

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKROBORU AKIŞLARINDAKİ ÖLÇÜM
BELİRSİZLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Neslihan ERKEN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail ÇALLI

Haziran 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKROBORU AKIŞLARINDAKİ ÖLÇÜM
BELİRSİZLİKLERİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Neslihan ERKEN


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 04 / 06 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. İsmail ÇALLI
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Ümit KOCABIÇAK
Üye


Doç. Dr. Tahsin ENGİN
Üye

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca desteğini esirgemeyen danıőmanım Prof. Dr. İsmail alı' ya, belirsizlik analizi konusunda bilgilerini benimle paylaőan Doç. Dr. Tahsin Engin'e, deneylerde birlikte alıőtıęım Arő. Gör. Nezaket Parlak'a, (2003K120970-1) nolu proje kapsamında bu çalışmanın yapılmasını mümkün kılan DPT 'ye teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca yüksek lisansım boyunca bana maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve çalıőmalarım boyunca benden manevi desteğini esirgemeyen aileme ve niőanlım Yrd. Doç. Dr. Murat zsoy' a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç.....	2
1.2. Kapsam.....	2
BÖLÜM 2.	
MİKROKANALLAR.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Mikrokanallar ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	5
2.3. Mikrokanallarda Isı Geçişi.....	9
BÖLÜM 3.	
BELİRSİZLİK ANALİZİ.....	11
3.1. Tanımlar.....	11
3.2. Belirsizlik Analizi.....	14
3.2.1. Hata kaynakları.....	15
3.2.2. Hataların sınıflandırılması.....	15
3.3. Toplam Belirsizlik.....	19
3.4. Deneysel Bulguların Analizi.....	20

3.4.1. Akılcı yaklaşım.....	20
3.4.2. Belirsizlik analizi.....	21
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAMALAR.....	23
4.1. Deney Düzenegi.....	23
4.1.1. Deney düzenegi elemanları.....	24
4.1.1.1. Sabit sıcaklık banyosu.....	24
4.1.1.2. Güç kaynağı.....	24
4.1.1.3. Mikroboru.....	25
4.1.1.4. Pistonlu mikroakış pompası.....	25
4.1.1.5. Vakum pompası.....	26
4.1.1.6. Basınç dönüştürücüleri.....	26
4.1.1.7. Basınç regülatörü.....	27
4.1.1.8. Vizkozimetre.....	27
4.1.1.9. Hassas terazi.....	28
4.1.1.10. Filtre.....	28
4.1.1.11. Termoelemanlar.....	28
4.1.1.12. Veri toplama cihazı.....	29
4.1.1.13. Vakum tüpü.....	29
4.1.1.14. Bağlantı elemanları.....	29
4.2. Deneysel Çalışma.....	30
4.3. Model.....	31
4.4. Deneyler.....	34
4.5. Yapılan Deneylerin Belirsizlik Analizi.....	37
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
5.1. Sonuçlar.....	46
5.2. Öneriler.....	52
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Alan
$A_{iç}$: Mikroboru iç yüzey alanı
$A_{dış}$: Mikroboru dış yüzey alanı
C	: Güvenirlilik seviyesi
c_p	: Özgül ısı
D_h	: Hidrolik çap
D_i	: Mikroboru iç çap
E	: Işınım yayma katsayısı
f	: Sürtünme faktörü
f_{den}	: Deneysel sürtünme faktörü
f_{teo}	: Teorik sürtünme faktörü
h	: Isı taşınım katsayısı
I	: Akım
k	: Isı iletim katsayısı
k_s	: Paslanmaz çelik ısı iletim katsayısı
L	: Mikroboru uzunluğu
L_h	: Isıtılan mikroboru uzunluğu
m	: Kütle
Nu	: Nusselt sayısı
$P_ç$: Çıkış basıncı
P_g	: Giriş basıncı
P_x	: Rastgele hata
q	: Isı akısı
Q	: Hacimsel debi
R_i	: İç yarıçap
R_o	: Dış yarıçap

Re	: Reynolds sayısı
S_c	: Mikroboru iç duvarındaki ısı üretimi
S_x, σ	: Standart sapma
T_a	: Akışkan sıcaklığı
$T_ç$: Çıkış sıcaklığı
T_{dy}	: Mikroboru dış yüzey sıcaklığı
T_g	: Giriş sıcaklığı
T_{iy}	: Mikroboru iç yüzey sıcaklığı
T_∞	: Ortam sıcaklığı
U	: Gerilim
U	: Toplam belirsizlik
$U_{m_{su}}$: Su kütleindeki toplam belirsizlik
U_m	: Kütleli debideki toplam belirsizlik
U_t	: Zamandaki toplam belirsizlik
v	: Hız
W_R	: R büyüklüğünün hata oranı
\bar{X}_n	: Ölçümün ortalaması
ΔP	: Basınç düşüşü
ΔT	: Sıcaklık farkı
ϕ	: Elektriksel güç
ρ	: Yoğunluk
σ	: Stefan Boltzman sabiti
μ	: Vizkozite
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MFD	: Mikro akışkanlı cihazlar

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1	X değişkeninin ölçümündeki hatalar.....	19
Şekil 4.1	Deney düzeneği.....	23
Şekil 4.2	Sabit sıcaklık banyosu.....	24
Şekil 4.3	BK Precision güç kaynağı.....	24
Şekil 4.4	GW INSTEC güç kaynağı.....	25
Şekil 4.5	Mikroboru.....	25
Şekil 4.6	Pistonlu mikroakış pompası.....	26
Şekil 4.7	Vakum pompası.....	26
Şekil 4.8	Basınç dönüştürücüsü.....	27
Şekil 4.9	Basınç regülatörü.....	27
Şekil 4.10	K tipi termoeleman 25 µm.....	28
Şekil 4.11	Veri toplama cihazı.....	29
Şekil 4.12	Vakum tüpü.....	29
Şekil 4.13	Istavroz bağlantılar.....	30
Şekil 4.14	Polimer port.....	30
Şekil 4.15	Bağlantı elemanları.....	30
Şekil 4.16	Ölçme noktaları.....	31
Şekil 4.17	Boru kesiti ve sıcaklıklar.....	32
Şekil 5.1	U-113 no'lu mikroborunun Sürtünme faktörü-Re sayısı değişimi.....	47
Şekil 5.2	1bar T2-1 deneyi sıcaklık değişimi.....	48
Şekil 5.3	1bar T2-2 deneyi sıcaklık değişimi.....	48
Şekil 5.4	1bar T3-1 deneyi sıcaklık değişimi.....	49
Şekil 5.5	1bar T3-2 deneyi sıcaklık değişimi.....	49
Şekil 5.6	0,6bar T2-1 deneyi sıcaklık değişimi.....	50
Şekil 5.7	0,6bar T2-2 deneyi sıcaklık değişimi.....	50

Şekil 5.8	0,6bar T3-1 deneyi sıcaklık değişimi.....	51
Şekil 5.9	0,6bar T3-2 deneyi sıcaklık değişimi.....	51

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1	Günümüzdeki MEMS temel uygulama alanları.....	4
Tablo 2.2	Mikrokanallarda tek fazlı akışta ısı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalar, geometri ve akış koşulları	7
Tablo 2.3	Mikrokanallar için ısı aktarımı bağıntıları.....	10
Tablo 3.1	Gauss dağılımında güvenilirlik seviyesi	17
Tablo 4.1	0,6 bar basınçta yapılan deneylerin detayları.....	35
Tablo 4.2	1 bar basınçta yapılan deneylerin detayları.....	36
Tablo 4.3	Kütledeki belirsizlik hesabına örnek	38
Tablo 4.4	Çalışmada kullanılan akış formülleri ve belirsizlik hesap formülleri.....	39
Tablo 4.5	Çalışmada kullanılan ısı formülleri ve belirsizlik hesap formülleri.....	41
Tablo 5.1	0,6bar basınçta yapılan deneylerin belirsizlikleri	46
Tablo 5.2	1bar basınçta yapılan deneylerin belirsizlikleri	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Mikrokanal, belirsizlik analizi

Bu tez çalışmasında iç çapı 254 mikrometre, boyu 20 cm olan U-113 (Tub SS 1/16-0,010-20) no'lu paslanmaz çelik mikroborunun akış ve ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelendi. Akışkan olarak su kullanılarak laminar bölge için deneyler yapıldı. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi ve basınç düşüşleri incelenip mevcut teori ile karşılaştırıldı. Aynı zamanda ısı transferi karakteristikleri de incelendi. Yapılan deneylerle ilgili belirsizlik hesaplamaları yapıldı.

MEASUREMENT UNCERTAINTY IN MICROTUBE FLOWS

SUMMARY

Key Words: Microchannel, uncertainty analysis

The experimental research on microchannel heat transfer and fluid flow was presented in this work. Diameter of the microtube was 254 μ m and the flow regime was laminar. The tube material was stainless steel and the working fluid was water. The experimental setup was designed in such a way that the investigation of the average friction factor and developing heat transfer was possible. Also uncertainty analysis of the experiments were performed.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mikro ve nano ölçekli makineler üzerindeki ilgi tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kendisini hissettirmeye başlamıştır. Teknolojinin hızla gelişmesi bu makinelerin, düşük verimli, gürültülü ve büyük ölçekli makine ve cihazların yerini alacağını göstermektedir. Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) olarak da bilinen yeni sistemler, içerisinde akışkanın dolaştığı farklı birimleri birbirine bağlayan mikrokanaallar içermektedir. Bu kanallardan geçen akışkanın akış ve ısı geçiş özelliklerinin ortaya çıkarılması, yeni mikro-elektro-mekanik sistemlerin geliştirilmesine yardımcı olacaktır [1].

Makro düzeylerdeki ısı transferi hesaplamalarında, akışkanın sürekli rejimde olduğu varsayılmaktadır. Ancak, akışkanın geçtiği kanal geometrisi küçüldükçe, sürekli rejim varsayımı da geçerliliğini yitirmeye başlar. Kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu prensipleri birim kütleye uygulanarak, lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler, Navier-Stokes ve enerji denklemleri, elde edilir. Ancak bu denklemler, mikro seviyelerdeki analizler için direkt olarak kullanılamazlar. Akışın mikro seviyelerde gerçekleşmesi durumunda, akışkanın, mikroskobik seviyelerde, oldukça küçük ve birbirinden bağımsız moleküllerden oluştuğu kabul edilmeli ve hesaplamalar bu kabule göre gerçekleştirilmelidir [2].

Deneysel çalışmalar, incelenen sistemler hakkında daha doğru ve kesin bilgileri vermeleri bakımından her zaman sayısal ve analitik çalışmaların önünde yer almıştır. Son yıllarda daha ucuz ve kolay olması nedeniyle sayısal çalışmalar ağırlık kazanmasına rağmen, bu çalışmalardan elde edilen sonuçların deneysel olarak desteklenmesi, deneysel çalışmaların önemini ayrıca artırmaktadır. Bununla birlikte deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçlar kadar önemli bir başka nokta; ölçülen değerlerin doğruluğudur. Doğruluğu etkileyen en önemli etken ise, deneyler sırasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalardır [3].

1. 1. Amaç

Bu tez çalışmasında iç çapı 254 mikrometre, boyu 20 cm olan U-113 (Tub SS 1/16-0,010-20) no'lu paslanmaz çelik mikrobunun akış ve ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelendi. Elde edilen deney verilerinin belirsizlik analizi yapıldı.

1. 2. Kapsam

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tezin amaç ve kapsamına yer verilmekte ardından ikinci bölümde mikrokanallar ve mikrokanallarla ilgili literatür incelemesi özetlenmektedir. Üçüncü bölümde ise belirsizlik analiziyle ilgili bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde deney düzeneği, yapılan deneyler ve bu deneylerin belirsizlik hesaplamalarına yer verilmektedir. Son olarak beşinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

BÖLÜM 2. MİKROKANALLAR

2. 1. Giriş

Karakteristik boyutları 1 µm' den 1 mm' e kadar değişen mikro-cihazlar günümüzde teknolojik bir gerçekliktir ve kalp pilinden mürekkep püskürtmeli yazıcılara kadar pek çok alanda başarı ile kullanılmaktadır. Bunlar arasında mikro pompalar veya mikro ısı eşanjörleri gibi mikro-akışkanlı cihazlar (MFD' ler) çok önemli bir grup oluşturmaktadır. MFD' lerin ana kullanıcıları otomotiv ve uçak firmalarını içeren mikroelektronik, kimya, ecza, gıda ve tıbbi teknolojiler gibi sanayilerdir [4].

Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) olarak ta bilinen yeni sistemler, içerisinde akışkanın dolaştığı farklı birimleri birbirine bağlayan mikrokanallar içermektedir [1]. Tablo 2. 1' de MEMS' in temel uygulama alanları görülmektedir. MEMS temelde entegre üretim teknolojisinin yöntemlerini değişiklik ve eklemeler yaparak kullanmaktadır. Mikro sistem üretim teknolojisi temelde yapısal malzeme olarak Poli-Si (Çok kristalli silisyum), yalıtkan malzemesi olarak silisyum nitrat (Si₃N₄), heba malzemesi olarak silisyum oksit (SiO₂) ve iletken malzeme olarak ta alüminyum kullanılır. Bunun yanında, entegre devre ve MEMS teknolojisinin arasındaki en önemli fark, MEMS üretiminde çok farklı malzemelerin kullanılmasıdır. Ticarileştirilmiş MEMS ürünleri yukarıda bahsedildiği gibi temel malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Ürün olarak çok başarılı MEMS ürünlerini görmek mümkündür. Hava yastıklarında kullanılan mikro ivmeölçerler, optik yansıtıcılarda kullanılan mikro aynalar, mürekkep püskürtmeli (inkjet printers) yazıcılarda kullanılan mikro nozullar endüstriyel son ürünlerde kullanılan birkaç örnektir. Endüstriyel ürünlerde kullanılan mikro sistemler arasında, akışkan-MEMS sensörleri % 5 ile 10 arası bir market payına sahiptir, bu oran sürekli artmaktadır. Mikro-akışkan sistemleri sağlık biliminde (minyatür sıvı analizinde), mikro laboratuvar sisteminde, mikro karıştırıcılarda, mikro soğutucularda, bio-teknolojide

(Mikro-PCR-Polimerize Zincir Reaksiyonu), farmakoloji gibi birçok alanda kullanıldığı görülmektedir. Bu sistemlerin en önemli birimlerinden biri mikro akışkan sistemlerin farklı bölümlerini birbirine bağlayan mikro kanallardır. Mikro kanallar, rezervuarlar için bağlantı elemanı ve/veya reaksiyon alanı olarak, kromotografi için ayrıştırıcı olarak veya mikro soğutucular için boru işlevi görürler [5].

