



**MİKROKANALLARDA KARMA TAŞINIMLA ISI
TRANSFERİNE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Emre MANDEV

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Eyüphan MANAY**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

**MİKROKANALLARDA KARMA TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNE YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Emre MANDEV

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eyüphan MANAY

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

15 / 11 / 2022

Emre MANDEV

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MİKROKANALLARDA KARMA TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Emre MANDEV

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Eyüphan MANAY

Bu tez çalışmasında, mikrokanaallarda imalat süreci kaynaklı yüzey pürüzlülüğü ve mikrokanal boyutları gibi geometrik parametrelerin karma taşınım ile ısı transferine etkileri incelenmiştir. Paslanmaz çelik malzeme kullanılarak üretilen dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanaallarda, birleşik doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin toplam ısı transferine katkısı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde 1,1 µm, 1,8 µm ve 3,0 µm olmak üzere üç farklı ortalama yüzey pürüzlülüğüne, 300 µm, 500 µm ve 700 µm'lik üç kanal genişliğine ve 300 µm ve 450 µm'lik iki kanal yüksekliğine sahip mikrokanaallı ısı alıcılar kullanılmıştır. İmalat sürecinde elektro-erozyon üretim parametreleri değiştirilerek yüzey pürüzlülüğü hassas şekilde kontrol edilmiş ve farklı geometrik özelliklerde üretilen mikrokanaallı ısı alıcılar için detaylı yüzey haritaları oluşturulmuştur. İş akışkanı olarak saf su kullanılan deneylerde, mikrokanaallı ısı alıcı alt yüzeyine sabit ısı akısı uygulanmıştır. Ayrıca karma taşınım koşullarını sağlamak için deneyler 10–80 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğünün karma taşınım ile ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü etkisinin nedenleri ve seviyesi de tartışılmıştır.

2022, 196 sayfa

Anahtar Kelimeler: Isı Transferi, Karma Taşınım, Mikrokanal, Yüzey Pürüzlülüğü.

ABSTRACT

Ph.D

INVESTIGATION ON EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON MIXED CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN MICROCHANNELS

Emre MANDEV

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Eyüphan MANAY

In this thesis, the effects of geometrical parameters such as surface roughness and microchannel dimensions on mixed convection heat transfer in microchannels were investigated. The contribution of combined natural and forced convection effects to total heat transfer was investigated experimentally in rectangular multiple microchannels fabricated using stainless steel material. The experiments were conducted with microchannel heat sinks having three different average surface roughness values of 1.1 μm , 1.8 μm , and 3.0 μm , three microchannel widths of 300 μm , 500 μm and 700 μm and two microchannel heights of 300 μm and 450 μm . During the manufacturing process, surface roughness values were controlled by changing electro-erosion fabrication parameters, and detailed surface maps were generated for the microchannel heat sinks. In the experiments using pure water as the working fluid, constant heat flux was applied to the bottom surface of the microchannel heat sink. The experiments were conducted in the range of 10–80 Reynolds numbers to ensure mixed convection conditions. In conclusion, it was determined that surface roughness had a significant effect on mixed convective heat transfer. Also, the causes and level of surface roughness effect were discussed.

2022, 196 page

Keywords: Heat Transfer, Mixed Convection, Microchannel, Surface Roughness.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde ve mesleki gelişimim sırasında destek ve yardımlarını gördüğüm, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Eyüphan MANAY'a teşekkür ederim. Ayrıca yapıcı eleştiriden faydalandığım ve örnek aldığım Sayın Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'e ilgisinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarının yürütülmesinde ciddi katkıları bulunan, değerli görüş ve önerilerinden faydalandığım çalışma arkadaşım Dr. İbrahim ATEŞ'e teşekkür ederim. Ayrıca Erzurum Teknik Üniversitesi'ndeki mesai arkadaşlarıma da manevi desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında TÜBİTAK tarafından desteklenen 117M223 nolu proje kapsamında üretilen mikrokannallar kullanılmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan sevgili eşim Yeşim Zeynep'e ve oğlum Ömer'e, sevgi ve desteklerini esirgemeyen anneme ve babama ve de duaları ile yanımda olan kıymetli büyüklerime şükranlarımı sunarım.

Emre MANDEV
Kasım 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu ve Kapsam	1
1.2. Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) ve Minyatürleşme	3
1.3. Mikro Akış ve Mikro Akışlı Cihazlar (MFD).....	6
1.4. Termal Uygulamalarda Mikrokanallar ve Mikrokanallı Isı Alıcıları.....	9
1.5. Mikrokanal Üretim Yöntemleri.....	11
1.5.1. Mikro-mekanik işleme	12
1.5.2. Litografi.....	17
1.5.3. Islak ve kuru aşındırma	24
1.5.4. Baskı ve kabartma	28
1.5.5. Mikro-enjeksiyon kalıplama	30
1.5.6. Mikro-lazer işleme	33
1.5.7. Mikro-elektro erozyon	37
1.5.8. Mikrokanal üretim yöntemleri değerlendirme ve sonuçlar.....	40
1.6. Taşınım ile Isı Transferi ve Karma Taşınım	43
1.7. Yüzey Pürüzlülüğü.....	48
1.7.1. Yüzey pürüzlülüğü terminolojisi ve pürüzlülük parametreleri	49
1.7.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yöntemleri.....	58
2. KAYNAK ÖZETLERİ	62
2.1. Mikrokanallarda Akış, Isı Transferi ve Geleneksel Yaklaşımlar.....	63
2.2. Mikrokanallarda Akış ve Isı Transferine Yüzey Pürüzlülüğü Etkileri	86
2.3. Pürüzlü Mikrokanallarda Düşük Reynolds Akışları ve Karma Taşınım	94
3. MATERYAL ve YÖNTEM	101
3.1. Çoklu Mikrokanallar	101
3.1.1. Mikrokanalların geometrik özellikleri ve imalatı	101
3.1.2. Mikrokanalların yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi.....	103

3.2. Deney Sistemi	107
3.3. Deney Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar	109
3.4. Test Bölgesinin Detayları	112
3.5. Deneylerin Yapılışı	113
3.6. Verilerin İşlenmesi	114
3.6.1. Isı kaybının belirlenmesi	114
3.6.2. Isı transferi hesap prosedürü	115
3.6.3. Belirsizlik analizi	118
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	120
4.1. Yüzey Haritaları ve Yüzey Pürüzlülük Durumu	120
4.2. Isı Transferi Bulgularının Literatürle Karşılaştırılması	140
4.3. Yüzey Pürüzlülüğün Karma Taşınım Isı Transferine Etkisi	144
4.4. Mikrokanal Boyutlarının Karma Taşınım Isı Transferine Etkisi	149
4.5. Zorlanmış ve Doğal Taşınım Isı Transferi Bileşenlerinin Değerlendirilmesi	156
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	162
KAYNAKLAR	165
EKLER	194
EK 1 Termokupl Kalibrasyon Eğrileri ve Denklemleri	194

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Semboller</u>	<u>Açıklama</u>
A	Alan (m^2)
f	Sürtünme Faktörü
D	Çap (m)
g	Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
h	Mikrokanal Yüksekliği (μm)
$\bar{h}$	Ortalama Taşınım Katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
I	Elektrik Akımı (A)
k	Isıl İletkenlik ($W/m \cdot ^\circ C$)
L	Uzunluk (m)
$\dot{m}$	Kütleli Debi (kg/s)
$\dot{Q}$	Isı Akısı (W)
R	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
S_i	Yüzey Alanı Artırım Faktörü
t	Kalınlık (m)
T	Sıcaklık ($^\circ C$)
V	Gerilim (V)
W	Genişlik (m)
w	Mikrokanal Genişliği (μm)

<u>Diğer Semboller</u>	<u>Açıklama</u>
β	Genleşme Katsayısı ($1/K$)
μ	Dinamik Viskozite ($kg \cdot m/s$)
ν	Kinematik Viskozite (m^2/s)
σ	Standart Belirsizlik
ε^*	Boyutsuz Yüzey Pürüzlülüğü
Φ	Doğal Taşınım Katsayısı

Alt İndisler**Açıklama**

a	Ortalama
b	Bulk
c	Kesit
Con	Taşınm
For	Zorlanmış
h	Hidrolik
He	Isıtıcı
i	Giriş
ku	Basıklık
L	Yerel
Lo	Kayıp
Nat	Doğal
o	Çıkış
p	Tepe Maksimum
q	Karekök Ortalama
s	Yüzey
sk	Çarpıklık
t	Yükseklik Maksimum
v	Tepe Minimum
w	Duvar
∞	Ortam

Kısaltmalar**Açıklama**

FDM	Eriyik Biriktirmeli Modelleme
Gr	Grashof Sayısı
Gz	Graetz Sayısı
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MFD	Mikro Akışlı Sistemler
NDL	Doğal Döngülü Deşarj
Nu	Nusselt Sayısı
PDMS	Polidimetilsiloksan
Pr	Prandtl Sayısı
PVC	Polivinil Klorür
Ra	Rayleigh Sayısı
Re	Reynolds Sayısı
Ri	Richardson Sayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Piyasa, endüstri ve tüketici yönüyle MEMS ürünlerine örnekler (Anonymous 2021a).....	4
Şekil 1.2.	MEMS pazarında ürünlerin gelişim trendleri (Anonymous 2021b).....	4
Şekil 1.3.	Biyokimyasal uygulamada kullanılan bir MFD sistemi örneği, mikrokanallar ve sensörleri (Anonymous 2021c).	7
Şekil 1.4.	Termal uygulamalarda mikrokanallar için örnek bir MFD devresi (Van Erp et al. 2020).....	9
Şekil 1.5.	Mikrokanallı kompakt ısı değiştiricisi (Anonymous 2021d).....	10
Şekil 1.6.	Mikro-mekanik işleme yöntemleri ve ürünleri (Ganesh et al. 2017).....	13
Şekil 1.6.	(Devam).	14
Şekil 1.7.	Mikro-mekanik işleme sırasında oluşan (a) çatlakların şematik gösterimi (b) derinlik tutarsızlığı örneği.	16
Şekil 1.8.	Mikro-mekanik işleme sırasında oluşan çapak yapıları (Saptaji et al. 2012).	16
Şekil 1.9.	Oksitlenmiş bir silikon levha örneği üzerinde negatif fotorezist kullanımı durumunda Fotolitografi ile desen transferi (Madou 2011).	18
Şekil 1.10.	Farklı kesit geometrilerindeki mikrokanalların Fotolitografi, ıslak aşındırma ve kalıplama teknikleri kullanılarak üretimini (a) şematik (b) mikroskop (Lee et al. 2019).....	19
Şekil 1.11.	Stereolitografi tekniği kullanılarak farklı parametreler ile üretilen yarım daire kesitli mikrokanalların yüzey yapısı (Carnero et al. 2022).	19
Şekil 1.12.	Farklı teknikler kullanılarak üretilen mikrokanalların üst ve kesit görünüşleri (Parthiban et al. 2021).	21
Şekil 1.13.	Bazı aşındırmanın işlemleri ve sıklıkla kullanılan mikrokanal üretim yöntemlerinin şematik görselleri (Tang et al. 2021).	26
Şekil 1.14.	Üretim yöntemlerine göre mikrokanal örnekleri (a) Koutny et al. (1996), (b) Ichiki et al. (2003), (c) Uchida and Hamaguchi (2008), (d) He et al. (2012), (e) Long et al. (2019), (f) Melentiev and Fang (2018), (g) Nurul Amin et al. (2016), (h) Zheng et al. (2007), (i) Yalikun and Tanaka (2016), (j) Kotz et al. (2016) ve (k) Gal-Or et al. (2019).	27

Şekil 1.15. Mikrokanallı bakır ısı alıcı üretim süreci (a) Alüminyum ince film kaplama (b) Tungsten kuru aşındırma (c) Bakır sıcak kabartma (d) giriş ve çıkış portlarının mekanik işlenmesi (e) alt ve üst plakaların birleştirilmesi (f) mikrokanalların tarama mikroskobu görüntüsü (g) mikrokanalların SEM görüntüsü (Li and Chen 2019).	29
Şekil 1.16. Tek taraflı sıcak kabartma işlemi (a) şematik görünüm (b) kalıplama sıcaklığı ve kuvvetinin değişimi (Li and Chen 2019).....	30
Şekil 1.17. Enjeksiyon kalıplama işlemi için kalıp dolma simülasyonu ve mikrokanal kesit görseli (a), (b), (c) ve (d) farklı zaman aralıklarında ve (e) SEM görüntüsü (Ma et al. 2020).	32
Şekil 1.18. Enjeksiyon kalıplamayla üretilen mikrokanalların lazer mikroskobu görüntüleri (Ma et al. 2020).	32
Şekil 1.19. Kızılötesi lazer kullanılarak üretilen mikrokanallarda yüzey yapısı (Prakash, and Kumar 2021).....	34
Şekil 1.20. Kısa atımlı lazer kullanılarak üretilen mikrokanallarda lazer parametrelerinin geometrik özelliklere etkisi (Zhao and Wang 2018).	35
Şekil 1.21. Belirli lazer parametrelerinde (a) su altında ve (b) açık havada lazerle işlenen mikrokanallar (Parakash et al. 2013).....	35
Şekil 1.22. Mikro-elektro erozyon yöntemiyle üretilen mikrokanallar ve bu kanalların 3B profilometre görüntüsü (Chaides et al. 2014).....	38
Şekil 1.23. Farklı geometrilerde dalma mikro-elektro erozyon elektrotları ve bu elektrotlar kullanılarak üretilen mikrokanallar (Sarma and Patowari 2018).	38
Şekil 1.24. Isı transfer mekanizmaları (a) iletim (b) zorlanmış taşınım (c) doğal taşınım (Cengel and Ghajar 2014).	43
Şekil 1.25. Taşınım ile ısı transferi (a) doğal (b) zorlanmış (c) karma taşınım (Cengel and Ghajar 2014).....	45
Şekil 1.26. Karma taşınım ile ısı transferi (a) destekleyen (b) doğal (c) çapraz akış durumu (Cengel and Ghajar 2014).	47
Şekil 1.27. Yüzey dokusunun bileşenleri; pürüzlülük (nano ve mikropürüzlük), dalgalanma (makropürüzlük), yüzey paterni ve yüzey hataları (Bhushan 2000).....	50
Şekil 1.28. Denk pürüzlülük parametrelerindeki farklı yüzey yapıları (Bobrovskiy 2018).	53

Şekil 1.29. Pürüzlülük ölçüm cihazları şematik görseli (a) temaslı Stylus tekniği ve (b) temassız optik görüntüleme tekniği (Schlegel et al. 2011).	60
Şekil 1.30. Pürüzlülük ölçümünde temaslı yöntemlerin dezavantajları (Brown 2017). .	61
Şekil 2.1. Bazı ölçek etkilerinin şematik gösterimi (a) yüzey pürüzlülüğü (Sun and Faghri 2003), (b) elektrik çift tabaka (Hunter 1981) ve (c) eksenel ısı iletimi (Rahimi and Mehryar 2012; Coskun and Cetkin 2020).	82
Şekil 3.1. Çoklu mikrokanallı ısı değiştirici parametreleri.....	101
Şekil 3.2. Contour GTK 3D optik profilometre (Anonymous 2021i).	103
Şekil 3.3. Carl Zeiss optik mikroskop (Anonymous 2021j).	104
Şekil 3.4. Pürüzlülük ölçüm noktaları şematik görünümü.	104
Şekil 3.5. Mikrokanallı ısı alıcılarında kanal kesit görüntüleri [$w - h - R_a (\mu m)$].	106
Şekil 3.5. (Devam).....	107
Şekil 3.6. Deney düzeneği şematiği	108
Şekil 3.7. Deney düzeneği fotoğrafı	108
Şekil 3.8. Mikro dişli pompa ve teknik özellikleri (Anonymous 2021k).	109
Şekil 3.9. İndikatörlü debimetre ve teknik özellikleri (Anonymous 2021l).	110
Şekil 3.10. Sirkülatörlü su banyosu ve teknik özellikleri (Anonymous 2021m).	110
Şekil 3.11. Güç kaynağı ve teknik özellikleri (Anonymous 2021n).	111
Şekil 3.12. Data kartı ve teknik özellikleri (Anonymous 2021o).	112
Şekil 3.13. Test bölgesinin şematik görünümü.	113
Şekil 3.14. Test bölgesi için ısı kayıp eğrisi ve denklemi.	115
Şekil 4.1. Isı değiştirici no1 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.	122
Şekil 4.2. Isı değiştirici no2 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.	123
Şekil 4.3. Isı değiştirici no3 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.	124
Şekil 4.4. Isı değiştirici no4 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.	125
Şekil 4.5. Isı değiştirici no5 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (d) 5S.	126
Şekil 4.6. Isı değiştirici no6 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (d) 5S.	127

Şekil 4.7. Isı değiştirici no7 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.....	128
Şekil 4.8. Isı değiştirici no8 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.....	129
Şekil 4.9. Isı değiştirici no9 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.....	130
Şekil 4.10. Isı değiştirici no10 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.....	131
Şekil 4.11. Isı değiştirici no11 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (d) 5S.....	132
Şekil 4.12. Isı değiştirici no12 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (d) 5S.....	133
Şekil 4.13. Isı değiştirici no13 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.....	134
Şekil 4.14. Isı değiştirici no14 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.....	135
Şekil 4.15. Isı değiştirici no15 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.....	136
Şekil 4.16. Isı değiştirici no16 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.....	137
Şekil 4.17. Isı değiştirici no17 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (d) 5S.....	138
Şekil 4.18. Isı değiştirici no18 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (d) 5S.....	139
Şekil 4.19. w=300 µm mikrokanal genişliği için karma taşınım ısı transferi sonuçlarının modellerle karşılaştırılması (a) h=300 µm ve (b) h=450 µm.	141
Şekil 4.20. w=500 µm mikrokanal genişliği için karma taşınım ısı transferi sonuçlarının modellerle karşılaştırılması (a) h=300 µm ve (b) h=450 µm.	142
Şekil 4.21. w=700 µm mikrokanal genişliği için karma taşınım ısı transferi sonuçlarının modellerle karşılaştırılması (a) h=300 µm ve (b) h=450 µm.	143
Şekil 4.22. w=300 µm mikrokanal genişliğinde farklı pürüzlülük değerleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) h=300 µm ve (b) h=450 µm....	146
Şekil 4.23. w=500 µm mikrokanal genişliğinde farklı pürüzlülük değerleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) h=300 µm ve (b) h=450 µm....	147

Şekil 4.24. $w=700\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı pürüzlülük değerleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300\ \mu\text{m}$ ve (b) $h=450\ \mu\text{m}$	148
Şekil 4.25. $R_a=1,1\ \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinde farklı mikrokanal genişlikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300\ \mu\text{m}$ ve (b) $h=450\ \mu\text{m}$	150
Şekil 4.26. $R_a=1,8\ \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinde farklı mikrokanal genişlikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300\ \mu\text{m}$ ve (b) $h=450\ \mu\text{m}$	151
Şekil 4.27. $R_a=3,0\ \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinde farklı mikrokanal genişlikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300\ \mu\text{m}$ ve (b) $h=450\ \mu\text{m}$	152
Şekil 4.28. $w=300\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı mikrokanal yükseklikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $R_a = 1,8\ \mu\text{m}$ ve (b) $R_a=3,0\ \mu\text{m}$	153
Şekil 4.29. $w=500\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı mikrokanal yükseklikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $R_a = 1,8\ \mu\text{m}$ ve (b) $R_a=3,0\ \mu\text{m}$	154
Şekil 4.30. $w=700\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı mikrokanal yükseklikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $R_a = 1,8\ \mu\text{m}$ ve (b) $R_a=3,0\ \mu\text{m}$	155
Şekil 4.31. Nusselt sayısının Richardson sayısıyla değişimi ve karma taşınım sınırları (a) $h=300\ \mu\text{m}$ ve (b) $h=450\ \mu\text{m}$	157
Şekil 4.32. $w=300\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı yüzey pürüzlülükleri için karma taşınım sonuçlarının değerlendirilmesi (a) Φ/Gz ve (b) $Ra^{1/4}/Nu_{\text{For}}$ yaklaşımı.	159
Şekil 4.33. $w=500\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı yüzey pürüzlülükleri için karma taşınım sonuçlarının değerlendirilmesi (a) Φ/Gz ve (b) $Ra^{1/4}/Nu_{\text{For}}$ yaklaşımı.	160
Şekil 4.34. $w=700\ \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı yüzey pürüzlülükleri için karma taşınım sonuçlarının değerlendirilmesi (a) Φ/Gz ve (b) $Ra^{1/4}/Nu_{\text{For}}$ yaklaşımı.	161
Şekil E1.1. Termokupl kalibrasyon eğrileri ve denklemleri.....	196

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Mikrokanallar ve mikroakışlı cihazlar için bazı geleneksel olmayan üretim yöntemleri, işlem özeti ve çözünürlüğü (Rehmani et al. 2021).....	22
Çizelge 1.2.	Mikrokanallar ve mikroakışlı cihazlar için bazı geleneksel olmayan üretim yöntemleri, avantajlar ve dezavantajlar (Rehmani et al. 2021).	23
Çizelge 1.3.	Mikro-lazer işleme üretim metotları, materyalleri, avantaj ve dezavantajları (Prakash and Kumar 2015).....	36
Çizelge 1.4.	Performansa ve uygulamalara göre mikro-elektro erozyon işlemleri (Uhlmann et al. 2015).....	39
Çizelge 1.5.	Mikrokanal üretim metotları, temel uygulama alanları, materyalleri, avantaj ve dezavantajları (Prakash and Kumar 2015).	40
Çizelge 1.5.	(Devam).....	41
Çizelge 1.6.	Çalışma kapsamında yapılan mikrokanal üretim denemeleri ve hedeflenen geometrik özelliklerin durumu (Ateş 2020).	42
Çizelge 1.7.	Isı taşınım katsayılarının farklı şartlardaki değer aralıkları (Bergman et al. 2017).....	44
Çizelge 1.8.	Pürüzlülük terminolojisi ve bazı önemli tanımlar.	51
Çizelge 1.8.	(Devam).....	54
Çizelge 1.9.	Bazı önemli pürüzlülük parametreleri için açıklayıcı görseller ve tanımlar (Anonymous 2021g).....	53
Çizelge 1.9.	(Devam).....	54
Çizelge 1.9.	(Devam).....	55
Çizelge 1.10.	Bazı önemli pürüzlülük parametreleri için hesap prosedürü ve kullanım alanları (Anonymous 2021h).....	56
Çizelge 1.10.	(Devam).....	57
Çizelge 1.11.	Pürüzlülük ölçüm yöntemlerinin sınıflandırılması (Prabhakar et al. 2017).	59
Çizelge 2.1.	Tek fazlı ısı transferi için önerilen geleneksel korelasyonlar (Asadi et al. 2014).....	64
Çizelge 2.1.	(Devam).....	65
Çizelge 2.1.	(Devam).....	66

Çizelge 2.2.	Mikrokanallarda laminar akış sürtünme katsayısı için deneysel veriler ve geleneksel teorilerden sapma (Morini 2004).....	67
Çizelge 2.2.	(Devam).....	68
Çizelge 2.3.	Mikrokanallarda tek fazlı ısı transferi için Nusselt sayısı ve geleneksel teorilerden sapma (Morini 2004).....	69
Çizelge 2.3.	(Devam).....	70
Çizelge 2.4.	Mikrokanallarda farklı geometri, iş akışkanı ve akış karakteristikleri için önemli bulgular özet tablosu (Salman et al. 2013).	71
Çizelge 2.4.	(Devam).....	72
Çizelge 2.4.	(Devam).....	73
Çizelge 2.4.	(Devam).....	74
Çizelge 2.4.	(Devam).....	75
Çizelge 2.4.	(Devam).....	76
Çizelge 2.4.	(Devam).....	77
Çizelge 2.4.	(Devam).....	78
Çizelge 2.4.	(Devam).....	79
Çizelge 2.5.	Ölçek etkileri yönüyle mikrokanallarda ısı ve akış çalışmaları (Coskun and Cetkin 2020)	83
Çizelge 2.5.	(Devam).....	84
Çizelge 2.6.	Mini ve mikrokanallarda pürüzlülüğünün akış karakteristiklerine etkisi özet tablosu; bağıl pürüzlülük, kanal ve akışkan (Dai et al. 2014).	90
Çizelge 2.6.	(Devam).....	91
Çizelge 2.7.	Mini ve mikrokanallarda pürüzlülüğünün akış karakteristiklerine etkisi; hidrolik çap, Reynolds sayısı ve sürtünme faktörü (Dai et al. 2014).	92
Çizelge 2.7.	(Devam).....	93
Çizelge 2.8.	Mikrokanallarda taşınım ile ısı transferinde yüzey pürüzlülüğü etkileri özet tablosu; yöntem, geometri, iş akışkanı ve akış rejimi (Pelevic and Meer 2016; Mandev and Manay 2022).....	95
Çizelge 2.8.	(Devam).....	96
Çizelge 2.8.	(Devam).....	97
Çizelge 2.9.	Mikrokanallarda taşınım ile ısı transferinde yüzey pürüzlülüğü etkileri özet tablosu – değerlendirme ve sonuçlar (Pelevic and Meer 2016; Mandev and Manay 2022).....	98
Çizelge 2.9.	(Devam).....	99

Çizelge 2.9. (Devam).....	100
Çizelge 3.1. Mikrokanallı ısı alıcılarda hedeflenen geometrik özellikler.....	102
Çizelge 3.2. Mikrokanallı ısı alıcıların pürüzlülük değerleri (μm).....	105
Çizelge 3.3. Deneysel değişkenlerin belirsizlik analizi	119



1. GİRİŞ

1.1. Konu ve Kapsam

Genelde mikro elektro mekanik sistemlerin, özelde ise mikro akışlı cihazların temel bileşenlerinden olan mikrokanallar üretim yöntemleri ve kullanım alanlarındaki çeşitlilik nedeniyle farklı araştırma disiplinlerine konu olmaktadır. Son yıllarda her alanda ağırlığını artıran minyatürleşme trendleri de mikrokanal konusundaki ilginin hızla artmasına neden olmaktadır. Mikrokanallar, imalat yöntemleri yönüyle ele alındığında, geleneksel imalat yöntemlerinin bu kritik bileşenler için kullanılmasının oldukça güç olduğu görülecektir. Mikrokanal malzemesinin metalik, polimer veya seramik oluşuna göre geleneksel veya geleneksel olmayan üretim yöntemlerinden uygun olan birinin veya birkaçının kullanılması gerekmektedir. Seçilen yöntem, malzemeye ve üretim parametrelerine bağlı olarak boyutsal hassasiyet, kanal kesitinin şekli, kanallardaki yüzey yapısı ve pürüzlülüğü gibi geometrik özelliklerde farklılıkların oluşması kaçınılmazdır. Isı ve akış mühendisliği yönüyle bakıldığında bu geometrik özelliklerdeki farklılıklar kanallardaki akış yapısını ve dolayısı ile termal performansı da etkilemektedir. Ayrıca, doğrudan üretim yöntemi ve malzeme özelliği etkileşimleri sonucu oluşan yüzey pürüzlülükleri makro sistemlerde bazen ihmal edilse de mikrokanallar gibi küçük karakteristik uzunluklarda önem kazanan ölçeklendirme etkileri arasında gösterilmektedir.

Mikrokanallarda ısı transferinde önemli bir diğer husus ise akışkanın nasıl tahrik edileceğidir. Mikroakışlı sistemlerde ısı değiştiricileriyle birlikte akış tahrik mekanizmalarının da boyutlarını minimize etmek gerekir. Bunun sonucu olarak akış hızları düşebilir ve dolayısıyla taşınım mekanizmasının tekrar değerlendirilmesi gerekebilir. Aslında her zaman var olan doğal taşınım etkileri akış hızlarının azalmasıyla ihmal edilebilir sınırların dışına çıkmaktadır. Bu sebeple düşük Reynolds sayılarında taşınım mekanizmasının zorlanmış yerine karma taşınım olarak değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Karma taşınım mekanizmasında doğal taşınım kaynaklı akışın, zorlanmış akışa göre yönelimi ısı transferinin artmasına veya azalmasına neden olabilmektedir. Bu durum akış yapısını ve ısı transfer mekanizmasını da karmaşıktırmaktadır.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında bu çalışmayla mikrokanallarda karma taşınım ile ısı transferi konusunun daha iyi anlaşılması ve özellikle yüzey pürüzlülüğü etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasında, mikrokanallarda imalat süreci kaynaklı yüzey pürüzlülüğü ve mikrokanal boyutları gibi geometrik parametrelerin karma taşınım ile ısı transferine etkileri incelenmiştir. Paslanmaz çelik malzeme kullanılarak üretilen dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallarda kombine doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin toplam ısı transferine katkısı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler 1,1 μm , 1,8 μm ve 3,0 μm olmak üzere üç farklı ortalama yüzey pürüzlülüğüne, 300 μm , 500 μm ve 700 μm 'lik üç mikrokanal genişliğine ve 300 μm ve 450 μm 'lik iki mikrokanal yüksekliğine sahip 18 farklı mikrokanallı ısı alıcıyla gerçekleştirilmiştir. İmalat sürecinde elektro-erozyon parametreleri değiştirilerek yüzey pürüzlülüğü hassas şekilde kontrol edilmiş ve farklı geometrik özelliklerde üretilen mikrokanallı ısı alıcılar için detaylı yüzey haritaları oluşturulmuştur. Temassız olarak ölçülen yüzey pürüzlülükleri için ortalama yüzey pürüzlülüğünün yanında ek pürüzlülük parametreleri de verilmiştir. İş akışkanı olarak saf su kullanılan deneylerde, mikrokanallı ısı alıcı alt yüzeyine sabit ısı akısı uygulanmıştır. Ayrıca karma taşınım koşullarını sağlamak için deneyler 10–80 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğünün karma taşınım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü etkisinin nedenleri ve seviyesi de tartışılmıştır.

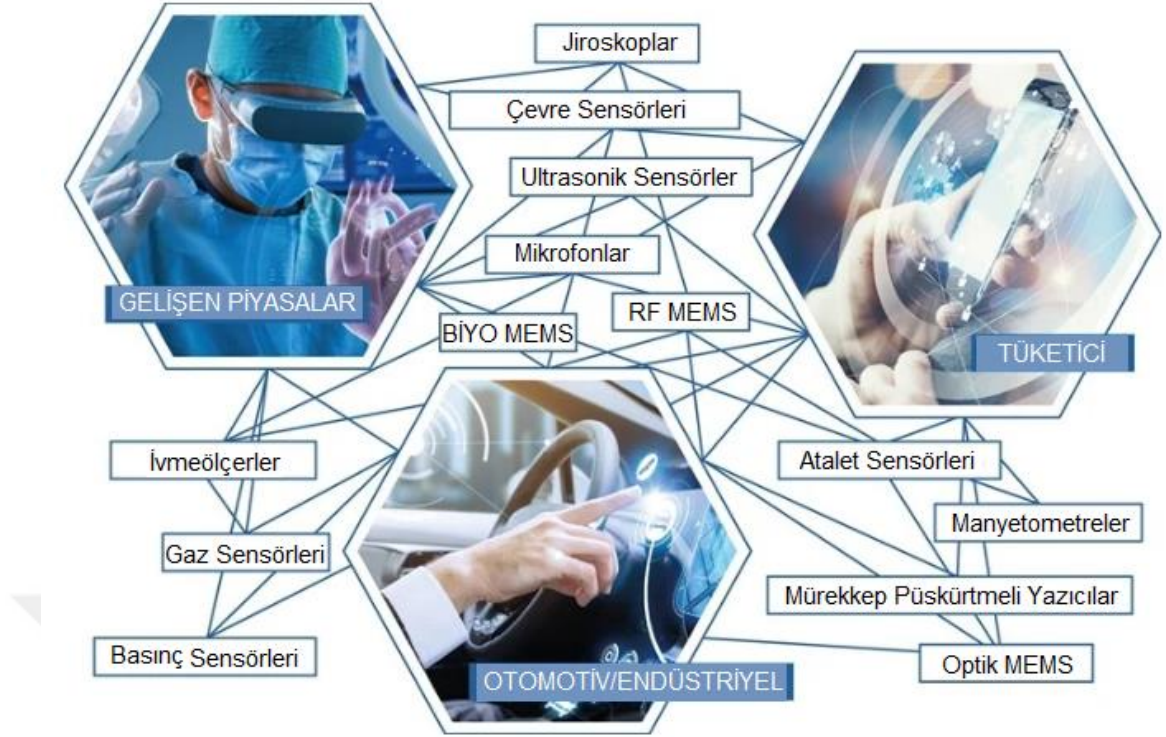
Çalışmanın giriş bölümünde ilk olarak mikrokanalların mikro elektro mekanik sistemlerde ve mikro akışlı cihazlardaki yeri ve önemi vurgulanarak günümüzdeki minyatürleşme sürecinden bahsedilmiştir. Devamında termal uygulamalarda mikrokanalların kullanımı detaylandırılmış ve bu konunun avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Sonrasında mikrokanallar üretim yöntemleri yönüyle ele alınmıştır. Üretim yöntemleri detaylandırılarak mikrokanal üretim yöntemlerinin kanal geometrik parametreleri üzerindeki etkileri irdelenmiş ve tez kapsamında kullanılacak mikrokanallarda aranan geometrik özellikler vurgulanmıştır. Karma taşınım ile ısı transferi, yüzey pürüzlülüğü terminolojisi ve pürüzlülük ölçüm yöntemleriyle ilgili tanımlamalar yapılarak giriş bölümü sonlandırılmıştır. Kaynak özetleri bölümü mikrokanallarda geleneksel yaklaşımlardan sapmalar ve literatürdeki tutarsızlıklar konusunda yapılan değerlendirmeye başlamaktadır. Devamında mikrokanallardaki ölçek etkilerine vurgu yapılarak özelde ısı transferi ve akış olaylarındaki pürüzlülük etkileri

irdelenmiştir. Materyal ve yöntem bölümü mikrokanalların üretim sürecini ve mikrokanalların geometrik özelliklerini içermektedir. Ayrıca test bölgesinin ve kullanılan elemanların teknik özellikleri bu bölümde verilmiştir. Son olarak hesap prosedürü ve belirsizlik analizi ise materyal ve yöntem bölümünde detaylandırılmıştır. Araştırma bulguları ise yüzey pürüzlülük durumunun değerlendirilmesi, ısı transferi sonuçlarının modeller ile karşılaştırılması, geometrik parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkilerinin ortaya konması ve karma taşınım bileşenlerinin değerlendirilmesini içermektedir.

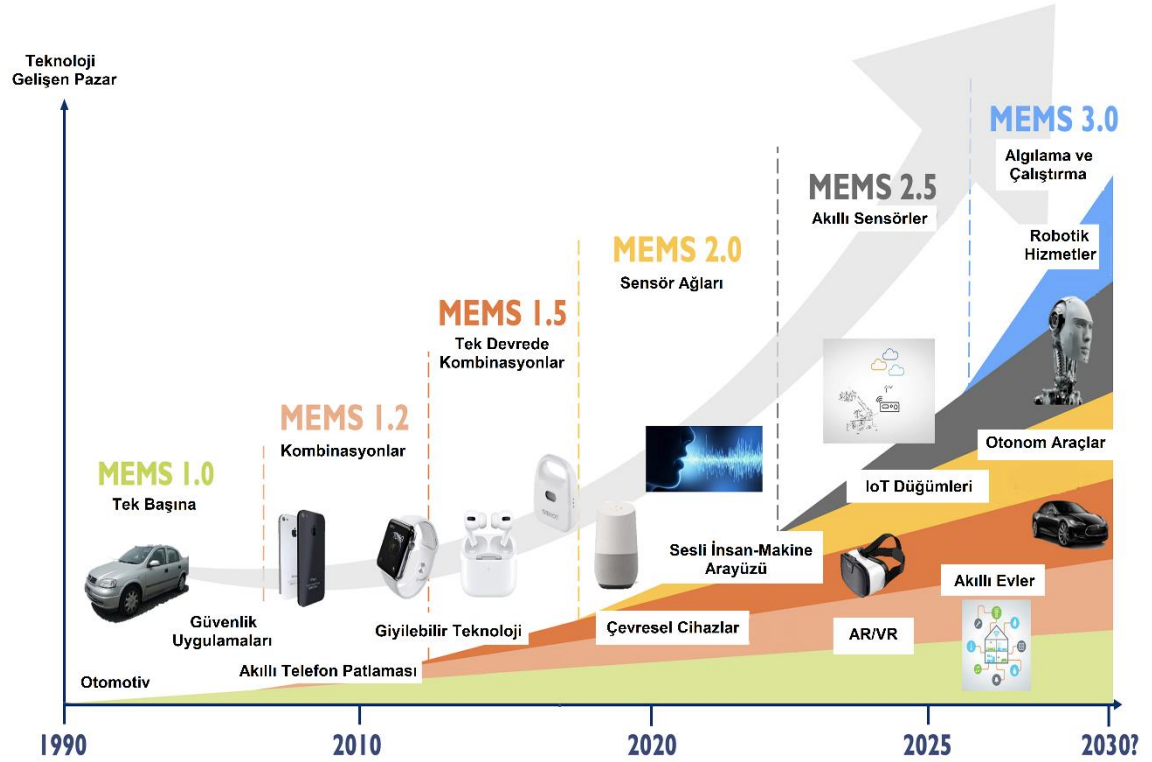
1.2. Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) ve Minyatürleşme

Günümüzde minyatürleştirme alanında bariz bir trend olduğu görülmektedir. Yakın geçmişte hızla gelişen üretim teknolojilerinin yardımıyla hemen hemen her sistem fonksiyon kaybına uğramadan hatta yeni fonksiyonlar kazandırılarak mikrometre boyutlarında ve altında üretilebilmektedir. İşte bu gelişmelerin neticesinde 1980'lerde MEMS (Mikro Elektro-Mekanik Sistemler) olarak bilinen oldukça geniş ve yenilikçi bir konu ortaya çıkmıştır. 1990'lardan sonra ise MEMS ürünleriyle kimyasal, biyolojik ve biyomedikal gibi alanlarda fark yaratan uygulamalar ortaya konmuştur. MEMS mekanik ve elektrikli bileşenleri birleştiren küçük entegre cihazlar veya sistemler oluşturmak için kullanılan bir süreç teknolojisi olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler veya cihazlar mikro ölçekte algılama, kontrol etme ve harekete geçirme ve makro ölçekte etki oluşturma yeteneğine sahiptir. MEMS'in disiplinler arası doğası, entegre devre üretim teknolojisi, makine mühendisliği, malzeme bilimi, elektrik mühendisliği, kimya ve kimya mühendisliğinin yanı sıra akışkan mühendisliği, optik ve kontrol alanları da dahil olmak üzere geniş ve çeşitli teknik alanlardan tasarım, mühendislik ve üretim uzmanlığını kullanır. MEMS devreleri otomotiv, tıp, elektronik, iletişim ve savunma uygulamaları gibi çeşitli sistemlerde bulunabilir. MEMS, 21. yy. için en umut verici teknolojilerden biri olarak gösterilmektedir ve hem endüstriyel hem de bireysel tüketim ürünlerinde ağırlığını artırması beklenmektedir. MEMS teknikleri ve mikrosistem tabanlı cihazlar tüm yaşam biçimimizi çarpıcı biçimde etkileme potansiyeline sahiptir. Yarı iletken mikrofabrikasyon ilk mikro üretim devrimi olarak görülüyorsa, MEMS teknolojisi ikinci devrimdir. Piyasa, endüstri ve tüketici yönüyle MEMS ürünlerine örneklerin verildiği faydalı bir görsel Şekil 1.1'de, MEMS pazarının gelişim trendlerini içeren bir görsel ise Şekil 1.2'de verilmiştir (Rao 2002; Tabeling 2005; Kim and Meng 2016).

1. GİRİŞ



Şekil 1.1. Piyasa, endüstri ve tüketici yönüyle MEMS ürünlerine örnekler (Anonymous 2021a).



Şekil 1.2. MEMS pazarında ürünlerin gelişim trendleri (Anonymous 2021b)

Literatürde MEMS üretim teknolojisi hakkında birkaç belirgin avantajdan bahsedilmiştir. Öncelikle MEMS teknolojisinin disiplinler arası yapıda olması ve mikro işleme teknikleri barındırması, elektronik ve mekanik deyince ilk etapta akla gelmeyecek olan biyoloji ve kimya gibi ilgisiz alanlarda benzersiz bir uygulama sahasının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ek olarak fiziksel boyutlar, hacim ve ağırlıkta azalma seri üretime olanak sağladığı gibi, ürün maliyetinde belirgin bir azalmayı beraberinde getirmektedir. Diğer bir avantaj ise MEMS teknolojisi ile beraber ortaya çıkan alışılmadık imalat yöntemlerinin geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilemeyecek imalatların güvenilir şekilde yapılmasını mümkün kılmasıdır. Bununla birlikte, MEMS teknolojisinin potansiyelini gerçekleştirmeden önce ele alınması ve üstesinden gelinmesi gereken minyatürleştirme ile ilgili birçok zorluk ve teknolojik engel bulunmaktadır. Minyatürleştirme sadece mevcut cihazları küçültmekle ilgili değildir (her ne kadar bazı klasik örnekler olsa da). Bu bir mikro sistemin yapısını tamamen yeniden düşünmekle ilgilidir. Başarılı bir MEMS cihazı üretmek için, ölçekleme yasalarını içeren temel fizik ve çalışma ilkelerinin hem makro hem de mikro düzeyde tam olarak anlaşılması ve uygulanması gerekir. Bazen bir MEMS cihazı ile performans, boyut/ağırlık, güvenilirlik ve maliyet açısından hiçbir avantaj elde edilemez. Mikro ölçekte artan yüzey alanı/hacim oranlarının hem önemli avantajları hem de dezavantajları vardır.

Mikro düzeydeki karşılaşılabilecek bazı sorunlar Rao (2002) tarafından devam eden kısımdaki gibi tanımlanmıştır. Fakat burada verilen sorunların farklı bir ürün tasarımı için gerekli olabileceği de değerlendirilmelidir.

- Sürtünme ataletten büyüktür. Kılcal, elektrostatik ve atomik kuvvetler ile mikro düzeydeki yapışma önemli olabilir.
- Isı yayılımı, ısı depolamadan daha fazladır ve sonuç olarak termal taşıma özellikleri bir problem veya tersine büyük bir fayda olabilir.
- Akışkan veya kütle taşıma özellikleri son derece önemlidir. Küçük akış boşlukları tıkanmaya eğilimlidir ancak sıvı hareketini tersine düzenleyebilir.
- Malzeme özellikleri (Young modülü, Poisson oranı, tane yapısı) ve mekanik teori (artık gerilme, aşınma ve yorulma vb.) boyuta bağlı olabilir.

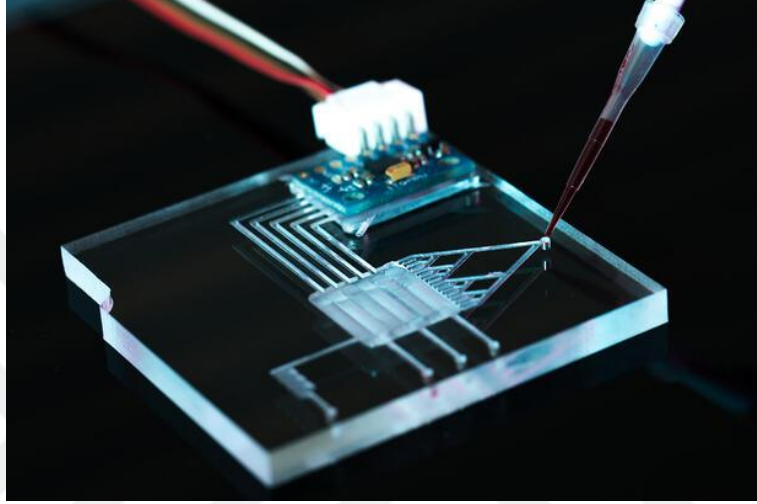
1990'lar minyatürleşmenin belirgin ölçüde çeşitlendiği yıllardır ve MEMS cihazlarının kimyasal, biyolojik ve biyomedikal uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bahsedilen uygulamalar, alışılmışın dışında koşullarda çalışmaktaydı ve farklı akış yapıları barındırıyordu. Bu durum yeni araştırma sahaları olan mikroakışlar ve MFD (Mikro Akışlı Cihazlar) kavramlarının orta çıkmasına yol açtı. Mikroakışlar için sıklıkla kullanılan bir tanım yapay mikro sistemlerde dolaşan basit veya karmaşık, tek veya çok fazlı akışların incelenmesidir. İlerleyen bölümde bu MEMS konusunda bir alt başlık olarak değerlendirilen mikroakışlar ve MFD detaylandırılmıştır (Tabeling 2005; Jiang et al. 2015).

1.3. Mikro Akış ve Mikro Akışlı Cihazlar (MFD)

Mikroakışlar birkaç mikrometreden milimetreye kadar iç boyutlara sahip teknik aparatlarda gerçekleşen sıvı etkileşimleri olarak tanımlanmaktadır. Daha genel olarak, akış yapılarının boyutlarından biri 1 mm'den küçükse mikroakış terimi kullanılır. Mikroakışlar, mikro ölçekte önem kazanan bazı etkilerin baskın olmaya başlamasıyla makro akışlardan ayrılmaktadır. Mikroakışların gerçekleştiği özel MEMS cihazları ise MFD (Micro Fluidic Devices) olarak tanımlanmaktadır (Cottet and Renaud 2021). MFD ürünlerini genel manada göz önüne alarak belirlenen bir dizi özellik Folch (2016) tarafından aşağıdaki gibi verilmektedir. Ayrıca Şekil 1.3'de MFD teknolojisi ile alakalı bir örnek görsel sunulmuştur. Biyokimyasal uygulamada kullanılan bu MFD yapısı üzerindeki mikrokanal ve sensörlerle dikkat çekmektedir.

- Bu cihazlarda özellikle akışkan viskozitesi akış karakteristiklerinde etkin bir rol oynamaktadır.
- Akış pek çok uygulama için laminar şartlarda gerçekleşir ve matematiksel modellenmeye yatkındır.
- MFD boyutları biyolojik hücrelerle aynı büyüklük mertebesine sahiptir ve bu cihazlar hücrelerle doğrudan etkileşime izin vermektedir.
- Mikro valfler ve mikro pompalar ile sistem üzerinde otomasyon sağlanabilir.
- Üretilen cihazların boyutlarının küçük olması nedeniyle seri üretim maliyetlerinde önemli bir fayda elde edilmektedir.

- Kullanılan reaktif madde, ihtiyaç duyulan numune veya gereken iş akışkanı miktarları oldukça küçüktür.
- Cihazlardaki kompaktlık taşınabilirliği sağlamaktadır. Ayrıca ilgi maddesinin az olması pek çok uygulamada analiz hızını artırmaktadır.
- Yüzey alanı/hacim oranının artması, termal uygulama performansları yönüyle benzersiz bir verimlilik ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 1.3. Biyokimyasal uygulamada kullanılan bir MFD sistemi örneği, mikrokannallar ve sensörleri (Anonymous 2021c).

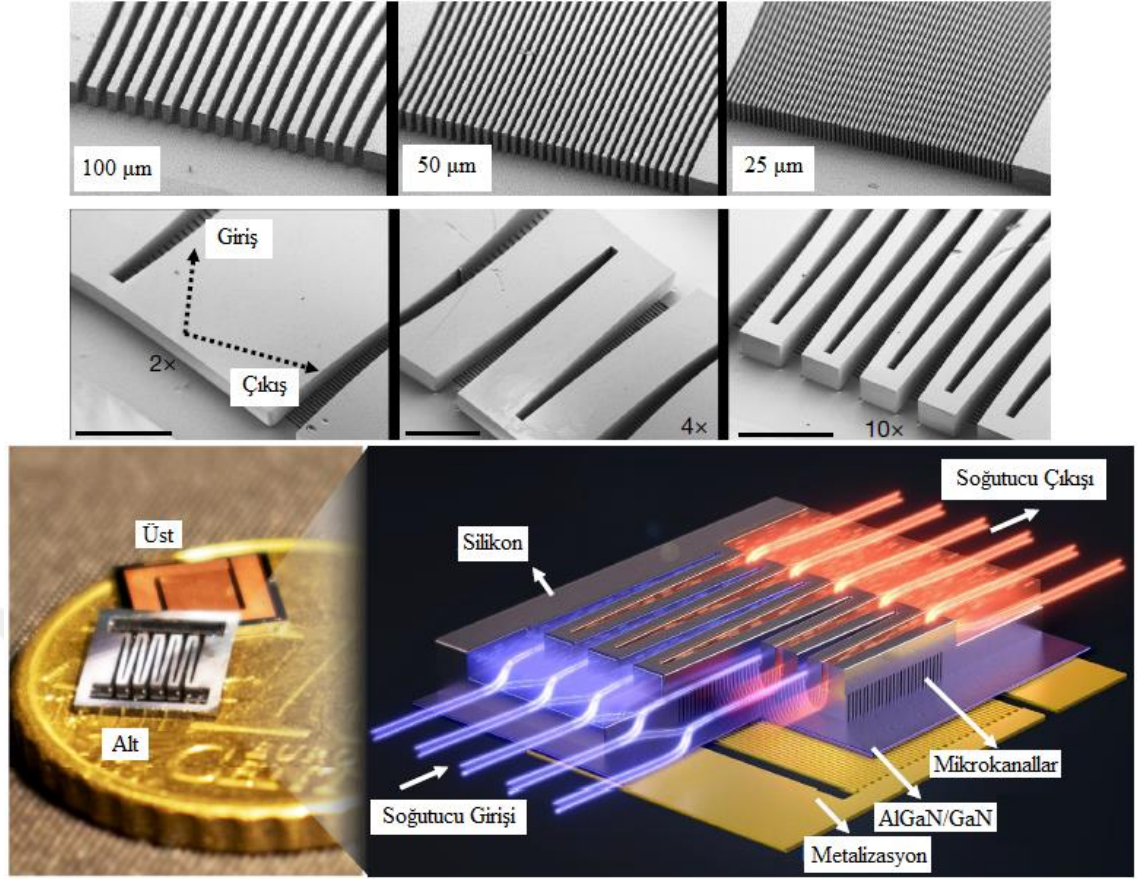
Devam eden bölümde bu avantajların bazıları daha açık biçimde tartışılmıştır. Yukarıda bahsedilen kritik özellikler nedeniyle MFD sağlık, biyoloji, kozmetik, ilaç keşfi gibi geniş bir alan yelpazesinde kilit bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Temelde akışkan proseslerini mikro ölçeğe küçülterek elde edilen avantajların bazıları doğrudan boyuttaki küçülmeden; bazıları ise bu durumun sonuçlarından kaynaklanmaktadır. En belirgin MFD avantajlarından biri minyatürleştirilmiş bileşenlerin ve işlemlerin daha küçük hacimlerde akışkan gerektirmesi ve böylece reaktif tüketiminin azalmasına yol açmasıdır. Bu şekilde maliyetler azalır ve küçük miktarlardaki değerli numunelerle daha fazla testin gerçekleştirilmesinin önü açılabilir. Ayrıca atık ürünlerin miktarları da azaltılabilir. Küçük bileşenlerin küçük termal kütlesi ve büyük yüzey alanı/hacim oranı, ısı transfer hızını artırarak, hızlı soğutma ve hassas sıcaklık kontrolü sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu özellik ekzotermik reaksiyonlarda istenmeyen yan reaksiyonlara ve hatta patlamalara yol açabilecek aşırı ısınmaların önüne geçilmesine yardımcı olabilir.

Büyük yüzey alanı/hacim oranı ayrıca katalizörler veya enzimler içeren işlemlerde ve katı faz sentezinde de bir avantaj olarak görülmektedir. MFD ürünleri küçük uzunluk ölçeklerinde olduğundan bu cihazlarda difüzyon karıştırma hızlıdır ve genellikle reaksiyonların doğruluğu yüksektir. MFD bazen görevlerini tamamen yeni yollarla gerçekleştirebilmektedir. Buna bir örnek olarak MEMS devreleri üzerindeki farklı sıcaklık kontrolü uygulamaları gösterilebilir. Bu alandaki bazı uygulamalarda akışkanın yerinde ısıtılması ve soğutulması yerine akışkan farklı sıcaklıklardaki devre bölgeleri arasında hareket ettirilerek sıcaklık kontrolü sağlanmaktadır (Van Dam 2006; Cottet and Renaud 2021).

MFD ürünleri için literatürde pek çok yönde sınıflandırmalar yapılmıştır. Fakat oldukça geniş bir uygulama alanına sahip bu teknoloji için ürünler basitçe aşağıdaki gibi listelenebilir.

- Mikrokanallar
- Mikro akış sensörleri
- Mikro vana ve valfler
- Mikro pompalar
- Damla ve jet üreteçleri

Bu sınıflandırma içerisinde, bir MFD sisteminde akışın doğası gereği olmazsa olmaz bileşenler mikrokanallardır. Mikrokanallar bu tez kapsamında da özel olarak ele alınan MFD ürünüdür. Hemen hemen tüm MFD uygulamalarında kullanılan mikrokanallarda oldukça geniş bir konu çeşitliliğinin bulunduğu daha önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Bu tez çalışmasında ise mikrokanallar termal uygulamalar yönüyle ele alınmıştır. Devam eden bölümde mikrokanallar ve mikrokanallı ısı alıcıları hakkında bir değerlendirme sunulmuştur. Ayrıca Van Erp et al. (2020) tarafından tasarlanan ve üzerinde mikrokanallar barındıran bir MFD örneği de Şekil 1.4’de verilmektedir. Şekilde farklı hidrolik çaplardaki mikrokanallar, iş akışkanının giriş çıkış bölümleri ve MFD ürünün tamamına ait görseller sunulmuştur.

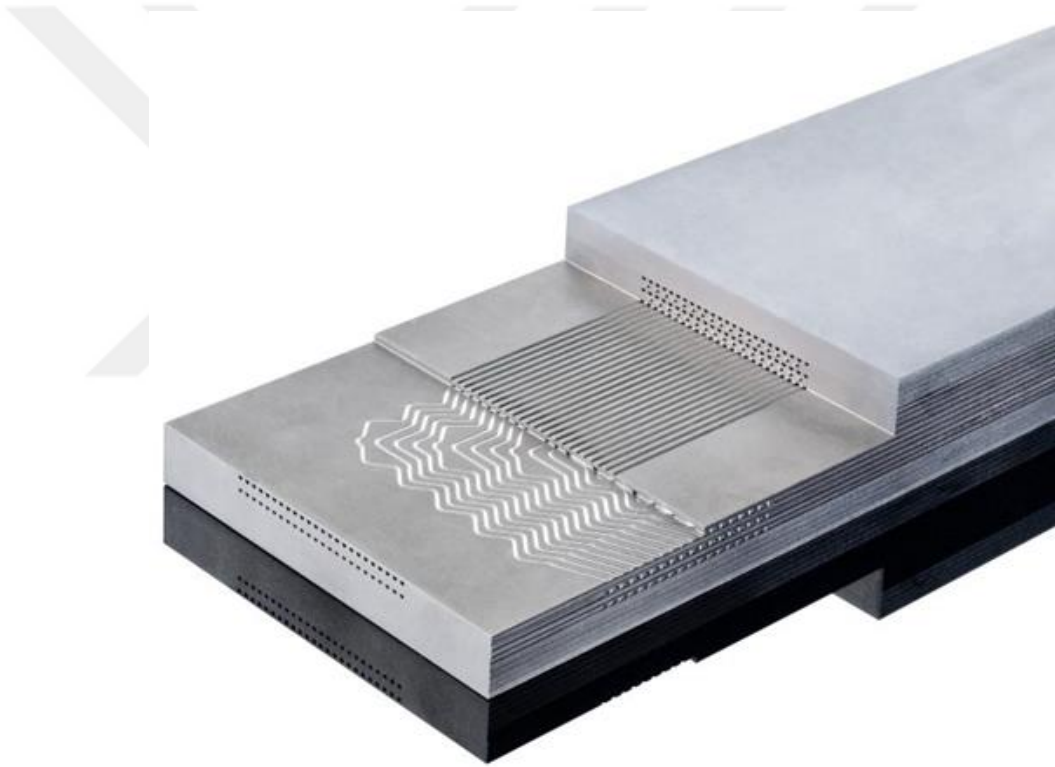


Şekil 1.4. Termal uygulamalarda mikrokanallar için örnek bir MFD devresi (Van Erp et al. 2020).

1.4. Termal Uygulamalarda Mikrokanallar ve Mikrokanallı Isı Alıcıları

Termal alanda literatüre geçen ilk mikrokanal uygulama önerisi Tuckerman ve Pease (1981) tarafından ortaya atılmıştır. Büyük ölçekli entegre devrelerin soğutulması konusundaki bu öncü çalışmadan sonra mikrokanallarda tek fazlı ısı transferi üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Tuckerman ve Pease (1981) bu çalışmada mikrokanallı ısı alıcılar kavramını tanıtmış ve mikrokanallardaki tek fazlı zorlanmış taşınım şartlarında soğutmanın potansiyeli hakkında tahminlerde bulunmuştur. O dönemde geleneksel olarak akış kanallarının kullanıldığı zorlanmış taşınım uygulamaları ağırlıklı olarak kabul görmüştür. Fakat mikrokanallarda ısı transferi, geleneksel hava ve sıvı soğutmalı sistemlere kıyasla rekor düzeyde yüksek ısı transfer katsayısı ve düşük ila orta basınç düşüşleri sağlama potansiyeli göstermiştir. Bu durum mikrokanallarda ısı transferi konusunu araştırmacılar için giderek daha popüler ve ilgi çekici hale getirmiştir.

Son yıllarda ise çeşitli tıbbi cihazlar, yüksek güç yoğunluklu mikro elektronikler, süper bilgisayarlar, plazma ortam bileşenleri ve yüksek güçlü lazerler gibi ürün sahalarındaki teknolojik gelişmeler neticesinde cihazların güç tüketimlerinde ve soğutma gereksinimlerinde belirgin bir artış oluşmuştur. Geleneksel soğutma sistemler bu yükleri karşısında performans problemleri yaşamaktadır. Bu gereksinime karşılık verebilecek kompakt mikrokanallı ısı eşanjörleri çeşitli endüstrilerde yeni uygulamalar bulmaktadır. Mikrokanallı ısı değiştiricileri, yeni nesil yüksek performanslı termal yönetim sistemlerini tasarlamada ve çalıştırmada umut verici bir çözüm olarak görülmektedir (Schmidt 2003; Ohadi et al. 2013). Mikrokanallı kompakt ısı değiştiricisi için örnek bir görsel Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5. Mikrokanallı kompakt ısı değiştiricisi (Anonymous 2021d)

Newton'un soğutma yasasından sabit bir sıcaklık farkı için ısı akısının, ısı transfer katsayısı ve ısı transfer yüzey alanına bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, yüksek ısı akısı giderme gereksinimini yerine getirmek için ısı transfer katsayısı veya ısı transfer yüzey alanı artırılmalıdır. Isı transfer katsayısı hidrolik çapla ilgili olduğundan, ilk olarak yüzey alanını arttırmak daha anlamlı bir seçenektir. Kanalların içindeki akışkanın davranışı kanalın hidrolik çapı ve kanal kesit alanı ile doğrudan alakalıdır. Yüksek ısı

transferi elde etmek için, kanalın daha küçük bir hidrolik çapa ve daha büyük ısı transfer alanına sahip olması hedeflenmelidir. Daha küçük hidrolik çap ve daha büyük yüzey alanı, basınç düşüşünü arttırır ve sonuç olarak daha yüksek pompalama gücü gerektirir. Öte yandan, ısıtma yüzeyinin artan alanı, ısı transfer oranını arttırır. Buradaki denge sistem gereksinimlerine göre mikrokanaallı ısı alıcı tasarımlarıyla sağlanmalıdır.

Mikrokanaallardaki ısı transferi ve akış, yüksek güç yoğunluklu elektronik cihazların etkili ve daha hızlı soğutulması arayışında geniş çapta araştırılmıştır. Yukarıda tartışıldığı gibi mikro kanalların avantajları, yüksek ısı transfer katsayılarında ve ısı değiştiricilerindeki minyatürleşme yeteneklerinde görülebilmektedir. Diğer avantajları ise azaltılmış ağırlıkları, az iş akışkanı gerektirmeleri ve üretimde daha az malzeme gerektirmeleridir. Mikro kanalların azaltılmış çapları, daha kompakt ısı eşanjörleri ve birim hacim başına daha fazla yüzey alanı sayesinde daha yüksek ısı transfer katsayıları ile sonuçlanır. Mikrokanaallar oldukça özel alanlarda geniş ve pratik uygulamalara sahiptir. Örneğin, mikrokanaallı ısı alıcılarının kompaktlığı ve düşük ağırlığı, otomotiv endüstrisini hızla bu konuya yöneltmiş ve bugün mikrokanaallar otomotiv kondansatörlerindeki dairesel boruların ve hidrolik çapları yaklaşık 1 mm olan ısı eşanjörlerinin yerini neredeyse tamamen almıştır. Daha yakın zamanlarda ise mikrokanaallar otomotiv iklimlendirme sistemlerine, yakıt hücrelerine ve mikro elektronik devrelere başarıyla uygulanmıştır. Mikrokanaalların temel dezavantajları ise, yüksek basınç kaybı ve gereken pompalama gücündeki artış olarak gösterilmektedir. Ayrıca kanallarda görülen yüksek derecede filtreleme ve üretin teknolojilerindeki maliyet de önemli problemler olarak karşımıza çıkmaktadır (Ohadi et al. 2013; Adham et al. 2013).

1.5. Mikrokanaal Üretim Yöntemleri

Mikrokanaalların imalatı, mikro akışlı cihazların geliştirilmesi noktasında önemli bir husustur. Kullanıcıların teknik beklentilerinin yanı sıra, mikro akışlı cihazların gelişimi üretim proseslerinin hızlanması ve ucuzlamasına da bağlıdır. Fakat nispeten seri ve ucuz olan geleneksel imalat yöntemlerinin bu kritik bileşenlerin üretiminde kullanımı oldukça güçtür. Yıllar boyunca farklı kullanıcı beklentileri, uygulama alanları ve malzeme türleri için bir dizi imalat tekniği önerilmiştir ve bu teknikler halen geliştirilmektedir.

Mikrokanal malzemesinin metal, polimer veya seramik oluşuna göre geleneksel veya geleneksel olmayan üretim yöntemlerinden uygun olan birini veya birkaçının kullanılması gerekmektedir (Kanlayasiri and Paul 2004; Fernández-Pradas 2009; Paulraj et al 2012; Prakash et al. 2013). Mikrokanalların kullanım amaçları ve kullanıcı beklentilerine göre seçilmesi gereken bu yöntemler genel olarak aşağıda verilen başlıklar altında sınıflandırılabilir (Prakash and Kumar 2015):

- Mikro-Mekanik İşleme
- Litografi
- Islak ve Kuru Aşındırma
- Kabartma ve Baskı
- Mikro-Enjeksiyon Kalıplama
- Mikro-Lazer İşleme
- Mikro-Elektro Erozyon

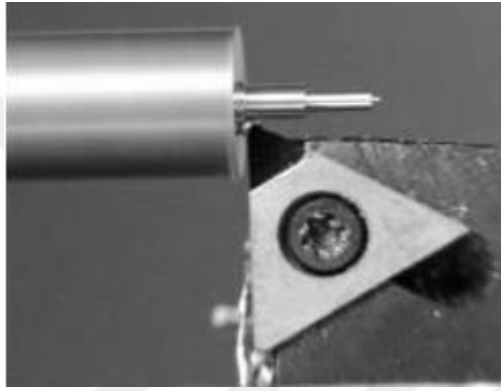
Seçilen yönteme, malzeme ve üretim parametrelerine göre boyutsal hassasiyet, kanal kesitinin şekli, kanallardaki yüzey yapısı ve pürüzlülüğü gibi geometrik özelliklerde farklılıkların oluşması kaçınılmazdır. Devam eden bölümde mikrokanal üretim yöntemleri detaylandırılmış, kabiliyetleri aktarılmış ve ayrıca yöntemlerin avantaj/dezavantaj yönleri de vurgulanmıştır.

1.5.1. Mikro-mekanik işleme

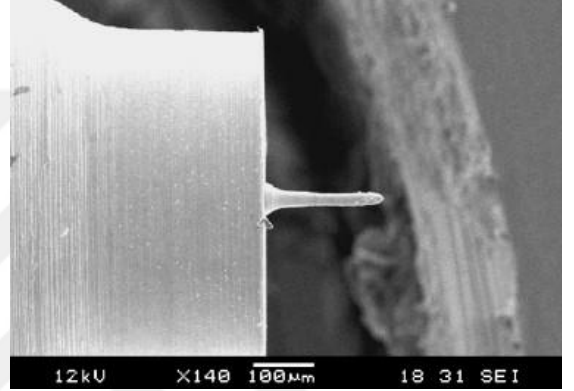
Mikro-Mekanik İşleme boyutları birkaç mikron ile milimetre seviyesi arasında değişen yapı, parça veya cihazların; denk boyutlarda kesici takımlar kullanılarak iş parçası üzerinden talaş kaldırılmasıyla imal edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu işleme tekniği geleneksel talaşlı imalat süreçleriyle teknik olarak benzerlik gösterse de üründe aranan geometrik özellikler oldukça farklıdır.

1. GİRİŞ

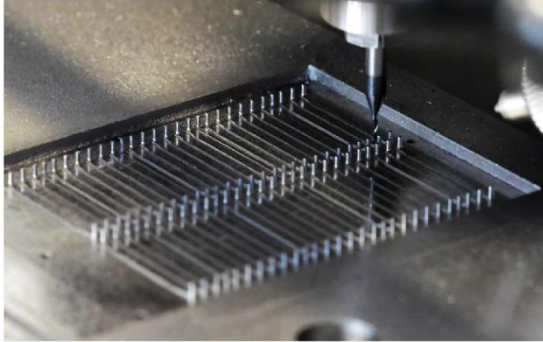
Mikro-Mekanik İşleme yöntemleri temelde; frezeleme, tornalama, delme ve taşlama olarak dört başlık altında sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde bahsi geçen yöntemlerde kullanılan takım tezgahları da geleneksel makro boyuttaki mekanik işlemede kullanılan tezgahların minyatürleştirilmiş formları olarak değerlendirilebilir. Ancak makro boyuttaki mekanik işleme ile mikro-mekanik işleme yöntemleri talaş oluşumu, kesme kuvvetleri, takım geometrisi, titreşim, süreç kararlılığı gibi konularda ciddi farklılıklar sergilemektedir (Liu et al. 2004). Mikro-mekanik işleme yöntemleri ve bu yöntemlerle işlenen ürünlere ait örnek görseller Şekil 1.6'da sunulmuştur.



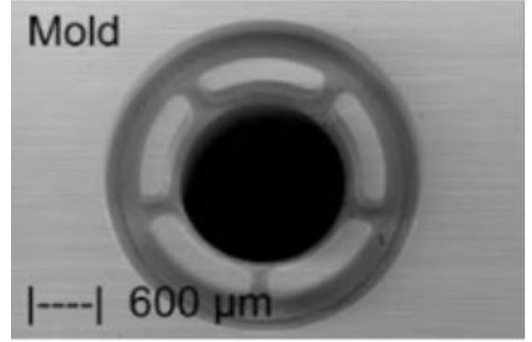
(a) Mikro Tornalama
(Senthilkumar and Subathra 2012)



(b) Mikro Tornalama
(Asad et al. 2007)

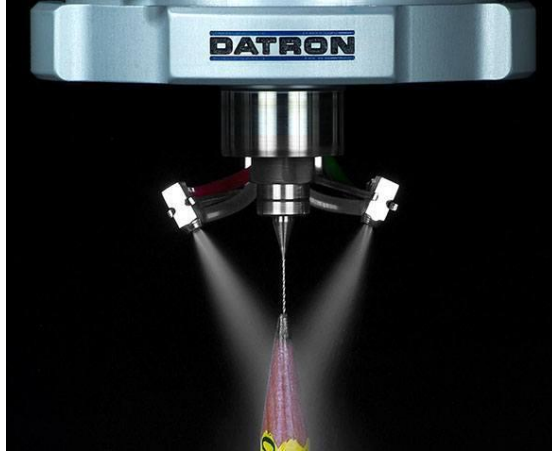


(c) Mikro Frezeleme
(Masato et al. 2017)

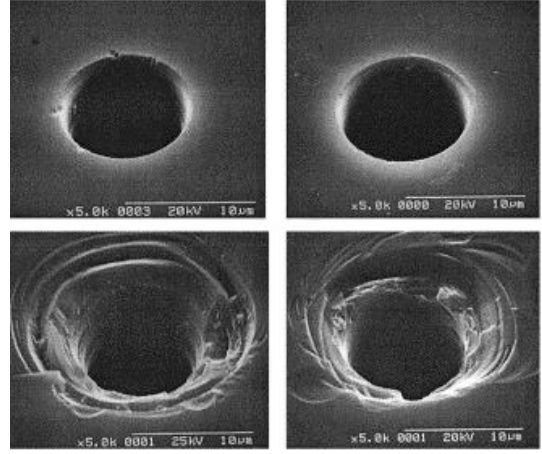


(d) Mikro Frezeleme
(Weule et al. 2001)

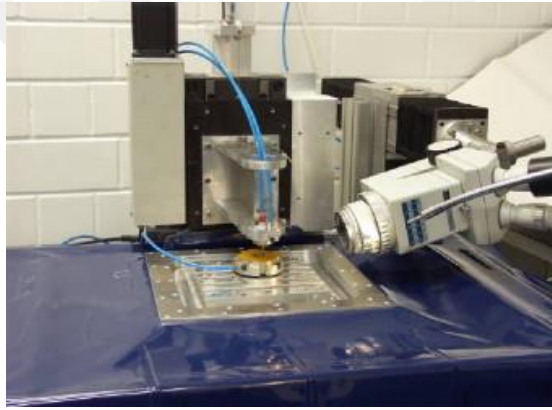
Şekil 1.6. Mikro-mekanik işleme yöntemleri ve ürünleri (Ganesh et al. 2017)



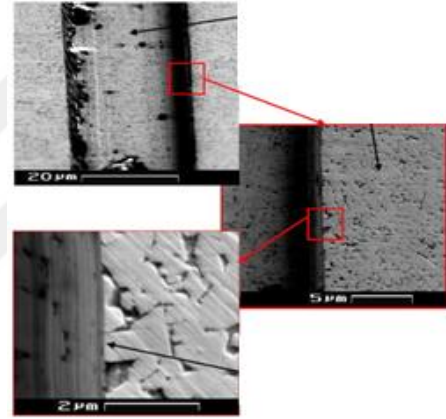
(e) Mikro Delme
(Anonymous 2021e)



(f) Mikro Delme
(Egashira and Mizutani 2002)



(g) Mikro Taşlama
(Aurich et al. 2009)



(h) Mikro Taşlama
(Aurich et al. 2009)

Şekil 1.6. (Devam)

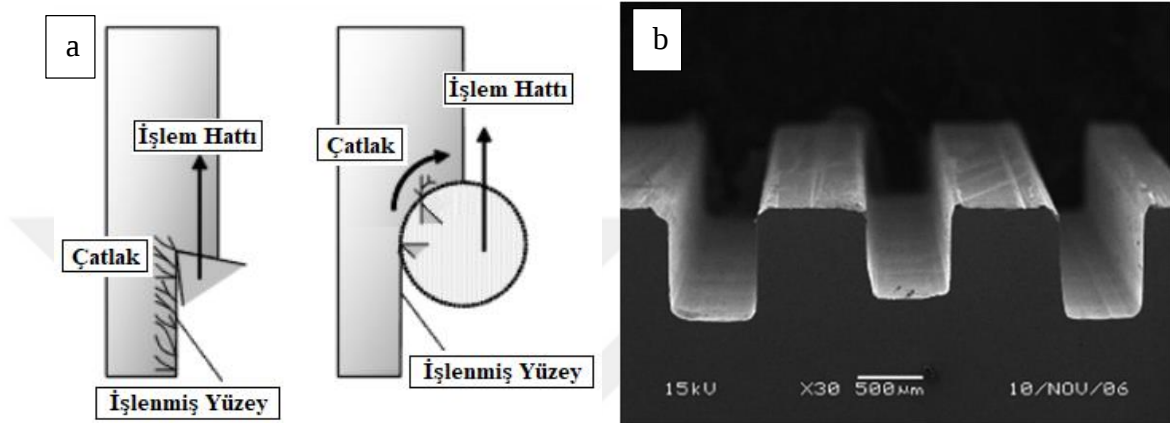
Yüksek hassasiyetli işlemenin ortaya çıkmasıyla birlikte, mikro-mekanik işleme yöntemleri, mikrokanallar oluşturmak için önemli bir alternatif olarak görülmüştür. Ayrıca bu işleme yöntemi mevcut pazar koşulları için büyük ölçüde vazgeçilmez olan seri ve toplu üretimden ziyade özelleştirilmiş bileşenlerin üretilmesi için daha uygun bir yöntemdir. Ultra hassas takım tezgahlarının yüksek düzeyde işleme hassasiyetleriyle nispeten iyi yüzey kalitesi ve form doğruluğu elde edilebilir. Mikro-mekanik işlemede yüksek işleme hızı, diğer mikro üretim teknolojilerine göre bir başka avantajdır. Ayrıca bu yöntemde çelik, alüminyum, pirinç, plastik ve polimerler gibi pek çok sertlik seviyesinde ve çok sayıda malzeme üzerinde işlem gerçekleştirilebilir. Mikro-mekanik işleme tezgahları genel olarak mikro-lazer işleme ve litografi tekniklerin aksine çok pahalı bir kurulum da gerektirmez (Sun and Cheng 2015; Prakash and Kumar 2015).

