

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HALKA GEOMETRİLİ AKIŞTA SIVI KRİSTAL YÖNTEMİYLE
ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Mak.Müh.Kemal KUVVET

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Makina Yüksek Mühendisi"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02.08.1995

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 25.08.1995

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Jüri Üyesi : Y. Doç. Dr. Alican DALOĞLU

Jüri Üyesi : Y. Doç. Dr. Ahmet ÜNAL

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Ağustos 1995

TRABZON

ÖNSÖZ

Bu çalışma, sıvı kristal yöntemi kullanılarak halka geometrili bir akımda ısı transfer karakteristiklerinin incelenmesi amacıyla yönelik olup, çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarı'nda kurulan deney düzeneğinde, akım ve geometrik parametrelere bağlı olarak deneysel veriler elde edilmiştir. İkinci aşamada, bu veriler kullanılarak, geliştirilen bilgisayar programı aracılığıyla sonuçlar hesaplanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam süresince, bilimsel eleştirileriyle beni yönlendiren, özverili ve değerli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof.Dr. Tahir YAVUZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, özellikle deney setinin kurulması aşamasında, gerek fikirleriyle ve gerekse malzeme teminindeki yardımlarından dolayı bölüm başkanımız Prof. Dr. Teoman AYHAN'a, çalışmalarım sırasında öneri ve eleştirileriyle yardımcı olan K.T.Ü. Makina Müh. Bölümü akademik personeline, Atatürk Üniversitesi Makina Müh. Bölümü'den Yrd. Doç. Dr. Kadir BİLEN'e de teşekkür ederim.

Trabzon, Ağustos 1995

Kemal KUVVET

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ	VIII
SEMBOL LİSTESİ	IX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması	3
1.3. Konsantrik Halka Bir Boruda Akım Alanı ve Akım Karakteristikleri	5
1.4. Isı Transfer Katsayısının Ölçülmesi	6
1.4.1. Entalpi Yöntemi	7
1.4.2. İnce Cidar Yaklaşımı	7
1.4.3. Kondüksiyon Çözüm Yöntemi	8
1.5. Sıvı Kristal Yöntemi	8
1.5.1. Sıvı Kristal	8
1.5.1.1. İzolasyonsuz (Saf) Sıvılar	9
1.5.1.2. Mikrokapsüllü Form	10
1.5.1.3. Etiket Plakalar	10
1.5.2. Sıvı Kristalin Özellikleri	11
1.5.3. Sıvı Kristal ile Sıcaklık Ölçümü	11
1.5.4. Sıvı Kristalin Kalibrasyonu	13
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	15
2.1. Giriş	15
2.2. Deneysel Çalışmalar	15
2.2.1. Sıcak Rüzgar Tüneli	15
2.2.2. Çalışma Bölgesi	17

2.2.3. Sıvı Kristalin Renk ve Sıcaklık İlişkisi	19
2.2.4. Yüzeyin Sıvı Kristalle Kaplanması	20
2.2.5. Deneysel Verilerin Ölçülmesi.	21
2.3. Isı Transfer Katsayısının Hesabı	23
2.3.1. Zaman Bağımlı Isı İletim Denklemi ve Sınır Koşulları.	24
2.3.2. Problemin Sonlu Farklarda İfadesi.	25
2.3.3. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi	29
2.4. Hesaplamalar İçin Geliştirilen Bilgisayar Programı	30
3. BULGULAR	33
3.1. Yerel Isı Transfer Katsayıları Dağılımı	33
3.2. Ortalama Isı Transfer Katsayıları Dağılımı	40
3.3. Test Elemanda Sıcaklık Dağılımı.	40
4. İRDELEME.	48
5. SONUÇLAR	52
6. KAYNAKLAR	53
7. EKLER	55
8. ÖZGEÇMİŞ.	59

ÖZET

Taşımla ısı transferinde önemli problemlerden biri; ısı taşınım katsayısının (h) belirlenmesidir. Deneysel olarak ısı taşınım katsayısı , entalpi yöntemi, ince cidar yaklaşımı ve kondüksiyon çözüm yöntemlerinin dışında, son yıllarda geliştirilen, özellikle kompleks geometrilere tercih edilen sıvı kristal yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada, düzgün yüzeyli halka geometrili bir kanalda, ısı transfer karakteristiklerinin çeşitli parametrelere bağlı olarak değişimleri, sıvı kristal yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Deneyler üç farklı çap oranında ($d_1/d_2=0.5, 0.667, 0.778$) ve $7000 < Re < 35000$ Reynolds sayısı değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, yerel ve ortalama ısı transfer katsayılarının değişimi belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Halka akım, ısı taşınım katsayısı, sıvı kristal yöntemi, ısı değiştiriciler.

SUMMARY

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN ANULAR FLOW USING LIQUID-CRYSTAL TECHNIQUE

Determination of the heat transfer coefficient is one of the most important problems in convective heat transfer. Heat transfer coefficient is experimentally determined through the enthalpy method, the thin boundary wall approximation, the conduction solution method and the liquid-crystal technique which is improved in recent years and especially preferred in complex geometries.

In this thesis, the variations of the heat transfer characteristics depending on different parameters is investigated using the liquid-crystal technique. Experiments are carried out in three different diameter ratios ($d_1/d_2=0.5, 0.667, 0.778$) in the range Reynolds number, between 7000 and 35000.

From this study, the variation of local and mean heat transfer coefficients in the annular flow are determined and the results are compared with the data in the literature.

Key Words : Annular flow, heat transfer coefficient, liquid-crystal technique, heat exchangers.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1. Laminer (a) ve türbülanslı (b) akımda akımın hidrodinamik gelişimi	5
Şekil 2. Termik sınır tabaka gelişimi	6
Şekil 3. Yüzeyde tabaka içinde asılı sıvı kristal molekülleri ve renk ayrımı.	12
Şekil 4. Sıvı kristal renklerinin bakış açısına bağımlılığı	12
Şekil 5. Sıvı kristal kalibrasyon düzeneği..	13
Şekil 6. Deney düzeneğinin şematik resmi.	16
Şekil 7. Deney düzeneğinin genel görünümü	18
Şekil 8. Çalışma bölgesinin şematik resmi	18
Şekil 9. Sıvı kristal renk aralığı ve ortalama renk sıcaklığı.	20
Şekil 10. Sıvı kristal renk bandının aksenal yönde zamanla konumunun ölçülmesi.	21
Şekil 11. Halka akım girişinde hız kontrol ünitesinin farklı skala değerlerindeki hız dağılımları.	22
Şekil 12. Problemin şematik gösterimi	24
Şekil 13. Çözümde kullanılan sonlu fark ağı.	25
Şekil 14. Türev sınır koşulu	26
Şekil 15. Ara düğüm noktalarında kullanılan sonlu fark ağı.	28
Şekil 16. Konveksiyon sınır koşulunda kullanılan sonlu fark ağı	29
Şekil 17. Isı taşınım katsayısı hesaplanması.	30
Şekil 18. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=165$ s'deki sıvı kristal renk bandının konumu ($x/d_e=0.333$).	34
Şekil 19. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=268$ s'deki sıvı kristal renk bandının konumu ($x/d_e=1.227$).	35
Şekil 20. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=364$ s'deki sıvı kristal renk bandının konumu ($x/d_e=2.667$).	35
Şekil 21. Yerel ısı transfer katsayısının akım yönünde değişimi, $d^*=0.5$	36
Şekil 22. Yerel ısı transfer katsayısının akım yönünde değişim, $d^*=0.667$	37

Şekil 23. Yerel ısı transfer katsayısının akım yönünde değişimi, $d^*=0.778$	38
Şekil 24. Ortalama Nusselt sayısının değişimi, $d^*=0.5$	41
Şekil 25. Ortalama Nusselt sayısının değişimi, $d^*=0.667$	41
Şekil 26. Ortalama Nusselt sayısının değişimi, $d^*=0.778$	42
Şekil 27. Ortalama Nusselt değerinin çap oranına göre değişimi..	42
Şekil 28. $d^*=0.667$, $Re=10015$ ve $x/d_e=0.333$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	43
Şekil 29. $d^*=0.667$, $Re=10015$ ve $x/d_e=1.833$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	43
Şekil 30. $d^*=0.667$, $Re=10015$ ve $x/d_e=3.666$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	44
Şekil 31. $d^*=0.667$, $Re=21152$ ve $x/d_e=0.333$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	44
Şekil 32. $d^*=0.667$, $Re=21152$ ve $x/d_e=1.833$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	45
Şekil 33. $d^*=0.667$, $Re=21152$ ve $x/d_e=3.666$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	45
Şekil 34. $d^*=0.667$, $Re=32423$ ve $x/d_e=0.333$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.	46
Şekil 35. $d^*=0.667$, $Re=32423$ ve $x/d_e=1.833$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	46
Şekil 36. $d^*=0.667$, $Re=32423$ ve $x/d_e=3.666$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi	47
Şekil 37. Deneysel verilerle ampirik bağıntı sonuçlarının karşılaştırılması, $d^*=0.778$	49
Şekil 38. Sıvı kristal metodu kullanılarak düzgün olmayan yüzeylerde ısı transfer katsayısının ölçümü	51

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sıvı kristalin renk-sıcaklık ilişkisi.	20
Tablo 2. Farklı debilerde hesaplanan hız düzeltme katsayıları.	23
Tablo 3. Yerel ısı transfer dağılımları için hesaplanan a ve b değerleri.	39



SEMBOL LİSTESİ

d_1	:Halka aralık iç çapı	[m]
d_2	:Halka aralık dış çapı	[m]
d_{e1}	:Test eleman iç çapı	[m]
d_{e2}	:Test eleman dış çapı	[m]
d^*	:Çaplar oranı, d_1/d_2	
d_e	:Hidrolik çap (eşdeğer çap), $d_2 - d_1$	[m]
V_{ort}	:Halka akım girişindeki ortalama akış hızı	[m/s]
V_{mak}	:Halka akım girişindeki maksimum hız	[m/s]
\bar{V}	:Halka aralıktaki ortalama akış hızı	[m/s]
μ	:Havanın dinamik viskozitesi	[kg/ms]
ν	:Havanın kinematik viskozitesi	[m ² /s]
k_a	:Havanın iletim katsayısı	[W/m °K]
C_p	:Havanın sabit basınçta özgül ısı	[J/kg °K]
Re	:Reynold sayısı, $\frac{\bar{V} \cdot d_e}{\nu}$	
Pr	:Prandtl sayısı, $\frac{\mu \cdot C_p}{k_a}$	
k_e	:Test elemanın ısı iletim katsayısı	[W/m °K]
ρ_e	:Test elemanın yoğunluğu	[kg/m ³]
C_{pe}	:Test elemanın sabit basınçta özgül ısı	[J/kg °K]
α_e	:Termal ısı yayılım katsayısı	[m ² /s]
T_h	:Akışkan sıcaklığı	[°K]
T_0	:Test elemanın başlangıç sıcaklığı (çevre sıcaklığı)	[°K]
M	:Sonlu fark çözümünde kullanılan düğüm noktası sayısı	
Δr	:Test elemanda, sonlu fark çözümünde kullanılan radyal yöndeki düğüm noktası aralığı	[m]
Δt	:Zaman adım miktarı	[s]

Fo	:Fourier sayısı, $\frac{\alpha_e \cdot \Delta t}{\Delta r^2}$	
Bi	:Biot Sayısı, $\frac{h \cdot \Delta r}{k_e}$	
T_m	:Test elemanın sayısal çözümle hesaplanan yüzey sıcaklığı	[°K]
T_{Yes}	:Sıvı Kristal yeşil renk sıcaklığı	[°K]
Nu	:Nusselt sayısı, $\frac{h \cdot x}{k_s}$	
T_f	:Film sıcaklığı, $\frac{T_{Yes} + T_h}{2}$	[°K]
\bar{Nu}	:Ortalama Nusselt sayısı	
\bar{x}	:Boyutsuz aksenal uzaklık, x/d_e	
\bar{r}	:Boyutsuz radyal uzaklık, $\frac{r-r^*}{r_{e2}-r^*}$	
r^*	:Cidar kalınlığında türev sınır koşulunun yeri, $\frac{r_1+r_2}{2}$	[m]

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Halka akım (annular akım), farklı çaplarda iç içe yerleştirilen iki boru arasında sınırlanan kesitteki akım olarak ifade edilir. Halka akım karakteristiklerinin belirlenmesi, özellikle borulu ısı değiştiricilerinin tasarımı açısından önemlidir.

Pratikte halka akımla enerji santrallerinde, kimya endüstrisinde, nükleer reaktörlerde, otomotiv endüstrisinde, iklimlendirme santrallerinde, soğutma ve ısıtma tekniğinde, alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde, endüstri kuruluşlarının atık su ve baca gazlarıyla meydana gelen kayıp enerjinin geri kazanılmasında karşılaşılmaktadır.

1970'li yıllarda yaşanan enerji krizinden sonra, enerjinin verimli kullanılması üzerindeki araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu amaçla, enerji dönüşümlerinde kullanılan ısı değiştiricilerinde etkinliğin artırılması üzerinde bir çok çalışma yapılmıştır. Çalışmalarda kullanılan en etkili metod, sıcak ve soğuk akışkan tarafındaki ısı taşınım katsayılarının iyileştirilmesidir. Bu iyileştirme, ısı transfer katsayısının mevcut durumuna göre daha da artırılması anlamına gelir.

Isı transferini iyileştirme teknikleri aktif ve pasif metodlar olarak sınıflandırılabilir. Isı transfer edilen akışkana ilave enerji verilerek, ısı transferindeki iyileşmeyi sağlayan yöntem aktif, ilave enerji vermeden ısı transferindeki iyileşmeyi sağlayan yöntem ise pasif yöntem olarak adlandırılmaktadır.

Aktif yöntemlere, mekanik yardımcılar kullanılarak yüzeyin döndürülmesi, akışın karıştırılması, yüksek veya düşük frekanslı yüzey titreşiminin oluşturulması, akış titreşiminin oluşturulması örnek verilebilir. Pasif yöntemlere ise yüzeyin kaplanması, yüzeyin işlenerek değiştirilmesi ve çıkıntılar oluşturulması, giriş vorteks üreticinin yerleştirilmesi verilebilir. Bu düzenlemelerde hedef, türbülansın artırılarak ısı transferinin iyileştirilmesidir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, iyileştirme teknikleri borulu ısı değiştiricilerinin halka akım tarafında, iç boru akımından daha etkili olduğu görülmüştür [1]. Bu

nedenle, borulu ısı değiştiricilerinde yapılan araştırmalar, ağırlıklı olarak annular akım üzerinde yürütülmektedir.

Isı transferi ile ilgili yapılan çalışmalarda ısı taşınım katsayısının (h) belirlenmesi, en önemli problemlerden biridir. Deneysel olarak ısı taşınım katsayısını belirlemek için, entalpi yöntemi, ince cidar yaklaşımı ve kondüksiyon çözüm yöntemleri dışında, son yıllarda kullanılmaya başlanan, özellikle kompleks sistemlerde ve düzgün olmayan yüzeylerde tercih edilen sıvı kristal yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle hakkında ayrıntılı bilgi, 1.4 ve 1.5 nolu bölümlerde verilecektir.

Sıvı kristal, belli sıcaklıklarda belli renkler gösteren bir bileşimdir. Bu özelliğinden yararlanarak, sıvı kristal ısı transferi incelemelerinde sıcaklık ölçüm materyali olarak kullanılır. Uygulamalarda sıvı kristal, akışkanın etkisine maruz kalan veya akışkanı sınırlayan yzeeye srltr. Sıvı kristal srlt yüzey, sıcak veya soğuk akışkanın etkisine bırakılır. Yüzeyle akışkan arasında meydana gelen ısı transferi nedeniyle yüzey sıcaklığı değişime uğrar. Sıvı kristal renk gösterim sıcaklığına erişildiğinde yüzeyde mavi, yeşil, kırmızı gibi rekler ardarda grntr ve belli bir sıcaklık değerinden sonra tekrar renksiz duruma dönülür. Akım karakteristiklerine ve geometrik şartlara bağlı olarak, oluşan renk bandının akım yönündeki zamanla hareketi bir video kamera ile izlenir. Renk bandının konum ve zaman değerleri kullanılarak, akışkanı sınırlayan model elemandaki zaman bağımlı ısı transfer denkleminin sayısal çözümünden, ısı taşınım katsayısı belirlenir.

Bu çalışmada sıvı kristal yöntemi kullanılarak, halka akımda ısı transfer karakteristiklerinin akım parametrelerine ve geometrik boyutlara bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. alışmalar üç farklı çap oranında (0.5, 0.667, 0.778) gerçekleştirilmiş ve sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan alışmalar ve elde edilen bulgular değerlendirilerek, sıvı kristal yönteminin avantaj ve dezavantajları, uygulamada dikkat edilmesi gereken noktalar belirlenmiş ve düzgün yapıda olmayan ısı değiştiricileriyle ilgili araştırmalarda kullanılabilirliği incelenmiştir.

Yapılan alışmalar sonucunda hazırlanan bu tezin ilk bölümünde problem tanımlanarak, bu konudan yapılan çalışmalar, kullanılan metodlar, sıvı kristal bileşimi ve kullanımı hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, deneysel ve sayısal yapılan çalışmalarla birlikte, deneysel verilerin elde edilmesi ve değerlendirilmesi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, bu verilerin grafik ve eşitliklerle ifadesi yapılmıştır. Dördüncü ve beşinci bölümlerde ise, elde edilen bulgular ışığında çalışmanın değerlendirilmesi yapılarak, sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

1.2. Literatür Araştırması

Laminer kanal akışlarının hidrodinamik gelişimi, iç akışkanlar mekaniğinde temel bir problemdir. Böyle akışların çözümü, dairesel boru ve paralel plakalı kanallar gibi basit kanal şekilleriyle sınırlıdır [2].

Daha geniş analitik çalışmalar paralel plakalı kanallara uydurulmuştur. Bu çalışmalarda atalet terimlerinin lineerleştirilmesini, serilerin açılımını, integral momentum denklemini ve sonlu farkları içeren çözüm metodlarından biri kullanılmıştır [3].

Halka bir pasajda akım ve ısı transferi alanında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan ilk defa Lamb [4], Navier-Stokes denklemlerini çözerek akım ortamında gelişmiş hız profilini elde etmiştir. 1941 yılında Jakob ve Rees [5], halka bir pasajda akım problemini aynı anda hem hidrodinamik hem de termal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada akım alanının hidrodinamik olarak gelişmiş olduğu kabul edilerek, iç duvarda sabit ısı akımı ve dış duvar izole edilmiş durumda enerji denklemi integre edilmiştir.

1963'de Reynolds, Lundberg ve McCuen [6,7], halka aralıkta, birim hacim elemanı için elde edilen ve enerji korunumunu ifade eden diferansiyel denklemin, iç ve dış silindir duvarlarında söz konusu olabilecek şartlara bağlı olarak analitik, sayısal ve deneysel çözüm önerileri yapılarak, hidrodinamik olarak gelişmiş laminer akımda, cidar sıcaklıkları ve ısı akısının farklı durumlarında çözümler elde edilmiştir.

Kays ve Leung [8,9], Reynolds ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarının devamında, hidrodinamik olarak gelişmiş türbülanslı akımda, halka geometrinin iç ve dış yüzeylerinin izolasyonlu ve izolasyonsuz durumlarında, farklı çap oranlarında ve Prandtl (Pr) sayılarında, ısı transfer katsayısının Reynolds sayısına göre değişimleri elde edilmiştir. Kays ve Leung ile Reynolds ve arkadaşlarının çalışmaları, halka akımda yapılan birçok çalışmada refans olarak alınmıştır.

Laminer bir akımda aynı anda gelişmekte olan hız ve sıcaklık alanı ilk defa 1964 yılında Heaton, Reynolds ve Kays [10] tarafından sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçların elde edildiği bu çalışmada, girişde üniform hız dağılımı söz konusu olup, ısıtma girişinden başlayarak yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda akım boyunca, akım ve sıcaklık alanının gelişimi, farklı çap oranlarında ve Pr değerlerinde elde edilmiştir. Ancak bu çalışmada akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişimi dikkate alınmamıştır.