Tablo 2. 1. Günümüzdeki MEMS temel uygulama alanları [6]

Alan	Uygulama
Akışkanlar Mekanik	Mikropompalar, mikrovalfler, mikrokarıstırıcılar, Lab on a chip, mikro iğneler, mikroplastik kartlar, mikro akışkan duyucuları
Bilgisayar	Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar
Biyoloji ve Tıp	DNA analizi, mikro-cerrahi aletler, kimyasal duyucular, sinirsel elektrotlar/sondalar
Elektronik	Cihazlar ve röleler
Fizik	Gelişmiş mikroskop uygulamaları, mikro ölçekli sıcaklık ölçüm uygulamaları
Haberleşme	Radyo frekansı devre ve filtre uygulamaları
Havacılık ve Uzay	Sürüklenme direncinin kontrolü, minyatür hava araçları, mikro-uydular, uydular için az yer kaplayan cihaz uygulamaları, radyasyon ölçüm
Optik	Tümleşik optik sistemler, optik anahtarlama, sayısal ışık işleme, düz panel görüntüleme
Taşıt Tekniği	Basınç/sıcaklık/ivme ölçümü, taşıt güdüm teknolojileri

Mikro-nano seviyelerdeki ısı transferi konusu, özellikle son 10 yılda birçok araştırmacının ilgisini çekerek gelişmiş ve günümüzde de büyük bir hızla gelişmeye devam etmektedir. Elektromekanik sistemlerin gelişmesi, günümüz teknolojisi ve bilimindeki, cihazların küçültülmesi eğiliminin artması gibi nedenler, bu konuyu oldukça popüler kılmakta ve yine bu konuya olan merakı arttırmaktadır. Elbette teknoloji ve bilimde yaşanan cihazların mikro-nano seviyelere kadar küçültülmesi eğilimi, beraberinde, bilimin birçok dalını ilgilendiren, çözülmeyi ve araştırılmayı bekleyen problemleri de beraberinde getirmiştir. Isı transferi konusu, mikro-nano seviyelerdeki cihazların ısınması, oluşan bu ısının giderilmesi ve sorun teşkil etmemesinin önemi açısından, karşılaşılan bu problemleri çözmeye yönelik bilim dallarından bir tanesidir [2].

2. 2. Mikrokanallar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Mala ve Li çapları 50 μm 'den 254 μm 'ye değişen birleşmiş silika ve paslanmaz çelik mikrotüplerde su akışını deneysel olarak incelemiştir. Akış karakteristiklerini analiz etmek için basınç düşüşü ve debiler ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar küçük çaplı mikrotüpler için öngörülen geleneksel teori ile büyük farklılıklar göstermiştir. Büyük çaplı mikrotüpler için ise deneysel sonuçlar geleneksel teori ile kısmen uyumludur. Düşük Re sayılarında gerekli olan basınç düşüşü, Poiseuille akış teorisine göre hesaplanan değer ile yaklaşık aynıdır. Ancak Re sayısı arttıkça, basınç gradyanında önemli bir artış meydana gelmektedir. Bu nedenle sürtünme faktörü geleneksel teori ile verilen değerden daha yüksektir. Aynı zamanda sonuçlar akış davranışında malzemenin etkisini belirlemiştir. Aynı debi ve aynı çap için silika mikrotüpüte paslanmaz çelik mikrotüpüden daha yüksek basınç gradyanı gerekmektedir. Ölçülen yüksek basınç gradyanı ya laminer akıştan türbülanslı akışa erken geçiş ya da mikrotüplerdeki yüzey pürüzlülüğüne bağlı olabilmektedir. Mala ve Li çalışmalarında bu fenomeni ele almışlardır [7].

Celata vd. mikroborularda tek fazlı akış ve ısı transferini incelemiştir. Farklı araştırmacıların elde ettiği sonuçlardaki uyumsuzluklara açıklık getirmek üzere laminer akış ve laminerden türbülansa geçiş detaylı olarak analiz edilmiştir. Yapılan deneylerde laminer akış rejiminde Re sayısının 600-800' den düşük olduğu

durumlarda sürtünme faktörünün Hagen-Poiseuille teorisiyle uyumlu olduğu görülmüştür. Laminerden türbülanslı rejime geçiş Re sayısının 1800-2500 aralığında olduğu zaman gerçekleşmiştir [8].

Lelea vd. paslanmaz çelik mikrokanallarda ısı transferi ve akışkan (saf su) akışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. 0,1, 0,3 ve 0,5 mm' lik mikrotüpler kullanılmıştır. Laminer akış rejiminde 800' e kadar değişen Re sayılarında çalışılmıştır. Deneysel sonuçlarından elde edilen veriler geleneksel teoriyle ve nümerik model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışılan çaplardaki mikrokanallarda su akışı için geleneksel teorilerin deneysel sonuçlarında elde edilen akış ve ısı transfer karakteristikleri ile uyumlu olduğu görülmüştür [9].

Qwhaib ve Palm soğutucu akışkan R134a'nın 1,7, 1,2 ve 0,8 mm iç çaplı mikrokanallarda tek fazlı zorlanmış taşınımının ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak araştırmıştır. Sonuçlar makro ölçekteki kanalların ısı transferi bağıntılarıyla ve mikro ölçekteki geometriler için önerilen bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Klasik bağıntılar ile deneysel ölçüm verileri arasında türbülanslı rejimde uyum gözlenmiştir. Buna karşılık, deneysel verilerle mikrokanallar için önerilen bağıntıların hiç biri arasında uyum gözlenmemiştir. Laminer rejimde ise ısı transfer katsayıları hemen hemen üç çap için de aynı bulunmuştur [10].

Celata vd. dairesel mikrotüplerde tek fazlı laminer saf su akışını deneysel olarak incelemiştir. Çapları 120-528 µm arasında değişen cam tüpler kullanmıştır. Deneysel sırasında vakum ortamı oluşturularak ısı kayıpları engellenmiş, böylelikle mümkün olduğunca doğru ölçümler elde edilmiştir. Termal giriş uzunluğu, tüp duvarında aksel iletim ve viskoz ısıtma incelenmiştir. Sonuçlar Nu sayısının azalan çapla azaldığını göstermiştir. Geçiş bölgesinden türbülansa doğru tüm Re sayıları için Nu sayısındaki düşüş en dikkat çekici bulgu olmuştur [11].

Li vd. mikrotüplerde laminer sıvı akışının akış ve ısı transferi karakteristiklerini belirlemek için deneysel ve nümerik çalışmalar yürütmüştür. 50-100 µm (pürüzsüz silika) ve 373-1570 µm (pürüzlü paslanmaz çelik) hidrolik çaplı mikrotüpler kullanılmıştır. Deneysel Re sayısının 20-2400 aralığında olduğu koşullarda saf su ile

gerçekleştirilmiştir. Silika tüpler için deneysel verilerin geleneksel teori ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Paslanmaz çelik tüpler için ise (pürüzlülüğün %1,5'ten büyük olduğu durumlarda) sürtünme faktörü geleneksel teoriden daha yüksektir ve yüzey bağıl pürüzlülüğü arttıkça artmaktadır. Paslanmaz çelik tüpler için eksenel yön boyunca yerel Nu sayısı dağılımının deneysel sonuçları Re sayısının düşük ve tüp duvarı bağıl kalınlığı yüksek olduğu durumda geleneksel sonuçlarla örtüşmemektedir [12].

Şara ve Yapıcı mikrokanallarda basınç düşüşü ve ısı-kütle aktarımıyla ilgili yapılan çalışmaların bir özetini çıkarmıştır. Bu çalışmadan alınan Tablo 2.2'de mikrokanallarda tek fazlı akışta ısı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalar, geometri ve akış koşullarının bir listesi verilmektedir [13].

Tablo 2. 2. Mikrokanallarda tek fazlı akışta ısı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalar, geometri ve akış koşulları

Referans	Geometri	D_h (μm)	Re	Akışkan	İncelenen
Peng vd. (1994)	Dikdörtgen	133-367	200-700	Su	f
Jiang vd. (1995)	dikdörtgen	0,787-0,797	0,1-1,58	saf su	f
Yu vd. (1995)	Dairesel	19-102	250-20000	Azot gazı ve su	f, Nu
Yang vd. (1995)	Farklı açılarda eğik	167-182	70-1600	su	f
Mala ve Li(1999)	dairesel	50-524	300-2500	su	f
Adams vd. (1999)	dairesel	760-1090	$2,6 \times 10^3$ - $2,3 \times 10^4$	su	Nu
Harms vd. (1999)	dikdörtgen	401,27	173-12900	Saf su	f, Nu
Papautsky vd. (1999)	Dikdörtgen	57,14	5-20	su	f
Pfund vd.(2000)	Pürüzlü, dikdörtgen	255,96-1041,45	60-3450	su	f
Xu vd. (2000)	Dikdörtgen	30-344	20-4000	Su	f
Qu vd.(2000)	Yamuk	62-169	150-1400	Su	Nu
Ren vd. (2001)	Dikdörtgen	28,17-80,76	5-55	saf su, KCl çözeltisi	f
Choi ve Cho(2001)	dikdörtgen	$6900-254 \times 10^4$	3000-15000	parafin	f, Nu

Tablo 2. 2. Mikrokanallarda tek fazlı akışta ısı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalar, geometri ve akış koşulları (devam)

Gao vd. (2002)	Dikdörtgen	199,20-1923,07	100-8000	saf su	f, Nu
Qu ve Mudawar(2002)	dikdörtgen	348,94	137-1672	Saf su	f, Nu
Araki vd. (2002)	Üçgen, yamuk	3,93-10,3	0,03-4,19	Helyum, azot	f
Hegab vd. (2002)	Dikdörtgen	112-210	1280-13000	R-134a	Nu
Celata vd. (2002)	Dairesel	130	100-8000	R114	f, Nu
Wu ve Cheng(2003)	yamuk	25.9-291.0	12.9-2000	Saf su	f
Brutin ve Tadrict (2003)	Dairesel	50-530	-	Su, saf su	f
Tiselj vd. (2004)	Üçgen	160	3,2-64	Su	Nu
Chen vd.(2004)	Dikdörtgen	57-267	50-850	Metanol	f, Nu
Qwhaib ve Palm(2004)	dairesel	800-1700	1000-17000	R-134a	Nu
Liu vd. (2004)	dikdörtgen	74,07-137,93	10-80	Saf su	f, Nu
Sharp ve Adrian (2004)	Dairesel	50-247	20-2900	saf su, 1-propanol, %20 gliserin/su	f
Hsieh vd. (2004a)	dikdörtgen	80	2,6-90	Azot gazı	f
Hsieh vd. (2004b)	Dikdörtgen	146	50-1000	saf su	f, hız
Phares ve Smedley (2004)	Dairesel	120-440	-	Su, saf su, tuz çözelti, gliserin/su	f
Garimella ve Singhal(2004)	Dikdörtgen	250-1000	588-2202	-	f, Nu
Lee vd. (2005)	Dikdörtgen	318-930	300-3500	Saf su	f, Nu
Xu vd.(2005)	Üçgen, trapezoid	155-	100-2000	Saf su	f, Nu

Tablo 2. 2. Mikrokanallarda tek fazlı akışta ısı ve basınç düşüşü ile ilgili çalışmalar, geometri ve akış koşulları (devam)

Kohl vd. (2005)	Dikdörtgen	25-100	6,8-2068	Hava, su	f
Hao vd. (2005)	Yamuk	237	50-2800	saf su	f
Kandlikar vd. (2005)	Dikdörtgen	325-1819	200-5700	Su, hava	f
Shen vd. (2006)	Dikdörtgen	436,36	162-1257	Saf su	f, Nu
Brander vd. (2006)	Dikdörtgen	70-144	-	Saf su	f, Nu
Morini vd. (2006)	Dairesel	127-762	300-4000	Azot	f
Hao vd. (2006)	Dikdörtgen	153-191	250-2500	saf su	f
Rands vd. (2006)	dairesel	16,6-32,2	300-3400	su	f
Hwang vd. (2006)	Dairesel	244-792	100-10000	R-134a	f
Baviere vd. (2006)	-	370,37-1093,75	200-8000	Su	f, Nu

2. 3. Mikrokanallarda Isı Geçişi

Küçük çaplı kanallar, verimli ısı transfer özelliklerine sahip olduğundan, oldukça ilgi görmektedir. Bu kanallar, bilgisayar yongalarını soğutma ve yüksek akıllı ısı çekilmesi gibi uygulamalar için çalışılmaktadır. Bir kanalın duvarları ile akışkan akışı arasındaki ısı transfer hızı temel taşınım ısı transfer denklemi ile verilir:

$$Q = hA(T_{\text{duvar}} - T_{\text{akışkan}}) \quad (2.1)$$

Isı transferi katsayısı ve yüzey alanının her ikisi de kanal çapı ile bağlantılıdır. Kanal çapını küçültme birçok avantaja sahiptir. Hepsinden önce, daha küçük çaplardaki kanallar daha yüksek bir yüzey alanının dahili akışkan akış hacmi oranına sahiptirler. Hacimsel temelde, akışkana ısı transferi hızı böylece hidrolik çapla ters orantılı olarak artar. Buna ek olarak, daha küçük çaplı kanallarda akışkan akışı genellikle laminer olduğundan ($Re = \rho V D_h / \mu$), ısı transfer katsayısı çap azaldıkça artar (tam gelişmiş akış koşulları altında ($Nu = h D_h / k$), $k = \text{sabit}$ olduğu için) [14].

Tablo 2. 3' te literatürdeki mikrokannallar için ısı aktarım bağıntılarından örnekler verilmektedir.

Tablo 2. 3. Mikrokannallar için ısı aktarımı bağıntıları [15]

Bağıntı	Geometri ve Koşullar	Referans
$Nu = Nu_{Gn} (1 + F), F = C Re [1 - (D - D_o)^2]$ $Nu_{Gn} = (f / 8)(Re - 1000) Pr / [1 + 12, 7(f / 8)^{0,5} (Pr^{2/3} - 1)]$ $C = 7, 6 \times 10^{-5}, D_o = 1, 164 mm, f = [1, 82 \log(Re) - 1, 64]^{-2}$	Dairesel, bakır, damıtık su, D=0,102-1,09 mm Re=2,6x10 ³ -2,3x10 ⁴ , Pr=1,53-6,43	Adams vd. (1998)
$Nu = 0, 007 Re^{1,2} Pr^{0,2} \quad 6000 < Re > 20000$	Mikroboru, silika, azot gazı ve su, D=19,52, 102µm Pr=0,7-5, Re=250-20000	Yu vd. (1995)
$Nu = 0, 000972 Re^{1,17} Pr^{1/3} \quad Re < 2000$ $Nu = 3, 82 \times 10^{-6} Re^{1,96} Pr^{1/3} \quad 2500 Re < 20000$	Dairesel, azot gazı, D=3-81,2 µm, L=24-52mm, Re=20-25000	Choi vd. (1991)

BÖLÜM 3. BELİRSİZLİK ANALİZİ

3. 1. Tanımlar

Doğruluk (Accuracy): Cihazın, ölçülen fiziksel büyüklüğün doğru değerini belirleyebilme kabiliyetidir. Histerizis, doğrusal olmama ve kayma, sıcaklık etkisi ve benzeri hata kaynakları nedeniyle oluşan, gerçek değerden sapma anlamına gelen, hata ile karıştırılmamalıdır. Doğruluk hatası bir ölçümün sonucundan doğru sonucun çıkarılması ile elde edilen değerdir. $X_i - X_{gerçek}$ şeklinde ifade edilir.

