

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BORU İÇİ AKIŞ DEBİSİNİN ISIL YÖNTEM
KULLANILARAK ÖLÇÜLMESİ



Onurcan YILBAŞ

Eylül, 2021
İZMİR

BORU İÇİ AKIŞ DEBİSİNİN ISIL YÖNTEM KULLANILARAK ÖLÇÜLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Onurcan YILBAŞ

Eylül, 2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ONURCAN YILBAŞ, tarafından **PROF. DR. M. SERHAN KÜÇÜKA** yönetiminde hazırlanan “**BORU İÇİ AKIŞ DEBİSİNİN ISIL YÖNTEM KULLANILARAK ÖLÇÜLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Prof. Dr. M. Serhan KÜÇÜKA

Danışman

.....

Doç. Dr. Alpaslan TURGUT

Jüri Üyesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Özay AKDEMİR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmam sırasında değerli bilgi ve birikimleri ile bana ışık tutan ve destek olan danışman hocam sayın Prof. Dr. Serhan KÜÇÜKA'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Deney düzeneğinin oluşturulması ve deneylerin gerçekleştirilmesi esnasında yardımcı olan Alim ZORLUOL'a ve Azat SERVER'e simülasyonların oluşturulması esnasında yardımlarını esirgemeyen Okan GÖK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında gerek maddi gerekse manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem Engülen YILBAŞ'a, babam Ali YILBAŞ'a, kız kardeşim Yaren YILBAŞ'a ve kız arkadaşım Esra DAĞTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onurcan YILBAŞ

BORU İÇİ AKIŞ DEBİSİNİN ISIL YÖNTEM KULLANILARAK ÖLÇÜLMESİ

ÖZ

Literatürde ısıl yöntemlerle debi ölçümü genellikle gaz akışkanlar için kullanılmaktadır. Bu çalışmada ısıl yöntem ile sıvı akış debisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bir boru içerisindeki su akışına ısıtıcı daldırılarak sıcaklığın akışa bağlı değişimi izlenmiştir. Deneylerde ısıtıcı olarak 3B yazıcılarda kullanılan ısıtıcı kullanılmıştır. 6 mm dış çapındaki silindirik ısıtıcı, 12 mm dış çapındaki bakır bir kapsül içine yerleştirilmiştir. Kapsül cidarında ısıl çift girebilecek şekilde ölçüm delikleri açılmış ve kapsül akış borusu içine istenilen derinlikte daldırılarak sıcaklığın akış hızına bağlı değişimi ölçülmüştür.

Yapılan simülasyon çalışmasında, ilk olarak deney düzeneği ANSYS-Fluent simülasyon programında modellenerek doğrulama çalışması yapılmıştır. Modelde kapsülün daldırma derinliği ve boru içi akış hızları değiştirilerek, ölçüm noktaları sıcaklığının değişimi izlenmiştir. Beklenebileceği gibi, akış hızı arttıkça ölçüm noktası sıcaklıkları azalmakta ve akışkan sıcaklığına yaklaşmaktadır. Son olarak, sıcaklık ölçümünün debi ölçümünde nasıl kullanılabileceği tartışılmış ve sıcaklık verilerinden hareketle akış hızını veren bir Arduino devresi prototipi kurulmuştur.

Anahtar kelimeler: Debimetre, ısıl yöntem, ısı transferi, akışkan debi ölçümü, daldırılmış ısıtıcı, arduino devresi

MEASUREMENT OF FLOW RATE IN PIPES BY THERMAL METHOD

ABSTRACT

In the literature, thermal methods for flow measurement is usually used for gas fluids. In this study, it was aimed to determine the flow rate of liquid by thermal method. For this purpose, the change of temperature depending on the flow was observed by immersing the heater into the water flow in a pipe. The heater used in 3D printers was used as a heater in the experiments. The 6 mm outer diameter cylindrical heater is housed in a 12 mm outer diameter copper capsule. Measurement holes were opened on the capsule wall so that the thermocouple could enter, and the capsule was immersed in the flow pipe at the desired depth and the change in temperature depending on the flow rate was measured.

In the simulation study, firstly, the experimental setup was modeled in the ANSYS-Fluent simulation program and the verification study was carried out. In the model, the immersion depth of the capsule and the flow rates in the pipe were changed, and the change in the temperature of the measurement points was monitored. Finally, it has been discussed how temperature measurement can be used in flow measurement and an Arduino circuit prototype was established that gives the flow rate based on the temperature data.

Keywords: Flow meter, thermal method, heat transfer, fluid flow measurement, immersed heater, arduino circuit

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Kütleli Isıl Akış Ölçerler	1
1.2 Kızgın Tel Anemometresi	4
1.2.1 Sabit Akım Yöntemi	7
1.2.2 Sabit Sıcaklık Yöntemi	8
1.2.3 Kızgın Tel Anemometresi ile İlgili Çalışmalar.....	9
1.3 MEMS Teknolojisi ve Kullanılan Sensörler	11
1.4 Tezin Kapsamı ve Amacı	15
BÖLÜM İKİ - DENEY DÜZENİĞİ VE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYLER	
.....	16
2.1 Deney Düzenliğinin Oluşturulması	16
2.2 Deney Düzenliğinde Kullanılan Elemanlar	20
2.2.1 Isıtıcı	20
2.2.2 Isıl Çift	20
2.2.3 Veri Toplama Cihazı	21
2.2.4 Ayarlanabilir Güç Kaynağı.....	22
2.3 Deneyler	23
2.4 Ölçüm Belirsizlikleri	27

**BÖLÜM ÜÇ - DALDIRILMIŞ KAPSÜL ETRAFINDAKİ AKIŞ VE ISI
TRANSFERİNİN MODELLENMESİ..... 29**

3.1 Simülasyonun Oluşturulması	29
3.2 Matematiksel Model ve Sınır Şartları	32
3.3 Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	35
3.3.1 Kapsül Yüzeyi ve Çevresindeki Sıcaklık & Hız Dağılımının Gösterilmesi	36
3.4 Daldırma Derinliğinin Değiştirilmesi.....	42
3.5 Boru Çapının Değiştirilmesi.....	45
3.6 Kapsül Yüzeyi Isı Transfer Katsayısının Değişimi	50
3.7 Kapsül Tepe Sıcaklığı Değişiminin Fonksiyon Olarak Türetilmesi	53

**BÖLÜM DÖRT - ÖLÇÜM DEVRESİ PROTOTİPİNİN ARDUİNO
KULLANILARAK OLUŞTURULMASI 54**

4.1 Prototip Devre Şeması.....	54
4.2 Kullanılan Elektronik Devre Elemanlarının Tanıtılması.....	55
4.1.1 Arduino Uno	55
4.1.2 K Tipi Sıcaklık Sensör Modülü	55
4.3 Programın İşleyişi.....	56

BÖLÜM BEŞ - SONUÇ..... 58

KAYNAKLAR 60

EKLER..... 64

EK – 1: Prototipe Ait Arduino Programlama Kodu	64
--	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Isıl debiölçer sistemlerin sinyal aktarım süreci.....	2
Şekil 1.2 Isıl debimetre	2
Şekil 1.3 Kütle akış ölçer şematik gösterim.....	3
Şekil 1.4 Sıvı kütle akış sensörünün şematik gösterimi	4
Şekil 1.5 Kızgın tel çalışma prensibi.....	6
Şekil 1.6 Sabit akım yöntemi	7
Şekil 1.7 Sabit sıcaklık yöntemi.....	8
Şekil 1.8 Ölçümlerde kullanılan kızgın tel anemometresi probu	9
Şekil 1.9 Simüle edilmiş kızgın tel sensörünün şeması	10
Şekil 1.10 Çift ısıtıcılı model yapısı.....	12
Şekil 1.11 Isıl dağıtım gaz akış ölçerin şematik gösterimi.....	13
Şekil 1.12 Esnek akış sensör simülasyonu	14
Şekil 2.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi	17
Şekil 2.2 Kapsül-boru yerleşimi.....	18
Şekil 2.3 Isıtıcı kapsül	18
Şekil 2.4 Isıtıcı kapsül şematik yerleşimi.....	19
Şekil 2.5 Isıtıcı kapsül ölçüleri.....	19
Şekil 2.6 Keysight 34972A veri toplama cihazı	22
Şekil 2.7 Deney düzeneği.....	23
Şekil 2.8 Isıtıcı kapsül-boru yerleşimi ve sıcaklık ölçüm noktası.....	24
Şekil 2.9 Reynolds sayısına bağlı sıcaklık değişimleri	27
Şekil 3.1 Kapsül-akış temas yüzeyi ve kapsül-tepe yüzeyi gösterimi	29
Şekil 3.2 Model mesh görünümü	30
Şekil 3.3 Toplam eleman sayısı & kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değeri	31
Şekil 3.4 Deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	35
Şekil 3.5 Re_boru=5209 (ortalama hız 0,249 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı	36

Şekil 3.6 Re_boru=2962 (ortalama hız 0,142 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı	37
Şekil 3.7 Re_boru=2069 (ortalama hız 0,0989 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı	37
Şekil 3.8 Re_boru=1412 (ortalama hız 0,067 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı	38
Şekil 3.9 Re_boru=1136 (ortalama hız 0,0543 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı	38
Şekil 3.10 Re_boru=5209 (ortalama hız 0,249 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı	39
Şekil 3.11 Re_boru=2962 (ortalama hız 0,142 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı	39
Şekil 3.12 Re_boru=2069 (ortalama hız 0,0989 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı	40
Şekil 3.13 Re_boru=1412 (ortalama hız 0,067 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı	40
Şekil 3.14 Re_boru=1136 (ortalama hız 0,0543 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı	41
Şekil 3.15 Farklı daldırma derinliklerinin şematik gösterimi	42
Şekil 3.16 5 mm daldırma derinliği için sıcaklık değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimi	44
Şekil 3.17 12 mm daldırma derinliği için sıcaklık değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimi	44
Şekil 3.18 Farklı boru çaplarında kapsül yerleşimi.....	45
Şekil 3.19 Kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklığının boru çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi	48
Şekil 3.20 Kapsül-tepe yüzeyi ortalama sıcaklığının boru çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi	49
Şekil 3.21 Kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklığının kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi	49
Şekil 3.22 Kapsül-tepe yüzeyi ortalama sıcaklığının kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi	50

Şekil 3.23 Isı taşınım katsayısı değişimi	52
Şekil 3.24 Kapsül-tepe yüzeyi ortalama sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki farkın kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi	53
Şekil 4.1 Devre şeması.....	54
Şekil 4.2 MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülü	55
Şekil 4.3 Sistem modellenmesi şematik gösterim.....	56
Şekil 4.4 Ekran çıktısı	57



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Telin üretiminde kullanılan metaller ve özellikleri.....	5
Tablo 2.1 3B Yazıcı ısıtıcısı özellikleri	20
Tablo 2.2 Isıl çift türleri-1	21
Tablo 2.3 Isıl çift türleri-2	21
Tablo 2.4 Ayarlanabilir DC güç kaynağı özellikleri	22
Tablo 2.5 Deney sonuçları	25
Tablo 2.6 Akışkan ortalama hızı, Reynolds sayısı ve sıcaklık değerleri	26
Tablo 3.1 Kullanılan malzemeler ve özellikleri-1.....	30
Tablo 3.2 Kullanılan malzemeler ve özellikleri-2.....	30
Tablo 3.3 Toplam eleman sayısı ve kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değerleri	31
Tablo 3.4 Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	35
Tablo 3.5 Daldırma derinliğine bağlı sıcaklık değişimi.....	43
Tablo 3.6 Kapsül sıcaklıklarının akış hızı ve Reynolds sayısı ile değişimi (boru iç çapı 21 mm)	47
Tablo 3.7 Kapsül sıcaklıklarının akış hızı ve Reynolds sayısı ile değişimi (boru iç çapı 33 mm)	47
Tablo 3.8 Kapsül sıcaklıklarının akış hızı ve Reynolds sayısı ile değişimi (boru iç çapı 44 mm)	48
Tablo 3.9 Isı taşınım katsayısının farklı daldırma derinlikleri ve farklı çaplar için kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi	51
Tablo 4.1 MAX6675 sensör modülü özellikleri	56

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde basınç farkına dayalı ölçüm yöntemleri, vorteks ölçerler, manyetik, ultrasonik ölçüm yöntemleri ve ısı yöntemleri gibi farklı hacimsel ve kütleli debi ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın konusu olan ısı yöntemleri ile debi ölçümü, ısıtılmış bir noktadan soğuk akışa doğru gerçekleşen ısı transferinin akışkan hızının bir fonksiyonu olduğu gerçeğine dayanan bir yöntemdir. Isı yöntemleri ile debi ölçümü, küçük debili akışlarda toplam akışkan kütleli debisinin doğrudan ölçülmesinde, gaz akışlarında ise yerel akış hızlarının belirlenmesinde halen geniş ölçüde kullanılmaktadır. Akışkan ve sıcak yüzey arasındaki yüksek ısı taşınım katsayısı ve yüksek ısı kapasiteleri, bu yöntemin sıvı akışlara uygulanmasını sınırlamaktadır.

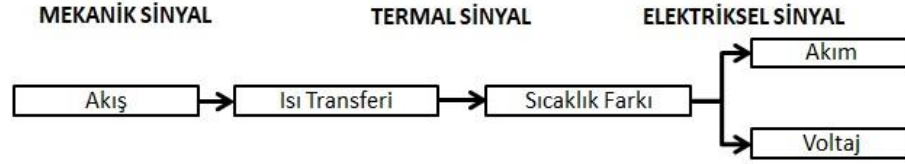
Giriş bölümünde, gaz ve sıvı akışlarında debi ölçümü için kullanılan farklı ısı yöntemleri hakkında genel bilgi verilmiş ve tezin bölümleri tanıtılmıştır.

1.1 Kütleli Isı Akış Ölçerleri

Kütleli ısı akış sensörleri, genelde küçük debilerdeki gaz akışkanların kütleli debilerinin ölçülmesinde kullanılırlar. Bu tip debi ölçerlerde elektriksel bir güç girişi sağlanarak, akışkanın ısıtıcı öncesi ve sonrası sıcaklıkları ölçülür. Sıcaklık değişimi, ve akışkan kütleli debisi arasında bir bağlantı kurulur (Thermal mass flow sensors, theory of operation & design, b.t.).

Isı kütle akış ölçerleri tarafından ölçülen fiziksel büyüklük, bir birim kesitten akan kütleli akış hızı veya toplam kütleli debi olarak tanımlanabilir. İlk olarak mekanik sinyal (kütle akışı), ısı sinyali (ısı transferi) dönüştürülür. Ardından meydana gelen sıcaklık farkı bir elektriksel çıkış sinyaline (akım veya voltaj) dönüştürülür (Amina ve Ahmed, 2017).

Akış ölçerin sinyal üretim süreci Şekil 1.1’de gösterildiği şekilde şematize edilebilir.



Şekil 1.1 Isıl debiölçer sistemlerin sinyal aktarım süreci

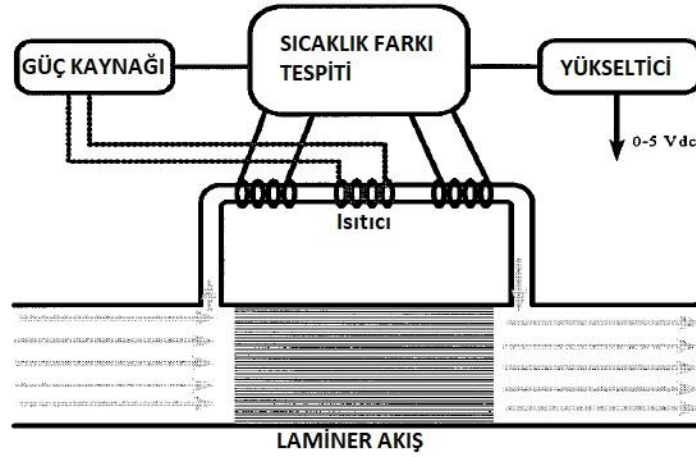
Isıtma işleminin akışkanın tamamına uygulandığı bir ısıl debimetre Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Burada kütleli debi m , ısıtıcı öncesi ve sonrası sıcaklık farkı $(T_2 - T_1)$, verilen elektriksel güç Q ve sıvının özgül ısı c temel alınarak Denklem 1.1’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$m = \frac{Q}{c \cdot (T_2 - T_1)} \quad (1.1)$$



Şekil 1.2 Isıl debimetre

Genel olarak gaz akışlarının ölçümünde kullanılan kütleli ısıl akış ölçerlerin şematik bir gösterimi, Şekil 1.3’te verilmiştir. Burada, akışkanın bir kısmı ısıtılmakta ve toplam debinin hesaplanması için debi oranına bağlı bir kalibrasyon gerekmektedir.

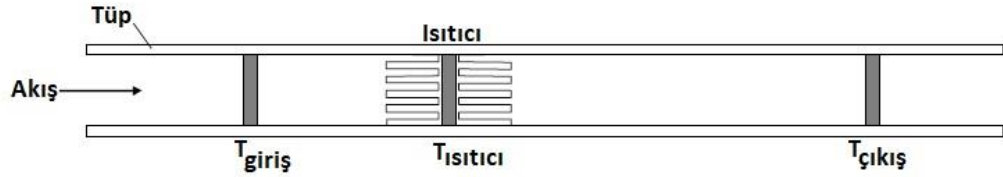


Şekil 1.3 Kütle akış ölçer şematik gösterim (Tison, 1996)

Isıl kütle akış ölçerlerin farklı üreticiler tarafından geliştirilmesi farklı tasarımlara sahip ısıl kütle akış ölçerlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu durum ısıl kütle akış ölçerlerin karşılaştırılmasını zorlaştırmıştır. Tison (1996) çalışmalarında bu kütle akış ölçerlerin kalibrasyon işlemlerinde Azot gazı (N_2) kullanıldığını belirtmiş diğer gazlar ile kalibrasyon yapılabilmesi için çeşitli düzeltme faktörlerinin kullanıldığını dikkat çekmiştir. Çalışmada farklı üreticilere ait akış ölçer performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Beş farklı gaz; Argon (Ar), Helyum (He), Kükürt hekzaflorür (SF_6) Hekzafloroetan (C_2F_6), ve Hidrojen (H) için düzeltme faktörleri hesaplanmış ve gaz düzeltme faktörlerinin sıcaklığa ve debiye olan etkisi, üreticilerin verdiği değerler ile karşılaştırılmıştır.

Boer (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüksek hızlı sıvı akışları için ısıl kütle akış ölçümü ve bu yöntemle geliştirilmiş olan Liqui-flow L30 sensörü anlatılmıştır. Gaz akışkanların ölçümünde ölçüm aralığını genişletmek için atlatma hattı tekniğinin kullanıldığı fakat bu yöntemin sıvılar için uygun bir yöntem olmadığı ele alınmıştır. Geliştirilen Liqui-flow L30 sensörünün atlatma hattına gerek duymayan bir ısıl akış sensörü olduğuna dikkat çekilmiş ve 1 kg/saat'e kadar kütleli debideki sıvı akışlar için kullanılabildiği belirtilmiştir.

Akış düz bir borudan geçirilir ve boru üzerine bir sensör ve ısıtıcı konfigürasyonu yerleştirilir. Isıtıcı sıcaklığı $T_{\text{ısıtıcı}}$, giriş sıcaklığı olan $T_{\text{giriş}}$ değerinin üzerinde olacak şekilde ısıtılır. Sıvı akışı sürerken sıcaklık artışını sürdürmek için gerekli olan güç, sıvı debisi için bir ölçüttür. Sıvı kütle akış sensörünün şematik gösterimi Şekil 1.4’te verilmiştir.



