



YÜZEY SICAKLIK DAĞILIMLARININ SIVI KRİSTAL TERMOGRAFİSİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Murat ÇAKAN

İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü
80191 Gümüşsuyu İstanbul
Tel: 0.212.2931300/2544
e-mail: cakanmu@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 07.12.2001)

Özet: Isı transferi yüzeyleri üzerindeki sıcaklık dağılımlarının ölçüm yoluyla belirlenmesi çoğu zaman ısı sistemlerde yapılabilecek değişikliklerin veya doğrudan ısı sistem tasarımının ön adımlarından birini oluşturmaktadır. Sıvı kristal termografisi yöntemi bilinen klasik sıcaklık ölçüm yöntemlerinin içerdikleri bazı dezavantajları barındırmadığından söz konusu yöntemlere bir alternatif oluşturmaktadır. Makale, sıvı kristal termografisi yöntemini jet motoru endüstrisinde rastlanan bir soğutma uygulaması aracılığıyla tanıtmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zorlanmış Isı Transferi, Sıvı Kristal, Pertürbatörler

EVALUATION OF SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION BY THE USE OF LIQUID CRYSTAL THERMOGRAPHY

Abstract: Evaluation of surface temperature distribution by means of measurements is often considered to be one of the first steps of thermal system design or thermal system modification. Liquid crystal thermography does not inherit some of the disadvantages of so called well-known classical temperature measurement techniques and therefore may serve as an alternative to the latter. This article introduces liquid crystal thermography technique through a cooling example found in jet engine industry.

Keywords: Forced Convection Heat Transfer, Liquid Crystals, Perturbators

SEMBOLLER

W	kanal genişliği	[m]
H	kanal yüksekliği	[m]
X	eksenel uzaklık	[m]
λ	pertürbatör yüksekliği	[m]
D_h	hidrolik çap	[m]
P	pertürbatör adımı	[m]
q	ısı akısı	[W/m ²]
h	ısı taşınım katsayısı	[W/m ² K]
T_d	duvar sıcaklığı	[°C]
T_r	referans sıcaklığı	[°C]
ν	kinematik viskozite	[m ² /s]
tc	termoeleman çifti	
Γ	soğutma etkenlik katsayısı (Nu/Nu_0)	

GİRİŞ

Bu makalenin amacı sıcaklığa duyarlı kolesterik sıvı kristalleri tanıtmak ve söz konusu malzemelerin yüzey sıcaklıklarının hassas ölçümünde nasıl kullanılabileceğini bir örnek aracılığıyla göstermektir.

Sıvı kristaller moleküler yapılarının oluşumuna bağlı olarak *smektik*, *nematik* ve *kolesterik* adlarıyla nitelendirilen organik maddelerdir. Kolesterik esaslı sıvı kristaller, moleküler yapılarındaki çeşitli değişken özellikler nedeniyle üzerlerine düşen tüm dalga boylarını