Çoğunlukla bir grup ölçümün doğruluğu, ölçümlerin ortalamasının gerçek değere yakınlığının bir göstergesidir. Doğruluk, genellikle tekrarlayabilir sabit hatalarla ilgilidir. Doğruluk genellikle cihazın tam skalasının yüzdesi cinsinden verilir. Örnek olarak 100 bar'a kadar ölçme yapabilen bir basınçölçerin doğruluğu %1 ise, bu cihaz ile ± 1 bar sınırları içinde ölçme yapılabilir [16, 17].

Hassasiyet (Sensitivity): Ölçme cihazının ölçek faktörünü belirleyen özelliğidir. İstenilen değerde çıkış sinyali üretebilmek için gereken minimum giriş sinyali büyüklüğüdür. Hassasiyet hatası, bir ölçümün sonucundan tüm ölçüm sonuçlarının ortalamasının çıkarılması ile bulunan değerdir. $X_i - \bar{X}$ şeklinde ifade edilir.

Çoğunlukla bir grup ölçümün hassasiyeti, ölçme aletinin çözünürlüğüne ve ölçümün tekrarlanabilirliğine bağlıdır. Hassasiyet genellikle tekrarlanmayan, rastgele hatalarla ilişkilidir [16, 17].

Bir ölçüm ya da hesaplama, çok doğru olmaksızın çok hassas olabileceği gibi bunun tam tersi de olabilir. Örneğin, doğru rüzgar hızı değerinin 25.00 m/s olduğunu varsayalım. A ve B anemometreleri ile yapılan beş ölçümün sonuçları şu şekilde olsun:

A anemometresi: 25.50, 25.69, 25.52, 25.58 ve 26.61 m/s. Tüm ölçümlerin ortalaması = 25.58 m/s

B anemometresi: 26.3, 24.5, 23.9, 26.8 ve 23.6 m/s. Tüm ölçümlerin ortalaması = 25.02 m/s

A anemometresinin daha hassas olduğu açıkça bellidir. Çünkü ölçümlerden hiç biri ortalama değerden 0.11 m/s' den fazla sapmamıştır. Buna karşın, ortalama değer olan 25.58 m/s doğru rüzgar hızı değerinden 0.58 m/s daha büyüktür; bu önemli bir eğilim hatasıdır. Buna sabit hata ya da sistematik hata da denir. Diğer taraftan B anemometresi çok hassas değildir, çünkü bununla yapılan ölçümler ortalama etrafında fazla saçılmaktadır. Ancak genel ortalama doğru değere çok daha yakındır. Dolayısıyla B anemometresi A anemometresinden daha az hassas olmakla birlikte, en azından bu ölçüm grubu için daha doğru ölçme yapmaktadır [18].

Eşik (Bias): Belirlenmesi istenilen fiziksel bir büyüklüğün doğru değerden bir yönde sapma eğilimidir. Eşik sistematik bir hatadır [16].

Kalibrasyon (Calibration): Bir ölçme aletinin doğruluğunun, bilinen değerler ile karşılaştırılarak hataların azaltılması işlemidir. Bütün ölçme aletleri için zaman zaman kalibrasyon işlemi gerekebilir. Bu işlem (1) standartlar enstitülerinin imkanları ile, (2) doğruluğu bilinen ve kanıtlanmış cihazlar ile veya (3) bilinen bir kaynak ile karşılaştırılarak yapılabilir [17].

Güvenirlilik Seviyesi (Confidence): Bir ölçümün doğruluk derecesidir [16].

Sapma (Deviate): İstatistiki dağılımın, belirlenen bir eğilimden farklılık gösteren herhangi bir parçasıdır [16]. $\tau = \frac{X - \mu}{\sigma}$ şeklinde ifade edilir.

Hata (Error): Ölçme sisteminden elde edilen değer, ölçülmesi gereken doğru değerden farkıdır yani doğruluktan sapma değeridir. $X_{ölçüm} - X_{gerçek}$ şeklinde ifade edilir. Hatalar sistematik veya rastgele olabilir [16].

Rastgele Hata (Random Error): Rastgele ortaya çıkan ve tekrarlanmayan istatistiki hatadır. Bu terim ortalama değerin etrafında değerler alabilen hatalar için genel bir tanımlamadır. Rastgele hatayı tanımlayabilmek için hata dağılımının bilinmesi gerekir [16].

Sistemik Hatalar (Systematic Error): Rastgele olmayan sürekli hatalardır. Sistemik hataların çeşitli nedenleri olabilir. Sistemik hata, aynı bileşenler ve yöntemin tatbik edildiği her cihaz ile aynı büyüklükte oluşur. Ayar ekipmanlarındaki kusurlar sistemik hatalara yol açabilir. Çünkü tüm ayarlı cihazlar, ayar ekipmanının hatası yönünde sapma gösterir. Gerilim ve direncin zamanla değişmesi, genellikle bir yönde olup sistemik hatalar sınıfına girer [16].

Histerizis (Hysteresis): Sabit ortam koşulları altında, bir ölçme cihazının, belirlenen bir değere, önce artan ve sonra azalan uyarılarla yaklaşılmasında, farklı değerler göstermesine neden olan tüm etkilerin bileşimidir. Histerisiz, cihazın ölçüm aralığının bir yüzdesi olarak ifade edilir. Örnek olarak bir termometre ile ortam sıcaklığı ölçülürken, termometrenin yüksek sıcaklıktan veya alçak sıcaklıktan yaklaşması durumlarında aynı ortam sıcaklığı için aynı termometre farklı iki değer gösterebilir. Histerizis olayında cihazlardaki mekanik sürtünmeler, manyetik etkiler, elastik deformasyonlar ve ısı etkileri rol oynar [16, 17].

Kesinlik (Precision): Aynı koşullar altında aynı büyüklüğün ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliğidir. Ölçüm doğruluğu anlamında kullanılmaz. Ölçümün kesinliği, burada, bir büyüklüğün ölçülen değerlerinin, ortalama değer civarındaki dağılımının izafi yoğunluğunu tanımlamak için kullanılmıştır. Bundan dolayı bir ölçümün kesinliği; doğruluğundan çok tekrarlanabilirliği ile ilişkilidir. Örnek olarak 100 Ω olduğu bilinen bir elektrik direncinin aynı bir cihazla on defa ölçüldüğü düşünölsün. Bu ölçmeler esnasındaki değerler sırasıyla 102, 104, 104, 103, 105, 106, 103, 105, 102, 106 Ω ise, on ölçme sonucunda ortalama değer olarak 104 Ω belirlenir. Göz önüne alınan bu direnç ölçme cihazının doğruluğu $(106-100)/100=6\%$ (6 Ω) iken, kesinliği $(106-104)/100=2\%$ den daha iyidir. Çünkü bu alet ortalama değerden $\pm 2 \Omega$ sapmıştır. Eğer bu cihaz 100 Ω ' a göre kalibre edilirse $\pm 2 \Omega$ doğrulukla ölçme

yapabilir. Sonuç olarak ölçme cihazlarının doğrulukları kalibrasyon ile iyileştirilebilmelerine karşılık, kesinlikleri iyileştirilemez [16, 17].

Güvenilirlik (Reliability): Bir cihazın, tekrarlanma doğruluk derecesinin, tanımlanan sınırlar içerisinde kalmaya devam etmesi olasılığıdır [16].

Belirsizlik (Uncertainty): Hata için belirlenen bir değerdir. Cihaz ile ölçüm yapılması durumunda hatanın ne olacağını belirlemesidir. Belirsizliğin hem kesinlik hem de doğruluk hatalarının sonucu olmasına rağmen sadece kesinlik hataları istatistiki yöntemlerde konu edilir [16].

Kararlılık (Stability): 1. Başka birimde meydana gelen değişiklik sonucu bir büyüklükte meydana gelen değişikliklerden bağımsız olma halidir; 2. Sürüklenmenin (giriş sinyalinden bağımsız olarak, çevre etkileri ve yükleme nedeniyle zamanla çıkış sinyalinde meydana gelen istenmeyen kademeli değişim) olmamasıdır [16].

Okunabilirlik (Readability): Ölçme cihazının okuma skalasının genişliğidir. Genelde okunabilirliği büyük olan aletler tercih edilmelidir. Örnek olarak aynı alt ve üst okuma sınırları içinde skalası 30 cm olan bir cihaz, skalası 15 cm olan bir cihazdan daha iyidir [17].

Çözünürlük (Resolution): Girişte meydana gelen ve cihaz çıkışında izlenebilir bir değişime neden olan en küçük değişiktir [16].

3. 2. Belirsizlik Analizi

Hata ve belirsizlik kavramları çoğu zaman birbirlerine karıştırılır ve birçok problemde bu iki kavram tam olarak ayırt edilemez.

Hata; ölçüm hatası, bir niceliğin ölçülen değeri ile gerçek değeri arasındaki farktır. Belirsizlik; ölçümlerdeki hataların tam olarak bilinmemesidir.

Bir ölçüm hatası, çoğu zaman birçok nedenden kaynaklanan çok sayıda bağımsız hataların sonucunda oluşur. Hata analizi, bu bağımsız hataların genel hata üzerindeki etkilerini değerlendirme çalışmasıdır. Ölçüm hatası hiçbir zaman tam olarak bilinemez. En iyi ihtimalle, içinde gerçek değer yer aldığı bir bölge belirlenebilir. Bu bölge belirsizlik olarak adlandırılır ve hatanın olası bir büyüklüğünün ifadesidir. Belirsizliğin gerçekçi bir ölçümüne ulaşmak için tüm potansiyel hata kaynaklarının etkilerinin tam olarak belirlenmesi gerekir [16].

3.2.1. Hata kaynakları

1. Fiziksel niceliği tanımlayan matematiksel modeldeki bir yanlışlık
2. Ölçme işleminin doğasından kaynaklanan tahminlerin çeşitliliği
3. Ayarlı cihazlar ve ölçüm standartlarındaki belirsizlik
4. Standart ve cihazlarda kademeli değişikliklere yol açan zamana bağlı karasızlıklar
5. Sıcaklık, nem, basınç gibi çevresel faktörlerine etkisi
6. Başka kaynaklardan elde edilen sabit değerler ve diğer parametreler
7. Sinyal karışması, parazitler, homojen olmama, yetersiz çözünürlük ve tam olmayan ayrışma durumlarından ileri gelen belirsizlik
8. Sayısal belirsizlik ve veri analizi
9. Yanlış belirlemeler ve prosedür hataları
10. Temizlik, beceri ve kullanıcı tekniklerini içeren laboratuvar çalışmaları [16]

3.2.2. Hataların sınıflandırılması

Ölçme iki özellik içerir: 1) Aynı niceliğe ait tekrarlanan ölçümlerin birbirini tutmaması, 2) niceliğin gerçek değerinin, ölçüm sonuçlarının limit değerinden farklı olması (ortalama değer limit μ , ölçüm sayısının sonsuza gitmesi durumunda örnek ortalamasının yakınsadığı değerdir. Eğer, $\overline{x_n}$ ölçümün ortalama sonucu ise $n \rightarrow \infty$ iken $\overline{x_n} \rightarrow \mu$) Bu özellikler rastgele ve sistematik hata olmak üzere iki çeşit hatanın sonucudur [16].

a) Rastgele hatalar

Rastgele hatalar ölçümün tekrarlanması durumunda değişimlere yol açan etkilerle ilişkilidir. Rastgele hataları düzeltmek mümkün değildir. Ölçüm sayısı artırılarak etkisi azaltılabilir.

Herhangi bir rastgele hatanın büyüklüğü saptanamaz çünkü bu tamamen bir rastgele olaydır. Dağılım, olası değerlerin yayılımını tanımlayan standart sapma σ ile karakterize edilir. Bu standart sapma, tekrarlanan ölçümlerin (x_1, x_2, \dots, x_n) sonucu elde edilir ve s ile belirtilir.

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{ve} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Belli sayıda yapılan ölçüm sonuçlarının ortalaması olan \bar{x} , genellikle ölçüm sonucu olarak alınır. Bu takdirde rastgele hata etkileri azalır ve \bar{x} değerindeki belirsizlik ölçüsü ortalamanın standart sapması (veya standart hata) olarak verilir ve

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} \quad (3.2)$$

$$S_{\bar{x}} = S_x / \sqrt{n} \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanır. \bar{x} için rastgele hata limiti, C güvenilirlik seviyesinde

$$t_C(v) s_{\bar{x}} \quad (3.4)$$

olarak verilebilir. Burada $t_C(v)$, $v(n-1)$ serbestlik derecesidir. t değeri tablolardan güvenilirlik seviyesine bağlı olarak okunur. Rastgele belirsizlik çoğu zaman t istatistiğini kullanmak yerine standart sapmanın iki veya üç katı olarak verilir. Rastgele hata aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_x = t S_x \quad (3.5)$$

$$P_{\bar{x}} = tS_{\bar{x}} = \frac{tS_x}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

Tablo 3. 1: Gauss dağılımında güvenilirlik seviyesi [19]

%50	$\pm 0,675 \sigma$
%68,3	$\pm 1,0 \sigma$
%95	$\pm 1,96 \sigma$
%99,7	$\pm 3,0 \sigma$
%99,99	$\pm 4,0 \sigma$

Ölçülen niceliği etkileyen rastgele hata nedenleri çok sayıda ise toplam standart sapma hesaplanır. Böylece bağımsız hata kaynaklarının birleşik etkisine de açıklık getirilmiş olunur [16, 19].

b) Sistemik hatalar (bias)

Ölçümün aynı koşullar altında tekrarlanmasına rağmen hata değişmiyorsa bu hata, *sistemik hata* olarak adlandırılır. Sistemik hatalar tüm ölçümlerin aynı miktarda hatalı olmasına yol açarlar ve ölçümün tekrarlanması ile belirlenemezler.

Sistemik hataların belirlenmesi daha karmaşık olup, genellikle istatistikî metotlar ile yapılamaz. Sistemik hatalara yol açan parametrelerden bazıları da deneylerde kullanılan sabitler, çarpanlar, vb. katsayılarıdır. Bu hataların etkileri, ölçülen değerlerin kontrolü ve kişisel beceri ile belirlenir. Hataların büyüklükleri deneysel doğrulamayı gerektirebilir, ancak deneyi yapan kişinin yargı ve tecrübelerine başvurmak gerekli olabilir.

