

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRO YAPILI YÜZEYLERDE GÖZENEK ÇAPLARININ VE GİRİNTİ
ARALIKLARININ PARAMETRİK OLARAK ÇEKİRDEKLİ KAYNAMA
ÜZERİNDE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Can İSPİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRO YAPILI YÜZEYLERDE GÖZENEK ÇAPLARININ VE GİRİNTİ
ARALIKLARININ PARAMETRİK OLARAK ÇEKİRDEKLİ KAYNAMA
ÜZERİNDE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Can İSPİR
(503141102)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503141102 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ali Can İSPİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MİKRO YAPILI YÜZEYLERDE GÖZENEK ÇAPLARININ VE GİRİNTİ ARALIKLARININ PARAMETRİK OLARAK ÇEKİRDEKLİ KAYNAMA ÜZERİNDE DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İ. Cem PARMAKSIZOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Aralık 2016**
Savunma Tarihi : **21 Aralık 2016**





Aileme,



ÖNSÖZ

Mayıs 2015'ten beri İTÜ Yüksek Sıcaklık Laboratuvarında birlikte çalışmakta olduğum, gerek yüksek lisans tez çalışmalarında ve bilimsel projelerde aktardığı kıymetli bilgi ve tecrübeler ile bu noktaya gelmemi sağlayan, her koşulda arkamda durarak çok değerli desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Seyhan Uygur Onbaşıoğlu'na teşekkür etmeyi borç bilirim.

Yüksek Lisans tez çalışmam süresince benden desteğini esirgemeyen aileme, teknik ve manevi destekleriyle deneysel çalışmalarında büyük yol katetmemi sağlayan ısı ve kütle geçişi laboratuvarlarında çalışan tüm çalışma arkadaşlarıma, kaynama ısı geçişinde sahip olduğu bilgi ve tecrübelerle çalışmama destek olan Sn. Prof. Dr. Mustafa Özdemir'e, deneysel çalışmalarında imalat konusunda verdiği destekten dolayı Arçelik A.Ş.'de prototip atölyesinde çalışmakta olan Tkn. Murat Bakyüz'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu Yüksek Lisans tez çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Sıcaklıkta Isı Geçiş Laboratuvarı'nda, TÜBİTAK tarafından 1001 programı kapsamında 115M403 No'lu proje kapsamında desteklenerek hazırlanmıştır.

Aralık 2016

Ali Can İSPİR
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı	1
1.2 Kaynama Isı Geçiş Mekanizması.....	1
1.2.1 Havuz kaynaması	2
1.2.2 Akış Kaynaması	4
1.3 Çekirdekli Kaynamada Temel Mekanizmalar	6
1.3.1 Kabarcık oluşumu.....	6
1.3.2 Aktif çekirdeklenme bölgeleri.....	8
1.3.3 Çekirdeklenme frekansı	8
2. KAYNAMA ISI GEÇİŞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ.....	11
2.1 Giriş.....	11
2.2 Pasif Yöntemler.....	13
2.2.1 Mikro ve nano yapılar.....	13
2.2.2 Girintili tüneller ve kaviteler ile yapılandırılmış yüzeyler.....	17
2.2.3 Gözenekli yapılar	21
2.2.4 Tel ve tel örgü tabakaları	22
2.2.5 Islanabilir kaplamalar	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	25
3.1 Gözenekli ve Girintili Tüneli Kaynama Yüzeyleri	25
3.2 Havuz Kaynama Deneyi.....	27
3.2.1 Deneysel ekipmanlar	27
3.2.2 Termoeleman yerleşimi	29
3.2.3 Isı akısı ve ısı taşınım katsayısı hesabı	30
3.2.4 Deneyin yapılışı.....	31
3.3 Su Verme / Damla Düşüm Deneyi.....	34
3.3.1 Deneysel ekipmanlar	35
3.3.2 Deneyin yapılışı.....	37
3.3.3 Buharlaşma zamanı ölçümü	38
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	41
4.1 Havuz Kaynama Deney Sonuçları	41
4.1.1 Çekirdekli kaynama eğrisi	44
4.1.2 Isı taşınım katsayısı – ısı akısı eğrisi	46

4.1.3 Çekirdeklenme davranışları	48
4.1.4 Kaynama ısı geçiş performans değerlendirmesi	51
4.1.4.1 Tünel aralıklarının etkisi	51
4.1.4.2 Gözenek çapının etkisi	53
4.1.5 Belirsizlik analizi	55
4.1.6 Literatür verileri ile değerlendirme	57
4.1.6.1 Yatay ve tünel mini tünelli yüzeyler	57
4.1.6.2 Gözenekli ve omega tünelli kaynama yüzeyleri	59
4.1.6.3 Çift girintili tünelli ve kaviteli kaynama yüzeyleri	60
4.2 Su Verme / Damla Düşüm Deney Sonuçları	62
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	73



KISALTMALAR

KIA	: Kritik Isı Akısı
LN	: Leidenfrost Noktası
TE	: Termo Eleman Çifti





SEMBOLLER

T_d	: Duvar sıcaklığı
T_{doyma}	: Sıvının doyma sıcaklığı
D_d	: Buhar kabarcığının ayrılma çapı
θ	: Dinamik temas açısı
σ	: Yüzey gerilmesi
ρ_s	: Sıvı yoğunluğu
ρ_g	: Gaz yoğunluğu
g	: Yer çekimi ivmesi
r_c	: Kavite ağız çapı
r_i	: Kavite iç çapı
D	: Kavite yüksekliği
d	: Kavite kalınlığı
f	: Çekirdeklenme frekansı
q''	: Isı akısı
k_{metal}	: Metalin ısıl iletkenlik katsayısı
T	: Sıcaklık
l	: Uzunluk
h	: Isı taşınım katsayısı
V	: Voltaj



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Kaynama yüzeylerinin boyutsal değerleri.....	27
Çizelge 4.1: Havuz kaynama deneyinde uygulanan akım, voltaj ve güç değerleri....	41
Çizelge 4.2: Havuz kaynama deney sonuçları çizelgesi.	43
Çizelge 4.3: Ölçüm elemanlarının belirsizlikleri	56



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Havuz kaynama eğrisi.	2
Şekil 1.2: Akış kaynama eğrisi.	4
Şekil 1.3: Kavitelerde buhar kabarcığı oluşumu.	7
Şekil 3.1: Kaynama yüzeylerinin tasarımında yatan öngörü.	26
Şekil 3.2: Kaynama yüzeylerinin geometrik özellikleri.	26
Şekil 3.3: Havuz kaynama deneysel elemanlarının yerleşimi.	29
Şekil 3.4: Isıtıcı blokta termo eleman yerleşimi.	30
Şekil 3.5: Termal macun sürülmüş yüzey altı termo elemanları.	31
Şekil 3.6: Isı geçirgenliğini azaltmak için kullanılan cam yünü.	32
Şekil 3.7: Çekirdeklenme davranışlarının gözlemlenmesi.	34
Şekil 3.8: Kızgın yüzeyde damlacığın buharlaşmasında gösterdiği davranış; 1) doğal taşınımlı kaynama 2) çekirdekli kaynama 3) geçiş kaynaması 4) film kaynama [38].	35
Şekil 3.9: Şırınga pompası.	36
Şekil 3.10: Su verme / damla düşüm deneysel elemanlarının yerleşimi.	37
Şekil 3.11: Hızlı kamera ile kızgın çelik yüzeye damla düşüm anının çekimi.	38
Şekil 3.12: Kızgın yüzeyde su damlacığının a) yüzeyle ilk teması b) kızgın yüzeyde kaynaması c) yüzeyden buharlaşması 4) yüzeyin tamamen kuruması	39
Şekil 4.1: 1.5G-3A-30-30 numunesinin 120V'da gerçekleştirilen havuz kaynama deneyindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.	42
Şekil 4.2: 1.5G-3.0A-30-30 için çekirdekli kaynama eğrisi.	44
Şekil 4.3: 1.5G-2.0A-30-30 için çekirdekli kaynama eğrisi.	44
Şekil 4.4: Düz-30-30 yüzeyi için çekirdekli kaynama eğrisi.	45
Şekil 4.5: Gözeneksiz girintili yüzey için çekirdekli kaynama eğrisi.	45
Şekil 4.6: 2.0G-2.0A-30-30 için çekirdekli kaynama eğrisi.	45
Şekil 4.7: Çalışılan kaynama yüzeylerinin kaynama eğrilerinin tek bir grafikte noktasal gösterimi.	46

Şekil 4.8: 1.5G-2.0A-30-30 için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.	46
Şekil 4.9: 1.5G-3.0A-30-30 için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.	47
Şekil 4.10: Düz-30-30 için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.	47
Şekil 4.11: Gözeneksiz girintili yüzey için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği. ..	47
Şekil 4.12: Çalışılan kaynama yüzeylerinin ısı taşınım katsayısı – ısı akısı eğrilerinin tek bir grafikte noktasal gösterimleri.....	48
Şekil 4.13: 80 DC voltajda buhar çekirdeklenmesinin hızlı kamera görselleri.	48
Şekil 4.14: 2 yüzeyin 90 dc voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.	49
Şekil 4.15: 2 yüzeyin 100 DC voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.	49
Şekil 4.16: 2 yüzeyin 110 DC voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.	50
Şekil 4.17: 2 yüzeyin 120 dc voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.	50
Şekil 4.18: 2 yüzeyin 125 dc voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.	51
Şekil 4.19: 1,5 mm gözenek çapı için kaynama eğrisi üzerinde aralıkların kıyaslanması.....	52
Şekil 4.20: 1,5 mm gözenek çapı için ısı taşınım katsayısı eğrisi üzerinde aralıkların kıyaslanması.....	52
Şekil 4.21: 2,0 mm tünel aralığı için kaynama eğrisi üzerinde gözenek çap etkisi. ..	53
Şekil 4.22: 2,0 mm tünel aralığı için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı eğrisi üzerinde gözenek çap etkisi.	54
Şekil 4.23: R.Pastuszko'nun geliştirdiği kaynama yüzeyleri [23].	57
Şekil 4.24: Isı taşınım katsayısı ve ısı akısı üzerinde 1,5 mm gözenek çapı için tünel aralığının etkisi [23].	58
Şekil 4.25: Deng, D. vd'nin çalışmasında yer alan gözenekli ortamın ve girintili tünellerin bulunduğu kaynama yüzeyleri [29].	59
Şekil 4.26: Geliştirilen kaynama yüzeyleri ve Deng vd.'nin geliştirdiği kaynama yüzeylerinin performanslarının kaynama eğrisi üzerinde gösterimi [29].	59
Şekil 4.27: A.K. Das vd.'nin çalışmasında yer alan kaynama yüzeyleri [9].	60

Şekil 4.28: Geliştirilen kaynama yüzeylerinin ve A.K.Das vd'nin çalışmasında kaynama yüzeylerinin kaynama performanslarının ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği üzerinde gösterimi [9].	61
Şekil 4.29: a)140 ⁰ C, b)150 ⁰ C yüzey sıcaklığında, alüminyum yüzeylerin su verme / damla düşüm deney sonuçları [41].	62
Şekil 4.30: Şekil 2. a)140 ⁰ C, b)150 ⁰ C yüzey sıcaklığında, çelik yüzeyin su verme / damla düşüm deney sonuçları [41].	63
Şekil 4.31: a) Çelik yüzey b) Alüminyum yüzey için temas açısı	64
Şekil 4.32: a)140 ⁰ C, b)150 ⁰ C, c)160 ⁰ C yüzey sıcaklığında 1.5G-3A-30-30 test numunesi için su verme / damla düşüm deney sonuçları.....	65
Şekil 4.33: a)140 ⁰ C, b)150 ⁰ C, c)160 ⁰ C yüzey sıcaklığında 1.5G-2.0A-30-30 test numunesi için su verme / damla düşüm deney sonuçları.....	66



MİKRO YAPILI YÜZEYLERDE GÖZENEK ÇAPLARININ VE GIRINTİ ARALIKLARININ PARAMETRİK OLARAK ÇEKİRDEKLİ KAYNAMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Kaynama en önemli faz değişim yöntemlerinden biri olup fiziksel yapısı oldukça karmaşıktır. Günümüzde enerji dönüşüm sistemlerinde, ısı pompalarından oluşan iklimlendirme sistemlerinde, elektronik soğutmasında ve buhar üretimi yapan ileri mühendislik yapıtlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Sistemlerin enerji verimliliği açısından çeşitli kaynama ısı geçiş iyileştirme yöntemleri son yüzyılda birçok araştırmacının ortak çalışma konusu haline gelmiştir. Bu iyileştirme yöntemleri aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dışardan bir etkinleştirme mekanizması ile kaynama ısı geçişine müdahale eden metodlar aktif yöntemler olarak, kaynama yüzey yapısı üzerinde bir takım değişimler yapan metodlar ise pasif yöntemler olarak incelenmektedir.

Pasif yöntemlerin kapsamında olan kaynama ısı geçiş iyileştirme yöntemlerinden biri de yüzey üzerine girintili kavite ve tünellerin yapılandırılmasıdır. Bu yapılar gözle görülebilir mertebede olduklarında yüzeyde ısı geçiş alanını arttırmalarının yanı sıra çekirdekli kaynama ısı geçiş mekanizmalarını da doğrudan etkilemektedirler. Birçok çalışma çekirdekli kaynama mekanizmasında kaynama ısı geçiş performansını doğrudan etkileyen çekirdeklenme yoğunluğu, aktif çekirdeklenme bölgeleri sayısı, çekirdeklenme frekansı, sıvının emilimi, buhar kabarcıklarının yüzeyden tahliyesi gibi performans olguları üzerinde iyileştirme sağlayacak yüzey yapıları geliştirmeyi amaç edinmişlerdir.

Çekirdekli kaynama ısı geçiş prosesinde buhar kabarcıkları yüzeyden uzaklaştırılırken yerlerine yeteri miktarda sıvı alınması en çok arzu edilen durumdur. Buhar kabarcıklarının yüzeyden uzaklaştırılamaması yüzey üzerinde kuruluğa ve kızdırma derecesinin ani artışına dolayısıyla ısı taşınım katsayısının düşümüne neden olurken fazla miktarda sıvının yüzeyde buhar kabarcığından boşalan yerlere hücum etmesi ısı akısını olumsuz yönde etkiler. Bu amaçla girintili kaviteli ve tünelli yapıların yanında doymuş sıvının veya kızgın buhar kabarcıklarının transportasyonu için gözenekli yapıların da kullanılması kaynama ısı geçiş için pozitif bir etki yaratmaktadır. Gözenekli yapılar bu bağlamda incelendiğinde yüzeye yeterli sıvı emilimi yapmak ve oluşan buhar kabarcıklarını yüzeyde birleşmelerinden önce yüzeyden uzaklaştırmak için uygun oldukları düşünülebilir.

Bu çalışmada girintili tünelli ve gözenekli yapıların boyutları parametrik olarak deneysel incelemeye tabi tutulmuştur. 1,5 mm ya da 2,0 mm gözenek çapına, 2 mm, 3 genişliğine sahip 3 kaynama yüzeyi, 3 mm tünel genişliğine sahip gözeneksiz kaynama yüzeyi ve herhangi bir işleme bulunmayan düz kaynama yüzeyi üzerinde ısı akısı, yüzey kızdırma derecesi, ısı taşınım katsayısı, çekirdeklenme davranışlarının belirlenmesi amacıyla havuz kaynama deneyi yapılmıştır. Bu yüzeyler geometrik

ölçülerine göre adlandırılmıştır: 1.5G-2.0A-30-30, 1.5G-3.0A-30-30, 2.0G-2.0A-30-30, 3.0A-30-30 ve DUZ-30-30. G harfi gözenek çapını, A harfi tünel aralığını, son iki sayı ise incelenen yüzeyin kesit ölçülerini mm cinsten ifade etmektedir.

Tasarlanan kaynama yüzeylerinin kaynamadaki ısı geçişini iyileştirmesi amacıyla gösterdikleri performans literatürde yer alan girintili kaviteli / tünelli ve gözenekli yapılarda yapılan çalışmalardaki sonuçlarla kıyaslanmıştır. En başarılı sonucu 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyi göstermiştir. Bu yüzey üzerinde $120,91 \text{ kW/m}^2$ ısı akısında yüzey kızdırma derecesi $7,4^\circ\text{C}$ olarak ölçülürken, bu değer düz yüzey için $118,9 \text{ kW/m}^2$ 'de $25,4^\circ\text{C}$ 'dir. Bu sonuç girintili tünelli ve gözenekli yapıların etkinliğini ön plana çıkarmaktadır.

Kaynama eğrisinde görüleceği üzere yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça geçiş ve film kaynama bölgelerinin rejimleri görülmeye başlar. Bu bölgelerde yüzey üzerinde buhar tabakası birleşerek bir buhar yastığı meydana getirir. Sıvı yüzeye ne kadar çok yayılırsa yani temas açısı ne kadar düşük olursa ve sıvıya temas eden sıcak yüzey ne kadar fazla olursa faz değişimi o kadar hızlı gerçekleşir.

Havuz kaynamada ulaşılması mümkün olmayan yüzey kızdırma derecelerinde tasarlanan yüzeylerin yüksek sıcaklıkta ısı performanslarını değerlendirme amacıyla su verme / damla düşüm deneyleri yapılarak yüzey üzerine damlayan damlacığın buharlaşma zamanı ölçülmüştür. TUBİTAK tarafından desteklenen “Buhar Kullanılan Cihazlarda Buhar Üretme ve Aktarma Sisteminin Enerji Verimliliğini Artırmaya Yönelik Tasarımı” adlı 115M403 nolu proje kapsamında incelenen ütü kaynama taban yüzeylerinin performansları ile kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmada ütü taban yüzeylerinden Alüminyum yüzey düşük yüzey sıcaklığında daha iyi sonuç verirken sıcaklık değeri arttıkça tasarlanan yüzeylerin performansları diğerlerinden daha üstün hale gelmiştir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECT OF PORE DIAMETER AND REENTRANT CAVITY WIDTH ON NUCLEATE BOILING IN MICRO STRUCTURED SURFACE

SUMMARY

Boiling phase change process is one of the most efficient heat transfer methods and it is hard to understand physics of boiling mechanism. Boiling phase change process is often preferred in various energy conversion units, heat exchange systems, vapor generation mechanisms, heat pumps used in air conditioning systems and cooling of high heat energy density electronic components. In order to increase energy efficiency of the systems, there are a lot of research studies dealing with various boiling heat transfer enhancement techniques. The different enhancement techniques are examined in two groups: Active techniques and passive techniques. Active enhancement techniques involve boiling process externally requiring an external activator or power supply. In passive enhancement techniques, boiling heat transfer is improved by altering boiling surface structure and structure characteristics.

Nano/micro structures manufactured in MEMS (microelectro mechanical systems) techniques, covering with woven screens, surface structured with porous media, reentrant cavities and tunnel structures, wettability film covers are the subjects of passive enhancement methods. One of these methods is the structuring boiling surface with reentrant cavities / tunnels and pores. These structures may affect the nucleate boiling process also increase the heat transfer area when they can be seen. Many research studies aims to develop the boiling structures providing an enhancement on the parameter of boiling heat transfer mechanism such as bubble frequency, active nucleation site density, replenishing of saturated liquid into surface and releasing of bubbles.

It is very desirable situation that enough amount of liquid is replenished while bubbles are released from boiling surface. When the bubbles cannot move away from the surface merging each other, it results in dry out of the surface. This causes the sudden increase of wall superheat and the sharp decrease of the heat transfer coefficient. On the other hand occupation of excessive amount of liquid occupy the cavities and tunnels in surface affect the performance boiling heat transfer adversely. For heat transfer performance, besides usage of reentrant cavity and tunnel structure for increasing active nucleation site density, it is sensible to use pore structures on tunnels and cavities for transportation of saturated liquid or superheated vapor bubbles. Because it can be considered that pore structures appropriate to release vapor bubbles before merging and replenishing amount of liquid.

In this research, the effect of pore diameter and reentrant cavity width were examined in terms of boiling heat transfer in micro structured surfaces. Reference structure geometry was the flat and polished surface. Reentrant cavity width effect and pore diameter effect on the boiling heat transfer performance were examined and compared

with the flat surface separately. Five boiling surface structured with pores and reentrant cavities / tunnels were designed, manufactured and investigated to determine pore diameter and width effect on nucleate boiling mechanism. The boiling surfaces are categorized and named according to geometric dimensions: 1.5G-2.0A-30-30, 1.5G-2.0A-30-30, 2.0G-2.0A-30-30. First column is defined as pore diameter in milimetric scale, secound column is reentrant cavity width in milimetric scale, third and fourth column are expressed as geometric dimension of the whole surface.

An experimental study was carried out in this study. Although there are many theoretical and numeric study for modelling boiling mechanisms, the studies were inadequate to predict and explain the physics of boiling mechanisms. Experimental studies are always the most reliable method to understand boiling heat transfer. In order to evaluate the performance of boiling heat transfer of the design structured surfaces, pool boiling experimental setup and droplet impingement experimental setup are designed and installed. In pool boiling experimental setup, the boiling surface is heated by two dc power supply units in fully water filled pool. The temperatures in system reach the steady state level in approximately half-two hours and the important measurements, calculations and observations can be held. The measurement can be done by the thermocouples in different location. One of the most important parameter for the performance is wall superheat which can be measured by thermo couples in subsurface. The heat flux transfered to boiling liquid is calculated by one dimension Fourier heat conduction equation. The boiling heat transfer coefficient which is the most important parameter, is calculated by the equation between heat flux and wall superheat. Nucleation behaviour and bubble formation during the boiling is observed by using high speed camera because it is hard to see by bare-eyes. The wall superheat cannot be reach very high levels because of safety and voltage limitation of dc power supply. So the behaviour and effect of the surfaces on the boiling heat transfer can be investigated in droplet impingement experiment setup at high temperature levels. In droplet impingement experimental setup, a liquid droplet is dropped and impinged on heated surface. The evaporation time of the liquid droplet is very signifciant to determine the boiling heat transfer performance. To measure evaporation time, high speed camera can be best option to measure evaporation time of the droplet.

Five boiling surfaces were experimentally investigated and the informations about the boiling heat transfer performance of the surfaces were obtained in this study. First of all, it is very obvious that pore structures provided better performance for the boiling heat transfer enhancement when the surface of 1.5G-3.0A-30-30 compared with unpored 3.0A-30-30 surfaces.

The decrease of the reentrant cavity/tunnel width increased the heat transfer coefficient when the surfaces having same pore diameter were evaluated. The positive effect can not be explained only by increase of heat transfer area, but also the increment of the reentants provided new active nucleation sites. The increase of nucleation site density was observed in high speed camera medias. In addition, it was seen that bubbles moved to liquid level merging with each other and in the form of turbulent jet. This merging was happened just above the surface with the increase of heat flux. This situation caused the wall superheat increased and colour of surface darkened.

1.5G-2.0A-30-30 boiling surface showed the best heat transfer performance when it is compared with other structured surfaces. Lower reeantrant cavity with and pore structures provided high enhancement in boiling heat transfer. Decrease of reentrant cavity width increased the heat transfer area and active nucleation sides. Pores in

surface helped replenishment of the liquid instead of departed vapour and made easier the release of bubbles.

The results of pool boiling experiments were compared with the results of reentrant cavity / tunnel structures in literature. The results of other studies are guide for the future studies to obtain better heat transfer performance of studied boiling surfaces such as structuring grooves inside the tunnels, decreasing the pore diameter, using porous media, using vertical tunnels addition to horizontal ones.

As it can be seen in boiling curve, transition and film boiling regime are seen at high temperature levels. In this regions, bubbles merge on the surface and create vapor film resulting in the sudden increase of wall superheat. The lower contact angle and the more superheated point to touch liquid cause to decrease evaporation time. In order to investigate heat transfer performance of the surfaces at high temperature levels in which it is hard to reach in pool boiling experimental setup, two selected surfaces were tested in droplet impingement experimental setup. The evaporation time of the droplets impinged on the surfaces compared with that of steam chamber surfaces of iron machine which is being examined as part of a scientific Project namely “Design of Steam Generators and Channels for The Steam Based Devices for Maximum Efficiency” funded by TUBITAK (The Scientific And Technological Research Council of Turkey). The reentrant cavity width effect was examined in these experiments. 1.5G-3.0A-30-30 and 1.5G-2.0A-30-30 were selected for the experiment. In the experiments, while Aluminium iron surface showed better performance at low surface temperatures, the studied surfaces performance were getting higher with the increase of temperature levels.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı

Kaynama ısı geçiş proiesi enerji dönüşüm teknolojilerinde, güç santrallerinde, atık ısı geri kazanım sistemlerinde, elektronik bileşenlerin soğutulmasında ve buhar üretim mekanizmalarının bulunduğu cihazlarda sıklıkla tercih edilen etkili bir ısı geçiş yöntemidir. Bu prosesinin performansı kaynama yüzeyinin yapısına önemli oranda bağlıdır. Kaynama yüzey yapısı kaynama ısı geçişinde gerçekleşen buhar kabarcıklarının ekirdeklenmelerini arttıracak, gelişimini tamamlayan buhar kabarcığının yüzeyden hızlıca ayrılmasını ve yüzeyden ayrılan buhar kabarcıklarının yerine yeterli miktarda doymuş sıvı girişini sağlayacak bir tasarıma sahip olması gerekir. Ayrıca yüzeyin sıvı damlacığının ve buhar kabarcığının sıcak yüzeyle daha iyi temas kurması için ıslatılabilir diğer bir tabirle sıvı sever olması gerekir. Literatürde kaynama ısı geçiş iyileştirmesi için kaynama yüzey yapısında değişimler yapmayı n gören çeşitli pasif yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında kaynama yüzey yapısında girintili tüneller, kaviteler ve gözenekler oluşturarak yüzeyin kaynama ısı geçiş performansı arttırılmaya çalışılmıştır. Havuz kaynama deneylerinde ısı akısına bağlı olarak yüzey kızdırma derecesinin azaltılması, kaynama ısı taşınım katsayısının arttırılmasına bağlı olarak oluşturulan yapıların performansları değerlendirilmiştir. Tez kapsamında kaynama ısı geçiş iyileştirmesi için tasarlanan girintili ve gözenekli kaynama yüzeylerinin kaynama ısı geçiş performansları havuz kaynama ve su verme / damla düşüm deneylerinde gözenek çapları ve girinti aralıkları parametrik olarak incelenecektir. Tasarlanan yüzeylerin kaynama ısı geçiş performansları; literatürde yer alan çalışmalardaki girintili tnelller ve kavitelerle yapılandırılmış yüzeylerin ve 115M403 nolu TUBİTAK 1001 proiesi kapsamında incelenen t kaynama taban yüzeylerinin performansı ile kıyaslama yapılacaktır.

1.2 Kaynama ısı Geçiş Mekanizması

Kaynama faz değişim proiesi, buhar kabarcıklarının kaynamanın gerçekleştiği kabul edilen kızgın yüzey ve sıvı arayüzünde oluşmasına denir. Bu bağlamda buhar / sıvı arayüzeyinde gerçekleşen faz değişimi olan buharlaşma prosesinden ayrılır.

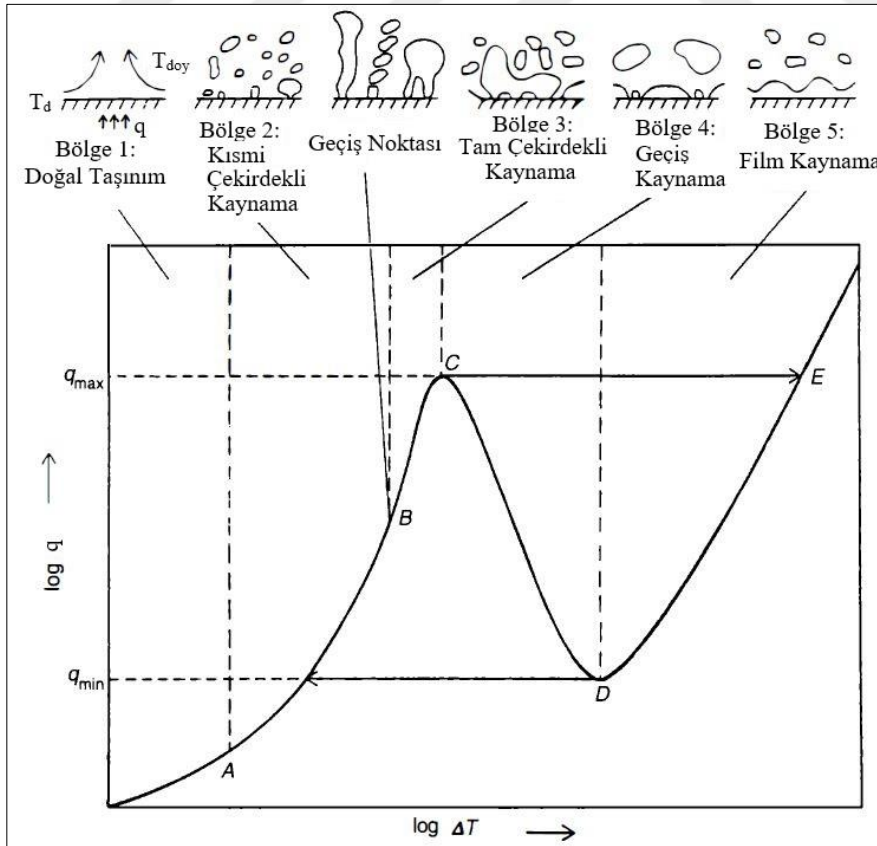
Kaynama ısı geçiş prosesi etkili bir ısı geçiş yöntemi olması bakımından çeşitli enerji dönüşümü yapan sistemlerde, ısı değıştiricilerinde, atık ısı geri kazanım sistemlerinde ve yüksek atık ısının bulunduğu elektronik bileşenlerde sıklıkla tercih edilir.

Kaynama ısı geçil prosesi temel olarak iki bölüme ayrılır:

- I. Havuz kaynaması
- II. Zorlanmış Akış Kaynaması
 - i. İç Akış Kaynaması
 - ii. Dış akış Kaynaması

1.2.1 Havuz kaynaması

Herhangi bir akışkan yığın hareketi olmayan, içi doymuş sıcaklıkta sıvı dolu bir kapalı kaba ısı geçişi olması durumunda havuz kaynama faz değışim prosesi gerçekleşir. 1934 yılında S. Nukiyama tarafından sıvılara batırılmış elektrikle ısıtılan nikrom ve platinyum teller kullanılarak gerçekleştirilen havuz kaynama deneyinde kızgın yüzeyden sıvıya aktarılan ısı akısının yüzey ile doymuş sıvı arasındaki sıcaklık farkı olan yüzey kızgınlık derecesi ile değıştiğı görülmüştür [1]. Bu değışime bağı olarak kaynama farklı rejimler göstermiştir. Şekil 1.1’de kızgınlık derecesine bağı olarak çizilen ısı akısı grafiğinde 4 farklı kaynama rejimi görülmektedir.



Şekil 1.1: Havuz kaynama eğrisi.

Şekil 1.1’de ΔT kızgınlık derecesi;

$$\Delta T = T_d - T_{doy} \quad (1.1)$$

Kaynama eğrisi üzerinde A noktasına kadar ısı akısı ile kızgınlık derecesi lineer olarak artar. Kaynama ısı geçiş prosesi bu noktaya kadar yalnızca doğal taşınım ile gerçekleşir. A noktasında buhar kabarcıkları kızgın yüzeyde görünmeye başlar. Yüzeyde yer alan kavite ve girintiler bu kabarcıklarının çekirdeklenmeleri için elverişli bir ortam meydana getirirler. Bu noktada ayrıca yüzeyin ıslatılabilirliği arttıkça çekirdeklenme ötelenir. Bu durum kritik ısı akısının da ötelenmesine de olanak sağlamış olur. Islatılabilirliği daha düşük olan bir yüzey için yüksek olan yüzeyde aynı ısı akısı için daha düşük kızgınlık derecesi görülmüş olur.

