

TEK YONGALI ELEKTRONİK CİHAZLARIN LAMİNER VE TÜRBÜLANSLI AKIŞTA SOĞUTULMALARININ ANALİZİ

Akın Burak ETEMOĞLU,
Mustafa Kemal İŞMAN,
Erhan PULAT,
Muhiddin CAN *

Bu çalışmada elektronik sistemlerin soğutulması hakkında kısaca bilgi verildikten sonra iki paralel levhadan alttaki üzerine monte edilmiş ve elektronik bir yongayı simüle eden tek bir blok üzerinden akış ve sıcaklık dağılımı hesaplamalı olarak analiz edilip blok yüzeyindeki yerel ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Analizler, Laminer durum için $Re=740-1850$, Türbülanslı durum için $Re=1850-3700$ aralığında yapılmıştır. Hesaplamalarda geometrik faktörler sabit tutulmuş ve blok üzerinde 250 W/m^2 'lik sabit ısı akışı kabul edilmiştir. Akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişimi ve kaldırma kuvveti etkileri göz önüne alınmıştır.

Reynolds sayısının artmasıyla ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Maksimum sıcaklık blok arka yüzü dibinde oluşmaktadır. Maksimum ısı transfer katsayısı her durum için blok ön üst köşesinde oluşmaktadır. Blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluklarının, türbülanslı akış durumunda laminer akış durumuna göre daha kısa olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler : Elektronik soğutma, HAD, yüzeye monte edilmiş blok, taşınım, laminer ve türbülanslı akış.

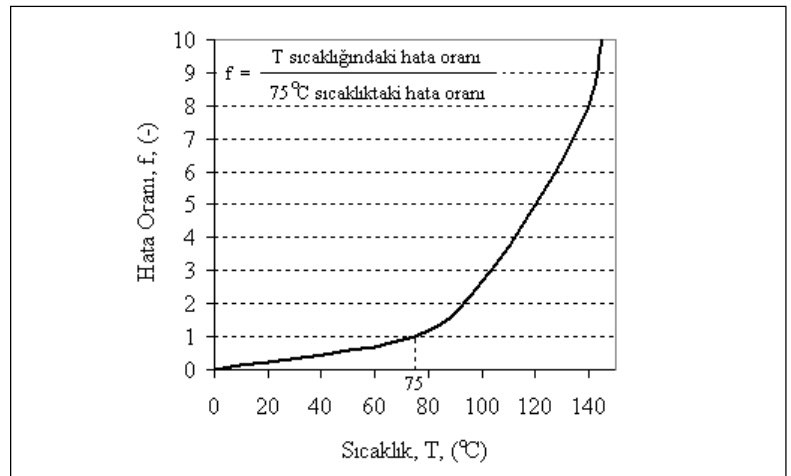
In this study, firstly brief information about the cooling of electronic systems is introduced and then velocity and temperature distribution in the flow over surface mounted block simulated single chip electronic module are analyzed computationally. Finally, local convective heat transfer coefficients are determined for block surfaces. Computations are performed in the Reynolds number range of 740-1850 for laminar case and 1850-3700 for turbulent case. In computations geometrical factors are fixed and 250 W/m^2 constant heat flux over the block surface is assumed. Variation of fluid properties with temperature and buoyancy effect are considered. Local heat transfer coefficient increases with increasing Reynolds number. Maximum temperature occurs at the bottom corner of the back side of the block. Maximum heat transfer coefficients are obtained at the front corner of top surface of the block for each cases. Reattachment length at the downstream of the block in the turbulent case is shorter than the laminar case.

Keywords : Electronics cooling, CFD, surface mounted block, forced convection, laminar and turbulent flow.