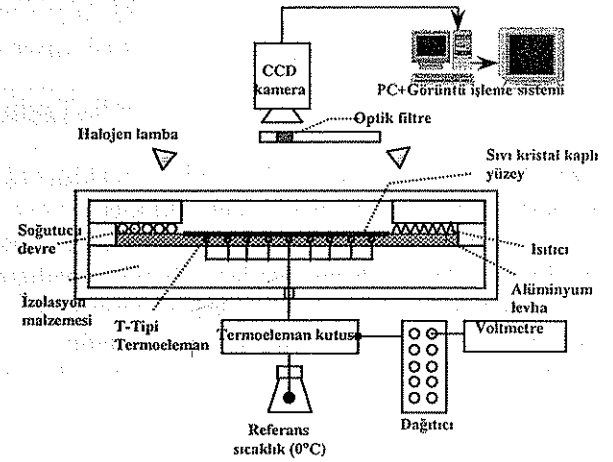
içeren ışığı, sıvı kristal sıcaklığının bir fonksiyonu olarak sadece belirli dalga boylarına önem vererek yansıtırlar. Yansıyan baskın dalga boylarındaki ışık görülebilir ışın yelpazesi içinde yer aldığında *sıcaklık-baskın dalga boyu* ilişkisi *sıcaklık-renk* ilişkisi olarak elde edilmiş olur. Bu ilişki sayesinde araştırmacılar, sıvı kristal solüsyonuyla kaplanmış yüzeyler üzerindeki sıcaklık dağılımlarını nitel olarak belirleyebilme şansına sahiptirler. Bu yolla, sayısız soğutma uygulamasında, "sıcak noktaların"; bir diğer deyişle iyi soğutulamayan bölgelerin kolayca belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu karmaşık olmayan nitel yöntemin sağladığı hızlı sonuç alma ve tersinirlik gibi çeşitli avantajların yanında içerdiği en önemli dezavantaj *sıcaklık-renk* kalibrasyonunda elde edilen bilgilerin kullanımının kişiden kişiye farklılık göstermesi, dolayısıyla verilmiş bir renk için iki farklı kişinin çok büyük bir olasılıkla *sıcaklık-renk* kalibrasyon eğrisinden iki farklı sıcaklık değeri okumalarıdır. Bu nedenle söz konusu yöntem ancak "sanki-nicel" olarak tanımlanabilir.

Yöntemin tamamen nicel hale getirilebilmesi için yöntemi oluşturan öğelerin insan algılamasındaki değişkenliklerden doğabilecek hatalardan arındırılması gerekmektedir. Bu, sıvı kristal yüzeyinden yansıyan ışınların, önüne çalıştıkları dalga boyu aralıklarının dışındaki tüm dalga boylarını kesen optik filtreler yerleştirilmiş bir kayıt cihazı tarafından kaydedilmesi yoluyla yapılabilir. Böylece belirsizliğe neden olan *sıcaklık-renk* ilişkisinin yerini *sıcaklık-baskın dalga boyu* ilişkisi alır. Bu ilişkiyi temel alan ölçüm yöntemi kullanılarak sıvı kristal solüsyonuyla kaplanmış yüzey sıcaklıklarını $\pm 0.15^\circ\text{C}$ mertebelerindeki hassasiyetlerle belirlemek mümkündür. Sıvı kristallerle ilgili ayrıntılı bilgiye çeşitli kaynaklardan ulaşılabilir (Ferguson, 1964; Ferguson, 1968; Ireland vd., 1993). Yukarıda belirtilen *sıcaklık-baskın dalga boyu* ilişkisinin kurulabilmesi için yapılması gereken kalibrasyon işlemi aşağıda açıklanmıştır.

SIVI KRİSTAL KALİBRASYONU

Kolesterik sıvı kristaller -30°C ila 250°C arasında çalışabilir ve 1°C 'den 50°C 'ye kadar olan sıcaklık aralıklarında renk sergileyebilirler. Kristal yapılarındaki değişim tersinir olduğundan *sıcaklık-baskın dalgaboyu* kalibrasyonu yenilendiği sürece kullanılabilirler. Yapılarındaki deformasyonu dolayısıyla da kalibrasyon sıklığını azaltmak için sıvı kristal solüsyonunu morötesi ışınlardan korumak yeterli olmaktadır.