Sistemik hatalar, gerçekçi olarak saptanamadığında güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi gerekir. Güvenirlik sınırları ve rastgele hata limitleri, sistemik hatanın doğru olarak bilinebilmesi için yeterli genişlikte olma gerekliliği açısından, birbirlerine benzeyen kavramlardır.

Her sistematik belirsizlik bileşeni, hata etkisi için bir sanki mutlak üst sınır olarak değerlendirilir ve büyüklüğü tipik olarak $-\delta/+ \delta$ aralığı içerisindeki değerler cinsinden hesaplanır.

Sistematik hata kaynaklarının çok sayıda olması durumunda, $-\delta/+ \delta$ sınırları, her bileşen için ayrı ayrı elde edilir. Bileşenleri birleştirmede kullanılan en yaygın iki yöntem, lineer toplama ve kareleri toplamının karekökünü hesaplamadır [16, 19].

c) Toplam belirsizlik

Toplam ölçüm hatası δ ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki farktır.

ε_i =Rastgele hata

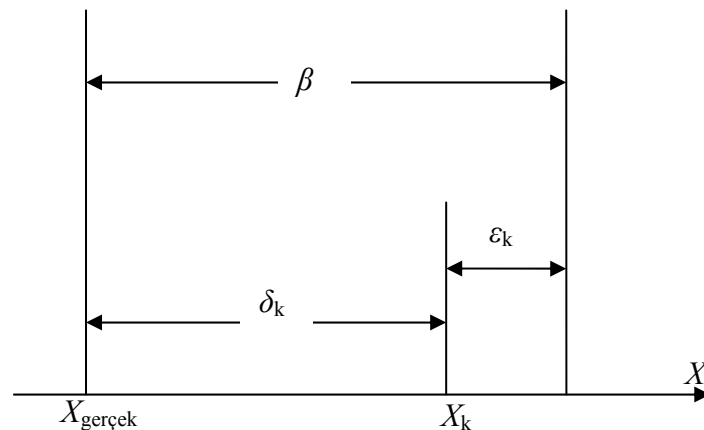
β =Sistematik hata

$$\delta_i = \beta + \varepsilon_i \quad (3.7)$$

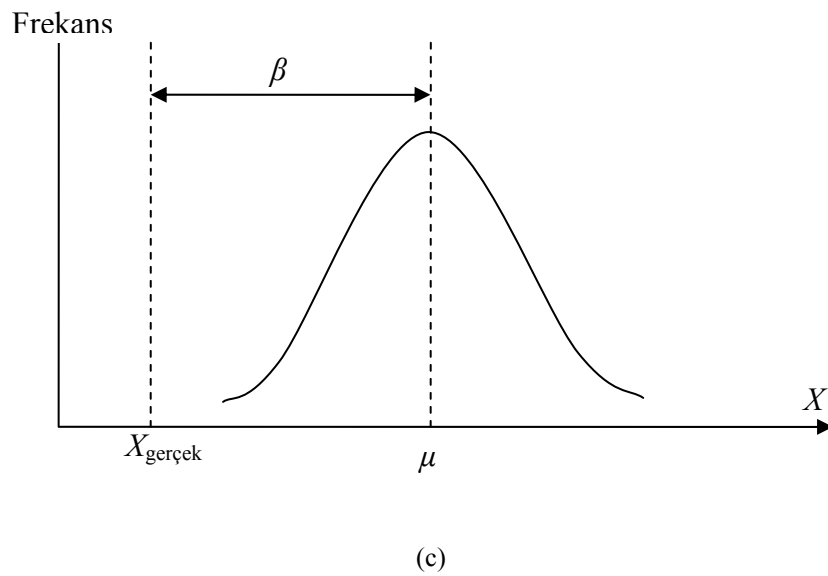
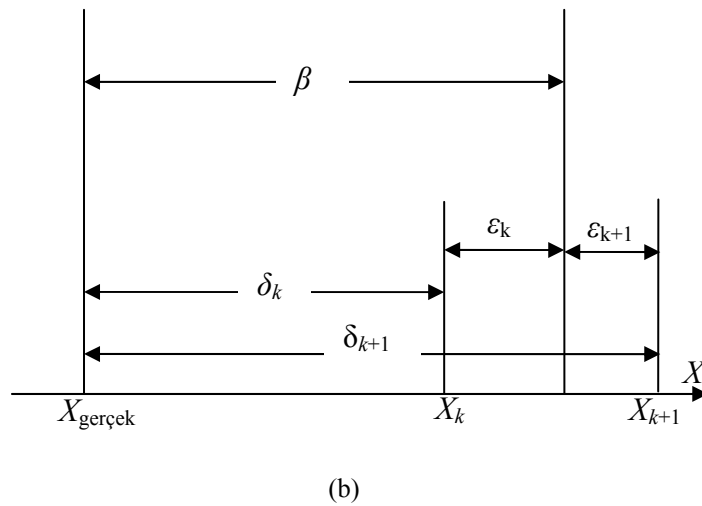
Rastgele hata her ölçüm için farklı değer alır. Buna karşılık sistematik hata tüm ölçümlerde aynıdır değişmez. Ölçüm almaya n adete ulaşana kadar devam edersek veriler Şekil 3.1.c' deki gibi davranacaktır. Sistematik hata n adet ölçümü ortalaması μ ve gerçek değer X arasındaki fark olacaktır. Ölçümlerimize bağlı X değerini ifade etmek istersek % C ' lik güven seviyesinde:

$$X \pm U_x$$

Burada X , n adet ölçümün ortalaması ve U_x rastgele ve sistematik hataların birleşiminden kaynaklanan X ölçümündeki belirsizliktir [16, 19].



(a)



Şekil 3. 1: X değişkeninin ölçümündeki hatalar: a) tek ölçüm, b) iki ölçüm, c) sonsuz sayıda ölçüm[19]

3. 3. Toplam Belirsizlik

Bir ölçümün belirsizliği, niceliğin değerinin ne kadar iyi belirlenebildiğinin bir ölçüsüdür. Bağımsız belirsizlik bileşenlerini toplam belirsizlik olarak birleştiren birçok yöntem vardır.

Bu metotlardan biri, tüm sistematik belirsizlik bileşenlerinin rastgele belirsizlik bileşenleri ile lineer olarak toplanmasını öngörür. Böylece, sınırları δ_i ile belirtilmiş k sistematik hata kaynağı varsa ve tüm rastgele hata kaynaklarından elde edilen toplam standart sapma s ise bütünsel belirsizlik U ;

$$U = ts + \sum_{i=1}^k \delta_i \quad (3.8)$$

şeklinde hesaplanır. Burada t , deneycinin t değeridir.

Kullanılan diğer iki yöntem, sistematik belirsizlik bileşenlerini karesel olarak toplama ve sonucu rastgele belirsizlik ile lineer olarak toplayarak,

$$U = ts + \sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_i^2} \quad (3.9)$$

şeklinde veya sonucu rastgele belirsizlik ile karesel toplayarak

$$U = \sqrt{(ts)^2 + \sum_{i=1}^k \delta_i^2} \quad (3.10)$$

şeklinde hesaplanır. Genellikle son bahsedilen yöntem karesel olarak toplama kullanılır [16, 19].

3. 4. Deneysel Bulguların Analizi

Belirli sayıda deney yapıldıktan sonra bu deneye ait hata oranlarının tespiti için pratikte birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılan bir tanesi “akılcı yaklaşım” (commonsense basis), diğeri ise “belirsizlik analizi” (uncertainty analysis) yöntemleridir. Son yıllarda hata oranlarının tespitinde, araştırmacılar tarafından belirsizlik analizi daha çok tercih edilmektedir [17].

3. 4. 1. Akılcı yaklaşım

Bu tip hata analizinde ölçme sisteminde bulunan bütün aletlerin aynı anda maksimum hatayı yaptığı kabul edilir [17].

3. 4. 2. Belirsizlik analizi

Deneysel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen hata tiplerinin üç ana grupta toplamak mümkündür [20]. Birinci olarak; deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar, ikinci olarak; sebebi genellikle kesin olarak bilinmeyen, aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar, üçüncü olarak; deney ve gereçlerinde rastgele elektronik salınımlardan, sürtünme etkilerinden vs. kaynaklanan rastgele hatalardır. Çoğu zaman sabit hatalar ile rastgele hataları birbirinden ayırt etmek zordur [20]. Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır ve uygun bir kalibrasyon ve düzeltme ile ortadan kaldırılabilir. Ölçü aletinin imalatının da doğru yapıldığı kabul edilirse, hata analizi; sabit ve rastgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır [21, 22].

Hata analizi sadece deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların yorumlanmasında değil, aynı zamanda uygun ölçüm metodunun ve ölçü aracının seçiminde önemli rol oynamaktadır. Ölçülecek büyüklük ve ölçü araçlarının seçiminden önce hata analizinin yapılması ve buna uygun büyüklük ve ölçüm aracının seçilmesi, sonuçların içinde yer alabilecek belirsizliğin minimuma indirilmesine yardımcı olacaktır [21, 22]. Diğer taraftan, ölçülen büyüklüklerden hangisinin toplam hata üzerinde en etkin rol oynadığının tespit edilmesi, bu ölçümlerin daha hassas yapılması için önlem almayı gerektireceğinden sonuçların belirsizliğinin azaltılmasına ayrıca katkıda bulunacaktır.

Deneysel bulguların hata analizi için belirsizlik analizi (uncertainty analysis) adı verilen daha hassas bir yöntem, Kline ve McClintock tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntemde göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olsun. Bu durumda

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $U_{x_1}, U_{x_2}, U_{x_3}, \dots, U_{x_n}$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise,

$$U_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} U_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} U_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

şeklinde verilmektedir [3, 19].

Bir parametrenin değerinin ölçülmesinde, sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hataları nedeniyle ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı yukarıdaki denklem ile hesaplanır.

Yukarıdaki ifade R^2 'ye bölüldüğü zaman

$$\left(\frac{U_R}{R} \right)^2 = \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} U_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} U_{x_n} \right)^2 \quad (3.12)$$

şeklini alır ve ifade sadeleştirildiğinde belirsizlik hesabı için 3.13 eşitliği kullanılır [19]:

$$\left(\frac{U_R}{R} \right)^2 = \left(\frac{U_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{U_{x_2}}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{U_{x_n}}{x_n} \right)^2 \quad (3.13)$$

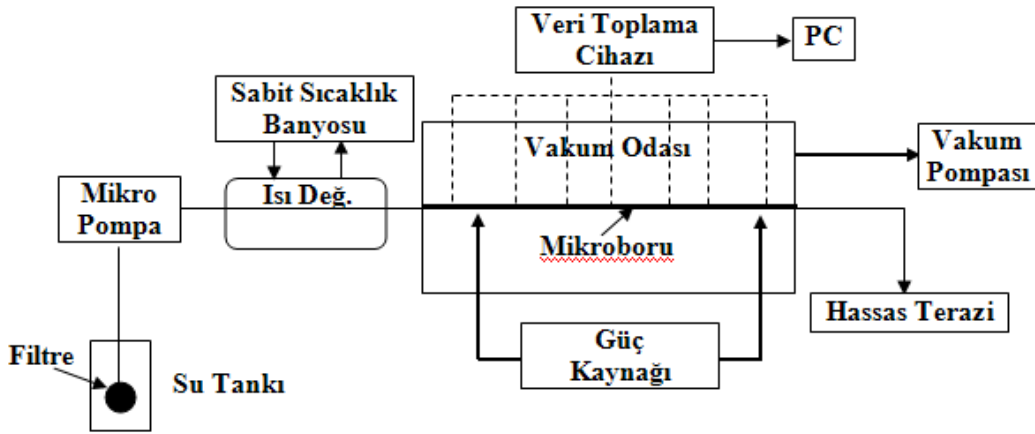
Eğer sistemde ölçülmesi gereken büyüklük $r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots$ şeklinde ise bu sistemin belirsizlik hesabı için 3.14 nolu formül kullanılabilir [19]:

$$\left(\frac{U_r}{r} \right)^2 = a^2 \left(\frac{U_{X_1}}{X_1} \right)^2 + b^2 \left(\frac{U_{X_2}}{X_2} \right)^2 + c^2 \left(\frac{U_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \dots \quad (3.14)$$

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAMALAR

4. 1. Deney Düzenegi

Şekil 4. 1’ de görüldüğü gibi deney düzenegi azot tüpü, su hazneleri, filtre, mikro pompa, ısı değiştiricisi, ısı banyosu, vakum tüpü, basınç dönüştürücüleri, mikroboru üzerinde çeşitli noktalardan sıcaklık ölçümü elde etmeyi sağlayan termoelemanlar, veri toplama cihazı, bilgisayar, vakum pompası ve hassas teraziden oluşmaktadır.



Şekil 4. 1. Deney düzenegi

4. 1. 1. Deney düzeneği elemanları

4. 1. 1. 1. Sabit sıcaklık banyosu



Şekil 4. 2. Sabit sıcaklık banyosu

Farklı sıcaklıklarda ortam şartı Cole-Parmer marka EW-12108-25 model çalışma aralığı -20 - 200 °C ve kararlılığı ± 0.01 °C olan sabit sıcaklık banyosu ile sağlandı.

4. 1. 1. 2. Güç kaynağı

Deneyler süresince iki adet güç kaynağı kullanıldı. BK Precision marka 1790 High Current Power Supply model olan güç kaynağı mikroboruları ısıtmak için kullanıldı. Belirsizliği $\pm 0.2 \approx \pm 10$ mV / $\pm 0.5 \approx \pm 10$ mA olup çalışma aralığı 0-32 Volt / 0-20 Amper'dir.



Şekil 4. 3. BK Precision güç kaynağı

GW INSTEC marka PPE-1323/3323 model olan güç kaynağı ise basınç dönüştürücülerini beslemek için kullanıldı.



Şekil 4. 4. GW INSTEC güç kaynağı

4. 1. 1. 3. Mikroboru

Deneyler süresince farklı uzunluk ve çapta Upchurch (ABD) firmasından temin edilen paslanmaz çelik mikroborular kullanıldı.



Şekil 4. 5. Mikroborunun deney düzeneği üzerindeki görüntüsü

4. 1. 1. 4. Pistonlu mikroakış pompası

Deneylerde mikroboru içerisindeki akış azot tüpü ve mikropompa ile sağlandı. Mikroakış pompası, Gilson marka WSC model, 0.1-60 MPa aralığında basınç sağlayabilen, 0-40 °C sıcaklık aralığında çalışabilen tek pistonlu bir pompadır. Debi aralığı 0.010-5 ml/dak ve kararlılığı \pm % 1 dir.