Şekil 1.4 Sıvı kütle akış sensörünün şematik gösterimi (Boer, 1995)

K sensör sabiti, c akışkanın ısı kapasitesi, $\dot{m}$ ise kütleli debi olmak üzere; güç ve kütleli debi arasındaki ilişki Denklem 1.2’deki gibi olur.

$$W_{\text{Elektrik gücü}} = k \cdot c \cdot \dot{m} \cdot (T_{\text{ısıtıcı}} - T_{\text{giriş}}) \quad (1.2)$$

1.2 Kızgın Tel Anemometresi

Kızgın tel kullanılarak gerçekleştirilen debi ölçüm yöntemi türbülanslı gaz akışkanların yerel hızlarının belirlenmesinde uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir.

Yöntem, ince ısıtılmış bir telden zorlanmış taşınım ısı transferine dayalı bir debi ölçüm tekniğidir. Telin yapısı sıcaklığa bağlı direnci değişen bir malzemeden oluşmaktadır. Telden bir elektrik akımı geçirildiğinde, teli akışkan sıcaklığının üzerinde ısıtır. Bu olay esnasında meydana gelen ısı transferi, telin bulunduğu noktadaki akış hızıyla ilişkilidir. Telin sıcaklığı değiştiğinde direnci de değişmektedir (Laurantzon, Tillmark ve Alfredsson, 2012) (Bruun, 1996).

Tungsten, platinyum, platinyum-iridyum ve platinyum-rodyum kızgın tel üretiminde kullanılan metaller olmakla beraber ilgili metallere ait; elektriksel direnç, telin sıcaklık direnç katsayısı, yoğunluk ve izin verilen en yüksek kullanım sıcaklığı özellikleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1 Telin üretiminde kullanılan metaller ve özellikleri (Shekhter, 2011)

Malzeme	Tungsten	Platinyum	Platinyum-İridyum	Platinyum-Rodyum
Elektriksel Direnç ($10^{-8} \Omega/m$)	5,5	10	32	18
Direnç Katsayısının sıcaklıkla değişimi (K^{-1})	0,0035	0,0036	0,0008	0,0016
Yoğunluk (kg/m^3)	19300	21450	21610	19970
İzin Verilen En Yüksek Kullanım Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	300	800	750	850

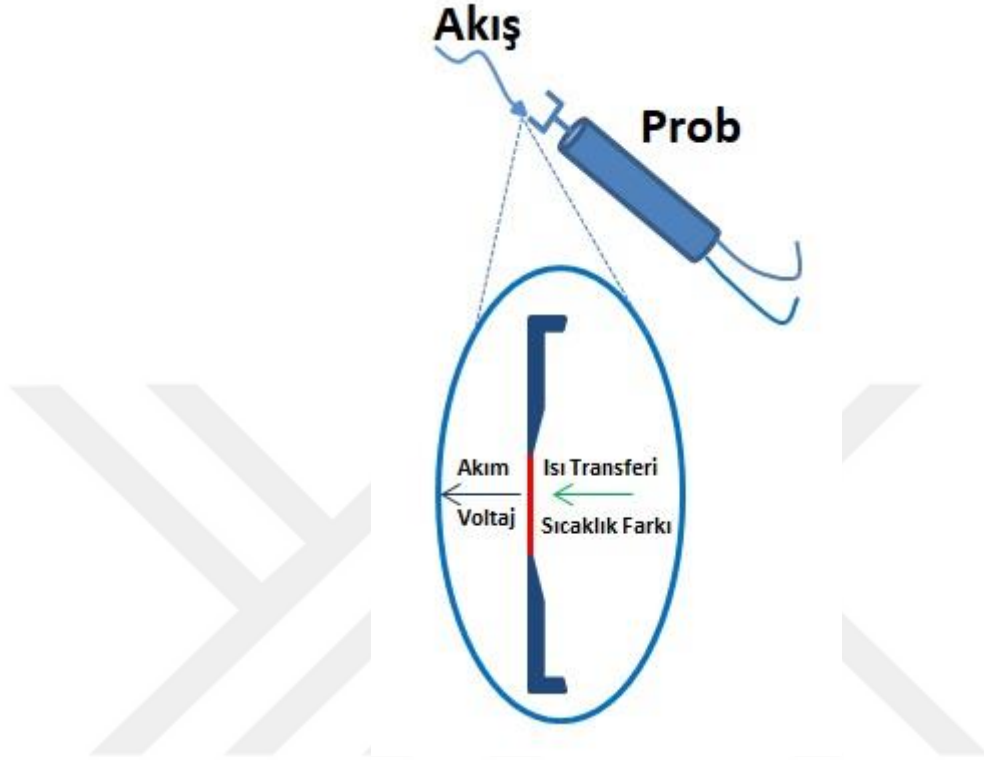
İnce telin yapısında kullanılan bu malzemelerde direnç ve sıcaklık arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Direnç ve sıcaklık arasında bulunan bu doğrusal ilişki; α tel direncine özgü direncin sıcaklıkla değişim katsayısı, R_T tel direnci (Ω), R_{ref} referans sıcaklıktaki tel direnci (Ω), T_T tel sıcaklığı (K) ve T_A akışkan sıcaklığı (K) olmak üzere Denklem 1.3’te verilmiştir (Shekter, 2011).

$$R_T = R_{Ref} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_T - T_A)] \quad (1.3)$$

Akışkan içine daldırılan tel, elektrik akımı ile ısıtılmaktadır. Isı transferinden dolayı kaybedilen güç verilen elektriksel güce eşit olacaktır. Kızgın tel çalışma prensibi Şekil 1.5’te şematize edilmiştir. Elektriksel güç ve tel sıcaklığı arasındaki ilişki Denklem 1.4’te verilmiştir.

$$I^2 \cdot R_T = h \cdot A_T \cdot (T_T - T_A) \quad (1.4)$$

A_T tel yüzey alanını (m^2) ve h ortam ve tel yüzeyi arasındaki ısı transfer katsayısını ($W/m^2 \cdot K$) göstermektedir.



Şekil 1.5 Kızgın tel çalışma prensibi

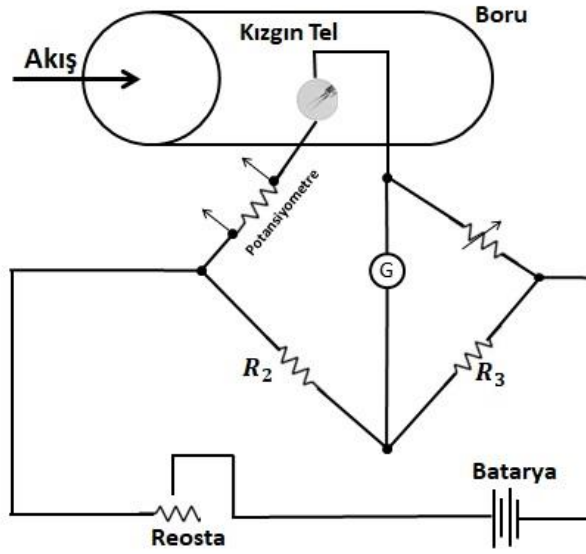
Isı transfer katsayısı h , King Yasası'na göre $V_{Akışkan}$ akışkan hızının bir fonksiyonu olarak Denklem 1.5'deki gibi hesaplanır. Katsayılar; a , b ve c kalibrasyon ile elde edilmektedir (Hot wire theory, b.t.).

$$h = a + b \cdot V_{Akışkan}^c \quad (1.5)$$

Kızgın tel anemometresi ile debi ölçümünde iki farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlar sırasıyla Sabit Akım Yöntemi ve Sabit Sıcaklık Yöntemidir.

1.2.1 Sabit Akım Yöntemi

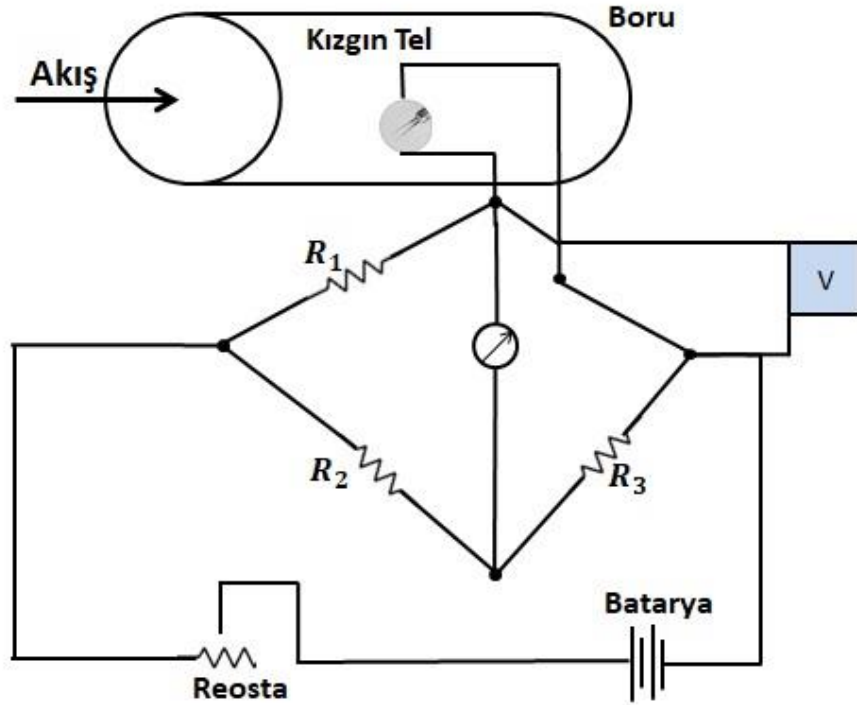
Sabit akım yönteminde kızgın tel anemometresi, akışın içerisinde hız ölçümü yapılacak noktaya yerleştirilir. Wheatstone köprüsü ise sabit gerilimde tutulur. Sabit büyüklükteki akım telden geçirilerek tel ısıtılır. Tel akışa maruz kaldığında, akışkana doğru bir ısı transferi gerçekleşir. Akışkan hızının artması ile birlikte, ısı transferi iyileşir, telin sıcaklığı ve direnci azalır. Sabit akım durumunda, tele verilen güç telin direnciyle doğru orantılı olarak azalır. Wheatstone köprüsü kullanılarak tel direncindeki değişim ölçülür. Tel direncindeki değişim kalibre edilerek akış hızının bir ölçüsü haline getirilir. Kızgın tel, R_2 ve R_3 dirençleri, reosta, batarya, potansiyometre ve galvanometreden oluşan devre şeması Şekil 1.6’da verilmiştir (Hot wire anemometer, b.t.).



Şekil 1.6 Sabit akım yöntemi

1.2.2 Sabit Sıcaklık Yöntemi

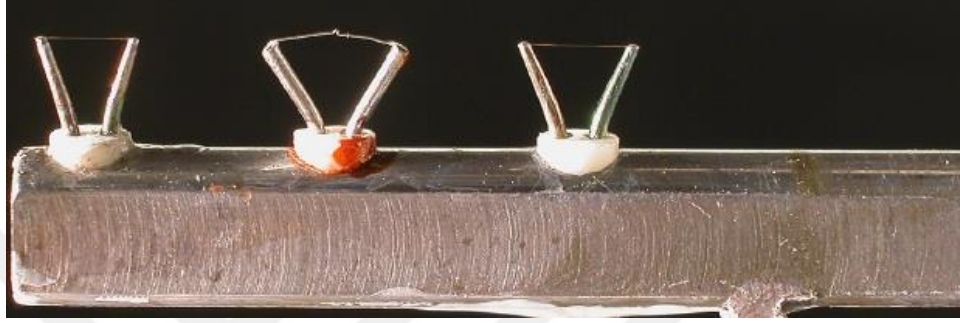
Sabit sıcaklık yönteminde de kızgın tel anemometresi, akışın içerisinde hız ölçümü yapılacak noktaya yerleştirilir. Teli ısıtmak için kullanılan akım, tel direnci sabit kalacak şekilde ayarlanır. Normal direnç, ısıtılan tel ile seri olarak bağlanır. Direnç boyunca gerçekleşen gerilim düşüşü, üzerinden geçen akım değerine bağlıdır. Direnci ve dolayısıyla telin sıcaklığını; referans alınan başlangıç noktasındaki değerine geri getirmek için gereken elektrik akımı kalibre edildiğinde akış hızının bir ölçüsü haline gelir. Kızgın tel, R_1 , R_2 , R_3 dirençleri, reosta, batarya ve voltmetreden oluşan devre şeması Şekil 1.7’de verilmiştir (Hot wire anemometer, b.t.).



Şekil 1.7 Sabit sıcaklık yöntemi

1.2.3 Kızgın Tel Anemometresi ile İlgili Çalışmalar

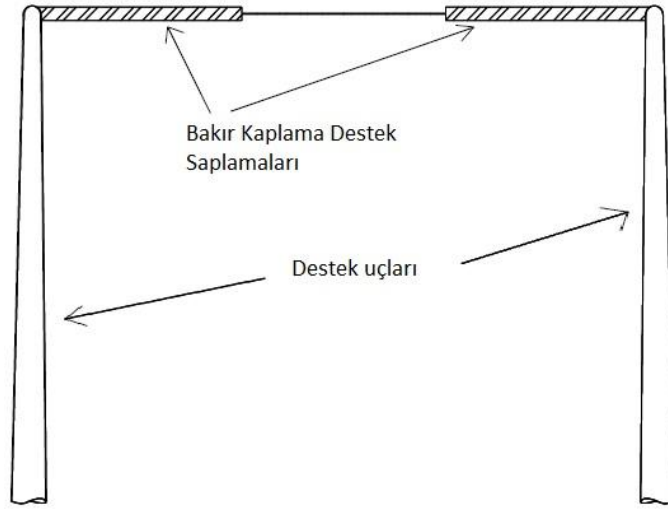
Tolga Yasa tarafından (2005) yapılan çalışmada, değişken gaz sıcaklıkları için kızgın tel anemometresi yöntemi ve kızgın teldeki yıpranmanın akışkan hız ölçümüne etkisi incelenmiştir. Ölçümler esnasında kullanılan kızgın tel anemometresi probu Şekil 1.8’de gösterilmiştir.



Şekil 1.8 Ölçümlerde kullanılan kızgın tel anemometresi probu (Yasa, 2005)

Yeni bir kalibrasyon yöntemi geliştirilerek; kızgın tel anemometresi yönteminin sadece sabit gaz sıcaklıkları için değil aynı zamanda değişken gaz sıcaklıkları için kullanılmasına imkan sağlanmıştır. Ölçüm esnasında telde yıpranma meydana geldiği ve bu yıpranmanın çeşitli hatalara yol açtığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak ortaya çıkan hataların giderilmesi için kalibrasyon modeli düzenlenmiştir.

Morris ve Foss tarafından (2003), kızgın tel anemometresinin geçici ısıl yanıtlarını incelemek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Simüle edilmiş olan kızgın tel sensörünün şeması Şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.9 Simüle edilmiş kızgın tel sensörünün şeması (Morris ve Foss, 2003)

Sensör bakır kaplama destek saplamaları ve destek uçlarından oluşmaktadır. Sensör için enerji dengesi akışkana olan ısı taşınımı ve desteklere olan iletim toplamı elektriksel güce eşit olacak şekildedir.

Ecın, Malik, Malek, Hosticka ve Grabmaier (2011) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada darbeli bir sıcak tel sisteminin matematiksel modeli kurulmuş ve boru akışı içinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli oluşturularak ısı davranışı incelenmiştir. Akış sensörü; bir darbeli tel ve sıcaklık sensörlerinden oluşmaktadır. Çalışmada amaç akışkan ortamdaki ısı darbe etkisinin analizidir. Çalışma farklı akışkan hızları ve farklı akışkanlar için tekrarlanmıştır. Farklı akışkanlar için TTOF (Isıl Uçuş Zamanı Yöntemi) uygulanmıştır. TTOF yöntemi, ısı darbesinin borudan geçen akış içerisinde belirli bir mesafe boyunca yayıldığı zamanı ölçmek için kullanılmaktadır. Darbeli sıcak tel sistemine uygulanan elektrik sinyali sistemin giriş sinyali olarak kabul edilmiştir. Isı darbesi akışkan boyunca taşınmaktadır ve belirli bir TTOF'dan sonraki zamanla tespit edilmektedir. Isıl sensörlerin konumlandırılmasının bu ölçüm için oldukça önemli olduğu belirtilmiştir.

Van Honschoten, Svetovoy, Krijnen ve Elwenspoek (2005), çalışmada bir ısı akış sensörü, iki veya üç kızgın tel, “microflown” olarak tanımlanan akustik sensör yardımıyla basınç, akustik ölçümler uygulanarak işlenmektedir. Ayrıntılı parametrik çalışmalar kullanılarak bir analiz yapılmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, merkezi telin en fazla ısıtıldığı olağan iki tel yerine üç telden oluşan yeni bir geometriye sahip bir tasarım geliştirilmiş ve imal edilmiştir.

Nguyen (2005) çalışmasında bir ısı akış sensörünün farklı ölçüm yöntemleri birleştirilerek bir model oluşturulmuş ve modele dayalı olarak yeni bir akış sensörü tasarlanmıştır. Yeni sensör; bir ısıtıcı ve sıcaklık sensörlerinden oluşmaktadır. Bu sayede akışkan debisinin hem yönünün hem de büyüklüğünün ölçülmesi sağlanmaktadır. Çalışmada ilk olarak laminar akışta iki boyutlu problem analiz edilmiştir. Sabit ısıtma gücünün ve sabit ısıtıcı sıcaklığının iki farklı çalışma modu modelde analitik olarak ele alınmıştır. Akış yönünün belirlenebilmesi için yeni bir tahmin algoritması üretilmiştir.

Çalışmada üretilen sensör prototipinin deneysel sonuçları da yer almaktadır. Sıcaklık sensörlerinden elde edilen değerler bilgisayar yardımıyla algoritma tarafından işlenerek gerçek debi ve akış yönü çıkartılmıştır. Akış yönünün belirlenmesi için bir Gauss tahmincisi üretilmiş olup analitik tahmin edici kullanılarak doğruluğu ispatlanmıştır.

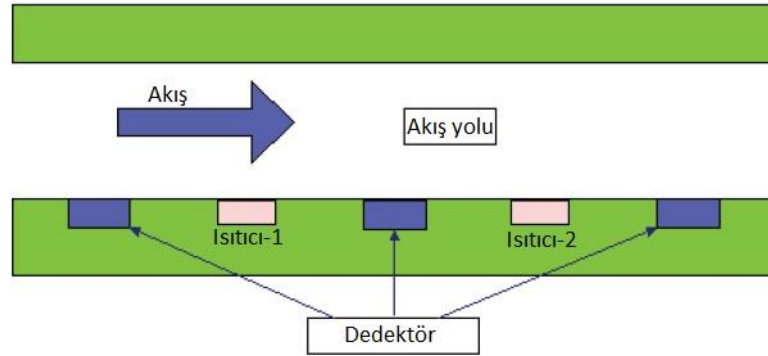
1.3 MEMS Teknolojisi ve Kullanılan Sensörler

Mikro Elektronik Mekanik Sistem (MEMS) teknolojisi, mikro fabrikasyon teknikleri kullanılarak yapılan minyatürleştirilmiş mekanik ve elektro-mekanik elemanlar olarak tanımlanmaktadır. MEMS; mikro yapılar, mikro sensörler, mikro aktüatörler ve mikro elektronik olmak üzere dört ana unsurdan oluşmaktadır. Mikro sensörler ve mikro aktüatörler, enerjiyi bir formdan diğer forma dönüştüren cihazlardır. Son yıllarda, MEMS teknolojisi alanında yapılan çalışmalar; sıcaklık, basınç, manyetik alan, radyasyon ve debi ölçüm sensörleri dahil olmak üzere birçok mikro sensörün geliştirilmesine olanak sağlamıştır (What is MEMS technology?, b.t).