Halka bir pasajda, akım alanı ve ısı transferinde akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişiminin etkileri, ilk defa Shumway ve McEligot [11] tarafından dikkate alınmıştır. Bu çalışmada gelişmiş laminer akımda, sınır tabaka denklemleri sonlu farklarda çözülerek, 0.25 çap oranında, $Pr=0.72$ değerlerinde, ısıtmanın halka geometrinin iç ve dış yüzeylerinden yapılması durumlarında çözümler elde edilmiştir.

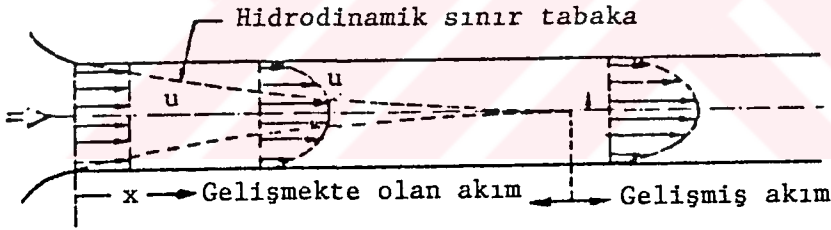
Coney ve El Shaarawi [12], hidrodinamik ve termik sınır tabakanın birlikte geliştiği, sıkıştırılamaz laminer bir akımda, akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişimini dikkate alarak, farklı çap oranlarında sayısal çözüm yaparak, ısı transfer katsayılarının dağılımını elde etmişlerdir.

Yavuz ve Özkılıç [5], 1987'de yapmış oldukları çalışmada annular bir boru içerisinde akım alanı ve ısı transfer karakteristikleri, uygun kabuller yapılarak (hareket daimi, sıkıştırılamayan ve eksenel simetrik bir akım, vizkoz kayıplar, kaldırma kuvveti ve dış kuvvetler ihmal edilebilir) ve akışkanın fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimleri dikkate alınarak nümerik olarak incelenmiştir.

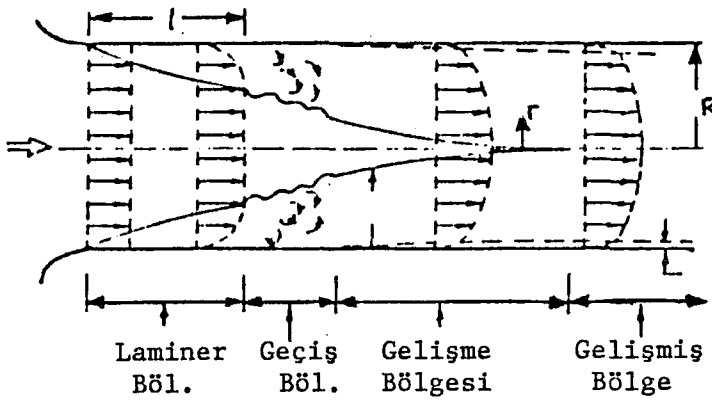
1970'li yıllardan sonra, konsantrik halka geometrideki akım alanı ve ısı transferi çalışmalarında, türbülansı artırıcı teknikler üzerine yapılan çalışmalar ağırlık kazanmıştır. Bu amaçla iç veya dış silindirin veya akım alanının döndürülmesiyle ilgili, ayrıca düzgün olmayan yüzeylerin akım alanı ve ısı transferine etkileri konusunda birçok çalışma yapılmıştır [13].

1.3. Konsantrik Halka Bir Boruda Akım Alanı ve Akım Karakteristikleri

Bir cisim etrafında akım alanı iki bölgeye ayrılarak analiz edilebilir. Cisim yüzeyine çok yakın olan ve akışkanın viskozitesinin dominant etki yaptığı hız veya momentum sınır tabaka bölgesi ve viskozitenin etkili olmadığı potansiyel akım bölgesi. Genelde akım alanı dış ve iç akım olarak iki genel ayrıma tabi tutulursa da sınır tabakanın teşekkülü ve gelişimi benzer karakteristikler gösterir. Bu çalışmada iç akım söz konusudur. Şekil 1-a ve 1-b'de görüldüğü gibi bir boru akımında hız sınır tabaka kalınlığı (δ_v), giriş ucundan başlayarak akım doğrultusu boyunca (x) büyüyerek belli bir noktada boru yarıçapına erişir. Bu noktada itibaren akım alanı hidrodinamik olarak gelişmiş olup hız profili akım doğrultusu boyunca değişmemektedir. Bu nokta ile giriş noktası arasındaki uzunluğa akımın hidrodinamik gelişme uzunluğu, akıma da hidrodinamik olarak gelişmekte olan akım denir. Laminer ve türbülanslı akımda akımın hidrodinamik olarak gelişimi Şekil 1-a ve Şekil 1-b de görülmektedir.



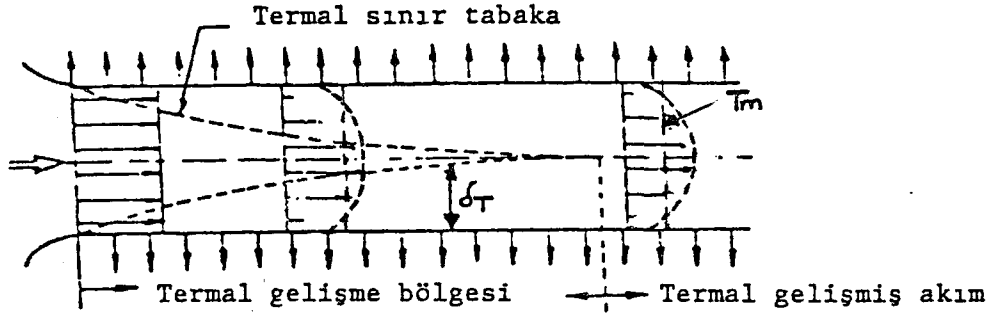
(a)



(b)

Şekil 1. Laminer (a) ve türbülanslı (b) akımda akımın hidrodinamik gelişimi.

Benzer şekilde bir yüzeye akışkan arasında ısı transferi meydana geliyorsa yüzeye çok yakın bölgede akışkan sıcaklığında büyük miktarda değişim meydana gelmektedir. Bu bölgeye termik (termal) sınır tabaka denir. Termal sınır tabaka kalınlığı (δ_T), giriş noktasında itibaren büyüyerek belli bir noktada boru yarıçapına erişerek akım termal olarak gelişmiş hale gelir. Bu değişim Şekil 2'de gösterilmiştir [2].



Şekil 2. Termik sınır tabaka gelişimi.

Konsantrik annular kanallar büyük teknolojik öneme sahiptirler. Bu kanallar geometrik olarak $d^* = d_1/d_2$ çap oranı ile karakterize edilirler. Bu eşitlikteki d_1 , konsantrik annular kanalı oluşturan iki borudan iç borunun çapını, d_2 ise dış borunun çapını göstermektedir.

Halka aralıkta Reynolds sayısı ;

$$Re = \frac{\bar{V} \cdot d_e}{\nu} \dots \dots \dots (1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada d_e hidrolik çap (eşdeğer çap) olup;

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{\Ç} = \frac{4 \cdot \left(\frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} \right)}{\pi d_2 + \pi d_1} = d_2 - d_1 \dots \dots \dots (2)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada F, kesit alana $\Ç$, ıslak çevreye karşılık gelmektedir.

1.4. Isı Transfer Katsayısının Ölçülmesi

Isı geçişi hesaplarında h ısı taşınım katsayısının belirlenmesi en zor ve en önemli problemlerden biridir. Isı taşınım katsayısı deneysel olarak, entalpi yöntemi, ince cidar

yaklaşımı ve kondüksiyon çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak belirlenebilmektedir[15]. Bu yöntemlerin dışında, özellikle son yıllarda kullanılmaya başlanan ve nisbeten kompleks sistemlerdeki ısı transferi çalışmalarında tercih edilen sıvı kristal yöntemi kullanılarak da ısı taşınım katsayısı belirlenebilmektedir [15]. Sıvı kristal yöntemi hakkında ayrıntılı bilgi 1.5 konu başlığında verilecektir

1.4.1. Entalpi Yöntemi

Entalpi yönteminde h ısı taşınım katsayısının hesabı şu şekilde yapılır:

$$Q = \dot{m} C_p (T_g - T_g) \dots \dots \dots (3)$$

formülüyle akışkana gelen toplam ısı hesaplanır. Bu bağıntıda, T_g akışkan giriş sıcaklığını, T_g akışkan çıkış sıcaklığını, \dot{m} akışkanın kütleli debisini göstermektedir. Bu değerlerin ölçülmesi gerekir. C_p ise sabit basınçta özgül ısı değeridir. Ortalama \bar{h} ısı taşınım katsayısı;

$$\bar{h} = \frac{Q}{F \Delta T_m} \dots \dots \dots (4)$$

formülüyle hesaplanır. Burada ΔT_m cidarla akışkan arasındaki logaritmik sıcaklık farkını, F yüzey alanını göstermektedir. Logaritmik sıcaklık farkı ise,

$$\Delta T_m = \frac{(T_{cg} - T_{ag}) - (T_{cg} - T_{ag})}{\ln \frac{T_{cg} - T_{ag}}{T_{cg} - T_{ag}}} \dots \dots \dots (5)$$

formülüyle tanımlanır.

1.4.2. İnce Cidar Yaklaşımı

İnce cidar yaklaşımıyla ısı taşınım katsayısının hesabında, cidar kalınlığının ısı direnci ihmal edilir. Sisteme verilen toplam ısı Q_T , elektriksel olarak ölçülür. Kalibrasyonla sistemden çevreye ısı kaybı hesaplanır. Geriye kalan ısı akışkana geçeceğinden;

$$Q_A = Q_T - Q_K \dots \dots \dots (6)$$

yazılabilir.

$$Q_A = \bar{h} F (T_{do} - T_{aor}) \dots \dots \dots (7)$$

bağıntısıyla ortalama ısı taşınım katsayısı hesaplanır. Burada, T_{do} cidar sıcaklıklarının ortalamasını, T_{aor} akışkanın ortalama sıcaklığını göstermektedir. Yerel ısı taşınım katsayıları hesabı için birim yüzeyden geçen ısı (Q_A/F) sabit kabul edilerek (7) eşitliğinde, T_{do} ve T_{aor} yerine sırasıyla, T_{dz} ve T_{az} yerel sıcaklıkları yazılır.

1.4.3. Kondüksiyon Çözüm Yöntemi

Bu yöntemde deneysel olarak tespit edilen sınır şartları kullanılarak sıcaklık alanı sayısal yöntemle elde edilir. Bu şekilde bulunan sıcaklık alanından yararlanarak sayısal türev alma yöntemiyle yerel ısı akıları hesaplanır. Girişte ölçülen akışkan sıcaklığı yerel ısı taşınım katsayılarının hesabına olanak sağlarken, çıkışta ölçülen akışkan sıcaklığı yapılan hatalar hakkında yaklaşık bir fikir verir [14].

1.5. Sıvı Kristal Yöntemi

1.5.1. Sıvı Kristal

1988 yılında Avusturyalı botanist Fried Rich Reinitzer, bazı organik bileşimlerin iki farklı ergime noktasına sahip olduklarını göstermiştir. Fried Rich Reinitzer, cholesteryl benzoate denilen düşük molar kütleli bu bileşimin, 145°C'de katı halden bulanık bir sıvıya ve 179°C'de de geçirgen açık bir sıvıya döndüğünü tesbit etmiştir. Bir müddet sonra Alman fizikçi O. Lehmann bulanık görünümlü ara fazın, cholesteryl benzoate bileşiminin, kristale benzer molekül sel yapıya sahip alanlar içerdiğini göstermiştir. Bu çalışmalar sonucunda yukarıda bahsedilen organik maddeye sıvı kristal (Liquid Crystal) adı verilmiştir [15,16].

Bu maddenin ara fazına mezomorphic faz veya sadece mezophaze denir. Bu ara faz belli organik bileşikler için karakterize edilir. Bu ara fazda moleküller dizili olmalarına rağmen hareketlidir.

Sıvı kristal karışımları, kimyasal yapılarına göre, Cholesteric ve Chiral nematic şeklinde iki gruba ayrılırlar. Ayrıca ısı özelliklerine göre, yüksek molar kütleli polimerler ve düşük molar kütleli polimerler şeklinde de sınıflandırılırlar. Düşük molar kütleli polimerler, kendi içerisinde disk ve çubuk yapı olarak ikiye ayrılırlar. Çubuk yapı, moleküllerin dizilişine göre smectic (molekülleri dik dizili, düzlem tabakaları birbirine paralel), nematic (moleküller dik dizili, düzlem tabakaları oluşmaz), cholesteric (moleküller ve oluşturdukları tabakalar birbirlerine paralel) şeklinde sınıflandırılırlar.

Sıvı kristal (cholesteric, chiral nematic), üzerine gelen ışığa karşılık spektrumdaki renkleri sırayla gösterir. Çoğu karışımlar, sıcaklık arttığı zaman renksizlikten, kırmızı renge dönüşür ve yüksek bir sıcaklıkta tekrar rengini kaybetmeden önce, spektrumundaki renkleri peşpeşe gösterir (sarı, yeşil, mavi, kırmızı, vb.). Sıcaklığa göre sadece tek bir renk gösteren karışımlar da yapılabilir.

Renk değişikliği tersinirdir. Diğer bir deyişle soğuma sırasında ısıtmada olduğu gibi sıvı kristal aynı tür renk değişimini tersten başlayarak gösterir.



Sıvı kristalin özellikleri kontrol edilebildiği takdirde avantajlarından yararlanılabilir ve verilen bir zaman aralığında (deneme, inceleme ve araştırma uygulamalarında) materyal olarak kullanılabilir. Sıvı kristal ticari olarak farklı formlarda kullanılmaktadır:

1.5.1.1. İzolasyonsuz (Saf) Sıvılar

Bunların sıvılık kıvamı, viskoz bir macun ve kalın bir yağın (motor yağı) arasında değişir. Bu çözeltiler, hava tabancası ve sprey ile yaygın bir şekilde yüzeye püskürtülür. Yüzeye püskürtülen bu sıvıları havanın zararlı etkilerinden korumak oldukça zordur.

İzolasyonsuz sıvı kristal karışımlarının, ince üniform filmler şeklinde uygulanması gerekir. Bu kalınlıklar chiral nematicler için 5÷10 mikrondan, 50 mikrona kadar,

cholestericler için ise 50 mikrondan 100 mikrona kadar değişir. Tabaka kalınlığına göre meydana gelen yüzey alanı da bozulmaya hassastır. Saf sıvı kristal filmleri, özellikle ultra viole ışınlarına ve atmosferdeki oksijenden dolayı bozulmaya ve ayrıca bazı kimyasal maddelere karşı hassastırlar. Bunların az miktardaki varlıkları, karışımın kalibre değerlerini değiştirebilir. Bu etkiler sonucunda, izolasyonsuz sıvı kristal filmlerinin ömrü, birkaç saat ile birkaç gün arasında değişebilir.

1.5.1.2. Mikrokapsüllü Form

İzolasyonsuz sıvı kristallerin çok çabuk kirlenmelerine karşı ömürlerini uzatmak için mikrokapsüllü form geliştirilmiştir. Mikrokapsüllü form, saf sıvı kristal karışımlarını koruma ve paketlemeyi kolaylaştırması ve sıvı kristalin özelliklerinde kararlılık sağlaması nedeniyle; sıvı kristal yönteminin, çok yönlü ve geniş çapta kolay bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Basit şekliyle bir mikrokapsül; etrafı üniform duvarla çevrili bir küredir ve mikrokapsül formunda sıvı kristalin küçük damlaları, aynı formdaki mikrokapsülleri vermek üzere polimer bir kaplama ile çevrilmiştir. Mikrokapsül çapı, mikron seviyesindedir.

Mikrokapsülleri bünyesinde bulunduran sıvı kristalin sulu çamuru, mikrokapsül formun bir ürünüdür. Bu çamur akım alanı incelemelerinde, sıvılar içinde izleyici partikül olarak ya da çok yaygın şekliyle yüzey uygulamalarında direkt olarak kullanılır. Yüzey uygulamalarında bu işlem püskürtme, yüzeye basma veya sürme şeklinde yapılır.

1.5.1.3. Etiket Plakalar

Sıvı kristal kullanan ticari gösterge aletlerinin çoğu, siyah absorbe edici bir plaka ve üzeri geçirgen bir polimer tabaka arasında sıkıştırılmış ince bir sıvı kristal filmi içerir. Küçük boyutta ve çeşitli sıcaklıklarda renk gösterebilecek şekilde imal edilmiştir. Bu küçük etiket parçalar, uygulamada yüzeye yapıştırılarak yüzey sıcaklığı ölçülür.

Bu çalışmada sıvı kristal bir sprey tabanca püskürtülerek yüzeye sürülmüştür.

1.5.2. Sıvı Kristalin Özellikleri

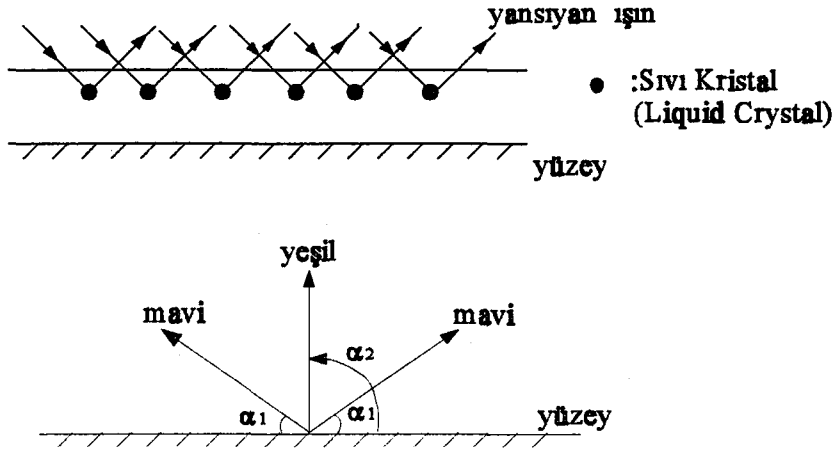
Sıvı kristal kullanarak sıcaklık ölçümünde iyi bir hassaslık sağlanabilmektedir. Ölçülen noktadaki sıcak değişimini, 0.2 s gibi çok hızlı bir zamanda algılayabilmektedir. İyi tekrarlanabilmekte ve tersinir renk gösterebilmektedir. Uygulamalarda $-30 \div 100$ °C gibi geniş bir kullanım aralığına sahiptir. Değişebilir renk gösterebilmektedir. Bu özellik daha hızlı ve doğru ölçüm almaya imkan sağlamaktadır. Uygulamalarda kullanımı kolay, esnek ve düzensiz yüzler için çok iyidir. Nispeten ucuz olup, renk gösteriminin görsel olarak kayıt edilebilmesine imkan vermektedir. Sıvı kristalin en önemli dezavantajları, saklama ömrünün sınırlı olması ve ölçüm hassasiyetinin kullanıcıya bağımlı olmasıdır.

İzolasyonsuz (mikrokapsülsüz) sıvı kristal, çok küçük oranda da olsa kirlilik, yağ ve çözücülere karşı aşırı duyarlıdır. Bu yüzden, çok ince film şeklinde uygulanmalıdır. Yüksek derecelere çıktığında bozulma riski ortaya çıkmaktadır.

Mikrokapsüllü sıvı kristal, atmosfere karşı izole edilmiştir. Uygulanması genellikle sulu çamurun sulandırılması ile yüzeye püskürtme veya basma şeklindedir. İyi kararlılık, doğruluk ve güvenilirlik özellikleri yüksektir. Renkleri biraz daha az parlak ve açısal bağımlılığı azdır.