Mikro-mekanik kesme takımlarının minyatürleşmesi takım ömürlerinde azalmaya neden olmuştur ve parça toleranslarının kontrolüne zarar verici etkilere sebep olan küçük titreşimlerin ve eksenel olmayan kuvvetlerin etkinliklerinin de nispeten artmasına sebebiyet vermiştir. Bu etkiler neticesinde ortaya çıkabilecek takım kesici kenar aşınmalarını ve hatta takım kırılmalarını belirlemek oldukça güçtür. Bu sebeple kullanıcılara, tezgaha monte edilen çeşitli sensör ve görüntüleme elemanlarıyla, tezgahta oluşabilecek takım aşınmalarının ve kırılmalarının gözlemlenmesi önerilmektedir. Mikro-mekanik kesme tezgahlarında devir başına takım ilerleme hızı geleneksel tezgahlara oranla oldukça yüksektir. Bundan dolayı işleme şartlarının seçimi dikkat gerektiren bir husustur. İşleme şartları uygun seçilmediği takdirde, yine geleneksel yöntemle nazaran oldukça pahalı olan mikro-mekanik kesme takımlarda kuvvetli aşınma hatta kırılma görülmesi olasıdır. Mikro-mekanik kesme takımları için kesme kuvveti analiziyle kesme planlarının oluşturulması ve kesme şartlarının belirlenmesi, takım aşınmasının önüne geçilmesi ve planlanan yüzey dokusunun elde edilebilmesi için oldukça önemlidir. Bu amaçla 3 eksenli minyatür kuvvet algılayıcılar kullanılarak mikro kesme kuvvetleri ölçülebilmektedir (Chae and Park 2007). Minyatür takımlar üzerindeki yüksek gerilme dağılımları ve küçük titreşimlerin dahi ürün üzerinde belirgin hatalara sebebiyet vermesi dikkate alındığında mikro-mekanik kesme kuvvetlerinin doğru belirlenmesi ve takım kalitesinin geliştirilmesi önemli araştırma konuları olarak değerlendirilebilir (Emre ve Adem 2011).

Şekil 1.7 a ve b’de sırasıyla mikro-mekanik işleme sırasında oluşan çatlakların şematik gösterimi ve derinlik tutarsızlığına bir örnek sunulmuştur. Şekilde verilen b görselinde kompozit çok kesicili bir mikro-freze makinesi kullanılarak işlenen mikrokanailler gösterilmektedir. Çalışmada iş parçası olarak paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir. Mikrokanaillerde görüntülenen derinlik tutarsızlığının yanında köşelerin keskin olmadığı (kavisli) da açıkça görülmektedir. Bu durum birleştirme işlemleri sırasında boşluk oluşmasına sebebiyet vereceğinden sızdırmazlık sorunlarının da ortaya çıkmasına neden olacaktır. Ek olarak bu çalışmada üst çapak yüksekliğinin ağırlıklı olarak ilerleme ve kesme hızından etkilendiği belirtilmiştir. Üst çapak genişliği ve kesme derinliğinin de ilerleme ve kesme hızından güçlü şekilde etkilendiği vurgulanmıştır (Pan et al. 2009).

1. GİRİŞ

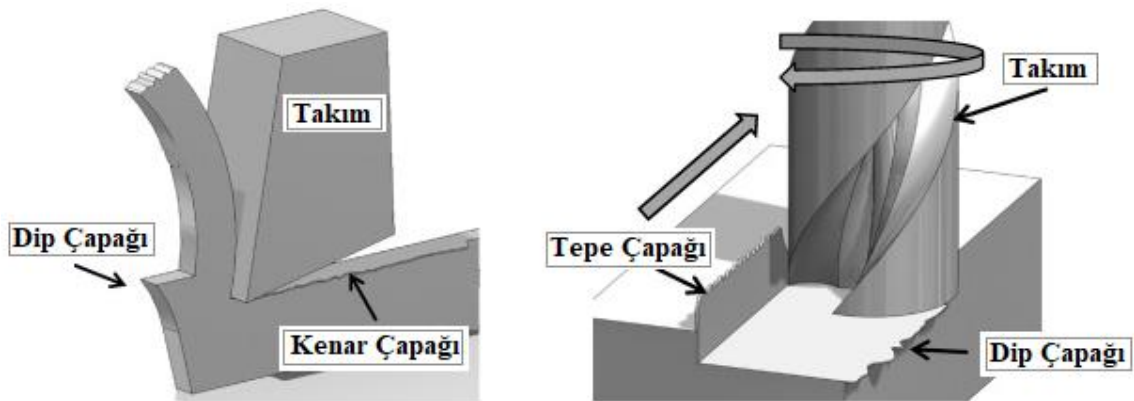
Mikro-mekanik kesme işlemleri sırasında meydana gelen bir olumsuzluk olarak çapak yapıları Şekil 1.8’de şematik olarak gösterilmiştir (Boswell et al. 2018). Mikro-mekanik kesme işlemlerinde öne çıkan olumsuzluklardan bir diğeri ise kesici takımın aşınması ve mekanik gerilme nedeniyle üründe gelişen çatlak oluşumudur (Şekil 1.7a). Ayrıca araştırmacılar nispeten uzun işlem sürelerini de bu işlem için meydana gelebilecek olumsuzluklar arasında göstermektedir (Prakash and Kumar 2015).



Matsumura et al. 2005; Hwang et al. 2019

Pan et al. 2009; Prakash and Kumar 2015

Şekil 1.7. Mikro-mekanik işleme sırasında oluşan (a) çatlakların şematik gösterimi (b) derinlik tutarsızlığı örneği.

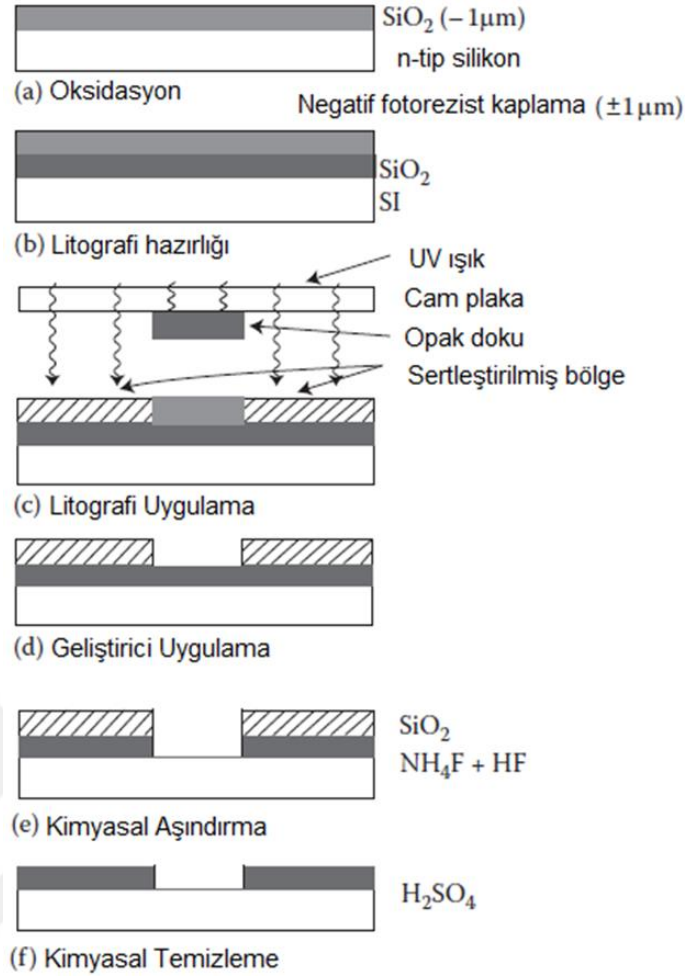


Şekil 1.8. Mikro-mekanik işleme sırasında oluşan çapak yapıları (Saptaji et al. 2012)

1.5.2. Litografi

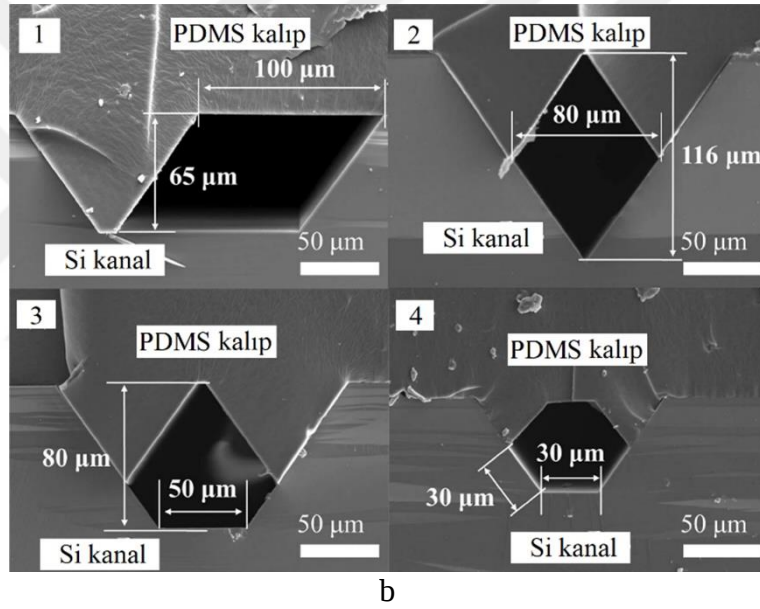
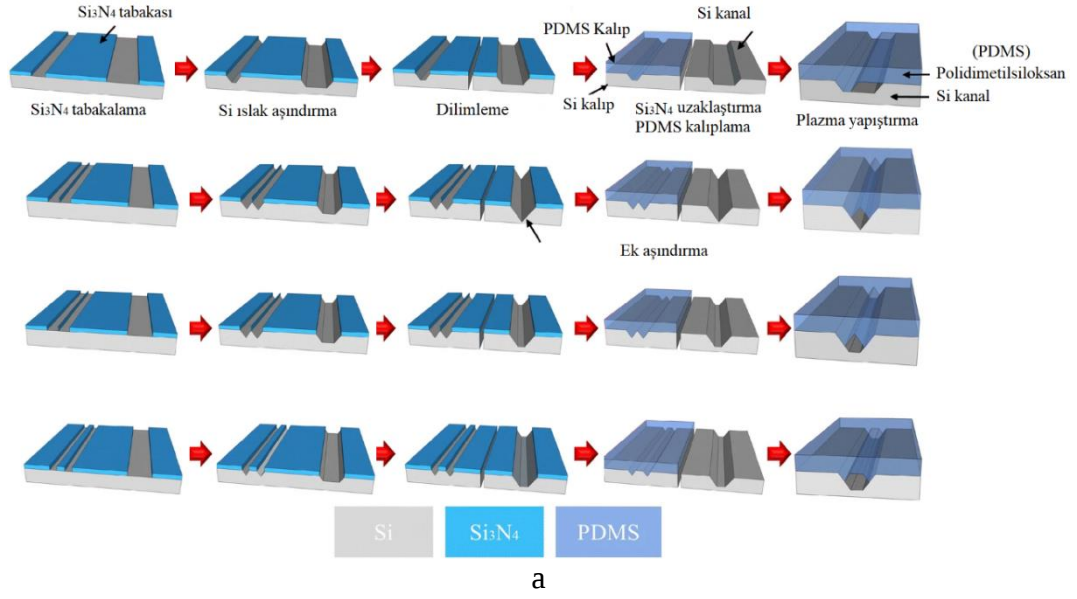
Mikrokanal üretiminde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri de Litografidir. Litografi basitçe belirlenen maske yapıları üzerindeki geometrik desenlerin fotorezist olarak adlandırılan ışığa duyarlı malzemelerle kaplanmış yarı iletken alttaşlar üzerine aktarılması işlemidir. Uygulamada çeşitli litografi metotları bulunsa da mikrokanal üretiminde en çok kullanılan alt litografi metodu Fotolitografidir. Fotolitografik üretim prosesi sırasıyla, alttaş hazırlama/temizleme, oksidasyon, fotorezist döndürmeli kaplama, ön pişirme, maske hizalama, ultraviyole ışınlarına maruz bırakma, geliştirme, son pişirme, fotorezisti çıkarma işlem adımlarından oluşur (Ateş 2020). Fotolitografi yönteminde eklemeli (biriktirme ve lift-off işlemleri) veya eksiltmeli (aşındırma işlemleri) olarak iki farklı prensip kullanılarak ve arzu edilen geometrik desen alttaş üzerine aktarılmaktadır (Luttge 2016). Temel Fotolitografi ile desen transferi için basit bir şematik gösterim Madou (2011) tarafından ortaya konulmuştur (Şekil 1.9). Ayrıca bu yönteme bir örnek olarak Lee et al. (2019) tarafından gerçekleştirilen ve farklı kesit geometrileri içeren mikrokanalların Fotolitografi, anizotropik ıslak aşındırma ve kalıplama teknikleri kullanılarak üretimini gösteren görseller Şekil 1.10'da sunulmuştur.

Stereolitografi olarak tanımlanan Litografi prosesinde ise sertleşen reaktif bir sıvı polimerin bir UV ışık kaynağı tarafından taranmasını ve çok ince bir katı tabakası oluşturulmasını içermektedir. Bu yöntemde katı kademeli olarak indirilir ve bu işlem tekrarlanarak parçanın şekli katmanlar halinde birbiri üzerine inşa edilir. Ortaya çıkan polimer yapısı, çeşitli kimyasallar ve ısıtma prosesleri kullanılarak sertleştirme işlemine tabi tutulabilir. Stereolitografinin diğer mikrokanal üretim yöntemlerine göre çok esnek geometrilerde tasarımların üretimine olanak sağladığı belirtilmektedir. Stereolitografi tekniği kullanılarak üretilen yarım daire kesitli mikrokanallarda elde edilen farklı yüzey kalitelerini içeren bir görsel örnek olarak Şekil 1.11'de verilmiştir.

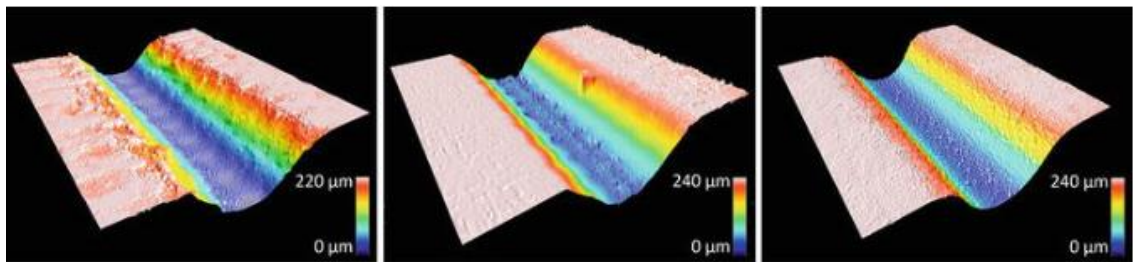


Şekil 1.9. Oksitlenmiş bir silikon levha örneği üzerinde negatif fotorezist kullanımı durumunda Fotolitografi ile desen transferi (Madou 2011).

Litografi yöntemiyle ilişkili diğer bir alt metot ise LIGA'dır (Litografi, kalıplama ve elektrokaplama için Almanca bir kısaltmadır). X-Işınları bir maske aracılığıyla iletken bir alt tabaka malzemesine bağlanmış X-ışınına duyarlı bir fotorezist malzemesi üzerine yansıtılır. X-ışını maskesi, projeksiyonun istenen son dizi tasarımının şeklini almasını sağlar. İletken alttaş ve fotorezist malzeme daha sonra bir Nikel iyonu solüsyon banyosuna daldırılır. Çözeltildeki Nikel, X-ışını ile ayarlanan istenen fotorezistli malzeme üzerine arzu edilen düzeyde elektrolizle kaplanır. Nikel yapısı daha sonra kendi başına veya diğer malzemeler için bir kalıp olarak kullanılabilir. Bu işlem birkaç kez tekrarlanabilir ve nihai ürünler daha karmaşık yapılar oluşturmak için birbirine yapıştırılabilir. İyon-ışınli Litografi ve elektron ışınli Litografinin aksine, X-ışını Litografisi vakum ve temiz oda tesislerinin varlığını gerektirmez, bu durum işlemi daha ucuz ve daha hızlı hale getirir. (Ueno et al. 2000; Ashman and Kandlikar 2006).



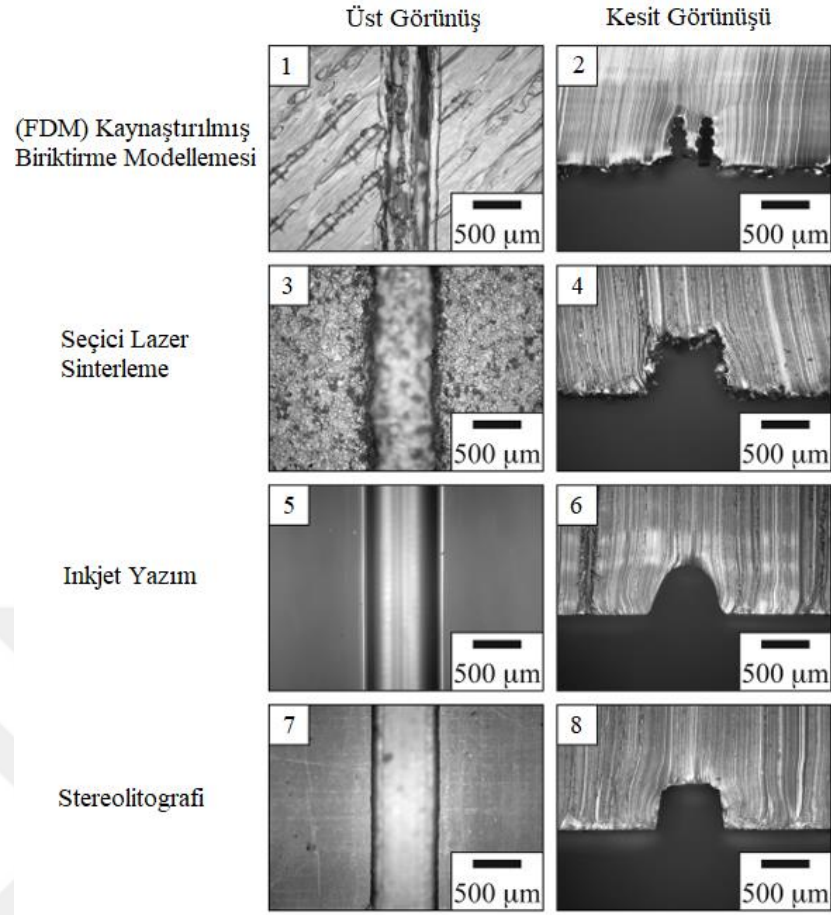
Şekil 1.10. Farklı kesit geometrilerindeki mikrokanalların Fotolitografi, ıslak aşındırma ve kalıplama teknikleriyle üretimi (a) şematik (b) mikroskop görüntüsü (Lee et al. 2019).



Şekil 1.11. Stereolitografi tekniği kullanılarak farklı parametreler ile üretilen yarım daire kesitli mikrokanalların yüzey yapısı (Carnero et al. 2022).

Mikrokanal üretim endüstrilerinde, maskeden ince filmlere desen transferi büyük ölçüde fotolitografi ile yapılır. Polimer esaslı malzemeler üzerine mikrokanallar oluşturmak için yumuşak Litografi olarak tanımlanan bir teknik geliştirilmiştir (McDonald et al. 2000). Bu yöntemde sertleştirilmiş polimer esaslı alttaş malzemeler kapalı mikrokanallar oluşturmak için bir cam yüzeye birleştirilir. Bu üretim tekniğini kullanmanın önemli bir yararı, ürünlerin uygun birleştirme teknikleri kullanılarak birbirlerine, seramik veya polimer alt tabakalara kolayca bağlanabilmesidir. Yumuşak Litografi tekniğinin bazı dezavantajları ise, kesme sırasında %1'den fazla hacimsel büzülme, alt tabaka malzemesinin yumuşaklığı, sarkma ve elde edilebilecek en boy oranını sınırlı oluşudur (Prakash and Kumar 2015).

Mikrokanal üretimi için kullanılan yöntemler daha önce bir sınıflandırma halinde verilmiş olsa da bu yöntemlerden birinin veya birkaçının birlikte kullanıldığı durumların olası olduğuna değinilmişti. Litografi bu yönüyle bakıldığında ek yöntemlerin en sık kullanıldığı yöntem olarak kabul edilebilir. İçerisinde Stereolitografi dahi dört farklı yöntem ile üretilen mikrokanalların üst ve kesit görünüşlerini içeren bir görsel Şekil 1.12.'de sunulmuştur. Burada pürüzlülük seviyelerinin oldukça farklı olduğu rahatlıkla görülebilir. Ek olarak mikrokanallar ve mikroakışlı cihazlar için bazı geleneksel olmayan üretim yöntemlerinin işlem özeti ve çözünürlüğü Çizelge 1.1'de avantaj ve dezavantajları ise Çizelge 1. 2'de sunulmuştur.



Şekil 1.12. Farklı teknikler kullanılarak üretilen mikrokanalların üst ve kesit görünüşleri (Parthiban et al. 2021).

1. GİRİŞ

Çizelge 1.1. Mikrokanallar ve mikroakışlı cihazlar için bazı geleneksel olmayan üretim yöntemleri, işlem özeti ve çözünürlüğü (Rehmani et al. 2021).

Mikroakışlı Sistemler için Üretim Tekniği	İşlem Özeti	İşlem Çözünürlüğü (µm)
Stereolitografi	Noktasal lazer tarama ve ışıkla sertleştirilebilir reçinenin kurlenmesi.	10–200 (Wang et al. 2017; Martínez-López et al. 2020; Raj and Chakraborty 2020)
Kaynaştırılmış Biriktirme Modellemesi	Isı ve ekstrüzyon kuvveti uygulanarak ekstrüde edilen termoplastik polimerin katman katman biriktirilmesi.	400–1000 (Chen et al. 2016; Pranzo et al. 2018)
Seçici Lazer Sinterleme	Seramik veya metal parçacıkların noktasal olarak lazer kaynaklı sinterlenmesi.	100-600 (Zhang et al. 2019)
Yumuşak Litografi	Elastomerik malzemelerin temas baskısı, damgalama veya ana kalıp baskısı yoluyla oluşturulması (Roger 2005).	0.05–0.5 (Kim et al. 2008)
Inkjet Yazım	Pozitif veya negatif fotorezist için maske oluşturulması ve bunun aşındırma için kullanılması veya katmanlı yapışkan yapı oluşturulması.	42–300 (He et al. 2015)
Xurografi	Bilgisayar kontrollü bir yazılım talimatlarıyla malzemenin keskin bir bıçakla kesilmesi (Gale et al. 2018).	15–250 (Neuville et al. 2017; Speller et al. 2019)

1. GİRİŞ

Çizelge 1.2. Mikrokanallar ve mikroakışlı cihazlar için bazı geleneksel olmayan üretim yöntemleri, avantajlar ve dezavantajlar (Rehmani et al. 2021).

Mikroakışlı Sistemler için Üretim Tekniği	Avantajlar	Dezavantajlar
Stereolitografi	Yüksek çözünürlük, düşük pürüzlülük.	Ekipmanın yüksek maliyeti, ışıkla sertleştirilebilir ham maddenin pahalı oluşu, karmaşık baskı parametreleri ve tutarlı baskı için donanım kalibrasyonu.
Kaynaştırılmış Biriktirme Modellemesi	Düşük ürün ve donanım maliyeti, karmaşık ürün geometrileri için uygun.	Sınırlı baskı çözünürlüğü ve malzeme yüksek sıcaklık uygulamalarına uyumsuz ürün.
Seçici Lazer Sinterleme	Yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık uygulamalarına özel ürünlerin üretimi.	Ekipmanın yüksek maliyeti. Sinterleme nedeniyle yüksek yüzey pürüzlülüğü ve iç mikro kanallarda kirlilik.
Yumuşak Litografi	Yüksek çözünürlük (Raj and Chakraborty 2020).	Karmaşık geometrilerde kullanım güçlükleri, düşük kimyasal direnç ve bazı sızdırmazlık problemleri (Mukhopadhyay 2007).
Inkjet Yazım	Düşük maliyetli, yüksek hızlı, kişiselleştirilebilir ve çok malzemeli ürünlerin üretilebilir (Rengier et al. 2010).	Düşük mukavemetli ürünler, dahili mikrokanalların üretimi için uzun işlem prosedürü.
Xurografi	Düşük donanım maliyeti, yüksek işlem hızı.	Karmaşık 3B mikrokanalların üretilmesi son derece zordur.

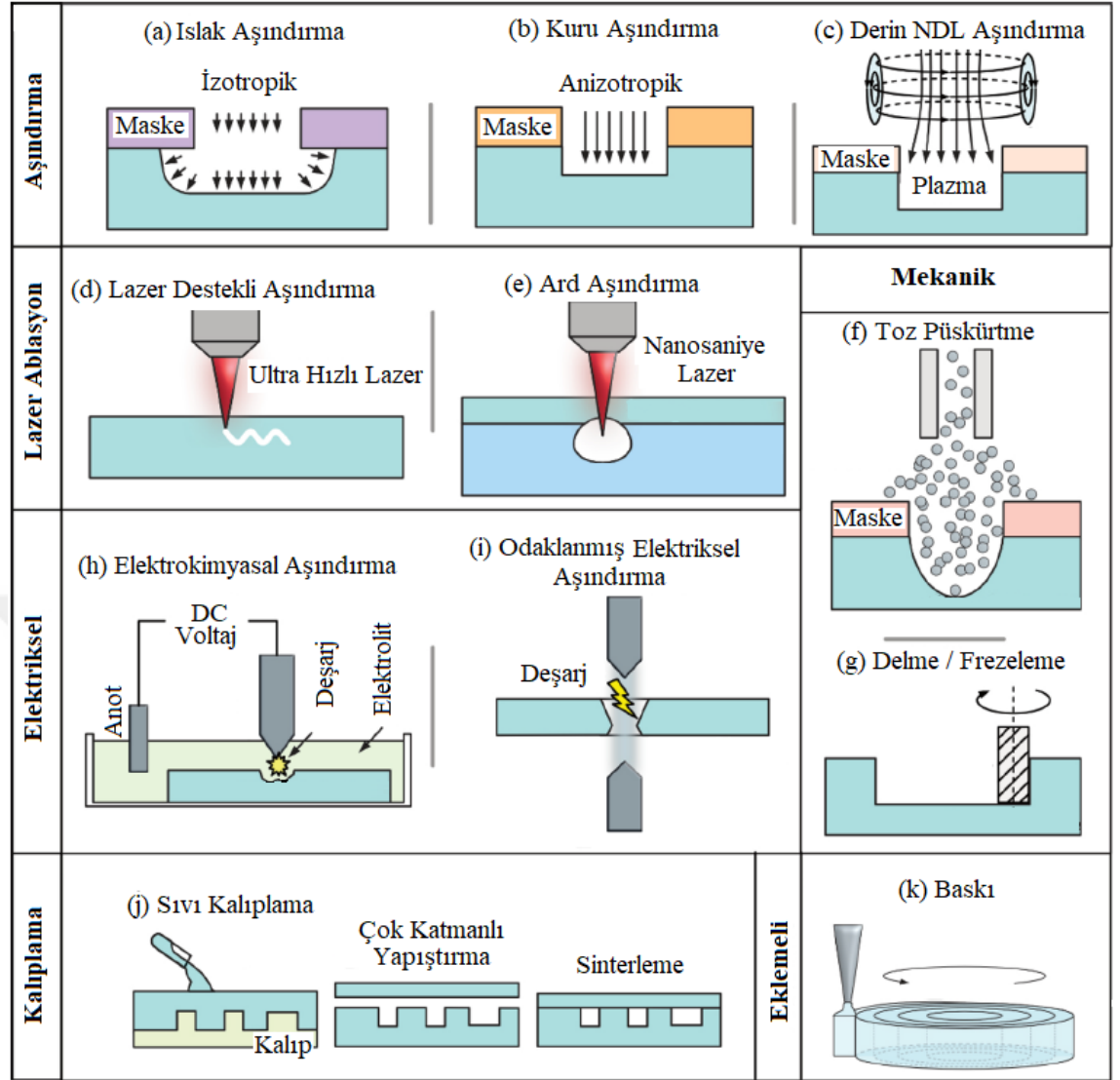
1.5.3. Islak ve kuru aşındırma

Aşındırma yöntemi, mikrokanaalların oluşturulması için sıklıkla kullanılan malzeme eksiltme odaklı bir üretim tekniğidir. Bu teknikte genellikle koruyucu bir maske tabakasıyla tanımlanan bir desen oluşturulur. Aşındırma işlemlerinde oluşturulan desen yardımıyla taban malzemesi üzerinden kimyasal/fiziksel olarak malzeme çıkarılarak desen aktarımı sağlanır. Aşındırma yöntemleri sıklıkla kullanılan reaktifin fazına göre sınıflandırılır. Sıvı fazı ve plazma/buhar-gaz fazı en yaygın iki aşındırma reaktifidir. Aşındırma proseslerinde diğer önemli terimler ise izotropi ve anizotropidir. İzotropik aşındırmada oluşan aşındırma izi veya bölgesi yönden bağımsızdır ve tüm yönlerde büyük oranda denktir. Anizotropik aşındırmada ise malzeme ağırlıklı olarak belirli bir yönde aşındırılmaktadır. Bu konudaki bir diğer önemli husus ise seçiciliktir. Seçicilik kullanılan malzeme ve maske arasındaki aşınma oranı farkı olarak tanımlanabilir. Plazma aşındırmada seçiciliğin sağlanması oldukça güçtür fakat anizotropi nedeniyle aşınma yönü kontrol edilebilir. Sıvı ve gaz kimyasallarla gerçekleştirilen aşındırma proseslerinde ise büyük oranda seçicilik sağlanabilir. Fakat bu işlemler sırasında ise izotropi nedeniyle aşındırma yönünün kontrolü pek mümkün değildir (Prakash and Kumar 2015).

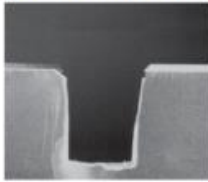
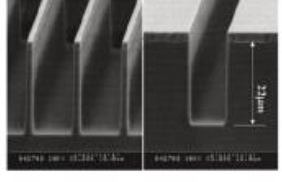
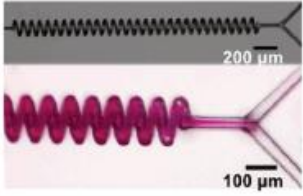
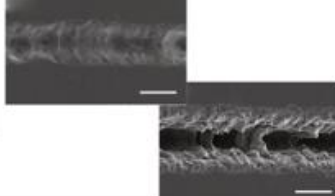
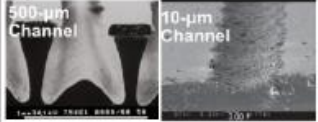
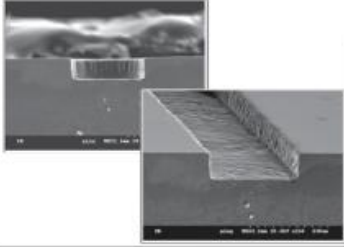
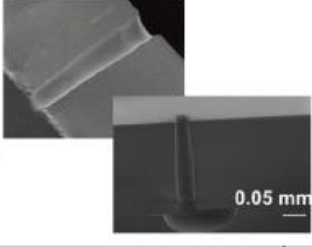
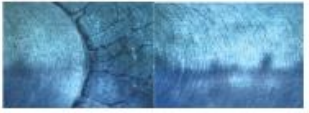
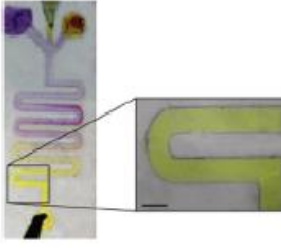
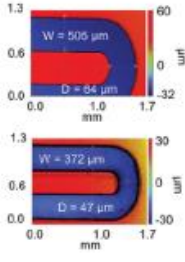
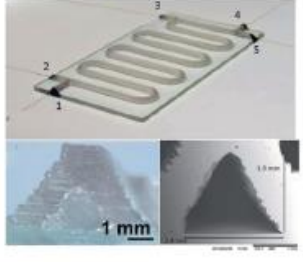
Kuru aşındırma işleminde yüzey buhar veya gaz fazındaki kimyasal aşındırıcılar kullanılarak kimyasal olarak veya kimyasal aşındırmanın yanında plazma ortamında sağlanan iyon bombardımanı kullanılarak bileşke fiziksel ve kimyasal olarak aşındırılır. Kuru aşındırma işlemlerinde kimyasal ve fiziksel aşındırma bileşenleri kontrol edilerek anizotropi sağlanabilir. En sık kullanılan özelleşmiş kuru aşındırma tekniği reaktif iyon aşındırma (RIE) tekniğidir. Reaktif iyon aşındırma büyük oranda düzgün aşındırma profilleri, yüksek aşındırma hızı, ortalama üstü seçicilik, tekdüzelik ve tekrarlanabilirlik gibi pek çok avantaja sahiptir. Bu yöntemde hem anizotropik hem de izotropik aşındırma profilleri elde etmek mümkündür. RIE yönteminde malzeme çeşitli gazlarla dolu bir reaktörün içine yerleştirilir. Bu gaz karışımından bir plazma oluşturulur ve oluşan iyonlar malzemenin yüzeyine doğru itilir. İyonlar burada reaksiyona girerek yeni gaz malzemesi oluştururlar ve aşındırmayı gerçekleştirirler.

Islak aşındırma, bir malzemenin sıvı kimyasal bir aşındırıcı banyosuna daldırılması yoluyla eksiltilmesi olarak tanımlanır. En temel aşındırma işlemi olarak değerlendirilir ve aşınma kimyasal yolla gerçekleşir. Islak aşındırma seçiciliği nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde elde edilen aşınma izleri büyük oranda izotropiktir. Bu durum derin kanalların oluşturulması konusunda işlemin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Aşındırıcıların maskeleme malzemesi altındaki tabakaya ulaştığı ve geometrik kararsızlıklar oluşturduğu örnekler görmek mümkündür. Buna karşın ıslak kimyasal aşındırma, kimyasallarla iyi reaksiyona giren metalik yüzeyler için oldukça elverişlidir (Madou 2011).

Islak ve kuru aşındırma işlemlerinin kıyaslama özeti devam eden bölümdeki gibi yapılabilir. Öncelikle ıslak aşındırma sıvı bazlı bir aşındırma işlemi iken kuru aşındırma plazma bazlıdır. Kullanılan kimyasallar ıslak aşındırmada sıvı fazında iken kuru aşındırmada ise kimyasal fazı gazdır. Islak aşındırma işlemlerinde yüksek aşındırma oranı ve hızı sonuç işlemi öne çıkaran avantajlardır. Bu işlemde basit yüzey uygulamaları ile seçicilik oluşturulabilir ve işlem için pahalı ekipmanlar gerekmez. Buna karşın aşındırma sonrası oluşan atık kimyasalları bertaraf etmek ciddi bir maliyettir ve dikkat gerektirir. Islak aşındırma işlemi boyunca aşındırıcıda biriken kimyasal yük giderek arttığı için aşınma hızı düşebilir. Bu nedenle aşındırıcı kimyasalın belirli periyotlarda yenilenmesi gerekmektedir. Bu durum ek bir işlem maliyet oluşturmaktadır. Kuru aşındırmada ise işlem pek çok yönüyle ıslak aşındırmaya göre güvenli ve kontrollüdür. Kuru aşındırma işlemlerinde elde edilen hassasiyet ıslak aşındırmaya göre belirgin şekilde üstündür. Islak aşındırma ile karşılaştırıldığında, kuru aşındırma işleminde kimyasal imha maliyeti daha düşüktür ve yan ürünlerin bertaraf edilmesi daha kolaydır. Fakat kuru aşındırma temiz oda tesisi gibi büyük bir kurulum maliyeti gerektirmektedir. (Dry Etching vs Wet Etching: Everything You Need To Know - Anonymous 2021f). Şekil 1.13’de Tang et al. (2021) tarafından oluşturulan ve mikrokanal üretim yöntemleriyle ilgili şematik çizimlerin yer aldığı faydalı bir görsel sunulmuştur. Bu görselde farklı aşındırma işlemlerinin yanında sıklıkla kullanılan diğer mikrokanal üretim yöntemleri de verilmektedir. Ayrıca Şekil 1.14’de ise bir önceki şekilde verilen işlemler neticesinde elde edilen ürünlerin örnekleri yer almaktadır (Tang et al. 2021).



Şekil 1.13. Bazı aşındırmanın işlemleri ve sıklıkla kullanılan mikrokanal üretim yöntemlerinin şematik görselleri (Tang et al. 2021).

Aşındırma	(a) Yaş Aşındırma 	(b) Kuru Aşındırma 	(c) Derin NLD aşındırma 
	(d) Lazer Destekli Aşındırma 	(e) Ard Aşındırma 	Mekanik (f) Toz Püskürtme 
Elektriksel	(h) Elektrokimyasal Aşındırma 	(i) Odaklanmış Elektriksel Aşındırma 	(g) Delme / Frezeleme 
	(j) Sıvı Kalıplama 		Ekleme (k) Baskı 

Şekil 1.14. Üretim yöntemlerine göre mikrokanal örnekleri (a) Koutny et al. (1996), (b) Ichiki et al. (2003), (c) Uchida and Hamaguchi (2008), (d) He et al. (2012), (e) Long et al. (2019), (f) Melentiev and Fang (2018), (g) Nurul Amin et al. (2016), h Zheng et al. (2007), (i) Yalikun and Tanaka (2016), (j) Kotz et al. (2016) ve (k) Gal-Or et al. (2019).

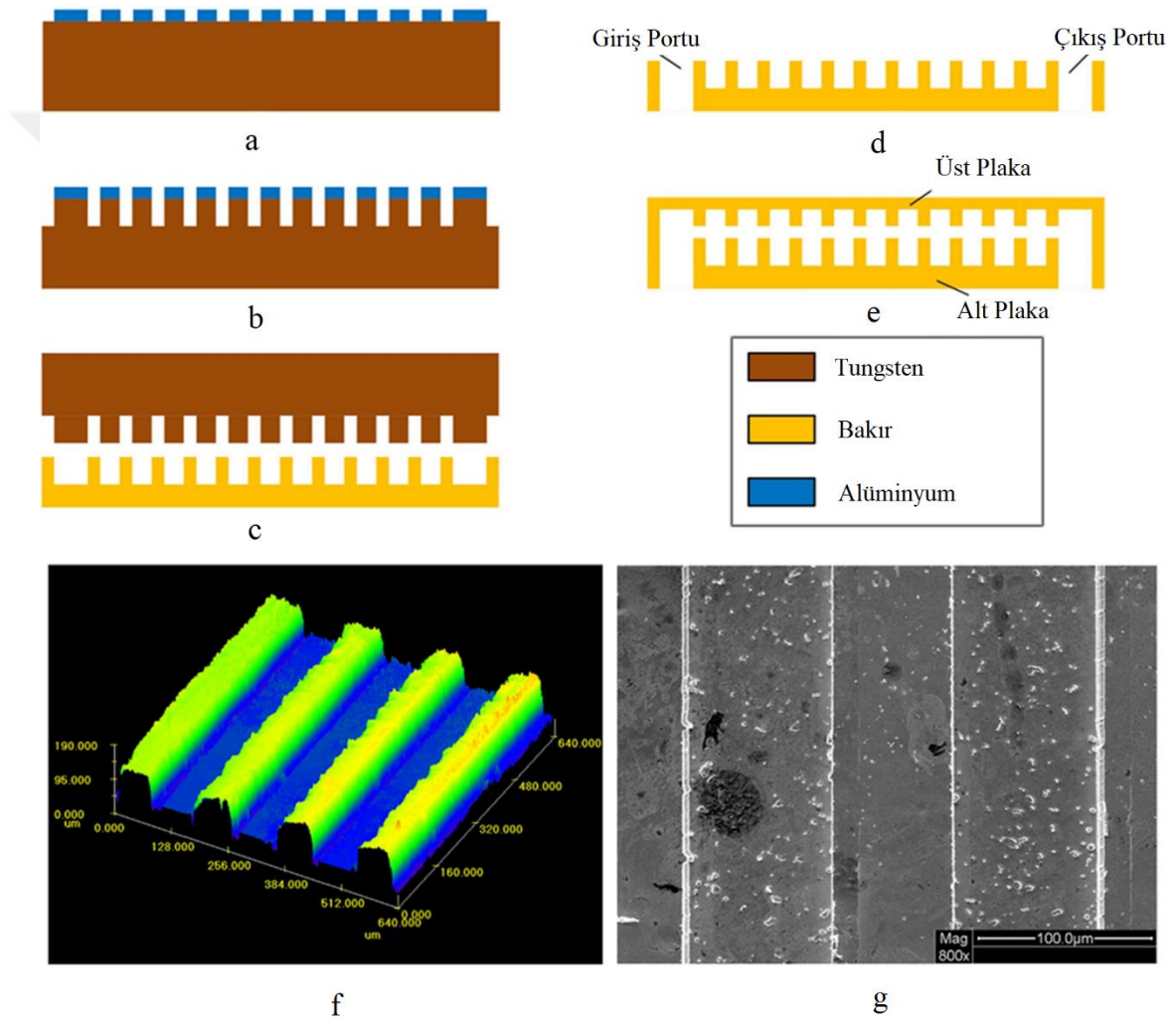
1.5.4. Baskı ve kabartma

Baskı ve Kabartma (ayrıca sıcak kabartma olarak bilinmektedir) yönteminde öncelikle taban malzeme belirli bir sıcaklığın üzerine ısıtılır. Sonra bir kalıp veya master daha taban malzeme üzerine bastırılarak desen aktarımı sağlanır. Kalıp ve taban malzeme arasında belirli bir süre temas sağlandıktan sonra, sistem soğutulur. Ardından kalıp ve taban malzeme ayrılır. Sıcak kabartma işlemi döngüsel şekilde birkaç pasoda veya sürekli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Benzer yöntemlerle karşılaştırıldığında, kurulum maliyeti nispeten düşüktür. Ayrıca işlem oldukça basittir ve elde edilen ürünler yüksek doğrulukta tekrarlanabilirlik göstermektedir. Bu yöntemin ilk uygulamalarından biri 1990'larda Forschungszentrum Karlsruhe'nin Mikroyapı Teknolojisi Enstitüsü'nde yürütülen LIGA yönteminin ikincil bir işlemi olarak gerçekleştirilmiştir. Kabartma yükü, sıcaklık ve kabartma süresi, mikrokanal genişliği ve derinliğinin hassasiyetini önemli ölçüde etkiler. Baskı oda sıcaklığında ve çok yüksek mekanik basınçta veya tam tersi yani yüksek sıcaklık ve düşük mekanik basınçta da gerçekleştirilebilir. Çok yüksek basınçta baskı yapmak, imalat süresini önemli ölçüde azaltır ve ayrıca alt tabaka malzemesinin ömrünü uzatır. Bununla birlikte, çok yüksek basınçta baskı yapıldığında, mikrokanal özellikleri basınç, temas süresi ve oda sıcaklığı gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilenir (Madou 2011; Lin et al. 2013).

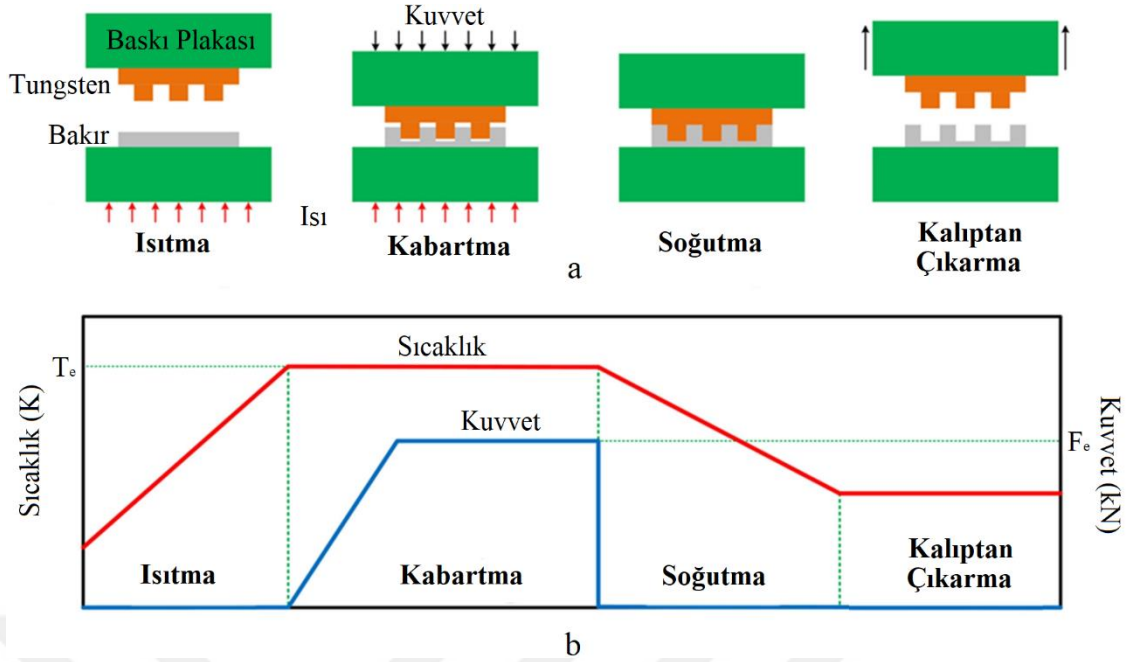
Tek taraflı bir sıcak kabartma çevrimi en temel baskı ve kabartma işlemi olarak değerlendirilebilir. Bu çevrimde mikrokanal malzemesi mikro yapılı kalıp ile alt baskı plakasının pürüzlü yüzeyi arasında konumlandırılır. Mikrokanal malzemesi ve alt plakasının, vakum altında kalıplama sıcaklığına ısıtılır. Sabit bir kalıplama sıcaklığına ulaşıldığında, kalıplama döngüsünün iki adımı başlatılır. İlk adımda kalıp ve alt tabaka, önceden ayarlanmış maksimum kabartma kuvveti elde edilene kadar birbirine doğru hareket ettirilir. İkinci adımda ise belirlenen kabartma kuvveti, tanımlanmış bir süre boyunca sabit bir değerde tutulur. Sabit bir kuvvet oluşturmak için kalıp ve alt tabaka arasındaki göreceli hareket kontrol edilmelidir. İkinci işlem adımı boyunca sıcaklık sabit bir değerde tutulmalıdır. Vakum altında gerçekleştirilen bu izotermal kabartma işlemi taban malzemede oluşabilecek boşlukların bertaraf edilmesi için oldukça önemlidir. Devamında kalıplanan ürün soğumaya alınır. Ürün kalıptan çıkarma sıcaklığına ulaşıldığında kalıplanmış parça, kalıp ile alt tabaka arasında bir nispi hareketle

1. GİRİŞ

oluşturularak ayrılır. Kalıptan çıkarma, kalıplanmış parçanın alt tabaka plakasına kalıba oranla daha fazla yapışması ile bağlantılı olarak çalışır. Kalıptan çıkarma sıcak kabartmanın en kritik işlem adımıdır ve ürünlerin kalıptan çıkarılmasına özen gösterilmelidir (Worgull 2015). Bir örnek olarak Li and Chen (2019) tarafından gerçekleştirilen bir bakır mikrokanallı ısı alıcısının sıcak kabartma işleminin de dahil olduğu üretim süreci ve kanal görüntüleri de Şekil 1.15’de sunulmuştur. Ayrıca tek taraflı sıcak kabartma işleminin anlatıldığı ve işlem sırasında sıcaklık ve kuvvet değişimlerinin sunulduğu şematik bir görsel Şekil 1.16’da verilmiştir.



Şekil 1.15. Mikrokanallı bakır ısı alıcısı üretim süreci (a) Alüminyum ince film kaplama (b) Tungsten kuru aşındırma (c) Bakır sıcak kabartma (d) giriş ve çıkış portlarının mekanik işlenmesi (e) alt ve üst plakaların birleştirilmesi (f) mikrokanalların tarama mikroskobu görüntüsü (g) mikrokanalların SEM görüntüsü (Li and Chen 2019).



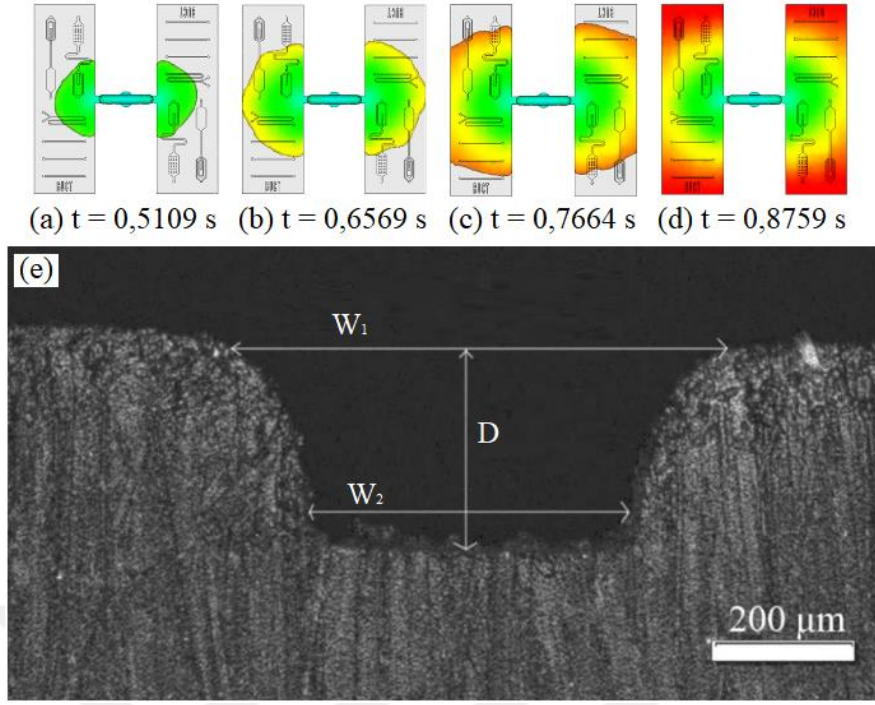
Şekil 1.16. Tek taraflı sıcak kabartma işlemi (a) şematik görünüm (b) kalıplama sıcaklığı ve kuvvetinin değişimi (Li and Chen 2019).

1.5.5. Mikro-enjeksiyon kalıplama

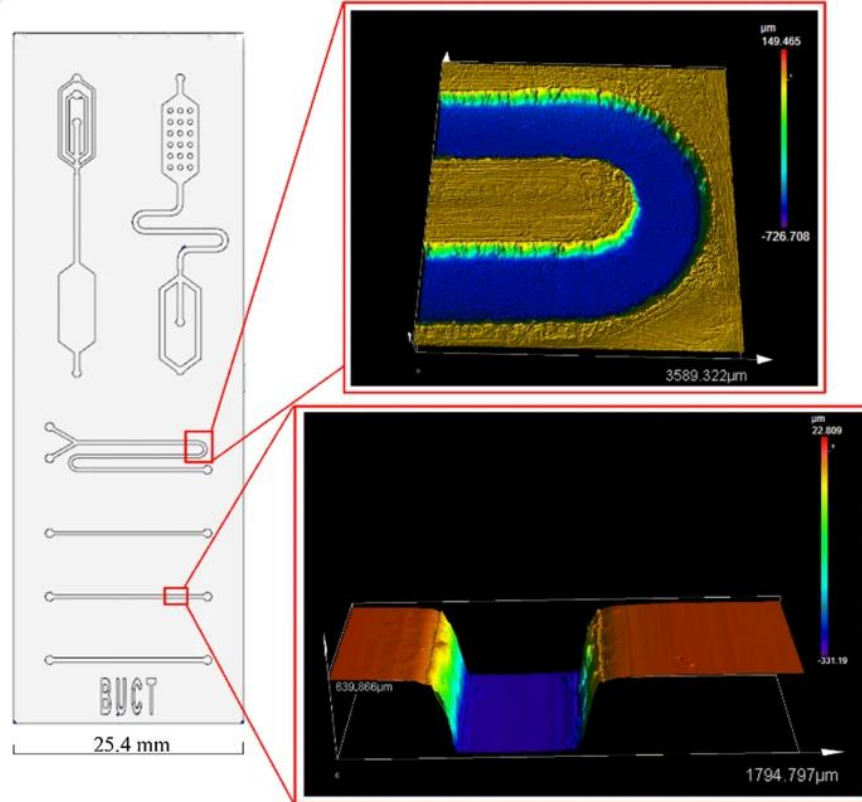
Mikro-enjeksiyon kalıplama karmaşık mikrokanallar ve mikro parçaların seri üretimi için en çok tercih edilen işlemlerin başında gelmektedir. Bu işlem temel olarak kullanılacak malzemenin bir hazneye yerleştirilmesi ve enjeksiyon sıcaklığına ısıtılmasıyla başlatılır. Daha sonra malzeme kalıp boşluğuna enjekte edilir ve işlemin sonunda soğumaya bırakılarak kalıptan çıkartılır. Birçok avantaja rağmen, mikro-enjeksiyon kalıplama uygulamalarında, mikro yapıların kalıplanması sırasında bazı doğal sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önde geleni küçük hacimlere enjekte edilen malzemenin, nispeten soğuk kalıp duvarına teması sırasında gözlenen ani katılaşmalardır. Yüksek en-boy oranlarına sahip mikrokanallar kalıplandığında sorun daha da belirgin bir hal alabilir. Bu problemlerin bertaraf edilmesi için mikro doldurma davranışlarını tahmin etmeye yönelik bilgisayar simülasyonları geliştirilmektedir. Mikro-enjeksiyon kalıplama uygulamalarında başarılı bir kalıplama için ilk adım kalıp içerisindeki havalın doğru tahliye edilmesi ve kalıbın mükemmel şekilde doldurulmasıdır. Bu kalıplama uygulamalarında birkaç saniye seviyesinde imalat süreleri elde edilebilse de bazı malzeme grupları için yetersiz soğutma termal gerilme kusurlarının oluşmasına neden olabilir.

Enjeksiyon kalıplamanın önemli avantajlarından biri de otomasyona uygun süreçler tasarlanabilmesi ve tek bir adımda karmaşık geometrilerin oluşturulabilmesidir. Bu yöntemde kalıplanmış mikro parçaların üretim maliyetleri, tasarımın karmaşıklığından çok az etkilenmektedir. Uygun şartlar altında kalıplanmış parçalarda tipik olarak iyi boyutsal toleranslar elde edilebilmektedir ve bitirme veya montaj gibi art işlemlere neredeyse hiç ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca kalıplanmış mikro parçaların üretim maliyetleri, tasarımın karmaşıklığından çok az etkilenmektedir. Belirli bir kalıp geliştirildikten sonra sistemlerin seri üretime yatkınlığı neticesinde çok sayıda parça kalıplanabilir. Mikro-enjeksiyon kalıplama yönteminin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı ise ek akış elemanlarının işlem sırasında birbirlerine entegre edilebilmesidir. Ek olarak bu yöntemin en büyük dezavantajlarından biri olarak nispeten yüksek kalıp maliyetleri gösterilmektedir (Wu and Wu 2007; Wu et al. 2013).

Enjeksiyon kalıplama işleminde mikrokanaalların geometrik özelliklerini etkileyen başlıca parametreler kalıp sıcaklığı ve serbest gevşeme miktarıdır. Kullanılan malzeme türlerine göre işlem süresinin, işlem sıcaklığının ve gevşeme miktarının uygun şekilde belirlenmesi ve hatta optimize edilmesi gerekmektedir. Mikro-enjeksiyon kalıplamada görülen bir diğer olumsuz durum ise karmaşık parçaların imalatında kaynak hatlarının oluşmasıdır. Bu kaynak hatları nedeniyle oluşan kısmi süreksizlikler parçanın mukavemetini de bir miktar düşürmektedir. Fakat bunun yanında bu işlem oldukça geniş bir malzeme grubuna hitap etmektedir. Termoplastik, termosetler gibi polimer malzemeler, polimerlerle birlikte fiber katkıları, seramikler ve hatta toz metal malzemeler gibi geniş malzeme gruplarıyla üretim yapılabilir. Çeşitli mikrokanal üretim süreçleri arasında mikro-enjeksiyon kalıplama geleneksel plastik teknolojisi, standartlaştırılmış süreç adımları, yüksek düzeyde otomasyon kullanımına yatkınlık ve kısa işlem süreleriyle önemli bir tercih avantajına sahiptir. Fakat bu işlemde kullanılacak mikro kalıpları üretmek için çoğunlukla diğer mikro işleme teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Tosello 2015; Chiou 2015). Önceki bölümde bahsi geçen kalıplama simülasyonlarıyla ilgili bir çalışma Ma et al. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üretilen mikrokanaalların geometrik özellikleri simülasyon verileri kullanılarak kontrol edilmiştir. Kalıp dolum simülasyonu ve üretilen mikrokanaallarla ilgili görseller Şekil 1.17 ve Şekil 1.18’de sunulmaktadır.



Şekil 1.17. Enjeksiyon kalıplama işlemi için kalıp dolma simülasyonu ve mikrokanal kesit görseli (a), (b), (c) ve (d) farklı zaman aralıklarında ve (e) SEM görüntüsü (Ma et al. 2020).



Şekil 1.18. Enjeksiyon kalıplamayla üretilen mikrokanaalların lazer mikroskobu görüntüleri (Ma et al. 2020).

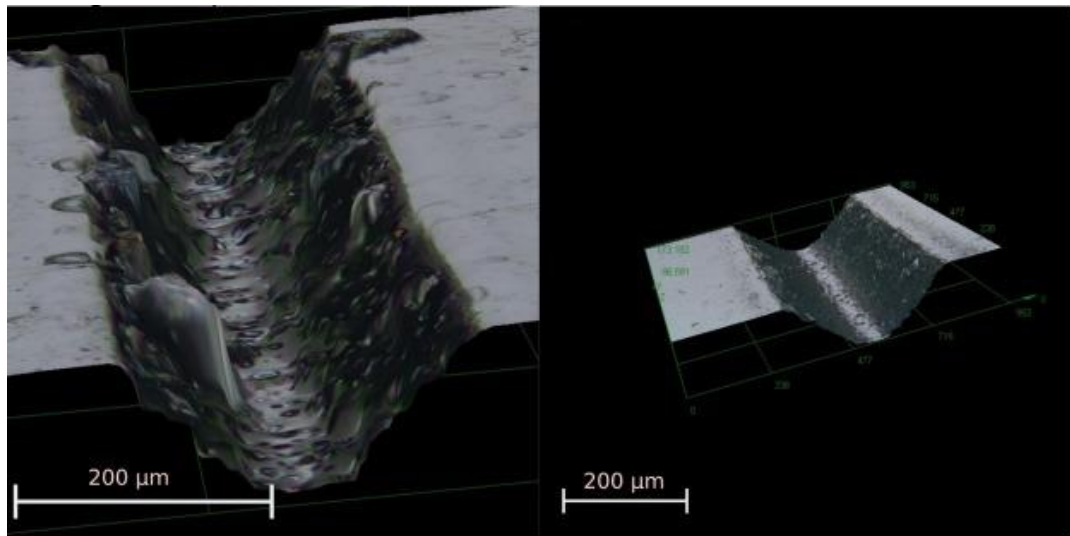
1.5.6. Mikro-lazer işleme

Mikro-lazer işleme, işlem sadeliği yönüyle ve hemen hemen her türlü geometriyi işleyebilme yetenekleriyle öne çıkmaktadır. Bunun yanında bu yöntem çok yönlü bir uygulama olarak nitelendirilmekte ve hemen hemen her türlü malzeme gurubu üzerinde kullanılabilir. Neredeyse tüm mikro-lazer işleme uygulamalarında malzeme kaldırma işlemi ısıya bağlı gerçekleşmektedir. Bu yöntem bahsi geçen diğer mikro işleme yöntemlerine nazaran yeni gelişmekte olan bir teknoloji olarak ele alınmalıdır. Lazer üretim süreçlerinin çoğu yalnızca bir veya en fazla iki adım içermektedir. Mikro-lazer işleme yönteminde aşındırma ve litografi yöntemlerindeki gibi maske uygulamalarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca temiz oda tesisi veya kalıp üretimi gibi ek maliyetler de söz konusu değildir. Çevre açısından nispeten temiz olan bu yöntemde atık ve hurda oluşumu minimum seviyede gerçekleşmektedir. Aynı zamanda mikro-lazer işleme yönteminde mikro yapıları oluşturmak için delme, oyma, kazıma, birleştirme ve yüzey modifikasyonu gibi geniş bir operasyon yelpazesi bulunmaktadır. Uygulamada yüzeye çarpan lazer ışınlarındaki fotonların enerjisi, lazerin dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. Kısa dalga boylu lazerin fotonları daha yüksek miktarda enerji içerirken, yüksek dalga boylu lazerlerin fotonları daha düşük miktarda enerji içermektedir. Kısa dalga boylu lazer ışınlarının yüksek dalga boylu olanlardan daha fazla kullanılmasının nedenlerinden biri de budur. Mikro-lazer işleme yöntemi yaygın olarak kullanılan lazer teknolojilerine göre dört başlık altında toplanabilir. Bu başlıklar ultraviyole, kızılötesi, kısa atımlı lazer ve şartlandırılmış lazer uygulamalarıdır. Devam eden bölümde bu başlıklara kısaca değinilmiştir (Prakash and Kumar 2015).

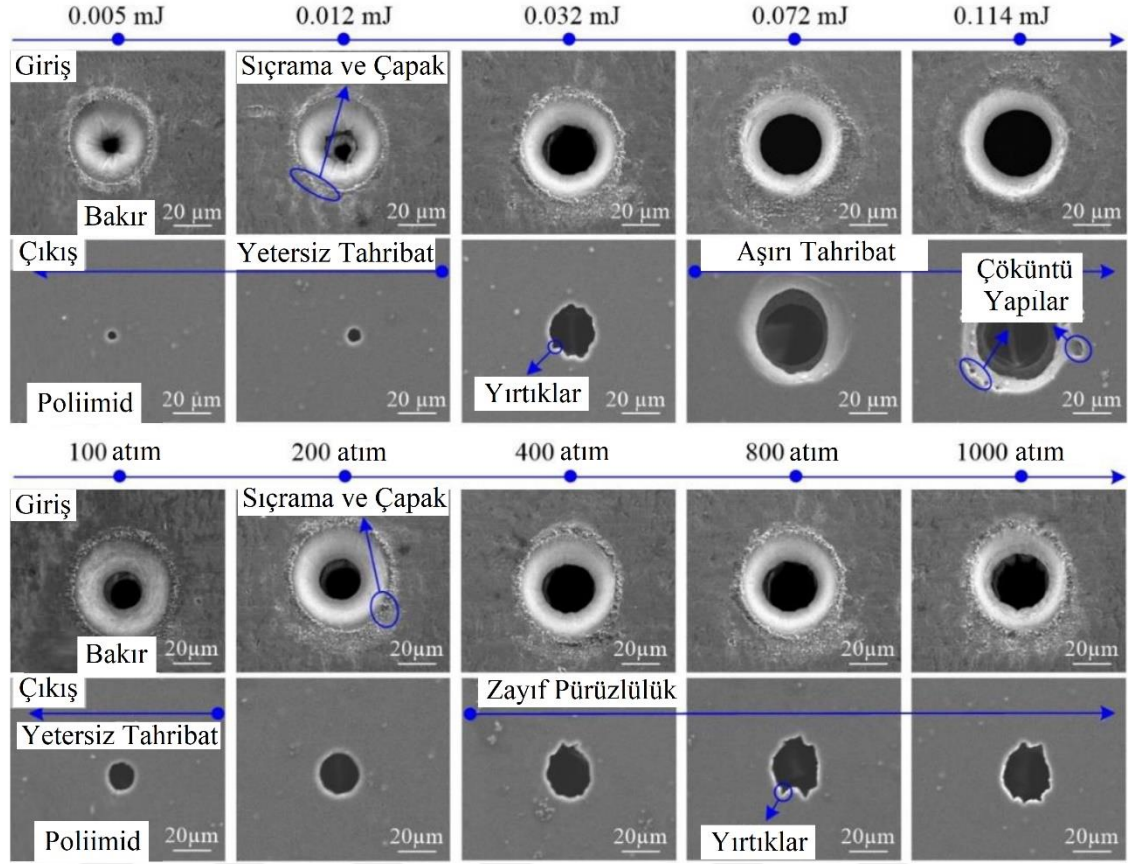
Ultraviyole lazer uygulamalarında kullanılan lazerlerin fotonları oldukça yüksek seviyede enerji taşımaktadır. Fakat çoğu ultraviyole lazer uygulamasında ısı tesiri altında kalan bölge, çapaklar ve kesilen malzeme birikimi gibi istenmeyen durumlar diğer mikro-lazer yöntemlerine nazaran daha azdır. Bu uygulamalarında yüksek oranda tahribat sağlanmasına karşın oldukça düşük ısı tesiri altında kana bölgeler elde edilmektedir. Lazer parametrelerinin kanal derinliği ve yüzey pürüzlülüklerine etkisinin incelendiği değerli bir çalışma Heng et al. (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada arzu edilen geometrik parametrelerin yakalanabilmesi için üretim parametrelerinin optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

1. GİRİŞ

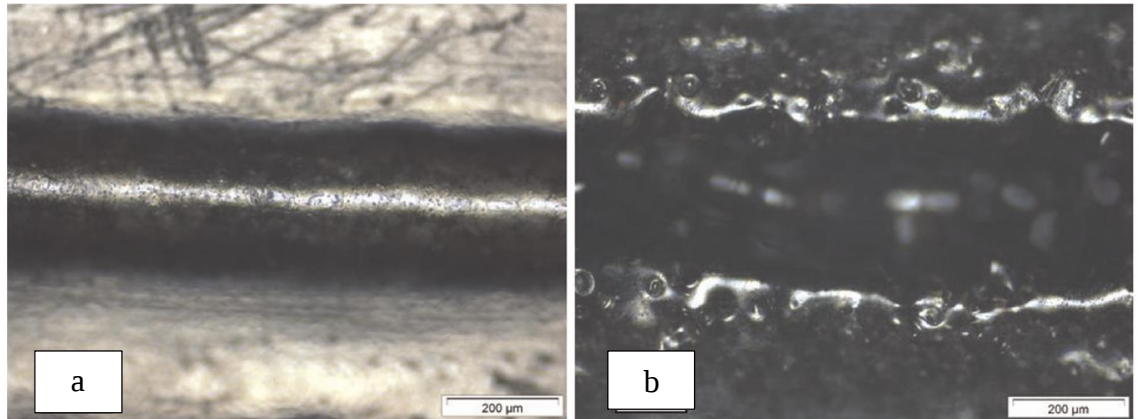
Farklı olarak kızılötesi lazer kullanılan mikro-lazer işleme uygulamalarında nispeten geniş sayılabilecek dalga boyu skalasında cihazlar kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda sıklıkla geometrik tutarsızlıklardan, yüksek yüzey pürüzlülüklerinden ve düşük en boy oranlarından bahsedilmektedir. Belirgin seviyede yüzey bozukluklarının görülebileceği bir kızıl ötesi lazer uygulama ürünü görsel şekil 1.19’da sunulmuştur (Prakash and Kumar 2021). Kısa atımlı lazer uygulamaları ise kullanılan sistemlerin doğası gereği gözlenen bazı avantajlara sahiptir. Bu uygulamalarda atım süresinin küçültülmesiyle lazer cihazlarında yüksek tepe gücüne ulaşılabilir. Bu durum tahribat mekaniğini önemli ölçüde değiştirmektedir. Neticede tekrarlanabilirlik ve yüzey kalitesi bakımından kısa atımlı lazer uygulamaları daha tercih edilebilir sistemler olarak değerlendirilmektedir. Şekil 1.20’de kısa atımlı lazer kullanılarak üretilen mikrokanallarda lazer parametrelerinin geometrik özelliklere etkisini gösteren örnek bir görsel sunulmuştur (Zhao and Wang 2018). Şartlandırılmış ortam lazer uygulamalarında ise çeşitli yardımcı gazlar kullanılarak numune yüzeyindeki birikmeyi önlemek, malzeme tahribatına yardımcı olmak, ısı tesiri altında kalan bölgeleri azaltmak ve sıçramayı engellemek hedeflenmektedir. Gazların yanı sıra farklı kimyasallar ve su içeren sıvılar da bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Belirli lazer parametrelerinde su altında ve açık havada lazerle işlenen mikrokanalların farklı seviyelerdeki pürüzlülüklerinin gözlenebileceği bir görsel Şekil 1.21’de verilmiştir (Parakash et al. 2013). Ayrıca mikro-lazer işleme yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarının sunulduğu faydalı bir tablo da Çizelge 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.19. Kızılötesi lazer kullanılarak üretilen mikrokanallarda yüzey yapısı (Prakash, and Kumar 2021).



Şekil 1.20. Kısa atımlı lazer kullanılarak üretilen mikrokanallarda lazer parametrelerinin geometrik özelliklere etkisi (Zhao and Wang 2018).



Şekil 1.21. Belirli lazer parametrelerinde (a) su altında ve (b) açık havada lazerle işlenen mikrokanallar (Parakash et al. 2013).

1. GİRİŞ

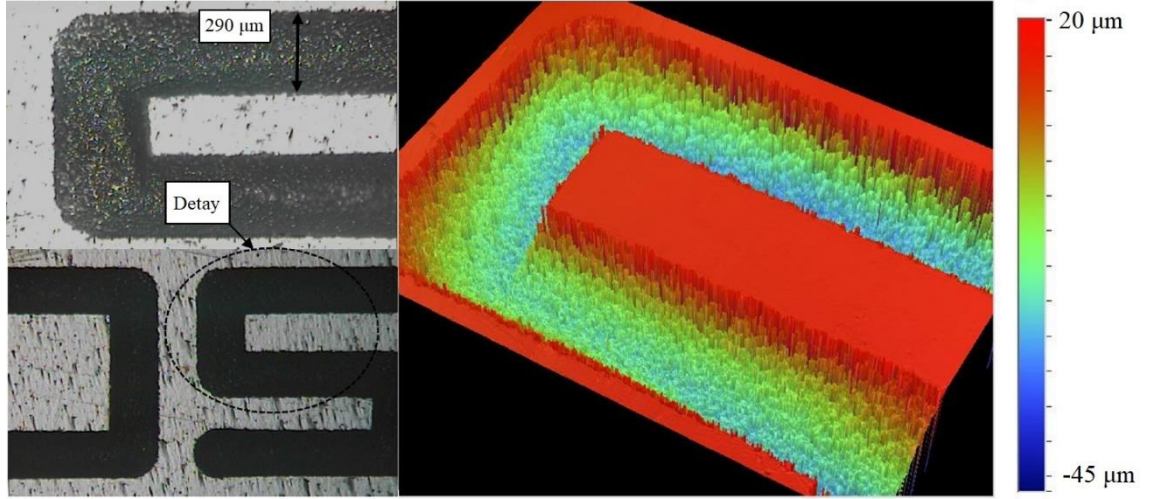
Çizelge 1.3. Mikro-lazer işleme üretim metotları, materyalleri, avantaj ve dezavantajları (Prakash and Kumar 2015).

Metotlar	Materyaller	Referanslar	Avantajlar ve Dezavantajlar
Ultraviyole Lazer	Hemen hemen tüm malzemeler	Waddell et al. 2002; Heng et al. 2006; Kitsara et al. 2006; Fernandez-Pradas et al. 2009	Avantajlar
			➤ Seri üretime uygun. ➤ Çok düşük imalat süresi. ➤ Düşük birikme ve çapak oluşumu.
			Dezavantajlar
Kızılötesi Lazer	Hemen hemen tüm malzemeler, özellikle polimerler	Lim et al. 2003; Kam and Majumder 2008; Hong et al. 2010; Karazi et al. 2010	Dezavantajlar
			➤ Büyük ısı tesirinde kalan bölge. ➤ Çapak oluşumu. ➤ Kanallarda şekil düzensizliği. ➤ Düşük en/boy oranı.
Kısa Atımlı Lazer	Şeffaf plastikler, cam ve diğer kesilmesi zor malzemeler	Joglekar et al. 2004; Day and Gu 2005; Gattas 2006; Kurselis 2010	Avantajlar
			➤ Küçük ısı tesirinde kalan bölge. ➤ Atomik seviyede kontrol.
			Dezavantajlar
Şartlanmış Ortamlarda Lazer	Metaller ve polimerler	Grasegger 1988; Kruusing 2004; Choo et al. 2004; Chung and Lin 2010	Avantajlar
			➤ Küçük ısı tesirinde kalan bölge. ➤ Düşük malzeme kaybı. ➤ Hassas kesim.
			Dezavantajlar
			➤ Belirsiz üretim güç yoğunluğu. ➤ Yüksek güç tüketimi.

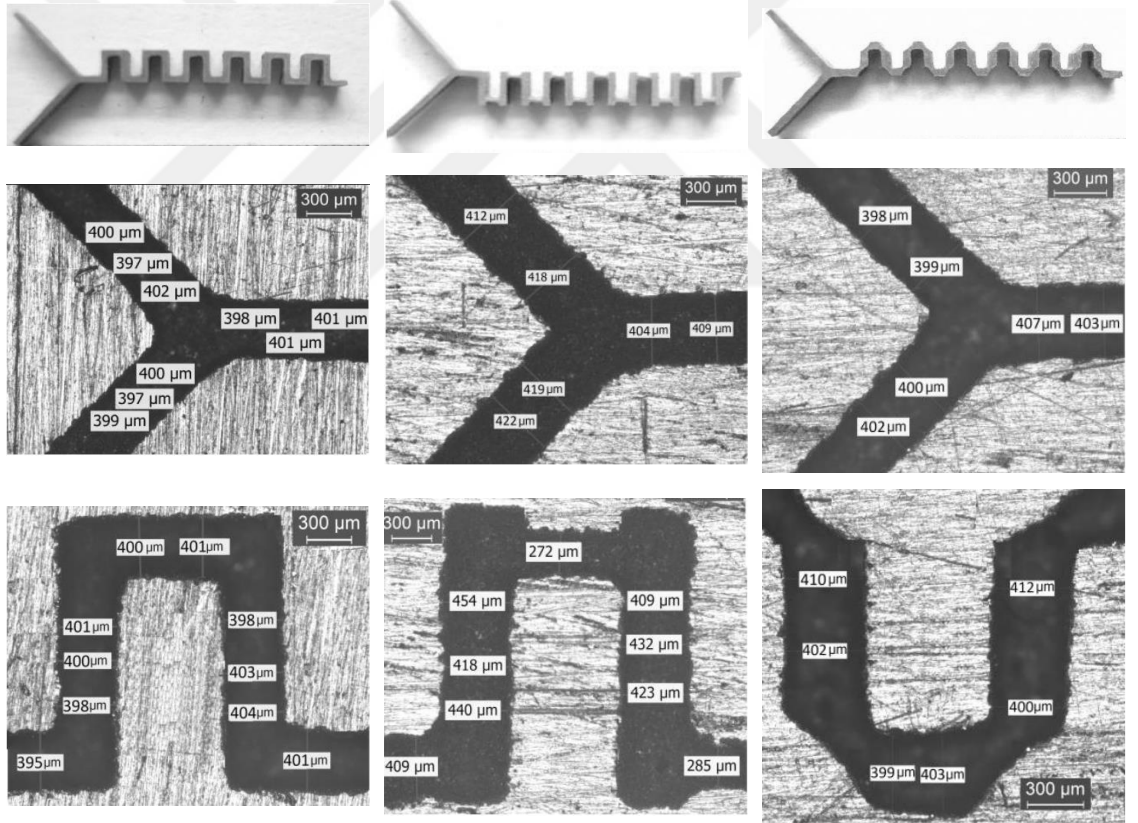
1.5.7. Mikro-elektro erozyon

Mikro-elektro erozyon yöntemlerinde farklı geometri ve özelliklerdeki elektrotlarda anlık enerji deşarjı oluşturularak iş parçası üzerinden malzeme ayrılmaktadır. Kaldırma mekanizması oluşturulan plazma bölgesindeki malzemenin buharlaşmasına dayanmaktadır. Bu yöntemde erozyon miktarını artıran ve plazma bölgesindeki kararlılığı sağlamayan dielektrik akışkanlar sıklıkla kullanılmaktadır. İşlem sırasında elektrot/takım ve iş parçası içi sıvı ile dolu bir çalışma boşluğu kalacak şekilde konumlandırılmaktadır. Ürünlerin geometrik parametreleri üzerinde de doğrudan etkileri olan dielektrik akışkanlar elektrik akımını belirli ölçüde iletmemesi özelliği göstermektedirler. Ek olarak bu sıvılar çalışma alanını soğutulması ve oluşan erozyon atıklarının çalışma bölgesinden uzaklaştırılması gibi kritik görevleri de yerine getirmektedirler.

