazlı mikrokanal ısı alıcıları son yirmi yılda oldukça kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Literatürdeki mikrokanallar ile ilgili yapılan ilk çalışmalar tek fazlı gaz ve sıvı akışının olduğu soğutma uygulamaları olup genellikle elde edilen deneysel verilerin mevcut literatürdeki bağıntıları doğrulayıp doğrulamadığını gösteren çalışmalardır. Son yıllarda ise mikrokanallarda akış kaynaması uygulamaları üzerine hem deneysel hem de sayısal çalışmaların arttığı görülmektedir. Literatürde deneysel çalışmaların yanı sıra çeşitli teorik çalışmalara da rastlamak mümkündür. Mikrokanallarda akış kaynaması, en ideal ısıl kontrol yöntemlerinden biri olmasının yanı sıra fiziksel boyutların küçük olması ve akış kaynamasındaki ısı geçişinin karmaşık yapısı nedeniyle dünyada ve ülkemiz için ilgi çekici araştırma alanları arasındadır. Dünya çapındaki mühendisler ve bilim adamları, geleneksel tek fazlı ısı transfer sistemlerinden, ısı taşınım katsayısı ve termal taşıma kapasitesindeki büyük

ilerlemeler nedeniyle faz değişimini kullanan sistemlere doğru geçiş yapıyorlar. Bu gelişmeler, elektronik termal yönetimi, nükleer enerji ve ısıtma, havalandırma, iklimlendirme ve soğutma dahil olmak üzere endüstri genelinde termal yönetim ve taşıma çözümlerinde yenilikçi ilerlemelere olanak sağlamıştır. Mikrokanallı ısı alıcılarında akış kaynamasının çeşitli yönleri araştırılmaktadır; bunlar kaynama başlangıcı, basınç düşümü, kabarcık aktivitesi, ısı transferi özellikleri, kritik ısı akısı ve akış modelleri şeklinde sıralanabilir. Yapılan çalışmalar deneysel zorlukların varlığını ortaya koymakta, kritik ısı akısı ısı taşınım katsayısı ve basınç düşümünün ayrıntılı araştırma gerektiren önemli tasarım parametreleri olduğu ve bunların doğru tahmin edilmesiyle ilgili zorlukları işaret etmektedir. Akış kaynamasını araştıran çalışmaların çoğalmasına rağmen mevcut literatürdeki eksiklik alanlarından biri akış kaynaması kararsızlıklar ve dinamik davranıştır. Sistem içindeki kaynama nedeniyle veya akış kaynaması doğasından kaynaklanan, çalışma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkabilen çok sayıda kararsızlık modu vardır.

Optimum tasarım ve etkin uygulamalar için mikrokanallarda kaynama akışındaki karakteristik özelliklerin incelenmesi ve fiziksel mekanizmanın ayrıntılı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Akış kaynaması mikrokanallar için, tam olarak kavramsallaşmayan bir fiziksel sistemdir. Literatürde, mikrokanallı kaynama akışı ile ilgili henüz kesin ve netlik kazanabilen bağıntılar yer almamaktadır. Yapılan çalışma, bunların oluşumuna yol açan temel mekanizmalara odaklanarak akış kaynaması kararsızlıklarına sistematik bir genel bakış sunmaktadır. Bu mekanizmaların, akışın mikrokanal olarak sınıflandırılmasına bağlı olarak, paralel mikrokanallı ısı alıcılarının farklı gözenekliliğe sahip yüzeylerdeki kaynamanın nasıl değişebileceğine vurgu yapılmaktadır. Her bir kararsızlık türü için kapsamlı literatür ve deneysel araştırmaları gerçekleştirilmekte ve mevcut literatürün güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilmektedir. Mevcut literatürün durumuna dayalı olarak gelecekteki çalışmalar için öneriler sağlamaya odaklanılmıştır

1.1. Amaç

Bu çalışma, mikrokanallı ısı alıcılarının toz metalürjisi yöntemi ile üretildiği durumda tasarım parametrelerinin belirlenmesi, ısı alıcılarının termal performanslarının değerlendirilmesi ve gelecekteki termal yönetim çözümleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması amacıyla kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Ayrıca, özellikle akış

kaynaması uygulamalarındaki zorlukları anlamak ve bu teknolojinin pratik uygulamalara nasıl entegre edilebileceği konularında derinlemesine bir analiz sunmaktadır.

Çalışmamın odaklandığı ana konular arasında toz metalurjisi prensipleri kullanılarak sinterleme yöntemi ile mikrokanallı ısı alıcılarının üretiminde gözenekli yapılar elde edebilmektir. Hedefi uygulayabilmek için çalışmada, ısı alıcısı olarak kullanılmak üzere gözenekli bakır plakalar üretilmiştir. Üretim sürecinde bakır tozları kullanılmış ve toz metalurjisi adımları takip edilmiştir. Gözeneklilik seviyesi ve hacmini etkileyen basınç, sinterleme sıcaklığı, zaman ve toz boyutu arasındaki ilişkiyi en verimli ve en iyi saptayabilmek için optimum deney tasarım yöntemine ihtiyaç duyulmuştur. En uygun yöntem olarak, Taguchi deneysel tasarım yöntemi seçilmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile en yüksek gözenekliliğe en kısa süre ve en ekonomik maliyetle ulaşılması sağlanmıştır. Deneylerde 5 µm ve 50 µm boyutlarında bakır tozları kullanılmış ve tozlar kalıp içerisinde farklı basınçta sıkıştırılarak 700°C ve 900 °C sıcaklıklarda farklı bekleme süreyle sinterlenmiştir. Taguchi yönteminde en yüksek gözenekliliğe sahip yüzey hedeflenerek L8 ortogonal dizisi seçilmiştir. Her bir tasarım parametresinin gözeneklilik üzerindeki etki oranları varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı karakterizasyonu, termal ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu ısı alıcıların gözeneklilik optimizasyonu için Taguchi deneysel optimizasyon yönteminin kullanımı, farklı yüzey özelliklerine sahip mikrokanalların akış kaynamasına etkisinin deneysel olarak incelenmesi ve literatürdeki mevcut modellerin doğruluğunun değerlendirilmesi yapılmıştır. Gözenekli ve gözeneksiz ısı alıcılarında akış kaynaması deneyleri ve akış görselleştirme çalışmaları yapılmıştır. Bakır ısı alıcılarındaki gözeneklilik değişiminin, basınç, kuruluk derecesi, ısı taşınım katsayısı gibi ısı ve akış özelliklerinin olan etkisi deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Mevcut literatür verileri ile karşılaştırılarak mikro ölçekte akış kaynaması ve ısı transferi konusundaki bilgiye katkı sağlama amacı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, elde edilecek verilerin, endüstriyel uygulamalardan laboratuvar araştırmalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılabilen kapsamlı bir temel oluşturması hedeflenmiştir. Çalışma neticesinde hem akademik hem de endüstriyel bir perspektiften, mikrokanallı ısı alıcıları üzerine yapılan araştırmalara yeni bir bakış açısı getirmek amaçlanmaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, farklı malzemelerden üretilmiş, mini ve mikrokanallı, akışkan olarak saf su ve farklı akışkanların kullanıldığı, tek fazlı akış ve akış kaynamasının ısı geçişi özellikleri üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar incelenerek derlenmiştir.

Yapılan çalışmalar i) mini ve mikro kanallarda tek fazlı akış ve ısı geçişi ii) akış kaynaması ve ısı geçişi iii) Mini ve mikrokanallı ısı alıcısı malzemelerinin termofiziksel özellikleri bunların üretimi ve optimizasyonunu irdeleyen akış kaynaması çalışmaları iv) akış kaynaması görüntüleme yöntemleri olarak alt başlıklar altında sunulmuştur.

Hidrolik çapları 100 ila 1000 μm arasında olan kanalları güvenle tanımlıyor ve mikrokanallar olarak kabul edilir. (Kandlikar, 2012). Sürdürülebilir enerjinin yöntemlerden biri de sistem verimliliklerinin artırılmasıdır ve bunun için cihazların minyatürleştirme çalışmaları başarılı çözümler sunmaya devam etmektedir. Minyatür ısı alıcıları, yüksek termal performansları sayesinde enerji açısından verimli sistemler sağlama potansiyeline sahiptir. Mikro/mini kanallar, küçük boyutları, kompakt yapıları ve yüksek ısı taşınım katsayısı avantajı nedeniyle elektronik soğutma, kimya sanayi, bataryalar, roket motoru soğutması, elektronik ekipman termal kontrolü gibi çeşitli alanlarda geniş uygulamalar sunar. Mikro ve mini kanallardaki tek fazlı ısı transfer mekanizması, geleneksel kanallara benzerlik gösterse de, mikro kanallardaki akış kaynaması ısı transferi, çeşitli kuvvetlerin ve kabarcık davranışlarının etkileri nedeniyle geleneksel kanallardan önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle, mikro ve mini kanallar içinde akış kaynaması sırasında farklı çalışma sıvılarının termodinamik performansının net bir şekilde anlaşılmasına güçlü bir ihtiyaç vardır. Mikro ve mini kanallarda akış kaynamasındaki ısı transferi katsayılarını doğru bir şekilde tahmin etmek için, genel olarak kabul görmüş korelasyonlara ihtiyaç vardır

Isı alıcıları bir ekipmanın soğutulması için kullanılan genişletilmiş yüzeylere sahip termal yönetim sistemlerinin elemanlarıdır. Teknolojilerdeki son gelişmelerle birlikte, ısıl güçler zaman içinde büyük ölçüde artmaktadır ve yakın gelecekte 1000 W/cm^2 'yi aşabilir. Bu nedenle mikrokanallı ısı alıcıları yüksek ısı ve küçük yer kaplamaları

nedeniyle minyatürleşen teknolojik ekipmanların soğutulması için büyük önem taşımaktadır.

2.1. Mini ve Mikro Kanallarda Tek Fazlı Akış ve Isı Geçişi

Literatürde mevcut olan mikro ve mini kanallı ısı alıcıları üzerine yapılan çeşitli çalışmalar bu bölümde sunulmuştur. En genelleştirilmiş sınıflandırma Kandlikar ve Grande (2003) tarafından yapılmış kanal boyutu sınıflandırma olup tablo 2.1 de verilmiştir. Bu Tez kapsamında hidrolik çapları 1 mm ye kadar olan kanallar mikro, 1mm ile 3mm arasında olan kanallar minikanal olarak bahsedilecektir. Literatür araştırması 0.1mm ile 3mm boyutları arasındaki kanalları içermektedir. Literatürde kanal hidrolik çapları açısından birçok sınıflandırma bulunmasına rağmen, ufak sapmalarla "mikrokanallar" ve "minikanallar" terimleri yaygın bir şekilde birbirinin yerine kullanılmaktadır. (Dixit ve Ghoshi, 2015)

Tablo 2.1. Kandlikar ve Grande (2003), tarafından yapılmış kanal boyutu sınıflandırması

Kanal Sınıflandırması	Kanal Boyutu
Moleküler nanokanallar	$D_h \leq 0.1 \mu\text{m}$
Geçiş kanalları	$0,1 \mu\text{m} < D_h \leq 10 \mu\text{m}$
Mikrokanallar	$10 \mu\text{m} < D_h \leq 200 \mu\text{m}$
Minikanallar	$200 \mu\text{m} < D_h \leq 3 \text{ mm}$
Geleneksel kanallar	$D_h > 3 \text{ mm}$

İlk olarak Tuckerman ve Pease (1981), tarafından 80 li yılların başlarında ısı alıcılarında mini ve mikrokanal kavramından bahsedilmeye başlanmıştır. Kanal hidrolik çapındaki azalma ile ısı taşınım katsayısında bir artış sağlanabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu gelişme, o dönemde sınırlı alanda yüksek ısı dağılımı sorunlarıyla uğraşan elektronik endüstrisinde bir devir yaratmıştır.

Peng ve Peterson (1995), dikdörtgen geometriye sahip mikrokanallarda tek fazlı ısı geçişi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Mikrokanal genişliğindeki değişimin mikro ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları neticesinde, sadece Reynolds sayısının değil, akışkanın sıcaklığı ve kanalların geometrisinin laminer akış bölgesindeki termal performansı büyük ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir.

Mala ve Li (1999) çalışmalarında, çapları 50 ile 254 μm arasında değişen mikrokanallardaki su akışını deneysel olarak incelediler. Deneysel sonuçları, 100 ile 2000 arasında değişen Reynolds sayısında sunuldu. Sonuçlarında, çapı 150 μm 'den küçük olan mikrokanallar için geleneksel teorideki tam gelişmiş akış özelliklerinden büyük oranda farklı olduğunu rapor etmişlerdir.

Adams ve ark. (1999) çalışmalarında dairesel olmayan bir mikro kanalda tek fazlı zorlanmış akış için ısı transferi deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Akışkan olarak su kullanılmıştır. Türbülanslı akış için klasik Gnielinski Nusselt korelasyonunun mikrokanallara makul bir doğrulukla uygulanabileceğini göstermiştir. Hidrolik çap için 1,2 mm'lik alt sınır değeri tavsiye edilmiştir. Bunun üzerindeki mikro kanallı ısı alıcılarının termal performansının geleneksel korelasyonlarla belirlenebileceğini öne sürmüşlerdir.

Xu ve ark. (2000) çalışmalarında, mikrokanallarda tek fazlı akış üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneylerini hidrolik çapları 30 μm ile 344 μm arasında değişen kanallarda Reynolds sayısının 20 ile 4000 aralığında gerçekleştirmişlerdir. Toplanan deneysel verilere ve literatürde mevcut bilgilere dayanarak, test edilen boyutlar için geleneksel kanallarda kullanılan Navier-Stokes denklemleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Lee ve ark. (2002) mikrokanallarda akışkan olarak su kullanmış ve mikro kanallı ısı alıcıların hem ısı transferi hem de sıvı akış özelliklerini belirlemek için klasik korelasyonların uygulanabileceği sonucunu açıklamıştır.

Qu ve Mudawar (2002) çalışmalarında mikrokanallı ısı alıcısında tek fazlı akış için basınç düşümü ve ısı transferi özelliklerini hem deneysel hem de sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında kullanmış oldukları ısı alıcısı bakır malzemeden üretilmiştir. Isı alıcısı, geniş ve derin bir dizi dikdörtgen mikro kanaldan oluşmaktadır. Akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır. Isı alıcısının üç boyutlu ısı transfer özelliklerini sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel olarak ölçülen basınç düşümü ve sıcaklık dağılımları, sayısal çalışmalarla iyi bir uyum göstermiştir. Sonuçlarında, geleneksel Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin, mikro kanallı ısı alıcılarının sıvı akışı ve ısı transferi özelliklerini yeterince tahmin edebildiğini belirtmişlerdir.

Lee ve Garimella (2003) Mikrokanallarda akış ve ısı geçişini araştırmak üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda kullandıkları bakır

mikrokanalların genişliği 194 μm ile 534 μm arasında değişirken, kanal derinliği genişliğin beş katıdır. Deneylerinde, Reynolds sayısı yaklaşık olarak 300 ila 3500 arasında değişirken, akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır. Sonuçlarında, mikro kanallardaki ısı transferinin klasik yaklaşımla tatmin edici bir şekilde uyumlu olduğunu göstermiştir.

Wu and Cheng (2003) çalışmalarında, silikon malzemeden üretilmiş birbirinden farklı on üç trapez mikrokanalda laminer ısı transferi ve basınç düşümü üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerlerinin büyük ölçüde geometrik parametrelere bağlı olduğu bulunmuştur. Laminer akış için Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün, yüzey pürüzlülüğü, yüzey hidrofilik özelliği ve geometrik parametreler için değişimini incelemiştir. Laminer Nusselt sayısı ile sürtünme faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hidrofilik özelliğinin artmasıyla birlikte arttığı, bu artışların, büyük Reynolds sayılarında daha belirgin olduğu rapor edilmiştir. Deneysel sonuçlar ayrıca, Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile düşük Reynolds sayılarında ($Re < 100$) hemen hemen doğrusal olarak arttığını, ancak 100'den büyük bir Reynolds sayısında yavaşça arttığını da göstermiştir.

Reynaud ve ark. (2005) çalışmalarının içeriği değişen kanal yüksekliklerine sahip bronz minikanallardan elde edilen deneysel sonuçları içerir. Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile düşük akış hızlarında arttığı bulunmuştur, ancak yazarlar bu sapmaları viskoz ısınmaya, üniform olmayan ısı akısına ve ölçüm belirsizliklerden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, 300 μm ve 1,12 mm kalınlığındaki mini kanallarda sürtünme ve ısı transfer katsayılarını deneysel olarak araştırmışlardır. Sürtünme faktörü, tüm kanal boyunca ölçülen basınç düşümünden tahmin edilmiştir. Isı taşınım katsayısı, belirli bir dönüştürücü kullanılarak duvardaki hem sıcaklık hem de ısı geçişi yerel ve doğrudan ölçülmesi ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarında, geleneksel boyuttaki kanallara göre klasik korelasyonlarla uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Gözlenen sapmaların ya mikroskobik etkilerle açıklanabileceğini ya da deney düzeneğindeki sapmalar nedeniyle oluştuğunu belirtmişlerdir.

Steinke and Kandlikar (2006) çalışmalarında mikrokanallardaki tek fazlı sıvı sürtünme faktörleriyle ilgili mevcut literatürü gözden geçirerek bir veri tabanı oluşturmuşlardır. Deneysel verilerle literatürün tutarsızlıklarını belirlemek için deneysel verilerin derinlemesine araştırılması ve karşılaştırılması gerektiğini savunmuştur. Literatür

araştırmaları neticesinde Stokes ve Poiseuille akış teorilerinin mikrokanalda tek fazlı sıvı akışı için geçerli olduğu bildirilmiştir.

Parlak ve ark. (2011) alışmalarında, tek fazlı su akışı üzerindeki viskoz ısınmanın etkilerini araştırmak amacıyla çapları 50 ile 150 μm arasında değişen mikrokanallar ile deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Deneyselerde adyabatik koşullar altında viskoz ısınmadan kaynaklanan sıcaklık artışları llmştir. Adyabatik mikrotplerdeki akışın sayısal analizi, viskoz ısıtma etkileri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları hem deneysel hem de analitik model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Kumar ve ark. (2011) alışmalarında, mikro ölçekte tek fazlı akışı üzerine deneysel araştırmaları ve bu akıştaki araştırmalarla ilgili sorunları özetlemiştir. zetlemiş oldukları deneysel verilerde, farklı kesit geometrileri için sürtünme faktörü, laminerden türbülansa geçiş ve pürüzlülüğün akışkan hidrodinamiği üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. alışmalarında farklı mikro karıştırcıların türleri ve tasarımları için mikro karıştırcıların yakın zamanda geliştirilmesi ve ilerlemesinin önemini vurgulamışlardır.

Kandlikar (2012) alışmasında literatürde mevcut bulunan mikrokanallar üzerine yapılmış çalışmaları derlemiştir. Elektronik cihazların leği küçüldükçe, bu cihazlardan termal kontrol ve ısı dağılımı, mikro kanal geçişlerinin uygulanması yoluyla etkili bir şekilde gerçekleştirilebildiğini belirtmiştir. alışmasında, tek fazlı sıvı akışı ve akış kaynama proseslerinin altında yatan mekanizmaları ve bunların yüksek ısı akısı soğutma uygulamalarında kullanılmalarını anlamada kaydedilen ilerlemenin tarihsel bir araştırmasını sunmuştur. Bu tarihsel çalışmanın sonucu olarak, tek fazlı ısı transferi performansının daha da geliştirilmesi gerektiğini ve mikro kanallı ısı alıcılarında akış kaynamasının pratik olarak uygulanmasının sağlanması için gelecekteki araştırma yönergelerini ana hatlarıyla belirtmiştir.

Awais ve Kim (2020), kanal giriş geometrileri farklı, mini kanallı ısı alıcısının performansını deneysel ve sayısal olarak araştırdılar. Akışkan olarak su ve alümina karışımlı nanoakışkan kullanılmıştır. Minikanalların hidrolik çapı 2,4 mm ve bakır malzemeden üretilmiştir. Optimize edilmiş giriş geometrisine sahip minikanallı ısı alıcının, yaklaşık % 17 daha yüksek toplam ısı taşınım katsayısı ve basınç düşümünde %43 azalma sağladığını gözlemlediler.

Meral ve Parlak (2021) çalışmalarında alüminyum malzeme kullanılarak çapraz akışlı bir mikrokanallı ısı değiştirici imalatı yapmışlardır. Çapraz akış düzeninde iki plakadan oluşan ısı değiştiricilerin plaka boyutları $50 \times 50 \times 3$ (mm³) dir. Plakalar 490 µm genişliğinde ve 490 µm derinliğinde kare mikrokanallardan oluşmuştur. Akış ve ısı deneylerini hem deneysel hemde sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal veriler arasında çok iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir. Ancak sayısal basınç kaybı değerleri deneysel değerlerle uyumlu olmamıştır.

Ho ve ark. (2023) çalışmalarında, minyatür kanalların termal performansını artırmak için yeni bir tasarım önermişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada, mini ve mikrokanallı çift katmanlı ısı alıcısı tasarlanmış ve ilk kez test edilmiştir. Test ettikleri mikro ve mini kanalların hidrolik çapları 0,49 ile 1,2 mm arasında değişmektedir. Akışkan olarak saf su ve su bazlı Al₂O₃ nanoakışkan kullanılmıştır. Mini ve mikro kanallı, çift katmanlı ısı alıcı ile tek katmanlı mikro kanallı ısı alıcısının ısı dağılım performansı arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar, tek katmanlı mikro kanallı ısı alıcı yerine mini ve mikrokanallı çift katmanlı ısı alıcı kullanılarak basınç düşümünün önemli ölçüde azaltılabileceğini gösterdi. Düşük akış hızları için, mini ve mikrokanallı çift katmanlı ısı alıcı ortalama ısı taşınım katsayısı, tek katmanlı mikro kanallı ısı alıcıdan daha yüksektir. Bu çalışma, mini ve mikrokanallı çift katmanlı ısı alıcıların kullanımının, mühendislik uygulamalarında tek katmanlı mikro kanallı ısı alıcılara göre daha fazla avantaja sahip olduğunu göstermektedir.

Mini ve mikrokanallı ısı alıcılarında deneysel ve sayısal çalışmalar yukarıda da özetlendiği gibi uzun yıllardır güncelliğini korumaktadır. Son dönemlerde yapılan çalışmalarda araştırma konuları ise, ısı alıcılarında yeni malzeme arayışı, geometri değişimi, akışkan olarak nano akışkan denemeleri gibi özgün deneysel ve sayısal çalışmalardır. Isı alıcılarında yüksek ısı transferi talebi ile, deneysel ve sayısal çalışmalarda standart bir korelasyona ulaşamama nedenleriyle, araştırmacıların büyük çoğunluğu mikrokanallı ısı alıcılarında akış kaynaması çalışmalarına yönelmiştir.

Standart boyutların küçülmesine eşlik eden bir diğer sorun ise, boyut küçülmesiyle termo-hidrolik performansı tahmin etmek için geleneksel kanal teorisinin mikro ölçekte kullanılıp kullanılamayacağı sorusudur. Bu konuda birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir.

Tablo 2.2 de çalışmamıza yakın tek fazlı mini ve mikrokanallı ısı alıcılarında çalışmalar yapmış araştırmacılardan bir kısmının özetine yer verilmiştir. Bu araştırmacıların çalışmalarının kapsamından da yine bu bölümde söz edilmiştir.

Tablo 2.2. Tek fazlı mini ve mikrokanallı ısı alıcılarında yapılan çalışmaların literatür özeti

Yazar	Akışkan/ Geometri	Hidrolik Çap[μm]	Literatürle Uyumu Evet\Hayır
Tuckerman ve Pease (1981)	Su/Dairesel	92–96	Evet
Peng ve Peterson (1995)	Su/Dairesel	200-800	Evet
Tso ve Mahulikar (1998)	Su / Dairesel	728	Evet
Adams ve ark. (1999)	Su/Dikdörtgen	1130	Evet
Mala ve Li (1999)	Su/ Dikdörtgen	50 ile 254	Hayır
Xu ve ark. (2000)	Su / Dikdörtgen	30–344	Evet
Lee ve ark. (2002)	Su/Dikdörtgen	54-215	Evet
Qu ve Mudawar (2002)	Su /Dikdörtgen	349	Evet
Wu ve Cheng (2003)	Su /Trapez	26–291	Evet
Lee ve Garimella (2003)	Su /Dikdörtgen	318–903	Evet
Reynaud ve ark. (2005)	Su/ Dikdörtgen	300-1120	Evet
Parlak ve ark. (2011)	Su / Dairesel	50 -150	Evet
Awais ve Kim (2020)	Su ve Alümina/Dikdörtgen	2400	Hayır
Meral ve Parlak (2021)	Su/Dikdörtgen	490	Evet
Ho vd. (2023)	Su ve Alümina/Dikdörtgen	490-1200	Hayır

2.2. Akış Kaynaması ve Isı Geçişi

Akış kaynaması, yüzey sıcaklıklarındaki küçük değişikliklerde çok yüksek ısı transfer katsayılarına ulaşma kabiliyetinden dolayı verimli bir soğutma yöntemi olarak 1920'lerin sonlarından itibaren kullanılmaktadır. O zamandan bu yana yaklaşık 100 yıldır, hem deneysel hem de teorik çalışmalar sayesinde ilerlemeler kaydedildi (O'Neill ve ark, 2020-1). Mevcut teorik bağıntıların $D_h > 3\text{mm}$ den büyük kanallar için uygulanabilir olduğu bilinmektedir. Bu nedenle hem boyutları küçülen hem de ısı akıları yüksek elektronik sistemlerin akış kaynaması, ısı transferi teknolojilerini güvenli ve

tekrarlanabilir bir şekilde kullanılabilirliği halen araştırma konusu olmayı sürdürmektedir.

Tran (1996) 2,4 mm hidrolik çapa sahip dairesel ve dikdörtgen kanallarda R12 çalışma akışkanı kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Akış kaynaması için deneysel bir korelasyon önermiştir.

Yu ve ark. (2002) çalışmasında iç çapı 2,98 mm ve ısıtılmış uzunluğu 0,91 m olan yatay dairesel boruda akış kaynamasındaki basınç düşümü, ısı transferi ve kritik ısı akısını incelemiştir. Çalışma akışkanı olarak su, etilen glikol gibi farklı akışkanlar kullanmıştır. Deneysel çalışmalarını 200 kPa sistem basıncı, 50–200 kg/m²s kütle akıları ve akışkan giriş sıcaklığını 80 °C olarak sürdürmüştür. Deneysel sonuçlarını mevcut korelasyonlarla karşılaştırmalarla sunmuştur. Deneysel sonuçlarından elde edilen bir korelasyon önermişlerdir.

Qu ve Mudawar (2003) çalışmalarında soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı mikrokanallı ısı alıcısında akış kaynamasındaki ısı transferini incelemiştir. Mikrokanallı ısı alıcıları 21 adet paralel kanaldan oluşmaktadır ve her bir kanal 231x713 µm kesindedir. Test akışkanı olarak 135-402 kg/m²s aralığındaki kütle akıda, giriş sıcaklığı 30°C ve 60°C ve çıkış basıncı 1,17 bar olan deiyonize su kullanılmıştır. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda, makro kanallar için en yaygın kullanılan ısı transferi korelasyonlarını, inceledikleri mikro kanallara uyguladıklarında genel eğilimde belirgin sapmalar görmüşlerdir. Bu nedenle mikrokanallar için yeni korelasyonlara ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Thome ve ark. (2004) mikrokanallardaki sıvı kabarcığının, buharlaşan bir uzun baloncuğun ve film kuruması meydana geldiğinde bir buhar kabarcığının sıralı ve döngüsel geçişi sırasında yerel ısı taşınım katsayısındaki geçici değişimini ve buharlaşmayı tanımlayan ilk mekanik ısı transfer modelini önermişlerdir. Isı transferinin kabarcık frekansına, kabarcıkların ve sıvı kütlelerinin uzunluklarına ve sıvı film kalınlığına bağlı olduğunu göstermişler, akış rejimlerini ve geçişlerini tanımlama ile akışın yorumlanmasındaki zorluklara dikkat çekmişlerdir.

Koşar ve ark. (2005), 227 µm hidrolik çapa sahip kanallarda, farklı kütle ve ısı akıları için ortalama çift fazlı ısı taşınım katsayısı ve kritik ısı akısı koşulları sağlamışlardır. Kabarcıklı kaynamanın düşük Reynolds ve kaynama sayılarında daha yaygın gözlemlenmiştir. Literatürdeki bağıntıların kritik ısı akısı koşullarını tahmin etmede

yeterli olduğunu ancak ısı transfer katsayılarını belirlemede yetersiz olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve ark. (2007) Mikrokanallarda akış kaynaması kararsızlıklarını belirlemek için akış görselleştirme ve deneysel çalışma gerçekleştirdiler. Mikrokanallar trapez kesitli, hidrolik çapı 186µm ve uzunluğu ise 30 mm idi. Belirli bir ısı akısı ve giriş suyu sıcaklığında, kütle akısına bağlı olarak dengeli ve dengesiz akış kaynama rejimlerinin var olduğu bulundu. Paralel mikrokanallar ve tek bir mikrokanal için 35°C'lik bir giriş suyu sıcaklığında dengeli akış kaynama rejimi ve dengesiz akışlı kaynama rejimi gösteren ısı akısı, kütle akısı açısından bir akış kaynama haritası sunmuşlardır.

Lee ve Garimella (2008), çalışmalarında kullandıkları mikrokanalların genişliği 102 µm ile 997 µm arasında değişirken, kanal derinliği 400 µm dir. Deneysel, kanallara tamamen sıvı halde giren deiyonize su ile yapılmıştır. Sonuçlar, uygulanan ısı akısının bir fonksiyonu olarak sıcaklıklar ve basınç düşümü cinsinden sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, mikrokanal dizilerindeki ısı transfer katsayılarını ve basınç düşümlerini tahmin etmede mevcut modellerin ve korelasyonların uygulanabilirliğinin kritik bir değerlendirmesine ve akış kaynamasındaki basınç düşümünü ve ısı taşınım katsayısını tahmin etmek için modellerin geliştirilmesine yol açabilecek niteliktedir. Literatürdeki korelasyonların, mikro kanallarda akış kaynaması ile ilişkili basınç düşümü ve ısı transferi için elde edilen deneysel sonuçlarla eşleşmediğini göstermektedir. Bu eksikliği giderebilmek için Mishima ve Hibiki modeline dayanan yeni bir basınç düşümü korelasyonu geliştirmiştir. Yeni korelasyonun sunduğu deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmiştir.

Sun ve Mishima (2009), akış kaynamasındaki kritik ısı transferi değeri için çapı 0,21 ila 6,05 mm arasında değişen içlerinde suyunda olduğu 11 farklı çalışma akışkanı için 2505 veri içeren yeni bir veri tabanıyla karşılaştırmışlardır. Sonuçlarını literatürdeki bağıntılarla da karşılaştırarak yeni bir bağıntı önermişlerdir.

Gedupudi ve ark. (2011) paralel mikrokanal dizilerinde buharlaşmayı kullanan ısı alıcıları küçük alanlardan yüksek ısı aktarma potansiyele sahiptir. Kanallar arasındaki akış dengesizlikleri ve debinin düzensiz dağılımı nedeniyle lokal kurumaya ve aşırı ısınmaya neden olabilirler. Akış dengesizliklerini azaltmak için bilinen önlemlerin rasyonel tasarımı için bir araç olarak, akış önünde sıkıştırılabilir bir hacme sahip plenumda tek bir kanalda kabarcık büyümesi için basit bir model geliştirmişlerdir.

Çalışmalarında girişte 7 K soğutma altında 0.38, 1.6 ve 40 mm'lik tek bir bakır kanalda deiyonize suyun akış kaynaması esnasında giriş sıkışmasının etkisini araştırmışlardır.

Wang ve Wang (2012) çalışmasında 3 -10 MPa basınç aralığında dikdörtgen kanalda akış kaynamasını araştırdı. Wang, test verilerini oldukça geniş test basıncı aralığı için tatmin edici bir şekilde ilişkilendirmiş olduğu bir korelasyon önerdi. Bu korelasyon için kaynama sayısı Bo , Reynolds sayısı Re ve basınç değerlerinin oranını kullanmıştır.

Wang ve ark. (2014) mikro kanallardaki akış kaynaması ısı transferinin geleneksel boyutlu kanallarda çok farklı olabileceğini ve henüz bir standartlaşma gözlenmediğini belirtmişlerdir. Kapalı alanda kabarcık dinamiği bilgisinin hala yeterli olmadığı belirtmişlerdir. Akış kaynama ısı transferi bağıntılarındaki; sıvı özellikleri, özgül ısı, viskozite, yüzey gerilimi ve gizli ısı gibi bağıntılar, faz değişim sürecini ve buhar kabarcığının gelişimini etkilediğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, her bir özelliğin göreceli etkisi hala belirsiz olduğunu, nicel analizler, önümüzdeki araştırmalarda gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Çeşitli kararsızlık türleri için kriter belirleyici kapsamlı bir sınıflandırma eksikliği olduğunu ve basınç dalgalanmasının termal ve hidrolik koşullara bağımlılığının yanı sıra kanal geometrisinin de hala ayrıntılı olarak açıklığa kavuşturulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Tamanna ve Lee (2015), silikon mikrokanallı soğutucu içindeki deiyonize suyun akış kaynaması üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Genişleyen mikro boşluklu soğutucudaki akış kaynama kararsızlığına kütle akısı, ısı akısı ve çıkış konfigürasyonunun etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır.

Markal (2016) paralel dikdörtgen mikrokanallarda en boy oranının akış kaynaması üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Ayrıntılı akış görselleştirmelerinin yanı sıra sıcaklık ve basınç ölçümleri de gerçekleştirmiştir. En boy oranının 3,54 olduğu değere kadar ısı taşınım katsayısında artış ve bu değerden azalış izlenmiştir. En boy oranı ile toplam basınç düşümü arasında düzenli bir ilişki olmadığını deneysel olarak belirtmiştir.

Huh ve Kim (2016) çalışmalarında suyun mikroskobik olarak kaynama özelliklerini tek bir yatay dikdörtgen mikrokanal kullanarak araştırmışlardır. Dikdörtgen mikrokanallar 103,5 ve 133µm hidrolik çaplara sahiptir. Mikrokanallar mikro işleme yüzey tekniği ile imal edilmiştir. Mikrokanal içerisindeki faz değişim olayları, gerçek

zamanlı bir akış görselleştirmesi sağlayan mikroskoplu yüksek hızlı bir CCD kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak yerel kaynama ısı transfer katsayıları incelendi ve tekli kabarcık oluşumu, büyüme ve ayrılma yanı sıra uzunlamasına kabarcık davranışı, mikro boyutlardaki ısı transfer mekanizmalarını aydınlatmak için analiz edilmiştir. Mikrokanallardaki akış kaynaması için kütle akısı, ısı akısı ve buhar kalitesinin etkileri araştırılmıştır.

Kharangate ve Mudawar (2017) çalışmalarında literatürde akış kaynaması için mevcut bulunan sayısal hesaplamalı çalışmaların derlemesini yapmıştır. Hesaplamalı yöntemlerin, tek fazlı sistemlerin modellenmesinde büyük başarı göstermiş olduğunu fakat, akış kaynamasında kullanılmasının sınırlı olduğunu vurgulamıştır. Ancak, birçok modern uygulama için önemli olan faz değişimi olgusunun karmaşıklığı göz önüne alındığında, üstesinden gelmek için hesaplama araçlarının kapasitesini büyük ölçüde artırılmasına acil ihtiyaç duyulduğunu da belirtmiştir.

Mikrokanallı ısı alıcılarında akış kaynaması, tek fazlı akışa göre daha yüksek ısı transfer katsayıları sağlasa da bu teknoloji endüstri tarafından daha benimsenememiştir. Buna yol açabilecek nedenler de mikro buharlaştırıcılardaki kütle ve ısı akısı, kanal geometrisi ve malzemenin akış kaynama rejimleri, basınç düşümü ve ısı transfer hızları üzerindeki etkisini aydınlatmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmasıdır. (Al-Zaidi ve ark. 2022)

2.3. Mini ve Mikrokanallı Isı Alıcısı Üretimi, Malzeme Özellikleri ve Optimizasyon Çalışmaları

Son yıllarda termal kontrol alanında ısı transferini artıracak yeni malzeme ve yüzey yapılarının geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Malzeme arayışına ek olarak, ısı transfer yüzey alanı modifikasyonu yöntemleri uzun yıllardır denenmektedir. Literatürde ısı transfer yüzeylerinin pürüzlülük, ıslanabilirlik ve gözeneklilik gibi özellikleri çeşitli yöntemlerle değiştirilmiş veya ısı transferini arttırmak için kaplamalar denenmiş ve yüzeyler çeşitli şekillerde kanatçıklarla genişletilmiştir. Isı borularındaki yivler gibi katı yüzeyin gözenekli katmanları sürekli bir sıvı kaynağı sağlar, kaynama işleminde çekirdeklenmeyi artırır. Gözenekli tabaka, kılcal kuvvetlerin faz değişim arayüzüne doğru hareketi ve buhar kaçış yollarını bulmasıyla sıvı akışını güçlendirir. Yüzey modifikasyon çalışmalarında, sinterleme, aşındırma, püskürtme, köpürtme ve dökümün kullanıldığı gözlenmiştir

Isı transfer performansını iyileştirmek için gözenekli ve pürüzlü yüzeylere sahip düşük ısı direnç sunan dayanıklı ısı alıcıları kullanılmaktadır. Bakır, mükemmel termal ve elektriksel iletkenliği, kolay üretimi ve korozyon direnci nedeniyle termal ve elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde, mini ve mikrokanallı ısı alıcısı malzemelerinin termofiziksel özellikleri, bunların üretimi ve optimizasyonu ve tüm bu değişimlerin akış kaynamasına etkisi üzerine yapılan çalışmaların derlemesi sunulmuştur.