Şekil 4. 6. Pistonlu mikroakış pompası

4. 1. 1. 5. Vakum pompası

Deneylerde sabit ısı akısı şartının sağlanabilmesi için, mikroboru vakum ortamında tutuldu. Vakum odası özel imalat olup, vakum işlemi Ulvac marka GVD-050A model vakum pompası ile sağlandı. Pompanın maksimum çalışma basıncı 0.03 Mpa'dır.



Şekil 4. 7. Vakum pompası

4. 1. 1. 6. Basınç dönüştürücüleri

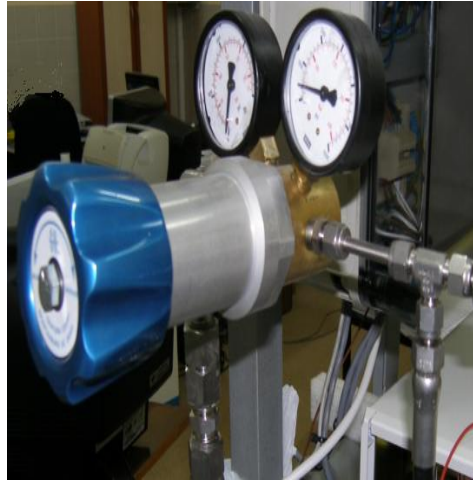
Mikroborunun giriş ve çıkışındaki basınç, çalışma aralıkları 0.8-400 bar ve 0-200 bar olan Keller marka PA-33X model basınç dönüştürücüleri sayesinde deney boyunca ölçüldü. Basınç dönüştürücülerinin kararsızlığı %0,025'tir.



Şekil 4. 8. Basınç dönüştürücüsü

4. 1. 1. 7. Basınç regülatörü

Deneylerde azot tüpü basıncını istenilen seviyeye indirmek için GO marka PR-56 model basınç regülatörü kullanıldı. Regülatörün giriş max basıncı 6000 *psig* ~ 400bar , çıkış max basıncı 4000 *psig* ~ 275bar dır.



Şekil 4. 9. Basınç regülatörü

4. 1. 1. 8. Vizkozimetre

Deneylerde akışkan olarak saf su kullanıldı. Her deney öncesinde suyun viskozitesi ve sıcaklığı AND marka SV 10 model çalışma aralığı 0.3-10000 mPas olan vizkometre ile belirlendi. Belirlenen bu değerlerin deney süresince sabit kaldığı kabul edildi. Vizkozimetrenin kararsızlığı % 1'dir.

4. 1. 1. 9. Hassas terazi

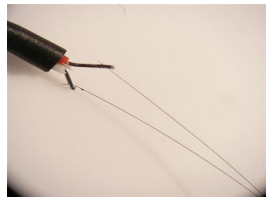
Mikroboru çıkışına kap koyularak toplanan akışkan kütlesi AND marka GX-600 model çalışma aralığı 200-600 gr olan hassas terazi ile ölçüldü. Terazinin kararsızlığı ± 0.015 gr' dır.

4. 1. 1. 10. Filtre

Mikroboruda meydana gelebilecek tıkanmaları önlemek amacıyla akışkan tankı içerisinde ve çıkışında 10 mikronluk filtre kullanıldı.

4. 1. 1. 11. Termoelemanlar

Mikroboru üzerine farklı noktalara yerleştirilen Anbetherm firmasından alınan (fine termokupul) K tipi(kromel-alumel: Nikel - %10 Krom & %5 Alüminyum, Silikon) termoelemanlar sayesinde sıcaklık ölçümü gerçekleştirildi. Termoeleman iki farklı metal alaşımın uçlarının kaynaklanması (birleştirilmesi) ile oluşturulan basit bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Kaynak noktası sıcak nokta, diğer açık iki uç ise soğuk nokta (referans nokta) olarak anılır. Termoeleman olayı sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından doğar. Bu sıcaklık farkıyla orantılı, soğuk nokta uçlarında mV mertebesinde gerilim üretilir. Bu gerilimler veri toplama cihazı sayesinde bilgisayara aktarılıp, sıcaklık değerleri okundu.



Şekil 4. 10. K-tipi termoeleman 25 μ m

4. 1. 1. 12. Veri toplama cihazı

Basınç ve sıcaklık değerlerini bilgisayara aktarmak için Iotech marka Personal Daq/3000 Series model ana modülde 8 tane analog girişi 2 tane analog çıkışı, ek modülde ise (PDQ 30) 24 adet analog girişi bulunan veri toplama cihazı kullanıldı. Cihazın kararsızlığı $\pm 0.01\%$ ' dir.



Şekil 4. 11. Veri toplama cihazı

4. 1. 1. 13. Vakum tüpü

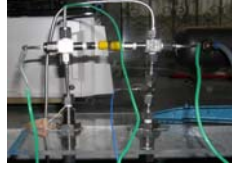
Taşınım ve ışıınım ile olan ısı kayıplarının önlenmesi için test düzeneği paslanmaz çelikten özel imal edilen vakum tüpü içerisine yerleştirildi. Özel sızdırmazlık elemanları ile sızdırmazlık sağlandı.



Şekil 4. 12. Vakum tüpü

4. 1. 1. 14. Bağlantı elemanları

Mikroboru girişi ve çıkışındaki sıcaklık ve basınç ölçümleri yapabilmek için mikroborunun bağlantı elemanlarına uygun paslanmaz çelikten ıstavroz elemanlar imal edildi.



Şekil 4. 13. Istavroz bağlantılar

Istavroz elemanların montajı için polimer malzemeye istavrozların katı modeline uygun kanallar açılmak suretiyle özel tutucular imal edildi.



Şekil 4. 14. Polimer port

Sabit sıcaklık banyosu, istavroz bağlantı elemanları, mikropompa girişi, basınç dönüştürücüleri ve vakum tüpü kapağı geçişleri için paslanmaz çelikten özel bağlantı elemanları yapıldı.



Şekil 4. 15. Bağlantı elemanları

4. 2. Deneysel Çalışma

Deneylerde akışkan olarak saf su kullanıldı. Suyun akışı için gerekli basınç, azot tüpü aracılığıyla sağlandı. Mikroboruda meydana gelebilecek tıkanmaları önlemek amacıyla akışkan tankı içerisinde ve çıkışında 10 mikronluk filtre kullanıldı. Boru giriş ve çıkışındaki basınçlar Keller marka basınç dönüştürücüleri ile ölçüldü.

Sistemin basıncı basınç göstergeleri sayesinde kontrol edildi ve boru çıkışına kap koyularak toplanan akışkan kütlesi AND marka GX-600 model hassas terazi ile

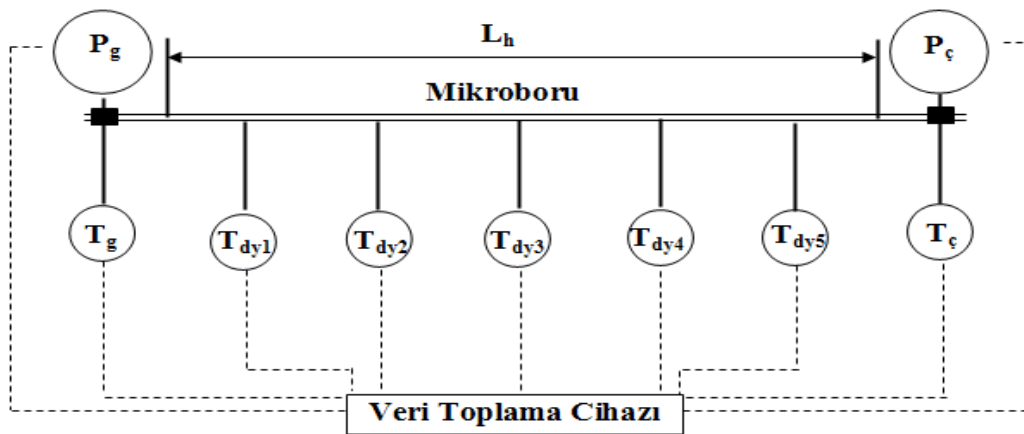
ölçüldü. Her deney öncesinde suyun viskozitesi ve sıcaklığı AND marka SV 10 model vizkozimetre ile belirlendi. Belirlenen bu değerlerin deney süresince sabit kaldığı kabul edildi. Farklı sıcaklıklarda ortam şartı istendiğinde Cole-Parmer marka EW-12108-25 model kararlılığı ± 0.01 °C olan ısı banyosu ile sağlandı.

Ölçüm değerleri veri toplayıcısı (Iotech marka, Personal Daq/ 3000 Series model) ile bilgisayara aktarıldı. Deneylerde Upchurch (ABD) firmasından temin edilen paslanmaz çelik mikrororular kullanıldı.

Mikrororu dış yüzeyi güç kaynağı aracılığıyla ısıtıldı. Borunun dış yüzeyi boyunca beş noktaya termoeleman bağlanarak sıcaklık değişimi veri toplama cihazı vasıtasıyla gözlemlendi.

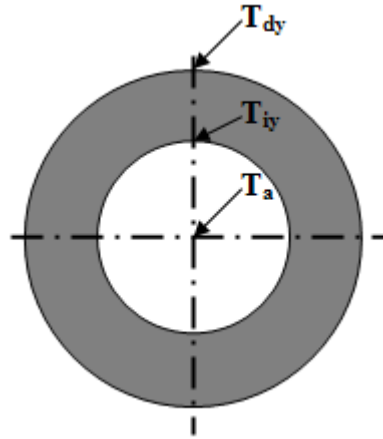
4.3. Model

Şekil 4. 16' da mikrororu ve ölçme noktaları görülmektedir. Şekilde gösterilen L_h , güç kaynağı yardımıyla ısıtılan borunun uzunluğudur. $P_g, P_ç$ sırasıyla giriş ve çıkış basıncını, yine $T_g, T_ç$ giriş ve çıkış sıcaklığını, T_{dy} borunun dış duvar sıcaklığını ifade etmektedir.



Şekil 4. 16. Ölçme noktaları

Deneysel olarak ısı transfer katsayısının ölçülebilmesi duvar için bir model olmaksızın mümkün değildir. Çünkü çok küçük çaplarda akışkan ile katı yüzey arasındaki ısı akısının doğrudan ölçülmesi, akışkanın yerel merkez sıcaklığının ölçülmesi ve de iç duvar sıcaklığının ölçülmesi imkansızdır. Şekil 4. 17' de mikroboru kesiti ve sıcaklıkları görülmektedir. Burada T_{iy} mikroborunun iç duvar sıcaklığıdır.



Şekil 4. 17. Boru kesiti ve sıcaklıklar

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda ısı geçişi hesapları mevcut teoriler kullanılarak yapıldı. Bu nedenle duvar ısı akısı yoğunluğu kanal boyunca üniform olarak kabul edildi. Buna göre, yerel Nusselt sayısı ;

$$Nu = \frac{h.D_i}{k} \quad (4. 1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada h, aşağıdaki denklemde tanımlanan yerel ısı transfer katsayısıdır ve ;

$$h = \frac{q}{(T_{iy} - T_a)} \quad (4. 2)$$

ile ifade edilir.

Duvar ile akışkan arasındaki yerel sıcaklık farkı lineer değişim ya da extrapolasyon yöntemi ile bulunmaktadır.

Mikroborudaki suyun yerel merkez sıcaklığı, T_a , ısı transferi dengesi denklemini yardımıyla hesaplanır.

$$T_a = T_g + \frac{\pi \cdot D_i \cdot L_n \cdot q}{m \cdot c_p} \quad (4.3)$$

T_{iy} , mikroborunun iç duvar sıcaklığıdır ve mikroborunun dış duvar sıcaklığı kullanılarak, tek boyutlu ısı iletim denkleminde elde edilir. Buna göre ısı iletim denklemini;

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{S_c}{k_s} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{S_c}{k_s} = 0 \quad (4.4)$$

şeklinde yazılır. Burada S_c , mikroborunun iç duvarındaki ısı üretimidir ve elektrik gücü yardımıyla bulunabilir.

$$S_c = \frac{\phi}{L_h \pi (R_0^2 - R_i^2)} \quad (4.5)$$

Burada güç kaynağından verilen elektriksel güç $\phi = U \cdot I$ şeklinde hesaplanabilir. Isı iletim denklemini 4.4'ün integrali alındığında;

$$T = -\frac{r^2}{4} \frac{S_c}{k} + c_1 \ln r + c_2 \quad (4.6)$$

elde edilir. Burada c_1 ve c_2 aşağıdaki sınır şartları kullanılarak bulunabilir.

$$r = R_0 \Rightarrow T = T_w'$$

$$r = R_i \Rightarrow k_s \frac{dT}{dr} = q_i = \frac{Q}{2\pi R_i L_h} = \frac{S_c}{2} \frac{R_0^2 - R_i^2}{R_i}$$

Sonuç olarak, mikroborunun yerel iç duvar sıcaklığı;

$$T_{iy} = T_{dy} - \frac{S_c}{4k_s} \left[R_0^2 \ln \left(\frac{R_0}{R_i} \right)^2 - (R_0^2 - R_i^2) \right] \quad (4.7)$$

şeklinde bulunur [23].

4. 4. Deneyleer

İç çapı 254 mikrometre, boyu 20 cm olan U-113 (Tub SS 1/16-0,010-20) no' lu paslanmaz çelik mikroboru test edildi. Akışkan olarak su kullanıldı ve akışkan boruya azot tankları vasıtasıyla sürüldü. Güç kaynağı yardımıyla borunun 16 cm 'lik kısmı ısıtıldı. Mikroboru üzerinde sırasıyla 0,6 bar ve 1 bar basınçta yapılan deneylere ait veriler Tablo 4. 1.'de ve 4. 2.'de verildi. Akış karakteristikleri debiden yola çıkarak hesaplandı. Isı karakteristikleri Nu sayısı ve h ise yukarıda bahsedilen modele göre hesaplandı.