MEMS mikroişlemcileri ortalamanın üstünde tutarlılığa sahiptirler ve güç tüketimleri daha düşüktür. MEMS teknolojisi birden fazla sensörün tek bir çipte birleşmelerine olanak sağlamaktadır. MEMS teknolojinin bu özelliği sayesinde debimetreler daha düşük maliyetli olarak üretilebilmektedir.

Wu ve Yao'nun (2011) yapmış oldukları çalışmada tek ısıtıcı modellerin yüksek gaz hacmini ölçmede yetersiz kaldığı belirtilerek çift ısıtıcı bir model geliştirilmiştir. Tasarımın en önemli noktası hedefe en uygun yapıyı seçmektir. Farklı tasarımlar farklı debi aralıklarındaki gaz akışını ölçmektedir.

Gaz akışı çipin içinden geçer, iki dedektör arasındaki sıcaklık alanını değiştirir. Yoğunluk, ısı kapasitesi ve akışın diğer fiziksel özellikleri de hesaba katılarak sıcaklık sinyalleri dedektörler tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülür. Çift ısıtıcı model yapısı Şekil 1.10'da verilmiştir.

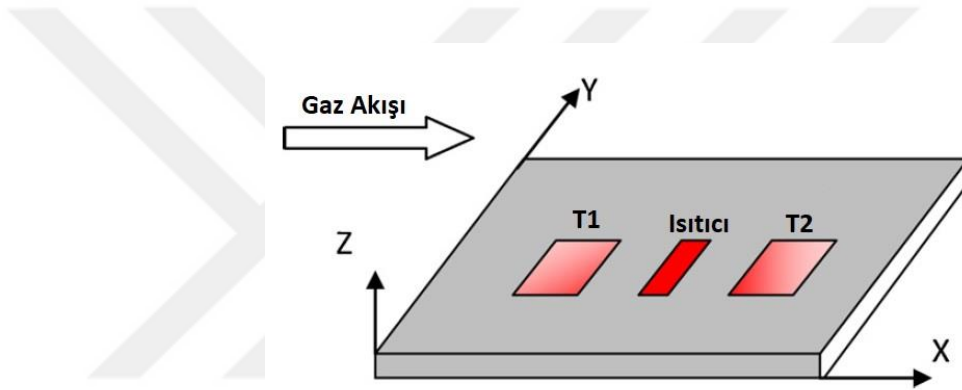


Şekil 1.10 Çift ısıtıcı model yapısı (Wu ve Yao, 2011)

Önerilen model, üst üste bindirilmiş iki ısıtıcı alan kullanır, sıcaklık tepesi noktasını arttırmadan, izotermal hatların genişliğini artırır, böylece dedektörlerin algılama aralığını genişletir. Çift ısıtıcı model bu özelliği sayesinde hızlı tepki vermektedir. Bu model debimetrelerin performansını arttırmaktadır.

Xue ve Yan tarafından (2012) gerçekleştirilen çalışmada geniş çalışma aralığına sahip silikon-cam bazlı bir ısı dağıtım gaz akış ölçer geliştirilmiştir. Akış ölçerin üretimi için kullanılan ısıtıcı ve termometrenin yapısında ince bir Platin (Pt) film kullanılmıştır. Sensör içerisinde ısı ve elektriksel sapmaları önlemek için Silikon Dioksit (SiO_2) katmanları Platin filmin üstüne yerleştirilmiştir. Isıtıcının yanında üç çift termometre bulunmaktadır. Sıcaklık sensörlerinin dönüşümlü olarak kullanılması sayesinde debimetrenin hassasiyeti ve debi ölçüm aralığı arttırılmıştır.

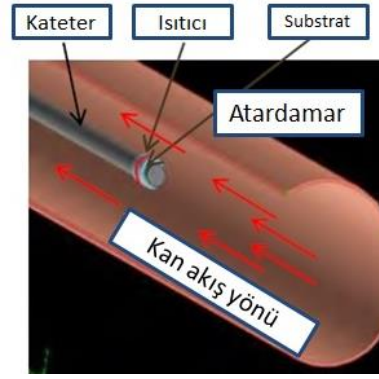
Platin ısıtıcı, üç çift termometre ve bir cam kanaldan oluşan geniş debi ölçüm aralığına sahip hassas debi akış ölçerin şematik gösterimi Şekil 1.11’de verilmiştir.



Şekil 1.11 Isıl dağıtım gaz akış ölçerin şematik gösterimi (Xue ve Yan, 2012)

Isıl gaz akış ölçerin çalışma prensibi, gaz akışı ile T1 ve T2 arasındaki sıcaklık farkı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Geliştirilen gaz akış ölçer cihazının debi ölçüm aralığı 0,8-2800 ml/dk olarak hesaplanmıştır.

Maji, Vunnam, Ravikumar ve Das (2011) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada kateter ucuna entegre edilmek üzere tasarlanmış ve anemometre çalışma prensibine dayanan MEMS tabanlı esnek akış sensörü simüle edilmiştir. Önerilen esnek akış sensörü; kateter (prob), ısıtıcı ve substrattan oluşmaktadır. Simüle edilen model Şekil 1.12’de verilmiştir.



Şekil 1.12 Esnek akış sensör simülasyonu (Maji, Vunnam, Ravikumar ve Das, 2011)

MEMS tabanlı esnek akış sensörü kateter bazlı çalışmalar esnasında vücut sıvısının eş zamanlı olarak izlenebilmesini sağlamayı amaçlamaktadır. Simulasyon çalışması, optimum dirençli ısıtıcı tasarımını ve ısıtıcının esnek bir polimer üzerinde gerçekleştirilmesi için uygun malzemenin tanımlanmasının ardından COMSOL 4.1 üzerinde akış analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntemde akışkan hızı, akışkan ortamında akış etkisine maruz bırakılan elektrikle ısıtılan algılayıcı elemandan sıvı içerisine dağılan ısı miktarıyla ilişkilendirilmiştir. Sıcaklık ve dolayısıyla algılayıcı elemanın direnci, ısıtıcıdan bir miktar akım geçirilerek ortam sıcaklığından daha yüksek bir değerde tutulmuştur. Algılayıcı elemanın akış içine yerleştirilmesi ile ortama doğru bir ısı geçişi olmaktadır. Sabit sıcaklık modunda, algılayıcı eleman giriş akımı arttırılarak sıcaklığı sabit tutulmuştur. Bu sayede her farklı akış debisinde farklı bir ısıtıcı akımı üretilmiştir.

1.4 Tezin Kapsamı ve Amacı

Literatür taramasında da görüldüğü gibi sıvı akışlarının ısıl yöntemle belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Tezin amacı, daldırılmış bir yüzey etrafındaki ısı transferinin; akış hızına ve Reynolds sayısına bağlı değişimini incelemek ve ısı transferinin değişimine bağlı olarak debi yönteminin geliştirilmesidir.

Tezin ikinci bölümünde deney düzeneği tanıtılmış olup, çalışma prensibi aktarılmıştır. Reynolds sayısına bağlı olarak T_1 , T_2 ve T_{su} sıcaklık değişimleri verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde ise simülasyon programında deney modellenmiştir. Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Farklı daldırma oranları, farklı çaplar için simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar değerlendirilmiştir. Ardından sıcaklık verilerinden hareketle akış hızını veren bir Arduino devresi prototipi kurulmuştur.

BÖLÜM İKİ

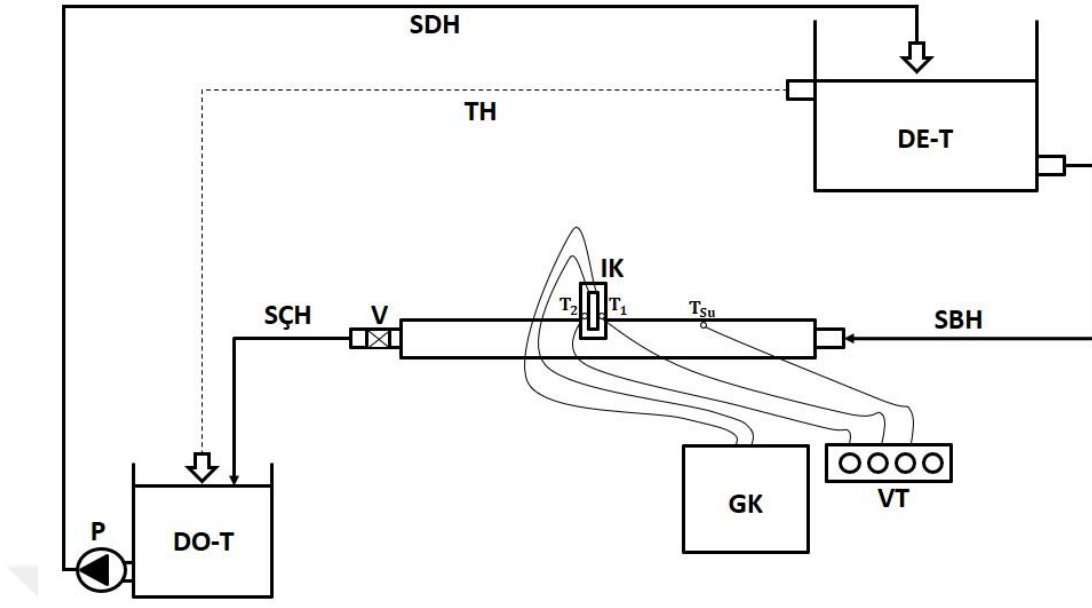
DENEY DÜZENEĞİ VE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYLER

Deneylerde su akışı olan bir boru içindeki ısıtıcı sıcaklığının akış debisi ile değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla boru içindeki su akış hızı değiştirilerek, kullanılan ısıtıcı kapsül üzerinde belirli bir noktadan alınan sıcaklığın akış hızına bağlı değişimi ölçülmüştür. Bu bölümde deney düzeneğinin yapısı anlatılmış ve deneyler hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

2.1 Deney Düzeneğinin Oluşturulması

Deneylerde 21 mm iç çap ve 33 mm dış çapında ve 1 m uzunluğunda yatay polipropilen boru içerisinde su akışı sağlanmıştır. Kullanılan akış borusu üzerinde boru yüzeyinden içeri doğru daldırılmış ve içinde elektrikli ısıtıcı bulunan bakır malzemeden yapılmış bir kapsül tesis edilmiştir. Deneylerde, su debisi değiştirilerek, ısıtıcı kapsülün üzerinde belirli bir noktadan alınan sıcaklığın akış hızına bağlı değişimi ölçülmüştür. Bu bölümde deney düzeneğinin yapısı anlatılmış ve deneyler hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

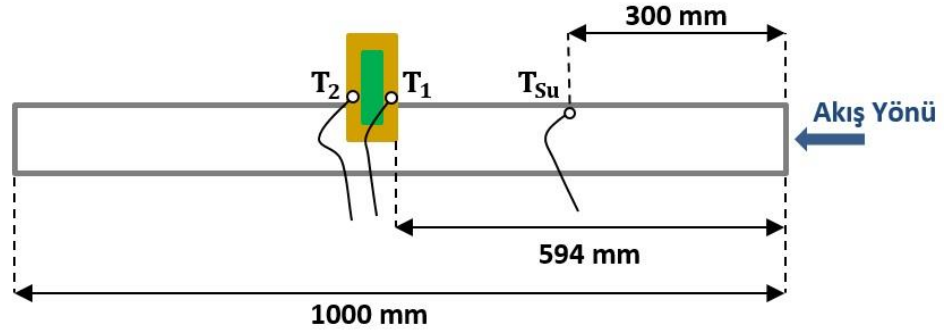
Dolaşım tankı (DO-T), su pompası (P), dengeleme tankı (DE-T), su besleme hattı (SBH), su dolaşım hattı (SDH), taşma hattı (TH), su çıkış hattı (SÇH), ayar vanası (V), içerisinde ısıtıcı bulunan kapsül (IK), kapsül sıcaklıklarının ölçüldüğü ısı çiftleri ısı çift-1 (T_1), ısı çift-2 (T_2), su sıcaklığının ölçüldüğü ısı çift-su (T_{su}), güç kaynağı (GK) ve veri toplama cihazı (VT)'den oluşan deney düzeneği şematik gösterimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Akış yönü Şekil 2.1’de gösterildiği gibidir. Pompadan basılan akışkan, dengeleme tankına doğru hareket etmektedir. Dengeleme tankında su seviyesi sabit tutularak, su besleme hattında düzenli bir akış rejimi sağlanmaktadır. Dengeleme tankında meydana gelen taşmalar taşma hattı aracılığı ile tekrar dolaşım tankına geri döndürülmektedir. Akışkan ısıtıcılı kapsülün yerleştirildiği boru içine yönlendirilmekte ve kapsülü soğutarak yoluna devam etmektedir. T_1 ve T_2 ısı çiftleri kullanılarak kapsül içerisinde tanımlanan derinlikteki sıcaklık anlık olarak okunmaktadır. Boru hattı çıkış tarafında bir küresel vana tesis edilmiş olup boru içerisindeki su akışının debi kontrolü bu vana yardımı ile yapılmaktadır. Son olarak su çıkış hattı ile dolaşım tankına geri dönen akışkan, pompa yardımıyla tekrar aynı döngüye girmektedir.

1 metre uzunluğundaki polipropilen boru içerisindeki ısıl çift ve kapsül yerleşimi Şekil 2.2’de gösterildiği gibidir.



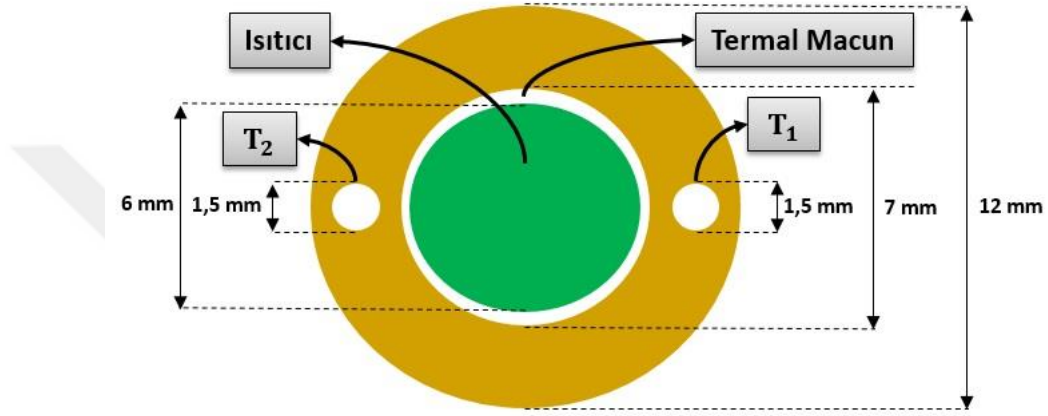
Şekil 2.2 Kapsül-boru yerleşimi

İçerisine bir ısıtıcı yerleştirilerek akış borusu içine daldırılan kapsül; dolu bakır malzemeden torna ve matkap yardımı ile istenilen boşluklar açılarak imal edilmiştir. Bakır kullanılmasının nedeni, yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması ile kapsülün farklı noktalarındaki sıcaklık değişimlerinin sınırlı olabilmesidir. Kullanılan bakırın ısı iletim katsayısı $350 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ’dir. Kapsülün dış çapı 12 mm, ısıtıcı yuvası delik çapı 7 mm ve et kalınlığı ortalanarak karşılıklı delinen ısıl çift ölçüm delikleri 1,5 mm çapındadır. Kapsül borusunun toplam boyu 30,5 mm’dir. Isıtıcı yuvası deliği üstten 25,5 mm, ısıl çiftler için kullanılan ölçüm deliği derinliği 19,5 mm’dir. İmal edilen kapsüle ait görsel Şekil 2.3’te verilmiştir.

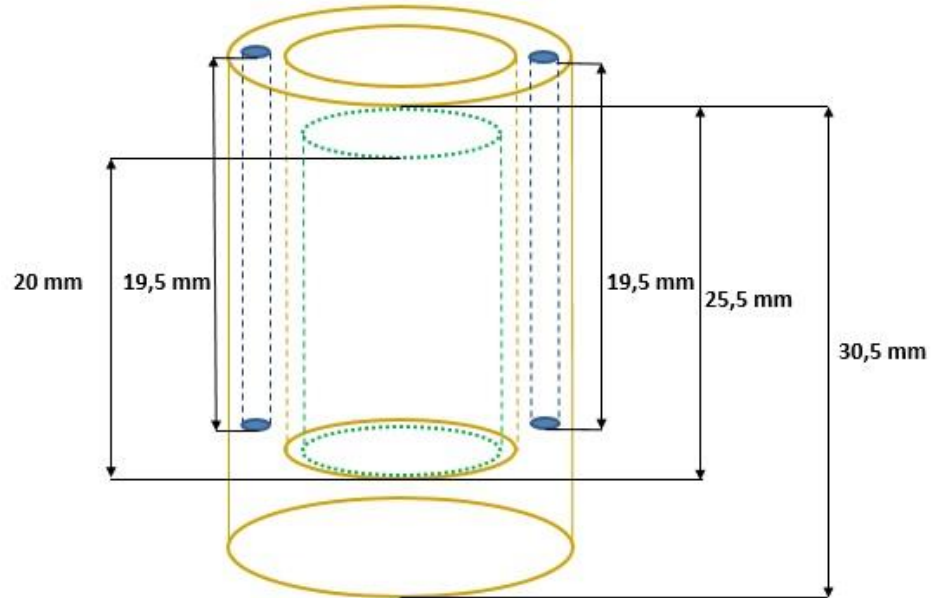


Şekil 2.3 Isıtıcı kapsül (Kişisel Arşiv, 2021)

Kullanılan elektrikli ısıtıcı, kapsül boşluğu içerisine yerleştirilmiştir. Isıtıcı ve kapsül arasında kalan boşluğun yapılan deneyleri olumsuz yönde etkilememesi için boşluk, $8,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 'lik termal iletkenliğe sahip termal macun kullanılarak doldurulmuştur. Isıtıcının çapı 6 mm ve 20 mm yüksekliğinde olup, kapsülün içerisinde ısıtıcı bulunduğu durumdaki şematik görüntü ve ölçüleri Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Isıtıcı kapsül şematik yerleşimi



Şekil 2.5 Isıtıcı kapsül ölçüleri

2.2 Deney Düzeneginde Kullanılan Elemanlar

Deney düzeneğinde kullanılan temel bileşenler; 3B yazıcı ısıtıcısı, ısı çifti, veri toplama cihazı ve ayarlanabilir güç kaynağı bu başlık altında incelenmiş olup, ilgili bileşenler tanıtılmıştır.

2.2.1 Isıtıcı

Kullanılan ısıtıcı üç boyutlu yazıcılarda, filament ısıtmak için kullanılan elektriksel bir elemandır. Boyutlarının küçük olması, elektriksel bağlantı için ekstra bir ekipman gerektirmemesi bu çalışma içerisinde gerçekleştirilen deneyler için seçilmesinde önemli bir etkidir. Kullanılan ısıtıcının özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 3B Yazıcı ısıtıcısı özellikleri (3D printer extruder ısıtıcı, b.t.)

Anma Gerilimi (V)	12
Güç (W)	40
Çap (mm)	6
Isıtıcı Kısım Uzunluğu (mm)	20
Malzeme	Paslanmaz Çelik

2.2.2 Isıl Çift

Isıl çift, ölçüm ucunda iki farklı iletken malzemenin birleştirilmiş olduğu bir sıcaklık sensörüdür. Diğer uçlar ise ölçüm cihazına bağlanır. Ölçüm cihazındaki soğuk uçlar ile sıcak uç arasında sıcaklık farkına bağlı bir elektriksel gerilim oluşmaktadır (Seeback etkisi). Malzeme türüne ve sıcaklık farkına bağlı olarak değişen gerilim şiddetinin okunması ile sıcak uç sıcaklığı hesaplanır (Termokupl, b.t.).