Liter ve ark. (2001), düzgün olmayan yüzeye sahip modifiye edilmiş bir gözenekli yüzey kaplama önerdi. Deneysel sonuçlar, modifikasyonun havuz kaynamadaki kritik ısı akısını düz bir yüzeye göre yaklaşık üç kat arttırdığını gösterdi. Bu artış nedeni, gaz fazını sıvı fazdan ayıran düzgün olmayan yüzeyin sıvı-gaz karşı akım direncinin azalmasına yol açması olarak belirtildi. Bununla birlikte, modifiye edilmiş gözenekli kaplamanın imalatı, yüksek maliyet ve zaman tüketimi ile karmaşık bir imalat prosedürü gerektirdiği rapor edilmiştir.

Bang ve Choo (2004) çalışmalarında dairesel kanallarda soğutucu akışkan kullanarak bakır, alüminyum ve pirinç kanallarda akış kaynamasının, ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini deneysel olarak inceledi. Kanalların çapı 1,67 mm idi. Sonuçlarında, bir mini kanaldaki akış kaynama ısı transfer katsayısının, kütle akısından ve buhar kalitesinden bağımsız olduğunu ve yalnızca ısı akısına göre değiştiğini gösterdi. Minikanal malzemesinin etkisinin küçük olduğunu belirtmişlerdir.

Koç ve ark. (2008), bakır levhalar üzerindeki bakır tozunu sıcak pres yöntemi ile sıkıştırarak sinterlenmiş mikro ölçekli gözenekli yüzeyler elde etmişlerdir. Sıcaklık, basınç ve geometrinin en iyi değerlerini belirlemek için proses parametrelerinin sıcak presleme teknikleri üzerindeki etkilerini ortaya koyan optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Yaklaşık 200-400 µm yükseklik ve genişliğe sahip, gözeneklilik seviyeleri %30-50 olan ve ince bir alt tabakaya güçlü bir şekilde bağlanan mikro kanalların, sıcak pres yöntemi kullanılarak üretilebileceğini belirtmişlerdir. Sıkıştırma basıncı, sıcaklık, bekletme süresi, toz boyutu ve alt tabaka koşullarının ulaşılabilir gözeneklilik ve kanal boyutu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hem basıncın hem de sıcaklığın gözeneklilik seviyesi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Liao ve ark. (2008) atmosfer basıncı altında pürüzsüz bir yüzeyi kullanarak katı ve sıvı temas açısının akış kaynamasındaki ısı transferi ve kritik ısı akısı üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Katı-sıvı temas açısının kritik ısı akısı üzerinde önemli ve karmaşık bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Katı-sıvı temas açısı, 0° - 180° arasında değişiyordu. Farklı katı-sıvı temas açılara sahip üç tür ısı transfer yüzeyi, 55° temas açısına sahip normal yüzey, 30° temas açısına sahip hidrofilik yüzey ve 0° temas açısına sahip süperhidrofilik yüzeydir. Deneysel sonuçlar yönelim ve temas açısının ısı transferi ve kritik ısı akısı üzerinde karmaşık, birleştirme etkilerine sahip olduğunu göstermektedir. Kritik ısı akısı için hem yönlendirmenin hem de temas açısının etkilerini hesaba katan bir tahmin korelasyonu kurulmuştur. Tahmin korelasyonu deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum içindedir.

Cora ve ark. (2009) bakır tozlarının ince bakır katı altlıklar farklı sıkıştırma basıncı (15–50 MPa), sıcaklık (350–500 °C) ve yüzey geometrisi (düz, büyük ve küçük kanallı) parametreleri altında, uygun proses koşullarını belirlemek için deney tasarımı kullanarak sıcak pres yöntemi ile mikrokanallı bakır plakalar üretmişlerdir. Sıkıştırılmış numunelerin gözenekliliği ve bağlanma mukavemetini, bunların mikro ölçekli ısı ve kütle transferi uygulamalarına yönelik fizibilitesini karakterize etmek amacıyla ölçülmüştür. Sonuçlarında, sağlam gözenekli ve mikro kanallı yüzey katmanları elde etmek için minimum 350 °C sıcaklık ve 15 MPa basınç seviyesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, daha yüksek basınç seviyelerinde (50 MPa), mikro ölçekli yüzey yapılarının imalatının, gelişmiş bağlanma mukavemeti özellikleriyle yüksek oranda tekrarlanabilir olduğunu da belirtmişlerdir. Mikro ölçekli, gözenekli ve kanallı yüzeyler, arttırılmış yüzey alanı ve hacim sunar, aynı zamanda akış kaynaması ısı transfer koşullarında %300 e kadar verimlilik artışı sunacağını belirtmişlerdir.

Singh ve ark. (2009) çalışmalarında yüksek güçlü kompakt mikroişlemcilerin soğutulması için sinterlenmiş gözenekli ısı alıcılarını deneysel olarak araştırmıştır. Isı alıcılarının plakası, %40 gözenekliliğe sahip dikdörtgen bakır kanallara sahiptir. Gözenekli yapı boyunca zorlanmış taşınım ile ısı transferi ve basınç düşümü, soğutucu akışkan olarak su kullanılarak $Re \leq 408$ değerinde incelenmiştir. Çalışmada, ısıtıcı bağlantı sıcaklığı setleri için 100 ± 5 °C sınırının altında tutulmuşken gözenekli numune boyunca 34 kPa'lık soğutucu basınç düşümü ile $2,9 \text{ MW/m}^2$ 'ye kadar olan ısı akıları başarıyla soğutulmuştur. $Re = 408$ değerinde suyun gözenekli bakır ortamdan

zorlanmış taşınımıyla, ısı taşınım katsayısı için maksimum $20 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ ve Nusselt sayısı için 126 değerleri kaydedilmiştir. Sinterlenmiş gözenekli ısı emicinin üst düzey mikroışlemciler için potansiyel bir termal yönetim cihazı olarak sınıflandırılmasına yardımcı olmaktadır.

Weibel ve ark. (2010) $45\text{-}355 \text{ }\mu\text{m}$ bakır tozları kullanarak sinterleme yöntemiyle $0,6\text{-}1,2 \text{ mm}$ arasında değişen kalınlığa sahip genişletilmiş yüzeyler elde etmişlerdir. Ancak toz boyutu $45 \text{ }\mu\text{m}$ 'den büyük olan bakır tozları ile yapılan yüzeylerde ısı transferinin daha iyi olduğunu vurgulamışlardır.

Hosseinni ve ark. (2011) çalışmalarında deneysel olarak akış kaynamasının yüzey malzemesine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında yüzey malzemesi olarak, bakır, pirinç ve alüminyum kullanılmıştır. Bakır, en düşük pürüzlülüğe sahip olmasına rağmen test edilen tüm yüzey malzemeleri içinde en iyi performansı gösterirken, pirincin bakırdan daha kötü ancak alüminyumdan daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Liu ve ark. (2011) kanal yüzeyindeki ıslanmanın, tek bir silikon mikro kanaldaki suyun kaynaması üzerine etkisini araştırdı. Deneysel çalışmaları, $105 \times 1000 \times 30000 \text{ }\mu\text{m}$ boyutlara sahip olan ancak farklı ıslanabilirlik değerlerinde üç farklı mikrokanal üzerinde yapıldı. Mikro kanallar, bir silikon üzerine plazma aşındırmasıyla yapılmıştır. Plazma aşındırma işlemi ile yapılan yüzey hidrofildir ve ölçülen temas açısı 36° 'dir. Farklı ıslanabilirliğe sahip bir yüzey üzerinde farklı kaynama akışı desenleri bulundu, bu da sıcaklık salınımlarında büyük fark yarattı. Deneyler sırasında uygulanan ısı akısı $230\text{-}354,9 \text{ kW/m}^2$ arasında değişmiş ve kütle akısının kanal içerisine $50\text{-}583 \text{ kg/m}^2\text{s}$ arasında akması sağlanmıştır. Isı akısına karşı kütle akısına göre ayrıntılı akış rejimleri de elde edilmiştir.

Sun ve ark. (2011) gözenekli kaplamalar vasıtasıyla ısı transferini artırmanın, genellikle çekirdekli kaynama rejiminde daha etkili olduğunu belirtmiştir. $0,9 \text{ mm}$ hidrolik çaplı bir kanalın alt yüzeyinde ortalama partikül çapı $50 \text{ }\mu\text{m}$ olan sinterlenmiş bir bakır kaplama tabakası kullanarak kanalın çıkışındaki akış kaynama ısı transfer katsayılarında % 69.2'ye kadar bir artış gözlemlenildi. En yüksek artış, kaynama başlangıcından hemen sonra düşük kuruluk derecelerinde, yani $x \sim 0,1$ elde edildi. Kaplanmış bölümde kuruluk derecesi ile ısı transfer katsayılarındaki azalma, çekirdek

kaynamasını baskılayan ve kanalda yerel kurumaya neden olan kabarcık hapsine bağlanmıştır.

Bai ve ark. (2013) paralel bir kanal dizisinin (0.54 mm hidrolik çap) alt yüzeyleri karakteristik partikül çapı 55 µm olan bakır tozunun sinterlenerek gözenekli yüzey elde etmişlerdir, akışkan olarak etanolün kullanıldığı kaynamalı akışta, ısı transfer katsayılarında yaklaşık %81'lik bir artış gözlemlenmiştir. Deneysel veriler sadece 0,3'e kadar olan düşük buhar kaliteleri için yapılmıştır. Isı transfer katsayılarının kurulum derecesine ile nispeten sabit kaldığı sade bakır kanalların aksine, kaplanmış kanallardaki ısı transfer katsayıları artan buhar kalitesi ile önemli ölçüde azalmış ve iyileştirme etkisinin azalmasına neden olmuştur. Hiçbir akış modeli sonucu sunulmamakla birlikte, yazarlar bunun kanallardaki akış rejimi gelişimine karşılık gelen ısı transfer mekanizmasındaki değişiklikten kaynaklandığını belirtmişlerdir. Deneysel veriler sadece 0,3'e kadar olan düşük buhar kaliteleri için yapılmıştır.

Balasubramanian ve ark. (2013) çalışmalarında, akış kaynama deneylerini iki farklı boyuttaki bakır malzeme esaslı mikrokanallı ısı alıcılarında (25 mmx25mm ve 20 mmx10 mm) yürütmüşlerdir. Yüzey pürüzlülüğü 2 µm (Ra) olan 300 µm genişlik ve 1200 µm derinliğe sahip kanallar, tel erozyon yöntemi ile işlenmiştir. Akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır. Deneysel veriler, farklı çalışma koşulları altında kanallar içerisinde mevcut olan akış kaynama rejimlerini tahmin etmek için Taitel-Dukler akış rejimi haritasında çizilmiştir. Literatürdeki çift fazlı ısı taşınım katsayısı korelasyonlarının uyumluluğunu değerlendirilmesi için ilgili rejime uygulandığında rejime dayalı korelasyonların mikrokanallarda ısı transferini tahmin edilenden daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.

Morshed ve ark. (2013), akışkan olarak etanol- Al_2O_3 esaslı nano akışkanını ve deiyonize su kullanarak yüzey morfolojisini modifiye edilmiş, Cu- Al_2O_3 nanokompozit kaplı bakır mikrokanalın akış kaynaması performansını incelemiştir. Cu- Al_2O_3 nanokompozit kaplı yüzeyin termal ve hidrolik performans üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, Cu- Al_2O_3 nanokompozit kaplamanın, yüksek basınç düşümü ile ısı transfer oranını arttırdığını gösterdi. Belirtilen sonuçlarda, kullanılan yöntemlerle pürüzlü ve gözenekli yüzeyler elde edilebildiğini ancak uygulama güçlüklerinin olduğunu göstermiştir.

Byon ve ark. (2013) farklı çaplarda iki çeşit bakır tozunu karıştırıp sinterleyerek farklı boyutlu gözeneklere sahip yapı hazırladılar. Deneysel sonuçlar, bu yapının, tek boyutlu gözenekli yapıya kıyasla kritik ası akısının %72 oranında artırabileceğini göstermiştir.

Liu ve ark. (2013) 60-180 kg/m²'lik bir kütle akısı aralığı için 0,9 ve 2 mm çapında pirinç ve bakır borularda çalışmışlardır. 270 mm uzunlukta ve bu uzunluk boyunca akışkan olarak suyun seçildi. Isı akısı aralığı 20-465 kW/m², basınç aralığı 100-200 kPa değer aralıklarında giriş sıcaklığı aralığı 20-50°C aralığında belirlenerek akış kaynaması incelenmiştir. Buhar kalitesi aralığı 0-0,8'olduğunu belirtmişlerdir.

Jaikumar ve Kandlikar (2015) yaptıkları çalışmada sinterlenmiş bakır kanalların havuz kaynamasındaki etkisini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada sinterlenmiş bakır kanalların havuz kaynamasındaki etkisini incelemişlerdir. Sinterlemede kullanılan bakır tozu 5-20 µm boyutlarındadır. Sinterleme sıcaklığı 800 °C de ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilerek sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş bakır tozu taneciklerinin birbirine bağlandığını ve 5-20 µm gözenek boyutu ile ideal ısı transferinin sağlandığını açıklamışlardır. Kanallarının genişliği 762µm, duvar genişliği ise 200µm dir. Bu kanallarda, üç farklı sinterleme yapmışlardır. Bunlardan birincisi kanalın tüm duvarlarının sinterlenmesi, ikinci sadece kanalın iç duvarlarının sinterlenmesi, üçüncüsü ise kanalın sadece üst duvarlarının sinterlenmesidir. Bu üç farklı bölgenin sinterlendiği kanallarda en yüksek ısı transfer performansını kanalın tüm duvarların sinterlendiği kanallar olduğunu belirtmişlerdir.

Paz ve ark. (2015) bakır, alüminyum ve paslanmaz çelikten yapılmış yedi farklı plakada katı yüzey malzemesinin ve yüzey pürüzlülüğünün etkisini akış kaynamasında deneysel olarak araştırdı. Çalışmalarında pürüzlülüğün tek bir etki olarak incelenmemesi gerektiği ve olguyu daha iyi anlamak için diğer morfolojik yüzey parametrelerin de dahil edildiği ileri çalışmalara ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

Jafari ve ark. (2016) yüzey pürüzlülüğünün mikro kanallarda kaynamalı akış üzerindeki etkisini incelemek için deneysel ve sayısal bir çalışma yürütmüştür. Sonuçlar artan yüzey pürüzlülüğü ile ısı transferinde % 45'e varan artış gösterse de talaşlı imalat yönteminin zaman, maliyet ve malzeme israfı açısından dezavantajları olduğunu belirtmişlerdir.

Al-Zaidi ve ark. (2020) çalışmalarında bakır ve alüminyum malzemelerden yapılmış mikrokanallarda farklı kütle debisi ve ısı akılarında deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Düşük ısı akısında ($<60 \text{ kW/m}^2$) yüzey malzemesinin ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi azdı. Yüksek ısı akısı için Alüminyum yüzeyin üzerinde bakır yüzeye kıyasla ortalama yaklaşık %12 daha yüksek ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir. Bunun nedeni, alüminyum yüzeyinde bulunan boşlukların yanı sıra, yüzey işleme sırasında oluşan pürüzlülükten kaynaklandığı rapor edilmiştir.

He ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada dikdörtgen kanallarda gözenekli ve gözeneksiz düz yüzeylerde basınç düşümünü, kaynama akışındaki ısıl performansları karşılaştırmıştır. Dikdörtgen kanallı plaka $30 \times 200 \text{ mm}$ boyutlarında, mikrokanal geometrisi ise kanal genişliği, 1 mm , derinliği ise $1,5 \text{ mm}$ dir. Düz mikrokanal üzerine bakır teller sinterlenerek $0,3 \text{ mm}$ kalınlığında porozlu yüzeyler elde edilmiştir. Bakır tellerin sinterlemesiyle oluşturulan yüzeyde, hacim hesabıyla %50,9 ve %39 değerlerinde bir gözeneklilik ölçülmüştür. Çalışmalarında, gözenekli yüzeyin yüksek ısı transfer performansına sahip olduğunu ve yüksek ısı akısı uygulamalarında, termal problemi çözmeyi vaat eden nispeten kararlı çalışma koşulu sunduğunu belirtmişlerdir.

An ve ark. (2021) termal iletkenlik ve ıslanabilirliğin havuz kaynaması üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmasında, farklı ısıl iletkenliklere sahip olması beklenen bakır, nikel ve bakır-nikel gözenekli tabletler soğuk presleme yöntemiyle hazırlanmıştır. Daha sonra havuz kaynama eğrileri ve gözenekli yüzeylerde karşılık gelen kabarcık dinamikleri deneysel olarak araştırıldı. Bir numunenin termal iletkenliğinin, kaynamalı ısı transferinde ıslanabilirlikten daha önemli bir rol oynadığını, neden olarak da yüksek bir termal iletkenlik her zaman kabarcık çekirdeklenmesinin aktivasyon süresinin azalması anlamına geldiği belirtilmiştir. Termal iletkenlik sabitlendiğinde, yüksek bir ıslanabilirlik, artan kabarcık ayrılma frekansı nedeniyle kaynama ısı transferini artıracaklarını rapor etmişlerdir. Termal direnç, bir numunenin kalınlığı ve gözenekliliği ile ayarlanabilir. Termal iletkenlik sabitlendiğinde, yüksek ıslanabilirlik, artan kabarcık ayırma frekansı nedeniyle kaynama ısı transferini artıracaktır. Küçük gözenekli bir numune, kaynama ısı transferi için faydalı olan yüksek bir termal iletkenliğe sahip olabilir. Ancak kabarcık kaçış direnci göz önüne alındığında gözeneginin azaltılması gerekir. Bir numunenin gözenekliliği uygun

şekilde seçilmesi gerektiği ıslanabilirlik, gözeneklilik ve termal iletkenlik gibi birçok özelliğin bir arada incelenmesi gerektiğini açığa çıkarmışlardır.

Gupta ve Misra (2021) ticari uygulama açısından, gelişmiş yüzeylerin önemli bir husus olduğunu, çalışmalarında yeni bir dört aşamalı elektrodlu aşındırma tekniğini, ıslanabilirlik ve kaynama ısı transferinde daha fazla iyileştirme için kullanılmıştır. Akış kaynama testleri, farklı kütle akılarında mikro/nano yapıları yüzeyler üzerinde su kullanılarak gerçekleştirildi. Geliştirilen mikro nanoyapılı Cu-Al₂O₃ yüzeyi ile ısı geçişinde daha fazla verime ulaşıldığı belirtildi.

Lee ve ark. (2022) mikrokanallarda gözenekli kaplamalar kullanılarak akış kaynaması için ısı transferi katsayısının, düz yüzeyler ile gözenekli yüzeyleri karşılaştırmak için deneysel olarak araştırmıştır. Kaplanmış gözenekli yüzeydeki daha derin boşlukların, buhar yakalamayı teşvik ettiğini belirtmiştir. Yüzey kaplamanın, özellikle akış kaynaması sistemi çekirdekli kaynamanın baskın rejimlerinde çalışılıyorsa, mikrokanallarda akış kaynama ısı taşınım katsayısını artırmak için umut verici bir teknik olduğu gösterilmiştir. Gözenekli yüzeydeki derin boşlukların, çekirdek oluşumunu teşvik ettiğini gözlemlemişlerdir. Basınç düşümünün büyüklüğü, salınımlar ve kuruma arasındaki karmaşık ilişki, eş zamanlı akış görselleştirme ve veri toplama kullanılarak daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Vontas ve ark. (2022) çalışmalarında, mikrokanallarda katı yüzey termofiziksel özelliklerinin akış kaynama ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisi üzerine sayısal bir araştırma yapmışlardır. Toplamda beş farklı katı yüzey malzemesi incelemişlerdir. Bunlar, Alüminyum, pirinç, bakır, paslanmaz çelik ve gümüş malzemeleridir. Gümüş, alüminyum ve bakır gibi yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemeler, tek fazlı aşamadaki simülasyonlarına göre ısı taşınım katsayısını %35'ten fazla artışla en yüksek değerlerini sergilemiştir, pirinç ve paslanmaz çelik malzemeleri kullanıldığında ise %30'un altında bir artış görüldüğü ifade edilmiştir. Çalışmalarında termofiziksel özelliklerini dikkate alınarak, Nusselt sayısı için yeni bir bağıntı önerilmiştir. Bu yeni bağıntı, mini ve mikro kanallarda, akış kaynaması için literatürde mevcut olan bağıntıların çoğunda göz ardı edilen, katı malzemenin yoğunluğu, ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği gibi kullanılan yüzeylerin önemli termofiziksel özelliklerini dikkate alması yönünden önemli olduğu vurgulanmıştır.

Farklı yüzey malzemelerine sahip ısı alıcıları farklı termal iletkenliğe, yüzey dokusuna ve ıslanabilirliğe sahip olacağı bilinmektedir. Bu parametreler, henüz tam olarak anlaşılmamış olan mikro ölçekli konfigürasyonlarda akış kaynama özelliklerini etkileyebilir. Literatürde bu ölçekte akış kaynaması modellerinin, basınç düşümünün ve ısı taşınım katsayısının tahmini için önerilen birçok ampirik korelasyon ve model arasındaki büyük tutarsızlıklar görülmektedir. (Al-Zaidi ve ark., 2022)

Farklı yüzey kalitesi, birikintiler, pullar, döküntüler, çatlaklar ve çizikler içeren farklı yüzey mikro yapılarına (yüzey özellikleri) neden olabilir. Yüzey boşluklarının geometrisi bir parametredir ve sadece ortalama yüzey pürüzlülüğünden ziyade yüzey özelliklerinin etkisi tartışılırken dikkate alınmalıdır. Bunun nedeni, farklı yüzey profillerinin benzer ortalama yüzey pürüzlülüğü gösterebilmesidir. (Rodriguez ve ark., 2011)

Öte yandan, toz metalürjisi, ısı alıcıları üretmek için uygun bir teknik olabilir. Toz metalürjisi tekniği kullanılarak optimum kanal geometrisine sahip bir soğutucu ekonomik ve hızlı bir şekilde üretilebilir. Diğer üretim prosesleriyle karşılaştırıldığında, sinterleme, düşük maliyeti, üretim süresinin kısa olması, daha az üretim prosedürü, seri üretime uygunluğu vb. nedeniyle pratik uygulamaya daha elverişli görünmektedir. Ayrıca, sinterleme diğer bazı proseslerden daha güvenilirdir. (Zeng ve ark., 2017)

Sonuç olarak, optimum proses parametrelerinin belirlenerek, yüzey parametrelerinin değişiminin akış kaynamasına etkisinin araştırılmasına ve mevcut verilerin doğrulanmasına yönelik bilimsel çalışmalara ihtiyaç vardır.

Tablo 2.3 de bu bölümde belirtilen literatür çalışmalarının özeti niteliğinde tabloya yer verilmiştir.

Tablo 2.3. Malzeme etkisi üzerine yapılan çalışmalarının özeti

Referans	Yöntem	Malzeme	Araştırma Alanı	Bulgular
Liter ve ark. (2001)	Kaplama	Cu	Gözeneklilik	Kritik ısı akısında 3 kat artış
Bang ve Choo (2004)	Malzeme Farklılığı	Cu, Al, Pirinç	Malzeme etkisi	Isı transferi buhar kalitesinden bağımsız
Koç ve ark. (2008)	Sıcak Pres	Cu	Gözeneklilik	Sıcak Pres prosesi
Liao ve ark. (2008)	Kaplama	Cu	Katı sıvı temas açısı	Kritik ısı akısı ile karmaşık ilişkili
Cora ve ark. (2009)	Sıcak Pres	Cu	Gözeneklilik	ısı transferinde %300 e kadar artış
Singh ve ark. (2009)	Sinterleme	Cu	Gözeneklilik	Isı transferinde artış gözenekli yüzeyde
Weibel ve ark. (2010)	Sinterleme	Cu	Gözeneklilik	Isı transferinde artış gözenekli yüzeyde
Hosseinni ve ark. (2011)	Malzeme Farklılığı	Cu, Al, Pirinç	Malzeme etkisi	Cu daha iyi ısı transferi performansı
Liu ve ark. (2011)	Aşınma	Silikon	Temas Açısı	Temas Açısı ilişkisi
Sun ve ark. (2011)	Kaplama	Cu	Gözeneklilik	Kaplama ile %69,2 daha yüksek ısı transferi
Bai ve ark. (2013)	Kaplama	Cu	Gözeneklilik	%81 artış ısı transferi
Balasubramanian ve ark. (2013)	Tel erezyon	Cu	Yüzey Pürüzlülüğü	Mevcut korelasyonlarla uyumlu
Byon ve ark. (2013)	Sinterleme	Cu	Gözenek	%72 artış kritik ası akısında
Liu ve ark. (2013)	Malzeme Farklılığı	Cu, Pirinç	Malzeme etkisi	Cu daha iyi ısı transferi performansı
Morshed ve ark. (2013)	Kaplama	Al -bakır	Yüzey Pürüzlülüğü- Gözenek	Isı transferinde artış gözenekli yüzeyde
Jaikumar ve Kandlikar (2015)	Sinterleme	Cu	Gözenek	Isı transferinde artış gözenekli yüzeyde
Paz ve ark. (2015)	Malzeme Farklılığı	Al, paslanmaz çelik, Cu	Yüzey Pürüzlülüğü	Yüzey Pürüzlülüğü tek başına incelenmemeli
Jafari ve ark. (2016)	Talaşlı İmalat	Cu	Yüzey Pürüzlülüğü	% 45 Isı transferi artışı yüzey pürüzlülüğü ile
Zengh ve ark. (2017)	Talaşlı İmalat	Yivli kanallar Oluşturmak	Cu	Yivli daha yüksek ısı transferi
Kumar ve ark. (2019)	Yüzey Kaplama	Gözeneklilik	Al ₂ O ₃	Al yüzey %12 daha yüksek ısı transfer

Tablo 2.3.(Devamı) Malzeme etkisi üzerine yapılan çalışmalarının özeti

Referans	Yöntem	Malzeme	Araştırma Alanı	Bulgular
He ve ark. (2020)	Sinterleme	Gözeneklilik	Cu	Porozite ile yüksek ısı transferi sağlandı
Al- Zaidi (2020)	Yüzey	Yüzey pürüzlülüğü	Al- Cu	Al yüzeyde %12 daha yüksek ısı transferi yüzey pürüzlülüğü ile
An ve ark. (2021)	Soğuk Pres	Termal İletkenlik ve ıslanabilirlik	Cu ve Ni	Termofiziksel ilişki
Gupta ve Misra (2021)	Aşınma	Mikro- nano yapılı yüzey	Cu ve Al ₂ O ₃	Isı transferinde verim artışı
Lee ve ark. (2022)	Kaplama	Gözeneklilik	Cu	Isı akısında% 44artış
Vontas (2022)	Malzeme Farklılığı	Termofiziksel özel.	Cu, Al, Ag ve paslanmaz çelik	%35'ten fazla ısı transferi malzeme değişimi ile

2.4. Akış Kaynaması Görüntüleme Yöntemleri

Akış modeli, ısı transferi ve akış direncinin özelliklerini ve mekanizmalarını etkileyen önemli bir karakteristik faktördür. Akış kaynaması desenleriyle ilgili çalışmalar çoğunlukla şeffaf cam ya da pleksiglas kullanılarak üretilen kanallardaki akışa odaklanmıştır. İki fazlı akışta akış desenlerini belirlemek için günümüz teknolojisinde yüksek hızlı kameralar kullanılarak elde edilen görüntülerden faydalanılmaktadır.

Akış rejimi, morfolojik ve fiziksel olarak akış kaynamasındaki basınç düşümünü ve ısı transferini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, çok sayıda çalışma temeldeki fiziği yakalamaya odaklanmıştır. Her akış deseni için akış modellerini doğru bir şekilde tahmin edebilen bir akış modeli haritası geliştirilmesi gerekmektedir. Son zamanlarda, minyatür cihazların geliştirilmesine yönelik büyük ilgi, mini/mikro kanallardaki akış desenlerini tahmin edebilen güvenilir akış deseni haritalarının geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamıştır. (Shin ve Kim, 2022)

Mikrokanallarda akış kaynaması performansını belirlemek için dikdörtgen kanal akış desenleri ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu performansı belirlemek için akış kararsızlığı, ters akış, erken kritik ısı akısı gibi yeni terimler yüksek hızlı kameralar sayesinde keşfedilmiş ve yani çalışmalarla bu terimlerin açıklığa kavuşturulması devam etmektedir. Gözlemlenen görselleştirme sonuçlarına dayalı olarak akış

kaynaması desenlerini belirlemek ve analiz etmek, karmaşık akış davranışını ve mini/mikro kanal akışlarının arkasındaki fiziği anlamak için çok önemlidir. Bu bölümde literatürde geçmişten günümüze yapılan çalışmalar özetlenerek tablolar halinde sunulmuştur.

Sudarja ve ark. (2001), çalışmalarında 3mm çapa sahip dairesel kanalda gliserin solüsyonlu karışımı akışkan kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmaları görüntüleme tekniği ile de desteklemişlerdir. Beş baskın akış desenlerinden bahsetmişlerdir. Bunlar kabarcıklı, tıpa, halkasal ve çalkantılı akışlar idi. Akışkan viskozitesinin akış yapısı, akış deseni değişimi ve boşluk oranı üzerinde önemli etkisinin olduğunu bildirdiler.

Chen ve ark. (2002), çalışmalarında mikrokanallarda deneysel olarak akış desenleri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Akışkan olarak azot ve su kullanarak iç çapı 1 ve 1,5 mm olan mikrokanallarda çalışmalar yapmışlardır. Mikro kanallardaki akış kaynaması akış desenlerini yüksek hızlı kameralar sayesinde araştırıldı. Akış desenlerini yorumlarken, kabarcık hızı ve void fraction gözlemlendi ve görselleştirme yoluyla analiz edildi. İki fazlı akış desen haritaları oluşturuldu ve kabarcık hızı ve boşluk oranı için korelasyonlar önerildi.

Akbar ve ark. (2003) yapmış oldukları çalışmada hidrolik çapları 0,866–1,5875 mm olan mikro kanallardaki hava-su akışı için mevcut akış deseni veritabanını kullanarak yeni bir akış deseni haritası önerdi. İki fazlı akış modellerini dört bölgeye ayırdılar. Bunlar yüzey gerilimi ağırlıklı bölge, atalet ağırlıklı bölge, yüzey gerilimi ve atalet kuvvetlerinin karışık olduğu geçiş bölgesi ve hem gaz hem de sıvı akış hızları yüksek olduğunda ortaya çıkan köpük bölgesi. Gaz ve sıvı fazları için yüzeysel Weber sayıları kullanarak akış rejimi geçiş sınırları önerdiler.

Chung ve Kawaji (2004), çalışmalarında 50, 100, 200 ve 530 µm çaplara sahip 4 farklı dairesel kanallarda, akışkan olarak nitrojen ve su karışımı kullanarak akış kaynaması için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında akış görüntüleme tekniği kullanarak akış desenlerini incelemişlerdir. Hidrolik çapları 250 ve 530 µm olan kanallar için kabarcıklı, tıkaç, çalkantılı, tıkaç halkasal ve dairesel akışlar gözlenmiştirler.

Qu ve ark. (2004), çalışmalarında hidrolik çapı 680µm olan dikdörtgen bir mikro kanalda N₂-su akış desenleri üzerinde deneyler gerçekleştirdi. Tıkaç ve halkasal akışlar

ağırlıklı olarak gözlemlenirken, tabakalı ve çalkantılı akışlar oluşmadı. Dairesel akıştan diğer akışlara geçiş, makro kanallardakine kıyasla oldukça düşük bir gaz hızında gerçekleşir. Azalan kanal çapıyla birlikte, yüzey gerilimi kuvvetinin akış paterni üzerinde gövde kuvvetinden daha önemli bir etkiye sahip olduğunu ve tabakalı akışın baskılanmasına neden olduğunu bildirmiştir.

Pehlivan ve ark. (2006), çalışmalarında akış kaynaması deneyleri için, akışkan olarak hava ve su kullanarak 800 µm çaplı borulardaki basınç düşümü ve akış rejimlerini araştırdı. Akış rejimlerini atalet ve yüzey kuvvetlerine bağlı olarak sınıflandırdılar. Deneysel çalışmalarında, kabarcıklı, çalkantılı ve dairesel akış desenlerini gözlemlədiler.

Yue ve ark. (2008), çalışmalarında sırasıyla 200, 400 ve 667 µm hidrolik çaplara sahip dikdörtgen mikrokanallarda akış kaynaması desenini ve basınç düşümü özelliklerini açıklığa kavuşturabilmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneylerinde akış desenlerini görselleştirmek yüksek hızlı fotoğraf sistemi kullanılmıştır. Mikrokanallı akış desenlerinde kabarcıklı akış, tıpa akışı tıpa-halkasal akış, çalkantılı akış ve halkasal akış gibi akış desenlerine rastlamışlardır. Genelleştirilmiş korelasyonların tahmin performansı, kanal çapı daha da küçüldükçe bozulur. Bu çelişkiyi çözmeye yönelik ampirik bir Weber sayılarına dayalı korelasyon geliştirildi. Ardından, bu akış desenleri altında akış kaynaması sürtünme basınç kaynaklı düşüşünün tahmini için makul korelasyonlar önerildi.

Venkatesan ve ark. (2010), deneysel çalışmalarında farklı çaplara sahip dairesel minikanallarda akış kaynamasındaki boru çapı değişiminin akış desenleri üzerindeki etkisini incelemiştir. 0,6-3,4mm aralığında iç çaplı dairesel minikanallarda boru çapının akış kaynaması desenleri üzerindeki etkisini hava ve su kullanılarak araştırmışlardır. Gaz ve sıvı akış hızları ölçüldükten sonra yüksek hızlı kamera kullanılarak akış kaynaması görüntüleri kaydedildi. Gözlemlenen akış modelleri, dağınmık kabarcıklı, kabarcıklı, tıkaç, tıkaç-halkasal, dalgalı-halkasal ve halkasal akışlardı. Bu akış desenleri tüm test edilen mikrokanallı çaplarda gözlenmedi, ancak belirli boru çaplarına özgü olduğu bulundu ve boru çapının akış modeli üzerindeki etkisini doğruladı. Deneysel olarak elde edilen görüntülü akış modelleri, daha büyük çaplarda genel olarak kabul görmüş modellerle uyum sağlarken, ancak daha küçük çaplı borularla önemli farklılıklar gözlemlendi.

Dessimoz ve ark. (2010) mikrokanal akış desenlerini tamamlanmış tıkaç, tıkaç-halkasal ve halkasal şeklindeki akışlar olarak sınıflandırdı. Akış deseni sınırlarının yüzeysel gaz ve sıvı Reynolds sayıları (sırasıyla Re_g ve Re_f) ve yüzeysel sıvı kılcal sayısı cinsinden ifade edilebileceğini gösterdiler.

Zhang ve ark. (2011), deneysel çalışmalarında çapları 302 ila 916 μm arasında değişen dairesel kanallarda N_2 ve farklı sıvı karışımli akışkan kullanarak kanal çapının, sıvı viskozitesinin ve yüzey geriliminin akış desenleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Su, etanol ve sodyum sülfat gibi çeşitli sulu çözeltilerde farklı termofiziksel özelliklere sahip birkaç sıvı kullanıldı. Akış görselleştirme çalışmalarında, baskın akış desenleri olarak kabarcıklı akış, tıkaç, dengesiz tıkaç, tıkaç-halkasal, halkasal, çalkantılı ve dalgalı akışları gözlemladiler. Akış deseni geçiş çizgilerine, Reynolds'un fonksiyonları, yüzey pürüzlülüğü ve viskozite oranıyla bağlantılı olduğu belirtildi.