Tablo 4. 1. 0,6 bar basınçta yapılan deneylerin detayları

Deney No:	Hacimsel Debi (mL/dak)	Re	Uyg. Isı (W)	Akışkana geçen ısı (W) $Q = m.c_p.\Delta T$	Taşınım ile ısı kaybı (W) $Q = h.A.\Delta T$	Işınım ile ısı kaybı (W) $Q = E.\sigma.A.(T_s^4 - T_\infty^4)$	Ölçülen sıcaklıkların ortalama değerleri						
							T_g °C	T_1 °C	T_2 °C	T_3 °C	T_4 °C	T_5 °C	T_c °C
T1-1	2,058	171,92	q''(1)=3,8	0,67592	0,1464446	0,048242	26,03	30,36	28,07	31,09	32,26	33,22	30,75
T1-2	2,058	171,92	q''(1)=3,8	0,703919	0,1627162	0,048242	26,12	30,45	28,20	31,18	32,39	33,29	31,03
T2-1	2,25	188,30	q''(2)=4,8	1,242943	0,2099039	0,063151	26,72	32,84	30,88	34,29	36,00	37,50	34,64
T2-2	2,25	187,96	q''(2)=4,8	1,262686	0,2115311	0,063672	26,77	32,72	30,42	34,14	35,76	37,05	34,82
T3-1	2,35	196,15	q''(3)= 6	2,39284031	0,275804	0,084959	26,90	35,59	33,03	38,20	40,53	42,46	35,75
T3-2	2,33	194,81	q''(3)= 6	2,62170624	0,2766175	0,084959	27,19	36,04	33,91	38,62	40,83	42,97	37,01

Tablo 4. 2. 1 bar basınçta yapılan deneylerin detayları

Deney No:	Hacimsel Debi (mL/dak)	Re	Uyg. Isı (W)	Akışkana geçen ısı (W) $Q = m.c_p.\Delta T$	Taşınımla kaybı (W) $Q = h.A.\Delta T$	Işınmla ısı kaybı (W) $Q = E.\sigma.A.(T_s^4 - T_\infty^4)$	Ölçülen sıcaklıkların ortalama değerleri						
							T_g °C	T_1 °C	T_2 °C	T_3 °C	T_4 °C	T_5 °C	T_ζ °C
T1-1	3,515	293,26	$q''(1)=3,8$	1,420135	0,150512	0,044455	27,38	30,29	28,56	31,09	31,15	32,21	33,19
T1-2	3,50	291,72	$q''(1)=3,8$	1,116445	0,149699	0,044204	27,24	30,22	28,60	30,43	31,13	32,26	31,83
T2-1	3,63	302,83	$q''(2)=4,8$	1,36857	0,187124	0,055901	27,33	32,22	30,18	32,61	33,73	35,16	32,75
T2-2	3,6	300,36	$q''(2)=4,8$	1,448801	0,191192	0,057188	27,43	32,30	30,16	32,76	33,82	35,28	33,21
T3-1	3,88	323,91	$q''(3)= 6$	2,022748	0,236752	0,071823	27,58	34,66	31,80	35,44	36,84	38,41	35,07
T3-2	3,84	320,36	$q''(3)= 6$	2,129946	0,24082	0,073149	27,65	34,84	32,20	35,63	37,06	38,80	35,62

4. 5. Yapılan Deneilerin Belirsizlik Analizi

Her bir deney aynı şartlarda en az 2 kez tekrarlandı. Elde edilen sonuçların standart sapması hesaplanıp %95 güven seviyesi için 1,96 ile çarpılarak rastgele hata belirlendi. Diğer taraftan deney düzeneğinde kullanılan ve ölçümleri etkileyen elemanların üretici firma tarafından belirlenen hata oranları da sistematik hata olarak alındı. Genişletilmiş belirsizlik hesabında en çok kullanılan yöntem rastgele ve sistematik hataların kareleri toplamının karekökü alınmasıdır. Bu çalışmada da genişletilmiş belirsizlik bu yolla bulundu. Bulunan genişletilmiş belirsizlik değerleri tablo 4. 4 ve 4. 5'te verilen belirsizlik analizinde kullanılan formüllerde yerine koyuldu. Daha sonra 100 ile çarpılarak yüzde belirsizlik hesaplandı. Belirsizlik hesaplarında 19 ve 20 no' lu kaynaklardan faydalanıldı.

Deneiler süresince debi, sıcaklık ve basınç ölçümleri alındı. Sıcaklık ve basınç ölçümünde veri toplama cihazından kaynaklanan hatalar esas olmakla beraber basınç ölçümünde basınç dönüştürücüsünden kaynaklanan ilave hata da alındı. Ayrıca veri toplama cihazı sayesinde sıcaklık ve basınç ölçümlerinde saniyede 3-4 adet değer alındı. Alınan bu değerlerin standart sapmaları da hesaplanarak toplam belirsizliğe eklendi. Termoelemanlar oldukça hassas seçildiğinden termoelemandan kaynaklanabilecek hata oranı göz ardı edildi. Debi ölçümünde ise zaman ve hassas teraziden kaynaklanan hata göz önüne alındı.

Boru boyunca akışkan sıcaklığında meydana gelen değişim akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında enterpolasyon yöntemi ile bulunduğundan akışkan sıcaklığının belirsizlik hesabında ölçülen giriş ve çıkış sıcaklıklarının standart sapmasından meydana gelen ve veri toplama cihazından kaynaklanan hata göz önünde bulunduruldu. Aynı şekilde boru boyunca dış duvar sıcaklığı da T_1 ve T_5 nolu termoelemanlardan elde edilen ölçümler arasında enterpolasyon yöntemi ile bulunduğundan; dış duvar sıcaklığı için toplam belirsizlik T_1 ve T_5 'in standart sapması ve veri toplama cihazının belirsizliğinden meydana gelmektedir.

Mikroboruların çap değerindeki hata miktarı kataloglardan alınmış olup boyda meydana gelen hata ise tekrarlanan ölçümlerin standart sapması ve ölçüm yapılan kumpasın hassasiyetine bağlı olarak hesaplandı.

Akışkanın yoğunluğu, viskozitesi, özgül ısı gibi fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek hata %0,1 olarak alındı [3].

Mikroboruyu ısıtmak için kullanılan güç kaynağının hassasiyeti, verilen ısı akısı için hatayı temsil etmektedir.

Tablo 4. 3' te örnek bir deneyden elde edilen verilere bağlı olarak debideki toplam belirsizliğin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

Tablo 4. 3: Kütledeki belirsizlik hesabına örnek

T1-1	0,007024 kg
T1-2	0,006987 kg
Standart sapma	0,000026
Rastgele hata	$1,96 \times 0,000026 = 0,000051$
Sistematik hata	$\pm 0,000015$ kg (hassas terazinin hata oranı)
Toplam belirsizlik	$U_{m_{su}} = \sqrt{0,000051^2 + 0,000015^2} = \pm 0,000053$

Yukarıda hesaplanan kütlenin toplam belirsizliği aşağıdaki formülde $t=120$ s ve $U_t=0,01$ için yerine koyularak kütleli debinin belirsizliği

$$\left(\frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 = \left(\frac{U_{m_{su}}}{m_{su}}\right)^2 + \left(\frac{U_t}{t}\right)^2 = 0,000763 \rightarrow \pm \%0,763$$

olarak bulunur.

Deneyler süresince alınan sıcaklık, basınç ve debi değerleri formüllerde kullanılarak Re sayısı, Nu sayısı, ısı taşınım katsayısı gibi büyüklükler hesaplandı. Tablo 4. 4 ve

4. 5' te sırasıyla kullanılan akış ve ısı formülleriyle bunların belirsizlik analizi için hesaplanan formüller verilmektedir.

Tablo 4. 4. Çalışmada kullanılan akış formülleri ve belirsizlik hesap formülleri

Kütleli debi	$\dot{m} = \frac{m_{su}}{t}$	$\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_{su}} = \frac{1}{t}$ $\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = -\frac{m_{su}}{t^2}$	$\left(\frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 = \left(\frac{U_{m_{su}}}{m_{su}}\right)^2 + \left(\frac{U_t}{t}\right)^2$
Hacimsel debi	$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$	$\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} = \frac{1}{\rho}$ $\frac{\partial Q}{\partial \rho} = -\frac{\dot{m}}{\rho^2}$	$\left(\frac{U_Q}{Q}\right)^2 = \left(\frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\rho}}{\rho}\right)^2$
Hız	$v = \frac{Q}{A}$	$\frac{\partial v}{\partial Q} = \frac{1}{A}$ $\frac{\partial v}{\partial A} = -\frac{Q}{A^2}$	$\left(\frac{U_v}{v}\right)^2 = \left(\frac{U_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{U_A}{A}\right)^2$
Alan	$A = \frac{\pi D_i^2}{4}$	$\frac{\partial A}{\partial D_i} = \frac{\pi D_i}{2}$	$\left(\frac{U_A}{A}\right)^2 = 2^2 \left(\frac{U_{D_i}}{D_i}\right)^2$
Re sayısı	$Re = \frac{\rho v D_i}{\mu}$	$\frac{\partial Re}{\partial \rho} = \frac{v D_i}{\mu}$ $\frac{\partial Re}{\partial v} = \frac{\rho D_i}{\mu}$ $\frac{\partial Re}{\partial D_i} = \frac{\rho v}{\mu}$ $\frac{\partial Re}{\partial \mu} = -\frac{\rho v D_i}{\mu^2}$	$\left(\frac{U_{Re}}{Re}\right)^2 = \left(\frac{U_{\rho}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{U_v}{v}\right)^2 + \left(\frac{U_{D_i}}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{U_{\mu}}{\mu}\right)^2$
Teorik sürtünme faktörü	$f_{teo} = \frac{64}{Re}$	$\frac{\partial f_{teo}}{\partial Re} = -\frac{64}{Re^2}$	$\left(\frac{U_{f_{teo}}}{f_{teo}}\right)^2 = \left(\frac{U_{Re}}{Re}\right)^2$

Tablo 4. 4. Çalışmada kullanılan akış formülleri ve belirsizlik hesap formülleri (devam)

Deneysel sürtünme faktörü	$f_{den} = \frac{2\Delta PD}{\rho Lv^2}$	$\frac{\partial f_{den}}{\partial \Delta P} = \frac{2D}{\rho Lv^2}$ $\frac{\partial f_{den}}{\partial D} = \frac{2\Delta P}{\rho Lv^2}$ $\frac{\partial f_{den}}{\partial \rho} = -\frac{2\Delta PD}{\rho^2 Lv^2}$ $\frac{\partial f_{den}}{\partial L} = -\frac{2\Delta PD}{\rho L^2 v^2}$ $\frac{\partial f_{den}}{\partial v} = -\frac{4\Delta PD}{\rho Lv^3}$	$\left(\frac{U_{f_{den}}}{f_{den}}\right)^2 = \left(\frac{U_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{U_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{U_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + (-2)^2 \left(\frac{U_v}{v}\right)^2$
---------------------------	------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tablo 4. 5. Çalışmada kullanılan ısı formülleri ve belirsizlik hesap formülleri

Isı taşınım katsayısı	$h = \frac{q}{T_{iy} - T_a}$	$\frac{\partial h}{\partial q} = \frac{1}{T_{iy} - T_a}$ $\frac{\partial h}{\partial T_{iy}} = -\frac{q}{(T_{iy} - T_a)^2}$ $\frac{\partial h}{\partial T_a} = \frac{q}{(T_{iy} - T_a)^2}$	$\left(\frac{U_h}{h}\right)^2 = \left(\frac{U_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{iy}}}{(T_{iy} - T_a)}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_a}}{(T_{iy} - T_a)}\right)^2$
Nu sayısı	$Nu = \frac{hD_i}{k}$	$\frac{\partial Nu}{\partial h} = \frac{D_i}{k}$ $\frac{\partial Nu}{\partial D_i} = \frac{h}{k}$ $\frac{\partial Nu}{\partial k} = -\frac{hD_i}{k^2}$	$\left(\frac{U_{Nu}}{Nu}\right)^2 = \left(\frac{U_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{U_{D_i}}{D_i}\right)^2 + \left(\frac{U_k}{k}\right)^2$

Tablo 4. 5. Çalışmada kullanılan ısı formülleri ve belirsizlik hesap formülleri (devam)

Depo edilen ısı miktarı	$q = \frac{mc_v(T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}})}{A_{iç}}$	$\frac{\partial q}{\partial m} = \frac{c_v(T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}})}{A_{iç}}$ $\frac{\partial q}{\partial c_v} = \frac{m(T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}})}{A_{iç}}$ $\frac{\partial q}{\partial T_{\text{çıkış}}} = \frac{mc_v}{A_{iç}}$ $\frac{\partial q}{\partial T_{\text{giriş}}} = -\frac{mc_v}{A_{iç}}$ $\frac{\partial q}{\partial A_{iç}} = -\frac{mc_v(T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}})}{A_{iç}^2}$	$\left(\frac{U_q}{q}\right)^2 = \left(\frac{U_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{U_{c_v}}{c_v}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{\text{çıkış}}}}{T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}}}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{\text{giriş}}}}{T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}}}\right)^2$
Boruya verilen ısı akısı	$\phi = UI$	$\frac{\partial \phi}{\partial U} = I$ $\frac{\partial \phi}{\partial I} = U$	$\left(\frac{U_\phi}{\phi}\right)^2 = \left(\frac{U_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{U_I}{I}\right)^2$

Tablo 4. 5. Çalışmada kullanılan ısı formülleri ve belirsizlik hesap formülleri (devam)

Boru iç yüzeyinde ısı üretimi	$S_c = \frac{\phi}{L_h \pi (R_o^2 - R_i^2)}$	$\frac{\partial S_c}{\partial \phi} = \frac{1}{L_h \pi (R_o^2 - R_i^2)}$ $\frac{\partial S_c}{\partial L_h} = -\frac{\phi}{L_h^2 \pi (R_o^2 - R_i^2)}$ $\frac{\partial S_c}{\partial R_o} = -\frac{2\phi R_o}{L_h \pi (R_o^2 - R_i^2)^2}$ $\frac{\partial S_c}{\partial R_i} = \frac{2\phi R_i}{L_h \pi (R_o^2 - R_i^2)^2}$	$\left(\frac{U_{S_c}}{S_c}\right)^2 = \left(\frac{U_\phi}{\phi}\right)^2 + \left(\frac{U_{L_h}}{L_h}\right)^2 + \left(U_{R_o} \frac{-2R_o}{(R_o^2 - R_i^2)}\right)^2 + \left(U_{R_i} \frac{2R_i}{(R_o^2 - R_i^2)}\right)^2$
-------------------------------	----------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tablo 4. 5. Çalışmada kullanılan ısı formülleri ve belirsizlik hesap formülleri (devam)

Boru dış yüzey sıcaklığı	$T_{dy} = T_{dy}' - \frac{S_c}{4k_s} \left[\begin{array}{l} R_o^2 \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 \\ -(R_o^2 - R_i^2) \end{array} \right]$	$\frac{\partial T_{dy}}{\partial T_{dy}'} = 1$ $\frac{\partial T_{dy}}{\partial S_c} = -\frac{1}{4k_s} \left[R_o^2 \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 - (R_o^2 - R_i^2) \right]$ $\frac{\partial T_{dy}}{\partial R_o} = -\frac{S_c \left(-2R_o + 2R_o \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) + 2R_o \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 \right)}{4k_s}$ $\frac{\partial T_{dy}}{\partial R_i} = -\frac{S_c \left(2R_i - \frac{2R_o^2 \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{R_i} \right)}{4k_s}$	$(U_{T_{dy}})^2 = \left(\frac{\partial T_{dy}}{\partial T_{dy}'} U_{T_{dy}'} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{dy}}{\partial S_c} U_{S_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{dy}}{\partial R_o} U_{R_o} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{dy}}{\partial R_i} U_{R_i} \right)^2$
--------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tablo 4. 5. Çalışmada kullanılan ısı formülleri ve belirsizlik hesap formülleri (devam)

İç alan	$A_{iç} = \pi D_i L_h$	$\frac{\partial A_{iç}}{\partial D_i} = \pi L_h$ $\frac{\partial A_{iç}}{\partial L_h} = \pi D_i$	$\left(\frac{U_{A_{iç}}}{A_{iç}} \right)^2 = \left(\frac{U_{D_i}}{D_i} \right)^2 + \left(\frac{U_{L_h}}{L_h} \right)^2$
Dış alan	$A_{dış} = \pi D_o L_h$	$\frac{\partial A_{dış}}{\partial D_o} = \pi L_h$ $\frac{\partial A_{dış}}{\partial L_h} = \pi D_o$	$\left(\frac{U_{A_{dış}}}{A_{dış}} \right)^2 = \left(\frac{U_{D_o}}{D_o} \right)^2 + \left(\frac{U_{L_h}}{L_h} \right)^2$

BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5. 1. Sonuçlar

Tablo 5. 1 ve 5. 2’de iç çapı 254 mikrometre, boyu 20 cm olan U-113 (Tub SS 1/16-0,010-20) no’ lu paslanmaz çelik mikroboru ile yapılan deneylere ait belirsizlikler verilmektedir.