Isıl çiftler kullanıldıkları yere göre farklı alaşımlardan yapılmaktadır. Tablo 2.2’de kullanılan ısı çiftleri ve yapıldıkları alaşımlar verilmiştir.

Tablo 2.2 Isıl çift türleri-1 (Termokupl, b.t.)

Tür	Alaşım
T	Bakır-Konstantan
K	%90 Nikel ve %10 Krom
J	Demir Konstantan
N	Demir-Konstantan
B,R ve S	Platin veya Platin Rodyum
E	%55 Bakır ve %45 Nikel

Isıl çift seçimi yapılırken genellikle sıcaklık ve algılama özelliğine göre seçilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde ısı çift türlerinden T tipi ısı çift kullanılmış olup, T tipi ısı çiftte ait özellikler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Isıl çift türleri-2 (Termokupl, b.t.)

Tür	Sıcaklık Değeri °C (Sürekli)	Sıcaklık Değeri °C (Ani)
T	-185 ile +300	-250 ile +400
	Hata Payı (°C)	
	-40 °C ile 125 °C arasında $\pm 0,5$	

2.2.3 Veri Toplama Cihazı

Veri toplama cihazı, sensörlerden gelen verilerin ölçülmesini sağlayan veri toplayıcı cihazdır. Bir veya daha fazla sensör birlikte kullanılabilir. Önceden belirlenmiş aralıkta istenilen fiziksel büyüklüğün ölçülmesini sağlar. Anlık olarak veya belirlenen zaman aralıklarında ölçüm yapılabilir. Veri toplama cihazı ve bilgisayar bağlantısı yapıp, ölçülen değerler bilgisayara kaydedilebilir. Sıcaklık, akım ve gerilim gibi büyüklüklerin ölçülmesinde kullanılır (Datalogger nedir?, b.t.).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda Keysight markasına ait 34972A model veri toplama cihazı tercih edilmiştir. Kullanılan model ısı çift sıcaklık ölçümleri, RTD ve termistör sıcaklık ölçümleri, AC/DC gerilim ve akım ölçümü, direnç ölçümünde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Saniyede 250 kanala kadar tarama yapabilme kapasitesine sahiptir (34972A data acquisition data logger, b.t.).

Veri toplama cihazında bulunan kanallardan; üç tanesi ısı çift sıcaklık ölçümü, bir tanesi gerilim ölçmek ve bir tanesi de akım ölçmek için toplamda beş adet kullanılmıştır. Kullanılan veri toplama cihazı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Keysight 34972A veri toplama cihazı (34972A data acquisition data logger, b.t.)

2.2.4 Ayarlanabilir Güç Kaynağı

Güç kaynakları, sistemlerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlamak için kullanılan cihazlardır. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda TT Technic markasına ait MCH305D-II model DC ayarlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan DC güç kaynağına ait özellikler Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4 Ayarlanabilir DC güç kaynağı özellikleri (DC güç kaynağı, b.t.)

Çıkış Voltajı	0-30V
Çıkış Akımı	0-5A
Ekran	3 haneli voltaj ve akım göstergesi
EnxBoyxYükseklik	260x165x300 mm
Ağırlık	10 kg

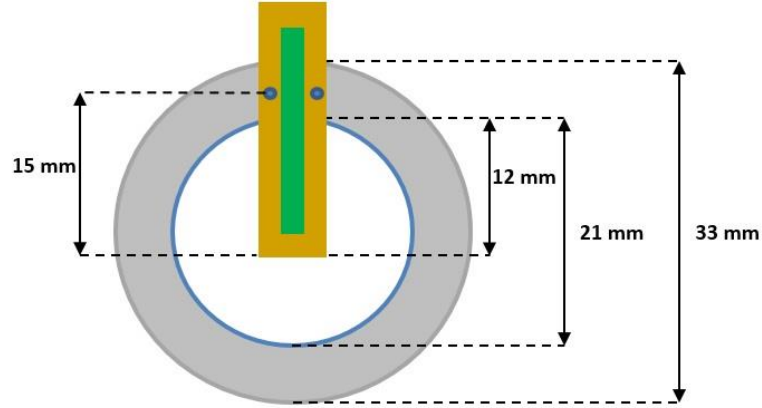
2.3 Deneyler

Deneylerde, ısıtıcı kapsülün su içine daldırılma derinliği 12 mm olarak seçilmiş ve boru içi su akış hızı değiştirilerek ısıtıcı kapsül içinde belirli noktalarda sıcaklık ölçümü yapılarak, sıcaklıkların boru içi su akış hızına bağlı değişimi belirlenmiştir. Deney düzeneğinin çalışır durumdaki bir görseli Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Deney düzeneği (Kişisel Arşiv, 2021)

Isıtıcı kapsülün yerleşimi ve sıcaklık ölçüm noktalarının akış doğrultusundaki konumları Şekil 2.2’de verilmiştir. Sıcaklık ölçüm noktalarının radyal doğrultudaki yerleşimi Şekil 2.8’de gösterildiği gibidir. Buna göre su akışından doğrudan etkilenmemesi ve ortalama bir değeri temsil etmesi için sıcaklık ölçüm noktası suyun temas ettiği yüzeyden daha geride bir nokta olarak seçilmiştir.



Şekil 2.8 Isıtıcı kapsül-boru yerleşimi ve sıcaklık ölçüm noktası

Her bir ölçümde çıkış vanası açıklığı değiştirilerek su debisi belirli bir miktara ayarlanmıştır. Bu şartlar altında akış borusu çıkışındaki su 0,5 litre ölçekli kaba aktarılarak su debisi hesaplanmıştır. Ölçümler sıcaklıkların denge durumuna ulaşmasından sonra başlamış ve her bir deney için yaklaşık 5'er dakika aralıkla 2-4 kez tekrarlanmıştır. Deney no, debi, kapsül sıcaklığı, su sıcaklığı ve elektriksel bilgidan oluşan ölçüm değerleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 Deney sonuçları

Deney No	Zaman	Debi		Kapsül Sıcaklığı		Su Sıcaklığı	Elektriksel Bilgi	
	Saat	Litre	Saniye	T ₁	T ₂	T _{Su}	Voltaj	Akım
1	14:15	0,5	5,79	27,2	28,3	17,4	8	1,8
	14:20	0,5	5,84	26,8	27,8	17,5	8	1,8
	14:25	0,5	5,77	26,7	27,7	17,7	8	1,8
Ortalama Değer:			5,8	26,9	27,93	17,53	8	1,8
2	15:00	0,5	10,3	29,2	30,1	18,3	8	1,8
	15:06	0,5	10,1	29,3	30,2	18,4	8	1,8
Ortalama Değer:			10,2	29,25	30,15	18,35	8	1,8
3	14:32	0,5	14,6	29,5	30,4	17,9	8	1,8
	14:37	0,5	14,2	30	30,9	17,9	8	1,8
	14:42	0,5	14,5	30,2	31,1	18	8	1,8
	14:46	0,5	14,6	30,5	31,5	18,1	8	1,8
Ortalama Değer:			14,48	30,05	30,98	17,98	8	1,8
4	15:54	0,5	21,1	33,8	34,9	19,1	8	1,8
	15:58	0,5	21,7	33,9	35	19,2	8	1,8
Ortalama Değer:			21,4	33,85	34,95	19,15	8	1,8
5	15:26	0,5	26,8	32,9	34,1	18,8	8	1,8
	15:31	0,5	26,4	33,6	34,7	18,8	8	1,8
	15:36	0,5	26,6	33,7	34,8	18,8	8	1,8
Ortalama Değer:			26,6	34,25	34,53	18,8	8	1,8

Ölçekli kap hacmi (V) 0,5 litre, dolum süresi (Δt) saniye olmak üzere hacimsel debi ($\dot{V}$) Denklem 2.1'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\dot{V} = \frac{V}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Akış borusu iç çapı (D) 21 mm olmak üzere akış borusu kesit alanı (A) 346,36 mm² olmaktadır.

Akışkan hızı (V) m/s olmak üzere Denklem 2.2'deki gibi hesaplanmıştır.

$$V = \frac{\dot{V}}{A} \quad (2.2)$$

Akışkan hızına bağlı olarak; 20°C'deki suyun dinamik viskozitesi (μ) 1,002 x 10⁻³ kg/m · s, yoğunluğu (ρ) 998 kg/m³ olmak üzere boru içi akış Reynolds sayısı (Re_{boru}) Denklem 2.3'teki gibi hesaplanmıştır.

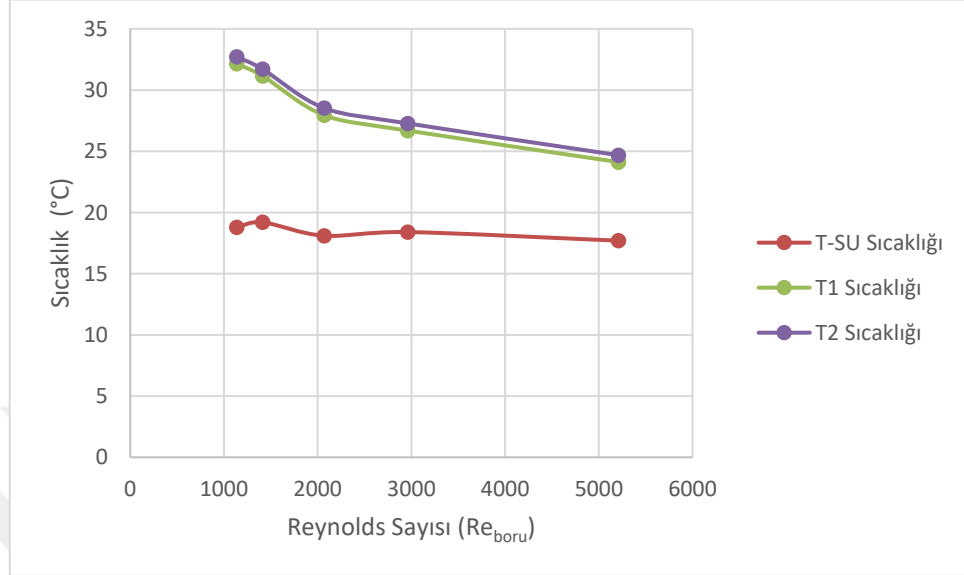
$$Re_{\text{boru}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (2.3)$$

Her bir deney grubu için ortalama değerlerden hareket ederek hesaplanan akışkan hızı, Reynolds sayısı, T_1 , T_2 ve T_{Su} sıcaklık değerleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6 Akışkan ortalama hızı, Reynolds sayısı ve sıcaklık değerleri

Deney No	Akışkan Hızı (m/s)	Reynolds (Re_{boru})	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_{Su} (°C)
1	0,249	5209	26,9	27,93	17,53
2	0,142	2962	29,25	30,15	18,35
3	0,0989	2069	30,05	30,98	17,98
4	0,067	1412	33,85	34,95	19,15
5	0,0543	1136	34,25	34,53	18,8

T_1 , T_2 ve T_{su} sıcaklıklarının Reynolds sayısına bağlı değişimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Reynolds sayısına bağlı sıcaklık değişimleri

Grafikten görüldüğü ve beklenebileceği gibi, su akış hızının artması ile birlikte kapsül sıcaklığında önce hızlı bir düşme olmuş, daha sonrasında ise bu sıcaklık düşmesi doğrusal olarak devam etmiştir.

2.4 Ölçüm Belirsizlikleri

Deneysel çalışmalarda sonuçlar; deneyin yapılma şekline, ölçüm aletlerinin kalibrasyonuna ve elde edilen sonuçların okunma şekline bağlıdır. Deneysel verilerin doğruluğunu etkileyen bu tür etkenlere deneysel hatalar denir.

Belirsizlik analizi, yapılan deneysel bir çalışmanın kesinlik yüzdesinin belirlenmesini sağlar. Deney sonuçlarından hesapla bulunan herhangi bir değişkenin toplam belirsizliğini veren ifade Kline ve McClintock'a göre Denklem 2.4'teki gibidir (Akan ve Ünal, 2021).

$$\delta R = \left[\sum \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \cdot \delta x_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

Burada R belirsizliği hesaplanacak olan değişken ve δR ise belirsizliğin büyüklüğüdür. R değişkeninin hesaplanmasında kullanılan ölçüm değişkenleri ve bu değişkenlerin deneysel belirsizlikleri ise sırası ile x_i ve δx_i ile gösterilmiştir.

Debi ölçümü suyun ölçekli kaba doldurulması ve sürenin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiş ve Denklem 2.1 kullanılarak debi hesaplanmıştır. Debi ölçümündeki belirsizlik Denklem 2.5 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\delta \dot{V} = \left[\left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \delta V \right)^2 + \left(\frac{V}{\Delta t^2} \cdot \delta \Delta t \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

Kabın ölçüm hassasiyetindeki belirsizlik 0,01 litre ve ölçüm süresindeki belirsizlik 0,2 saniye olarak değerlendirilmiştir. Dolum hacmi 0,5 litredir. İlk deneydeki dolum süresi 5,8 saniye olarak ölçülmüştür. 1 numaralı deney için ölçüm belirsizliği

$$\left[\left(\frac{0,01}{5,8} \right)^2 + \left(\frac{0,5 \cdot 0,2}{5,8^2} \right)^2 \right]^{1/2} = 3,44 \cdot 10^{-3} \text{ lt/s veya } 3,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \text{ olarak hesaplanır.}$$

Bu değer, hesaplanan debi ile karşılaştırılarak ilk deney için debi değerindeki belirsizliğinin %3,9 mertebesinde olduğu görülür. Diğer deneylerde ölçüm süresinin uzaması ile birlikte belirsizlik hem mutlak değer olarak, hem de oransal olarak azalmaktadır.

Deneylerde sıcaklık ölçümleri T-tipi ısı çifti kullanılarak yapılmıştır. T-tipi ısı çiftleri için ölçüm belirsizliği $0,5^\circ\text{C}$ alınabilmektedir. Akışkan ile ısıtıcı kapsül arasındaki sıcaklık farkı için olan ölçüm belirsizliği ise Denklem 2.5 kullanılarak $(0,5^2 + 0,5^2)^{1/2} = 0,71^\circ\text{C}$ hesaplanır.

BÖLÜM ÜÇ

DALDIRILMIŞ KAPSÜL ETRAFINDAKİ AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİN MODELLENMESİ

Boru içerisine daldırılmış kapsül etrafındaki akışın çözümlenebilmesi için sayısal bir model oluşturulmuştur. Modelde kullanılan süreklilik, momentum, ve enerji denklemleri ve sınır koşulları belirtilmiştir. Model sonuçları, deneylerde ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılarak yapılan analizlerin geçerliliği gösterilmiştir. Ayrıca akış hızları ve daldırma derinliğinin değiştirilmesi ile farklı durumlar için kapsül sıcaklık & hız dağılımları elde edilmiş ve ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.

3.1 Simülasyonun Oluşturulması

Deney düzeneğine ait fiziksel model ANSYS programı kullanılarak modellenmiş olup, deneylere ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda tanımlanan akış borusu ve kapsül ölçüleri önceki bölümlerde gösterildiği gibidir. Simülasyon sonuçlarını açıklarken sık sık kullanılacak olan Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Kapsül-Tepe yüzeyi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Kapsül-akış temas yüzeyi ve kapsül-tepe yüzeyi gösterimi

Simülasyon esnasında kullanılan malzemeler ve yoğunluk, özısı ve ısı iletkenliği, viskozite gibi özellikleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

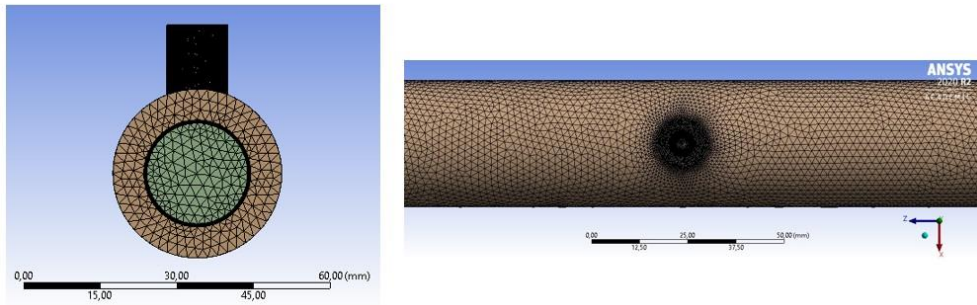
Tablo 3.1 Kullanılan malzemeler ve özellikleri-1

	Malzeme		
Özellik	Bakır	Paslanmaz Çelik	Polipropilen
Yoğunluk (kg/m ³)	8940	7820	1467
Özısı (J/kg·K)	385	461	900
Isı iletkenliği (W/m·K)	350	25	0,21

Tablo 3.2 Kullanılan malzemeler ve özellikleri-2

Akışkan	Su
Yoğunluk (kg/m ³)	998,2
Özısı (J/kg·K)	4182
Isı iletkenliği (W/m·K)	0,6
Viskozite (kg/m·s)	0,001003

Polipropilen boru, bakırdan imal edilmiş ısıtıcı kapsül, paslanmaz çelikten imal edilmiş ısıtıcı ve akış bölgesinden oluşan modelin mesh yapısı Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2 Model mesh görünümü

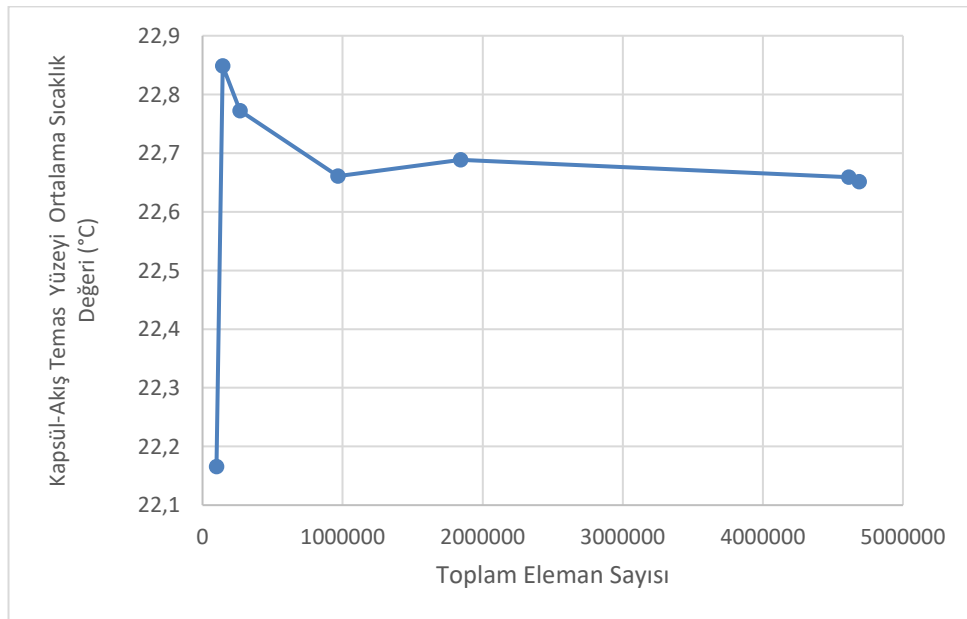
Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi polipropilen boruya kalın mesh atılırken, ısıtıcı kapsül ve çevresine daha ince mesh atılmıştır. Akışkanın yüzeye temas ettiği bölgelerde mesh yapısı daha sıkıdır.

Atılan mesh ve kullanılan eleman sayısına bağlı olarak Kapsül-Akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değerinin değişimi Tablo 3.3'te verilmiştir. Simülasyon esnasında kullanılan toplam eleman sayısı 4614381 olarak seçilmiştir.