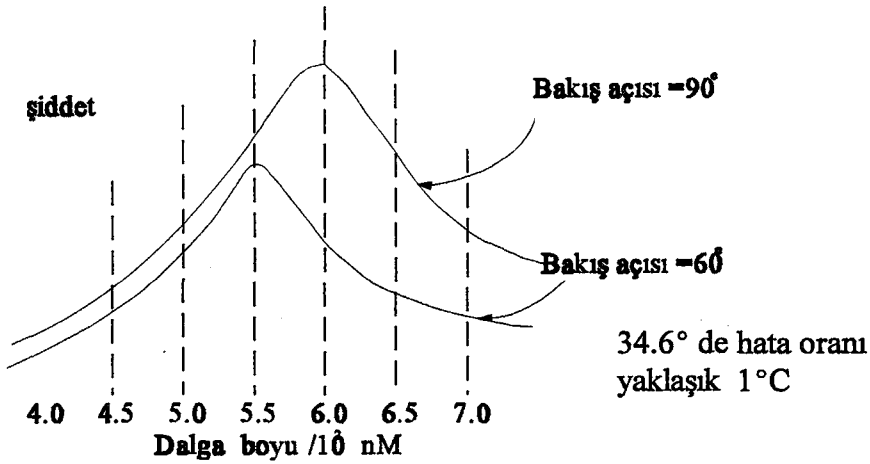
1.5.3. Sıvı Kristal ile Sıcaklık Ölçümü

Her ne kadar sıcaklık ölçülecek yüzeye sıvı kristal püskürtülse de, bundan yararlanmada bazı sınırlamalar vardır. Bunlardan birincisi, eğer sıvı kristal çevre havası etkisinden korunmamış ise kirlenmesi sonucunda sıvı kristalin yapısı değişebilir. İkincisi ise sıvı kristal ara fazında (mezophaze fazında) ise sıvı haldedir ve sıvı olan bu maddeye toz zerrecikleri kolayca yapışabilir, bu da sıvı kristalin bazı özelliklerini etkileyebilir. Bu iki nedenle sıvı kristalin her iki etkiye karşı çok iyi korunması gerekir. Bu iki etkiden korunmak için sıvı kristalin içinde çözüldüğü yeni karışım kullanılır. Bu karışım içinde sıvı kristalin kristal yapısı ve renk değiştirme özelliği etkilenmez. Böylece sıcaklık ölçülecek yüzeye bu yeni karışım püskürtülür. Püskürtmeden sonra karışım buharlaşır ve Polyarlate resim içerisinde sıvı kristal, Şekil 3'de görüldüğü gibi asılı olarak kalır [15].



Şekil 3. Yüzeyde tabaka içinde asılı sıvı kristal molekülleri ve renk ayırımı.

Yüzeyde sıvı kristalin renkleri bakış açısına bağlı olarak değişebilmektedir. Bakış açısının etkisi Şekil 4 'de görülmektedir [15]. Uygulamada ışık kaynağı, sıvı kristal püskürtülmüş yüzeye dik olacak şekilde yerleştirilmeli ve renkler dik izlenmelidir.

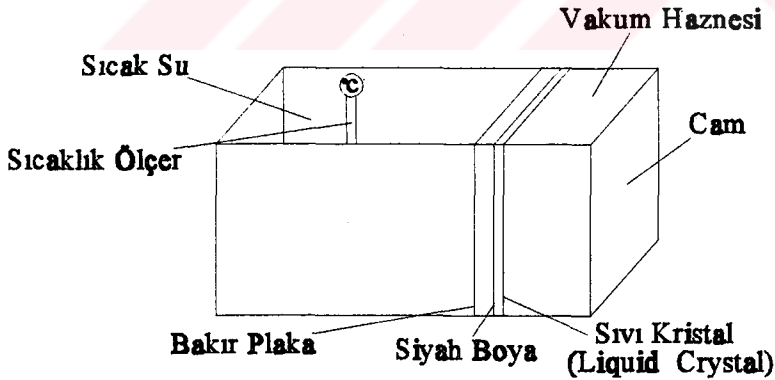


Şekil 4. Sıvı kristal renklerinin bakış açısına bağlılığı.

1.5.4. Sıvı Kristalin Kalibrasyonu

Sıvı kristalin kalibre edilmesi için sabit sıcaklıkta, üniform bir yüzeyin elde edilmesi gerekir. Bu bir sıcak su banyosu olabilir. Test düzlemi su banyosunun bir düzlemini oluşturur. Su bir ısıtıcı ile ısıtılarak sıcaklık termostatla kontrol edilir. Su banyosu polypropilen veya fiberglas plakalardan elde edilebilir. Bunun nedeni bahsedilen malzemeler oldukça iyi ızalasyon özelliğine sahip olmasıdır.

Kalibrasyon için gerekli su banyosu düzeneği Şekil 5'de gösterilmiştir. Deney kutusunun ön taraftaki yüzeyi cam olarak imal edilir. Tankta cam test plakasının arka tarafına da bakır plaka yerleştirilir. Burada bakır plaka kullanılmasının nedeni, bakırın çok iyi bir ısl iletkenliğe sahip olması, böylece de yüzeyde üniform bir sıcaklık dağılımının elde edilebilir olmasıdır. Bakır ve cam plakaların uygun bir macunla sızdırmazlıkları sağlanır. Bakır plaka ön kısmına bir vakum haznesi kaynak edilerek cam ile bakır plaka arasına hava girmemesi sağlanır. Böylece sıvı kristal püskürtülmüş yüzeyden konveksiyonla ısı kaybı önlenmiş olur.



Şekil 5. Sıvı kristal kalibrasyon düzeneği.

Uygulamada, sıvı kristalin püskürtüleceği yüzeye iyice yapışması için, içerisine imalatı sırasında uygun reçine veya yapıştırıcı katılmış ise, kalibrasyon işlemi daha basitce yapılabilir. Bu işlem için bir adet sıcak su banyosu ve banyo içerisine girecek ebatta

bakır bir plakadan yararlanılır. Bakır plaka üzeri siyah bir zeminle kaplandıktan sonra üzerine sıvı kristal püskürtülür ve kurumaya bırakılır. Bir süre sonra bakır plaka su banyosuna daldırılarak kalibrasyon işlemine geçilir. Sıvı kristal, içindeki yapışkan nedeni ile suda çözünmeye karşı dayanıklıdır. En azından kalibrasyon işlemi boyunca suda çözünme olmaz. Banyo su sıcaklığı ile sıvı kristal renkleri arasında ilişki kurulur. Bu çalışmada kalibrasyon işlemi bu şekilde yapılmıştır.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, dizayn edilen deney düzeneğinde, sıvı kristal renk bandının aksel yönde hareketi, bir kamera vasıtasıyla izlenerek, konum ve zaman değerleri ölçülmüştür. İkinci aşamada, ölçülen konum ve zaman değerleri kullanılarak, halka geometriyi oluşturan iç silindirik elemandaki (test elemanda) ısı transfer denkleminin sayısal çözümünden, h ısı taşınım katsayıları hesaplanarak, halka akımdaki ısı transfer karakteristiklerinin, akım ve geometrik parametrelere göre değişimleri belirlenmiştir. Bu işlemler ileriki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

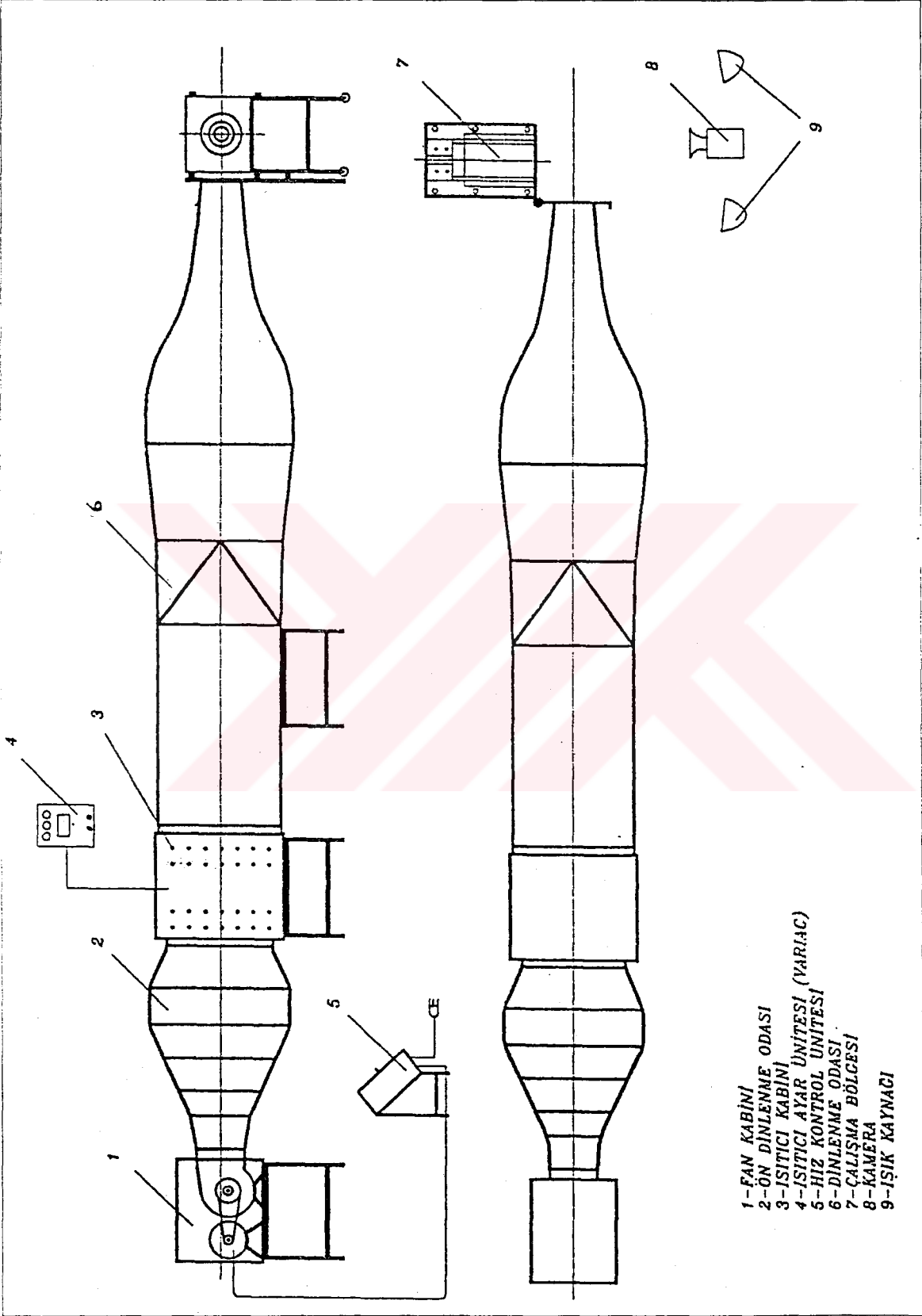
2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarında kurulan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, sıcak rüzgar tüneli ve çalışma bölgesi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

2.2.1. Sıcak Rüzgar Tüneli

Deneysel üfleme bir rüzgar tüneli kullanılmıştır. Üfleme radyal bir fan ile gerçekleştirilmiştir. Fan motorunun devri, bir hız ayar ünitesi ile kontrol edilerek, farklı debilerde çalışma imkanı sağlanmıştır. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Fan ve ısıtıcı kabini arasına yerleştirilen ön dinlenme odası, kademeli genişleyen şekilde imal edilmiştir. Kademeler arasına akım düzenleyiciler yerleştirilerek, hava akımının ısıtıcı kabine homojen hızda ve düşük girdaplarda girmesi sağlanarak, ısıtıcılardan eşit oranda yararlanma ve homojen ısıtma gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 6. Deney düzenineğin şematik resmi.

Rüzgar tüneline geçen hava akımı, herbiri 1000W ısıtma gücüne sahip olan, 24 adet yaprak rezistans kullanılarak ısıtılmıştır. Rezistanslar kabin içerisine, karşılıklı ve çapraz olarak, iki sıra halinde yerleştirilmiştir. Isıtıcıların akışkana vermiş oldukları ısı, özel bir firma tarafından imal edilen, 24 kW'lık varyak aracılığıyla kontrol edilmiştir. Dikdörtgen kesitli ısıtıcı kabini ile dairesel kesitli dinlenme odasının bağlantısı, bir geçiş borusu ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde rüzgar tüneli çıkışında nisbeten homojen hız dağılımı elde edilmesine karşın, ısıtmanın homojen bir şekilde yapılamaması ve akımın yeterince karışmaması nedeniyle, homojen sıcaklık dağılımı elde edilememiştir. Bunu önlemek için ısıtıcı kabini ile geçiş borusu arasına, belirli aralıklarla kesitin 2/3'ü büyüklüğünde saç perdelerin bulunduğu ilave bir kanal yerleştirildi. Böylece hava akımının ısıtıcı kabini bir miktar geçiklemeyle terketmesi ve zorunlu olarak perdeler arasındaki kanallardan geçmesi sağlanarak ısı bakımından homojen olmayan hava akımının karışması sağlanmıştır. Ancak bu işlem, basınç kayıplarını artırdığından sistemin çalışma kapasitesi düşürmüştür.

Rüzgar tüneline ve geçiş borusunun tasarım ve imalatı literatüre uygun bir şekilde yapılmıştır [18,19]. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 6 'da ve genel görünümü Şekil 7 'de gösterilmiştir.

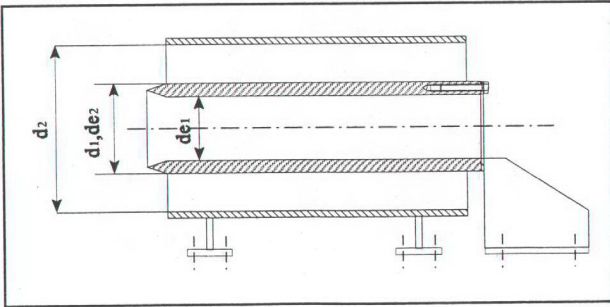
2.2.2. Çalışma Bölgesi

Halka akım modelinin oluşturulduğu çalışma bölgesi, iki silindirik borunun merkezlenmesi ile elde edilmiştir. Çalışma bölgesinin şematik resmi Şekil 8 'de verilmiştir. Halka geometriyi oluşturan dış boru, iç boru (test eleman) yüzeyindeki sıvı kristal renginin izlenebilmesi için, şeffaf pleksiglas malzemeden imal edilmiştir.

Test eleman malzemesinin seçimi, deneylerin sağlıklı yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Yüzeyde sıvı kristal renklerinin birbirine geçiş yaptığı çizgiler, net bir şekilde izlenebilmelidir. Aksi takdirde deneylerde renk yerinin tesbitinde yanlışlar meydana gelebilir. Bu da sonuçlarda belli oranlarda hatalara sebebiyet verir. Ayrıca sayısal çözümden kaynaklanabilecek hataları azaltmak için, kullanılan test elemanın ısı iletim katsayısının küçük olması istenir [16].



Şekil 7. Deney düzeneğinin genel görünümü.



Şekil 8. Çalışma bölgesinin şematik resmi.

Bu etkiler dikkate alınarak, kullanılan test elemanlarda pleksiglas levhaların kloroform ile yapıştırılmasıyla elde edilen blokların tornada işlenmesiyle imal edilmiştir. Yapıştırma için kullanılan kloroformun, pleksiglas malzeme ile reaksiyona girmesi nedeniyle iki plaka arasında ince bir tabaka oluşturmuştur. Bu tabakanın oluşması, sayısal çözümden eksenele yöndeki ısı transferinin ihmal edilmesiyle oluşan hatayı nisbeten azaltıcı yönde etki yapacağı aşikardır.

Hazırlanan test elemanların cidar kalınlığının, deneysel ölçümlerden ve sayısal çözümden kaynaklanan hataların azaltılması için kalın olması istenir. Bu nedenle $d_1/d_2=0.778$ çap oranı için hazırlanan test eleman, cidar kalınlığı 25 mm olacak şekilde imal edilmiştir. Ancak iki deney arasında, pleksiglas borunun homojen olarak çevre sıcaklığına erişmesi, birkaç saat gibi uzun bir süre alması nedeniyle cidar kalınlığı, 0.667 çap oranında 15 mm, 0.5 oranında ise 10 mm olacak şekilde test elemanlar imal edilmiştir.

2.2.3. Sıvı Kristalin Renk ve Sıcaklık İlişkisi

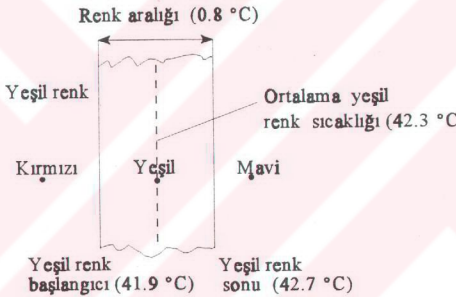
Lokal ısı transfer katsayılarını hesaplayabilmek için öncelikle sıvı kristalin kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işlemi, sıcak su banyosunda yapılmıştır. Kalibrasyon için kullanılacak test numunesi olarak su banyosuna girecek ebatta ince bir bakır plaka seçilmiştir. Bakır plaka seçilmesinin nedeni çok iyi ısı iletme sahip olması ve kısa sürede kararlı duruma erişmesidir. Böylece tüm yüzeyde üniform bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Kalibrasyon işleminde, sıvı kristal renklerinin iyi izlenebilmesi için bakır nümunesinin üzeri siyah bir zeminle kaplanmıştır. Zemin üzerine sıvı kristal püskürtülmüş bakır nümune, oda sıcaklığında kuruduktan sonra, kalibrasyon işlemine geçilmiştir. Sıcak su banyosuna daldırılan plaka yüzeyinde, su sıcaklığının sıvı kristal renk oluşum sıcaklığına erişmesiyle mavi, yeşil ve kırmızı renkler ardarda görünmüştür. Su sıcaklığı bakır-konstantan termoeleman çifti ve dijital göstergeli multimetre aracılığıyla milivolt (mV) olarak okunmuştur. Renk görünümünün sona ermesiyle, sıvı kristal sürülmüş zemin tekrar eski siyah görünümüne dönmüştür. Su sıcaklığıyla sıvı kristal renkleri arasındaki ilişki Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1'den görüldüğü üzere yeşil ve kırmızı renkler en dar aralığa sahip renklerdir. Renk aralığı, rengin görünmeye başladığı ve kaybolduğu sıcaklıkların farkı

Tablo 1. Sıvı kristalin renk-sıcaklık ilişkisi.

Renk	Sıcaklık Sınırları(°C)	Renk Aralığı(°C)	Ortalama Renk Sıcaklığı (°C)
Mavi	45.1÷42.7	2.4	43.9
Yeşil	42.7÷41.9	0.8	42.3
Kırmızı	41.9÷41.0	0.9	41.45

olarak tanımlanmıştır. Ortalama renk sıcaklığı ise, bu iki sıcaklığın aritmetik ortalaması olarak alınmıştır. Ölçümlerde, en canlı ve en dar aralığa sahip renk yeşil olduğundan, deneyler için yeşil renk aralığı tercih edilmiştir. Yeşil renk aralığı 0.8 °C, ortalama sıcaklığı ise 42.3 °C'dir. Bu durum Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Sıvı kristal renk aralığı ve ortalama renk sıcaklığı.