Tablo 5. 1. 0,6 bar basınçta yapılan deneylerin belirsizlikleri

0,6 bar	% Belirsizlik					
	Kütleli debi	Re sayısı	Deneysel sürtünme faktörü	Nu sayısı	T _a	T _{iy}
T21	0,414	0,45	5,195	23,2	0,76	2,75
T22				26,8	0,79	3,2
T31	1,000	1,015	5,572	27,4	1,46	3,6
T32				12,7	0,68	2,3

Tablo 5. 2. 1 bar basınçta yapılan deneylerin belirsizlikleri

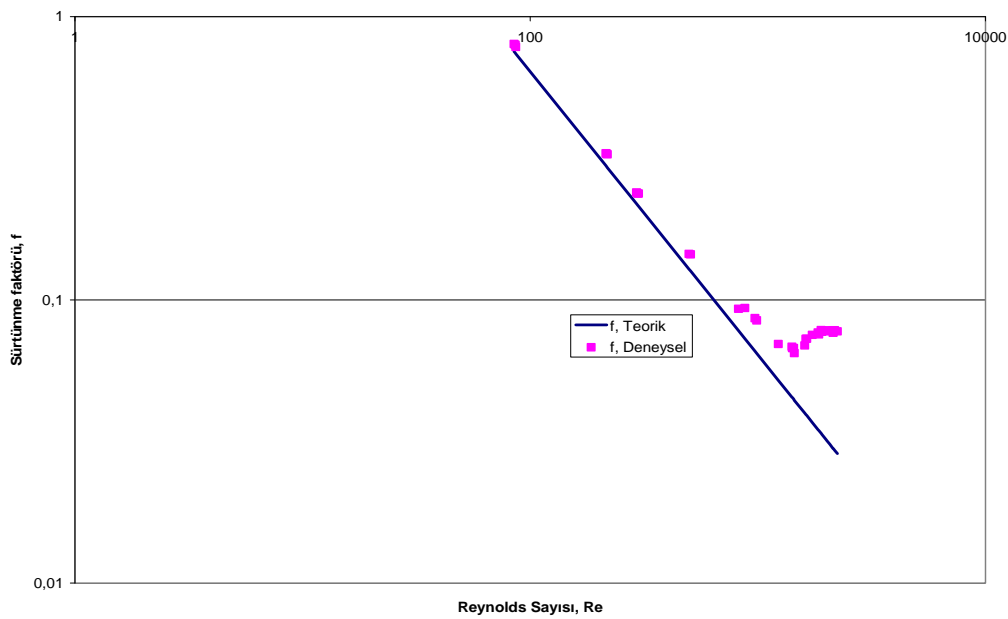
1 bar	% Belirsizlik					
	Kütleli debi	Re sayısı	Deneysel sürtünme faktörü	Nu sayısı	T _a	T _{iy}
T21	1,15	1,16	5,66	22,5	0,65	2,11
T22				23,3	0,66	2,06
T31	1,54	1,55	6,03	16,4	0,66	2,18
T32				15,3	0,62	2,0

Deneylerde hesaplama modeli olarak faydalanılan kaynak 9’ un belirsizlik değerleriyle, yapılan belirsizlik hesapları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların daha yüksek olduğu görüldü. Özellikle ısı karakteristiklerinde belirsizliğin daha

yüksek çıkmasının nedeninin termoelemanların bağlantısındaki kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

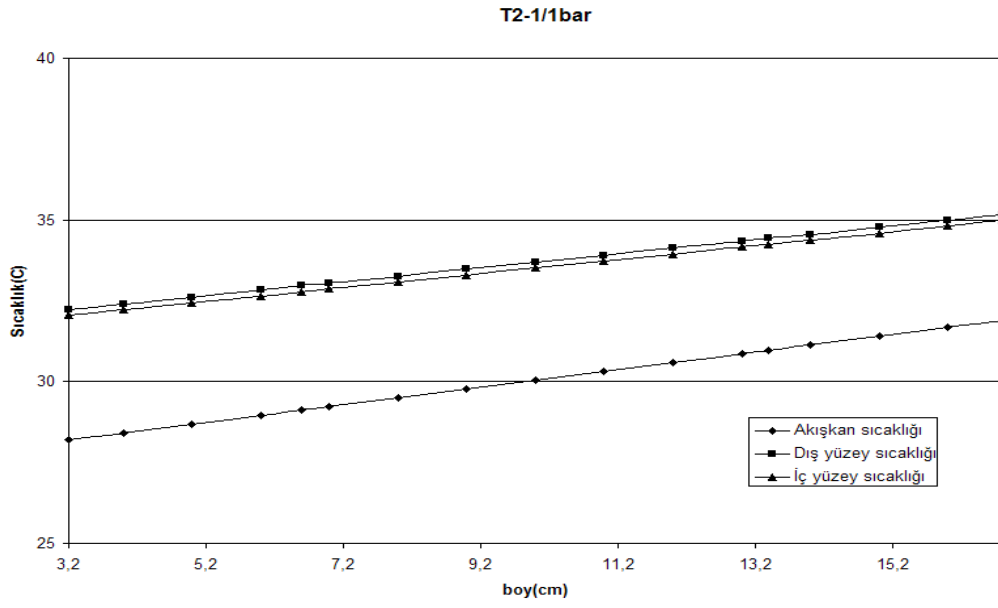
Ayrıca bu çalışmanın ileride yapılacak olan deneysel çalışmalardaki belirsizlik analizlerinin tespitinde araştırmacılara yararlı olacağı düşünülmektedir.

U-113 no' lu mikroboruya ait sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi şekil. 5. 1' de verilmektedir.

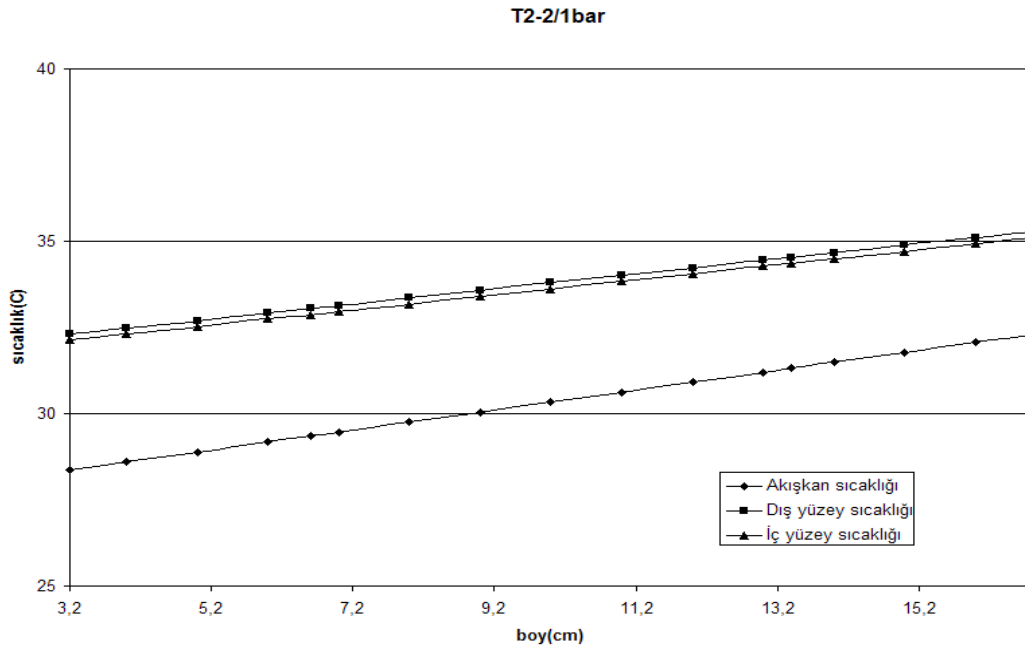


Şekil 5. 1. U-113 no' lu mikroborunun Sürtünme faktörü-Re sayısı değişimi

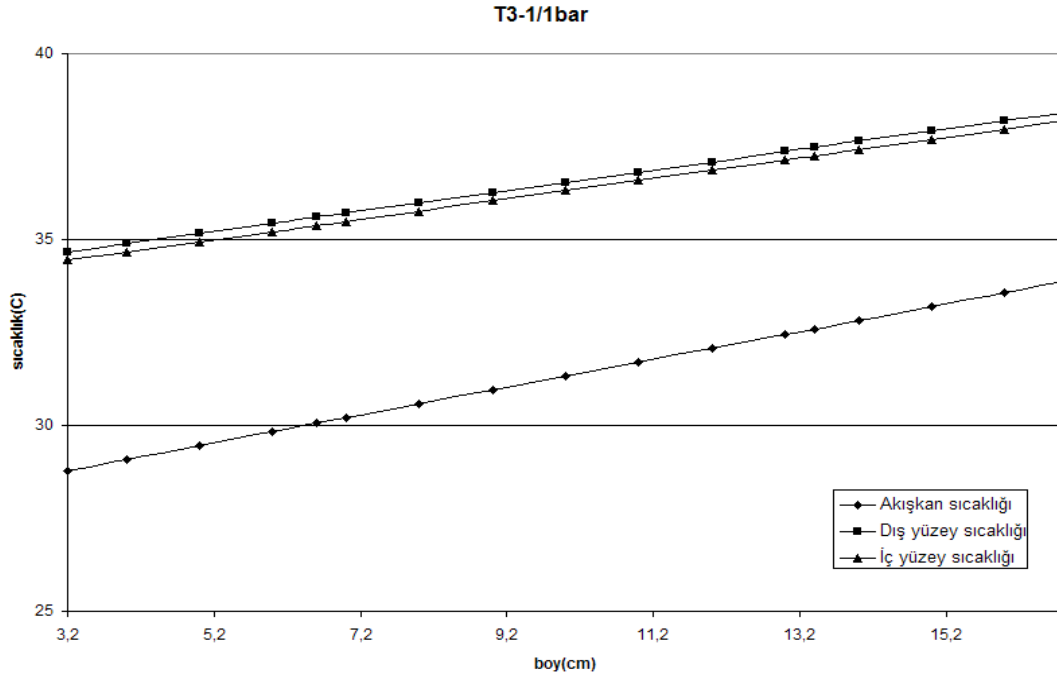
Yapılan deneylere ait sıcaklık-boy değişimi ise Şekil 5. 2-5. 9' da verilmektedir. Sıcaklıkların boru boyunca arttığı gözlemlendi. En yüksek sıcaklık boru dış yüzey sıcaklığı en düşük sıcaklık ise akışkan sıcaklığıdır.



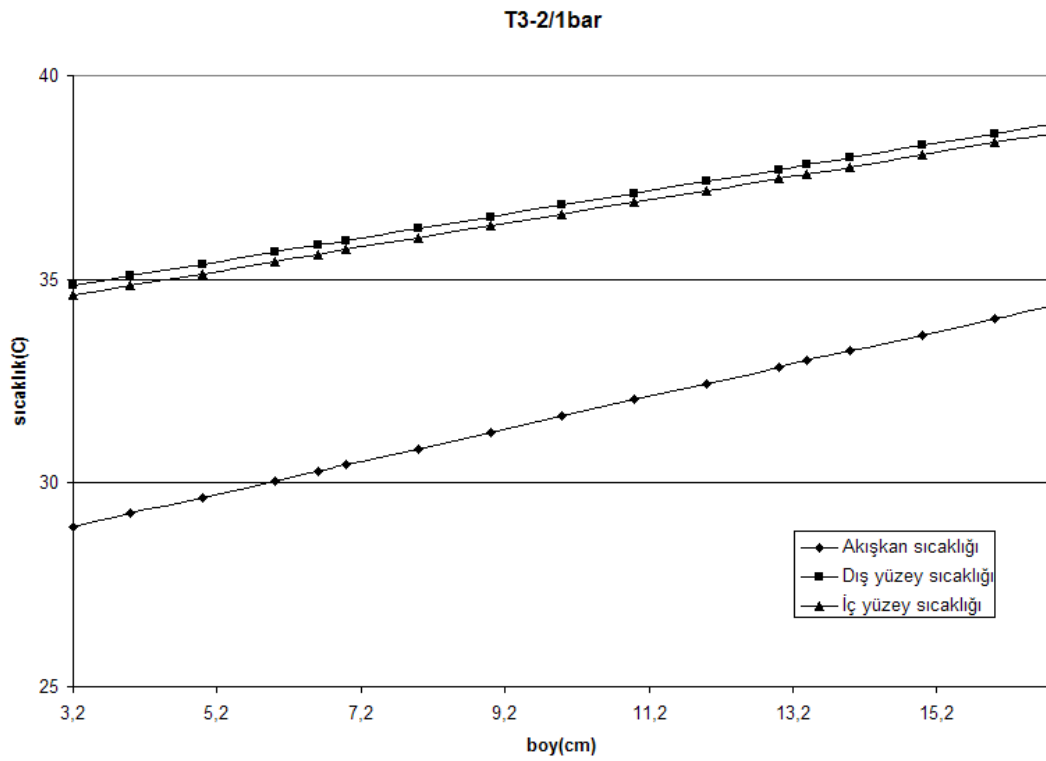
Şekil 5. 2. 1bar T2-1 deneyi sıcaklık değişimi