Choi ve ark. (2011) deneysel çalışmalarında dikdörtgen mikrokanallarda en boy etkisini, boşluk oranı ve basınç düşümünün akış desenine etkisini araştırmışlardır. Akışkan olarak azot gazı ve su kullanılmıştır. Deneysel olarak kullanılan dikdörtgen kanallar cam malzemeden üretilmiş ve hidrolik çapları 143-490 μm arasında değişmektedir. Dikdörtgen mikrokanalların en-boy oranları 0,92, 0,67, 0,47 ve 0,16' dır. En boy oranı, dikdörtgen bir mikro kanalda akış kaynaması için önemli bir parametredir. Akış deseni, basınç düşümü ve boşluk oranı üzerindeki en-boy oranının etkisini incelemek için dikdörtgen mikrokanallarda adyabatik sıvı, su ve nitrojen gazı akış kaynaması deneyleri yapıldı. Mikro kanallardaki basınç düşümü deneyler süresince test sistemine doğrudan gömülü basınç transmitterleri aracılığıyla ölçülmüştür. Görselleştirilmiş akış desenleri, yüksek hızlı bir kamera ile gerçekleştirildi. Bu çalışmada gözlemlenen dikdörtgen mikrokanallardaki tipik akış desenleri, kabarcıklı akışı, geçiş akışı (çoklu akış) ve sıvı halka akışıydı. En boy oranı düştükçe, hapsedme etkisinden dolayı kabarcıklı akış deseni baskın hale geldi ve köşedeki sıvı filmin kalınlığı azaldı. Dikdörtgen mikrokanallardaki boşluk oranı, hacimsel kalite ile doğrusal bir ilişkiye sahiptir. Dikdörtgen mikro kanallardaki sürtünme basıncı düşümü, akış deseniyle yüksek oranda ilişkilidir.

Zhao ve ark. (2013), hidrolik çapı 400 μm olan dikdörtgen bir mikro kanalda deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Akışkan olarak N_2 -su karışımı seçilmiştir. Akış desenleri üzerindeki çalışma basıncı etkisini araştırdı. Çalışma basınç aralıkları 0,1–5,0 MPa dır. Bu değer aralığında çalışma basıncının akış modeli üzerine etkisini

araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında, yedi farklı akış modeli (kabarcıklı, tıkaç, kararsız tıkaç, tıkaç-halkasal, paralel, dairesel ve çalkantılı akışlar) gözlemlendi ve Weber sayısıyla bağlantılı olarak akış rejimi haritaları, beş bölgeye ayrıldı.

Fu ve ark. (2020) tarafından bakır malzemeden üretilmiş mikrokanaallı ısı alıcısında suyun kaynama akışı deneysel olarak incelenmiştir. Isı alıcının genişliği 487 μm ve yüksekliği 1061 μm olan dokuz kanala sahiptir. Isı transfer ve basınç düşümü özellikleri, katı kanatçıklı bir mikro kanalinkilerle karşılaştırılmıştır. Aynı geometriye sahip ısı alıcısından bakır köpük kanatçıklı ısı taşınım katsayısı %80'e kadar iyileştirilir, ve basınç düşümü 1,2 ila 2 katına çıkarılır. Bakır köpük kanatçıklı kritik ısı akısı %25 oranında iyileştirilmiştir. Bakır köpük kanatçıklı ısı transfer mekanizmalar akış görselleştirmesi yardımıyla analiz edilmiştir. Farklı durumlarda çekirdek kaynaması ve ince film buharlaşması hakim olduğu belirtilmiştir.

Shin ve Kim (2022), çalışmalarında literatürde mevcut 25 adet deneysel çalışmanın verilerini kullanarak yeni bir bağlantı önermişlerdir. Özetlemiş oldukları veri tabanı, 0,2–4,0 mm hidrolik çap aralığında ve 16 çalışma akışkanı içerir. Mevcut çalışmanın akış desenleri tanımına dayanarak, veri tabanı iki ana kategoriye (halkalı olmayan ve halkasal akışlar) ve yedi alt kategoriye (kabarcıklı, aralıklı, geçişli, çoklu, dalgalı halkalı, düz halkalı ve dağınık-halkalı) sınıflandırılmıştır. Önceki genelleştirilmiş akış desenleri haritalarının tahminleri, birleştirilmiş veri tabanının dört alt kümesiyle karşılaştırılarak, ikisi arasındaki geçiş sınırlarında önemli sapmalar ortaya çıkmıştır. Buna göre, akış kaynaması mini ve mikro kanal akışları için akış rejimi sınır korelasyonlarına sahip yeni bir genelleştirilmiş akış rejimi haritası önerilmiştir. Yeni akış deseni haritasının, farklı akış desenleri, çalışma akışkanı ve geniş bir hidrolik çap aralığında eşit derecede iyi tahminler sağlayarak, veri tabanına karşı mükemmel uyum sağlayabildiği sunulmuştur.

Cheng ve Wu (2024) çalışmalarında, geometriye bağlı akış kaynama ısı transferini araştırmak için farklı genişliklerde mikrokanaal tasarlandı. Akış modellerinin mikrokanaal genişliklerine göre farklılık gösterdiği ve ortalama ısı taşınım katsayısının ve kritik ısı akısının da farklılık gösterdiği bulunmuştur. 50 μm genişliğindeki dar mikrokanaal, kabarcığın kanal içi hapsinden dolayı kritik ısı akısının tetiklenmesine karşı oldukça hassastır. Kaynama akışında görüntüleme tekniği ile akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. Akış kararsızlığının mikrokanaallara daha az bağımlı olduğu ancak kütle akısıyla güçlü bir ilgisi olduğu bulundu. Çalışmaları,

mikrokanalların geometrik etkisini araştırmak için deneysel denemelere katkıda bulunmakta ve geometriye bağlı akış kaynama özelliklerine ışık tutmaktadır.

Tablo 2.4. Akış kaynaması akış için yapılan görüntüleme çalışmaları

Referans	Kullanılan Akışkan	Hidrolik çap	Akış Görseli
Sudarja ve ark. (2001)	Hava-su-Gliserin	1.6 mm	Kabarcıklı, Tapa, Tıkaç, Halkasal
Chen ve ark (2002)	Su- N ₂	1-1,5 mm	Kabarcıklı
Akbar ve ark. (2003)	Hava -su-	0.866–1.5 875 mm	Kabarcıklı, Tapa, Tıkaç
Chung ve Kawaji (2004)	Su- N ₂	50-530 µm	Kabarcıklı, Tıkaç, Halkasal
Qu ve ark. (2004)	su-N ₂	0.68 mm	Tıkaç ve Halkasal
Pehlivan ve ark (2006)	Hava-su	800 µm	Kabarcıklı, Çalkantılı ve Halkasal
Yue ve ark. (2008)	Su- CO ₂	200–667 µm	Kabarcıklı,Tapa ve Halkasal
Venkatesan ve ark. (2010)	Hava-su	0.6– 3.4 mm	Kabarcıklı ve Halkasal
Zhao ve ark(2010)	Su- N ₂	0.40 mm	KabarcıklıTıkaç, KararsızTıkaç, Tıkaç-Halkasal, Paralel, Dairesel ve Çalkantılı
Dessimoz ve ark.(2010)	Hava-su-N ₂ - Co ₂	0.200–1.0 97 mm	Tıkaç, Tıkaç-Halkasal ve Halkasal
Choi ve ark.(2011)	su-N ₂	143-490 µm	Kabarcıklı,Geçiş ve Halkasal
Fu ve ark. (2020)	Su	660-670 µm	Halkasal
Shin ve Kim (2022)	Hava-su	1.333 mm	Kabarcıklı,Aralıklı, Geçişli,Çoklu,Dalgalı Halkalı, Düz Halkalı ve Dağınık-Halkalı
Cheng ve Wu (2024)	Su	80-200 µm	Kabarcıklı, Halkalı

Mikro ve mini kanallarda akış kaynaması desenleri hakkında çeşitli deneysel sonuçlar bildirilmiştir. Yukarıdaki özetlenen çalışmalarda şu sonuç çıkarılabilir; Akış desenleri deneysel çalışmaya, kanal geometsine, akışkan özelliklerine, kanal malzemesinin

yüzey özelliklerine, en boy oranına göre değişiklik göstermektedir. Deneysel çalışmalar incelendiğinde yukarıda özetlendiği gibi her araştırmacı kendine has bir yorum katarak, çalışmasına özgü akış desenleri tanımlamıştır. Dikdörtgen ve üçgen kanallardaki akış desenleri dairesel kanallardan çok farklıdır. Akış kaynaması deneysel çalışmalardaki görüntüleme ve akış desenlerinde tam bir neden sonuç ilişkisine varılamadığı gibi akış deseni terimlerinde de tam bir netlik sağlanamamıştır. Bu sorunların çözüme ulaşabilmesi adına boru çapı, pürüzlülük, yüzey gerilimi, termal iletkenlik ile akışkanların viskozite gibi fiziksel özellik değişimlerinin etkisi ile ilgili çalışmaların artırılması gerekmektedir.





3. MİKROKANANALLI ISI ALICILARININ ÜRETİMİ

Isı alıcılarının kullanım amacı bilindiği üzere yüksek ısı transferi katsayısı sağlayabilmektir. Günümüzde ilerleyen teknoloji ile verimli ve yüksek ısı kapasiteli ısı alıcılarına ihtiyaç artmıştır. Bu ihtiyaç nedeniyle son dönemdeki araştırmalarda, küçük alanlarda yüksek ısı kapasiteli ısı alıcılarının üretimi, optimizasyonu ve verimi konusunda çalışmalara sıkça rastlanılmaktadır. Literatürde ısı transferini artırmak için iki yöntem mevcuttur. Bunlar, aktif ve pasif yöntemlerdir. Aktif yöntemler; sıvı titreşimi, yüzey titreşimi, elektrostatik alanlar, mekanik yardımcılar, emme ve enjeksiyon olarak sınıflandırılmıştır. Pasif yöntemler ise; ilave katkı maddeleri, dönmeli akış cihazları, işlem görmüş yüzeyler, genişletilmiş yüzeyler (kanatçıklar) , pürüzlü yüzeyler olarak belirtilmiştir.

Malzemelerin termal stabilitesi, yüksek güç çıkışlı cihazlar nedeniyle elektronik bileşenlerin güvenilirliği için giderek daha önemli hale gelmiştir. Isı transfer performansını artırmak için dayanıklı, gözenekli ve pürüzlü yüzeylere sahip, düşük ısı direnç sunan malzemeden üretilmiş soğutucular kullanılmaktadır. Kritik ısı akışı, ısı transfer yüzeyi sıcaklığı ve termal direnç, dikkate alınması gereken temel tasarım parametreleridir. Bu parametreler doğrudan soğutucu malzemesi, çalışma akışkanı ve akış ve ısı transfer özellikleriyle ilgilidir. Soğutma sektöründe kullanılan malzemelerin yüksek ısıl iletkenlik ve düşük ısıl genleşme katsayısı gibi fiziksel özelliklere sahip olması beklenir. Bakır, mükemmel termal ve elektriksel iletkenliği, kolay üretimi ve olağanüstü korozyon direnci nedeniyle termal ve elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sheikholeslami ve ark. , 2015). Son yıllarda ısı kontrol alanında ısı transferini artıracak yeni malzeme ve yüzey yapılarının geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Malzeme arayışının yanı sıra ısı transfer yüzey alanı modifikasyonu yöntemleri de uzun yıllardır denenmektedir. Literatürde ısı transfer yüzeylerinin pürüzlülük, ıslanabilirlik ve gözeneklilik gibi özellikleri çeşitli yöntemler veya kaplamalarla değiştirilmiş ve ısı transferini arttırmak için yüzeyler çeşitli şekillerde kanatçıklarla genişletilmiştir. Isı borularındaki oluklar gibi katı yüzeyin gözenekli katmanları sürekli sıvı akışı sağlar, kaynama sürecinde çekirdeklenmeyi arttırır ve ısı transfer yüzey alanını genişletir. Yüzey modifikasyonu üzerine yapılan

çalışmalar sinterleme, aşındırma, püskürtme, köpürtme, yüzey buharı biriktirme, döküm gibi yöntemlerin kullanıldığını göstermiştir. Gözenekli yüzeylerde yapılan çalışmalarda ısı transferi test sonuçları, kabarcıklı akış rejiminde ısı akısını yüksek oranlarda arttırdığını ve gözenekli yüzeydeki kaynamanın, pürüzsüz yüzeye göre daha düşük sıcaklıklarda meydana geldiğini gösteren birçok çalışma mevcuttur.

Bu çalışmada ısı alıcılarımızın üretimi için özgün bir tasarım hedeflenilmiştir. Isı alıcısında ısı transferini artırmak için gözenekli ve pürüzlü yüzeyler elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu hedefe en uygun yöntem olarak toz metalurjisi prensibine dayalı sinterleme metodu seçilmiştir. Saf bakır tozundan sinterleme yöntemi ile bakır ısı alıcıları üretilmiştir. Bakır tozları sinterlenirken toz metalurjisi prensibi yöntemleri kullanılmıştır. Fakat bu proses kullanılırken en yüksek gözeneğe en düşük maliyet ve yöntemle ulaşabilmek için bir optimizasyon metoduna ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Taguchi deneysel tasarımına göre sinterlenerek üretilen ısı alıcılarının termofiziksel değerlerinin belirlenebilmesi için malzeme karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunlar, sertlik, pürüzlülük, gözeneklilik ve ıslanabilirliktir. Karakterizasyonu yapılan ısı alıcıları belirlenen geometriye sahip mikrokanaalları oluşturmak için tel erezyon yöntemi kullanılarak kanallar açılmıştır. Kanalların istenilen ölçüye uyup uymadığını öğrenmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kanal geometrisi incelenmiştir.

3.1. Toz Metalurjisi

Güç tüketiminin artması ve yüksek performanslı mikroişlemcilerin boyutunun küçültülmesi, mikro elektronik tasarımcıları için ısı yayılımını zorlaştırıyor. Bu unsurların bir sonucu olarak, küçük bir fiziksel alan üzerinde büyük miktarda güç yönetimi gerektirir, bu da yüksek güç yoğunluklarına neden olur. Bu artan termal yüklerin üstesinden gelmek için uygun maliyetli yeni ısı alıcısı tasarımlarının üretimi gereklidir. Bir işlemciyi aktif veya pasif olarak hava ya da su soğutmalı bir ısı alıcıya bağlamak, işlemciden ısıyı çekmenin en yaygın yoludur. Soğutucuların yüzey alanları artırılarak ısı kapasitesi artırılır. Isı alıcıları geliştirilirken maliyet ve performans önemi ortaya çıkmaktadır. Toz metalürjisi kullanılan üretim metodu, geometri ve ısı kapasitesi gereksinimlerini karşılayabilen düşük maliyetli, yüksek hacimli bir işlem sağlama potansiyeline sahiptir(Johnson ve ark. 2005).

Toz metalürjisi, tozlardan metalik parçaların üretildiği bir metal işleme teknolojisidir. Toz metalürjisi üretim dizisinde, tozlar istenen şekle sıkıştırılır ve ardından parçacıkların sert, rijit bir kütle halinde bağlanması için ısıtılır. Presleme adı verilen sıkıştırma, pres tipi bir makinede, parça için tasarlanmış kalıp kullanılarak gerçekleştirilir. Toz metalürjisi sürecinde çok az malzeme israfı gerçekleştirilir; başlangıç tozlarının yaklaşık %97'si ürüne dönüştürülür. Bu nedenle ekonomik bir üretim yöntemidir. Toz metalürjisiyle başlangıç malzemesinin doğası gereği, belirli bir seviyede gözeneklilik elde edilebilir. Bu özellik, gözenekli metal parçaların üretimine uygundur.

Toz metalürjisi, tozlardan katı metal bazlı ürünler oluşturmak için kullanılan tüm teknikleri kapsar. Bu, toz üretiminin ardından basınç ve sıcaklığın uygulanmasını, tozların işlenmesini ve koşullandırılmasını içeren bir veya daha fazla oluşum aşamasını içerir. Toz metalürjisi, çeşitli malzemelerden çok çeşitli ürünler üretmek için kullanılabilir ve tozdan metalik cisimler elde etmek için farklı yöntemler mevcuttur.

Bu üretim yöntemleri iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar, tek ve çift aşamalı üretim yöntemleridir. Tek aşamalı üretim yöntemleri; sıcak presleme, ekstrüzyon, sıcak haddeleme, doğrudan eklemeli imalattır. Çift aşamalı üretim yöntemleri; kalıpla sıkıştırma, enjeksiyonlu kalıplama, soğuk izostatik presleme, döküm ve ikinci aşaması olarak da sinterleme metodudur (Danninger ve ark. 2017).

Çalışmamızda bu yöntemlerden çift aşamalı üretim yöntemi olan, kalıpla presleme ve ardından da sinterleme yöntemini kullanılmıştır. Sinterleme öncesi bakır tozunun karakterizasyonu belirlendi. Daha sonrasında sinterleme işlemi gerçekleştirildi.

3.1.1. Toz karakterizasyonu

Metal tozlarının çeşitli uygulamalarda doğru kullanımı için, fiziksel, kimyasal ve teknolojik özelliklerinin eksiksiz bir şekilde belirlenmesini gerektirir.

3.1.2. Fiziksel özellikleri

Parçacık boyutu ve dağılımı, ayrı ayrı tozların boyutlarını ifade eder. Parçacık şekli küresel ise, tek bir boyut yeterlidir. Diğer şekiller için iki veya daha fazla boyut gereklidir. Parçacık boyutu verilerini elde etmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Partikül boyut analizi, parçacığın boyutu anlamına gelir. Partikül boyutunun belirlenmesi, ölçüm metodolojisine, ölçülen spesifik parametreye ve partikülün

şekline büyük ölçüde bağlıdır. Birçok farklı tanım kullanılmaktadır. En önemlileri şunlardır: Elek çapı; Elek analizinde parçacığın içinden geçeceği minimum kare açıklığın genişliğidir. İzdüşüm alan çapı; aynı izdüşüm değerine sahip bir dairenin çapı, olan, rastgele yönelimdeki parçacıkla aynıdır. Parçacık boyutu ölçümünde kullanılan teknikler şunlardır: Elek analizi, Işık engelleme, Mikroskop ile belirleme, Sedimentasyon, Elektriksel alan algılaması, Işık saçılımı ve kırınımıdır.

X-Işını teknikleri parçacık boyutu saptamak için en sık kullanılan yöntemdir. Bu teknikle, yansıtılan alan çapını sağlayan lazer kırınımıdır. Gerçek boyut taramalı elektron mikroskobu ile belirlenebilir. Toz şeklinin, tozun davranışı üzerinde belirgin bir etkisi vardır. (Danninger ve ark. 2017) dokuz farklı şekli tanımlar İğnesel, lifli, köşeli, pul pul, taneli, dentritik, düzensiz, nodüler, küreseldir. Ayrıca, bu tozların bir araya gelmesi ile: a:parçacık, b:tane ve c:aglomera dır (Danninger ve ark. 2017).

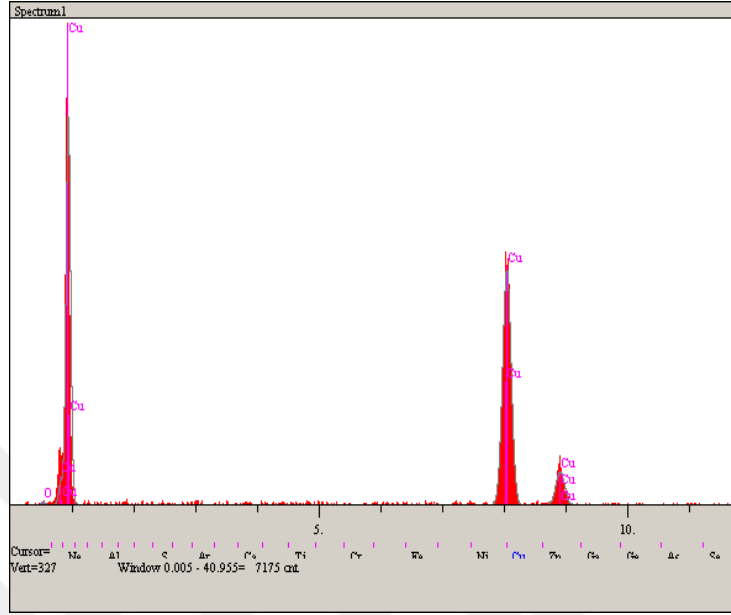
Çalışmamızda yurt dışından tedarik edilen bakır tozlarının fiziksel özelliklerini belirlemek için Taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), katı numunelerin yüzeyinde çeşitli sinyaller üretir. Bu sinyaller, numuneyi oluşturan kristal yapı ve oryantasyon, kimyasal bileşim ve dış morfoloji (doku) hakkında kapsamlı bilgi sağlar.

Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Jeol JSM 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobunda iki farklı firmadan alınan bakır tozlarının parçacık boyutları belirlenmiştir.

3.1.3. Kimyasal özellikleri

Genel olarak nispeten yüksek saflıkta olan elementel tozlar için, kimyasal analizin odak noktası safsızlık içeriğidir. Tozun kimyasal bileşimi belirlenerek, safsızlığı belirlenir. Ana bileşenleri ve safsızlıkları belirlemek ve faz dağılımı için bilgi almak gerekiyorsa, X-ışını toz kırınımı (XRD) kullanılır. Bakır tozunun saflığını test etmek için Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizi uygulandı. Analiz sonuçları, bakır tozunun %99.356'sının saf bakır olduğunu gösterdi. Taramalı elektron mikroskobunda elementel analizler, elektron demetinin numune üzerindeki bombardımanı sırasında elementlerden yayılan karakteristik X-ışınlarının algılanıp analiz edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlem, elektron mikroskobuna bağlı enerji saçınım spektrometresi (EDS) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu, morfolojik görüntü analizleri sırasında incelenen örnek üzerindeki bir hattın elementel mikro analizini yapmayı ve istenen bir

alandaki elementlerin dağılım haritalarını oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Çalışmamızda bir üretici firmadan aldığımız bakırın saflığını belirlemek için EDS analizi uygulandı. Sonuçlar aşağıdaki şekil3.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bakır partiküllerinin EDS analizi

[Meral ve Parlak 2018]

Tablo 3.1. EDS analizi

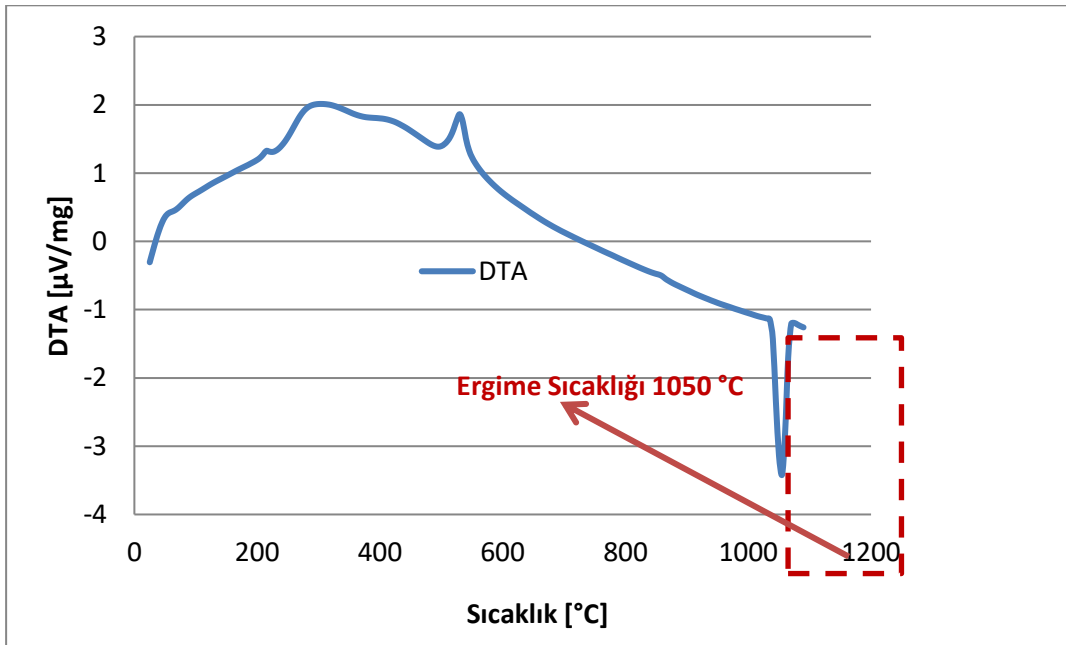
E. lt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units
O	Ka	1.78	0.843	2.509	0.644	wt. %
Cu	Ka	273.78	10.461	97.491	99.356	wt. %
				100.000	100.000	wt. % Total

Şekil 3.1’de yatay eksen x ışını enerjisini ve düşey eksen şiddeti göstermektedir. (Meral ve Parlak 2018). Numunedeki elementel yüzdeler pikleri altındaki alanlarla doğru orantılıdır. Şekil 2 sayesinde kullanılan bakır tozunun çoğunluğunun bakır elementinden oluştuğu anlaşılmaktadır, ancak oksitlenme nedeniyle çok az miktarda oksijen elementi içerdiği açıktır. Yukarıdaki Tablo 1 de belirtildiği gibi, EDS analiziyle toz numunenin %99,356’sının saf bakır olduğu kanıtlanmıştır.

3.1.4. Teknolojik özellikleri

Akış davranışı, bulk yoğunluğu ve sıkıştırılabilirlik, tozların teknolojik özellikleridir. ISO veya ASTM standartları tarafından belirlenen yöntemlerle bu özellikler test edilir.

Bakır tozunun ergime noktası ISO standartlarına uygun olarak termal analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Termal analiz, bir malzemenin fiziksel özelliklerinin, ısı enerjisi akışının kontrollü bir şekilde uygulanmasıyla belirlendiği bir uygulamadır. Analiz sırasında ısıtma, soğutma veya sabit bir sıcaklıkta tutma gibi birden fazla yöntem kullanılabilir. Bu yöntem, malzemelerin ergime noktası sıcaklığını ölçmek için de kullanılabilir. Malzemenin ergime noktasının %80'i hesaplanarak geleneksel sinterleme sıcaklığı elde edilir. En iyi sinterleme sıcaklığını bulmak için sinterlemede kullanılan bakır tozunun ergime sıcaklığı termal analiz yöntemi kullanılarak belirlendi. Termal analiz için, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan TA marka SDT Q600 model cihaz kullanıldı.



Şekil 3.2. Bakır tozunun termal analiz grafiği

Şekilde belirtilen termal analiz grafiğini yorumlayacak olursak, analiz sıcaklığı yatay eksen olarak sunulmuştur (Meral ve Parlak, 2018). Analiz 5 °C/dk ısıtma hızı ile, 1200 °C sıcaklığa ulaşılanaya denk devam etmiştir. DTA grafiğini ise düşey eksen gösterir. 1050 °C'de bir endotermik pik tespit edilmiştir ve bu pik ergime sıcaklığını ifade etmektedir. Dolayısıyla, saf bakır tozunun ergime noktası 1050 °C'dir.

3.1.5. Bakır tozu genel özellikleri

Bakır, standart koşullarda yüksek termal ve elektrik iletkenliğe sahip bir elementtir. Bu özelliklerinden dolayı iletkenliğin temel bir özellik olduğu elektrikli ve elektronik bileşenlerin üretimi için çok uygundur. Cu ve alaşımlarının üretimi için toz metalurjisi

üretim tekniği kullanmanın önemli bir özelliği, bu tekniğin gözenekli metalik parçalar üretme yeteneğidir. Gözeneklilik seviyesi ve gözeneklerin Şekil ve boyut dağılımı kontrol edilebilir. Bakır yapısal parçalarının üretimi için toz metalurjisi uygulaması, gerekli özellik seviyesine ulaşırken işleme operasyonlarını ve üretim maliyetlerini düşürmeye izin verir. Bakır ve bakır alaşımlarının toz metalurjisi ile üretimi, saflık gereksinimlerini azaltan elementlerin düşük oksijen afinitesi, sinterleme atmosferi ile de desteklenir. Bakır tozları, %99'un üzerinde saflıklarla ticari olarak temin edilebilir. Toz saflığı iletkenlik için önemli bir karakteristiktir, çünkü mevcut safsızlıklar katı çözültide zararlı bir etkiye sahiptir. Ayrıca bakır parçalarının elektriksel özellikleri gözeneklilik ile doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek termal iletkenlik gerektiren uygulamalar için alüminyum yerine bakır seçilir. Bakırın ekstrüde edilmesi, damgalanması, dökümü veya makinede işlenmesi daha zordur, ancak alüminyumdan daha çok toz metalurjisi teknikleri kullanılarak üretilir (Danninger ve ark. 2017).

3.1.6. Kalıpla presleme

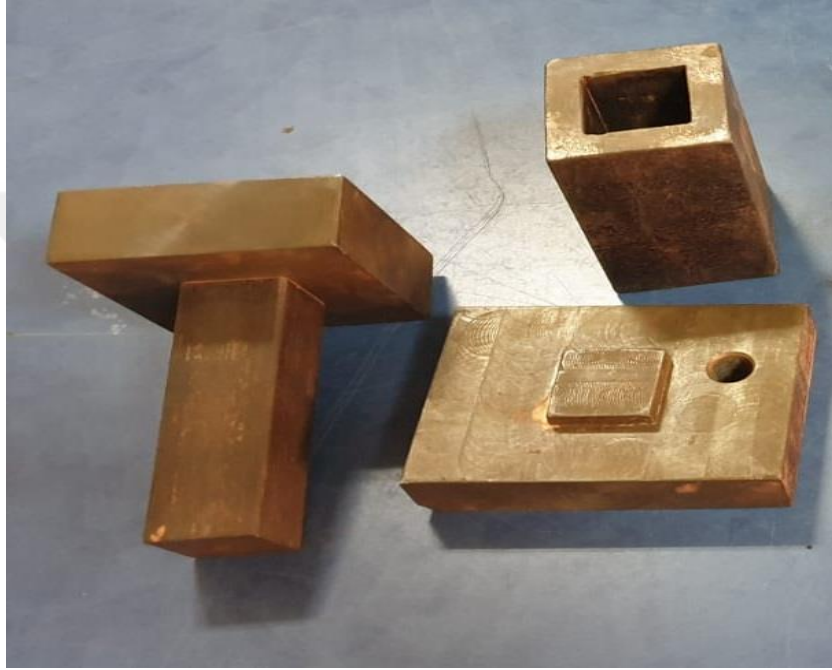
Toz metalürjisi, tozları belirli bir yoğunluk seviyesine getirmek için çeşitli işlemlerden oluşan bir prosestir. Sıkıştırma işleminde, tozlara gerekli Şekle sokmak için yüksek basınç uygulanır. Geleneksel sıkıştırma yöntemi, kalıpla tozların sıkıştırıldığı preslemedir. Toz metalurjisinde tozları Őekillendirmek için en yaygın yöntem sert kalıplarda eksenli sıkıştırmadır; büyük seri üretimi için en uygun maliyetli bir yöntemdir. Sıkıştırma işlemleri, Őekillendirme ve yoğunlaştırmayı aynı anda gerçekteştirir ve yerel olarak değişen yoğunluğa sahip ham kompaktlık sağlar.

Preslemeden sonra, ham yoğunluk olarak adlandırılan parçanın yoğunluğu, başlangıç yığın yoğunluğundan çok daha fazladır. Preslendiğinde parçanın ham mukavemeti kullanım için yeterlidir, ancak sinterlemeden sonra elde edilene göre daha azdır.

Preslemede uygulanan basınç başlangıçta tozların daha verimli bir düzende yeniden paketlenmesiyle sonuçlanır. Basınç arttıka, parçacıklar plastik olarak deforme olur, bu da parçacıklar arası temas alanının artmasına ve ek parçacıkların temas etmesine neden olur. Buna gözenek hacminde daha fazla azalma eşlik eder. Geleneksel toz metalurjisinde sıkıştırma için kullanılan presler mekanik, hidrolik veya ikisinin birleşimi olarak mevcuttur. Presler baskı yönüne ve sayısına göre çeşitliye ayrılır. Bunlar; Tek yönlü presleme sağlayan ve çift ve çok yönlü baskılama sağlayan presler olarak iki çeşitlidir. Toz metalurjisi üretimi için bir presin kapasitesi genellikle ton, kN veya MN olarak verilir.

Presleme için gereken kuvvet, parçasının öngörülen alan (dikey pres için yatay düzlemdeki alan) ile verilen metal tozlarını sıkıştırmak için gereken basınçla çarpılmasıyla hesaplanır (Groover, 2010).

Presleme işlemi için farklı basınç değerleri uygulandı. Presleme işlemi Sakarya üniversitesi laboratuvarında mevcut bulunan hidrolik preste gerçekleştirildi. Kalıp olarak 20 mm x 20 mm boyutlara sahip kare geometride özel tasarım kalıp kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Kare geometrili özel tasarım kalıp.

3.1.7. Sinterleme

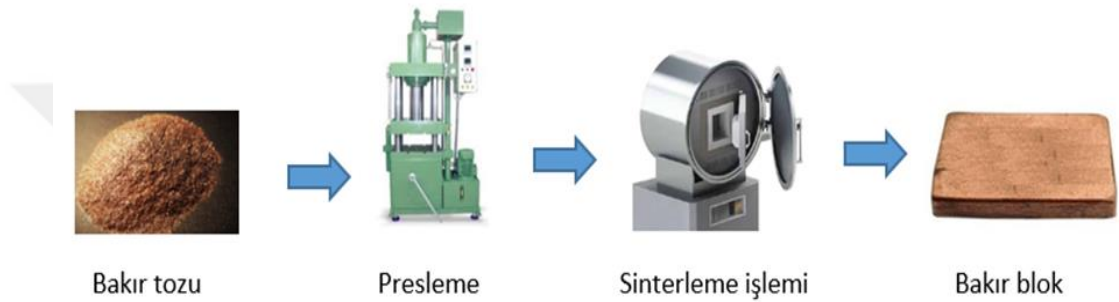
Toz metalurjisinde en yaygın kullanılan birleştirme tekniği sinterlemedir. Sinterleme teriminin ISO standartlarına göre tanımı şu şekildedir: Parçacıkları birbirine bağlayarak mukavemetini artırmak amacıyla, ana bileşen olan toz veya kompaktın, erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta, ısıtılmasıdır. (ISO 3252:1999)

Binlerce yıldır kullanılan seramiğin pişirilmesi terimi, sinterleme ile ilişkilendirilebilir. İkisi arasında temel fark, metallerin sinterleme sırasındaki ortam atmosferinde tipik olarak kimyasal dengede olmadığı zaman sinterleme felaketle sonuçlanacaktır. Hava ortamında sinterleme, toz bazlı sistemlerin yüksek kimyasal reaktivitesine neden olan spesifik yüzey oksidasyonuna neden olur. Bu nedenle, metalik sistemlerin sinterlenmesi, hem endüstriyel sinterleme süreçleri hem de

sinterleme mekanizmaları üzerinde önemli bir etkiye sahip olan koruyucu atmosferleri gerektirir (German, 1996).

Geleneksel toz metalurjisi prensibine göre Sinterleme üç ana kısımdan oluşur; (German, 2013).

- 1- tozların harmanlanması ve karıştırılması;
- 2- tozların istenen parça şekline preslendiği sıkıştırma;
- 3- parçacıkların katı halde bağlanmasına ve parçanın güçlendirilmesine için erime noktasının altındaki bir sıcaklığa ısıtmayı içeren fırınlama.



Şekil 3.4. Bakır tozunun sinterleme prosesi (Meral ve Parlak, 2018).

Kare geometride ısı alıcıları üretmek için, uygun miktarda bakır tozları şekil 3.3 de resmi gösterilen 20 mm x 20 mm boyuttaki kare kalıpta preslenmiştir. Preslenmiş toz bakırların kalıba yapışmasını önlemek için kalıbın içine çinko stearat püskürtülmüştür. Saf bakır, kalıbın için aktarılmasının ardından şekilde görülen mekanik presle farklı kuvvetlerde sıkıştırılmıştır.

Preslenen kompakt tozlar, mukavemet ve sertlikten yoksundurlar; bu nedenle düşük kuvvetler altında kolayca ufalanır. Sinterleme, sıkıştırılan kompakt metalik tozların sertliğini ve mukavemetini artıran bir ısı işlemidir.

Sinterleme işlemi genellikle metalin ergime noktasının 0,7 ile 0,9'u arasındaki sıcaklıklarda uygulanır. (German, 1978)

Termal analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiş olduğumuz bakır tozumuzun ergime sıcaklığı 1050 °C idi. Bu sıcaklığın 0,7 ile 0,9 katı olan, yaklaşık olarak 700 °C ile 900 °C arasında sıcaklıklar sinterleme sıcaklıklarımızdır. Bu hesaplanan sıcaklık değerlerinde ve farklı bekleme sürelerinde sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel sinterleme terimi yerine katı hal sinterlemesi veya katı faz sinterlemesi terimleri bazen kullanılır. Çünkü metal bu işlem sıcaklıklarında erimeden kalır.(German, 1978)

Preslenen toz parçacıkları, her biri kendi yüzeyine sahip birçok farklı parçacıktan oluşur ve bu nedenle kompakt bulunan toplam yüzey alanı çok yüksektir. Isının etkisiyle, parçacıklar arasındaki bağların oluşumu ve büyümesi yoluyla yüzey alanı azalır ve buna bağlı olarak yüzey enerjisinde azalma görülür. Sinterlenen tozun ilk boyutu ne kadar küçük olursa yüzey alanı o denli büyük olur (German, 1978).

3.1.8. Sinterleme atmosferi

Modern sinterleme uygulaması sağlayan fırınların içerisindeki atmosfer kontrol edilebilir.

Kontrollü bir atmosferin hedef içeriği şunlardır: oksidasyondan koruma, mevcut oksitleri çıkarmak için indirgeyici bir atmosfer sağlamak, preslemede kullanılan yağlayıcıların ve bağlayıcıların çıkarılmasına yardımcı olmak.