Tablo 3.3 Toplam eleman sayısı ve kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değerleri

Toplam Eleman Sayısı	Kapsül-Akış Temas Yüzeyi Ortalama Sıcaklık Değeri (°C)
99634	22,172
144795	22,853
267174	22,771
966791	22,660
1842081	22,688
4614381	22,659
4688082	22,651

Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi Kapsül-Akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değeri toplam eleman sayısı 0 ile 1000000 arasındayken 22,17°C ile 22,66°C arasında değişmektedir. Eleman sayısı 200000 üzerine çıktığında ise Kapsül-Akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değeri 22,6°C civarlarında seyretmiştir. Bu durum toplam eleman sayısı olarak seçilen 4614381 meshin güvenli bölgede olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.3 Toplam eleman sayısı & kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklık değeri

3.2 Matematiksel Model ve Sınır Şartları

Bu kısımda ANSYS-Fluent sayısal modellemede kullanılan denklemler ve sınır şartları verilmiştir. z, r ve θ yönleri sırası ile eksenel, radyal ve açısıl (teğetsel) yönler olmak üzere silindirik koordinatlar için olan süreklilik denklemi Denklem 3.1’de gösterilmiştir.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(u_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Momentum denklemleri Navier-Stokes denklemleri olarak da adlandırılmaktadır. Sırası ile r, θ ve z yönlerindeki momentum denklemleri aşağıda verildiği gibidir:

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \cdot \frac{\partial(u_r)}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \cdot \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (3.2a)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \cdot \frac{\partial(u_\theta)}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r \cdot u_\theta}{r} + u_z \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (3.2b)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \cdot \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \cdot \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (3.2c)$$

Silindirik koordinatlardaki enerji denklemi ise Denklem 3.3 ile gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} & \rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & = k \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Kullanılan k-epsilon modeline göre momentum denklemlerinde hızın ortalama değerleri ve etkin viskozite kullanılmaktadır. Etkin viskozite değeri μ_{eff} ve μ_t türbülans viskozitesi olmak üzere etkin viskozite değeri hesabı Denklem 3.4'te verilmiştir.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.4)$$

Denklem 3.5'te; k türbülans kinetik enerjisini, ε Eddy yayılma oranını, c_μ ise model sabitini ifade etmek üzere türbülans viskozitesi hesabı verilmiştir.

$$\mu_t = c_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Modelde ısıtıcıda üretilen gücün hacimsel olarak eşit dağılımlı olduğu kabul edilmiştir. Isıtıcı gücü W, ısıtıcı hacmi $V_{ısıtıcı}$ olmak üzere birim hacimsel güç Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır.

$$q_{hacimsel} = \frac{W}{V_{ısıtıcı}} \quad (3.6)$$

Sınır şartları: Modelde Suyun boruya giriş hızı bir-biçimli olarak verilmiş, ayrıca çıkışta akışın radyal yöndeki bileşeninin olmadığı kabul edilmiştir;

$$z = 0 \quad 0 \leq r \leq D/2 \quad u_z = V_{\text{giriş}} \quad (3.7a)$$

$$z = L \quad 0 \leq r \leq D/2 \quad \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0 \quad (3.7b)$$

Girişteki su sıcaklığı bilinmekte ve boru dış yüzeyi yalıtımlıdır;

$$z = 0 \quad T = T_{\text{giriş}} \quad (3.8a)$$

$$r = D_{\text{dış}}/2 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3.8b)$$

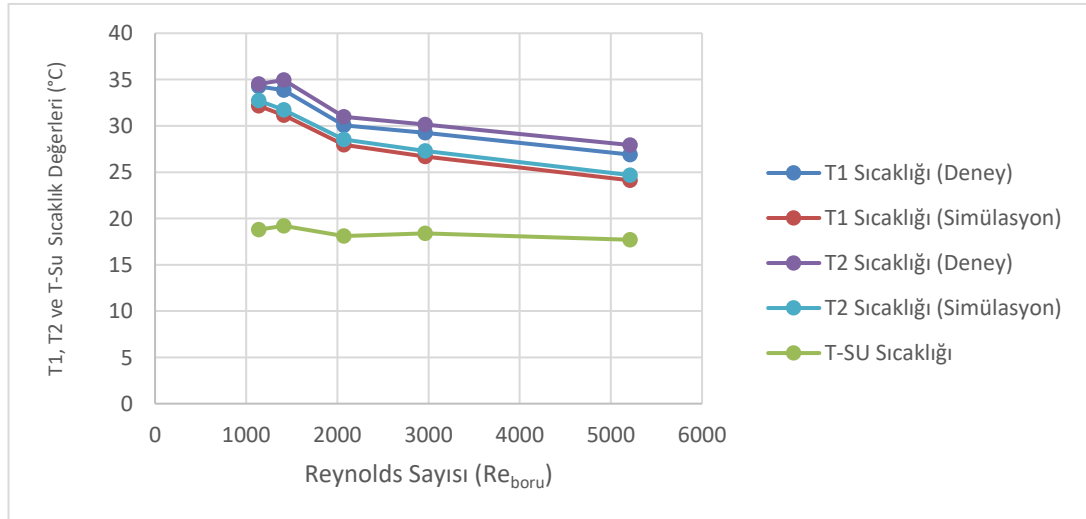
3.3 Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Modelin doğrulamasının yapılabilmesi için deneylerde ısı çiftlerinden ölçülen T_1 ve T_2 sıcaklıkları, modelde nokta koordinatları girilen T_1 ve T_2 ısı çiftlerinden okunan sıcaklıklar ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3.4'te deneylerde uygulanan ısıtıcı gücü, su sıcaklığı, Reynolds sayısı, T_1 ve T_2 ısı çiftlerinden okunan sıcaklık değerleri, simülasyonda T_1 ve T_2 ısı çiftlerinin bulunduğu noktalardan okunan sıcaklık değerleri bir arada verilmiştir.

Tablo 3.4 Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması

Numara	Deney					Simülasyon	
	Deney Güç (W)	Reynolds (Re_{boru})	T_{Su} (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)
1	14,4	5209	17,7	26,9	27,93	24,12	24,68
2	14,4	2962	18,4	29,25	30,15	26,69	27,28
3	14,4	2069	18,1	30,05	30,98	27,95	28,53
4	14,4	1412	19,2	33,85	34,95	31,16	31,72
5	14,4	1136	18,8	34,25	34,53	32,15	32,73

Şekil 3.4'te Reynolds sayısına bağlı olarak; T_1 ve T_2 ölçüm noktalarından okunan sıcaklık değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

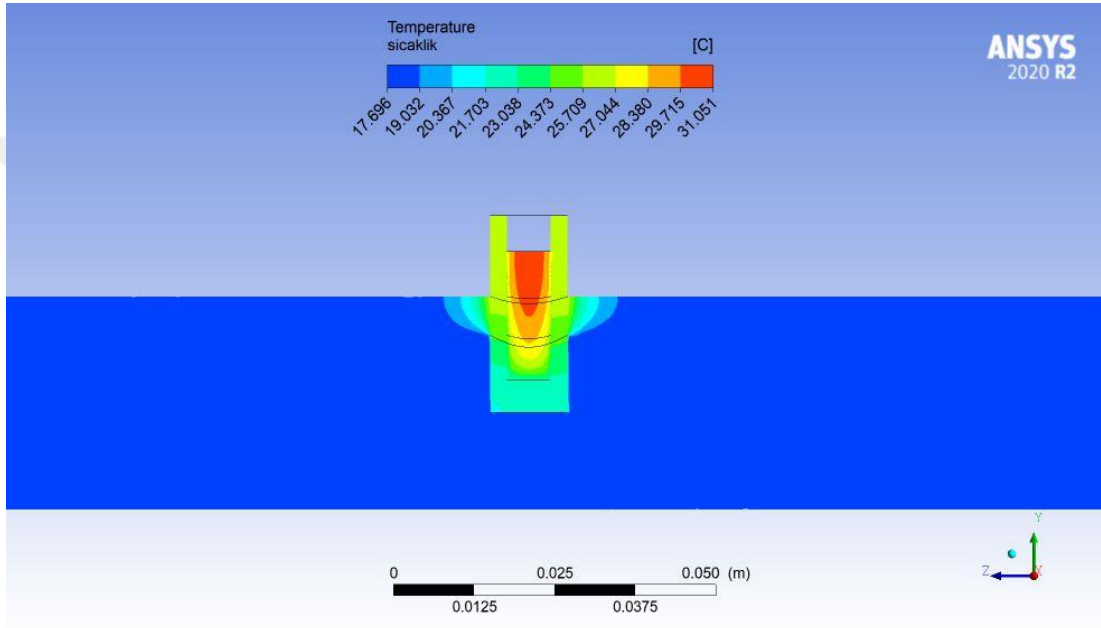


Şekil 3.4 Deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

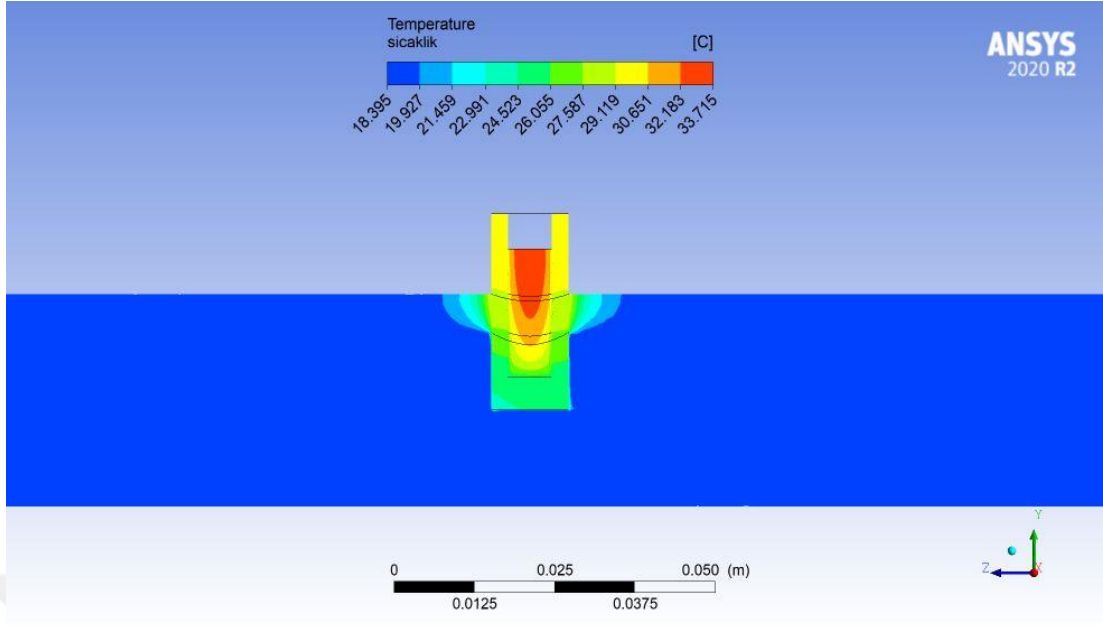
Elde edilen sonuçlar neticesinde deney ve model arasındaki sıcaklık farklarının 3,2°C'yi aşmadığı görülmüştür.

3.3.1 Kapsül Yüzeyi ve Çevresindeki Sıcaklık & Hız Dağılımının Gösterilmesi

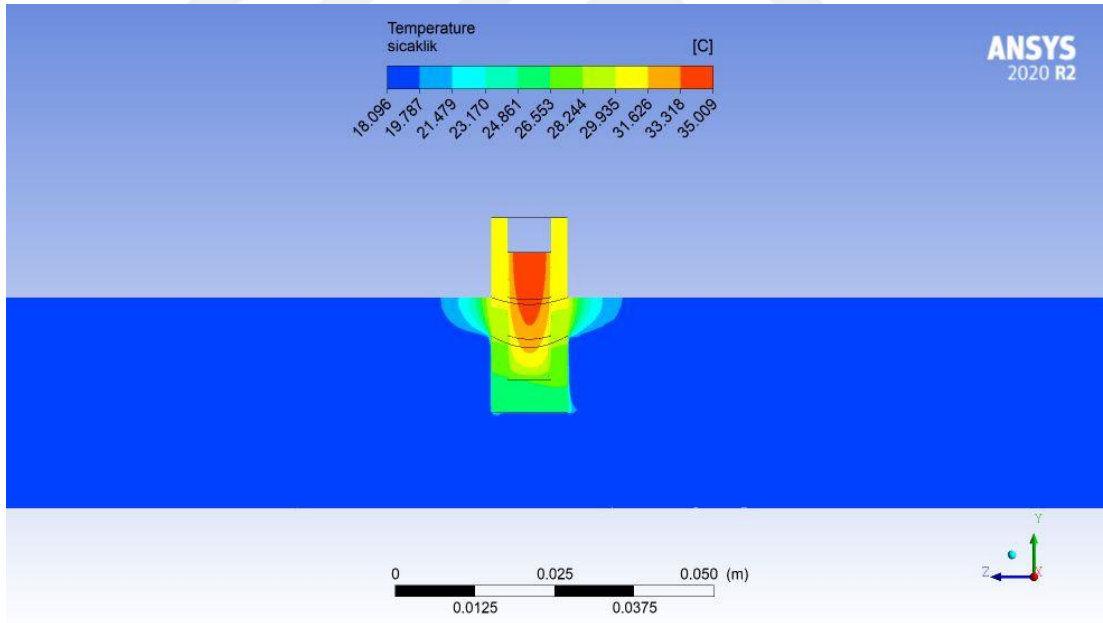
Kapsül etrafında oluşan sıcaklık dağılımına ait görseller sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



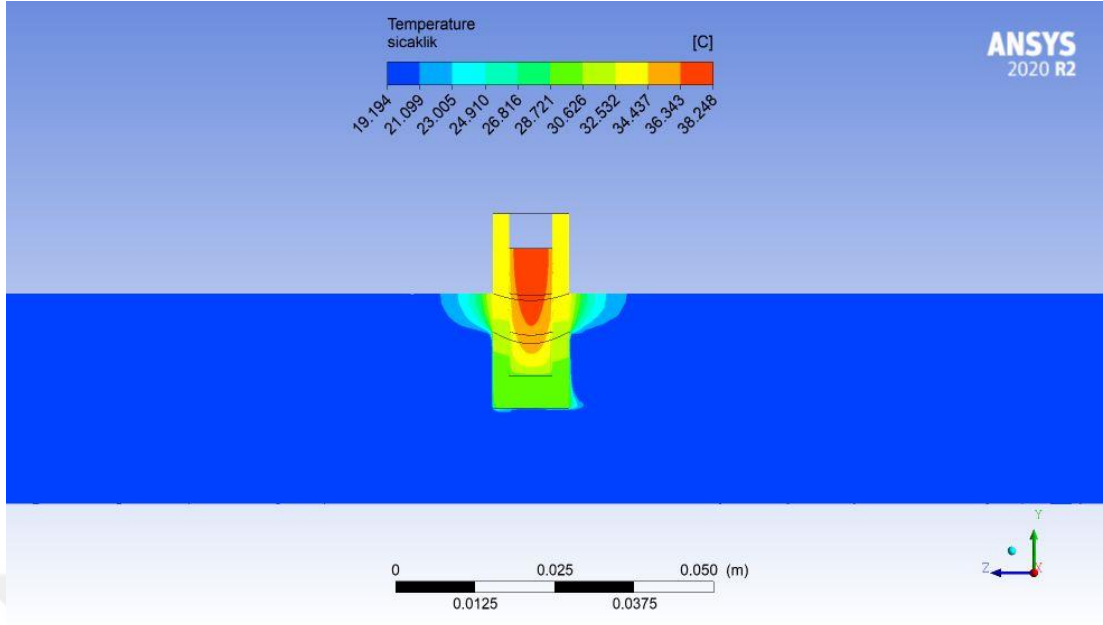
Şekil 3.5 $Re_{\text{boru}}=5209$ (ortalama hız 0,249 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı



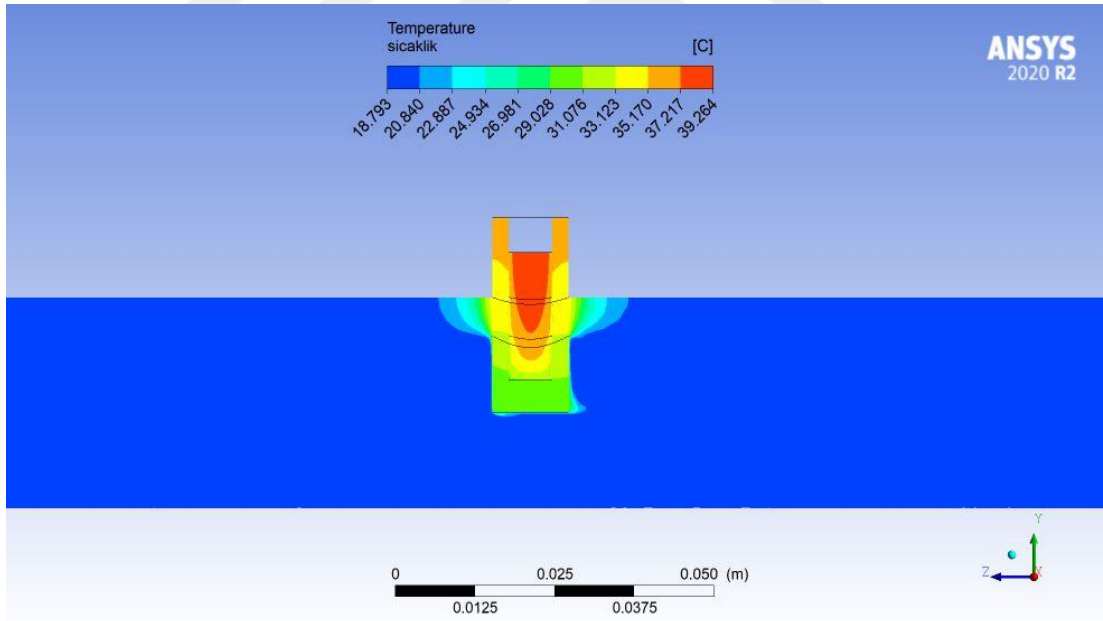
Şekil 3.6 $Re_{\text{boru}}=2962$ (ortalama hız 0,142 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı



Şekil 3.7 $Re_{\text{boru}}=2069$ (ortalama hız 0,0989 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı



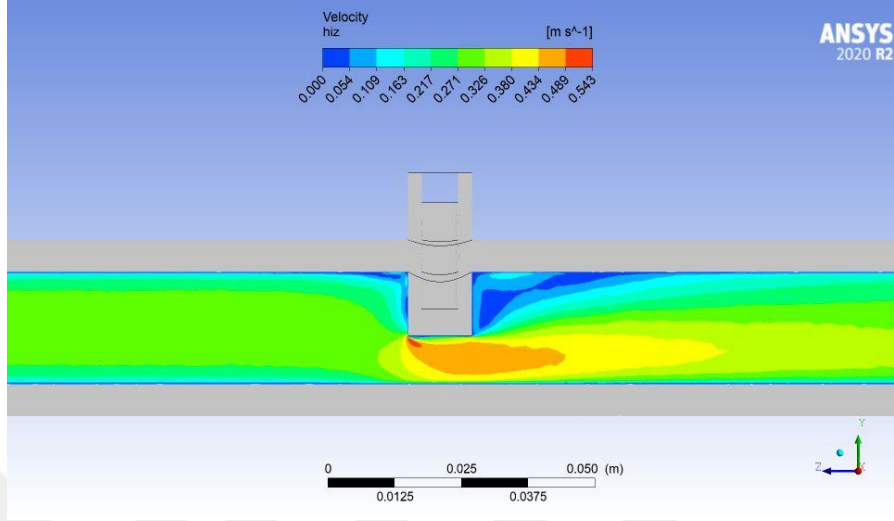
Şekil 3.8 $Re_{\text{boru}}=1412$ (ortalama hız 0,067 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı



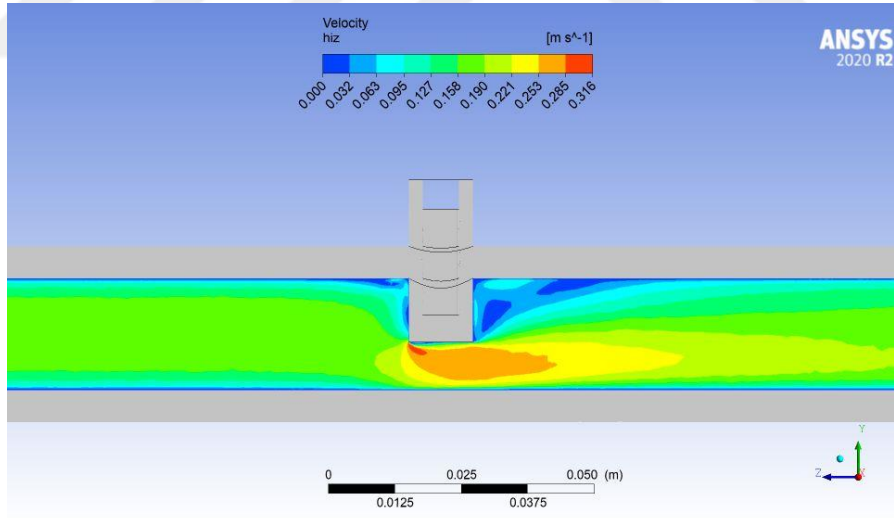
Şekil 3.9 $Re_{\text{boru}}=1136$ (ortalama hız 0,0543 m/s) için kapsül etrafında sıcaklık dağılımı

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Reynolds sayısı yüksek iken maksimum sıcaklık değeri 31°C iken, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi Reynolds sayısı düşüktüğü sıcaklık değeri artarak, maksimum sıcaklık 39°C olmuştur.