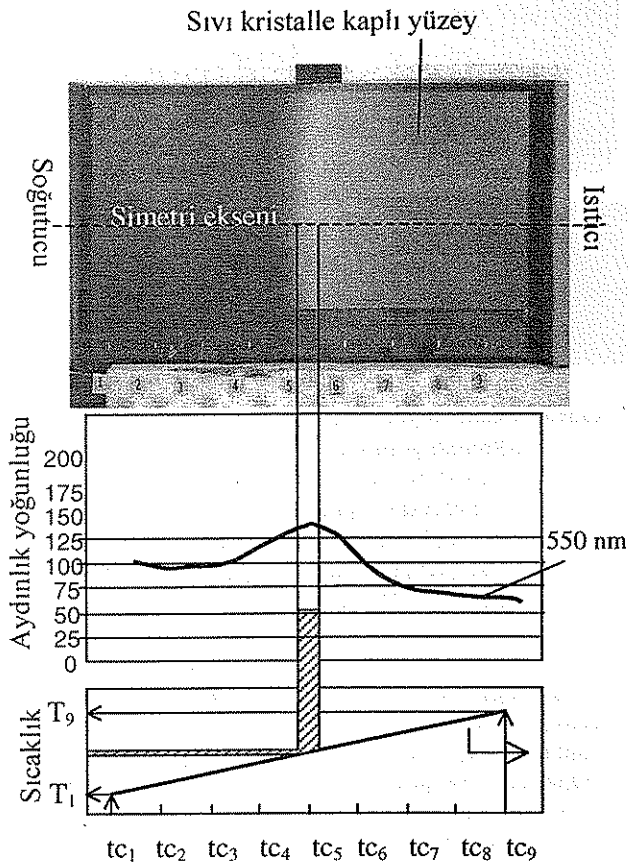
İlk kez (Akino vd., 1989) tarafından nicel sıvı kristal termografisi için önerilen kalibrasyon düzeneği Şekil 1'de şematik olarak gösterilmektedir. Üzerine sıvı kristal solüsyonu püskürtülmüş, kalınlığı yaklaşık 3 mm olan, siyaha boyanmış bir alüminyum levha kısa iki kenarı boyunca sırasıyla bir soğutucu ve bir ısıtıcı yardımıyla bir tarafından soğutulup diğer tarafından ısıtılmaktadır. Bu sayede levha üzerinde oluşan bir boyutlu sıcaklık gradyeninin şiddeti soğutucu ve/veya ısıtıcı devrelerin güçlerinin eksiltip artırılmasıyla ayarlanmaktadır.



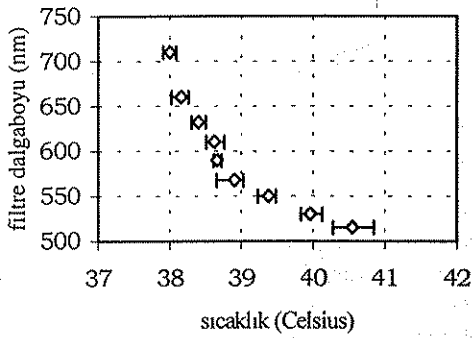
Şekil 1. Sıvı kristal kalibrasyon düzeneği

Levha boyunca oluşan sıcaklık dağılımı, levhanın içine yüksek iletme sahip epoksi yapıştırıcıyla sabitlenmiş termoelemanlar yardımıyla ölçülür. Levha üzerindeki sıcaklık dağılımına göre levha yüzeyinin bir bölümünde renk dağılımı görülecektir. Bu bölge görülebilir dalga boyu aralığında (400-800 nm) çalışan belli sayıda keskin optik filtreler kullanılarak bir siyah/beyaz CCD kamera aracılığıyla görüntülenirse her bir filtrenin hangi sıcaklık için çalıştığını belirlemek mümkün olur (Şekil 2). Bu ilişki Şekil 3'teki gibi sunulduğunda görülebilir ışın yelpazesinin kızılötesine yakın bölgelerinde birim dalgaboyu için sıcaklık değişiminin düşük dalgaboyu bölgesine oranla daha küçük olduğu görülebilir.

Buradan hareketle sıcaklık dağılımının mümkün olabildiğince hassas belirlenmesi amaç edinildiğinde yüksek görülebilir dalga boyu bölgesinde çalışan filtrelerin kullanılmasının uygun olacağı açıkça görülür.