Yaygın sinterleme fırını atmosferleri inert gaz, nitrojen bazlı ayrışmış amonyak ve hidrojen gazıdır. Bazı metaller için vakum atmosferi tercih edilir (German, 1994).

Metalik tozların sinterlenme sırasında oksidasyonunu önlemek için koruyucu atmosfer sağlanmalıdır (Bradbury, 1986).

Sinterleme atmosferi, istenmeyen reaksiyonlardan koruma sağlamanın yanı sıra, aynı zamanda reaksiyon ürünlerini de uzaklaştırmaktadır, örneğin buharlaşan yağlayıcılar yavaş bir şekilde fırın atmosferinden çıkarılır (Nayar, 1998).

NH_3 kolay depolanması ve taşınması nedeniyle son zamanlarda sinterleme prosesindeki kullanımı yaygınlaşmıştır. Azot ve hidrojenin karıştırılması nedeniyle kullanımı için gelişmiş bir tasarım gerektirir. Vakum atmosferi sert metaller için standart atmosferdir, fakat Titanyum gibi reaktif metaller için kullanım nedeni ise oksijeni azaltmaktır (Hryha, 2013).

Çalışmamızda, bakır tozları sinterleme esnasında oksidasyonu önlemek için, kontrollü atmosfer sağlayan tüp fırında 450 ml N_2 ve 50ml NH_3 gaz koşullarında 5 °C/dk hızla, Tablo 3.2 'de verilen iki farklı sıcaklık ve bekleme sürelerinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur

3.2. Deney Tasarımı

Günümüzde, deney tasarımı yöntemi birçok farklı alanda karar verme ve optimizasyon amacıyla kullanılmaktadır. Deney tasarımının en temel amacı, deney hatalarını minimize etmektir. Endüstriyel ortamlarda istatistiksel deney tasarımının uygulamaları 1930 yıllarında Sir Ronald Fisher başlatmıştır. Tarihsel gelişim süreci incelenirken üç döneme ayrıldığı gözlenmektedir. Endüstriyel dönem, Box ve Wilson (1951) tarafından yüzey metodolojisinin yanıt verme metodolojisinin geliştirilmesiyle birlikte deney tasarım yöntemi gelişmeleri de hızlandırıldı. Optimum deney tasarımı çalışmaları bu ikinci veya endüstriyel çağda başladı. Kiefer (1959, 1961) ile Kiefer ve Wolfowitz (1959), belirli objektif optimallik kriterlerine dayalı bir tasarım seçmek için bir yaklaşım modeli öne sürdüler. Onların bu ilk yaklaşım modeli parametrelerinin mümkün olan en iyi hassasiyetle tahmin edilmesini sağlayacak bir tasarım seçme esasına dayalıdır. Bu yaklaşım modeli pek uygulanabilir olmadı. Çünkü, Modelin uygulanması için bilgisayar araçları eksikti. Batı endüstrisinin 1970'lerin sonunda başlayan kalite iyileştirmeye artan ilgisi, istatistiksel tasarımın üçüncü çağını başlattı. Wu (1980), Kaçkar (1985) ve Taguchi (1987, 1991) istatistiksel tasarımın üçüncü çağı üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler (Montgomery, 2011).

Deney tasarımı tekniği yalnızca istatistiksel bir yöntem değildir; tüm arge ve üretim çalışmalarında kullanılabilir; kaliteyi artırabilir, maliyetleri düşürebilir ve sonuçların güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca diğer kalite tekniklerini destekler ve tamamlar. Deney tasarımı, geleneksel ve istatistiksel yöntemlere ayrılır (Hinkelmann ve Kempthorne, 2005). Bilim deneysel çalışmalardan yararlanılarak geliştirilebilir. Bilindiği üzere, deneysel çalışmalar genellikle çok sayıda deneyin uygulanmasını içerir. Deney tasarımı, diğer bilimsel disiplinlerle karşılaştırılabilir olsa da, kendine özgü metodoloji ve terminolojiye dayalıdır. Deney tasarımının amacı, neden ve etki etkileşimini ortaya çıkarmak için tasarlanmış bir varsayımdır. Bu tasarımı, oluşturmak için gerekli olanlar; Yanlısız bir deney planlaması yapmak, Deney sayısını minimize etmek ve Formülize edilen süreci istenildiğinde değiştirebilmektir.

Tasarlanan deney eksiksiz bir biçimde oluşturulursa, doğru bir yöntemle en mükemmel sonuçları içeren verilere ulaşılabilir.

Bu nedenle, deney tasarlanırken aşağıdaki sorulara cevap verecek şekilde tasarlanmalıdır (Lazıc, 2004).

- a) Sonuçları ve parametrelerin etkilerini hesaplamak mümkün mü?
- b) Sonuçları kaç parametre etkiler?
- c) Eş zamanlı olarak hesaba kaç parametre katılmalıdır?
- d) Deneyin kaç kez tekrarlanması gerekiyor?
- e) Hangi tür bir veri analizi uygulanmalıdır?
- f) Etkilerin seviye farklılıkları hangileridir?

İstatistiksel deney tasarım yöntemleri, klasik deney tasarım tekniklerinin yetersizliğini gidermiştir. İstatistiksel deneyleri tasarlamak için birçok yöntem vardır. Bunlar a) Tam faktöriyel b) Taguchi yöntemi c) Kesirli faktöriyel aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde yer verilmiştir.

3.2.1. Tam faktöriyel deney tasarımı

Faktöriyel tasarımlar, faktörlerin bir yanıt üzerindeki genel etkisini araştırmak için gereklidir ve birkaç faktörü içeren deneylerde yaygın olarak kullanılır. Genel faktöriyel tasarımın bazı özel durumları, araştırma çalışmalarında yaygın olarak kullanıldıkları ve ayrıca önemli pratik değere sahip diğer tasarımların temelini oluşturdukları için önemlidir.

Çok sayıda deney, iki veya ikiden fazla faktör etkilerini incelemeyi gerektirir. Bu tür deneyler için yaygın olarak faktöriyel tasarımlar en etkilisidir. Faktöriyel bir tasarımla, her denemede veya deneyin tekrarında, faktör seviyelerinin tüm olası kombinasyonlarının araştırılmasını içerir.

Bu, minimum iki ya da ikiden fazla parametrenin ve bu parametrelere ait minimum iki veya ikiden fazla seviyenin birbirleri ile çarpımları ile meydana gelen deneylerde seviyelerin çarpımıdır. Örneğin, bir deney modeli üç parametre içerir. Herbir parametreye iki seviye dahildir. Bu durumda, her bir parametre ve seviye kombinasyonu denendiğinde toplam sekiz deney yapılmalıdır. Bir diğer örnek ise, dört parametrelili bir deneyde her parametre üç seviyeye sahipse, $3^4 = 81$ deney yapılması gerekir.

3.2.2. Kesirli faktöriyel deney tasarımı

Tam faktöriyel kullanılarak oluşturulmuş deney tasarımında parametrelerin tüm seviyelerinin birleşimi tek tek denendiğinden, deney daha maliyetli ve daha fazla süre

gerektirmektedir. Bu nedenle, tam faktöriyel deney tasarımında çok fazla süre ve maliyet gerekir.

Tasarımı oluştururken deneyden alınan sonuçlar ile zaman ve harcanan maliyet arasındaki ilişki önemlidir. Kesirli faktöriyel deney tasarımı, zaman ve maliyetleri azaltmak için deney sayısını orantılı olarak azaltarak elde edilir. Örneğin, 8 parametrelili ve iki seviyeli bir deney tasarımı için tam faktöriyel kullanıldığında, bu durumda, $2^8 = 256$ deney olması gerekir. Sonucun 1/2 si olarak 128 deney ya da 1/8 olarak 32 deney yapılabilir. Araştırmacılar, deney sayısını kesirli olarak azaltma yetkisine sahiptir.

3.2.3. Taguchi metodu

Sistemi etkileyen faktörler arttıkça, gerekli olan deneylerin sayısı da hızla çoğalmaktadır. Genichi Taguchi'nin geliştirdiği Taguchi yaklaşımı deneylerin yürütülmesi ve değerlendirilme verimliliğini artırmıştır. Deneyden önce yapılan kapsamlı analiz ve değerlendirmeler sayesinde gereken deney sayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Taguchi metodu, deneysel tasarım olmanın ötesinde, yüksek kaliteli sistemler tasarlamak için çok faydalıdır. Bununla birlikte, faktörler arasındaki etkileşimlerin bir kısmı göz ardı edildiğinden, deney sayısında bir azalma olmuştur (Yang ve Montgomery, 1998).

Taguchi yaklaşımı ile tasarlanan deneylerde, sinyal/gürültü oranına çevrilerek değerlendirilir. Sinyal/Gürültü oranı kalite değeri, hedeflenen sonuca göre farklı yönlerde elde edilir ve analiz incelenir. Sinyal/gürültü oranı değerlendirilirken, en yüksek Sinyal / Gürültü oranı en iyi deney sonuçlarını verir. Bu nedenle, en iyi performansı deneylerde ele alınan faktörlerin seviyeleri arasında en yüksek S/N oranına sahip değerler ulaştıracaktır.

Bununla birlikte, varyans analizi (ANOVA) uygulanarak proses üzerindeki faktörün ne kadar önemli olduğu istatistiksel olarak belirlenir (Yang ve Tarn, 1998).

S/N oranı ve varyans analizi yardımıyla faktörlerin en iyi kombinasyonu bulunur. Deney tasarımı, faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesini sağlamak için dengeli olmalıdır. Bu nedenle, faktörlerin değişik seviyeleri için tüm test edilen şartlar dahilinden birebir sayıda örnekleme yapılmalıdır. (Ross, 1989)

Taguchi Deney Tasarımı yöntemine uygun olarak yapılacak bir çalışmada aşağıdaki adımlar izlenmelidir.

- Faktörleri seçmek ve aralarındaki etkileşimleri analiz etmek (akış ya da neden sonuç diyagramı)
- Faktörlerin derecelerini belirlemek
- En uygun dengeli tasarımı seçmek.
- Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli bir deney düzeninde kolonlarla birleştirilmesi.
- Önceden planlanan adımlardaki gibi deneylerin uygulanması.
- Sonuçların irdelenmesi.

Bu adımları izlemek, proses veya ürün için en iyi performansı sağlayacak deney parametrelerini belirlemek, deneyde irdelenen faktörlerin etkisini tahmin etmek ve ideal deney parametrelerine ulaşabilmeyi sağlamaktadır.

3.2.4. Taguchi metodu kullanarak sinterleme deney tasarımının belirlenmesi

Taguchi metodu, ürün ve prosesdeki değişkenliği en aza indirmek için, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçen bir deneysel tasarım yaklaşımıdır. Bu yöntem, ürünlerin kalitesini iyileştirmenin yanı sıra kalite geliştirmede çok daha az deneme ile daha iyi sonuçlar sağlar. Yapılan analiz ve araştırmalar sonucunda bakır tozlarının sinterleme sürecinde gözenekliliğe etki edeceği düşünülen faktörler ve değerleri aşağıdaki Tablo 3.2’de verilmiştir. Belirtilen faktörlerin tümü, kontrol edilebilen faktörlerdir.

Tablo 3.2. Sinterleme parametreleri ve seviye değerleri.

FAKTÖRLER	1.Seviye	2.Seviye
Toz Boyutu	5 µm	50 µm
Sinterleme Sıcaklıkları	700 °C	900 °C
Bekleme Süresi	30 dk	60 dk
Presleme Basınçları	50 bar	60 bar

Tabloda yer alan iki seviyeli dört faktörün etkilerini tam faktöriyel olarak ortaya çıkarmak için için $2^4 = 16$ deney yapmak gerekmektedir. Taguchi'nin deney tasarım matrislerinde ortogonal dizinler kullanması bu iki seviyeli üç faktörün çarpılma

üzerindeki etkilerini L8 deney tasarımı ile, 8 deney ile belirleyebilmeye olanak sağlamaktadır. Deney tasarım matrislerinde ortogonal dizinlerin kullanılması hem zaman hem de maliyet açısından %50 avantaj sağlamaktadır. Tablo 3.3’de L8 deney tasarımı görülmektedir. L8 dikey dizine göre gerçekleştirilen deney tasarımında dört parametre ve her bir parametrede iki seviye bulunmaktadır.

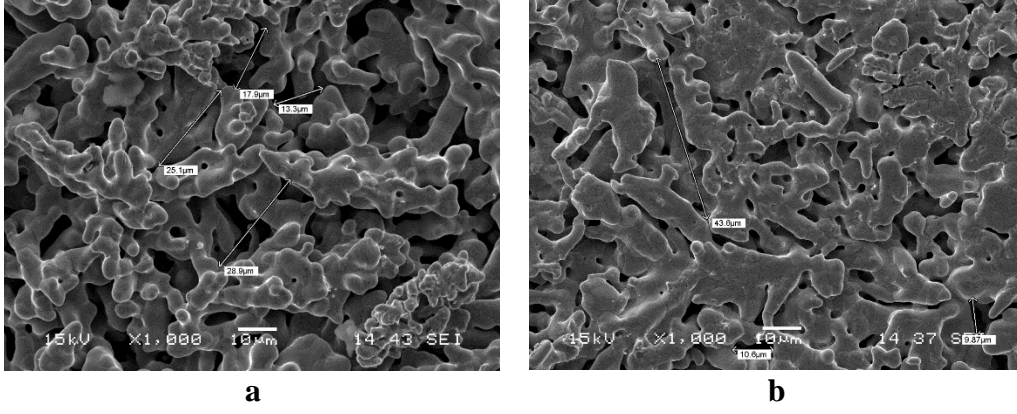
Tablo 3.3. L8 Ortogonal dizi.

Numune Kodu	Toz boyutu (μm)	Bekleme süresi (dk)	Basınç (bar)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
L1	5	30	50	700
L2	5	30	60	900
L3	5	60	50	900
L4	5	60	60	700
L5	50	30	50	900
L6	50	30	60	700
L7	50	60	50	700
L8	50	60	60	900

3.3. Deneysel Sonuçlar

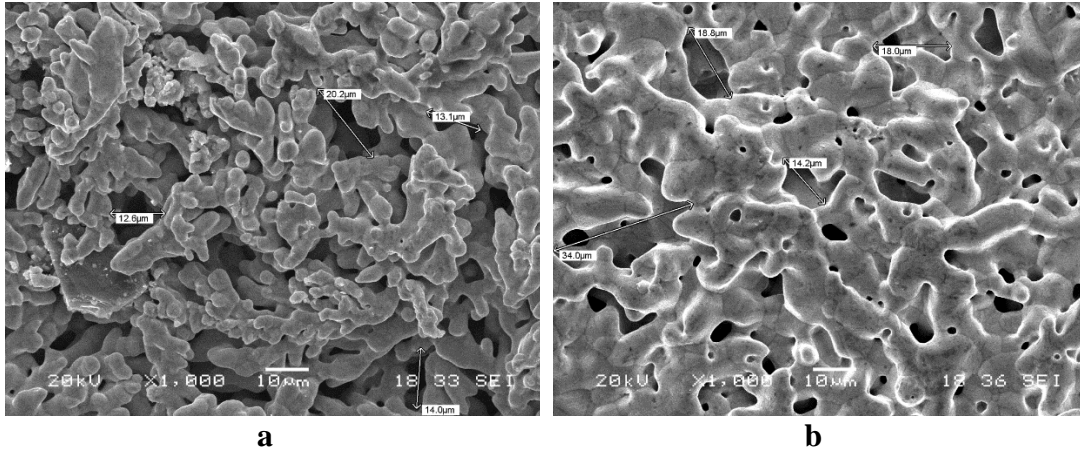
L8 dizinine uygun olarak Tablo 3.3’de belirlenen deney şartlarında yapılan 8 adet sinterlenmiş numunenin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmış, Tablo 2’de detaylı olarak değerleri verilmiş toz boyutu, sıcaklık, basınç ve bekleme süresi gibi parametreler kullanılarak sinterleme prosesi uygulanmış numunelerin SEM cihazında 1000 kat büyüme yapılarak mikroskobik görüntüleri belirlenmiştir.

Şekil 3.6 (a ve b) de farklı boyutlardaki bakır tozları kullanılarak üretilen numunelerin mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Şekil 3.6a da 5 μm tane boyutuna sahip bakır tozun 700 $^{\circ}\text{C}$ de 60 dakika sinterlenmesi ile üretilen numunenin (L4) mikroyapısı, Şekil3.6b de ise 50 μm tane boyutuna sahip bakır tozun 700 $^{\circ}\text{C}$ de 60 dakika sinterlenmesi ile üretilen numunenin (L7) mikroyapısı verilmiştir. Şekil6a ve 6b deki mikroyapılar incelendiğinde, 5 μm tane boyutuna sahip bakır tozu kullanılarak üretilen numunenin daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğu görülmektedir.



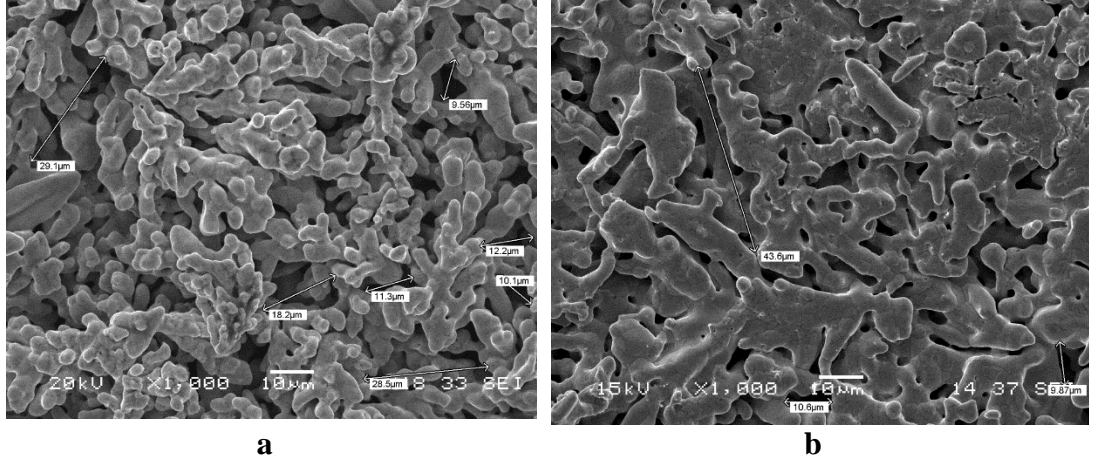
Şekil 3.5. a. 5 μm tane boyutuna sahip bakır toz kullanılarak üretilen numunenin(L4) SEM mikroyapısı .b. 50 μm tane boyutuna sahip bakır toz kullanılarak üretilen numunenin(L7) SEM mikroyapısı

Şekil 3.7.a ve 3.7.b deki mikroyapı görüntüleri, farklı sinterleme sıcaklıklarının gözenekliliğe olan etkisini incelemek için verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, toplam gözenek miktarı azaldıkça gözenekler yuvarlaklaşmakta ve başlangıçtaki parçacık sınırları kaybolmaktadır.Yüksek sıcaklıklarda, tane sınırı hareketi gözenekten ayrılmaya neden olur. Şekil 3.6.b Düşük sıcaklıklarda Şekil 3.7.a ise tane büyümesi yavaş olduğundan gözenekler tane sınırına bağlı kalır. Gözenek hareketi yüzey yayını ve buharlaşma ile mümkündür. Sonuç olarak sinterlemede mikroyapı gelişiminin ana belirleyicilerinden biri de sıcaklıktır.



Şekil 3.6. a. 700 0C de sinterlenerek üretilen numunenin (L1) mikroyapısı n b. 900 0C de sinterlenerek üretilen numunenin (L2) mikroyapısı

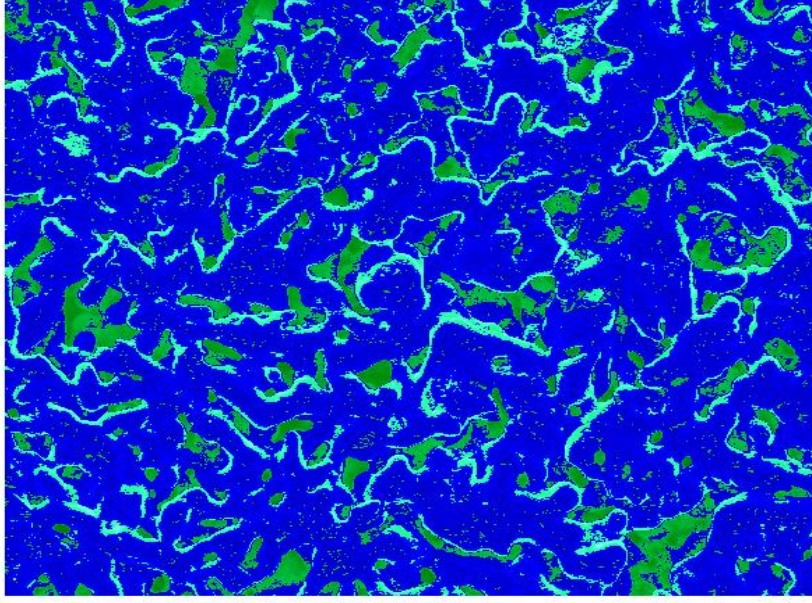
Şekil 3.8.a ve Şekil 3.8.b de bekleme süreleri hariç aynı şartlarda sinterleme yapılmış bakır tozlarının mikroyapıları verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde bekleme süresi artıkça daha iyi bir sinterlenme oluşumu gözlenmekte ve gözeneklilik azalmaktadır. Özetle bekleme süresi artıkça gözeneklilik azalmaktadır.



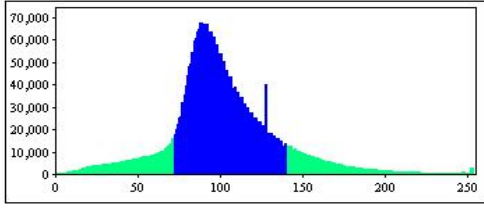
Şekil 3.7.a. 30 dakika sinterlenerek üretilen numunenin SEM mikroyapısı (L6) .b. 60 dakika sinterlenerek üretilen numunenin SEM mikroyapısı (L7)

Her numunenin mikroskopik görüntüleri, Image görüntü işleme yazılımı kullanılarak gözeneklilik yüzdesini ölçmek için çekilmiştir. Gözeneklilik ölçümleri için çekilen görüntüler ilk önce siyah ve beyaz tonlarında elde edildi. Daha sonra, gözenekli yüzey sınırları seçildi ve gözenekli alanlar yeşil renge, diğer alanlar ise koyu maviye dönüştürüldü. Yeşil renk alanının tüm alana oranı hesaplanarak, gözenek yüzdesi elde edildi. Şekil 3.9 da image programında gözenek ölçümü yüzde olarak hesaplanmış ve gözenek yüzdesi grafik olarak verilmiştir.

Segmentation for Image: Image2

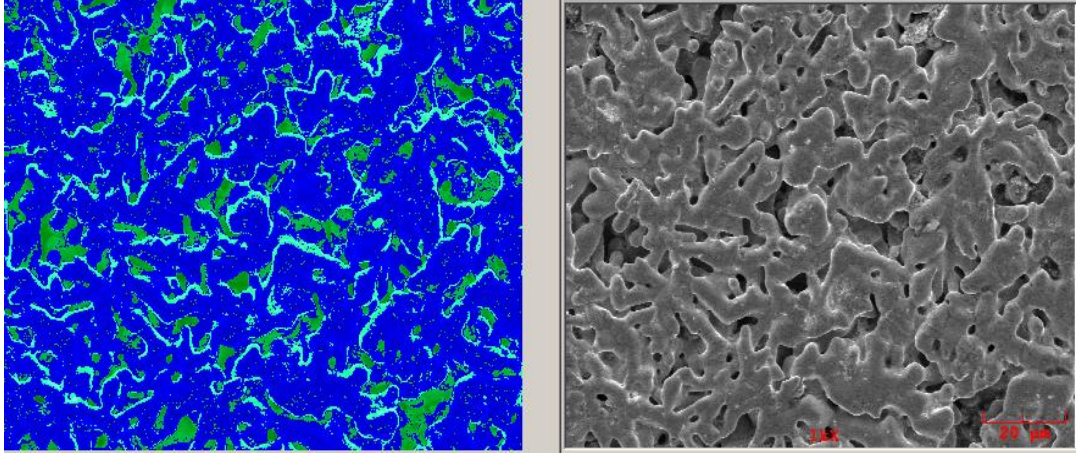


Segment	Description	Area
Blue		78.35
Green		21.65

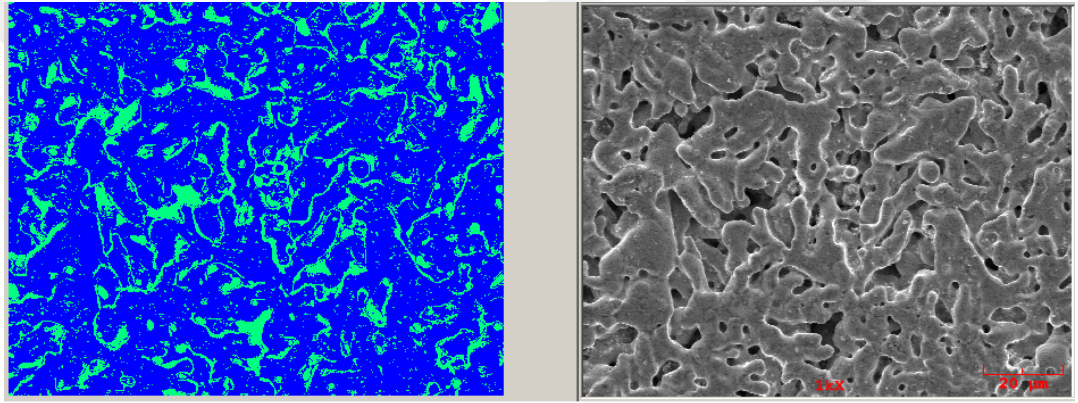


Şekil 3.8. Image programında gözenek ölçümü

Sinterleme deneylerinin tekrarlanabilirliğinin tespiti için deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Tekrarlanan numunelerin SEM görüntüleri ve gözenek ölçümü için kullanılan image görüntüleri şekil 3.10 ve 3.11’ de verilmiştir. Deneylerin tekrarlanabilirliğini ve işlem kabiliyetinin bir göstergesini belirlemek için Şekil 10 ve 11 karşılaştırılmıştır. Şekil 3.9’ da image programında alınmış görüntüsü verilen numunenin gözenek değeri %21,65 ölçülmüş, şekil 3.10’ dakinin ise %20,77 olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada kullanılan gözeneklilik ölçüm tekniğinin $\pm\% 5$ toleransla sonuçlandırıldığı düşünüldüğünde deneylerin tekrarlanabilirliği kabul edilebilir.



Şekil 3.9. 5µm toz boyutunda 60dk 50bar 900 °C de sinterlenmiş numunenin SEM cihazında alınmış mikroyapısı



Şekil 3.10. 5µm toz boyutunda 60dk 50bar 900 °C de sinterlenmiş tekrarlanan numunenin SEM cihazında alınmış mikroyapısı

Sinterlenmiş numunelerin gözenek boyutları 9µm ile 20,2 µm arasında değişmektedir. Numunelerin gözenek yüzdeleri ise en düşük %13,77, en yüksek ise %29,75 dir. Yüksek sıcaklıklarda sinterlemenin daha iyi gerçekleştiğini fakat gözenekliliğin azaldığını gözlemleyebiliyoruz.

3.4. Varyans Analizi (ANOVA)

Gözenekliliğe etki eden faktörlerin önemini tespiti için varyans analizi (ANOVA) tekniği kullanılmıştır.

Gözenek için en uygun parametre seviyelerini ve etki oranlarını belirlemek için Taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Yöntem için kullanılan işlem basamakları aşağıda sıralanmıştır.

- Deney tasarımının belirlenmesi

- Elde edilen deney tasarımına göre gözenek değerlerinin yazılması
- Sinyal/Gürültü oranının belirlenerek optimum parametre seviyelerine ulaşılması
- Sinyal/Gürültü oranına dayalı olarak varyans analizinin (ANOVA) gerçekleştirilmesi

SEM görüntüleri Image programında kullanılarak gözenek değerleri yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Tablo 4 de tüm deney sonuçlarının gözenek değerleri yüzdesel olarak verilmiştir.

Tablo 3.4. Image programında elde edilen gözenek değerleri

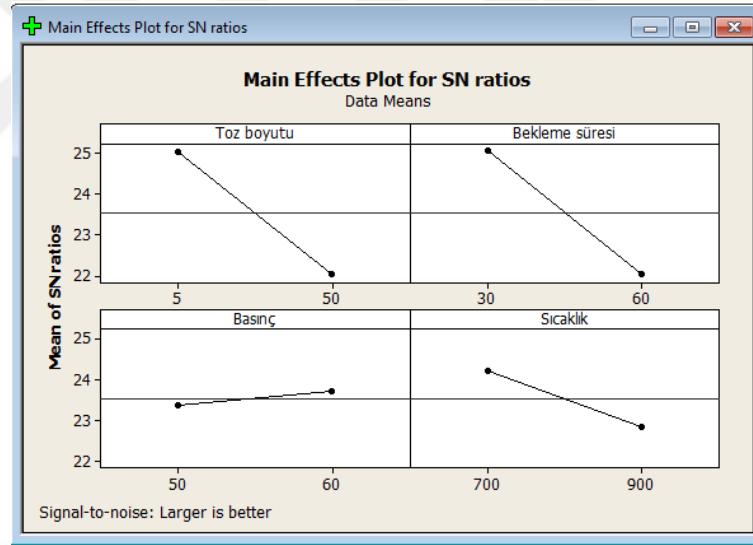
	Toz boyutu [μm]	Bekleme Süresi[Dk]	Basınç[Bar]	Sıcaklık[$^{\circ}\text{C}$]	Gözenek[%]
1	5	30	50	700	29,75
2	5	30	60	900	26,95
3	5	60	50	900	22,85
4	5	60	60	700	25,14
5	50	30	50	900	21,3
6	50	30	60	700	25,64
7	50	60	50	700	20,47
8	50	60	60	900	13,77

SEM görüntülerinden elde edilen gözeneklerin hepsi minitab programına girilmiştir. Ardından Taguchi analizi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile gözenek değişimi üzerine faktör ve seviyelerin etkisini görmek için, minitab programı ile S/G analizi (sinyal/gürültü analizi) ve varyans analizi uygulanmıştır.

Tablo 3.5. Sinyal/gürültü analizi

	Toz boyutu [μm]	Bekleme Süresi[dk]	Basınç[Bar]	Sıcaklık[$^{\circ}\text{C}$]	Gözenek [%]	S/G
1	5	30	50	700	29,75	26,1070
2	5	30	60	900	26,95	25,4832
3	5	60	50	900	22,85	23,4637
4	5	60	60	700	25,14	25,0571
5	50	30	50	900	21,3	23,4052
6	50	30	60	700	25,64	25,2014
7	50	60	50	700	20,47	20,5061
8	50	60	60	900	13,77	19,0849

Taguchi deney tasarım yöntemi ile en yüksek gözeneklilik için S/N oranlarına göre elde edilen en uygun parametre seviyeleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.11. Taguchi tasarımının önerdiği seviye değerleri

Taguchi deney tasarımına göre yukarıdaki şekildeki grafiklerde de incelendiği gibi, en yüksek gözenekliliğin 5 mikronluk toz boyutunda, 30 dk lık bekleme süresinde, 60 barlık basınçta ve 700 $^{\circ}\text{C}$ deki seviye değerlerinde olması beklenmektedir.

Bakır tozundan gözenekli yüzeyler elde edebilmek için, toz metalürjisi prensibine göre, basınç, bekleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve toz boyutu gibi parametrelerin, iki farklı seviyesi kullanılarak 8 adet deney yapılmıştır. Faktörlerin F üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla % 95 güven düzeyinde yapılan varyans analizi

(ANOVA) sonuçları Tablo 3.6 'da verilmiştir. Burada, her bir faktör/değişkenin önem seviyesini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), F değerleri ve yüzde etki oranları (PCR) görülmektedir. Değişkenlerin önem seviyesi, ANOVA tablosundaki P değeri dikkate alınarak belirlenmektedir.

Tablo 3.6. Varyans analizinin gerçekleştirilmesi

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Etki Oranı[%]
Toz boyutu	1	11,3263	11,3263	11,3263	11,97	0,041	38,24734157
Bekleme süresi	1	9,3329	9,3329	9,3329	9,87	0,052	31,5159067
Basınç	1	0,4333	0,4333	0,4333	0,46	0,547	1,463193903
Sıcaklık	1	5,6828	5,6828	5,6828	6,41	0,092	19,1900261
Hata	3	2,8379	2,8379	0,946			9,583194038
Toplam	7	29,6133					% 100
%95 güvenlikte							

Herbir deney parametresinin yüzde olarak etkisi varyans analizi ile belirlenmiştir. Parametreler içinden en yüksek etki oranı % 38,25toz boyutu daha sonra %31,52 bekleme süresi, sıcaklığın etki oranı %19,19 ve en az etki oranı ise % 1,46 değerle basınçtır. Öte yandan hata yüzdesi de 9,58 dir.

Taguchi yöntemi ve ANOVA analiziyle mikrokanallarda ısı akışı testlerinde kullanılmak üzere bakır tozundan sinterleme yöntemiyle gözenekli yüzeyler elde edebilmek amaçlanmıştır. Elektron mikroskobu görüntüleri herbir parametre değiştiğinde gözenekliliğin değiştiğini gösterdi. Toz metalürjisi prensipleri takip edildiğinde sinterlemeye birçok faktörün etki ettiği tespit edilmiştir. Bunlar toz boyutu, sinterleme sıcaklığı, bekleme süresi ve basınçtır. Bu belirtilen faktörlerin herbiri farklı değerlerde sinterlemeye ve buna bağlı olarak gözenekliliğe etki etmektedir. Herbir faktörün farklı seviyelerinde tek tek sinterleme yapabilmek oldukça maliyet ve zaman gerektirmektedir. Bu nedenle zaman ve maliyet tasarrufu oluşturabilmek amacıyla taguchi yöntemi kullanılmıştır. 16 deney yapmamız gerekirken L8 ortogonal dizi ile maliyet ve zaman %50 ye düşürülmüştür. Herbir deney parametresinin yüzde olarak gözenekliliğe etkisini belirlemek için varyans analizi kullanılmıştır. Deneylerde 5µm

ve 50 µm boyutlarına sahip bakır tozları kullanılmıştır. Toz metalürjisi adımları takip edilerek, tozlar kalıpta 50 ve 60 bar basınçta sıkıştırılmış, 700 °C ve 900 °C sıcaklıkta, 30 ve 60 dakika sürelerde sinterlenmiştir. Yüksek basınçlarda daha düşük gözeneklilik elde edilmiştir. Yüksek ve tutarlı gözeneklilik seviyeleri sağlamak için düzgün, homojen ve küçük boyutlu tozlar kullanılmalıdır. Faktör etkisinin önemini incelemek için varyans analizi yapılmış ve parametreler içinden en yüksek etki oranı % 38,25 toz boyutu daha sonra % 31,52 bekleme süresi, sıcaklığın etki oranı % 19,19 ve en az etki oranı ise % 1,46 ile basınçtır.