Malzeme erozyonunun termal prensiplere dayanmasına ve plazma bölgesi içerisinde oldukça yüksek sıcaklıklar elde edilebilmesine karşın mikro-elektro erozyon yöntemlerinde enerji giderleri ve işletme maliyetleri oldukça düşük seviyelerdedir. Bu yöntemin avantajlarından bir diğeri de malzeme sertliği, sünekliği ve Young modülü gibi mekanik özelliklerden bağımsız uygulanabilmesidir. Mikro-elektro erozyon yöntemi 0,01 Siemens/cm'nin üzerinde iletkenliğe sahip olan geniş bir malzeme grubunun işlenmesine olanak tanımaktadır. İş parçası üzerinde elde edilen geometrik özellikler ve yüzey yapısı deşarj süresi, deşarj akımı ve gerilimi veya dielektrik sıvının ve iş parçasının iletkenlikleri gibi çok çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Çok esnek bir işlem süreci oluşturan bu yöntemde mikro- tel, dalma, delme, taşlama, frezeleme ve tel taşlama erozyon olarak çeşitli alt yöntemlerden bahsedilmektedir. Bu yöntemler arasında endüstriyel olarak en yaygın olanlar tel erozyon ve dalma erozyondur. Mikro dalma erozyonda üç boyutlu bir elektrot kullanılarak serbest yüzeyler oluşturulabilirken tel erozyonda ise silindirik bir tel elektrot kullanılmaktadır. Mikro-elektro erozyon kullanılarak işlenen kanallar ve bu kanalların yüzey yapılarının gösterildiği örnek bir görsel Şekil 1.22'de sunulmuştur. Ayrıca Şekil 1.23'de Sarma and Patowari (2018) tarafından üretilen farklı geometrilerdeki dalma erozyon kalıpları ve bu kalıplar ile üretilen mikro yapılar verilmektedir. Çizelge 1.4'de ise mikro-elektro erozyon işlemleri sınıflandırılmış ve bazı teknik detaylar aktarılmıştır (Uhlmann et al. 2015; Ganesh et al. 2017).



Şekil 1.22. Mikro-elektro erozyon yöntemiyle üretilen mikrokanallar ve bu kanalların 3B profilometre görüntüsü (Chaides et al. 2014).



Şekil 1.23. Farklı geometrilere dalma mikro-elektro erozyon elektrotları ve bu elektrotlar kullanılarak üretilen mikrokanallar (Sarma and Patowari 2018).

Çizelge 1.4. Performansa ve uygulamalara göre mikro-elektro erozyon işlemleri (Uhlmann et al. 2015).

Mikro-Elektro Erozyon Metotları	Geometrik Karmaşıklık	Yapıların Boyutları	Pürüzlülükler ($R_a - R_z$ [μm])
Mikro Tel Erozyon	En büyük açıları 15° olan konik yüzeyler. 2,5B.	Tel çapına bağlı en düşük iç yarıçap, kesme genişliği ve iş parçası yüksekliği.	0,07 – 0,35 (Çoklu kesim stratejisiyle)
Mikro Dalma Erozyon	Yüzeylerde serbest biçim. Elektrot üretimi ile sınırlandırılma. 3B.	En düşük yapı genişliği $\sim 0,02$ mm. En/boy oranı ~ 20 .	0,1 – 0,5 (Tüm yönlerde)
Mikro Delme Erozyon	Dikey işleme 2B.	0.04 mm'ye kadar sondaj çapı. En/boy oranı 25 – 50.	0,3 – 1,5 (Yanal yüzeyler)
Mikro Taşlama Erozyon	Düz veya kısmen kavisli kanal yapıları. Takım geometrisine bağlı kanal profilleri. 2,5B.	Minimum yapı genişlikleri 0,07 mm. En/boy oranı ~ 15 . Elektrot aşınmasına bağlı yapı uzunluğu (>50 mm).	0,2 – 0,8 (Tüm yüzeyler)
Mikro Frezeleme Erozyon	Serbest biçimli yüzeyler. 3B.	En düşük iç yarıçap pim çapına bağlı. Uygulanabilir elektrot çapı 0,1 mm.	0,2 – 0,8 (Tüm yüzeyler)
Mikro Tel Taşlama Erozyon	Dönel simetrik yapılar.	0,02 mm en düşük elektrot çapı. En/boy oranı ~ 30 .	0,15 – 0,75

1.5.8. Mikrokanal üretim yöntemleri değerlendirme ve sonuçlar

Mikro akışlı cihazlarda ve temelde mikrokanallarda kullanılan üretim yöntemlerinin detayları önceki bölümlerde sunulmuştur. Mikrokanal üretiminde yukarıda bahsedilmeyen, uygulama önemini kaybetmiş veya henüz gelişmekte olan yöntemler de bulunmaktadır. Yukarıda değerlendirilen yöntemlerin pek çoğu uzun bir geçmişe sahiptir. Buna rağmen mikro üretim konusuna yüksek Ar-Ge bütçeleri aktarılmakta ve bu konu geniş araştırmacı kitleleri tarafından halen çalışılmaktadır. Mikrokanal üretim metotları, temel uygulama alanları, materyalleri, avantaj ve dezavantajlarıyla ilgili faydalı bir değerlendirme Prakash and Kumar (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1.5).

Çizelge 1.5. Mikrokanal üretim metotları, temel uygulama alanları, materyalleri, avantaj ve dezavantajları (Prakash and Kumar 2015).

Üretim Metotları	Uygulama Alanları	Materyaller	Referanslar	Avantajlar ve Dezavantajlar	
Mikro-Mek. İşleme	Isı Alıcılar, Metalik Mikro Parçalar	Özellikle Metaller	Qin (2015); Pan et al. (2009); Wan et al. (2014); Liow et al. (2009).	Avantajlar	Yüksek hassasiyet ve iyi yüzey kalitesi. Bireysel üretime uygunluk.
				Dezavantajlar	Seri ve toplu üretime uygun değil. Kesici takımında aşınma oluşur. Çatlak ve sonlarda çapak oluşumu.
Litografi	Biyomekanik Uygulamalar	Reaktif Metaller	Madou (2011); Kikuchi et al. (2013); Belloy et al. (2000); Park et al. (2005); Maselli et al. (2006).	Dezavantajlar	Paralel olmayan kanal duvarları. Tam boyut kontrolü olası değil. Malzeme kaybı meydana gelir.

Çizelge 1.5. (Devam)

Islak ve Kuru Aşındırma	Kimyasal Uygulamalar, DNA kan ve Protein Analizleri	Polimerler ve Silikon	Yao et al. (2005); Pal and Sato (2009); Becker and Locascio (2002); Xia and Whitesides (1998); Ueno et al. (2000); Delamarche et al. (1998).	Avantajlar	Geniş ve karmaşık topografya üretimleri için uygun. Yüksek en-boy oranlı kanalları için uygun.
				Dezavantajlar	Temiz oda tesisi gerektirir. Teslim süresi nispeten fazladır.
Baskı ve Kabartma	Biyomekanik ve Kimyasal Uygulamalar	Polimerler ve Silikon	Martynova et al. (1997); McCormick et al. (1997); Lin et al. (2013).	Dezavantajlar	Düşük yüzey kalitesi gözlenir. Teslim süresi nispeten fazladır.
Enjeksiyon Kalıplama	Elektrokimya, Hücre ve DNA uygulamaları	Polimerler, Silikon ve Metaller	Whiteside et al. (2006); Ganz (2005); Thomas et al. (2000); Piotter et al. (2002); Tosello et al. (2007); Matteucci et al. (2013).	Avantajlar	Yüksek boyutsal esneklik.
				Dezavantajlar	Kaynak hatları görülebilir. Düşük dayanım.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa işin doğası gereği tüm üretim yöntemlerinin edilen ürünler üzerinde karakteristik izlerini sergilediği görülecektir. Bu durum aynı fonksiyonu yerine getirecek ürünlerde sonucu belirgin oranda değiştirebilecek farklı geometrik özelliklerin ortaya çıkmasıyla sonuçlanacaktır. Termal uygulamalar için bu geometrik özellikler boyutsal hassasiyet, yüzey yapısının dağılımı, kanal profilinin şekli ve yüzey pürüzlülüğü olarak değerlendirilebilir.

1. GİRİŞ

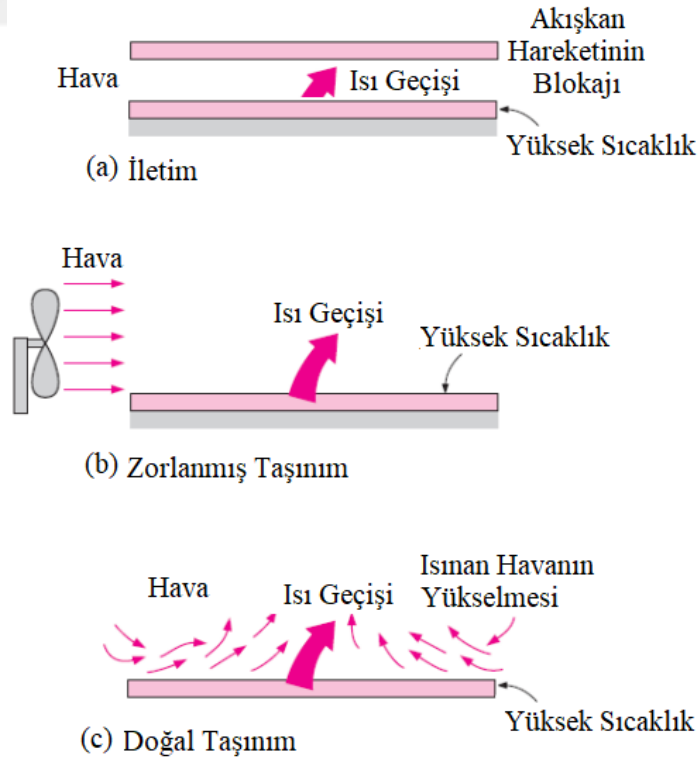
Yukarıda bahsedilen geometrik özellikler mikrokanal üretim yöntemine göre değişiklikler gösterdiği gibi aynı yöntemdeki farklı işlem parametrelerinden dahi büyük oranda etkilenmektedir. Bunun yanında bu değişimlerin göz önüne alındığı, hatta bu özelliklerin etkilerinin incelendiği araştırmalar olduğu gibi çok sayıda araştırmacı bu kritik özellikleri ihmal etmiştir. Isı-akış uygulamaları için literatürde belirgin bir birliğin sağlanamamasının bir nedeni de bu durumdur. Bu çalışma kapsamında ise üretilen mikrokanallarda boyutsal hassasiyet ve yüzey yapısında düzgün dağılım aranmıştır. Ayrıca kanal tasarımında kullanılan dikdörtgen kesitler için paralel yüzeylerin ve keskin köşelerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanında araştırma parametrelerimizden biri olan yüzey pürüzlülük seviyelerinin kontrol edilebilirliği de hedeflenmiştir. Bir dizi deneme sonucunda bu tez çalışması kapsamında kullanılan mikrokanalların üretimi için dalma mikro-elektro erozyon yöntemi tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan denemeleri ve bu denemelerin hedeflenen geometrik özelliklere verdiği karşılıkları içeren bir tablo Çizelge 1.6'da verilmiştir. Mikrokanalların detayları ise 3. Materyal ve Yöntem başlığı altında sunulmuştur.

Çizelge 1.6. Çalışma kapsamında yapılan mikrokanal üretim denemeleri ve hedeflenen geometrik özelliklerin durumu (Ateş 2020).

Mikrokanal Üretim Yöntemi	Boyutsal Hassasiyet	Düzensiz Dağılımlı Yüzey Yapısı	Düzensiz Kanal Kesiti	Kontrol Edilebilir Pürüzlülük
Litografi ve Aşındırma	✓	✗	✗	✗
Mikro-Lazer İşleme	✗	✗	✗	✗
Mikro-Mekanik İşleme	✓	✗	✗	✗
Tel Mikro-Elektro Erozyon	✓	✓	✗	✓
Dalma Mikro-Elektro Erozyon	✓	✓	✓	✓

1.6. Taşınım İle Isı Transferi ve Karma Taşınım

Temel olarak ısı transferi üç ana mekanizma ile gerçekleşmektedir. Bunlar iletim, taşınım ve ışıdır. Taşınım mekanizması bir yüzey ile bu yüzeye temas halindeki akış arasında gerçekleşen ısı enerjisi aktarımı olarak tanımlanmaktadır. Taşınım mekanizmasının aktif olması için yalnızca bir akışkanın varlığı yeterli değildir. Taşınım mekanizmasından bahsedilebilmesi için yüzeyler ile akışkanlar arasında hareket etkileşimlerinin gerçekleşmesi gerekmektedir. Aksi halde ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşecektir. Taşınım ile ısı transferinde akışkan içerisindeki yayılım hareketlerinin mekanizmadaki etkinliği biliniyor olsa da akışkan moleküllerinin yığın olarak hareketliliği aranmaktadır. Bir yüzey ile durağan akışkan kitlesi arasında gerçekleşen iletim, akışkanın kitlesel olarak harekete geçmesiyle taşınım dönüşürken ısı transferinde artış gözlenmektedir. Hem iletim hem de akışkan hareketi etkileşimleri içermesi nedeniyle taşınım mekanizmasını çözümlemek nispeten karmaşıktır. Akışkan hareketliliğine göre ısı transfer mekanizmalarının tanımlarını gösteren faydalı bir görsel Şekil 1.24’de sunulmuştur (Cengel and Ghajar 2014; Bergman et al. 2017).



Şekil 1.24. Isı transfer mekanizmaları (a) iletim (b) zorlanmış taşınım (c) doğal taşınım (Cengel and Ghajar 2014).

1. GİRİŞ

Taşıymıla ısı transferi Newton'un Soğutma Yasası olarak bilinen ifadeyle tanımlanmaktadır. İlgili denklem Eş. 1.1'de verilmiştir. Burada ısı transferinin sıcaklık farkı, yüzey alanı ve ortalama taşıym katsayısı ile doğru orantılı olduğu görölmektedir ($\bar{h}$ [W/m².°C]).

$$\dot{Q}_{\text{Con}} = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \quad (1.1)$$

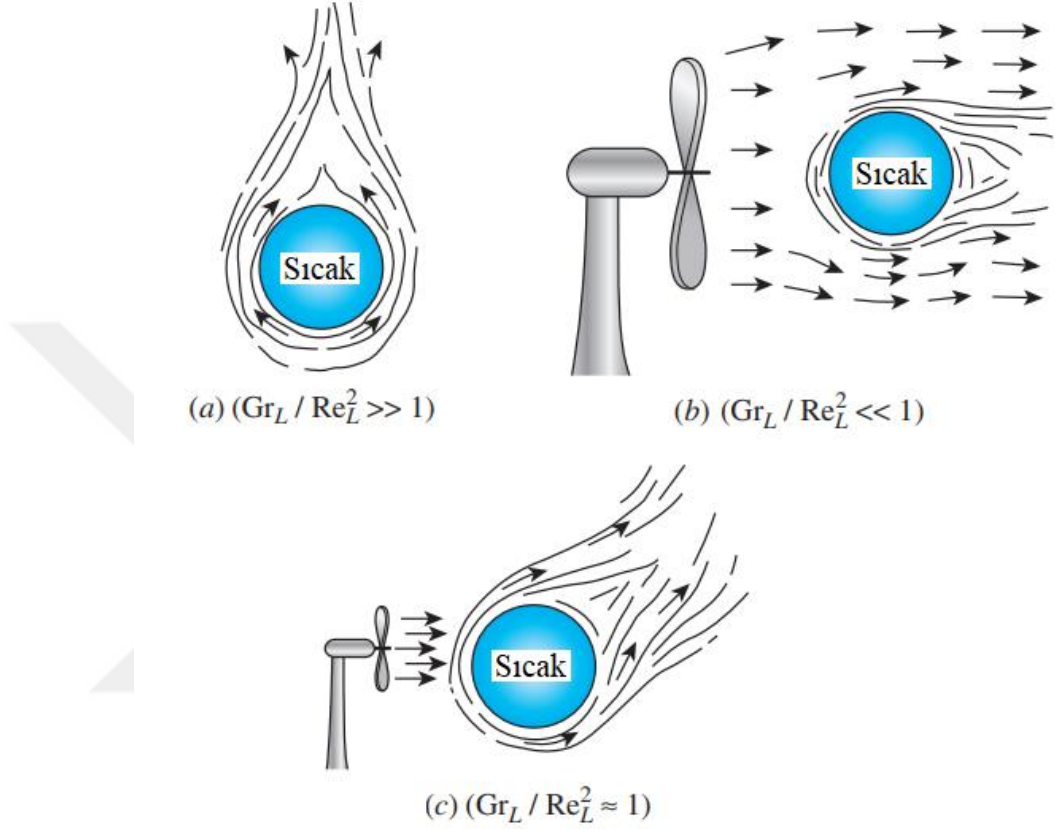
Buradaki kritik parametre olan taşıym katsayısı, bir katı yüzey ile bir akışkan arasında birim alan ve birim sıcaklık farkı başına ısı transfer hızı olarak tanımlanabilir. Verilen basit ifade biçimine karşın taşıym katsayısı doğası gereği karmaşıktır ve bir özelliği değil akış ile yüzey arasındaki etkileşimi ifade etmektedir. Ayrıca bu katsayı akış rejimi türünden, akış hızından, akışkan termodinamik özelliklerinden, yüzey yapılarından ve pürüzlülük vb. geometrik özelliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Taşıym problemlerinde ortalama taşıym katsayıları için tahminler veya ampirik bağıntılar kullanılsa da en doğru yaklaşım taşıym katsayısının deneysel olarak belirlenmesidir. Isı taşıym katsayılarının farklı şartlardaki değer aralıkları Çizelge 1.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 1.7. Isı taşıym katsayılarının farklı şartlardaki değer aralıkları (Bergman et al. 2017).

Mekanizma ve Akışkan	$\bar{h}$ [W/m ² .°C]
Doğal Taşıym	
Gazlar	2 – 25
Sıvılar	50 – 1000
Zorlanmış Taşıym	
Gazlar	25 – 250
Sıvılar	50 – 20000
Faz Değişimi	
Kaynama ve Yoğuşma	2500 – 100000

1. GİRİŞ

Yukarıda verilen geniş taşınım katsayısı aralığının oluşmasında akışın nasıl oluştuğu veya nasıl tahrik edildiği büyük önem arz etmektedir. Taşınım ile ısı transfer mekanizması akışın nasıl oluştuğu ve/veya tahrik edildiğine göre üç alt başlık halinde sınıflandırılmıştır. Bu alt başlıklar doğal, zorlanmış ve karma taşınım (Şekil 1.25).



Şekil 1.25. Taşınım ile ısı transferi (a) doğal (b) zorlanmış (c) karma taşınım (Cengel and Ghajar 2014).

Akışkanların yoğunlukları sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Artan sıcaklık genellikle akışkanları genleştirmekte ve yoğunlukta azalmaya neden olmaktadır. Yerçekimi etkisi altında akışkan içerisinde bir yoğunluk gradyanının oluşması kaldırma kuvvetlerini tetiklemektedir. Azalan sıcaklıkta da buna benzer bir durumdan söz etmek mümkündür. Neticede herhangi bir dış tahrik olmadan yoğunluk farkı sebebiyle oluşan akış ve ısı transferi mekanizması doğal taşınım olarak değerlendirilmektedir. Başka bir deyişle farklı sıcaklıkta bir yüzeye temas eden akışkanlar ısınma veya soğumaya bağlı olarak yoğunluk değişimleri gözlenebilir. Bu durum akışkanın kaldırma kuvveti etkisi altında hareketlenmesine neden olur. İşte burada ısı transferi doğal taşınım ile

1. GİRİŞ

gerçekleşmektedir. Doğal taşınım mekanizmasında akış hızları nispeten düşük olduğu için zorlanmış taşınım mekanizmasına oranla düşük ısı etkileşimleri söz konusu olabilir. Bu mekanizmanın geçerliliği Eşitlik 1.2’de verilen ifade ile değerlendirilmektedir.

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1 \quad (1.2)$$

Bu oranda Gr_L yerel Grashof sayısını temsil etmektedir. Grashof sayısının tanımı akışkan üzerine etki eden kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranının bir ölçüsü olarak verilmektedir. Yerel Reynolds sayısı (Re_L) ise akışkan üzerine etki eden atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını göstermektedir. Eşitlikte verilen durum sağlanıyorsa akış üzerinde bir dış tahrik yoktur veya var olan dış tahrik ihmal edilebilir düzeydedir ve doğal taşınım mekanizması aktiftir.

Zorlanmış taşınımında akışkan hareketi dış unsurlar tarafından sağlanmaktadır. Bu mekanizmada akışkan fazına göre fan, kompresör veya pompa benzeri tahrik elemanları kullanılarak akışkan ile yüzeyler arasında etkileşim sağlanır. Kayda değer güç tüketiminin söz konusu olduğu bu dış tahrik unsurlarıyla oluşturulan zorlanmış akışlar pek çok uygulamada doğal taşınım akışlarını baskılamaktadır. Bu durumun kontrolü Eşitlik 1.3’de verilen ifadeyle gerçekleştirilebilir.

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1 \quad (1.3)$$

Bu ifadede verilen oranın 1’den çok küçük olduğu durum için atalet kuvvetleri büyük oranda baskındır ve kaldırma kuvvetleri ihmal edilebilir. Akış alanı zorlamış akış yönünde baskılanmıştır ve ısı transferi zorlanmış taşınım ile gerçekleşmektedir. Taşınım ile ısı transferi uygulamalarında dış tahrik elemanları söz konusu ise doğal taşınım etkileri ihmal etmek yönünde bir eğilim söz konusudur. Fakat kararsız bir sıcaklık gradyanının varlığında doğal taşınım akışlarının oluşması kaçınılmazdır. Özellikle düşük Reynolds sayılarında gerçekleşen akışlarda kaldırma kuvveti kaynaklı akışları ihmal etmek ısı geçişi üzerinde hatalı değerlendirmelere neden olacaktır.

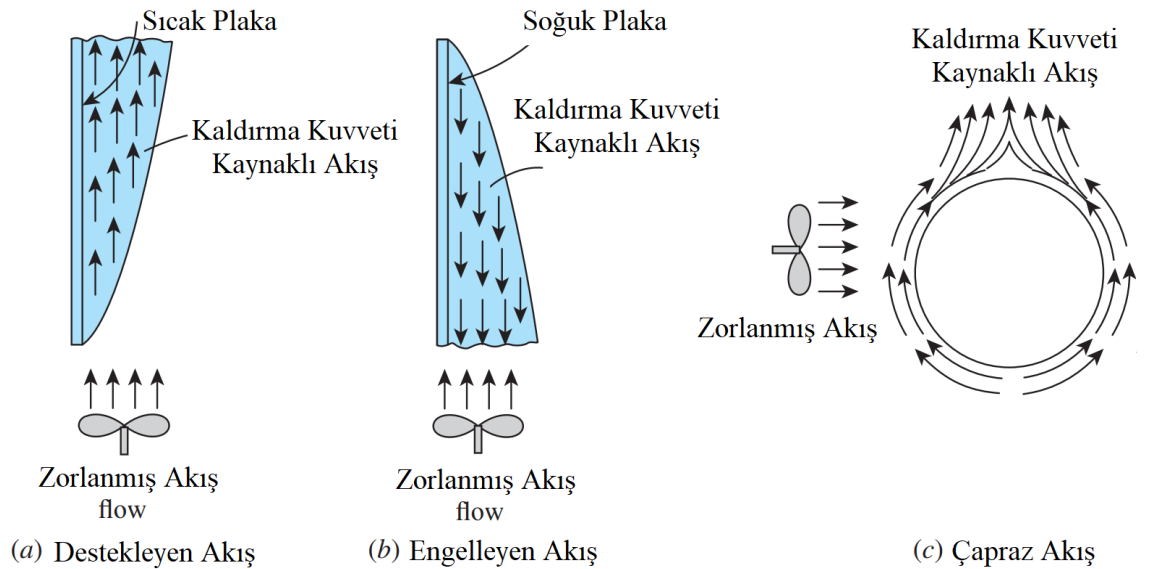
1. GİRİŞ

Değerlendirme ölçütü olarak kullanılan oran Eşitlik 1.4’de verilen ifadede olduğu gibi 1 civarında ise ısı transferinde doğal ve zorlanmış akışların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durumda mekanizma karma taşınım olarak adlandırılmaktadır.

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \approx 1 \quad (1.4)$$

Karma taşınım mekanizmasında dikkat edilmesi gereken ilk husus dış tahrik kaynaklı akışlar ile doğal akışlarının yönelim durumudur. Burada zorlanmış hız bileşeni baz alınarak doğal hız bileşeninin durumuna göre bir sınıflandırma yapılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre zorlanmış ve doğal akışlar aynı yönlü, karşıt yönlü ve dik yönlü olabilmektedir. İlgili sınıflandırma aşağıda maddeler halinde verilmiş ve bu maddeler hakkında görsel bir açıklama ise şekil 1.26’da sunulmuştur.

- Aynı yönlü (destekleyen akış).
- Karşı yönlü (engelleyen akış).
- Dik yönlü (çapraz akış).



Şekil 1.26. Karma taşınım ile ısı transferi (a) destekleyen (b) doğal (c) çapraz akış durumu (Cengel and Ghajar 2014).

Destekleyen ve çapraz akış durumlarında kaldırma kuvveti, ısı geçişini arttırıcı etkide bulunmaktadır. Buna karşın engelleyen akış durumunda ise ısı geçişi olumsuz şekilde etkilenmektedir. Zorlanmış ve doğal taşınımın bir arada olduğu durumların karmaşık yapısı pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir ve son yıllarda bu konuya olan ilginin arttığı açıktır. Genel bir değerlendirme yapıldığında, laminer zorlanmış taşınım şartlarında kaldırma kuvveti sonucu oluşan akış yapılarının ısı geçişini önemli ölçüde etkileyebileceği, ancak türbülans rejiminde gerçekleşen yüksek hızlardaki zorlanmış akışlarda bu etkilerin ihmal edilebileceği görülmektedir (Cengel and Ghajar 2014; Shang and Zhong 2016; Mandev 2017; Bergman et al. 2017).

1.7. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey özellikleri, yüzey yapılarının boyutları ve konfigürasyonu yani genel anlamda işlenmiş yüzeylerin yapısı nihai ürünlerin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak ürünler için arzu edilen performans standartlarını karşılamak için yüzeylerin pürüzlülüğünü ölçmek önemlidir. Yüzeyleri pürüzlülük durumlarına göre sınıflandırmak ve değerlendirmek için yapıların içbükey/dışbükey oluşlarını, yükseklik/derinlik durumlarını ve yapılar arasındaki aralıklar gibi düzensizlikleri belirlemek gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar daha sonra belirli standartlara dayalı hesaplama prosedürlerine tabi olarak önceden belirlenmiş yöntemlere göre analiz edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün olumlu veya olumsuz etkileri, düzensizliklerdeki boyut, şekil ve ürünlerin kullanımına göre belirlenmektedir.

Pürüzlülük seviyesi, yüzeylerin yerine getireceği fonksiyonlara ve göstereceği performanslara göre yönetilmelidir. Yüzey pürüzlülüğü bazı uygulamalar için istenmeyen bir durum olabileceği gibi, bazen de ürünün fonksiyon ve performansı için kritik önem taşıyabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve değerlendirilmesi çeşitli pürüzlülük kriterlerini gösteren çok sayıda yerleşik parametreye sahip geniş bir kavramdır. Son yıllarda işleme teknolojisinin ilerlemesi ve gelişmiş ölçüm cihazlarının ortaya çıkışı, yüzey pürüzlülüğünün farklı yönlerinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bölümde yüzey pürüzlülüğü ile ilgili tanımlar yapılarak terminoloji ve pürüzlülük parametreleri detaylandırılmıştır. Ayrıca burada yüzey pürüzlülüğünün ölçümü ve ölçüm yöntemlerine dair giriş niteliğindeki bilgilere de yer verilmiştir.

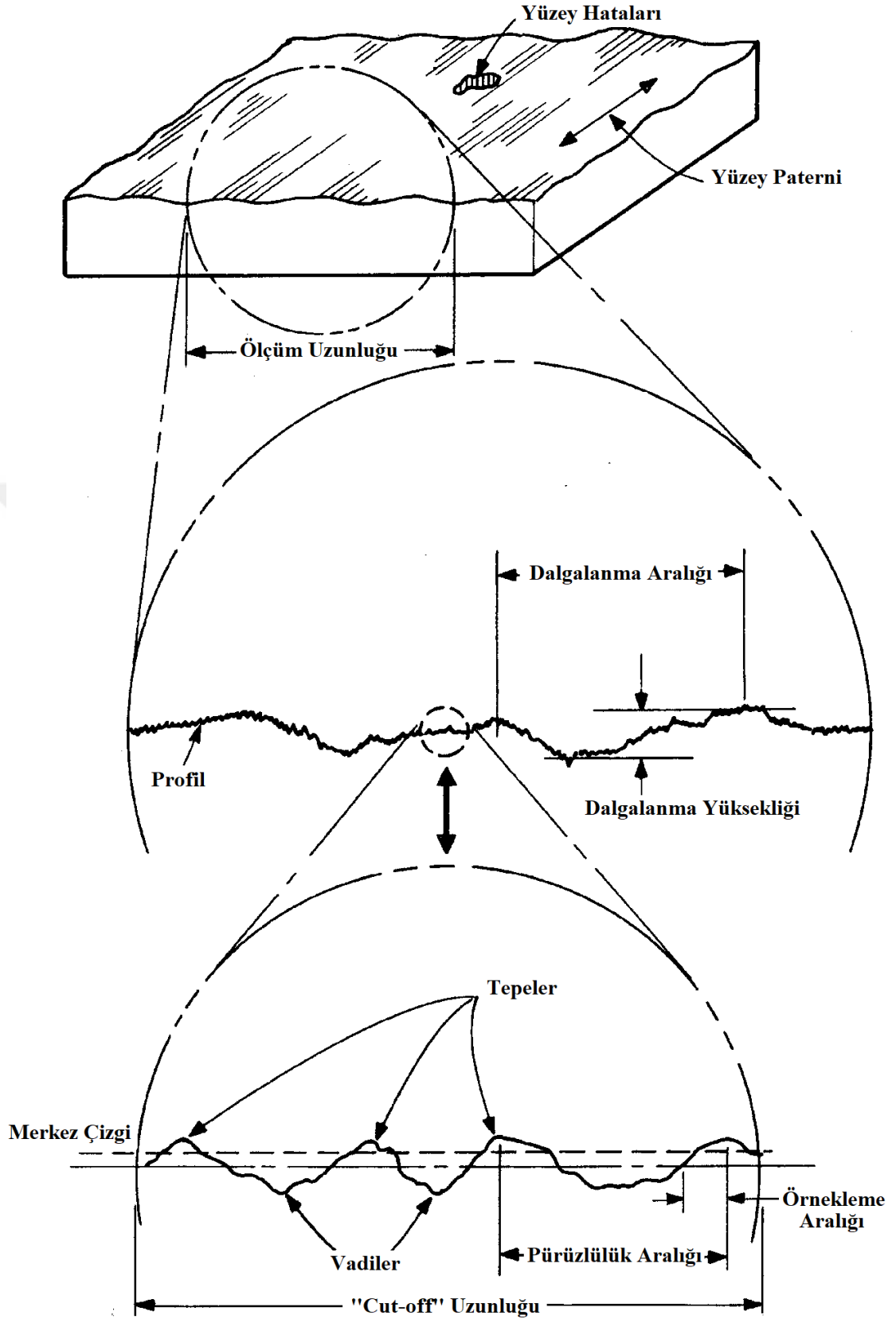
1.7.1. Yüzey pürüzlülüğü terminolojisi ve pürüzlülük parametreleri

Katı bir yüzey malzemelerin doğasına, yüzey hazırlama yöntemine ve yüzey ile çevre arasındaki etkileşime bağlı olarak karmaşık yapılara ve özelliklere sahiptir. Katı yüzeylerin özellikleri yüzey etkileşimi için çok önemlidir çünkü yüzey özellikleri gerçek temas, sürtünme, aşınma, ıslanabilirlik ve yağlanma gibi fiziksel fenomenleri etkiler. Bunlara ek olarak optik, elektriksel ve termal performans gibi uygulamalarda da yüzey özellikleri önemlidir. Katı yüzeyler, oluşum yönteminden bağımsız olarak, belirlenen geometrik formdan sapmalar içermekte veya düzensizlikler barındırmaktadır. Bu düzensizlikler şekilsel mertebelerden, atomlar arası mesafe düzeyindeki düzensizliklere kadar değişen geniş bir aralıkta olabilmektedir. Ne kadar hassas olursa olsun hiçbir işleme yöntemiyle, malzemeler üzerinde moleküler olarak düz bir yüzey elde edilememektedir. Hatta kristallerin bölünmesiyle elde edilen en pürüzsüz yüzeylerde bile, yükseklikleri atomlar arası mesafeleri aşan düzensizliklerle karşılaşmaktadır (Bhushan 2000).

Yüzey dokusu yüzeyin üç boyutlu topografyasını oluşturan nominal yüzeyden tekrarlayan veya rastgele sapmalar olarak tanımlanmaktadır ve aşağıda maddeler halinde verilen bileşenlerden oluşmaktadır.

- Pürüzlülük (nano ve mikro pürüzlülük),
- Dalgalılık (makro pürüzlülük)
- Yüzey paterni
- Yüzey kusurları

Nano ve mikro pürüzlülük, değişen genlik ve aralıklarda tepeler (yerel maksimumlar) ve vadiler (yerel minimumlar) ile karakterize edilen kısa dalga boylarının yüzeyindeki değişiminden oluşur. Bu yapılar moleküler boyutlara kıyasla büyük fakat mikrometre ve altı seviyelerdedir. Nano ve mikro pürüzlülük çoğunlukla üretim sürecine özgü karakteristikleri içermektedir. Dalgalılık yüzey düzensizliğidir daha uzun dalga boylarına sahiptir ve makro pürüzlülük olarak adlandırılır. Dalgalılık aralıkları pürüzlülük örnekleme uzunluğundan büyük olan tüm düzensizlikleri içerir. Yüzey paterni genellikle üretim yöntemiyle belirlenen, baskın yüzey modelinin yönü olarak tanımlanmaktadır. Yüzey kusurları ise dokudaki beklenmedik ve istenmeyen süreksizliklerdir (Şekil 1.27).



Şekil 1.27. Yüzey dokusunun bileşenleri; pürüzlülük (nano ve mikropürüzlük), dalgalanma (makropürüzlük), yüzey paterni ve yüzey hataları (Bhushan 2000).

1. GİRİŞ

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Şekil 1.27'den de görüleceği gibi yüzey üzerinde belirli uzunluklarda ölçüm bölgeleri tanımlanır. Bu bölgelerden alınan verilerle pürüzlülük profilleri oluşturulacağı gibi pürüzlülük alanları da elde edilebilir. Pürüzlülük ölçümlerinin değerlendirilmesi ulusal ve uluslararası standartlarla rijit şekilde belirlenmiştir. İlgili standartlar geometrik referansları ve hesap prosedürünü içermekle beraber pek çok pürüzlülük parametresini de tanımlamaktadır. Standartlar genellikle bir merkez çizgi tanımlamasının üzerine bina edilmiştir. Pürüzlülük parametrelerinin tanımlanabilmesi ve daha iyi anlaşılabilmesi için gerekli terminolojinin bir bölümü devam eden kısımda sunulmuştur (Çizelge 1.8).

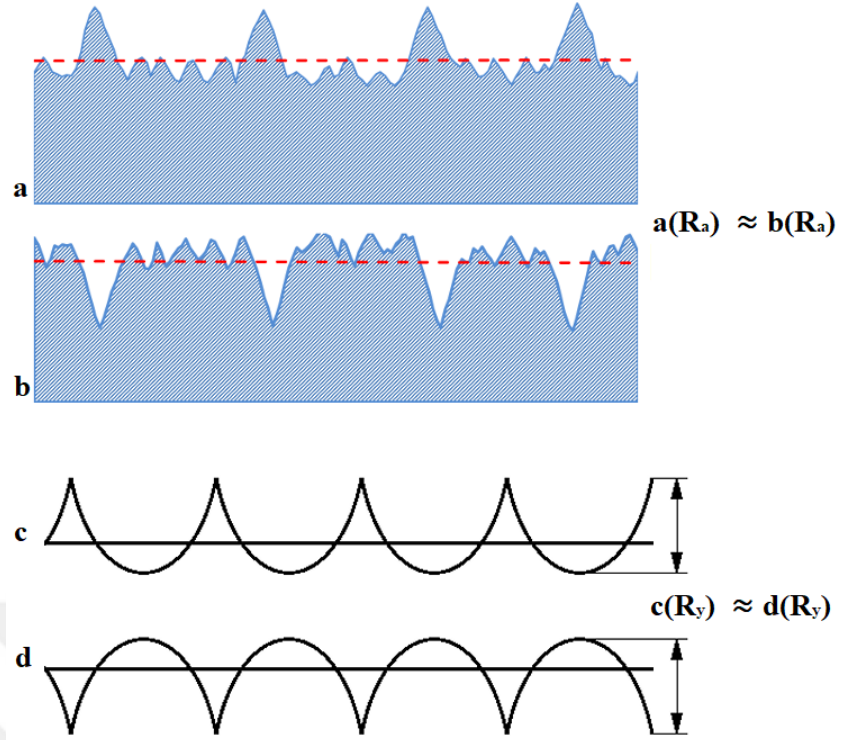
Çizelge 1.8. Pürüzlülük terminolojisi ve bazı önemli tanımlar

Profil	Bir alan boyunca iki boyutlu bir kesit.
Merkez Çizgi	Her veri noktası için ağırlıklı ortalama hesaplanarak oluşturulan ve üst ve alt bölgeleri eşit alanlara ayıran düz bir çizgidir. Ortalama çizgi olarak da bilinmektedir. Ortalama çizgi profil sapmalarının ölçüldüğü referans çizgidir.
Yüzey Dokusu	Gerçek yüzey için tipik olan belirli sapmalardan oluşan topografya. Pürüzlülük ve dalgalanma içerir.
Dalgalanma Parametreleri	Pürüzlülüğün üzerine bindirildiği daha büyük bir yüzey dokusu bileşeni.
Pürüzlülük Parametreleri	Üretim sürecinin doğasında bulunan veya malzemeden kaynaklanan periyodik olmayan düzensizlikler. Bunlar yüzeyin dikey özelliklerinin bir ölçüsüdür.
Tepe	Bir profilin ortalama çizgisinin üzerinde ve profilin ortalama çizgisiyle iki kesişimi arasında kalan kısımdaki maksimum yükseklik noktası.
Vadi	Bir profilin ortalama çizgisinin altında ve profilin ortalama çizgisiyle iki kesişimi arasında kalan kısımdaki maksimum derinlik noktası.

Çizelge 1.8. (Devam)

Profil Düzensizliği	Bir tepe noktası ile bitişiğindeki vadi noktası arası.
Aralık Parametreleri	Yüzeyin yatay veya yanal periyodik özelliklerinin bir ölçüsü.
Örnekleme Uzunluğu	Pürüzlülük ve dalgalılığı ayırmak için kullanılan nominal dalga boyudur. Örnekleme uzunluğundan daha büyük uzunlukta bulunan herhangi bir yüzey düzensizliği dalgalılık olarak kabul edilir
Değerlendirme Uzunluğu	Yüzey parametrelerinin değerlerinin değerlendirildiği uzunluktur. Değerlendirme uzunluğunun genel olarak beş örnekleme uzunluğundan oluşması tavsiye edilir.

Neticede yüzeylerin pürüzlülük seviyelerini tanımlamak için yüzeyden alınan profil veya alan verileri kullanılarak çeşitli pürüzlülük parametreleri oluşturulmaktadır. Bu parametreler bir profildeki tüm bilgileri tek bir sayıya indirgediğinden, bunların uygulanmasında ve yorumlanmasında çok dikkatli olunmalıdır. Çünkü farklı yüzey yapıları için benzer pürüzlülük parametreleri elde edilebilir. Bu durumu izah eden bir örnek görsel Şekil 1.28’de sunulmuştur. Yüzeylerdeki pürüzlülük seviyelerinin ve yapılarının daha doğru anlatılabilmesi için birkaç pürüzlülük parametresinin beraber verilmesi veya profil parametrelerine ek olarak alan parametrelerinin hesaplanması yaygın uygulamalardandır. Daha uygun bir yaklaşım ise pürüzlülük parametrelerinin yanında profil veya alan görsellerinin verilmesi ve yorumlanmasıdır. Ayrıca ham profil verilerinin nasıl filtrelendiği, ortalama çizginin nasıl hesaplandığı gibi durumların ve ölçümün fiziği ile ilgili küçük değişikliklerin hesaplanan parametreyi büyük ölçüde etkileyebildiği de göz önünde bulundurulmalıdır. Pürüzlülük parametreleri arasında en yaygın kullanılan parametre ise R_a ortalama yüzey pürüzlülüğüdür. Bunun yanında R_p , R_q , R_t vb. pürüzlülük ifadelerinden de faydalanılmaktadır. Bazı pürüzlülük parametreleri için açıklayıcı görseller ve tanımlar Çizelge 1.9’da hesap prosedürleri ve kullanım alanlarına örnekler ise Çizelge 1.10’da verilmiştir (Whitehouse 2010).

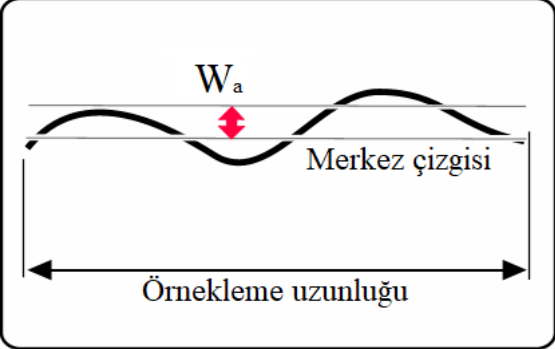
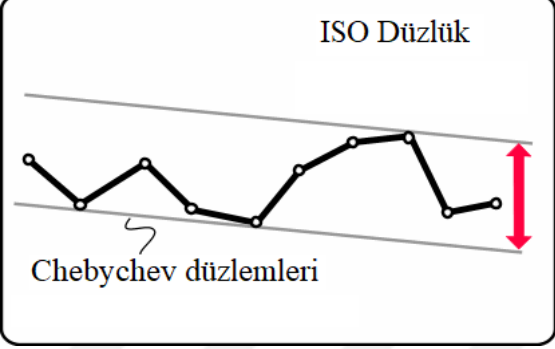
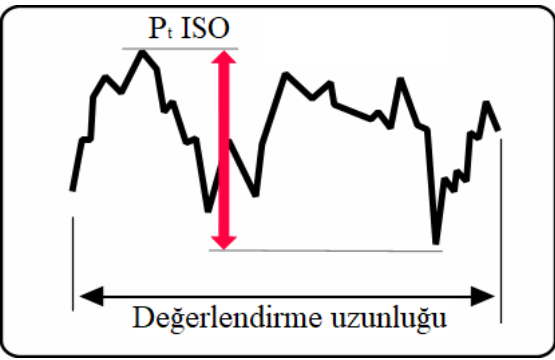
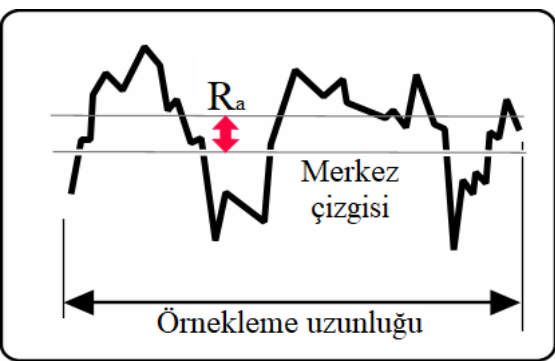


Şekil 1.28. Denk pürüzlülük parametrelerindeki farklı yüzey yapıları (Bobrovskiy 2018)

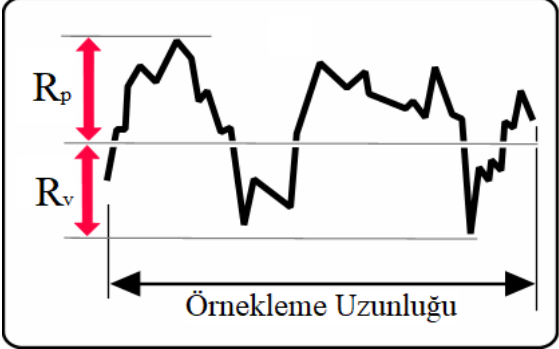
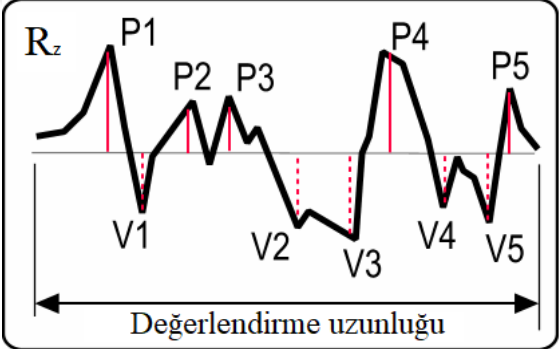
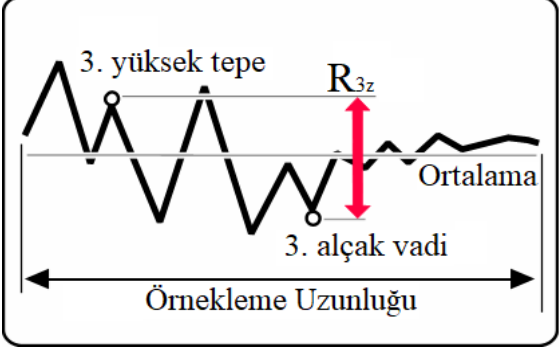
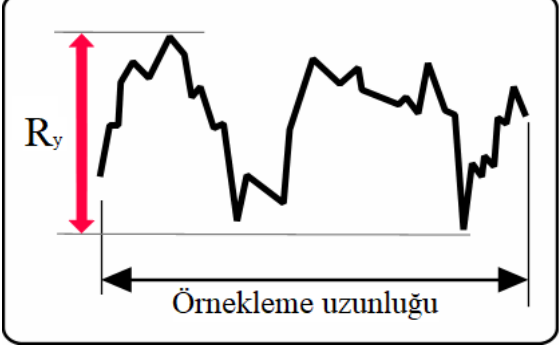
Çizelge 1.9. Bazı önemli pürüzlülük parametreleri için açıklayıcı görseller ve tanımlar (Anonymous 2021g).

	İsveç yüksekliği olarak da bilinir. Tanımlanmış iki referans çizgisi arasındaki pürüzlülüktür. Üst çizgi verilerin %5'ini ve alt çizgi ise %90'ını gösterir. Veri kaybı ve ölçüm hatalarından az etkilenmektedir. Profil veya alan verileri için kullanılabilir.
	Dalgalılık verilerinin maksimum yüksekliğidir.

Çizelge 1.9. (Devam)

	Aritmetik ortalama sapmadır. Dalgalılık profilinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak hesaplanır.
	Alansal düzlük sapmasıdır. Yüzeyin mükemmel düzlükten sapmasının bir ölçüsüdür. Yüzey verilerine Chebychev uyumu uygulanarak elde edilir. Chebychev uyumu, yüzey veri noktalarını tepelere ve vadilerden sıkıştırmak için iki paralel düzlemi etkin bir şekilde kullanan ve düzlemler arasındaki mesafeyi en aza indirecek şekilde açıyı ayarlayan matematiksel bir tekniktir.
	Tepeden vadiye toplam profil yüksekliğidir. Tüm değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek tepe ile en derin vadi arasındaki mesafedir. Filtrenmemiş profil verileri kullanılır.
	Değerlendirme uzunluğu boyunca profil yüksekliklerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır. Profil ve alan verileri için kullanılabilir.

Çizelge 1.9. (Devam)

	En yüksek tepe ve en alçak vadi. En yüksek tepe; ortalama çizgi ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir. Veri seti boyunca ortalama çizginin üzerindeki maksimum nokta yüksekliğidir. En alçak vadi; ortalama çizgi ile en düşük nokta arasındaki maksimum mesafedir. Veri seti boyunca ortalama çizginin altındaki maksimum veri nokta yüksekliğidir.
	On nokta yüksekliğidir. Değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek beş tepe noktasının ve en düşük beş vadinin ortalama mutlak değeridir. Profil ve alan verileri için kullanılabilir.
	Temel pürüzlülük derinliği. Üçüncü en yüksek tepe ile üçüncü en alçak vadi arasındaki mesafedir. Profil ve alan verileri için kullanılabilir.
	Tepeden vadiye en yüksek pürüzlülüktür. Örnekleme uzunluğu içindeki en yüksek tepenin tepesi ile en derin vadinin dibi arasındaki dikey mesafedir. Tüm tepeden vadiye değerlerin maksimumudur.

1. GİRİŞ

Çizelge 1.10. Bazı önemli pürüzlülük parametreleri için hesap prosedürü ve kullanım alanları (Anonymous 2021h).

Tanımlama	Hesaplama	Kullanım
Ortalama pürüzlülük (R_a) ölçülen uzunluk veya alan için hesaplanan ana yüksekliktir. Mikrometre veya mikro inç cinsinden belirtilir. R_a ANSI B46.1 standardına göre hesaplanır.	$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i - \bar{Z} $ M veri noktalarının sayısı ve Z ortalama düzleme göre yüzey yüksekliğidir.	R_a en temel pürüzlülük tanımlama terimidir. Profil yüksekliklerindeki genel değişimi tespit etmek ve bir üretim sürecinin sonuçlarını izlemek için kullanışlıdır.
Ortalama karekök pürüzlülük (R_q) yükseklik sapmaları ile değerlendirme uzunluğu üzerinden alınan ortalama çizgi arasındaki farkların ortalama kareköküdür.	$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}$	R_q ortalama karekök pürüzlülüğü genellikle optik yüzeylerde kullanılır. Profil yüksekliklerinin standart sapmasını temsil eder ve çarpıklık ve basıklık hesaplamalarında kullanılır.
R_p ve R_v maksimum tepe yüksekliği ve maksimum vadi derinliğini tanımlar. Değerlendirme uzunluğunca ortalama çizgi ile sırasıyla en yüksek ve en düşük noktalar arası mesafelerdir.	Ölçümlerden elde edilir.	Tepe yüksekliği bir parçadaki sürtünme ve aşınma hakkında bilgi sağlar. Vadi derinliği ise bir parçanın bir yağlayıcıyı nasıl tutabileceği hakkında fikir verir.
R_t maksimum pürüzlülük yüksekliği değerlendirme uzunluğu/alanındaki en yüksek ve en alçak noktalar arasındaki dikey mesafedir.	$R_t = R_p + R_v$	Bu maksimum yükseklik bir yüzeyin genel pürüzlülük tanımlarının yapılmasında oldukça kullanışlıdır.

Çizelge 1.10. (Devam)

R_z değerlendirme alanındaki en büyük on tepe ve vadi ayrımının ortalama profil yüksekliğidir. En büyük tepe yükseklikleri 'H' ve en büyük vadi derinlikleri 'L' için yanda tarafta verilen eşitlikle hesaplanır.	$R_z = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^{10} H_i - \sum_{j=1}^{10} L_j \right]$	R_z küçük valf yuvaları, olukların yüzeyleri ve zeminleri gibi sınırlı erişimli yüzeylerde, özellikle yüksek tepe noktalarının veya derin vadilerin varlığının işlevsel olarak önemli olduğu durumlarda yüzey dokusunu değerlendirmede kullanılır.
R_{sk} çarpıklık yüzey profilinin ortalama çizgiye göre asimetrisinin bir ölçüsüdür. Negatif çarpıklık vadilerin baskın olduğunu gösterirken, pozitif çarpıklıkta tepe profillerinin yaygın olma durumu söz konusu olur.	$R_{sk} = \frac{1}{nR_q^3} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^3$	R_{sk} geleneksel olmayan işleme proseslerinde yüzey karakteristiklerinden yük taşıma kapasitesi ve gözeneklilik gibi özellikler için kullanılır. Negatif eğim, iyi yatak yüzeyi için önemli bir kriterdir.
R_{ku} profil basıklığı ortalama çizginin üstündeki ve altındaki sivrilik dağılımının bir ölçüsüdür. $R_{ku} > 3$ durumu yüksek sivriligi temsil eder, $R_{ku} < 3$ için ise tam tersi bir durum söz konusudur. Mükemmel rastgele dağılım için $R_{ku} = 3$'dür.	$R_{ku} = \frac{1}{nR_q^4} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^4$	Pürüzlülük basıklığının nadir uygulama alanları olsa da mikro üretim teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak kullanım alanlarını artırmaktadır. Yine optik yüzeyler için ve bazen stres kırığı kontrolünde başvurulmuş bir ifadedir.

1.7.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yöntemleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yöntemlerini temaslı ve temassız yöntemler olarak iki grup altında sınıflandırmak mümkündür. Güvenilir kaynaklar endüstriyel anlamda ilk yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin 1930'ların başında gerçekleştirildiğini raporlanmıştır. İlk pürüzlülük ölçüm cihazlarının ise 2 boyutlu profilometre prensibiyle çalışan ve temaslı yöntemi temel alan cihazlar olduğu bildirilmiştir. 3 boyutlu ölçümler gerçekleştiren pürüzlülük alanı temelli cihazların ortaya çıkışı ise bundan yaklaşık yarım asır sonra 1980'lerde gerçekleşmiştir. Beyaz ışık interferometreleri ve 3 boyutlu profilometreler gibi pürüzlülükleri yüzey alanlarını temel alarak ölçen cihazlar bu tarihlerde kullanıma sunulmuştur.

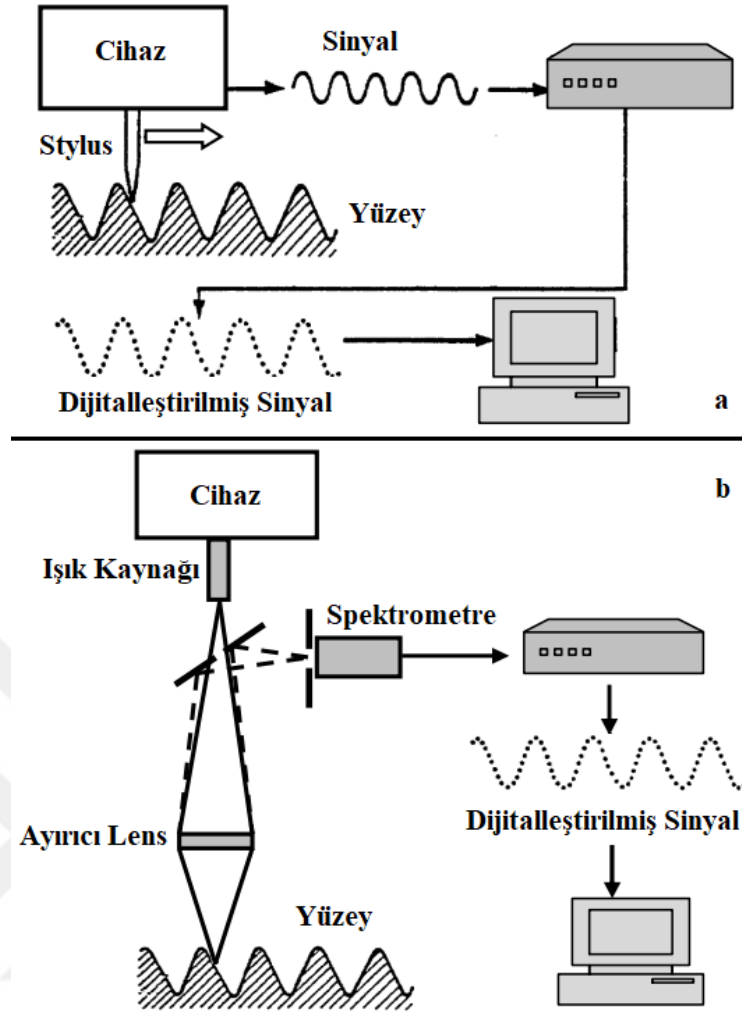
Pürüzlülük ölçüm yöntemleri Çizelge 1.11'de temaslı ve temassız yöntemler başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Bu yöntemlerin bazıları literatürde karşılık bulmasına rağmen oldukça dar uygulama alanlarına sahiptir veya kullanımları belirli bölgelerle sınırlı kalmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi pürüzlülük ölçüm cihazları ve yöntemleri başlangıçta iğneli temaslı mekanik metotları temel almıştır. Fakat günümüzde en yaygın kullanılan yöntemler temassız optik ve mikroskobik metotlardır. Optik ve mikroskobik 3 boyutlu yüzey ölçümlerine geçiş geleneksel iğneli mekanik ölçümlerin yeterli doğrulukta veya hiç ölçemediği günümüz teknoloji ürünlerinin ortaya çıkışı nedeniyle oldukça önemlidir. Bu ürünlerin yüzey özelliklerinin hassas biçimde ölçülmesi ve elde edilen verilerin nitelikli değerlendirilmesi, minyatürleşen cihazların yüksek performans ve değişen fonksiyon talepleri nedeniyle daha da önem kazanmaktadır.

Ölçülmekte olan yüzeyle mekanik temas halinde yükseklik bilgisi elde etmek için tasarlanmış 'Stylus' profilometresi gibi geleneksel pürüzlülük ölçerler aslında pürüzlülük yüksekliğini ve yüzeylerin durumunu başarılı sayılabilecek ölçüde ölçebilmektedir. Fakat nispeten yumuşak malzemeden üretilmiş numuneler, ölçüm ucundan daha küçük olan yüzey özellikleri ve tahribatsız alan ölçümüne olan ihtiyaç temassız ölçüm yöntemlerine talebin artmasına yol açmıştır. Bu talepleri karşılamak için numunenin yüzey özelliklerinin doğru, temassız ve 3 boyutlu ölçümünü sağlayabilen araçlar olarak optik ve mikroskobik temassız pürüzlülük ölçüm cihazları geliştirilmiştir (Brown 2017).

Çizelge 1.11. Pürüzlülük ölçüm yöntemlerinin sınıflandırılması (Prabhakar et al. 2017)

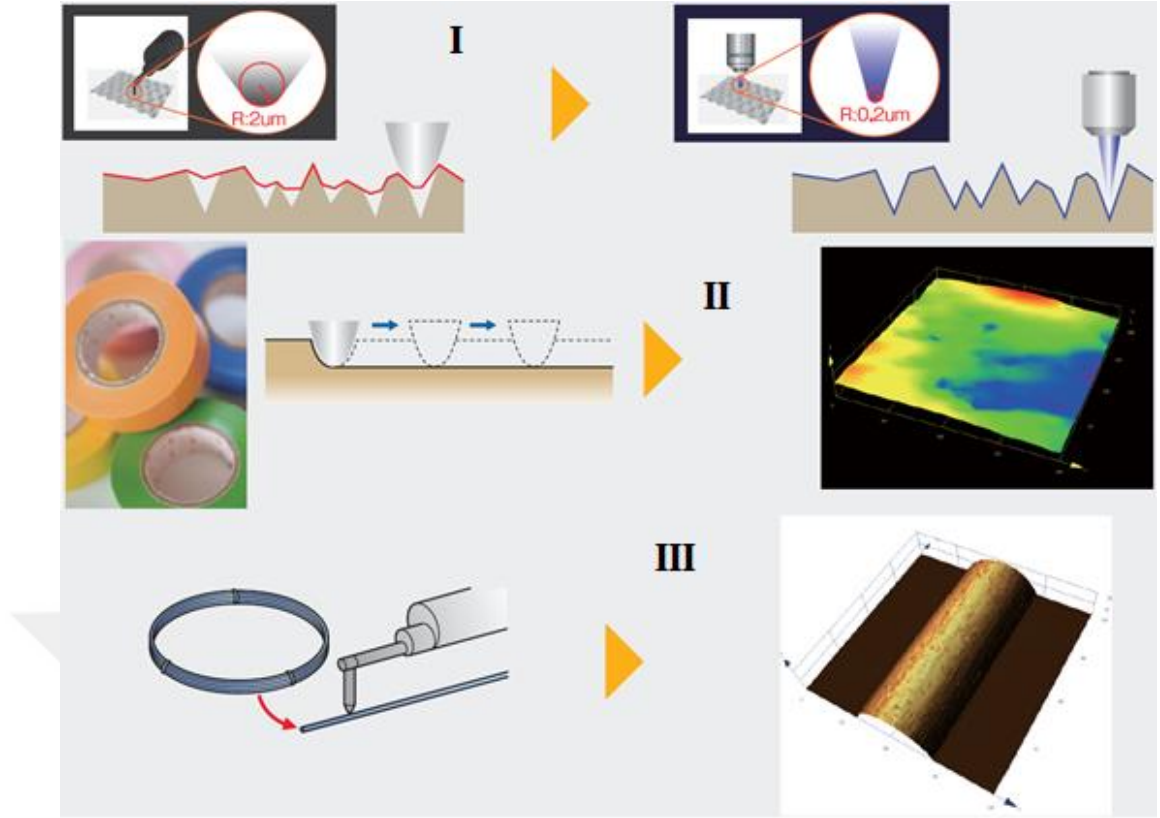
Temaslı Yöntemler	1- İğneli Mekanik Metotlar	
Temassız Yöntemler	1- Optik Metotlar	Geometrik
		Fiziksel
	2- Mikroskopik Metotlar	Taramalı Sonda Mikroskopi
		Taramalı Elektron Mikroskopi
	3- Ultrasonik Metotlar	
	4- Elektriksel Metotlar	
	5- Akışkan Metotları	Hidrolik
		Pnömatik
	6- Makine Görüşü	Fourier Dönüşümü
		Waveler Dönüşümü

Bu noktada profilometri kavramını biraz daha detaylandırmak gerekebilir. Profilometri, bir yüzeyden topografik verileri çıkarmak için kullanılan tekniklere verilen isimdir. Profilometride tek bir nokta, bir çizgi veya alanın taraması yapılabilmektedir. Profilometrinin amacı; yüzey morfolojisi, basamak yüksekliklerini ve yüzey pürüzlülüğünü elde etmektir. Bu işlem ‘Stylus’ tekniğinde olduğu gibi fiziksel bir aygıt kullanılarak yapılabileceği gibi çeşitli ışık kaynakları, optik elemanlar veya mikroskoplar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Şekil 1.29’da temaslı ‘Stylus’ tekniği ve temassız optik görüntüleme tekniği için geliştirilen pürüzlülük ölçüm cihazlarına örnek şematik görseller verilmiştir.



Şekil 1.29. Pürüzlülük ölçüm cihazları şematik görseli (a) temaslı Stylus tekniği ve (b) temassız optik görüntüleme tekniği (Schlegel et al. 2011).

Şekil 1.29'dan da görüleceği gibi profilometre cihazlarının temelde iki elemandan oluştuğu söylenebilir. Bunlar bir algılayıcı ve bir numune tutucudur. Burada algılayıcı numune üzerindeki noktaların konumunu belirlemektedir. Bu cihazlarda ölçüm algılayıcı hareketiyle gerçekleştirilebileceği gibi, numune tutucunun veya her iki elemanın hareketli olduğu durumlar da söz konusudur. 'Stylus' profilometrelerinde yüzeyi algılamak için mekanik bir algılayıcı kullanılmaktadır. Yüzey yüksekliğini elde etmek için bu algılayıcı yüzey boyunca fiziksel olarak hareket ettirilmektedir. Yüzey boyunca tarama yaparken, numunenin algılayıcıya uyguladığı tepki kuvvetini izleyen bir geri besleme döngüsüyle bir sinyal üretilmekte ve sonuçta bu sinyal işlenmektedir. Optik profilometrelerde ise fiziksel bir algılayıcı yerine ışık kaynağı kullanır. Bu tekniğin temelinde ışığı yüzeye 3 boyutu algılayabilecek şekilde yönlendirmek yatmaktadır.



Şekil 1.30. Pürüzlülük ölçümünde temaslı yöntemlerin dezavantajları (Brown 2017)

Şekil 1.30’da temaslı pürüzlülük yöntemlerinin bazı dezavantajlarını açıklayan bir görsel sunulmaktadır. Ayrıca bu dezavantajları temassız yöntemlerin avantajları olarak değerlendirmek de mümkündür. Şekilde verilen ilk maddede de görüleceği gibi geleneksel temaslı algılayıcıların uç yarıçapı genellikle birkaç μm ’nin üstündedir. Bu durum bir skala oluşmasına ve düşük seviyeli yüzey pürüzlülüklerinin kaçırılmasına neden olmaktadır. Oysa optik ve mikroskopik temassız ölçümlerde algılayıcılar çok daha küçük çözünürlüklere inebilmekte ve nanometre seviyelerindeki pürüzlülükleri bile yakalayabilmektedir. İkinci maddede ise temaslı algılayıcıların doğrudan teması konusuna değinilmiştir. Temaslı algılayıcılar yumuşak veya yapışkan özelliklere sahip yüzeylerin hasarına veya sıyrmasına neden olarak doğru verilerin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Optik ve mikroskopik algılayıcılar için ise böyle bir olumsuzluk söz konusu olmamaktadır. Son olarak temaslı algılayıcılar küçük teller ve mikro yapılar gibi kısıtlı alanlardan ölçüm almada sorun yaşamaktadır. Bu algılayıcıları mikrometre mertebesindeki ölçüm alanlarına indirmek son derece zordur. Fakat temassız algılayıcılar düzlemsel bir temelde çalışmakta ve görüntü tabanının hassas konumlandırılma kabiliyeti ölçümlerde büyük kolaylık sunmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Genelde MEMS ve özelde ise MFD teknolojisinin vazgeçilmez elamanları olarak mikrokanallar çeşitli kullanım sahaları, farklı üretim yöntemleri ve kendilerine has özellikleri nedeniyle oldukça geniş bir kitleye hitap etmekte ve çok disiplinli araştırma gruplarının ilgisini çekmektedir. Pek çok kaynak konu ile ilgili literatürün başlangıcı için 1980'lerin başlarını işaret etmektedir. Bu tarihten günümüze kadar, gerçekleşen teknolojik gelişmelere de paralel olarak, mikrokanal üretim ve uygulamalarına olan ilgi ve Ar-Ge faaliyetleri artarak devam etmiştir.

Bu tez kapsamında da ele alınan mikrokanallı ısı alıcılar ve mikrokanallarda termal uygulamalar konusunda kilometre taşı olarak değerlendirilen önemli bir çalışma 1981 yılında Tuckerman ve Pease tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Tuckerman ve Pease (1981) o dönem için yeni sayılabilecek bir teknoloji olan yüksek hız ve yoğunluklu entegre devrelerin soğutulması için yüksek performanslı kompakt mikrokanallı ısı alıcılarını önermiştir. Çalışmada kimyasal ıslak aşındırma yöntemiyle elde edilmiş, yaklaşık 300 µm derinliğe ve 50×50 kesite sahip mikrokanallardan oluşan mikrokanallı ısı alıcılar kullanılmıştır. Önemli bir sonuç olarak 1×1 cm'lik yüzeyi 71 °C civarında bir sıcaklıkta tutarak 790 W/cm²'lik soğutmanın gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Yine o dönemde kullanılan geleneksel soğutma işlemleri için rapor edilen 20 W/cm² civarındaki ısı akıları göz önüne alındığında elde edilen bu sonucun çarpıcılığı daha net anlaşılmaktadır. Bu çalışma neticesinde sunulan sonuçlar araştırmacıların mikrokanallarda ısı transferi uygulamalarındaki potansiyeli fark etmesine neden olmuştur. Mikrokanalların yüksek ısı akısı potansiyeli takip eden yıllarda yüksek güç yoğunluklu bileşen veya sistemlerin soğutulmasında sıklıkla kullanılmıştır. Ayrıca mikrokanallarda akış ve ısı transferinin fiziksel temellerini anlamaya yönelik çok sayıda çalışma yapılmasının da önü açılmıştır (Manay 2014; Ateş 2020).

Termal uygulamalar için mikrokanallar küçük boyutları, düşük ağırlıkları, üretimde az miktarda malzeme gerektirmeleri, kullanımda az miktarda iş akışkanı gerektirmeleri ve yüksek yüzey alanı/hacim oranları nedeniyle oldukça avantajlı bileşenlerdir. Fakat bu elemanların yukarıda sayılan avantajların yanı sıra küçük hidrolik çap, yüksek basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kavitasyon ve akış analizi için kullanılacak

teorilerin belirsizliği gibi dezavantajlar da bulunmaktadır. Ayrıca mikrokannallar konusunda tasarım alanındaki serbestlikler ve üretim yöntemlerindeki çeşitlilikler nedeniyle oldukça geniş bir geometrik özellik havuzundan söz etmek mümkündür. Mikrokannallarda veya mikrokannallı ısı alıcılarında değişen geometrik özellikler akış ve ısı transferini de kuvvetli şekilde etkilemektedir. Bu geometrik özellikler genel olarak kanal kesiti geometrisi, kanal sayısı, kanal yüksekliği, kanal genişliği, en/boy oranı, kanal pürüzlülüğü, kanal içerisine yerleştirilen elemanlar vb. olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında kullanılan iş akışkanı, akış rejimi ve termal koşullar da ısı-akış etkileşimlerinde belirleyicidir. Devam eden bölümde öncelikle mikrokannallardaki akış ve ısı transferi literatürü detaylandırılmış, devamında geometrik bir parametre olarak yüzey pürüzlülüğünün akış ve ısı transferine etkileri irdelenmiştir. Son olarak mikrokannallarda düşük Reynolds akışları ve karma taşınım konusu değerlendirilerek tez çalışmasının ana hatları ortaya konulmuştur (Manay 2014; Mandev 2017).

2.1. Mikrokannallarda Akış, Isı Transferi ve Geleneksel Yaklaşımlar

Mikrokannalların ve mikrokannallı ısı alıcıların akış karakteristiklerini ve termal davranışlarını araştırmak veya termal verimliliğini artırmak için yıllardır kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalarda farklı iş akışkanları, kanal geometrileri ve akış rejimlerinin etkisi çeşitli yöntemler kullanılarak irdelenmiştir. Konu ile ilgili ilk dönem derleme çalışmalarından önemli sonuçlar çıkarılabileceği düşünülmektedir. Bu konuda ilk değerlendirmelerin yapıldığı öncü derleme çalışmalardan biri Obot (2002) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma mikrokannallarda sürtünme ve ısı aktarımını daha iyi anlamaya yönelik bir literatür incelemesi şeklindedir ve yaklaşık 25 deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları içermektedir. Burada verilen değerlendirmede araştırmacı sürtünme faktöründe gözlenen geleneksel teoriden sapmayı ölçüm yöntemlerine ve belirsiz geometrik özelliklere bağlarken bazı net çıkarımlarda da bulunmuştur. Bu çıkarımlar maddeler halinde verilecek olursa; (1) iddia edildiğinin aksine pürüzsüz kanallarda erken türbülans oluşumunu tetikleyecek sonuçlarla karşılaşılmamıştır, (2) laminar akışta Nusselt sayısının, Reynolds sayısı kareköküyle orantılı olduğu görülmüştür ve (3) büyük hidrolik çaplı kanallardan elde edilen geleneksel deneysel korelasyonlar belirli deneysel hataların göz önüne alınmasıyla mikrokannalların ısı transferi tahminleri için kullanılabilir. Fakat üzerinden çok geçmeden bu

2. KAYNAK ÖZETLERİ

çıkarımlara karşı görüşler de oluşmaya başlamıştır. Gerekli değerlendirmelerin yapılabilmesi ve farklılıkların daha net görülebilmesi için Asadi et al. (2014) tarafından hazırlanan ve tek fazlı ısı transferindeki geleneksel korelasyonların özetini içeren bir çizelge aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tek fazlı ısı transferi için önerilen geleneksel korelasyonlar (Asadi et al. 2014).