Şekil 2. Optik filtre baskın dalgaboyu (550 nm)/sıcaklık kalibrasyonu



Şekil 3. Optik filtre baskın dalgaboyu/sıcaklık ilişkisi

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu yazıda, söz konusu nicel sıcaklık ölçüm tekniğinin uygulama prensibi boyutsuz pertürbatör yüksekliği λ/D_h 'ın değiştiği ($\lambda/D_h=0.1, 0.15, 0.2$) pertürbatörler arasındaki boyutsuz mesafenin ise

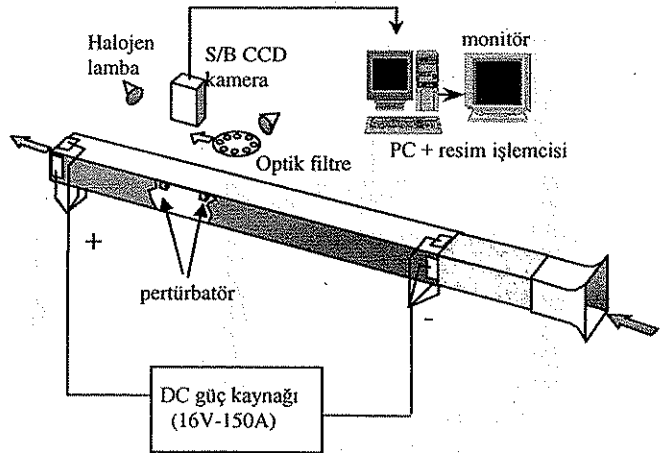
$P/\lambda=9$ olarak sabit kaldığı zorlanmış taşınımli soğutma kanalı modeli örneği aracılığıyla açıklanacaktır. Uygulama örneğine temel teşkil eden çalışmalar Belçika'da bulunan von Karman Akışkanlar Dinamiği Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir.

Deney Düzenegi

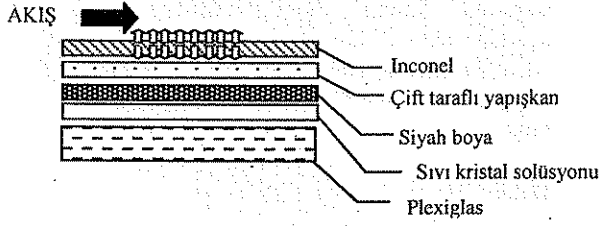
Yanma odasını terk eden sıcak gazların ($\sim 2000K$) etkisi altında çalışmak zorunda olan jet motoru yüksek basınç türbin kanatlarının orta veter kesimlerinde soğutma kanal kesitleri kareye yakındır ($W/H \sim 1$).

Bu çalışmada kullanılan model, kare kesitli türbin soğutma kanalını yaklaşık 10:1 ölçeğinde simüle eder (Şekil 4).

Oda şartlarındaki hava bir fan yardımıyla 50x50 mm kesitli 1800 mm uzunluğundaki kanala emilir. Karakteristik uzunluk kanal hidrolik çapı olarak seçildiğinde $Re=3 \times 10^4$ olarak hesaplanır. Modelin çan şeklindeki giriş ağzını takip eden ilk 400 mm'si ısıtılmamıştır. Bu bölümde akışı düzenleyen bal petekleri ve hız-basınç ölçümleri için prob giriş yerleri bulunur. Isıtılmayan 400 mm'lik bu bölümü takip eden 1000 mm'lik Plexiglas kanal boyunca akan hava, kanalın iç yüzlerini kaplayan ve sisteme sabit ısı akısı sağlayan 20µm kalınlığındaki direnç folyoları (Inconel©) aracılığıyla ısıtılır. Direnç folyosunun ve sıvı kristalin kanal içindeki yerleşim planı Şekil 5'te gösterilmiştir.