3.5. Karakterizasyon

Toz metalürjisi prensipleri takip edilerek sinterleme yöntemi kullanılarak üretilen sekiz adet bakır numunelerin üretim amacı yüksek gözenekliliğe sahip özgül ısı alıcısı meydana getirmektir. Üretimi gerçekleştirilen tüm numunelerin akış ve ısı deneylerinde malzeme ve yüzey etkisini inceleyebilmek için termofiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Bu nedenle üretilen tüm numunelerin karakterizasyonunun yapılması gerekli bulunmuştur. Sekiz adet numunenin termal iletkenlik, sertlik, ıslanabilirlik, yoğunluk değerleri Sakarya Üniversitesinin Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Isı iletim katsayısı

Isı iletim katsayısı, ısı yayılımı ve özgül ısı, ısı transferi hesaplamaları için gerekli olan malzemenin üç önemli fiziksel özelliğidir. Bu üç özellik arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile ifade edilir. (Vincent, 2012)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Isı yayılım katsayısı, ele alınan ortamdaki ısı iletiminin ısı depolamaaya oranıdır. α ısı yayılım, k , ρ ve c_p sırasıyla ısı iletim katsayısı, yoğunluğu ve özgül ısıyı verir. Sinterleme ile üretilen bakır numunelerin ısı yayılım katsayısı değerleri Sakarya Üniversitesi laboratuvarında mevcut olan, Netzsch LFA447 termal difüzyon cihazı ile ölçüldü. Ölçüme başlamadan önce tüm numuneler zımparalanarak numune tutucuya uygun inceliğe getirilmiş ve yüzey paralelliği sağlanmıştır. Ayrıca Xenon ışık enerjisi absorpsiyonu ve sıcaklık detektörüne IR radyasyon emisyonu sağlamak için numunelerin üst ve alt yüzeylerine sprey yardımı ile grafit kaplanmıştır. Proteus LFA analiz programı yardımıyla termal difüzyon katsayısı değerleri belirlendikten sonra ısı

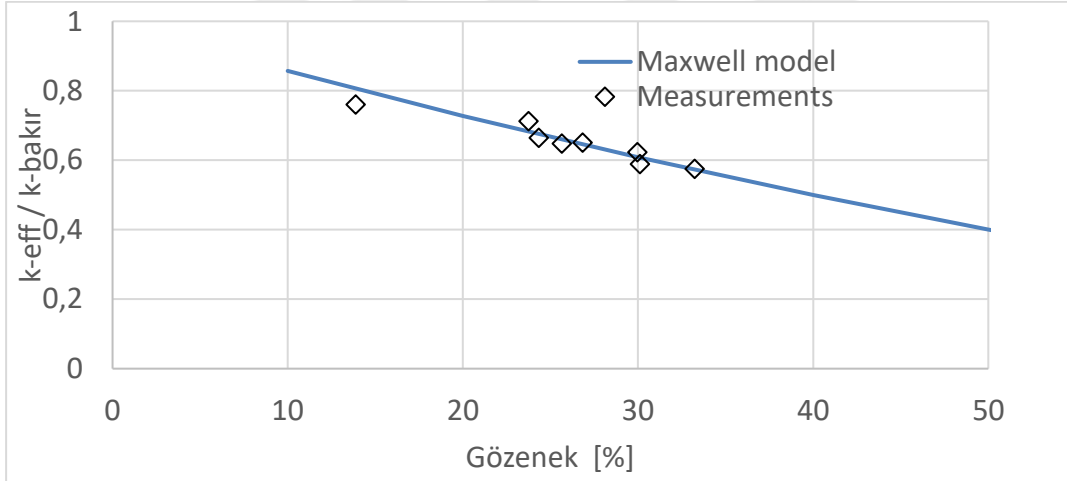
iletim katsayısı hesaplanmıştır. Ölçülen ısı iletkenlik değerleri, heterojen malzemenin ısı iletkenliğini gösteren Maxwell denkleminde elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Maxwell denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir . (Lu, 2020)

$$k_{eff} = \left[\frac{2\varepsilon + 1 + 2k_s/k_g(1 - \varepsilon)}{2 + k_s/k_g(1 - \varepsilon) + \varepsilon} \right]$$

Saf bakır tozundan sinterleme ile elde edilen numunelerin yoğunluğu ve gözenekliliği Arşimet prensibi kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki denklem, ısı transfer performansını etkileyen temel bir faktör olarak sinterlenmiş gözenekli tabakanın gözenekliliğini ε hesaplar. (Zhang ve ark. 2020)

$$\varepsilon = \frac{V_t - (m_{cp} - \rho_{cp})}{V_t} \times 100 \%$$

V_t gözenekli bakır numunelerinin ölçülen hacmi, m_{cp} bakır numunelerinin kütesidir. Ayrıca ρ_{cp} , bakır tozlarının yoğunluğudur.



Şekil 3.12. Maxwell modelinden elde edilen değerler ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması

Ölçülen ısı iletim katsayıları, Şekil 3.13'de gösterilen Maxwell modelinden elde edilen verilerle karşılaştırıldı. Maxwell modelinin sinterlenmiş gözenekli bakır numunelerin ısı iletim katsayılarını tahmin edebildiği sonucuna varılmıştır. Ölçümler, sinterlenmiş bakır numunelerin özelliklerinin yoğunluk ve gözenekliliğe bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

3.5.2. Pürüzlülük ölçümü

Sinterlenerek üretilen sekiz adet numunenin pürüzlülük ölçümleri Sakarya Üniversitesi Sargem biriminin karakterizasyon laboratuvarında bulunan KLA Tencor P6 standart

profilometre cihazı ile yapılmıştır. Tabloda da belirtildiği gibi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri 4,6 ile 7,9 μm arasında ölçülmüştür. Çok belirgin olmamakla birlikte gözeneklilik değerlerinin artmasıyla pürüzlülük değerlerinin bir miktar arttığı söylenebilir.

Tablo 3.7. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Numune	Pürüzlülük
	Ra [μm]
L1	6.42
L2	4.64
L3	5.91
L4	5.88
L5	6.78
L6	7.95
L7	6.88
L8	5.29

3.5.3. Sertlik ölçümü

Toz metalurjisi yöntemleri takip edilerek sinterlenen sekiz adet numunenin Vickers Sertlik ölçümleri Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde bulunan LEICA marka VH-MOT model sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik ölçümleri her numunenin 5 farklı noktasından yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Ortalama Vickers Sertlik değerleri Tablo 3.8 de belirtildiği gibi 34 ile 68 HV arasında değişmektedir. Yoğunluk arttıkça sertliğin arttığı gözlenmiştir. Literatürde benzer sonuçlar bildirilmiştir. (Mondal ve ark. 2021), (Uddin ve ark. 2010) Yüksek sıcaklıklarda sinterlenmiş bakır tozları ile elde edilen numune iyi fiziksel özelliklere sahiptir. Özellikle ince tozlarla (5 μm) yapılan yüksek yoğunluklu numunelerde ince, düzgün bir mikro yapı gözlenir. Bu da sertliğin diğerlerinden daha yüksek olmasına neden olmuştur.

Tablo 3.8. Ortalama Vickers Sertlik

Numune	Vickers Sertlik [Hv]
L1	37
L2	43
L3	68
L4	52
L5	38
L6	34
L7	36
L8	48

3.5.4. Islanabilirlik

Kaynama yüzeyinin temas açısı önemli ve dikkate alınması gereken bir özelliktir. Bir çok araştırmacı kaynama akışı çalışmalarında ısı alıcısının temas açısının etkisi üzerine çalışmalara devam etmektedir. Henüz tam olarak kabul görmüş bir çalışma olmasa da çalışmalar sürdürülmektedir. Temas açısı ne kadar küçük olursa, yüzeyin ıslanabilirliği o kadar yüksek olur. Kaynama sırasında çekirdeklenmeyi destekledikleri için hidrofobik yüzeyler tercih edilir. Tüm numunelerin temas açısı 90 derecenin üzerinde ölçülmüştür. Yoğunluğu az olan numunelerde temas açısı daha yüksek çıkmıştır.

Kaynama sürecinde hidrofilikliğin kritik ısı akısını arttırdığı, hidrofobik yüzeylerin ise kabarcık çekirdeklenmesini arttırdığı bilinmektedir. Sinterlenen numunelerin temas açıları ölçülerek sağ ve sol açıların ortalaması alınmıştır. Numunelerimizin ıslanabilirlik açıları Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarında bulunan Krüss marka dsa 30s model cihazda gerçekleştirilmiştir. Ölçülen değerler Tablo 9 da verilmiştir.

Tablo 3.9. Isı alıcılarının Temas Açısı değerleri

Numune	Temas Açısı [°]
L1	112.6
L2	104.7
L3	105.6
L4	106.9
L5	111.0
L6	113.1
L7	112.4
L8	106.8

3.5.5. Yoğunluk tayini

Sinterleme yöntemiyle üretilen numunelerin yüzey gözenekliliği kadar yoğunluğu da önemli bir karakterdir. Numunelerin yoğunluk tayini için DIN 51065 (ISO EN 993-1) standardı kullanılmıştır. Bu standart yöntemine göre, numuneler öncelikle etüvde 100°C’de kurutulup, kuru ağırlık ölçülür daha sonra, su dolu kaba numuneler yerleştirilir. Numuneler ile su içinde kabın alt kısmıyla temasta olmamalıdır. Bu nedenle kap altına tel ızgara konumlandırılır. Suya gömülü halde bulunan numuneler, kabın içerisinde 2-3 saat süre ile kaynatılır. Kaynama işlemi belirtilen sürede tamamlandıktan sonra, kap içindeki su oda sıcaklığına ulaştığında numuneler içerisinden alınır. Yaş tartım sonrasında numune üzerindeki su tabakası, arındırılır akabinde tartıma alınır. Tartılan bu değere doymuş ağırlık adı verilir.

Archimed yöntemi kullanılarak kuralan askı sisteminde bulunan düzenekte, tartı cihazının tabanından sarkıtılan bir ipe bağlanan numune, suya daldırıldığı haliyle ağırlığı ölçülür.

Aşağıda verilen eşitlik yardımıyla numunelerin bulk yoğunluğu (hacim ağırlığı, ρ_h) belirlenir.

$$\rho_h = (M_K) / (M_D - M_K) * (\rho_{su})$$

M_K : Kuru ağırlık (g)

M_D : Doymuş ağırlık (g)

M_A : Askı ağırlığı (g)

ρ_{su} : Sıvının yoğunluğu

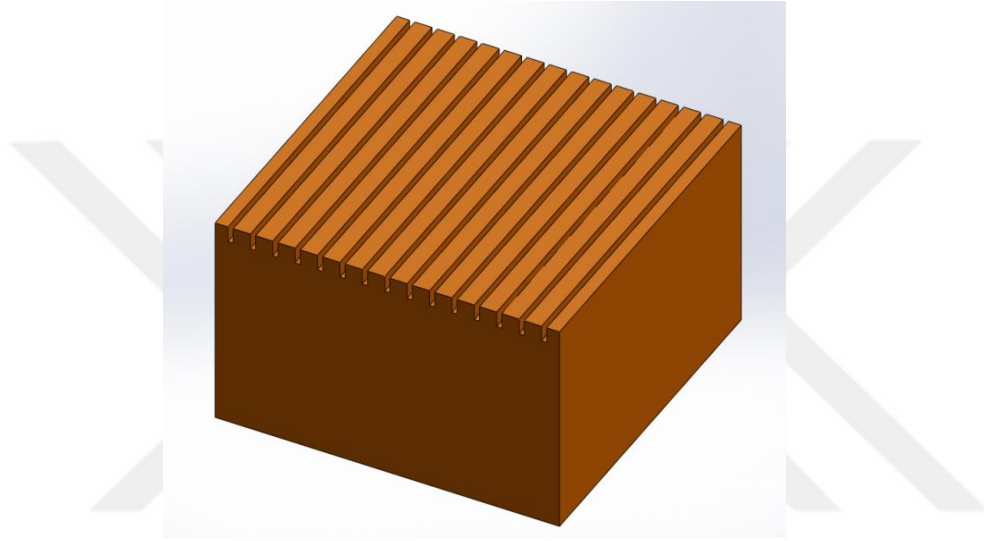
Archimed yöntemi kullanılarak belirlenen değerler yukarıdaki yoğunluk denkleminde yerine konularak yoğunluk değeri sinterlenerek üretilmiş sekiz adet numune için hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler aşağıdaki Tablo 3.10 da belirtilmiştir.

Tablo 3.10. Isı alıcılarının Yoğunluk değerleri

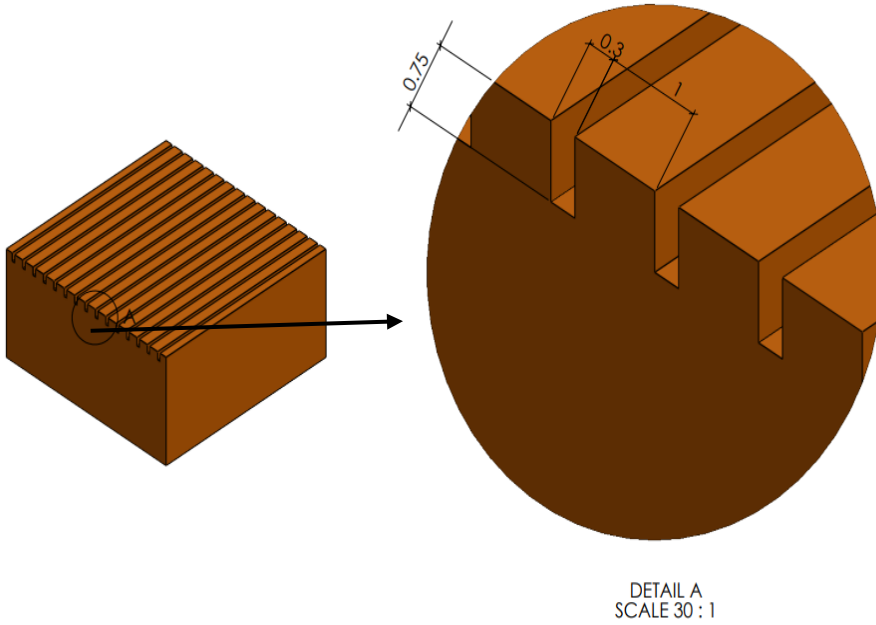
Numune	Yoğunluk [g/cm ³]
L1	6.2999
L2	6.8252
L3	7.7077
L4	7.0427
L5	6.6552
L6	6.2552
L7	6.5487
L8	6.7725

3.6. Isı Alıcısı Tasarımı

Sinterlenen numunelerin mikrokanal geometri tasarımı katı model programı olan Solidworks programında tasarlanmıştır. Sinterlenmiş ısı alıcılarının boyutu 20mmx20mmx10mm dir. Şekilde 3.14 de Solidworks programında tasarlanmış görüntüsü verilen ısı alıcısının birbirine paralel kanalları her biri eşit genişlik ve yüksekliktir. Sinterlenen sekiz adet bakır ısı alıcısının herbir mikrokanal genişliği 750 μm , yüksekliği ise 300 μm 'dir. A kesit resmi verilmiş mikrokanalın görüntüsü şekilde 3.15.b 'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Solidworks programında tasarlanan ısı alıcısı

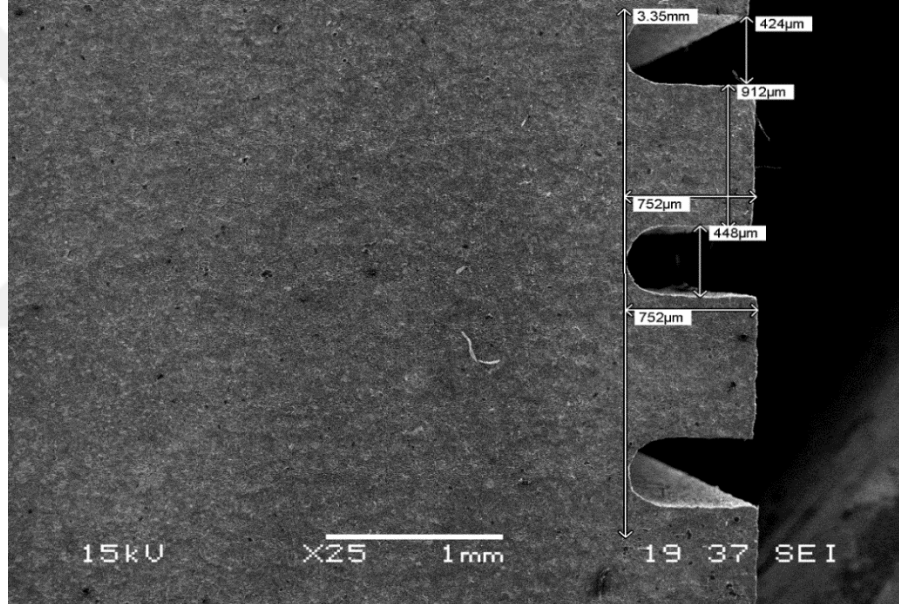


Şekil 3.14. Solidworks programında tasarlanan ısı alıcısının A kesit resmi

3.7. Tel Erezyon Yöntemi

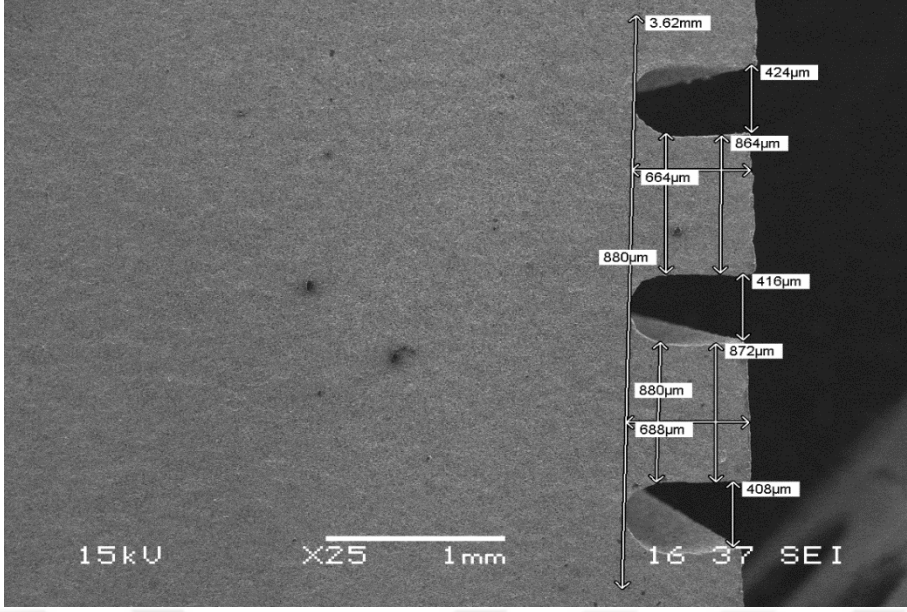
Şekil 3.15'de teknik resim görüntüsü verilmiş ısı alıcısının herbirine tasarlanan boyutlarda tel erezyon yöntemiyle mikrokanallar açılmıştır. Sinterlenmiş sekiz numunenin her biri aynı boyutlarda olması istenmiş fakat tel boyutu ve üretim toleransları nedeniyle belirlenen geometride sapmalar belirlenmiştir.

Numunenelerin her birinin taramalı elektron mikroskobu yardımıyla kanal en ve boy oranı saptanarak, istenilen ölçüden ne kadar sapma olduğu kontrol edilmiştir. Şekil 3.16-3.23' de mikrokanallı ısı alıcıların SEM cihazı ile alınmış mikroskop görüntülerinden belirlenmiş kanal geometri görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde hedeflenen, şekil 3.15' de verilen geometriden sapmalar olduğu gözlenmiştir. Hedeflenen kanal genişliği $300\mu\text{m}$, derinliği ise $750\mu\text{m}$ 'dir.

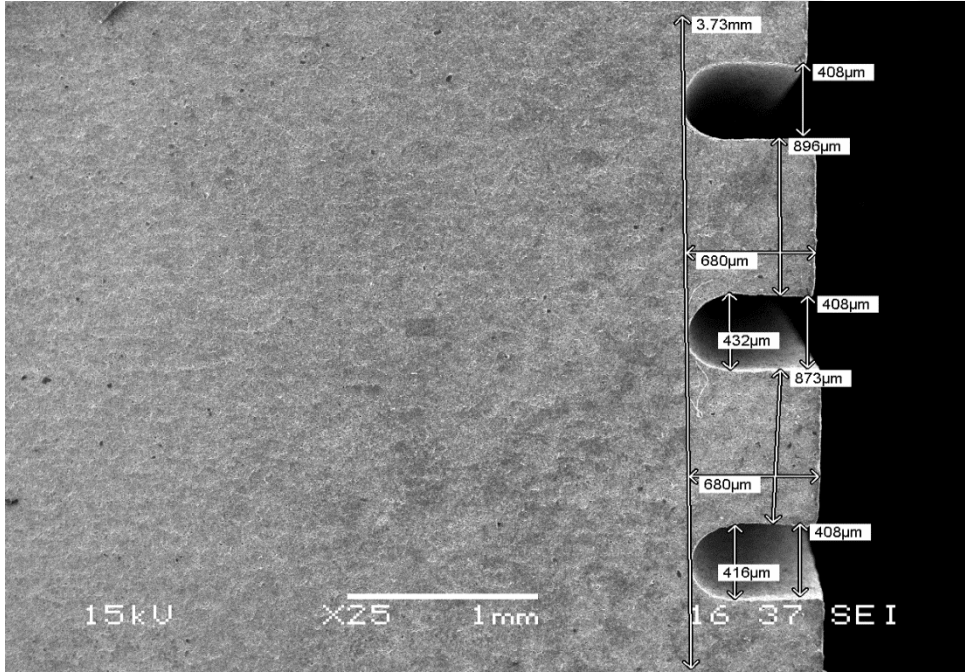


Şekil 3.15. L1 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü

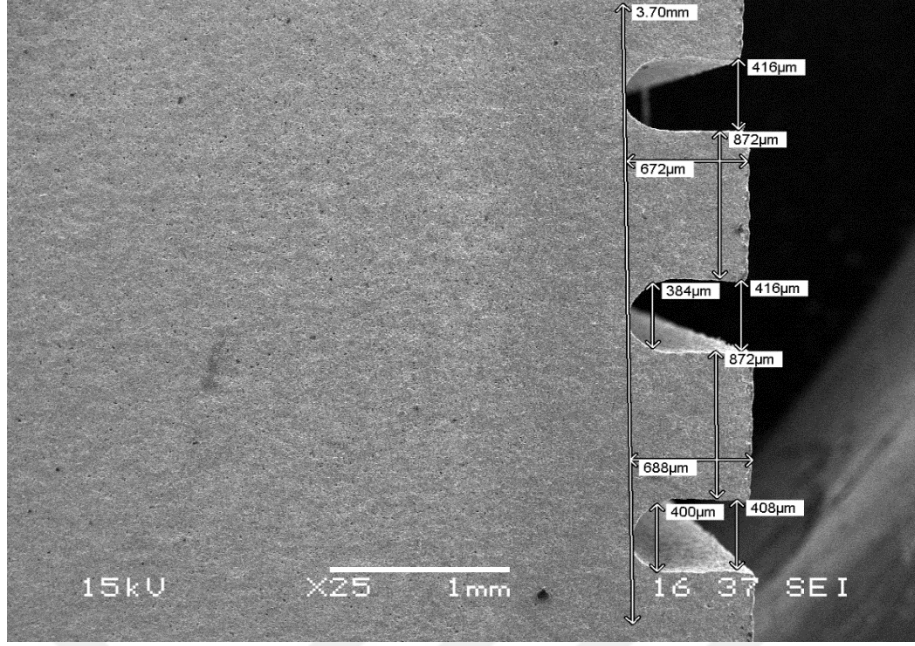
L1 ısı alıcısının kanal genişlik ve derinlik değerlerinde istenilen değerlerden sapmalar olduğu, sem görüntüleme yöntemiyle tespit edilmiştir. Kanal genişliği minimum $424\mu\text{m}$, maksimum ise $448\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Kanal yüksekliği ise $752\mu\text{m}$ olarak her bir kanalda eşit olduğu gözlenmiştir.



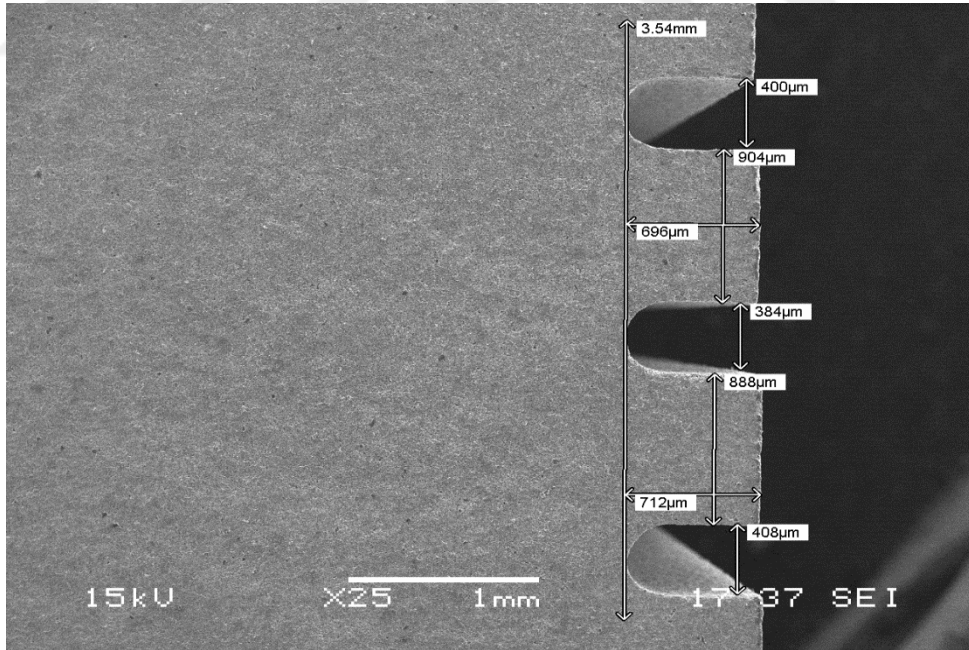
Şekil 3.16. L2 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü L2 ısı alıcısının kanal geometrisinin saptanması için SEM görüntüsü incelendiğinde hedeflenen geometriden sapma olduğu belirlenmiştir. En yüksek kanal genişliği 424 µm iken en düşük kanal genişliği ise 408 µm olarak ölçülmüştür. En küçük kanal derinliği 664 µm en yüksek kanal derinliği ise 688 µm olarak ölçülmüştür.



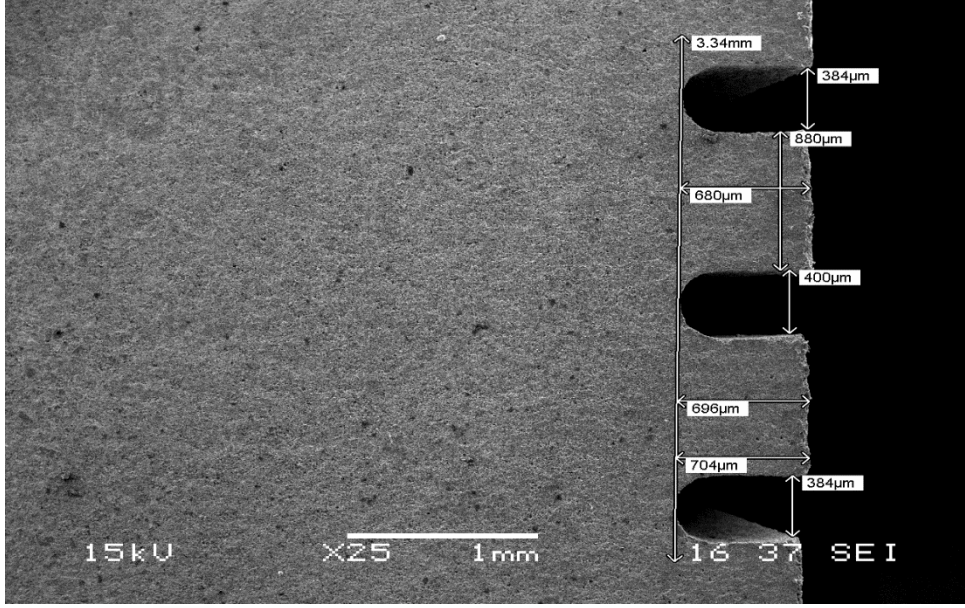
Şekil 3.17. L3 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü L3 ısı alıcısı kanal yüksekliği 680 µm kanal genişliği ise 408 µm olarak belirlenmiştir.



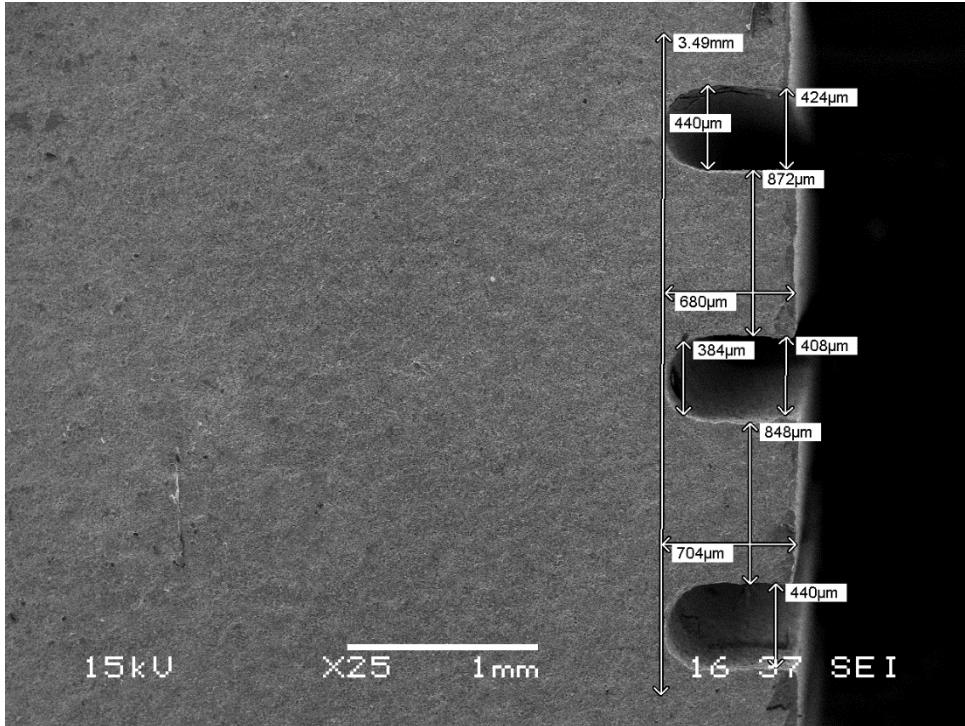
Şekil 3.18. L4 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü L4 ısı alıcısının en düşük 384 μm en yüksek 416 μm olarak kanal genişliği belirlenmiştir. Kanal yüksekliği ise 672 μm ve 688 μm en düşük ve yüksek kanal yükseklikleridir.



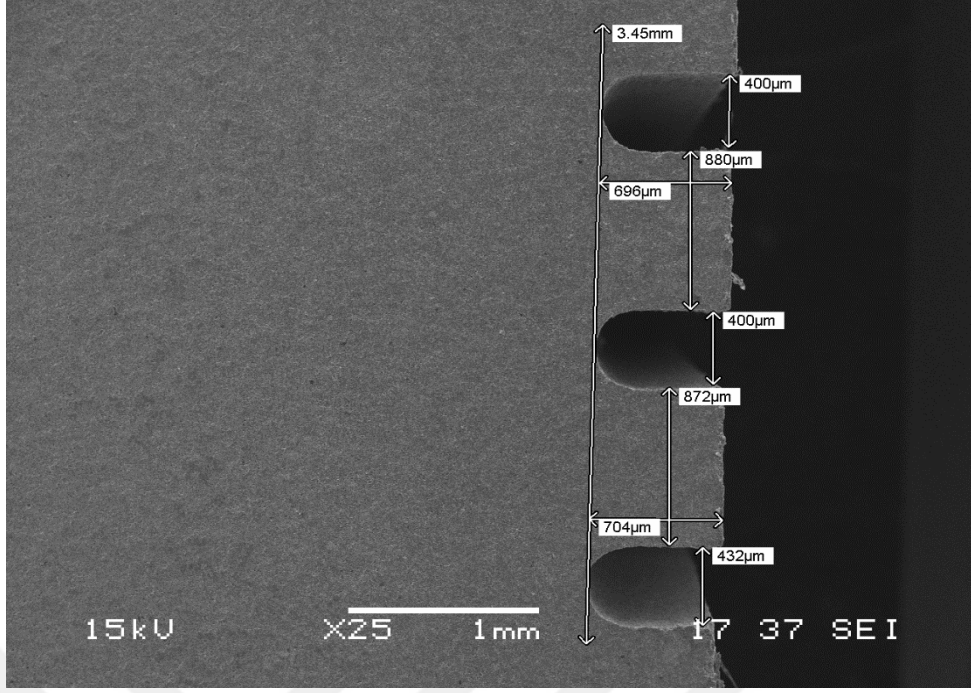
Şekil 3.19. L5 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü L5 ısı alıcısında maksimum kanal yüksekliği 712 μm iken maksimum kanal genişliği 408 μm olarak ölçüldü. Kanal genişlik ve yükseklik değerlerinin minimumu sırasıyla 384 μm ve 696 μm dir.



Şekil 3.20. L6 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü
L6 numunesinin kanal genişliği 384 μm en düşük ve en yüksek ise 400 μm olarak ölçüldü.Kanal yüksekliği ise sırasıyla en yüksek ve en düşük 704 μm ve 680 μm dir.



Şekil 3.21. L7 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü



Şekil 3.22. L8 ısı alıcısının tel erezyonla mikrokanal açıldıktan sonraki sem görüntüsü L7 adlı ısı alıcısı kanal genişliği en yüksek 440 µm iken L8 in 432 µm dir. Kanal genişliklerinin minimum değerleri ise L7 nin 384 µm, L8 in ise 400 µm dir. Kanal yükseklikleri L7 nin en yüksek 704, en düşük 680 µm dir. L8 in ise en yüksek kanal yüksekliği 704 µm iken en küçük 696 µm olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.11. Isı alıcılarının maksimum ve minimum genişlik ve yükseklikleri

Isı Alıcısı	Kanal genişliği (min,-maks.)	Kanal derinliği (min,-maks.)
	[µm]	[µm]
L1	424-448	752-752
L2	408-424	664-688
L3	408-408	680-680
L4	408-416	672-688
L5	384-408	696-712
L6	384-408	696-704
L7	384-440	680-704
L8	400-432	696-704

L1 den L8 kadar olan sekiz adet ısı alıcısının geometrisini belirleyen genişlik ve yüksekliklerinin, maksimum ve minimum değerlerini içeren tablo 11 de aşağıda verilmiştir. Isı alıcılarının ısı ve akış hesaplama denklemleri için hidrolik çap hesaplanırken, bu genişlik ve yüksekliklerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



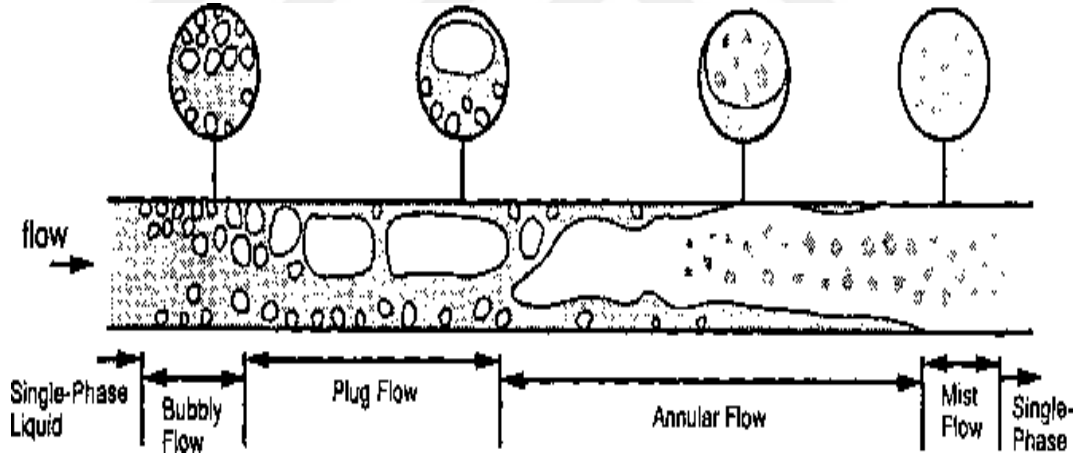
4. ÇİFT FAZLI AKIŞ TEORİSİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Boru ve kanallardaki kaynama akışı uygulamalar arasında karşılaşılan en karmaşık faz değişim prosesidir. En çok karşılaşılan kazan ve buharlaştırıcı uygulamalarında, akış ya dik ya da yataydır.

Şekil 4.1’de dairesel bir boru için düşük ısı akısında buharlaşma şematik olarak gösterilmektedir. Dairesel boru boyunca buharlaşma artarak devam eder. Akış kaynamasında akış rejimi hıza bağlıdır.

Kaynama ilk başlığında borudan kabarcıklar çıkmaya başlar. Daha sonra kabarcıktan tapan akışa ve tapan halka akışa ve sisli akış meydana gelir (Şekil.4.1).

Kaynama akışı ve buna bağlı faz değişimi genel olarak karmaşıktır. Kaynama akışı süresince farklı yerlerde farklı buharlaşma desenleriyle karşılaşılabilir.



Şekil 4.1. Yatay bir boruda taşınım kaynama sırasında akış deseni (Carey, 1962).

Kabarcıklı akış deseni genellikle şekil.4.1’de de görüldüğü gibi kaynama başlangıcında görülür. Akışta daha fazla buhar üretildikçe ve buhar oranı arttıkça akış nerdeyse dairesel bir konfigürasyona geçiş yapar ve bunun üzerine sıvı buhar arayüzünde buharlaşma daha önemli bir hal alır. Bazı durumlarda çekirdek kaynaması tamamen bastırılabilir ve film buharlaşması tek aktif buharlaşma mekanizması olabilir.

Buharlaşma işleminde halka şekilli akış aşamasında sıvı damlacıklarının sürüklenmesiyle buhar üretilir. Bu etkiyle birlikte doğrudan buharlaşmada, aşağı doğru

akarken sıvı film kalınlığı azalma eğilimi gösterir. Sonunda, sıvı film, boru duvarının bazı kısımlarında tamamen kaybolabilir. Bu olay genellikle boru duvarının kuruması olarak adlandırılır. Yatay borularda kısmi olarak kuruma şekil 1’de görüldüğü gibi yerçekiminden dolayı genellikle üst kısımda gözlenir. Borunun üst kısmı kuru kalırken alt kısmında sıvı film kalabilir. Aşağı doğru ıslaklık azalarak borunun tüm çevresinde tamamen kuruma sağlanır. Buharlaşmanın devam edebilmesi için boru duvarından sıvı damlacıklarına ısı taşınımı gerekmektedir (Carey, 1962).

Kandlikar ve ark. (1997) çeşitli akış koşulları altında bir çekirdeklenen kabarcığın çevresindeki yerel sıcaklık alanına bağlı daha fazla değişiklik önermişlerdir.