2.2.4. Yüzeyin Sıvı Kristalle Kaplanması

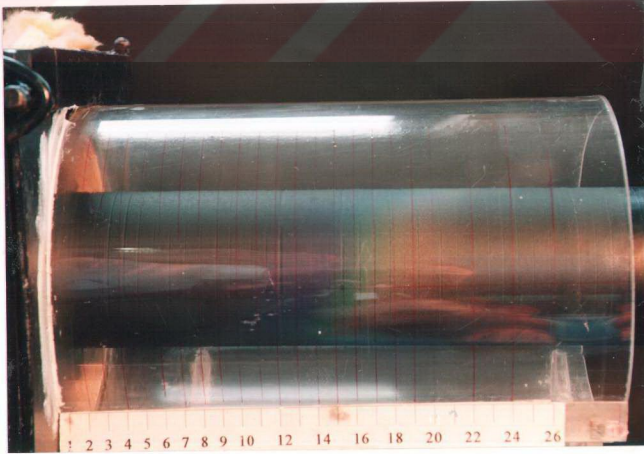
Sıvı kristal yüzeye, ince bir tabaka halinde uygulanmalıdır. Bu amaçla mikrokapsüllü sıvı kristal, öncelikle su ile inceltilmiş ve daha sonra sprey tabancası ile ince bir film şeklinde yüzeye püskürtülmüştür. Her püskürtme işleminden sonra, karışımdaki suyun buharlaşması için test elemanı belli bir süre oda sıcaklığında bekletilmiştir. Böylelikle sulu karışım damlacıklarının yüzeyde akıntı oluşturması önlenerek, homojen sıvı kristal dağılımı elde edilmesi sağlanmıştır.

Sıvı kristal renklerinin canlı olarak izlenebilmesi için sıvı kristal tabaka kalınlığının en az 50 ile 100 mikron arasında olması gerekir. Bu kalınlık yeterince sağlanamazsa, renkler solgun ve cansız olur. Bu durumda renklerin kalınlığını ve ara geçiş çizgilerini tesbit etmek zorlaşır [16]. Uygulamada tabaka kalınlığı, renklerin netliği dikkate alınarak belirlenmiştir.

Sıvı kristal renklerinin, çalışmalar sırasında net bir şekilde izlenebilmesi için test elemanı yüzeyi siyaha boyanmıştır. Boya malzemesi olarak, oluşacak tabaka kalınlığının ince olması için mürekkep formunda boya kullanılmıştır.

2.2.5. Deneysel Verilerin Ölçülmesi

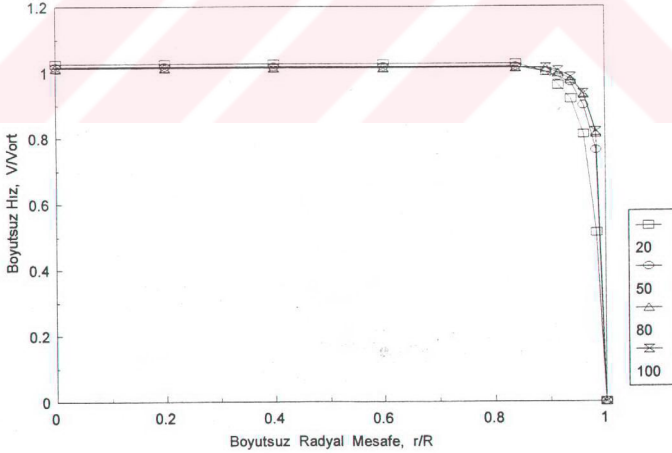
Test elemanı yüzeyinde, ısı transferi sonucunda oluşan sıvı kristal renk genişliğinin ve eksenel yöndeki konumunun ölçülebilmesi için, Şekil 10'da görüldüğü gibi, çalışma bölgesine 1/1 ölçeğinde uzunluk skalası yerleştirilmiştir. Sağlıklı okumanın yapılabilmesi için, şeffaf dış borunun yüzeyi de 10 mm aralıklarla ölçeklendirilmiştir. Çalışma bölgesine, kamera ile izlenebilecek şekilde dijital bir kronometre yerleştirilerek, geçen süre kamera kaydıyla belirlenmiştir.



Şekil 10. Sıvı kristal renk bandının eksenel yönde zamanla konumunun ölçülmesi.

Konsantrik halka aralığındaki ortalama hızı belirleyebilmek için, rügar tüneli çıkışında, test eleman öncesinde, farklı debilerde pitot tüpüyle hız taraması yapılarak deney seti, hız kontrol sayacına göre kalibre edilmeye çalışılmıştır. Ancak farklı zamanlarda yapılan deneylerde, çevre basıncının ve sıcaklığının değişmesi nedenleriyle kalibrasyon değerleri hata oluşturmuştur. Bu hatanın giderilmesi için halka akım girişindeki hız dağılımından yararlanılmıştır. Şekil 11'de gösterilen hız kontrol ünitesinin farklı skala değerlerindeki hız dağılımlarından görüleceği gibi, halka akım girişinde nisbeten homojen bir hız dağılımı mevcuttur. Bu nedenle deneyler esnasında, halka akım girişinde eksene yakın bir noktadan pitot tüpü ile dinamik basınç ölçülmüş ve maksimum hız hesaplanmıştır. Farklı debilerde (hız kontrol ünitesinin skala değerindeki artış debi artışına karşılık gelir) elde edilen hız dağılımları kullanılarak, ortalama hız, Simpson yöntemiyle sayısal olarak hesaplanmıştır [20]. Bulunan ortalama ve maksimum hız değerleri kullanılarak, C_d hız düzeltme katsayısı (8) ifadesi tanımlanmıştır.

$$C_d = \frac{V_{\text{mat}}}{V_{\text{ort}}} \quad \dots \quad (8)$$



Şekil 11. Halka akım girişinde hız kontrol ünitesinin farklı skala değerlerindeki hız dağılımları.

Farklı debilerdeki maksimum ve ortalama hız değerleri kullanılarak hesaplanan C_d değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Deneylerde hız düzeltme katsayısı olarak 1.0182 değeri kullanılmıştır. Bu değer, Tablo 2'deki hız düzeltme katsayılarının aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.

Deneylerde maksimum hız ölçülerek, C_d ve (8) ifadesi yardımıyla, halka akım girişindeki ortalama hız belirlenmiştir.

Tablo 2. Farklı debilerde hesaplanan hız düzeltme katsayıları.

Hız Kontrol Skalası	20	40	50	70	80	100
V_{\max} (m/s)	2.2458	3.7242	4.4916	5.8885	6.8487	9.3140
V_{ort} (m/s)	2.1845	3.6574	4.4112	5.8041	6.7448	9.1779
$C_d = V_{\max}/V_{\text{ort}}$	1.02807	1.01827	1.01823	1.01456	1.01541	1.01483

Halka aralığındaki ortalama hız, test elemanının cidar kalınlığından dolayı kesitte meydana gelen küçülme dikkate alınarak, (9) ifadesiyle hesaplanmıştır. Bu ifadede, d_2 halka aralık dış çapını, d_{e2} test eleman dış çapını (halka aralık iç çapı), d_{e1} test eleman iç çapını, V_{ort} halka geometri girişindeki ortalama hızı, \bar{V} halka aralığındaki ortalama hızı göstermektedir.

$$\bar{V} = V_{\text{ort}} \frac{d_2^2}{d_2^2 - (d_{e2}^2 - d_{e1}^2)} \dots \dots \dots (9)$$

2.3. Isı Transfer Katsayısının Hesabı

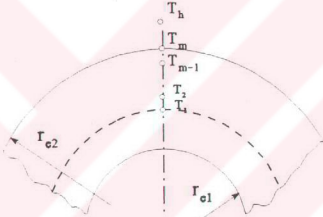
Çapları farklı iki borunun, içiçe merkezlenmesi ile elde edilen halka (annular) akımda lokal ısı transfer katsayısını belirleyebilmek için, annular geometriyi oluşturan iç silindirik elemandaki (test elemanda) ısı transferinden yararlanılmıştır. Bunun için başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir.

Belli bir anda ortam sıcaklığında olan test elemanın (pleksiglas boru), gelişmiş türbülanslı akımın elde edildiği sıcak rüzgar tüneli önüne indirilmesiyle, T_0 ortam

sıcaklığındaki test eleman ile T_h sıcaklığındaki akışkan arasında ısı transferi gerçekleşir. Buradan hareketle deneysel ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak, test eleman yüzeyindeki (halka akımdaki) ısı taşınım katsayısı sayısal olarak hesaplanır.

2.3.1. Zaman Bağımlı Isı İletim Denklemi ve Sınır Koşulları

Sıcak akışkan önüne indirilen, r_{e2} - r_{e1} cidar kalınlığındaki test elemanı başlangıçta T_0 ortam sıcaklığındadır. Eleman içerisinde ısı üretimi yoktur. Çözüm için, eksenal yöndeki ısı transferi ihmal edilmiştir. Şekil 12'de şematik olarak gösterilen problemi tanımlayan ısı transfer denklemi, başlangıç ve sınır şartları şu şekilde ifade edilir:



Şekil 12. Problemin şematik gösterimi.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (r_{e1} + r_{e2})/2 \leq r \leq r_{e2}, \quad t > 0 \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$r = (r_{e1} + r_{e2})/2, \quad t > 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$r = r_{e2}, \quad t > 0, \quad k \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_h - T_m) \quad \dots \dots \dots (12)$$

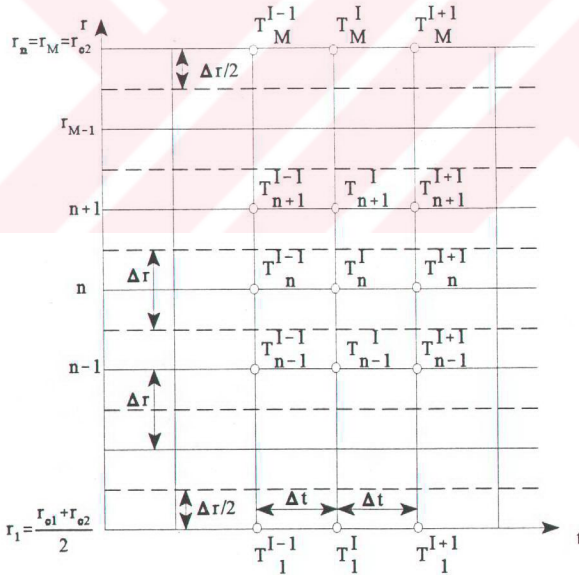
$$t = 0, \quad (r_{e1} + r_{e2})/2 \leq r \leq r_{e2}, \quad T = T_0 \quad \dots \dots \dots (13)$$

2.3.2. Problemin Sonlu Farklarda İfadesi

Bu çalışmada, zaman bağımlı ısı iletim denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Birçok sayısal yöntemde çözümün iraksamaması için bir yakınsakhik kriterinin kullanılması gerekmektedir. Bu durum dikkate alınarak, ısı iletim denkleminin sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümünde, her hangi bir sınırlayıcı kriter gerektirmeyen Crank-Nicolson implicit metodu kullanılmıştır [20]. Çözümde kullanılan sonlu fark ağı, Şekil 13'de gösterilmiştir.

$n=1$ düğüm noktasında, türev sınır koşulu dikkate alınarak, enerji dengesi eşitliği;

$$\frac{\rho_c C_{pc} (r_1 \delta\theta \delta x \delta r)}{2} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{k_c}{2} \delta x \delta\theta \left[(r_1 + \frac{\delta r}{2}) \left(\frac{T_2^{I+1} - T_1^{I+1}}{\delta r} + \frac{T_2^I - T_1^I}{\delta r} \right) \right] \quad (14)$$



Şekil 13. Çözümde kullanılan sonlu fark ağı.

şeklinde yazılır. (14) ifadesi düzenlenerek;

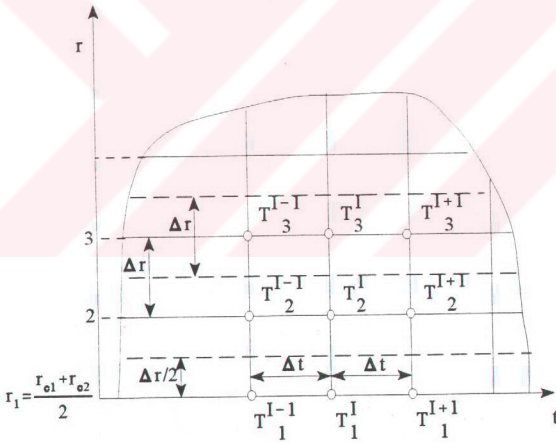
$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\alpha}{\delta r^2} \left[\left(1 + \frac{\delta r}{2r_1} \right) (T_2^{I+1} - T_1^{I+1} + T_2^I - T_1^I) \right] \dots \dots \dots (15)$$

ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{T_1^{I+1} - T_1^I}{\Delta t}, \quad Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\delta r^2} \quad \text{tanımları kullanılarak;}$$

$$\left(1 + Fo \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_1} \right) \right) T_1^{I+1} - Fo \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_1} \right) T_2^{I+1} = Fo \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_1} \right) (T_2^I - T_1^I) + T_1^I \dots (16)$$

son şeklini alır. Türev sınır koşulu ile ilgili sonlu fark ağı Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Türev sınır koşulu.

$n=2$ ile $n=M-1$ aralığındaki düğüm noktaları için enerji dengesi eşitliği,

$$\rho_c C_{pc} (r_n \delta \theta \delta x \delta r) \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{k_c}{2} \delta x \delta \theta \left[\left(r_n - \frac{\delta r}{2} \right) \left(\frac{T_{n-1}^{I+1} - T_n^{I+1}}{\delta r} + \frac{T_{n-1}^I - T_n^I}{\delta r} \right) \right]$$

$$+ \frac{k_c}{2} \delta x \delta \theta \left[\left(r_n + \frac{\delta r}{2} \right) \left(\frac{T_{n+1}^{I+1} - T_n^{I+1}}{\delta r} + \frac{T_{n+1}^I - T_n^I}{\delta r} \right) \right] \dots \dots \dots (17)$$

yazılıp, düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\alpha}{2 \delta r^2} & \left[\left(1 - \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n-1}^{I+1} - 2 T_n^{I+1} + \left(1 + \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n+1}^{I+1} \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n-1}^I - 2 T_n^I + \left(1 + \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n+1}^I \right] \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

şeklini alır. $\frac{\partial T}{\partial t}$ açılımı ve Fo tanımı kullanılarak (18) eşitliği için,

$$\begin{aligned} - \frac{Fo}{2} \left(1 - \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n-1}^{I+1} + (1 + Fo) T_n^{I+1} - \frac{Fo}{2} \left(1 + \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n+1}^{I+1} \\ = \frac{Fo}{2} \left(1 - \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n-1}^I + (1 - Fo) T_n^I + \frac{Fo}{2} \left(1 + \frac{\delta r}{2 r_n} \right) T_{n+1}^I \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

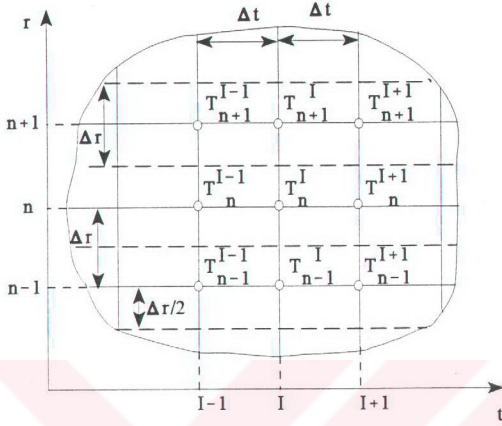
ifadesi elde edilir. n=2 ile n=M-1 aralığındaki düğüm noktaları için kullanılan ağ yapısı Şekil 15 'de gösterilmiştir.

n=M düğüm noktası için, konveksiyon sınır koşulu dikkate alınarak enerji dengesi eşitliği yazılır ve düzenlenirse,

$$\begin{aligned} \rho_c C_{pc} (r_M \delta \theta \delta x \delta r) \frac{\partial T_M}{\partial t} = \frac{k_c}{2} \delta x \delta \theta \left[\left(r_M - \frac{\delta r}{2} \right) \left(\frac{T_{M-1}^{I+1} - T_M^{I+1}}{\delta r} + \frac{T_{M-1}^I - T_M^I}{\delta r} \right) \right] \\ + \frac{h}{2} \delta x \delta \theta r_M (T_h - T_M^{I+1} + T_h - T_M^I) \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial t} = \frac{\alpha}{\delta r^2} \left[\left(1 - \frac{\delta r}{2 r_M} \right) (T_{M-1}^{I+1} - T_M^{I+1} + T_{M-1}^I - T_M^I) + \frac{h \delta r}{k} (2 T_h - T_M^{I+1} - T_M^I) \right] \dots (21)$$

elde edilir. $\frac{\partial T_M}{\partial t}$ açılımı, Fo ve Bi (Biot) sayısı tanımları kullanılarak,

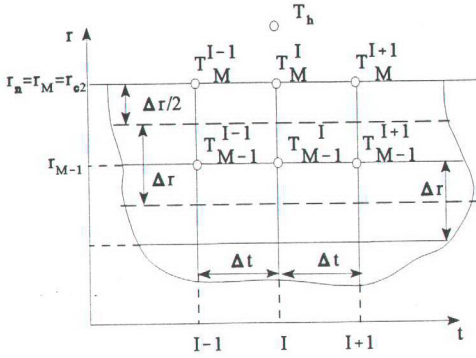


Şekil 15. Ara düğüm noktalarında kullanılan sonlu fark ağı.

$$\begin{aligned}
 -\frac{Fo}{2} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_M} \right) T_{M-1}^{I+1} + \left[1 + Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_M} + Bi \right) \right] T_M^{I+1} &= Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_M} \right) T_{M-1}^I \\
 + \left[1 - Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_M} + Bi \right) \right] T_M^I + 2 Fo Bi T_h &\dots\dots\dots (22)
 \end{aligned}$$

denklemi elde edilir. Konveksiyon sınır koşulunda kullanılan ağ yapısı Şekil 16'da gösterilmiştir.

(16), (19), (22) ifadeleri kullanılarak, (23)'de gösterilen, A.T=F formunda denklem takımı elde edilmiştir. Bu denklem takımı çözülerek, radyal yöndeki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir [19].



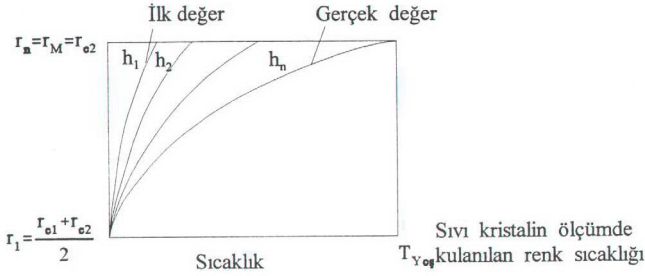
Şekil 16. Konveksiyon sınır koşulunda kullanılan sonlu fark ağı

$$\begin{bmatrix}
 b_1 & c_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 a_2 & b_2 & c_2 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & a_3 & b_3 & c_3 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & a_{m-1} & b_{m-1} & c_{m-1} & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & 0 & a_m & b_m & \dots & \dots & \dots & \dots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 T_1 \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 \dots \\
 T_{m-1} \\
 T_m
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 F_1 \\
 F_2 \\
 F_3 \\
 \dots \\
 F_{m-1} \\
 F_m
 \end{bmatrix}
 \dots \dots \dots (23)$$

2.3.3. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Deney esnasında sıvı kristalin ortalama $T_{Y_{es}}$ sıcaklığının konum ve zaman değerleri bir video kamera ile belirlenmiştir. Ölçülen bu değerler ve küçük bir ısı taşınım katsayısı kabulü yapılarak, test elemanın radyal yöndeki sıcaklık dağılımı hesaplanmış ve test elemanın yüzey sıcaklığı (T_m) belirlenmiştir.

Hesap sonucu bulunan yüzey sıcaklığı ile sıvı kristalin ölçülmüş ortalama yeşil renk sıcaklığı $T_{Y_{es}}$ aynı ise kabul edilen ısı transfer katsayısı doğrudur, aksi takdirde eşitlik sağlanıncaya kadar iterasyona devam edilir. İterasyona, $T_{Y_{es}} - T_m \leq 0.01$ değerine erişildiğinde son verilir. Isı taşınım katsayısının hesabı şematik olarak Şekil 17.'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Isı taşınım katsayısı hesaplanması.

Test elemanın yüzeyindeki, sıvı kristalin $T_{y,es}$ sıcaklığı, eksenel yönde ölçülen yeşil renk bandının konum ve zaman değerleri kullanılarak, her bir ısı transfer katsayısına göre hesaplanmaya çalışılarak, yerel ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı taşınım katsayıları kullanılarak, yerel Nusselt sayıları belirlenmiştir.