A noktasından sonra çekirdekli kaynama evresi başlar, burada kaynama eğrisinin eğiminde artış görülür. Çekirdekli kaynama kısmi ve tam gelişmiş çekirdekli kaynama olarak iki evrede incelenir. Kısmi çekirdekli kaynamada yüzeydeki aktif çekirdeklenme bölgelerinden ayrılan buhar kabarcıkları kaynamanın gerçekleştiği kapta sıvı seviyesine doğru çıkmaya başlarlar. Aktif çekirdeklenme bölgesi sayısı ve buhar kabarcıklarının oluşum frekansları ısı akısı ve yüzey kızdırma derecesi ile artar. Tam çekirdekli kaynama bölgesinde yüzeyden ayrılan buhar kabarcıkları sıvı seviyesine doğru ilerlerken birleşerek bir akım jeti şeklinde hareket ederler. Daha geniş birleşmelerde buhar kabarcıkları mantar şeklini halini alırlar [3].

Buhar kabarcıklarının yüzey üzerinde birleşimleri çekirdekli kaynamanın bitiş evresini hazırlar. Buhar kabarcıklarının yüzey üzerinde birleşmeleri kaynama yüzeyi ile doymuş sıvı arasında bir buhar yastığı oluşmasına neden olur. Bu nedenle kaynama yüzeyinden sıvıya aktarılan ısı akısı düşmeye başlar. Isı akısının tam olarak düşmeye başladığı nokta kaynama ısı geçişinin doyumluk noktası, ısı akısı da kritik ısı akısı (KIA) olarak adlandırılır. Bir diğer tabirle, kaynama faz değişim prosesini ısı geçiş mekanizması olarak kullanan cihazların güvenli biçimde çalışabilmeleri için yüzey yapılarına bağımlı olarak aktarabilecekleri / geçirebilecekleri maksimum ısı akısı miktarına kritik ısı akısı (KIA) adı verilir. Bu cihazların başında nükleer reaktörün soğutması gelmektedir [4].

Kritik ısı akısı (KIA) aşıldığında genellikle yüzeyler buhar filmi ile kaplanmakta ve kızgın yüzey ısı akısını aktaramadığından hızlı ve aşırı ısınmaya maruz kalmaktadır. Bu durum sonucunda yüzey sıcaklığı hızla artar ve genellikle bu artış yüzey malzemesi metalin ergime sıcaklık değerlerine ulaşılmasına neden olur. Havuz kaynama deneylerinde 4. Ve 5. Bölgeler olan geçiş ve film kaynamaları görülemez. C noktasından E noktasına ulaşılır. Bu da belirtildiği gibi metalin ergime sıcaklığına tekabül etmektedir.

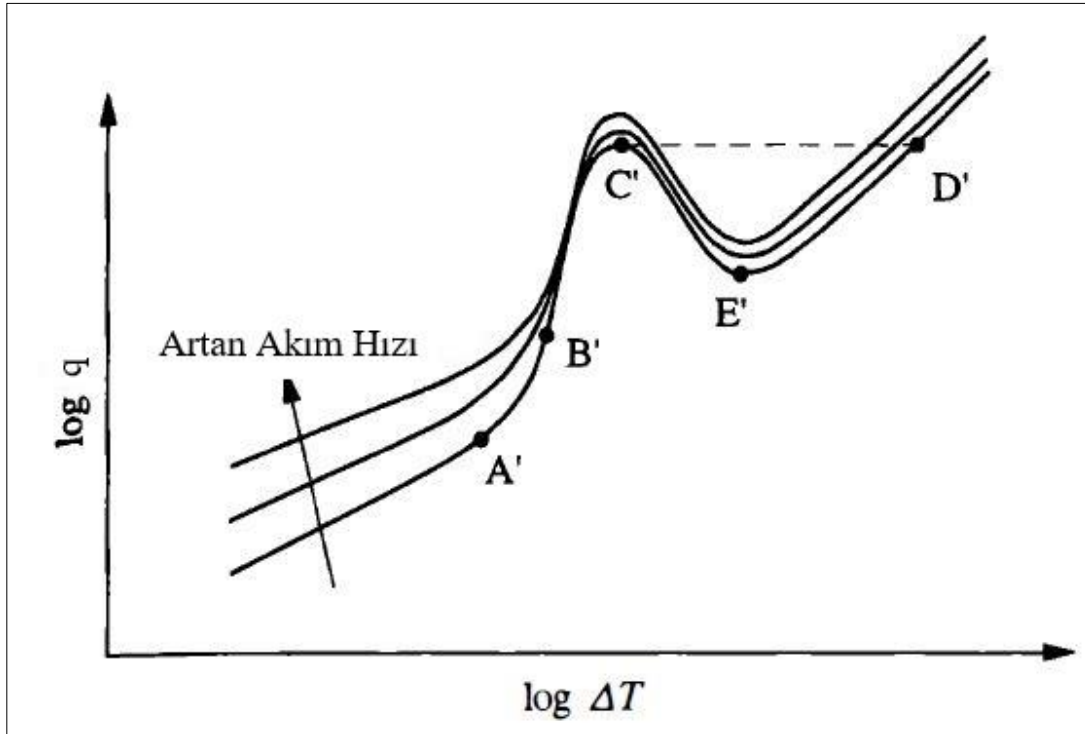
ED noktaları arasındaki 5. Bölge film kaynamayı temsil etmektedir. Film kaynama bölgesinde yüzey tamamıyla buhar filmiyle kaplıdır. Film kaynamanın başlangıcı olan D noktası, aktarılan ısı akısının minimum değerini aldığı Leidenfrost noktası (LN) olarak bilinir. Leidenfrost noktasında yüzeyde dengeli buhar filmi ile kaplıdır, ısıtma işleminin devam etmesi durumunda dengeli buhar filmi dağılmaya başlar. Aşırı ısınmış yüzey aşırı soğumuş sıvı ile karşılaştığında sırasıyla 4., 3. ve 2. bölgelere geri dönülerek hızla soğur ve çekirdekli kaynama rejimi gözlenir.

Çekirdekli kaynama ile film kaynama arasındaki bölgenin adı geçiş kaynama bölgesi olarak bilinir. Her çekirdekli hem de film kaynama rejimlerinin tüm özelliklerini taşımaktadır. Oldukça kararsız bir rejime sahip olan geçiş kaynaması film kaynamada olduğu gibi havuz kaynama deneyinde görülemeyip ancak sıcaklık kontrollü su verme / damla düşüm deneylerinde incelenebilir.

1.2.2 Akış Kaynaması

Havuz kaynamasında elde edilen grafiğe benzer bir grafik de zorlanmış akış kaynamasında elde edilir. Akımın ve ısıtıcının yerleşimine göre boru içi kaynama gibi iç akış kaynaması veya dış akış kaynaması olarak ikiye ayrılır.

İç akış kaynamasında ısıtıcı yüzeyde oluşan buhar kabarcıkları yüzeyden ayrılmaları neticesinde akım yönünde hareket ederler. Bu durum Şekil 1.2’de görülen akış kaynama eğrisini akım hızına bağlı olarak etkiler.



Şekil 1.2: Akış kaynama eğrisi.

Akış kaynama eğrisinde yer alan B noktasına kadar akış hızı arttıkça aynı kızgınlık derecesi için daha yüksek ısı akıları görülebilmektedir. Bu durum oluşan buhar kabarcıklarının akış hızı arttıkça yüzeyi daha hızlı terketmeleri ve yeni buhar kabarcıklarının çekirdeklenmelerine olanak sağlamaları ile açıklanabilir.

Akış kaynamasının evrelerine değinmek gerekirse ilk olarak A noktasına kadar tek fazlı zorlanmış taşınım ile ısı geçişi gerçekleşmektedir. Isı geçiş katsayısı akış hızı ile artmaktadır. Bu bölgede ısı geçiş katsayısı yüzey kızgınlık derecesine bağımlılığı oldukça düşükken ısı akısı ile yüze kızgınlık derecesi lineer olarak artmakta olduğu görülebilmektedir.

A'B' bölgesi tam gelişmiş çekirdekli kaynama için bir hazırlık evresi olarak kabul edilir ve kısmi çekirdekli kaynama olarak adlandırılır. Bu bölgede buhar kabarcıkları oluşur, toplam ısı geçiş katsayısı üzerinde hem tek fazlı doğal taşınım ısı geçiş mekanizması ile hme de faz değişiminden kaynaklı ısı geçişinin etkisi vardır. Isı akısının yüzey kızgınlık derecesindeki etkisi zorlanmış taşınımına göre daha fazla iken tam gelişmiş çekirdekli kaynamaya göre düşüktür.

Tam gelişmiş çekirdekli akış kaynaması için farklı akım hızlarında kaynama eğrileri birbirleri üzerine çakışmakta, aynı eğriyi takip etmektedirler. Bu bölgede buhar kabarcıkları kaynama yüzeyinden ayrılırken birleşip kabarcıklı, sürüklenen ve halkasal akım yapıları şeklinde akış doğrultusunda hareket ederler. Halkasal akım için duvar üzerindeki sıvı filmi çok incelir ve çekirdekli kaynama durma noktasına gelir. Bu noktada sıvı-buhar arayüzünde buharlaşma ile ısı geçişi mevcuttur. Yüzeydeki kuruluk çekirdekli kaynama durduğundan azalır ve yüzey kızgınlık derecesi tam gelişmiş kaynamaya göre aynı ısı akısı için daha düşük seviyelerde yer alır.

Düşük akım hızı koşullarında bir müddet sonra sıvı filmi tamamiyle kurur ve doygunluk noktası olan kritik ısı akısı (KIA) noktasına ulaşılır. Bu noktadaki ısı akısı aynı zamanda “dry-out” kuru ısı akısı olarak da bilinir ve genellikle buhar kazanlarında karşılaşılan bir durumdur.

Yüksek akım hızı için akış kaynamasında kritik ısı akısı (KIA) havuz kaynamasına benzer meydana gelir. Sıvı filmi yüzeyden ayrılan buhar kabarcıklarının yerini dolduramaması durumunda ısı akısı düşmeye başlar. Kritik ısı akısı literatürde çekirdekli kaynamanın sonu, kaynama krizi veya yanma ısı akısı olarak bilinir. Dolayısıyla akış kaynama için kritik ısı akısı (KIA) sistem basıncına, yüzey yapısına ve akım hızına bağlı olduğu sonucuna varılır. Kritik ısı akısından sonra sıcaklık hızla yükselir ve C'D', D'E' bölgeleri pas geçilerek havuz kaynamasındaki kaynamada olduğu gibi E' noktasına ulaşılır.

Buhar filmi akış kaynamada kaynama yüzeyinden ayrılır, bu konfigürasyona ters halkasal akım kaynaması adı verilir. Sıvı filmi tamamen kurduğunda yüzey buhar akımının etkisiyle bir miktar soğur ve yüzeyde buhardan sıvı faza geçiş göstergesi olarak sıvı zerreciklerinin oluştuğu görülebilir.

C'D' bölgesi geçiş kaynamsı olarak bilinir ve havuz kaynamada olduğu gibi kararsız bir rejim mevcuttur. Bu nedenle ısıtıcı kontrollü bir deney yapısı ile bölgenin incelenmesi oldukça zordur.

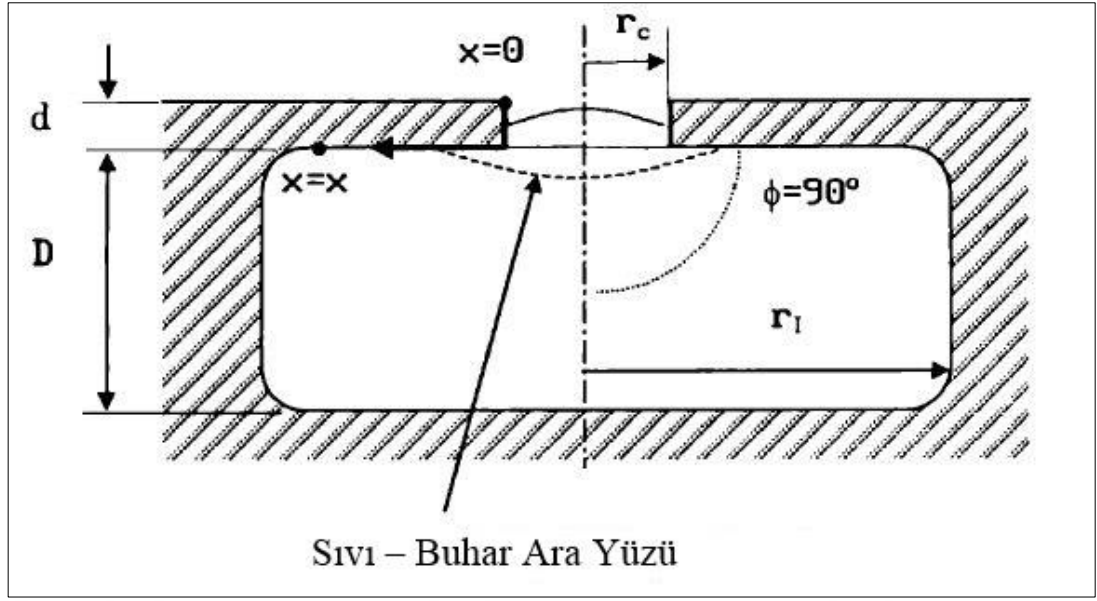
1.3 Çekirdekli Kaynamada Temel Mekanizmalar

Çekirdekli kaynama ısı geçişinde kızgın yüzey üzerinde buhar kabarcığının oluşması, gelişmesi ve yüzeyden ayrılması oldukça önem arz eden aşamalardır. Bu prosesin iyi yorumlanması için çekirdeklenme fiziğinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

1.3.1 Kabarcık oluşumu

Kızgın yüzey üzerinde buhar kabarcıklarının oluşması için çok sayıda akışkan molekülünün aynı anda yüksek etkinleşme enerjisine sahip olması gerekir. Yüksek enerjili moleküller titreşerek kümecikler, kümecikler de birleşerek buhar kabarcıklarını meydana getirdiği varsayılır. Bir diğer yandan buhar kabarcıklarının oluşması için yüzeyin belirli bir sıcaklıkta olması gerektiği düşünülür. Suda kabarcık oluşumu için 1 atm basınçta saf su için yapılan deneylerde minimum 5°C gibi düşük bir kızgınlık derecesine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Kabarcıklanma düz yüzey üzerinde mikroskobik oyuklarda (kaviteler) oluşmaya başlar. Bu nedenle oyuk çekirdeklenmesi kabarcık oluşumunun anlaşılması bakımından önemlidir. Bu tez çalışmasında geliştirilen yüzeylerde kavitelerin, tünellerin yer almasından dolayı kavitelerde kabarcık oluşumunun fiziğine değinilme gereği duyulmuştur.

Şekil.1.3'de kaynama yüzeyi üzerinde yer alan bir kavite ağzında, genişleme açısı 90°C'den daha fazla olan sıvı damlacığı ve buhar oluşumu görülmektedir. Eğer sıvının ya da yüzeyin temas açısı daha yüksek olursa genişleme açısı azalır. Bu durumda sıvının iç duvarlara temas edememesi ile sonuçlanabilir. Çalışma şekline göre bu durum olumlu veya olumsuz bir etki yaratabilir. Ancak sıvının kızgın yüzeye teması ne kadar çok olursa kaynama ısı geçiş alanı da o kadar artmış olur. Bu durum kabarcık oluşum mekanizmasının karakteristik özelliklerinin anlatımında daha iyi ifade edilmiştir.



Şekil 1.3: Kaviterde buhar kabarcığı oluşumu.

Kaviterdeki buhar kabarcıklarının oluşum mekanizmasını ve kaynama ısı geçişine olan etkilerinin anlaşılabilmesi için karakteristik özelliklerine değinmek gerekir:

1. Kaynama ısı geçiş prosesinde buhar kabarcıklarının oluşumu devam ederken buhar kaviterin içerisinde sıkıştırılırsa bu sıvı buhar ara yüzünde bir termodinamik denge olduğu anlamı taşır. Bu noktada dengeyi bozacak biçimde sıcaklık farkı artarsa buhar kabarcığı büyür ve eğrilik çapı azalır. Bir müddet sonra buhar kabarcığı kavite içerisinde kararsız bir hale gelir. Sıcaklığın artışı etrafındaki doymuş sıvı ile olan ısı geçişini de arttırır ve kabarcık gözle görülebilir bir hale gelir. Yüzeyin kızgınlık derecesi daha önce bahsedilen eşik değeri aşmadan bu çekirdeklenme prosesi meydana gelmez.
2. Buhar kabarcıklarının yüzey üzerinde birleşip buhar yastığı oluşturmalarındansa tekil olarak kavitede kısıtılmaları ve birbirlerine bağlanan tünellerle yüzeyden uzaklaştırılmaları kaynama ısı geçiş iyileştirmesi için daha uygun olmaktadır.
3. Kavite ağzı içerisine sıvı girişine müsaade etmeyecek kadar keskin olursa buharlaşma yalnızca kavite girişinde olur ve iç yüzeylere herhangi bir sıvı teması gerçekleşmez. Özellikle yüksek ısı akısı bölgelerinde kaviterin bu bağlamda daha düşük bir hacme sahip olmaları kaynama ısı geçiş performansı bakımından daha uygun olmaktadır. Bu nedenle kullanılan sıvıya, çalışma koşullarına ve fiziksel koşullara da bağlı olarak kavite ağızlarının optimal bir değeri olduğu sonucu rahatlıkla çıkarılabilir.

4. Kaviterler çeşitli olarak nano boyutlardan görülebilir boyut mertebelerinde olabilmelerinin yanında talaşlı imalat, sinterleme, delikli metal örtüleri ile kaplama, yüzeyin kazınması, aşındırıcı malzemeler kullanılarak işleme yapmak gibi birçok üretim metodu ile oluşturulabilmektedirler. Her bir imalat yöntemi kaynama ısı geçişi açısından kavitelere farklı karakteristik özellikler kazandırmaktadır.
5. Her kavitenin sahip olduğu karakteristik yapıda sıvı girişi ve buhar çıkışı belirli bir limiti aşması durumunda çekirdekli kaynamada kritik ısı akısı (KIA) düşmeye başlayacaktır. Bu nedenle kavitenin sahip olduğu yüzeyin geometrik özellikleri çalışma koşullarını ve sıvının fiziksel özelliklerini dikkate alacak biçimde tasarlanmalıdır.
6. Birçok kaynama yüzeyinde kaviterler aktif çekirdeklenme bölgelerinin arttırılması isteği ile tercih edilmektedir. Bu amaç için 2. adımda bahsedilen kaviterlerin ağız genişlikleri sıvı girişine mutlaka müsaade edecek ölçüde olmalıdır.

1.3.2 Aktif çekirdeklenme bölgeleri

Çekirdekli kaynama ısı geçişinde ısı akısının artışı ile yüzey kızgınlığı ve kaynama yüzeyi üzerindeki buhar kabarcıklarının çekirdeklenmesi de artar. Özellikle girintili yüzeyler başta olmak üzere yüzeye üzerine çöken kalıntılar ve yoğun kabarcıklardan dolayı çekirdeklenme odaklarının deneysel olarak belirlenmesi oldukça zordur [5]. Bu tez çalışmasında da yer alan hızlı kamera gibi donanımlı deneysel ekipmanlara rağmen iç girintilerin gözlemlenmesi fiziksel olarak imkânsızdır. Ayrıca yüzey üzerinde aktif çekirdeklenme bölgeleri oluşturması için yer alan kaviterler, tüneller ve gözeneklerin hangilerinin kaynama esnasında potansiyel çekirdeklenme odağı olduğu belli değildir. Aktif çekirdeklenme yoğunluğunun belirlenebilmesi için yüzey kızgınlık derecesini ve ısı akısını bilgilerinden faydalanılarak çıkartılmış ampirik formülasyonlar mevcuttur [6,7].

1.3.3 Çekirdeklenme frekansı

Çekirdekli kaynamada çekirdeklenme frekansı kabarcığın oluşması, büyümesi ve yüzeyden ayrılmasını kapsamaktadır. Yüzeydeki oyuklar içerisinde oluşan buhar kabarcığı başlangıçta kaynama yüzeyinin gerilimi ve atalet kuvvetlerinin etkisiyle büyürken sonrasında sıvı gaz ara yüzünde kızgın buhar ile kızgın sıvı arasındaki iletim

mekanizması ile ısı geçişinden dolayı meydana gelen buharlaşma sonucu büyümeye devam eder.

Buhar kabarcıklarının çapı yüzeyden ayrılmadan önce ayrılma çapı adı verilen bir değere ulaşır. Ayrılma apı kabarcığa etkiyen kuvvetlerin dengesi tarafından belirlenir. Bu kuvvetler içerisinde sıvı ve gaz fazlarının atalet kuvveti, kabarcıktaki sıvı sürüklenmesi, kaldırma kuvveti ve yüzey gerilme kuvvetleri yer alır. Bu bağlamda Fritz tarafından ayrılma çapı için temas açısı, sıvı-gaz yoğunlukları, yüzey gerilmesi ve yer çekimine bağlı olarak şu yaklaşım önerilmiştir [8]:

$$D_d = 0,0208\varnothing \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_g)}} \quad (1.2)$$

Burada $\varnothing$ ölçümü oldukça zor olan ve sıcaklığa bağlı olarak değışen dinamik temas açısıdır. Ayrılma çapına ulaşan buhar kabarcıklarının çekirdeklenme odağından ortalama ayrılma frekansları f kızgın sıvı tabakasının oluşması, kabarcığın büyümesi için geçen sürelerden yararlanılarak hesaplanır. Bu frekans değeri ne kadar büyük olursa yüzeyin kaynama ısı geçiş performansı doğru orantılı etkiler. Ancak her bir kavitenin davranışının farklı olması, kabarcık ve sıvının hareketlerinin yüzeydeki çekirdeklenme potansiyeli yüksek bölgeleri etkilemesi, kabarcık şeklinin zamanla değışmesi kabarcığın oluşum ve büyüme zamanını teorik olarak belirlemeyi zorlaştırmışından dolayı çekirdeklenme frekansının ölçümü için nicel bilgilere ulaşmak düşük ihtimaldir [2].



2. KAYNAMA ISI GEÇİŞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

2.1 Giriş

Kaynama ısı geçişinin iyileştirilmesi birçok gelişmiş mühendislik yapıtları için fayda sağlamaktadır. Bu yapıtlar için, enerji dönüşüm teknolojileri; ısı pompası sistemleri ve atık ısı kazanım sistemleri, güç santralleri; nükleer enerji santralleri ve jeotermal enerji santralleri, elektronik mikro işlemcilerinin soğutma üniteleri örnek verilebilir.

Kaynama ısı geçişi iyileştirmek için kullanılan teknikler şu başlıkları gerçeklemeyi hedefler:

- Isı geçişi bölgesinde doymuş akışkan ve temasta olduğu kızgın yüzey arasındaki sıcaklık farkını (kızdırma derecesi) azaltmak,
- Sabit kızgınlık derecesinde ısı geçiş alanını arttırarak ısı geçiş alanını arttırarak kompakt ısı değiştiricilerinde olduğu gibi daha küçük yüzey alanı ile daha yüksek ısı taşınım katsayısı elde etmektir.

Gelişmiş ısı pompası sistemlerinde yüksek COP (ısı performans katsayısı) için kızgın kaynama yüzeyi ile doymuş sıvı arasındaki kızgınlık derecesi 1-2⁰C ile sınırlandırılmıştır.

Kaynama ısı geçişi prosesi için kullanım alanına bağlı olarak farklı türde akışkanlar tercih edilebilir. Herhangi bir iyileştirme metodu kullanılmadan su akışkanı aynı yüzey yapısı üzerinde diğer akışkanlara göre daha geniş bir çekirdekli kaynama bölgesine sahiptir. Havuz kaynamasında iyileştirme yöntemlerinin bazında aynı sıcaklık farkı için daha yüksek ısı akısının sıvıya iletilmesi dolayısıyla ilk bölümde verilen kaynama eğrisinin sağa doğru ötelenmesi yatmaktadır. Su akışkanının bu özelliğinden ötürü absorpsiyonlu ısı pompası sistemlerinde sıklıkla tercih edilme nedeni olmuştur. Türbin kompresör tipli ısı pompası sistemlerinde gövdenin veya boruların içi tümüyle su ile dolu olduğundan kaynama ısı geçiş iyileştirmeleri bu cihazların etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Diğer organik akışkanlar sahip oldukları viskozite, depolama gibi fiziksel özelliklere göre kaynama ısı geçiş prosesi için tercih edilebilirler.

Kaynama ısı geçişinin iyileştirilmesinin fayda sağladığı bir başka alan da elektronik soğutmasıdır. Özellikle süper hızlı bilgisayarların güvenli işletilebilmeleri için havuz kaynama ısı geçişinin performansı oldukça önem taşır. Bu uygulama alanında FC-72 gibi organik dielektrik soğutma sıvıları çevrim akışkanı olarak tercih edilir.

Bir diğer yandan içerisinde buhar üretim mekanizmalarının bulunduğu cihazların ısı verimlilikleri açısından kaynama ısı geçişinde yapılacak iyileştirmeler oldukça önem arz etmektedir. Örnek olarak endüstriyel veya evsel amaçla kullanılan bir elbise ütüsünde buhar üretimi, kızgın kaynama tabanı üzerine sıvı damlamasıyla gerçekleşir. Sistem taban sıcaklığına göre enerjiyi ve suyu damlamasını keser ya da aktif hale getirir. Kaynama ısı taşınım katsayısında yapılacak iyileştirmeler ile aynı ısı akısı için cihazın buhar üretim kapasitesi artırılır.

Kaynama ısı geçiş iyileştirmeleri için çalışılmakta olan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler pasif ve aktif yöntemler olarak ikiye ayrılırlar. Kaynama yüzey yapısı ve karakteristikleri üzerinde yapılan değişimler pasif yöntemler başlığı altında incelenirken prosesin gerçekleştiği bölgeye dışardan bir aktüatör ile müdahale bulunulduğunda aktif yöntemler başlığında değerlendirmeye alınır.

Kaynama ısı geçişi iyileştirmesi için uygulanacak aktif veya pasif yöntemlerde şu hususlar dikkate alınmalıdır:

- Kaynama yüzeyi üzerinde pasif yöntemler kullanılarak geliştirilen yapılar aktif çekirdeklenme bölgeleri için elverişli olmalıdırlar. Çekirdeklenme odaklarının artışı buhar kabarcıklanma frekansını da arttırarak daha çok kabarcık oluşmasını sağlar ve bu kabarcıkların içerisindeki kızgın buhardan doymuş sıvıya geçen gizli ısıyı (latent heat) arttırır.
- Kaynama yüzey üzerinde buhar kabarcıklarının çekirdeklenip büyüüp ayrılmaları süreci çekirdeklenme frekansını ifade eder. Buhar kabarcıklarının kaynama yüzeyini mümkün olduğunca meşgul etmemeleri gerekir. Birleşip tabaka halinde kalmaları durumunda geçiş ve film kaynama bölgelerine geçeceği daha önceki bölümde açıklanmıştı. Dolayısıyla yüzeydeki sıvı tabakasının korunması için buhar kabarcıkları yüzeyde oyuklara sıkıştırılarak bu bölgelerde gelişim süreçlerini tamamlamaları kaynama ısı geçiş etkinliğini arttıracaktır.

- Kaynama yüzeyinin üzerinde yer alan yapılar aktif çekirdeklenme için olanak sağlamalarının yanında buhar kabarcıklarının yüzeyden hızlı biçimde ayrılmalarını da sağlamalıdır. Bu amaç için sonra ki alt başlıklarda anlatılacağı gibi girintili tüneller kullanılabilir.
- Kaynama yüzeyi sıvının yüzey üzerine en iyi teması gösterebilmesi için sıvı sever olmalıdır.

Çekirdekli kaynama ısı geçiş prosesinde yüzeyin etkin bir performans gösterebilmesi için kaynamayı emme – buharlaştırma modunda sürdürmesi gerekmektedir. Bu modda yüzeyde buhar kabarcıkları oluşurken yüzeyden ayrılmaları ile yerleri miktarda doymuş sıvı kabarcıkların yerlerini doldurmalıdır. Gereğinden fazla sıvının kızgın yüzeye hücum etmesi ısı akısını düşürürken bu mod taşmalı mod (flooded mode) olarak adlandırılır. Buharın yüzeyden tahliye olamaması ve buhar filmi oluşturması bir önceki bölümde anlatıldığı gibi ısı akısını düşürür ve yüzeyin hızla ısınmasına neden olur. Bu mod da kuruma modu (dried-up mode) olarak adlandırılmaktadır. Taşmalı ve kuruma modu kaynama ısı geçiş performansını olumsuz etkileyen çalışma şekilleridir [boiling and cond]. Dolayısıyla tasarlanan yüzey yapısı buhar kabarcıklarının yüzeyden kolayca tahliye olmasını sağlarken yerlerine yeteri miktarda sıvıyı emerek prosesi emme-buharlaştırma modunda güvenli olarak devam ettirmelidir.

Kaynama ısı geçişi iyileştirilmesi için kullanılan pasif yöntemler, literatürdeki çalışmalar ile bir sonraki alt başlıkta değerlendirilmiştir:

2.2 Pasif Yöntemler

Pasif yöntemler herhangi bir dış tesir olmaksızın kaynama yüzeyi üzerinde gerçekleştirilen yapılandırmalar ile kaynama ısı geçiş etkinliğinin artırılmasıdır. Yüzey koşullarının çekirdeklenmede çok önem arz etmesi pasif yöntemler kullanılarak yapılan birçok çalışmanın literatürde yer almasına neden olmuştur. Bu yöntemler ve yapılan çalışmalar alt başlıklarda sunulmuştur:

2.2.1 Mikro ve nano yapılar

Aktif çekirdeklenme bölgelerinin sayısını arttırmak ve yüzeyin temas açısı değerini düşürmek amacıyla mikrometrik ve nanometrik yapılar son yıllarda çalışma konusudur.

Makro yapılar, yüzeydeki buhar kabarcıklarını kısıtılarak, bir sonraki buhar çekirdeklenmesine yardımcı olmakta ve kaynama ısı geçişini arttırmaktadır [9]. Sıvı damlacığının ya da kaynama sırasında oluşan buhar kabarcığının sıcak yüzey ile temas ettiği temas çizgisinin su severlikle (ıslatılabilirlik) birlikte genişlemesi de kaynama etkinliğine olumlu katkıda bulunmaktadır [10]. Yüzey üzerinde oluşturulan mikro/nano yapılar, yalın yüzeyin susever olması durumunda Wenzel modeline göre yüzeyin su severliğini arttırmaktadır [11]. Bir diğer yandan mikro/nano yapılar kaynama esnasında yüzey üzerinde aktif çekirdeklenme bölgelerinin sayılarını arttırarak kaynama ısı geçişinin etkinliğinin artmasını sağlamaktadır [12].

Kim vd. 4 farklı mikro/nano işlemlerin bulunduğu ve bulunmadığı yüzey üzerinde kaynama deneylerini gerçekleştirmiştir. Bu yüzeylerden biri karşılaştırma amacıyla düz Silisyum (SCS, single crystalline silicon) (F yüzeyi), biri üzerinde 6 μm kalınlığında aralarında 50 μm genişlik bulunan sekizgen yapıların bulunduğu M yüzeyi, biri üzerinde boyları 100 nm'den 1 μm ye kadar değişen ZnO nano çubukların ekili olduğu N yüzeyi, bir diğeri ise hem N yüzeyindeki nano yapıları hem de M mikro yapıları birlikte barındıran NM yüzeyidir. İşlenen yüzeylerin ıslatılabilirliği (temas açısı) iyileştirilmiş, kaynama performanslarında düz yüzeye göre artış sağlanmıştır. Ortalama kritik ısı akısı değeri için düz yüzeye göre en yüksek artış %107 artış ile NM yüzeyinde görülmüştür. Bu değeri %79 ile N, %47 ile M yüzeyi takip etmektedir [13].