Giriş sıcaklığı $T_{B,i}$ olan küçük hidrolik çapa sahip kanalda soğutulmuş sıvı düşünelim.

(i) sabit özellikler varsayalım, (ii) homojen ısı akısı ve (iii) sabit koşullar varsa, z akış uzunluğu boyunca sıcaklığı $T_{B,z}$ aşağıdaki denklemde verilir:

$$T_{B,z} = T_{B,i} + \left(\frac{q'' P z}{\dot{m} c_p} \right) \quad (4.1)$$

q'' :ısı akısı, P : ısıtılmış çevre, z : kanal girişinden ısıtılmış uzunluk, \dot{m} :kanal boyunca kütle akış debisi, c_p :özellik ısı.

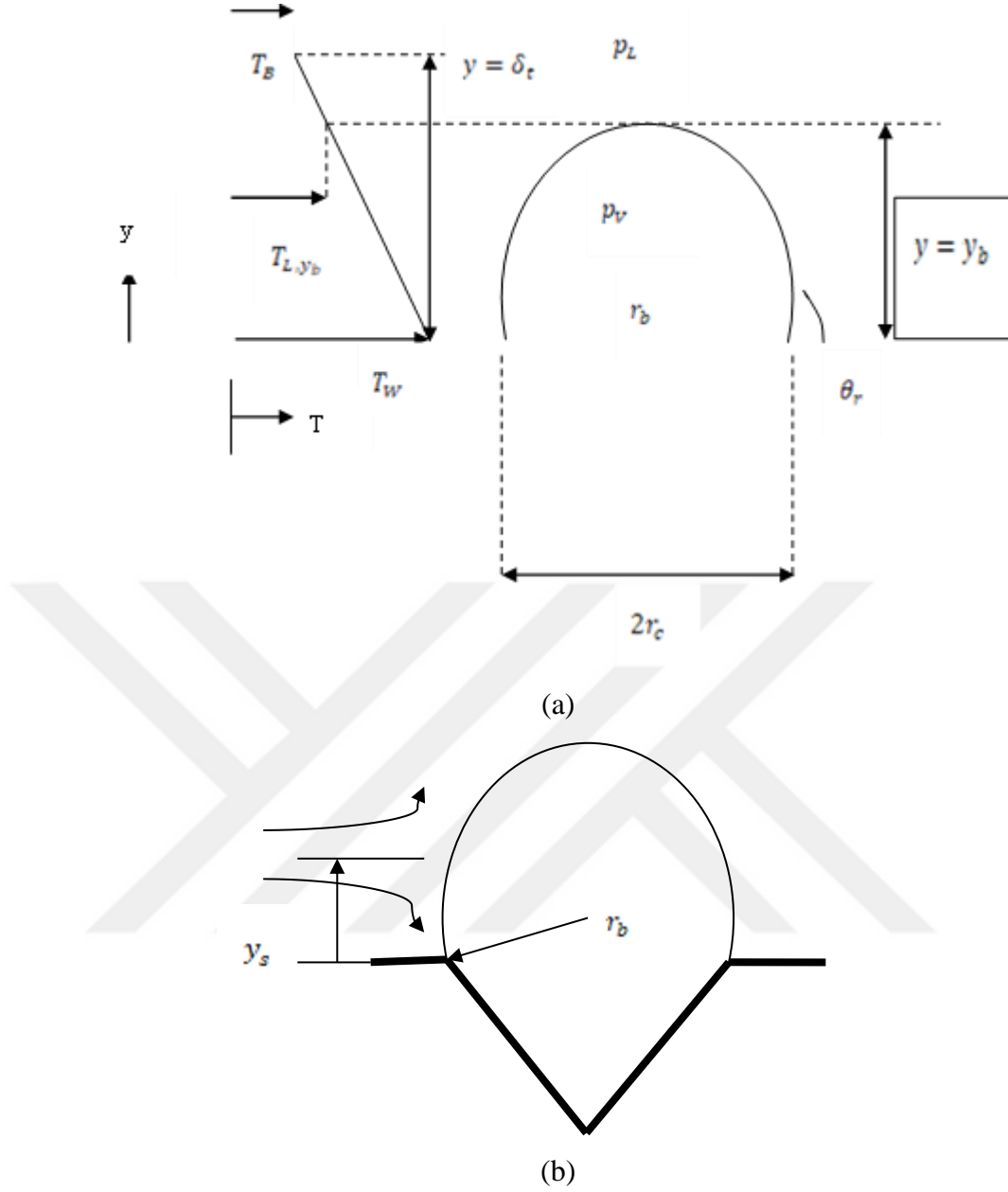
Akış yönü doğrultusunda yüzey sıcaklığı ($T_{W,z}$), yerel ısı taşınım katsayısı (h_z) boyunca lokal kütlenin sıvı sıcaklığı ile ilgilidir.

$$T_{W,z} = T_{B,z} + \frac{q''}{h_z} \quad (4.2)$$

Yerel ısı taşınım katsayısı h_z , dir. Formülasyondaki karmaşıklık göz önüne alındığında (dikdörtgen kanallarda köşe etkileri, paralel kanallarda akışkanın eşit dağılmaması, yerel koşullardaki değişiklikler vb.) tam gelişmiş akış koşulları için denklemler kullanılır.

Isıtıcı yüzeyindeki küçük boşluklar buharı veya gazları hapseder ve çekirdeklenme görevi görür. Yüzey sıcaklığı doyma sıcaklığını aştığında, boşluğun içinde bir kabarcık oluşabilir. Dış sıvı p_L ve iç buhar p_V arasındaki basınçlar arasındaki farktan kaynaklanan kuvvet, yüzey gerilimi kuvvetleri ile dengelenir. Bir kabarcık çapı boyunca düzlemden geçen bir kuvvet dengesi aşağıdaki denklemi verir:

$$(p_V - p_L) = \frac{2\sigma}{r_b} \quad (4.3)$$



Şekil 4.2. (a) Kabarcık çekirdeğinin etrafındaki sıcaklık ve basıncı (b) akıştaki bir kabarcığın önünde durma noktasının şematik gösterimi (Kandlikar ve ark. 1997).

σ : yüzey gerilimi ve r_b : kabarcık yarıçapı. Kabarcığın çekirdeklenip çekirdeklenemeyeceği ve boşluğun bir çekirdeklenme bölgesi olarak etki edip edemeyeceği, kabarcığın çevresindeki yerel sıcaklık alanına bağlıdır. Sıvıdaki yerel sıcaklık, $y = \delta_t$ kalınlığında bir sıvı alt katmanındaki lineer bir sıcaklık gradyanının duvardaki sıcaklıktan dökme sıvıdaki sıcaklığa kadar varsayılarak değerlendirilir. Eşdeğer iletkenlik ve taşınım denklemlerinden elde edilen ısı taşınım katsayılarını eşitleyerek, kalınlığı δ_t ile verilir:

$$\delta_t = \frac{k_L}{h} \quad (4.4)$$

burada k_L sıvının ısı iletimidir ve h çekirdeklenmenin öncesinde sıvıda tek fazlı ısı taşınım katsayısıdır.

Belirli bir konumda , $y = y_b$ 'noktasındaki sıvı sıcaklığı, doğrusal denklemden elde edilir.

$$T_{L,y_b} = T_W - \left(\frac{y_b}{\delta_t}\right) (T_W - T_B) \quad (4.5)$$

T_{L,y_b} : $y = y_b$ 'deki sıvı sıcaklığı ve T_W : duvar sıcaklığı. Arayüz eğrilığının doyma sıcaklığındaki değişime olan etkisinin ihmal edilmesi ve Clausius-Clapeyron denklemini, $d_p/d_T = h_{LV}/[T_{sat}(v_v - v_L)]$ 'ni basınç farkını doyma sıcaklıklarındaki karşılık gelen farkla ilişkilendirmek için, bir buhar kabarcığını devamı için gereken sıcaklık şu şekilde verilir:

$$(p_V - p_L) = \frac{[T_{L,sat}(p_V) - T_{sat}]h_{LV}}{T_{sat}(v_V - v_L)} \quad (4.6)$$

$T_{L,sat}(p_v)$; p_v basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığı, T_{sat} ; p_L sistem basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığı, h_{LV} : p_L 'de buharlaşma gizli ısı, v_v ve v_L : buhar ve sıvı özgül hacimleri. denklemleri birleştirirsek ve , $v_v \gg v_L$: varsayarsak, şunları elde ederiz:

$$T_{L,sat}(p_V) = T_{sat} + \frac{2\sigma}{r_b} \frac{T_{sat}}{\rho_V h_{LV}} \quad (4.7)$$

Çekirdeklenme şartı olarak T_{L,y_b} ; $T_{L,sat}(p_V)$ 'den büyük olmalıdır, bu denklem (4.5) tarafından verilen buhar kabarcığını korumak için sıvı-buhar ara-yüzünde herhangi bir noktada gereken minimum sıcaklığı temsil eder. (4.5) ve (4.7) eşitlikleri birleştirilirse, belirli yarıçaplardaki çekirdeklenme boşlukları için şu koşulu verir:

$$\left(\frac{y_b}{\delta_t}\right) (T_W - T_B) - (T_W - T_{sat}) + \frac{2\sigma}{r_b} \frac{T_{sat}}{\rho_V h_{LV}} = 0 \quad (4.8)$$

Aşırı soğutma ve duvar aşırı kızdırma aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Delta T_{Sub} = T_{sat} - T_B \quad (4.9)$$

$$\Delta T_{Sat} = T_W - T_{sat} \quad (4.10)$$

Kabarcık yarıçapı r_b ve yükseklik y_b , aşağıda belirtilen temas açısı θ_r boyunca ağız yarıçapı r_c ile ilgilidir:

$$r_b = \frac{r_c}{\sin\theta_r} \quad (4.11)$$

$$y_b = r_b(1 + \cos\theta_r) = \frac{r_c(1 + \cos\theta_r)}{\sin\theta_r} \quad (4.12)$$

(4.11) ve (4.12) Denklemlerinin (4.8)'de yerine konarak, ve elde edilen ikinci dereceden denklemin çözümü r_c için, aşağıdakiler tarafından verilen çekirdeklenme boşluklarının aralığını elde etmiştir:

$$\{r_{c,min}, r_{c,max}\} = \frac{\delta_t \sin\theta_r}{2(1 + \cos\theta_r)} \left(\frac{\Delta T_{Sat}}{\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub}} \right) \times \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\sigma T_{Sat}(\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub})(1 + \cos\theta_r)}{\rho_V h_{LV} \delta_t \Delta T_{Sat}^2}} \right) \quad (4.13)$$

Minimum ve maksimum boşluk yarıçapı $r_{c,min}$ ve $r_{c,max}$, sırasıyla Eşitlik (4.13)'deki radikalın negatif ve pozitif işaretlerinden elde edilir.

Farklı araştırmacılar, kabarcık yarıçapını, boşluk yarıçapı ve sıvı sıcaklığın T_L tespit edildiği konumla ilişkilendirmek için farklı modeller kullandılar. Hsu (1962), $\theta_r = 53.1^\circ$ temas açısına etkili bir şekilde çeviren $y_b = 1.6r_b$ olduğunu varsaymıştır. Bu değeri denklemlere koyarak (4.13), Hsu'nun ölçütünden kaynaklanan boşluklardan oluşan aralık şöyledir:

$$\{r_{c,min}, r_{c,max}\} = \frac{\delta_t}{4} \left(\frac{\Delta T_{Sat}}{\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub}} \right) \times \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{12.8\sigma T_{Sat}(\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub})}{\rho_V h_{LV} \delta_t \Delta T_{Sat}^2}} \right) \quad (4.14)$$

Bergles ve Rohsenow (1964) ve Sato ve Matsumura (1964) çekirdeklenme başlangıcında $y_b = r_b = r_c$ ile yarım küre şeklindeki bir kabarcıklı düşündüler. Ortaya çıkan çekirdeklenme boşlukları aralığı:

$$\{r_{c,min}, r_{c,max}\} = \frac{\delta_t}{2} \left(\frac{\Delta T_{Sat}}{\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub}} \right) \times \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\sigma T_{Sat}(\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub})}{\rho_V h_{LV} \delta_t \Delta T_{Sat}^2}} \right) \quad (4.15)$$

Kandlikar ve diğ. (1997), bir balonun etrafındaki akışı analiz etmiş ve kabarcık tabanından belli bir mesafede y_s durgunluk noktasının meydana geldiğini bulmuştur. 20–60° aralığında uzaklaşan temas açıları için durgunluk noktasının konumu aşağıdakiler tarafından verilmiştir:

$$y_s = 1.1r_b = 1.1 \left(\frac{r_c}{\sin\theta_r} \right) \quad (4.16)$$

Bu konumda duvardan uzağa giden bir akış çizgisi, kabarcığın üzerinde, $y = y_s$ 'deki sıcaklık, $y = y_b$ 'deki sıvı sıcaklığı olarak alınmıştır. Elde edilen çekirdeklenme boşlukları aralığı aşağıdaki gibi verilir:

$$\begin{aligned} \{r_{c,min}, r_{c,max}\} &= \frac{\delta_t \sin\theta_r}{2.2} \left(\frac{\Delta T_{Sat}}{\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub}} \right) \\ &\times \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{8.8\sigma T_{Sat}(\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub})}{\rho_V h_{LV} \delta_t \Delta T_{Sat}^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Çekirdekli kaynamanın (ONB) başlangıcı akış kaynamada özellikle ilgi çekmektedir. Çekirdeklenecek ilk boşluğun yarıçapı r_c (eğer varsa) Eşitlik (4.17) 'daki terimin sifıra eşitlenmesiyle elde edilir:

$$r_{c,crit} = \frac{\delta_t \sin\theta_r}{2.2} \left(\frac{\Delta T_{Sat}}{\Delta T_{Sat} + \Delta T_{Sub}} \right) \quad (4.18)$$

Belirli bir ısı akısı için, duvar ONB'de kızarır, $\Delta T_{Sat,ONB}$ tarafından verilir:

$$\Delta T_{Sat,ONB} = \sqrt{8.8\sigma T_{Sat} \left(\frac{q''}{\rho_V h_{LV} k_L} \right)} \quad (4.19)$$

Verilen bir bölümdeki yerel duvar süper ısısı Denklem (4.19) verilenlerden daha düşükse, çekirdeklenme gerçekleşmez. ONB'deki yerel alt soğutma, aşağıdaki denklemden belirlenebilir:

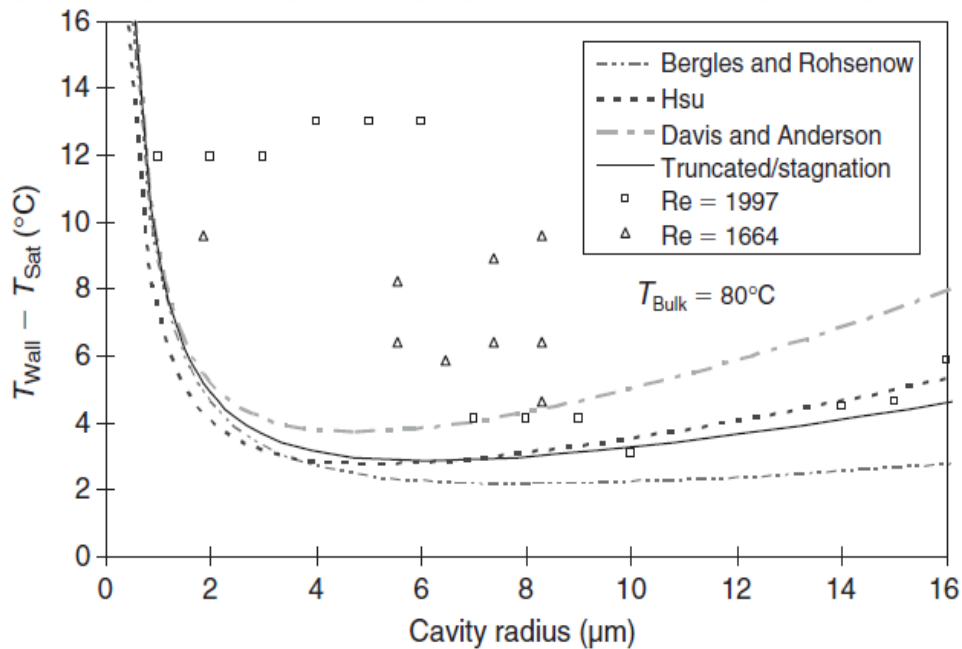
$$\Delta T_{Sub,ONB} = \frac{q''}{h} - \Delta T_{Sat,ONB} \quad (4.20)$$

Aşırı soğutulmuş sıvının girdiği bir kanalda, çekirdeklenme olayının meydana geldiği bölgedeki yerel aşırı soğutma, Denklem (4.20) tarafından verilmektedir. Eğer alt soğutma negatifse, yerel sıvının aşırı kızdırıldığı ve aşırı yüksek kabarcık büyüme

oranlarına neden olacağı anlamına gelir. Daha sonra, bu gibi yüksek oranların, ciddi basınç düşümü dalgalanmalarına yol açan ters akıma yol açtığı gösterilecektir.

Şekil 4.3 farklı çekirdeklenme modellerinin Kandlikar ve ark. (1997) deneysel verileriyle karşılaştırılmasını göstermektedir. Çekirdeklenme aktivitesini görselleştirmek ve altta yatan boşluk boyutlarını ölçmek için yüksek güçlü bir mikroskop ve yüksek hızlı kamera kullanıldı. Boşluklar büyük ölçüde dikdörtgen şeklindedir ve boşluğun yarıçapının belirlenmesinde açıklığın daha büyük tarafı kullanılmıştır. Boşluklar belirli bir minimum duvar süper ısısında çekirdeklenir ve daha yüksek duvar süper ısınmalarında çekirdeklenmeye devam eder. Şekil 3'de gösterilen veri noktalarının çoğu, çekirdeklenme için gereken minimumdan daha yüksek duvar süper ısısı değerlerine karşılık gelir. Tüm veri noktalarının Eşitlik (4.15) tarafından verilen kriterlere çok yakın ya da üstüne düştüğü görülmüştür.

Şekil 4.3 de görüldüğü gibi, Davis ve Anderson ölçütü, daha büyük çaplı oyuklar için daha yüksek duvar süper sıcaklıkları öngörürken, Bergles ve Rohsenow'un ölçütü, daha büyük oyukların daha düşük duvar süper sıcaklıklarında çekirdeklemesine izin verir ve Hsu'in tahminleri de verilere oldukça yakındır. Kandlikar ve ark. (1997) ölçütü temas açısı etkisini içermektedir.



Şekil 4.3. 3 x 40 mm kanalında 1 atm basınçta su ile alınır deneysel verileriyle farklı çekirdeklenme kriterleri karşılaştırması, Kandlikar ve ark. (1997) tarafından kesilmiş / durgunluk modeli.

Yukarıdaki analiz, ısıtıcı yüzeyindeki her boyuttaki oyukların kullanılabilirliğini varsayar. Yarıçapı $r_{c,crit}$ boşlukları mevcut değilse, mevcut boşluklar üzerinde çekirdeklenmeyi başlatmak için daha yüksek aşırı ısıtmalar gerekebilir. Şekil 4.2'de çizilen çekirdeklenme kriterleri, spesifik yarıçaplı oyukların aktif hale getirilmesi için gerekli olan aşırı ısıtmayı belirtir. Alternatif olarak, Denklemler (4.4) ve (4.11) ile birlikte Denklem (4.8), belirli bir boşlukta çekirdeklenmeyi başlatmak için gereken yerel koşulları belirlemek için kullanılabilir. Belirli bir yarıçap yarıçapı r_c boşluğunun çekirdeklenmesi için gerekli olan duvar aşırı ısınması için ortaya çıkan denklem şu şekilde verilir:

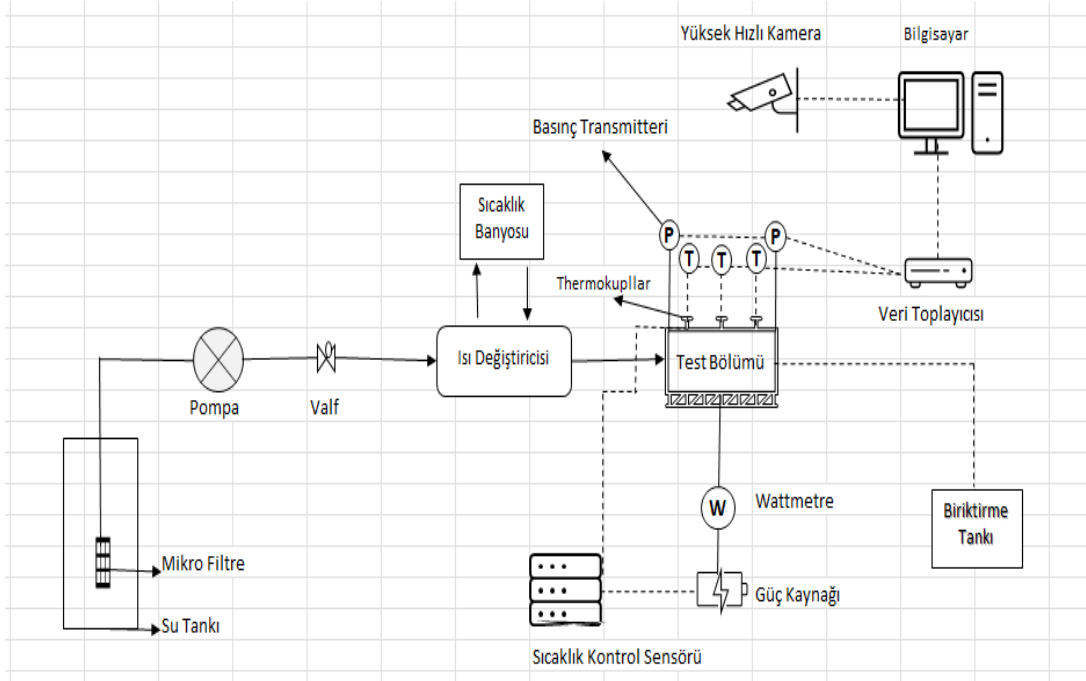
$$\Delta T_{Sat}|_{ONB \text{ at } r_c} = \frac{1.1r_c q''}{k_L \sin \theta_r} + \frac{2\sigma \sin \theta_r}{r_c} \frac{T_{Sat}}{\rho_V h_{LV}} \quad (4.21)$$

Eşitlik (4.21) 'de kullanılan boşluk büyüklüğü, Eşitlik (4.21) verilen kritere göre r_c 'den daha küçük veya daha büyük olabilir. Mevcut oyuklar arasında, en küçük kızma gereksinimine oyuk ilk önce çekirdeklenecektir. Denklem (4.20), belirli bir ısı akısı için çekirdeklenme noktasında lokal kütle sıcaklığını bulmak için kullanılabilir. Yine, eğer yerel aşırı soğutma negatifse, bu durumda dökme sıvının aşırı ısıtıldığı ve daha sonra tartışılacağı gibi ciddi dengesizliklere yol açacağı anlamına gelir.

Yukarıdaki çekirdeklenme kriterlerinin mikro kanallara uygulanabilirliği tartışmaya açıktır.

5. ISI ALICILARININ AKIŞ KAYNAMA DENEYLERİ VE TEORİSİ

Kaynama akışı çalışmalarının yapıldığı deney tesisatının Şematik resmi şekil5.1 de verilmiştir. Deneylerde akışkan olarak deiyonize su kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan cihaz ve sensörler tablo 5.1 de belirtilmiştir. Su tankında depolanmış akışkan önce mikro filtreden geçirilerek ayarlanan debide Gilson marka pompa ile 60-110 ml/dk debi aralığında ayarlanarak test bölümüne iletilebilmektedir. Akışkanın filtreden geçirilme nedeni sistemdeki herhangi bir ekipmanın zarar görmemesidir. Deneyler boyunca akışkan giriş sıcaklığı sabit sıcaklık banyosu ile 80 0C ye sabitlenmiştir. Giriş sıcaklığı test boyunca mikrokanal girişinde elimko firmasından temin edilen K tipi termokupl ile ölçülerek sabit sıcaklık banyosunun doğruluğu kanıtlanmıştır. Tüm deneyler boyunca mikrokanal test bölümünün giriş ve çıkışına yerleştirilen bağlantı elemanlarına sabitlenen termokupl ve basınç transmitterleri ile ölçümler alınmış ve Personel daq3000 model veri toplayıcısı ile bu veriler anlık olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Deneylerde basınç transmitteri olarak 0-1 bar aralığından yüksek hassasiyetli Keller marka basınç transmitteri kullanılmıştır. Giriş ve çıkış sıcaklıkları ile duvar sıcaklıkları Elimko Marka K tipi termokupl ile ölçülmüştür. Test bölümü, her biri 100 W kapasiteli maksimum 4 adet kartuj ısıtıcı yerleştirilebilen bir bakır blok ile ısıtılmıştır. Toplam gücünün 400 W'a ulaşabileceği ısıtıcıların gücü bir güç kaynağı ile düzenlenmiştir ve tam giriş gücü bir dijital wattmetre ile düzenli olarak kontrol edilmiştir. Sistemin güvenlik kontrolü için sıcaklık kontrollü sensör tasarlanmıştır. Bu sensörler belirlenen duvar sıcaklığı aşıldığında devreye girerek, kartuj ısıtıcılara verilen gücü kesmiştir, aşırı ısınma ve iş güvenliği bu şekilde sağlanmıştır. Böylece kaynama akışı için yapılan deneyler güvenli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneylerin doğruluğu için ölçümler en az üç kere tekrarlanmıştır ve veri toplayıcısı vasıtasıyla bilgisayara anlık olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.1. Deney düzeneği şeması

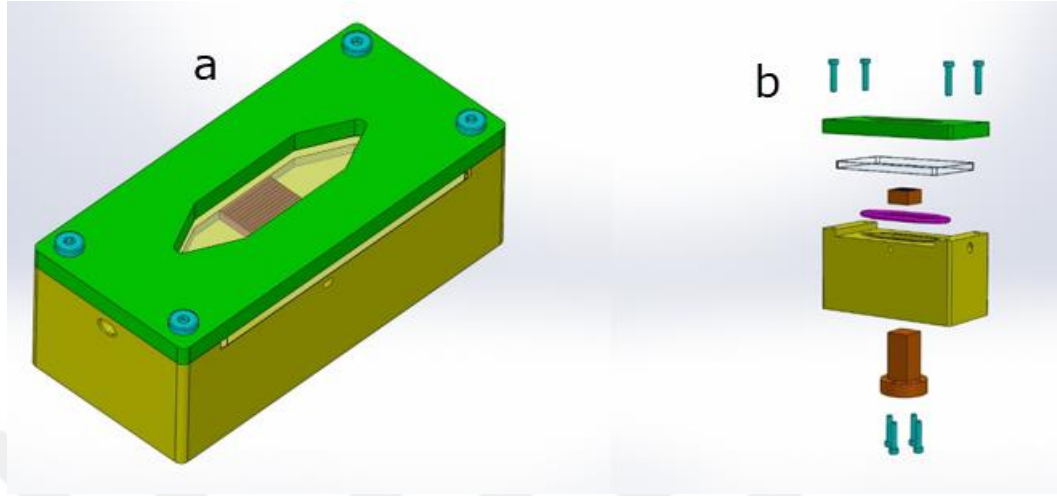
Tablo 5.1. Deney tesisatında kullanılan cihaz ve sensör listesi

Cihaz/ Sensör	Marka/Model
Pompa	Gilson 305
Filtre	Xiongchuan
Sıcaklık Banyosu	Cole-Parmer
Basınç Transmitteri	Keller
K tipi Termokupullar	Elimko
Güç Kaynağı	GW INSTEK
Veri Toplayıcısı	Personel Daq/3000
Yüksek Hızlı Kamera	Panasonic GH6
Lensler	Laowa Macro Probe Cine

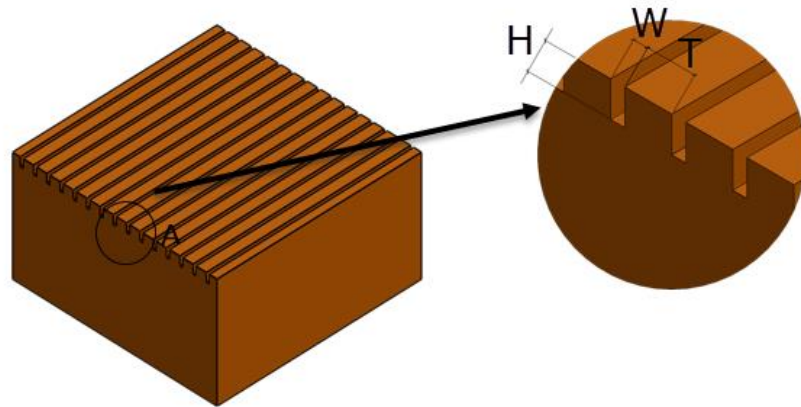
5.1. Test Bölgesi

Şekil 5.2. de, test bölgesi paslanmaz çelik blok, alt kısmında kartuş ısıtıcı yuvalarının yer aldığı bakır blok, bu blok içerisine yerleştirilmiş kartuş ısıtıcılar, mikrokanallı ısı alıcısı, şeffaf üst kapak, oring ve saplama-somun takımlarından oluşmaktadır. Mikrokanallı ısı alıcısının sızdırmazlığını sağlayabilmek için sıkı geçme ile paslanmaz çelik bloğa yerleştirilmiştir ve alt kısmından bakır bloğa teması sağlanmıştır. Akışın görüntülenebilmesi için üst kısmına şeffaf plaka kullanılmış ve sızdırmazlığı sağlamak için saplama-somun takımları ile paslanmaz çelik plakaya sabitlenmiştir. Mikrokanallı ısı alıcısına giren ve çıkan akışkanın sızdırmazlığını sayılabilmek için paslanmaz

çelik bloğa oring kanalı açılarak, belirlenen ölçüde özel oring üretilirerek bu kanala yerleştirilmiştir. Çelik bloğun giriş ve çıkışının yanı sıra duvar sıcaklığı ölçmek için mikrokannallı ısı alıcısına temas etmekte olan termokupllar yer almıştır.



Şekil 5.2. a. Test Bölümü b. Montaj



Şekil 5.3. Katı model ve kesiti

Tablo 5.2. Deneysel olarak ölçülen değerler

Deneysel Ölçülen Değerler	Birim
Giriş Sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$
Çıkış Sıcaklığı	$^{\circ}\text{C}$
Duvar Sıcaklıkları	$^{\circ}\text{C}$
Basınç	bar
Debi	ml
Uygulanan güç	Watt

5.2. Belirsizlik Analizi

Deneysel ölçümlerin doğruluğu ve düzgün yorumlanabilmesi için deneysel belirsizlik hesabı büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada deneysel belirsizlikler hesaplanırken Kline ve McClintock (1953) tarafından sunulan yöntem kullanılmıştır. Termokupl ile ölçülen sıcaklık ölçümünün standart belirsizliği $\pm\%1,2$, basınç transmitterinden okunan basınç değerinin standart belirsizliği $\pm\%1,5$, pompadan okunan hacimsel debinin standart belirsizliği, $\pm\%0,5$ ve kartuj ısıtıcıların yaydığı ısıl gücün okunduğu Watmetrenin standart belirsizliği $\pm\%0,3$ olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerden kaynaklanan ve hesaplanan değerler için yapılan belirsizlik hesaplamaları sonucu Tabloda belirtilmiştir.

Tablo 5.3. Belirsizlik değerleri

Hesaplanan değerler	Belirsizlik Değeri ($\pm\%$)
Isı taşınım katsayısı (h)	15,9
Isı alıcısı alanı	2,25
Kuruluk derecesi	5,4
Isı akısı	1.2

5.3. Hesaplamalarda Kullanılan Bağntı ve Denklemler

Kütle akısı denklem (5.1) ile hesaplanmıştır. Burada \dot{V} hacimsel debi, ρ_L sıvı yoğunluğu, N kanal sayısı ve A_k ise kesit alanıdır. Bu bölümde kullanılan denklemler Markal, (2016) referans alınarak düzenlenmiştir.

$$G = \frac{\dot{V}\rho_L}{NA_k} \quad (5.1)$$

Test düzeneğinde ısı alıcılarının altına yerleştirilen ısıtıcı kartuştan gelen ısıl güç, \dot{q} olmak üzere, akışkana geçen etkin ısı akısı \dot{q}_e ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir. \dot{q}_k sistemde meydana gelen ısı kaybı, A_t ise ısı alıcısının taban alanıdır. Isı kaybı hesabı yapılarak deneyler boyunca oluşan ısı kaybı belirlenerek mevcut ısıdan çıkarılarak net ısı değerine ulaşıldı.

$$\dot{q}_e = \frac{q - \dot{q}_k}{A_t} \quad (5.2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada; k_b , bakırın ısı iletim katsayısı, l_h , ısı alıcı tabanı ile kanal dibi arasındaki uzaklık, $T_{taban,n}$ ise ilgili termo elemandan okunan sıcaklık değeridir.

Isı alıcısında yerel duvar yüzeyi sıcaklığı hesaplanabilmesi için bir boyutlu ısı iletimi kabulü yapılarak aşağıdaki denklem kullanılmıştır. Burada k bakır bloğun ısı iletim katsayısı, l ise sıcaklık değerini okunduğu termokupla uzaklığıdır. Isı alıcısı boyunca yerel duvar sıcaklığı;

$$T_{Dn} = T_{1,n} - \dot{q}_e \frac{l}{k} \quad (5.3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada; k , bakırın ısı iletim katsayısı, l , ısı alıcı tabanı ile kanal dibi arasındaki uzaklık, $T_{1,n}$ ise ilgili termo elemandan okunan sıcaklık değeridir. Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen numunelerin ısı iletim katsayılarının ölçülerek belirlenecektir.