Nusselt sayısı;

$$Nu = \frac{h \cdot x}{k_a} \dots \dots \dots (24)$$

şeklinde tanımlanır. Burada k_a , havanın ısı iletim katsayısı olup, film sıcaklığına göre hesaplanmıştır. Film sıcaklığı;

$$T_f = \frac{(T_{y,es} + T_h)}{2} \dots \dots \dots (25)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Eksenel yönde hesaplanan ısı taşınım katsayıları ve (24) ifadesi kullanılarak, yerel ısı transfer katsayıları (Nusselt sayıları; Nu) dağılımı elde edilmiştir.

2.4. Hesaplamalar İçin Geliştirilen Bilgisayar Programı

Kullanılan bilgisayar programı, bir ana program ve üç köşeli bant matris çözümünün gerçekleştirdiği ÇÖZÜM alt programından oluşmaktadır. Ana programın ilk kısmında, Crank-Nicolson implisit yöntemiyle elde edilen sonlu fark denklemlerinin

çözümü yapılarak, test elemanın radyal yöndeki sıcaklık dağılımı hesaplanır. Sıvı kristalin yeşil renk sıcaklığı (TM) ile bulunan yüzey sıcaklığı $T(NB+1)$ arasındaki fark, $T_{y_{0q}} - T_m \leq 0.01$ değerine erişinceye kadar iteratif çözüm tekrarlanır. Bu işlem, deneysel olarak sıvı kristalin okuma yapılan her konumunda tekrarlanarak, akım yönünde farklı konumlardaki ısı taşınım katsayıları belirlenmektedir.

Yerel ısı taşınım katsayıları kullanılarak, yerel Nusselt sayıları hesaplanmakta; bu değerler kullanılarak da Simpson yöntemi ile ortalama Nusselt değerleri bulunmaktadır. Ayrıca girişte ölçülen dinamik basınca karşılık gelen manometrik yükseklik ve hız düzeltme katsayıları kullanılarak ortalama hız ve Reynolds değerleri hesaplanmaktadır.

Bilgisayara veri olarak aşağıdaki değerler girilmiştir.

- 1- Çevre sıcaklığı (Test elemanın başlangıç sıcaklığı), TAC.
- 2- Hava akımı sıcaklığı , TAH ($60 \pm 0.5^\circ\text{C}$).
- 3- Sıvı kristalin ortalama yeşil renk sıcaklığı, TM (42.3°C).
- 4- Test elemanın iç yarıçapı, R(1).
- 5- Test elemanın dış yarıçapı (halka akım iç yarıçapı), R(2).
- 6- Konsantrik halka geometri dış yarıçapı, RAD2.
- 7- Renk bandının aksel yönde okunan konum-zaman değerlerinin adeti, NUM.
- 8- Test elemanın sonlu fark çözümü için radyal yönde oluşturulan bölme sayısı, NB.
- 9- Zaman adım miktarı, ZAMANADI
- 10- Ortam basıncı ve dinamik basınca karşılık gelen manometrik yükseklik, PO, FH.
- 11- Sıvı kristalin yeşil renk bandının aksel yöndeki konum, zaman değerleri, XX(I), TIME(I).

Programaya veri olarak girilen NB değeri, radyal yönde birim adım miktarı (Δr) 0.5 mm olacak şekilde belirlenirken, zaman adım miktarı (Δt) değeri ise 1 s olarak programaya girilmiştir. Yapılan sayısal çözümler sonucunda, Δr 'nin 3 mm'den, Δt 'nin ise 5 s'den küçük değerlerinde elde edilen sonuçların değişmediği görülmüştür. Başka bir ifadeyle ağ yapısından bağımsız çözüm elde edilmiştir. Bu nedenle, radyal adım miktarı ve zaman adım miktarı olarak nisbeten küçük değerler seçilmiştir.

Pleksiglas malzemeden imal edilen test elemanların fiziksel özellikleri, ısı yayılım katsayısı olarak $AK=1.0692 \cdot 10^{-7}$ şeklinde programda sabit olarak atanmıştır. Bu değer, pleksiglas üretici firmanın katalog değerleri ve [21]'de yer alan fiziksel değerler $k_e=0.1884$ W/mK, $\rho_e=1200$ kg/m³ ve $C_{pe}=1468.3$ J/kgK kullanılarak;

$$\alpha = \frac{k_e}{\rho_e C_{pe}} = 1.0692 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan bilgisayar programı EK Tablo 1'de verilmiştir.

3. BULGULAR

Elde edilen sonuçların gösterimi, öncelikle yerel ısı transfer katsayılarının dağılımı şeklinde olacaktır. Farklı Re değerlerinde elde edilen yerel Nu dağılımları kullanılarak, ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}), Reynolds sayısına göre değişimleri verilecektir. Son olarak, test elemanda, farklı Re ve eksenel konumlarda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi gösterilecektir.

Deneyler üç değişik çap oranında ($d^*=d_1/d_2$) gerçekleştirilmiştir (0.778, 0.667, 0.5). Ölçümler, deney düzeneğinin kapasitesi nedeniyle Re 'un 7000=35000 değerleri arasında yapılmıştır. Hava akımı sıcaklığı, referans değerlerle karşılaştırma imkanı sağlamak ve yüksek debilerde ısıtıcılara aşırı yüklenmemek için 60 (± 0.5) °C'de deneyler gerçekleştirilmiştir. Başka bir ifadeyle, Pr=0.7 de ölçümler yapılmıştır.

Deneyler esnasında çalışma bölgesinin, rejime erişmiş sıcak rüzgar tüneli önüne indirilince, test elemanın cidar kalınlığı nedeniyle sistemin rejim durumundan bir miktar uzaklaştığı görülmüştür. Bu nedenle, sistem rejime gelirken, rüzgar tüneli çıkışına, test elemanın radyal boyutlarında bir model yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında bu model sıcak hava akımı önünden kaldırılarak çalışma bölgesi indirilmiştir. Böylece rejim durumu korunmuştur.

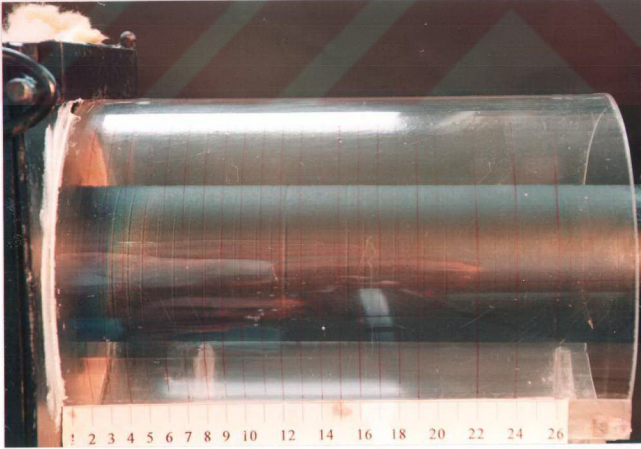
Bir deneyin ardında, test elemanın homojen olarak çevre sıcaklığına (başlangıç şartı) erişmesinin uzun zaman aldığı tesbit edilmiştir. Bu nedenle, sıcak hava akımı önünden kaldırılan çalışma bölgesi girişine ayrı bir fan yerleştirilerek, test elemanın daha kısa sürede ve homojen bir şekilde çevre sıcaklığına erişmesi sağlanmıştır.

3.1. Yerel Isı Transfer Katsayıları Dağılımı

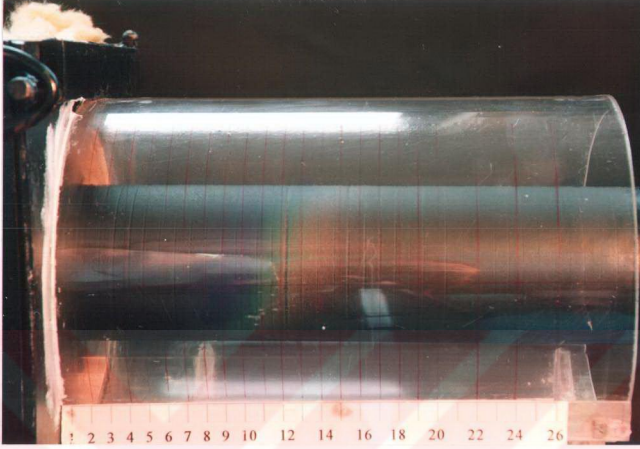
Farklı Re değerlerinde ölçülen yerel ısı transfer katsayıları dağılımının gösterimi, boyutsuz eksenel uzaklığa (x/d_c) göre yapılmıştır.

Isı transfer katsayı hesaplamalarında, deneysel veri olarak bilgisayar programına girilen ve deneyler esnasında video kameraya kayıt edilen sıvı kristal renginin konum ve zaman ilişkisi, 0.5 çap oranında, $Re=20513$ değeri için, Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de fotoğraflarla gösterilmiştir. Fotoğrafların çekimi, şeffaf pleksiglass boruda oluşan parlama nedeniyle, flaşsız, gün ışığında yapılmak durumunda kalmıştır. Ancak, ışık kaynağı kontrol edilemediğinden, renk bandı düzgünlüğü bir miktar bozulmuştur.

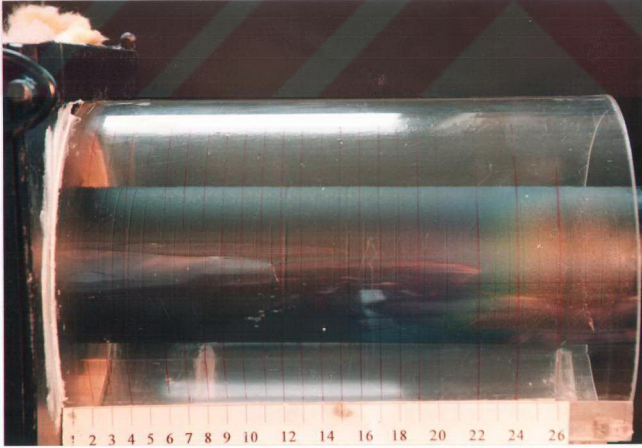
0.5 çap oranında, 10010, 16155, 20513, 25737, 30386, 34091 Reynolds sayısı değerlerindeki yerel ısı transfer katsayıları dağılımı Şekil 21'de, 0.667 oranında ve 10016, 13366, 16356, 21152, 23648, 27957, 32425 Reynolds sayısındaki dağılımlar Şekil 22'de, 0.778 oranında ve 7861, 10391, 13638, 15724, 18226, 20579, 23974, 27796 Reynolds sayısındaki dağılımlar Şekil 23'de gösterilmiştir.



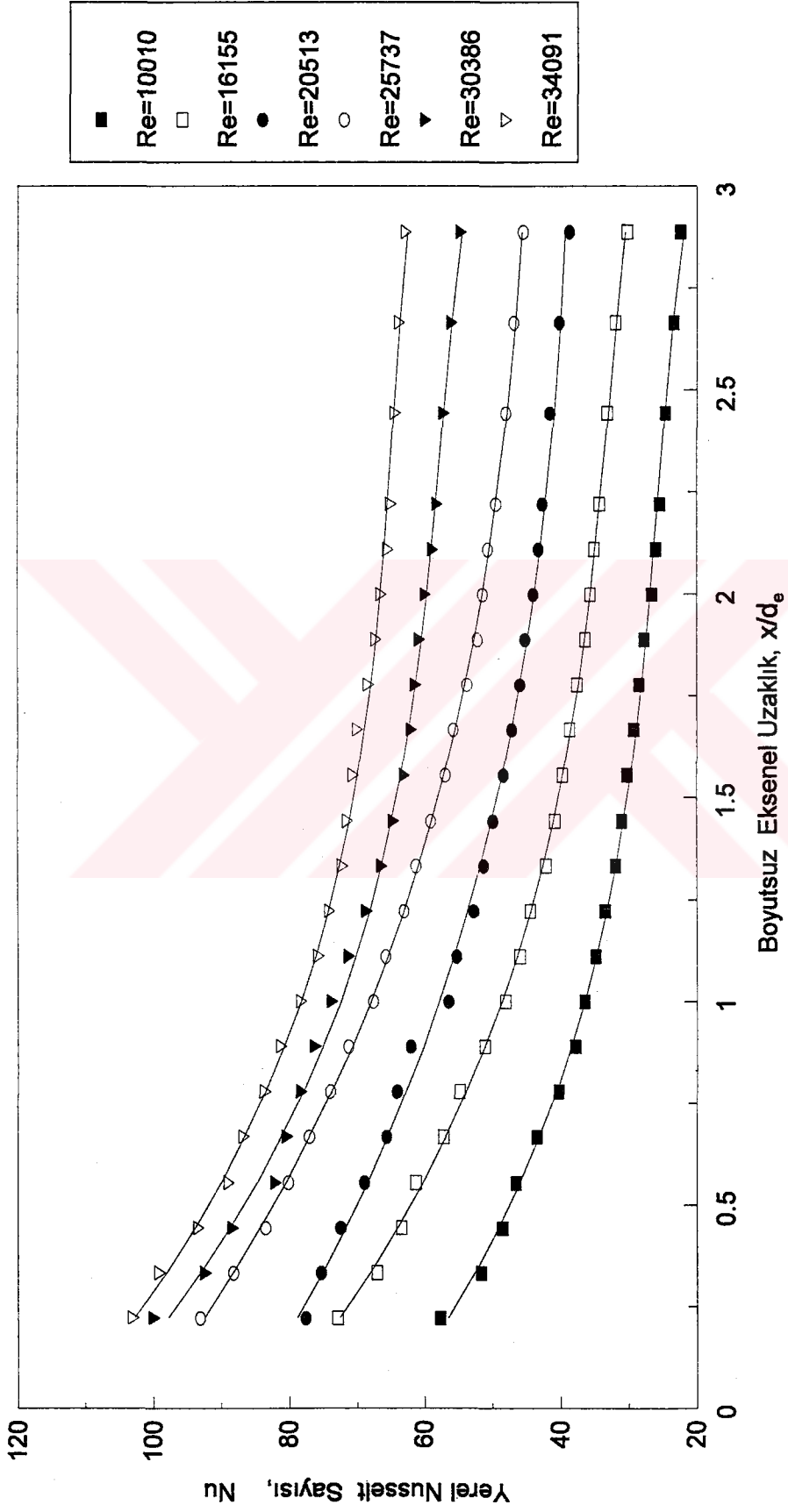
Şekil 18. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=165$ s'deki sıvı kristal renk bandının konumu ($x/d_e=0.333$).



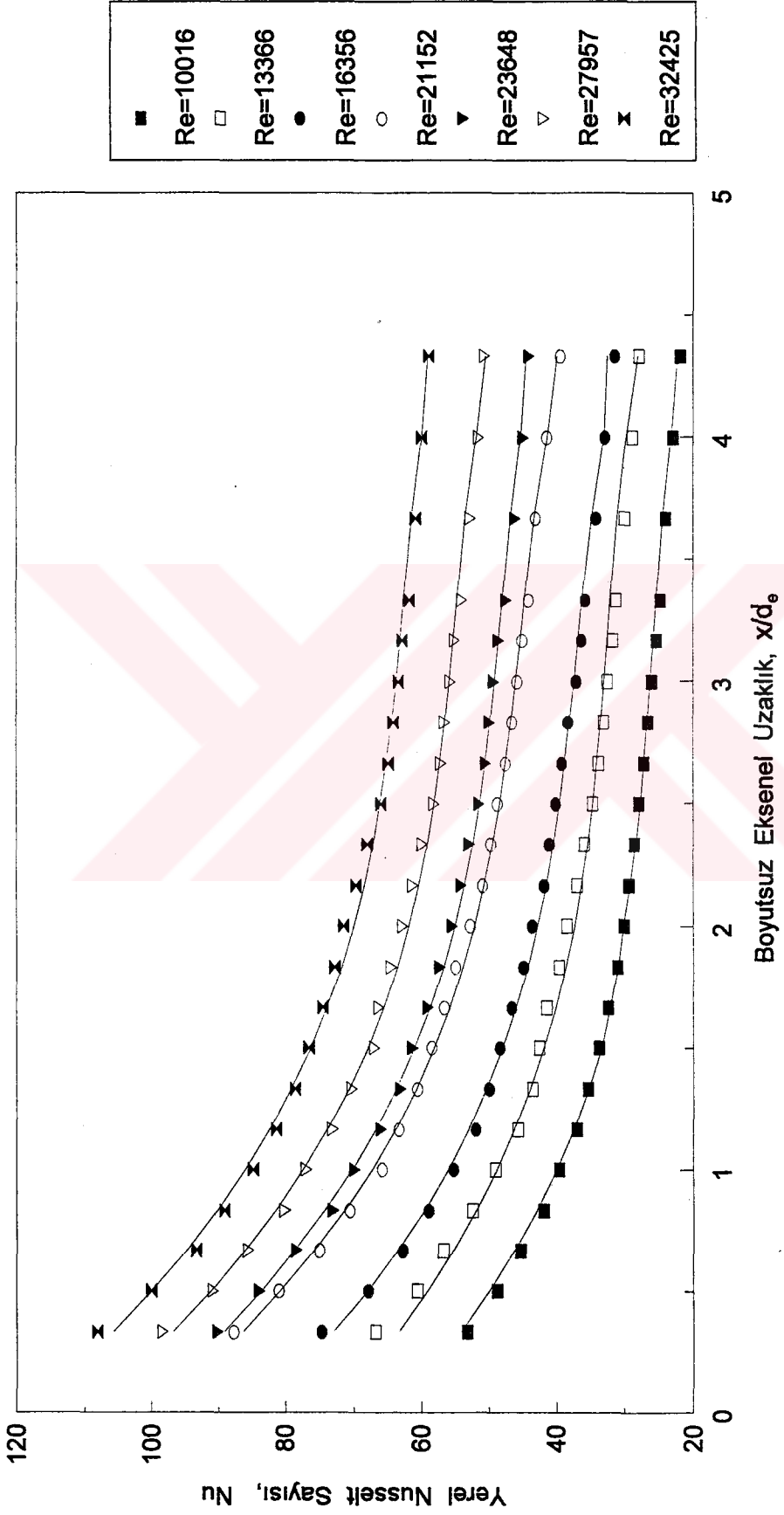
Şekil 19. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=268$ s'deki sıvı kristal renk bandının konumu ($x/d_e=1.227$).