Wei ve Honda, elektronik çiplerin soğutulmasında kullanılan FC-72 akışkanın kaynama ısı geçiş performansını iyileştirmek amacıyla mikro yüzeyler üzerinde havuz kaynaması deneyleri gerçekleştirmiştir. 6 farklı boyutta sahip (30x60 μm^2 , 30x120 μm^2 , 30x200 μm^2 , 50x60 μm^2 , 50x200 μm^2 , 50x270 μm^2 (kalınlık x yükseklik μm^2)) mikro yapılar 10x10x0.5 mm³ silikon çip üzerinde kuru kazıma (dry etching) tekniği ile işlenmiştir. Kritik ısı akısının iyileştirilmesinde diğer boyutlara göre en iyi performansı, 50x270 μm^2 boyutlara sahip mikro yapıları yüzey göstermiştir [14].

Dong vd. etanol akışkanı için havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Kaynama yüzeylerine farklı boyutlara sahip silindirik yapıda mikro/nano kaviteli ve iğneli işlemler oluşturmuşlardır. Mikro iğneli ve kaviteli yapılar arasında en yüksek kritik ısı akısına ve ısı taşınım katsayısına ulaşan yüzey işlemesi 50 μm çapına, 50 μm aralığına (pitch) ve 5 μm yüksekliğine sahip MP04 kodlu yüzey olmuştur. Düşük ısı akılarında, mikro yüzeylerdeki buhar çekirdeklenme oluşumu düz yüzeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Mikro kavitelerin çapının azaltılması çekirdeklenme

bölgelerini arttırırken nano yapılar üzerindeki çekirdeklenme artışı daha düşüktür. Bir diğer yandan mikro yapıli yüzeyler ve düz yüzeylere göre nano yapıli yüzeylerin kabarcıkların oluşum frekanslarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Yüksek ısı akılarında ise buhar kabarcıklarının birbirleriyle birleşmesine engel olarak nano yapıların buhar filmi oluşumu geciktirdiği görülmüştür. Bu durum buhar kabarcıklarının çekirdeklenme frekansı üzerindeki etkileri ile ilişkilendirilebilmektedir. Kavitelerin ve iğneli yapıların çapları büyüdükçe efektif ısı geçiş alanı arttığından düşük ısı akısında kaynama ısı geçişini iyileştirdiği düşünülebilir. Küçük çap değerleri için ısı geçiş katsayısı daha yüksektir ve buhar kabarcıklarının çekirdeklenme sayısı büyük çaplı yapılardakilere göre daha yüksek olduğundan daha yüksek kritik ısı akısı (KIA) değerlerine ulaşmaktadır [15].

Yu vd. FC-72 elektronik ekipmanların soğutulmasında kullanılan akışkan için yaptığı havuz kaynama deneylerinde üzerlerinde hiyerarşik düzende bulunan farklı uzunluğa sahip çubuklar bulunan yüzeyler kullanılmıştır. Çubukların aralarındaki uzaklıklar için 3 farklı değer: 0.5, 1.0, 2.0 mm; uzunlukları için 4 farklı değer: 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm and 4.0 mm ele alınmıştır. Çubukların aralarındaki mesafenin azalması ve çubuk boylarının artması ısı geçişi için artış sağlasa da mantar bulutu şeklindeki buhar kabarcıklarının yüzeyden ayrılmasına karşı akış direncinin artmasına neden olmuştur. Bu durum yüzeydeki buhar kabarcıklarının frekansının azalması anlamını taşımakla birlikte ısı geçiş katsayısında düşüşlere sebebiyet vermektedir. Ancak kritik ısı akısı için en yüksek değer 4 mm çubuk uzunluğuna, 0.5 mm aralık değerine sahip yüzeyde gözlemlenmiştir. Düz refereans yüzeye göre 5 katlık bir artış sağlanmıştır [16].

Chu vd. deneysel olarak yükseklikleri 10 μm - 20 μm , çapları 5 μm - 10 μm ve aralarındaki boşluk miktarı 5-10 μm boyutlarına sahip mikro sütunlarla kaplı silisyum (SCS, single crystalline silicon) yüzeyler üzerinde çekirdekli kaynama ısı geçişini gözlemlenmişlerdir. Bu yapılar içerisinde yüksek kritik ısı akısı (KIA) olan 208 W/cm² değerine yüksekliği 20 μm , çapı ve aralarındaki boşluk değeri 5 μm olan sütun yapıli yüzeyde ulaşılmıştır. Bu durum Yu et al. Yaptığı çalışmada elde ettikleri sonuçla örtüşmektedir [17].

Nimkar vd. üzerine mikro ölçekte piramit şeklinde farklı boyutlarda anizotropik kazıma yöntemi ile kaviteler açılmış <1 0 0> kafes yapısındaki silisyum (SCS, Single Crystalline Silicon) yüzeylerde FC-72 akışkanıyla atmosfer basıncında kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Piramitlerin üst yüzeyleri 240 μm , alt yüzeyleri ise 40

μm 'dir. 0.5 mm aralıklı 225 kaviteli yüzey 1, 0.75 mm aralıklı 100 kaviteli yüzey 2, 1.0 mm aralıklı yüzey 3 test numunelerinin kaynama ısı geçiş davranışı gözlemlenmiştir. Yüzey 1 üzerinde buhar kabarcıklarının çekirdeklenmesinde aralarındaki kötü etkileşim sınır tabaka karışımına engel olmuş, bunun sonucunda düz yüzeyden daha kötü bir kaynama ısı geçişi gözlemlenmiştir. Aktif buhar kabarcık çekirdeklenmesi bakımından en yüksek değer yüzey 2'de görülmüş ve ısı geçişi bakımından en iyi performansı bu yüzey sağlamıştır. Buhar kabarcıklarının en son ulaştığı çap değerleri ve frekansları ısı akısı ile birlikte artmıştır, kavite sıklığı bu değerler üzerinde gözle görülür bir etkisi olmamıştır. Ancak ısı akısının düşük olduğu zamanlarda aktif buhar kabarcıklarının çekirdeklenme sayısı kavite sıklığına göre değişmektedir [18].

Kwon vd. Leidenfrost etkisini iyileştirmek amacıyla SCS yüzey üzerinde hiyerarşik düzende kare şeklinde mikro ölçekte yapılar işlenmiş, kızdırılmış yüzey üzerine oda sıcaklığında su damlası düşürülerek Leidenfrost sıcaklığı ölçülmüştür. Kare şeklindeki yapıların bir kenar uzunluğu 10 μm 'dir. Bu yapıların aralarındaki boşluk miktarı değiştirilerek optimum sıklık aralığı bulunmaya çalışılmıştır. Mikro yapılar için en iyi seçenek kare yapıların aralarındaki uzaklığın 75 μm olduğu yüzey olmuştur. 300°C'de sıvı damlasının yüzey ile teması kesilirken (Leidenfrost Noktası'na ulaşıldığı için), optimum işlenmiş yüzeyde devam etmektedir. Bu yapı üzerinde gerek temas açısını azaltmak, gerekse Leidenfrost noktasını ötelemek için yüzey üzerine 220 nm çapında sahip silika partiküller ekilmiştir [19].

Bu çalışmalara ek olarak mikro yapıların boyutları ve dizilimleri, özellikle yükseklikleri ya da derinliklerinin kaynamaya etkisi literatürde bilimsel açıdan oldukça tartışılan bir konudur. Kavite derinliği ile ilgili Yu vd. işlenmiş silisyum SCSüzerinde FC-72 akışkanı ile gerçekleştirdikleri havuz kaynama deneylerinde, derinlik değeri arttıkça toplam ısı geçiş katsayısının düştüğünü gözlemlemiştir [21]. Bon vd. ise FC-72 ve n-hexane akışkanları ile yaptıkları deneylerde kavite derinliklerinin ısı geçiş performansına etkisinin olmadığını gözlemlemiştir [22]. Rainey vd. FC-72 sıvısı ile yaptıkları kaynama deneylerinde yüzeyler üzerine yerleştirdikleri çubukların yüksekliklerini (1mm, 2mm, 4mm, 8mm) değiştirmişlerdir. Toplam ısı geçiş alanı için çubuk uzunluğu olumsuz etki göstermiştir [23]. Bu durum Yu vd.'nin gözlemleri ile çelişmektedir [21].

2.2.2 Girintili tüneller ve kaviteler ile yapılandırılmış yüzeyler

Isı değiştiricilerinde yivli boru olarak bilinen TURBO-B, GEWA gibi boru tiplerinin içyapılarında kullanılan birbirleri ile bağlantılı girintili tüneller kaynama ısı geçiş iyileştirmeleri için kullanılan pasif yöntemler arasındadır. Girintili tünellerin içyapılarında kaviteler ve gözenekler bulunabilmektedir. Bu yapıların varlığı yukarıda açıklandığı gibi buharın yüzeyden tahliyesi ve buhar kabarcıklarının kısıtılarak yüzeyin sıvı ile temasının kesilmemesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu yapılar ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda özetlenerek sunulmuştur:

Isı değiştiricilerinde yivli boru olarak bilinen TURBO-B, GEWA gibi boru tiplerinin içyapılarında kullanılan birbirleri ile bağlantılı girintili tüneller kaynama ısı geçiş iyileştirmeleri için kullanılan pasif yöntemler arasındadır. Girintili tünellerin içyapılarında kaviteler ve gözenekler bulunabilmektedir. Bu yapıların varlığı yukarıda açıklandığı gibi buharın yüzeyden tahliyesi ve buhar kabarcıklarının kısıtılarak yüzeyin sıvı ile temasının kesilmemesi açısından büyük önem taşımaktadır. Girintili tünelli yapılarının kaynama ısı geçiş prosesini emme-buharlaştırma modunda (suction-evaporation mode) sürdürmesi gerekir. Bu modda yüzeyde buhar kabarcıkları oluşurken yüzeyden ayrılmaları ile yeteri miktarda doymuş sıvı yerlerini doldurmalıdır. Gereğinden fazla sıvının hücum etmesi ısı akısını düşürürken bu mod sel modu (flooded mode) olarak adlandırılır. Buharın yüzeyden tahliye olamaması ve buhar filmi oluşturması daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi ısı akısını düşürür ve yüzeyin hızla ısınmasına neden olur. Bu da kuruma modu (dried-up mode) olarak adlandırılmaktadır. Sel ve kuruma modu kaynama ısı geçiş performansını olumsuz etkileyen çalışma şekilleridir [2]. Dolayısıyla yüzey yapısı tasarlanırken emme-buharlaştırma modunda çalışacak biçimde tasarlanmalıdır.

Bu yapılar ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda özetlenerek sunulmuştur:

Nakayama vd. R-11, su ve nitrojen sıvıları ile yaptığı havuz kaynama deneylerde 0,1mm çap değeri civarındaki gözeneklerin bulunduğu yüzeylerde çekirdekli kaynama düz yüzeydeki kaynamaya göre çok daha erken başladığından ısı geçiş katsayısı ısı taşınım katsayısına göre oldukça fazla olduğunu görmüşlerdir. Küçük kızdırma derecesinde gözenekli yüzeyler kaynama üzerinde bu etkisinden dolayı ısı değiştiricileri için oldukça cazip bir yüzey yapısı haline gelmektedir. Yazarlar, buhar kabarcıklarının kızgın yüzeyden ayrılırken gözenekler sayesinde subcooled sıvının

yüzeye kılcallık etkisiyle emildiğini gözlemlemişlerdir. Bu çevrim sürekli devam ettikçe yüzey asla kurumamaktadır. Bu da ısı akısının düşmesine engel olmaktadır. Yukarıda bahsi geçen sıvılar kullanılarak yapılan havuz deneylerinde işlenmiş yüzeylerde aynı ısı akısı için kızdırma derecesinin %80-%90 azaldığı görülmüştür [24].

A.K. Das vd.'nin yaptıkları çalışmada içlerinde cepçiklerin bulunduğu, birbirlerini kesen ve eğimli girintili tünel yapılarının yer aldığı kaynama yüzey yapılarının tasarımında şu iki temele dayandıklarını açıklamışlardır: Tünellerde hafif buhar kabarcıkları yüzeylerden ayrılırken kabarcıkların hareketlerinden kaynaklı olarak yüzey güçlü bir doğal taşınımına maruz kalır. Bu durum gizli ısıнын aktarımını açıklamaktadır. Tünellerin sonlarında yer alan genişleyen cepçikler girintili kaviteler yaratarak kaynama ısı geçişini arttırmaktadır. Bu cepçikler buhar kabarcıklarının çekirdeklenmesi için oldukça elverişli bölgelerdir. Girintili kavitelere ek olarak gözenekli ve birbirleri ile bağlantılı tünelli yapılar ısı geçişinin artırılması için oldukça büyük önem arz etmektedir. Bu durum kaynama ısı geçişini artışı arttırmak için en efektif metotlardan biridir [25]. Girintili tünelli yüzeylerin kaynama ısı geçiş iyileştirmesi için tasarımında iki yol gösterici bilgiye ulaşılabilir: Tünelli – girintili ya da gözenekli yapıların kaynama ısı geçişini iyileştirebilmesi için ısı geçiş alanı artışı sağlamanın yanında yüzeye sıvı girişinin ve yüzeyden buhar çıkışının hızını arttıracak bir geometriye sahip olması gerekir.

Chien ve Webb, üzerinde 0,8 mm uzunluğunda kanatların bulunduğu ve bu kanatlı yapıların gözenekli bir folyo ile kaplandığı bakır bir tüp üzerinde yer alan yüzeylerde yapılandırmaların konumlarını yatay ve dikey olarak değiştirerek metanol sıvısı ile havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Hızlı kamera vasıtasıyla tünelli ve gözenekli yapıların buhar kabarcıklarının oluşumuna etkisini görsel olarak incelemişler. Gözenekli yapıların tünellere buhar kabarcığı yüzeyden ayrılırken yüzey gerilme kuvvetlerinin etkisiyle sıvı emilimi sağladığını gözlemlemişler ve bu durumun emme-buharlaşma modelini desteklediğini belirtmişlerdir [26].

Pastuszko üzerinde dikey ve yatay sırada eksende yer alan, genişliği 0,6 ve 1,5 mm arasında değişen dar tünelli yapılar ile genişliği 1,5 mm olan tünelli yapıların yer aldığı kaynama yüzeylerinde su, etanol ve R-123 akışkanları kullanarak havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Tünellerin üzerlerinde sıvının yüzeye nüfuz hızını arttıracak çap değerleri 0,3 mm, 0,4 mm ve 0,5 mm arasında değişen gözenekli yapılar

mevcuttur. Elde edilen ısı taşınım katsayısını Nakayama'nın ve Chien – Webb'in çalışmalarındaki sonuçlarla karşılaştırmıştır. Oluşan buharın tahliyesini hızlandıran tünelli yapıların yanında sıvı emilimini kolaylaştıran gözenekli yapıların da bulunması yüzeydeki kurumayı geciktirmekte ve kritik ısı akısı (KIA) değerini arttırmaktadır. 1,5 mm genişliğe sahip tünelli yapılar için 0,3 mm'lik gözenek çaplı kaynama yüzeyi ısı geçiş performansı bakımından en iyi sonucu vermiştir. Isı akısı 100 kW/m^2 'de gözeneksiz tünelli yapıda elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında ısı geçiş katsayısı 3 kat daha fazladır. Dar tünelli yapılar için yine gözenek çapı 0,3 mm olan kaynama yüzeyi ısı geçiş katsayısı bakımından en iyi sonucu vermiştir. 200 kW/m^2 ısı akısının üzerinde ısı geçiş katsayısı için $55 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 'lik bir değere ulaşılmıştır. Bu değer tünelli yapılarda $35 \text{ kW/m}^2\text{K}$ olup 600 kW/m^2 'lik ısı akısında elde edilmiştir. Dar tünelli yapılarda ise tünel genişliğinin azalması su akışkanının kaynama prosesinde olumlu bir sonuç vermiştir [27]. Nakayama ve Chien & Webb yüzey üzerinde çok fazla gözenek olması ve gözenek çapının çok büyük olması sonucunda tabana buharlaşma yoğunluğundan bir diğer deyişle debisinden daha fazla sıvı aktarımına sebep olacağını belirtmişlerdir [24,28]. Bu durum Pastuzko'nun elde ettiği sonuçlarla örtüşmektedir. Bir diğer yandan Pastuzsko'nun ifadesine göre yatay tünellerde tünellerin yeterince sıvıyı alabilmesi için gözenek çapının büyük olması bir avantaj sağlamaktadır. Ancak sistem yatay ve dikey tünellerle birlikte düşünüldüğünde yatay tünellerde kümelenmiş olan yoğun buhar kabarcıkları sıvının dikey tünellerde kalmalarına sebep olurken yüzeyde kurumaya sebep olurlar ve ısı akısını düşürürler. Bu nedenle gözenek çapının optimum değerde tutulması gerekmektedir. Eğer tünel genişliği artarsa gözenek çapının da artması sıvı beslemesi için daha uygun olacaktır.

Deng vd. sinterleme yöntemi kullanılarak imal edilen gözenekli ve girintili kavitelerin (PS-RC) bulunduğu yüzeyde su ve etanol kullanarak havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışma daha sonra değinilecek gözenekli yapıların girintili tünel ve kaviteli yapılarla birleşik uygulaması olarak görülebilir. Söz konusu yapılar ısı geçiş alanını arttırmanın yanı sıra çekirdeklenme bölgeleri oluşturmakta ve gözenekli yapılar sayesinde sıvının yüzeye alınımını kolaylaştırmaktadır. Bu sayede yüzeylerde ısı akısı yüksek değerlere çıksa bile ıslanmaya devam etmektedir. Bu ifade Pastuzko'nun sonuçlarıyla da örtüşmektedir [23]. Gözenekli yüzey yapısı üzerine omega şeklindeki tüneller, mikro elektro tel erozyon yöntemi üretilmiştir. Düşük ısı akılarında aynı ısı akısı için yüzey kızdırma derecesi gözenekli numunede 3,1 – 3,2

civarında iken gözeneksiz numune için bu değer 8,1 – 12,3'tür. Su akışkanı için yapılan deneylerde en yüksek ısı geçiş katsayısı 41 - 43 W/cm² ısı akılarında 41 kW/m²K olarak hesaplanmıştır [29]. Isı geçiş katsayısının maksimum olduğu noktada ısı geçişinin en çok buhar kabarcıklarının hızlı çekirdeklenmesi sonucu oluşan gizli ısıdan kaynaklandığı, doymuş sıvı ile buhar çekirdekleri ve yüzey arasındaki ısı geçişinin ihmal edilebilir olduğu düşünülmektedir. Bir bakıma buhar çekirdeklenme frekansı arttıkça doymuş sıvıya olan mikro konveksiyon mekanizması yeterince zaman bulamadığından ısı geçişinde daha minör bir rol oynar. Isı akısı miktarı arttıkça su için girintili kavitelerden çıkan buhar kabarcıkları ısıtıcı yüzeyin üstünde birleşmeye ve toplanmaya başlarlar. Bu durumda yüzey de kuruma meydana gelir ve sıvı alımı zorlaşır. Dolayısıyla yüzey kızgınlık derecesi artar. Omega biçimindeki yüzey kavileri buhar kabarcıklarının yüzeye olan teması için bir bariyer gibi davranarak ısı geçiş performansının bozulmasına engel olmuştur. Yüzey kızgınlığı için düşük değerlere göre değer arttıkça ısı taşınım katsayısı da artmıştır. Bunun nedeni buhar kabarcıklarının birleşmesine en olunması yüzeyin sıvı ile beslenmesinin önünün tıkanmaması olabilmektedir. Yüzey kızdırma derecesinin artışı buhar kabarcıklarının çekirdeklenme frekansı arttıkça mikro konveksiyonun artmasına neden olmakta ve ısı geçiş katsayısını arttırmaktadır. Ancak bir noktadan sonra buhar kabarcıklarının yüzeyden ayrılırken ki çapları kızgınlık derecesinin artışı ile birlikte düşmeye başlar, bu da gizli ısı geçişi ve mikro konveksiyonla sağlanan ısı geçiş miktarını azaltır. Bir tarafta olumlu diğer tarafta olumsuz etki birbirlerini dengeler ve yüzey kızgınlığının önemi yüksek kızgınlık derecelerinde yitirilmiş olur. Liquid subcooling effect konusunda birçok bilinmeyen birbirlerine ters düşen yayınlar mevcuttur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, diğer literatür verileri ile kıyaslandığında modüler biçimde yapılmış gözenekli yapıların bulunduğu çalışmalardaki sonuçlardan daha kötü bir ısı geçiş performansı olduğu görülmüştür [30].

N.H. Kim vd. Turbo-B gibi yivli ısı değiştiricisi borusu yüzey yapısına benzer olarak girintili tüneller ve değişken çapda gözeneklerin bulunduğu yüzeyler üzerinde R-11, R-123 ve R-134a akışkanları kullanarak havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Diğer çalışmalara benzer olarak bu çalışmada da girintili ve bağlantılı tünellerin ve gözeneklerin buharın tahliyesi ve sıvı beslemesi için uygun yapılar olduğu görülmüştür. Düşük ısı akılarında kaynama yüzeyinin toplam alanının çok artması daha önce de belirttiği gibi sel modda yani yüzeye çok fazla sıvı nüfuz etmesine

neden olduğundan ısı taşınım katsayısı düşer. Bir diğer yandan tünellerin havuza açılan bölgeleri küçüldükçe yüzeyin kuruması gerçekleşir, ısı akısı düşer ve çekirdekli kaynama aşaması sona erer. Yüzeye gereğinden fazla sıvının hücum etmesi yüzeyde aşırı soğumaya sebep olur buhar çekirdeklenme frekansı azalır. 0,20, 0,23 ve 0,27 mm gözenek çaplarının parametrik olarak incelendiği yüzeylerde R-11 ve R-123 akışkanları için en yüksek ısı taşınım katsayısı 0,23 mm olarak görülmüştür. R-134a için ise optimum gözenek çapı 0,27 mm'dir. Bu durumdan anlaşılabileceği üzere küçük gözenek çapı yüzeyin kurumasına neden olarak ısı taşınım katsayısını azaltırken, büyük gözenek çapı yüzeye gereğinden fazla sıvının hücum etmesine neden olmaktadır [31].

2.2.3 Gözenekli yapılar

Kaynama yüzeyi üzerine gözenekli tabakalar genelde metal taneciklerinin sinterlenerek bağlanmasıyla gözenekli kaynama yüzeyleri elde edilir. Gözenek çaplarının, oyuk geometrilerinin, katı taneciklerin çapları, taneciklerin ısı iletim katsayıları, yüzey üzerindeki gözenekli tabakanın kalınlığı kaynama ısı geçişine tesir eder.

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi Deng vd. girintili tünelleri gözenekli bir yapı üzerine inşa etmişlerdir. Bu çalışmada gözenekli yapıların tasarımında şu husus dikkate alınmıştır: Gözenekli yapılar yüzeye sıvı girişini kolaylaştırmalarının yanında kaynama sırasında akım çizgilerinin önüne geçmelerinin durumunda yüzeye yeterli sıvı girişi sağlanamaz. Bu durumda bu yapıların kullanılması olumsuz etki yapar. Bu nedenle gözenekli yapıların bir kanal veya belirli bir yola sahip geometrik şekillerde kullanılmaları daha uygun düşmektedir. Buharın tutunmasını sağlayan direnç düşecek ve sıvı hareketinden kaynaklı kılcallık etkisiyle yüzeyden tahliye olabilecektir. Bu durum gözenekli yapılar sayesinde çekirdeklenme yoğunluğunun artışı ile ilişkilendirilebilir. Bir diğer yandan gözeneksiz yüzeyde maksimum ısı geçiş katsayısı 120 W/cm^2 ısı akısı için $27,7 \text{ kW/m}^2\text{K}$ olarak bulunmuştur [29]. Gözenekli yapılar buhar embriyolarını içyapıdaki matrislerde korumakla birlikte yüzey üzerinde bulunan gözenekli yapıların güçlü kılcallık etkilerinden ve emici özelliklerinden ötürü doymuş sıvının sıcak yüzeye teması hızlı bir biçimde gerçekleşebilmektedir. Bu durum ısı geçiş katsayısının artışının sorumlusu olarak görülmektedir. Çekirdeklenme odaklarının sayısı ve çekirdeklenme frekansı bakımından gözenekli yüzeyin üstünlüğü hızlı kamera ile görsel olarak incelenmiştir. Isı geçiş katsayısının maksimum aldığı

değerin (41-43 W/cm² ısı akılarında) sıvı ve buhar fazlarının akım yönlerinin birbirlerine en uygun olduğu zamanda gerçekleştiği kabul edilmektedir.

C.Y. Lee vd. kaynama yüzeyi üzerinde nano boyutta gözenekli ortam oluşturarak havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Anotlama ve elektro – polishing yöntemleriyle alüminyum yüzeylerde nano boyutta gözenekli ortam oluşturulmuş ve bu gözenekli ortamda kaynama ısı geçişinde iyileştirme sağlanmıştır. Nano gözeneklerin bulunduğu yüzeyde 80 kW/m² ısı akısı için 8 kW/m²K'lık bir ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir [32].

2.2.4 Tel ve tel örgü tabakaları

Dış akış kaynamasında boruların etrafına sarılan tel tabakaları, kaynama yüzeyleri üzerine yerleştirilen örgü yapıları aktif çekirdeklenme bölgeleri yaratarak kaynama ısı geçişi için iyileştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bazı araştırmacılar yüzeyi tel örgü tabakaları ile kaplayarak kaynama ısı geçiş prosesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Hesagawa vd. farklı sıklıklarda sarılı tel örgü yapılarını kaynama yüzey üzerine yerleştirmiş ve havuz kaynama deneyleri yapmışlardır. Büyük gözenekli yapıların iyileştirme için küçük gözenekli yapılardan daha etkin olduğu sonucuna varmışlardır. 35⁰C'lık bir kızdırma derecesi için düz yüzeye göre gözenekli yapıların kritik ısı akısında (KIA) maksimum %50'lik iyileştirme sağladığı görülmüştür [33].

Pastuzsko R. yükseklikleri 0.5 mm veya 1 mm olan mikro kanatların bulunduğu kaynama yüzeyleri üzerinde ve bu yüzeylerin üzerlerine delikli bakır folyo kaplayarak su ve FC-72 dielektrik organik akışkanları ile havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir. Aynı boyutlara sahip kanatların bulunduğu örgü kaplı olan ve olmayan iki kaynama yüzeyi için 500 kW/m²'lik ısı akısında tel örgülü yüzeyde 25 kW/m²K'lık bir ısı taşınım katsayısı elde edilirken bu değer diğer yüzey için 15 kW/m²K civarında kalmıştır [34].

2.2.5 Islanabilir kaplamalar

Kaynama yüzeyinin su sever ya da sıvı sever kaplamalar ile kaplanması durumunda sıvı damlacığının ve oluşan buhar kabarcıklarının yüzeye daha çok temas halinde olmaları ve ısı geçiş alanının artacağı daha önceki bölümlerde ifade edilmişti. Bu kaplamalar ile yüzeyin yüzey gerilimi düşürürler ve temas açısını azaltırlar. Su

akışkanı gibi temas açısı büyük olan akışkanlarda oldukça iyi neticeler alınırken yüzey gerilimi ve temas açısı küçük akışkanlar için ıslanabilir kaplamalar iyi sonuçlar vermemiştir [35]. Literatürde ıslanabilir kaplamalar üzerinde yapılan birçok kaynama ısı geçişi iyileştirme çalışmaları bulunmaktadır.

Deendarlianto vd. inceledikleri 3 paslanmaz çelik kaynama yüzeyinden birini TiO_2 ile kaplamış, birini TiO_2 ile kaplayıp ultraviyole ışına maruz bırakmış, diğerinde ise herhangi bir işlem yapmadan üzerlerine yüksek sıcaklıkta sıvı damlası damlatmışlardır [36]. İşlem yapılan yüzeylerden sadece TiO_2 kaplamalı olan yüzeyde su akışkanı için temas açısı 22° olarak ölçülürken ultraviyole ışına da maruz bırakılmış yüzeyde temas açısı 0° olarak gözlemlenmiştir. Normal çelik yüzeyde ise temas açısı 88° olarak ölçülmüştür. Düşük yüzey sıcaklığında yapılan su verme / damla düşüm deneylerinde buharlaşma zamanı temas açısı en küçük olan yüzeyde en düşük değerde iken $140^\circ C$ sonrasında yüzeylerin buharlaşma süreleri birbirlerine oldukça yakındır. Bu durum yüksek sıcaklıkta temas açısının etkisinin azalması ile açıklanabilmektedir.

Takata vd. daldırma ve püskürtme gibi farklı TiO_2 kaplama yöntemleri kullanarak kapladıkları kaynama yüzeylerinde havuz kaynama deneyi ve su verme / damla düşüm deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Havuz kaynama deneyinde yüksek ve düşük ısı akılarında püskürtme ile kaplanan yüzey ısı taşınım katsayısı bakımından en iyi sonucu vermiştir. Yaklaşık 1500 kW/m^2 civarındaki ısı akısında $25^\circ C$ 'lik kızdırma derecesi gözlemlenmiştir. Su verme / damla düşüm deneyinde ise $31-34^\circ$ temas açısına sahip püskürtme kaplı yüzeyler ile $82-84^\circ$ temas açısına sahip kaplama bulunmayan yüzeydeki buharlaşma zamanı karşılaştırılmıştır. $120^\circ C$ 'ye kadar TiO_2 kaplı yüzeylerdeki damlacıklar daha kısa zamanda buharlaşırken daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşma süresi düz yüzeyle ile kaplı yüzey için aynı olmaktadır. Bu sonuç Deendarlianto'nun elde ettiği sonuçlarla da örtüşmektedir [37,36].



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

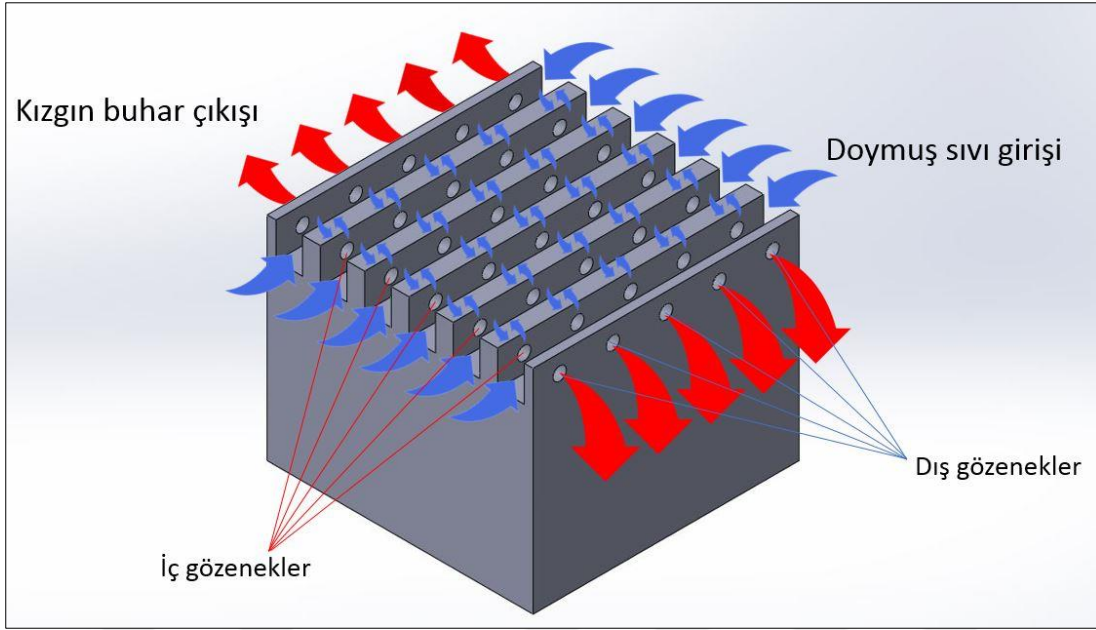
3.1 Gözenekli ve Girintili Tüneli Kaynama Yüzeyleri

Bu tez çalışmasının uygulama alanındaki çıktısı, 115M403 no’lu “Buhar Kullanılan Cihazlarda Buhar Üretme Ve Aktarma Sisteminin Enerji Verimliliğini Artırmaya Yönelik Tasarımı” isimli TUBİTAK 1001 projesinde ele alınan ütü kaynama tabanı yüzey yapısının kaynama ısı geçiş prosesi için iyileştirilmesi üzerine olmuştur. Ayrıca yapılan literatür çalışmasında gözlemlendiği üzere girintili tüneli ve kaviteli yapılarda yer alan gözenek çaplarının ve tünel aralıklarının kaynama ısı geçiş prosesinin emme-buharlaştırma modunda (suction-evaporation mode) bir diğer deyişle istenilen kaynama rejiminde çalışması için oldukça önemli olduğu görülmüştür.