Duvar ısı akısı denklem 4 yardımıyla hesaplanabilir. Buradaki A_{tt} mikrokanalların toplam ısı alanını ifade eder.

$$\dot{q}_D = \frac{\dot{q} - \dot{q}_k}{A_{tt}} \quad (5.4)$$

A_{tt} mikrokanalların toplam ısı alanı denklem 5 yardımıyla hesaplanabilir. Burada H_K mikrokanallı ısı alıcısının yüksekliği, W_K ise mikrokanallı ısı alıcısının genişliğidir. N ısı alıcısında mevcut mikrokanal sayısıdır. L ise kanal uzunluğunu ifade eder.

$$A_{tt} = NL(2H_K + W_K) \quad (5.5)$$

Deney tesisatında da belirtildiği gibi mikrokanallı ısı alıcıların üst bölümü şeffaf levha ile kapatılmıştır. Levhanın ısı iletim katsayısı düşüktür. Kanatçık ucundan olan ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu durumda adyabatik uçlu kanat yaklaşımı kullanılarak, kanatçık verimi (η_k) ve toplam yüzey verimi (η_t) aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir. (Markal, 2016).

$$\eta_K = \frac{\tanh mH_K}{mH_K} \quad (5.6)$$

$$\eta_T = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_K) \quad (5.7)$$

Denklem [5.7] deki A_f kanatçık yüzey alanını ifade etmektedir. Denklem [5.8] yardımıyla kanatçık parametresini ifade eden m Eşitliği hesaplanabilir. Denklem [5.8] deki w_f kanatçık genişliğini simgeler.

$$m = \sqrt{\left(\frac{h_{tp}}{k_a w_f}\right)} \quad (5.8)$$

Akış kaynamasında ısı taşınım katsayısı denklem [9] yardımıyla hesaplanır. Burada, $T_{sat,n}$ yerel doyma sıcaklığını belirtir.

$$h = \frac{q_D}{\eta_0(T_{D,n} - T_{sat,n})} \quad (5.9)$$

Çalışmamızda akışkan olarak deiyonize su kullanılacaktır. Akışkan doyma sıcaklığına yakın bir değere sabit sıcaklık banyosu ile hazırlanacaktır. Isı alıcısının girişi ile çıkışı arasında basınç düşümü bir basınç transmitteri ile ölçülecektir. Ölçülen basınç farkı, giriş ve çıkışındaki yerel kayıplar ile sürtünme kaybının toplamını kapsamaktadır. Ayrıca akışkan tek fazlı olarak girecek, ısıl gücün etkisi ile akış kaynamasına geçecektir. Bu nedenle oluşacak basınç düşümü hem tek fazlı ve hem de çift fazlı akışın varlığı göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Kaynama akış bölgesinin başlangıç noktasında basınç, mikrokanal girişindeki basınç değerinden tek fazlı bölge boyunca oluşan basınç kaybının çıkarılmasıyla elde edilir. Denklem 10 yardımıyla Tek fazlı bölgedeki basınç düşümü hesaplanabilir (Markal, 2016).

$$\Delta P_{sp} = \frac{2f_{sp}G^2L_{sp}V_L}{D_h} \quad (5.10)$$

Denklem 11 de f_{sp} ile belirtilen Fanning sürtünme katsayısı olup Shah ve London tarafından tek fazlı akış için önerilmiştir. Burdaki β isemikrokanallı ısı alıcısının 0 ile 1 arasında olacak şekilde yükseklik/genişlik ya da oranını ifade etmektedir.

$$f_{sp}Re_{sp} = 24(1 - 1.355\beta + 1.947\beta^2 - 1.701\beta^3 + 0.956\beta^4 - 0.254\beta^5) \quad (5.11)$$

Resp tek fazlı akıştaki Reynolds sayısıdır ve denklem 12 ile hesaplanabilir.

$$Re_{sp} = \frac{GD_h}{\mu_{sp}} \quad (5.12)$$

Mikrokanallardaki kanallardaki akışkan iki bölüme ayrılabilir: tek ve çift fazlı olarak. Kuruluk derecesinin $x_e = 0$ olduğu yani tek fazlı bölge uzunluğu aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir: (Markal, 2016).

$$L_{sp} = \frac{\dot{m}C_{p,L}(T_{sat,0} - T_1)}{q_{eff}W_t} \quad (5.13)$$

$$P_{w,x_e=0} = P_{ch,i} - \Delta P_{sp} \quad (5.14)$$

Denklem deki kuruluk derecesinin sıfır alındığı dolayısıyla tek fazlı bölgenin uzunluğu, mikrokanallı ısı alıcısı çıkışındaki basınç dönüşümü, akış kaynama bölgesindeki herhangi bir noktaya karşılık gelen yerel basınç ve doyma sıcaklığı

değerleri lineer interpolasyon yardımıyla hesaplandı, benzer yaklaşımı [Markal, Ateş, Mirmanto, 2014; Mahmoud vd.,2014; Qu ve Siu-Ho, 2009] kullanmıştır.

$$P_{w.n} = P_{w.xe=0} - \left(\frac{P_{w.xe=0} - P_{ch.o}}{L - L_{sp}} \right) (L_n - L_{sp}) \quad (5.15)$$

Eşitlik 5.16 yardımıyla kaynama akışındaki yerel kuruluk derecesi hesaplanabilir:

$$x_{e.n} = \frac{(\dot{q}_w A_t L_n - \dot{m} C_{p,L} (T_{sat.n} - T_i))}{\dot{m} i_{lv}} \quad (5.16)$$

Mikrokannallı ısı alıcısı çıkışındaki kuruluk derecesi eşitlik 5.17 yardımıyla hesaplanabilir:

$$x_{e.o} = \frac{(\dot{q}_w A_t - \dot{m} C_{p,L} (T_{sat.o} - T_i))}{\dot{m} i_{lv}} \quad (5.17)$$

5.3.1. Basınç düşümü

Deneysel ölçümler boyunca mikrokannallı ısı alıcısının giriş ve çıkış bölümündeki basınçlar, basınç transmitteri vasıtasıyla ölçülmüştür. Buradaki P_i giriş basıncını, P_0 ise çıkış basıncını ifade eder.

$$\Delta P_{MT} = P_i - P_0 \quad (5.18)$$

Mikrokannallı ısı alıcısının boyutları nedeniyle akışkan girişte kesit daralması çıkışta kesit genişlemesine maruz kalmaktadır.

$$P_{ch.i} = P_i - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}) \quad (5.19)$$

Denklem 5.22 ve 5.23 de sırasıyla K_{c1} ve K_{c2} kesit daralmasını ifade eder ve denklem 5.22 ve 5.23 ile hesap edilebilmektedir: (Markal, 2016).

$$\Delta P_{c1} = \frac{V_{L.i}}{2} (G_{P2.i}^2 - G_{P1.i}^2) + \frac{K_{c1} V_{L.i}}{2} G_{P2.i}^2 \quad (5.20)$$

$$\Delta P_{c2} = \frac{V_{L.i}}{2} (G^2 - G_{P2.i}^2) + \frac{K_{c2} V_{L.i}}{2} G^2 \quad (5.21)$$

$$K_{c1} = 0.64740 + 1.2501\beta_2 + 0.3417\beta_2^2 - 0.8358\beta_2^3 \quad (5.22)$$

$$K_{c2} = 0.64740 + 1.2501\beta + 0.3417\beta^2 - 0.8358\beta^3 \quad (5.23)$$

24 ve 25 numaralarıyla verilmiş olan eşitliklerde; WP2 ve HP2, sırasıyla, küçük haznenin genişliği ve yüksekliğini; Hch ve Wch, tek bir mikrokannalın yüksekliği (derinliği) ve genişliğini temsil etmektedir.

$$\beta_{P2} = \frac{H_{P2}}{W_{P2}} \quad (5.24)$$

$$\beta = \frac{W_{ch}}{H_{ch}} \quad \text{or} \quad \frac{H_{ch}}{W_{ch}} 0 < \beta < \quad (5.25)$$

Mikrokanalın çıkışında oluşan basınç değeri benzer yaklaşım kullanılarak eşitlik [27] ile hesaplanabilir:

$$P_{ch,0} = P_0 + \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} \quad (5.26)$$

çıkış bölümünde mikrokanallarda genişleme ve daralmalardan meydana gelen basınç kazanımları denklem 5.29 ve 5.30 vasıtasıyla hesaplanabilir:

$$\Delta P_{e2} = \frac{V_{L,0} + X_{e,0} V_{Lg,0}}{2} (G_{p2,0}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} (V_{L,0} + X_{e,0} V_{Lg,0})}{2} G^2 \quad (5.27)$$

$$\Delta P_{e1} = \frac{V_{L,0} + X_{e,0} V_{Lg,0}}{2} (G_{p1,0}^2 - G_{P2,0}^2) + \frac{K_{e1} (V_{L,0} + X_{e,0} V_{Lg,0})}{2} G_{P2,0}^2 \quad (5.28)$$

$$K_{e2} = \left(1 - \frac{NA_{ch}}{A_{p2}}\right)^2 \quad (5.29)$$

$$K_{e1} = \left(1 - \frac{A_{p2}}{A_{p1}}\right)^2 \quad (5.30)$$

Eşitlik 5.29 ve 5.30 ile kesit genişlemesi kazanım katsayıları verilmektedir. Kesit daralması basınç kayıpları ile kesit genişlemesi basınç kazanımlarının belirlenmesine yönelik bu tür yaklaşımlar, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Qu ve Siu-Ho, 2009; Lee and Garimella, 2008; Qu vd., 2006; Qu ve Mudawar, 2003; Collier and Thome, 1994; Blevins, 1984, Markal 2016.)

Literatürde akış kaynaması için çalışmamıza yakın ve benzer yöntemler kullanılarak oluşturulmuş bağıntılar aşağıda verilmiştir. Bu bağıntılar deneysel olarak bulduğumuz değerlerle hesaplanarak, karşılaştırılmalı olarak bölüm 6 da verilmiştir.

Tablo 5.4. Kaynama akışı için literatürde bulunan çalışmamıza yakın bağıntılar

Referans	Bağıntı
Papell (1963)	$h_{tp}=h_{sp} [90 Bo^{0.7}Ja-0.54(\rho_g/\rho_f)^{0.056}]$
Badiuzzaman (1967)	$h_{tp}=h_{sp}$ $[178Bo^{0.75}Ja^{-0.9}(\rho_g/\rho_f)^{-0.06}(\Delta T_{sub}/T_{sat})^{0.45}]$
Shah (1976)	$h_{tp}=h_{sp}[230Bo^{0.5}\Delta T_{sat}/(T_W - T_f)]$
Tran (1996)	$h_{tp} = 8.4 \times 10^5 (Bo^2 We_{fo})^{0.3} \frac{\rho_l^{-0.4}}{\rho_g}$
Kandlikar (1998)	$h_{tp}=h_{sp}[1058Bo^{0.7}\Delta T_{sat}/(T_W - T_f)]$
Yu et al. (2002)	$h_{tp} = 6.4 \times 10^5 (Bo^2 We_{fo})^{0.27} \frac{\rho_l^{-0.2}}{\rho_g}$
Sun and Mishima (2009)	$h_{tp} = \frac{6Re_{fo}^{1.05}Bo^{0.54}}{(We_{fo}^{0.191})^{0.3}(\frac{\rho_l}{\rho_g})^{0.142}} \frac{k_f}{D_e}$
Li and Wu (2010)	$h_{tp} = 334Bo^{0.3}(Re_f^{0.36}Bd)\frac{k_l}{D_e}$
Wang (2012)	$h_{tp} = 5.32N_{conf}^{-0.187}Bo^{0.2619}Re^{0.5266}(p/p_{cr})^{0.4035}\frac{k_f}{D_e}$
Li and Jia (2015)	$h_{tp}=277.3Bo^{0.978}Re_{ls}^{0.94}(1-x)^{0.47}\frac{k_l}{D_h}$
Z. Rui et al. (2023)	$h_{tp} = 0.02582Bo^{-4.85}Re^{-0.94}(1-x)^{-1.57}$



6. AKIŞ KAYNAMASI DENEYSEL SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, mikrokanallarda katı yüzey termofiziksel özelliklerinin akış kaynamasındaki ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisi üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Çalışma kapsamında toz metalurjisi prensibiyle ürettiğimiz sekiz farklı gözenekliğe sahip mikrokanallı ısı alıcısında ısı ve akış deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan hesaplama alanı, ortalama hidrolik çapı kullanılan kare bir akışkan alanından ve akışkan alanının alt tarafı ile temas halinde olan kare bir katı alandan oluşur. Katı alan, sabit bir ısı akısı uygulanarak alt sınırında ısıtılmıştır. Deneyler gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak yüksek hızlı kamera ile görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler ile akış görselleştirilmesi sağlanmıştır Gerçekleştirilen tüm deney verilerini sunmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle karakteristik ve özgün bulunan deneysel sonuçlar hem birbirleriyle hem de geleneksel bağıntı ve literatür çalışmaları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Bu çalışma akış kaynaması için literatürde mevcut olan bağıntıların çoğunda göz ardı edilen, katı malzemenin gözenegi, ısı kapasitesi ve ısıl iletkenliği gibi kullanılan yüzeylerin önemli termofiziksel özelliklerini dikkate alması yönünden önemlidir.

Deneysel sonuçları sunarken alt bölümlere ayrılarak en verimli şekilde açıklanması hedeflenmiştir.

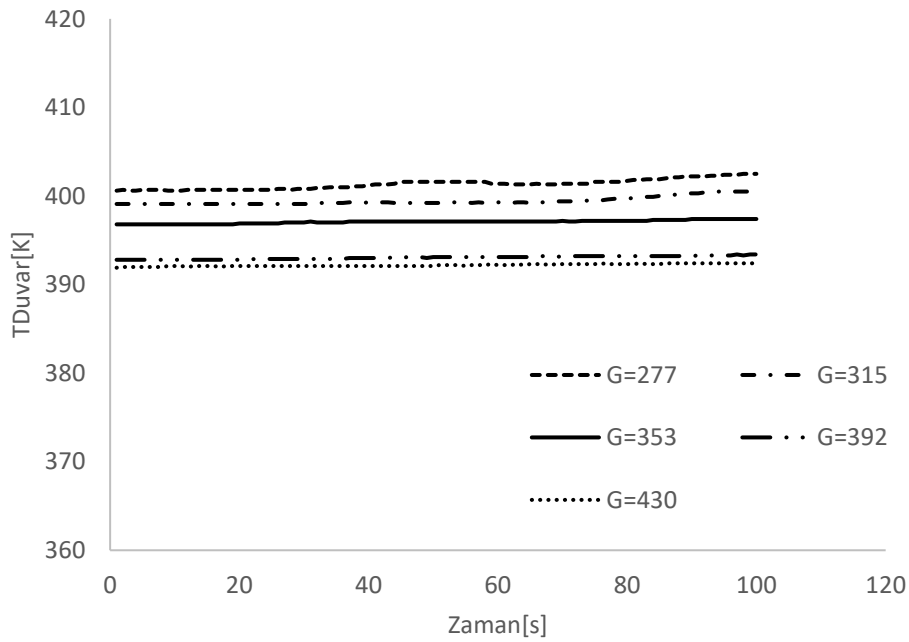
6.1. Mikrokanallı Isı alıcılarında Kaynama Akışındaki Basınç Düşümü ve Isı Transferinin Deney Sonuçları

Deneysel çalışma bölümünde ayrıntılı olarak da belirtildiği üzere akış deneyleri ile 60-110 ml/dk debi aralığında pompa vasıtasıyla test bölümüne ulaştırılmaktadır. Kütle akıları ise $277 \text{ kg} / \text{m}^2\text{s}$ ve $430 \text{ kg} / \text{m}^2\text{s}$ aralığında değişmektedir. Sekiz adet ısı alıcısının herbiri aynı boyutlarda ve aynı hidrolik çapa sahip olduğu kabul edilmiştir. Fakat ısı alıcıları farklı gözenekliliğe sahiptir. Deneyler boyunca akışkan giriş sıcaklığı sabit sıcaklık banyosu ile 80°C ye ayarlanmıştır. K tipi termokupllar ile kanal giriş ile çıkışı ve duvar sıcaklıkları deneysel olarak ölçülmüştür. Sıcaklık kaynağı olarak kartuj ısıtıcılar kullanılmıştır. Kartuj ısıtıcıların her biri 100 W kapasitelidir. 100 W kapasiteli ısıtıcılardan farklı sayılarda kullanılarak, farklı ısı gücü ile bakır blok

ısıtılarak kaynama akışı sağlanmıştır. Deneysel olarak basınç transmitteri olarak yüksek hassasiyetli Keller marka basınç transmitteri kullanılmıştır. Deneysel olarak ölçülen basınç düz ve gözenekli yüzeyler için farklılık göstermektedir. Ölçülen basınç değerleri değişim göstermektedir.

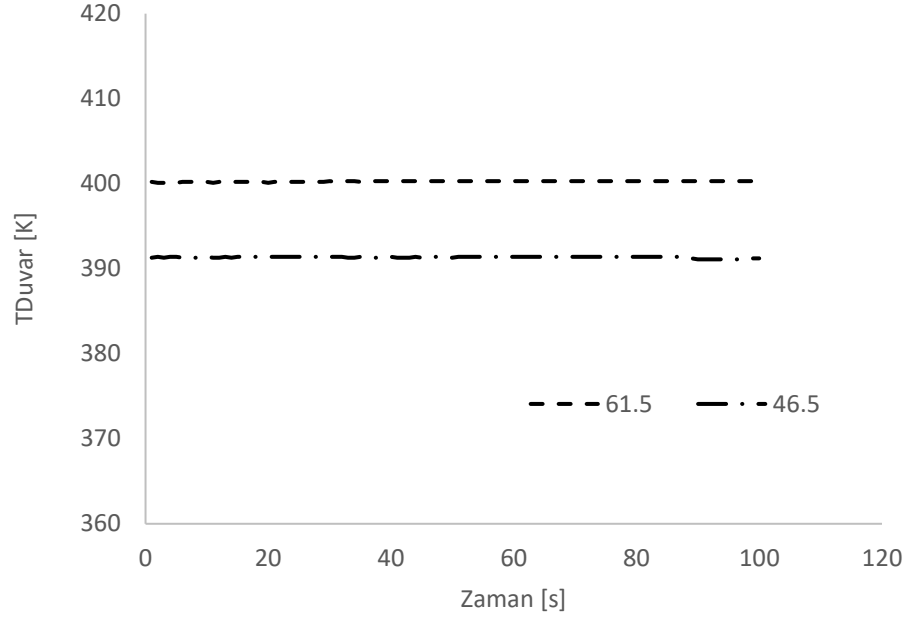
6.1.1. Deneysel olarak ölçülen duvar sıcaklıkları

Bir ısı alıcısının görevi, sistemden gelen ısı akısını dağıtarak sistemi güvende tutmaktır. Duvar sıcaklıkları, ısı alıcısının orta noktasında iki farklı yere yerleştirilen termokupullar ile ölçülmüştür. Duvar sıcaklıkları sabit ısı akısında farklı kütle akılarında ölçülmüş ve ortalama değer alınmıştır. Şekil 6.1, farklı kütle akılarında deneylerde ölçülen duvar sıcaklığının zamanla değişimini göstermektedir. En düşük kütle akısı olan $277 \text{ kg/m}^2\text{s}$ deki duvar sıcaklığı 400 K civarında ölçülürken, en yüksek kütle akısı olan $430 \text{ kg/m}^2\text{s}$ duvar sıcaklığının 392 K 'e düştüğü gözlemlenmiştir. Kütle akısındaki artış duvar sıcaklığında düşüşe neden olmuştur. Yüksek kütle akılarında yapılan deneylerde ısı alıcısı duvarının daha fazla soğuduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.1.Farklı kütle akılarındaki duvar sıcaklığı değişimleri (277 ve $430 \text{ kg/m}^2\text{s}$ arasında)

Benzer şekilde, mikrokanallarda deneysel olarak çalışan Markal ve ark. (2016) $51 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ile $91,6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ arasında artan kütle akıları ile duvar sıcaklıklarının düştüğünü göstermiştir.

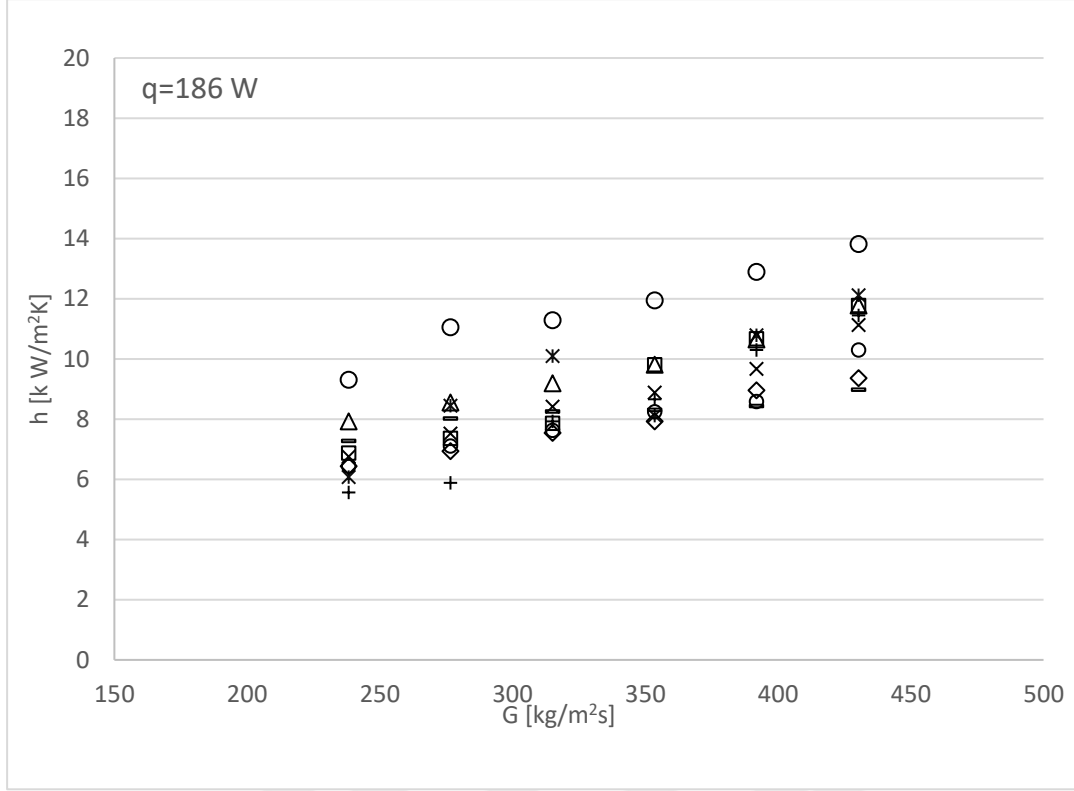


Şekil 6.2. Farklı efektif ısı akılarında duvar sıcaklığının zamanla değişimi (46.5 ve 61.5 W/cm²) Kütle akıları sabit $G=277\text{kg/m}^2\text{s}$.

Isı akısı ile duvar sıcaklığı arasındaki ilişki Şekil 2'de gösterilmektedir. Aynı kütle akılarında ve farklı ısı akılarında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları, ölçülen duvar sıcaklıklarında farklılık olduğunu göstermiştir. Isı akısı 46,5 W/cm² 'den 61,5 W/cm² 'ye çıkarıldığında, duvar sıcaklığı yaklaşık 391 K'den 400 K'e yükselmiştir.

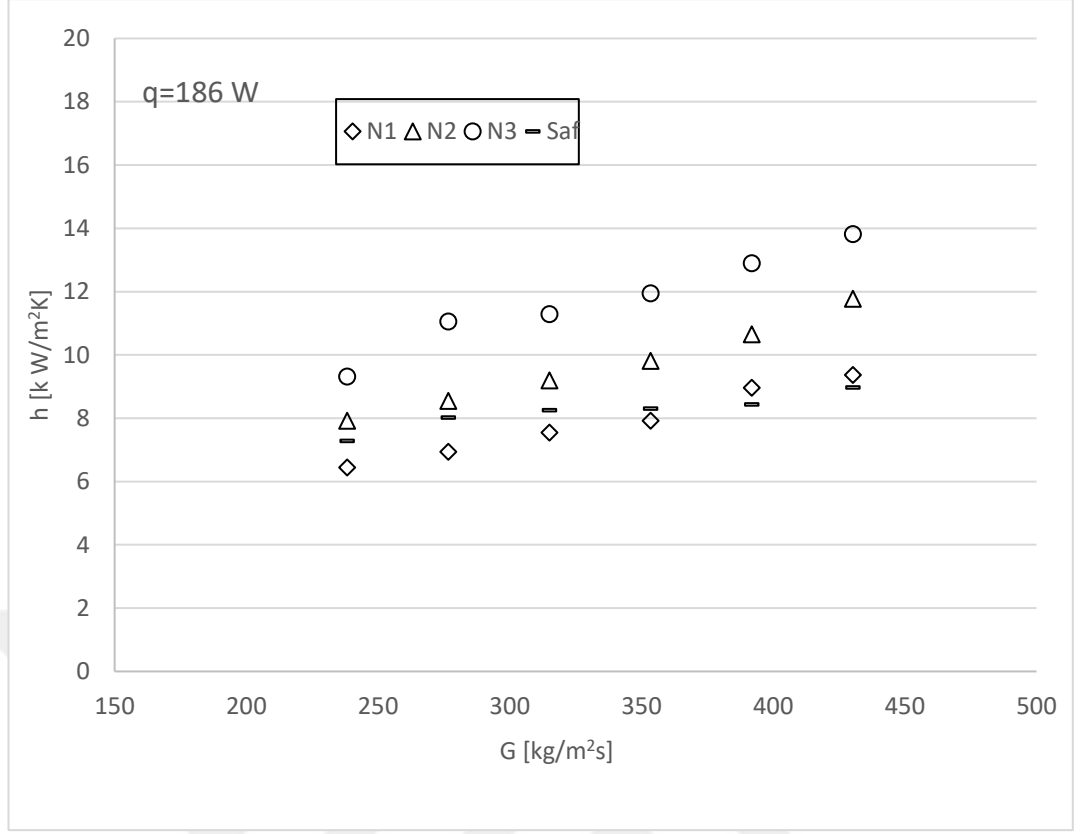
6.1.2. Kaynama akışındaki deneysel olarak belirlenen Isı taşınım Katsayıları

Bu bölümde farklı gözenekli ısı alıcılarında, yerel akış kaynaması ısı transferi katsayılarının kütle akısı, kuruluk derecesi ve efektif ısı akısı değerine göre değişimleri incelenmiştir.



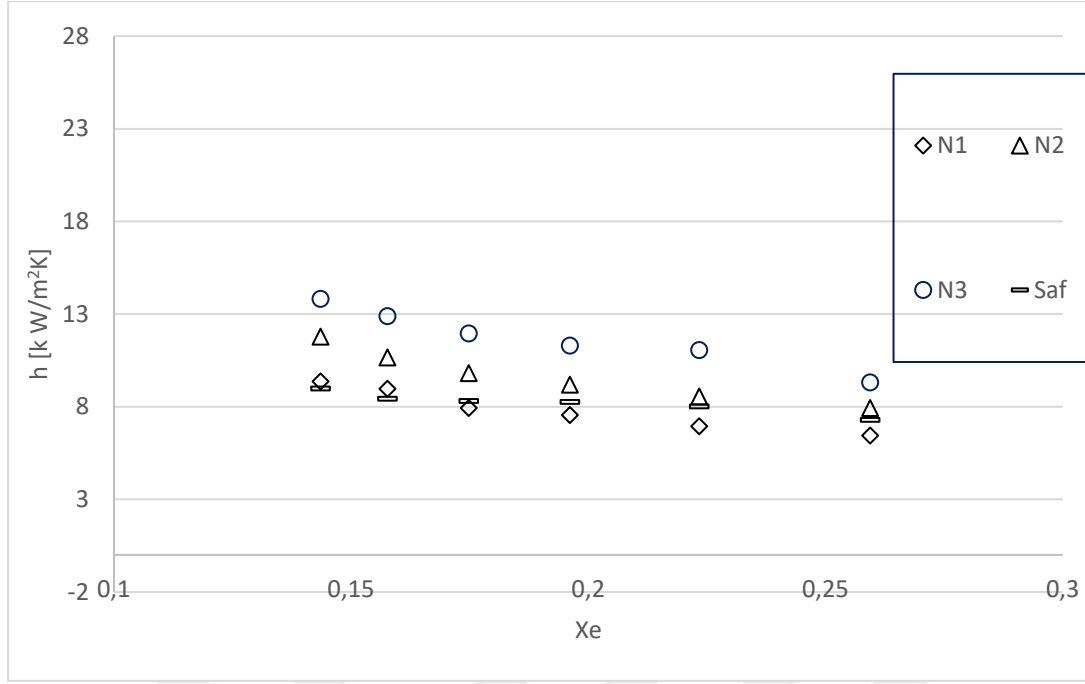
Şekil 6.3. Kütle akısına göre ısı taşınım katsayısı değişimi

Şekil 6.3 de farklı gözeneklere sahip sekiz adet numune ve saf numune olmak üzere dokuz adet numunenin kütle akısı değişimine göre deneysel olarak elde edilmiş yerel ısı taşınım katsayısı değerleri verilmiştir. Numunelerin her birinde genel olarak debi artışına karşı ısı taşınım katsayısında da artış gözlenmiştir. Bu literatürle uyumlu bir sonuçtur. Fakat dokuz numunenin dokuzunda da gözenek artışı ve ısı taşınım katsayısı arasında net bir ilişki gözlenmemiştir. Bu sonuç literatürde de yer alan küçük gözenekli bir numune, kaynama ısı transferi için faydalı olan yüksek bir termal iletkenliğe sahip olabilir. Ancak kabarcık kaçış direnci göz önüne alındığında gözenek azaltılması gerekir. Bu nedenle, bir numunenin gözenekliliği uygun şekilde seçilmelidir [vontas]Bu nedenle diğer karşılaştırma grafiklerine birbiri ile en uygun gözenek değerli olan numunelerin sonuçları ile devam edilmiştir.



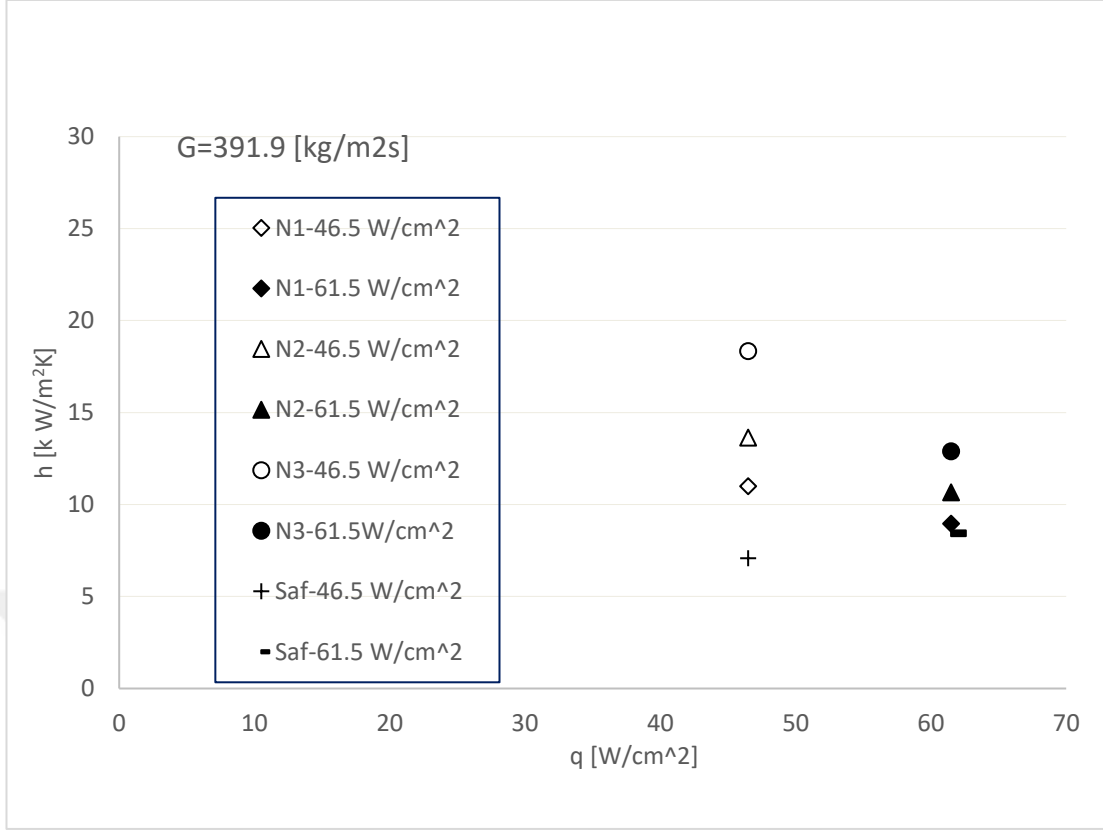
Şekil 6.4. Isı taşınım katsayısının kütle akısına göre değişimi

Farklı gözenekli yapılara sahip ısı alıcıları ile 238,2 ila 430,3 kg/m²s kütle akısı aralığında kaynama akışı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4 de ısı taşınım katsayılarının kütle akısı ile değişimini göstermektedir. Aynı geometriye sahip ısı alıcılarında gerçekleştirilen deneylerde, kütle akısının artmasıyla birlikte ısı taşınım katsayısında bir artış gözlemlenmiştir. En yüksek ısı taşınım katsayıları en yüksek gözenekliliğe sahip mikrokanallı ısı alıcıda elde edilmiştir. En düşük ısı taşınım katsayısı değerleri ise saf soğutucu ve N1 adlı ısı alıcısında elde edilmiştir. Markal ve ark. (2016) da ısı taşınım katsayısının artan kütle akısı ile arttığını bildirmiştir.



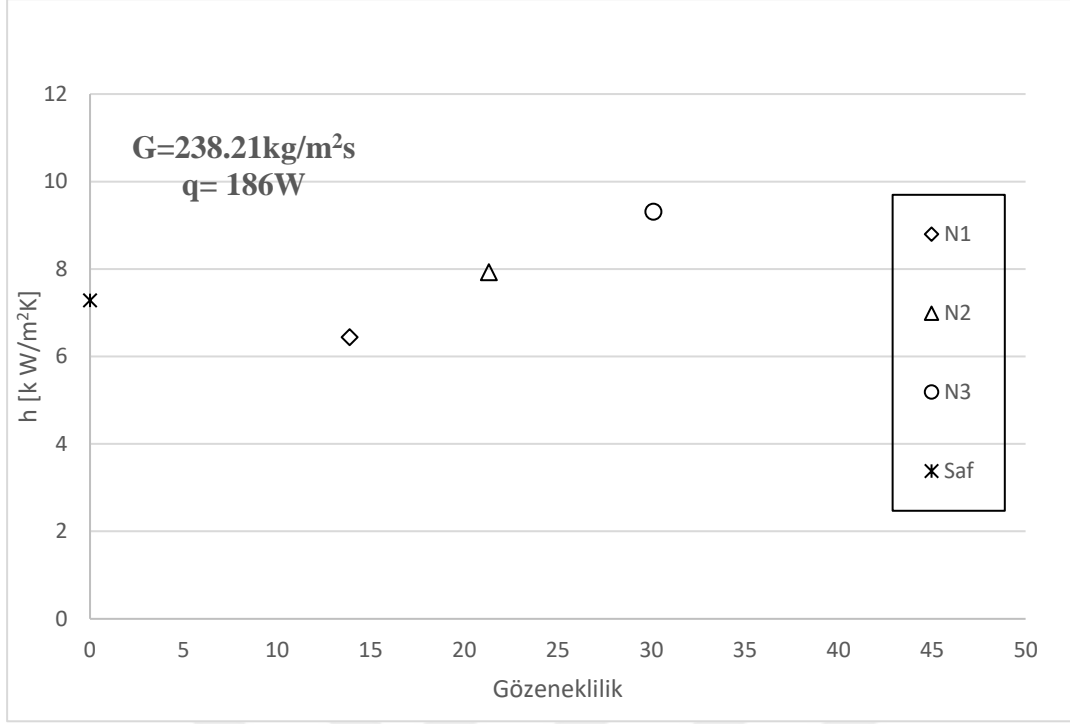
Şekil 6.5. Isı taşınım katsayısının buhar kalitesine göre değişimi

Şekil 6.5'de buhar kalitesinin artmasıyla ısı taşınım katsayısının azaldığı görülmektedir. Literatürde buhar kalitesi ile ısı taşınım katsayısı arasında farklı eğilimlerde bir ilişki olduğu bildirilmektedir. He ve ark. (2020) buhar kalitesinin artmasıyla ısı taşınım katsayısının azaldığını tespit etmiştir. Yine başka bir çalışmada Markal ve ark. (2016) buhar kalitesinin artmasıyla ısı taşınım katsayısının azaldığını belirtmiştir. Ayrıca, düşük en-boy değerlerinde ısı taşınım katsayısının buhar kalitesinden bağımsız olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, ısı alıcılarının gözenekliliği azaldıkça ısı taşınım katsayılarının düştüğü görülmektedir. En yüksek ısı taşınım katsayısı değerleri en yüksek gözenekliliğe sahip yüzeydedir. Aynı şekilde en düşük ısı taşınım katsayısı değerlerine saf ısı alıcı ve N1 ısı alıcıda ulaşıldığı görülmektedir. Benzer şekilde, He ve ark. (2020) en yüksek ısı taşınım katsayılarına 0,01 ila 0,2 buhar kalitesi aralığında yüksek gözenekli ısı alıcısında ulaşmıştır. Sonuç olarak, buhar kalitesi düşükken yüksek ısı taşınım katsayılarına ulaşılmıştır.



Şekil 6.6. Isı taşınım katsayısı ısı akısı ile değişimi ($G=391.9 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

Şekil 6.6 dört farklı ısı alıcının ısı akısı ve ısı taşınım katsayıları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Deneyler aynı kütle akısı $391,9 \text{ kg/m}^2\text{s}$ olacak şekilde iki farklı ısı akısında gerçekleştirilmiştir. En yüksek ısı taşınım katsayısı değeri N3 numunesinde $46,5 \text{ W/cm}^2$ ısı akısı koşulunda gerçekleştirilen deneyde elde edilmiştir. Isı akısı arttığında ısı taşınım katsayısının düştüğü gözlemlenmiştir. N3 ısı alıcısı diğerlerine göre daha yüksek gözeneklilik değerine sahiptir. En düşük gözenekliliğe sahip ısı alıcısında düşük ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Isı akısı değeri arttığında ısı transfer katsayıları birbirine yaklaşmış ancak en yüksek gözenekliliğe sahip numunenin ısı taşınım katsayısı yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde Markal (2016) etkin ısı akısı ile ısı taşınım katsayısı arasındaki ilişkiyi sunmuştur.

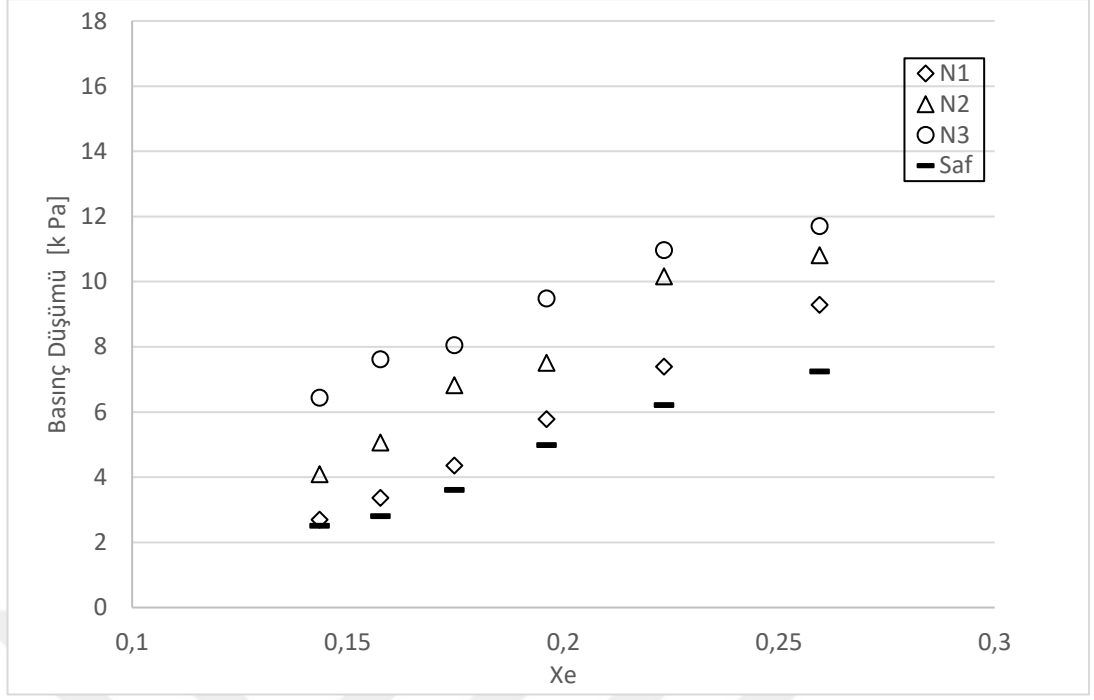


Şekil 6.7. Gözeneklilik değişiminin ısı taşınım katsayısına etkisi

Şekil 6.7 de, ısı taşınım katsayısının gözeneklilik ile değişimini vermektedir. Gözeneklilik arttıkça ısı taşınım katsayısının arttığı gözlemlenmiştir.