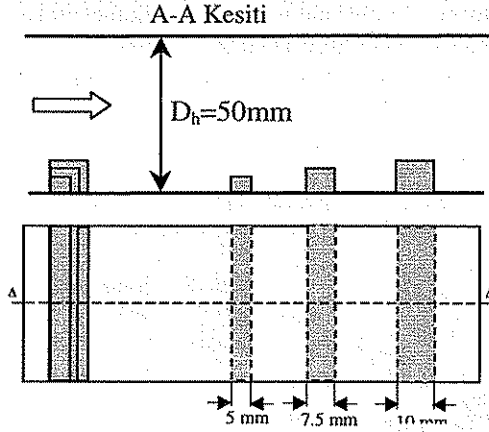
Şekil 4. Deney düzenegi



Şekil 5. Yerleşim

Şekil 5'te görülen yerleştirmeye sıvı kristal çözeltisinin Plexiglas üzerine maket tabancası yardımıyla püskürtülmesiyle başlanır. Yüzeye düşen ışığın absorbe edilmesi ve böylelikle kanal yüzeyindeki sınır şartını değiştirmemesi için sıvı kristal katmanı siyah boyayla boyanır. Son olarak direnç folyosu çift taraflı bir yapıştırıcı aracılığıyla yüze yapıştırılır. Model, 400 mm'lik ısıtılmayan bir bölümün fana bağlanmasıyla tamamlanır. Girişte olduğu gibi çıkışta da bal petekleri ve hız-basınç ölçüm düzenekleri bulunur.

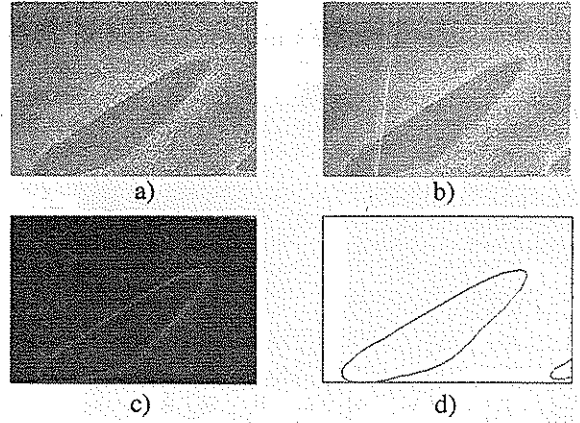
Çalışmada ısı geçişi üzerindeki etkileri incelenen üç değişik boyutta kare kesitli pertürbatörler Plexiglas malzemesinden imal edilmişlerdir. Direnç folyosu üzerine yapıştırılan pertürbatörlerin kanalın ısıtılmış bölümü boyunca dağılımları Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Pertürbatörlerin kanal içinde dizilişi

Veri Toplama

Deneylerde (Akino vd., 1989) tarafından önerilen ölçme prosedürü takip edilmiştir. Yüzey üzerinde oluşan eş-renk (eş-sıcaklık) eğrileri bir siyah/beyaz CCD kameranın algıladığı görüntülerin optik filtrelerle filtre edilmesi sonucunda kaydedilir (Şekil 7-a,b,c) ve bu görüntüler bir resim işleyici yazılım kullanılarak işlenerek eş-sıcaklık eğrileri çizilir (Şekil 7-d).



Şekil 7. Resim kaydı ve işlenmesi

- renkli görüntü
- siyah/beyaz CCD kamera tarafından kaydedilen optik filtresiz görüntü
- siyah/beyaz CCD kamera tarafından kaydedilen filtrelenmiş görüntü
- Resim işleyici yazılımı kullanılarak işlenmiş görüntü

Belirli bir ısı akısı için, gözlemlenen alanın bazı bölümlerinde sıvı kristallerin çalıştığı sıcaklık aralığının dışında sıcaklıklara sahip bölgeler bulunabilir. Bu durumda yukarıda özetlenen işlem, yüzey ısı akısı değiştirilerek, dolayısıyla önceden renk içermeyen bölgelerin de renklenmesi sağlanarak tekrar edilir. Böylelikle gözlemlenen alanın Denklem 1'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanan çok sayıda eş-ısı taşınım katsayısı eğrileriyle temsil edilmesi sağlanır.