Kaynak	Koşul Geometri Rejim	Önerilen Korelasyon
Kays and Crawford (1980)	Re < 2200 Dikdörtgen Tam Gelişmiş	$Nu = 8,235 \left(\frac{1 - 1,883 / \alpha + 3,767 / \alpha^2}{-5,814 / \alpha^3 + 4,361 / \alpha^4 - 2 / \alpha^5} \right)$
Incropera and DeWitt (1996)	Re < 2200 Daire Eş Zamanlı Gelişen	$Nu = 1,86 \left(\frac{Re Pr D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14}$
Incropera and DeWitt (1996)	Re < 2200 Daire Termal Gelişen Laminer – Sabit Yüzey Sıcaklığı	$Nu = 3,66 + \frac{0,19 (Re Pr D / L)^{0.8}}{1 + 0,117 (Pr Re D / L)^{0.467}}$
Incropera and DeWitt (1996)	Re > 10000 Daire Tam Gelişmiş Türbülanslı	$Nu = 0,023 (Re)^{0.8} (Pr)^{1/3}$
Incropera and DeWitt (1996)	Re > 10000 Daire Tam Gelişmiş Türbülanslı	$Nu = \frac{(f/8) Re Pr}{K + 12,7 (f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}$
Stephan and Preußer (1979)	0,7 < Pr < 7 RePrD/L < 33 Daire Eş Zamanlı Gelişen– Sabit Yüzey Sıcaklığı	$Nu = 3,657 + \frac{0,0677 (Re Pr D / L)^{1,33}}{1 + 0,1 Pr (Re D / L)^{0,3}}$

Çizelge 2.1. (Devam)

Kaynak	Koşul Geometri Rejim	Önerilen Korelasyon
Shah and London (1978)	Re < 2200 Daire Termal Gelişen Laminer – Sabit Isı Akısı	$Nu = \begin{cases} 1,953(Re Pr D / L)^{1/3} : (Re Pr D / L) \geq 33,3 \\ 4,364 + 0,0722 Re Pr D / L : (Re Pr D / L) \leq 33,3 \end{cases}$
Shah and London (1978)	Re < 2200 Daire Tam Gelişmiş Laminer	$Nu = 4,861 \left(1 - 3,656 / \alpha + 12,821 / \alpha^2 - 27,441 / \alpha^3 \right) + 37,373 / \alpha^4 - 28,365 / \alpha^5 + 8,888 / \alpha^6$
Kakac et al. (1987)	2200 < Re Re < 10000 Daire Geçiş	$Nu = 0,116(Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left(1 + (D / L)^{2/3} \right) \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14}$
Gnielinski (1976)	Re < 5×10 ⁶ Daire Geçiş ve Tam Gelişmiş	$Nu = \frac{(f / 8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7(f / 8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$ $f = \frac{1}{(1.82 \ln(Re) - 1.64)^2}$
Wu and Little (1993)	Re > 3000 Dikdörtgen Laminer	$Nu = 0,00222(Re)^{1,09} (Pr)^{0,4}$
Choi et al. (1991)	Re < 2200 Dikdörtgen Laminer	$Nu = 0,000972(Re)^{1,17} (Pr)^{1/3}$
Choi et al. (1991)	Re < 20,000 Dikdörtgen Türbülanslı	$Nu = 3,82 \times 10^{-6} (Re)^{1,96} (Pr)^{1/3}$
Yu et al. (1995a)	Re < 20000 Dikdörtgen Türbülanslı	$Nu = 0,007(Re)^{1,2} (Pr)^{0,2}$

Çizelge 2.1. (Devam)

Kaynak	Koşul Geometri Rejim	Önerilen Korelasyon
Peng et al. (1995a)	Re < 2200 Dikdörtgen Laminer	$Nu = 0,1165(D/P)^{0,81}(b/w)^{-0,79} Re^{0,62} Pr^{0,33}$
Peng et al. (1995a)	Re > 10,000 Dikdörtgen Türlülanlı	$Nu = 0,072(D/P)^{1,15} [1 - 2,421(z - 0.5)^2] Re^{0,8} Pr^{0,33}$
Admas et al. (1999)	Re > 10000 Daire Türlülanlı	$Nu = Nu_{Gn} + (1 + F); Nu_{Gn} = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$ $f = (1.82 \log(Re) - 1,64)^{-2}; F = 7,6 \times 10^{-5} Re \left(1 - \left(\frac{D_h}{D_0}\right)^2\right)$
Bejan et al. (2013)	Re < 2200 Termal ve Hidrokinamik Gelişen Laminer	$Nu = C' \left(\frac{L/D_h}{Re Pr}\right)^{-0,5}$

Orbot'dan (2002) kısa bir süre sonra yine mikrokanallarda ısı-akış davranışları hakkında kapsamlı bir çalışma Morini (2004) tarafından ortaya konmuştur. Morini (2004) önceki çalışmaya kıyasla çok daha geniş bir örneklem grubu üzerinde çalışmış ve karşıt bazı değerlendirmeler ortaya koymuştur. Morini (2004) genel olarak 1 mm altında hidrolik çaplardaki kanallarda sürtünme faktörü, laminar-türlülan geçişi ve Nusselt sayısı sonuçlarını özetlemekte ve deneysel sonuçların karşılaştırmasını gerçekleştirmektedir. Çalışma neticesinde pek çok çalışma için sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı deneysel verilerinin geleneksel teorilerle uyuşmadığı, ayrıca bir birleri arasında da tutarlılığın olmadığı rapor edilmiştir. Bu alışılmadık tutarsızlıklar (1) seyreltme ve sıkıştırılabilirlik etkileri, (2) viskoz yayılım etkileri, (3) elektro-ozmotik etkiler, (4) sıcaklığa bağlı akışkan özellikleri, (5) pürüzlülük gibi kanal yüzey koşulları ve (6) deneysel belirsizliklere dayandırılmıştır. Morini (2004) tarafından hazırlanan, sürtünme faktörü (Çizelge 2.2) ve ısı transferi (Çizelge 2.3) sonuçları için geleneksel teorilerden sapmaların ve tutarsızlıkların gösterildiği çizelgeler aşağıda sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.2. Mikrokanallarda laminar akış sürtünme katsayısı için deneysel veriler ve geleneksel teorilerden sapma (Morini 2004).

Kaynak	D_h (µm)	Kanal Kesiti	Akışkan	Geleneksel f Teorisinden Sapma
Harley and Bau (1989)	45–67	Dikdörtgen, Yamuk	İzopropanol	↑
Pfalher et al. (1990, 1991)	1,6–65	Dikdörtgen, Yamuk	İzopropanol, Yağ	↓
Urbanek et al. (1993)	5–25	Yamuk	İzopropanol	↑
Rahman and Gui (1993)	79–325	Yamuk	Su	→
Wilding et al. (1985)	26–63	Yamuk,	Biyolojik Sıvı, Su	↑
Peng et al. (1995b,1996)	133–367	Dikdörtgen	Su	↑
Yu et al. (1995a)	19–102	Daire	Su	↓
Jiang et al. (1995)	20–65	Dikdörtgen, Yamuk	Su	↑
Jiang et al. (1997)	35–120	Yamuk	Su	↓
Richter et al. (1997)	18–116	Yamuk	Su	→
Harms et al. (1997, 1999)	404–1923	Dikdörtgen	Su	→
Webb and Zhang (1998)	960–2000	Dikdörtgen	R134a	→
Pfund et al. (1998)	200–900	Dikdörtgen	Su	→
Flockhart and Dhariwal (1998)	50–120	Yamuk	Su	→
Mala and Li (1999)	50–254	Daire	Su	↑
Papautsky et al. (1999)	50–600	Dikdörtgen	Su	↑
Meinhart et al. (1999)	54,5	Dikdörtgen	Su	→
Xu et al. (1999)	50–300	Dikdörtgen	Su	↓
Qu et al. (2000a)	51–169	Yamuk	Su	↑
Sharp et al. (2000)	75–242	Daire	Su	→

Çizelge 2.2. (Devam)

Kaynak	D_h (µm)	Kanal Kesiti	Akışkan	Geleneksel f Teorisinden Sapma
Xu et al. (2000)	30–344,3	Dikdörtgen	Su	→
Ding et al. (2000)	400–600	Dikdörtgen, Üçgen	R134a	↑
Celata et al. (2000)	130	Daire	R114	→
Judy et al. (2000)	20–150	Daire	İzopropanol, Su, Metanol	↓
Li et al. (2000)	79,9–205,3	Daire	Su	→
Yang et al. (2000)	173–4010	Daire	Su, R134a	→
Pfund et al. (2000)	128–521	Dikdörtgen	Su	↑
Debray et al. (2001)	590–2218	Dikdörtgen	Su	→
Jiang et al. (2001)	300	Dikdörtgen	Su	↑
Ren et al. (2001a)	28,1–80,3	Dikdörtgen	Su, KCl Çözeltilisi	↑
Kandlikar et al. (2001)	620–1067	Daire	Su	↑
Gao et al. (2002)	199,2–1923	Dikdörtgen	Su	→
Warrier et al. (2002)	750	Dikdörtgen	FC–84	→
Judy et al. (2002)	47–101	Dikdörtgen	İzopropanol, Su, Metanol	→
Hegab et al. (2002)	112–210	Dikdörtgen	R134a	→
Qu and Mudawar (2002)	349	Dikdörtgen	Su	→
Bucci et al. (2003)	290	Daire	Su	→
Wu and Cheng (2003a)	25,9–291	Yamuk	Su	→
Li et al. (2003)	79,9–166,3	Daire	Su	↑

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.3. Mikrokanallarda tek fazlı ısı transferi için Nusselt sayısı ve geleneksel teorilerden sapma (Morini 2004).

Kaynak	D_h (μm)	Kanal Kesiti	Akışkan	Geleneksel Isı transferi Teorisinden Sapma
Wu and Little (1984)	55,8–72,4	Yamuk	Azot	↑
Choi et al. (1991)	3–81	Daire	Azot	↑
Yu et al. (1995b)	19–102	Daire	Su ve Azot	↑
Rahman and Gui (1993)	176–325	Yamuk	Su	↑
Peng and Wang (1993)	646	Dikdörtgen	Su	↓
Wang and Peng (1994)	311–747	Dikdörtgen	Su ve Metanol	↓
Peng et al. (1995a)	311–646	Dikdörtgen	Metanol	↓
Peng et al. (1996)	133–367	Dikdörtgen	Su	↓
Peng and Peterson (1995)	311–747	Dikdörtgen	Su ve Metanol	↓
Peng and Peterson (1996)	133–367	Dikdörtgen	Su	↓
Acosta et al. (1985)	369–990	Dikdörtgen	Helyum	→
Harms et al. (1999)	404	Dikdörtgen	Su	→
Cuta et al. (1996)	425	Dikdörtgen	R124	↑
Ravigururajan et al. (1996)	425	Dikdörtgen	R124	↑
Nguyen et al. (1996)	690	Yamuk	Su	↑
Adams et al. (1998a)	102–1090	Daire	Su	↑
Adams et al. (1999b)	>1200		Su	→
Tso and Mahulikar (2000)	717–741	Daire	Su	↓
Celata et al. (2000)	130	Daire	R114	↑
Qu et al. (2000b)	62–169	Yamuk	Su	↓

Çizelge 2.3. (Devam)

Kaynak	D_h (μm)	Kanal Kesiti	Akışkan	Geleneksel Isı transferi Teorisinden Sapma
Rahman (2000)	299–491	Dikdörtgen	Su	↑
Debray et al. (2001)	590–2218	Dikdörtgen	Su	↓
Jiang et al. (2001)	300	Dikdörtgen	Su	↑
Kandlikar et al. (2001)	620–1067	Daire	Su	↑
Gao et al. (2002)	199,2–1923	Dikdörtgen	Su	↓
Qu and Mudawar (2002)	349	Dikdörtgen	Su	→
Warrier et al. (2002)	750	Dikdörtgen	FC-84	→
Bucci et al. (2003)	290	Daire	Su	→
Wu and Cheng (2003a)	69,2–160	Yamuk	Su	→

Yukarıda verilen derleme çalışmaları mikrokanaallarda ısı transferinin temellerini anlamaya yönelik ilk dönem çalışmaları olarak değerlendirilebilir. Bunun yanında karşıt görüşleri ve çeşitli tutarsızlıkları barındırması açısından da önemlidir. İlk dönem araştırmalarının önerilerine ve literatürdeki tutarsızlıkların ortadan kaldırılmasına yönelik ilgiye paralel olarak mikrokanaallarda ısı transferi literatürü sonraki dönemlerde de gelişmeye devam etmiştir. Son döneme yaklaşıırken pek çok araştırmacı tarafından mikrokanaallarda tek fazlı ısı transferi için farklı iş akışkanlarının, akış rejimlerinin ve geometrik özelliklerin incelendiği çalışmalar görmek mümkündür. Bu çalışmalarda sonraki dönem ısı tutabilecek bazı önemli bulguların ve özel durumlarla sınırlanmış olsa da kullanışlı ampirik bağıntıların elde edildiği görülmektedir. Buna kıymetli bir örnek olarak Salman et al. (2013) tarafından gerçekleştirilen derleme çalışma verilebilir. Bahsi geçen çalışmada araştırmacılar akışkanın türü, Reynolds sayısı ve akış rejimi yönüyle mikrokanal literatürünü detaylandırarak kritik nitelikteki bulguları listelediler ve bir özet tablo oluşturdular. Bu özet tablo Çizelge 2.4’de sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.4. Mikrokanallarda farklı geometri, iş akışkanı ve akış karakteristikleri için önemli bulgular özet tablosu (Salman et al. 2013).

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Wu and Cheng (2003a)	0–100	Su	285–451 L/D Laminer	Reynolds sayısındaki artışla Nusselt sayısının lineere yakın bir davranışta arttığı belirlenmiştir.
Giulio and Paola (2004)	100–1700	R114	50–150 µm Laminer	Yüzey pürüzlülüğünün ısı transferi üzerine etkisi geometrik parametrelere nispeten azdır. Isı transferinde en etkili parametre mikroboru kesit geometrisi olmuştur.
Owhaib et al. (2004)	50–400 kg/m ² s Kütle akısı	R134a	0,862–1,7 mm Laminer	Daha küçük çaplı kanallarda ısı transfer katsayısının daha yüksek olduğu ve sistem basıncındaki artışın ısı transfer performansını arttırdığı gözlenmiştir.
Lelea et al. (2004)	800 ile sınırlı	Saf su	0,1–0,5 mm Laminer	Su akışı için incelenen kanal çaplarında geleneksel teorilerin uygulanabilirliği vurgulanmıştır.
Ji et al. (2004)	0,001–100	Hava	L=1–100 µm Laminer	Ortalama Poiseuille sayısı yalnızca pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla değil aynı zamanda pürüzlülük elemanları arasındaki mesafenin azalması ile de artmıştır.
Kohl et al. (2005)	5–19000	Su ve Hava	25–100 µm Laminer ve Türbülanslı	Sonuçlar mikrokanallardaki sürtünme katsayılarının, geleneksel kanal verileri kullanılarak tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Lee et al. (2005)	300–3500	Deiyonize Su	106–307 μm Laminer	Mikrokanallarda ısı transfer katsayısının debiye bağlı olduğu ve azalan kanal boyutuyla arttığı belirlenmiştir.
Zhu and Liao (2006)	–	Hava	– Laminer	Dikdörtgen ve üçgen kesitli mikrokanallarda Nusselt sayısı aynı termal sınır koşullara sahip geleneksel kanallara göre daha düşük olduğundan bahsedilmiştir.
Celata et al. (2006a)	300 ile sınırlı	Demineralize Su	70–326 μm Laminer	126 μm 'den düşük çap değerlerinde 64/Re'den oldukça büyük sürtünme katsayısı değerleriyle karşılaşmıştır.
Celata et al. (2006b)	50–3138	Demineralize Su	50–528 μm Laminer ve Türbülanslı	Nusselt sayısı çap değerinin azalması ile azalmıştır
Roland et al. (2006)	200–8000	Demineralize Su	700–200 μm Laminer ve Türbülanslı	Mikro ölçekte laminer akış için Nusselt sayısında bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir.
Shen et al. (2006)	162–1257	Deiyonize Su	W=300, H=800 μm Laminer	Nusselt sayısı geleneksel teori tahminlerinden düşük kalmıştır. Bu durumdan en/boy oranı ve yüzey pürüzlülüğü sorumlu tutulmuştur.
Wojtan et al. (2006)	400–1600 $\text{kg/m}^2\text{s}$ Kütle akısı	R134a ve R245fa	0,5 ve 0,8 mm Laminer	Isı transfer katsayısı ile kütle akış, ısıtılmış uzunluk ve kanal boyutları arasında kuvvetli bir ilişki belirlenmiştir.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Liu et al. (2007)	100–7000	Deiyonize Su	242, 315 ve 520 μm Laminer ve Türbülanslı	Nusselt sayısı laminar korelasyonlar ile kabaca uyumludur.
Celata et al. (2007a)	0,8–500	Helyum	30–254 μm Laminer	Sürtünme faktörü Hagen–Poiseuille modeli tahminleriyle iyi bir uyum içerisinde olmuştur.
Qi et al. (2007)	–	Hidrojen	0,531–1,931 mm	Düşük ve orta dereceli ısı akılarında ısı transfer katsayısı artan kütle kalitesiyle artmıştır.
Peng et al. (2007)	1540–2960	Deiyonize Su	230 μm Laminer ve Türbülanslı	Akış karakteristiğinde laminar türbülansa geçiş 1700–1900 Reynolds aralığında gerçekleşmiştir.
Zhou et al. (2007)	20–2400	Deiyonize su	50–1570 μm Laminer	Eksenel yönde Nusselt sayıları sonuçları geleneksel teori tahminlerin uzağında kalmıştır.
Diaz and Schmidt (2007)	–	Su ve Etanol	H=0,3 mm W=12,7mm Laminer	Alt ısı akısının artması ile ısı transfer katsayısında bir artış olduğu belirlenmiştir.
Yang and Lin (2007)	100–10000	Su	123–962 μm Laminer ve Türbülanslı	Toplam ısı girişindeki ısı kaybı, iç çapa ve Reynolds sayı değerlerine bağlı değişmiştir.
Wang and Wang (2007)	1–500	–	–	Duvar pürüzlülüğünün basınç düşümüne etkisi belirlenmiştir. Basınç düşümü artan yüzey pürüzlülüğü ile artmıştır.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Ngo et al. (2007)	250–2500	CO ₂	1,09 mm Laminer	Isı değiştiricilerinde basınç düşüm katsayısı analizi yapılmış ve S–şekilli kanatların zikzak kanatlara göre 4–5 kat daha az basınç düşümüne neden olduğu belirlenmiştir.
Tang et al. (2007a)	3–6300	Azot ve Helyum	52–300 µm Laminer	Mikrokanallardaki yüzey pürüzlülüklerinin sürtünme katsayısını doğrudan etkileyeceği belirtilmiştir.
Niazmand et al. (2008)	10–200	Hava	W/H=0,25–2 Laminer	Tam gelişmiş olmayan hız profilleri ve sıcaklık sıçramaları neticesinde, giriş bölgesi ısı transferi ve sürtünme katsayısında düşüş gözlenmiştir.
Mlcak et al. (2008)	50–400	Su	85,6 µm Laminer	Hidrolik giriş uzunluğunun artması ile sürtünme katsayısında lineer bir artış gözlenmiştir.
Koo ve Kleinstreuer (2008)	20–2000	İzopropanol, Su ve Metanol	50 µm Laminer	Viskoz yayılım, akış alanındaki sürtünme katsayısı ölçümlerini büyük oranda etkilemiştir.
Park and Punch (2008)	69–800	Deiyonize Su	106–307 µm Laminer	Belirtilen parametreler sınırları dahilinde konvansiyonel akış teorilerinin kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.
Harirchian and Garimella (2008)	250–1600 kg/m ² s Kütle akısı	FC–77	W=100–5850 H= 400 µm Laminer	Basınç düşümü ile hem kanal boyutu hem de kütle akışı arasında güçlü bir ilişki gözlenmiştir.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Wang and Cheng (2008)	100–400 kg/m ² s Kütle akısı	Deiyonize Su	155 µm Laminer	Tek bir mikrokanaal içerisindeki kararlı hal kaynama ile ısı transferi buhar kalitesi ile ilişkilendirilmiştir.
Hong and Asako (2008)	14–1829	Hava	10–100 µm Laminer	Mikrokanallarda gaz akışında duvar sıcaklığını belirlemek üzere bir korelasyon hazırlanmıştır.
Ergu et al. (2009)	100–845	Deiyonize Su	W–H–L mm 3,70–0,107–35 Laminer	Mikrokanallarda sürtünme katsayısı hesapları için klasik laminer akış teorilerinin kullanılabileceği belirtilmiştir.
Chen et al. (2009a)	200–1700	Su	100–250 µm Laminer	Kanal boyutların azaltıldığında yoğunlaşma ısı transferinde belirgin bir artış elde edilmiştir.
Chen et al. (2009b)	30–500	Deiyonize Su	40–158 µm Laminer	Üçgen kesit, en yüksek ısı transfer performansı gösteren olmuştur. Trapez kesit ise üçgen kesitliden düşük fakat dikdörtgen kesitliden yüksek performans sergilemiştir.
Hernando et al. (2009)	10–5000	Deiyonize Su	100–200 µm Laminer	Plaka kalınlığı ve plaka malzemesi, mikrokanaal ısı değiştirici tasarımında kritik parametreler olarak belirlenmiştir.
Khadem et al. (2009)	–	Hava	L/H=20 Laminer	Yüksek bağıl pürüzlülüklerde Nusselt sayısı, pürüzlülüğün önemli ölçüde etkilenmiştir.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Mokrani et al. (2009)	100–5000	Su	1–100 μm Laminer ve Türlüanslı	Mikrokanallarda konvansiyonel kanunlar ve korelasyonların doğrudan uygulanabilir olduğu savunulmuştur.
Bertsch et al. (2009)	–	R134a ve R245fa	1,09 ve 0,54 mm	Tek fazlı akış için R134a ve R245fa akışkanlarının ısı transfer katsayıları karşılaştırılmıştır.
Zhang and Fu (2009)	–	Sıvı Azot	0,531 ve 1,042 mm	İki fazlı akış karakteristikleri için mevcut teorik modeller yetersizdir.
Sara et al. (2009)	40–1400	Deiyonize Su	0,20 mm Laminer	Sürtünme faktörü Hagen–Poiseuille modeli ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Sherwood sayısı ise bu model tahminlerinden küçüktür.
Quan et al. (2010)	240	Su	127–173 μm Laminer	Mikrokanallarda ısı transfer katsayısının artan kütle akışı ile arttığı ve hidrolik çapla azaldığı ortaya konmuştur.
Zhang et al. (2010a)	–	Deiyonize Su	W=61, H=272 μm L=15mm Laminer	Mikrokanallı ısı değiştiricisinde, modellerde elde edilen basınç düşümü verilerinin deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.
Agarwal et al. (2010)	–	R134a	0,424–0,939 mm Laminer	Yatay mikrokanallardaki soğutucu R134a için ısı transferi korelasyonları geliştirilmiştir.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Xiong and Chung (2010)	40–2000	Su	50 μm Laminer	Hidrolik çapın Nusselt sayısı ve sürtünme faktöründe arttırıcı veya azaltıcı etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.
Celata et al. (2010)	–	FC-72	480 μm Laminer	Isı transfer katsayısının ısı akısından bağımsızlığına yönelik sonuçlar alınmıştır.
Zhang et al. (2010b)	10–2280	Su	120–528 μm Laminer	Isı transferiyle, duvar–sıvı ısıl iletkenlik oranı arasında hassas bir ilişki olduğu belirlenmiştir.
Wu et al. (2010)	300–900	Su ve Metanol	90,6 μm Laminer	Mikrokanalın kesit geometrisi ile yoğunlaşma akışındaki düzensizlikler arasında ilişki kurulmuştur.
Lelea and Cioabla (2010)	7,2–1684	Su ve FC-70	0,1 mm Laminer	Sürtünme katsayısı ve Poiseuille sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.
Satapathy (2010)	–	Hava	–	Boyutsuz basınç düşümünün Reynolds sayısı ve yüzey pürüzlülüğündeki artış ile arttığı belirlenmiştir.
Sui et al. (2010)	100–800	Su	$L=1,5 \times 10^{-4}$ m Laminer	Akıştaki girdapların artması akışın yönünün değişmesine ve akışta karışma etkisinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple dalgalı mikrokanalların termal performansı düz mikrokanallardan daha iyi olmuştur.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Muhammad et al. (2010)	1000–3000	FC–70, Su ve Helyum	H=300 μm W=100–250 μm	Yüksek Reynolds sayılarında, iş akışkanı olarak su kullanımı, FC–70 ve Helyum kullanımına oranla daha iyi ısıl performans elde edilmesini sağlamıştır.
Kosar (2010)	50–2000	Su	H=200, W=200 μm Laminer	Düşük ısıl iletkenlikte akışın Nusselt sayısının da düşük olduğu gözlenmiştir.
Fang et al. (2010)	–	Su	100–300 μm Laminer	Küçük kanallar, yüksek ortalama ısı akısına sahip olmaları sebebiyle daha elverişli olarak nitelendirilmiştir.
Chiu et al. (2011)	50–1000	Su	W/H=1,67–14,29 Laminer	Isı transfer katsayısındaki artışının yüksek en/boy oranlı mikrokannallarda daha belirgin olduğu rapor edilmiştir.
Megahed (2011)	–	FC–72	248 μm Laminer	Kütle akışının artışıyla kararsızlığın azaldığını gösteren sonuçlar elde edilmiştir.
Asthana et al. (2011)	–	Su ve Yağ	100 μm Laminer	Basınç kaybındaki artışın, ısı transferini arttırdığı belirgin bir biçimde artırdığı vurgulanmıştır.
Wu et al. (2011)	–	R134a, R123, R245fa, R236fa, Azot ve Su	L/D=50–150 Laminer	Su verilerinin %94’ünün ve su harici verilerin %97’sinin tahmininde %30 hatayla kullanılabilecek ampirik ifadeler elde edilmiştir.

Çizelge 2.4. (Devam)

Kaynak	Reynolds Sayısı	İş Akışkanı	Geometri ve Karakteristik	Bulgular
Bogojevic et al. (2011)	82	Su	194 μm Laminer	Kaynama başlangıcının homojen olmayan akış dağılımına neden olduğu bildirilmiştir.
Aziz and Niedbalski (2011)	—	Hava	—	Viskoz dağılım güçlenirken Nusselt sayısının minimum değerine ulaşılmıştır.

Mikrokanallar ve mikrokanallı ısı alıcılarında ısı transfer şartları geniş bir çeşitlilik gösterebilir ve belirli kalıplardan bahsetmek mümkün değildir. Bu nedenle her özel durumun kendi doğası içerisinde araştırılması gerekmektedir. Mikrokanallarda ısı transferinin temel yaklaşımı, akışkanın içinden aktığı geometriler üzerinedir. Kanalın profili, diğer bir deyişle doğrudan hidrolik faktörler ısı verimliliği belirler. Akışın hidrolik çapı, mikrokanalların veya mikrokanallı ısı alıcılarının performansının değerlendirildiği tüm çalışmalar için kritiktir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, mikrokanal için en-boy oranı ve kesit geometrisi gibi özelliklerin uygun şekilde seçilmesiyle ısı verimin artırılması hedeflenmektedir. En-boy oranı ile birlikte malzemenin iletkenliği yani mikrokanal malzemesi de termal direnci azaltmak için hayati bir rol oynamaktadır (Dash et al. 2022).

Xie et al. (2009) kanal boyutlarının, kanal duvar ve taban kalınlığının ve giriş hızının basınç düşüşü, termal direnç ve izin verilen maksimum ısı akışı üzerindeki etkilerini detaylı şekilde incelemiştir. Çalışma sonucunda ısı alıcı tasarımında önemli bir parametre olan basınç düşüşünün kanal geometrisinin güçlü bir fonksiyonu olduğu savunulmuştur. Isı transferi açısından yüksek basınç kaybı olumsuzluğuna rağmen, dar ve derin bir kanalın, geniş ve sığ bir kanaldan çok daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Bu durum mikrokanal literatüründe ağırlıklı olarak bahsedilen bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.

Mikrokanallarda farklı kesit geometrilerinin ve hidrolik çapların ısı transferine etkilerinin incelendiği önemli bir çalışma ise Agarwal et al. (2010) tarafından yürütülmüştür. Çalışmada kare, fiçı, üçgen, dikdörtgen, W şekilli ve N şekilli olarak tanımlanan 6 farklı kesit geometrisinin ısı transferi üzerine etkileri deneysel olarak tartışılmıştır. Kesit geometrisinden kaynaklı keskin köşelerin ısı transferini belirgin şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır. Literatür incelendiğinde yukarıda bahsedilen kesit geometrisi değişikliklerinin değerlendirildiği deneysel ve sayısal araştırmalarda termal performans eğilimleri konusunda birlik görülebilir.

Garg et al. (2014) hidrodinamik olarak tam gelişmiş, tek fazlı ve laminar akış için dikdörtgen, yamuk ve dikdörtgen-yamuk biçimli mikrokanallarda taşınım ısı transferi üzerine önemli bir araştırma yürütülmüştür. Çalışmada kanal kesitleri belirli bir en boy oranında sabitlenerek hidrolik çap için geometrik seçimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikrokanalda soğutma etkinliğini belirlemek için ısı transfer katsayısı ve sıcaklık gradyanları incelenmiştir. Yapılan değerlendirmede yüksek hızlarda tüm kesit geometrileri için ısı transferi performansının çok yüksek oranda yakınsadığı vurgulanmıştır. Buna karşın, düşük pompalama gücünün gerekli olduğu yerlerde, mikrokanallı ısı alıcıların etkinliğini artırmak için trapez kanal kullanımı önerilmiştir.

Kanal kesit geometrilerinin incelendiği bir başka çalışmada ise Jing and He (2019) dikdörtgen, elips ve ikizkenar üçgen gibi farklı kesitlere sahip mikrokanalların hidrolik ve termal performanslarını araştırmıştır. Sonuçlar genel trende benzer şekilde artan hidrolik çapın taşınım ısı transfer katsayısını ve hidrolik direnci düşürdüğünü göstermiştir. Bu literatürde büyük ölçüde kabul gören bir sonuçtur. Buna ek olarak araştırmacılar en yüksek hidrolik direnç ve ısı taşınım katsayısının dikdörtgen kesitli mikrokanalda gözlemlendiğini vurgulamıştır.

Kesit geometrisi ile ilgili genel bir değerlendirme yapılacak olursa, mikrokanallarda veya mikrokanallı ısı alıcılarında yüksek ısı transfer performansı elde edebilmek için, büyük en-boy oranı, küçük hidrolik çap ve keskin köşeler barındıran kesit geometrileri seçmek önerilmektedir. Mikrokanallarda uygun olmayan geometri seçimleri sıcaklık sıçraması, yüksek basınç düşüşü, sürtünme faktörü ve duvar kesme gerilimi çeşitli kayıpların taşınmasına neden olabilmektedir.

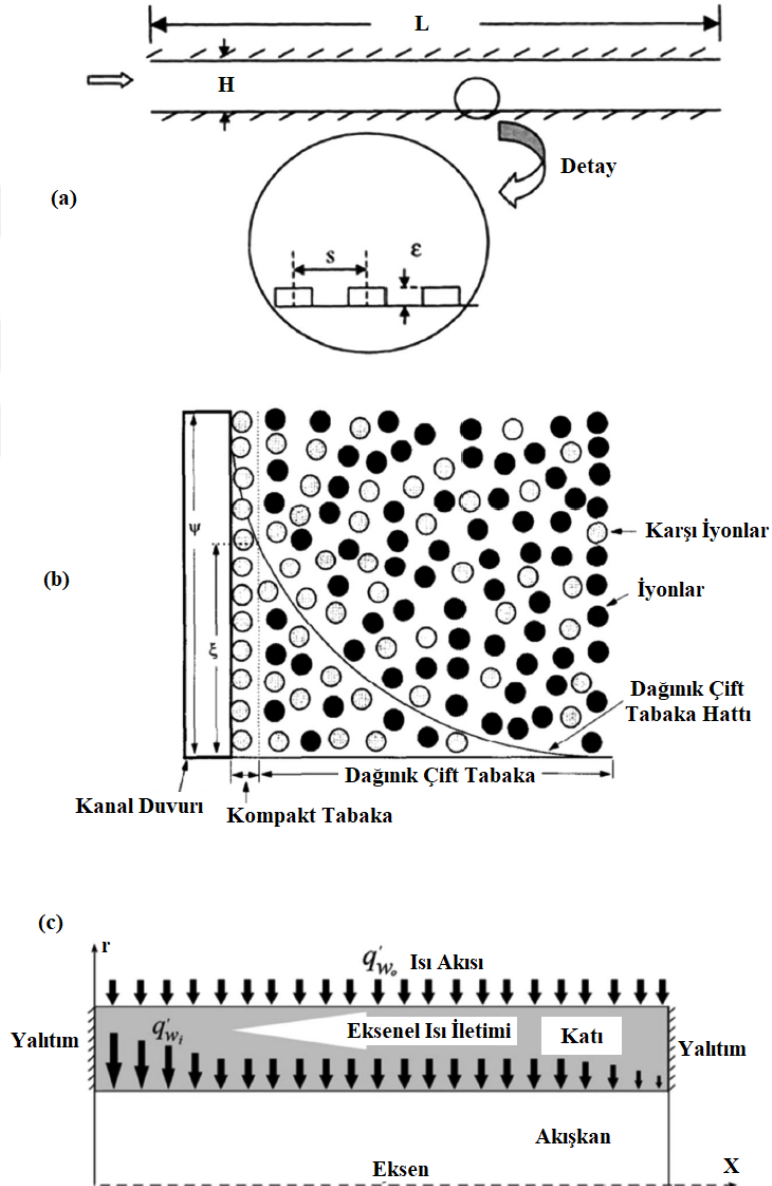
Mikrokanallarda ısı ve akış karakteristiklerinde meydana gelen geleneksel teorilerden sapma ve tutarsızlıklar için ise son dönemde pek çok değerlendirme, tartışma ve yönlendirme yapılmıştır. Genel kabul gören yaklaşım mikro ölçekte makro ölçekte olmayan yeni bir fiziksel fenomenin ortaya çıkmadığıdır. Buna karşın mikrokanallar ile makro boyuttakiler arasında gözlenen fark ve tutarsızlıklar, makro boyutlarda ihmal edilebilir düzeyde iken mikro boyutlarda önem kazanan fiziksel fenomenler sebebiyle oluşmaktadır. Bu fiziksel fenomenler ölçek etkileri olarak isimlendirilmektedir.

Ölçek etkilerinin mikrokanallarda ısı-akış olaylarındaki baskınlıkları sınır koşulları, yüzey koşulları, kanal geometrisi ve Reynolds sayısı gibi şartların değişimiyle önem kazanabilmekte veya etkinliklerini yitirebilmektedir. Ölçek etkilerinin tanımlandığı ve değerlendirildiği önemli bir çalışma Rosa et al. (2009) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen çalışmada ölçek etkileri aşağıda maddeler halinde verilen şekilde sınıflandırılmıştır.

- Giriş Etkileri
- Sıcaklığa Bağlı Özellikler
- Seyreltme Etkileri
- Sıkıştırılabilirlik Etkileri
- Birleşik Isı Transferi
- Viskoz Isınma
- Elektrik Çift Tabaka
- Ölçüm Belirsizlikleri
- Yüzey Pürüzlülüğü Etkileri

Son dönemde ölçek etkilerinin incelendiği bir diğer çalışma ise Coskun and Cetkin (2020) tarafından ortaya konmuştur. Yazarlar hazırladıkları derleme çalışmada önemli ölçek etkilerini; yüzey pürüzlülüğü, elektrik çift tabaka, eksenel ısı iletimi, en-boy oranı ve viskoz ısınma başlıkları altında detaylandırmıştır. Çalışma neticesinde mikrokanallarda ısı ve akış olayları literatürü derinlemesine incelenerek mikro ölçekte fiziksel olayların doğru şekilde anlaşılabilmesi ve literatürdeki tutarlılığın artırılabilmesi için çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Bu öneriler özetle; geometrik parametrelerin mümkün olduğunca kesin tanımlanması, yapılan karşılaştırmaların kabuller ve yöntemler

yönleriyle örtüşüyor olması, mikrokanallarda ısı ve akış olaylarında ölçek etkilerinin göz önüne alınması, ihmal edilen ölçek etkileri ve fiziksel fenomenler bulunuyorsa bunların ihmal edilme kriter ve sebeplerinin açık şekilde bildirilmesi ve akış fiziğine daha çok odaklanılması olarak verilebilir. Ayrıca bu çalışmada Çizelge 2.5’de verilen haliyle mikrokanal literatüründeki çalışmaların ölçek etkileri başlıklarına göre dağılımını içeren faydalı bir çizelge de oluşturulmuştur. Bazı ölçek etkilerinin şematik olarak gösterildiği bir resim ise Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Bazı ölçek etkilerinin şematik gösterimi (a) yüzey pürüzlülüğü (Sun and Faghri 2003), (b) elektrik çift tabaka (Hunter 1981) ve (c) eksenel ısı iletimi (Rahimi and Mehryar 2012; Coskun and Cetkin 2020).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.5. Ölçek etkileri yönüyle mikrokanallarda ısı ve akış çalışmaları (Coskun and Cetkin 2020).

Kaynak	Pürüzlülük	Elektrik Çift Tabaka	Eksenel Isı İletimi	En-Boy Oranı	Viskoz Isıtma
Weilin et al. (2000)	✓				
Zhou and Yao (2011)	✓				
Shen et al. (2006)	✓			✓	
Mala and Li (1999)	✓				
Mala et al. (1997)		✓			
Yang et al. (1998)		✓			
Ng and Poh (2001)		✓			
Huang et al. (2014)			✓		
Kim (2016)				✓	
Wang et al. (2016)				✓	
Kleinstreuer and Koo (2004)	✓				
Kandlikar et al. (2003)	✓				
Ren et al. (2001a)		✓			
Ren et al. (2001b)		✓			
Yang and Li (1998)		✓			
Cole and Cetin (2011)			✓		
Chiu et al. (2011)				✓	
Sahar et al. (2017)				✓	
Koo and Kleinstreuer (2004)					✓
Morini and Spiga (2007)				✓	✓

Çizelge 2.5. (Devam)

Kaynak	Pürüzlülük	Elektrik Çift Tabaka	Eksenel Isı İletimi	En-Boy Oranı	Viskoz Isıtma
Qu et al. (2000b)	✓				
Morini (2006)					✓
Raghuraman et al. (2017)				✓	
Ng and Poh (2002)		✓		✓	
Vainshtein and Gutfinger (2002)		✓			
Tardu (2004)		✓			
Ren and Li (2005)		✓			
Ban et al. (2010)		✓			
Koo and Kleinstreuer (2005)	✓				
Chen et al. (2009c)	✓				
Mishan et al. (2007)			✓		
Natrajan and Christensen (2010)	✓				

Mikrokanallar gibi kompakt geometrilerde giriş etkilerinin oldukça önemli olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebi kanal boyutlarına oranla oldukça yüksek sayılabilecek giriş uzunluklarıdır. Klasik akışkanlar dinamiği teorisinde iki giriş uzunluğu tanımlanmaktadır. Bunlar hidrodinamik giriş uzunluğu (bu uzunluk sonunda hız profili tamamen gelişmiştir ve sabit kalır) ve termal giriş uzunluğudur (bu uzunluk sonunda sıcaklık profili tamamen gelişmiştir). Taşınım mekanizması akışkan akışı ve sıcaklık gradyeninin bileşik etkileşimini içerdiğinden hem hız hem de sıcaklık profili Nusselt sayısı üzerinde önemli düzeyde etkilere sahiptir.

Giriş etkilerinin vurgulandığı deneysel bir çalışmalardan biri Bucci et al. (2003) tarafından ortaya konmuştur. Çalışmada deneyler sabit yüzey sıcaklığı sınır şartlarında ve 200 ila 6000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. İş akışkanı olarak kullanılan demineralize su paslanmaz çelik mikrobörler içersinden akıtılmıştır. Seçilen üç farklı mikrobör çapı (172, 290 ve 520 μm) için Nusselt sayısının artan Reynolds sayısı ile arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca Nusselt sayısında geleneksel teori tahminlerinden %17 ila %55 oranında sapma belirlenmiştir. Bu büyük sapmadan ise termal olarak gelişmekte olan akış koşulları sorumlu tutulmuştur.

Celata et al. (2006) ise mikrobörlerde su akışı için tek fazlı ısı transferi etkileşimlerini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışma da giriş etkilerinin vurgulanması yönüyle oldukça önemlidir. Çalışmada Reynolds sayısı 600 ile 4500 aralığında tutulmuş, mikrobör çapları ise 50 ile 528 arasında farklı ölçülerde seçilmiştir. Çalışmada test bölgesi bir vakum kapsülünün içersine yerleştirilmiş ve test bölgesinden çevreye gerçekleşecek ısı kayıplarının önüne geçilebilmesi hedeflenmiştir. Fakat ışınlama ısı kayıpları, eksenel iletim ve viskoz ısınma ihmal edilmiştir. Çalışmanın neticesinde Nusselt sayısının giriş etkilerinin bir sonucu olarak konum ve Reynolds sayısına bağlı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca hidrolik çapın küçülmesine bağlı olarak giriş bölgesinin kısılmasının Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisini de azalttığı belirlenmiştir. Giriş etkilerini konu alan literatürü genişletmek mümkün olsa da bu konu tez kapsamındaki temel odaklardan biri değildir. Yine de ihmal edilebilir düzeyde giriş etkilerinden bahsedilmesi için Morini (2006) tarafından önerilen Graetz sayısının 10'dan küçük olması gerekliliği not edilebilir. Birkaç mikron seviyesindeki hidrolik çaplarda birkaç milimetre seviyesinde giriş uzunlukları oluşacağı göz önüne alındığında tipik mikrokanal boyutları için giriş etkilerinin hemen hemen her zaman göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

Seyreltme ve sıkıştırılabilirlik etkileri ise kuvvetli olarak gaz akışları için söz konusudur ve bu tez kapsamında detaylandırılmamıştır (Bahrami et al. 2012; Barisik et al. 2015; Şen and Darici 2017). Viskoz yayılım veya viskoz ısınma mikrokanal uzunlukları boyunca akışkan sıcaklığındaki veya yoğunluğundaki büyük değişimler sonucu viskozite gibi termodinamik özelliklerde oluşan değişimden ileri gelmektedir. Literatürde bazı özel durumlarda bu etkinin 50 mikronun altındaki hidrolik çaplarda veya

1000 Reynolds seviyesinin üstündeki akışlarda kuvvetlendiği belirtilmektedir ve sıcaklığa bağlı termofiziksel özelliklerin kullanımıyla kontrol edilmesi önerilmektedir (Kalyoncu and Barisik 2016; Mukherjee et al. 2017). Elektrik çift tabaka etkisi yalnızca iyon içeren sıvı akışları için ve duvar yüzeyinin elektrostatik bir potansiyel taşıdığı durumda söz konusu olmaktadır (Rosa et al. 2009). Bu tez kapsamında incelenen yüzey pürüzlülüğü etkisi ise devam eden bölümde detaylandırılmıştır.

2.2. Mikrokanallarda Akış ve Isı Transferine Yüzey Pürüzlülüğü Etkileri

Yukarıda bahsedilen ölçeklendirme etkilerinden yüzey pürüzlülüğü doğrudan mikrokanalların üretim parametreleriyle ilgilidir ve çok çeşitli karakteristikler gösterebilir. Ayrıca kontrollü değiştirilmesi zordur ve mikrokanallar gibi dar kesitlerden pürüzlülük ölçümlerinin alınması da oldukça güçtür. Bu nedenlerle literatürde mikrokanallardaki yüzey pürüzlülüğünün konusundaki çalışmaların adedi nispeten azdır ve bu çalışmaların da oldukça küçük kontrol grupları üzerinde gerçekleştirildiği görülmektedir. Mikroborularda yüzey pürüzlülüklerinin akış karakteristiklerine etkilerine yönelik öncü deneysel çalışmalardan biri Mala and Li (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. İş akışkanı olarak saf suyun kullanıldığı bu çalışmada Reynolds sayısı aralığı yaklaşık 100–2000 olarak seçilmiştir. Silika ve paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş mikroboru çaplarının ise 50–254 μm arasında değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca mikroborular için ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri $\pm 1,75 \mu\text{m}$ olarak verilmiştir. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünün akış karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve sürtünme katsayısını belirgin şekilde artırdığı rapor edilmiştir.

Devamında yüzey pürüzlülüklerinin farklı yöntemlerle modellenerek incelendiği nümerik çalışmalara rastlamak mümkündür. Bu çalışmaların bir örneği Croce and D'agaro (2005) tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada tam gelişmiş sıkıştırılamaz akış için 2B düzlem ve dairesel mikrokanallardaki akış modellenmiştir. Yüzey pürüzlülükleri ise rastgele farklı geometrik yapılarda çıkıntılar olarak kanallara eklenmiştir. Çalışmanın sonucunda yüzey pürüzlülüklerinin sürtünme katsayısını her durumda artırdığını fakat ısı transferinde olumlu veya olumsuz sonuçlara yol açabileceği öne sürülmüştür. Isı transfer sonuçlarındaki artışın nedeni olarak sürtünme yapılarının tepe noktalarında meydana

gelen bölgesel hız artışları ve bu tepelerin sebep olduğu sınır tabaka etkileşimleri gösterilmiştir. Isı transferindeki azalmadan ise vadi bölgelerinde oluşan devir daim yapıları sorumlu tutulmuştur. Buna bağlı olarak dairesel mikrokanalda yüzey pürüzlülükleri Nusselt sayısını belirgin şekilde azaltırken düzlem mikrokanalda ise arttırmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin farklı geometrilerde modellenmesinin de sonuçları etkilediği belirtilmiştir.

Mikro akışlı elemanlarda yüzey pürüzlülüğünün etkisinin incelendiği diğer bir nümerik çalışma ise Koo and Kleinstreuer (2005) tarafında ortaya konmuştur. Bu çalışmada kanallardaki pürüzlülük gözenekli ortam katmanı olarak tanımlanan bir teknikte modellenmiştir. Laminer tam gelişmiş viskoz akış varsayımıyla sürtünme faktörü ve Nusselt sayısının yüzey pürüzlülükleriyle değişimi incelenmiştir. Kanal kesit geometrisi fark etmeksizin Nusselt sayısında geleneksel değerlendirme ölçütlerinin hem altında hem de üstünde kalan sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca sonuçlar yüzey pürüzlülüğünün sürtünme faktörü üzerindeki etkisinin Nusselt sayısına oranla daha belirgin olduğunu göstermiştir. Paralel plakalı mikrokanallardaki pürüzlülük etkisinin mikroborulara göre daha net olduğu da rapor edilmiştir.

Shen et al. (2006) $300 \times 800 \mu\text{m}$ dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallı ısı alıcısında gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada bağıl pürüzlülüğün %4–6 arasında değerler aldığı bildirilmiştir. Bakır malzemedan imal edilmiş ısı alıcının üzerinde 26 kanal yer almaktadır. Isı alıcı imalatında mikro işleme tekniği kullanılmıştır. Akışkan giriş sıcaklıkları 30°C , 50°C ve 70°C olarak belirlenirken ısıtıcı gücü 140–450 W aralığında tutulmuştur. Çalışmadan elde edilen ısı transferi sonuçlarının geleneksel tahminlerden önemli ölçüde düşük olduğu gözlenmiştir. Hidrolik olarak geliştirilmiş ancak termal olarak gelişen akışın şartlarında boyutsuz eksenel mesafenin artmasıyla Nusselt sayılarında azalma tespit edilmiştir. Li et al. (2007) Mikroborular için laminer sıvı akışındaki ısı ve akış karakteristiklerini incelemek amacıyla deneysel ve sayısal unsurlar barındıran bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışmada geniş bir hidrolik çap aralığında pürüzsüz silika ve pürüzlü paslanmaz çelik mikroborular kullanılmıştır. Bunun yanında Reynolds sayısı aralığı 20 ila 2400 olarak verilirken, bağıl yüzey pürüzlülüğü ise %0,95–2,4 aralığında tutulmuştur. Deneyler neticesinde pürüzsüz mikroborularda sürtünme faktörü için geleneksel tahminlerin

başarılı olduğu vurgulanırken, pürüzlü paslanmaz çelik mikrobörler için belirgin bir sapmanın olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu sapmanın bağıl yüzey pürüzlülüğündeki artış neticesinde daha da kuvvetlendiği de belirtilmiştir. Geleneksel sürtünme faktörü teorisinin kullanımı için %1,5 bağıl pürüzlülük gibi bir sınırlandırma da çalışma neticesinde önerilmiştir. Ek olarak ısı transferi sonuçları düşük Reynolds sayılarında ve yüksek mikrokanal duvar kalınlıklarında geleneksel teorilerden büyük oranda sapma göstermiştir.

Gamrat et al. (2009) gerçekleştirdikleri çalışmada mikrokanaallardaki yüzey pürüzlülüğünü bir mikrokanaalın duvarlarında periyodik olarak dağıtılan paralel yüzeyli elemanlar olarak modellemiştir. Bu çalışmada mikrokanaallarda laminar akışta pürüzlülüğün ısı transferi üzerindeki etkisini belirlemek için sayısal ve teorik yaklaşımlar kullanılmıştır. Burada 3B simülasyonlarda kullanılmak üzere ayırık eleman yaklaşımı ve ortalama hacim tekniği temelinde tek boyutlu bir kaba katman modeli geliştirilmiştir. Çalışma neticesinde artan bağıl pürüzlülükle birlikte literatürde Poiseuille sayısı ve Nusselt sayısında gözlenen artış sayısal simülasyonlarla doğrulanmıştır.

Wagner and Kandlikar (2012) yapısal pürüzlülük geometrilerinin laminar ve türbülanslı akışlardaki sürtünme faktörü üzerindeki etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak ele almıştır. Bu çalışmada mikrokanal yükseklikleri 230–937 μm arasında değişmiştir ve Testler 5–3400 Reynolds sayı aralığında gerçekleştirilmiştir. Teorik ve sayısal bölümlerden elde edilen sonuçlarla pürüzlülük yapısı ve yüksekliğinin kanal uzunluğu boyunca basınç düşüşü üzerindeki etkisini tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Belirli bir pürüzlülük profili için kanal en-boy oranı veya hidrolik çap azaldıkça diğer bir deyişle bağıl pürüzlülük arttıkça, deneysel sürtünme faktörünün belirgin bir şekilde arttığı vurgulanmıştır. Bu artışın pürüzlülük frekansındaki azalmayla daha belirgin hale geleceği de belirlenmiştir. Elde edilen yüksek sürtünme faktörlerinin pürüzlülük elemanları arasındaki devridaim bölgelerinde meydana gelen kararsızlıktan kaynaklandığı iddia edilmiştir.

Dai et al. (2014) pürüzlü mini ve mikrokanaallarda sıvı akışına ilişkin detaylı kaynak taramasına yer verilen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Geniş deneysel literatürün bir özetini şeklindeki bu önemli çalışmada pürüzlülüğünün sürtünme faktörü ve geçiş

karakteristiği üzerindeki etkileri konu edinilmiştir. Bu çalışmada makro kanallardaki %5 seviyesi gibi yüksek bağıl pürüzlülükler mikrokanallar için %1 seviyesine denk tutulmuştur. Ayrıca mikrokanallarda %1'in altındaki bağıl pürüzlülüklerin sürtünme faktörü ve kritik Reynolds sayısı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı savunulmuştur. Kanal kesitleri gibi farklı geometrik özelliklerin ise sürtünme faktörü ve kritik Reynolds sayısı üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada sunulan özet çizelgenin geçmiş dönem çalışmalarındaki tutarsızlıkları ortaya koyması açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir ve Çizelge 2.6 ile 2.7'de verilmiştir. Bu çizelge kesit, iş akışkanı, kanal malzemesi, bağıl pürüzlülük, kanal uzunluğu, hidrolik çap ve akış rejimi bilgileriyle sürtünme faktörü ve kritik Reynolds sayısı sonuçlarını içermektedir.

Pelevic and Meer (2016) bu alanda ilk kez uygulanan sayısal modelleme teknikleriyle üç boyutlu yüzey pürüzlülüklerinin akışkan akışı ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca bu çalışma önerilen modelin literatürdeki diğer sayısal modellerle karşılaştırmasını da içermektedir. Çalışma neticesinde geçmişte önerilen pürüzlülük modellerine eleştiriler yapılarak, bu modellerin mikrokanallardaki basınç düşümü ve ısı transferi analizlerinde kullanılmaması önerilmiştir. Sonuçlar pürüzlülük frekansı ve bağıl pürüzlülük yüksekliği parametreleri kullanılarak irdelenmiş ve ısı-akış olaylarında pürüzlülük yüksekliği etkisinin daha baskın olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca %2.9 bağıl pürüzlülük yüksekliğine kadar gerçekleştirilen analizlerde yüzey pürüzlülüklerinin hem basınç kaybını hem de ısı transferini artırdığı belirlenmiştir. Fakat basınç kayıplarındaki artışın ısı transferine oranla daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Bu başlık altında verilen mikrokanallarda ısı ve akış olaylarına yüzey pürüzlülüğü etkisi için bir değerlendirme yapılacak olursa; konu ile ilgili literatür büyük oranda sayısal çalışmalardan oluşmaktadır, çoğunlukla akış karakteristikleri üzerine yoğunlaşmıştır ve en önemlisi halen tutarsızlıklar barındırmaktadır. Sayısal çalışmalardaki ağırlık, mikrokanallar gibi dar geometrilerde deneysel verilerin alınmasında karşılaşılan güçlüklerden kaynaklanabilir. Gözlenen tutarsızlıkların ise geometrik özelliklerdeki çeşitlilikten ve pürüzlülük yapılarının doğru değerlendirilememesinden ileri geldiği düşünülmektedir. Bir sonraki bölümde literatür taraması daha da daraltılarak düşük Reynolds sayılı akışlar ve karma taşınım ile ısı transferi yönüyle ele alınmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.6. Mini ve mikrokanallarda pürüzlülüğünün akış karakteristiklerine etkisi
özet tablosu; bağıl pürüzlülük, kanal ve akışkan (Dai et al. 2014).

Kaynak	Kanal ve Akışkan	Kesit ve Kanal Adedi	R/D_h (%)	L/D_h
Mala and Li (1999)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,69 – 3,5	122 – 1000
Pfund et al. (2000)	Polikarbonat – Su	Dikdörtgen – 1	0,28 – 0,6	156 – 240
Qu et al. (2000b)	Silisyum – Su	Yamuk – 1	1,2 – 1,7	166 – 546
Hegab (2002)	Alüminyum – R134	Dikdörtgen – 3	0,16 – 0,74	300 – 570
Celata et al. (2002)	P. Çelik – R114	Dairesel – 6	2,65	692
Bucci et al. (2003)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,31 – 0,87	144 – 407
Kandlikar et al. (2003)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,16 – 0,36	290 – 298
Li et al. (2003)	P. Çelik, Silisyum ve Cam – Su	Dairesel – 1	0,01 – 4,3	145 – 714
Baviere et al. (2004)	Silisyum – Su	Dikdörtgen – 1	0,08 – 2,6	140 – 429
Kohl et al. (2005)	Silisyum – Su	Dikdörtgen – 1	0,29 – 1,33	220 – 534
Kandlikar et al. (2005)	Su	Dikdörtgen – 1	0,022 – 7,35	105
Schmitt and Kandlikar (2005)	Su	Dikdörtgen – 1	0,017 – 11	83
Hwang and Kim (2006)	P. Çelik – R134a	Dairesel – 1	0,1 – 0,18	930 – 1786
Hao et al. (2006)	Silisyum – Su	Dikdörtgen – 1	0,012 – 18,74	120 – 149
Rands et al. (2006)	Silisyum – Su	Dairesel – 1	0,03 – 0,04	621 – 1475
Hao et al. (2007a)	Silisyum – Su	Dikdörtgen – 1	3,5 – 6,9	117 – 121

Çizelge 2.6. (Devam)

Kaynak	Kanal Malzemesi ve Akışkan	Kesit ve Kanal Adedi	R/D_h (%)	L/D_h
Hrnjak and Tu (2007)	PVC – R134a	Dikdörtgen – 1	0,14 – 0,35	315 – 340
Tang et al. (2007b)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	4,1 – 5,9	294 – 424
Brackbill and Kandlikar (2007)	Su	Dikdörtgen – 1	0,47 – 16,8	44 – 209
Yang and Lin (2007)	P. Çelik – Su	Dairesel – 7	0,15 – 1,1	370 – 1138
Li et al. (2007)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,95 – 2,4	191 – 804
Brackbill and Kandlikar (2008)	Su	Dikdörtgen – 1	3,7 – 17	44 – 92
Hakamada et al. (2008)	Bakır – Su	Dairesel – 1	0,08 – 2,39	208 – 556
Gamrat et al. (2008)	Silisyum – Su	Dikdörtgen – 1	1,02 – 4,98	128 – 261
Wibel and Ehrhard (2009)	P. Çelik – Su	Dikdörtgen – 1	0,34 – 1,0	197 – 209
Ghajar et al. (2010a)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	1,2 – 3,7	146 – 457
Ghajar et al. (2010b)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,27 – 0,43	305
Tam et al. (2011a)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,21 – 0,65	150 – 400
Tam et al. (2011b)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,21 – 0,43	150 – 300
Singh (2011)	Nikel – Su	Dairesel – 1	0,5 – 1,3	200 – 422
Wagner and Kandlikar (2012)	Su	Dikdörtgen – 1	3 – 18	87 – 337
Li (2012)	P. Çelik – Su	Dairesel – 1	0,01 – 2,94	191 – 600

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.7. Mini ve mikrokanallarda pürüzlülüğünün akış karakteristiklerine etkisi; hidrolik çap, Reynolds sayısı ve sürtünme faktörü (Dai et al. 2014).

Kaynak	D_h (μm)	Re	Sürtünme Faktörü (Deneysel/Hesaplanan)	Kritik Re
Mala and Li (1999)	50 – 254	80 – 2500	1,06 – 1,21	300 – 900
Pfund et al. (2000)	128 – 521	60 – 3450	1,47 – 1,58	1680 – 2214
Qu et al. (2000b)	51 – 168	94 – 1491	1,18 – 1,32	1000
Hegab (2002)	111 – 264	1280 – 13000	1,01 – 1,02	1960 – 2224
Celata et al. (2002)	130	100 – 8000	1,07 – 1,10	1880 – 2480
Bucci et al. (2003)	172 – 520	200 – 6000	1,01 – 1,04	2332 – 2973
Kandlikar et al. (2003)	620 – 1067	500 – 3000	1,01 – 1,10	2000 – 2147
Li et al. (2003)	80 – 450	300 – 2500	0,93 – 1,33	1678 – 2188
Baviere et al. (2004)	389 – 585	8000'e kadar	1,05 – 1,37	2417 – 2822
Kohl et al. (2005)	25 – 100	5 – 2068	0,99 – 1,07	–
Kandlikar et al. (2005)	325 – 1819	200 – 5700	1,03 – 3,89	592 – 2390
Schmitt and Kandlikar (2005)	769 – 1820	3500'e kadar	1,09 – 2,43	506 – 1524
Hwang and Kim (2006)	224 – 792	200 – 10000	1,01 – 1,06	1790 – 1857
Hao et al. (2006)	153 – 191	100 – 2300	1,01 – 1,05	877 – 2142
Rands et al. (2006)	17 – 32	300 – 3400	0,97 – 1,05	2131 – 2569
Hao et al. (2007b)	195	100 – 2500	1,36 – 1,54	1367 – 2259

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.7. (Devam)

Kaynak	D_h (μm)	Re	Sürtünme Faktörü (Deneysel/Hesaplanan)	Kritik Re
Hrnjak and Tu (2007)	70 – 305	112 – 9180	1,00 – 1,09	1570 – 2290
Tang et al. (2007b)	119 – 172	14 – 1890	1,56 – 1,68	1500
Brackbill and Kandlikar (2007)	424 – 2016	210 – 2400	1,00 – 7,45	572 – 2367
Yang and Lin (2007)	123 – 962	50 – 23500	0,94 – 1,04	1955 – 2338
Li et al. (2007)	373 – 1570	80 – 2200	0,92 – 1,10	–
Brackbill and Kandlikar (2008)	970 – 2018	1000 – 15000	–	714 – 2342
Hakamada et al. (2008)	200 – 500	200 – 2000	0,95 – 1,08	1000
Gamrat et al. (2008)	191 – 585	30 – 6000	1,06 – 1,40	1619 – 1964
Wibel and Ehrhard (2009)	128 – 386	300 – 3000	0,97 – 1,06	1812 – 2337
Ghajar et al. (2010a)	337 – 2083	500 – 10000	0,98 – 1,88	1360 – 2414
Ghajar et al. (2010b)	1000 – 2000	800 – 7000	0,99 – 1,04	1815 – 2660
Tam et al. (2011a)	750 – 2000	800 – 13000	0,96 – 1,08	2196 – 2678
Tam et al. (2011b)	1000 – 2000	700 – 7000	0,97 – 1,05	2495 – 2699
Singh (2011)	381 – 1016	500 – 10000	1,02 – 1,12	2277 – 2813
Wagner and Kandlikar (2012)	542 – 1745	5 – 3400	1,05 – 3,66	611 – 2258
Li (2012)	508 – 1600	700 – 7000	0,99 – 1,81	1670 – 2458

2.3. Pürüzlü Mikrokanallarda Düşük Reynolds Akışları ve Karma Taşınım

Mikrokanallarda ısı transferinde belki de en önemli husus akışkanın nasıl tahrik edileceğidir. Mikroakışlı sistemlerde ısı değiştiricileriyle birlikte akış tahrik mekanizmalarının da boyutlarını minimize etmek gerekebilir. Bunun sonucu olarak akış hızları düşebilir ve dolayısıyla taşınım mekanizmasını tekrar değerlendirilmesi gerekebilir. Aslında her zaman var olan doğal taşınım etkileri akış hızlarının azalmasıyla ihmal edilebilir sınırların dışına çıkmaktadır. Bu sebeple düşük Reynolds sayılarında taşınım mekanizmasının zorlanmış yerine karma taşınım olarak değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşımdır. Karma taşınım mekanizmasında doğal taşınım kaynaklı ikincil akışın, zorlanmış akışa göre yönelimi ısı transferinin artmasına veya azalmasına neden olabilmektedir. Bu durum akış yapısını ve ısı transfer mekanizmasını karmaşıktırmaktadır. Ayrıca son yıllarda karma taşınım ile ısı transferi mekanizmasının daha iyi açıklanmasına ve çeşitli korelasyonların oluşturulmasına yönelik ilginin arttığı da görülmektedir (Manay et al. 2019; Meyer et al. 2019; Everts et al. 2020). Bununla beraber yukarıda tartışılan iç akışta ısı transferi literatüründe mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğü konusunda çelişkili sonuçlarla karşılaşmaktadır. Karma taşınım literatürünün geliştirilmesi ve mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğü konusunun daha iyi anlaşılabilmesi ancak detaylı araştırmaların gerçekleştirilmesiyle mümkün olabilir.

Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9’da mikrokanallarda taşınım ile ısı transferinde yüzey pürüzlülüğü etkileri ile alakalı bir özet tablosu sunulmaktadır. Tablo karma taşınım şartlarına yakın nispeten düşük Reynolds sayılarını da içermektedir. Verilen literatür özeti ve ilgili çizelgeler dikkate alındığında mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğünün zorlanmış taşınım ile ısı transferi üzerine yapılmış çalışmalar olduğu görülmektedir. Ancak, yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda mikrokanallarda üretim kaynaklı yüzey pürüzlülüklerinin karma taşınım ile ısı transferine etkilerinin incelendiği deneysel bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Mikrokanallarda ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan yüzey pürüzlülükleri genellikle belirsizlikler içerisinde değerlendirilmiştir. Bu çalışmayla mikrokanallarda karma taşınım ile ısı transferinin deneysel olarak incelenmesi ve yüzey pürüzlülüğü etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu karmaşık mekanizmanın daha iyi anlaşılması konusunda literatürün desteklenmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 2.8. Mikrokanallarda taşınımın ısı transferinde yüzey pürüzlülüğü etkileri özet tablosu; yöntem, geometri, iş akışkanı ve akış rejimi (Pelevic and Meer 2016; Mandev and Manay 2022).

Kaynak	Yöntem	Kanal Geometrisi	Yüzey Pürüzlülüğü	İş Akışkanı	Akış Rejimi
Wu and Cheng (2003b)	Deneyssel	Yamuk ve Dikdörtgen Mikrokanallar (13 Farklı Geometrik Parametre)	$3,26 \times 10^{-5} - 1,09 \times 10^{-2}$ Bağıl Pürüzlülük	Deiyonize Su	Laminer $Re < 1000$
Croce and D'Agaro (2004)	Sayısal	Mikroborular $D = 50-150 \mu m$	%0,0 – 5,3 Bağıl Pürüzlülük Yüksekliği	R114 Pr = 4,77	Laminer $Re = 100-1600$
Koo and Kleinstreuer (2005)	Sayısal	Paralel Plakalı Mikrokanallar ve Mikroborular	%1 – 4 Bağıl Yüzey Pürüzlülüğü	Sıvı Akışı	Laminer Tam Gelişmiş
Grohmann (2005)	Deneyssel	Mikroborular $D = 250$ ve $500 \mu m$	Pürüzlülük r_d ile verilmiş $D = 250 \mu m$ için $r_d = 1,2$ $D = 500 \mu m$ için $r_d = 1,07$ Pürüzsüz Boru için $r_d = 1,0$	Argon	$Re = 4000-10000$
Shen et al. (2006)	Deneyssel	Çoklu Dikdörtgen Mikrokanallar $300 \times 800 \mu m$ 'lik 26 kanal	%4 – 6 Bağıl Yüzey Pürüzlülüğü	Deiyonize Su	$Re = 162-1257$

Çizelge 2.8. (Devam)

Ji et al. (2006)	Sayısal	2B Paralel Plakalı Mikrokanallar	%0 – 6 Bağıl Pürüzlülük Yüksekliği	Azot	2B sıkıştırılabilir gaz akışı Ma = 0,0055–0,202
Li et al. (2007)	Deneyssel ve Sayısal	Mikroborular Kaynaşık Silika D = 50–100 µm Paslanmaz Çelik D = 373–1570 µm	%0,95, 1,4 ve 2,4 Bağıl Yüzey Pürüzlülüğü	Deiyonize Su	Laminer Re = 20–2400
Liu et al. (2007)	Deneyssel	Mikroborular D = 168 ve 399 µm	%2,7 ve 3,5 Bağıl Pürüzlülük	Saf Su	Laminer ve Geçiş Re = 100–3000
Celata et al. (2007b)	Deneyssel	Mikroborular Cam için D = 120–528 µm Çelik için D = 146–440 µm	Pürüzlülük (R_a) Cam için < 0,01 µm Çelik için 0,6 – 2,7 µm	Demineralize Su	Laminer ve Türbülanslı Re = 50–7025
Croce et al. (2007)	Sayısal	Mikroborular D = 50–150 µm	%0,05 – 2,65 Bağıl Pürüzlülük	R114 Pr = 4,77	Laminer Re = 100–1600
Lin and Kandlikar (2012)	Deneyssel	Sinüzoidal Kanal Duvarları $D_h = 0,72–1,81$ mm	Pürüzlülük Yüksekliği 18 – 96 µm	Saf Su	Re < 2500

Çizelge 2.8. (Devam)

Ozalp (2012)	Sayısal	Mikroboru $D = 0,5-1 \text{ mm}$	Boyutsuz Yüzey Pürüzlülüğü $\varepsilon^* = 0,001 - 0,01$	Su	$Re = 10-2000$
Heo et al. (2014)	Deneyisel ve Sayısal	Dikdörtgen Mikrokanallar $D_h = 279 \text{ }\mu\text{m}$	Farklı Aralıklarda (2, 4 ve 8 μm) Sabit Mikrokanatçık Yapıları (8x10 μm)	Deiyonize Su	Laminer $Re = 70-250$
Xing et al. (2016)	Deneyisel	Paralel Dairesel Mikrokanallar ($44 \times D = 400 \text{ }\mu\text{m}$)	$R_a = 0,86, 0,92 \text{ ve } 1,02 \text{ }\mu\text{m}$	Hava	$Re = 150-2800$
Lu et al. (2020)	Sayısal	Kare, Dalgalı ve Oyuklu Kanallar $D_h = 500 \text{ }\mu\text{m}$	0 – 2,19% Bağıl Pürüzlülük	Su	$Re = 500$
Ansari and Zhou (2020)	Sayısal	Dikdörtgen Mikrokanallar $D_h = 450 \text{ }\mu\text{m}$	Pürüzlülük Yüksekliği 15 ve 30 μm	Hava ve Su	$Re = 50-250$
Hsieh et al. (2021)	Deneyisel	Dikdörtgen Mikrokanallar $60 \times 200 \text{ }\mu\text{m}$ ($D_h = 92,3 \text{ }\mu\text{m}$)	Pürüzlülük Yüksekliği 12, 15 ve 20 μm (150 μm 'lik adımlarla)	Deiyonize Su	Düşük Reynolds Sayıları $Re = 7-22$

Çizelge 2.9. Mikrokanallarda taşınım ısı transferinde yüzey pürüzlülüğü etkileri özet tablosu – değerlendirme ve sonuçlar (Pelevic and Meer 2016; Mandev and Manay 2022).

Kaynak	Değerlendirme ve Sonuçlar
Wu and Cheng (2003b)	Artan yüzey pürüzlülüğü ile basınç düşüşü ve Nusselt sayısı artmıştır. Bu artış büyük Reynolds sayılarında, düşük Reynolds sayılarında olduğundan daha belirgindir.
Croce and D'Agaro (2004)	Pürüzlülüğün ısı transferi üzerindeki etkisi genellikle kabul edilebilir deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kalmıştır ve sürtünme kaybindan daha küçüktür. Ayrıca ısı transferi kanalın geometrisine ve pürüzlülüğe de duyarlıdır.
Koo and Kleinstreuer (2005)	Nusselt sayısı yüzey pürüzlülüğü koşullarına bağlı olarak geleneksel değerden yüksek veya düşük olabilmektedir. Bununla birlikte ısı transferi üzerindeki yüzey pürüzlülüğü etkisi, momentum transferinden daha az önemlidir.
Grohmann (2005)	Tek fazlı ısı transferi ile ilgili sonuçlar makro ve mikro boyutlar arasında fiziksel mekanizma olarak bir fark olmadığını belirtmiştir. Geleneksel değerlendirmeye kıyasla küçük borularda ısı transfer katsayılarının artması, yüzey pürüzlülüğünün artan bağl etkisi ile açıklanmıştır.
Shen et al. (2006)	Hem yerel hem de ortalama Nusselt sayılarının, tüm akış hızları için geleneksel teori tahminlerinden önemli ölçüde düşük olduğu belirtilmiştir. Bu durumdan kesit en boy oranı ve yüzey pürüzlülüğü sorumlu tutulmuştur.
Ji et al. (2006)	Bağl pürüzlülük yüksekliğindeki artış hem sıkıştırılabilir ve hem de sıkıştırılmaz akışlar için yerel ısı transferinde belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Pürüzlülük elemanları ortalama Nu sayısını yani ısı transferinin iyileştirmemiştir.

Çizelge 2.9. (Devam)

Li et al. (2007)	Bağıl yüzey pürüzlülüğünün %1,5'ten büyük olduğu durumda deneysel sürtünme faktörü geleneksel teoriden kayda değer bir sapma göstermiştir. $Re > 100$ 'den sonra Reynolds sayısının artmasıyla hem deneysel hem de sayısal sonuçları kademeli olarak geleneksel ısı transferi karakterine yaklaştırmıştır.
Liu et al. (2007)	Reynolds sayısı artışı ile klasik deneysel korelasyonlar kaba mikroboru için tatmin edici tahminler sağlamamıştır. Deneysel Nusselt sayılarının, pürüzlülük ve giriş uzunluğunun etkilerinden dolayı klasik korelasyonların tahminlerinden %25-50 daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.
Celata et al. (2007b)	Bozulma etkisinin önlenemediği pürüzsüz yüzeyli cam borular için, ısı transfer davranışı kaba çelik borulardaki davranışa benzer değildir. Sunulan verilerle bu etki için nicel bir şekilde gösterilmiştir.
Croce et al. (2007)	Nusselt sayısının artışı, ısı transfer hızının saf iletim hızına yakın olduğu pürüzlülük tepelerinin arkasında düşük hız bölgelerinin varlığından dolayı basınç düşüşünden çok daha küçük olmuştur.
Lin and Kandlikar (2012)	Isı transfer katsayısının pürüzlülük yapıları tarafından önemli ölçüde artırıldığı gösterilmiştir. Daha yüksek H/D_h oranına sahip kanallarda hem ısı transferinde hem de basınç düşüşünde daha belirgin bir fark elde edilmiştir.
Ozalp (2012)	Yüzey pürüzlülüğünün sıcaklık gradyanları üzerindeki etkisi düşük mikroboru çaplarında ve yüksek ısı akısı durumlarında daha net şekilde görülebilir. Yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi ise yüksek Reynolds sayısı ve düşük mikroboru çaplarında daha belirgin bir hale gelmektedir.

Çizelge 2.9. (Devam)

Heo et al. (2014)	Mikro kanatlı yüzeyler için taşınım ısı transferinin bir ölçüsü olarak Nusselt sayıları kanatçık aralığının artmasıyla azalmıştır. Ayrıca pürüzsüz yüzeye göre Nusselt sayısında 2 µm kanatçık aralı için artış elde edilmesine karşın 4 ve 8 µm kanatçık aralıklarında düşüş gözlemlenmiştir.
Xing et al. (2016)	Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayısı 1500 civarındadır ki bu makro kanalların değerinden daha düşüktür. Isı transferinde belirlenen Nusselt sayısı artan Reynolds sayısı ile artmakta ve daha büyük pürüzlülüklerde daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmektedir.
Lu et al. (2020)	Pürüzlülüğün etkisi yereldir ve büyük ölçüde bölgesel akış alanına bağlıdır. Duvara yakın hız gradyanını artırabilecek engellerin bulunduğu kanallarda yani pürüzlü kanallarda akış alanı bu yapıardan büyük oranda etkilenmektedir.
Ansari and Zhou (2020)	Dikdörtgen yüzey pürüzlülüğüne sahip mikrokanallar, daha yüksek adveksiyon seviyesi nedeniyle artan Reynolds sayısına bağlı olarak daha iyi performans vermiştir. Yapılandırılmış yüzey pürüzlülüğüne sahip mikro kanallar elektronik soğutma için ısı dağılımını iyileştirmenin yenilikçi bir yolu olabilir.
Hsieh et al. (2021)	Pürüzlü kanallarda tek fazlı akış durumunda pürüzsüz kanallara göre %16'lık bir ısı transferi artışı gözlenirken bu artış oran çift fazlı akış durumu için çok daha büyük (%38) olmuştur.

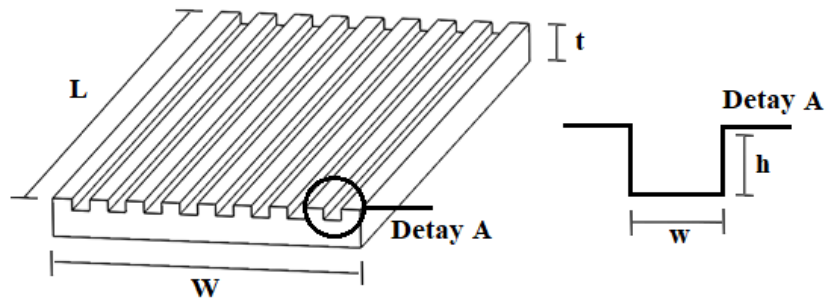
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çoklu Mikrokanallar

Tez çalışması kapsamında, test bölgesinin merkezindeki çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda karma taşınım ile ısı transferi deneysel olarak araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün etkileri yanında mikrokanal genişliği ve yüksekliği de geometrik parametreler olarak incelenmiştir. Isı alıcıların üretiminde giriş kısmında detaylı olarak bahsedilen yöntemlerinden mikro dalma elektro erozyon yöntemi kullanılmıştır. Devam eden bölümde çoklu mikrokanallar için seçilen geometrik özellikler, imalat süreci ve yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi konuları detaylandırılmıştır.