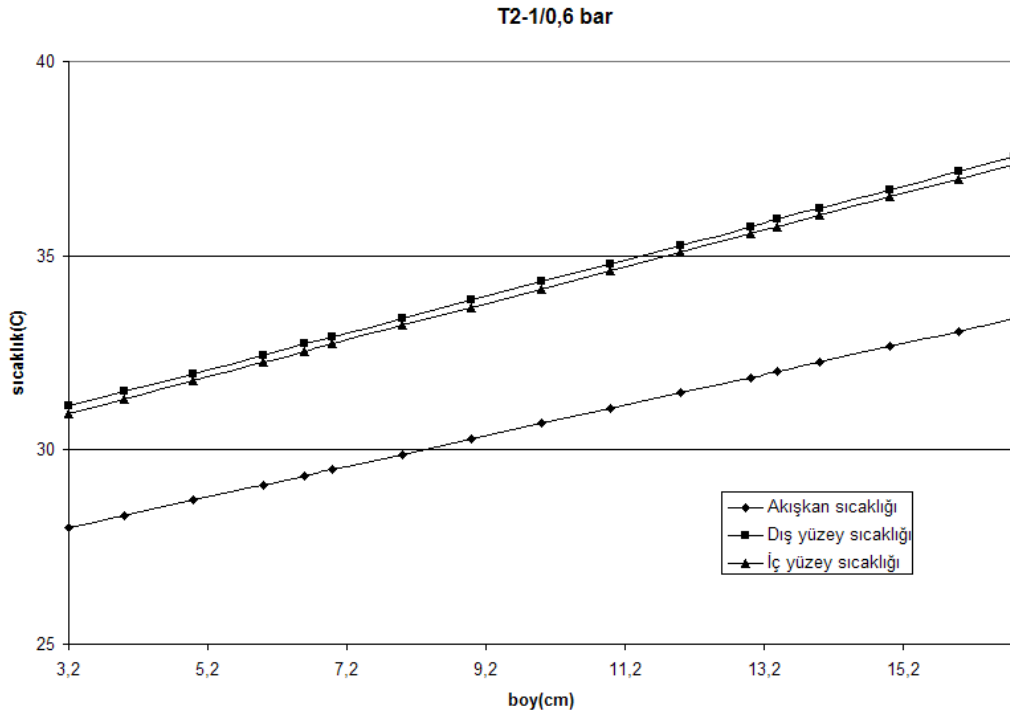
Şekil 5. 3. 1bar T2-2 deneyi sıcaklık değişimi



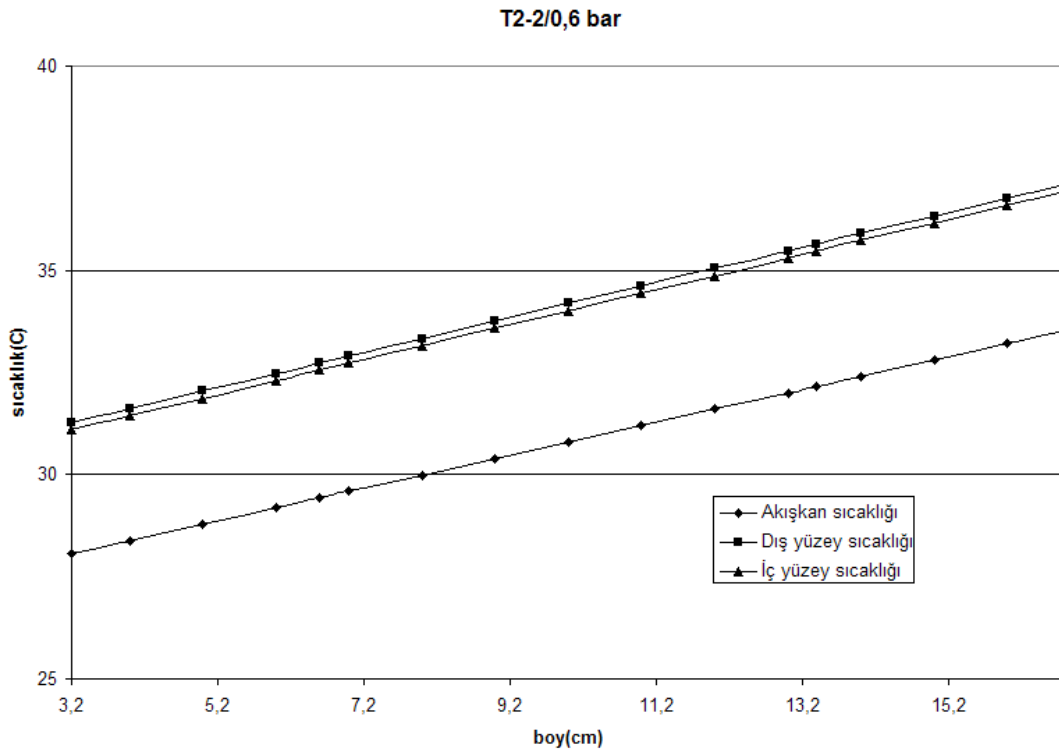
Şekil 5. 4. 1bar T3-1 deneyi sıcaklık değişimi



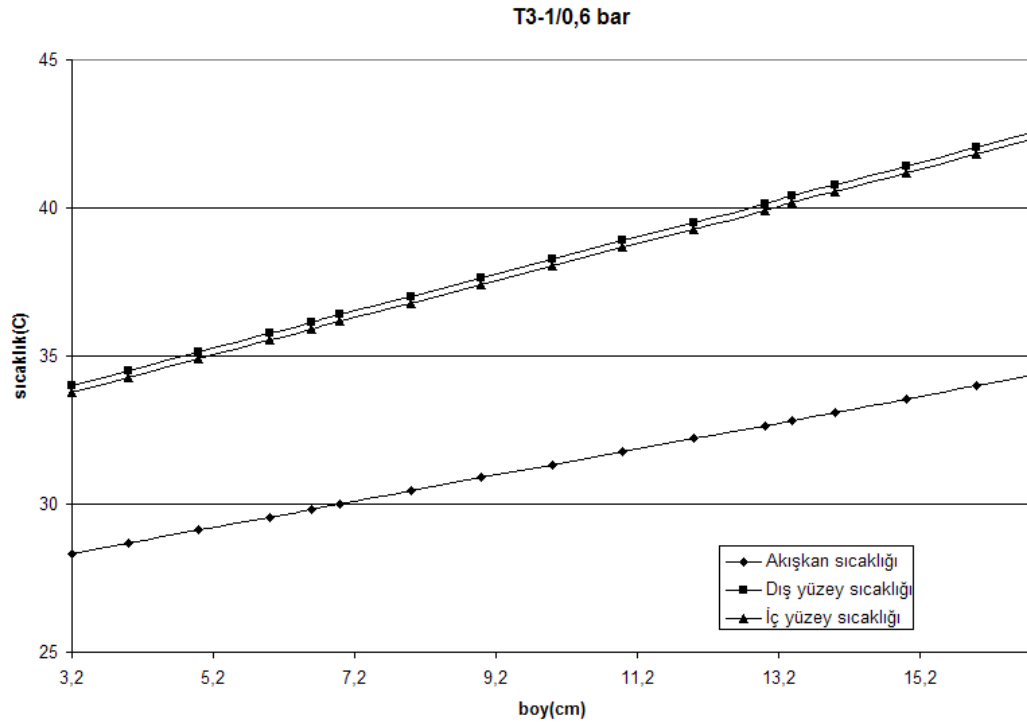
Şekil 5. 5. 1bar T3-2 deneyi sıcaklık değişimi



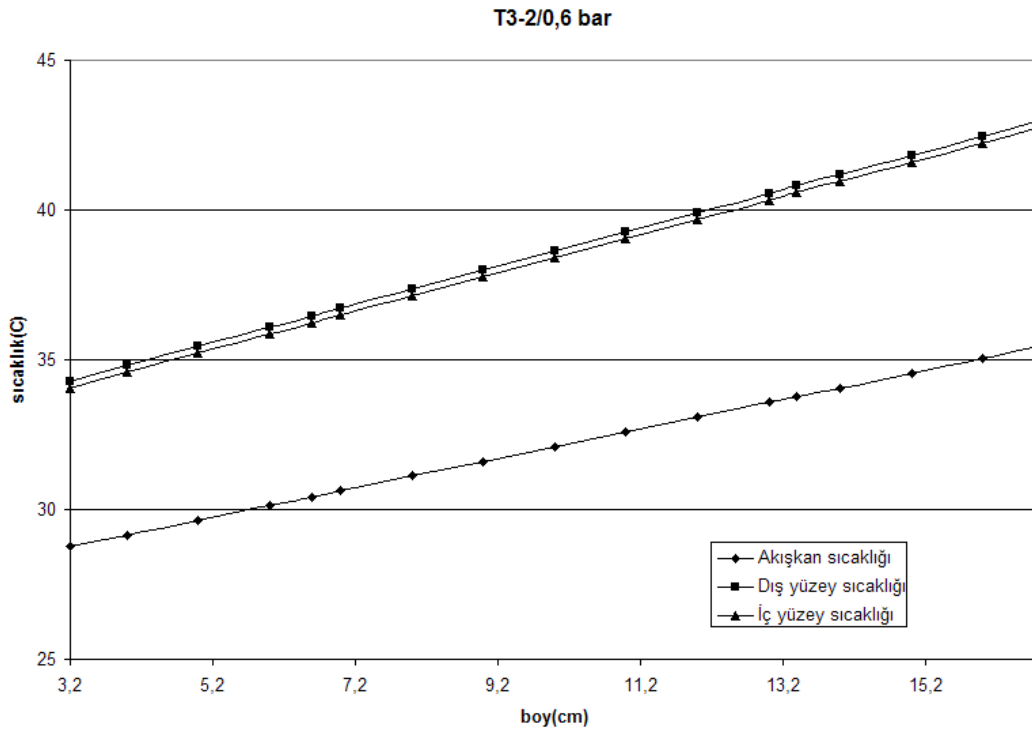
Şekil 5. 6. 0,6bar T2-1 deneyi sıcaklık değişimi



Şekil 5. 7. 0,6bar T2-2 deneyi sıcaklık değişimi



Şekil 5. 8. 0,6bar T3-1 deneyi sıcaklık değişimi



Şekil 5. 9. 0,6bar T3-2 deneyi sıcaklık değişimi

5. 2. Öneriler

Bu çalışma sonucunda sıcaklık ölçümlerinde kullanılan termoelemanların boru yüzeyine özel termoeleman kaynağı ile bağlanmasıyla daha sağlıklı veriler elde edilebileceği düşünülmektedir. Böylelikle ısı karakteristikleri de iyileştirilmiş olacaktır.

Aynı zamanda daha fazla deney yapılarak belirsizlik bileşenlerinden olan rastgele hata için standart sapma iyileştirilebilir. İhmal edilen bazı hata kaynakları hesaba katılarak daha hassas belirsizlik hesabı gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] PARLAK, N., ENGİN, T., ÖZBEY, A., Mikroborularda su akışının deneysel olarak incelenmesi, ULIBTK'07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, KAYSERİ, 30 Mayıs-2Haziran 2007
- [2] ÇETİN, B., BULUT, B., YAZICIOĞLU, A., YÜNCÜ, H., KAKAÇ, S., Mikroborularda su akışının deneysel olarak incelenmesi, ULIBTK'07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, KAYSERİ, 30 Mayıs-2Haziran 2007
- [3] AKPINAR KAVAK, E., Deneysel çalışmalarındaki hata analizine bir örnek: kurutma deneylerindeki hata analizi, Mühendis ve Makina Dergisi, 46(540), Ocak 2005
- [4] MORINI, L., C., LORENZINI, M., Çeviri: İNAL, L., DEMİR, Y., Mikrokanallarda tek fazlı akışkan akışı ve ısı geçişi, Mühendis ve Makina Dergisi, 47(557), Haziran 2006
- [5] TRABZON, L., Mikrokanalların üretim metotları, Mühendis ve Makina Dergisi, 47(556), Mayıs 2006
- [6] KAPLAN, H., DÖLEN, M., Mikro-elektro-mekanik-sistemler (MEMS): mikro-akışkan uygulamaları, 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, 4-6 Eylül 2003
- [7] MALA, M. Gh., LI, D., Flow characteristics of water in microtubes, International Journal of Heat and Fluid Flow 20 (1999) 142-148
- [8] CELATA, G. P., CUMO, M., GUGLIELMI, M., ZUMMO, G., Experimental investigation of hydraulic and single-phase heat transfer in 0.130-mm capillary tube, Microscale Thermophysical Engineering, 6:85–97, 2002
- [9] LELEA, D., NISHIO, S., TAKANO, K., The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 2817–2830
- [10] OWHAIB, W., PALM, B., Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science 28 (2004) 105–110

- [11] CELATA, G. P., CUMO, M., MARCONI, V., MCPHAIL, S. J., ZUMMO, G., Microtube liquid single-phase heat transfer in laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 3538–3546
- [12] LI, Z., HE, Y-L., TANG, G-H, TAO, W-Q, Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 3447–3460
- [13] ŞARA, O. N., YAPICI, S., Mikro kanallarda basınç düşüşü ve ısı/kütle aktarımı: I-Basınç düşüşü ve sürtünme faktörü bağıntıları, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 48(570), Temmuz 2007
- [14] KANDLIKAR, S. G., Çeviri: ÖZTÜRK, M. M., Mikrokanallarda akış tipi kaynama ile ısı transferi konusunda son gelişmeler, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 47(557), Haziran 2006
- [15] LEE, P-S, GARIMELLA, S.V., LIU, D., Investigation of heat transfer in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005) 1688–1704
- [16] Çeviri: AYDER, E., Editör: GENÇELİ O. F., ASHRAE Temel El Kitabı, Bölüm 13: Ölçme Tekniği, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınlar:2, Temmuz 1998
- [17] GENÇELİ, O. F., Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul 2000
- [18] ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M., Çeviri Eitörü: ENGİN, T., Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Güven Bilimsel, Eylül 2007
- [19] COLEMAN, H. W., STEELE, W. G., Experimentation and uncertainty analysis for engineers, John Wiley&Sons, 1989
- [20] HOLMAN, J.P., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill Book Company, 37-52, 1971
- [21] MİDİLLİ, A., Doğal vakum tekniği ile atıksuların damıtılması, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2001
- [22] AKPINAR, E. K., BİÇER, Y., Tarımsal ürünlerin kurutulmasında siklon tipi bir kurutucunun kullanılabilirliği, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 43(515), 21-26, 2002
- [23] PARLAK, N., Mikroborularda akış ve ısı geçişinin incelenmesi, 2. Doktora tez izleme raporu, Sakarya Üniversitesi, Aralık 2007

ÖZGEÇMİŞ

Neslihan Erken, 14.05.1984' te Sakarya' da doğdu. İlköğretimini Ali Dilmen İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2002 yılında Adapazarı Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve 2006 yılında mezun oldu. Mezun olduğu yıl yüksek lisans eğitimine başladı. Aralık 2006'da Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.