$$h(x,y) = q/[T_d(x,y) - T_r] \quad (1)$$

Denklem (1)'de ısı akısı q , doğru akım güç kaynağına sağlanan Joule ısıtmasından ortama olan kayıplar çıkartıldıktan sonra bulunan net değerdir. Aynı denklemde yerel duvar sıcaklığı $T_d(x,y)$ sıvı kristaller kullanılarak bulunur. Referans sıcaklık T_r ise ölçüm yapılan kanal kesitine kadar yazılan enerji dengesinden elde edilen ortalama akışkan sıcaklığıdır.

Bu çalışmada fiziksel problem $Nu=f(Re, Pr)$ ilişkisi ile modellendiğinden bulunan eş-ısı taşınım katsayısı eğrileri önce

$$Nu(x,y) = h(x,y) \cdot D_h / \nu \quad (2)$$

ifadesi kullanılarak eş-Nusselt eğrilerine dönüştürülmüştür. Bulunan değerler daha sonra içinde pertürbatör kullanılmayan kanal akışı için geçerli olan

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

Dittus-Boelter tarafından verilen (Dittus vd., 1930) ifade ile normalleştirilmiştir. Elde edilen boyutsuz büyüklük Γ ile gösterilir ve "soğutma etkenlik katsayısı" olarak adlandırılır.

$$\Gamma = Nu/Nu_0 \quad (4)$$

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Denenen üç farklı λ/D_h oranı için ardışık iki pertürbatörün arasında kalan kanal yüzeyinde eş-soğutma etkenlik katsayısı (Γ) dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.

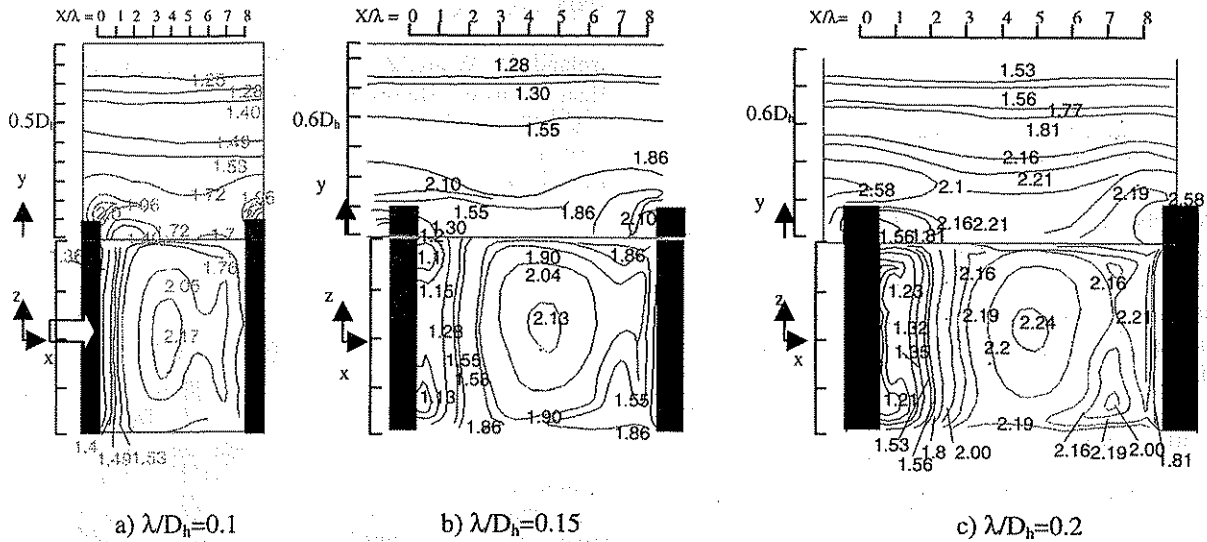
Simetri ekseninde ve tüm P/λ oranlarında en yüksek yerel soğutma iyileştirme katsayısı $X/\lambda=4$ ile 5 arasında bir bölgede gözlenmektedir. Pertürbatörü aşarken yüzeyden ayrılan akışkan $X/\lambda=4$ ile 5 arasında yüzeye çarpmakta ve yüzeyden taşınımı olan ısı geçişini iyileştirmektedir. Bu bölgeden ana akışın geldiği yöne doğru hareket edildiğinde soğutmada pertürbatörsüz kanal konfigürasyonu için elde edilen soğutma değerine (Denklemler 3) doğru bir düşüş gözlemlenmektedir.