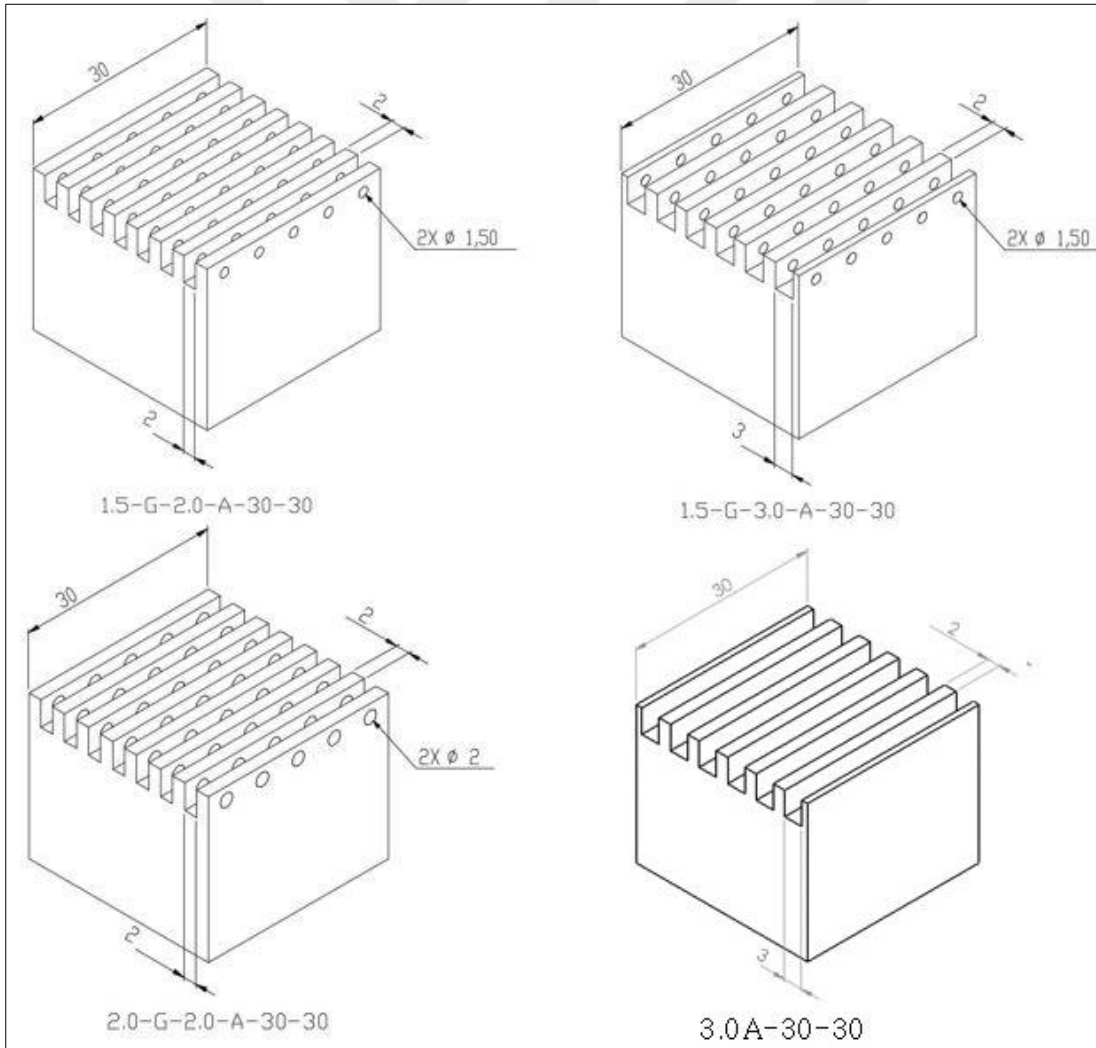
Çalışma kapsamında düz yüzeye göre kaynama ısı geçişi iyileştirmesi için Alüminyum malzemeden üretilmiş girintili tüneli ve gözenekli yapılara sahip 3 adet kaynama yüzeyi tasarlanmıştır. Bu kaynama yüzeylerinde girintili tünelin aralık değerleri ve gözenek çapları parametrik olarak havuz kaynama deneylerinde ve su verme / damla düşüm deneylerinde parametrik olarak incelenmiştir. 1 adet girintili tüneli ve 1 adet herhangi bir iyileştirme yöntemi kullanılmayan çıplak düz yüzey de karşılaştırma amacıyla havuz kaynama deneylerinde test edilmiştir.

Kaynama yüzeyleri, dış gözeneklerin oluşan ve gelişimini tamamlayan buhar kabarcıklarının yüzeyin üzerinin dışında tahliyesini kolaylaştıracağı, iç gözeneklerin girintiler arasında doymuş sıvı aktarımı sağlayarak ayrılan buhar yerine yeterli miktarda sıvı temin edeceği ve tünel aralıklarının da kaynama ısı geçiş alanını arttırmanın yanı sıra aktif çekirdeklenme bölgelerini sayısına önemli ölçüde katkı yapacakları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır (Şekil 3.1).

Şekil 3.2’de yüzeylerin izometrik görünümüleri ölçüleri ile birlikte gösterilmiştir. Tünel yüksekliği ve her bir sıra için gözenek sayısı çalışma kapsamında sabit tutulmuş, gözenek çapı ve tünel aralıkları parametrik olarak incelenmiştir.



Şekil 3.1: Kaynama yüzeylerinin tasarımında yatan öngörü.



Şekil 3.2: Kaynama yüzeylerinin geometrik özellikleri.

Yapılandırılmış çalışma kapsamında incelenen kaynama yüzeylerinin geometrik özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Kaynama yüzeylerinin boyutsal değerleri.

Seri No	Özel İsmi	Aralık [mm]	Gözenek Çapı [mm]	Boyut [mm]
1	1.5-G-2.0-A-30-30	2	1.5	30x30
2	1.5-G-3.0-A-30-30	3	1.5	30x30
3	2.0-G-2.0-A-30-30	2	2	30x30
4	3.0-A-30-30	3	-	30x30
5	DÜZ-30-30	-	-	30x30

5 farklı geometrinin 5’i için havuz kaynama ve 2’si için su verme / damla düşüm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ki amaç aynı yüzeyler arasında kıyaslama yaparak gözenek ve aralık değerlerinin parametrik olarak etkisini incelemektir. Elde edilen değerler literatürde elde edilen sonuçlarla kıyaslanacaktır.

3.2 Havuz Kaynama Deneyi

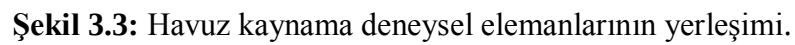
3.2.1 Deneysel ekipmanlar

Havuz kaynama deney düzeneğinde yer alan deneysel ekipmanlar sırasıyla;

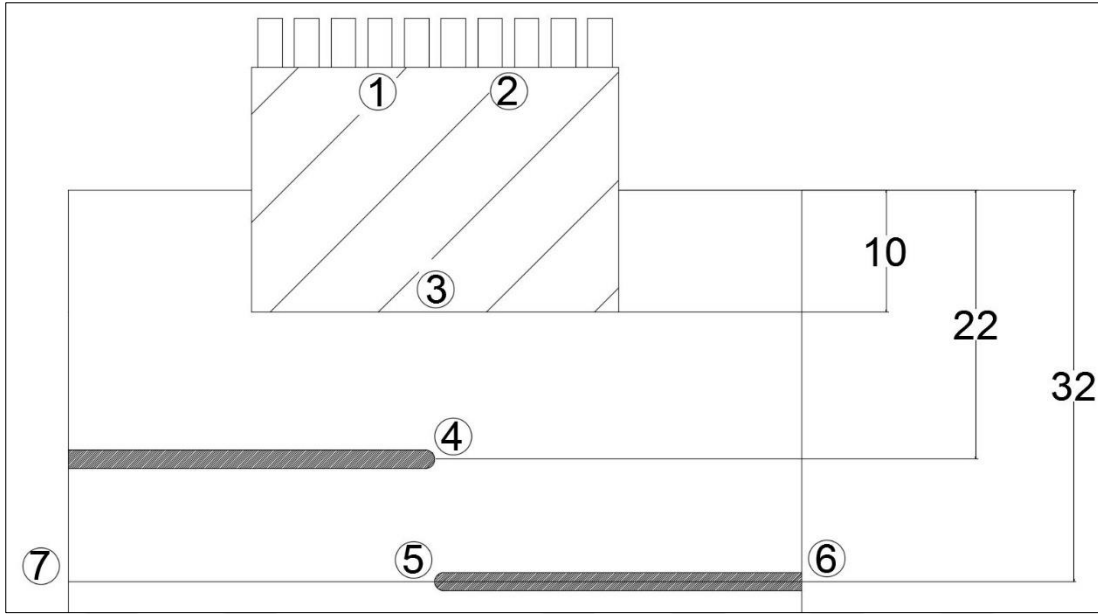
- 1) Cam Kondanser: Çıkan buharı yoğunlaştırmak ve doymuş su halinde havuza tekrar dönmesini sağlamak için kullanılmaktadır.
- 2) Üst Plaka Isıtıcıları: Tavan yüzeyini 1 atmosfer basınçta doyma sıcaklığında sabit tutmak amacıyla DC güç kaynağını ile beslenen plaka tipi 150W gücünde 2 adet ısıtıcı kullanılmaktadır.
- 3) Metal Levha: Deney düzeneğinin tavanında yer almaktadır.
- 4) Yardımcı Isıtıcılar: Kaynama havuzundan dış ortama ısı geçişini telafi etmek ve havuz içerisindeki sıcaklığı doyma sıcaklığında sabit tutmak amacıyla 4 adet her biri 50W gücünde fişek tipi ısıtıcılar kullanılmaktadır.

- 5) Temper Cam: Isıya dayanıklı temperlenmiş cam kaynama havuzunu oluşturmak için kullanılmaktadır. Camın saydamlığı sayesinde kaynama bölgesi hızlı kamera ile gözlemlenebilecektir.
- 6) Teflon Plaka: Numunenin sabitlenmesi ve blok ile havuz arasında yalıtım görevi görmesi için havuz tabanında yüksek sıcaklığa dayanıklı teflon plaka kullanılmaktadır.
- 7) M10 Saplama: Deney düzeneğinin konstrüksiyonunu sabitlemek amacıyla 4 adet M10 saplama ve somun kullanılmıştır.
- 8) Test Numunesi: İncelenmek istenen yüzey yapıları deney sistemine termal pasta kullanılarak monte edilmiştir.
- 9) Isı Geçiş Bloğu: Damla düşüm deney düzeneğinde kullanıldığı gibi bakır malzemeden ısı geçiş bloğu imal edilecektir. Bu blok termo elemanlara da ev sahipliği yapmakta olup termo elemanlar arasında yazılan tek boyutlu ısı iletim denklemi ile proses boyunca ısı akısı hesaplanabilecektir. Detaylı bilgiler ölçüm aşamasında verilecektir.
- 10) Isıtıcı: Fişek tipi 2 adet 100 ohm'luk dirence sahip gücünde fişek tipi ısıtıcılar kullanılmıştır.
- 11) Gaz Beton: Bakır bloğun dış ortama ısı kaybını önlemek için ısı iletim katsayısı değeri 0,05 W/mK olan gaz beton yalıtım amacıyla kullanılmıştır.
- 12) Veri Toplayıcı: Hassas sıcaklık ölçümü AGILENT marka 34970A model veri toplayıcı (data acquisition) cihazı kullanılmıştır.
- 13) Arayüz Programı: Veri toplayıcı cihaza termo elemanlar vasıtasıyla iletilen sıcaklık bilgileri bir arayüz programında işlenmekte ve bilgisayar ortamında sıcaklık cinsinden anlık olarak görüntülenip kaydedilmektedir.
- 14) DC Güç Kaynağı: Plaka tipi rezistansları ve yardımcı ısıtıcıları beslemek için EA ELEKTRO-AUTOMATİK marka EA-PS 8032-10 T model maksimum 160V gerilim uygulanabilen 640W gücündeki DC güç kaynağı ünitesi kullanılmıştır.
- 15) Soğuk Su Banyosu: Çıkan Buharı yoğunlaştırmak için cam kondansere doymuş sıcaklıkta su temin eden bir su banyosu kullanılmıştır.
- 16) Sıcaklık Kontrolörü: AC güç kaynağı ile beslenen yardımcı fişek tipi ısıtıcılarının kontrolünü sağlayan bir adet PID sıcaklık kontrolörü kullanılmıştır.

19)Termo Elemanlar: J tipinde OMEGA markalı termo elemanlar deney sisteminde sıcaklık ölçümü için kullanılmıştır.



Isıtıcı bloktaki termo eleman Yerleşimi Şekil 3.4’de gösterilmiştir



Şekil 3.4: Isıtıcı blokta termo eleman yerleşimi.

Şekil.3.4’de görüldüğü üzere 1. ve 2. termo elemanlar yüzey tam altında kaynama yüzeyinin sıcaklığını ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. 3, 4 ve 5 nolu termo elemanlar blok içerisinde eksenel yöndeki ısı akısı hesabında kullanılmaktadır. 6, 7 nolu termo elemanlar ve 5 nolu termo elemandan elde edilen sıcaklık değerleri ile yatay düzlemde ısı geçişi kontrolü yapılmaktadır. 8 nolu termo eleman ise havuz içerisindeki sıvı doyma sıcaklığının ölçümü amacıyla deney sisteminde yer almaktadır.

3.2.3 Isı akısı ve ısı taşınım katsayısı hesabı

Kaynama ısı geçişindeki ısı akısı hesabında literatürde yer alan havuz kaynama için yapılmış deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır [23, 31]. Deneyde sıcaklık değerleri dengeye ulaştıktan sonra eksenel doğrultuda yer alan iki termo eleman arasında Fourier ısı iletim denklemi yazılır:

$$q^u = k_{metal} \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (3.1)$$

Bu ısı akısı havuz içerisinde kaynamakta olan akışkana aktarılır. Yüzeyin ortalama sıcaklığı;

$$T_{ort} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.2)$$

Kızgınlık derecesi;

$$\Delta T_{kızgınlık} = T_{ort} - T_8 \quad (3.3)$$

Kaynama ısı geçişi prosesinde ısı taşınım katsayısı hesabı;

$$h = \frac{q^u}{\Delta T_{kızgınlık}} \quad (3.4)$$

3.2.4 Deneyin yapılışı

Deney düzeneğinde öncelikle tüm elemanlar konstrüktif açıdan birbirlerine uyum sağladığından ve iş güvenliğini tehdit edecek yanlış yerleştirilmiş herhangi bir elektriks bağlantısının bulunmadığından emin olunmalıdır.

Deneyin düzeneğinin hazırlanması ve yapılış şekli aşağıda sırayla sunulmuştur:

- 1) İki parçadan oluşan ısı geçil bloğunun içerisine 100 ohm'luk dirence sahip ana ısıtıcılar termal macunlar sürülerek yerleştirilir. Isıtıcılar ile blok arasında kesinlikle hava boşluğu kalmamalıdır.
- 2) Termo elemanların yerleşiminden önce pozitif ve negatif uçları birbirlerine kaynaklanmalı ve boşluklara yerleştirilirken mutlaka termal macun kullanılarak hava boşluğu kalmamasına özen gösterilmelidir.
- 3) Isı geçiş bloğu gaz beton içerisine yerleştirildikten sonra test edilecek kaynama yüzeyi yine termal macun kullanılarak ısı geçiş bloğuna monte edilir. 1 ve 2 nolu termo elemanların montajında diğerlerinde olduğu gibi termal macun kullanılmalıdır.



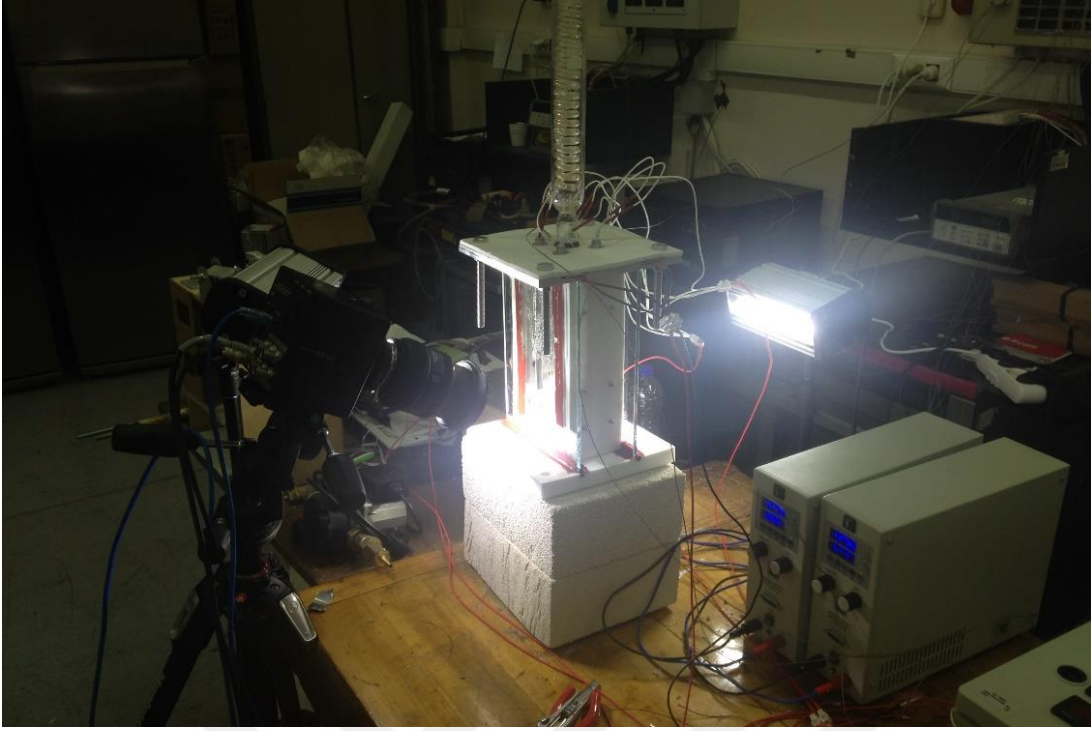
Şekil 3.5: Termal macun sürülmüş yüzey altı termo elemanları.

- 4) Kaynama yüzeyinin montajından sonra test numunesinin ısı geçiş bloğunun dışında kalan kısmı teflon bant ile kaplanarak havuz tabanında herhangi bir sızdırma gerçekleşmesi önlenmiş olur. Sonrasında yüksek sıcaklığa dayanıklı cam, metal ve teflon plakadan oluşan kaynama havuzu kaynama yüzeyi üzerine kapatılır. Havuz duvarını oluşturan Alüminyum duvarların dış kısımları kayıpları azaltmak amacıyla yalıtım ile kapatılmıştır.



Şekil 3.6: Isı geçirgenliğini azaltmak için kullanılan cam yünü.

- 5) Yardımcı ve üst ısıtıcılarının bulunduğu metal tavan kapatılmadan önce kaynama havuzu içerisine bir miktar su konularak herhangi sızdırmazlık olup olmadığı kontrol edilir.
- 6) Sızdırmazlık kontrolünden sonra havuz su ile doldurulur ve üst tavan havuz üzerine kapatılır. Tavanın üzerine yine teflon bant kullanılarak cam tüp kondanser yerleştirilir ve kondanserin su banyosu ile bağlantısı yapılır.
- 7) Ana ısıtıcıların, yardımcı ısıtıcıların ve tavan ısıtıcılarının pano içerisindeki elektrik bağlantıları yapıldıktan sonra son kontroller yapılır ve ana ısıtıcılardan başlayarak kademeli biçimde tüm sistemin gücü devreye alınır.
- 8) Tam anlamıyla kaynama deneyine başlamadan önce deney düzeneğinde kullanılan akışkan içerisindeki çözünmüş gazların arınması için herhangi bir ölçüm alınmadan 3 saat boyunca sıvı kaynatılır.
- 9) Akışkan saf hale getirildikten sonra sistemin başlangıç sıcaklığına dönmesi beklenir.
- 10) Saf akışkan eldesinden sonra sistem ölçüm için hazır hale gelmiş olur. Termo elemanlardan sıcaklık ölçümü alınması için veri toplayıcı ve arayüz programı aktif hale getirilir.
- 11) Ana ısıtıcıların beslendiği DC güç kaynaklarında çalışılmak istenen güç değeri voltaj ayarı yapılarak ayarlanmış olur.
- 12) Ana ısıtıcıların çalışmasından sonra kademeli biçimde diğer ısıtıcılar aktif hale getirilir ve sistemdeki sıcaklıklar ara yüz programından kontrol edilir. Herhangi bir termo elemanda beklenmeyen sıcaklık değeri okunması durumunda sistem derhal kapatılmalıdır.
- 13) Sistem aşama aşama ısınır ve bir müddet sonra kaynama yüzeyi üzerinde çekirdeklenmeler ve kaynama belirtileri görülmeye başlanır.
- 14) Arayüz programında okunan sıcaklık değerlerinin dengeye ulaşması beklenir bu da 2 saat gibi bir süreye tekabül etmektedir. Dengeye ulaştıktan sonra test edilen yüzeyde kaynama ısı geçiş prosesi için ısı akısı ve ısı taşınım katsayısı hesabı yapılır.
- 15) Hızlı kamera sistem dengeye ulaştıktan sonra devreye alınır ve yüzeydeki buhar çekirdeklerinin kabarcıklaşma davranışları için gerekli gözlemler yapılır.

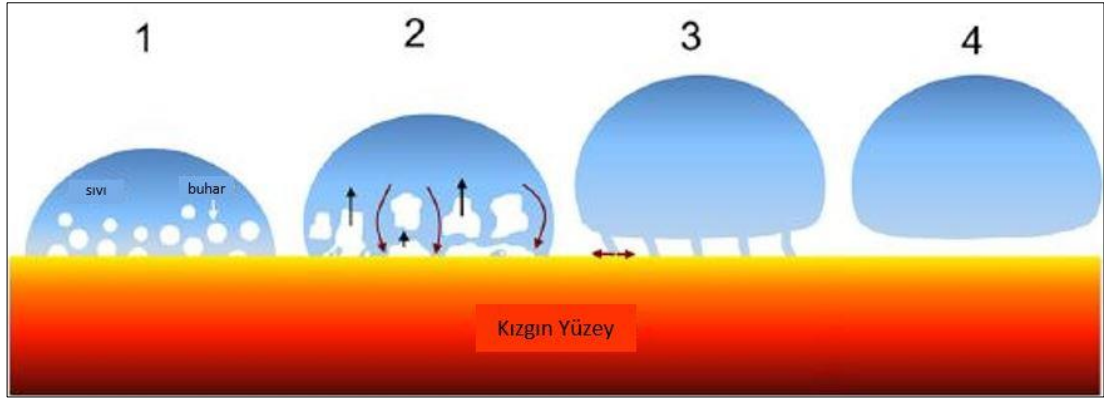


Şekil 3.7: Çekirdeklenme davranışlarının gözlemlenmesi.

16) Deney düzeneğinde gerekli ölçümler ve gözlemler yapıldıktan sonra deney bitirilir. Isıtıcılardan başlayarak sistemde çalışan elektronik elemanlar kapatılır. Ara yüz programı sıcaklıkların kontrolü amacıyla sıvının oda sıcaklığına soğumasından sonra kapatılır. Sıvının oda sıcaklığına soğumasından sonra küçük kapasiteli bir pompa ile sıvı havuzdan tahliye edilir.

3.3 Su Verme / Damla Düşüm Deneyi

Su verme / damla düşüm deney düzeneğinde geliştirilen kaynama yüzeyleri yüksek sıcaklığa geçiş ve film kaynama bölgelerine kızdırılarak üzerlerine düşen damlacıkların buharlaşma süreleri, ölçülerek yüzeylerin yüksek sıcaklıklarda kaynama performansları üzerinde nicel ve nitel bilgilere sahip olunmaktadır. Havuz kaynama deneyinde yüzey ısıtıcı kontrollü olduğu için geçiş ve film kaynama bölgelerine ulaşamamaktadır. Bu nedenle sıcaklık kontrollü bir sistem sayesinde bu bölgelerde yüzeyin kaynama ısı geçiş karakteristiğinin incelenmesi daha mümkündür [2]. Bilindiği üzere yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça kaynama rejimi değişmekte geçiş ve film kaynama türleri görülmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Kızgın yüzeyde damlacığın buharlaşmasında gösterdiği davranış; 1) doğal taşınımlı kaynama 2) çekirdekli kaynama 3) geçiş kaynaması 4) film kaynama [38].

3. ve 4. Kaynama bölgelerinde damlacık ile kızgın yüzey arasında buhar yastığı bulunmaktadır. Bu buhar yastık kızgın yüzey ile sıvı arasında süreksizlik yaratır ve ısı geçişi zorlaşır. Bu süreksizliği kırmak ve sıvıya ısı geçişi sağlamak için yüzeydeki girintilerden faydalanılabilir. Çalışmanın bu bölümünde yüzey girintilerinin buharlaşma süresi üzerinde etkisi incelenecektir.

Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi yüksek sıcaklığa çıkıldığında damlacık buharlaşma süresi üzerinde temas açısının etkisi azalmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan yüzeylerin düz yüzeye göre girintiler sayesinde damlacığa daha iyi temas etmesi ve buharlaşma süresini kısaltarak yüksek sıcaklıklarda da kaynama ısı geçişi iyileştirmesi beklenmektedir. Tasarlanan yüzeyler bu bağlamda Prof. Dr. Seyhan Onbaşioğlu tarafından yürütülen TUBİTAK 1001 projesi kapsamında ele alınan ütü kaynama taban yüzeylerinin performansları ile kıyaslanacaktır.

3.3.1 Deneysel ekipmanlar

Su verme / damla düşüm deneyinde yer alan elemanlar ve özellikleri sırasıyla;

- 1) Isı Geçiş Bloğu: Alüminyum malzemeden üretilmiş ısı geçiş bloğu 50W gücünde ısıtıcıya ev sahipliği yapmanın yanı sıra yüzeyde 3 adet termo eleman yuvası bulunmaktadır.
- 2) Termo Elemanlar: Deney düzeneğinde Omega marka K tipi (Kromel/Alümel) glass kaplamalı 482⁰C’de yalıtım özelliğini yitirmeyecek özellikte 0.9 mm x 1.3 mm boyutunda termo elemanlar kullanılmıştır.
- 3) Isıtıcı: 50W gücünde plaka tipi bir ısıtıcı kullanılmıştır.

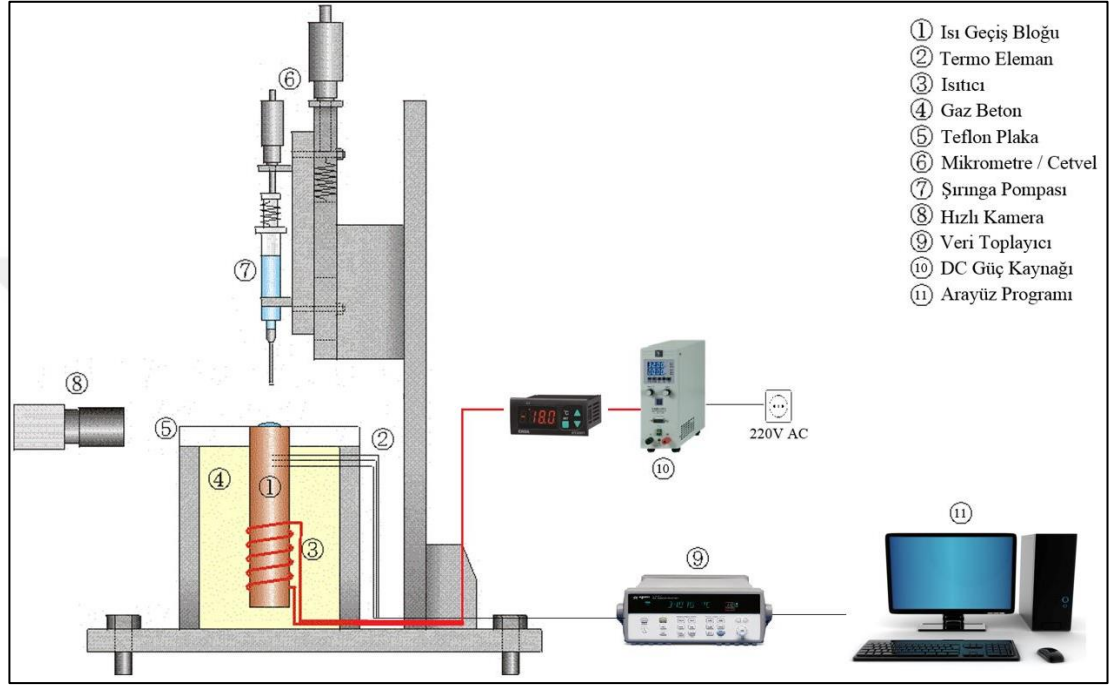
- 4) Gaz Beton: Isı iletim katsayı değeri 0,05 W/mK olan Ytong marka gaz beton tek boyutlu ısı geçişi için yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır.
- 5) Teflon Plaka: Test numunesini bloğa sabitlemek için Polytetrafluoroethylene (PTFE) (teflon) plaka kullanılmıştır. Isı iletim katsayısı değeri 0,25 W/mK'dir.
- 6) Mikrometre / Cetvel: Damlanın atım yüksekliğini ölçmek için cetvel ya da mikrometre kullanımı öngörülmüştür.
- 7) Şırınga Pompası: Damla atımı için bir şırınga pompası tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Sıvı damlacığının çap değerinin tekrar edilen deneyler boyunca sabit kalması veya parametrik olarak incelenmesi için step motor, vidalı mil, vidalı somun, kaplin, ölçekli şırınga, mil yatağından oluşan bir konstrüksiyon, C++ tabanlı bir yazılım olan Arduino'da yazılmış bir bilgisayar programı ile kontrol edilmektedir.



Şekil 3.9: Şırınga pompası.