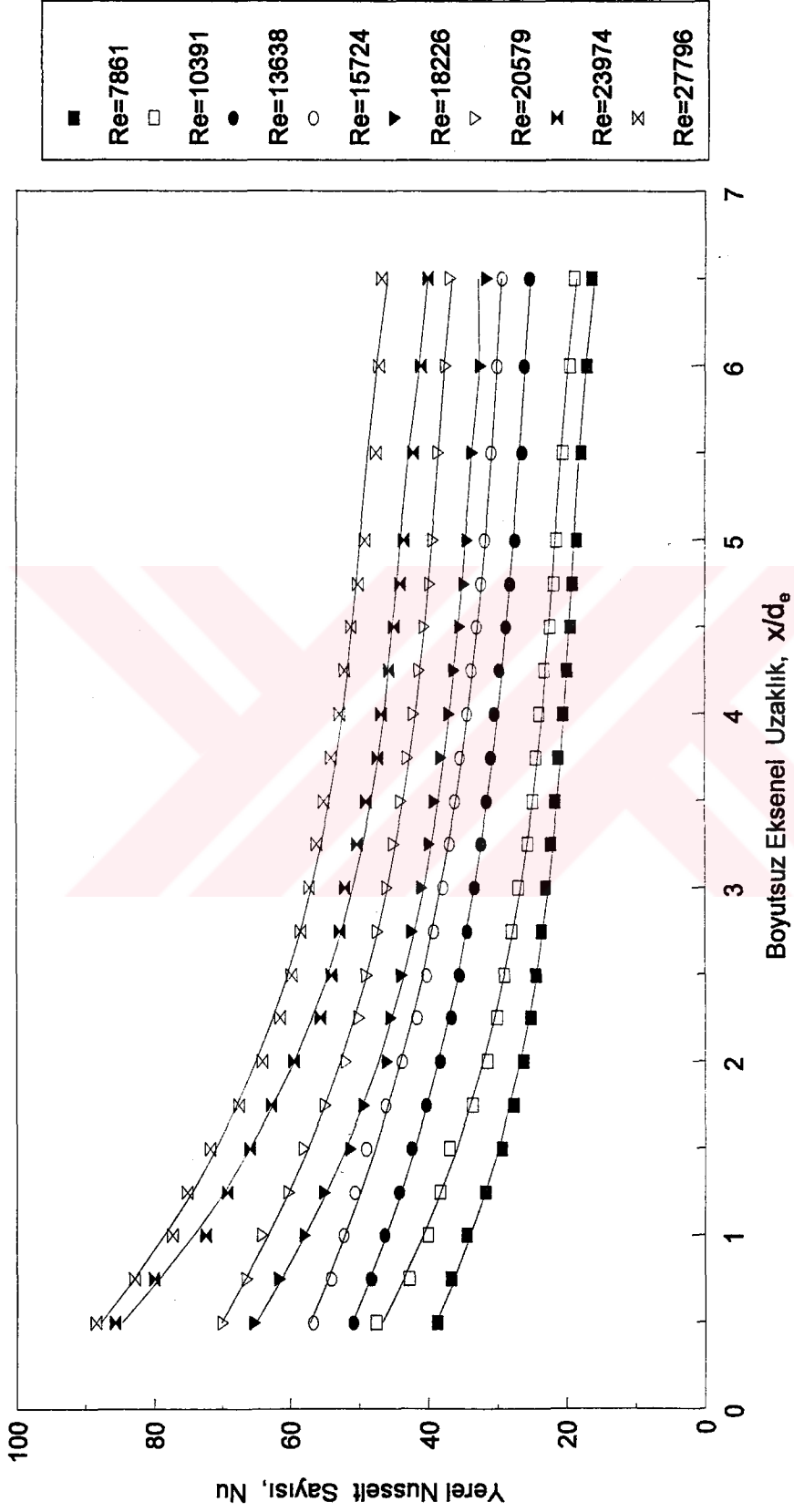
Şekil 20. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=364$ s'deki sıvı kristal renk bandının konumu ($x/d_e=2.667$).



Şekil 21. Yerel ısı transfer katsayısının akım yönünde değişimi, $d^*=0.5$.



Şekil 22. Yerel ısı transfer katsayısının akım yönünde değişimi, $d^*=0.667$.



Şekil 23. Yerel ısı transfer katsayısının akım yönünde değişimi, $d^*=0.778$.

Grafiksel gösterimi yapılan yerel ısı transfer katsayıları dağılımı, ayrıca herbir çap oranı için, Re ve x/d_e bağılı olarak aşağıdaki ampirik bağıntılarla ifade edilmiştir. Bağıntıların hesabında kullanılan a ve b değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

a) $d^*=0.5$ çap oranı için;

$$Nu = a (Re) + b (Re) \ln (x / d_e) \dots \dots \dots (26)$$

$$a (Re) = -1.413 \cdot 10^{-8} \cdot Re^2 + 0.00237 \cdot Re + 14.2005 \dots \dots \dots (26.a)$$

$$b (Re) = -2.218 \cdot 10^{-8} \cdot Re^2 - 0.001106 \cdot Re - 5.21027 \dots \dots \dots (26.b)$$

b) $d^*=0.667$ çap oranı için;

$$Nu = a (Re) + b (Re) \ln (x / d_e) \dots \dots \dots (27)$$

$$a (Re) = -2.73945 \cdot 10^{-8} \cdot Re^2 + 0.0031396 \cdot Re + 11.4599 \dots \dots \dots (27.a)$$

$$b (Re) = 2.03559 \cdot 10^{-8} \cdot Re^2 - 0.00115029 \cdot Re - 3.32441 \dots \dots \dots (27.b)$$

c) $d^*=0.778$ çap oranı için;

$$Nu = a (Re) + b (Re) \ln (x / d_e) \dots \dots \dots (28)$$

$$a (Re) = -6.0809 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 + 0.00248986 \cdot Re + 13.9006 \dots \dots \dots (28.a)$$

$$b (Re) = -2.3156 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 - 0.000363 \cdot Re - 6.38302 \dots \dots \dots (28.b)$$

Tablo 3. Yerel ısı transfer dağılımları için hesaplanan a ve b değerleri.

$d^*=0.5$			$d^*=0.667$			$d^*=0.778$		
Re	a	b	Re	a	b	Re	a	b
10010	36.684	-14.13	10016	39.418	-12.44	7861	33.213	-9.15
16155	48.406	-17.71	13366	49.368	-15.41	10391	39.947	-11.55
20513	56.746	-17.14	16356	55.571	-16.85	13638	45.481	-10.93
25737	66.619	-20.28	21152	66.653	-19.02	15724	51.366	-11.93
30386	72.606	-18.16	23648	69.545	-18.66	18226	56.830	-14.01
34091	78.684	-16.95	27957	76.668	-19.06	20579	62.172	-14.15
-	-	-	32425	85.227	-19.58	23974	72.716	-18.46
-	-	-	-	-	-	27796	77.695	-17.30

3.2. Ortalama Isı Transfer Katsayıları Dağılımı

Nusselt sayısının yerel değerleri kullanılarak, ortalama ısı transfer katsayısına (ortalama Nusselt sayısına: \bar{Nu}) geçilmiştir. \bar{Nu} değerleri, bir önceki bölümde, her bir Re için elde edilen,

$$Nu = a + b \ln(x/d_0) \dots \dots \dots (29)$$

formundaki yerel ısı transfer bağıntıları (a ve b değerleri Tablo 3.'de verilmiştir) ve

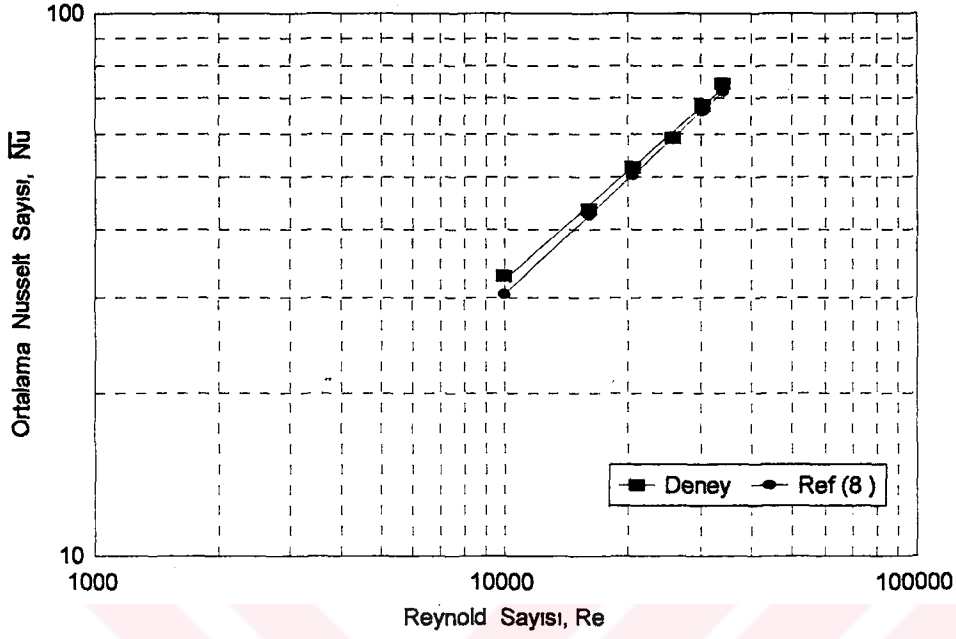
$$\bar{Nu} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} Nu(\bar{x}) d\bar{x} \dots \dots \dots (30)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabileceği gibi, sadece (30) ifadesi kullanılarak da hesaplanabilir. Bunun için, \bar{x}_1 ve Nu_1 (i : eksenel yönde deneysel ölçüm sayısı) değerleri dikkate alınarak, sayısal integrasyon ile \bar{Nu} hesaplanır. Bu çalışmada Simpson metodu kullanılarak sayısal integrasyon yapılmıştır. \bar{x} boyutsuz eksenel uzaklığı (x/d_0) göstermektedir. Her iki şekilde hesaplanan \bar{Nu} değerleri arasında, sıvı kristal renk bandının konum ve zaman değerlerinin çokluğu nedeniyle çok küçük farklılıklar oluşmuştur. Ortalama Nusselt sayılarının gösteriminde sayısal olarak hesaplanan değerler kullanılmıştır. İstenildiği takdirde Tablo 3 değerleri kullanılarak, \bar{Nu} değerleri analitik olarak hesaplanabilir.

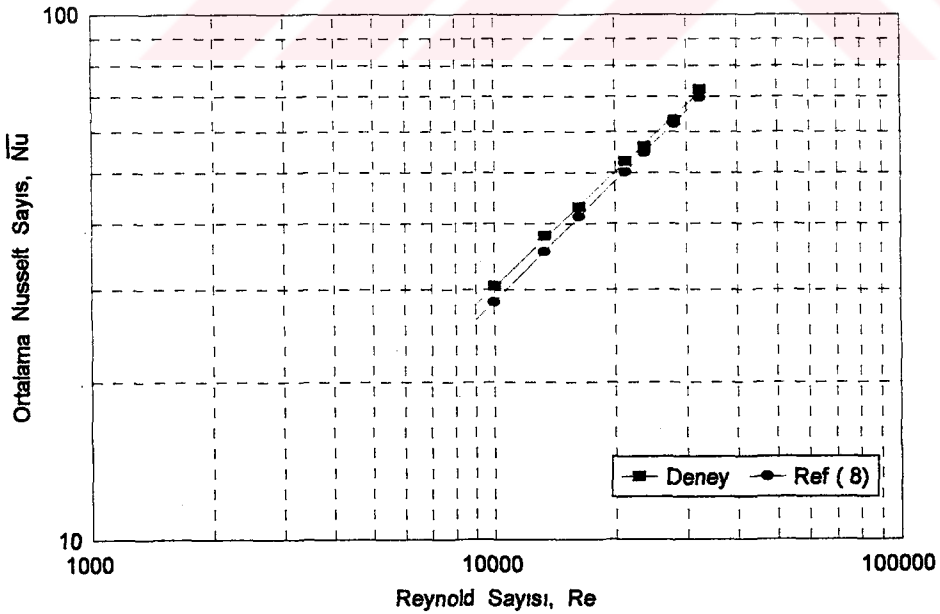
Üç farklı çap oranlarında elde edilen \bar{Nu} değerlerinin Re ile değişimi, Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 26'da, Kays ve Leung'in [8] türbülanslı akımda, iç ve dış silindirlerin izolasyonsuz durumlarında elde ettikleri değerlerle birlikte gösterilmiştirler. Üç farklı çap oranında elde edilen ortalama Nusselt değerlerinin birlikte gösterimi Şekil 27'de yapılmıştır.

3.3. Test Elemanda Sıcaklık Dağılımı

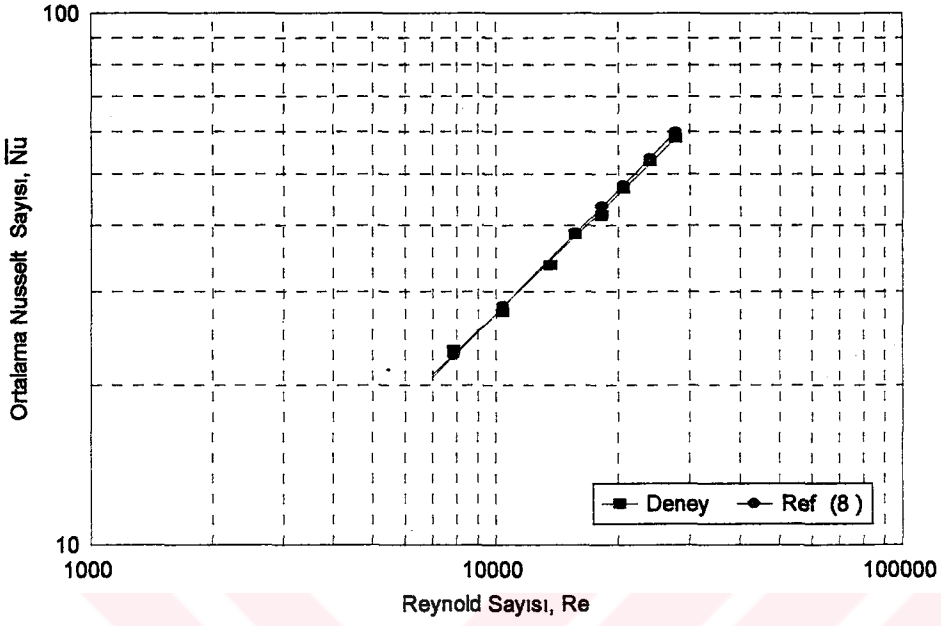
Akım boyunca sıcaklık gradyenine bağlı olarak, sıvı kristal renk bandının etkilenişini ve türev sınır koşulundan kaynaklanan hata oranının incelenebilmesi için, $d_1/d_2=0.667$ çap oranında, farklı akım şartlarında ve eksenel konumlarda, test elemandaki sıcaklık dağılımlarının zamanla değişimi Şekil 28-36 aralığında gösterilmiştir.



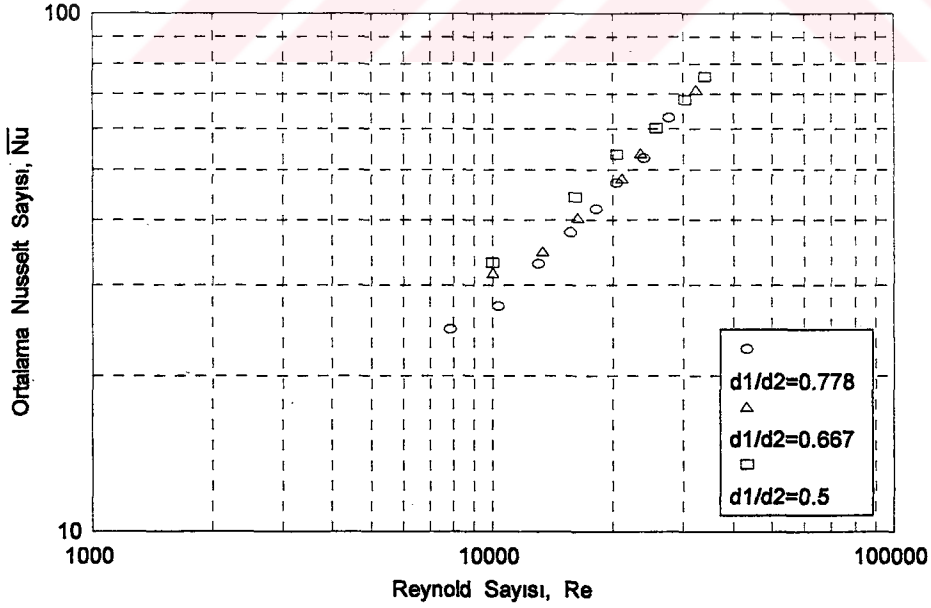
Şekil 24. Ortalama Nusselt sayısının değişimi, $d^*=0.5$.



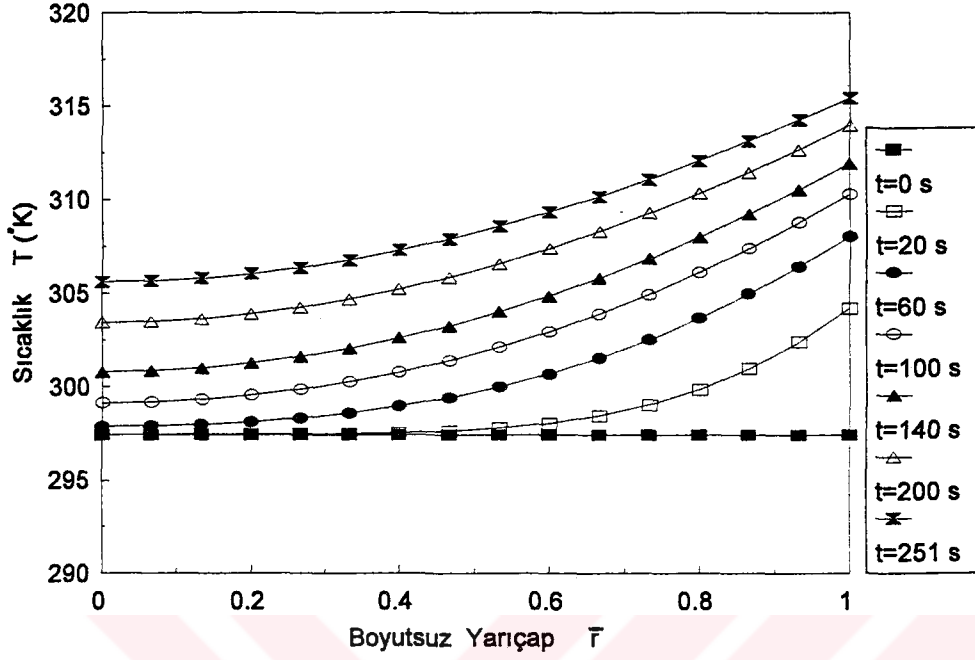
Şekil 25. Ortalama Nusselt sayısının değişimi, $d^*=0.667$.



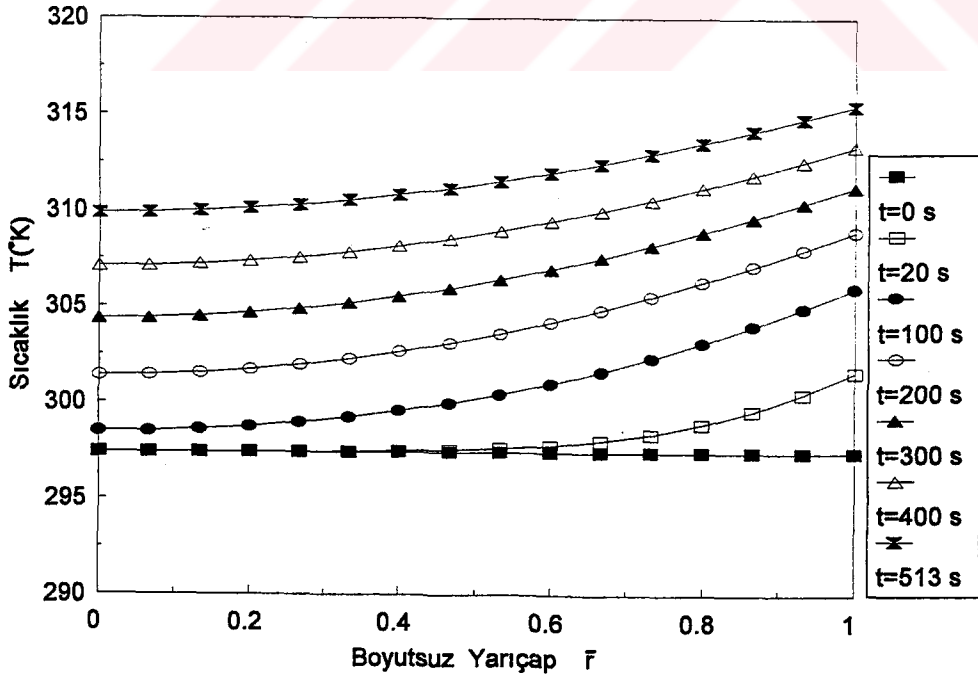
Şekil 26. Ortalama Nusselt sayısının değişimi, $d^*=0.778$.