Bunun nedeni söz konusu bölgenin ısı geçişi yüzeyine göre daha düşük sıcaklıktaki ana akışla yüzey arasında ısı geçişini engelleyici bir yastık görevini gören bir döngü tarafından kaplanmış olmasıdır. Yüksek ısı geçişi bölgesinden ana akış

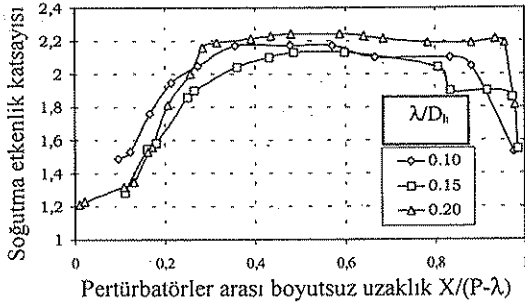
yönünde uzaklaştığında ise soğutma iyileştirme katsayısı değerlerinde hafif bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni bu bölgeden itibaren ısı ve hidrodinamik sınır tabakaların oluşumlarına yeniden başlamış olmalarıdır.

Pertürbatörler arasında kalan yüzeyi karakterize eden eş- Γ eğrilerinin iki boyutlu olması kanal akışının üç boyutlu, karmaşık bir akış olduğunu kanıtlamaktadır. Eş- Γ 'nin simetri eksenine boyunca dağılımının λ/D_h oranı ile değişimi Şekil 9'daki diyagramda verilmiştir. Bu diyagrama göre en iyi soğutma $\lambda/D_h=0.2$ oranıyla elde edilmektedir. Boyutsuzlaştırılmış pertürbatörler arası mesafenin sonunda $\lambda/D_h=0.2$ oranında gözlemlenen ani soğutma etkenliği artışı, pertürbatörü aşamayan sınır tabaka akışının bir döngü oluşturacak biçimde tekrar yüzeye çarpması sonucunda oluşmaktadır.

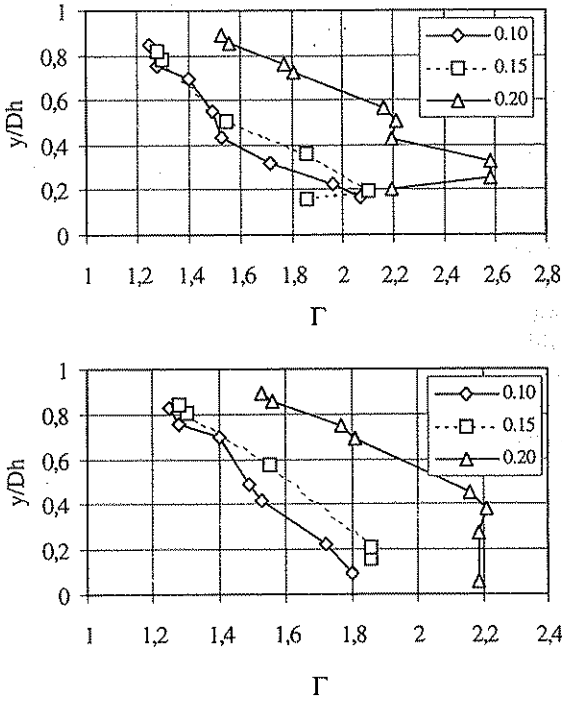
Pertürbe edilmemiş yan duvarda pertürbatörün üzerinden ve iki ardışık pertürbatör arasındaki mesafenin ortasından geçen birer çizgi boyunca oluşan Γ dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. $\lambda/D_h=0.2$ oranı için yan duvardaki soğutma etkenliği katsayısındaki artış hem diğer iki λ/D_h oranına göre çok yüksektir hem de pertürbe edilmemiş üst duvara yakın bölgelerde beklenen aksine $\Gamma=1$ değerinden yaklaşık %40 daha fazladır. Bu durum $\lambda/D_h=0.2$ söz konusu olduğunda kanalın sadece bir duvarının pertürbe edilmesinin kanal içi ortalama soğutma etkenliğine olumlu etki edeceğini gösterir. Bu, bazı uygulamalarda basınç kayıplarının azaltılması açısından önemli bir kazanım olarak belirebilir.