- 8) Hızlı Kamera: Deney düzeneğinde buharlaşma zamanını, geçiş ve film kaynama bölgesinde damlacığın davranışını incelemek amacıyla PHOTRON marka FASTCAM Mini UX100 model, 1.3 Megapiksel görüntü çözünürlüğü (1280x1025 piksel) çözünürlüğe, maksimum 800.000 fps kayıt hızına sahip bir hızlı kamera ve SIGMA marka 24-70mm f/2.8 if ex dg hsm model 1:5.3 büyütme oranına sahip mercek kullanılmıştır.
- 9) Veri Toplayıcı: Hassas sıcaklık ölçümü AGILENT marka 34970A model veri toplayıcı (data acquisition) cihazı kullanılmıştır.

- 10) DC Güç Kaynağı: Plaka tipi rezistansı beslemek için EA ELEKTRO-AUTOMATİK marka EA-PS 8032-10 T model maks. 160V gerilim uygulanabilen 640W gücündeki DC güç kaynağı ünitesi kullanılmıştır.
- 11) Arayüz Programı: Veri toplayıcı cihaza termo elemanlar vasıtasıyla iletilen sıcaklık bilgileri bir arayüz programında işlenmekte ve bilgisayar ortamında sıcaklık cinsinden anlık olarak görüntülenip kaydedilmektedir.



Şekil 3.10: Su verme / damla düşüm deneysel elemanlarının yerleşimi.

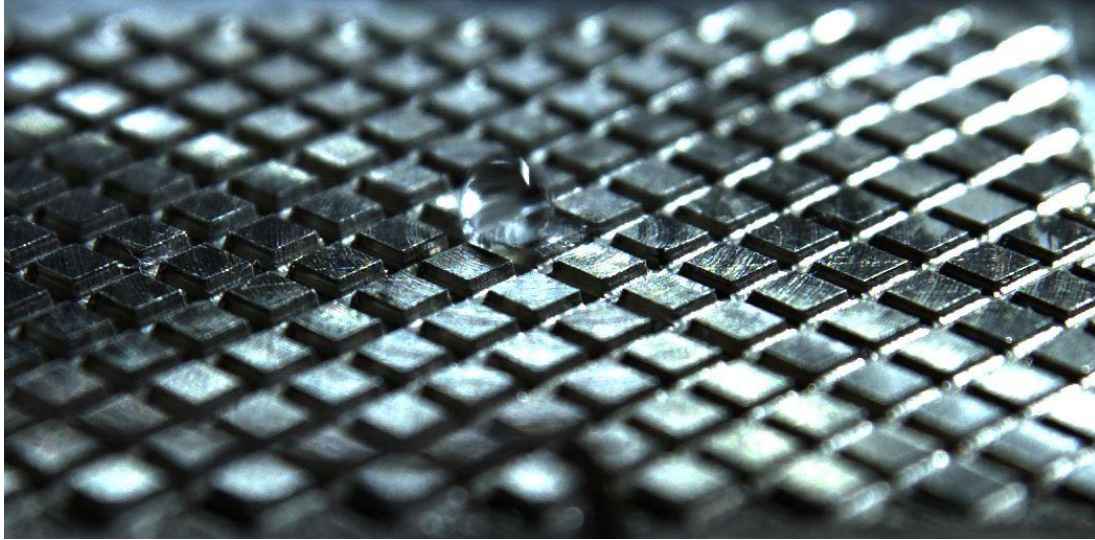
3.3.2 Deneyin yapılışı

- 1) Su verme / damla düşüm deneyine başlamadan önce diğer çalışmada da olduğu gibi donanımsal tüm bağlantılar kontrol edilmeli ve iş güvenliği güvence altına alınmalıdır.
- 2) Test edilecek yüzeyler ilk önce alkol ile temizlenmeli üzerlerinde herhangi bir tortu, yabancı cisim kalmamasına özen gösterilmelidir.
- 3) Test yüzeyinin alt tarafına yüzey sıcaklığı ölçümü yapacak termo elemanlar yerleştirilir ve termal macun sürülerek ısı geçiş bloğunun üzerine arada herhangi bir boşluk kalmadan iyi temas edecek biçimde yerleşimi sağlanır.
- 4) Elektrik panosundan sıringa pompası üzerinde gerekli ayarlar yapılır. Atılmak istenen damla hacmi belirlenir. Damlanın küre şeklinde olduğu varsayılarak çap değerine ulaşılabilir.

- 5) Hızlı kameranın kurulum işlemleri tamamlandıktan sonra merceği damlanın düşeceği bölgeye odaklandırılır. Kamera ile uyumlu olan PVF adlı ara yüz programı çalıştırılarak görüntü netliği kontrol edilir, ışık ayarlarında gerekli düzenlemeler yapılır.
- 6) Isı geçiş bloğunda ısıtılması için DC güç kaynağı açılır ve blok içerisinde sıcaklık dağılımının denge koşullara gelmesi beklenir. Bir PID kontrolör ve röle yardımıyla yüzey sıcaklığının incelenmek istenen sıcaklığa ulaşması sağlanır. Aynı zamanda ara yüz programından noktasal sıcaklık değerleri de kontrol edilmelidir.
- 7) İstenen sıcaklığa ulaşıldıktan kamera kayda alınır ve sonra şırınga pompasına komut verilir. Damlanın buharlaşması süreci kamera ile görüntülenir ve buradan buharlaşma zamanı ölçülür, yüksek sıcaklıkta test edilen kaynama yüzeyinde damlacığın davranışı gözlemlenir.

3.3.3 Buharlaşma zamanı ölçümü

Su verme / damla düşüm deneyinde damlanın buharlaşma süresi hızlı kamera vasıtasıyla ölçülür. Hızlı kameranın arayüz programında Şekil.3.11’de görüldüğü gibi damlanın yüzeye çarptığı an ile yüzeyden buharlaştığı an arasındaki süre ölçülerek incelenen kaynama yüzeyinde damlanın buharlaşma zamanı belirlenir.



Şekil 3.11: Hızlı kamera ile kızgın çelik yüzeye damla düşüm anının çekimi.

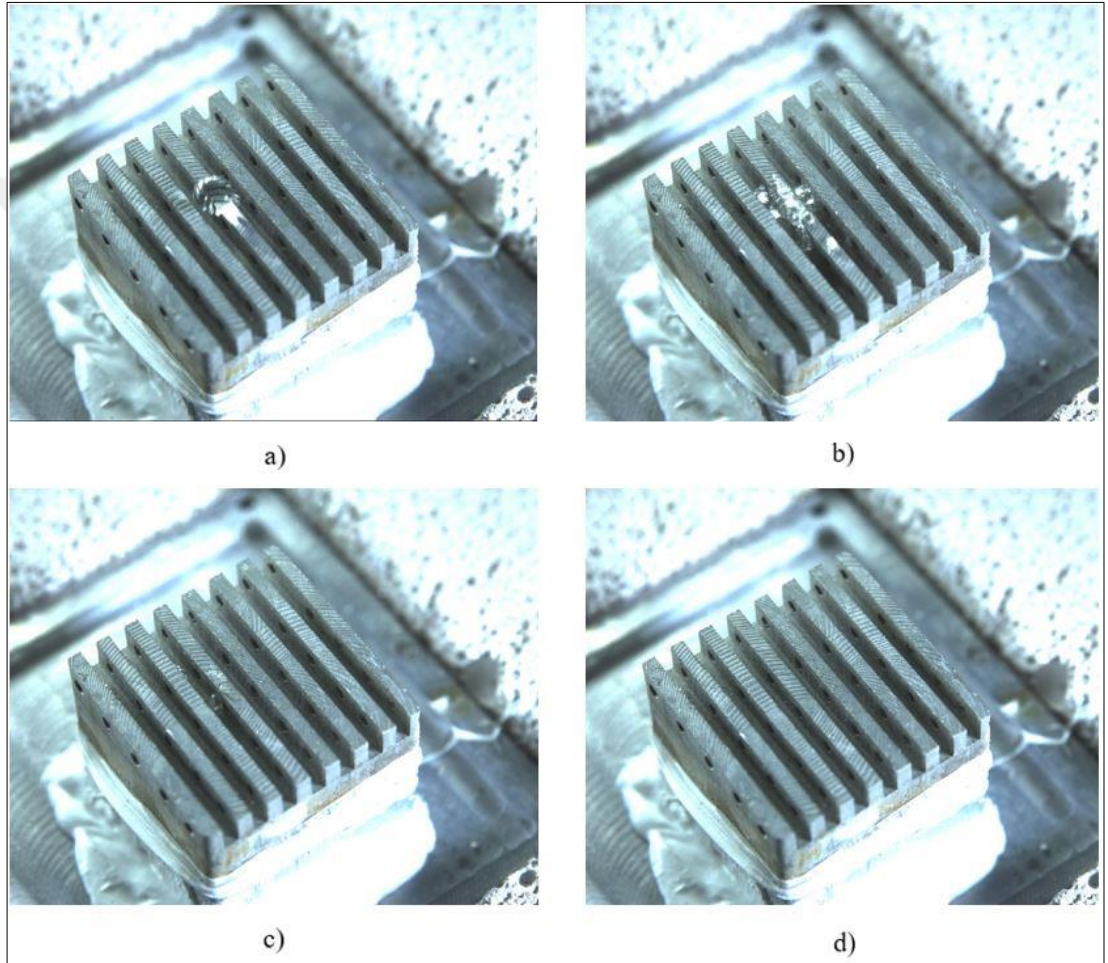
Damlacık yüzeye düştükten sonra hızla buharlaşma gerçekleşir. Yüzeydeki metallerin yapılarına bağlı olarak sıçrama yapabilmektedir. Bu nedenle deney birçok kere tekrar

edilmiştir. Deneyin tekrarlanabilirliği açısından diğer sonuçlarla bağdaşmayanlar değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Damlanın buharlaşma zamanı;

$$t_{buharlaşma} = t_{düşme} - t_{kaybolma} \quad (3.5)$$

Su verme / damla düşüm deneyinde damlanın düşmesinden buharlaşıp yüzeyi terk etmesine kadar geçen sürede geçirdiği aşamalar Şekil 3.12’de verilmiştir:



Şekil 3.12: Kızgın yüzeyde su damlacığının a) yüzeyle ilk teması b) kızgın yüzeyde kaynaması c) yüzeyden buharlaşması 4) yüzeyin tamamen kuruması



4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Havuz kaynama deneyi 7 farklı kaynama yüzeyi için 6 farklı DC voltaj değerinde yapılmıştır. Yüzey yapısına bağlı olarak tam gelişmiş çekirdekli kaynama ve kısmi çekirdekli kaynama bölgeleri yakalanmıştır, kaynama eğrisi üzerine gösterilmiştir. Literatürde yer alan girintili tünelli yapıların kaynama deneylerinde elde edilen ısı taşınım katsayıları, kızdırma dereceleri ve ısı akıları göz önünde bulundurularak karşılaştırma yapılmıştır. 2 adet kaynama yüzeyi su verme / damla düşüm deneylerinde kaynama ısı geçiş performansı test edilmiş ve TUBİTAK 1001 projesi kapsamında çalışılan yüzeylerin performansı ile kıyaslanmıştır.

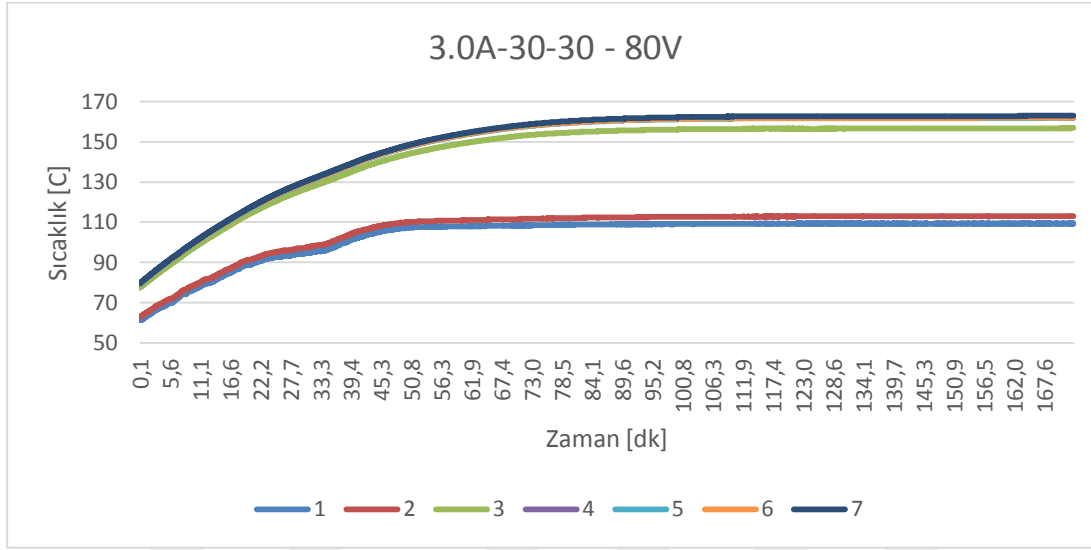
4.1 Havuz Kaynama Deney Sonuçları

Her bir test numunesi için 6 farklı DC voltaj değerinde havuz kaynama deneyleri yapılmıştır. Uygulanan akım, voltaj ve enerji değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. DC güç kaynakları 2 adet olduğu için güç değeri 2 kat olarak yazılmıştır.

Çizelge 4.1: Havuz kaynama deneyinde uygulanan akım, voltaj ve güç değerleri.

Deney No:	Voltaj [V]	Akım [A]	Güç [W]
1	80	0,8	128
2	90	0,9	162
3	100	1	200
4	110	1,1	242
5	120	1,2	288
6	125	1,25	312,5

Her bir 5 farklı kaynama yüzeyi için toplam 24 deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için sistem sıcaklıklarının dengeye gelmesi beklenmiştir. (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: 1.5G-3A-30-30 numunesinin 120V'da gerçekleştirilen havuz kaynama deneyindeki sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi.

Çizelge 4.2'de tüm yüzeyler için deneysel olarak ölçülen kızdırma dereceleri ve hesaplanan ısı akılar ve kaynama ısı taşınım katsayıları görülmektedir.

Düz yüzeyde, yüzeyin aşırı ısınması ve kararmasından dolayı güvenlik amacıyla 125 DC Volt için havuz kaynama deneyi tekrarlanmamıştır.

Havuz kaynama deneyinde ısı akısı ölçümü 5 nolu blok içi termo eleman ile 3 nolu termo eleman arasında Fourier ısı iletim denklemi yazılarak yapılmıştır.

Isı geçiş bloğu malzemesi bakır olarak seçildiği için ısı iletim katsayısı $k = 400 \text{ W/mK}$ olarak belirlenmiştir.

3 ve 5 nolu termo elemanlar arasındaki uzaklık 22 mm olduğundan denklem 3.1'deki $\Delta l = 0,022 \text{ m}$ olarak yazılmıştır.

Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4 kullanılarak yüzey kızdırma derecesine ve kaynama ısı geçiş prosesindeki ısı taşınım katsayısı değerlerine ulaşılmıştır.

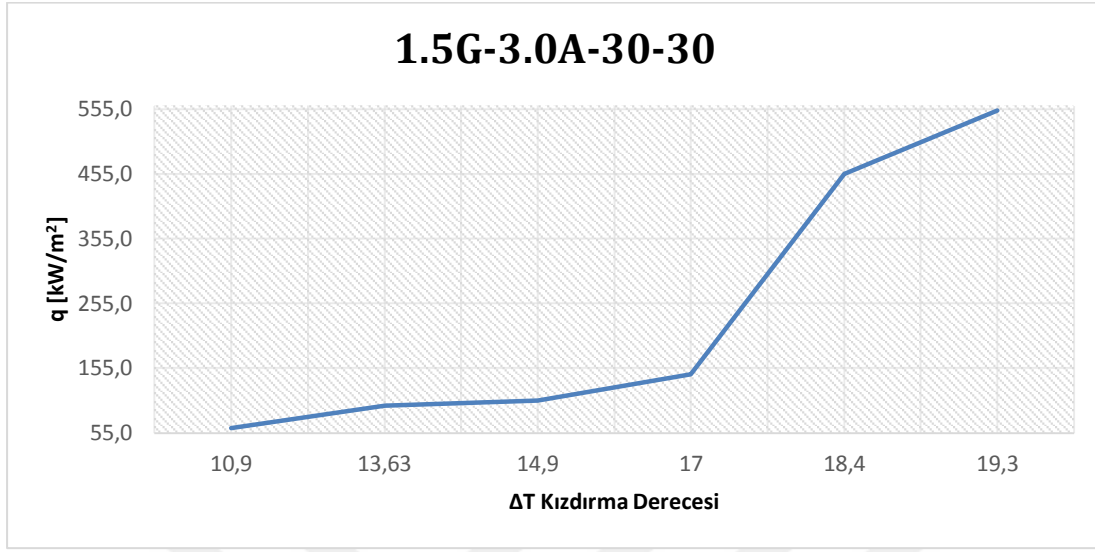
Çizelge 4.2: Havuz kaynama deney sonuçları çizelgesi.

Yüzey No	Voltaj [V]	T _{ort} [C]	T ₃ [C]	T ₅ [C]	k [W/mK]	l [m]	q [kW/m ²]	Kızdırma Derecesi [C]	h [kW/m ² K]
Düz-30-30	80	120,05	156,9	160,8	400	0,022	70,91	20,1	3,54
	90	124,14	173,43	178,65	400	0,022	94,91	24,1	3,93
	100	125,415	190,7	197,2	400	0,022	118,18	25,4	4,65
	120	133,04	238,4	249,14	400	0,022	195,27	33,0	5,91
3.0A-30-30	80	111,14	156,77	161,91	400	0,022	93,45	11,1	8,39
	90	112,89	172,39	179,19	400	0,022	123,64	12,9	9,59
	100	114,89	189,54	198,18	400	0,022	157,09	14,9	10,55
	110	116,87	209,77	220,38	400	0,022	192,91	16,9	11,44
	120	118,8	244,26	257,29	400	0,022	236,91	18,8	12,60
	125	119,67	270,36	283,43	400	0,022	237,64	19,7	12,08
1.5G-2.0A- 30-30	80	107,43	148,11	154,76	400	0,022	120,91	7,4	16,27
	90	108,965	162,41	171,31	400	0,022	161,82	9,0	18,05
	100	110,56	178,73	191,8	400	0,022	237,64	10,6	22,50
	110	111,5	195,9	212,75	400	0,022	306,36	11,5	26,64
	120	113,29	229,1	250,4	400	0,022	387,27	13,3	29,14
	125	113,68	260	283,16	400	0,022	421,09	13,7	30,78
1.5G-3.0A- 30-30	80	110,9	150	153,44	400	0,022	62,55	10,9	5,74
	90	113,63	166,9	172,25	400	0,022	97,27	13,6	7,14
	100	114,9	178,79	184,54	400	0,022	104,55	14,9	7,02
	110	117	198,4	206,4	400	0,022	145,45	17,0	8,56
	120	118,4	232,4	257,43	400	0,022	455,09	18,4	24,73
	125	119,3	245,9	276,31	400	0,022	552,91	19,3	28,65
2.0G-2.0A- 30-30	80	106,99	148,06	154,56	400	0,022	118,18	7,0	16,91
	90	108,39	162,24	170,7	400	0,022	153,82	8,39	18,33
	100	109,94	177,89	187,96	400	0,022	183,09	9,94	18,42
	110	111,55	201,2	213,93	400	0,022	231,45	11,55	20,04
	120	112,27	237,4	253,03	400	0,022	284,18	12,27	23,16
	125	112,5	272,05	290,13	400	0,022	328,73	12,5	26,30

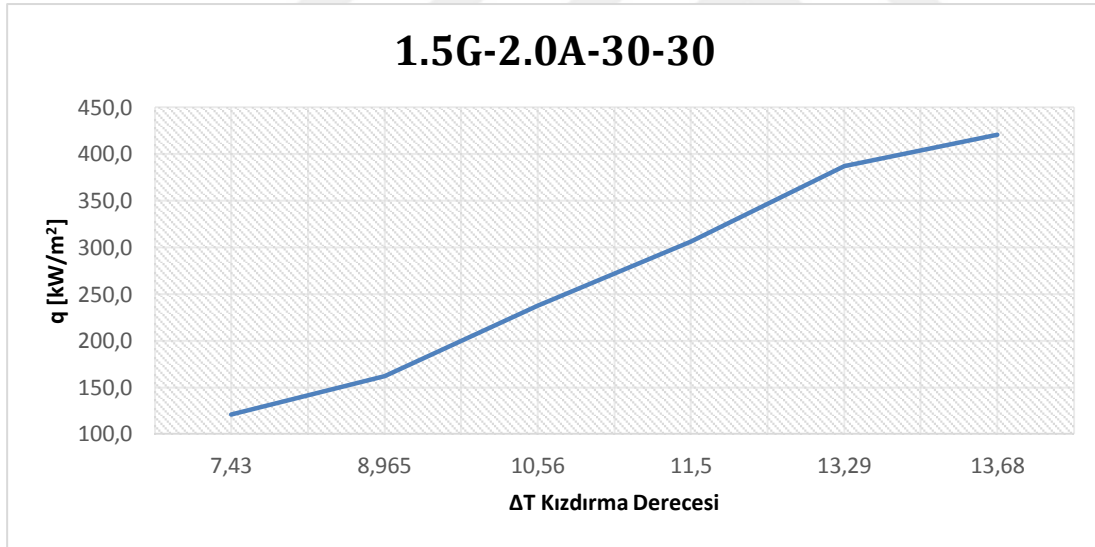
Sıcaklıklar dengeye ulaştığında yüzeylerin buhar çekirdeklenmesi davranışları hızlı kamera ile kayıt altına alınmıştır.

4.1.1 Çekirdekli kaynama eğrisi

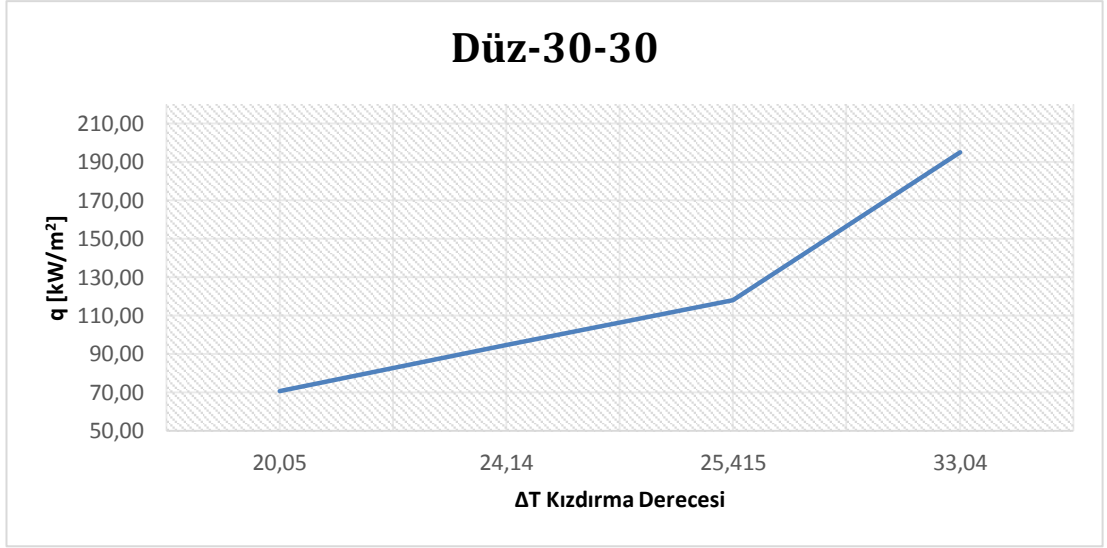
7 farklı yüzey için çekirdekli kaynama eğrisinin bir bölümü elde edilmiştir.



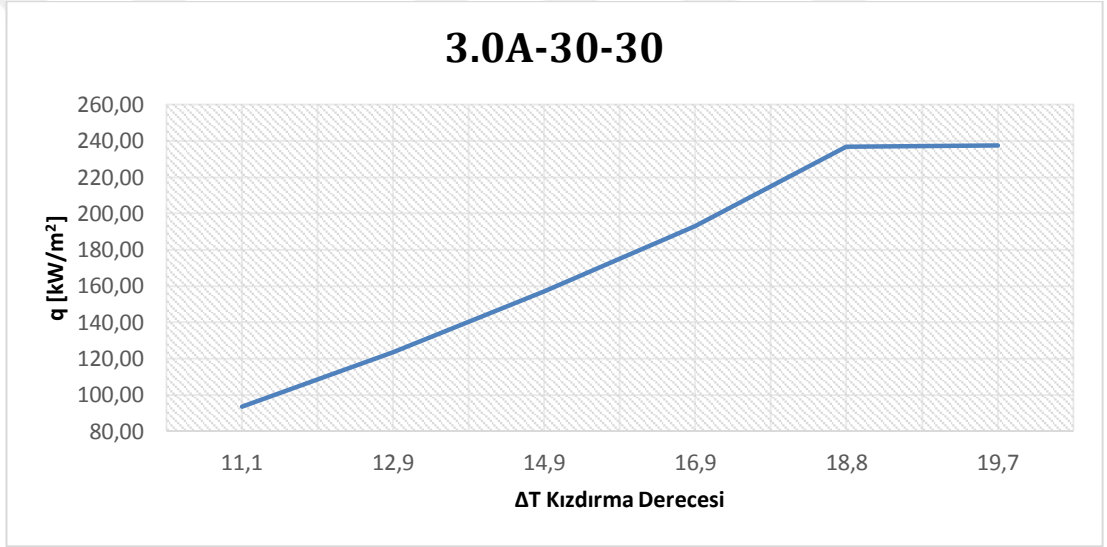
Şekil 4.2: 1.5G-3.0A-30-30 için çekirdekli kaynama eğrisi.



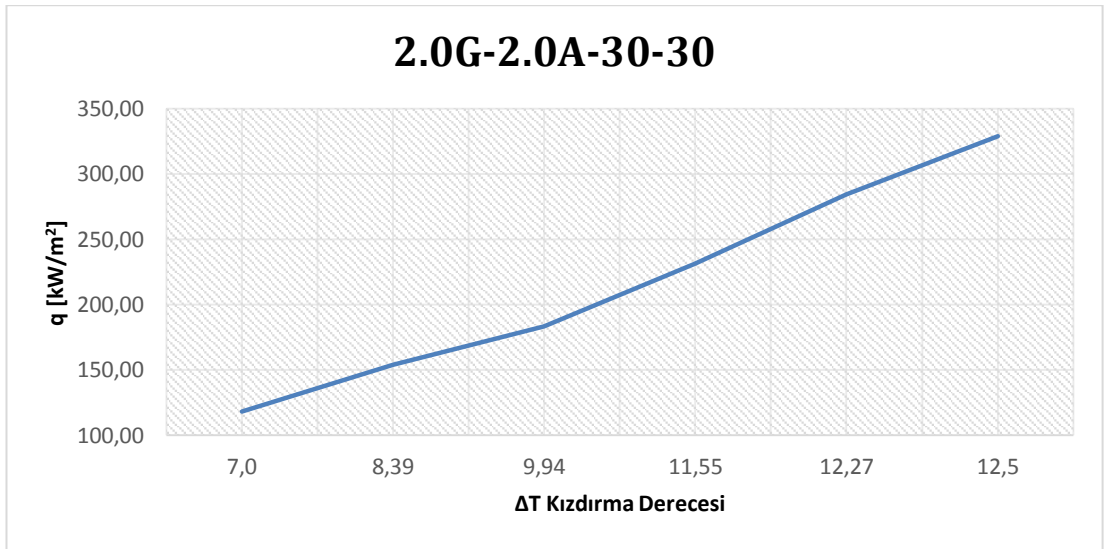
Şekil 4.3: 1.5G-2.0A-30-30 için çekirdekli kaynama eğrisi.



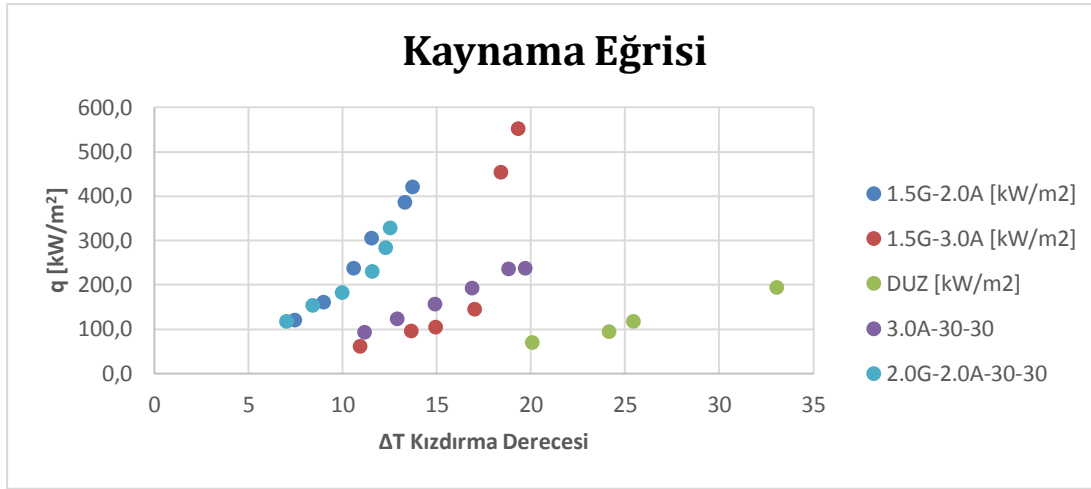
Şekil 4.4: Düz-30-30 yüzeyi için çekirdekli kaynama eğrisi.



Şekil 4.5: Gözeneksiz girintili yüzey için çekirdekli kaynama eğrisi.



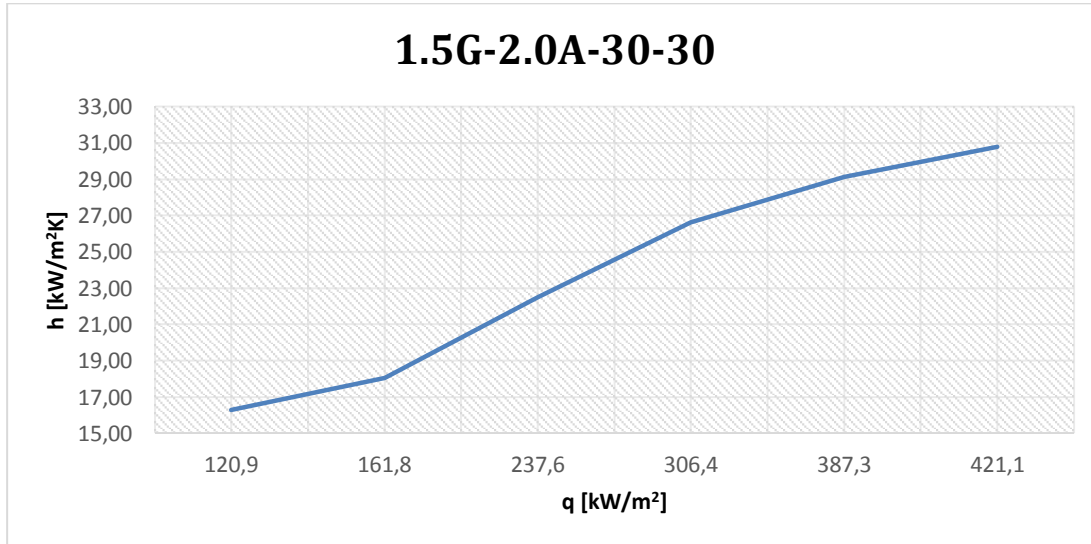
Şekil 4.6: 2.0G-2.0A-30-30 için çekirdekli kaynama eğrisi.