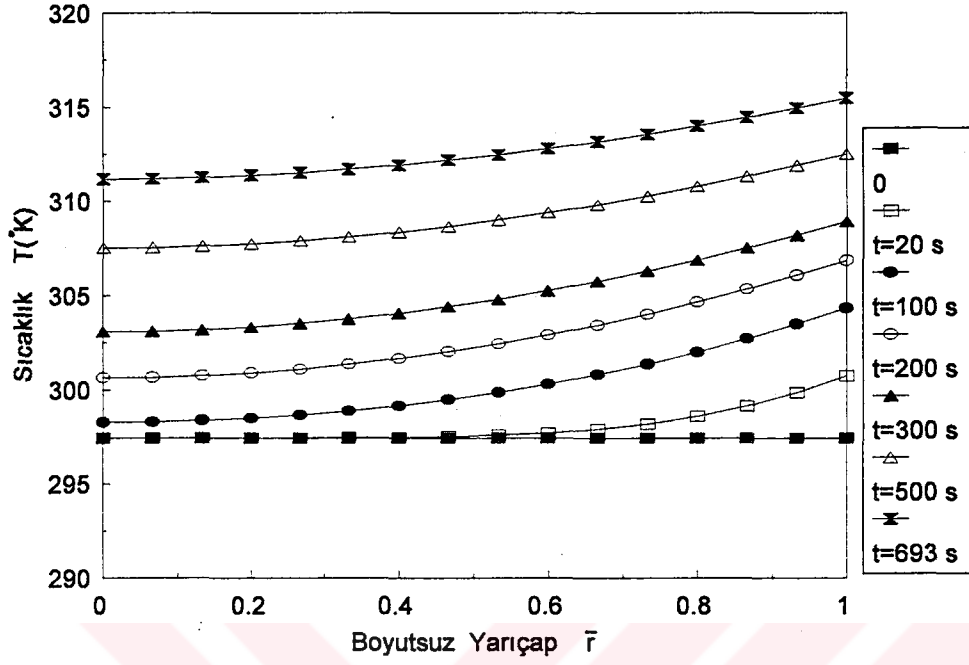
Şekil 27. Ortalama Nusselt değerinin çap oranına göre değişimi.



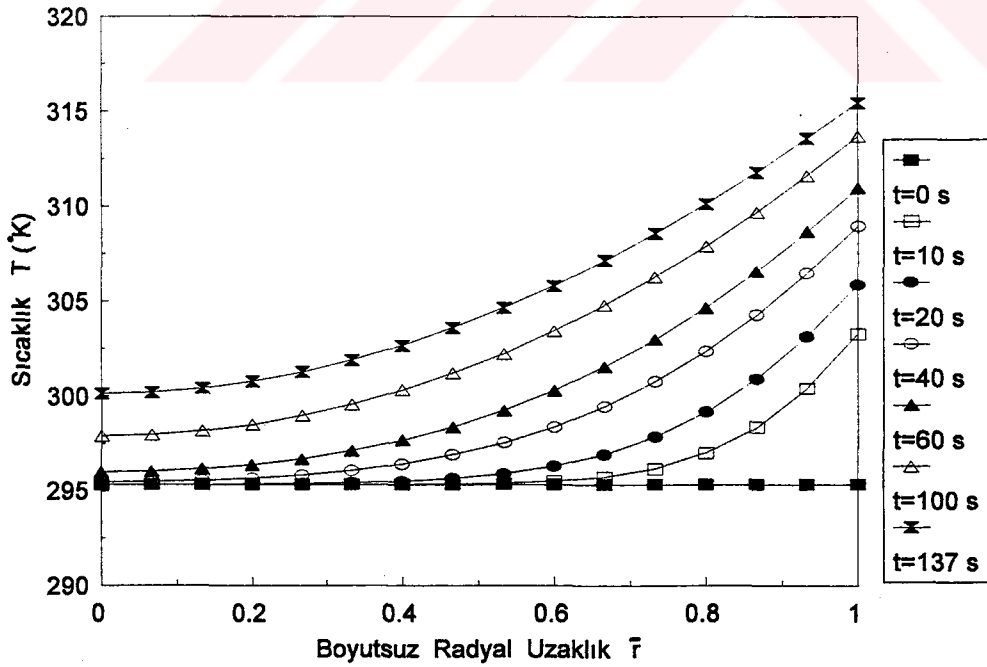
Şekil 28. $d^*=0.667$, $Re=10015$ ve $x/d_e=0.333$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



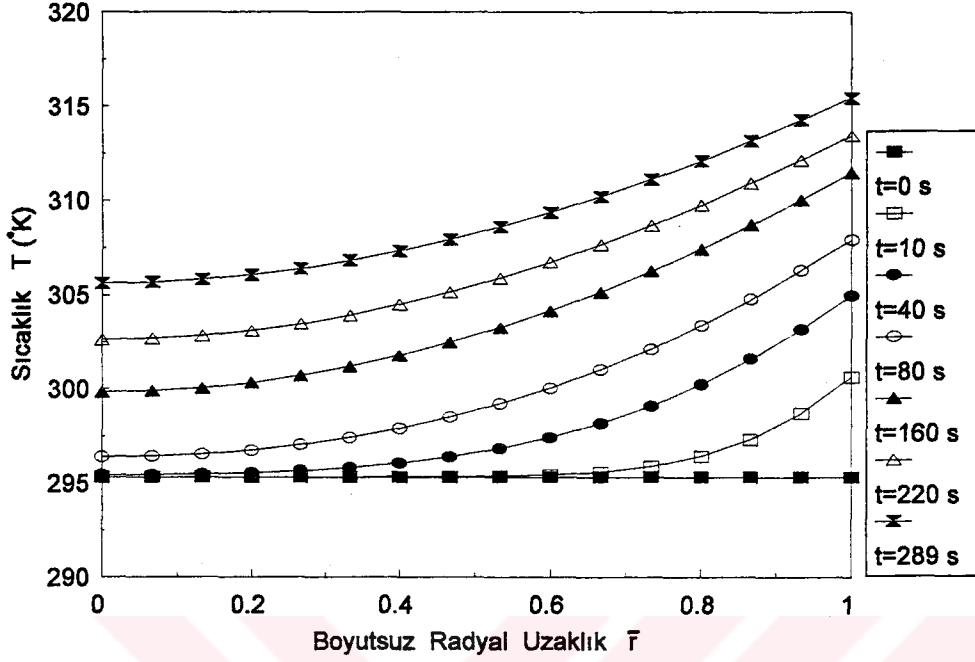
Şekil 29. $d^*=0.667$, $Re=10015$ ve $x/d_e=1.833$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



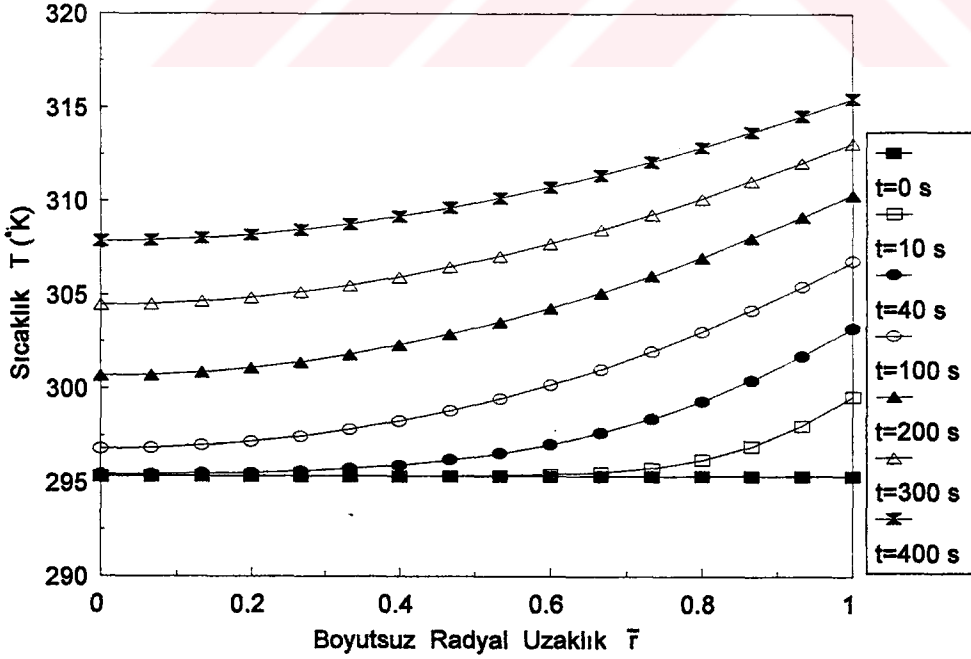
Şekil 30. $d^*=0.667$, $Re=10015$ ve $x/d_e=3.666$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



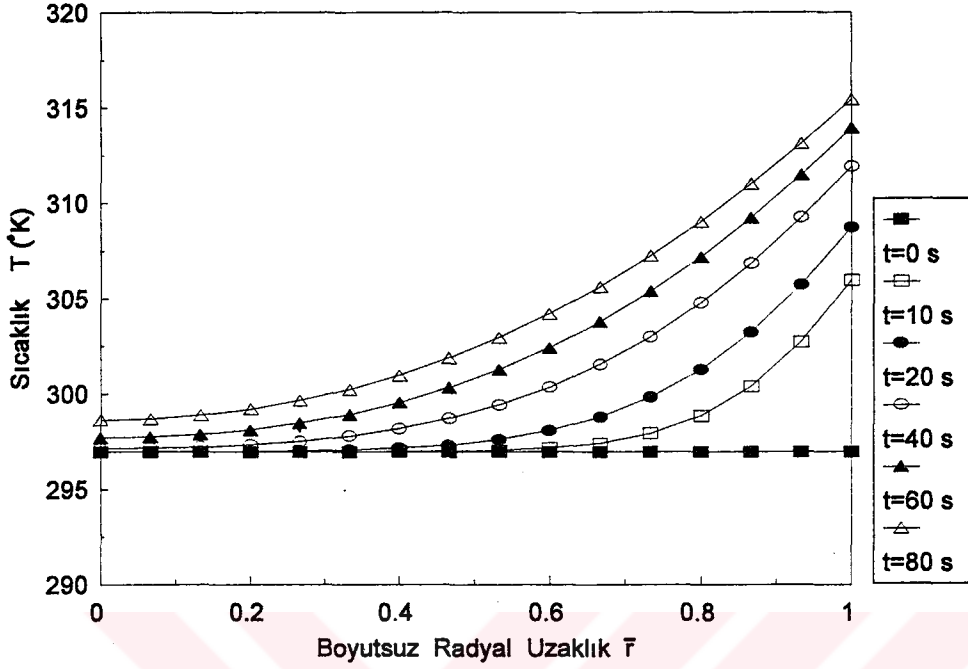
Şekil 31. $d^*=0.667$, $Re=21152$ ve $x/d_e=0.333$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



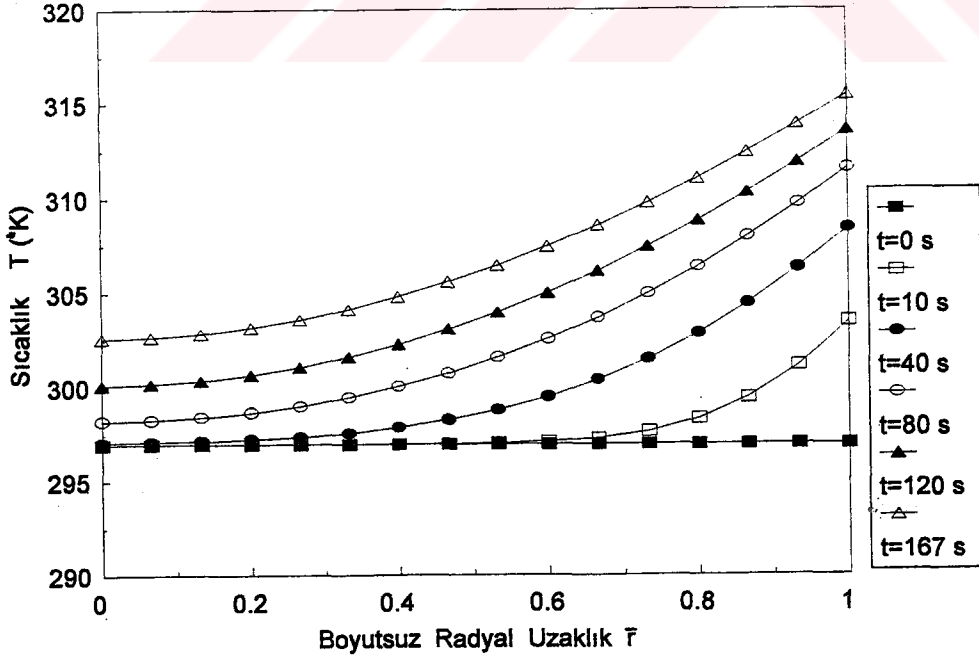
Şekil 32. $d^*=0.667$, $Re=21152$ ve $x/d_e=1.833$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



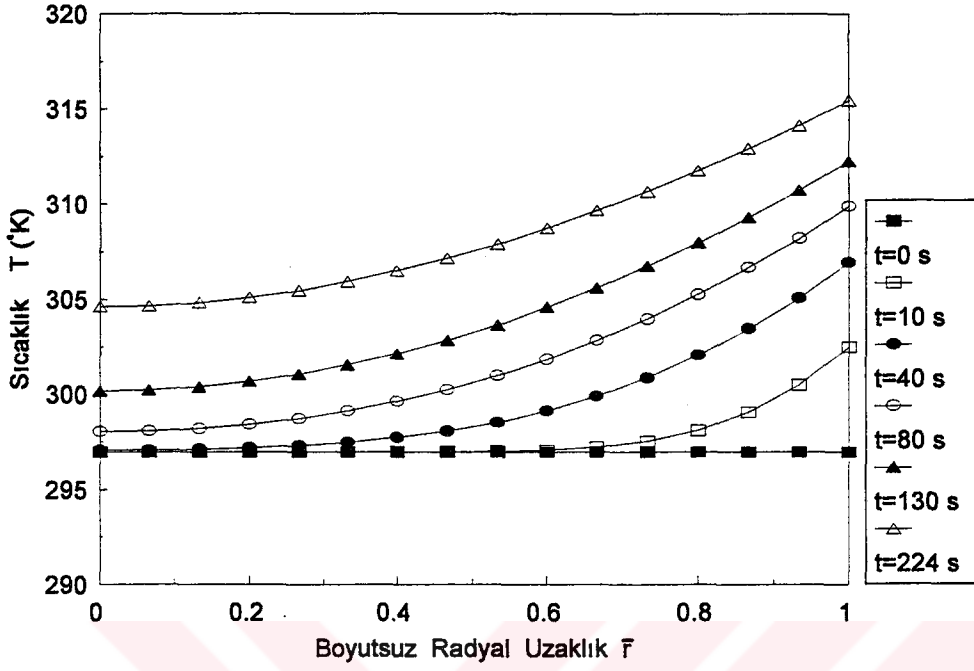
Şekil 33. $d^*=0.667$, $Re=21152$ ve $x/d_e=3.666$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



Şekil 34. $d^*=0.667$, $Re=32423$ ve $x/d_e=0.333$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



Şekil 35. $d^*=0.667$, $Re=32423$ ve $x/d_e=1.833$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.



Şekil 36. $d^*=0.667$, $Re=32423$ ve $x/d_e=3.666$ konumunda, test elemanda sıcaklık dağılımının zamanla değişimi.

4. İRDELEME

Bu çalışmada, konsantrik halka geometride, 0.5, 0.667 ve 0.778 çap oranlarında ve $7000 < Re < 35000$ Reynolds sayısı değerlerinde, ısı transfer karakteristiklerinin akım ve geometrik şartlara bağlı olarak değişimleri, sıvı kristal yöntemi kullanarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bir önceki bölümde verilmiştir.

Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23'de görüldüğü gibi, yerel ısı transfer katsayıları akım yönünde logaritmik olarak azalmaktadırlar. Re sayısının artan değerlerinde ısı transfer katsayıları da artarak, değişim şeklini korumuştur. Ancak, bazı deneylerde elde edilen yerel Nu sayısı değişimlerinin, diğer deneylerinkiyle uyuşmadığı görülmüştür. Şöyleki, halka akım girişinde beklenenden daha yüksek bir ısı transfer katsayısı söz konusu olurken, çıkışa doğru tersi durum söz konusu olmuştur. Bu durum, iki deney arasında test elemanın bütün noktalarının homojen olarak çevre sıcaklığına erişememesinden kaynaklandığı, yapılan deneylerle tesbit edilmiştir. Bu problemin giderilmesi için iki deney arasında uzun bir süre beklemek gerekmiştir. Bu da zaman kaybına neden olduğundan, sıcak hava akımından kaldırılan halka akım (çalışma bölgesi) girişine, seyyar bir fan yerleştirilerek daha kısa sürede test elemanın çevre sıcaklığına erişmesi sağlanmıştır.

Farklı çap oranları için elde edilen yerel Nu değişimleri, 2.2.5 bölümünde açıklandığı şekilde hız kontrol ünitesinin kalibrasyon değerlerinin değişmesi nedeniyle, sabit Re değerlerinde sonuçlar elde edilemediğinden birbiriyle mukayese edilememişlerdir. Karşılaştırmalar ortalama Nusselt sayısı üzerinden yapılmıştır.

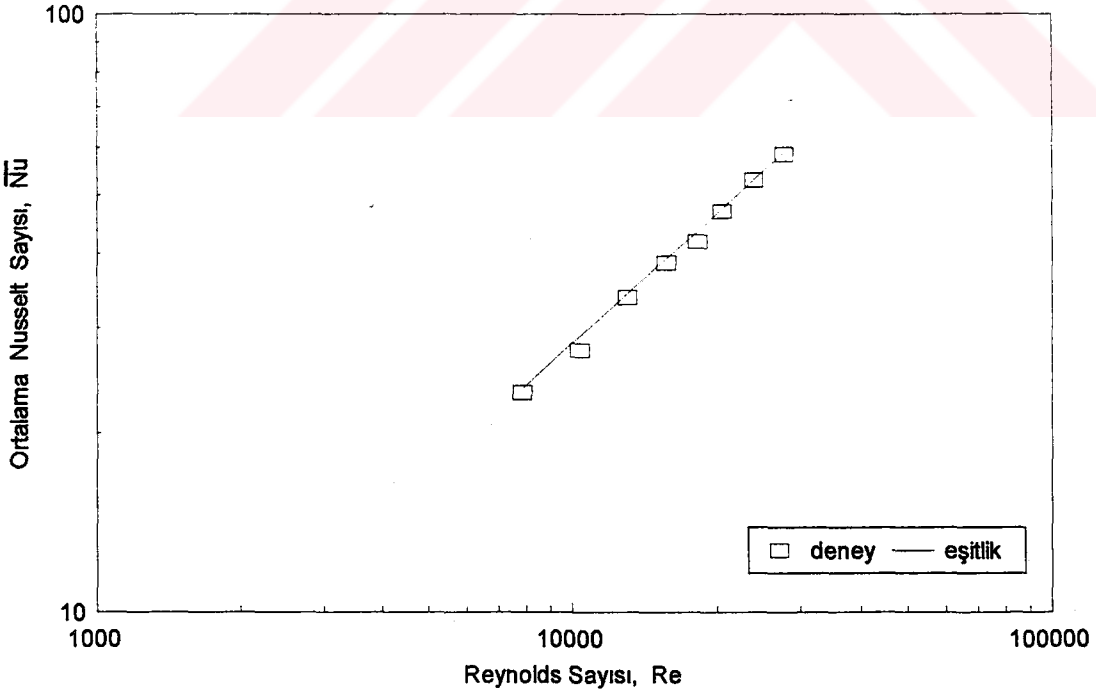
Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 26'da , yerel Nusselt sayıları kullanılarak, Simpson sayısal integrasyon yöntemiyle hesaplanan ortalama Nusselt değerleri, Kays ve Leung'un [8] iç ve dış yüzeyleri izolasyonsuz halka bir geometride, gelişmiş türbülanslı akım için elde edilen Nusselt değerleriyle birlikte gösterilmiştir. 0.778 çap oranı için elde edilen sonuçlar Kays ve Leung 'un sonuçlarıyla iyi bir uyum göstermesine karşın, 0.5 ve 0.667 çap oranlarında, sıvı kristal yöntemiyle elde edilen sonuçlar bir miktar yüksek çıkmıştır. Bu artış daha çok, tornada işlenerek üretilen test elemanların yüzeyinde, özellikle yapıştırılan levhaların birleşme yerlerinde oluşan pürüzlerin, yüzeyde sınır tabakayı bozması ve

türbülansı artırmasından kaynaklanmıştır. 0.667 çap oranı için oluşan farklı %1.7 ile %7.3 arasında olurken, 0.5 çap oranında ise %2.5 ile %7.9 arasında olmuştur.