Şekil 8. Pertürbatörler arası eş-soğutma etkenlik katsayısı (Γ) dağılımı (şekilde, pertürbe edilmemiş yan yüzey pertürbe edilmiş yüzeye izdüşülmüş halde gösterilmiştir ve akışın yönü soldan sağa doğrudur.)



Şekil 9. Farklı λ/D_h için Γ dağılımı (pertürbe edilmiş duvar)

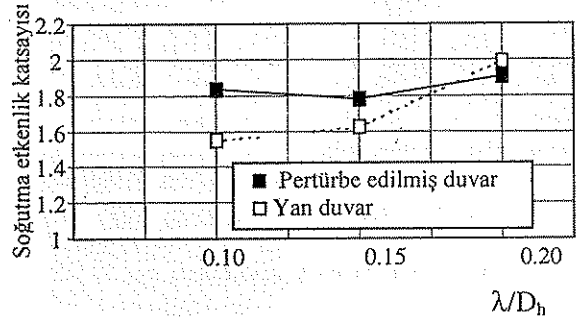


Şekil 10. Farklı λ/D_h için Γ dağılımı (pertürbe edilmemiş yan duvar)

Pertürbatör boyutlarının artması sonucunda ortaya çıkan bir başka durum ise yan duvarlardan taşınım ile olan ısı transferinin pertürbatörlerin yerleştirildiği duvardaki ısı geçişine giderek yaklaşması ve $\lambda/D_h=0.2$ oranı için onu geçmesidir (Şekil 11).

Murat ÇAKAN

1967 yılında Edirne'de doğdu. 1980 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1992 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde, Makina Programında yaptığı tez çalışmasıyla yüksek mühendis ünvanını kazandı. 1993-1999 yılları arasında Belçika'da bulunan von Karman Akışkanlar Dinamiği Enstitüsünde çalıştı ve 2000 yılında yine Belçika'da bulunan Louvain-la-Neuve Üniversitesi'nde doktorasını tamamladı. Halen İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.



Şekil 11. Pertürbe edilmiş duvarlar ile yan duvarlardaki ortalama soğutma etkinlik katsayısı değişimi

KAYNAKLAR

- Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K., Mitsushiro, K., Ueda, M., Improved Liquid Crystal Thermography Excluding Human Sensation, *J. of Heat Transfer*, Vol. 111, 558-565, 1989.
- Dittus, P. W., Boelter, M. K., Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type, *Univ. Of California Pub. Eng.*, Vol. 2, No: 13, 443-461, 1930.
- Ferguson, J. L., *Scientific American*, 211, 77, 1964.
- Ferguson, J. L., Liquid Crystals in Nondestructive Testing, *Applied Optics*, Vol. 7, No. 9, September 1968.
- Ireland, P., Wang, Z., Jones, T. V., Liquid Crystal Heat Transfer Measurements, *VKI Lecture Series* 1993-05.