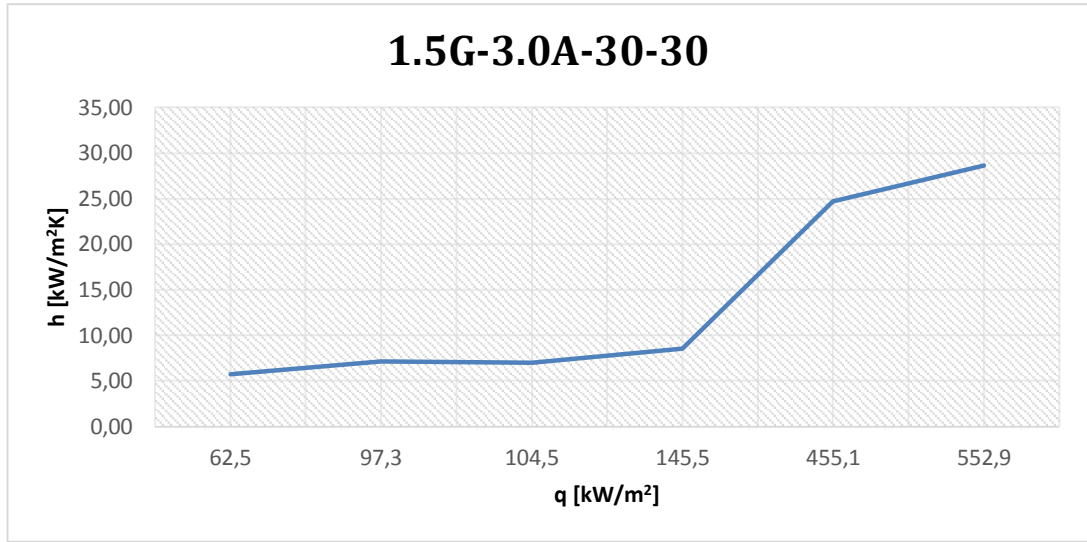
Şekil 4.7: Çalışılan kaynama yüzeylerinin kaynama eğrilerinin tek bir grafikte noktasal gösterimi.

4.1.2 Isı taşınım katsayısı – ısı akısı eğrisi

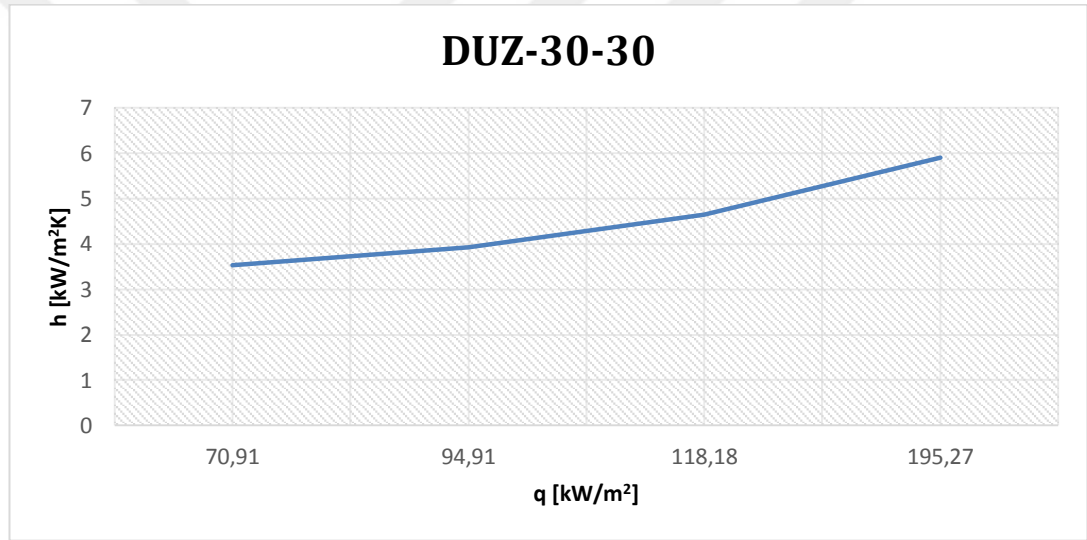
Kaynama ısı geçiş iyileştirmesi için en önemli faktörlerden biri test edilen kaynama yüzeylerinin ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkileridir. Isı taşınım katsayısı verilen ölçülen ısı akısı ve kızdırma derecesine bağlı olarak Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıda şekillerde her bir yüzeyde hesaplanan ısı taşınım katsayılarının ısı akısı ile değişimi görülmektedir:



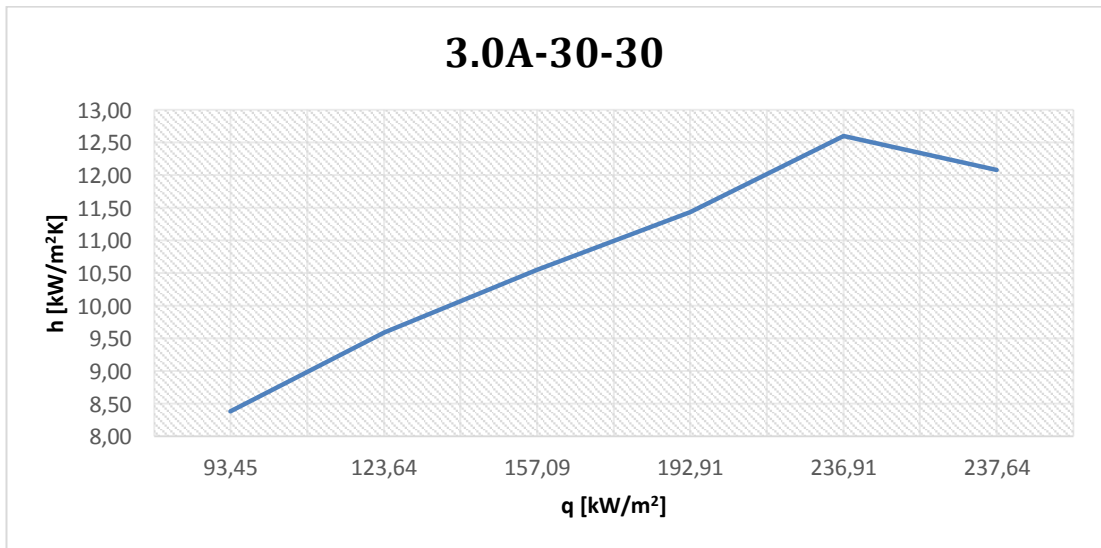
Şekil 4.8: 1.5G-2.0A-30-30 için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.



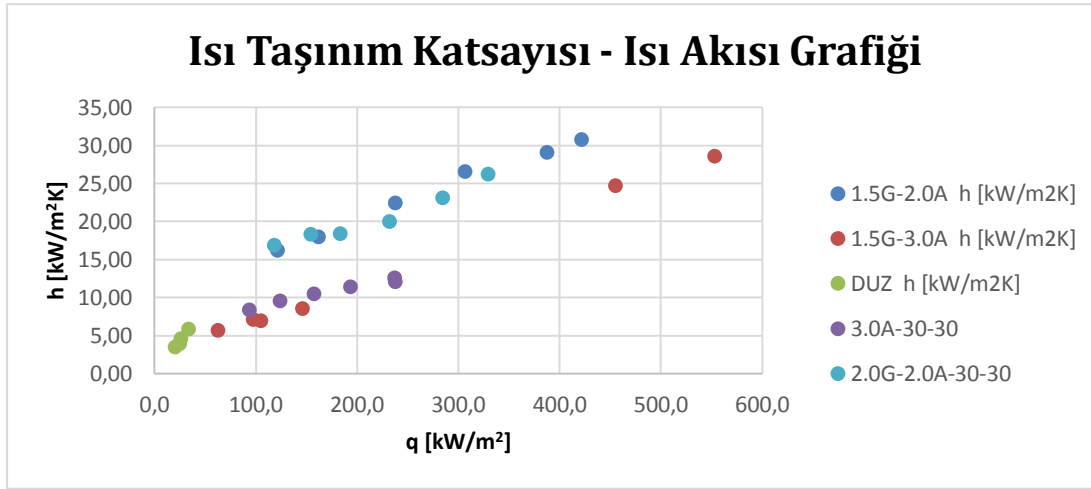
Şekil 4.9: 1.5G-3.0A-30-30 için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.



Şekil 4.10: Düz-30-30 için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.



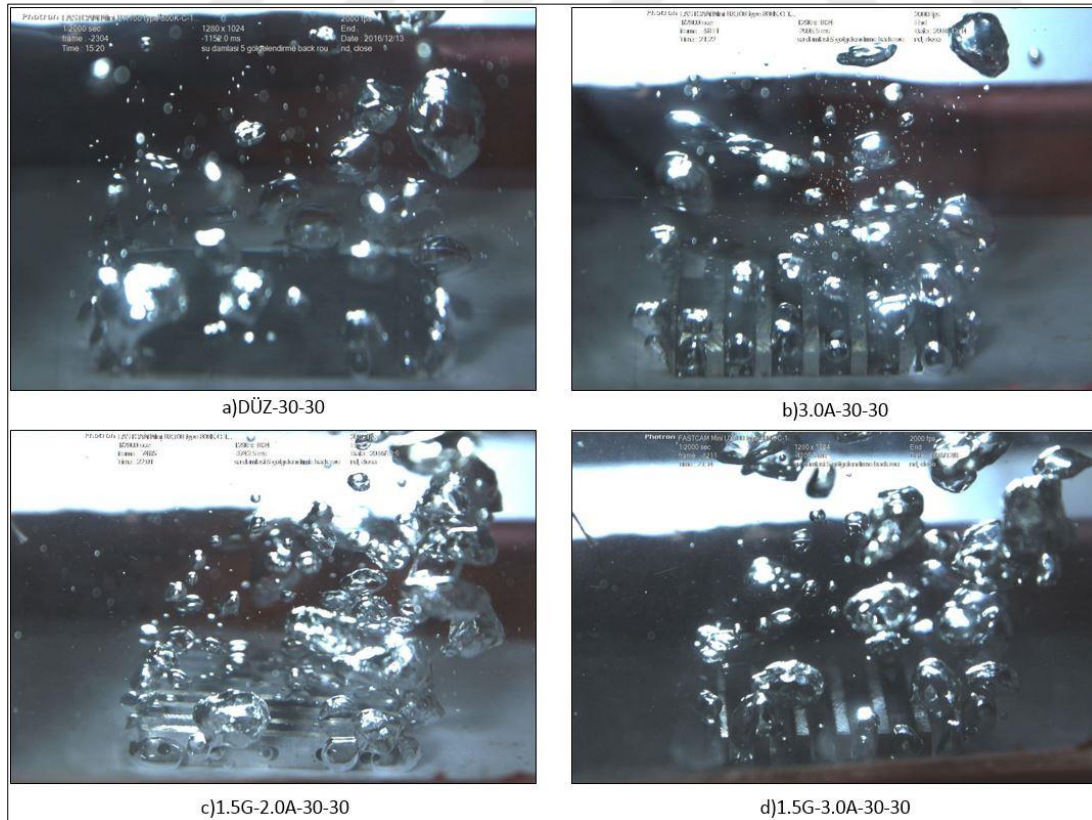
Şekil 4.11: Gözeneksiz girintili yüzey için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği.



Şekil 4.12: Çalışılan kaynama yüzeylerinin ısı taşınım katsayısı – ısı akısı eğrilerinin tek bir grafikte noktasal gösterimleri.

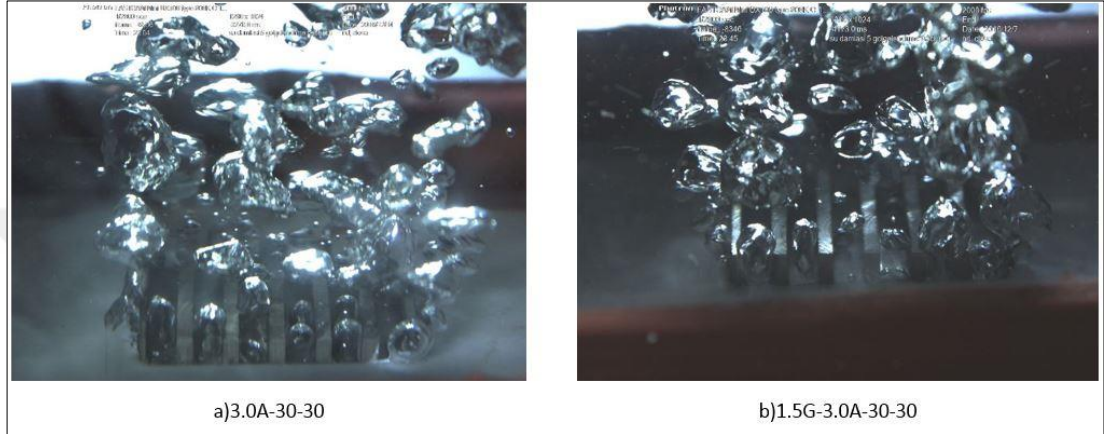
4.1.3 Çekirdeklenme davranışları

Hızlı kamera ile yüzeyde oluşan kabarcıkların oluşumları frekansları; ısı akısı ve yüzey kızdırma dereceleri ile değişen davranışları gözlemlenmiştir. Hızlı kamera çekimleri 2000 fps’da yapılmıştır. Değerlendirme her bir DC voltaj değeri için ayrı ayrı yapılmıştır.

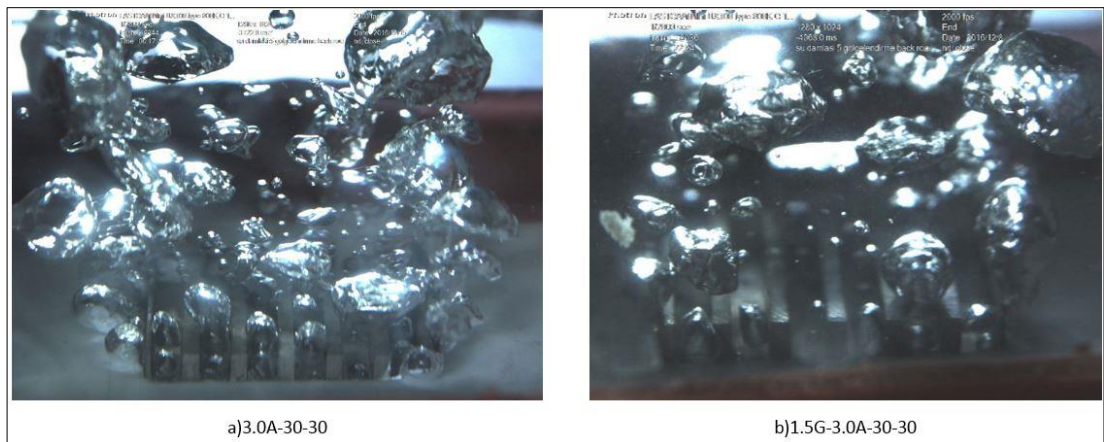


Şekil 4.13: 80 DC voltajda buhar çekirdeklenmesinin hızlı kamera görselleri.

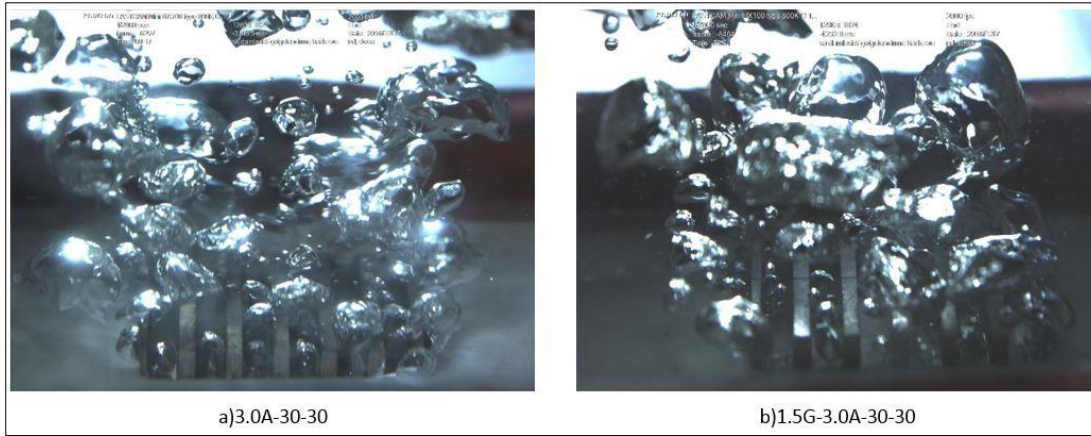
Uygulanan voltaj değeri aynı olsa da blok içerisinde yüzey yapısına bağlı olarak kaynamanın kararlı rejime oturduğu ısı akısı değerleri birbirlerinden farklıdır. Bu noktada litertürdeki değerlendirme bakış açılarının ışığında yüzeyleri kıyaslarken yüksek ısı akısı ve düşük ısı akısı bazında değerlendirmek daha uygun olacaktır. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi girintili ve gözenekli yüzeylerde çekirdeklenme odaklarına imkan sağlayan yapıların varlığı çekirdeklenme yoğunluğunu arttırmıştır. Bu iyileştirme 3 yüzeyde düz yüzeye göre 1,5-6 kat daha fazla ısı taşınım katsayısı görülmesine neden olmuştur.



Şekil 4.14: 2 yüzeyin 90 dc voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri. Aynı girinti aralığına sahip yüzeylerde düşük ısı akılarında gözeneklerin varlığı iyileştirme sağlayamamış 3.0A-30-30 yüzeyinde gözeneklerin yerini çekirdeklenme odakları aldığından daha iyi bir sonuç çıkmasına neden olmuştur. 2,0 mm girinti aralığına sahip yüzeyde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde düşük ısı akılarında girinti aralıklarının etkisinin gözeneklerin etkisinden çok daha yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir.

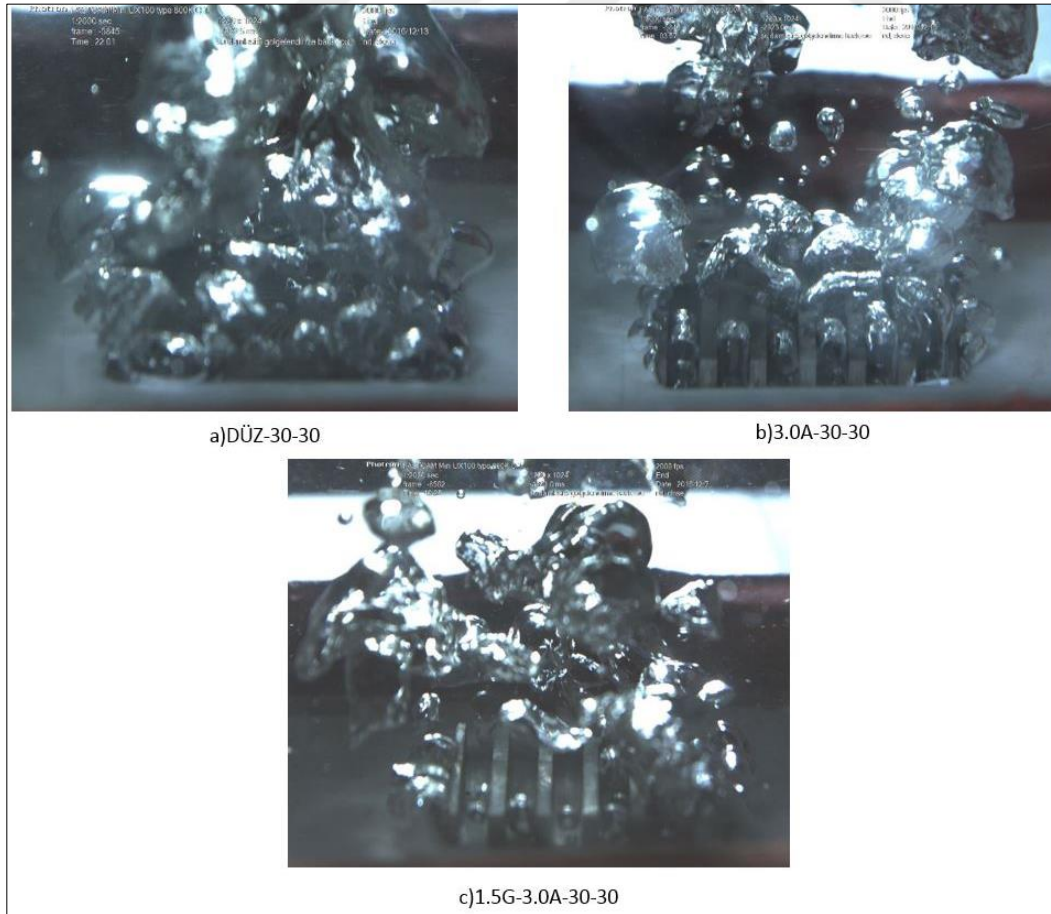


Şekil 4.15: 2 yüzeyin 100 DC voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.

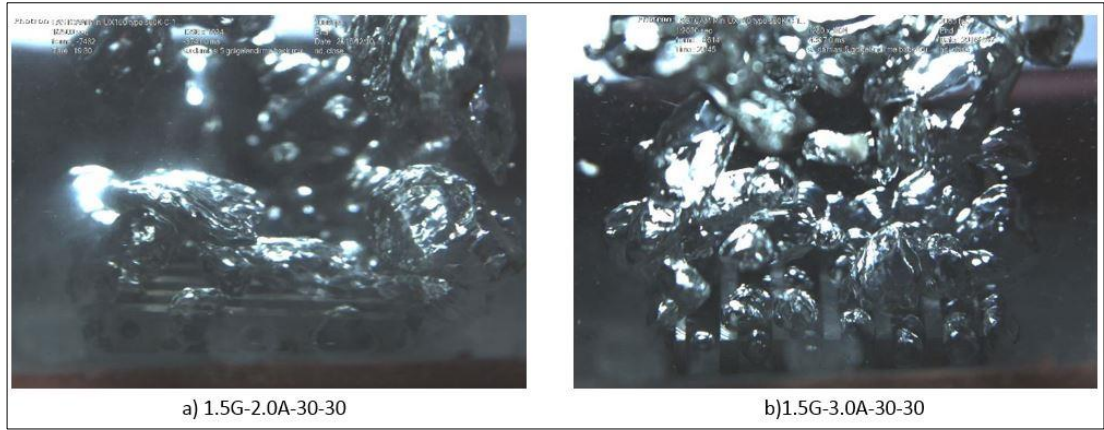


Şekil 4.16: 2 yüzeyin 110 DC voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.

Isı akısı arttıkça yüzeyde birim zamanda oluşan çekirdeklenme yoğunluğunda artış meydana gelir. Bu artış tüneller içerisinde buhar kabarcıklarının geçiş trafiğini yoğunlaştırmanın yanında bu yoğunlukta sıvı emilimini zorlaştırır. Bu emilim için gözenekler devreye girer ve ısı akısının artışı ile gözenekli yapıların önemi de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.17: 2 yüzeyin 120 dc voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.



Şekil 4.18: 2 yüzeyin 125 dc voltajda çekirdeklenme esnasında hızlı kamera görselleri.

Isı akısı daha fazla arttırılırsa yüzey üzerinde buhar kabarcıkları mantar bulutu şeklinde birleşirler ve buhar jeti halinde yukarı doğru hareket ederler. Bu birleşmeler yüzeyde meydana gelirse kızgınlık derecesinin ani artışına sebep olurken kaynamanın doygunluk noktasına ulaştığının ve çekirdekli kaynamanın sonlandığının da bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Yüzey üzerinde kümelenmeler kararsız buhar filmi oluşumuna neden olabilir.

4.1.4 Kaynama ısı geçiş performans değerlendirilmesi

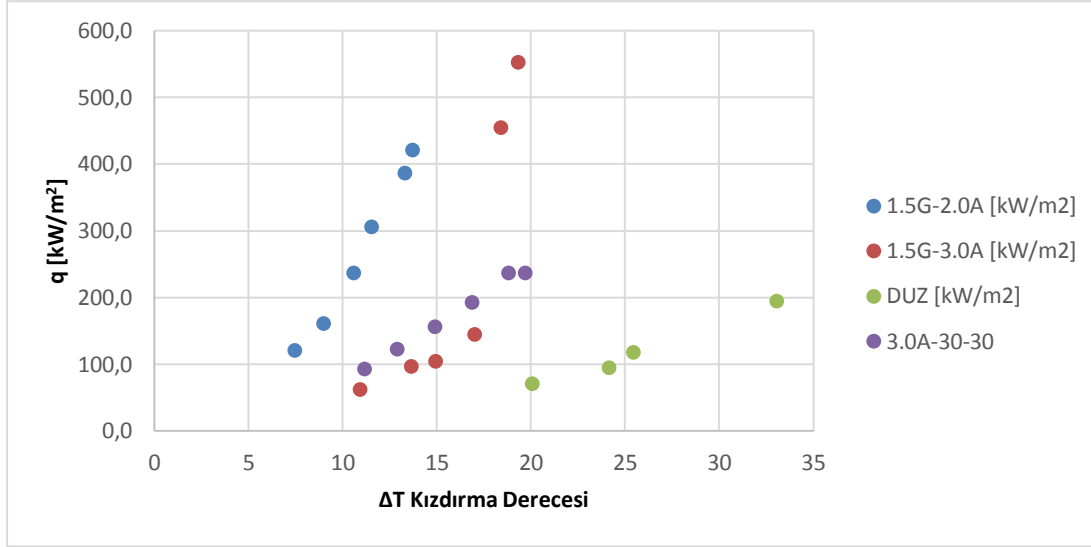
Her yüzey yapısı gözenek ve girinti aralıklarının etkisinin görülmesi için parametreye bağlı olarak kategorize edilerek değerlendirilmiştir.

4.1.4.1 Tünel aralıklarının etkisi

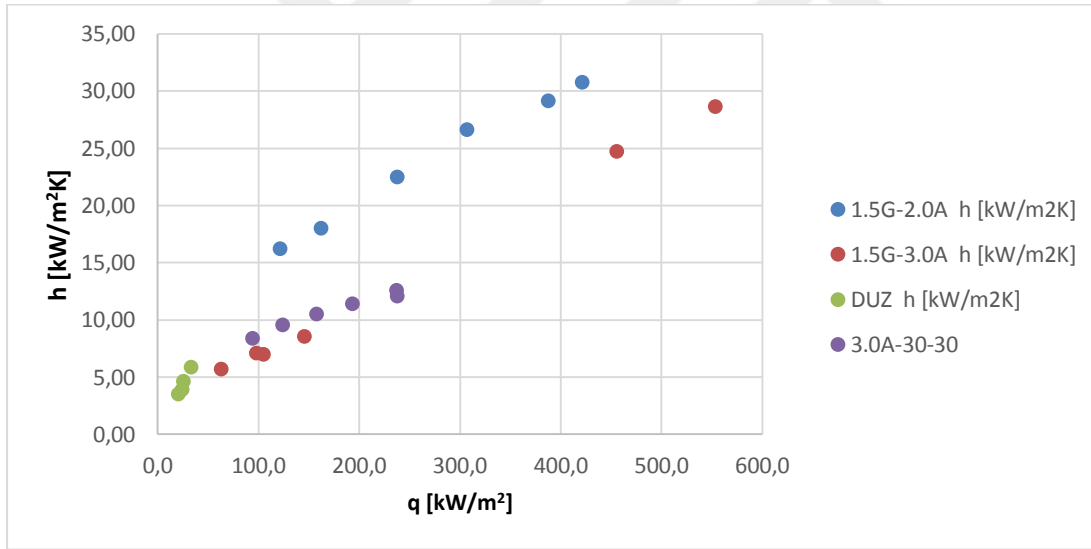
1.5G-2.0A-30-30 ve 1.5G-3.0A-30-30 kaynama yüzeyleri ile 2.0G-2.0A-30-30, 2.0G-2.0A-30-30 ve 2.0G-4.0A-30-30 kaynama yüzeyleri aynı gözenek çapında tünel aralığının etkisi için kendi içlerinde kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Şekil.4.19 ve Şekil.4.20’de 1,5 mm gözenek çapına sahip iki kaynama yüzeyi ile üzerinde herhangi bir yapı bulunmayan düz yüzeyin; kızdırma derecesine bağlı olarak ısı akısı grafiği ve ısı akısına bağlı olarak ısı taşınım katsayısı grafikleri görülmektedir. Bilindiği ve değinildiği üzere yüzey kızdırma derecesi arttıkça kaynama ısı geçiş mekanizmasını kullanan uygulama alanlarında metal yüzeyin kuruması, yanması ve ergimesi nedeniyle güvenlik problemleri oluşmaya başlar. Bu tez çalışmasında düz yüzeye alternatif olarak geliştirilen gözenekli ve girintili tünelli yüzeylerde kaynama ısı geçiş performansı düz yüzeye göre oldukça tatmin edicidir. 20⁰C’lik kızdırma derecesi için düz yüzeye göre 1.5G-3.0A-30-30 yüzeyinde yaklaşık 10 kata yakın daha

fazla ısı akısı görülmektedir. Bu da yapılandırılmış yüzeylerin başarısının nicel anlamda karşılığıdır.



Şekil 4.19: 1,5 mm gözenek çapı için kaynama eğrisi üzerinde aralıkların kıyaslanması.



Şekil 4.20: 1,5 mm gözenek çapı için ısı taşınım katsayısı eğrisi üzerinde aralıkların kıyaslanması

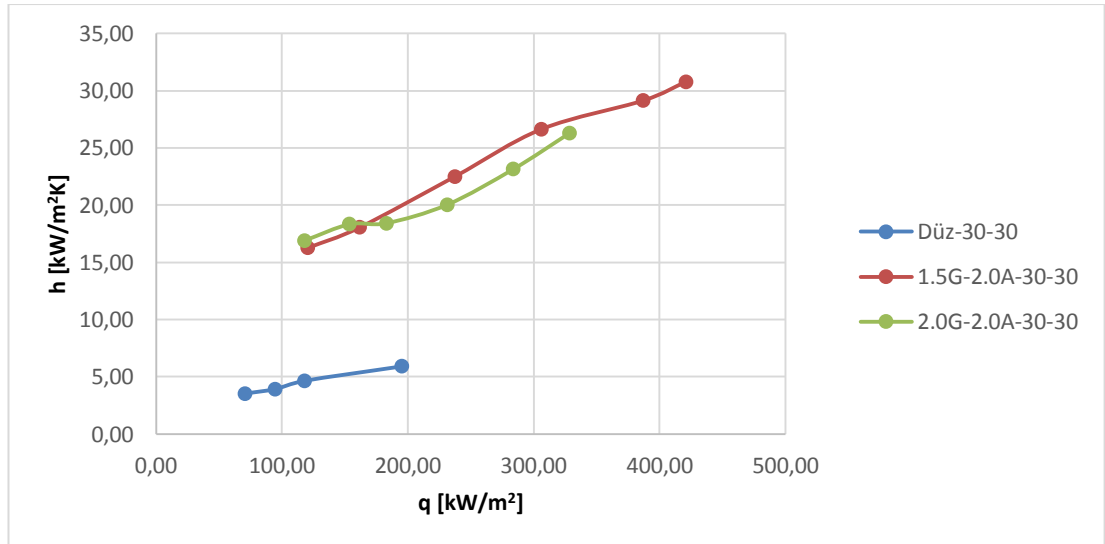
Ek olarak, 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyi aynı yüzey boyutu içerisinde ısı geçiş alanını arttırmasından dolayı 1.5G-3.0A-30-30 yüzeyinden daha üstün bir performansa sahiptir. Bu üstünlük elbette sadece alan artışı ile açıklanamaz. Girintilerin artışı yüzeyde oluşan buhar kabarcıklarının aktif çekirdeklenme odakları olumlu etkilemiştir ve buhar kabarcıklarının çekirdeklenme yoğunluğu üzerinde pozitif bir etki yaratmıştır. Bu durum hızlı kamera ile çekilen görsellerde rahatlıkla görülebilir (Şekil 4.13). Ancak girinti aralıklarının azalması her zaman kaynama ısı geçiş iyileştirmesi

için olumlu sonuçlar doğurmayabilir. 4 mm tünel yüksekliği için buhar kabarcıkları dar aralıklardan yüzeyi terk edememeleri durumunda birleşerek yüzey üzerinde buhar yastığı meydana getirmeleri de olasıdır. Nitekim hızlı kamera görselleri incelendiğinde yüksek ısı akılarına çıkıldıkça kabarcıkların mantar şeklinde birleşerek yukarı yönde buhar jeti halinde hareket ettikleri görülür. Bu formasyon başka çalışmalarda da görülmüştür [2, 16, 39].