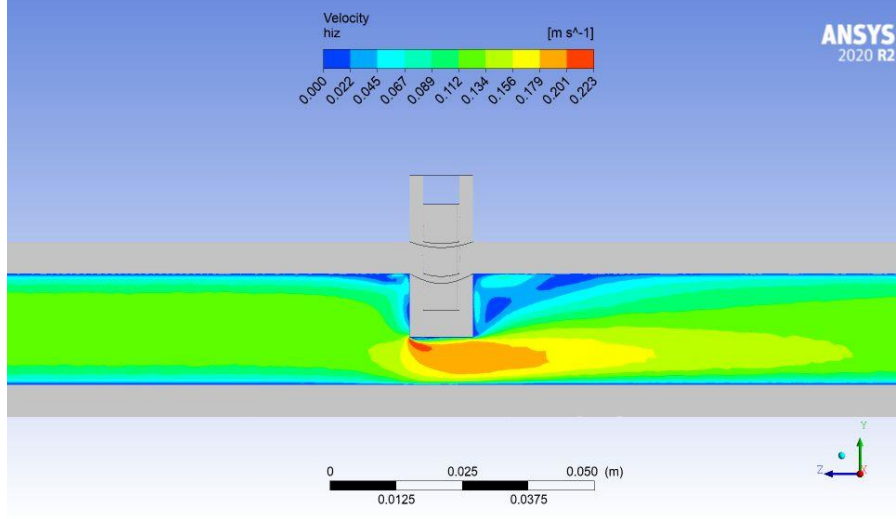
Kapsül etrafında oluşan hız dağılımına ait görseller sırasıyla Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te verilmiştir.



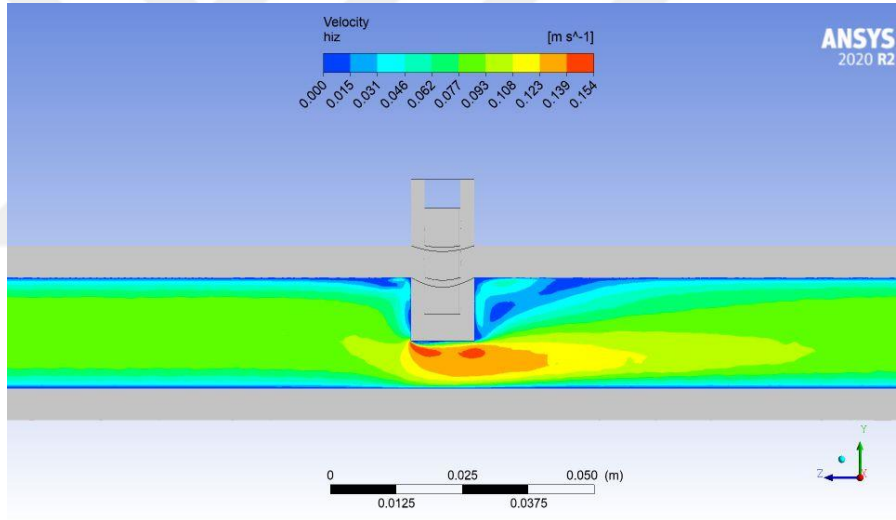
Şekil 3.10 $Re_{\text{boru}}=5209$ (ortalama hız 0,249 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı



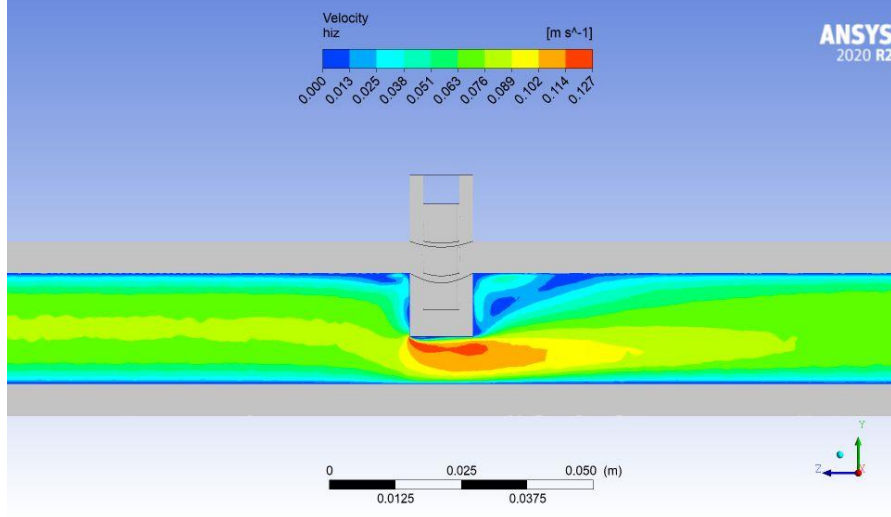
Şekil 3.11 $Re_{\text{boru}}=2962$ (ortalama hız 0,142 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı



Şekil 3.12 $Re_{\text{boru}}=2069$ (ortalama hız 0,0989 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı



Şekil 3.13 $Re_{\text{boru}}=1412$ (ortalama hız 0,067 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı

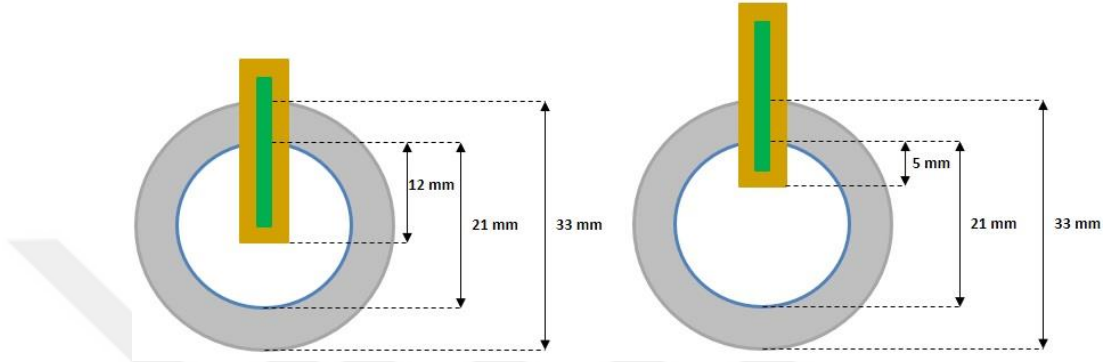


Şekil 3.14 $Re_{\text{boru}}=1136$ (ortalama hız 0,0543 m/s) için kapsül etrafında hız dağılımı

Şekillerde de görüldüğü gibi kapsülün daldırıldığı konumda akış alanı daralmıştır. Buna bağlı olarak maksimum hıza, daldırılan kapsülün hemen alt kısmında ulaşılmıştır. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi Reynolds sayısı yüksek iken maksimum hız değeri 0,543 m/s’ye ulaşmıştır. Şekil 3.14’te görüldüğü gibi Reynolds sayısı düştükçe maksimum hız değeri azalarak 0,127 m/s olmuştur.

3.4 Daldırma Derinliğinin Değiştirilmesi

Şekil 3.15'te görüldüğü gibi akış borusu iç çapının 21 mm olarak sabit tutulduğu durumda daldırma derinliği sırası ile 5 mm ve 12 mm alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.



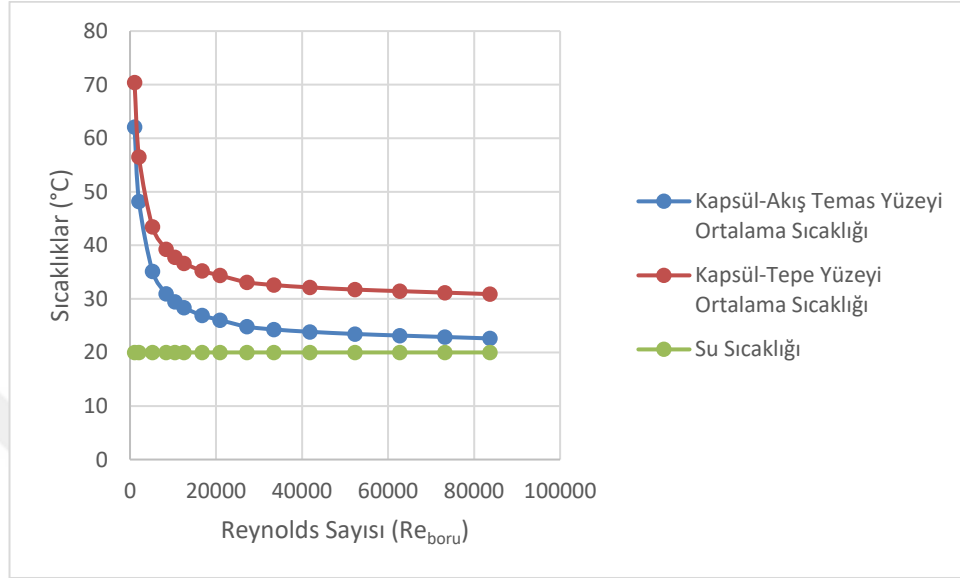
Şekil 3.15 Farklı daldırma derinliklerinin şematik gösterimi

Daldırma derinliğinin 5 mm ve 12 mm olduğu durumlar için hesaplanan Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklıkları Tablo 3.5’te verilmiştir.

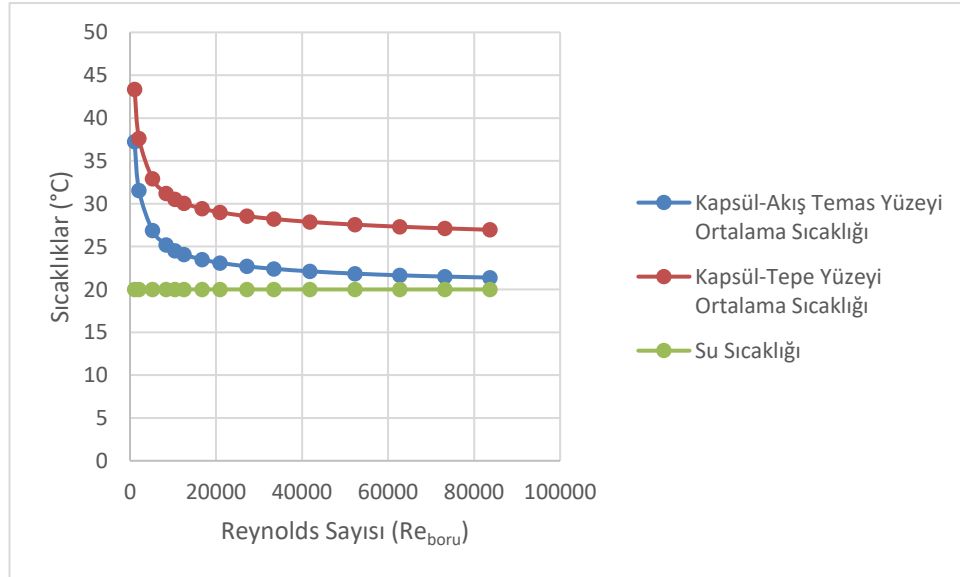
Tablo 3.5 Daldırma derinliğine bağlı sıcaklık değişimi

Reynolds Sayısı (Re_{boru})	Kapsül-Akış Temas Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı (°C)		Kapsül-Tepe Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı (°C)	
	Daldırma Derinliği 5 mm	Daldırma Derinliği 12 mm	Daldırma Derinliği 5 mm	Daldırma Derinliği 12 mm
1046	62,11	37,25	70,42	43,34
2092	48,21	31,55	56,5	37,61
5229	35,142	26,88	43,44	32,92
8366	30,967	25,19	39,27	31,2
10458	29,47	24,52	37,78	30,52
12550	28,34	24,07	36,65	30,05
16733	26,916	23,49	35,24	29,43
20916	26,046	23,1	34,37	29
27191	24,81	22,7	33,11	28,55
33466	24,29	22,41	32,59	28,22
41832	23,852	22,11	32,14	27,88
52290	23,449	21,84	31,74	27,56
62749	23,154	21,65	31,45	27,32
73207	22,883	21,5	31,17	27,13
83665	22,614	21,38	30,89	26,96

Daldırma derinliğinin 5 mm ve 12 mm olduğu durumlar için Kapsül-Tepe yüzeyi ve Kapsül-Akış temas yüzeyi ortalama sıcaklıklarının Reynolds sayısına bağlı değişimleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.16 5 mm daldırma derinliği için sıcaklık değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimi

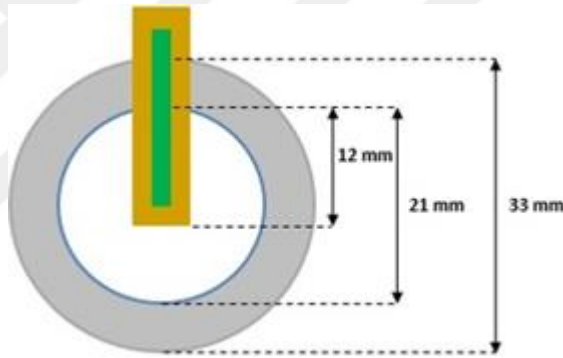


Şekil 3.17 12 mm daldırma derinliği için sıcaklık değerlerinin Reynolds sayısına bağlı değişimi

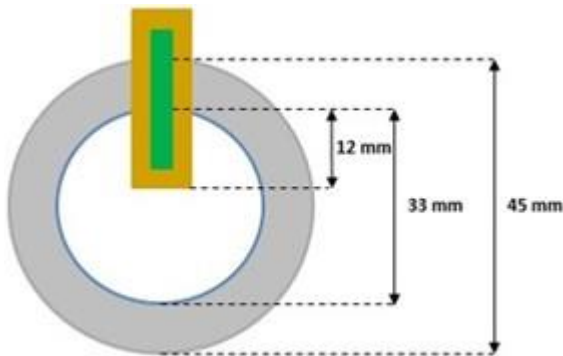
Beklenebileceği gibi daldırma derinliğinin artması ile sıcaklıklar düşmüştür. Her iki daldırma derinliği için de Reynolds sayısının artması ile birlikte sıcaklıklar azalmakta, Reynolds sayısının 20000'i aştığı durumlarda ise Kapsül-Akış temas yüzeyi sıcaklığı su yüzeyi sıcaklığına yaklaşarak yaklaşık yatay bir çizgi izlemektedir. Kapsül-Tepe yüzeyi ve Kapsül-Akış temas yüzeyi sıcaklıkları arasındaki fark ise yaklaşık sabit kalmaktadır.

3.5 Boru Çapının Değiştirilmesi

Çalışma 21 mm, 33 mm ve 44 mm olmak üzere 3 farklı boru iç çapı için tekrarlanmıştır. Şekil 3.18'de çap 21 mm (a), çap 33 mm (b) ve çap 44 mm (c) olarak gösterilmiştir.