3.1.1. Mikrokanalların geometrik özellikleri ve imalatı

Çoklu mikrokanallı ısı alıcılar için ISO 2083 paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Mikrokanallar $L=30$ mm uzunluğunda, $W=12$ mm genişliğinde ve $t=2.3$ mm kalınlığında dikdörtgen prizmalar üzerine dalma elektro erozyon yöntemi ile işlenmiştir. Mikrokanalların genişlikleri (w) $300\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ ve $700\ \mu\text{m}$, yükseklikleri ise (h) $300\ \mu\text{m}$ ve $450\ \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Mikrokanalların pürüzlülük değerleri ise ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) cinsinden $1,1\ \mu\text{m}$, $1,8\ \mu\text{m}$ ve $3,0\ \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Isı alıcıların genişliği sabit olduğundan, $300\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ ve $700\ \mu\text{m}$ 'lik mikrokanal genişlikleri sırasıyla 19, 11 ve 8 adet çoklu mikrokanal yerleşimine neden olmaktadır. Isı alıcıların detayları Şekil 3.1'de, hedeflenen geometrik parametreler ise Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Ayrıca Çizelge 3.1 kullanılan 18 adet ısı alıcının numaralandırmasını da içermektedir.



Şekil 3.1. Çoklu mikrokanallı ısı değiştirici parametreleri

Çizelge 3.1. Mikrokanallı ısı alıcılarda hedeflenen geometrik özellikler

No	<i>L</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>w</i> (μm)	<i>h</i> (μm)	<i>D_h</i> (μm)	Kanal Sayısı	<i>R_a</i> (μm)
1	30	12	2,3	300	300	300	19	1,1
2	30	12	2,3	300	450	360	19	1,1
3	30	12	2,3	500	300	375	11	1,1
4	30	12	2,3	500	450	474	11	1,1
5	30	12	2,3	700	300	420	8	1,1
6	30	12	2,3	700	450	548	8	1,1
7	30	12	2,3	300	300	300	19	1,8
8	30	12	2,3	300	450	360	19	1,8
9	30	12	2,3	500	300	375	11	1,8
10	30	12	2,3	500	450	474	11	1,8
11	30	12	2,3	700	300	420	8	1,8
12	30	12	2,3	700	450	548	8	1,8
13	30	12	2,3	300	300	300	19	3,0
14	30	12	2,3	300	450	360	19	3,0
15	30	12	2,3	500	300	375	11	3,0
16	30	12	2,3	500	450	474	11	3,0
17	30	12	2,3	700	300	420	8	3,0
18	30	12	2,3	700	450	548	8	3,0

Yukarıda detayları verilen mikrokanalların imalatları Ankara’da bulunan Hasemek firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Mikrokanallar için seçilen pürüzlülükler dalma elektro erozyon üretim parametrelerinin değiştirilmesiyle kontrol edilmiştir. Daha öncesinde Çizelge 1.6’da verilen beş farklı üretim metoduyla denemeler yapılmış olsa da arzu edilen sonuçlar alınamamıştır. Yüzey pürüzlülüklerine ek olarak mikrokanal imalatları için boyutsal hassasiyet, kanal profilinin şeklinin uygunluğu ve yüzey yapısının düzün dağılımı hedeflenmiştir. Bahsedilen bu üç kritik konu imalatı gerçekleştirilen 18 kanalın karşılaştırılmasının sağlıklı şekilde yapılabilmesi için elzemdir. Üretim yöntemi olarak dalma elektro erozyon yönteminin seçilmesi boyutsal hassasiyet, kanal profilinin şeklinin uygunluğu ve yüzey yapısının düzün dağılımı konularında elde edilen başarılı sonuçlar sebebiyle olmuştur.

3.1.2. Mikrokanalların yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi

Yüzey pürüzlülükleri yaygın olarak R_a , R_p , R_q , R_t vb. ifadelerle değerlendirilir. Bu konuda en sık kullanılan ve bu çalışmada geometrik bir parametre olarak ele alınan pürüzlülük ifadesi ortalama pürüzlülük R_a ’dır. Pürüzlülük Ortalaması (R_a), değerlendirme uzunluğu boyunca profil yüksekliklerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır (Whitehouse 2010). Bu çalışmada, ısı alıcıların boyutları, kanal kesitinin şekli, kanallardaki yüzey yapısı ve pürüzlülük değerlerinin belirlenmesi ve kontrolünde Bruker marka Contour GTK 3D optik profilometre ve Carl Zeiss marka optik mikroskop kullanılmıştır. Optik profilometre ve mikroskop görselleri ve bazı teknik özellikleri sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3’de verilmiştir.



- Z Odaklama Seviyesi: 100 mm
Manuel Z Eksen.
- Z Tarama Seviyesi: 0,1 nm den 10 mm’ye Kadar.
- Optik Montaj Modülü: En Yeni Nesil Çift LED Aydınlatma Kaynağı: Tek Sabit FOV.
- Objektifler: Parfokal: 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x; LWD: 2x, 5x, 10x.
- Sistem Yazılımı: Vision64 Operasyon ve Analiz Yazılımı.

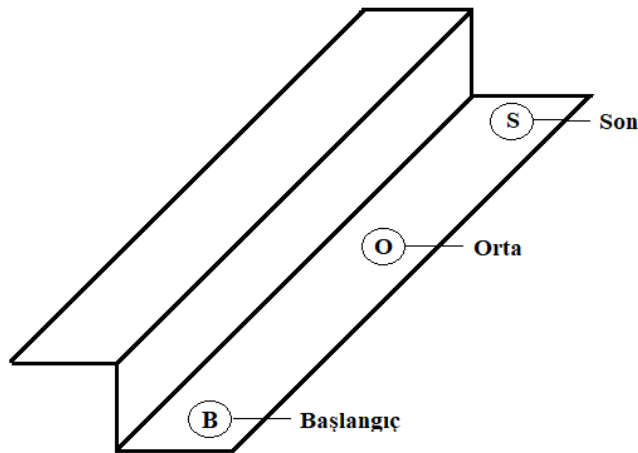
Şekil 3.2. Contour GTK 3D optik profilometre (Anonymous 2021i)



- Işık Kaynağı: LED 10 W.
- Görüş Alanı: 23 mm.
- Optik Sistem: Sonsuz, IC²S.
- Z Odak Aralığı: 11 mm.
- Kontrast Yöntemleri: BF, DF, Ph ve sTL Pol.

Şekil 3.3. Carl Zeiss optik mikroskop (Anonymous 2021j)

Isı alıcısındaki tek bir mikrokanal için yüzey pürüzlülüğü ölçümü kanalın başlangıç (B), orta (O) ve son (S) olmak üzere üç bölgeye ayrılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Pürüzlülük ölçüm noktalarını gösteren şematik resim Şekil 3.4’te sunulmuştur. Ölçümler üçer tekrar ile temassız olarak yapılmıştır. Tek bir kanalda yapılan dokuz ölçümün ortalaması bir kanalın ortalama R_a değeri olarak alınmıştır. Bu ölçümlere her bir ısı alıcının her bir mikrokanalı için devam edilmiştir. Kullanılan 18 çoklu mikrokanallı ısı alıcıda toplamda 684 bölgeden yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak ısı alıcının R_a değeri her bir mikrokanal için elde edilen değerlerinin ortalaması olarak belirlenmiştir.



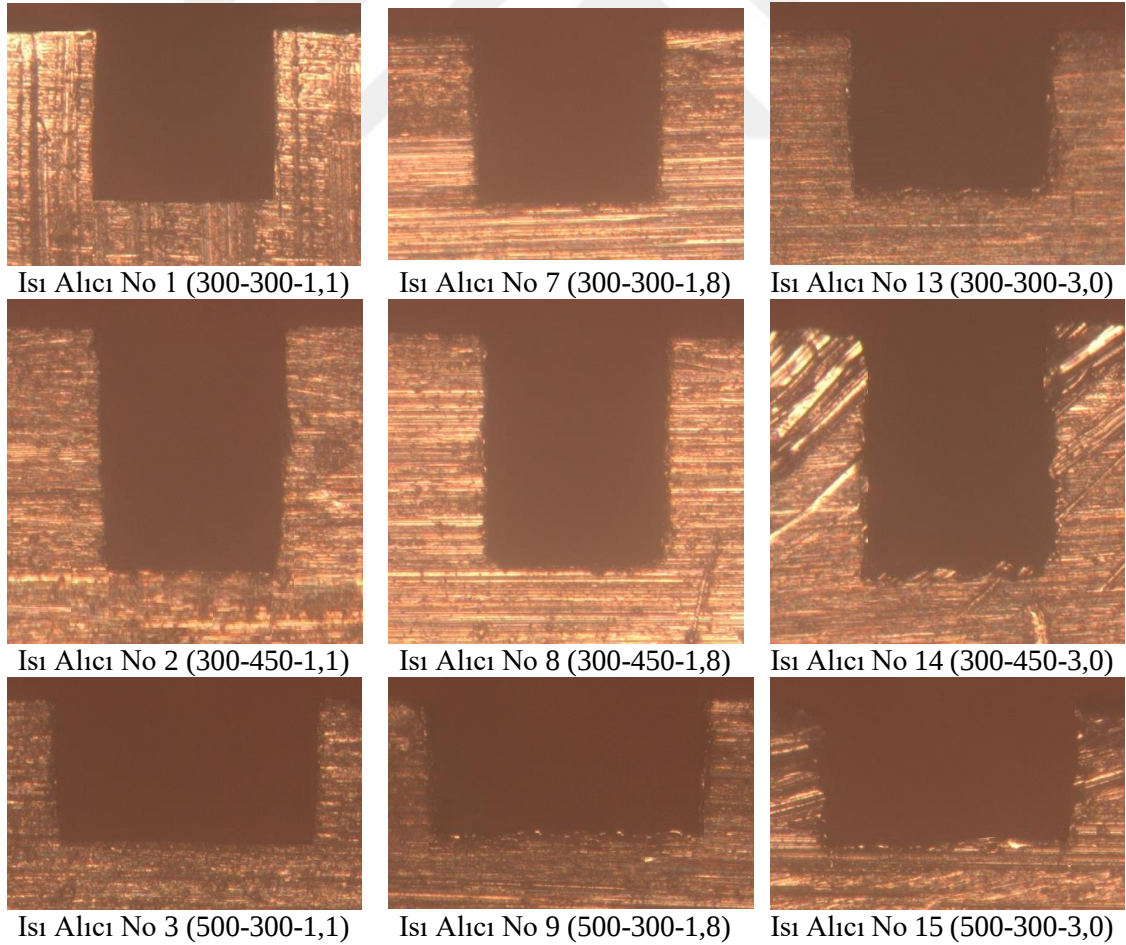
Şekil 3.4. Pürüzlülük ölçüm noktaları şematik görünümü

Çizelge 3.2. Mikrokanallı ısı alıcıların pürüzlülük değerleri (μm)

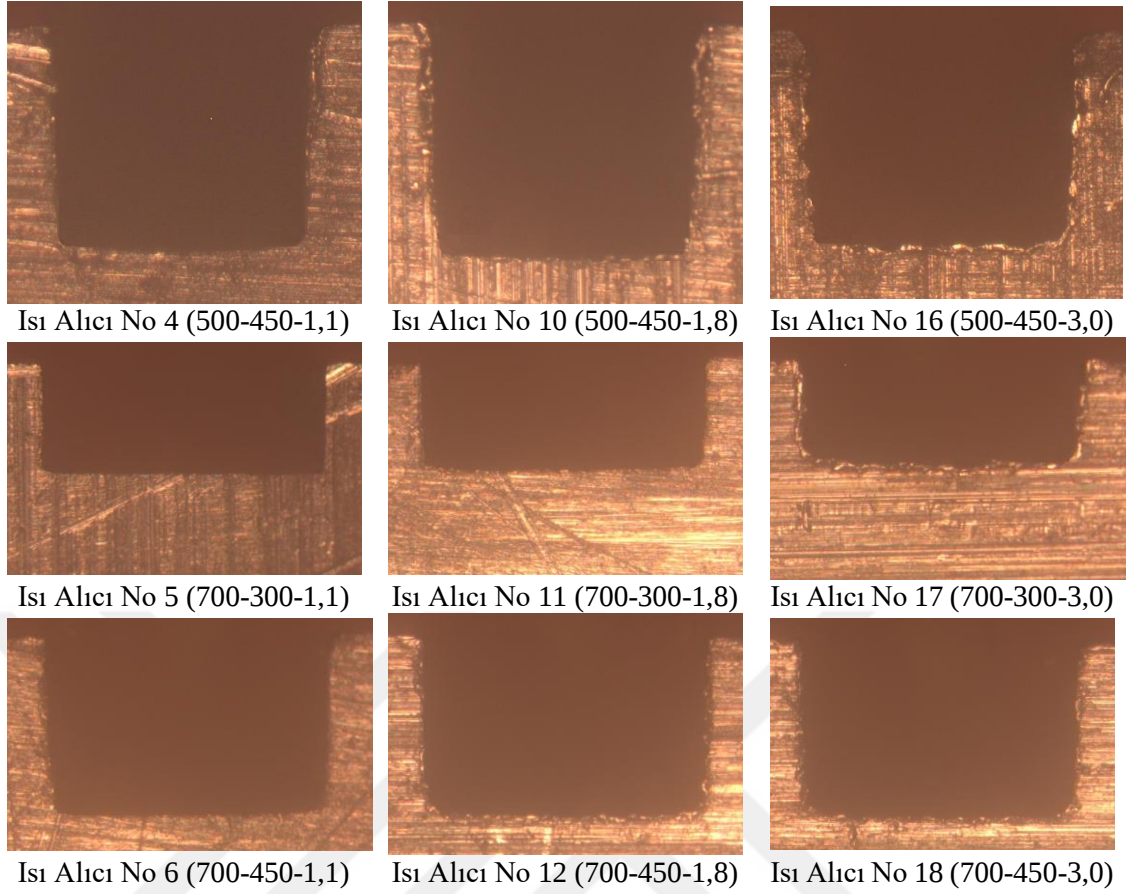
No	Kesit Ölçüleri	Kanal için Min-Max R_a	Isı Alıcı için Ortalama R_a	R_p Aralığı	R_q Aralığı	R_t Aralığı	S_i Değeri
1	w = 300 h = 300	0,83 – 1,28	1,02	3 - 4	1,6 - 1,8	6 - 8	$\approx 1,03$
2	w = 300 h = 450	0,75 – 1,32	1,03				
3	w = 500 h = 300	0,79 – 1,17	1,04				
4	w = 500 h = 450	0,86 – 1,14	1,08				
5	w = 700 h = 300	0,88 – 1,22	1,03				
6	w = 700 h = 450	0,94 – 1,20	1,05				
7	w = 300 h = 300	1,68 – 1,92	1,83	8 - 10	2,0 - 2,3	15 - 18	$\approx 1,11$
8	w = 300 h = 450	1,63 – 1,94	1,81				
9	w = 500 h = 300	1,72 – 1,99	1,80				
10	w = 500 h = 450	1,63 – 2,05	1,79				
11	w = 700 h = 300	1,66 - 1,87	1,78				
12	w = 700 h = 450	1,69 – 1,79	1,75				
13	w = 300 h = 300	2,79 – 3,19	3,03	15 - 18	3,0 - 3,4	27 - 32	$\approx 1,17$
14	w = 300 h = 450	2,74 – 3,25	2,99				
15	w = 500 h = 300	2,81 – 3,23	3,05				
16	w = 500 h = 450	2,76 - 3,33	3,04				
17	w = 700 h = 300	2,85 – 3,16	2,98				
18	w = 700 h = 450	2,87 – 3,15	3,00				

İncelenen tüm mikrokanallı ısı alıcıların ortalama R_a değerleri ve her bir mikrokanaldan elde edilen minimum ve maksimum R_a değerleri Çizelge 3.2'de sunulmuştur. Bu ölçümlerde giriş bölümünde detayları verilen R_p , R_q ve R_t gibi diğer bazı pürüzlülük özellikleri elde edilmiştir. R_p , R_q ve R_t değerlerinin değişim aralıkları da Çizelge 3.2'ye eklenmiştir. Ek olarak Çizelge 3.2 ölçüm yapılan gerçek yüzeyin alanın teorik pürüzsüz yüzey alanına oranı olarak tanımlanan S_i 'nin yaklaşık değerlerini de içermektedir.

Optik profilometre kullanarak alınan yüzey haritaları Vision64 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Alınan yüzey haritalarının örnekleri araştırma bulguları ve tartışma bölümünde detaylı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır. Şekil 3.5'de ise optik mikroskoptan alınan mikrokanal kesit görüntüleri gösterilmektedir. Pek çok üretim yöntemiyle elde edilememesine karşın dalma elektro erozyon yönteminde sağlanabilen düzgün kesit yapısı ve keskin köşeler Şekil 3.5'de açıkça görülebilmektedir (Ateş 2020).



Şekil 3.5. Mikrokanallı ısı alıcılarında kanal kesit görüntüleri [$w - h - R_a$ (μm)]



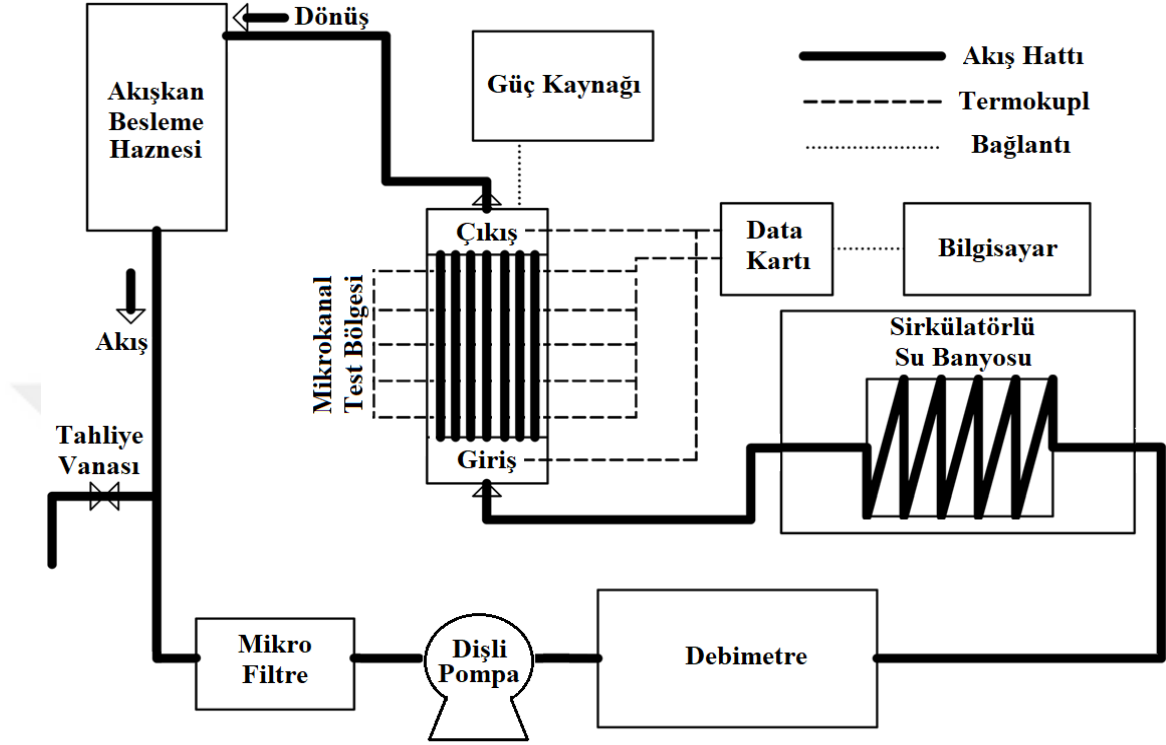
Şekil 3.5. (Devam)

3.2. Deney Sistemi

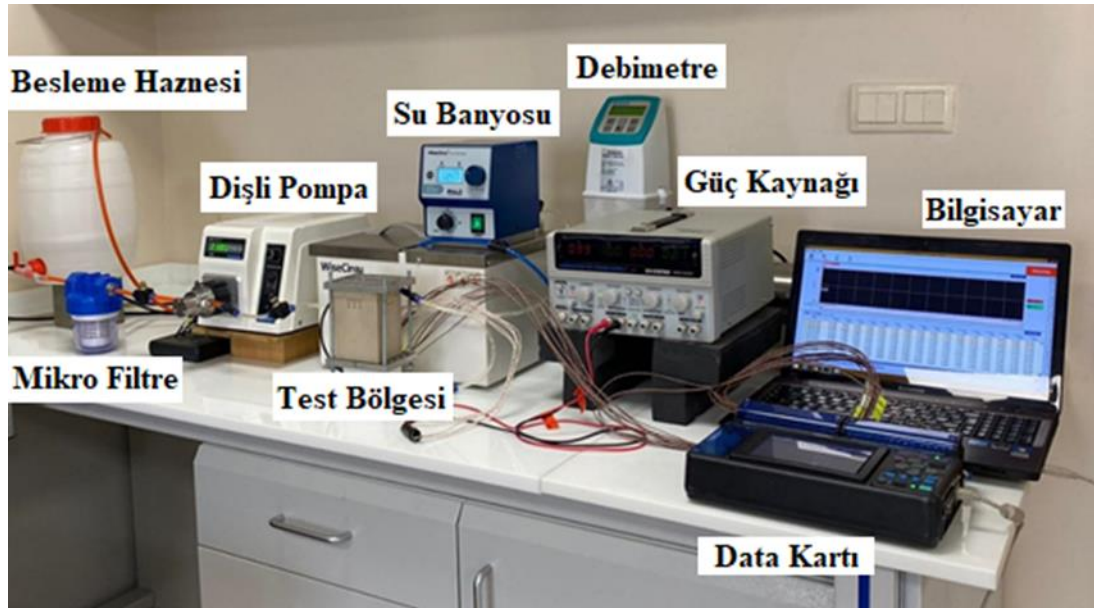
Deney sistemi Erzurum Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulmuştur. Isı transfer deney düzeneğinin detaylı şematik görseli Şekil 3.6'de fotoğrafı ise Şekil 3.7'de sunulmuştur. Akış frekans kontrollü Longer marka WT3000-1JB model mikro dişli pompa kullanılarak sağlanmıştır. Akışkan mikro dişli pompaya girmeden önce filtreleme işlemine tabi tutulmaktadır. Mikro dişli pompa çıkışında bulunan Siemens marka FC-MASS 2100 model debimetre ve SITRANS MASS 6000 model indikatör kullanılarak debi ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Daha sonra akışkan WiseCircu marka WCR-P8 model sirkülatörlü sabit sıcaklık su banyosundan geçirilerek istenilen giriş sıcaklığına ayarlanmakta ve test bölgesine aktarılmaktadır. Test bölgesinden elde edilen sıcaklık verileri Hioki marka LR8402-20 model data kartı üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır. Test bölgesindeki sabit ısı akısı GW Instek marka GPS-4303 model DC güç kaynağıyla sağlanmaktadır. Bu güç kaynağı test bölgesindeki 6 mm çapında, 40 mm uzunluğunda ve 100 W kapasiteli 3

3. MATERYAL ve YÖNTEM

adet kartuş ısıtıcıyı beslemekte kullanılmıştır. Kapalı devre olarak çalışan deney düzeneğinde test bölesinin çıkışı bir dönüş hattı ile akışkan besleme haznesine bağlanmıştır.



Şekil 3.6. Deney düzeneği şematığı



Şekil 3.7. Deney düzeneği fotoğrafı

3.3. Deney Sisteminde Kullanılan Ekipmanlar

Deney sisteminde kullanılan elemanlar, bu elemanların işlevleri ve bazı teknik özellikleri bu bölümde detaylandırılmıştır. Deney düzeneğinde de akışı sağlamak için Longer marka WT3000-1JB model mikro dişli pompa kullanılmıştır (Şekil 3.8). Deney planında oldukça düşük Reynolds sayılarında çalışılması sebebiyle hassas hız ayarına ihtiyaç duyulmaktadır. Mikro dişli pompa bu işlevi yerine getirmesinin yanında darbesiz ve sürekli akış sağlamaktadır. İşte bu özellikler deney sisteminde tercih edilmesinin sebebi olmuştur.



- Kompakt Boyutlu, Sessiz ve Darbesiz Akış Sağlar.
- Hız Doğruluğu: $\pm 1.0\%$.
- Akışkan Sıcaklığı: -24 ila 120 °C.
- Akışkan Viskozitesi: ≤ 200 cSt.
- Hızı ve Hız Çözünürlüğü: 300-3000 rpm ve 1 rpm.

Şekil 3.8. Mikro dişli pompa ve teknik özellikleri (Anonymous 2021k)

Akışkanın debi ölçümü için pompa çıkışında Siemens marka FC-MASS 2100 model debimetre ve SITRANS MASS 6000 model indikatör kullanılmıştır (Şekil 3.9).



- Islak Parça Materyali: Paslanmaz Çelik (1,4435; AISI 316L).
- Proses Sıcaklığı: -50 ila +180 °C.
- Hassasiyet: Kütlesel Akış Oranının %0,1'inden daha Küçük.
- Patentli DFT (Ayrık Fourier Dönüşümü) Algoritma Sayesinde Parazitten Etkilenmez.

Şekil 3.9. İndikatörlü debimetre ve teknik özellikleri (Anonymous 2021l)

Deney sisteminde kullanılan sirkülatörlü su banyosunun görseli Şekil 3.10'da verilmiştir. Farklı deneysel parametrelerin birlikte değerlendirilebilmesi için aynı deney şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bunun sebebi iş akışkanı giriş sıcaklığı içerisine serpantin yerleştirilmiş bir sirkülatörlü su banyosu kullanılarak kontrol edilmiştir. Kullanılan saf su test bölgesine girmeden hemen önce su banyosu içerisinde bulunan serpantinden geçerek su banyosu üzerinde ayarlanan sıcaklık değerine getirilmektedir.



- Kapasite: 22 Litre.
- Isıtma Kapasitesi: 2 kW.
- Sıcaklık Aralığı: +5 °C ila 100 °C.
- Sıcaklık Sensörü ve Kontrolü Doğruluğu: PT100 ve +/- 0,1 °C.
- İç Gövde Malzemesi: 304 Paslanmaz Çelik Malzeme.

Şekil 3.10. Sirkülatörlü su banyosu ve teknik özellikleri (Anonymous 2021m)

Deney sisteminde test bölgesinin merkezinde yer alan çoklu mikrokanallı ısı alıcılara sabit ısı akısı uygulanmaktadır. Sabit ısı akısı şartları test bölgesinde bulunan kartuş ısıtıcılar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kartuş ısıtıcıların konumu ve özellikleriyle ilgili detaylar ilerleyen kısımda sunulmuştur. Bu ısıtıcılar GW Instek marka GPS-4303 model çok kanallı DC güç kaynağı ile beslenmiştir. DC güç kaynağına ait fotoğraf ve cihazın teknik özellikleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



- Dört Kanallı DC Güç Beslemesi.
- Bağımsız Akım ve Gerilim Ölçümü.
- Dalgalanma ve Gürültü: ≤ 1 mVrms.
- Aşırı Yük ve Ters Gerilim Koruması.
- Ölçüm Göstergesi Doğruluğu: $\leq 0.3\%$ (Akım-Gerilim)

Şekil 3.11. Güç kaynağı ve teknik özellikleri (Anonymous 2021n)

Test bölgesi içerisine yerleştirilmiş giriş, çıkış ve yüzey termokuplları Şekil 3.12’de verilen Hioki marka LR8402-20 data kartına bağlanmıştır. Karma taşınım ısı transferi deneyleri boyunca bazı kontrol sıcaklıkları dahil toplam 16 kanal üzerinden sürekli veri alınmıştır. Deneyler esnasında alınan bu veriler data kartı ve bilgisayar bağlantısı üzerinden anlık olarak kaydedilmiştir.



- 30 Analog ve 8 Dijital Kanal Girişi.
- Gerilim ve En Yüksek Çözünürlük: ± 10 mV ila ± 100 V ve 500 nV.
- Sıcaklık ve Termokupllar: -200 °C ila 2000 °C - K, J, E, T, N, R, S, B ve W.
- En Yüksek Örnekleme Hızı: 10 ms.
- Gerçek Zamanlı Bilgisayara, USB Belleğe ya da CF Karta Kayıt.
- Sensör Gerilim Kayma Koruması.

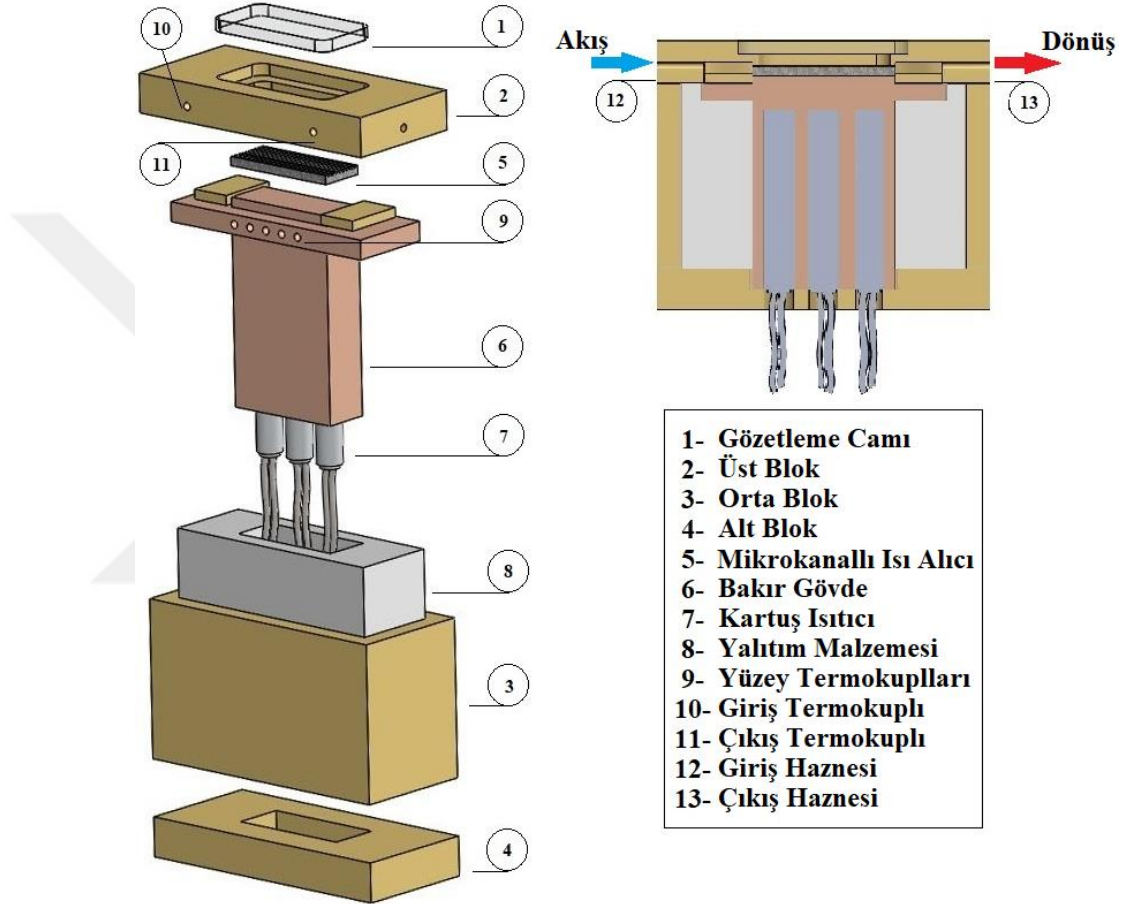
Şekil 3.12. Data kartı ve teknik özellikleri (Anonymous 2021o)

3.4. Test Bölgesinin Detayları

Test bölgesi basit şekilde üst, orta, alt bloklar, gövde ve çoklu mikrokanallı ısı alıcıdan oluşmaktadır. Burada üst blok akışkan giriş-çıkışı ve mikrokanallı ısı alıcılara aktarımını sağlamaktadır. Ayrıca giriş-çıkış haznelerinden sıcaklık ölçümleri de bu bölüm üzerinden yapılmaktadır. Orta blok gövdeyi korumak ve yalıtımını sağlamak için kullanılmaktadır. Alt blok ise gövdenin ve kartuş ısıtıcıların yerleştirildiği bölümdür. Bu üç blok üstün mekanik, kolay ve hassas işlenebilme özellikleri ve düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle Poliariletereterketon (PEEK) malzemeden imal edilmiştir. Çoklu mikrokanallı ısı alıcılar bakır gövde üzerine yerleştirilmiştir. Gövde aynı zamanda kartuş ısıtıcıların da yerleştirildiği kısımdır. Mikrokanallı ısı alıcı ile bakır gövde arasındaki iletim direncini azaltmak için termal macun kullanılmıştır. Benzer şekilde bakır gövde içerisine yerleştirilen kartuş ısıtıcıların yüzeylerine de termal macun uygulaması yapılmıştır.

Yüzey sıcaklıklarının ölçümü için termokupllar bakır gövdenin üst bölümüne gövde üst yüzeyinden 2 mm aşağıya yerleştirilmiştir. Yüzey sıcaklık ölçümleri toplamda 10 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir. Yüzey ve akışkan giriş çıkış sıcaklıklarının ölçümünde T tipi termokupllar kullanılmıştır. T tipi termokuplların çalışma aralığı -200 ila 300 °C aralığında olup tel kalınlıkları 0,5 mm'dir ve elyaf örgü ile yalıtılmıştır. Üretici kataloğunda doğruluk değeri $\pm 0,4$ olarak verilmektedir. Termokupllar sisteme bağlanmadan önce sabit sıcakta tutulan su banyosunda $10-90$ °C sıcaklık aralığında

kalibre edilmiş ve kalibrasyon denklemleri oluşturulmuştur (EK-1). Hesaplamalarda kullanılan sıcaklık verileri bu denklemler kullanılarak düzenlenmiştir. Bakır gövdeden olan ısı kayıplarını azaltmak için bakır gövdenin yüzeyi termal yalıtım malzemesiyle kaplanmıştır. Ek olarak mikrokanaalların hemen üzerine akış kontrolünün yapılabilmesi amacıyla bir gözetleme camı yerleştirilmiştir. Test bölgesinin detaylarının yer aldığı şematik bir görsel Şekil 3.13’de verilmektedir.



Şekil 3.13. Test bölgesinin şematik görünümü

3.5. Deneylerin Yapılışı

Deneyler iş akışkanı olarak seçilen saf su ile gerçekleştirilmiştir. Deney prosedürü su haznesinin belirlenen seviyeye kadar saf suyla doldurulmasıyla başlamaktadır. Daha sonra mikro dişli pompa acıkarak akış sağlanmakta ve sistemdeki hava tahliye edilmektedir. Devamında sirkülatörlü su banyosu giriş sıcaklığına ayarlanmakta ve data kartı üzerinden sıcaklık kaydı başlatılmaktadır. İş akışkanı giriş şartlarına ayarlanma

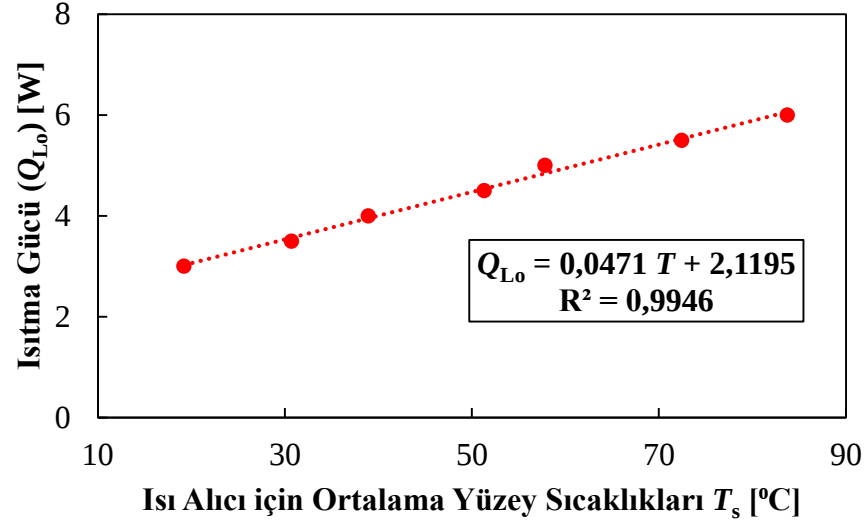
sürecinde iken debimetre üzerinden debi okumaları gerçekleştirilmektedir. Bu sayede arzu edilen Reynolds sayısına karşılık gelen debi değeri pompa ve ayar vanaları yardımıyla ayarlanmaktadır. Akışkan belirlenen giriş sıcaklığına geldiğinde ve arzu edilen Reynolds sayısının ulaşıldığında güç kaynağı çalıştırılmakta ve kanal sabit ısı akısına maruz bırakılmaktadır. Bundan sonra sıcaklık verilerinin kararlı hale gelmesi beklenmektedir. Sonrasında en az 5 dakika kararlı hal verileri kaydedilerek hesap prosedürü için saklanmaktadır. Aynı prosedürün tekrarlanmasıyla farklı parametreler için deneylere devam edilmektedir.

3.6. Verilerin İşlenmesi

Verilerin işlenmesi bölümü ısı kaybının belirlenmesi, ısı transferi hesap prosedürü ve belirsizlik analizi olarak üç başlığa ayrılmıştır. Devam eden kısımda bu başlıklar açıklanarak detaylandırılmıştır.

3.6.1. Isı kaybının belirlenmesi

Verilerin işleme prosedürüne çoklu mikrokanallı ısı alıcıya uygulanan ısıtma gücünün belirlenmesiyle başlanmıştır. Bu ısıtma gücü güç kaynağı kullanılarak sağlanmış ve hesabı Eşitlik (3.2)'de verilmiştir. Deney düzeneğinin termal yalıtımına özen gösterilmesine rağmen, yüksek ısı akısı nedeniyle önemli bir ısı kaybı olacağı tahmin edilmiştir. Bu nedenle, taşınım ile ısı transferinin doğru bir şekilde belirlenmesi için test bölümünde ısı kayıplarının ölçülmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Öncelikle test bölgesine farklı seviyelerde ısıtma gücü uygulanmış ve ısı alıcı yüzey sıcaklıkları sabit hale geldiğinde her bir ısıtma gücü değeri için sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Bu sıcaklık verileri kullanılarak, ısıtma gücü ile yüzey sıcaklıkları arasında bir ilişki kurularak Şekil 3.14'de gösterilen ampirik korelasyon elde edilmiştir (Harirchian and Garimella 2008; Collins et al. 2018). %5'in altındaki ısı kayıpları literatürde genel olarak ihmal edilebilir olarak kabul edilmektedir. Ancak mevcut deney sisteminde, en düşük yüzey sıcaklıklarında bile test bölümündeki ısı kayıpları bu orandan daha yüksek olmuştur. Bu nedenle, güç kaynağından sağlanan toplam ısıtma gücünden ampirik bağıntı ile elde edilen ısı kaybı çıkartılarak her bir durum için taşınım ısı transferi Eşitlik (3.3)'de verildiği gibi hesaplanmıştır (Li et al. 2020; Hsieh et al. 2021).



Şekil 3.14. Test bölgesi için ısı kaybı eğrisi ve denklemi

3.6.2. Isı transferi hesap prosedürü

Isı kaybı eğrisinden elde edilen ampirik eğri denklemi Eşitlik (3.1)'de verilmiştir. Deneyler sırasında elde edilen yüzey sıcaklıklarının ortalamaları aşağıdaki eşitlikte yerine yazılarak öncelikle ısı kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{Lo} = 0,0471 T_s + 2,1195 \quad (3.1)$$

Kartuş ısıtıcılar üzerinden test bölgesine aktarılan ısı, güç kaynağı göstergesinden okunan akım ve gerilim değerlerinin çarpılmasıyla Eşitlik (3.2)'de verildiği haliyle elde edilmiştir.

$$\dot{Q}_{He} = VI \quad (3.2)$$

Taşınımla gerçekleşen ısı transferi Eşitlik (3.2)'den elde edilen ısı güç ve Eşitlik (3.1)'den elde edilen ısı kaybının farkı olarak Eşitlik (3.3)'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{Con} = \dot{Q}_{He} - \dot{Q}_{Lo} \quad (3.3)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısının hesaplanması için ise Eşitlik (3.4)'de verilen Newton'un soğuma yasasından faydalanılmıştır.

$$\bar{h} = \frac{\dot{Q}_{\text{Con}}}{A_s (T_s - (T_i + T_o) / 2)} \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4) kullanılarak hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayısı kullanılarak Eşitlik (3.5)'de verilen ortalama Nusselt sayısı elde edilmiştir (Foo et al. 2018).

$$\text{Nu} = \frac{\bar{h}D_h}{k} \quad (3.5)$$

Reynolds sayısı ise Eşitlik (3.6) ile hesaplanmıştır. Doğal taşınım ile ısı transferinde kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını karakterize eden Grashof sayısı ve Rayleigh sayısı ise sırasıyla Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.8)'de gösterildiği şekliyle elde edilmiştir.

$$\text{Re} = \frac{\dot{m}D_h}{\mu A_c} \quad (3.6)$$

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_s - (T_i + T_o) / 2)D_h^3}{\nu^2} \quad (3.7)$$

$$\text{Ra} = \text{GrPr} \quad (3.8)$$

Ek olarak Eşitlik (3.9)'da laminar iç akış karakterizasyonunda sıklıkla kullanılan Graetz sayısı tanımlanmıştır

$$\text{Gz} = \text{RePr} \frac{D_h}{L} \quad (3.9)$$

Kaldırma kuvvetlerinin atalet kuvvetlere oranı olarak tanımlanan ve ayrıca taşınım mekanizmasının doğal, karma veya zorlanmış olarak tanımlanmasında değerlendirme kriteri olarak kullanılan boyutsuz Richardson sayısı ise Eşitlik (3.10)'da verilmiştir (Manay 2019).

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3.10)$$

Literatürde karma taşınım şartlarında Nusselt sayısı, akışkan tahriki yönünde oluşan zorlanmış taşınım bileşeni ve bu bileşene göre farklı yönlerde oluşabilecek doğal taşınım bileşeninin kombinasyonu olarak Eşitlik (3.11)'de verildiği haliyle tanımlanmıştır. Burada n geometrik bir parametredir ve birçok kaynak en iyi veri eşleşmelerinin $n = 3$ için sağlandığını belirtmişlerdir (Li and Feng 2013; Bergman et al. 2017).

$$Nu^n = Nu_{For}^n \pm Nu_{Nat}^n \quad (3.11)$$

Karma taşınım için analitik sonuçlar incelenecek olursa genellikle bu sonuçların Eşitlik (3.12)'de verilen cebirsel denkleme benzer şekilde ifade edildiği görülmektedir (Oliver 1962; Brown and Thomas 1965; Depew and August 1971). Burada c sabitinin değerinin sabit ısı akısı sınır şartında 2,11 alınması önerilmiştir (Li and Feng 2013).

$$\left(Nu \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} \right)^3 = \left(c \times Gz^{1/3} \right)_{For}^3 + \left(c \times \Phi^{1/3} \right)_{Nat}^3 \quad (3.12)$$

Φ ise doğal taşınım etkilerini içeren ve Grashof, Prandtl, Graetz sayılarının fonksiyonu olan bir parametre olarak araştırmacılar tarafından farklı şekillerde tanımlanmıştır. Bulguların analizinde doğal taşınım etkileri ile zorlanmış taşınım etkilerinin kıyaslanmasında Eşitlik (3.13)'de verilen bu ifadeden faydalanılmıştır (Feng and Li 2013).

$$\Phi = \left(\frac{\text{GrPr}L / D_h}{\text{Gz} + L / D_h} \right) \quad (3.13)$$

3.6.3. Belirsizlik analizi

Fiziksel büyüklükler ölçüldüğünde sonuçlar her zaman bir miktar hata barındırmaktadır. Bir ölçümdeki hata ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Ölçün hataları sistematik ve rastgele hataların toplamından oluşmaktadır. Ölçüm yapılan cihazdan kaynaklanan, operatör veya çevresel koşullar gibi dış etkililerle değişmeyen sabit hatalar sistematik hatalar olarak tanımlanmaktadır. Sistematik hataları cihazların belirli aralıklarla ve doğru yöntemlerle kalibre edilmesiyle azaltılabilir. Aksi durumda kalıcı hale gelmesi söz konusu olmaktadır. Rastgele hatalar ise yapılan ölçüme özgüdür ve büyük oranda dış etkilere bağlıdır. Bu tip hatalar kararsız etkililerden ileri gelir ve ölçümde dağılmalara neden olmaktadır. Rastgele hataların azaltılması için ise ölçüm tekrarının arttırılması önerilmektedir.

Belirsizlik analizi, deneysel ölçümlerde veya türetilen bulgulara hata içeren aralığın tespit edilmesi için uygulanan prosedürdür. Elde edilen bulguların sağlıklı şekilde değerlendirilebilmesi için belirsizlik seviyelerinin saptanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada belirsizlik analiz yöntemi olarak sıklıkla tercih edilen ve kabul gören Kline-McClintock yöntemi (Moffat 1988; Parlak et al. 2022) kullanılmıştır. Bu yöntemde analiz türetilen ifadeyi oluşturan bağımsız değişkenlerin ve bu bağımsız değişkenlerin hata oranlarının Eşitlik (3.14)'de kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

$$\sigma_y = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \sigma_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \sigma_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

Ölçülen değişkenlerin bazıları için doğruluklar: akım, voltaj, uzunluk, sıcaklık ve kütle akış hızı, cihaz kataloglarında verilen teknik özelliklerden elde edilmiştir. Bu parametreler ve doğruluk değerleri Çizelge 3.3'ün sol sütununda yüzde olarak verilmiştir. Türetilen bazı parametrelerin belirsizlik değerleri ise yine Çizelge 3.3'ün sağ sütununda sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Deneysel değişkenlerin belirsizlik analizi

Belirlenen		Türetilen	
Değişken	Doğruluk (%)	Değişken	Belirsizlik (%)
I	0,3	$\dot{Q}$	0,4
V	0,3	A	0,2
T	0,4	Nu	1,4
$\dot{m}$	0,1	Re	1,0
L	0,1	Gr	1,4

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

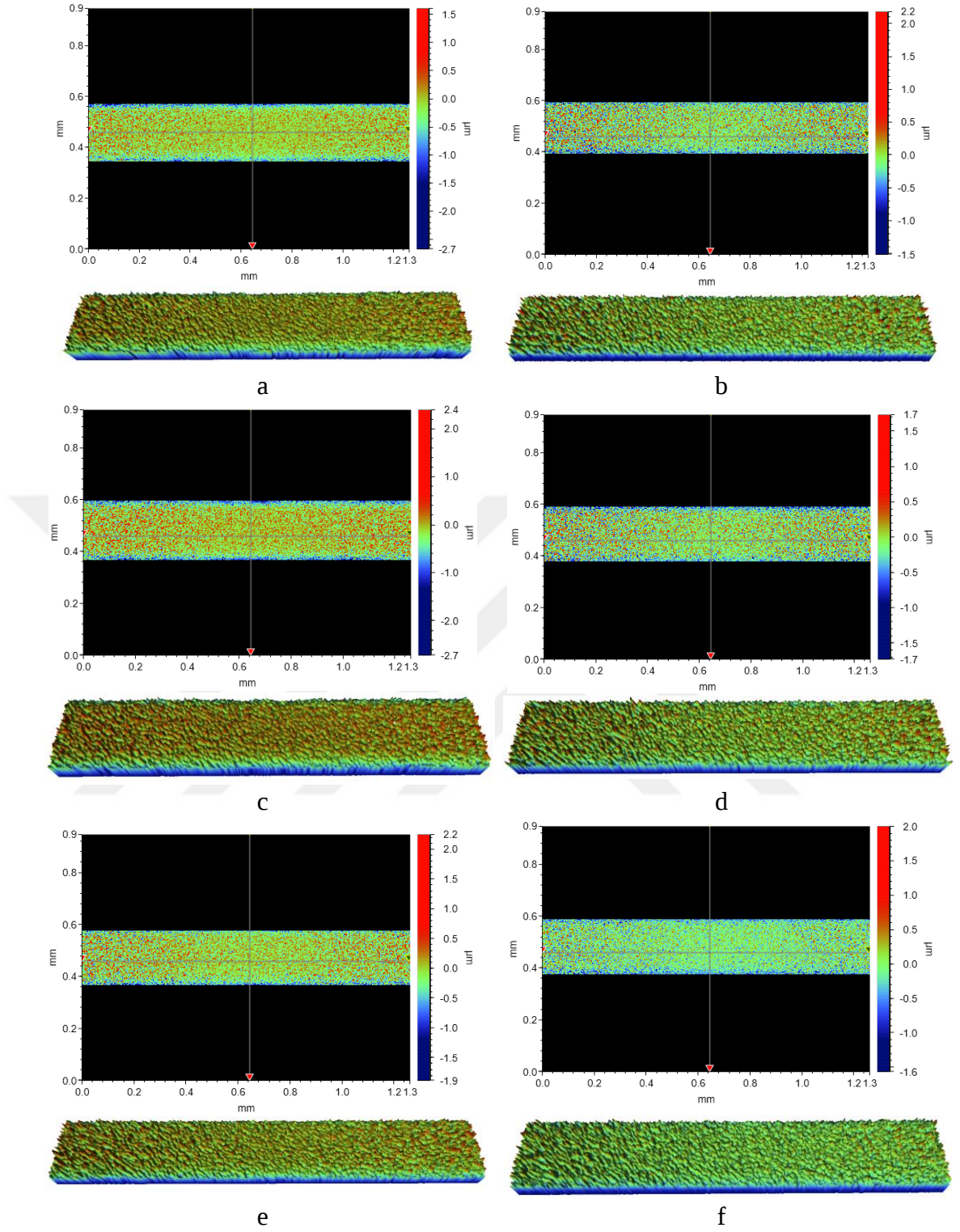
Bu bölümde öncelikle elde edilen yüzey haritaları üzerinde pürüzlülük yapısı, dağılımı ve durumu hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Ardından en düşük pürüzlülük parametresi için elde edilen deneysel ortalama Nusselt sayısı bu konuda önerilen iki farklı ampirik modelden elde edilen verilerle kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Daha sonra ayrı başlıklar altında yüzey pürüzlülüğü ve mikrokanal boyutlarının karma taşınım ısı transferi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Ve son olarak toplam ısı transferinde karma taşınım bileşenlerinin durumları detaylandırılmıştır. Bulgular karma taşınım şartlarını sağlanması için 10–80 Reynolds sayısı aralığında elde edilmiştir. İş akışkanı olarak saf suyun kullanıldığı deneylerde mikrokanallı ısı alıcının tabanına sabit ısı akısı uygulanmıştır.

4.1. Yüzey Haritaları ve Yüzey Pürüzlülük Durumu

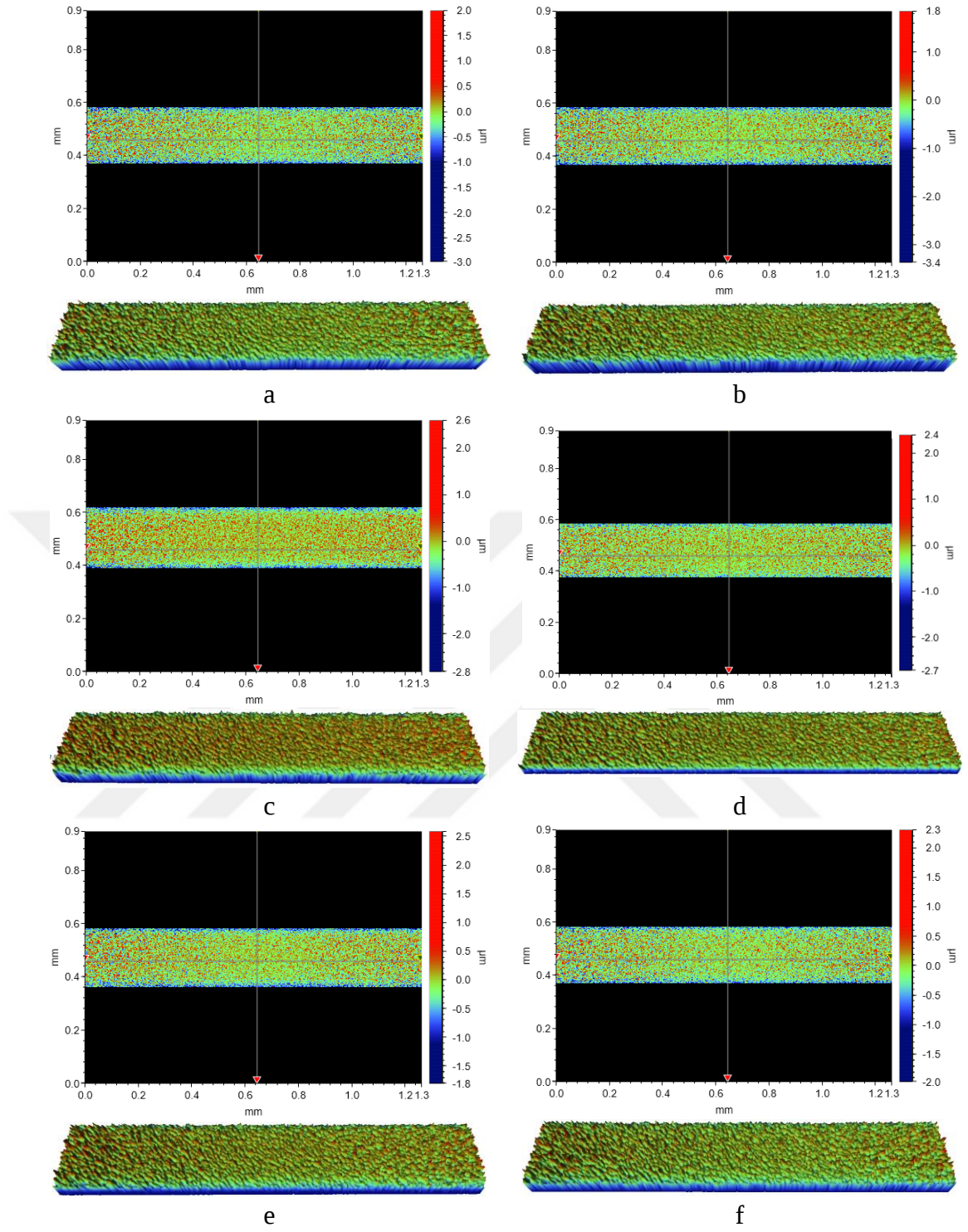
Bu tez çalışmasının temelinde yüzey pürüzlülüğü etkileri yer almaktadır ve bu etkilerin doğru şekilde değerlendirilmesi ve kıyaslanabilmesi pürüzlülük yapılarının düzgün şekilde tanımlanmasına bağlıdır. Bu sebeple toplamda 684 bölgeden yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiş ve temel yüzey pürüzlülük parametresi olarak elde edilen R_a ortalama yüzey pürüzlülüğü verileri materyal ve yöntem başlığında verilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri ortalama yüzey pürüzlülüğü vb. parametrelere indirgenmesi temelde bazı faydalar barındırsa da tek başına pürüzlülük parametrelerinin kullanılması pürüzlülük yapısı hakkında hatalı değerlendirmelere neden olabilmektedir. Hatalı değerlendirmelerin bertaraf edilmesi için pürüzlülük parametreleri ile yüzey haritalarının birlikte kullanılması elverişli bir yöntemdir. Devam eden bölümde üzerinde karma taşınım ısı transferi deneylerinin gerçekleştirildiği 18 farklı mikrokanallı ısı alıcı için elde edilen yüzey haritaları detaylı olarak sunulmuştur. Şekil 4.1 ile 4.18 arasında verilen haritalarda her bir şekil bir ısı alıcıyı temsil etmektedir ve seçilen iki farklı kanalda başta (B), ortada (O) ve sondaki (S) yüzey görüntülerini içermektedir. Pürüzlülük yapıları ve dağılımları hakkındaki genel değerlendirme aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Pürüzlülük yapılarının özellikle düşük pürüzlülük seviyesinde konik karakteristikte olduğu gözlemlenmiştir.

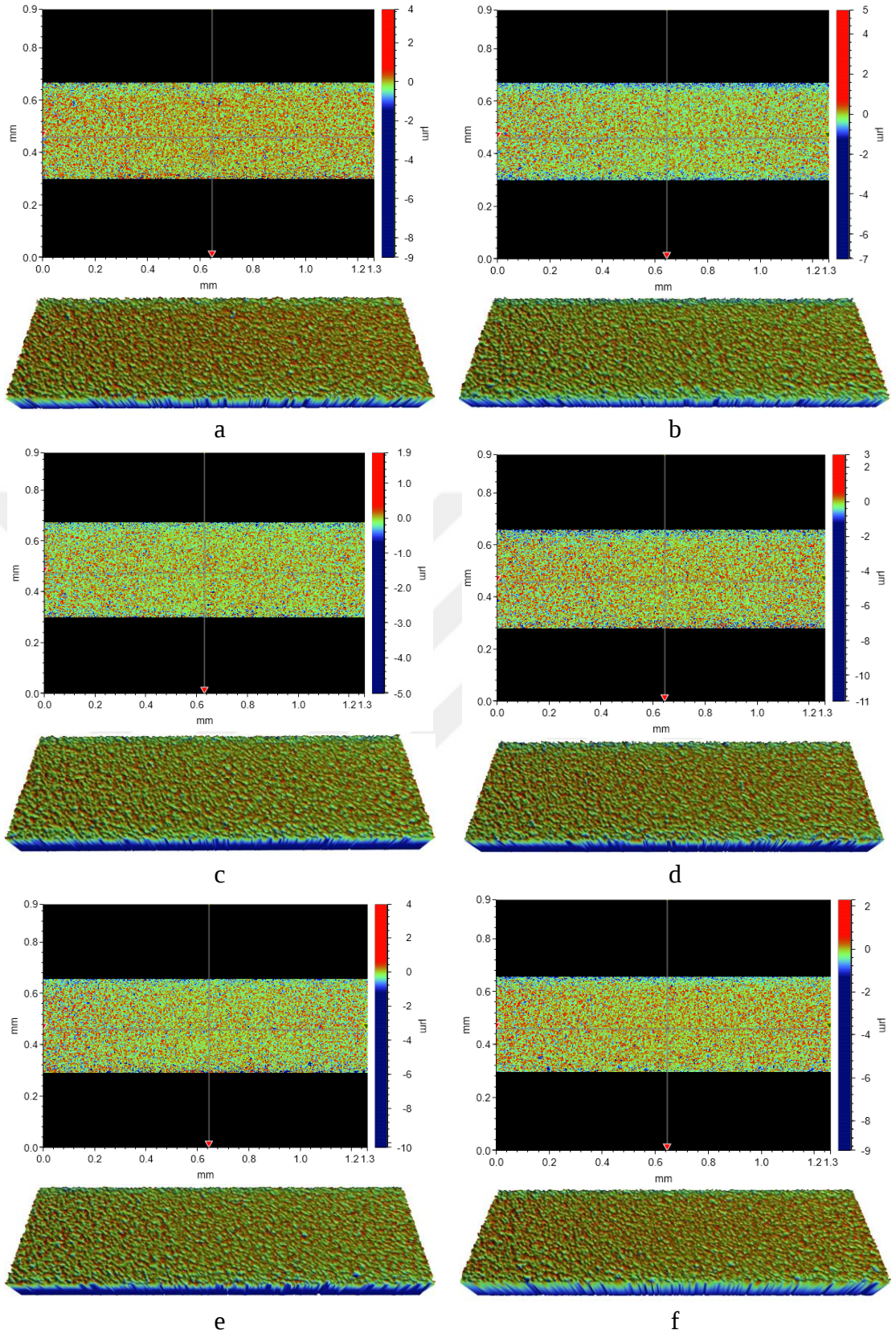
- Pürüzlülük seviyesinin artmasıyla pürüzlülük yapılarındaki konik karakteristiğin bozulduğu görülmektedir.
- Bu durum pürüzlülük yüksekliğinden bağımsız olarak akış yapılarını ve dolayısı ile ısı transferini etkileyecektir.
- Tüm pürüzlülük yüksekliklerinin kanal boyutlarından ve kanal konumundan bağımsız olarak kararlı bir seviyede olduğu görülmektedir.
- Tüm kanal boyutları ve pürüzlülük seviyeleri için tepe ve vadi yapılarında herhangi bir bölgede yoğunlaşma saptanmamıştır.
- Pürüzlülük yapıları da kanal boyutlarından ve kanal konumundan bağımsız olarak düzgün bir dağılım göstermektedir.
- Özellikle herhangi bir kanal boyunca başta, ortada ve sonda yapılan ölçümler kıyaslandığında, pürüzlülük dağılımının oldukça düzgün olduğu görülmektedir.
- Üretim veya malzeme hatası olarak değerlendirilebilecek bölgelerin sayısı ortalama pürüzlülük seviyesindeki artışla nispeten artmaktadır.
- Yine de pürüzlülük haritalarında saptanan hatalı bölgeler oldukça azdır ve bu ihmal edilebilir bir seviye olarak değerlendirilmiştir.
- Çeşitli yöntemlerde meydana gelebilecek takım veya kalıp aşınması gibi etkiler üründe elde edilen geometrik özelliklerde sapmalara sebebiyet vermektedir. Bu durum tekrarlanabilirlik olarak tanımlanmaktadır ve imalat sürecinin uzamasıyla kritik hale gelebilmektedir.
- Yüzey haritalarından elde edilen sonuçlar ışığında dalma elektro erozyon yönteminin tekrarlanabilirlik yönüyle oldukça başarılı olduğu çıkarımında bulunulabilir.
- Sonuç olarak 18 farklı mikrokanallı ısı alıcı için hem elde edilen yüzey pürüzlülük parametreleri hem de yüzey haritaları incelenmiş ve ısı transferi sonuçlarının pürüzlülük yönüyle kıyaslanmasında bir olumsuzluk görülmemiştir.



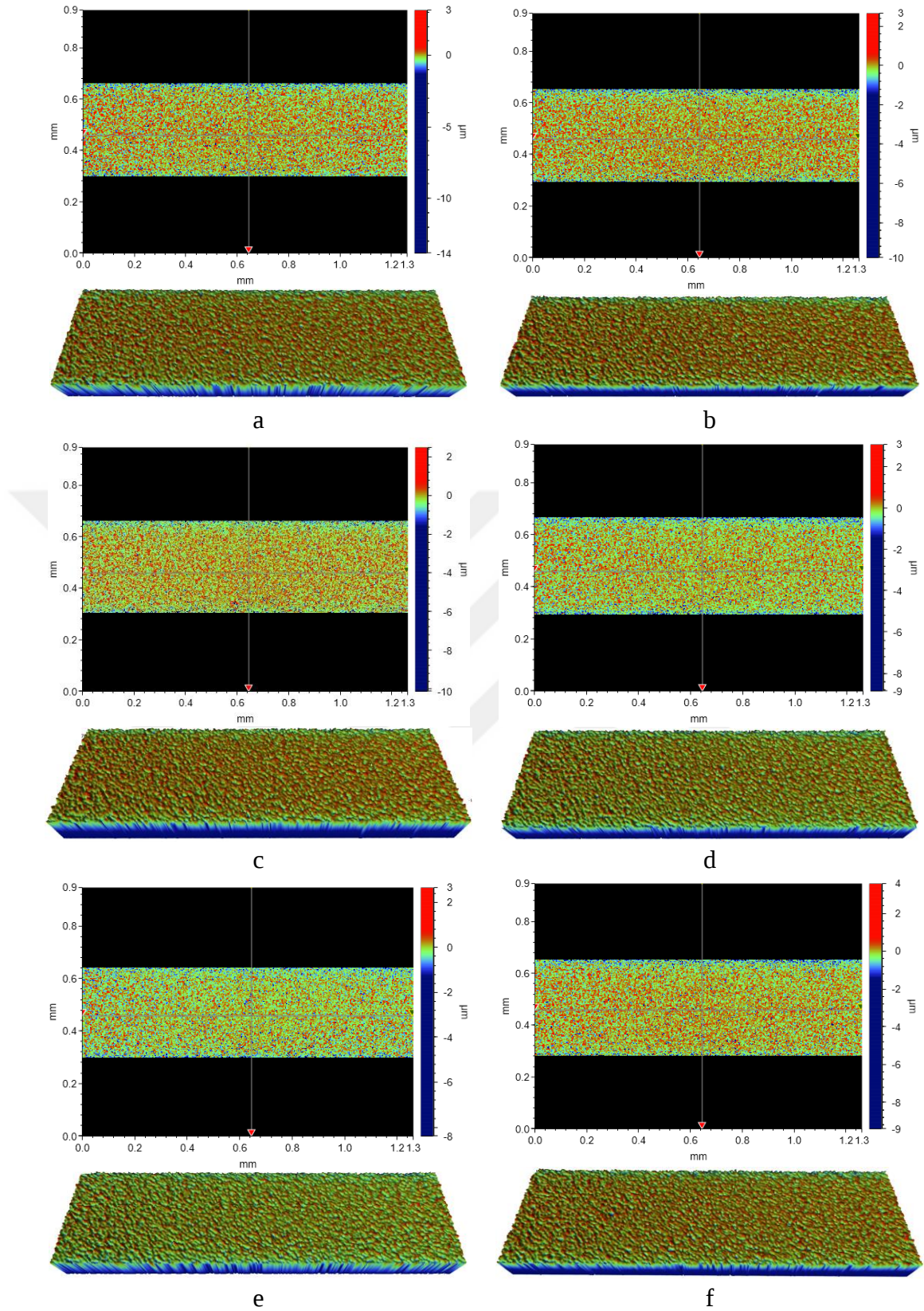
Şekil 4.1. Isı değiştirici no1 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 40O, (d) 10O, (e) 4S ve (f) 10S.



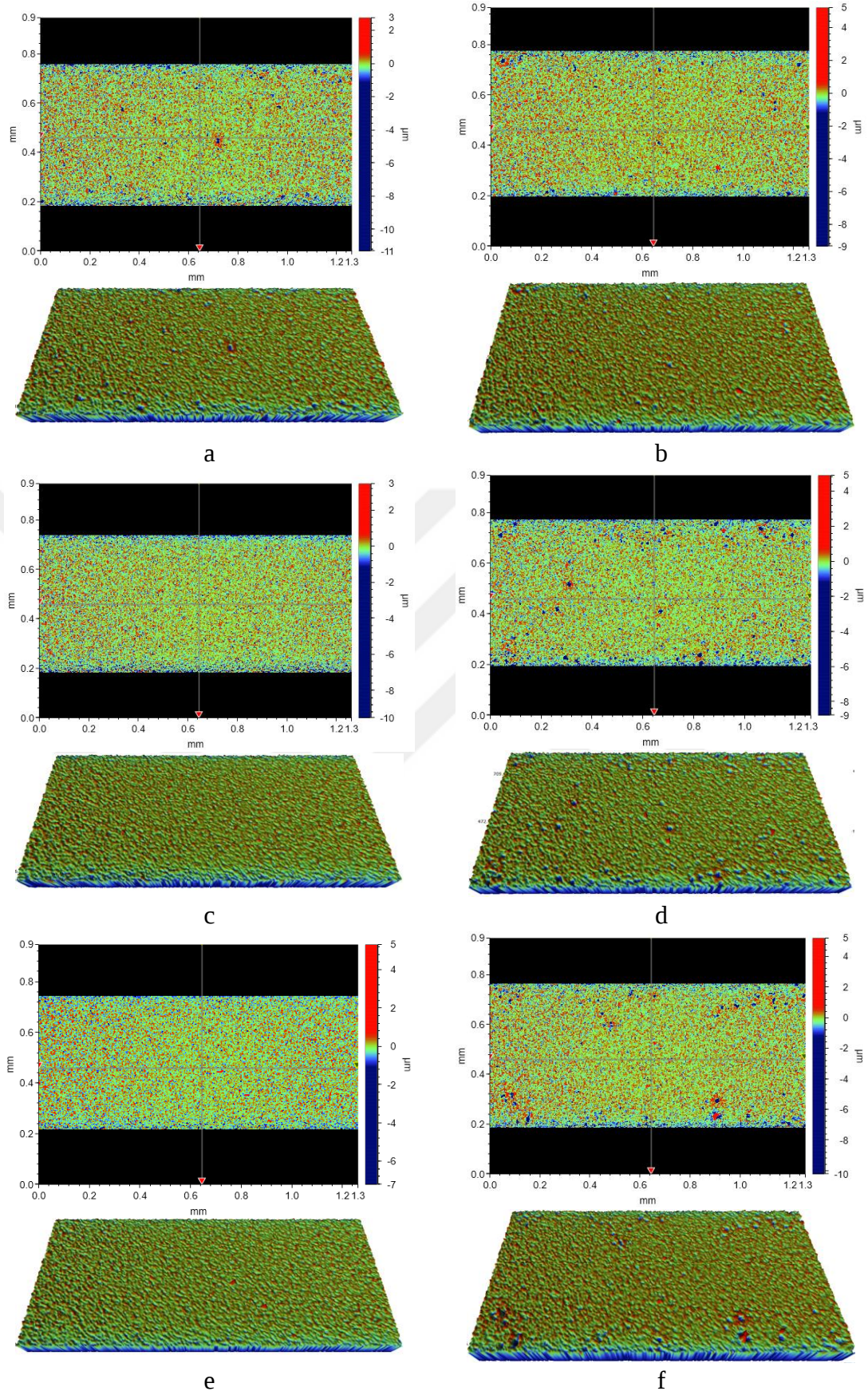
Şekil 4.2. Isı değıştirici no2 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (f) 10S.



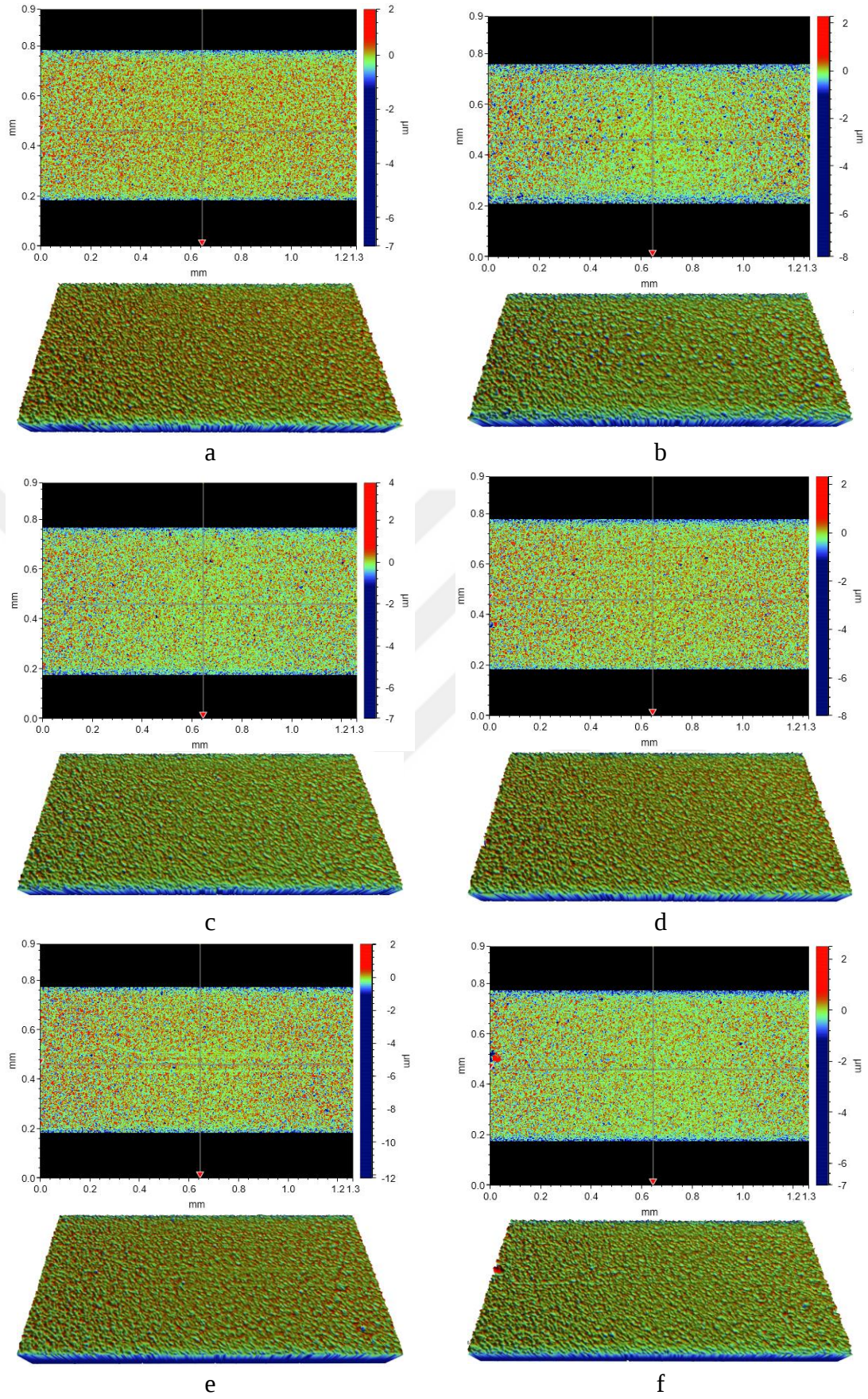
Şekil 4.3. Isı değıştirici no3 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.