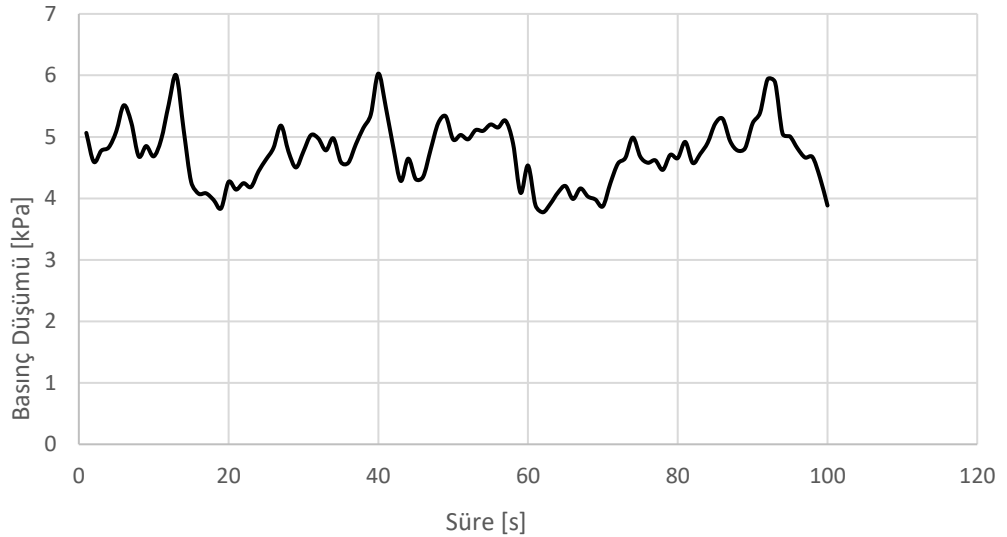
6.1.3. Basınç düşümü

Şekil 6.8 de, buhar kalitesinin bir fonksiyonu olarak kaynama akışında basınç düşümü karakteristiklerini göstermektedir. Buhar kalitesi arttıkça basınç düşümü değerlerinin yavaşça arttığı görülmektedir. Buhar kalitesi arttıkça özgül hacim de artmaktadır. Bu durumda, artan ortalama buhar hızı daha yüksek bir basınç düşümüne neden olmaktadır. Öte yandan ısı alıcılarının gözeneklilik etkisi de bu şekilde görülmektedir. Basınç düşümü en yüksek N3 ısı alıcı örneğinde ortaya çıkmıştır. En düşük basınç düşümü ise saf bakır ısı alıcısında elde edilmiştir. Deneysel verilerden varılan sonuca göre, gözenekliliğin basınç düşümü üzerinde etkisi olduğu ve gözeneklilik azaldıkça basınç düşümünün arttığı görülmüştür.



Şekil 6.8. Basınç düşümünün buhar kalitesi ile değişimi

Benzer şekilde, He ve ark. (2020) 0,01 ila 0,2 buhar kalitesi aralığında pürüzsüz bir yüzey üzerinde maksimum 3,5 kPa basınç gözlemlemişlerdir. Gözenekli yüzeylerde basınç düşümünün 5,5 kPa'a ulaştığını bildirmişlerdir. Gözenekli yüzeylerde basınç düşümü arasında net bir ilişki olduğu anlaşılmıştır. Deneysel veriler incelenirken basınç düşümünde dalgalanmalar olduğu gözlenmiştir. Bu durum şekil 6.9 da verilen grafikte açıkça gözlenmektedir.



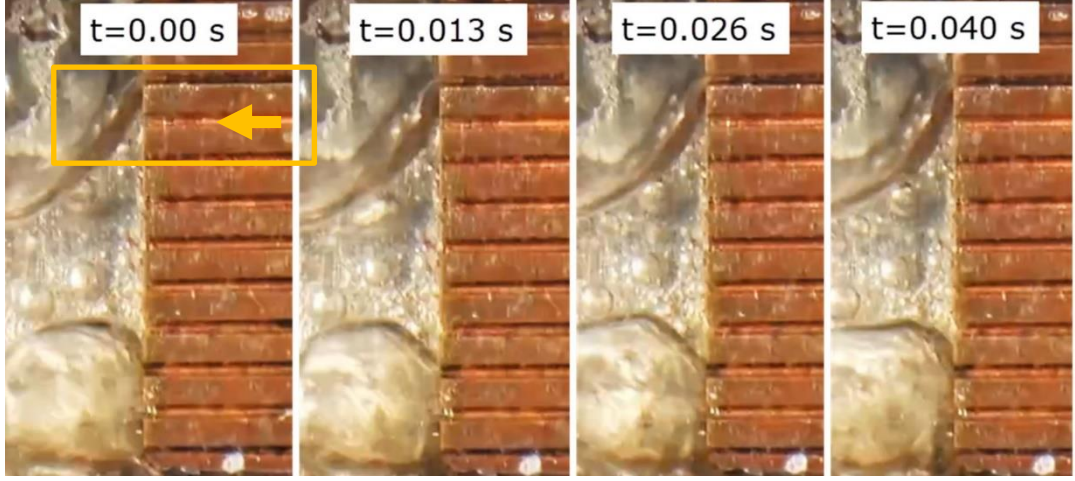
Şekil 6.9. Basınç düşümü kararsızlığı

Şekil 6.9 da gözlemlenen basınç dalgalanmaları kaynama akışında gözlemlenen geri akışla açıklanabilir. Bu durumu kanıtlayabilmek için akış görselleştirme çalışmaları gerçekleştirildi. Aşağıdaki Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 de akış görselleştirme sonuçlarında elde edilen akış görselleri ve geri akış oluşumunda elde edilen görüntülere yer verildi.

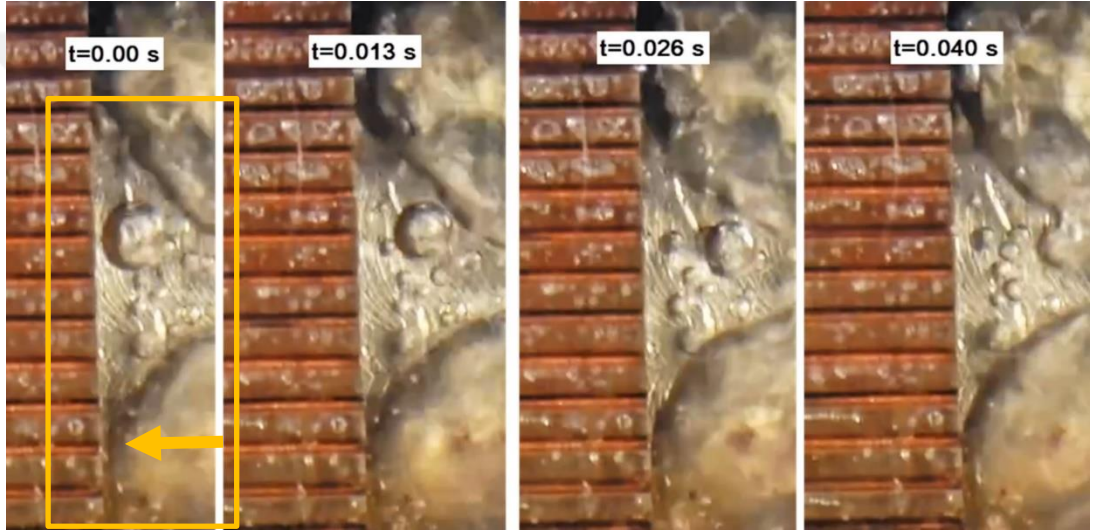


Şekil 6.10. Zamana göre değişen akış görselleri

Literatürde bir kanalda akışın kaynamasında karşılaşılan farklı aşamalar akış görselleştirme teknikleri yardımıyla sunulmaktadır. Akış modelleri öncelikle kabarcıklanma, slug, dairesel ve sis olarak sınıflandırılabilir (Thome ve ark. 2013). Mini ve mikrokanallarda akış modelleri kabarcıklı akış, slug akış, dairesel akış ve sis akışı olarak sınıflandırılabilir. Yaygın olarak kabul edilen terimlere göre, çalışmada gözlemlenen akış modelleri, slug akış olarak sınıflandırılmıştır. Slug akışta kabarcık şekli kanal geometrisine bağlıdır. Şekil 6.10'da buhar kabarcığının tek bir kanalda ilerlediği görülmektedir. İlk olarak kanaldan daha kısa bir buhar kabarcığı görülüyor. Kanal boyunca ilerleyen kabarcık, çıkışa doğru diğer küçük kabarcıklarla birleşerek büyümüştür. Slug akışında buhar kabarcığı kanal genişliği ve yüksekliği ile sınırlanır ve akış yönünde uzanmaya devam eder. Sıvı parça, buhar parçacığı arasında bulunur ve sıvı ve buhar parçacığı, kanalda dönüşümlü olarak görünür.

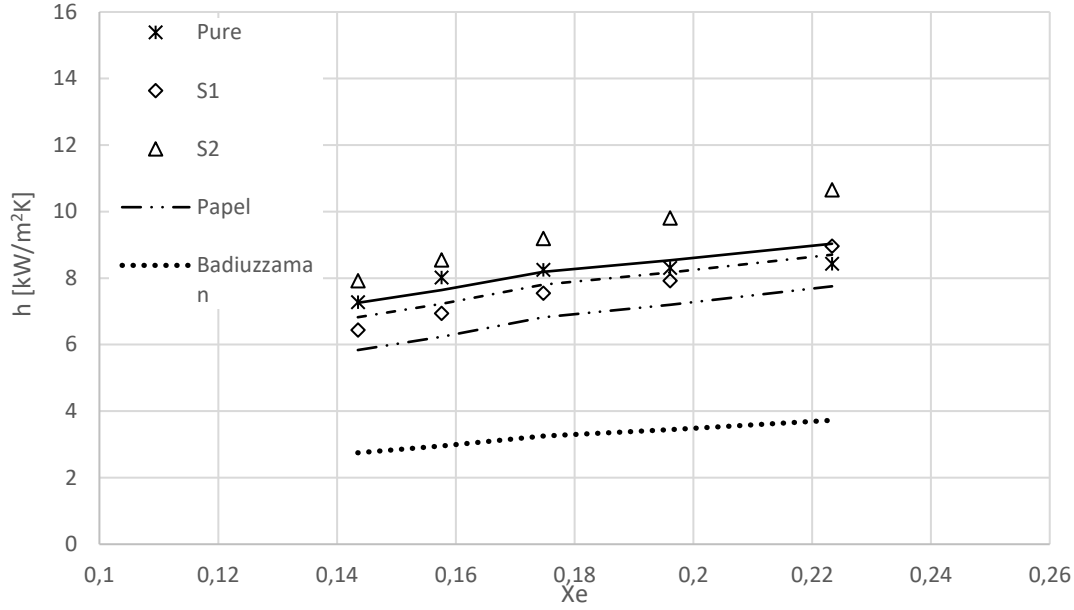


Şekil 6.11. a. Buhar giriş portu



Şekil 6.12. b. Çıkış portu

Giriş ve çıkış portlarındaki ters buhar akışı çalışma koşullarına karşılık gelen görüntüler Şekil. 6.14.a ve 6.15.b 'de gösterilmektedir. Buhar kabarcıkları, hem kanal giriş hem de çıkış portlarının iki farklı bölümünü doldurur. Kanaldaki kabarcıklar akışın ters yönünde hareket ederek daha büyük kabarcıkların oluşmasına neden olur. Bu duruma geri akış denir. Büyümüş kabarcıklar, alandaki akışı engellemesine neden olur. Bu kütle akış hızıyla ilgilidir. Deneylerdeki kütle akışının ($G=353 \text{ kg/m}^2\text{s}$) ataleti hem basınç düşümünü hem de paralel kanal salınımlarını bastırmak için yetersizdir. Testlerde akış kararsızlıkları ve geri akış gözlemlendi. Basınç düşümündeki dalgalanmalar geri akıştan kaynaklanmaktadır (Şekil 6.11). Aynı zamanda ısı taşınım katsayılarındaki düzensiz değerlerde geri akıştan kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.13. Deneyel ısı taşınım katsayılarının mevcut korelasyonlardan elde edilen verilerle karşılaştırılması

Tablo 6.1. Deneyel sonuçlar ile korelasyonlardan elde edilen ortalama sapma

Exp. data	Papel (1963)	Badiuzzaman(1967)	Shah (1976)	Tran (1996)	Yu et al. (2002)
N1	-24.46	-64.37	525.28	-11.93	-6.46
N2	-38.45	-70.96	409.50	-28.24	-23.78
Saf	-27.98	-66.01	494.74	-16.13	-10.99

İki fazlı ısı transferinin tahmini, minyatür soğutma sistemlerinin termal tasarımında önemli bir husustur. Deneyel sonuçların mevcut korelasyonlardan elde edilen verilerle karşılaştırılması Şekil 6.12 de verilmiştir. Ayrıca ortalama sapmalar Tablo 6.1'de gösterilmiştir. Genel olarak karşılaştırılan ilişkilerin ortalama hatası %20'den büyüktür. Ancak sapma, Yu ve ark. (2002) ve Tran'ın ilişkilerinden elde edilenlerle karşılaştırıldığında nispeten küçüktür. Yu ve ark. (2002) ve Tran (1996) ilişkilerinde N1 numunesi ve saf bakır numune ile tutarlı bulunmuştur ve en düşük gözenekliliğe sahiptir. Bu nedenle gözeneklilik arttıkça geleneksel ilişkilere uyumun azaldığı sonucuna varılmıştır.

7. SONUÇ

Mikrokanallı ısı alıcı malzemesinin, yüzeysel ve yapısal fiziksel özelliklerinin akış kaynaması üzerinde ne kadar etkiye sahip olduğu hakkında literatürde henüz kesin bir fikir birliği sağlanamamıştır. Bu nedenle gözenekliliğin akış kaynaması üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, kaynama akışında ısı taşınım katsayısına, gözeneklilik gibi malzeme yapısal özellikliğinin etkilerini incelemek için, sinterleme yöntemi ile gözenekli yapılar elde edilmiştir.

Sinterleme ile üretilen ve gözeneklilik değerleri %13 ile %30 arasında değişen ısı alıcıları ile saf bakır malzemeden yapılmış ısı alıcının kaynama akışına ilişkin deneysel veriler sunulmaktadır. Deneysel araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

a) Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçların literatürdeki deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Hem düz hem de gözenekli ısı alıcılarında artan kütle akışı ile ısı taşınım katsayısı doğrusal olarak arttı. Tüm testlerde ısı güç arttıkça ısı taşınım katsayısının azaldığı görüldü. Aynı şekilde buhar kalitesinin artmasıyla birlikte ısı taşınım katsayısı da azalmıştır. Buhar kalitesinin artmasıyla basınç düşümü de arttı. Tüm kütleli akılarda gözeneklilik arttıkça basınç düşümü de arttı.

b) Gözenekli yüzeyler kaynama akışındaki ısı transferinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. En yüksek kütle akışında ($430,32 \text{ kg/m}^2\text{s}$), saf ısı alıcıya kıyasla %33,31 gözenekli ısı alıcısında daha yüksek ısı taşınım katsayısı elde edildi. Ancak ısı akışı arttıkça en düşük ısı taşınım katsayısı değerlerine düz yüzeyde ulaşıldı. Gözenekliliğin artmasının ısı taşınım katsayısını düşük ısı güçte yüksek ısı güce göre daha olumlu etkilediği söylenebilir.

c) Gözenekliliği yüksek bir numune, kaynama ısı transferi için faydalı olan yüksek bir termal iletkenliğe sahip olabilir. Ancak kabarcık kaçış direnci göz önüne alındığında gözenekliliğin azaltılması gerekir. Bu nedenle, bir numunenin gözenekliliği uygun şekilde seçilmelidir

d) Deneysel sonuçları kaynama akışı dengesizliklerini ortaya çıkardı. Basınç düşümü ölçümlerinde verilerin belirli bir aralıkta salınım yaptığı gözlemlenmiştir. Akış görüntüleri, giriş ve çıkış bağlantı noktalarında geri buhar akışını gösterir. Bu geri akış basınç değerlerinde salınımlara neden oldu.

e) Deneysel veriler, literatürde en çok kullanılan ve mevcut bağıntılardan elde edilen verilerle karşılaştırıldı. Yu ve ark. (2002) deneysel verilerle en uyumlu korelasyonu bulmuşlardır. Ortalama sapma oranı $-6,46\%$ ile $23,78\%$ değerleri arasında hesaplanmıştır. Diğer iki en tutarlı korelasyon Tran (1996) ve Papel (1963) olup ortalama sapma oranları $11,95\%$ ile $38,45\%$ arasında değişmektedir. Deneysel sonuçların, literatürdeki mevcut bağıntılarla uyumu düz soğutucuların gözenekli soğutuculara göre daha uygun olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma, mikrokanallarda, akış kaynaması için literatürde mevcut olan bağıntıların çoğunda göz ardı edilen, katı malzemenin yoğunluğu, ısı kapasitesi ve ısı iletkenliği gibi kullanılan malzemelerin, önemli termofiziksel özelliklerini dikkate alması yönünden önemlidir

KAYNAKLAR

- Adams T., Dowling M., Abdel-Khalik S., Jeter S. (1999). Applicability of Traditional Turbulent Single-Phase Forced Convection Correlations to Non-Circular Microchannels. *Int J Heat Mass Transf*, 42, 4411-4415. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00102-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00102-7)
- Akbar, M. K., Plummer, D. A., & Ghiaasiaan, S. M. (2003). On gas-liquid two-phase flow regimes in microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 29(5), 855-865. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(03\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(03)00043-0)
- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., & Karayiannis, T. G. (2020, October). Flow Boiling of HFE-7100 in Multi-Microchannels: Effect of Surface Material. International ASET Inc. (MHMT Congress). <https://doi.org/10.11159/icmfht20.124>
- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., & Karayiannis, T. G. (2022). Flow boiling in copper and aluminium microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123101. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123101>
- An, Y., Huang, C., & Wang, X. (2021). Effects of thermal conductivity and wettability of porous materials on the boiling heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, 170, 107110. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107110>
- Awais, A. A., & Kim, M. H. (2020). Experimental and numerical study on the performance of a minichannel heat sink with different header geometries using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115125. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115125>
- Bai, P., Tang, T., & Tang, B. (2013). Enhanced flow boiling in parallel microchannels with metallic porous coating. *Applied thermal engineering*, 58(1-2), 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.067>
- Balasubramanian, K., Lee, P. S., Teo, C. J., & Chou, S. K. (2013). Flow boiling heat transfer and pressure drop in stepped fin microchannels. *International journal of heat and mass transfer*, 67, 234-252. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.023>
- Bang, K. H., & Choo, W. H. (2004, January). Flow boiling in minichannels of copper, brass, and aluminum round tubes. In *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels* (Vol. 41642, pp. 559-564).
- Bradbury, S. (1986) *Powder Metallurgy Equipment Manual*, 3rd edn, MPIF, Princeton NJ.
- Byon, C., Choi, S., & Kim, S. J. (2013). Critical heat flux of bi-porous sintered copper coatings in FC-72. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 655-661. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.029>
- Carey, V. P. (2020) *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, 3rd edn.

- Chen, W. L., Twu, M. C., & Pan, C. (2002). Gas–liquid two-phase flow in micro-channels. *International Journal of Multiphase Flow*, 28(7), 1235-1247. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00023-X)
- Choi, C. W., Yu, D. I., & Kim, M. H. (2011). Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: Part I–Flow pattern, pressure drop and void fraction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3), 616-624. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.067>
- Chung, P. Y., & Kawaji, M. (2004). The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels. *International journal of multiphase flow*, 30(7-8), 735-761. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.05.002>
- Cora, Ö. N., Usta, Y., & Koç, M. (2009). Micro-manufacturing of micro-scale porous surface structures for enhanced heat transfer applications: an experimental process optimization study. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(4), 045011. DOI 10.1088/0960-1317/19/4/045011
- Danninger, H., Calderon, R. D. O., & Gierl-Mayer, C. (2017). Powder metallurgy and sintered materials. *Addit. Manuf*, 19(4).
- Dessimoz, A. L., Raspail, P., Berguerand, C., & Kiwi-Minsker, L. (2010). Quantitative criteria to define flow patterns in micro-capillaries. *Chemical Engineering Journal*, 160(3), 882-890. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.011>
- Dixit, T. & Ghosh I. (2015). Review Of Micro- and Mini-Channel Heat Sinks and Heat Exchangers for Single Phase Fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(1), 1298-1311. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.024
- Gedupudi, S., Zu, Y. Q., Karayiannis, T. G., Kenning, D. B. R., & Yan, Y. Y. (2011). Confined bubble growth during flow boiling in a mini/micro-channel of rectangular cross-section Part I: Experiments and 1-D modelling. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(3), 250-266. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.09.001>
- German, R.M. (1996) *Sintering Theory and Practice*, JohnWiley & Sons, New York-Chichester-Brisbane–Toronto–Singapore.
- German, R.M. (2013) History of sintering–empirical phase. *Powder Metallurgy*, 56 (2), 117–123.
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- Gupta, S. K., & Misra, R. D. (2021). Flow boiling heat transfer performance of copper-alumina micro-nanostructured surfaces developed by forced convection electrodeposition technique. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 164, 108408. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108408>Get rights and content
- He, B., Luo, X., Yu, F., Zhou, J., & Zhang, J. (2020). Flow boiling characteristics in bi-porous minichannel heat sink sintered with copper woven tape. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119988. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119988>.

- Hinkelmann, K., Kempthorne, O.(2005). *Design and Analysis of Experiments Volume 2 Advanced Experimental Design*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, New Jersey.
- Ho, C. J., Peng, J. K., Yang, T. F., Rashidi, S., & Yan, W. M. (2023). Comparison of cooling performance of nanofluid flows in mini/micro-channel stacked double-layer heat sink and single-layer micro-channel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 191, 108375. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108375>
- Hosseini, R., Gholaminejad, A., Nabil, M., & Samadinia, M. H. (2011, January). Concerning the effect of surface material on nucleate boiling heat transfer of R-113. In *ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference* (Vol. 38921, p. T10238). <https://doi.org/10.1115/ajtec2011-44498>.
- Hryha, E., Nyborg, L., Malas, A., Wiberg, S., and Berg, S.(2013) Carbon control in PM sintering: Industrial applications and experience. *Powder Metallurgy*, 56 (1), 5–11. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00079-X)
- Huh, C., & Kim, M. H. (2007). Pressure drop, boiling heat transfer and flow patterns during flow boiling in a single microchannel. *Heat Transfer Engineering*, 28(8-9), 730-737. <https://doi.org/10.1080/01457630701328213>
- ISO 3252:1999. *Powder Metallurgy — Vocabulary*, International Standards Organization, Geneva, Switzerland.
- Jafari, R., Okutucu-Özyurt, T., Ünver, H. Ö., ve Bayer, Ö. (2016). Experimental investigation of surface roughness effects on the flow boiling of R134a in microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.016>
- Jaikumar, A., & Kandlikar, S. G. (2015). Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for selectively sintered open microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 652-661. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.100>
- Johnson, J. L., Tan, L. K., Bollina, R., Suri, P., & German, R. M. (2005). Evaluation of copper powders for processing heat sinks by metal injection moulding. *Powder metallurgy*, 48(2), 123-128. DOI 10. 1179/003258905X37792
- Kandlikar, S. G. (2012). History, Advances, and Challenges in Liquid Flow and Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels: A Critical Review, *J. Heat Transf.*, 134 (3) <https://doi.org/10.1115/1.4005126>
- Kandlikar, S.G., & Grande W.J. (2003). Evolution of Microchannel Flow Passages-- Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology. *Heat transfer engineering*, 24 (1), 3-17. <https://doi.org/10.1080/01457630304040>
- Kharangate, C. R., & Mudawar, I. (2017). Review of computational studies on boiling and condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1164-1196. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.065>
- Kline, S. J. (1963). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mech. Eng.*, 75, 3-8.

- Koç, M., Usta, Y., & Karakoç, A. (2008). Investigations on thermo-mechanical fabrication of micro-scale porous surface features. *Journal of power sources*, 179(2), 592-602. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.056>
- Koşar, A., Kuo, C. J., & Peles, Y. (2005). Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23-24), 4867-4886. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.003>
- Kumar, A. Y., Wang, J., Bai, Y., Huxtable, S. T., & Williams, C. B. (2019). Impacts of process-induced porosity on material properties of copper made by binder jetting additive manufacturing. *Materials & Design*, 182, 108001. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108001>
- Kumar, V., Paraschivoiu, M., & Nigam, K. D. P. (2011). Single-phase fluid flow and mixing in microchannels. *Chemical Engineering Science*, 66(7), 1329-1373. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.016>
- Lazıc, Z., R. (2004). *Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide*. WILEY-VCH, USA, 157-165.
- Lee, P. S., & Garimella, S. V. (2003, January). Experimental investigation of heat transfer in microchannels. In *Heat transfer summer conference* (Vol. 36932, pp. 391-397). <https://doi.org/10.1115/HT2003-47293>
- Lee, P. S., Ho, J. C., & Xue, H. (2002, May). Experimental study on laminar heat transfer in microchannel heat sink. In *ITherm 2002. Eighth intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems* (Cat. No. 02CH37258) (pp. 379-386). IEEE.
- Lee, V. Y., Henderson, G., Reip, A., & Karayiannis, T. G. (2022). Flow boiling characteristics in plain and porous coated microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183, 122152. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122152>
- Liao, L., Bao, R., & Liu, Z. (2008). Compositive effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water. *Heat and Mass Transfer*, 44, 1447-1453. <https://doi.org/10.1007/s00231-008-0384-6>
- Liter, S. G., & Kaviany, M. (2001). Pool-boiling CHF enhancement by modulated porous-layer coating: theory and experiment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(22), 4287-4311. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00084-9)
- Liu, T. Y., Li, P. L., Liu, C. W., & Gau, C. (2011). Boiling flow characteristics in microchannels with very hydrophobic surface to super-hydrophilic surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.060>
- Liu, Y., Fletcher, D. F., & Haynes, B. S. (2013). On the importance of upstream compressibility in microchannel boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58(1-2), 503-512. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.068>
- Lu, X., Zhao, Y., Wang, G., & Zhu, X. (2020). Effects of structure characteristics and fluid on the effective thermal conductivity of sintered copper foam. *Results in Physics*, 19, 103655. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103655>

- Mala, G. M., & Li, D. (1999). Flow characteristics of water in microtubes. *International journal of heat and fluid flow*, 20(2), 142-148. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(98\)10043-7](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(98)10043-7)
- Markal, B. (2016). *Mikrokanallarda kaynamalı akışın deneysel incelenmesi* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı. 154, Trabzon).
- Markal, B., Aydın, O., & Avci, M. (2016). Effect of aspect ratio on saturated flow boiling in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 130-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.024>
- Meral Z.K., & Parlak, N. (2018). Mikro Ölçekte Çift Fazlı Akış ve Isı Geçişi İçin Gözenekli Yüzey Üretimi, *IJMSIT*, 2(2), 61–66.
- Meral, Z. K., & Parlak, N. (2021). Experimental research and CFD simulation of cross flow microchannel heat exchanger. *Journal of Thermal Engineering*, 7(2), 270-283. <https://doi.org/10.18186/thermal.872366>
- Meral, Z. K., & Parlak, N. (2023). Experimental Investigation on Two-Phase Heat and Fluid Flow in Porous Heat Sinks. *Heat Transfer Research*, 54(16). <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2023047737>
- Mondal, S., Pal, P. K., & Nandi, G. (2021). Optimization of process parameters of TIG welding of duplex stainless steel without filler rod by grey-Taguchi method. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 28(4), 385-392.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- Morshed, A. K. M. M., Paul, T. C., & Khan, J. A. (2013). Effect of Al₂O₃ nanoparticle deposition on flow boiling performance of water in a microchannel. *Experimental thermal and fluid science*, 47, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.11.015>
- Nayar, H.S. (1998) Sintering atmospheres, in *ASM Handbook. Powder Metal Technologies and Applications*, ASM Materials Park OH,(7) , 457–467.
- O'Neill, L. E., & Mudawar, I. (2020). Review of two-phase flow instabilities in macro- and micro-channel systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 157, 119738. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119738>
- Parlak, N. (2010). *Mikrokanallarda akış ve ısı geçişinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi* (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- Parlak, N., Engin, T., Küçük, H., & Gür, M. (2011). Investigation of the Viscous Heating Effect at Single-Phase Laminar Water Flow in Microtubes. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.08.006>Get rights and content
- Paz, M. C., Conde, M., Suárez, E., & Concheiro, M. (2015). On the effect of surface roughness and material on the subcooled flow boiling of water: Experimental study and global correlation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 64, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.02.016>.

- Pehlivan, K., Hassan, I., & Vaillancourt, M. (2006). Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels. *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15), 1506-1514. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.010>
- Peng, X. F., & Peterson, G. P. (1995). The effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(4), 755-758. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)93010-F](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)93010-F)
- Qu, W., & Mudawar, I. (2002). Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink. *International journal of heat and mass transfer*, 45(12), 2549-2565. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00337-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00337-4)
- Qu, W., & Mudawar, I. (2003). Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks—I. Experimental investigation and assessment of correlation methods. *International journal of heat and mass transfer*, 46(15), 2755-2771. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00041-3)
- Qu, W., Yoon, S. M., & Mudawar, I. (2004). Two-phase flow and heat transfer in rectangular micro-channels. *J. Electron. Packag.*, 126(3), 288-300. DOI: 10.1115/1.1756589
- Reynaud, S., Debray, F., Franc, J. P., & Maitre, T. (2005). Hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional minichannels. *International journal of heat and mass transfer*, 48(15), 3197-3211. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.02.020>
- Rodriguez Ferreira, V., Sukumaran, J., Ando, M., & De Baets, P. (2011). Roughness measurement problems in tribological testing. In *Sustainable Construction and Design 2011 (SCAD)* (Vol. 2, No. 1, pp. 115-121). Ghent University, Laboratory Soete.
- Ross, P. J. (1988). Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design.
- Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2015). Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 444-469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.113>
- Shin, H. C., & Kim, S. M. (2022). Generalized flow regime map for two-phase mini/micro-channel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 196, 123298. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123298>
- Singh, R., Akbarzadeh, A., & Mochizuki, M. (2009). Sintered porous heat sink for cooling of high-powered microprocessors for server applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(9-10), 2289-2299. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.11.016>
- Steinke, M. E., & Kandlikar, S. G. (2006). Single-phase liquid friction factors in microchannels. *International journal of thermal sciences*, 45(11), 1073-1083. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.01.016

- Sudarja, S., Jayadi, F., Indarto, I., Deendarlianto, D., & Widyaparaga, A. (2001, August). The effect of liquid viscosity on the gas-liquid two-phase flow pattern in horizontal mini-channel. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2001, No. 1). AIP Publishing.
- Sun, L., & Mishima, K. (2009). An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(23-24), 5323-5329. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.041>
- Sun, Y., Zhang, L., Xu, H., & Zhong, X. (2011). Flow boiling enhancement of FC-72 from microporous surfaces in minichannels. *Experimental thermal and fluid science*, 35(7), 1418-1426. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.05.010>
- Tamanna, A., & Lee, P. S. (2015). Flow boiling instability characteristics in expanding silicon microgap heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 390-405. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.057><https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.057>
- Tao, W., Jun, W., & Xiaojun, W. (2012). Experimental study on two-phase flow and heat transfer through narrow rectangular channel under middle-low pressure condition. *Nuclear Power Engineering*, 33.
- Thome, J. R., Dupont, V., & Jacobi, A. M. (2004). Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: presentation of the model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(14-16), 3375-3385. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.01.006>
- Tran, T. N., Wambsganss, M. W., & France, D. M. (1996). Small circular-and rectangular-channel boiling with two refrigerants. *International Journal of Multiphase Flow*, 22(3), 485-498. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(96\)00002-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(96)00002-X)
- Tuckerman, D.B. & Pease, R.F. (1981). High Performance Heat Sinking For VLSI. *IEEE Electron. Dev. Lett. EDL-2*, 126-129. <http://dx.doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>
- Uddin, S. M., Mahmud, T., Wolf, C., Glanz, C., Kolaric, I., Volkmer, C., ... & Fecht, H. J. (2010). Effect of size and shape of metal particles to improve hardness and electrical properties of carbon nanotube reinforced copper and copper alloy composites. *Composites Science and Technology*, 70(16), 2253-2257 <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.07.012>
- Venkatesan, M., Das, S. K., & Balakrishnan, A. R. (2010). Effect of tube diameter on two-phase flow patterns in mini tubes. *The canadian journal of chemical engineering*, 88(6), 936-944. DOI 10.1002/cjce.20410
- Vincent, C., Silvain, J. F., Heintz, J. M., & Chandra, N. (2012). Effect of porosity on the thermal conductivity of copper processed by powder metallurgy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73(3), 499-504. <https://doi.org/10.1016/j.jpms.2011.11.033>

- Vontas, K., Miché, N., Marengo, M., & Georgoulas, A. (2022). A numerical investigation of the solid surface material influence on flow boiling within microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 217, 119006. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119006>
- Wang, G., Cheng, P., & Wu, H. (2007). Unstable and stable flow boiling in parallel microchannels and in a single microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(21-22), 4297-4310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.033>
- Wang, Y., & Wang, Z. G. (2014). An overview of liquid–vapor phase change, flow and heat transfer in mini-and micro-channels. *International journal of thermal sciences*, 86, 227-245. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.07.005>
- Weibel, J. A., Garimella, S. V., & North, M. T. (2010). Characterization of evaporation and boiling from sintered powder wicks fed by capillary action. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19-20), 4204-4215. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.043>
- Xu, B., Ooti, K. T., Wong, N. T., & Choi, W. K. (2000). Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27(8), 1165-1176. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(00\)00203-7](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(00)00203-7)
- Yang, W. P., & Tarng, Y. S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of materials processing technology*, 84(1-3), 122-129.
- Yu, W., France, D. M., Wambsganss, M. W., & Hull, J. R. (2002). Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube. *International Journal of Multiphase Flow*, 28(6), 927-941. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00019-8)
- Yue, J., Luo, L., Gonthier, Y., Chen, G., & Yuan, Q. (2008). An experimental investigation of gas–liquid two-phase flow in single microchannel contactors. *Chemical Engineering Science*, 63(16), 4189-4202. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.05.032>
- Zeng, J., Zhang, S., Tang, Y., Sun, Y., & Yuan, W. (2017). Flow boiling characteristics of micro-grooved channels with reentrant cavity array at different operational conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 1001-1012. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.128>
- Zhang, S., Chen, C., Chen, G., Sun, Y., Tang, Y., & Wang, Z. (2020). Capillary performance characterization of porous sintered stainless steel powder wicks for stainless steel heat pipes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116, 104702. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104702>
- Zhang, T., Cao, B., Fan, Y., Gonthier, Y., Luo, L., & Wang, S. (2011). Gas–liquid flow in circular microchannel. Part I: Influence of liquid physical properties and channel diameter on flow patterns. *Chemical engineering science*, 66(23), 5791-5803. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.035>

Zhao, Y., Chen, G., Ye, C., & Yuan, Q. (2013). Gas-liquid two-phase flow in microchannel at elevated pressure. *Chemical engineering science*, 87, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.10.011>





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Zeynep KÜÇÜKAKÇA MERAL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine mühendisliği Bölüm
- **Yükseklisans** : 2014, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011-2014 yılları arasında Makine Mühendisi olarak Özel Sektörde çalıştı.
- 2014 yılından bu yana Sakarya Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.
- 2014 yılında 7TH International Ege Energy Symposiumunda The Best Young Researcher Ödülü'nü kazandı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Meral, Z. K., & Parlak, N. (2023). Experimental Investigation on Two-Phase Heat and Fluid Flow in Porous Heat Sinks. *Heat Transfer Research*, 54(16).
- Meral, Z. K., & Parlak, N. (2023). Experimental characterization of pure copper heat sinks fabricated by powder metallurgy. *Science of Sintering*, (58).
- Meral, Z. K., & Parlak, N. (2018) . Mikro Ölçekte Çift Fazlı Akış ve Isı Geçişi İçin Gözenekli Yüzey Üretimi . *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*. 2 (2), 61 – 66.

DİĞER ESERLER:

Meral, Z. K., & Parlak, N. (2021). Experimental research and CFD simulation of cross flow microchannel heat exchanger. *Journal of Thermal Engineering*, 7(2), 270-283.