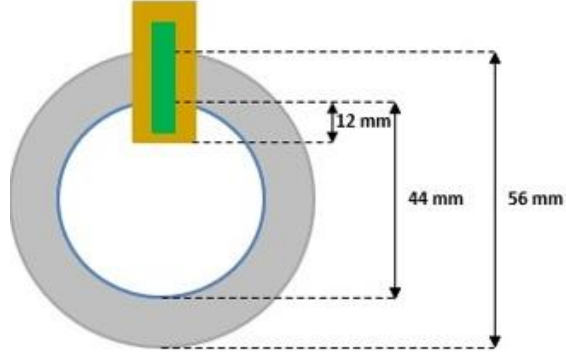


(a)



(b)

Şekil 3.18 Farklı boru çaplarında kapsül yerleşimi



(c)

Şekil 3.18 Devamı

Tablo 3.6, Tablo 3.7 ve Tablo 3.8’de daldırma derinliğinin 12 mm sabit olması ve boru iç çapının sırasıyla 21 mm, 33 mm ve 44 mm olduğu durumlar için, Kapsül-Tepe yüzeyi ve Kapsül-Akış temas yüzeyi sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Bu çalışmada karşılaştırma yapabilmek üzere Reynolds sayısı boru içi akışın yanı sıra kapsül dış çapına göre de tanımlanmış olup Denklem 3.8’de verilmiştir. Burada kapsül dış çapı 12 mm sabit değerdedir.

$$Re_{\text{kapsül}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_{\text{kapsül}}}{\mu} \quad (3.8)$$

Tablo 3.6 Kapsül sıcaklıklarının akış hızı ve Reynolds sayısı ile değişimi (boru iç çapı 21 mm)

Boru Çapı (mm)	Güç (W)	Hız (m/s)	$Re_{kapsül}$	Re_{boru}	T_{su} (°C)	Kapsül-Tepe Yüzeyi Sıcaklığı (°C)			Kapsül-Akış Temas Yüzeyi Sıcaklığı (°C)		
						T_{maks}	T_{min}	T_{ort}	T_{maks}	T_{min}	T_{ort}
21	20	0,05	598	1046	20	43,35	43,34	43,34	40,12	35,53	37,25
	20	0,1	1195	2092	20	37,61	37,61	37,61	34,49	29,9	31,55
	20	0,25	2988	5229	20	32,92	32,91	32,92	29,83	25,27	26,88
	20	0,4	4781	8366	20	31,2	31,19	31,2	28	23,61	25,19
	20	0,5	5976	10458	20	30,53	30,51	30,52	27,34	22,98	24,52
	20	0,6	7171	12550	20	30,06	30,05	30,05	26,87	22,57	24,07
	20	0,8	9562	16733	20	29,44	29,42	29,43	26,25	22,09	23,49
	20	1	11952	20916	20	29,01	28,99	29	25,82	21,79	23,1
	20	1,3	15538	27191	20	28,56	28,54	28,55	25,36	21,47	22,7
	20	1,6	19123	33466	20	28,23	28,21	28,22	25,03	21,24	22,41
	20	2	23904	41832	20	27,89	27,87	27,88	24,69	21,01	22,11
	20	2,5	29880	52290	20	27,57	27,55	27,56	24,38	20,81	21,84
	20	3	35856	62749	20	27,33	27,31	27,32	24,13	20,68	21,65
	20	3,5	41832	73207	20	27,14	27,12	27,13	23,94	20,58	21,5
	20	4	47808	83665	20	26,97	26,96	26,96	23,76	20,5	21,38

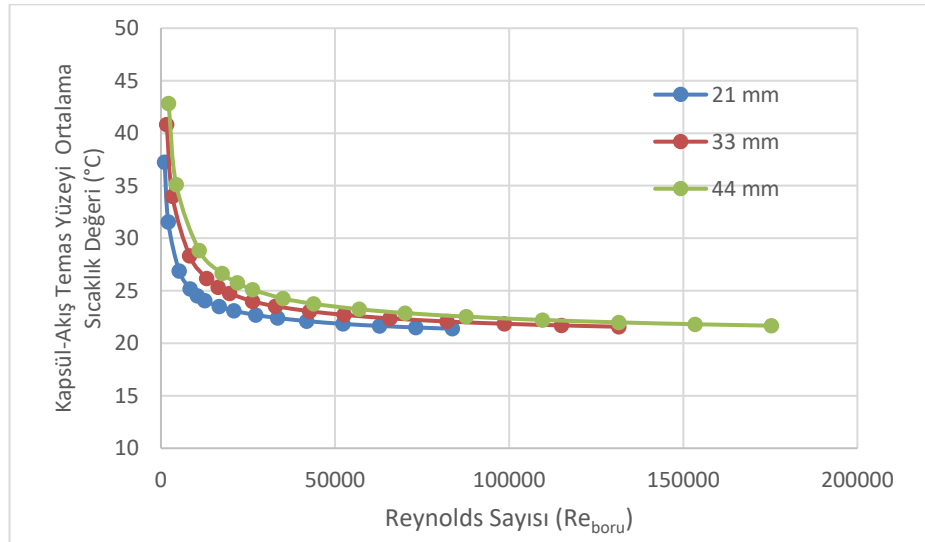
Tablo 3.7 Kapsül sıcaklıklarının akış hızı ve Reynolds sayısı ile değişimi (boru iç çapı 33 mm)

Boru Çapı (mm)	Güç (W)	Hız (m/s)	$Re_{kapsül}$	Re_{boru}	T_{su} (°C)	Kapsül-Tepe Yüzeyi Sıcaklığı (°C)			Kapsül-Akış Temas Yüzeyi Sıcaklığı (°C)		
						T_{maks}	T_{min}	T_{ort}	T_{maks}	T_{min}	T_{ort}
33	20	0,05	598	1643	20	47,34	47,33	47,33	43,42	36,93	40,83
	20	0,1	1195	3287	20	40,47	40,46	40,47	36,49	30,57	34
	20	0,25	2988	8217	20	34,77	34,76	34,76	30,79	26,46	28,33
	20	0,4	4781	13147	20	32,6	32,59	32,59	28,65	24,53	26,17
	20	0,5	5976	16434	20	31,75	31,74	31,75	27,82	23,72	25,34
	20	0,6	7171	19721	20	31,14	31,13	31,14	27,23	23,16	24,75
	20	0,8	9562	26295	20	30,36	30,35	30,35	26,45	22,48	24
	20	1	11952	32868	20	29,87	29,86	29,86	25,96	22,08	23,53
	20	1,3	15538	42729	20	29,34	29,33	29,34	25,43	21,72	23,05
	20	1,6	19123	52589	20	28,97	28,96	28,97	25,05	21,47	22,71
	20	2	23904	65737	20	28,58	28,57	28,58	24,66	21,22	22,37
	20	2,5	29880	82171	20	28,23	28,22	28,22	24,31	20,99	22,07
	20	3	35856	98605	20	27,97	27,95	27,96	24,05	20,84	21,86
	20	3,5	41832	115039	20	27,76	27,75	27,75	23,84	20,73	21,7
	20	4	47808	131473	20	27,58	27,57	27,58	23,66	20,65	21,57

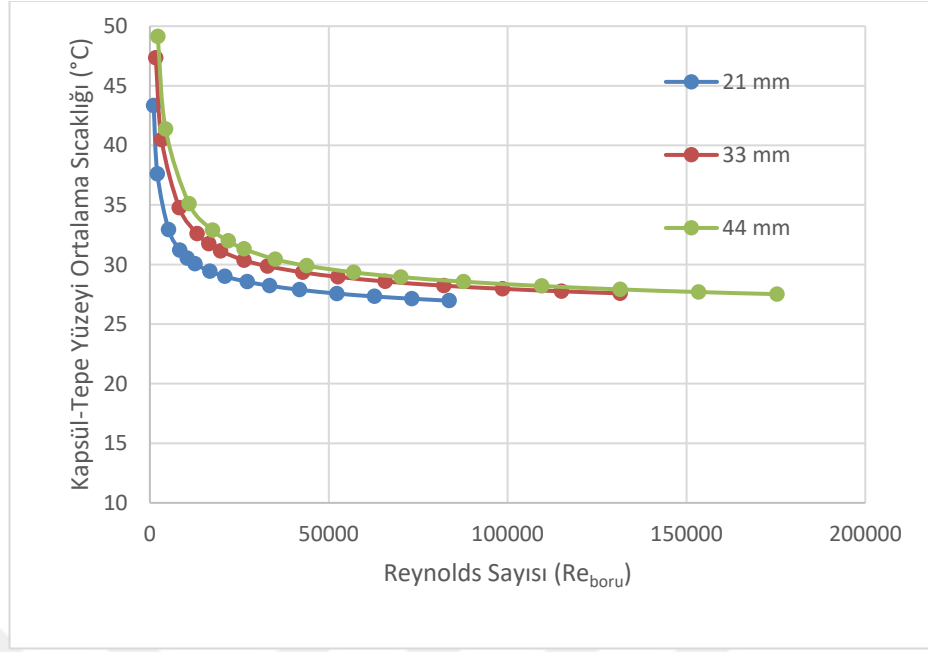
Tablo 3.8 Kapsül sıcaklıklarının akış hızı ve Reynolds sayısı ile değişimi (boru iç çapı 44 mm)

Boru Çapı (mm)	Güç (W)	Hız (m/s)	$Re_{kapsül}$	Re_{boru}	T_{su} (°C)	Kapsül-Tepe Yüzeyi Sıcaklığı (°C)			Kapsül-Akış Temas Yüzeyi Sıcaklığı (°C)		
						T_{maks}	T_{min}	T_{ort}	T_{maks}	T_{min}	T_{ort}
44	20	0,05	598	2191	20	49,14	49,13	49,14	45,26	38,62	42,84
	20	0,1	1195	4382	20	41,36	41,36	41,36	37,41	31,46	35,11
	20	0,25	2988	10956	20	35,09	35,09	35,09	31,15	26,72	28,85
	20	0,4	4781	17530	20	32,88	32,73	32,88	28,97	25	26,65
	20	0,5	5976	21912	20	31,98	31,97	31,98	28,09	24,17	25,76
	20	0,6	7171	26295	20	31,31	31,3	31,3	27,43	23,53	25,1
	20	0,8	9562	35059	20	30,44	30,43	30,44	26,58	22,76	24,26
	20	1	11952	43824	20	29,9	29,89	29,89	26,04	22,33	23,75
	20	1,3	15538	56972	20	29,34	29,34	29,34	25,48	21,89	23,24
	20	1,6	19123	70119	20	28,95	28,94	28,95	25,09	21,62	22,88
	20	2	23904	87649	20	28,56	28,55	28,56	24,7	21,37	22,53
	20	2,5	29880	109561	20	28,2	28,19	28,19	24,34	21,13	22,22
	20	3	35856	131473	20	27,92	27,91	27,91	24,06	20,96	21,99
	20	3,5	41832	153385	20	27,69	27,68	27,69	23,84	20,84	21,81
	20	4	47808	175297	20	27,52	27,51	27,51	23,66	20,74	21,67

Şekil-3.19’da Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Şekil 3.20’de Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklık değerlerinin boru çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına göre değişimleri verilmiştir.

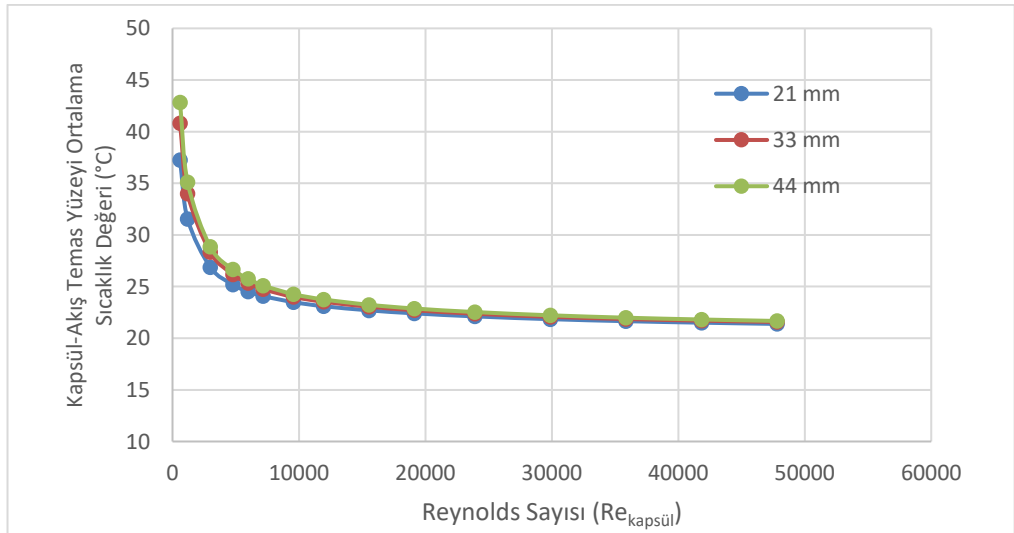


Şekil 3.19 Kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklığının boru çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi

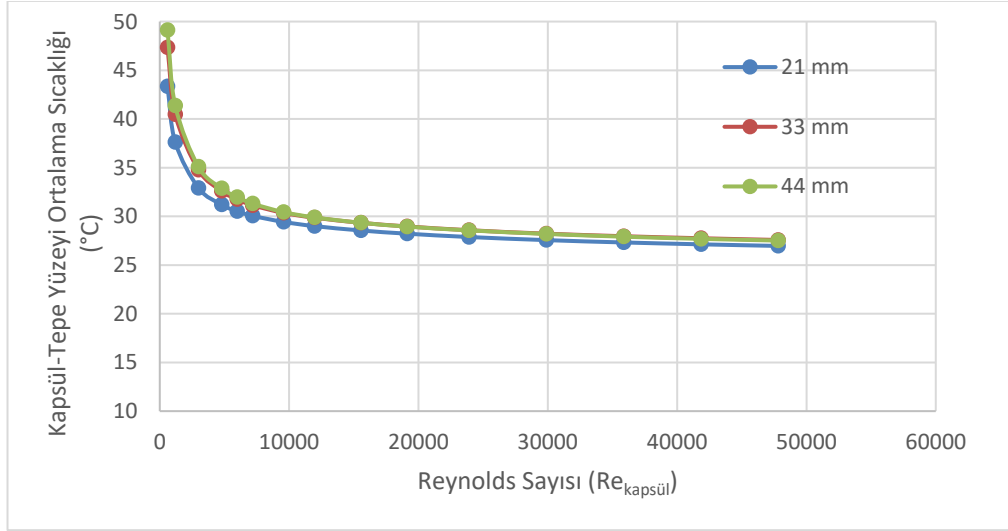


Şekil 3.20 Kapsül-tepe yüzeyi ortalama sıcaklığının boru çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi

Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklık değerlerinin kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına göre değişimleri ise sırası ile Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Kapsül-akış temas yüzeyi ortalama sıcaklığının kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi



Şekil 3.22 Kapsül-tepe yüzeyi ortalama sıcaklığının kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de görüldüğü gibi boru çapı arttıkça aynı Reynolds sayısı için gerekli akış hızı azalmakta, bunun bir sonucu olarak ısı transferi zayıflamakta ve Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Kapsül-Tepe yüzeyi sıcaklık değerleri yükselmektedir. Buna karşılık Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de, kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına göre çizilen grafiklerde, aynı Reynolds sayısı ve dolayısı ile aynı akış hızı için, farklı çaplardaki Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklıklarının yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir. Bu durum, ısı transferinin iç boru çapından daha çok, kapsül çapına bağlı olduğuna işaret etmektedir.

3.6 Kapsül Yüzeyi Isı Transfer Katsayısının Değişimi

Çalışmada son olarak, ısı transfer katsayısının daldırma derinliği ve akış hızına bağlı değişimi incelenmiştir. Yüzeyden olan ısı taşınım katsayısı h , kapsülün toplam ısı yükü Q , Kapsül-Akış temas yüzeyi ortalama sıcaklığı $T_{Yüzey}$ ve su sıcaklığı T_{Su} olmak üzere Denklem 3.9’daki gibi hesaplanır.

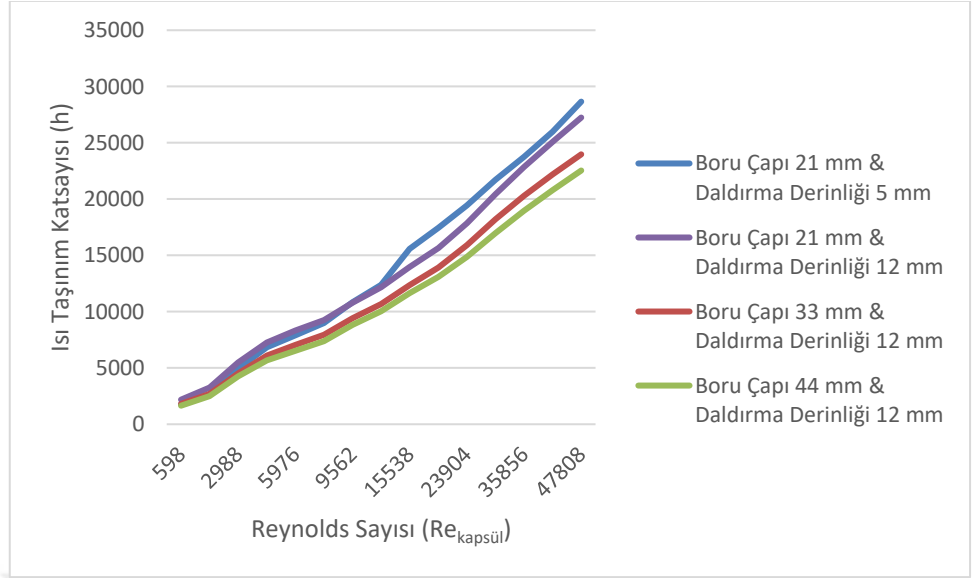
$$h = \frac{Q}{A_{Yüzey} \cdot (T_{Yüzey} - T_{Su})} \quad (3.9)$$

Kapsül-Akış temas yüzey alanı A, kapsülün su ile temas eden yan ve alt yüzeylerinin toplam alanı olup, daldırma derinliğinin 5 mm olduğu durum için 266,97 mm², daldırma derinliğinin 12 mm olduğu durum için 530,86 mm² olmaktadır.

Yapılan farklı simülasyonlar için hesaplanan Kapsül-Akış temas yüzeyi ısı taşınım katsayısı değerleri Tablo 3.9’da toplu olarak verilmiştir. Reynolds sayısının hesaplanmasında kapsül çapı esas alınmıştır.

Tablo 3.9 Isı taşınım katsayısının farklı daldırma derinlikleri ve farklı çaplar için kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi

Boru Çapı (mm)	21	21	33	44
Daldırma Derinliği (mm)	5	12	12	12
Re _{kapsül}	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² · K)	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² · K)	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² · K)	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² · K)
598	1779,026	2183,881	1809,055	1649,425
1195	2655,611	3263,177	2690,354	2493,923
2988	4947,483	5476,033	4522,358	4257,874
4781	6830,928	7264,706	6103,993	5663,278
5976	7910,748	8329,3	7052,429	6536,477
7171	8982,588	9248,936	7937,482	7387,637
9562	10832,097	10784,581	9428,069	8834,575
11952	12390,801	12159,728	10676,254	10035,055
15538	15574,799	13974,032	12358,999	11636,238
19123	17462,654	15650,774	13916,087	13099,123
23904	19448,283	17844,541	15912,814	14875,817
29880	21720,726	20443,779	18205,843	16980,95
35856	23752,31	22844,75	20300,31	18961,28
41832	25985,01	25084,353	22190,759	20797,72
47808	28659,061	27244,372	23976,369	22539,358

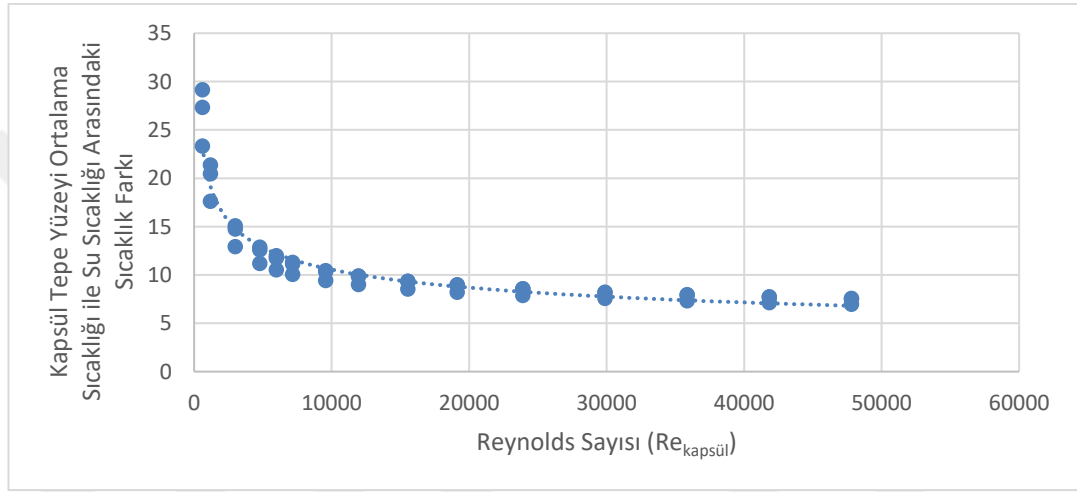


Şekil 3.23 Isı taşınım katsayısı değişimi

Isı taşınım katsayısının kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi ise Şekil 3.23'te verilmiştir. Bekleneceği gibi, Reynolds sayısının artması ile ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Aynı Reynolds sayısı ve sabit daldırma derinliğinde ise, boru çapı arttıkça ısı taşınım katsayısında bir azalma gözlenmiştir. Bunu bir nedeni olarak, boru cidarına yakın kısımlarda türbülans etkilerinin daha zayıf olması söylenebilir.

3.7 Kapsül Tepe Sıcaklığı Değişiminin Fonksiyon Olarak Türetilmesi

Şekil 3.22’de görüldüğü gibi, sabit daldırma derinliği için Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklığı esas olarak kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına göre değişmekte olup, boru çapının etkisi yok sayılabilir düzeydedir. Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki farkın $Re_{\text{kapsül}}$ sayısına bağlı değişimi Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



Şekil 3.24 Kapsül-tepe yüzeyi ortalama sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki farkın kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi

Sıcaklık farkının Reynolds sayısının bir kuvveti olarak değiştiği göz önüne alınarak yapılan regresyon analizinde katsayılar Denklem 3.10’daki gibi hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre belirleme katsayısı R^2 değeri 0,9503 olmaktadır.

$$T_{\text{Tepe}} - T_{\text{Su}} = 139,7 \cdot (Re_{\text{kapsül}})^{-0,28} \quad (3.10)$$

Diğer yandan, yapılan simülasyon çalışmalarında Kapsül-Tepe yüzeyi en yüksek ve en küçük sıcaklıkları arasındaki fark $0,02^{\circ}\text{C}$ ’yi geçmemiştir. Bu durum, Kapsül-Tepe yüzeyi sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki farkın ölçülmesi ile boru içi ortalama akış hızının hesaplanabileceğini göstermektedir.