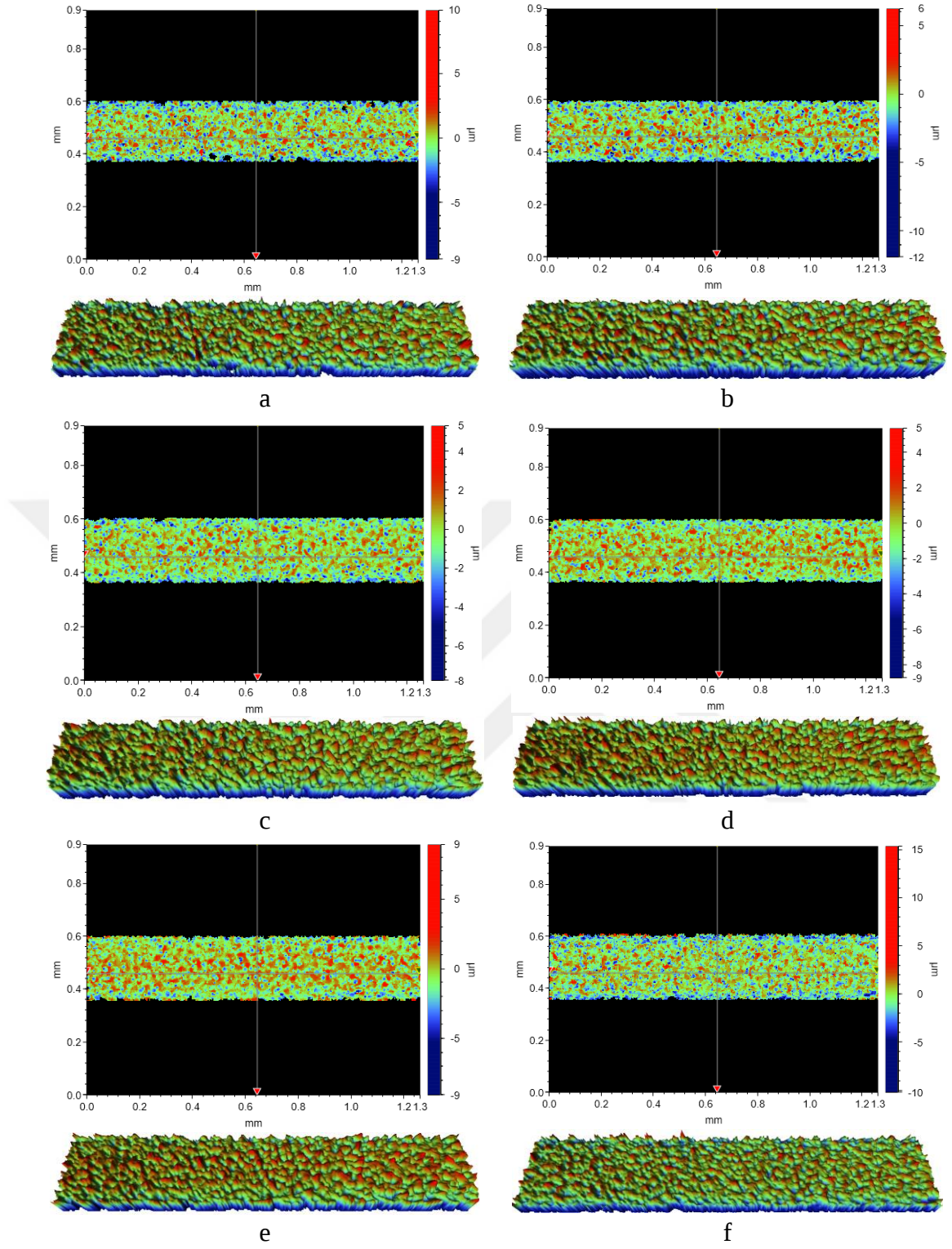
Şekil 4.4. Isı değiştirici no4 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.



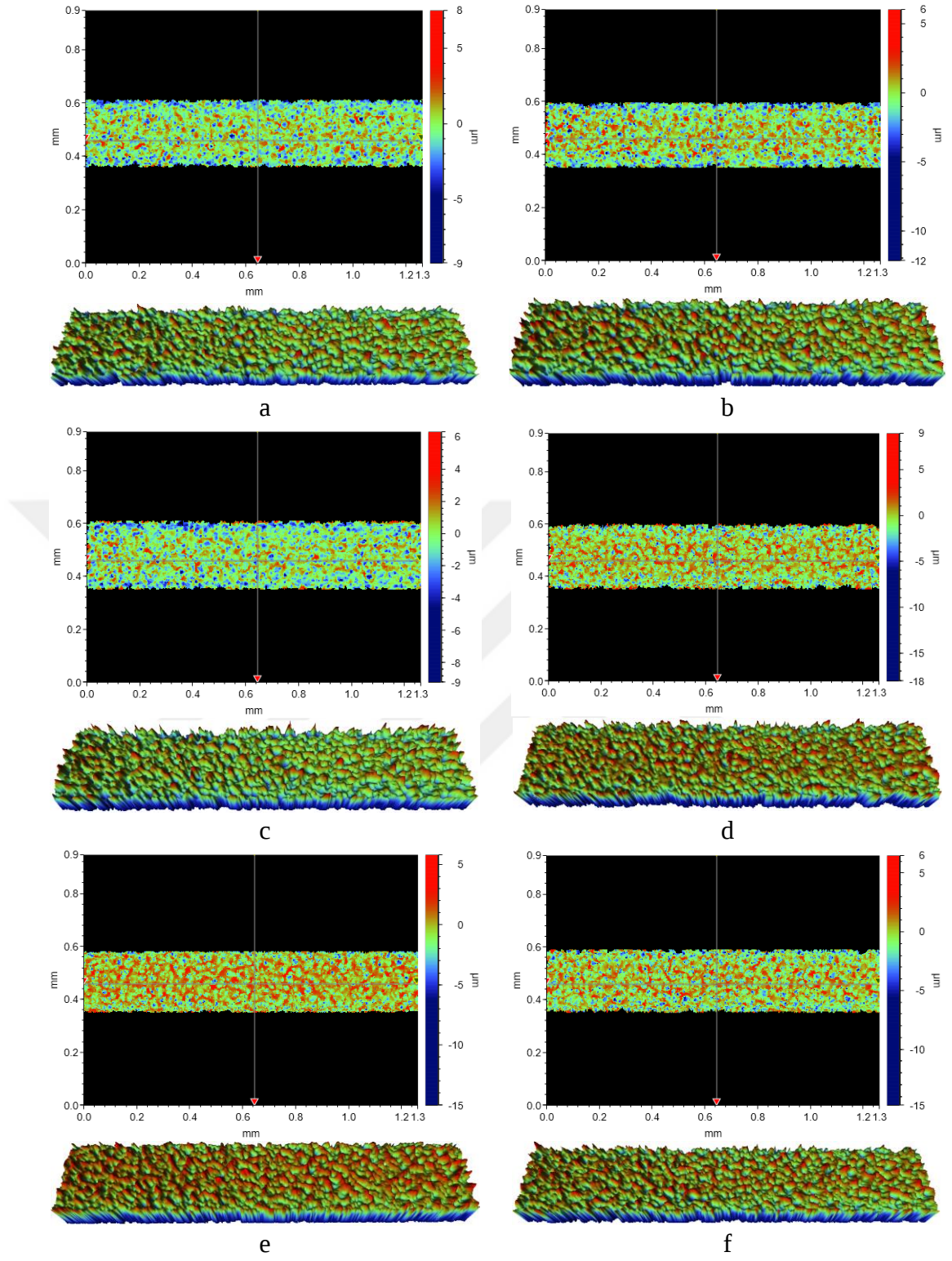
Şekil 4.5. Isı değiştirici no5 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (f) 5S.



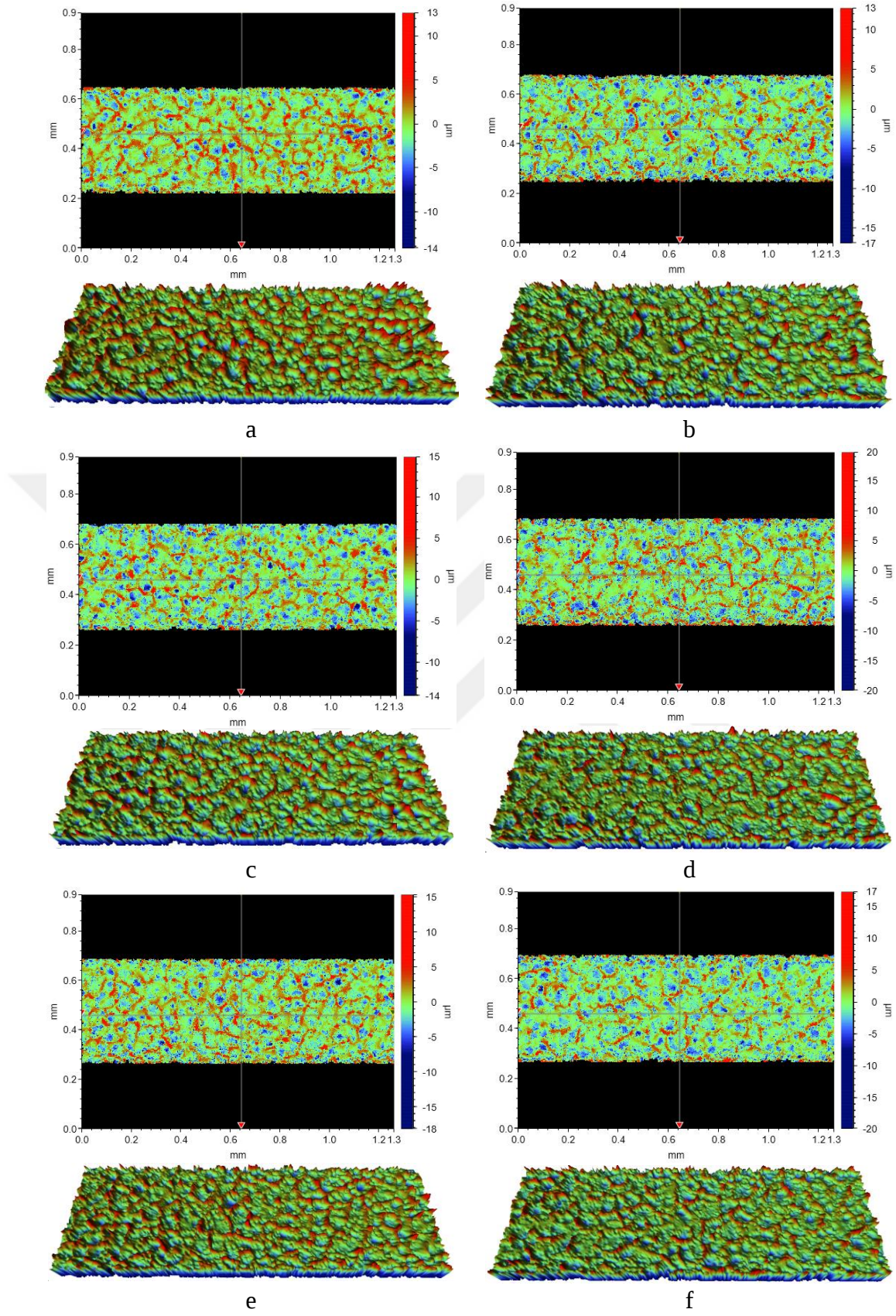
Şekil 4.6. Isı değiştirici no6 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (f) 5S.



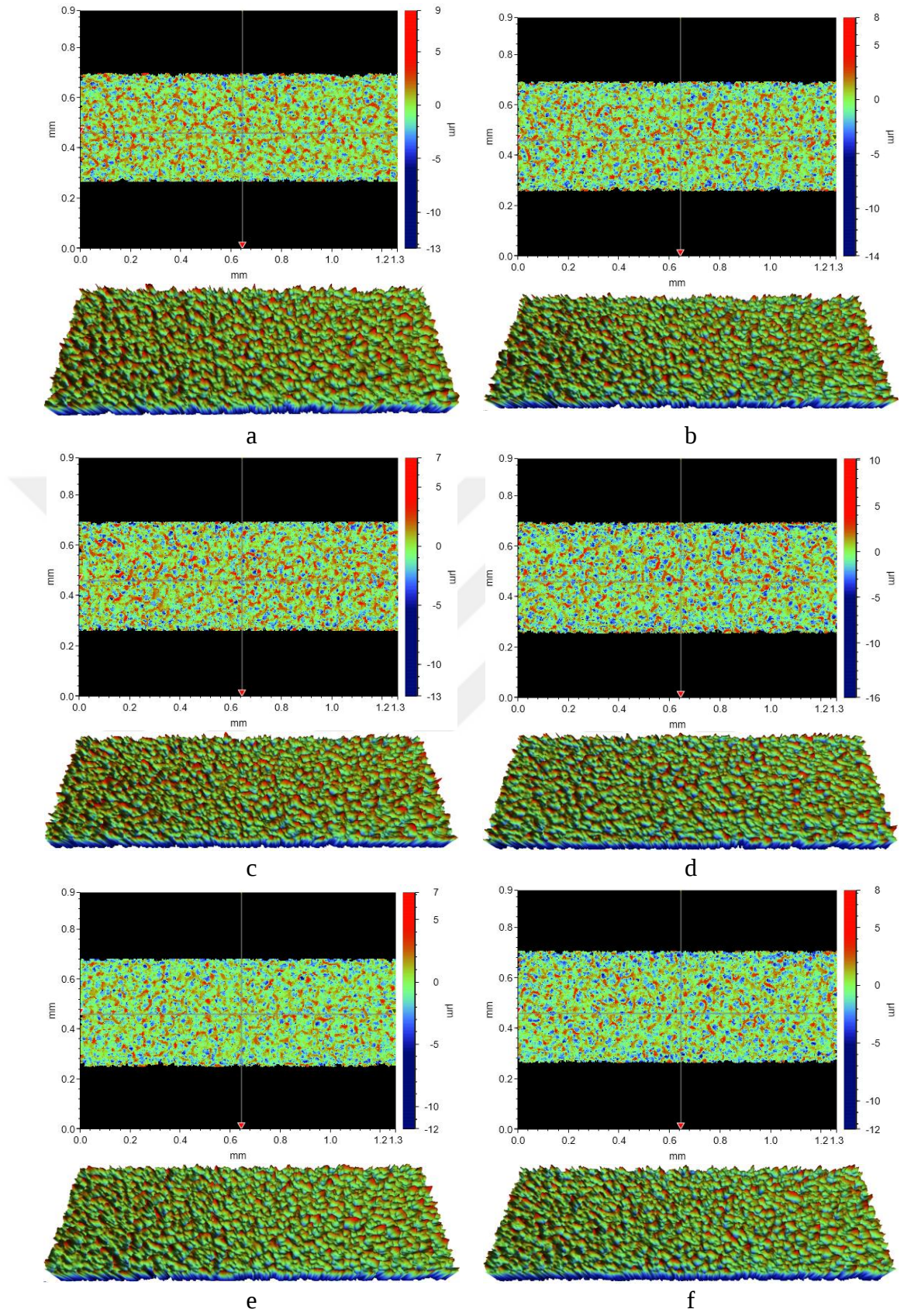
Şekil 4.7. Isı değiştirici no7 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (f) 10S.



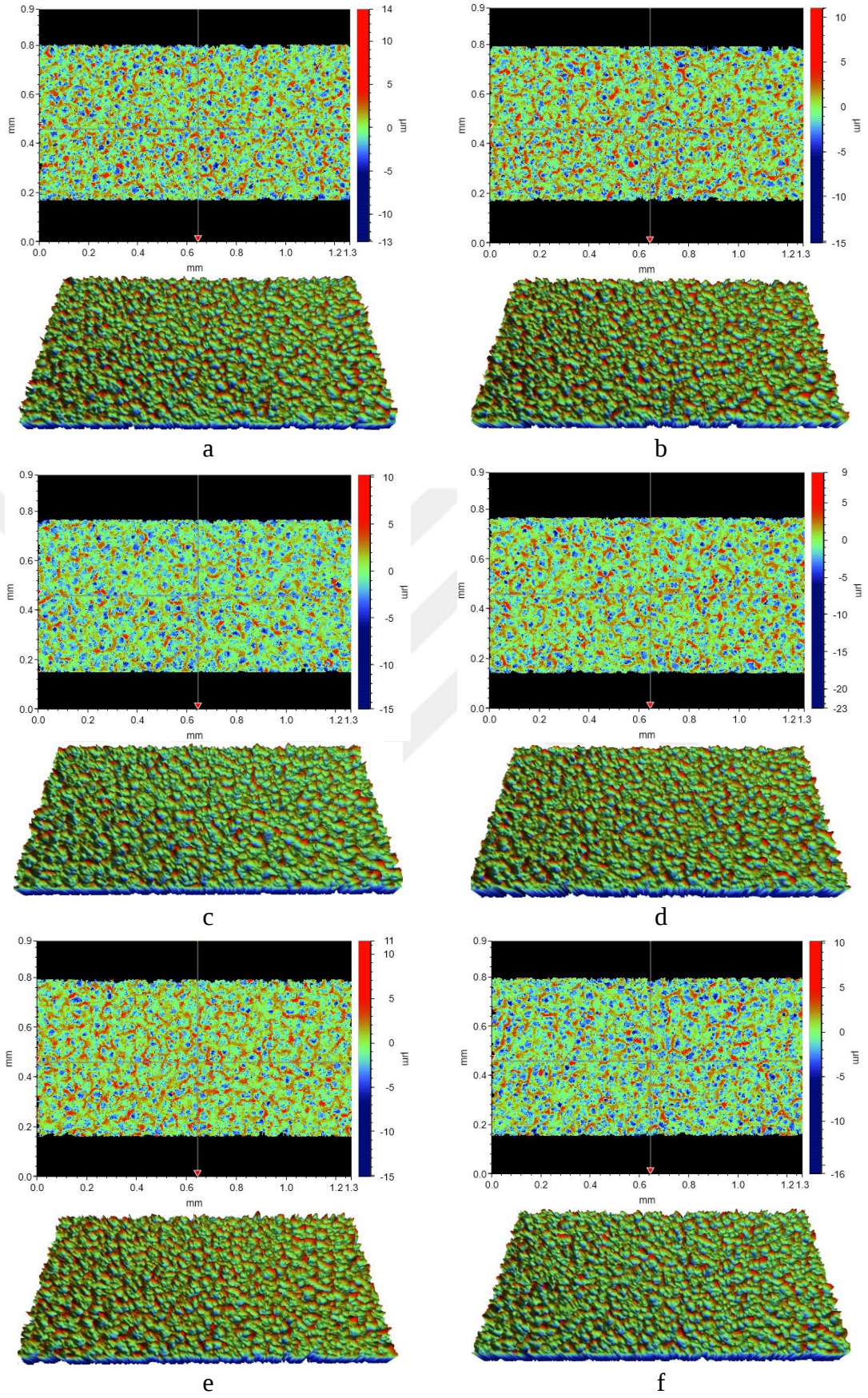
Şekil 4.8. Isı değıştirici no8 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.



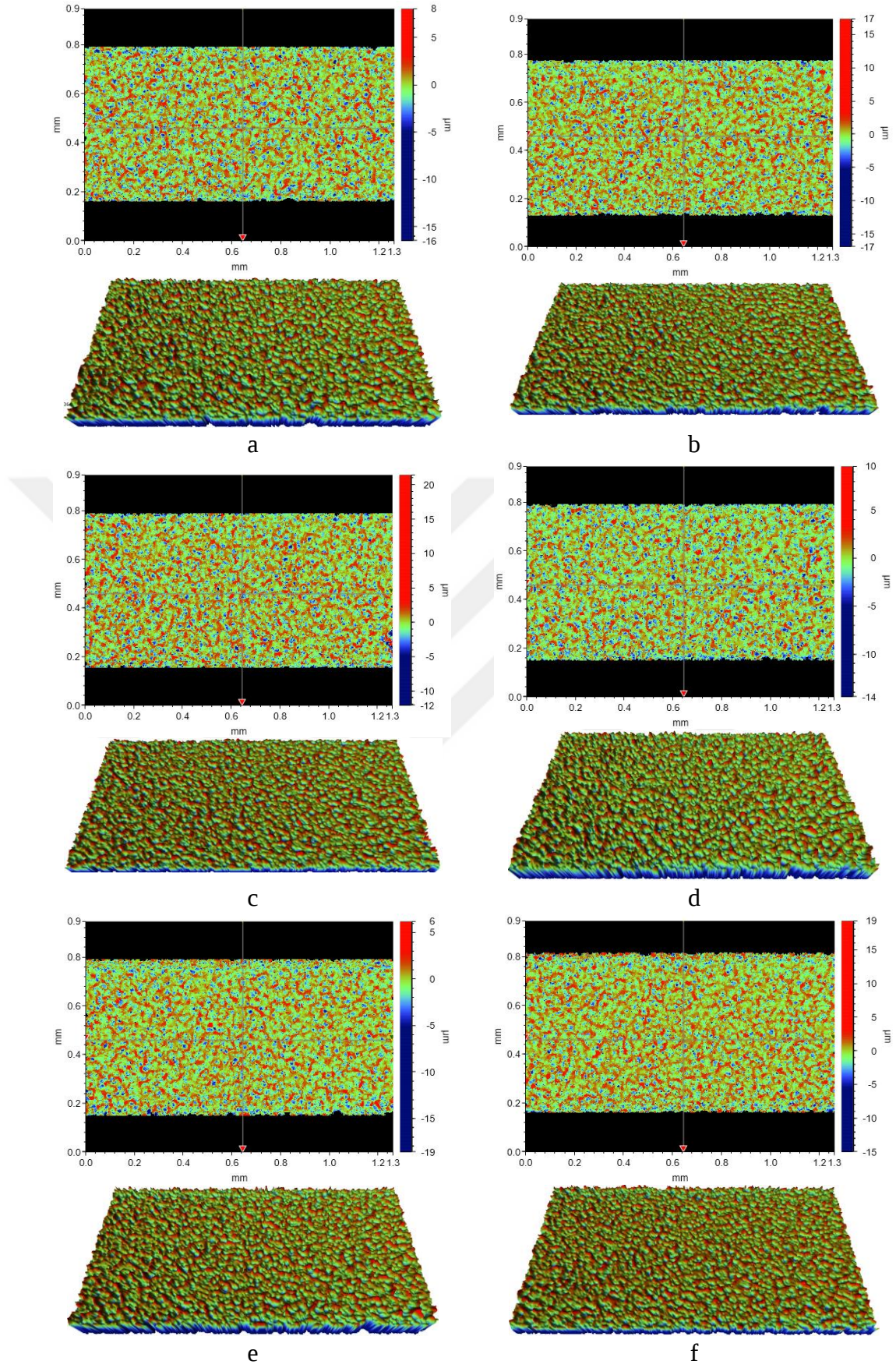
Şekil 4.9. Isı değiştirici no9 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (f) 6S.



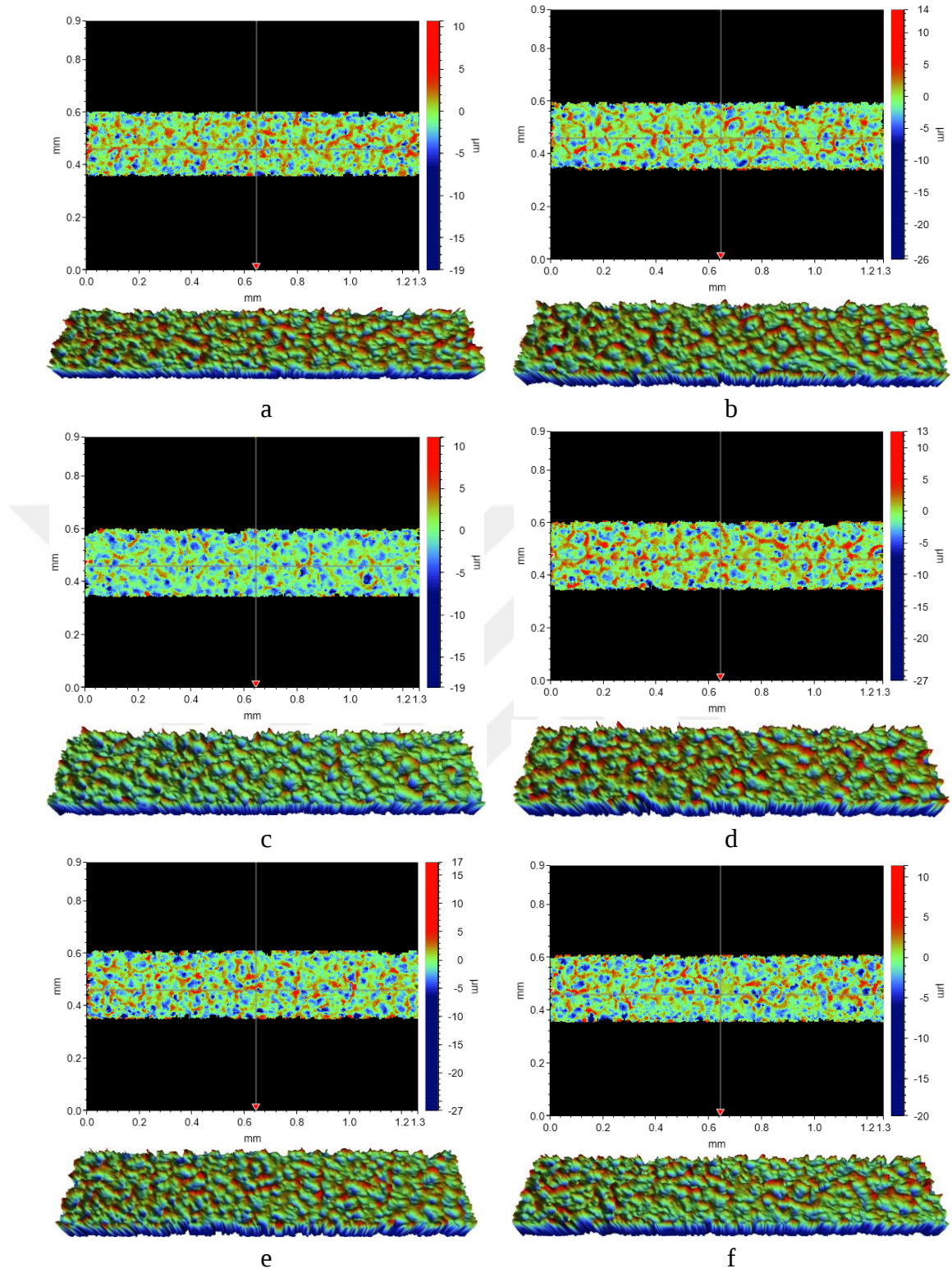
Şekil 4.10. Isı değiştirici no10 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (f) 6S.



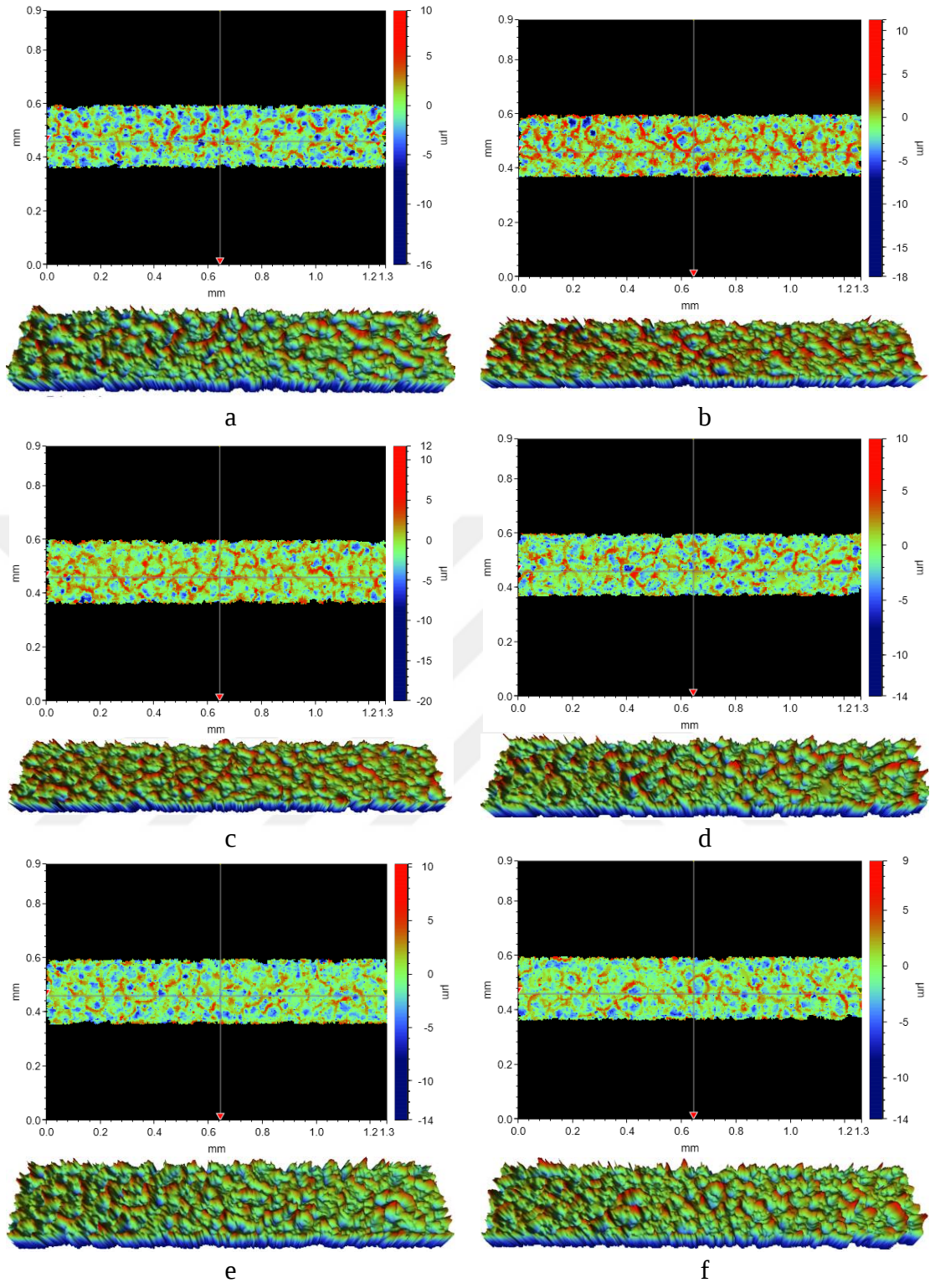
Şekil 4.11. Isı değıştirici no11 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (f) 5S.



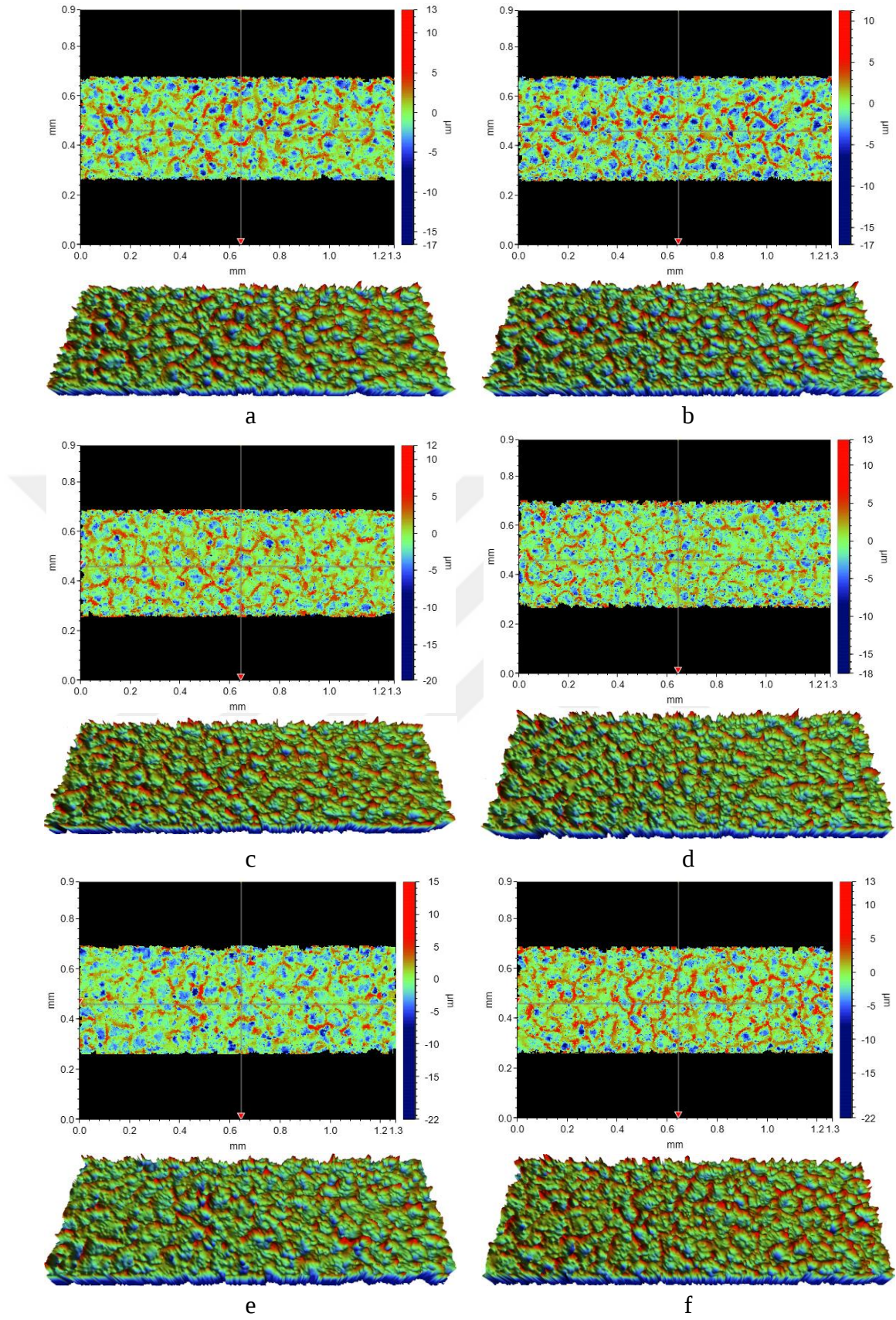
Şekil 4.12. Isı değiştirici no12 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (f) 5S.



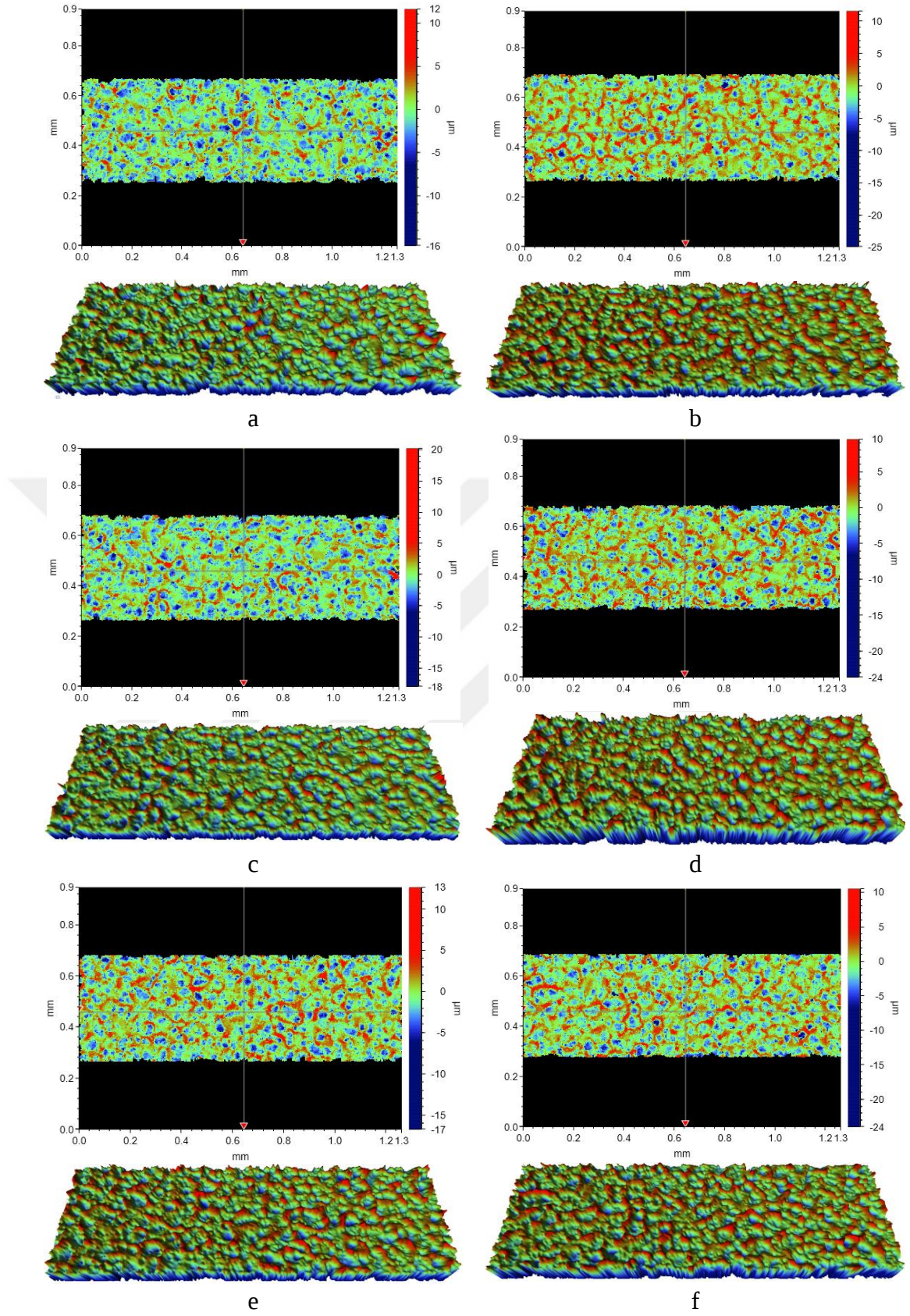
Şekil 4.13. Isı değıştirici no13 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (f) 10S.



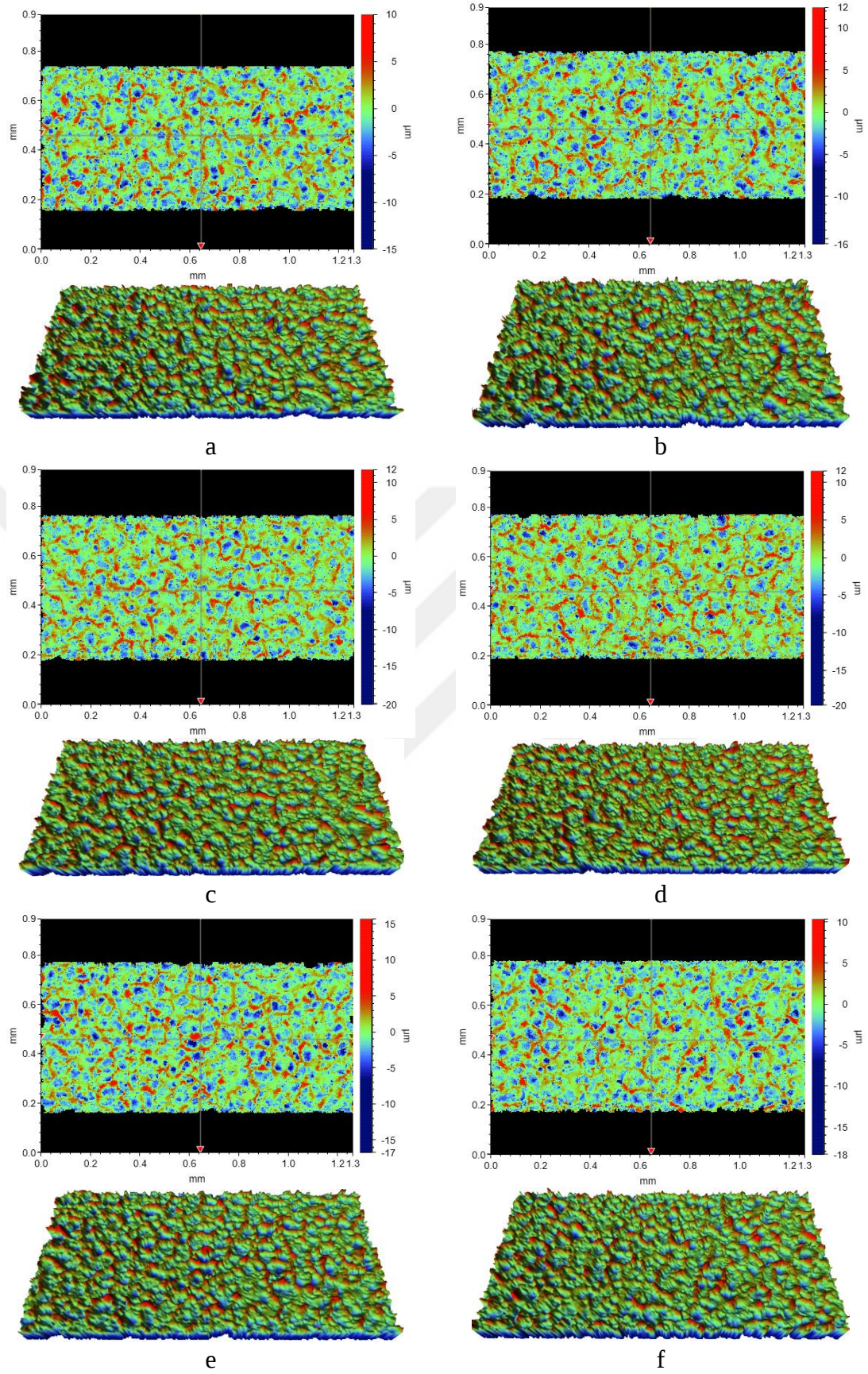
Şekil 4.14. Isı değişirici no14 için yüzey haritaları (a) kanal 4 bölge B, (b) 10B, (c) 4O, (d) 10O, (e) 4S ve (d) 10S.



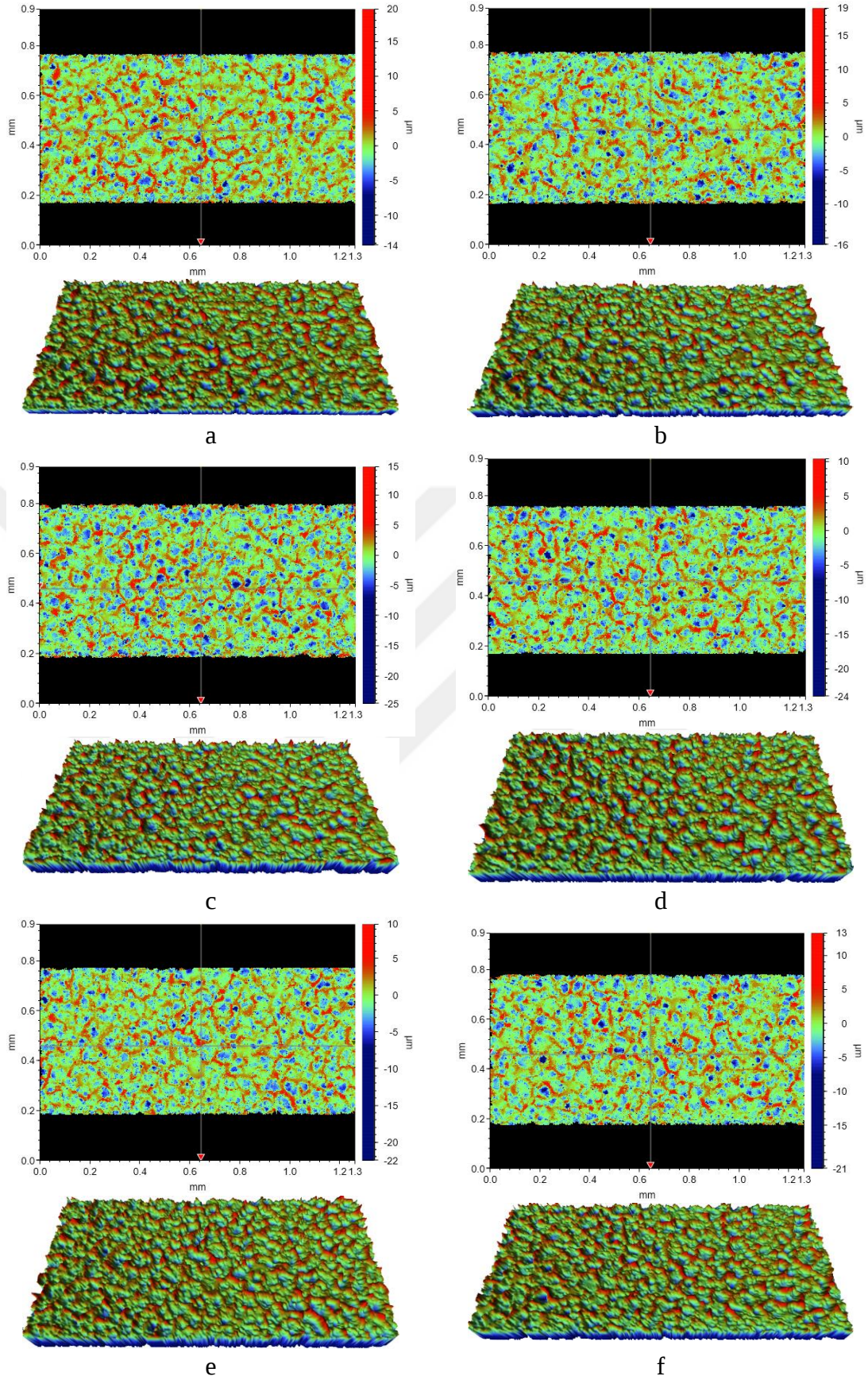
Şekil 4.15. Isı değiştirici no15 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (f) 6S.



Şekil 4.16. Isı değıştirici no16 için yüzey haritaları (a) kanal 3 bölge B, (b) 6B, (c) 3O, (d) 6O, (e) 3S ve (d) 6S.



Şekil 4.17. Isı değiştirici no17 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 20, (d) 50, (e) 2S ve (f) 5S.



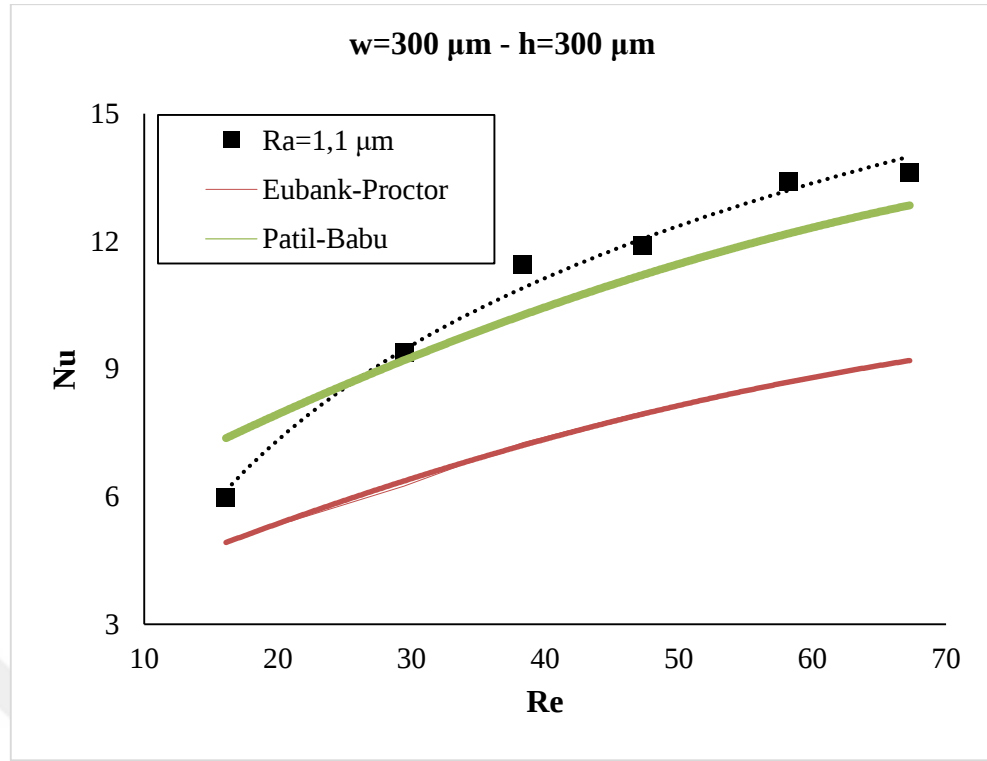
Şekil 4.18. Isı değiştirici no18 için yüzey haritaları (a) kanal 2 bölge B, (b) 5B, (c) 2O, (d) 5O, (e) 2S ve (f) 5S.

4.2. Isı Transferi Bulgularının Literatürle Karşılaştırılması

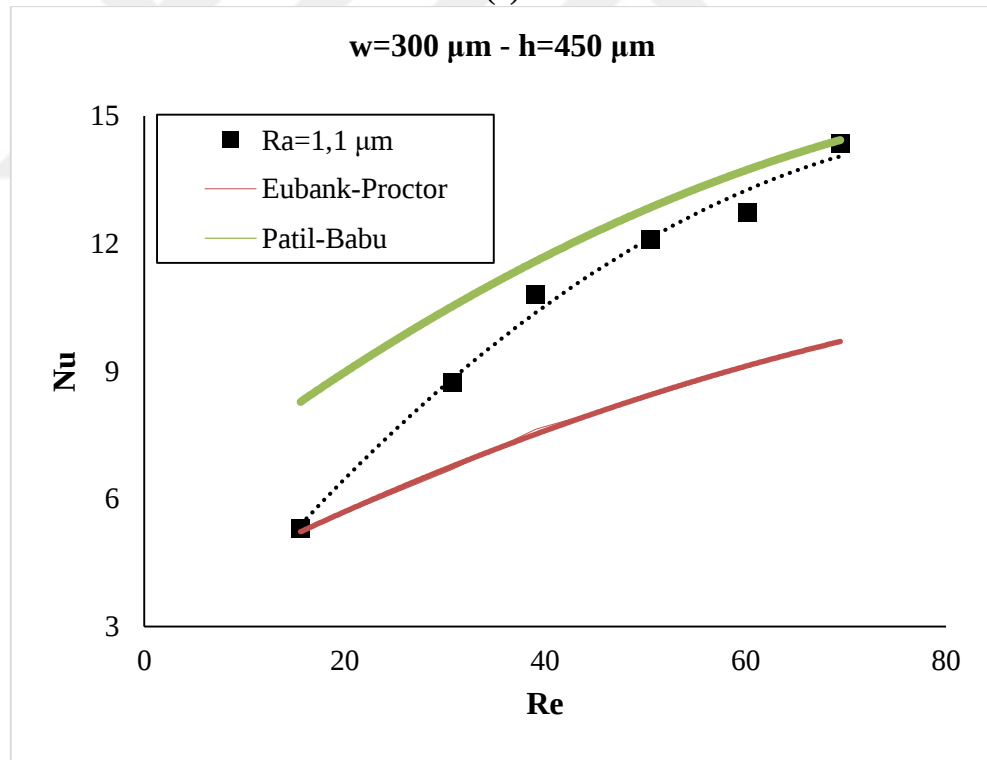
Bu bölümde ilk olarak birleşik zorlanmış ve doğal taşınım sonuçları temsil eden ortalama Nusselt sayısının literatürde önerilen ampirik ifadelerle karşılaştırılması sunulmaktadır. Tüm kesit ölçülerinde en düşük pürüzlülük değeri $R_a=1,1 \mu\text{m}$ için oluşturulan grafikler Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de verilmiştir. Karşılaştırmada kullanılan Eubank-Proctor ve Patil-Babu eşitlikleri sırasıyla Eş. (4.1) ve Eş. (4.2)’de gösterilmektedir. Eubank-Proctor eşitliği karma taşınım için geleneksel bir modeldir ve pek çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Feng and Li 2013). Patil-Babu (Patil and Babu 2012) eşitliği ise kare bir kanalda su ile yapılmış deneylerden elde edilen ampirik bir model olarak verilmiştir. İlgili şekiller incelendiğinde Eubank-Proctor ve Patil-Babu eşitliklerinin tahminleri arasında belirgin bir fark olduğu görülmektedir. Özellikle düşük mikrokanaal hidrolik çapları için Patil-Babu eşitliğinin deneysel verilerle daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Reynolds sayısının artmasıyla Eubank-Proctor tahminleri ile deneysel veriler arasındaki fark hızla yükselmektedir. Model tahminleri ile deneysel sonuçlar arasındaki farkın her iki eşitliğin de pürüzlülük etkilerini içermemesinden ve pürüzsüz kanallar için elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

$$\text{Nu} = 2.11 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\text{Gz} + 0.0273 \left(\frac{\text{GrPr} L/D_h}{\text{Gz} + L/D_h} \right)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (4.1)$$

$$\text{Nu} = 2.10 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\text{Gz} + 0.015 (\text{GzGr}^{0.33})^{1.30} \right)^{0.33} \quad (4.2)$$

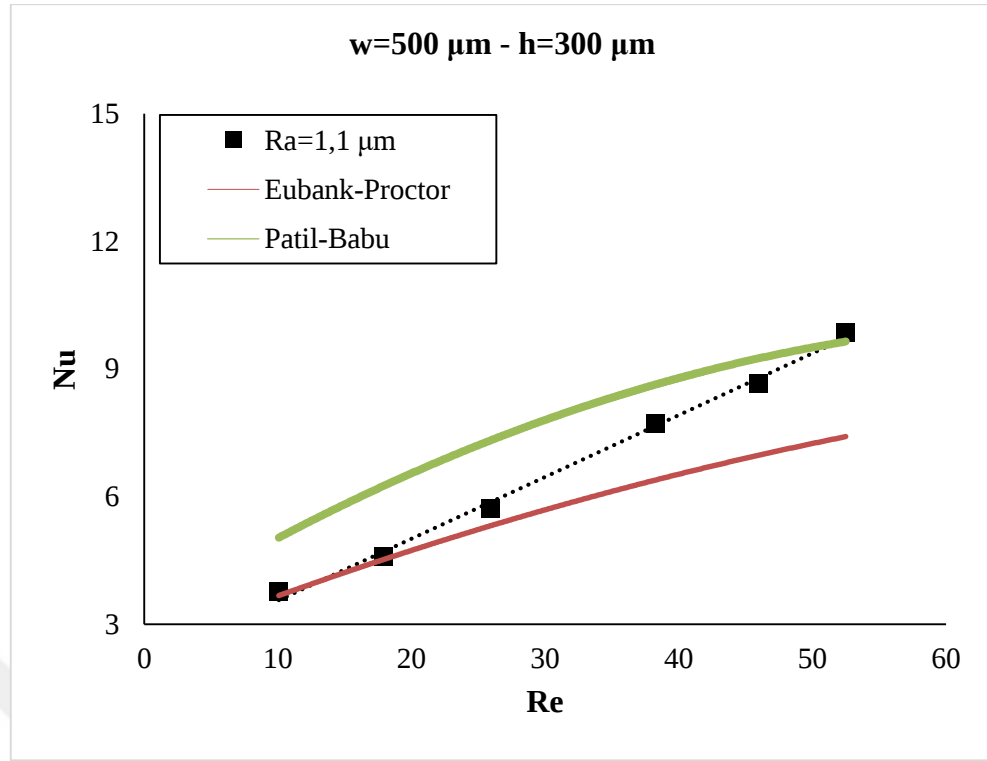


(a)

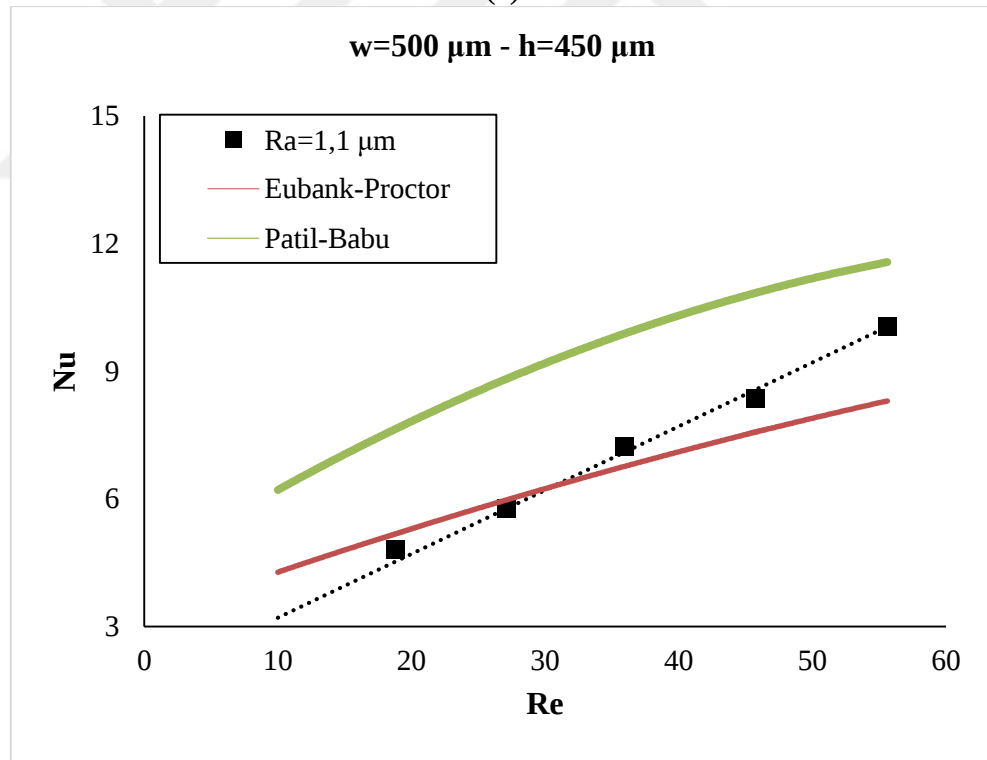


(b)

Şekil 4.19. w=300 μ m mikrokana1 genişliği için karma taşı1ım ısı transferi sonuçlarının modellerle karşılaştı1ırılması (a) h=300 μ m ve (b) h=450 μ m.

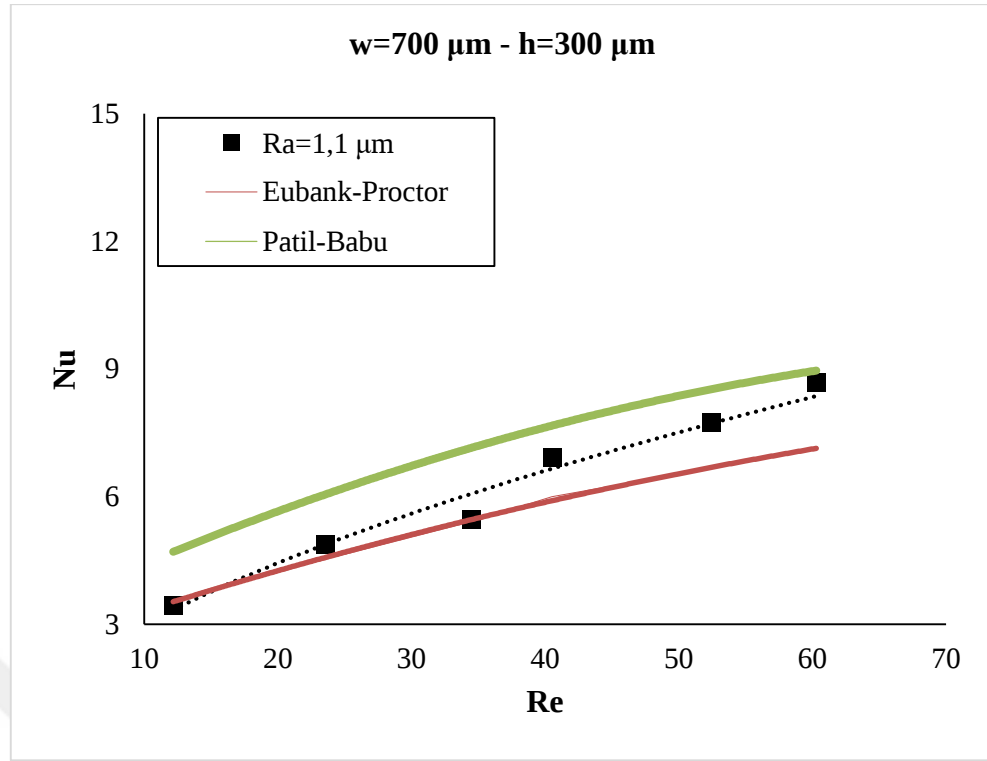


(a)

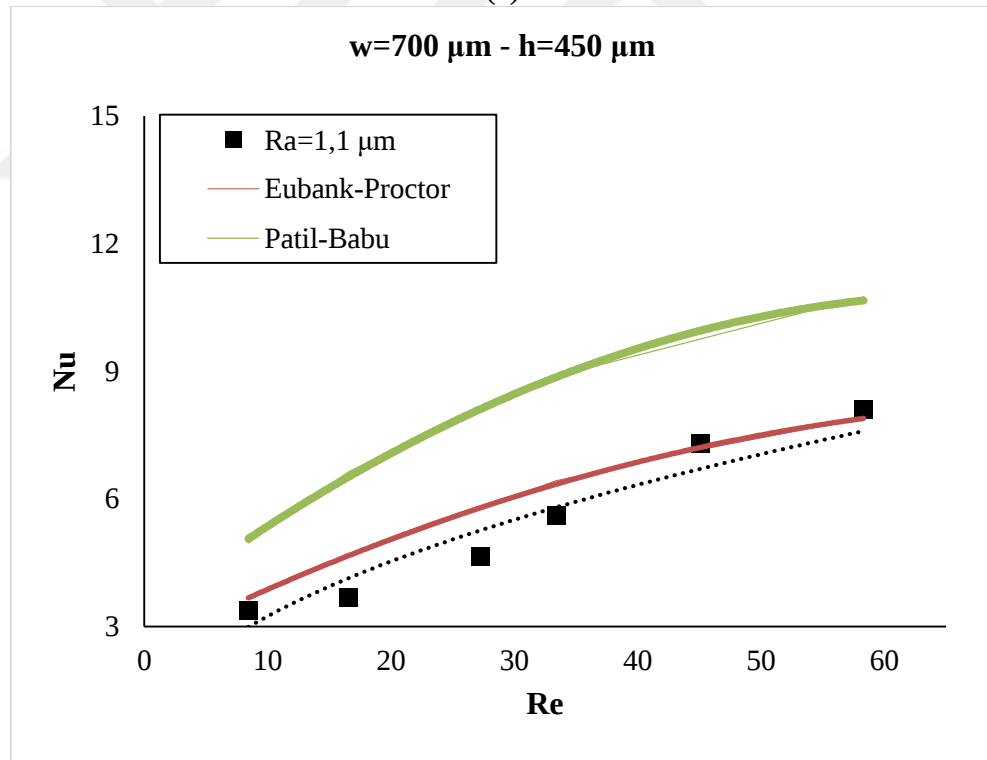


(b)

Şekil 4.20. w=500 μm mikrokana1 genişliği için karma taşı1ım ısı transferi sonuçlarının modellerle karşılaştı1ırılması (a) h=300 μm ve (b) h=450 μm .



(a)



(b)

Şekil 4.21. w=700 μ m mikrokana1 genişliği için karma taşınım ısı transferi sonuçlarının modellerle karşılaştırılması (a) h=300 μ m ve (b) h=450 μ m.

4.3. Yüzey Pürüzlülüğün Karma Taşınım Isı Transferine Etkisi

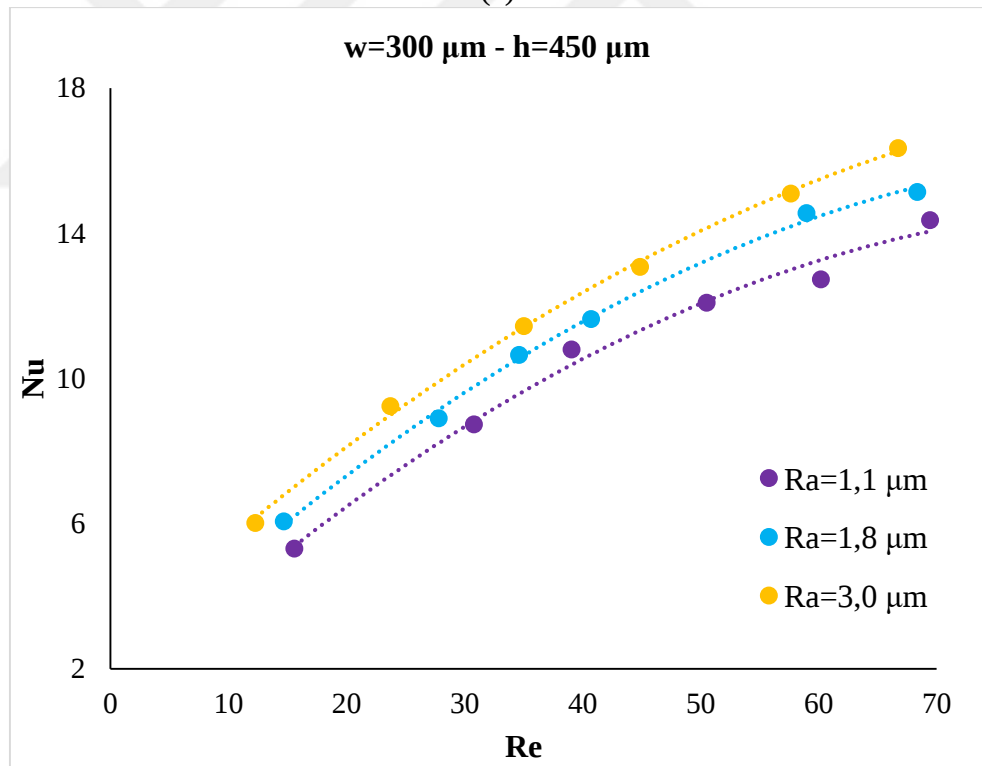
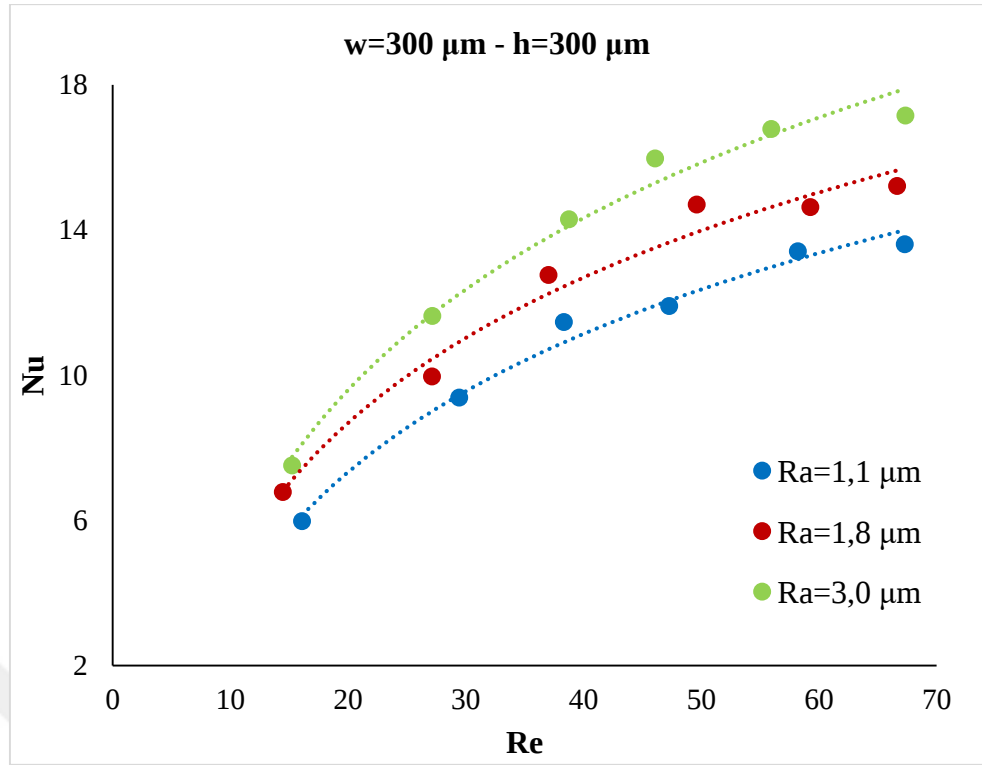
Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24’de sırasıyla 300, 500 ve 700 μm ’lik kanal genişlikleri için ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi sunulmaktadır. Burada (a) ve (b) maddeleri 300 ve 450 μm ’lik kanal yükseklikleri için hazırlanmıştır. Her bir grafikte 1,1 μm , 1,8 μm ve 3,0 μm R_a olmak üzere üç farklı pürüzlülük durumu değerlendirilmiştir. Tüm grafiklerde Reynolds sayısının artışıyla ortalama Nusselt sayısının da arttığı görülmektedir. Bu durum Reynolds sayısındaki artışla meydana gelen zorlanmış taşınım etkinliğindeki artıştan ileri gelmektedir. Çalışılan tüm mikrokanaal boyutları için en yüksek ısı transfer sonuçları en yüksek pürüzlülük değerlerinde elde edilmiştir.

Akış alanındaki yüzey pürüzlülükleri akışı bozan vadi-tepe noktaları olarak değerlendirilmektedir. Yüksek ortalama pürüzlülük değeri kanal içerisindeki vadi-tepe noktalarının çoğalması veya bu noktalar arası mesafenin büyümesi anlamına gelmektedir. Artan yüzey pürüzlülüğü sonucunda mikrokanaal yüzeylerinde akışı rahatsız eden veya bozan yapıların yoğunluğu ve/veya etkinliği artmaktadır. Bu yapılar sınır tabakadaki momentum etkileşimlerini tetikleyeceğinden ısı transferinde artışa sebebiyet vermektedir. Buna ilaveten, pürüzlülük yapılarının oluşturduğu vadi-tepe noktaları arasında yerel girdap ve devir daim bölgelerinin oluşumu söz konusudur. Yüzey pürüzlülüğündeki artış yerel girdapların ve devir daim bölgelerinin oluşumunu tetikler ve/veya etkinliklerini artırır. Bu durum giriş bölgesinde ısı sınır tabakanın gelişimini geciktirir ve ısı transferinin daha etkin bir seviyede gerçekleşmesini sağlar. Bu sebeple artan pürüzlülükle nispeten daha büyük ısı taşınım katsayıları gözlemlenmiştir.

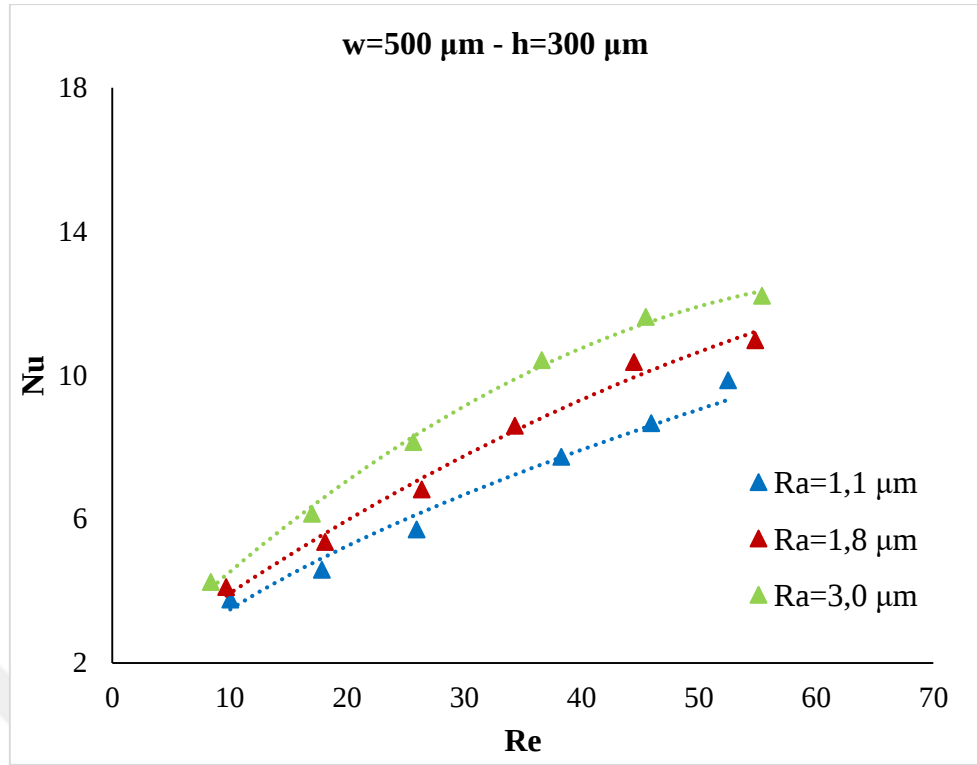
Farklı bir yönden ele alındığında, pürüzlülüklerin kanal yüzeylerine yakın bölgelerde oluşturduğu yerel girdap ve çalkantılar akışkan içerisinde ek karıştırma etkilerine de sebep olacak ve sınır tabaka gelişimini etkileyecektir. Oluşan bu karıştırma etkileri yüksek yüzey pürüzlülüklerinde düşük olan duruma göre daha da kuvvetli olacaktır (Niavarani and Priezjev 2009; Yan 2011). Artan pürüzlülükle meydana gelen ısı transferi artışının diğer bir sebebinin de bu karıştırma etkileri olduğu düşünülmektedir.

Mikrokanallardaki yüzey pürüzlülüklerinin artması ısı transfer yüzey alanının da ayrıca artması anlamına gelmektedir. Bu durum izah edilecek olursa; önceki bölümlerde pürüzlülük yapılarının yaklaşık konik bir geometri olarak değerlendirilebileceği tartışılmıştır. Bir tepe noktasının düz bir yüzeyden yükseltilmesi veya bir vadi noktasının alçaltılması yüzeyin bükülmesine ve yeni yüzeyin genişlemesine sebebiyet vermektedir. Oluşan bu yeni genişletilmiş yüzeyin boyutları, vadi-tepe yüksekliğinin yani yüzey pürüzlülüğü seviyesinin artmasıyla artmaktadır. Pürüzlülüklerden kaynaklı genişleyen yüzeyin değerlendirilmesinde S_i parametresinden faydalanılmaktadır. Bu ifade pürüzlü yüzey alanının teorik pürüzsüz yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır ve yüzey pürüzlülük parametrelerinin verildiği Çizelge 3.2’de çalışılan tüm mikrokanallar için verilmiştir. S_i ifadesinin değeri 1,1, 1,8 ve 3,0 μm ’lik ortalama pürüzlülük değerleri için sırasıyla ve yaklaşık olarak 1,03, 1,11 ve 1,14 olarak elde edilmiştir. Bahsi geçen bu oranlar artan pürüzlülük sonucu önemli seviyelerde yüzey alanı artışı olduğunu ortaya koymaktadır. Artan yüzey pürüzlülüğü ile gözlenen ısı transferindeki artışın bir diğer sebebi ise etkin ısı transfer alanındaki artış olarak değerlendirilmiştir.