Farklı çap oranlarıyla elde edilen ortalama Nusselt değerlerinin birlikte gösterimi Şekil 27'de yapılmıştır. Bura da görüldüğü gibi, düzgün yüzeyler tarafından sınırlanan konsantrik halka akımda çap oranları küçüldükçe, başka bir ifadeyle halka akım aralığı büyüdükçe ortalama ısı transfer katsayısı artmıştır. Ancak bu artış nispeten küçük olmuştur.

Elde edilen ortalama Nusselt sayıları (\bar{Nu}) kullanılarak, konsantrik halka akım için, Reynolds sayısı ve çap oranlarına bağlı olarak, deneysel verilere uygun korelasyon sonucu;

$$\bar{Nu} = 0.04118 Re^{0.71864} Pr^{0.42} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{-0.24466} \dots \dots \dots (31)$$



Şekil 37. Deneysel verilerle ampirik bağıntı sonuçlarının karşılaştırılması, $d^*=0.778$.

şeklinde elde edilmiştir. Bu eşitlik, en küçük kareler yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Burada $Pr=0.7$ sabit olup, $Pr^{0.42}$ ifadesi, Stephan 'nın [22] izolasyonsuz durum için vermiş olduğu eşitlik dikkate alınarak kabul yapılmıştır. 0.778 çap oranında elde edilen deneysel sonuçlar ile (31) eşitliğiyle hesaplanan değerler Şekil 37'de gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi, belirlenen ifade ile deneysel veriler çok iyi uyum göstermiştir.

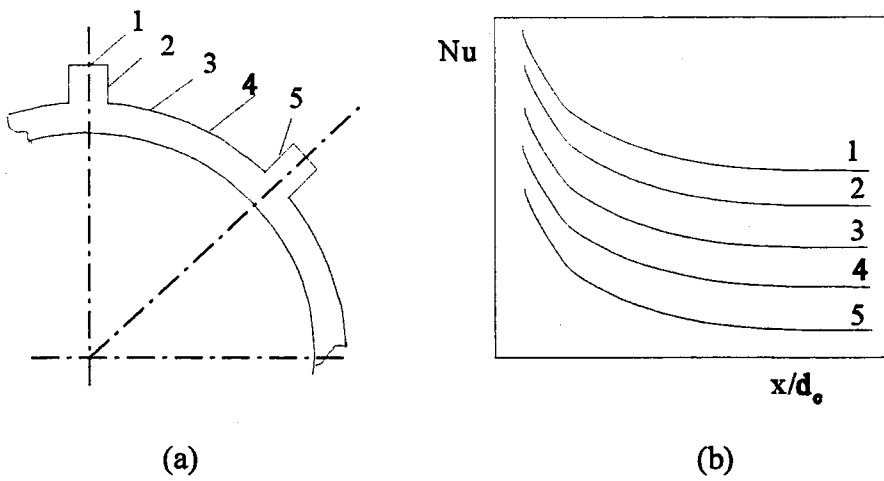
Test elemanın radyal yönde sıcaklık dağılımının sayısal olarak hesaplanması için kullanılan türev sınır şartının, cidar orta noktasında olduğu kabul edilmiştir. Ancak, test elemanının iç (boru akımı) ve dış (halka akım) kısmından aynı özelliklerde hava akımı geçmesine rağmen, farklı yüzeyler ve debiler nedeniyle cidar içerisinde türev noktasının yeri, cidar orta noktasından bir miktar boru akımı veya halka akımı tarafında olabilir. Bu durumda cidar orta noktasında kabul edilen türev sınır şartından kaynaklanabilecek hata oranı belirlemek için, 0.667 çap oranında, Reynolds sayısının düşük, orta ve yüksek değerleri için, $x/d_e=0.333, 1.833$ ve 3.666 konumlarında, radyal yöndeki sıcaklık dağılımlarının zamanla değişimleri elde edilmiştir. $Re=10015$ değeri için farklı aksenal konumlarda hesaplanan sıcaklık dağılımlarının gösterildiği Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30 'da görüleceği üzere, test elemanın yüzeyine yakın noktalarda yüksek sıcaklık gradyeni mevcutken, kullanılan test eleman malzemesinin ısı iletim katsayısının düşük olması nedeniyle cidar orta noktasına doğru çok küçük bir gradyen mevcuttur. Bu nedenle türev sınır koşulunun cidar orta noktasından bir miktar içeride veya dışarıda olması sonuçları yüksek oranda etkilemeyecektir. $Re=21152$ ve 32423 değerlerindeki sıcaklık dağılımlarının verildiği Şekil 31-36'da görüleceği üzere, Re sayısı arttıkça türev sınır koşulunun yerinden dolayı kaynaklanacak hata riski artarken, her Re değeri için bu risk akım yönünde azalmaktadır. Bu çalışmada deney sisteminin kapasitesi nedeniyle çok yüksek Re değerlerine çıkılmadığından, test elemanların cidar kalınlıklarının çok ince olmaması ve kullanılan malzemenin ısı iletim katsayısının çok düşük olması nedenlerinden dolayı, bu hatanın etkisi çalışmalar süresince hissedilmemiştir. Ayrıca, Ek Tablo 1'de verilen program kullanılarak, cidar yüzeyine çok yakın noktalar dışında, türev sınır şartının, cidar kalınlığının farklı konumlarında alınması durumunda elde edilen sonuçların çok küçük değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sırasında, sıvı kristal sürülmü yüzeyi aydınlatmada kullanılan ışık kaynağının, renk bandının konum-zaman değerlerinin ölçümünde kullanılan video kameranın

sıvı kristal sürülmüş yüzeye göre konumları, ölçümlerin sağlıklı yapılabilmesi ve renk bandı düzgünlüğünün korunması açısından önemli olduğu tesbit edilmiştir. Kontrollü ışık gönderilmediği durumlarda Şekil 18..20'de görüldüğü gibi renk bandı düzgünlüğünü bir miktar kaybetmektedir. Ayrıca uygulamalarda dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de, sıvı kristalin kalibrasyonun da yüksek ısı iletimli, test elemanların imalinde ise düşük ısı iletimli malzemeler tercih edilmelidir.

Sıvı kristal yöntemi kullanılarak yapılan ısı transferi incelemelerinde, sıvı kristal renklerinin daha net izlenebilmesi için test eleman yüzeyleri siyaha boyanmalıdır. Kullanılan boya, mürekkep formunda olması tercih edilmelidir.

Sıvı kristal metodu düzgün olmayan yüzeylerin oluşturduğu halka akımlarada uygulanabilir. Fakat, kanat üst ve yan yüzeyler ile kanatsız yüzeylerdeki ısı transferinin farklı olması nedeniyle, sıvı kristal renginin aksenel hareketi düzgün olmayacaktır. Bu durumda renk bandının konum ve zaman değerleri, Şekil 38.(a)'da gösterildiği gibi, iki kanat arasında, farklı konumlarda, akım yönünde ölçülecektir. Ölçüm değerleri kullanılarak, her bir konum için Şekil 38.(b)'de temsili olarak gösterilen yerel ısı transfer katsayıları dağılımı elde edilir. Bu dağılımlar kullanılarak, ortalama yerel ısı transfer katsayıları dağılımı belirlenir.



Şekil 38. Sıvı kristal metodu kullanılarak düzgün olmayan yüzeylerde ısı transfer katsayısının ölçümü.

5. SONUÇLAR

1. Yüzeyde sıvı kristal ile ölçülmüş sıcaklıkların kullanılmasıyla, zamana bağlı ısı iletim denkleminin, sınır koşulları ile sayısal çözümünden, ısı transfer katsayıları hesaplanabilir.

2. Halka geometreli bir akımda yerel ısı transfer katsayıları akım yönünde logaritmik olarak azalma şeklinde bir değişim göstermektedir.

3. Deneysel verilere bağlı olarak ortalama ısı transfer katsayısı Reynolds sayısına bağlı olarak $Re^{0.718}$ şeklinde, çap oranlarına bağlı olarak $(d_1/d_2)^{-0.24466}$ şeklinde değişmekte olduğu tesbit edilmiştir.

4. Sıvı kristalin zamana bağlı sıcaklık ölçümlerinde, test elemanın malzeme cinsi önemlidir. Düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin kullanılması ile sıvı kristal renklerinin birbirine geçiş yaptığı çizgiler net izlenirken, renk aralıkları normal genişlikte olmuştur.

5. Ard arda yapılan deneylerde, test elemanın başlangıç koşullarına tekrar erişmesi için, iki deney arasında yeterli süre beklenilmesi gerekir. Aksi durumda, halka akım girişinde ısı transfer katsayıları büyük çıkmakta, bu da hata oluşturmaktadır.

6. Sıvı kristal kullanılarak yapılan ısı transferi incelemelerinde, test eleman yüzey pürüzlülüğü, ısı transferini, renk bandının genişliğini ve düzgünlüğünü etkilemektedir.

7. Sıvı kristal renklerinin izlenmesinde kullanılan kamera, sıvı kristal sürülü yüzeye, dik olacak şekilde yerleştirilmelidir.

8. Sıvı kristalin kalibrasyonunda, ısı iletimi yüksek malzemeden imal edilmiş test eleman kullanılmalı. Isı transferi incelemelerinde, ısı iletimi düşük malzemeler tercih edilmelidir.

9. Sıvı kristal yöntemi, düzgün yüzeyli olmayan halka akımlarda da uygulanabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Kreith, F., Principles of Heat Transfer, Third Edition, Edward, F.O., Harper International Edition, New York, 1976.
2. Beavers, G.S., Sparrow, E.M. ve Magnuson, R.A., Experiments On Hydrodynamically Developing Flow in Rectangular Ducts of Arbitrary Aspect Ratio, International Journal of Heat and Mass Transfer, 13 (1970) 689-702.
3. Sarioğlu, M., Silindirik Boru İçerisinde Yerleştirilen Silindirik Yüzey Elemanlarının Akım Ortamına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991.
4. Lamb, H., Hydrodynamiccs, Sixth Edition, Dover Publication, Dover Publications, New York, 1982.
5. Yavuz, T. ve Özkılıç, S., Annular Bir Boru İçerisinde Akım Alanı ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Nümerik Analizi, Isı Bilimi ve Tekniği 6. Ulusal Kongresi, Ankara, Bildiriler Kitabı, (1987) 192-201.
6. Reynolds, W.C., Lundberg, R.E. ve Mccuen, P.A., Heat Transfer in Annular Passages. General Formulation of The Problem for Arbitrarily Prescribed Wall Temperatures or Heat Fluxes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 6 (1963) 483-493.
7. Lundberg, R.E., Mccuen, P.A. ve Reynolds, W.C., Heat Transfer in Annular Passages. Hydrodynamically Developed Laminar Flow With Arbitrarily Prescribed Wall Temperatures or Heat Fluxes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 6 (1963) 495-529.
8. Kays, W.M. ve Leung, E.Y., Heat Transfer in Annular Passages. Hydrodynamically Developed Turbulent Flow with Arbitrarily Prescribed Heat Flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 6 (1963) 537-557.
9. Rohsenow, W.R., Hartnett, J.P. ve Gonic, E.N., Handbook of Heat Transfer Fundamentals, Second Edition, MnGraw -Hill Book Company, New York, 1984.
10. Heaton, H.S., Reynolds, W.C. ve Kays, W.M., Heat Transfer in Annular Passages. Simultaneous Development of Velocity and Temperature Fields in Laminar Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 6 (1964) 763-781.
11. Shumway, R.W. ve McEligot, D.C., Heated Laminar Gas Flow in Annuli with Temperatur - Dependent Transport Properties , Nüclear Science and Engineering, 46 (1971) 394-407.

12. Coney, J.E.R. ve El-Shaarawi, M.A.I., Finite Difference Analysis For Laminar Flow Heat Transfer in Concentric Annuli with Simultaneously Developing Hydrodynamic and Thermal Boundary Layers, International Journal of Numerical Methods in Engineering, 9 (1975) 17-38.
13. Agrawal, A.K. ve Sengupta, S., Laminar Fluid Flow and Heat Transfer in An Annulus with An Externally Enhanced Inner Tube, International Journal of Heat and Fluid Flow, 14 (1993) 54-63.
14. Bulut, İ., Isı Taşınım Katsayılarının Kondüksiyon Çözüm Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1986.
15. Bilen, K., Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
16. Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K., Mitsushiro, K. ve Ueda, M., Improved Liquid-Crystal Thermometry Excluding Human Color Sensation, Transactions of the ASME-Journal of Heat Transfer, 111 (1989) 558-565.
17. Doyran, A.G., Paraşüt Aerodinamiği ve Endüstriyel Amaçlı Düşük Türbülanslı Rüzgar Tüneli Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1985.
18. Bilgin, A., Farklı Kesit Şekline ve Eşdeğer Koniklik Açısına Sahip Geçiş Borularının Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1988.
19. Aktaş, Z., Öncül, H. ve Ural, S., Sayısal Çözümleme, Birinci Baskı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1984.
20. Özışık, N.M., Heat Conduction, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1980.
21. Kakaç, S., Isı Transferine Giriş I, Üçüncü Baskı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1987.
22. Dağsöz, A.K., Isı Geçişi, Dördüncü Baskı, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul, 1989.

7. EKLER

Ek Tablo 1. Bilgisayar Programı

C23456

```
REAL K
DOUBLE PRECISION T(200),A(200),B(200),C(200),F(200),
*VU,V,DH2,GNU(50),H2(50),XD(50),NUORT,TO
DIMENSION R(30),XX(50),TIME(50)
OPEN(25,FILE='KUVVET.VER')
OPEN(27,FILE='KUVVET.DAT')
READ(25,*)TAH,TAC,TM,R(1),R(2),RAD2,NUM,NB,ZAMANADI
READ(25,*) PO,FH
DH2=2*(RAD2-R(2))/1000.
R(1)=R(1)*0.001
RAD2=RAD2*0.001
R(2)=R(2)*0.001
DR=((R(2)-R(1))/2)/NB
DH=(RAD2-R(2))*2
DO 22 I=1,NUM
READ(25,*)XX(I),TIME(I)
22 XX(I)=XX(I)*0.001
TAH=1.32049+23.2018*TAH
TAH=TAH+273.15
TAC=1.32049+23.2018*TAC
TAC=TAC+273.15
TM=TM+273.15
TE=(TAH+TM)/2
TK=1.38758E-11*TE**3-4.82294E-8*TE**2
1+0.000102587*TE-0.000579549
THIC=R(2)-R(1)
R(1)=R(1)+THIC/2.
```

```

DO 8 N=2,NB+1
8  R(N)=R(1)+DR*(N-1)
   AK=1.0692E-7
   K=0.1884
   DO 999 I=1,NUM
   CONS=ZAMANADI
   FO=AK*CONS/(DR**2)
   H2(I)=1.0
   M=TIME(I)/CONS
   DO 14 N=1,NB+1
14  T(N)=TAC
C  *****
C  **TEST ELEMANDA RADYAL SICAKLIK DAĞILIMI HESAPLANIYOR**
C  *****
27  DO 332 N=1,M
    B(1)=1.+FO*(1.+(DR/(2*R(1))))
    C(1)=-FO*(1.+(DR/(2*R(1))))
    F(1)=FO*(1.+(DR/(2*R(1))))*(T(2)-T(1))+T(1)
    DO 511 J=2,NB
      A(J)=(FO/(-2.))*(1.-DR/(2.*R(J)))
      B(J)=(1.+FO)
      C(J)=(FO/(-2.))*(1.+DR/(2.*R(J)))
      F(J)=(FO/2.)*(1.-DR/(2.*R(J)))*T(J-1)+(1.-FO)*
+T(J)+(FO/2.)*(1.+DR/(2*R(J)))*T(J+1)
511  CONTINUE
    A(NB+1)=(-FO)*(1.-DR/(2*R(NB+1)))
    B(NB+1)=1.+FO*(1.-(DR/(2*R(NB+1))))+H2(I)*DR/K
    F(NB+1)=FO*(1.-(DR/(2.*R(NB+1))))*T(NB)+(1.-FO*(1.-
+(DR/(2*R(NB+1))))+H2(I)*DR/K)*T(NB+1)+
+FO*H2(I)*DR*2*TAH/K
332  CALL SOLVE (NB+1,A,B,C,F,T)
    IF ((TM-T(NB+1)) .GT. 3.) H2(I)=H2(I)+0.5
    IF ((TM-T(NB+1)) .GT. 1.) H2(I)=H2(I)+0.1

```

```

IF ((TM-T(NB+1)) .LT. 1.) H2(I)=H2(I)+0.05
IF ((TM-T(NB+1)).LT. 0.01) GOTO 7
H2(I)=H2(I)+0.01
DO 16 J=1,NB+1
16  T(J)=TAC
    GOTO 27
7    GNU(I)=H2(I)*DH/TK
    XD(I)=XX(I)/DH
999  CONTINUE
    DO 888 I=1,NUM
    WRITE(*,*) XD(I),GNU(I)
888  WRITE(27,108) XD(I),GNU(I)
C    *****
C    ***ORTALAMA NUSSELT SAYISI HESAPLANIYOR***
C    *****
    BATOP=0.
    TOP=0.
    DO 30 I=1,NUM-1
    BATOP=((GNU(I)+GNU(I+1))/2.)*(XD(I+1)-XD(I))
    TOP=TOP+BATOP
30   CONTINUE
    NUORT=TOP/(XD(NUM)-XD(1))
    WRITE(*,*) 'ORTALAMA NUSSELT SIMSON ILE=',NUORT
C    *****
C    *** REYNOLDS SAYISI HESAPLANIYOR***
C    *****
    ROS=784.
    SR=287.
    G=9.80665
    TO=TAH
    VU=-3.20451E-8*TO**3+0.000127052*TO**2+0.02415*TO-1.97827
    VU=VU*1E-6
    ROH=PO*100000/(750.*SR*TO)

```

V=SQRT(2*ROS*G*FH/(ROH*1000))

RE=V*DH2/VU

WRITE(*,*) 'HIZ VE REYNOLDS DEGERI =',V,RE

108 FORMAT (1X,F10.3,3X,F10.2)

STOP

END

C *****

C ***ÜÇ KÖŞELİ BANT MATRİS ÇÖZÜMÜ***

C *****

SUBROUTINE COZUM (NM,A2,B2,C2,F2,T2)

DOUBLEPRECISIONT2(200),D(200),U(200),L(200),+Z(200),A2(200),
+B2(200),C2(200),F2(200)

D(1)=B2(1)

U(1)=C2(1)

DO 49 J=2,NM-1

L(J)=A2(J)/D(J-1)

D(J)=B2(J)-L(J)*U(J-1)

U(J)=C2(J)

49 CONTINUE

L(NM)=A2(NM)/D(NM-1)

D(NM)=B2(NM)-L(NM)*U(NM-1)

Z(1)=F2(1)

DO 59 J=2,NM

Z(J)=F2(J)-L(J)*Z(J-1)

59 CONTINUE

T2(NM)=Z(NM)/D(NM)

DO 69 J=NM-1,1,-1

T2(J)=(Z(J)-U(J)*T2(J+1))/D(J)

69 CONTINUE

RETURN

END

8. ÖZGEÇMİŞ

Kemal KUVVET; 1972 yılında Trabzon'da doğdu. Orta öğrenimini Trabzon Lisesi'nde tamamlayarak, 1988 yılında K.T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1992 yılında Makina Mühendisi ünvanı ile K.T.Ü. 'den mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 1993 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. Bilgisayar programlamacı sertifikasına sahip olup İngilizce bilmektedir. Halen K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü 'nde araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