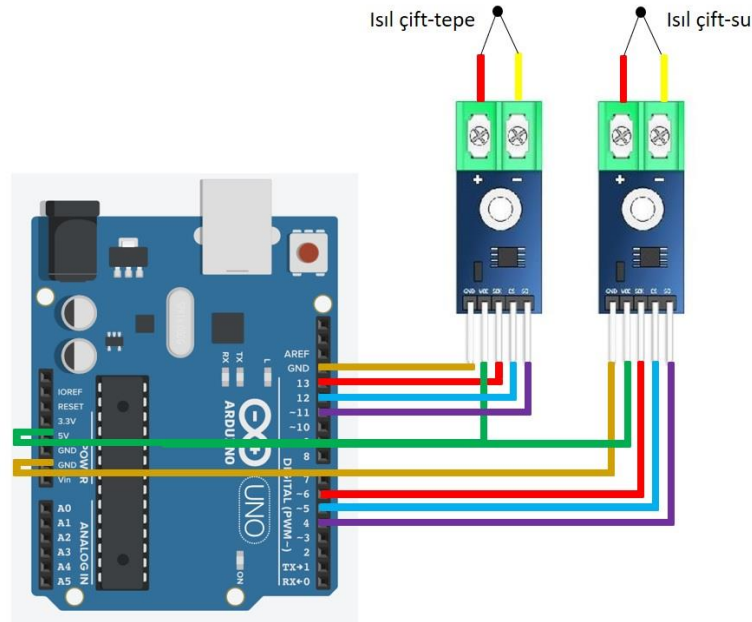
BÖLÜM DÖRT

ÖLÇÜM DEVRESİ PROTOTİPİNİN ARDUİNO KULLANILARAK OLUŞTURULMASI

Kapsül-Tepe yüzey ortalama sıcaklığı ve simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen bağıntının kullanılması ile Reynolds sayısı ve su akış hızını çıktı olarak veren bir Arduino devresinin tasarımı yapılmıştır. Prototip devre kurularak test edilmiştir.

4.1 Prototip Devre Şeması

Arduino Uno, iki adet MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülü ve iki adet K tipi ısıl çiftten oluşan devre şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. İlk ısıl çift kapsül tepe sıcaklık değerini ölçmekte olup, ikinci ısıl çift ise su sıcaklığını ölçmektedir.



Şekil 4.1 Devre şeması

MAX6675 ısı çift-tepe sırasıyla; GND-GND, VCC-5V, SCK-D13, CS-D12, S0-D11 olacak şekilde kablo bağlantıları yapılmıştır. MAX6675 ısı çift-su ise sırasıyla; GND-GND, VCC-5V, SCK-D6, CS-D5, S0-D4 olacak şekilde kablo bağlantıları yapılmıştır. Isıl çift ve MAX6675 modül arasındaki bağlantı da Şekil 4.1’de gösterildiği gibi yapılmıştır.

4.2 Kullanılan Elektronik Devre Elemanlarının Tanıtılması

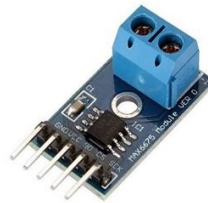
Prototip içerisinde kullanılan temel bileşenler; Arduino Uno, MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülü ve K tipi ısı çift bileşenleri tanıtılmıştır.

4.1.1 Arduino Uno

Arduino Uno, çeşitli elektronik projelerinde kullanılabilen, maliyeti düşük, esnek ve kolay programlanabilen açık kaynaklı bir mikrodenetleyicidir. Arduino Uno ile çeşitli sensörlerden veri okunarak, bu verilere bağlı olarak çeşitli aktüatörler kontrol edilebilmektedir. Arduino Uno, Atmega328 mikrodenetleyicisine, 6 adet analog giriş pini ve 6’sı PWM çıkışı olarak kullanılabilen 14 adet dijital Giriş/Çıkış pinine sahiptir (What is Arduino Uno?, b.t.).

4.1.2 K Tipi Sıcaklık Sensör Modülü

MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülü aracılığıyla K tipi ısı çiftin çıkışı ölçülerek Arduino’ya aktarılır. Şekil 4.2’de CS, SO, SCK, VCC ve GND pinlerini içeren MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülü verilmiştir.



Şekil 4.2 MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülü (MAX6675 K-tipi sıcaklık modülü, b.t.)

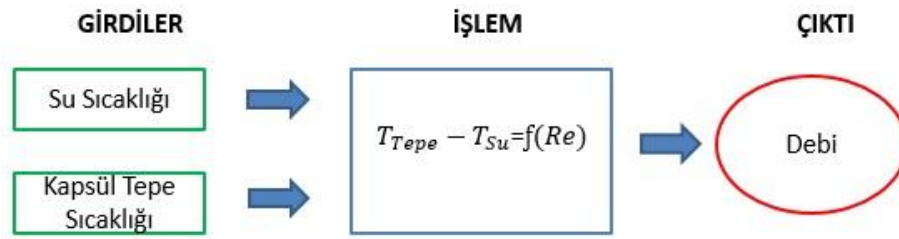
Devrede sıcaklıkların ısı çifti üzerinden ölçülmesi için kullanılan MAX6675 K tipi sıcaklık sensör modülüne ait özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir (MAX6675 K-tipi sıcaklık modülü, b.t.)

Şekil 4.1 MAX6675 sensör modülü özellikleri (MAX6675 K-tipi sıcaklık modülü, b.t.)

Besleme Gerilimi	3,3 veya 5 V DC
Çalışma Akımı	50 mA
Ölçüm Aralığı	0-1023 °C
Uyumlu Sensör	K tipi ısı çifti

4.3 Programın İşleyişi

Sistem modellemesi üç farklı aşamada ele alınmıştır. Bunlardan ilki girdiler kısmıdır. Su sıcaklığı ve kapsül tepe sıcaklığı sensörler vasıtasıyla okunarak sisteme girdi olarak gelmektedir. Ardından kapsül daldırma derinliği (L), akış borusu iç çapı (D) ve Reynolds sayısına bağlı fonksiyonlar ile işlenerek çıktılar kısmında debi elde edilmektedir. Şekil 4.3’te sistem çalışması şematik gösterimi verilmiştir.

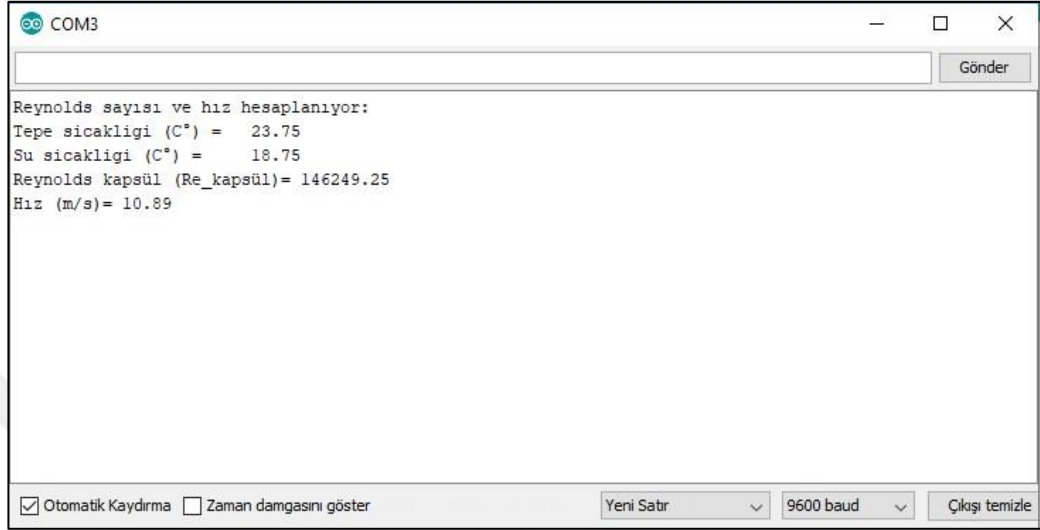


Şekil 4.3 Sistem modellenmesi şematik gösterim

$Re_{kapsül}$ (Re) değerinin bilinmesi ile; akış borusu iç çapı D (m), suyun dinamik viskozitesi μ (kg/m · s), yoğunluğu ρ (kg/m³) olmak üzere boru içi su akış hızı V_{Su} (m/s) Denklem 4.1’deki gibi hesaplanır.

$$V_{Su} = \frac{\mu \cdot Re_{Kapsül}}{\rho \cdot D} \quad (4.1)$$

Su sıcaklığı ve Kapsül-Tepe sıcaklığını ısı çiftleri ile ölçerek türetilen bağıntılar vasıtasıyla kapsül etrafındaki akış için Reynolds sayısını ve su hızını veren programa ait Arduino kodu Ek-1’de verilmiştir. Ekran çıktısı Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4 Ekran çıktısı

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ

Bu çalışmada, bir boru içine daldırılmış kapsül sıcaklığının akış hızına bağlı değişimi incelenmiştir. Deneylerde, kapsül üzerindeki ölçüm noktası sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki fark akış hızına bağlı olarak 9,37°C ile 15,8°C arasında değişmiştir. Yapılan simülasyonlarda ise ölçüm noktası sıcaklıkları deney sonuçlarına göre yaklaşık 3°C daha düşük çıkmış ve akışkan sıcaklığı ile olan fark 6,42°C ile 13,93°C arasında hesaplanmıştır. Bu durum, deneysel sonuçlara göre olan sıcaklık farkı ile yaklaşık %11,8 ile %31,4 arasında bir sapmaya işaret etmektedir. Bunun bir nedeni, kullanılan 3B yazıcı ısıtıcısının hacimsel ısıtıcı olarak modellenmesi ve tüm yapısının homojen kabul edilmesidir. Daha iyi bir modelleme için 3B yazıcı ısıtıcısının yapısı daha ayrıntılı olarak göz önüne alınmalıdır. Sapmanın ikinci bir nedeni, yaklaşık 2,5 mm cidar kalınlığına sahip bakır kapsül içerisindeki sıcaklık ölçüm noktasının içerideki ısıtıcı ve dışarıdaki akışkan yüzeyler arasındaki konumudur. Sıcaklık ölçüm noktasının yerinin tanımlanmasında küçük farklar olması, ölçüm noktası sıcaklığında sapmalara neden olacaktır.

Modelleme çalışmasında farklı ısıtıcı kapsül daldırma derinliği ve akış borusu çapları için Kapsül-Akış temas yüzeyi ve Kapsül-Tepe yüzeyi sıcaklıklarının akışkan hızına göre değişimi belirlenmiştir. Kapsül-Akış temas yüzeyi sıcaklığı, akışkanın geliş doğrultusu ve göz önüne alınan noktanın boru cidarına uzaklığına bağlı olarak 42°C'a kadar farklılıklar gösterebilmektedir. Akışkanın tam tersi yönünde (boru cidarından dışarı doğru) olan ve adyabatik yüzey olarak modellenen tepe yüzeyinde ise, 0,15°C aşmayan küçük sıcaklık farkları hesaplanmıştır. Çalışılan akışkan hızı aralığında, tepe yüzeyi ortalama sıcaklığının akışkan sıcaklığı arasındaki fark 1,38°C ile 50,42°C arasında değişmiştir.

Çalışmanın bir diğer çıktısı olarak, daldırılmış temas yüzeyi ile akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Bekleneceği gibi akışkan hızının artması ile ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Burada dikkat çeken bir sonuç kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısının sabit kalması durumunda, ortalama ısı taşınım katsayısının değişiminin sınırlı olmasıdır. Yani, daldırılmış boru etrafındaki ısı transferini, esas olarak daldırılmış borunun çapı ve akış hızı belirlemektedir. Akış borusunun çapının etkisi daha düşüktür.

Kapsül-Tepe yüzeyi ortalama sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki farkın kapsül çapına göre hesaplanan Reynolds sayısına bağlı değişimi türetilmiş olup regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan regresyon analizi sonucunda belirleme katsayısı olan R^2 değerinin 0,9503 ile 1 değerine yakın yüksek bir değer çıktığı görülmüştür. Arduino kullanılarak ölçüm devresi tasarlanmıştır. Ölçüm devresi aracılığı ile Kapsül-Tepe yüzeyi sıcaklığı ve su sıcaklığı okunarak; kapsül çapına göre Reynolds sayısı ve su akış hızı çıktı olarak alınabilmektedir.

Sonuç olarak, daldırılmış ısıtıcı üzerindeki sıcaklığın ölçülmesi yönteminin özellikle düşük akış hızlarında sıvı akışlarının debisini ölçmekte kullanılabileceği görülmektedir. Ancak yöntemin hassasiyetle uygulanabilmesi için, ısıtıcının yapısı bilinmeli ve farklı akışkanlar için çalışmalar tekrarlanarak uygun bağıntılar türetilmelidir.

KAYNAKLAR

34972A data acquisition data logger, (b.t.). 13 Temmuz 2021, <https://www.keysight.com/en/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?cc=TR&lc=eng>

3D printer extruder isitici, (b.t.). 11 Temmuz 2021, <https://www.robolinkmarket.com/3d-printer-extruder-isitici-12v>

Akan, A. E. ve Ünal, F. (2021). An application to error and uncertainty analysis in industrial type dryer experiments. *Turkish Journal of Engineering*, 5(2), 75–80. doi:10.31127/tuje.679377

Amina, B. ve Ahmed, H. (2017). An overview of thermal mass flowmeters applicability in oil and gas industry. *Energy Procedia*, 141, 299–303. doi:10.1016/j.egypro.2017.11.109

Boer, A. I. H. J. (1995). *Thermal flow sensor for high liquid flows*. 17 Mayıs 2021, <http://www.tuncell.com/userfiles/l30.pdf>

Bruun, H. H. (1996). Hot-wire anemometry: principles and signal analysis. *Measurement Science and Technology*, 7(10), 209–232. doi:10.1088/0957-0233/7/10/024

Datalogger nedir?, (b.t.). 9 Ağustos 2021, <https://www.rst-elektronik.com/blog/datalogger-nedir>

DC güç kaynağı, (b.t.). 13 Ağustos 2021, <https://www.elektronikekipman.com/DC-Guc-Kaynagi,PR-320.html>

Ecın, O., Malik, I. Y., Malek, M., Hosticka, B. J. ve Grabmaier, A. (2011). *Thermo-fluidic impulse response and TOF analysis of a pulsed hot wire*. 1 Nisan 2021, <https://uk.comsol.com/paper/thermo-fluidic-impulse-response-and-tof-analysis-of-a-pulsed-hot-wire-11842>

Hot wire anemometer, (b.t.). 31 Ağustos 2021, <https://circuitglobe.com/hot-wire-anemometer.html>

Hot wire theory, (b.t.). 19 Ağustos 2021, https://www.efunda.com/designstandards/sensors/hot_wires/hot_wires_theory.cfm

Laurantzon, F., Tillmark, N. ve Alfredsson, P. H. (2012). *What does the hot-wire measure?*. 12 Ağustos 2021, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:526077/FULLTEXT01.pdf>

Maji, D., Vunnam, R. S., Ravikumar, C. P. ve Das, S. (2011). *Simulation of MEMS based flexible flow sensor for biomedical application*. 11 Temmuz 2021, <https://www.comsol.com/paper/simulation-of-mems-based-flexible-flow-sensor-for-biomedical-application-11368>

MAX6675 K-tipi sıcaklık modülü, (b.t.). 03 Ekim 2021, <https://www.direnc.net/max6675-k-tipi-sicaklik-modulu>

Morris, S. C. ve Foss, J. F. (2003). Transient thermal response of a hot-wire anemometer. *Measurement Science and Technology*, 14(3), 251–259. doi:10.1088/0957-0233/14/3/302

Nguyen, N. T. (2005). A novel thermal sensor concept for flow direction and flow velocity. *IEEE Sensors Journal*, 5(6), 1224–1234. doi:10.1109/JSEN.2005.858924

Shekter, Y. L. (2011). *Hot-wire and hot-film anemometers*. 12 Haziran 2021, <https://www.thermopedia.com/content/853/>

Termokupl, (b.t.). 14 Temmuz 2021, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Termokupl>

Thermal mass flow sensors, theory of operation & design, (b.t.). 6 Ağustos 2021, <https://www.omega.com/en-us/resources/thermal-mass-flow-working-principle-theory-and-design>

Tison, S. A. (1996). A critical evaluation of thermal mass flow meters. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 14(4), 2582–2591. doi:10.1116/1.579985

van Honschoten, J. W., Svetovoy, V. B., Krijnen, G. J. M. ve Elwenspoek, M. C. (2005). Optimization of a thermal flow sensor for acoustic particle velocity measurements. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(3), 436–443. doi:10.1109/JMEMS.2005.844848

Yasa, T. (2005). *Değişken gaz sıcaklıkları için sıcak tel anemometresi yöntemi ve sıcak teldeki yıpranmanın hız ölçümlerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

What is Arduino Uno?, (b.t.). 04 Ekim 2021, <https://www.rs-online.com/designspark/what-is-arduino-uno-a-getting-started-guide>

What is MEMS technology?, (b.t.). 18 Temmuz 2021, <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>

Wu, Y. Q. ve Yao, S. Y. (2011). MEMS thermal mass flow meter with double-heater structure. *2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits, EDSSC 2011*, 9–10. doi:10.1109/EDSSC.2011.6117606

Xue, N. ve Yan, W. P. (2012). A silicon-glass-based microfabricated wide range thermal distribution gas flow meter. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 173(1), 145–151. doi:10.1016/j.sna.2011.11.022



EKLER

EK – 1: Prototipe Ait Arduino Programlama Kodu

```
#include "max6675.h"
#include "math.h"
int Tepe_thermoSO = 11;
int Tepe_thermoCS = 12;
int Tepe_thermoSCK = 13;
int su_thermoSO = 4;
int su_thermoCS = 5;
int su_thermoSCK = 6;
float Rekapsul = 0;
float Rekapsul1 = 0;
float Dkapsul=0.012;
float nusu=0.000891;
float rosu=997;
float Hiz= 0;
float tepe;
float su;
MAX6675 thermocouple1(Tepe_thermoSCK, Tepe_thermoCS, Tepe_thermoSO);
MAX6675 thermocouple2(su_thermoSCK, su_thermoCS, su_thermoSO);
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Reynolds sayısı ve hız hesaplanıyor:");
    delay(500);
}
void loop() {
    Serial.print("Tepe sicakligi (C°) = ");
    Serial.print("\t");
    Serial.println(thermocouple1.readCelsius());
    tepe=thermocouple1.readCelsius();
```

EK – 1 devamı

```
Serial.print("Su sıcaklığı (C°) = ");  
Serial.print("\t");  
Serial.println(thermocouple2.readCelsius());  
su=thermocouple2.readCelsius();  
Rekapsul1= 139.7/(tepe-su);  
Rekapsul=pow(Rekapsul1,1.0/0.28);  
Serial.print("Reynolds kapsül (Re_kapsül)= ");  
Serial.println(Rekapsul);  
Hiz= (Rekapsul*nusu) / (rosu*Dkapsul);  
Serial.print("Hız (m/s)= ");  
Serial.println(Hiz);  
delay(5000);  
}}
```