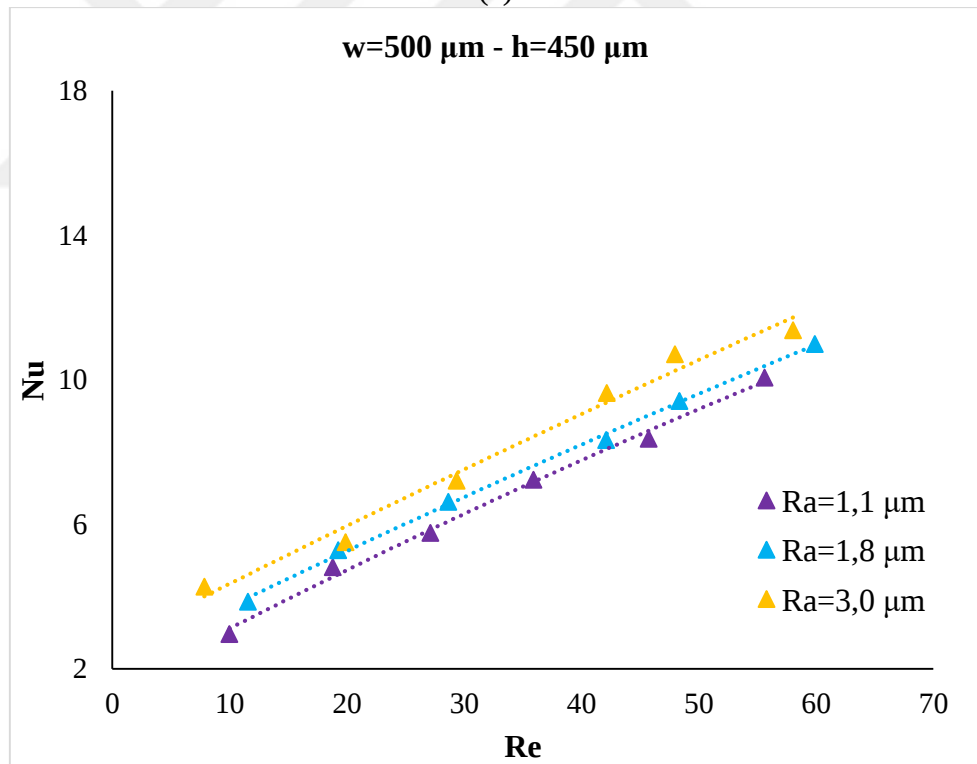
Yüzey pürüzlülüğünün ortalama Nusselt sayısı yani ısı transferi üzerindeki etkinliği mikrokanalların hidrolik çaplarında meydana gelen artışla zayıflamaktadır. Yüzey pürüzlülüklerinin ısı transferinde oransal olarak en etkin olduğu mikrokanal kesiti $300 \times 300 \mu\text{m}$ ’lik en küçük kanal kesitidir. Benzer şekilde pürüzlülük etkisinin en zayıf olduğu kanal kesiti ise $700 \times 450 \mu\text{m}$ ’lik en büyük kanal kesiti olmuştur. Bu durum bağıl pürüzlülük yaklaşımı ile açıklanabilir. Bağıl pürüzlülük, pürüzlülük yüksekliğinin kanal hidrolik çapına bölünmesiyle elde edilen bir ifadedir. Pürüzlülük yapılarının kanal içerisindeki etkinliğinin oransal olarak anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Belirli bir pürüzlülük yüksekliği kanal boyutlarının artmasıyla akış alanındaki etkinliğini oransal olarak yitirecektir. Artan kanal çapının ısı transferinde yüzey pürüzlülük etkinliğini düşürmesinin sebebi bu durumdur.



Şekil 4.22. w=300 μ m mikrokanal genişliğinde farklı pürüzlülük değerleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) h=300 μ m ve (b) h=450 μ m.

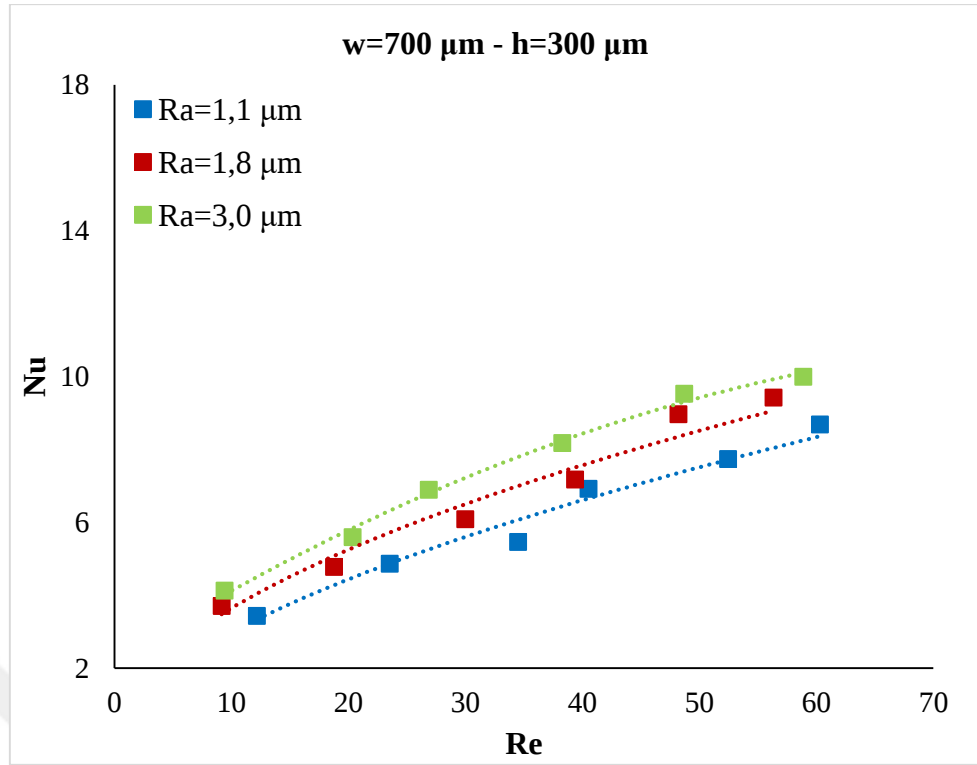


(a)

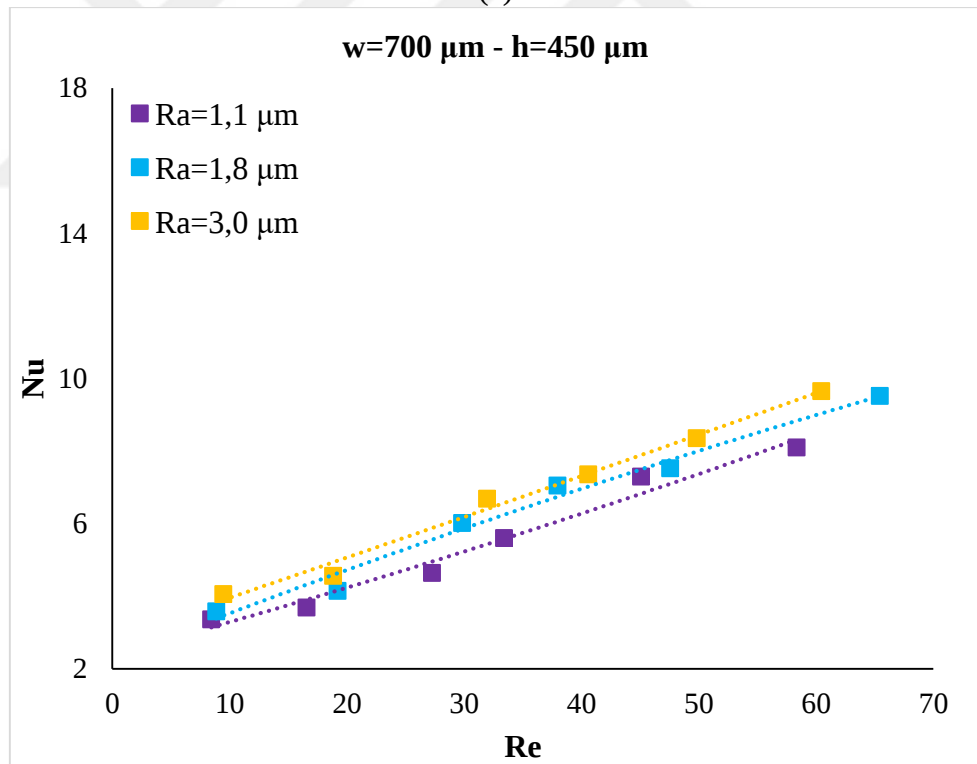


(b)

Şekil 4.23. w=500 μ m mikrokanal genişliğinde farklı pürüzlülük değerleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) h=300 μ m ve (b) h=450 μ m.



(a)



(b)

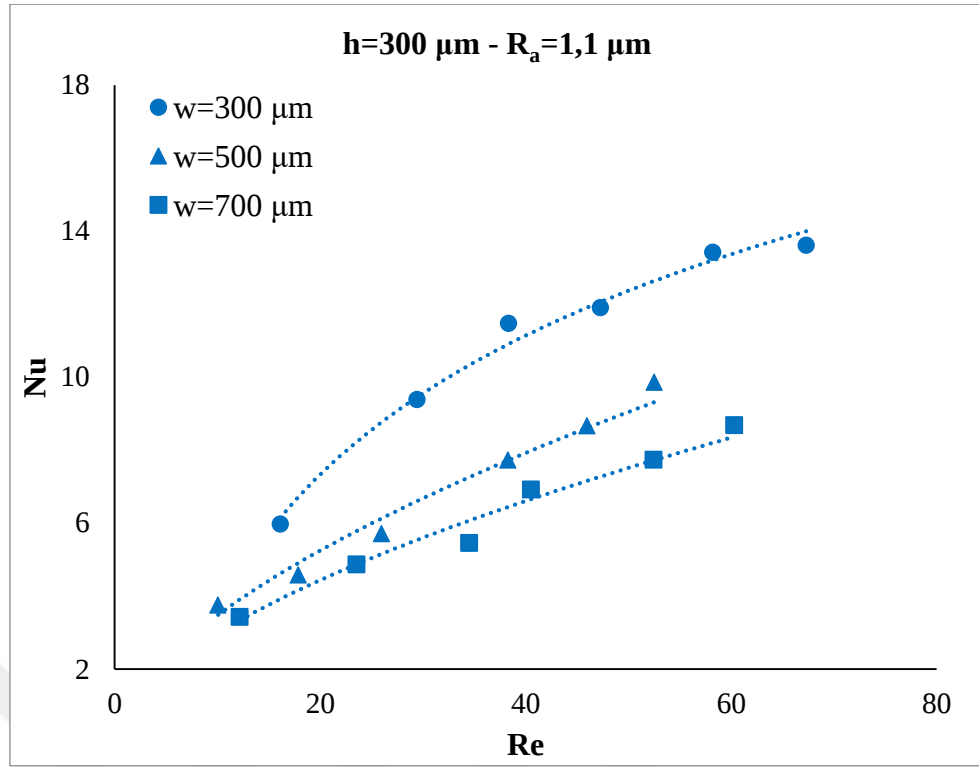
Şekil 4.24. w=700 μ m mikrokana1 genişliğinde farklı pürüzlülük değeri1i için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değışimi (a) h=300 μ m ve (b) h=450 μ m.

4.4. Mikrokanal Boyutlarının Karma Taşınım Isı Transferine Etkisi

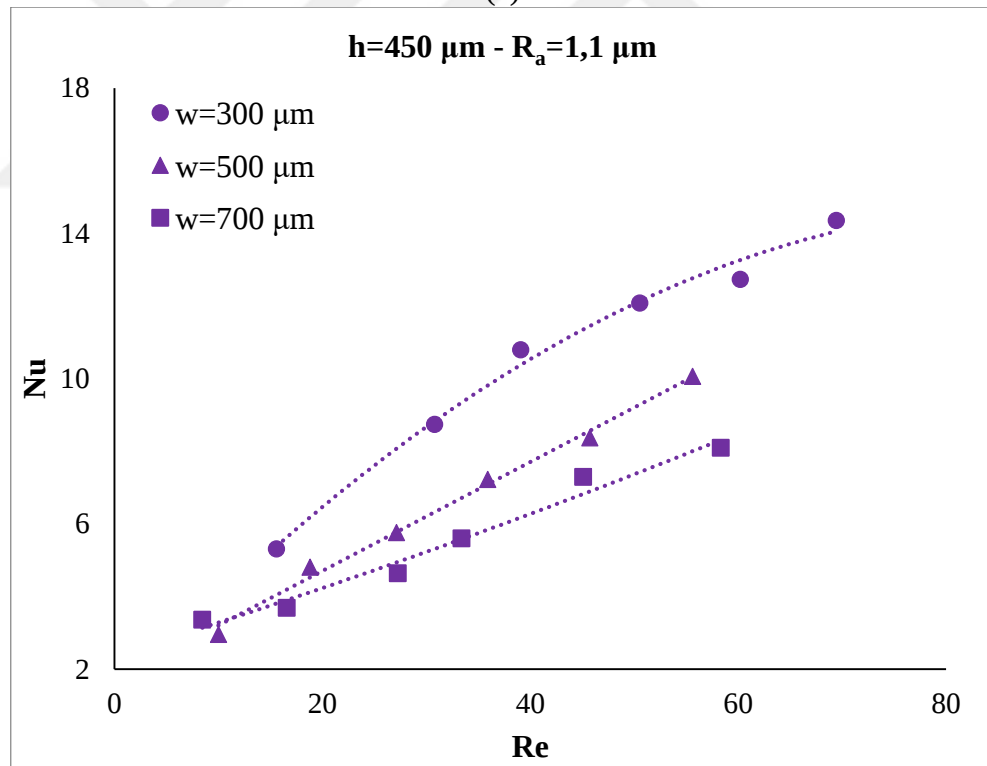
Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27’de sırasıyla 1,1, 1,8 ve 3,0 μm ’lik sabit pürüzlülük seviyeleri ile 300 ve 450 μm ’lik mikrokanal yükseklikleri için ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi sunulmaktadır. Bu üç grafikte ortak olarak mikrokanal genişliğinin azalmasıyla Nusselt sayıları, başka bir deyişle ısı transferi artmıştır. Düşük Reynolds sayılarında mikrokanal genişliğinin ısı transferi üzerindeki etkisi daha sınırlıyken artan Reynolds sayısı ile bu etki daha da belirgin bir hal almıştır. Yine de ilgili grafiklerde genişlik etkileri incelenirken bu çalışmada tekil bir mikrokanal değil sabit genişlikte mikrokanallı ısı alıcıların kullanıldığı unutulmamalıdır. Bu durum değişken genişliklerde değişken kanal adedi anlamına gelmektedir (Mikrokanallı ısı alıcıların geometrik özellikleri için bkz. Çizelge 3.1).

Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30’da ise kanal genişliği ve yüzey pürüzlülükleri sabit tutularak, kanal yüksekliklerinin ısı transferine etkisi irdelenmiştir. Burada da beklenildiği üzere sabit bir mikrokanal genişliği ve yüzey pürüzlülüğünde mikrokanal yüksekliklerinin azalması ısı transferini arttıran bir etki oluşturmuştur. Mikrokanal yüksekliğinin ısı transferi üzerindeki etkisi yüksek yüzey pürüzlülüklerinde daha belirgin olarak gözlemlenebilmektedir. Bu durum yanal yüzeylerdeki pürüzlülük yapılarının akışı bozma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Ek olarak düşük Reynolds sayılarında kanal boyutlarının ısı transferi üzerindeki etkisi ise belirsizleşmektedir.

Verilen grafikler karşılaştırıldığında en yüksek ortalama Nusselt sayıları en küçük kesite sahip ($w=300 \mu\text{m}$, $h=300 \mu\text{m}$) mikrokanallı ısı alıcı için elde edilmiştir. Benzer şekilde en düşük ortalama Nusselt sayısı sonuçları ise en büyük kesite sahip ($w=700 \mu\text{m}$, $h=450 \mu\text{m}$) mikrokanallı ısı alıcıda gözlemlenmiştir. Mikrokanalların hidrolik çaplarının azalmasıyla ısı transferinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Sabit bir Reynolds sayısında, kanalın hidrolik çapının küçülmesi akışkanın zorlanmış akış yönündeki hız bileşeninin artması anlamına gelmektedir. Zorlanmış taşınım bileşenini etkileyen bu hız artışı sınır tabaka etkileşimlerini tetiklemektedir. Bu durum ısı transferindeki iyileşmenin sebebi olarak değerlendirilmiştir (Lee et al. 2005; Chiu et al. 2011; Manay ve Sahin 2016).

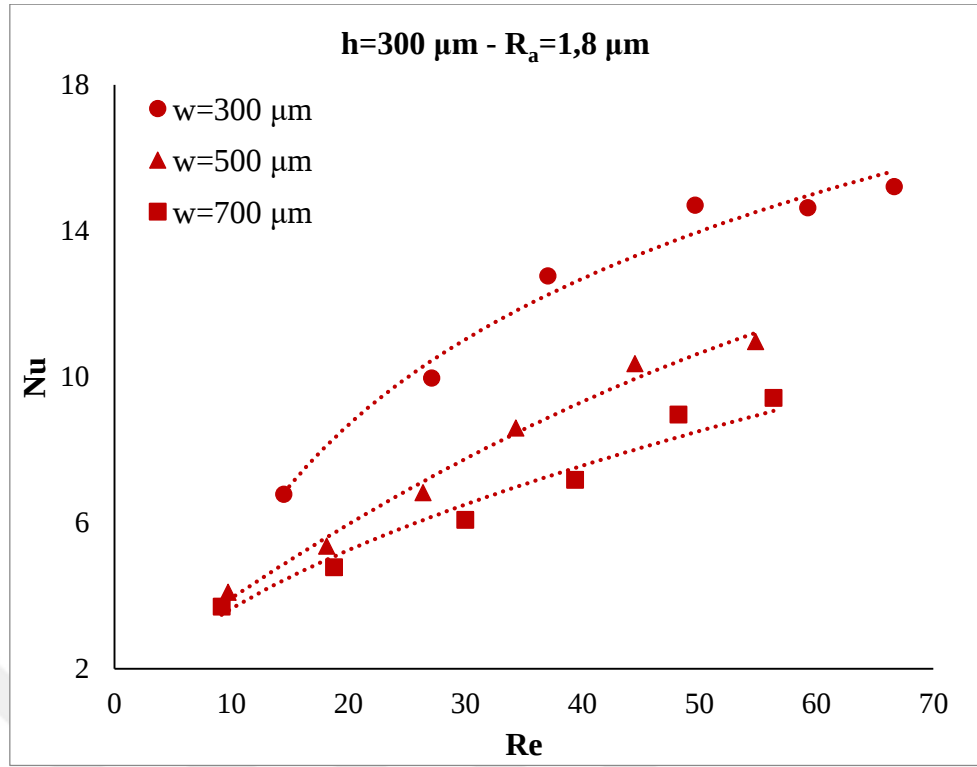


(a)

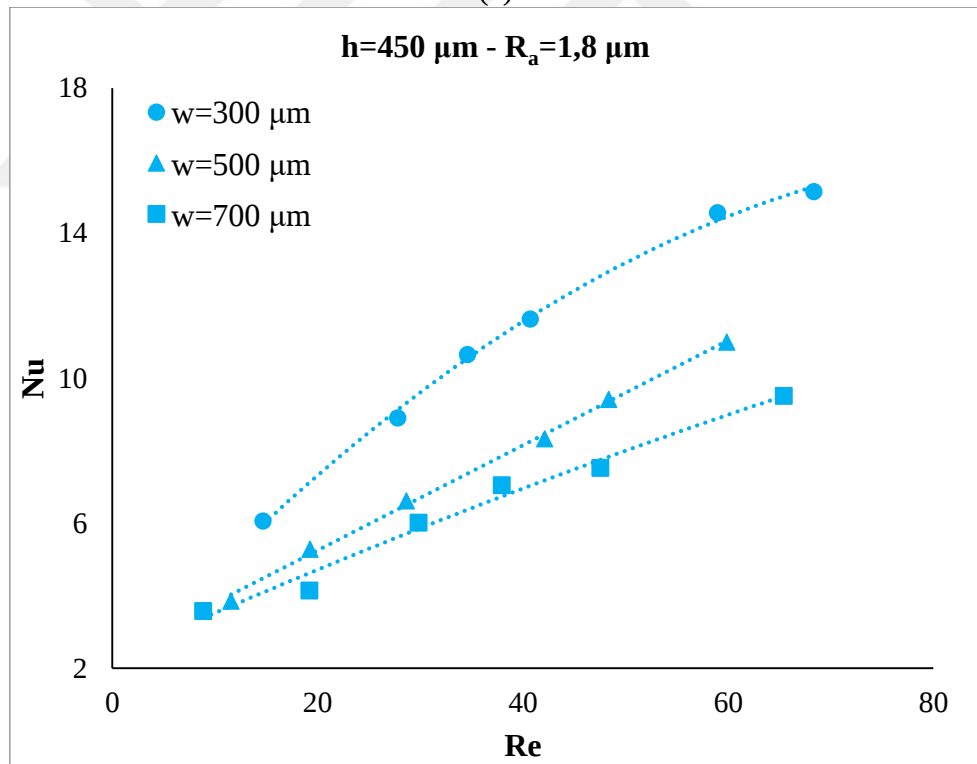


(b)

Şekil 4.25. $R_a=1,1 \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinde farklı mikrokanal genişlikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300 \mu\text{m}$ ve (b) $h=450 \mu\text{m}$.

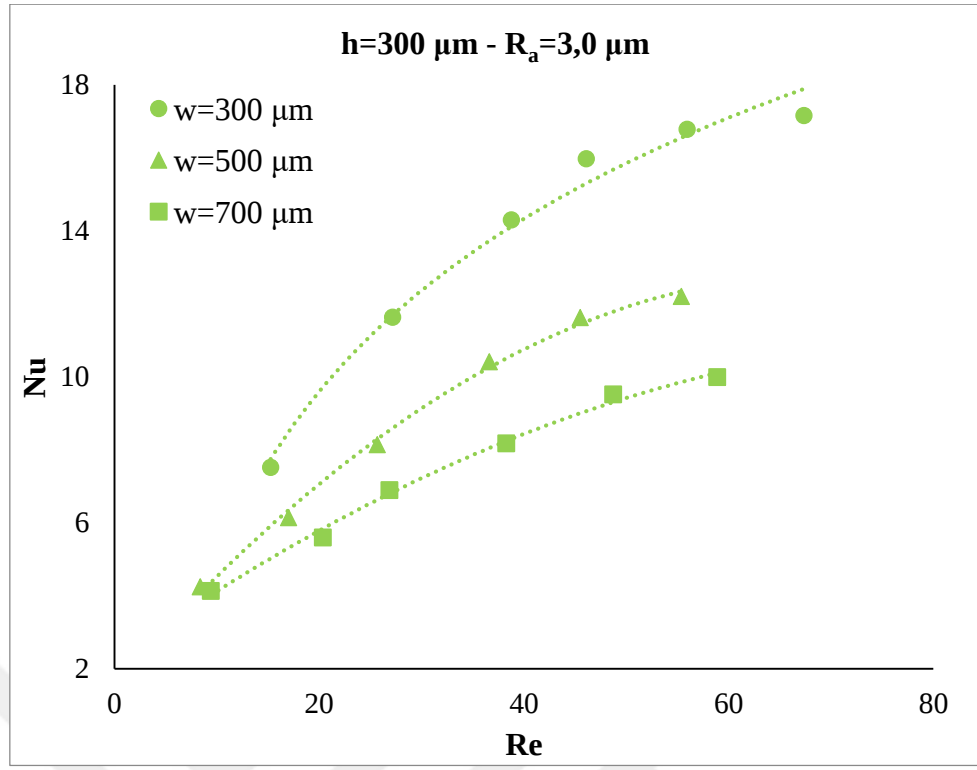


(a)

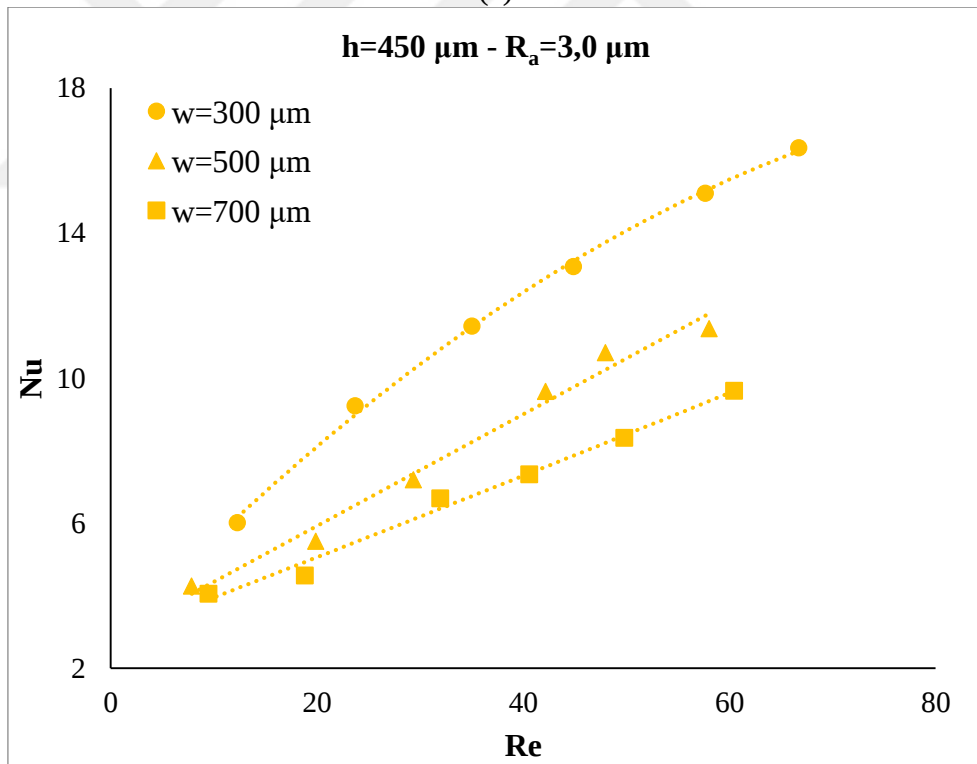


(b)

Şekil 4.26. $R_a=1,8 \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinde farklı mikrokanal genişlikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300 \mu\text{m}$ ve (b) $h=450 \mu\text{m}$.

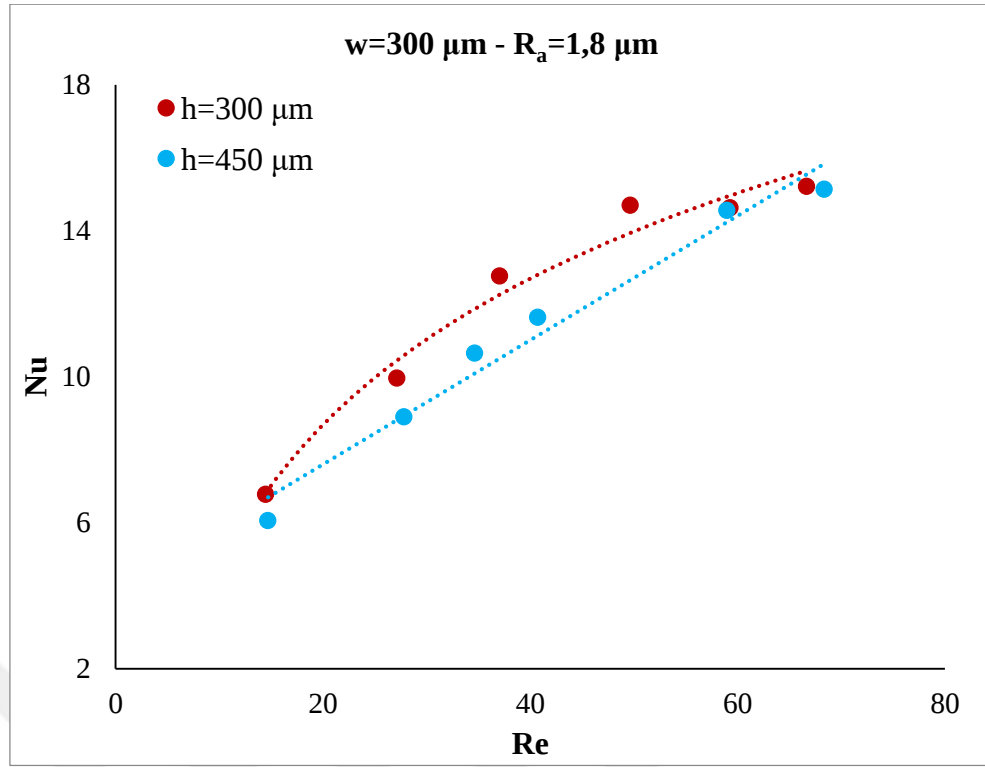


(a)

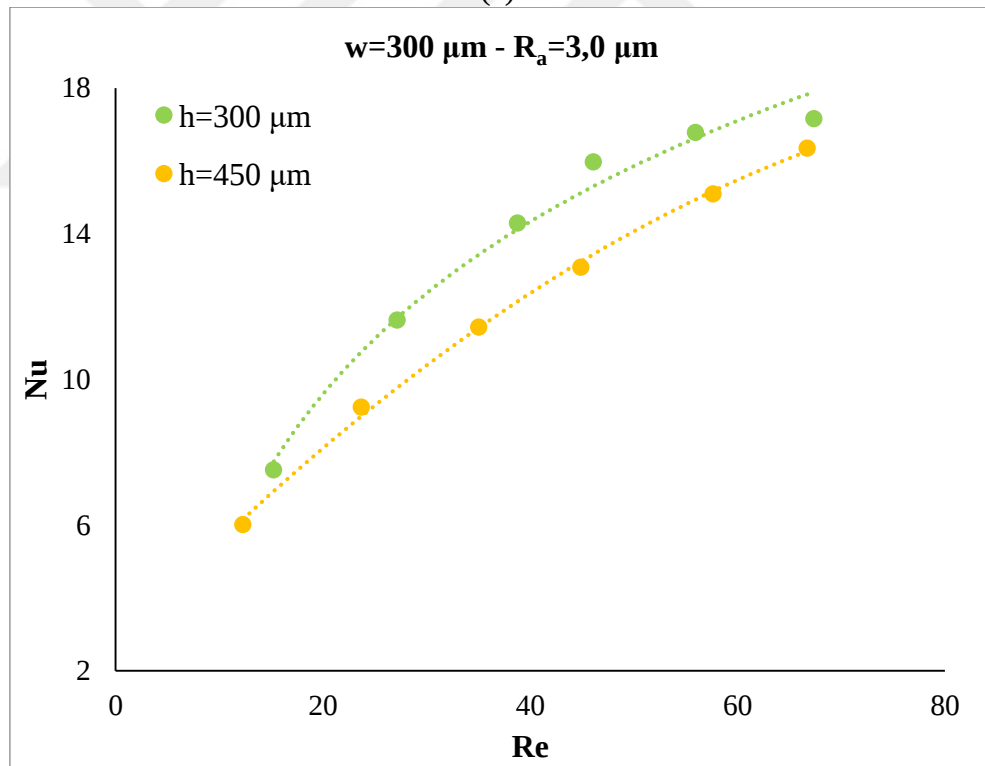


(b)

Şekil 4.27. $R_a=3,0 \mu\text{m}$ pürüzlülük değerinde farklı mikrokanal genişlikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $h=300 \mu\text{m}$ ve (b) $h=450 \mu\text{m}$.

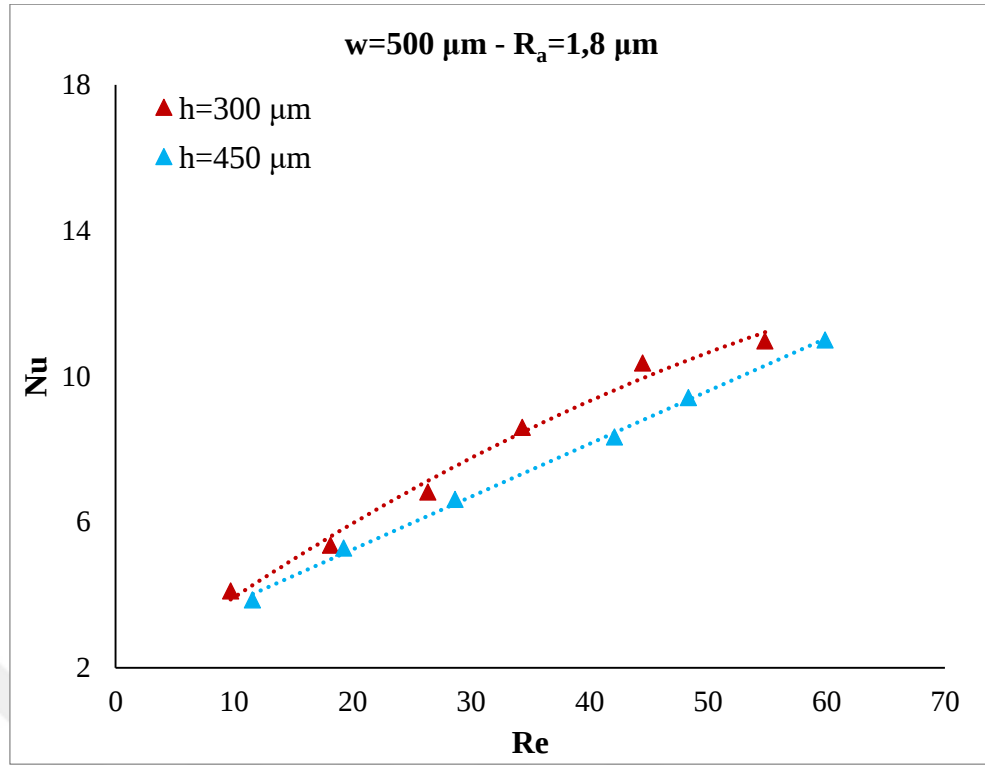


(a)

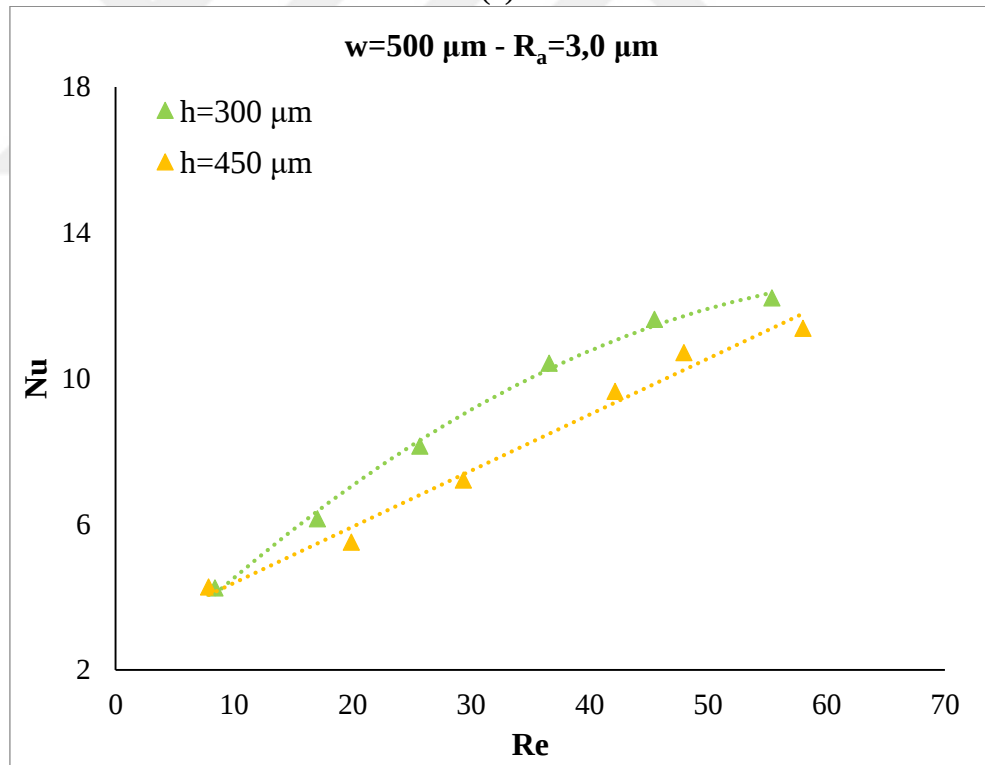


(b)

Şekil 4.28. w=300 μm mikrokana1 genişliğinde farklı mikrokana1 yükseklikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $R_a = 1,8 \mu\text{m}$ ve (b) $R_a = 3,0 \mu\text{m}$.

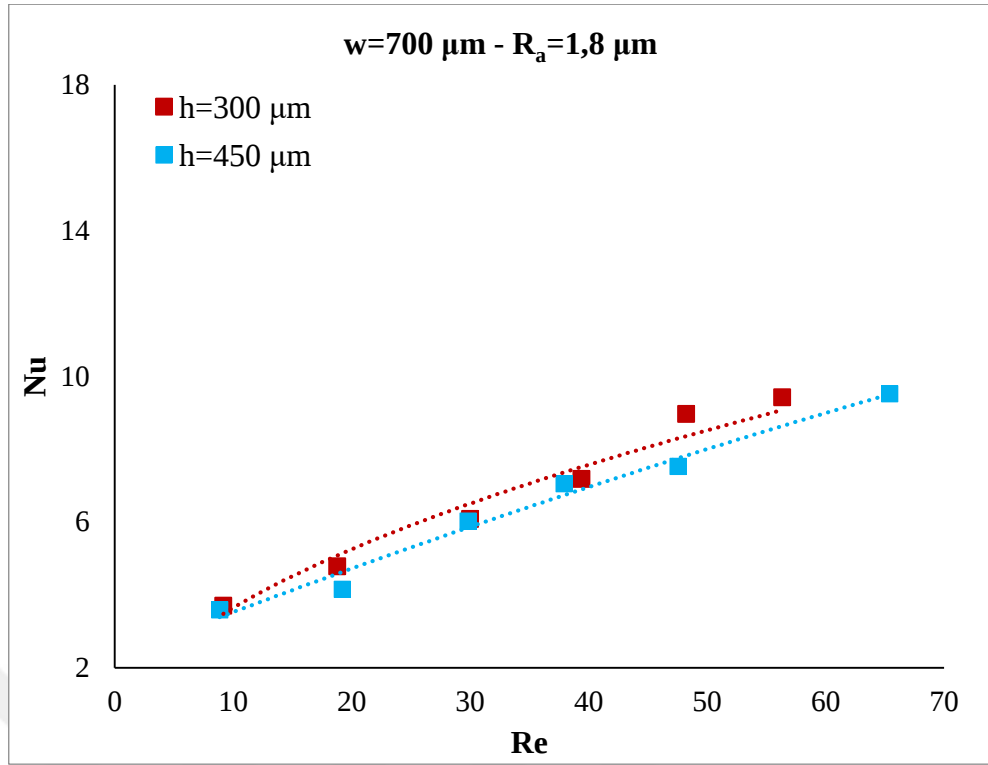


(a)

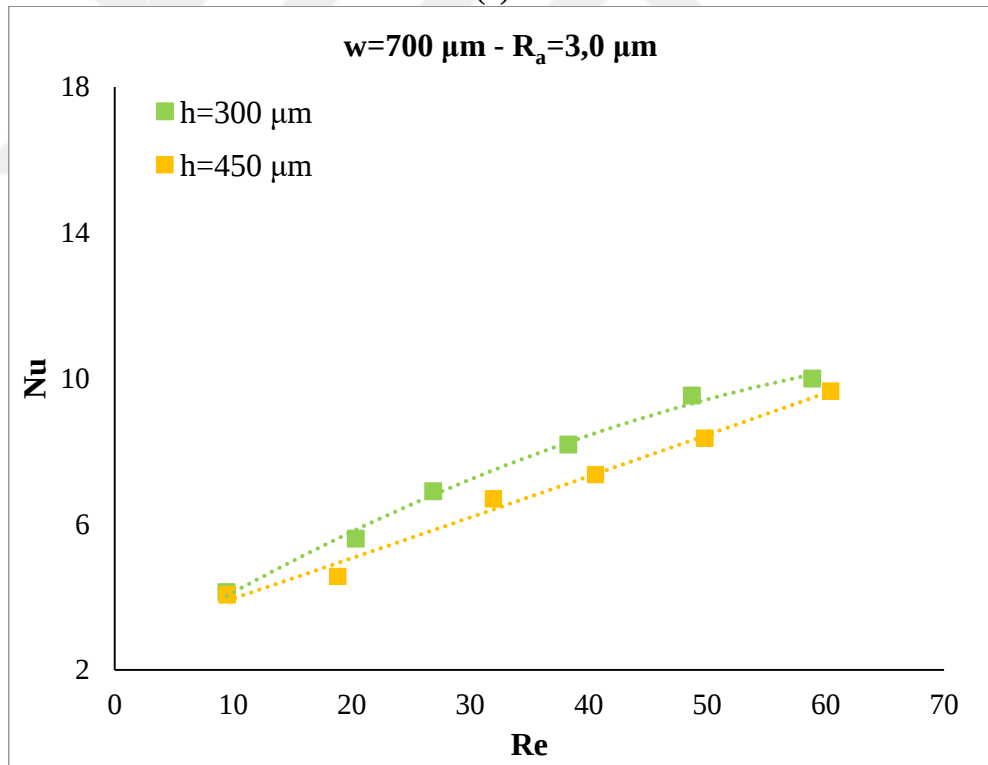


(b)

Şekil 4.29. $w=500 \mu\text{m}$ mikrokana1 genişliğinde farklı mikrokana1 yükseklikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $R_a = 1,8 \mu\text{m}$ ve (b) $R_a=3,0 \mu\text{m}$.



(a)



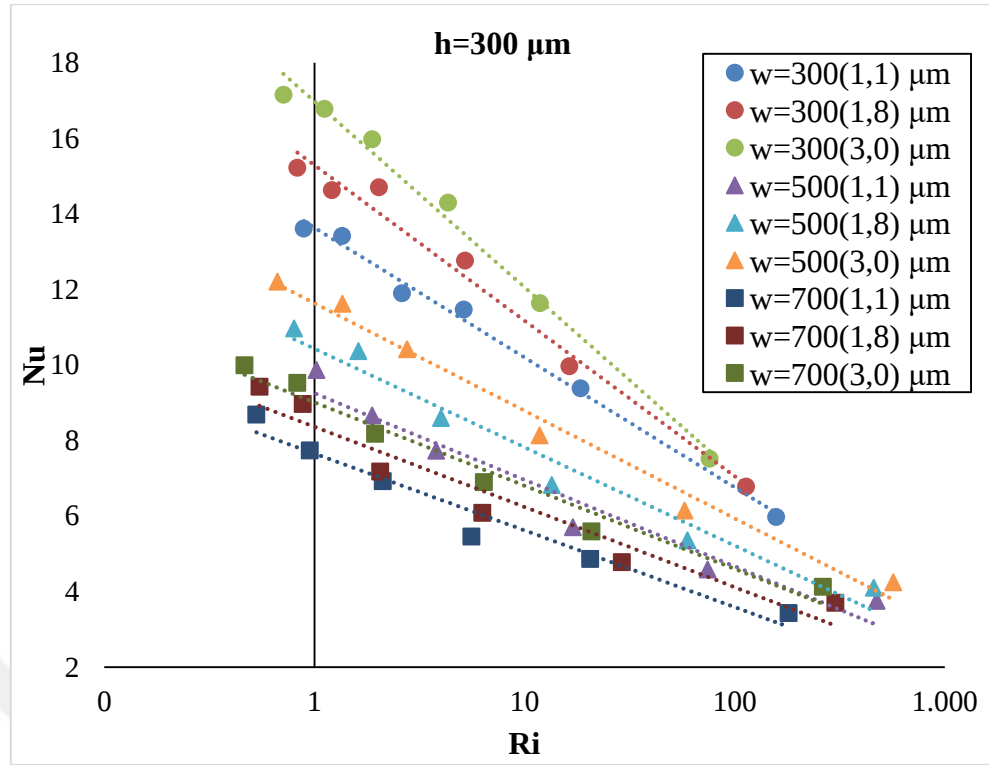
(b)

Şekil 4.30. $w=700 \mu\text{m}$ mikrokana1 genişliğinde farklı mikrokana1 yükseklikleri için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $R_a=1,8 \mu\text{m}$ ve (b) $R_a=3,0 \mu\text{m}$.

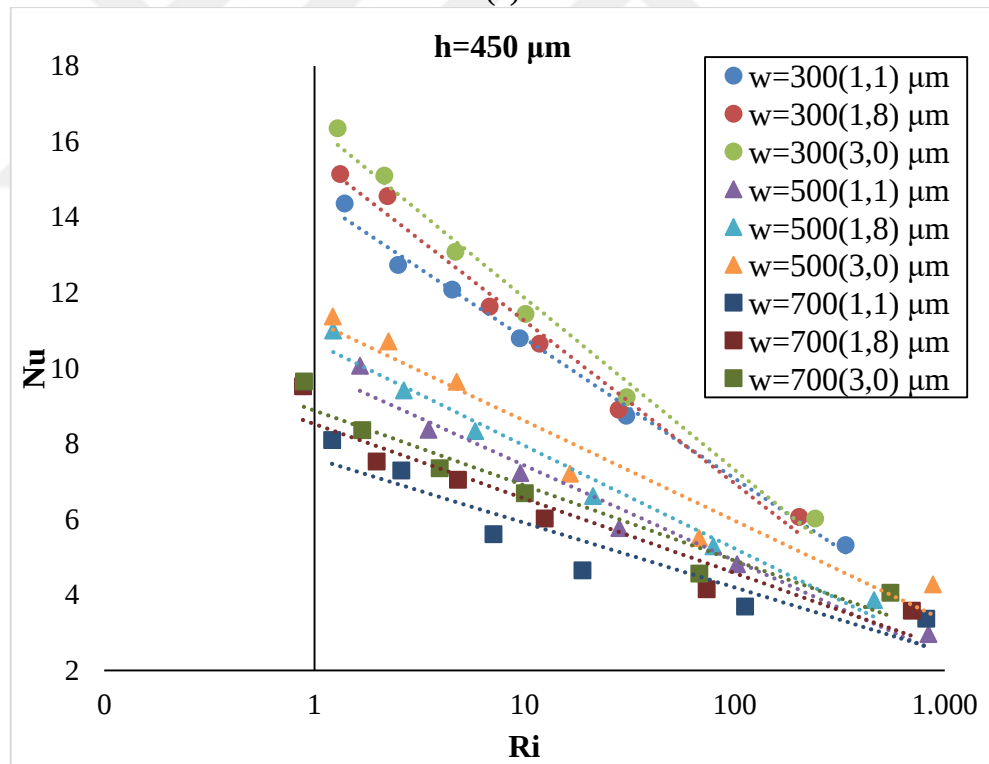
4.5. Zorlanmış ve Doğal Taşınım Isı Transferi Bileşenlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.31 (a) ve (b)'de sırasıyla 300 ve 450 μm 'lik sabit mikrokanal yüksekliklerinde mikrokanallı ısı değiştiricileri için Richardson sayısına karşılık ortalama Nusselt sayıları verilmektedir. Burada Richardson sayısı bir değerlendirme kriteri olarak taşınım ısı transferinin zorlanmış, doğal veya karma olarak tanımlanmasında kullanılmaktadır ve grafiklerde logaritmik yatay eksenle gösterilmiştir. Richardson sayısının 1 değerinden çok küçük değerler alması durumunda kaldırma kuvvetleri önemini yitirirken ısı transfer mekanizması zorlanmış taşınım olarak değerlendirilmektedir. Richardson sayısının 1 değerinden çok büyük değerler alması durumunda ise tahrik yönünde ihmal edilebilir akış ataletinden bahsedilir ve artık doğal taşınım söz konusu olmaktadır. Karma taşınım yaklaşımları için önerilen Richardson sayısı aralığı genellikle 0.1-10 olarak verilmektedir (Incropera and DeWitt 1996; Cengel and Ghajar 2014).

Şekil 4.31 (a) ve (b) incelendiğinde araştırılan durumların büyük oranda bu aralıkta kaldığı görülmektedir. Ayrıca Richardson sayısındaki düşüş pürüzlülüğün Nusselt sayısı üzerindeki etkisinin daha belirginleşmesine neden olmuştur. Richardson sayısı arttıkça yani zorlanmış taşınım bileşeni zayıfladıkça yüzey pürüzlülüklerinin karma taşınım ısı transferi üzerindeki etkisi belirsizleşmektedir. Buradan yüzey pürüzlülüklerinin neden olduğu ısı transferi artışında ağırlıklı olarak zorlanmış akış yönündeki etkileşimlerin sorumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak Şekil 4.31 (a) ve (b) karşılaştırıldığında mikrokanal yüksekliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüklerinin Nusselt sayısı üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Benzer durum her iki grafikte verilen farklı genişlikler için de söz konusu olmuştur. Genel olarak hidrolik çapın artması yüzey pürüzlülüklerinin ısı transferi üzerindeki etkisinin zayıflamasına neden olmaktadır. Önceki bölümlerde de detaylandırıldığı gibi sabit bir yüzey pürüzlülüğü için hidrolik çapın artırılması pürüzlülüklerin oluşturduğu sınır tabaka etkileşimleri ve karışım etkilerinin oransal olarak azaltmaktadır.



(a)

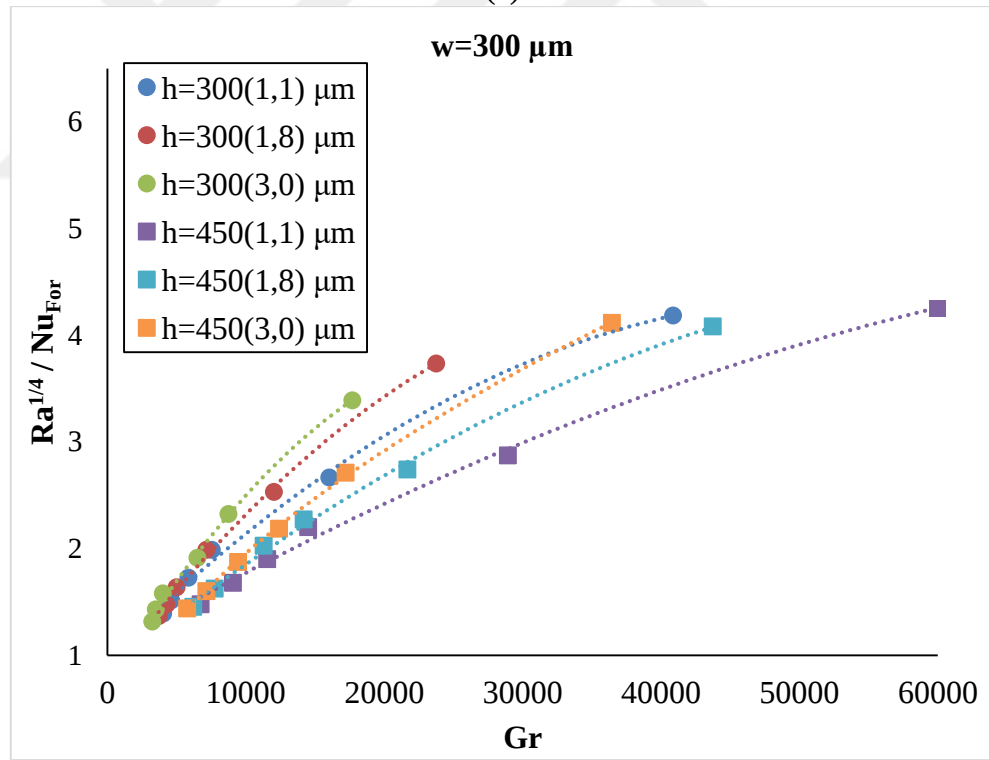
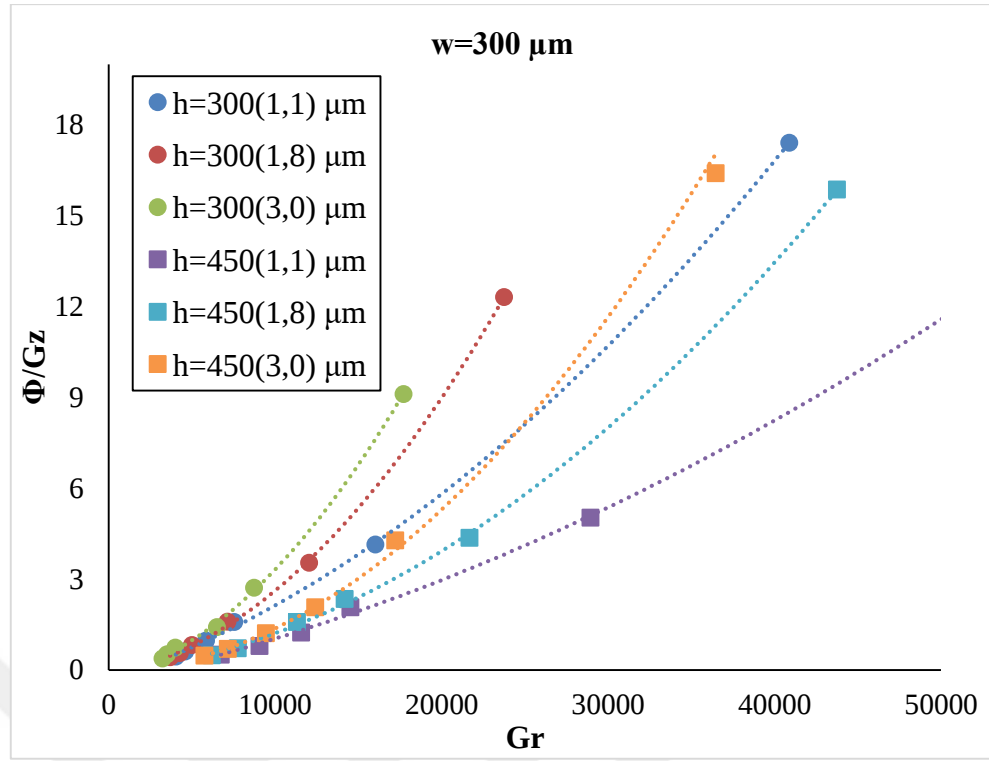


(b)

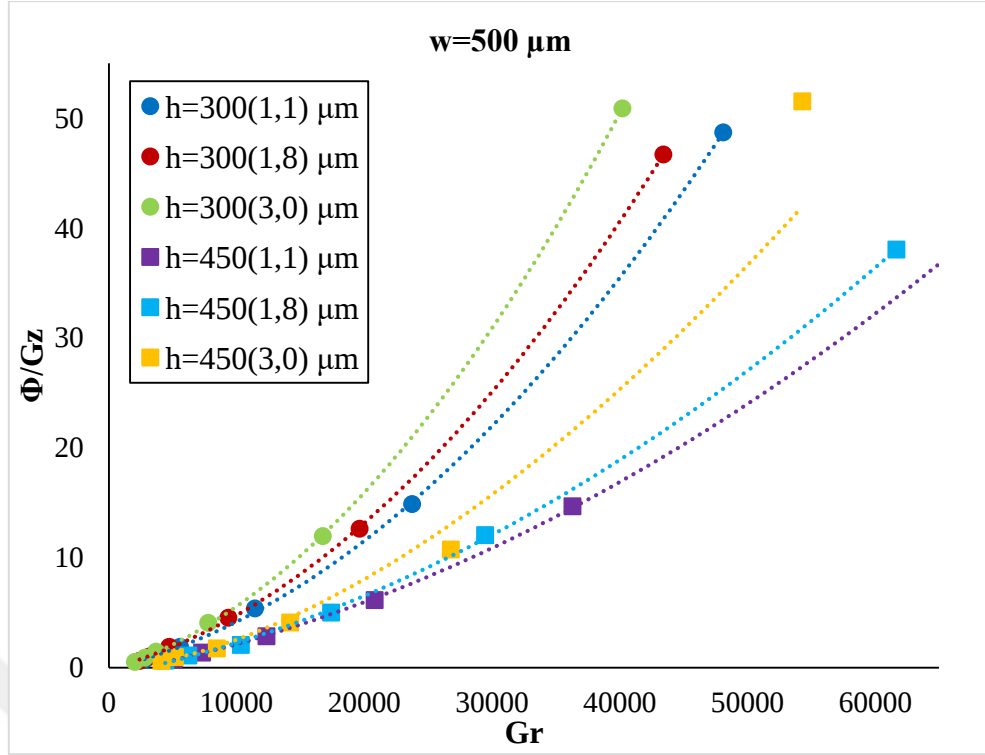
Şekil 4.31. Nusselt sayısının Richardson sayısıyla değişimi ve karma taşınım sınırları (a) $h=300 \mu\text{m}$ ve (b) $h=450 \mu\text{m}$.

Şekil 4.32, 4.33 ve 4.34’de farklı mikrokanal yükseklikleri ve yüzey pürüzlülükleri için doğal ve zorlanmış taşınım bileşenlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Grafikler sırasıyla 300, 500 ve 700 μm mikrokanal genişlikleri için hazırlanmış ve (a) ile (b) maddelerin sırasıyla Φ/Gz ifadesi ile $\text{Ra}^{1/4}/\text{Nu}_{\text{For}}$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi verilmiştir. Bahsi geçen grafiklerin (a) maddelerinde sunulan Φ/Gz ifadesi doğal taşınımın toplam ısı transferine oranının bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Grashof sayısının artmasıyla Φ/Gz ifadesi de hızla artmaktadır. Düşük Grashof sayılarında ise bu oran sıfıra yaklaşmakta yani ısı transfer mekanizması zorlanmış taşınımına dönüşmektedir. Sabit bir mikrokanal genişliği ve yüksekliği için yüzey pürüzlülüklerinin karma taşınım üzerindeki etkisi ancak Grashof sayısının artmasıyla gözlenebilir bir hal almıştır. Doğal taşınım bileşenin toplam ısı transferindeki ağırlığın artması akış alanında zorlamış akışlara dik ikincil akışların kuvvetlenmesi anlamına gelmektedir. Dikdörtgen kanal kesitinde dikey duvarlarındaki pürüzlülüklerin ikincil akışları bozan etkileri sonucu doğal taşınımında bir miktar artış beklenmektedir. Fakat bu sınırlı artış nispeten yüksek Grashof sayılarında belirgin şekilde gözlenebilmektedir.

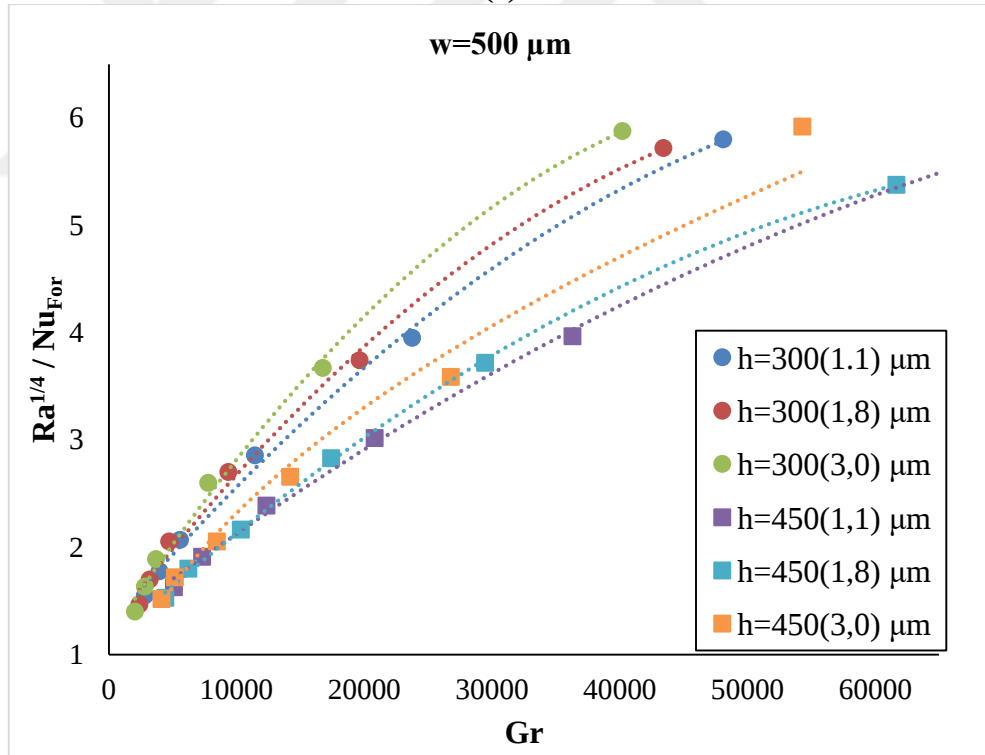
Burada (b) maddelerinde verilen $\text{Ra}^{1/4}/\text{Nu}_{\text{For}}$ ifadesi ise karma taşınım ile ısı transferinde doğal taşınım etkileriyle zorlanmış taşınım etkinlerinin kıyaslanmasında yaygın olarak kullanılan bir ifadedir (Feng and Li 2013; Manay and Mandev 2019). Bu ifadenin artması doğal taşınım etkinliğinin kuvvetlenmesi anlamına gelmektedir. İlgili grafikler incelendiğinde, bu araştırmaya konu olan tüm yüzey pürüzlülükleri, mikrokanal yükseklikleri ve genişlikleri için düşük Grashof sayılarında diğer karma taşınım kıyaslama ifadesine benzer şekilde $\text{Ra}^{1/4}/\text{Nu}_{\text{For}}$ değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Artan Grashof sayısı ile kaldırma kuvvetlerinin etkinliği de artacağından $\text{Ra}^{1/4}/\text{Nu}_{\text{For}}$ ifadesi yükselmektedir. Ayrıca sabit bir mikrokanal genişliği için kanal yüksekliğinin artması doğal taşınım bileşenin nispeten zayıflamasına neden olmaktadır. Şekil 4.32, 4.33 ve 4.34 birlikte değerlendirildiğinde mikrokanal yüksekliğinin karma taşınım bileşeni üzerindeki etkisinin kanal genişliği artmasıyla daha belirgin bir hal aldığı da görülmektedir. Ek olarak pürüzlülüğün doğal taşınım bileşeni üzerindeki etkisinin mikrokanal kesiti başka bir deyişle hidrolik çapın artmasıyla belirsizleştiği de görülmektedir. Bu durumdan azalan ikincil akış etkinlikleri sorumlu tutulmaktadır.



Şekil 4.32. $w=300 \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı yüzey pürüzlülükleri için karma taşınım sonuçlarının değerlendirilmesi (a) Φ/Gz yaklaşımı ve (b) $Ra^{1/4}/Nu_{For}$ yaklaşımı.

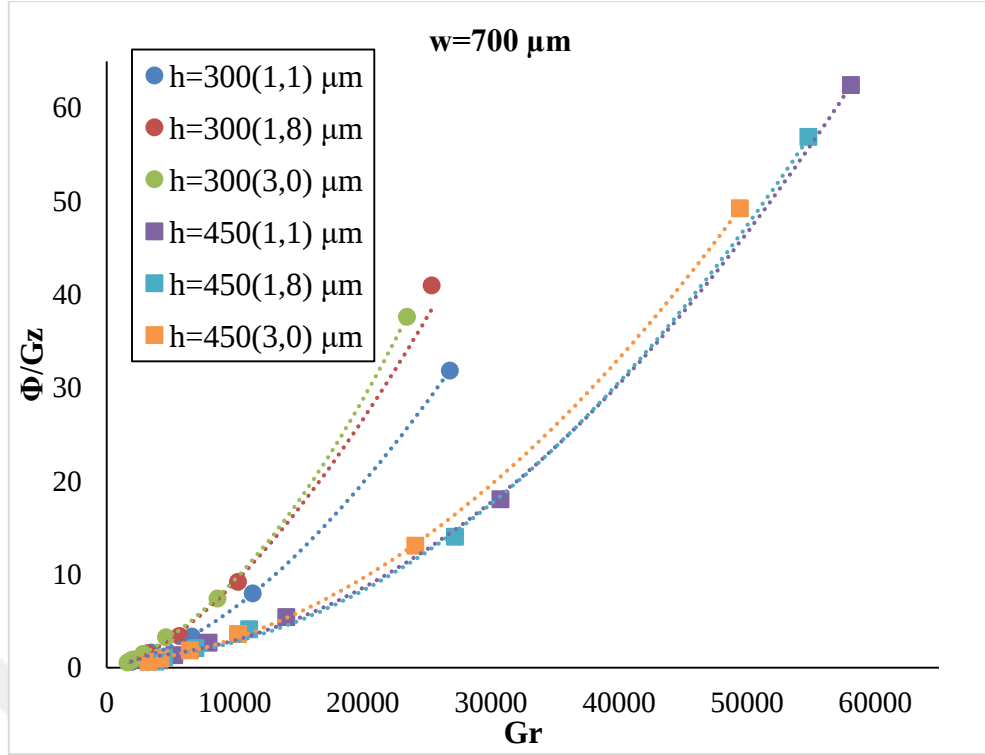


(a)

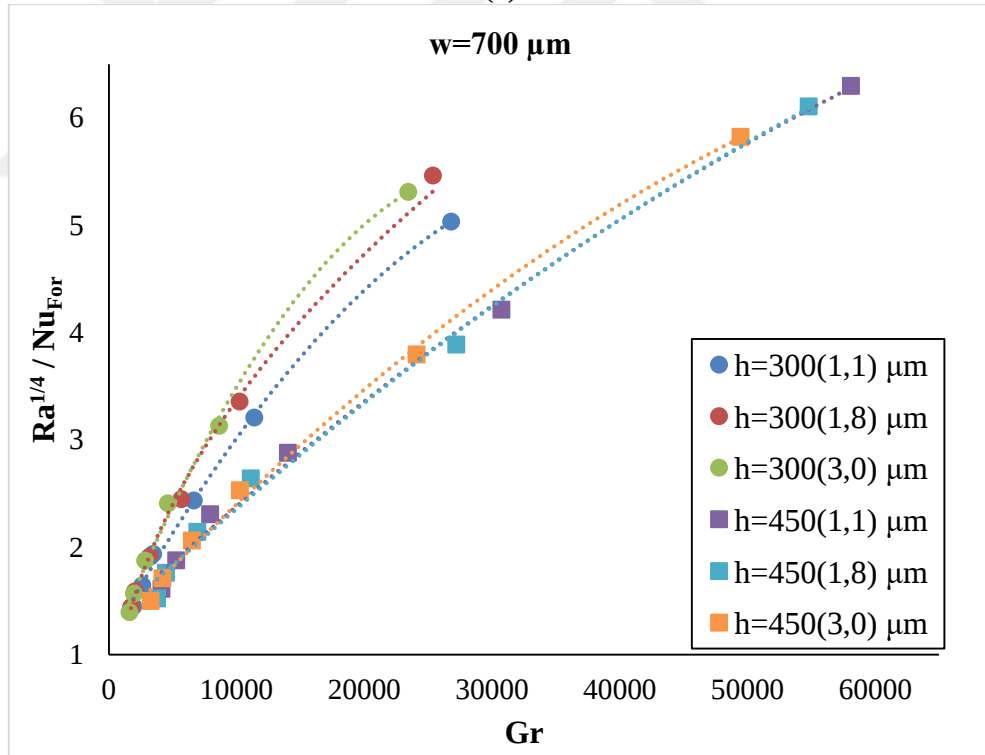


(b)

Şekil 4.33. $w=500 \mu m$ mikrokanal genişliğinde farklı yüzey pürüzlülükleri için karma taşınım sonuçlarının değerlendirilmesi (a) Φ/Gz ve (b) $Ra^{1/4}/Nu_{For}$ yaklaşımı.



(a)



(b)

Şekil 4.34. $w=700 \mu\text{m}$ mikrokanal genişliğinde farklı yüzey pürüzlülükleri için karma taşınım sonuçlarının değerlendirilmesi (a) Φ/Gz ve (b) $Ra^{1/4}/Nu_{For}$ yaklaşımı.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mikrokanallarda imalat süreci kaynaklı yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra mikrokanal genişliği ve yüksekliği gibi geometrik parametrelerin karma taşınım ısı transferine etkileri incelenmiştir. Paslanmaz çelik malzemeden üretilen dikdörtgen kesitli çoklu mikrokanallarda doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin toplam ısı transferine katkısı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler 1,1 μm , 1,8 μm ve 3,0 μm olmak üzere üç farklı ortalama yüzey pürüzlülüğüne, 300 μm , 500 μm ve 700 μm 'lik üç mikrokanal genişliğine ve 300 μm ve 450 μm 'lik iki mikrokanal yüksekliğine sahip 18 farklı mikrokanallı ısı alıcıyla gerçekleştirilmiştir. İmalat sürecinde elektro-erozyon parametreleri değiştirilerek yüzey pürüzlülüğü hassas şekilde kontrol edilmiş ve farklı geometrik özelliklerde üretilen mikrokanallı ısı alıcılar için detaylı yüzey haritaları oluşturulmuştur. Temassız olarak ölçülen yüzey pürüzlülükleri için ortalama yüzey pürüzlülüğünün yanında ek pürüzlülük parametreleri de verilmiştir. İş akışkanı olarak saf su kullanılan deneylerde, mikrokanallı ısı alıcı alt yüzeyine sabit ısı akısı uygulanmıştır. Ayrıca karma taşınım koşullarını sağlamak için deneyler 10–80 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Devam eden kısımda önemli sonuçlar ve öneriler özetlenmiştir.

- Mikrokanal üretimi için muadil üretim yöntemleriyle elde edilmesi güç olan, boyutsal hassasiyet ve düzgün kanal kesiti mikro dalma elektro erozyon yöntemiyle elde edilebilmiştir. Bunun yanında tez çalışması için kritik öneme sahip olan yüzey pürüzlülüklerinin kontrolü ve düzgün dağılımlı yüzey yapısı da elektro erozyon yöntemiyle sağlanabilmiştir.
- Geleneksel modellerin ve son dönemde oluşturulmuş ampirik eşitliklerin tahminleri pürüzlü kanallar için elde edilen sonuçlarla büyük oranda uyumsuzdur.
- Yüzey pürüzlülükleri karma taşınım ortalama Nusselt sayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Bu etki hidrolik çapın azalmasıyla daha da belirginleşmektedir.

- En iyi karma taşınım ısı transferi sonuçları en düşük hidrolik çap ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü için elde edilmiştir.
- Artan yüzey pürüzlülük seviyelerinin ısı transferini artırma yönünde etkilemesinden, artan ısı transfer yüzey alanı, karıştırma etkisi, artan giriş uzunluğu ve sınır tabaka etkileşimleri sorumlu tutulmuştur.
- Yüzey pürüzlülüklerinin zorlanmış taşınım bileşeni üzerindeki etkinliğinin, doğal taşınım bileşenine oranla daha baskın olduğu gözlemlenmiştir.
- Zorlanmış taşınım bileşeni üzerindeki yüzey pürüzlülüğü etkisi tüm Reynolds sayılarında gözlenebilirken, doğal taşınımında bu etki nispeten yüksek Grashof sayısı değerinde ve düşük hidrolik çaplarda gözlenebilir olmuştur.
- $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, $700\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m}$ ve $700\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m}$ kesitli mikrokanallı ısı alıcılarda yüzey pürüzlülüğünün $1.1\ \mu\text{m}$ 'den $1.8\ \mu\text{m}$ 'ye artması Nusselt sayısında sırasıyla %24, %19, %17 ve %13 civarında artışa neden olmuştur. Benzer şekilde, yüzey pürüzlülüğünün $1.8\ \mu\text{m}$ 'den $3.0\ \mu\text{m}$ 'ye artması aynı kanal kesitlerinde Nusselt sayısında sırasıyla %17, %15, %14 ve %10 civarında artışa sebebiyet vermiştir.
- Mikrokanallarda çoğunlukla ihmal edilmesine rağmen düşük seviyelerde yüzey pürüzlülükleri dahi ısı transferi sonuçlarına ciddi oranda etki edebilmektedir. Mikrokanallarda ısı transferi literatüründe bir uyumun olmamasının nedenlerinden birinin de bu olabileceği düşünülmektedir.
- Mikrokanal uygulamalarında yüzey pürüzlülüklerin de bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu hedeflenen uygulamadaki davranış belirsizliklerini azaltmakta faydalı olabilir.
- Mikrokanalların doğası gereği, pürüzlü yüzeyler ısı transferi artıma uygulamaları için pasif bir yöntem olarak ele alınacaksa, pürüzlendirme işlemlerinin üretimden bağımsız düşülmemesi ve üretim prosesleri sırasında kontrol edilmesi önerilmektedir.

Karma taşınım mekanizmasında zorlanmış akış bileşeni doğal taşınım kaynaklı ikincil akışlardan büyük oranda etkilenmiştir. Buna ek olarak yüzey pürüzlülükleri de kanal yüzeylerine yakın bölgelerde hem zorlanmış akışı hem de doğal akışı bozmaktadır. Bu sebeple karma taşınım ile ısı transferi mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi ve açıklanabilmesi için akış yapılarının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Fakat mikrokanallardaki dar kesitler akış yapısını incelemeyi güçleştirmektedir. Bunun için μ PIV gibi modern akış görselleştirme tekniklerinin kullanımını önerilmekte ve devam eden çalışmalar için planlanmaktadır. Ayrıca pürüzlülük yapılarının hidrodinamik ve termal gelişimi yavaşlatarak giriş uzunluklarında artışa sebebiyet verdiği bilinmektedir. Bu yöndeki araştırmalar da bu konunun daha iyi anlaşılmasına ışık tutacaktır.



KAYNAKLAR

- Acosta, R. E., Muller, R. H. ve Tobias, W. C. 1985. Transport processes in narrow (capillary) channels. *AIChE Journal*, 31, 473–482.
- Adams, T. M., Abdel-Khalik, S. I., Jeter, M. ve Qureshi, Z. H. 1999a. An experimental investigation of single phase forced convection in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(6–7), 851–857.
- Adams, T. M., Dowling, M. F., Abdel-Khalik, S. I. ve Jeter, S. M. 1999b. Applicability of traditional turbulent single phase forced convection correlations to non-circular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 4411–4415.
- Adham, A. M., Mohd-Ghazali, N. ve Ahmad, R. 2013. Thermal and hydrodynamic analysis of microchannel heat sinks: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 614-622.
- Agarwal, A., Bandhauer, T. M. ve Garimella S. 2010. Measurement and modeling of condensation heat transfer in non-circular microchannels. *International Journal of Refrigeration*, 33(6), 1169–1179.
- Amin, A. K. M., Bagum, M. N., Fathiah, N., Konneh, M. ve Ariff, T. F. 2016. An experimental approach to determine the critical depth of cut in Brittle-to-Ductile phase transition during end milling of soda-lime glass. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4553–4562.
- Ansari, M. Q. ve Zhou, G. 2020. Flow and heat transfer analysis of microchannels structured with rectangular surface roughness. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 156, 108066.
- Anonymous, 2021a. Web Sitesi: <https://www.news-medical.net>, Erişim Tarihi: 19.05.2021.
- Anonymous, 2021b. Web Sitesi: <https://www.i-micronews.com>, Erişim Tarihi: 19.05.2021.
- Anonymous, 2021c. Web Sitesi: <https://www.strouse.com>, Erişim Tarihi: 19.05.2021.
- Anonymous, 2021d. Web Sitesi: <https://www.vpei.com>, Erişim Tarihi: 19.05.2021.
- Anonymous, 2021e. Web Sitesi: <http://www.datron.com>, Erişim Tarihi: 19.05.2021.
- Anonymous, 2021f. Web Sitesi: <https://www.wevolver.com>, Erişim Tarihi: 28.08.2021 – Dry etching vs wet etching: everything you need to know.
- Anonymous, 2021g. Web Sitesi: <http://www.zygo.com>, Erişim Tarihi: 28.08.2021.
- Anonymous, 2021h. Web Sitesi: <http://www.veeco.com>, Erişim Tarihi: 28.08.2021.