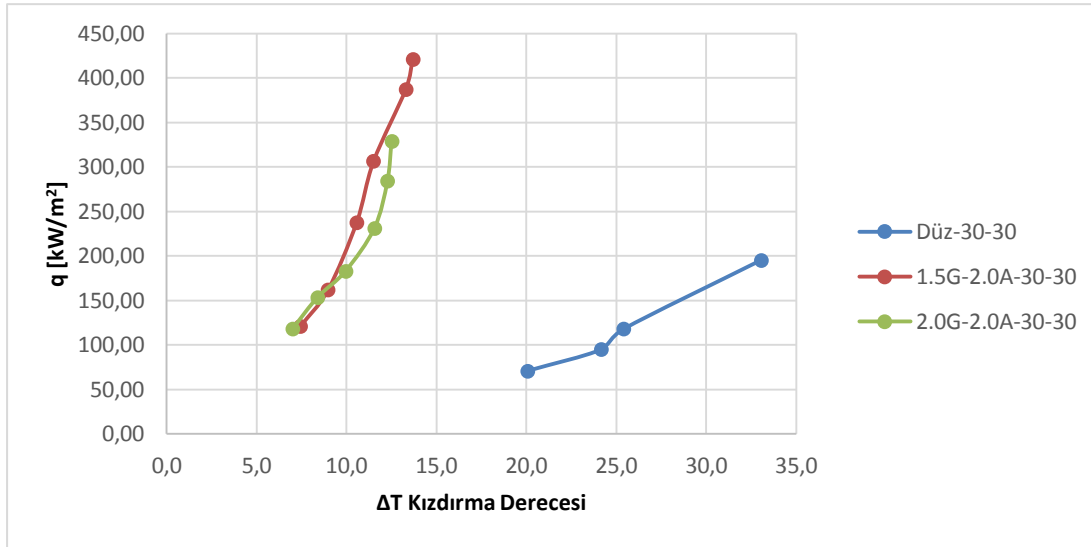
Bir diğer yandan düşük ısı akılarında gözeneksiz girintili yüzey aynı girinti aralığına sahip gözenekli yüzeye göre aynı ısı akısı için daha yüksek ısı taşınım katsayısına sahip olmuştur. Bunun nedenleri arasında düşük ısı akılarında çekirdeklenme yoğunluğunun düşük olması bu nedenle akışkan alışverişi yapacak mekanizmalara ihtiyaç olmaması düşünülebilirken gözeneksiz yüzeyin yüksek ısı akılarına çıkıldıkça kaynama ısı geçiş iyileştirmesi için yeterli olmadığı 20°C kızgınlık derecesinde kritik ısı akısı değerine (KIA) ulaşmasıyla anlaşılabılır. Bu noktada yüzey üzerinde akışkan alışverişi yapacak yapıların bulunması yüzeyin kaynama eğrisi üzerinde daha geniş çalışma alanı elde etmesini sağlar.

4.1.4.2 Gözenek çapının etkisi

Aynı tünel aralığına sahip 1.5G-2.0A-30-30 ve 2.0G-2.0A-30-30 kaynama yüzeyleri gözenek çap etkisinin incelenmesi için birbirleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.21: 2,0 mm tünel aralığı için kaynama eğrisi üzerinde gözenek çap etkisi.



Şekil 4.22: 2,0 mm tünel aralığı için ısı taşınım katsayısı – ısı akısı eğrisi üzerinde gözenek çap etkisi.

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de görüldüğü üzere ısı akısı yaklaşık 330 kW/m² civarına kadar kaynama yüzeylerinin performansları birbirlerine yakındır. Düşük ısı akılarında gözeneklerin etkisinden ziyade aralıkların etkisinin daha fazla olduğu bu sonuçlardan da doğrulanabilir.

Isı akısı daha önce de bahsedildiği gibi kaynama ısı geçişine bağlı olarak sistemin kendi içerisindeki sıcaklık dağılımıyla ölçülmektedir. Fişek tipi ısıtıcı geometrilerinin sabit olduğu düşünüldüğünde bu mekanizmalardan atılan ısı akısı tamamen dc güç kaynaklarından sağlanan voltaj ve akım değerlerine bağlıdır. Ancak kaynama yüzeyinden sıvıya aktarılan ısı akısı yüzeyde gerçekleşen kaynama ısı geçiş mekanizmalarına ve yüzey alanına bağlıdır. 125 dc voltaj verildiğinde 2.0G-2.0A-30-30 yüzeyi 12,5°C yüzey kızdırma derecesinde 328 kW/m² ısı akısını sistemden dış ortamdaki akışkana atabilmiştir. Aynı dc voltaj değerinde 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyi 13,7°C yüzey kızdırma derecesi için 421,09 kW/m² ısı akısını dış ortamdaki akışkana aktarabilmektedir. Bu durum şöyle bir örnek ile açıklanabilir: 1.5G-2.0A-30-30 kaynama yüzey yapısı ile kaplı bir nükleer reaktör yakıt çubuğu ile 2.0G-2.0A-30-30 kaynama yüzey yapısı ile kaplı başka bir nükleer reaktör yakıt çubuğu (deney düzeneğindeki fişek tipi ısıtıcılar) ele alınsın. Reaktör içerisindeki radyoaktif elementin yanma sonucu açığa çıkan aynı miktardaki ısıda akışkana iletilen ısı akısı 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyinde daha fazla olup buhar debisi de artacaktır. Bu durumda güç üretiminin gerçekleştiği buhar türbinlerine giren buhar debisi artacağından sistem daha verimli bir hale gelecektir. 2.0G-2.0A-30-30 yüzeyinde sistem içerisindeki

bileşenler daha fazla ısınmakta ve atılan ısı akısı diğer yüzeye göre nispeten daha düşük kalmaktadır. 13,7⁰C kızdırma derecesi eğer yüzey sıcaklığı için güvenli çalışma koşulları dâhilinde kalıyorsa termal verimlilik açısından 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyi tercih edilmelidir. Her iki yüzeyde kaynama ısı geçiş mekanizmaları değerlendirildiğinde çalışılan ısı akısı aralığında 1,5 mm gözenek çapının buhar kabarcıklarının yüzeyden tahliyesi için ve tüneller arasında sıvı alışverişi yapılması için yeterli olduğu görülmektedir. Bu değerin arttırılarak 2,0 mm'ye çıkarılması yüzeyden tahliye olan buhar için olumlu bir etki yaratsa da kaynama yüzeyi üzerindeki boşlukların artmasına çekirdeklenme odaklarının nispeten düşmesine ve fazla sıvı emilimi sağlayarak yüzeyin taşma moduna girmesine sebebiyet vermektedir. Bu durumda yüzeyden atılan ısı akısı aynı ısı miktarı için karşılaştırılan diğer yüzeye göre daha düşük kalmasına sebep olmuştur.

DC güç kaynaklarının emniyet sınırları aşılarak 130V ve üzerine çıkılırsa çalışılan ısı akısı aralığı değiştiğinden 2,0 mm gözenek çapına sahip yüzey daha iyi bir performans gösterebilir. Diğer yandan 1,5 mm'lik gözenek aralığının azaltılması çalışılan ısı akısı aralığında daha iyi sonuçlar doğurabileceği bir olasıdır. Özellikle düşük ısı akılarında gözeneksiz yüzeyin 1,5G-3.0A-30-30 yüzeyinden daha iyi performans sağladığı düşünüldüğünde yüzeydeki boşlukların artmasının düşük ısı akılarında olumsuz etki yarattığı çok açık bir gerçektir.

4.1.5 Belirsizlik analizi

Havuz kaynama deneylerinde ısı akısının ve yüzey kızdırma derecesinin belirlenmesinde kullanılan termo eleman çiftlerinin belirsizlikleri göz önünde bulundurulması gereken bir unsurdur. Bu amaçla Kline ve McClintock [40] tarafından öne sürülen belirsizlik analizi metodu kullanılacaktır:

$$P = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

$$w_P = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (4.2)$$

Termo elemanların ve uzunluk ölçerin belirsizlikleri Çizelge 4.3’de sunulmuştur:

Çizelge 4.3: Ölçüm elemanlarının belirsizlikleri

Ölçüm Cihaz Tipi	Ölçüm doğruluğu
J tipi Termo Eleman Çifti	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$
Uzunluk Ölçer (Kumpas)	0,01 mm

Havuz kaynama deneyinin belirsizlik analizi için 1.5G-2.0A-30-30 kaynama yüzeyinde 100V DC voltaj değeri için yapılan deney göz önünde bulundurulmuştur.

Kaynama havuzu içerisine iletilen ısı akısının hesabı için uzunluk ölçerin belirsizliği ve termo eleman çiftlerinin belirsizliği kullanılmaktadır. Isı akısının belirsizliğinin tespiti için;

$$q^u = k_{metal} \frac{\Delta T}{\Delta l}$$

$$w_{q^u} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial q^u}{\partial \Delta T} w_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial q^u}{\partial \Delta l} w_{\Delta l}\right)^2}$$

$$w_{q^u} = \pm \sqrt{\left(k_{metal} \cdot \frac{1}{\Delta l} \cdot w_{\Delta T}\right)^2 + \left(k_{metal} \cdot \frac{-\Delta T}{\Delta l^2} \cdot w_{\Delta l}\right)^2}$$

$$w_E = \pm \sqrt{\left(400 \times \frac{1}{0,022} \times 1,1\right)^2 + \left(400 \times \frac{-13}{0,022^2} \times 0,00001\right)^2} = 20000,29 \text{ W/m}^2$$

Bu değer hesaplanan ısı akısı ile değerlendirildiğinde %8 oranında bir belirsizlik söz konusudur.

Yüzeyin kızdırma derecesini bulmak için yüzeyde yer alan iki termo elemanların ortalaması alınmaktadır. Kızdırma derecesinin belirsizliğinin tespiti için;

$$T_{ort} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$w_{T_{ort}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial T_{ort}}{\partial T_1} w_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{ort}}{\partial T_2} w_{T_2}\right)^2}$$

$$w_{T_{ort}} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} \times 1,1\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \times 1,1\right)^2} = 0,77^\circ C$$

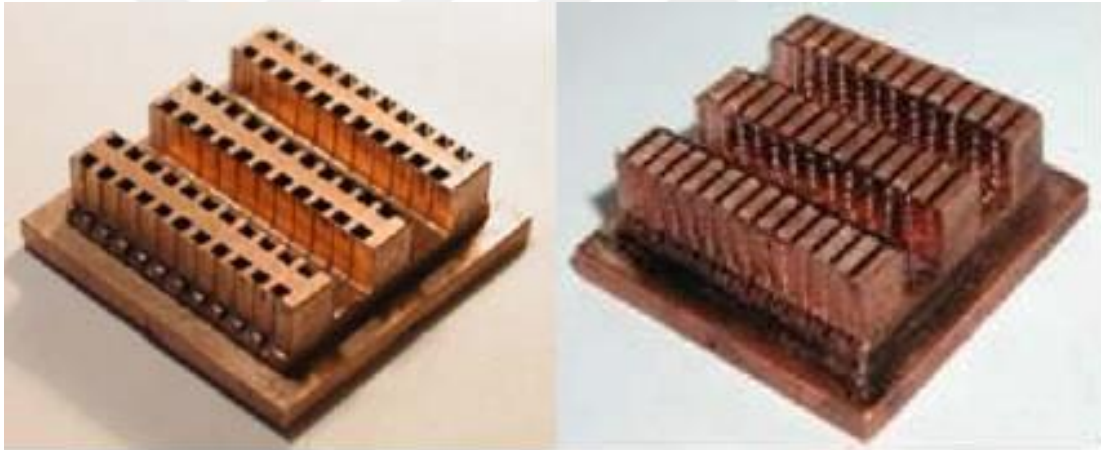
Ölçülen değer ile değerlendirildiğinde %0,707 gibi bir belirsizlik söz konusudur.

4.1.6 Literatür verileri ile değerlendirme

Geliştirilen kaynama yüzeylerinin performansları literatürde yer alan çalışmalardaki kaynama yüzeylerinin kaynama ısı geçiş performansları ile kıyaslanarak yapılan tez çalışmasının başarı ölçütü için bir fikir oluşması sağlanmıştır.

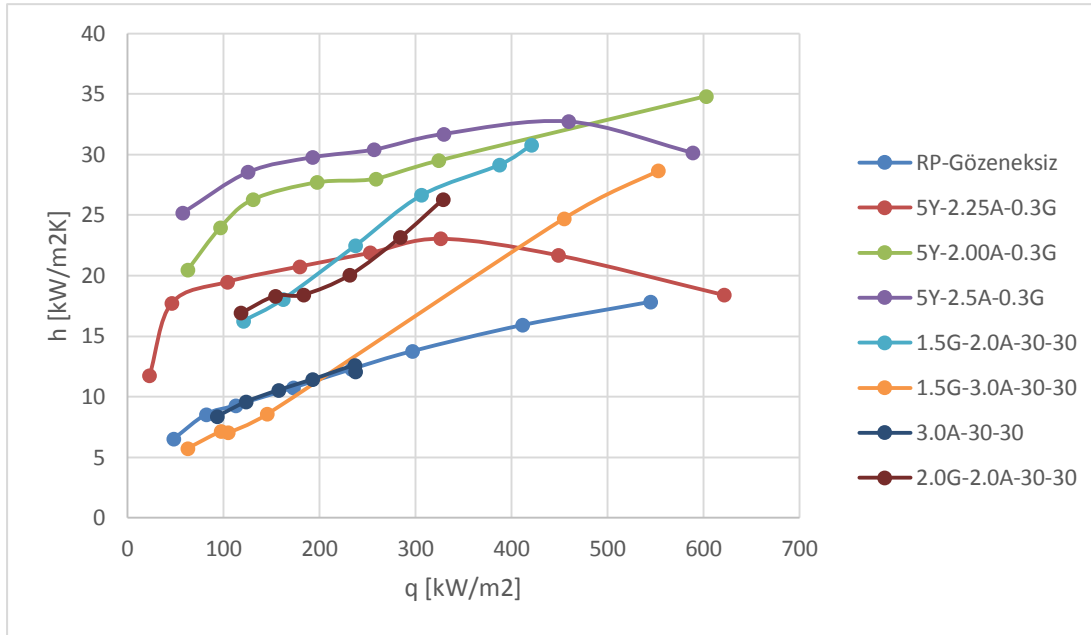
4.1.6.1 Yatay ve tünel mini tünelli yüzeyler

Pastuzko'nun Şekil 4.23'de mini tünelli yapıların bulunduğu kaynama yüzeyinde su, etanol ve R-123 sıvıları kullanarak havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir.



Şekil 4.23: R.Pastuszko'nun geliştirdiği kaynama yüzeyleri [23].

Deney sonuçları bu çalışmada elde edilen sonuçlarla birlikte Şekil 4.24'de gösterilmiştir. 5Y-2.00A-0.3G ifadesinde 2.00 mm olarak tünel sıklık aralığını, 0.3 ise yine milimetrik olarak tünellerin üzerinde bulunan gözeneklerin çap değerini ifade etmek için kullanılmıştır [23].

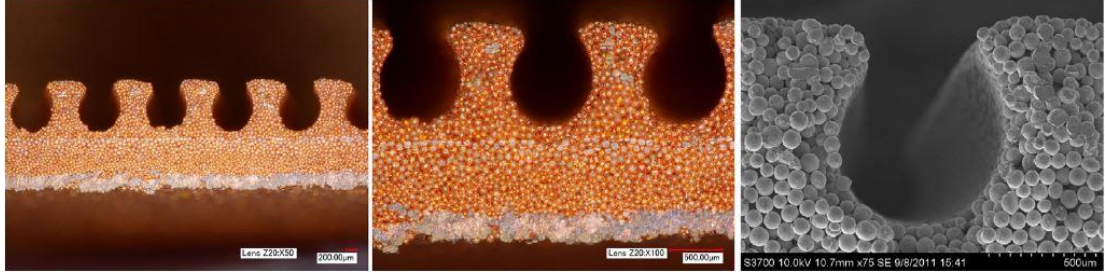


Şekil 4.24: Isı taşınım katsayısı ve ısı akısı üzerinde 1,5 mm gözenek çapı için tünel aralığının etkisi [23].

Düşük ısı akılarında kaynama ısı geçiş performansı bakımından 1.5G-3.0A-30-30 yüzeyi karşılaştırılan çalışmadaki gözeneksiz girintili yüzeye göre zayıf kalmıştır. Yüksek ısı akılarında ise gözenekli yapıların kullanımının avantajları ön plana çıkmış ve yaklaşık aynı ısı akısı için 2,25 mm tünel aralığına sahip yüzeyden daha yüksek ısı taşınım katsayısı görülmesi olanaklar dâhilinde olmuştur. 2,0 mm girinti aralığına sahip 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyi 2.0 mm girinti aralığına 5-2.00-0.3W yüzeyi ile kıyaslandığında düşük ısı akılarında gözenek çapının küçük olması daha iyi kaynama ısı geçişi iyileştirmesi sağladığı görülebilir ancak yüksek ısı akılarında yüzeyde oluşan ve yüzeyden ayrılan buhar kabarcıklarının sayısının artması daha fazla sıvı ile beslenmesini gerektirdiğinden büyük gözenek çaplarına ihtiyaç duyulacaktır. Diğer yandan 2.0G-2.0A-30-30 yüzeyi ısı akısı arttıkça tünel aralığının dar ve gözenek çapının fazla olması nedeniyle 5Y-2.25A-0.3G yüzeyine üstünlük sağlamasının yanında düşük ısı akılarında daha geniş tünel aralığına sahip 5Y-2.5A-0.3G yüzeyinden daha düşük bir performans göstermiştir. Tünel aralıklarının etkisi aktif çekirdeklenme odakları sayısı ile alakalı olduğundan ısı akısı arttıkça kaynama ısı geçiş performansı üzerinde açık bir biçimde görülebilir. Ancak girintilerin çok fazla olması dar kanallarda oluşan buhar tahliyesini zorlaştırmakla beraber yüzey üzerinde birleşerek yüzeyin kurumasına da neden olabilir. Bu durum ısı akısında düşmelere ısı taşınım katsayısının azalmasına yol açabilmektedir.

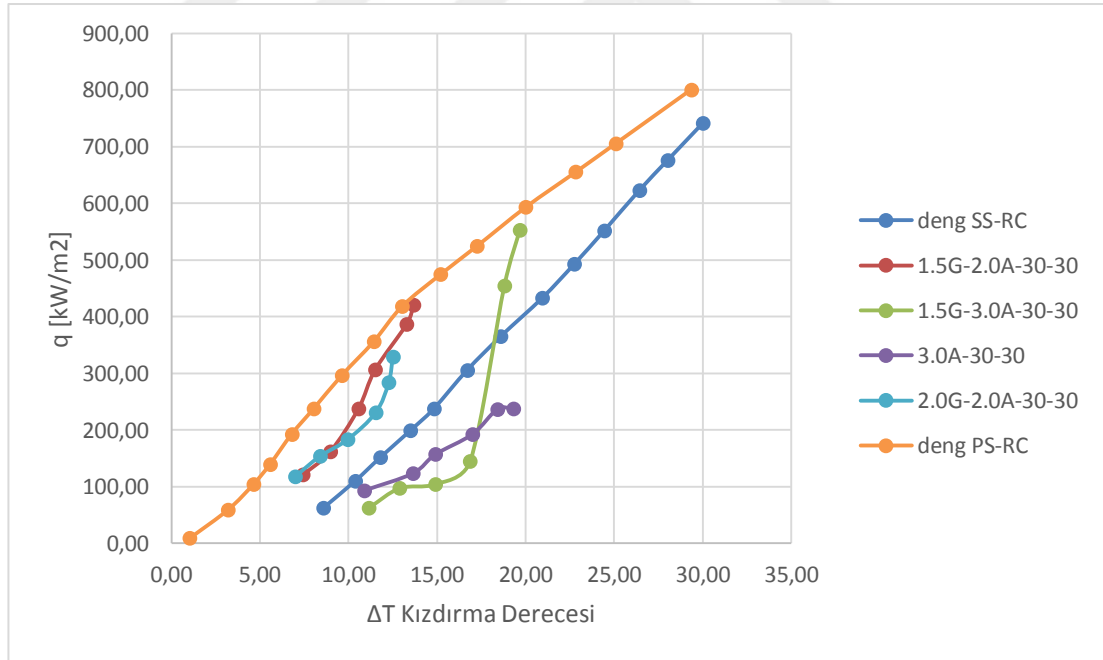
4.1.6.2 Gözenekli ve omega tünelli kaynama yüzeyleri

Deng, D.vd'nin yapmış olduğu çalışmada omega biçiminde girintili kavitelerin ve gözenekli yapıların bulunduğu yüzeylerde havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmiştir.



Şekil 4.25: Deng, D. vd'nin çalışmasında yer alan gözenekli ortamın ve girintili tünellerin bulunduğu kaynama yüzeyleri [29].

Farklı aşırı soğumuş sıvı derecelerinde omega yapılı çelik malzemeden üretilmiş gözenekli yüzey (deng-PS-RC) ile gözeneksiz yüzeylerde (deng-SS-RC) su akışkanı ile gerçekleştirilen havuz kaynama deneyleri sonuçları Şekil 4.26'da sunulmuştur:



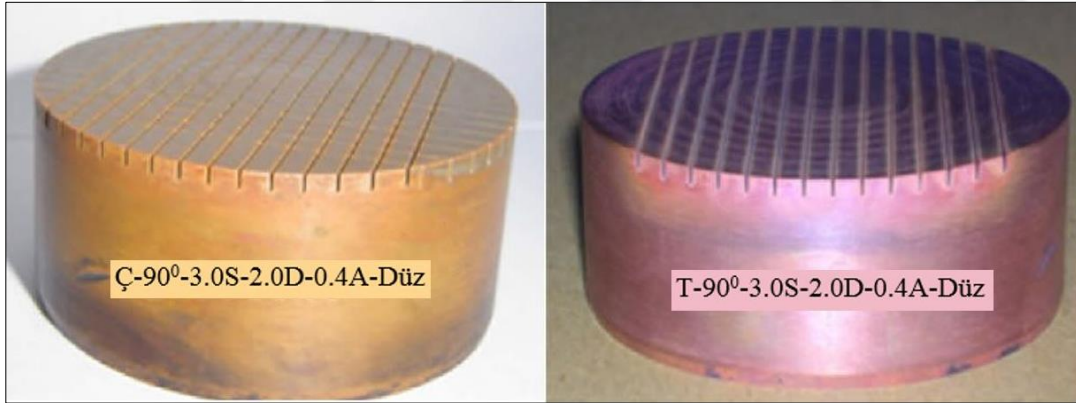
Şekil 4.26: Geliştirilen kaynama yüzeyleri ve Deng vd.'nin geliştirdiği kaynama yüzeylerinin performanslarının kaynama eğrisi üzerinde gösterimi [29].

Deng vd'nin yaptıkları deneysel çalışmada deneysel donanımlarının daha yüksek ısı akılarına çıkmalarına olanak sağladığından bu tez çalışmasına göre daha geniş çekirdekli kaynama eğrisi elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.26'da görüleceği gibi gözenekli ortamda elde edilen sonuçlar bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre

nispeten daha üstündür. Ancak 1.5G-2.0A-30-30 ve 2.0G-2.0A-30-30 kaynama yüzeyleri sırasıyla 13°C ve 19°C kızdırma derecelerinde gözenekli yüzeye aynı performansı yakalayabilmişlerdir. Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere özellikle düşük ısı akılarında gözenek çaplarının düşmesi kaynama ısı geçiş iyileştirmesi açısından olumlu bir etki yaratırken ısı akısı arttıkça yüzeye daha fazla sıvı emilimi gerekeceğinden büyük çapta gözenekler daha iyi bir etki yaratabilmektedir. 2.0G-2.0A-30-30 kaynama yüzeyinin kaynama eğrisi ısı akışının artışı ile birlikte incelenen gözenekli yüzeye göre daha dik bir görünüm halini alması bunun bir kanıtı olarak gösterilebilir. Gözenek çap etkisinin yanında omega biçimindeki girintili tüneller bu çalışmada yer alan dikdörtgen biçimindeki tünellerden gözeneksiz durumda daha iyi bir performans göstermiştir.

4.1.6.3 Çift girintili tünelli ve kaviteli kaynama yüzeyleri

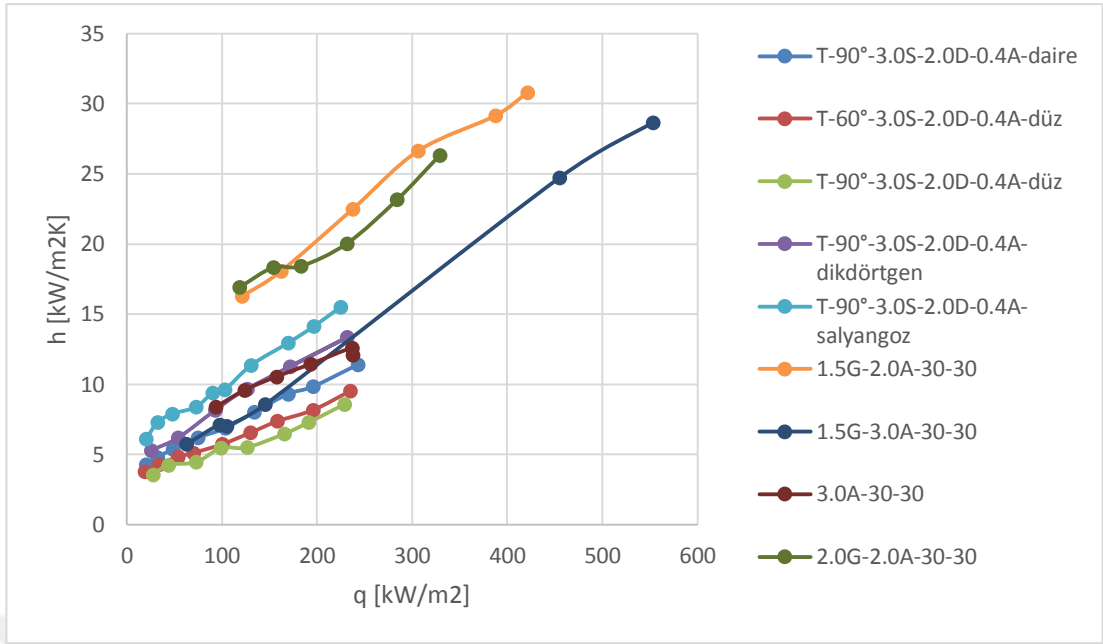
A.K. Das vd. Şekil 4.27’de ikisi görüldüğü gibi tek tünelli ve birbirlerini 90° kesen ve çift tünellerin, bu tünellerin uçlarında buhar kabarcıklarının kısırılması için cepçiklerin bulunduğu kaynama yüzeylerinde su akışkanı kullanarak havuz kaynama deneyleri yapmışlardır [9].



Şekil 4.27: A.K. Das vd.'nin çalışmasında yer alan kaynama yüzeyleri [9].

Şekil 4.25’de görüleceği gibi yüzeyler isimlerinde; yüzey boyunca Ç birbirini kesen çift ve T tek tünelleri, milimetrik olarak; S tünel sıklık aralığını, D tünel derinliğini, A tünel aralığını, en sondaki ifade cepçiklerin geometrisini ifade etmektedir [9].

Yüzeylerin göstermiş olduğu kaynama ısı geçiş iyileştirmeleri Şekil 4.28’de ısı akısı – ısı taşınım katsayısı eğrisinde verilmiştir:



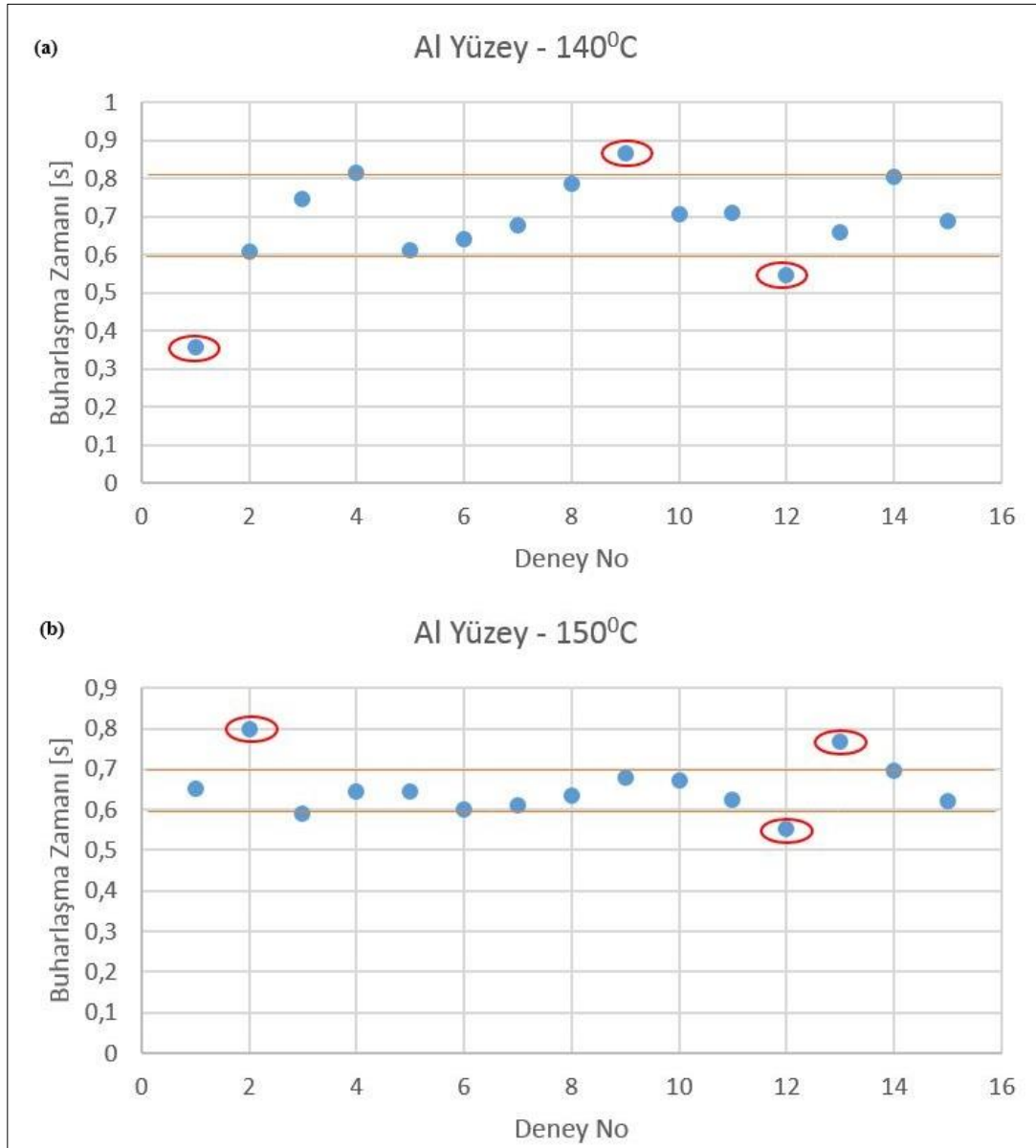
Şekil 4.28: Geliştirilen kaynama yüzeylerinin ve A.K.Das vd'nin çalışmasında kaynama yüzeylerinin kaynama performanslarının ısı taşınım katsayısı – ısı akısı grafiği üzerinde gösterimi [9].