- Anonymous, 2021i. Web Sitesi: <https://www.bruker.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Anonymous, 2021j. Web Sitesi: <https://www.zeiss.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Anonymous, 2021k. Web Sitesi: <https://www.longerpump.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Anonymous, 2021l. Web Sitesi: <https://www.new.siemens.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Anonymous, 2021m. Web Sitesi: <http://www.daihan-sci.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Anonymous, 2021n. Web Sitesi: <https://www.gwinstek.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Anonymous, 2021o. Web Sitesi: <https://www.hioki.com>, Erişim Tarihi: 18.11.2021.
- Asad, A. B., Masaki, T., Rahman, M., Lim, H. S. ve Wong, Y. S. 2007. Tool-based micro-machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 192, 204–211.
- Asadi, M., Xie, G. ve Sunden, B. 2014. A review of heat transfer and pressure drop characteristics of single and two-phase microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 34–53.
- Ashman, S. ve Kandlikar, S. G. 2006. A review of manufacturing processes for microchannel heat exchanger fabrication. *ASME 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Parts A and B*. Limerick, 855–860, Ireland.
- Asthana, A., Zinovik, I., Weinmueller, C. ve Poulikakos, D. 2011. Significant Nusselt number increase in microchannels with a segmented flow of two immiscible liquids: an experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1456–1464.
- Ateş, İ. 2020, Mikrokanallarda yüzey pürüzlülüğünün akış kaynama karakteristiklerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 250, Erzurum.
- Aurich, J. C., Engmann, J., Schueler, G. M. ve Haberland, R. 2009. Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 58(1), 311–314.
- Aziz, A. ve Niedbalski, N. 2011. Thermally developing microtube gas flow with axial conduction and viscous dissipation. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 332–340.
- Bahrami, H., Bergman, T. L. ve Faghri, A. 2012. Forced convective heat transfer in a microtube including rarefaction, viscous dissipation and axial conduction effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 6665–6675.

- Ban, H., Lin, B. ve Song, Z. 2010. Effect of electrical double layer on electric conductivity and pressure drop in a pressure-driven microchannel flow. *Biomicrofluidics*, 4, 014104.
- Barisik, M., Yazicioglu, A. G., Çetin, B. ve Kakaç, S. 2015. Analytical solution of thermally developing microtube heat transfer including axial conduction, viscous dissipation, and rarefaction effects. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 81–88.
- Baviere, R., Ayela, F., Le Person, S. ve Favre-Marinet, M. 2004. An experimental study of water flow in smooth and rough rectangular micro-channels. *Proceedings of 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels, ICMM2004–2338*, Rochester.
- Baviere, R., Favre-Marinet, M. ve Le Person, S. 2006. Bias effects on heat transfer measurements in microchannel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3325–3337.
- Becker, H. ve Locascio, L. E. 2002. Polymer microfluidic devices. *Talanta*, 56, 267–287.
- Bejan, A. 2013. *Convection heat transfer - fourth edition*. John Wiley and Sons, Hoboken, 704, New Jersey.
- Belloy, E., Thurre, S., Walckiers, E., Sayah, A. ve Gijs, M. A. M. 2000. The introduction of powder blasting for sensors and microsystem applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 84, 330–337.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. ve DeWitt, D. P. 2017. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 992, New York.
- Bertsch, S. S., Groll, E. A. ve Garimella, S. V. 2009. Effects of heat flux, mass flux, vapor quality, and saturation temperature on flow boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 35, 142–154.
- Bhushan, B. 2000. *Modern Tribology Handbook*, 1st edition. Volume One–Chapter Two. CRC Press, 1760, Boca Raton.
- Bobrovskiy, I. N. 2018. How to select the most relevant roughness parameters of a surface: Methodology Research Strategy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 302, 012066.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Walton, A. J., Lin, H., Cummins, G., Kenning, D. B. R. ve Karayiannis, T. G. 2011. Experimental investigation of non-uniform heating effect on flow boiling instabilities in a microchannel-based heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 309–324.
- Boswell, B., Islam, M. N. ve Davies, I. J. 2018. A review of micro-mechanical cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 789–806.

- Brackbill, T. P. ve Kandlikar, S. G. 2007. Effect of sawtooth roughness on pressure drop and turbulent transition in microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 28, 662–669.
- Brackbill, T. P. ve Kandlikar, S. G. 2008. Effects of roughness on turbulent flow in microchannels and minichannels, 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM-2008), 23–25 June, ASME–Proceedings of the ICNMM-2008, 62224, Darmstadt, Germany.
- Brodie, I. ve Murray, J. J. 1982. *The physics of microfabrication*. Plenum Press, 524, New York.
- Brown, A. ve Thomas, M. 1965. Combined free and forced convection heat transfer for laminar flow in horizontal tubes. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 7(4), 440–448.
- Brown, C. A. 2017. *Introduction to Surface Roughness Measurement–Roughness measurement guidebook*. Olympus, 48, Worcester.
- Brugger, J., Buser, R. A. ve Rooij, N. F. D. 1992. Silicon cantilevers and tips for scanning force microscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 34, 193–200.
- Bucci, A., Celata, G. P., Cumo, M., Serra, E., Zummo, G. 2003. Water single-phase fluid flow and heat transfer in capillary tubes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 11(6), 81–89.
- Carnero, B., Bao-Varela, C., Gómez-Varela, A. I. ve Flores-Arias, M. T. 2022. Internal microchannel manufacturing using stereolithographic 3D printing, In: *Trends and Opportunities of Rapid Prototyping Technologies*. IntechOpen, 82, London.
- Celata, G. P., Cumo, M., Guglielmi, M. ve Zummo, G. 2000. Experimental investigation of hydraulic and single phase heat transfer in 0.130 mm capillary tube. *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 108–113, New York.
- Celata, G. P., Cumo, M., Guglielmi, M. ve Zummo, G. 2002. Experimental investigation of hydraulic and single-phase heat transfer in 0.130-mm capillary tube. *Microscale Thermophysical Engineering*, 6, 85–97.
- Celata, G. P., Cumo, M., Marconi, V., McPhail, S. J. ve Zummo, G. 2006a. Microtube liquid single-phase heat transfer in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3538–3546.
- Celata, G. P., Cumo, M., McPhail, S. J. ve Zummo, G. 2006b. Characterization of fluid dynamic behaviour and channel wall effects in microtube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27, 135–143.
- Celata, G. P., Cumo, M., McPhail, S. J., Tesfagabir, L. ve Zummo, G. 2007a. Experimental study on compressible flow in microtubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 28–36.

- Celata, G. P., Cumo, M., McPhail, S. J. ve Zummo, G. 2007b. Single-phase laminar and turbulent heat transfer in smooth and rough microtubes. *Microfluidics and Nanofluidics*, 3(6), 697–707.
- Celata, G. P., Saha, S. K., Zummo, G. ve Dossevi, D. 2010. Heat transfer characteristics of flow boiling in a single horizontal microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 1086–1094.
- Cengel, Y. A. ve Ghajar, A. J. 2014. *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*–5th edition. McGraw-Hill Professional, 992, New York.
- Chae, J. ve Park, S. S. 2007. High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 1433–1441.
- Chaides, O., Ahuett-Garza, H. ve Yi, A. Y. 2014. Implementation of a microchannel manufacturing system based on micro-electro discharge machining. *Ingenieria Mechanica Marzo*, 4(6), 229–238.
- Chen, C., Mehl, B. T., Munshi, A. S., Townsend, A. D., Spence, D. M. ve Martin, R. S. 2016. 3D printed microfluidic devices –fabrication, advantages and limitations: a mini review. *Analytical Methods*, 8, 6005–6012.
- Chen, Y., Wu, R., Shi, M., Wu, J. ve Peterson, G.P. 2009a. Visualization study of steam condensation in triangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5122–5129.
- Chen, Y., Zhang, C., Shi, M. ve Wu, J. 2009b. Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 917–920.
- Chen, Y., Zhang, C., Shi, M. ve Peterson, G.P. 2009c. Role of surface roughness characterized by fractal geometry on laminar flow in microchannels. *Physical Review Journals*, 80, 26301.
- Chiou, F. 2015. Microinjection Molding, In: Bhushan, B. edition *Encyclopedia of Nanotechnology*. Springer, 4512, Dordrecht.
- Chiu, H. C., Jang, J. H., Yeh, H. W. ve Wu, M. S. 2011 The heat transfer characteristics of liquid cooling heat sink containing microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1), 34–42.
- Choi, S. B., Barron, R. F. ve Warrington, R. O. 1991. Fluid flow and heat transfer in microtubes. *Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems*. ASME DSC, 32, 123–134.
- Choo, K. L., Ogawa, Y., Kanbargi, G., Ota, V., Raff, L. M. ve Komanduri, R. 2004. Micromachining of silicon by short-pulse laser ablation in air and under water. *Materials Science and Engineering: A*, 372(1–2), 145–162.

- Chung, C. K. ve Lin, S. L. 2010. CO₂ laser micromachined crackless through holes of Pyrex 7740 glass. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50, 961–968.
- Chungpyo, H. ve Yutaka, A. 2008. Heat transfer characteristics of gaseous flows in microtube with constant heat flux. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1375–1385.
- Cole, K. D. ve Çetin, B. 2011. The effect of axial conduction on heat transfer in a liquid microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2542–2549.
- Collins, I. L., Weibel, J. A., Pan, L. ve Garimella, S. V. 2019. A permeable-membrane microchannel heat sink made by additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 1174–1183.
- Coskun, T. ve Cetkin, E. 2020. A review of heat and fluid flow characteristics in microchannel heat sinks. *Heat Transfer*, 49, 4109–4133.
- Cottet, J. ve Renaud P. 2021. Chapter 1 – Introduction to microfluidics, Editor(s): Eric Chappel, In *Developments in Biomedical Engineering and Bioelectronics, Drug Delivery Devices and Therapeutic Systems*. Academic Press, 680, Massachusetts.
- Croce, G. and D'Agaro, P. 2005. Numerical simulation of roughness effect on microchannel heat transfer and pressure drop in laminar flow. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(10), 1518–1530.
- Croce, G. ve D'Agaro, P. 2004. Numerical analysis of roughness effect on microtube heat transfer. *Superlattices and Microstructures*, 35, 601–616.
- Croce, G., D'agaro, P. ve Nonino, C. 2007. Three-dimensional roughness effect on microchannel heat transfer and pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(25–26), 5249–5259.
- Cuta, J. M., McDonald, C. E. ve Shekarriz, A. 1996. Forced convection heat transfer in parallel channel array microchannel heat exchanger. *Advances in Energy Efficiency, Heat/Mass Transfer Enhancement – ASME-PID, 2/HTD*, 338, 17–23.
- Dai, B., Li, M. ve Ma, Y. 2014. Effect of surface roughness on liquid friction and transition characteristics in micro- and mini-channels. *Applied Thermal Engineering*, 67(1–2), 283–293.
- Dash, B., Nanda, J. ve Rout, S. K. 2022. The role of Microchannel geometry selection on heat transfer enhancement in heat sinks: A review. *Heat Transfer*, 51, 1406–1424.
- Day, D. ve Gu, M. 2005. Microchannel fabrication in PMMA based on localized heating by nanojoule high repetition rate femtosecond pulses. *Optics Express*, 13(16), 5939–5946.

- Debray, F., Franc, J. P., Maitre, T. ve Reynaud, S. 2001. Measurement of forced convection heat transfer coefficients in mini-channels. *Mécanique & Industries*, 2(5), 443–454.
- Delamarche, E., Bernard, A., Schmid, H., Bietsch, A. Michel, B. ve Biebuyck H. 1998. Microfluidic networks for chemical patterning of substrates: design and application to bioassays. *Journal of the American Chemical Society*, 120(3), 500–508.
- Depew, C. A. ve August, S. E. 1971. Heat transfer due to combined free and forced convection in a horizontal and isothermal tube. *Journal of Heat Transfer*, 93(4), 380–384.
- Diaz, C. M. ve Schmidt, J. 2007. Experimental investigation of transient boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 95–102.
- Ding, L. S., Sun, H., Sheng, X. L. ve Lee, B. D. 2000. Measurement of friction factors for R134a and R12 through microchannels. *Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century*, 2, 650–657.
- Egashira, K. ve Mizutani, K. 2002. Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool. *Precision Engineering*, 26(3), 263–268.
- Ergu, O. B., Sara, O. N., Yapıcı, S. ve Arzutug, M. E. 2009. Pressure drop and point mass transfer in a rectangular microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 618–623.
- Everts, M., Bhattacharyya, S., Bashir, A. I. ve Meyer, J. P. 2020. Heat transfer characteristics of assisting and opposing laminar flow through a vertical circular tube at low Reynolds numbers. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115696.
- Fang, C., David, M., Wang, F. ve Goodson, K. E. 2010. Influence of film thickness and cross-sectional geometry on hydrophilic microchannel condensation. *International Journal of Multiphase Flow*, 36, 608–619.
- Feng, Z. Z. ve Li, W. 2013. Laminar mixed convection of large-Prandtl-number in-tube nanofluid flow, Part I: Experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 919–927.
- Fernandez-Pradas, J. M., Serrano, D., Serra, P. ve Morenza, J. L. 2009. Laser fabricated microchannels inside photostructurable glass–ceramic. *Applied Surface Science*, 255(10), 5499–5502.
- Flockhart, S. M. ve Dhariwal, R. S. 1998. Experimental and numerical investigation into the flow characteristics of channels etched in (100) silicon. *Journal of Fluids Engineering*, 120, 291–295.
- Folch, A. 2016. *Introduction to bioMEMS*. CRC Press, 528, Boca Raton.

- Foo, Z. H., Cheng, K. X., Goh, A. L. ve Ooi, K. T. 2018. Single-phase convective heat transfer performance of wavy microchannels in macro geometry. *Applied Thermal Engineering*, 141, 675–687.
- Gale, B. K., Jafek, A. R., Lambert, C. J., Goenner, B. L., Moghimifam, H., Nze, U. C. ve Kamarapu, S. K. 2018. A review of current methods in microfluidic device fabrication and future commercialization prospects. *Inventions*, 3, 60.
- Gal-Or, E., Gershoni, Y., Scotti, G., Nilsson, S. M. E., Saarinen, J., Jokinen, V., Strachan, C. J., Gennas, G. B., Yli-Kauhaluoma, J. ve Kotiaho, T. 2019. Chemical analysis using 3D printed glass microfluidics. *Analytical Methods*, 11, 1802–1810.
- Gamrat, G., Favre-Marinet, M. ve Le Person, S. 2009. Modelling of roughness effects on heat transfer in thermally fully-developed laminar flows through microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(12), 2203–2214.
- Gamrat, G., Favre-Marinet, M., Le Person, S., Baviere, R. ve Ayela, F. 2008. An experimental study and modelling of roughness effects on laminar flow in microchannels. *Journal of Fluid Mechanics*, 594, 399–423.
- Ganesh, M., Sidpara, A. ve Deb, S. 2017. Fabrication of micro-cutting tools for mechanical micro-machining – Gupta, K. edition: advanced manufacturing technologies. *Materials forming, machining and tribology*. Springer, 196, New York.
- Gao, P., Le Person, S. ve Favre-Marinet, M. 2002. Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 41, 1017–1027.
- García-Hernando, N., Acosta-Iborra, A., Ruiz-Rivas, U. ve Izquierdo, M. 2009. Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in a single-phase liquid flow micro-heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5433–5446.
- Garg, H., Negi, V. S., Wadhwa, A. S. ve Lall, A. K. 2014. Numerical analysis of different shapes of microchannel for miniature cooling system, *International Conference on Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS-2014)*, 06-08 March, Proceedings of 2014 RAECS UIET, 8–14, Chandigarh, India.
- Gattas, R. R. 2006. Femtosecond-laser interactions with transparent materials: applications in micromachining and supercontinuum generation. PhD Thesis, Harvard University, 149, Cambridge.
- Ghajar, A. J., Tam, L. M., Tam, H. K. ve Wen, Q. 2010a. The effect of inner surface roughness on friction factor in horizontal microtubes, in: *Proceedings of 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering*, 59–63.
- Ghajar, A. J., Tang, C. C. ve Cook W. L. 2010b. Experimental investigation of friction factor in the transition region for water flow in minitubes and microtubes. *Heat Transfer Engineering*, 31, 646–657.

- Giulio, P. 2004. Numerical analysis of roughness effect on microtube heat transfer. *Journal of Superlattices and Microstructures*, 35, 601–616.
- Gnielinski, V. 1976. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *International Chemical Engineering*, 16, 359–368.
- Grassegger, J. M. 1998. Rapid prototyping of microfluidic structures with Nd:YAG-laser-ablation, 6th international Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, 18-22 January, Proceedings of the Micro System Technologies 98, 439–444, Berlin, Germany.
- Grohmann, S. 2005. Measurement and modeling of single-phase and flow-boiling heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(20), 4073–4089.
- Hakamada, M., Asao, Y., Saito, N. ve Mabuchi, M. 2008. Microfluidic flows in metallic microchannels fabricated by the spacer method. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, 075029.
- Hao, P. F., Yao, Z. H. ve He, F. 2007a. Experimental study of flow characteristics in rough microchannels. *Acta Physica Sinica*, 56, 4728–4732.
- Hao, P. F., Yao, Z. H., He, F. ve Zhu, K. Q. 2006. Experimental investigation of water flow in smooth and rough silicon microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16, 1397–1402.
- Hao, P. F., Zhang, X. W., Yao, Z. H. ve He, F. 2007b. Transitional and turbulent flow in a circular microtube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 423–431.
- Harirchian, T. ve Garimella, S. V. 2008. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(15), 3724–3735.
- Harley, J. ve Bau, H. H. 1989. Fluid flow in micron and sub-micron size channels. *Proceedings of IEEE, MEMS*, 25–28.
- Harms, T. M., Kazmierczak, M. J. ve Gerner, F. M. 1999. Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 149–157.
- Harms, T. M., Kazmierczak, M. J., Gerner, F. M., Holke, A., Henderson, H. T., Pilchowski, J. ve Baker, K. 1997. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop through deep microchannels in a (110) silicon substrate. *Proceedings of ASME Heat Transfer Division*, 351(1), 347–357.
- He, S., Chen, F., Liu, K., Yang, Q., Liu, H., Bian, H., Meng, X., Shan, C., Si, J., Zhao, Y. ve Hou, X. 2012. Fabrication of three-dimensional helical microchannels with arbitrary length and uniform diameter inside fused silica. *Optics Letters*, 37, 3825–3827.

- He, Y., Wu, Y., Fu, J. Z. ve Wu, W. B. 2015. Fabrication of paper-based microfluidic analysis devices: A review. *The Royal Society of Chemistry Advances*, 5, 78109–78127.
- Hegab, H. E., Bari, A. ve Ameen, T. 2002. Friction and convection studies of R-134a in microchannels within the transition and turbulent flow regimes. *Experimental Heat Transfer*, 15, 245–259.
- Heng, Q., Tao, C. ve Zuo, T. C. 2006. Surface roughness analysis and improvement of micro-fluidic channel with excimer laser. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2, 357–360.
- Heo, K. Y., Kihm, K. D. ve Lee, J. S. 2014. Fabrication and experiment of micro-pin-finned microchannels to study surface roughness effects on convective heat transfer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24, 125025.
- Hong, T. F., Ju, W. J., Wu, M. C., Tai, C. H., Tsai, C. H. ve Fu, L. M. 2010. Rapid prototyping of PMMA microfluidic chips utilizing a CO₂ laser. *Microfluidics and Nanofluidics*, 9, 1125–1133.
- Hrnjak, P. ve Tu, X. Single phase pressure drop in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 2–14.
- Hsieh, S. S., Huang, C. F. ve Pan, J. S. 2021. Low Reynolds numbers convective heat transfer in single/two-phase roughened microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 198, 117468.
- Huang, C. Y., Wu, C. M., Chen, Y. N. ve Liou, T. M. 2014. The experimental investigation of axial heat conduction effect on the heat transfer analysis in microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 169–173.
- Hunter, R. J. 1981. Zeta potential in colloid. Science: principles and applications. Academic Press, 398, New York.
- Hwang, J., Cho, Y. H., Park, M. S. ve Kim, B. H. 2019. Microchannel fabrication on glass materials for microfluidic devices. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20, 479–495.
- Hwang, Y. W. ve Kim, M. S. 2006. The pressure drop in microtubes and the correlation development. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1804–1812.
- Ichiki, T., Sugiyama, Y., Taura, R., Koidesawa, T. ve Horiike, Y. 2003. Plasma applications for biochip technology. *Thin Solid Films*, 435, 62–68.
- Incropera, F. P. ve DeWitt D. P. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Sons, 1048, New York.
- Ji, Y., Yuan, K. ve Chung, J. N. 2004. Numerical simulation of wall roughness on gaseous flow and heat transfer in a microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1241–1253.

- Ji, Y., Yuan, K. ve Chung, J. N. 2006. Numerical simulation of wall roughness on gaseous flow and heat transfer in a microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(7–8), 1329–1339.
- Jiang, P. X., Fan, M. H., Si, G. S. ve Ren, Z. P. 2001. Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 1039–1051.
- Jiang, S., Shi, T., Zhan, X., Xi, S., Long, H., Gong, B., Li, J., Cheng, S., Huang, Y. ve Tang, Z. 2015. Scalable fabrication of carbon-based MEMS/NEMS and their applications: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(11), 113001.
- Jiang, X. N., Zhou, Z. Y., Huang, X. Y. ve Liu, C. Y. 1997. Laminar flow through microchannels used for microscale cooling systems. *Proceedings of 97 IEEE/CPMT Electronic Packaging Technology Conference*, 119–122.
- Jiang, X. N., Zhou, Z. Y., Yao, J., Li, Y. ve Ye, X. Y. 1995. Micro-fluid flow in microchannel. *Proceedings of Transducers 95*, 317–320, Stockholm.
- Jing, D. ve He, L. 2019. Numerical studies on the hydraulic and thermal performances of microchannels with different cross-sectional shapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118604.
- Joglekar, A. P., Liu, H., Meyhofer, E., Mourou, G. ve Hunt, A. J. 2004. Optics at critical intensity: applications to nanomorphing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(16), 5856–5861.
- Judy, J., Maynes, D. ve Webb, B. W. 2000. Liquid flow pressure drop in microtubes. *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 149–154, New York.
- Judy, J., Maynes, D. ve Webb, B. W. 2002. Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3477–3489.
- Kakac, S., Shah, R. K. ve Aung W. 1987. *Handbook of single-phase convective heat transfer*, John Wiley and Sons, 1238, New York.
- Kalyoncu, G. ve Barisik, M. 2016. The extended Graetz problem for micro-slit geometries; analytical coupling of rarefaction, axial conduction and viscous dissipation. *International Journal of Thermal Sciences*, 110, 261–269.
- Kam, D. H. ve Majumder, J. 2008. 3-D biomimetic microchannel network by laser direct writing. *Journal of Laser Applications*, 20, 185.
- Kandlikar, S. G., Joshi, S. ve Tian, S. 2001. Effect of channel roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes. *Proceeding of 35th National Heat Transfer Conference*, 12134, Anaheim.

- Kandlikar, S. G., Joshi, S. ve Tian, S. 2003. Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes. *Heat Transfer Engineering*, 24(3), 4–16.
- Kandlikar, S. G., Schmitt, D., Carrano, A. L. ve Taylor, J. B. 2005. Characterization of surface roughness effects on pressure drop in single-phase flow in minichannels. *Physics of Fluids*, 17, 100606.
- Kanlayasiri, K. ve Paul, B. K. 2004. A Nickel Aluminide microchannel array heat exchanger for high-temperature applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 6(1), 72–80.
- Karazi, S. M., Brabazon, D. ve Azouz, A. B. 2010. Dimensions and cost prediction modelling of Nd:YVO₄ laser internal micro-channel fabrication in PMMA. *Proceedings of the Microtech 2010 Conference and Expo, Anaheim*.
- Kays, W. M. ve Crawford, M. E. 1980. *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, 635, New York.
- Khadem, M. H., Shams, M. ve Hossainpou, S. 2009. Numerical simulation of roughness effects on flow and heat transfer in microchannels at slip flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 69–77.
- Kikuchi, T., Wachi, Y., Sakairi, M. ve Suzuki, R. 2013. Aluminum bulk micromachining through an anodic oxide mask by electrochemical etching in an acetic acid/perchloric acid solution. *Microelectronic Engineering*, 111, 14–20.
- Kim, B. 2016. An experimental study on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62, 224-232.
- Kim, B. J. ve Meng, E. 2016. Review of polymer MEMS micromachining. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(1), 013001.
- Kim, P., Kwon, K. W., Park, M. C., Lee, S. H., Kim, S. M. ve Suh, K. Y. 2008. Soft lithography for microfluidics: A review. *BioChip Journal*, 2, 1–11.
- Kitsara, M., Chatzichristidi, M., Niakoula, D., Goustouridis, D., Beltsios, K., Argitis, P. ve Raptis, I. 2006. Layer-by-layer UV micromachining methodology of epoxy resist embedded microchannels. *Microelectronic Engineering*, 83, 1298–1301.
- Kleinstreuer, C. ve Koo, J. 2004. Computational analysis of wall roughness effects for liquid flow in micro-conduits. *Journal of Fluids Engineering*, 126, 1–9.
- Kohl, M. J., Abdel-Khalik, S. I., Jeter, S. M. ve Sadowski, D. L. 2005. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1518–1533.
- Koo, J. ve Kleinstreuer, C. 2004. Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3159–3169.

- Koo, J. ve Kleinstreuer, C. 2005. Analysis of surface roughness effects on heat transfer in micro-conduits. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(13), 2625–2634.
- Kosar, A. 2010. Effect of substrate thickness and material on heat transfer in microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 635–642.
- Kotz, F., Plewa, K., Bauer, W., Schneider, N., Keller, N., Nargang, T., Helmer, D., Sachsenheimer, K., Schafer, M., Worgull, M., Greiner, C., Richter, C. ve Rapp, B. E. 2016. Liquid glass: a facile soft replication method for structuring glass. *Advanced Materials*, 28, 4646–4650.
- Koutny, L. B., Schmalzing, D., Taylor, T. A. ve Fuchs, M. 1996. Microchip electrophoretic immunoassay for serum cortisol. *Analytical Chemistry*, 68, 18–22.
- Kruusing, A. 2004. Underwater and water-assisted laser processing – Part 1. General features, steam cleaning and shock processing. *Optics and Lasers in Engineering*, 41, 307–327.
- Kurselis, K., Kudrius, T., Paipulas, D., Balachninaite, O. ve Sirutkaitis, V. 2010. Experimental study on femtosecond laser micromachining of grooves in stainless steel. *Lithuanian Journal of Physics*, 50(1), 95–103.
- Lee, D. K., Kwon, J. Y. ve Cho, Y. H. 2019. Fabrication of microfluidic channels with various cross-sectional shapes using anisotropic etching of Si and self-alignment. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 125, 291.
- Lee, P. S., Garimella, S. V. ve Liu, D. 2005. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(9), 1688–1704.
- Lelea, D. 2010. Effects of temperature dependent thermal conductivity on Nu number behaviour in microtubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 245–249.
- Lelea, D., Nishio, S. ve Takano, K. 2004. The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2817–2830.
- Li, Q. 2012. Experimental investigation of friction factor and heat transfer for single phase water flow in stainless steel and nickel micro-tubes. Master of Science Thesis, Oklahoma State University, 86, Oklahoma.
- Li, W. ve Feng, Z. Z. 2013. Laminar mixed convection of large-Prandtl-number in-tube nanofluid flow, Part II: Correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 928–935.

- Li, X. ve Chen, J. 2019. Microembossed copper microchannel heat sink for high-density cooling in electronics. *Micro and Nano Letters*, 14, 1258–1262.
- Li, Y., Wang, Z., Yang, J. ve Liu, H. 2020. Thermal and hydraulic characteristics of microchannel heat sinks with cavities and fins based on field synergy and thermodynamic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115348.
- Li, Z., He, Y. L., Tang, G. H. ve Tao W. Q. 2007. Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3447–3460.
- Li, Z. X. 2003. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes. *Microscale Thermophysical Engineering*, 7, 253–265.
- Li, Z. X., Du, D. X. ve Guo, Z. Y. 2000. Characteristics of frictional resistance for gas flow in microtubes. *Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century*, 2, 658–664.
- Li, Z. X., Du, D. X. ve Guo, Z. Y. 2000. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes. *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 162–168, New York.
- Li, Z. X., Du, D. X. ve Guo, Z. Y. 2003. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes. *Microscale Thermophysical Engineering*, 7, 253–265.
- Lim, D., Kamotani, Y., Cho, B., Mazumder J. ve Takayama S. 2003. Fabrication of microfluidic mixers and artificial vasculatures using a high-brightness diode-pumped Nd:YAG laser direct write method. *Lab on a Chip*, 3, 318–323.
- Lin, M. C., Yeh, J. P., Chen, S. C., Chien, R. D. ve Hsu, C. L. 2013. Study on the replication accuracy of polymer hot embossed microchannels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 55–61.
- Lin, T. Y. ve Kandlikar, S. G. 2012. An experimental investigation of structured roughness effect on heat transfer during single-phase liquid flow at microscale. *Journal of Heat Transfer*, 134(10), 101701.
- Liow, J. L. 2009. Mechanical micromachining: a sustainable micro-device manufacturing approach. *Journal of Cleaner Production*, 17, 662–667.
- Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. ve Ehmann, K. F. 2004. The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(4), 666–678.
- Liu, Z., Zhang, C., Huo, Y. ve Zhao, X. 2007. Flow and heat transfer in rough micro steel tubes. *Experimental Heat Transfer*, 20(4), 289–306.

- Liu, Z. G., Liang, S. Q. ve Takei, M. 2007. Experimental study on forced convective heat transfer characteristics in quartz microtube. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 139–148.
- Long, J., Zhou, C., Cao, Z., Xie, X. ve Hu, W. 2019. Incubation effect during laser-induced backside wet etching of sapphire using high-repetition-rate near-infrared nanosecond lasers. *Optics and Laser Technology*, 109, 61–70.
- Lu, H., Xu, M., Gong, L., Duan, X. ve Chai, J. C. 2020. Effects of surface roughness in microchannel with passive heat transfer enhancement structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148, 119070.
- Luttge, R. 2016. *Nano- and microfabrication for industrial and biomedical applications*. Elsevier, 278, Oxford.
- Ma, X., Li, R., Jin, Z., Fan, Y., Zhou, X. ve Zhang, Y. 2020. Injection molding and characterization of PMMA-based microfluidic devices. *Microsystem Technologies*, 26, 1317–1324.
- Madou, M. J. 2011. *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology – third edition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 1992, Broken Sound Parkway Boca Raton.
- Mala, G. M. ve Li, D. 1999. Flow characteristics of water in microtubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(2) 142–148.
- Mala, G. M., Li, D. ve Dale, J. D. 1997. Heat transfer and fluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(13), 3079–3088.
- Manay, E. 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, 142, Erzurum.
- Manay, E. 2019. Experimental investigation of mixed convection heat transfer of ferrite-based nanofluids in multiple microchannels. *Heat and Mass Transfer*, 55, 533–546.
- Manay, E., Mandev, E. ve Temiz, R. O. 2019. Analysis of mixed convection heat transfer of nanofluids in a minichannel for aiding and opposing flow conditions. *Heat and Mass Transfer*, 55(10), 3003–3015.
- Manay, E. ve Sahin, B. 2016. The effect of microchannel height on performance of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 307–320.
- Mandev, E. 2017. Mikrokanallarda nanoakışkanların karma taşınım ile ısı transferi karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 181, Erzurum.

- Mandev, E. ve Manay, E. 2022. Effects of surface roughness in multiple microchannels on mixed convective heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, 217, 119102.
- Martínez-López, J. I., Cervantes, H. A. B., Iturbe, L. D. C., Vázquez, E., Naula, E. A., López, A. M., Siller, H. R., Mendoza-Buenrostro, C. ve Rodríguez, C. A. 2020. Characterization of soft tooling photopolymers and processes for micromixing devices with variable cross-section. *Micromachines*, 11, 970.
- Martynova, L., Locascio, L. E., Gaitan, M., Kramer, G. W., Christensen, R. G. ve MacCrehan, W. A. 1997. Fabrication of plastic microfluid channels by imprinting methods. *Analytical Chemistry*, 69(23), 4783–4789.
- Masato, D., Sorgato, M., Parenti, P., Annoni, M. ve Lucchetta, G. 2017. Impact of deep cores surface topography generated by micro milling on the demolding force in micro injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 246, 211–223.
- Maselli, V., Osellame, R., Cerullo, G., Ramponi, R. ve Laporta, P. 2006. Fabrication of long microchannels with circular cross section using astigmatically shaped femtosecond laser pulses and chemical etching. *Applied Physics Letters*, 88, 191107.
- Matsumura, T., Hiramatsu, T., Shirakashi, T. ve Muramatsu, T. 2005. A study on cutting force in the milling process of glass. *Journal of Manufacturing Processes*, 7(2), 102–108.
- Matteucci, M., Christiansen, T. L., Tanzi, S., Østergaard, P. F., Larsen, S.T. ve Taboryski, R. 2013. Fabrication and characterization of injection molded multi level nano and microfluidic systems. *Microelectronic Engineering*, 111, 294–298.
- McCormick, R. M., Nelson, R. J., Alonso-Amigo, M. G., Benvegnu, D. J. ve Hooper, H. H. 1997. Microchannel electrophoretic separations of DNA in injection-molded plastic substrates. *Analytical Chemistry*, 69, 2626–2630.
- McDonald, J. C., Duffy, D. C., Anderson, J. R., Chiu, D. T., Wu, H. Schueller, O. J. ve Whitesides, G. M. 2000. Fabrication of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane). *Electrophoresis*, 21(1), 27–40.
- Megahed, A. 2011. Experimental investigation of flow boiling characteristics in across-linked microchannel heat sink. *International Journal of Multiphase Flow*, 37, 380–393.
- Meinhart, C. D., Wereley, S. T. ve Santiago, J. G. 1999. PIV measurements of a microchannel flow. *Experiments in Fluids*, 27, 414–419.
- Melentiev, R. ve Fang, F. 2018. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 22, 1–20.

- Meyer, J. P., Bashir, A. I. ve Everts, M. 2019. Single-phase mixed convective heat transfer and pressure drop in the laminar and transitional flow regimes in smooth inclined tubes heated at a constant heat flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 109, 109890.
- Mishan, Y., Mosyak, A., Pogrebnyak, E. ve Hetsroni, G. 2007. Effect of developing flow and thermal regime on momentum and heat transfer in micro-scale heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3100–3114.
- Mlcak, J. D., Anand, N. K. ve Rightley, M. J. 2008. Three-dimensional laminar flow and heat transfer in a parallel array of microchannels etched on a substrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 5182–5191.
- Moffat, R. J. 1998. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, 3–17.
- Mokrani, O., Bourouga, B., Castelain, C. ve Peerhossaini, H. 2009. Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1337–1352.
- Morini, G. L. 2004. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(7), 631–651.
- Morini, G. L. 2006. Scaling effects for liquid flows in microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 27(4), 64–73.
- Morini, G. L. ve Spiga, M. 2007. The role of the viscous dissipation in heated microchannels. *Journal of Heat Transfer*, 129, 308–318.
- Mukherjee, S., Biswal, P., Chakraborty, S. ve DasGupta S. 2017. Effects of viscous dissipation during forced convection of power-law fluids in microchannels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 89, 83–90.
- Mukhopadhyay, R. 2007. When PDMS isn't the best. *Analytical Chemistry*, 79, 3248–3253.
- Natrajan, V. K. ve Christensen, K. T. 2010. The impact of surface roughness on flow through a rectangular microchannel from the laminar to turbulent regimes. *Microfluidics and Nanofluidics*, 9, 95–121.
- Neuville, A., Renaud, L., Luu, T. T., Minde, M. W., Jettstuen, E., Vinningland, J. L., Hiorth, A. ve Dysthe, D. K. 2017. Xurography for microfluidics on a reactive solid. *Lab on a Chip*, 17, 293–303.
- Ng, E. Y. K. ve Poh, S. T. 2001. CFD analysis of double-layer microchannel conjugate parallel liquid flows with electric double-layer effects. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 40(7), 735–749.

- Ng, E. Y. K. ve Poh, S. T. 2002. Modeling of electric double layer effects through pressure-driven microchannel flows. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 3, 351–365.
- Ngo, T. L., Kato, Y., Nikitin, K. ve Ishizuka, T. 2007. Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 560–570.
- Nguyen, N. T., Bochnia, D., Kiehnscherrf, R. ve Dözel, W. 1996. Investigation of forced convection in microfluid systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 55, 49–55.
- Niavarani, A. ve Priezjev, N. V. 2009. The effective slip length and vortex formation in laminar flow over a rough surface. *Physics of Fluids*, 21(5), 052105.
- Niazmand, H., Renksizbulut, M. ve Saeedi, E. 2008. Developing slip-flow and heat transfer in trapezoidal microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 6126–6135.
- Obot, N. T. 2002. Toward a better understanding of friction and heat/mass transfer in microchannels—A literature review. *Microscale Thermophysical Engineering*, 6(3), 155–173.
- Ohadi, M., Choo, K., Dessiatoun, S. ve Cetegen, E. 2013. Emerging applications of microchannels in next generation microchannel heat exchangers. Springer, 67–105, New York.
- Oliver, D. R. 1962. The effect of natural convection on viscous-flow heat transfer in horizontal tubes. *Chemical Engineering Science*, 17(5), 335–350.
- Owhaib, W., Martin-Callizo, C. ve Palm, B. 2004. Evaporative heat transfer in vertical circular microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 24, 1241–1253.
- Ozalp, A. A. 2012. Laminar-transitional micropipe flows: energy and exergy mechanisms based on Reynolds number, pipe diameter, surface roughness and wall heat flux. *Heat and Mass Transfer*, 48, 17–34.
- Pal, P. ve Sato, K. 2009. Various shapes of silicon freestanding microfluidic channels and microstructures in one step lithography. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, 055003.
- Pan, M., Zeng, D. ve Tang, Y. 2009. Feasibility investigations on multi-cutter milling process: a novel fabrication method for microreactors with multiple microchannels. *Journal of Power Sources*, 192, 562–572.
- Papautsky, I., Brazzle, J., Ameal, T. ve Frazier, A. B. 1999. Laminar fluid behavior in microchannels using micropolar fluid theory. *Sensors and Actuators A: Physical*, 73, 101–108.

- Patil, S. V. ve Babu, P. V. V. 2012. Experimental studies on mixed convection heat transfer in laminar flow through a plain square duct. *Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2013–2021.
- Park, H. S. ve Punch, J. 2008. Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 4535–4543.
- Park, J. H., Lee, N. E., Lee, J., Park, J. S. ve Park, H. D. 2005. Deep dry etching of borosilicate glass using SF_6 and SF_6/Ar inductively coupled plasmas. *Microelectronic Engineering*, 82(2), 119–128.
- Parlak, M., Ozsunar, A. ve Kosar, A. 2022. High aspect ratio microchannel heat sink optimization under thermally developing flow conditions based on minimum power consumption. *Applied Thermal Engineering*, 201(A), 117700.
- Parthiban, P., Vijayan, S., Doyle, P. S. ve Hashimoto, M. 2021. Evaluation of 3D-printed molds for fabrication of non-planar microchannels. *Biomicrofluidics*, 15, 024111.
- Paulraj, P., Paul, B. K. ve Peterson, R. B. 2012. Development of an adhesive-bonded counterflow microchannel heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 48, 194–201.
- Pelević, N. ve van der Meer, T. H. 2016. Heat transfer and pressure drop in microchannels with random roughness. *International Journal of Thermal Sciences*, 99, 125–135.
- Peng, X. F. ve Peterson, G. P. 1995. The effect of thermofluid and geometrical parameters on convection of liquids through rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38, 755–758.
- Peng, X. F. ve Peterson, G. P. 1996. Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39, 2599–2608.
- Peng, X. F. ve Wang, B. X. 1993. Forced convection and flow boiling heat transfer for liquid flowing through microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 3421–3427.
- Peng, X. F., Peterson, G. P. ve Wang, B. X. 1995b. Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels. *Experimental Heat Transfer*, 7, 249–264.
- Peng, X. F., Wang, B. X., Peterson, G. P. ve Ma, H. B. 1995a. Experimental investigation of heat transfer in flat plates with rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(1), 127–137.
- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H. H. ve Zemel, J. N. 1990. Liquid and gas transport in small channels. *Proceedings of ASME DSC*, 31, 149–157.

- Pfalher, J., Harley, J., Bau, H. H. ve Zemel, J. N. 1991. Gas and liquid flow in small channels. *Micromechanical Sensors, Actuator and Systems*, ASME DSC, 32, 49–60, Atlanta.
- Pfund, D., Rector, D., Shekariz, A., Popescu, A. ve Welty, J. 2000. Pressure drop measurements in a microchannel. *AIChE Journal*, 46, 1496–1507.
- Pfund, D. A., Shekariz, A., Popescu, A. ve Welty, J. R. 1998. Pressure drops measurements in microchannels. *Proceedings of MEMS in ASME DSC*, 66, 193–198.
- Piotter, V., Mueller, K., Plewa, K, Ruprecht, R. ve Hausselt, J. 2002. Performance and simulation of thermo-plastic micro injection molding. *Microsystem Technologies*, 8, 387–390.
- Prabhakar, D., Kumar, M. ve Krishna, A. G. 2017. Prediction of Machined surface Roughness A Review. *Materials Science*, 26953187.
- Prakash S. ve Kumar, S. 2015. Fabrication of microchannels: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B – The Journal of Engineering Manufacture*, 229(8), 1273–1288.
- Prakash, S. ve Kumar, S. 2021. Determining the suitable CO₂ laser based technique for microchannel fabrication on PMMA. *Optics & Laser Technology*, 139, 107017.
- Prakash, S., Acherjee, B., Kuar, A. S. ve Mitra, S. 2013. An experimental investigation on Nd:YAG laser microchanneling on polymethyl methacrylate submerged in water. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B – The Journal of Engineering Manufacture*, 227(4), 508–519.
- Pranzo, D., Larizza, P., Filippini, D. ve Percoco, G. 2018. Extrusion-based 3D printing of microfluidic devices for chemical and biomedical applications: A topical review. *Micromachines*, 9, 374.
- Qi, S. L., Zhang, P., Wang, R. Z. ve Xu, L. X. 2007. Flow boiling of liquid nitrogen in microtubes: Part I–The onset of nucleate boiling, two-phase flow instability and two-phase flow pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4999–5016.
- Qin, Y. 2015. *Micromanufacturing engineering and technology (Chapter 1) – 2nd edition* (Qin Yi). William Andrew Publishing, 858, Norwich.
- Qu, W. ve Mudawar, I. 2002. Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2549–2565.
- Qu, W., Mala, G. M. ve Li, D. 2000b. Heat transfer for water flow in trapezoidal silicon microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3925–3936.

- Qu, W., Mala, G. M. ve Li, D. 2000a. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 353–364.
- Quan, X., Dong, L. ve Cheng, P. 2010. Determination of annular condensation heat transfer coefficient of steam in microchannels with trapezoidal cross section. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3670–3676.
- Raghuraman, D. R. S., Raj, R. T. K., Nagarajan, P. K. ve Rao, B. V. A. 2017. Influence of aspect ratio on the thermal performance of rectangular shaped micro channel heat sink using CFD code. *Alexandria Engineering Journal*, 56, 43–54.
- Rahimi, M. ve Mehryar, R. 2012. Numerical study of axial heat conduction effects on the local Nusselt number at the entrance and ending regions of a circular microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 59, 87-94.
- Rahman, M. M. 2000 Measurements of heat transfer in microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27, 495–506.
- Rahman, M. M. ve Gui, J. F. 1993. Design fabrication and testing of microchannel heat sink for aircraft avionics cooling. *Proceedings of the 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1, 1–6.
- Rahman, M. M., Shevade, S. S. ve Ojada, E. 2010. Convective heat transfer in a composite trapezoidal microchannel during magnetic heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1175–1181.
- Raj, M. K. ve Chakraborty, S. 2020. PDMS microfluidics: A mini review. *Journal of Applied Polymer Science*, 137, 48958.
- Rands, C., Webb, B. ve Maynes, D. 2006. Characterization of transition to turbulence in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 2924–2930.
- Rao, R. 2002. An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems). PRIME Faraday Partnership, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, 56, Loughborough.
- Ravigururajan, T. S., Cuta, J. M., McDonald, C. E. ve Dorst, M. K. 1996. Singlephase thermal performance characteristics of a parallel micro-channel heat exchanger. *Proceedings of US National Heat Transfer Conference – ASME-HTD*. 329, 157–166.
- Rehmani, M. A. A., Jaywant, S. A. ve Arif, K. M. 2021. Study of microchannels fabricated using desktop fused deposition modeling systems. *Micromachines*, 12(1), 14.
- Ren, L. ve Li, D. 2005. Improved understanding of the effect of electrical double layer on pressure-driven flow in microchannels. *Analytica Chimica Acta*, 531, 15–23.
- Ren, L., Li, D. ve Qu, W. 2001a. Electro-viscous effects on liquid flow in microchannels. *Journal of Colloid and Interface Science*, 233, 12–22.

- Ren, L., Qu, W. ve Li, D. 2001b. Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3125–3134.
- Rengier, F., Mehndiratta, A., Von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Kauczor, H. U., Unterhinninghofen, R. ve Giesel, F. L. 2010. 3D printing based on imaging data: Review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5, 335–341.
- Richter, M., Woias, P. ve Weiß, D. 1997. Microchannels for applications in liquid dosing and flow-rate measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 62, 480–483.
- Rogers, J. A. ve Nuzzo, R. G. 2005. Recent progress in soft lithography. *Materials Today*, 8, 50–56.
- Rosa, P., Karayiannis, T. G. ve Collins, M. W. 2009. Single-phase heat transfer in microchannels: The importance of scaling effects. *Applied Thermal Engineering*, 29(17), 3447–3468.
- Sahar, A. M., Wissink, J., Mahmoud, M. M., Karayiannis, T. G. ve Ishak, M. S. A. 2017. Effect of hydraulic diameter and aspect ratio on single phase flow and heat transfer in a rectangular microchannel. *Applied Thermal Engineering*, 115, 793–814.
- Salman, B. H., Mohammed, H. A., Munisamy, K. M. ve Kherbeet, A. S. 2013. Characteristics of heat transfer and fluid flow in microtube and microchannel using conventional fluids and nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 848–880.
- Saptaji, K., Subbiah, S. ve Dhupia, J. S. 2012. Effect of side edge angle and effective rake angle on top burrs in micro-milling. *Precision Engineering*, 36, 444–450.
- Sara, O. N., Ergu, Ö. B., Arzutug, M. E. ve Yapıcı, S. 2009. Experimental study of laminar forced convective mass transfer and pressure drop in microtubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 1894–1900.
- Sarma, P. ve Patowari, P. K. 2018. Fabrication of metallic micromixers using WEDM and EDM for application in microfluidic devices and circuitries. *Micro and Nanosystems*, 10(2), 137–147.
- Satapathy, A. K. 2010. Slip flow heat transfer in an infinite microtube with axial conduction. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 153–160.
- Schlegel, D., Folea, M., Roman, A. ve Nardin, P. 2011. Surface analysis of machined fiber glass composite material. *Recent Research in Manufacturing Engineering*, 152–155.
- Schmidt, R. 2003. Challenges in electronic cooling: opportunities for enhanced thermal management techniques-microprocessor liquid cooled minichannel heat sink. *First International Conference on Microchannels and Minichannels*, 951–959, Rochester.

- Schmitt, D. J. ve Kandlikar, S. G. 2005. Effects of repeating microstructures on pressure drop in rectangular minichannels. Proceedings of 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, ICMM2005-ASME, 75111, Toronto.
- Sen, S. ve Darici, S. 2017. Transient conjugate heat transfer in a circular microchannel involving rarefaction, viscous dissipation and axial conduction effects. Applied Thermal Engineering, 111, 855–862.
- Senthilkumar, V. ve Muruganandam, S. 2012. State of the art of micro turning process. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2, 36–42.
- Shah, R. K. ve London, A. L. 1978. Laminar flow forced convection in ducts, in: Advances in Heat Transfer, Academic Press, 477, New York.
- Shang, D. Y. ve Zhong, L. C. 2016. Heat transfer of laminar mixed convection of liquid. Heat and Mass Transfer. Springer, 226, New York.
- Sharp, K. V., Adrian, R. J. ve Beebe, D. J. 2000. Anomalous transition to turbulence in microtubes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Conference and Expo, 5th Micro-Fluidic Symposium, 150–158, Orlando.
- Shen, S., Xu, J. L., Zhou, J. J. ve Chen, Y. 2006. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface. Energy Conversion and Management, 47, 1311–1325.
- Singh, A. 2011. Experimental investigation of friction factor in microtubes and development of correlations for prediction of critical Reynolds number. Master of Science Thesis, Oklahoma State University, Department of Mechanical Engineering, 78, Oklahoma.
- Speller, N. C., Morbioli, G. G., Cato, M. E., Cantrell, T. P., Leydon, E. M., Schmidt, B. E. ve Stockton, A. M. 2019. Cutting edge microfluidics: Xurography and a microwave. Sensors and Actuators B: Chemical, 291, 250–256.
- Stephan, K. ve Preußer, P. 1979. Wärmeübergang und maximale wärmestromdichte beim behältersieden binärer und ternärer flssigkeitssgemische. German Chemie Ingenieur Technik, 51, 37.
- Sui, Y., Teo, C. J., Lee, P. S., Chew, Y. T. ve Shu, C. 2010. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 2760–2772.
- Sun, H. ve Faghri, M. 2003. Effect of surface roughness on nitrogen flow in a microchannel using the direct simulation Monte Carlo method. Numerical Heat Transfer–Part A: Applications, 43(1), 1–8.
- Sun, X. ve Cheng, K. 2015. Micromanufacturing engineering and technology (Chapter 2) – 2nd edition (Qin Yi). William Andrew Publishing, 858, Norwich.

- Tabeling, P. 2005. Introduction to Microfluidics. Oxford University Press, 312, Northampton Shire.
- Tam, L. M., Tam, H. K. ve Ghajar, A. J. 2011a. Simultaneous heat transfer and pressure drop measurements for a horizontal micro-tube. Proceedings of 8th ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu, AJTEC2011-44218, Hawaii.
- Tam, L. M., Tam, H. K., Ghajar, A. J., Ng, W., Wong, I. W., Leong, K. F. ve Wu, C. K. 2011b. The effect of inner surface roughness and heating on friction factor in horizontal micro-tubes. Proceedings of ASME JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, AJK2011-16027, Shizuoka.
- Tang, G. H., Li, Z., He, Y. L. ve Tao, W. Q. 2007a. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow. International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2282–2295.
- Tang, G. H., Li, Z., He, Y. L., Zhao, C. Y. ve Tao, W. Q. 2007b. Experimental observations and lattice Boltzmann method study of the electroviscous effect for liquid flow in microchannels. Journal of Micromechanics and Microengineering, 17, 539–550.
- Tang, T., Yuan, Y., Yalikun, Y., Hosokawa, Y., Li, M. ve Tanaka, Y. 2021. Glass based micro total analysis systems: Materials, fabrication methods, and applications. Sensors and Actuators: B. Chemical, 339, 129859.
- Tardu, S. 2004. The electric double layer effect on the microchannel flow stability and heat transfer. Superlattices and Microstructures, 35, 513–529.
- Thomas, N., Ocklind, A., Blikstad, I., Griffiths, S., Kenrick, M., Derand, H., Ekstrand, G., Ellström, C., Larsson A. ve Andersson, P. 2000. Integrated cell based assays in microfabricated disposable CD devices. Proceedings of the Micro Total Analysis Systems, 249–252, Enschede.
- Tosello, G. 2015. Micromanufacturing engineering and technology (Chapter 9) – 2nd edition (Qin Yi). William Andrew Publishing, 858, Norwich.
- Tosello, G., Gava, A., Hansen, H. N., Lucchetta, G. ve Marinello F. 2007. Micro-nano integrated manufacturing metrology for the characterization of micro injection moulded parts. Proceedings of the 7th international conference of the European society for precision engineering and nanotechnology, 377–380, Bremen.
- Tso, C. P. ve Mahulikar, S. P. 2000. Experimental verification of the role of Brinkman number in microchannels using local parameters. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 1837–1849.
- Tuckerman, D. B. ve Pease, R. F. W. 1981. High performance heat sink for VLSI. IEEE Electronic Device Letters, 2(5), 126–129.
- Uchida, T. ve Hamaguchi, S. 2008. Magnetic neutral loop discharge (NLD) plasmas for surface processing. Journal of Physics D: Applied Physics, 41(8), 083001.

- Ueno, K., Kitagawa, F., Kim, H. B., Tokunaga, T., Matsuo, S., Misawa H. ve Kitamura N. 2000. Fabrication and characteristic responses of integrated microelectrodes in polymer channel chip. *Chemistry Letters*, 29, 858–859.
- Uhlmann, E., Röhner, M., Langmack, M. ve Schimmelpfennig, T. M. 2015. *Micromanufacturing engineering and technology (Chapter 4)* – 2nd edition (Qin Yi). William Andrew Publishing, 858, Norwich.
- Urbanek, W., Zemel, J. N. ve Bau, H. H. 1993. An investigation of the temperature dependence of Poiseuille numbers in microchannel flow. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 3, 206–209.
- Vainshtein, P. ve Gutfinger, C. 2002. On electroviscous effects in microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, 252–256.
- Van Dam, R.M. 2006. Solvent-resistant elastomeric microfluidic devices and applications. Doctor of Philosophy, California Institute of Technology, 334, California.
- Van Erp, R., Soleimanzadeh, R., Nela, L., Kampitsis, G. ve Mantioli, E. 2020. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling. *Nature*, 585, 211–216.
- Waddell, E. A., Locascio, L. E. ve Kramer, G. W. 2002. UV laser micromachining of polymers for microfluidic applications. *Journal of the Association for Laboratory Automation*, 7(1), 78–82.
- Wagner, R. N. ve Kandlikar, S. G. 2012. Effects of structured roughness on fluid flow at the microscale level. *Heat Transfer Engineering*, 33(6), 483–493.
- Wan, Z., Li, Y., Tang, H., Deng, W. ve Tang, T. 2014. Characteristics and mechanism of top burr formation in slotting microchannels using arrayed thin slotting cutters. *Precision Engineering*, 38, 28–35.
- Wang, B. X. ve Peng, X. F. 1994. Experimental investigation on liquid forced convection heat transfer through microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(1), 73–82.
- Wang, G. ve Cheng, P. 2008. An experimental study of flow boiling instability in a single microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 1229–1234.
- Wang, H. ve Wang, Y. 2007. Influence of three-dimensional wall roughness on the laminar flow in microtube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 220–228.
- Wang, H., Chen, Z. ve Gao, J. 2016. Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 107, 870–879.

- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J. ve Hui, D. 2017. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458.
- Warrier, G. R., Dhir, V. K. ve Momoda, L. A. 2002. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 53–64.
- Webb, R. L. ve Zhang, M. 1998. Heat transfer and friction in small diameters channels. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2, 189–202.
- Weilin, Q., Mala, G. M. ve Dongqing, L. 2000. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 353–364.
- Weule, H., Hüntrup, V. ve Tritschler, H. 2001. Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 50(1), 61–64.
- Whitehouse, D. J. 2010. *Handbook of surface and nanometrology* (2nd edition). CRC Press, 999, Boca Raton.
- Whiteside, B. R., Martyn, M. T. ve Coates, P. D. 2006. Introduction to micromolding. In: Greener, J. and Wimberger-Friedl, R. edition *Precision injection moulding*. Munich: Hanser, 239–264.
- Wibel, W. ve Ehrhard, P. 2009. Experiments on the laminar/turbulent transition of liquid flows in rectangular microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 30, 70–77.
- Wilding, P., Pfalher, J., Zemel, J. N., Bau, H. H. ve Kricka, L. J. 1994. Manipulation and flow of biological fluids in straight channels micromachined in silicon. *Clinical Chemistry*, 40, 43–47.
- Wojtan, L., Revellin, R. ve Thome, J. R. 2006. Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 765–774.
- Worgull, M. 2015. *Micromanufacturing engineering and technology* (Chapter 7) – 2nd edition (Qin Yi). William Andrew Publishing, 858, Norwich.
- Wu, C. ve Wu, S. 2007. Flow analysis of micro-channel in injection molding. *Journal of Polymer Engineering*, 27(2), 107–128.
- Wu, H. Y. ve Cheng, P. 2003a. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2547–2556.

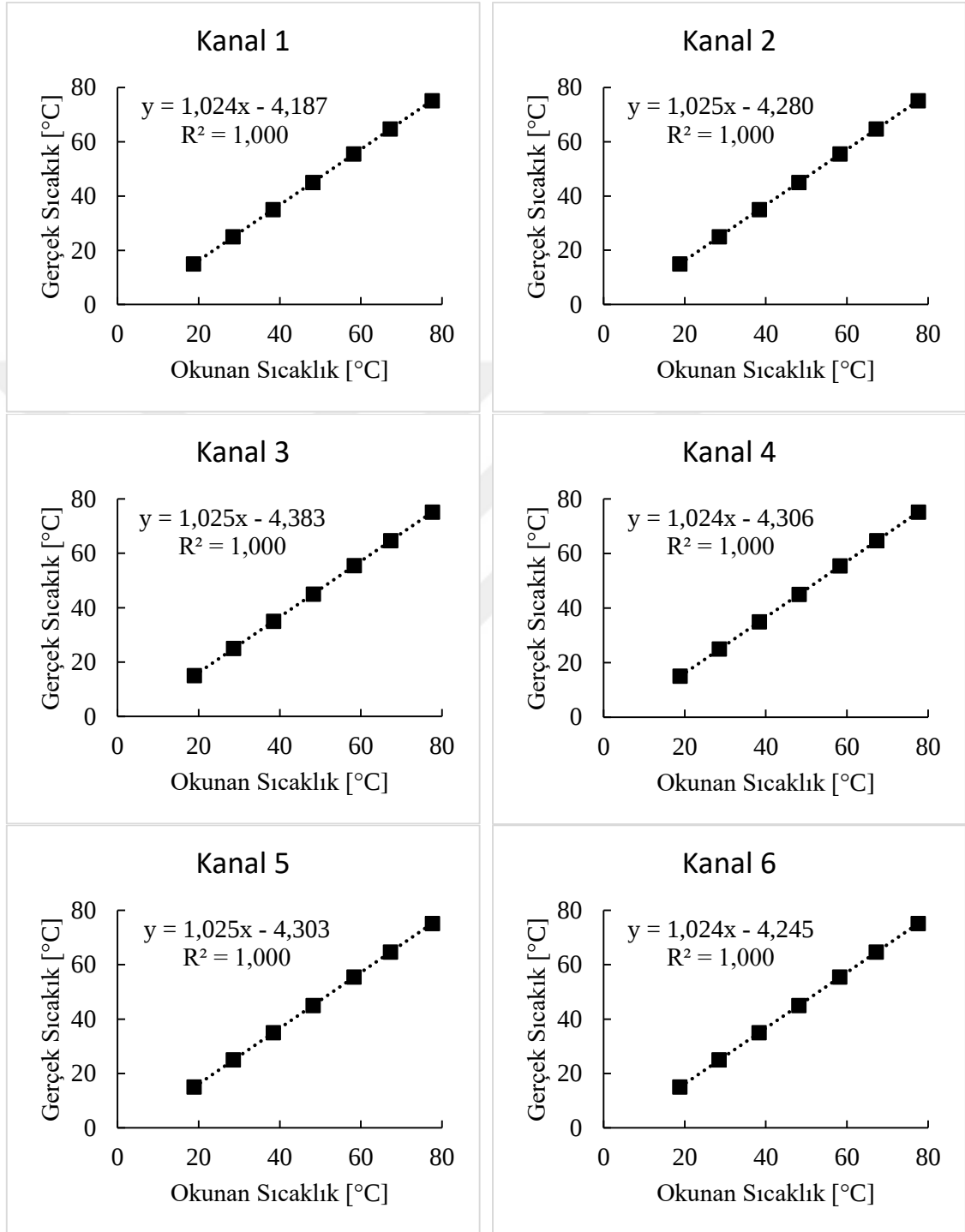
- Wu, H. Y. ve Cheng, P. 2003b Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2519–2525.
- Wu, J., Shi, M., Chen, Y. ve Li, X. 2010. Visualization study of steam condensation in wide rectangular silicon microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 922–930.
- Wu, P. Y. ve Little, W. A. 1984. Measurement of the heat transfer characteristics of gas flow in fine channel heat exchangers used for microminiature refrigerators. *Cryogenics*, 24, 415–420.
- Wu, P. Y. ve Little, W. A. 1983. Measurement of friction factor for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule Thompson refrigerators. *Cryogenics*, 23(5), 273–277.
- Wu, W. I., Rezai, P., Hsu, H. H. ve Selvaganapathy, P. R. 2013. Materials and methods for the microfabrication of microfluidic biomedical devices, Editor(s): Xiujun, J. Li, Y.Z., In *Microfluidic Devices for Biomedical Applications*. Woodhead Publishing, 3–62, Cambridge.
- Xia, Y. ve Whitesides, G. M. 1998. Soft lithography. *Annual Review of Material Science*, 28, 153–184.
- Xie, X. L., Liu, Z. J., He, Y. L. ve Tao, W. Q. 2009. Numerical study of laminar heat transfer and pressure drop characteristics in a water cooled minichannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 29, 64–74.
- Xing, Y., Zhi, T., Haiwang, L. ve Yitu, T. 2016. Experimental investigation of surface roughness effects on flow behavior and heat transfer characteristics for circular microchannels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(6), 1575–1581.
- Xiong, R. ve Chung, J. N. 2010. A new model for three-dimensional random roughness effect on friction factor and heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3284–3291.
- Xu, B., Ooi, K. T., Wong, N. T. ve Choi, W. K. 2000. Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27, 1165–1176.
- Xu, B., Ooi, K. T., Wong, N.T., Liu, C. Y. ve Choi, W. K. 1999. Liquid flow in microchannels. *Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, 150–158, San Diego.
- Xu, J., Locascio, L., Gaitan, M. ve Lee C. S. 2000. Room-temperature imprinting method for plastic microchannel fabrication. *Analytical Chemistry*, 72, 1930–1933.
- Yalikun, Y. ve Tanaka, Y. 2016. Large-scale integration of all-glass valves on a microfluidic device. *Micromachines*, 7, 12–14.

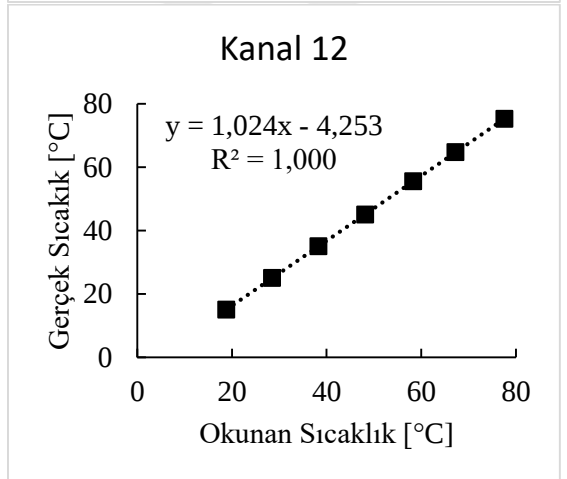
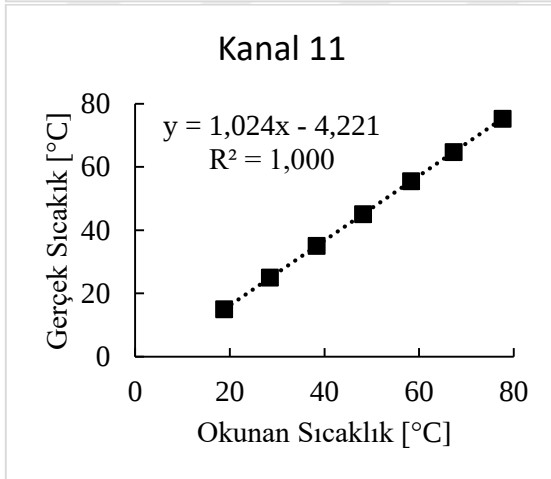
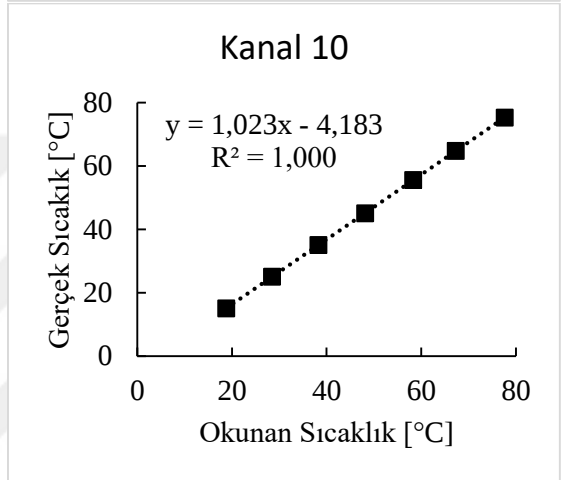
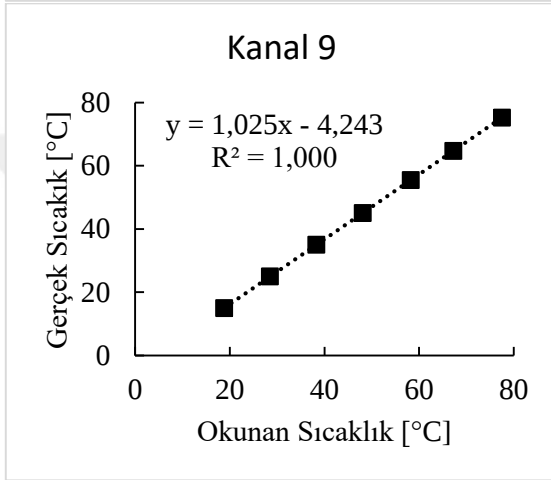
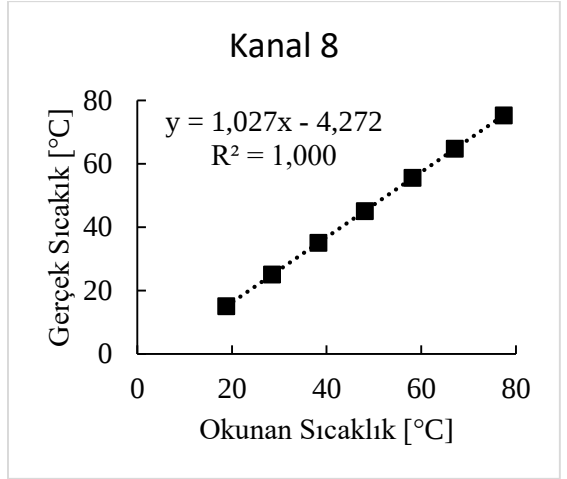
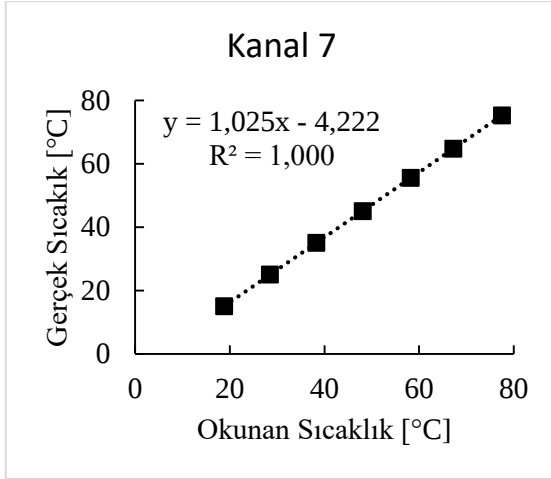
- Yan, B. H. 2011. Periodic large scale vortex structure in rectangular channels with non-uniform wall roughness. *Nuclear Engineering and Design*, 241(8), 2948–2955.
- Yang, C. ve Li, D. 1998. Analysis of electrokinetic effects on the liquid flow in rectangular microchannels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 143, 339–353.
- Yang, C., Li, D. ve Masliyah, J. H. 1998. Modeling forced liquid convection in rectangular microchannels with electrokinetic effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(24), 4229–4249.
- Yang, C. Y. ve Lin, T. Y. 2007. Heat transfer characteristics of water flow in microtubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 432–439.
- Yang, C. Y., Chien, H. T., Lu, S. R. ve Shyu, R. J. 2000. Friction characteristics of water, R134a and air in small tubes. *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, 168–174, New York.
- Yao, P., Schneider, G. J. ve Prather, D. W. 2005. three-dimensional lithographical fabrication of microchannels. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(4), 799–805.
- Yu, D., Warrington, R. O., Barron, R. ve Ameel, T. 1995a. An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes, in: *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, 523–530, Maui.
- Yu, D., Warrington, R., Barron, R. ve Ameel, T. 1995b. An experimental investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes. *Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, 1, 523–530.
- Yücel, E. ve Çiçek, A. 2011. İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri. *Sakarya University Journal of Science*, 15(1), 46-59.
- Zhang, N., Liu, J., Zhang, H., Kent, N. J., Diamond, D. ve Gilchrist, M. D. 2019. 3D printing of metallic microstructured mould using selective laser melting for injection moulding of plastic microfluidic devices. *Micromachines*, 10, 595.
- Zhang, P. ve Fu, X. 2009. Two-phase flow characteristics of liquid nitrogen in vertically upward 0.5 and 1.0 mm micro-tubes: visualization studies. *Cryogenics*, 49, 565–575.
- Zhang, T., Peles, Y., Wen, J. T., Tong, T., Chang, J. Y., Prasher, R. ve Jensen, M. K. 2010a. Analysis and active control of pressure-drop flow instabilities in boiling microchannel systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2347–2360.

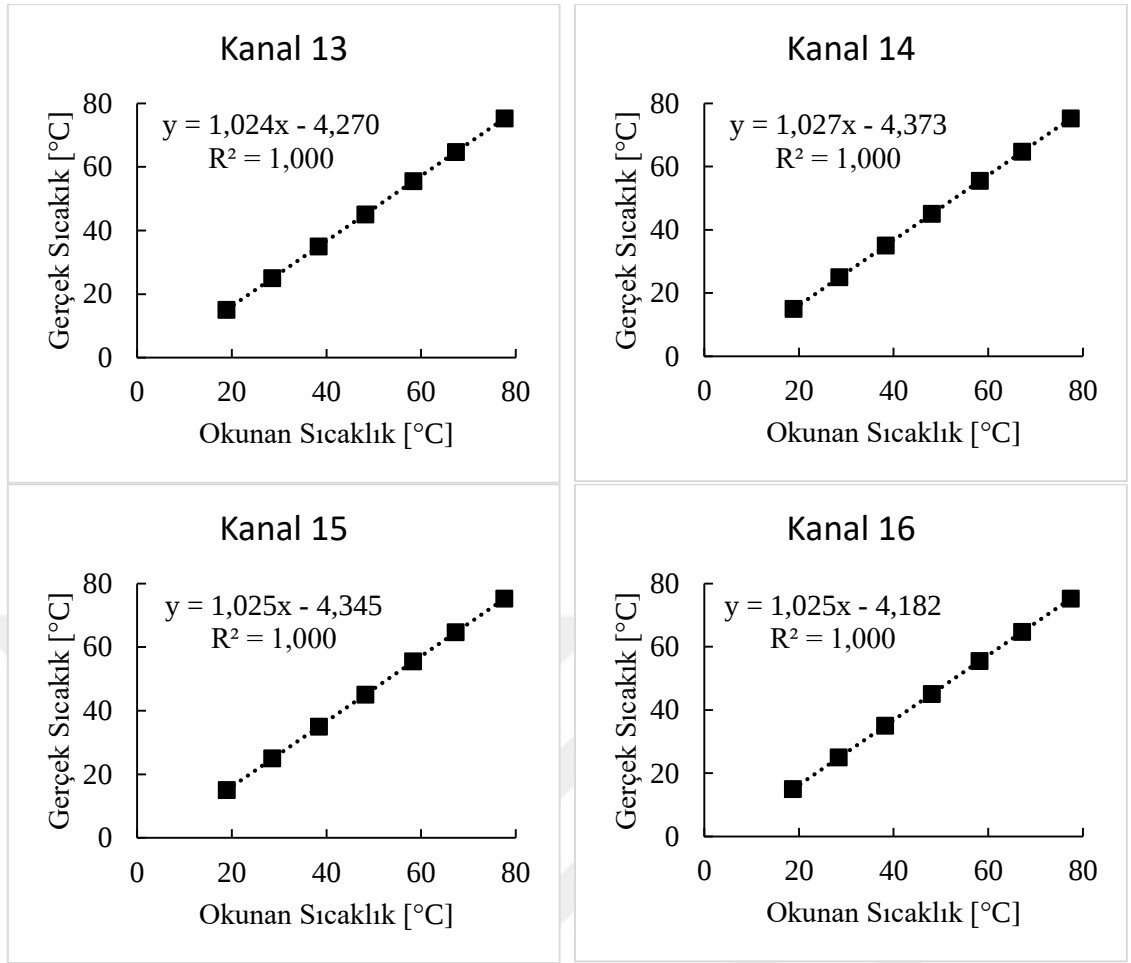
- Zhang, S.X., He, Y.L., Lauriat, G. ve Tao, W.Q. 2010b. Numerical studies of simultaneously developing laminar flow and heat transfer in microtubes with thick wall and constant outside wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3977–3989.
- Zhao, W. ve Wang, L. 2018. Microdrilling of through-holes in flexible printed circuits using picosecond ultrashort pulse laser. *Polymers*, 10(12), 1390.
- Zheng, Z. P., Cheng, W. H., Huang, F. Y. ve Yan, B. H. 2007. 3D microstructuring of Pyrex glass using the electrochemical discharge machining process. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17, 960.
- Zhou, G. ve Yao, S. C. 2011. Effect of surface roughness on laminar liquid flow in microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 31, 228–234.
- Zhu, X. ve Liao, Q. 2006. Heat transfer for laminar slip flow in a microchannel of arbitrary cross section with complex thermal boundary conditions. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1246–1256.

EKLER

EK 1. Termokupl Kalibrasyon Eğrileri ve Denklemleri







Şekil E1.1. Termokupl kalibrasyon eğrileri ve denklemleri.