Diğer literatür verilerinin aksine, A.K. Das'ın çalışmasında hesaplanan ısı taşınım katsayısından daha fazla ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir. Çizelge 4.1'den faydalanılarak yapılan değerlendirmede gözeneksiz girintili 3.0A-30-30 yüzeyi için ısı taşınım katsayısındaki mertebeler Şekil 4.24'deki test yüzeylerinin performanslarına bir yakınlık gösterirken 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyi için 237 kW/m²'lik ısı akısında 22,50 kW/m²K'lik bir ısı taşınım katsayısı elde edilmiştir. Bu değer U-90-3-2-0.4-Cir yüzeyi için 15-16 kW/m²K civarındadır. Hiç kuşkusuz ki yüksek ısı akılarında gözenekli yapıların etkisi ön plana çıkmakta ve yüzeydeki akışkan alışverişine yardımcı olarak ısı taşınım katsayısında iyileştirme sağlamaktadır. Bu çalışmadan çıkarılabilecek önemli bir sonuç da tünellerin sonlandığı yerlerde bulunan küçük cepçikler buhar kabarcıklarının kısıtılarak yüzeyi meşgul etmeleri önlenmiştir. Bu da ısı akısında dramatik artışlara sebep olmuştur. Tez kapsamında çalışılan yüzeylerde gözenek ve girintilerin yanında bu yapıların da yer almasının oldukça fayda sağlayacağı beklenmektedir.

4.2 Su Verme / Damla Düşüm Deney Sonuçları

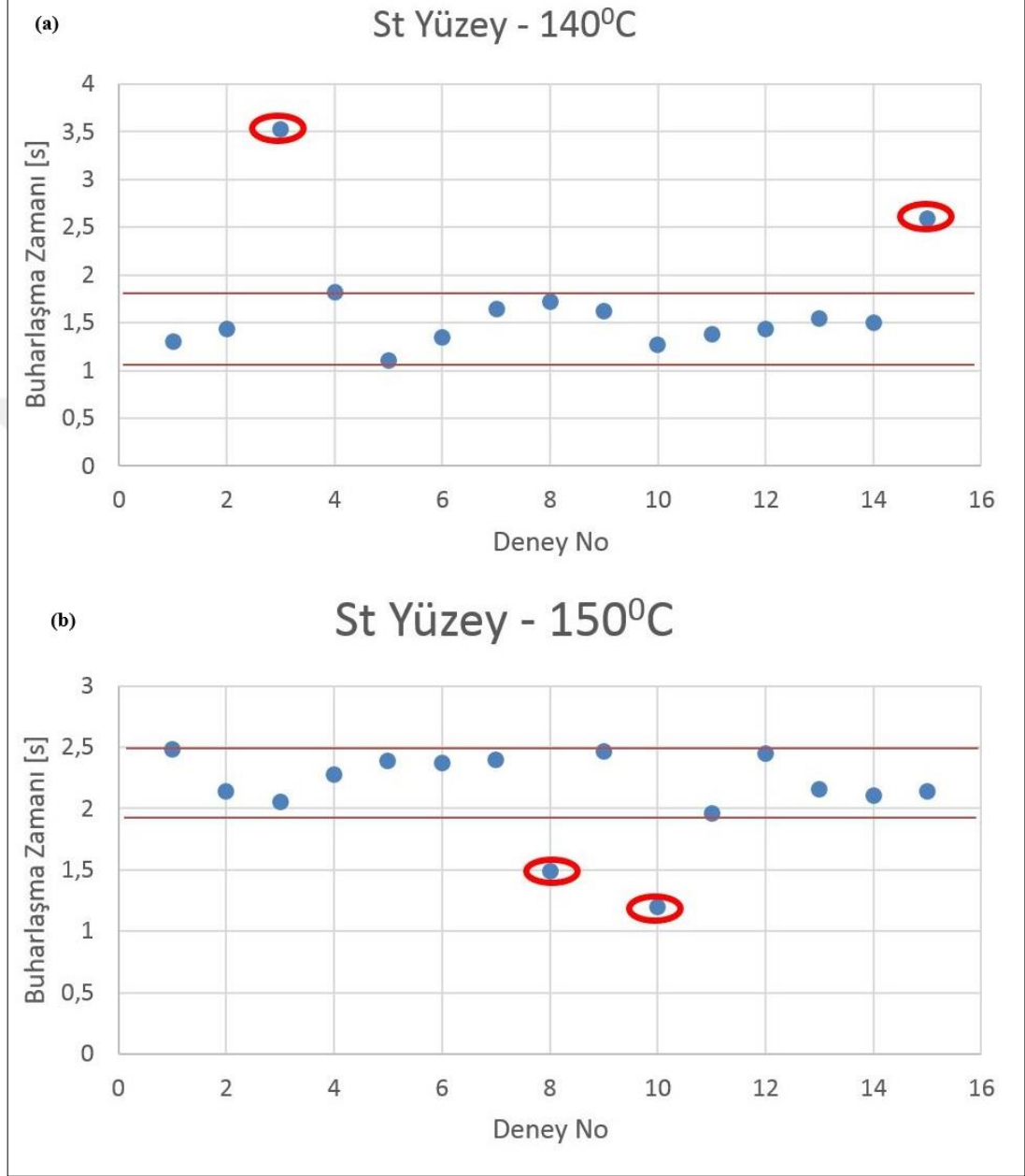
Su verme / damla düşüm deneyinde hacmi bilinen bir damla kızgın test kaynama yüzeylerine düşürülerek buharlaşma zamanı ölçülmüş TUBİTAK 1001 Projesinde kapsamında çalışılan ütü taban yüzeylerinin performansı ile kıyaslama yapılmıştır.

Şekil 4.29'da mevcut ütü taban yüzey profillerinin bulunduğu alüminyum malzeme test numunesinin 140°C ve 150°C sıcaklıklarında 0,05 ml damla çapı için tekrar edilen 15 deney sonuçları gösterilmektedir [41].



Şekil 4.29: a)140°C, b)150°C yüzey sıcaklığında, alüminyum yüzeylerin su verme / damla düşüm deney sonuçları [41].

Şekil.4.30'da mevcut ütü taban yüzey profilleri için alternatif olarak üretilen çelik malzemeden üretilmiş test numunesinin aynı sıcaklık ve damla hacmindeki deney sonuçları görülmektedir.

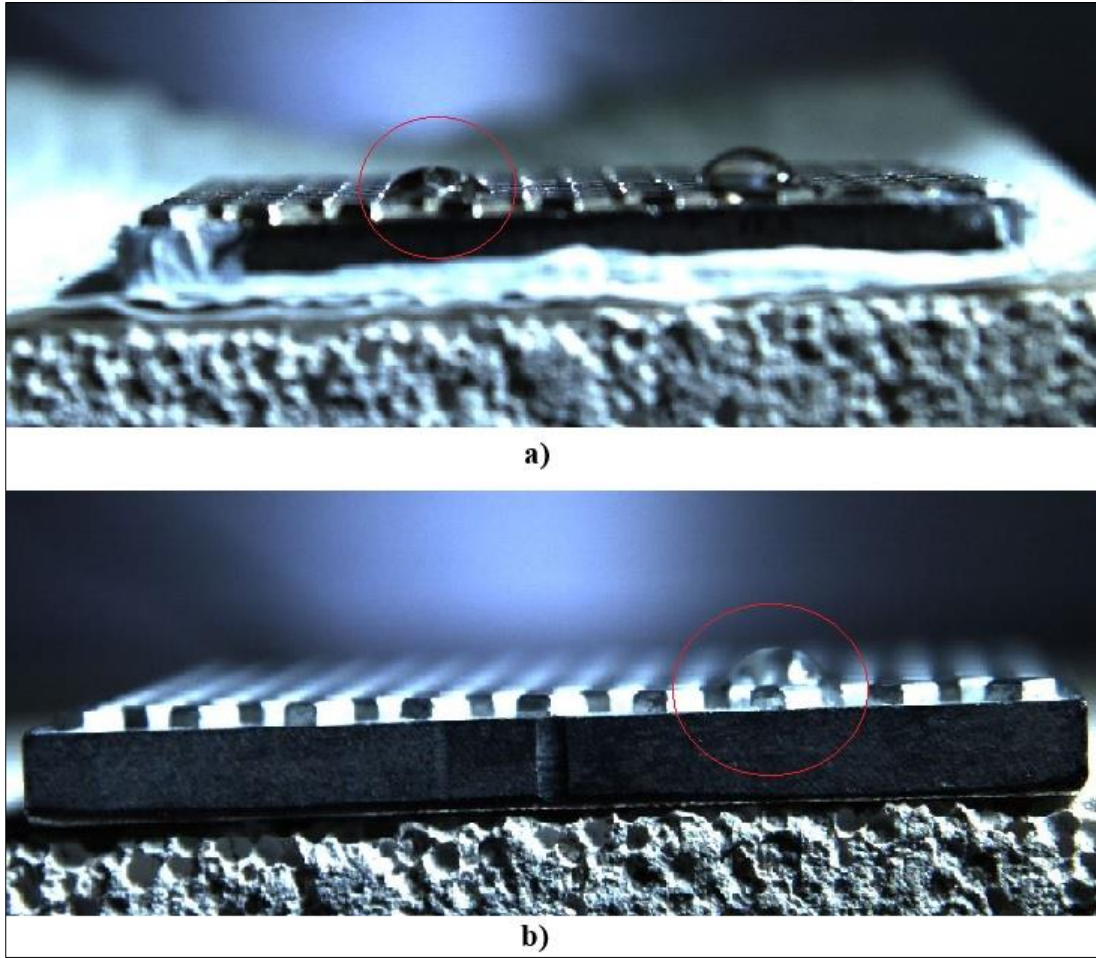


Şekil 4.30: Şekil 2. a)140°C, b)150°C yüzey sıcaklığında, çelik yüzeyin su verme / damla düşüm deney sonuçları [41].

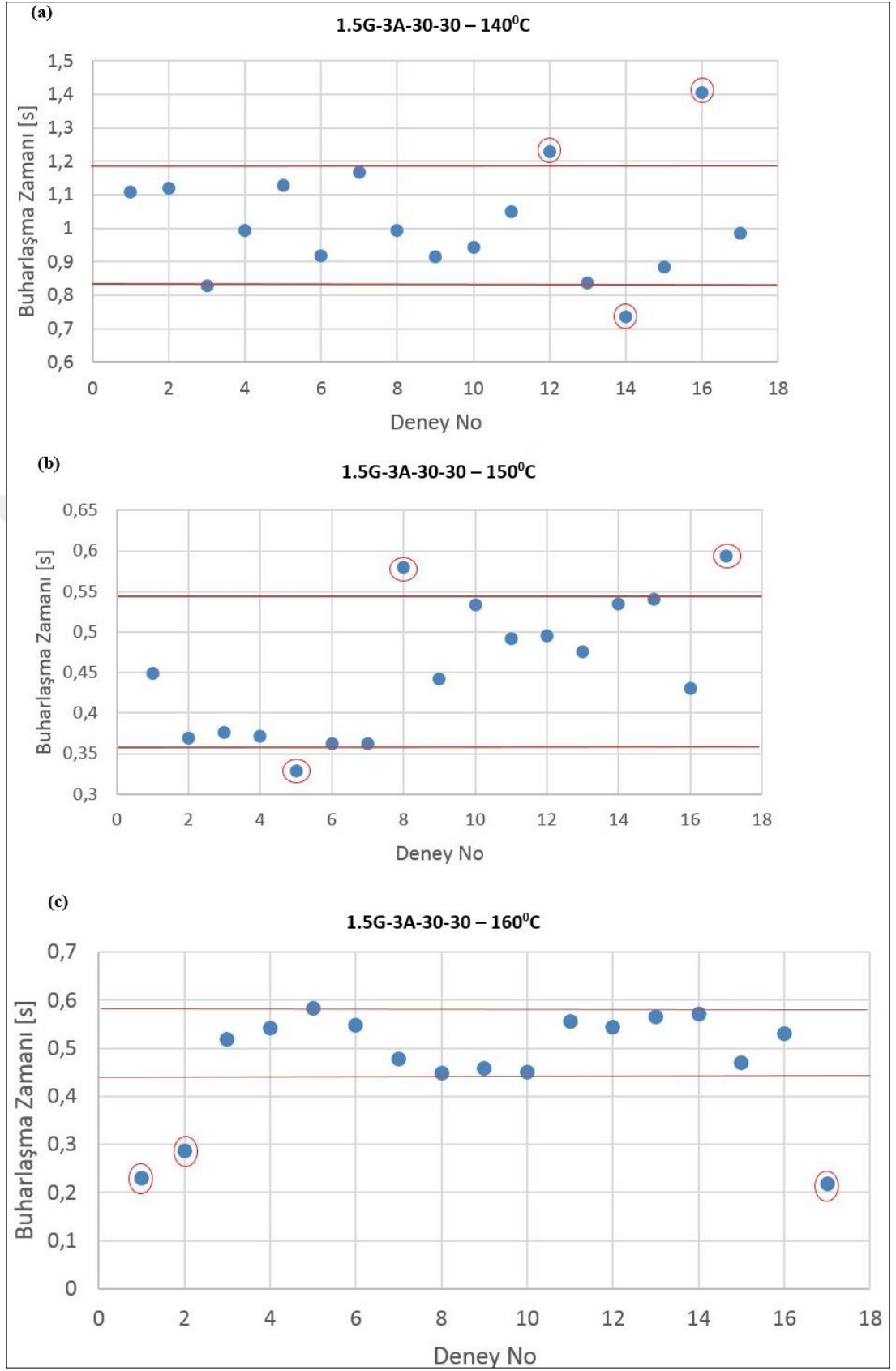
Su verme / damla düşüm deneyinde sıvı damlacıklarının buharlaşma süreleri ıslatabilme sıcaklığına (wettability limit) kadar gözlemlenebilir. Bu noktadan sonra sıvı damlacığı muhtemelen sıçrama yapacak veya geçiş ve film kaynama bölgelerinde olacağı için damlacığın altı buhar tabakasıyla kaplanarak sıcak yüzeyle teması kesilecektir. Bu nedenle sıcaklıklar 140°C, 150°C ve 160°C olarak seçilmiştir. Çalışma

kapsamında kaynama yüzeylerinden sadece 1.5G-3A-30-30 ve 1.5G-2A-30-30 yüzeyleri su verme / damla düşüm deneyinde test edilmiştir. Şekil 4.33’de ve Şekil 4.34’de test edilen yüzeyler üzerinde; 0,05 ml damla çapı için 140⁰C, 150⁰C ve 160⁰C sıcaklıklarında her bir sıcaklık değeri için tekrar edilen 17 deneyde buharlaşma zamanı görülmektedir. Kırmızı çember içerisine alınan deney sonuçları değerlendirilmeye alınmamıştır.

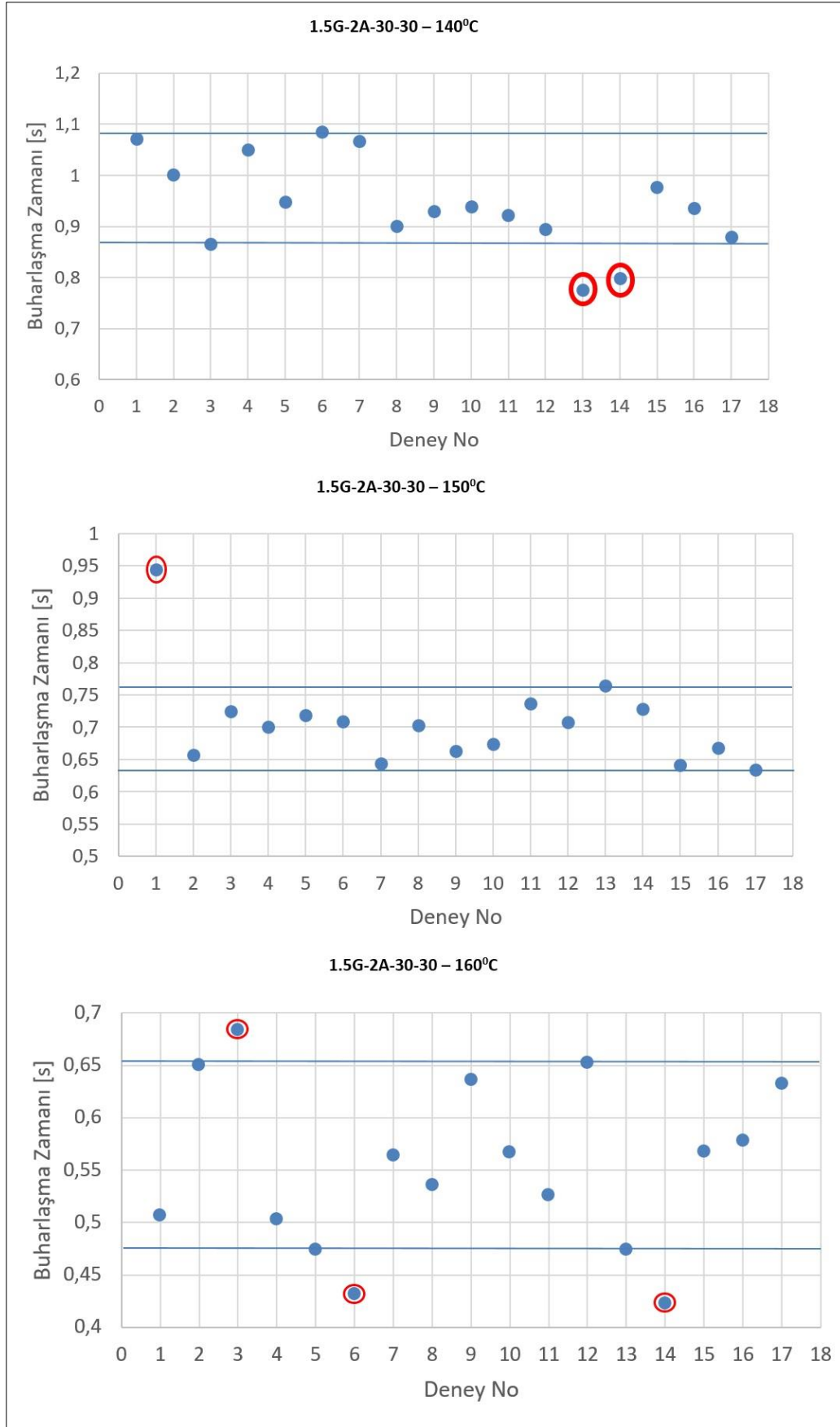
Çelik ve alüminyum yüzey için temas açısı ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.31). Bu ölçümlerde çelik yüzeyde temas açısının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak buharlaşma zamanı değerlendirildiğinde alüminyum yüzeyin daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Bu sonuç üzerinde alüminyum yüzeyde yer alan profillerin damlaya daha iyi temas sağlamasının yanında temas açısının yüksek sıcaklıklarda herhangi bir öneminin kalmadığının göstergesi olarak görülebilir. Bu bakımdan literatürde yer alan çalışmalarda çıkarılan sonuçlarla da uyushmaktadır [36,37].



Şekil 4.31: a) Çelik yüzey b) Alüminyum yüzey için temas açısı



Şekil 4.32: a)140°C, b)150°C, c)160°C yüzey sıcaklığında 1.5G-3A-30-30 test numunesi için su verme / damla düşüm deney sonuçları



Şekil 4.33: a)140°C, b)150°C, c)160°C yüzey sıcaklığında 1.5G-2.0A-30-30 test numunesi için su verme / damla düşüm deney sonuçları

Şekil.4.32 ve Şekil.4.33’de sırasıyla 1.5G-3.0A-30-30 ve 1.5G-2.0A-30-30 kaynama yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen su verme / damla düşüm deneyinin sonuçları görülmektedir. Tez çalışması kapsamında çalışılan kaynama yüzeylerinden 1.5G-3.0A-30-30 test numunesi alüminyum yüzeye göre yüksek sıcaklıkta daha iyi bir performans göstermiştir. Bunun nedeni arasında girintilerin çalışılan yüzeylerde daha fazla olması tabana ulaşan damlaya temas eden kızgın yüzeyin artması ile açıklanabilir. Damlacık kızgın yüzeyle daha iyi temas kurmuş, dolayısıyla artan kızgın yüzey temasıyla daha kısa zaman içerisinde buharlaşma gerçekleşmiştir. 1.5G-2.0A-30-30 kaynama yüzeyi yüksek sıcaklıkta geliştirilen diğer yüzeye daha kötü bir performans sergilemiştir. Bu durum 3 mm aralığa sahip yüzeyde 0,05 ml hacmindeki damlanın aralığa düştüğünde kızgın yüzeylerin sıvının tümüne temas edebilmesi ile açıklanabilir. Diğer yüzeyde girintinin fazla olması sıçramalara damlanın parçalanıp bir kısmının boşluklarda buhar filmi oluşturup buharlaşmayı gecikmesine neden olmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda su verme deneylerinde 1.5G-2.0A-30-30 yüzeyinin performansını kötü etkilemiştir. Daha yüksek sıcaklığa çıkılması durumunda yüzeyin ıslatılabilir sıcaklık limiti geçilecek sıçramalar artacaktır. Bu sıçramaları azaltmak için keskin girinti köşelerine yuvarlatmalar yapılabilir ya da yüzeyin ıslatabilir sıcaklık limit değerinin arttırılması için kimyasal su sever bileşimle yüzey kaplanabilir.

Her iki kaynama yüzeyi de TUBİTAK 1001 projesi kapsamında incelenen yüzeylerden daha iyi yüksek sıcaklıkta kaynama ısı geçiş performansı göstermiştir. Gözeneklerin ve girintilerin kaynama ısı geçişinde kayda değer bir iyileştirme sağladıkları aşıkardır. Proje kapsamında ütü kaynama tabanı için geliştirilen yüzeylerin kullanılması ütü enerji tüketim verimliliğini ve buhar debisini arttıracaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Çengel, Y. A.** (2010). Isı ve Kütle Geçişi, 3. Basım, McGraw-Hill.
- [2] **Kandlikar, S.G., Shoji, M., Dhir, V.K.** (1999). Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation
- [3] **Gaertner, R.F.** (1965). Photographic Study of Nucleate Pool Boiling on a Horizontal Surface. *Journal of Heat Transfer* 97:17-29.
- [4] **Ahna, H.S., Leea, C., Kimb, H., Jo, H., Kanga, S., Kima, J., Shina, J., Kima, M.H.** (2010). Pool Boiling CHF Enhancement By Micro/Nanoscale Modification of Zircaloy-4 Surface. *Nuclear Engineering and Design* 240 (2010) 3350–3360.
- [5] **Heled, Y., Orell, A.** (1967). Effects of Deposit Layer on Nucleation Sites, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 10, pp. 533-542.
- [6] **Kocamustafaogulları, G., Ishii, M.** (1983). Interfacial Area and Nucleation Site Density in Boiling Systems, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26-9, pp. 1377-1387.
- [7] **Cornwell, K., Brown, R.D.** (1978). Boiling Surface Topography, *Proceedings of 6th International Heat Transfer Conference*, 1, pp. 157-161.
- [8] **Fritz, W.** (1935) Maximum volume of vapor bubbles,” *Physikalische Zeitschrift*, vol. 36, pp. 379–384.
- [9] **Das, A.K., Das, P.K., Saha, P.** (2010). Some Investigations On The Enhancement Of Boiling Heat Transfer From Planer Surface Embedded With Continuous Open Tunnels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 34, Issue 8, Pages 1422–1431.
- [10] **Lu, Y.W., Kandlikar, S.G.** (2010). Nanoscale Surface Modification Techniques For Pool Boiling Enhancement – A Critical Review And Future Directions, *Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, FEDSM-ICNMM2010 August 1-5, 2010, Montreal, Canada.
- [11] **Wenzel, R.N.** (1936). Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water, *Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 988 - 994, 1936.
- [12] **McHale, J.P., Garimella, S.V.** (2013). Nucleate boiling from smooth and rough surfaces – Part 1: Fabrication and characterization of an optically transparent heater–sensor substrate with controlled surface roughness, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44 (2013) 456–467

- [13] **Kim, S.T., Kim, H.D., Kim, H., Ahn, H.S., Jo, H.J., Kim, J., Kim, M.H.** (2009). Effects of nanofluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF, *Experimental Thermal and Fluid Science*
- [14] **Wei, J.J., H. Honda, H.** (2003). Effects of fin geometry on boiling heat transfer from silicon chips with micro-pin-fins immersed in FC-72, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 4059–4070.
- [15] **Dong, L., Quan, X., Cheng, P.** (2014). An experimental investigation of enhanced pool boiling heat transfer from surfaces with micro/nano-structures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 71, 189–196.
- [16] **Yu, C.K., Lu, D.C.** (2007). Pool boiling heat transfer on horizontal rectangular fin array in saturated FC-72, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, 3624–3637.
- [17] **Chu, K. H., Enright, R., Wang, E.N.** (2012). Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 241603.
- [18] **Nimkar, N.D., Bhavnani, S.H., Jaeger, R.C.** (2006). Effect of nucleation site spacing on the pool boiling characteristics of a structured surface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49, 2829–2839.
- [19] **Kwon, H., Bird, J.C., Varanasi, K.K.** (2013). Increasing Leidenfrost point using micro-nano hierarchical surface structures, *Applied Physics Letters*, 103, 201601
- [20] **Liang, G., Mu, X., Guo, Y., Shen, S., Quan, S., Zhang, J.** (2016). Contact vaporization of an impacting drop on heated surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 73–80
- [21] **Yu, C. K., Lu, D. C., Cheng, T. C.** (2006). Pool boiling heat transfer on artificial micro-cavity surfaces in dielectric fluid FC-72, *Journal Of Micromechanics and Microengineering*, 16, 2092–2099.
- [22] **Bon, B., Klausner, J., McKenna, E.** (2013). An investigation of pool boiling heat transfer on single crystal surfaces and a dense array of cylindrical cavities, *J. Heat Transfer*, 135, 121501.
- [23] **Rainey, K. N., S. M. You, S. M.** (2000). Pool Boiling Heat Transfer From Plain and Microporous, Square Pin-Finned Surfaces in Saturated FC-72, *J. Heat Transfer*, 122(3), 509-516.
- [24] **Nakayama, W., Daikoku, T., Kuwahara, H., And Nakajima, T.** (1980). Dynamic Model Of Enhanced Boiling Heat Transfer On Porous Surfaces—Part I. Experimental Investigation, *ASME Journal Of Heat Transfer*, Vol. 102, No. 3, Pp. 445-450.
- [25] **Das, A. K., Das, P. K., Saha, P.** (2009). Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling, *Applied Thermal Engineering*, 29, 3643–3653.
- [26] **Chien, L. H., Webb, R. L.** (1998). Visualization of pool boiling on enhanced surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16, 332-341
- [27] **Pastuszko R.** (2008). Boiling heat transfer enhancement in subsurface horizontal and vertical tunnels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1564–1577.

- [28] **Chien, L. H., Webb, R. L.** (1996). A parametric study of nucleate boiling on structured surfaces. Part II: effect of pore diameter and pore pitch, *ASME-HDT*, 326, 137–143.
- [29] **Deng D., Feng J., Huang Q., Tang Y., Lian Y.** (2016). Pool Boiling Heat Transfer of Porous Structures with Reentrant Cavities, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 556–568.
- [30] **Li, C. H., Li, T., Hodgins, P., Hunter, C. N., Voevodin, A. A., Jones, J. G., Peterson, G. P.** (2011) Comparison Study of Liquid Replenishing Impacts on Critical Heat Flux and Heat Transfer Coefficient of Nucleate Pool Boiling on Multiscale Modulated Porous Structures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 54, 3146–3155.
- [31] **Kim, N. H., Choi, K. K.** (2001). Nucleate Pool Boiling On Structured Enhanced Tubes Having Pores With Connecting Gaps, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, pp.17-28.
- [32] **Lee, C. Y., Bhuiya, M. M. H., Kim K. J.** (2010). Pool Boiling Heat Transfer with Nano-Porous Surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 4274–4279.
- [33] **Hasegawa, S., Echigo, R., Irie, S.** (1975). Boiling Characteristic and Burnout Phenomena on a Heating Surface Covered with Woven Screens, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 12, pp 722-724.
- [34] **Pastuszko, R., Wójcik, T.M.** (2015). Experimental Investigations and A Simplified Model For Pool Boiling on Micro-Fins with Sintered Perforated Foil, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 63, 34–44.
- [35] **Küçük, H.** (2002). Çekirdekli Havuz Kaynamasında Isı Geçişine Katı Taneciklerin Etkisi. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Deendarlianto, Takata, Y., Hidaka, S., Indarto, Widyaparaga, A., Kamal, S., Purnomo, Kohno, M.** (2014). Effect of Static Contact Angle on The Droplet Dynamics During The Evaporation of A Water Droplet on The Hot Walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 691–705
- [37] **Takata, Y., Hidaka, S., Cao, J.M., Nakamura, T., Yamamoto, H., Masuda, M., Ito, T.** (2005). Effect of Surface Wettability on Boiling and Evaporation, *Energy*, 30, 209-220.
- [38] **Hassebrook, A., Kruse, C., Wilson, C., Anderson, T., Zuhlke, C., Alexander, D., Gogos, G., Ndao, S.** (2016). Effects of Droplet Diameter and Fluid Properties on the Leidenfrost Temperature of Polished and Micro/Nanostructured Surfaces, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 138 / 051501-1.
- [39] **Dhir V. K., Abarajith H. S., Li D.** (2007). Bubble Dynamics and Heat Transfer during Pool and Flow Boiling, *Heat Transfer Engineering*, 28(7):608–624, Taylor & Francis.
- [40] **Kline, S. J. ve McClintock, F. A.** (1953). Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, *Mechanical Engineering*, Martinus Nijhoff Publishers, 3-8.

- [41] **Onbaşıoğlu, S.** (2016). TÜBİTAK 115M403 Araştırma Projesi Gelişme Raporu, İlk Dönem.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ali Can İSPİR
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.08.1990
E-posta : ispir@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
Makina Mühendisliği, Isı – Akışkan Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılında, Anadolu Motor A.Ş.'de Üretim, AR-GE ve Yönetim bölümlerinde 2. kısa dönem stajını yaptı.
- 2013 yılında, Ex-en Mühendislik firmasında stajyer olarak Solar Sistemler üzerine 2 proje tamamladı.
- 2013 yılında, Sistemair – HSK A.Ş. firmasında Üretim, AR-GE ve Yönetim departmanlarında 3. kısa dönem stajını gerçekleştirdi.
- 2014 yılında, Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu.
- 2015 yılında, 113M525 nolu TUBİTAK 1001 projesinde araştırmacı olarak çalıştı.
- 2015 yılından beri 115M403 nolu TUBİTAK 1001 projesinde araştırmacı olarak çalışmaya devam etmektedir.
- 2016 yılından beri, İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Sıcaklıkta Isı Geçiş Laboratuvarı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

YAYINLAR:

Uluslararası Bildiriler:

- Ispir A., Dikeç E., Onbasioglu S., Solution of Leakage Problem in A Guarded Hot Plate Device, IX International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Cracow, May 23-26, 2016
- Dogu O., Dikeç E., Ugurlu B., Ispir A., Onbasioglu S.U., Modelling of Fibrous Materials Used in High Temperature Applications, 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malaga, July 11-13, 2016

Ulusal Bildiriler:

- Ispir A., Karatas T., Ayder E., Çift Emişli Pompa Çarkının Türbin Moduna göre Tasarımı ve Optimizasyonu, 9th Pompa-Vana-Kompresör Kongresi, Istanbul, 5-7 Mayıs, 2016