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

GİRİŞ

Elektronikteki hızlı gelişmeler modern hayatı baştan başa çevrelemiş ve elektronik cihazlar günlük hayatın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Elektronik ve bilgisayar destekli uygulamalar, yaşadığımız ve çalıştığımız ortamların ısıtılması ve soğutulmasından savunma sanayisine, sağlıktan eğitime kadar geniş bir alanda yer bulmuş, güvenlik ve konforumuz için yoğun şekilde kullanılabilir hale gelmiştir. Uygulama alanlarının yoğun ve vazgeçilmez oluşu elektronik sistemlerin güvenle ve yüksek performansla çalışmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle savunma, sağlık, iş ve eğitim sistemlerinde kullanılan bilgisayarlarda oluşacak problemler yalnızca bu servislerin aksamasını sağlamayacak, aynı zamanda insan hayatını önemli derecede olumsuz etkileyecektir. Elektronik cihazların performanslarının, güvenilirliklerinin, ömürlerinin artırılması ihtiyacı kaçınılmazdır. Bu nedenle konu üzerinde sistemli ve düzenli çalışmalar tüm dünyada sürdürülmektedir. Bir dirençten akım geçtiğinde ısı üretildiği bilinen bir gerçektir. Elektronik cihazlar da görevlerini yerine getirirken bu yolla ısı üretirler. Elektronik cihazların küçülmesine paralel olarak birim hacimde üretilen ısı miktarı da doğal olarak artmaktadır. Elektronik cihazlardaki hata oranı, sıcaklığın artışıyla üssel olarak artmaktadır. Şekil 1'de elektronik cihazlarda oluşan hata oranının sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir [1].



Şekil 1. Hata Oranının Sıcaklığa Bağlı Artışı. [1]

Gerektiği gibi uygun tasarlanıp kontrol edilmeyen elektronik ekipmanlarda ısı üretiminin oluşturduğu yüksek çalışma sıcaklıkları güvenlik ve performansın azalmasına neden olur. Bu gerçek, ısı transferinde, yani soğutma sistemlerinde gelişmeyi ve yeni araştırmaları zorunlu kılmakta, elektronik elemanların tasarım ve işletiminde termal kontrolün önemini gün geçtikçe arttırmaktadır.

Davalath ve Beyazitoğlu, üç blok üzerinden olan laminer, iki boyutlu, gelişmekte olan akışı ve zorlanmış taşınımı sürekli rejimde sayısal olarak incelemiştir. Çözümleri diğer geometrik özellikler sabit olmak üzere dört değişik blok aralığı için yapmışlardır. Son blok arkasındaki yeniden birleşme uzunluğu Reynolds sayısının artmasıyla artmaktadır. Bloklar arasındaki akış ve sıcaklık dağılımı da bir çukur üzerinden olan akışa benzemektedir [2].

Can ve Pulat, çalışmalarında elektronik cihazların, çarpan hava jetleri kullanılarak soğutulmasını incelemiş, ilk yatırım ve işletim harcamalarını, lüle tasarımı ve ihtiyaç duyulan fan gücüne bağlı olarak ifade ederek optimizasyon ilkelerini sunmuşlardır [3].

Poulikakos ve Wietrzak, mikroelektronik bir cihazın zorlanmış taşınımıyla soğutulması için türbülanslı sayısal bir çalışma yapmışlardır. Akış, sıkıştırılmaz, daimi ve iki boyutlu olarak ele alınmış ve $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada eşlenik (iletim+taşınım) ısı transferi etkileri incelenmiş ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir [4].

Igarashi ve Takasaki tarafından yapılan çalışmada laminer bir sınır tabaka içine yerleştirilmiş iki boyutlu dikdörtgen bir blok etrafındaki akış ve ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada akış, blok yüksekliğinin sınır tabaka kalınlığına oranına ve Reynolds sayısına bağlı olarak üç tipe ayrılmıştır. Bunlar, laminer, ayrılma ve yeniden birleşme tipi akışlardır. Bu çalışmada her yüzdeki ortalama Nusselt sayısı ifadeleri çıkarılmıştır [5].

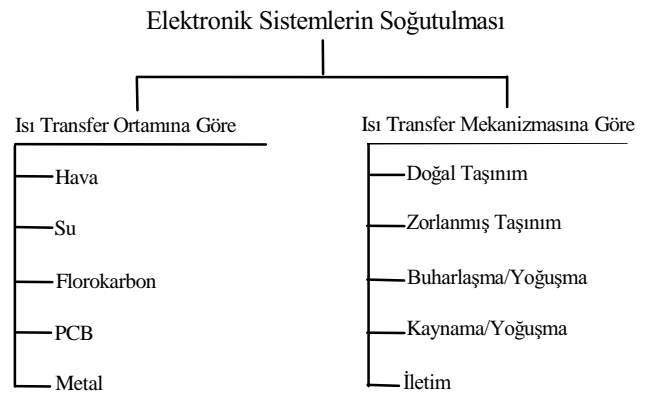
Zahn ve arkadaşları, tek bir seramik mikroelektronik paketin soğutulmasını üç boyutlu sürekli laminer akış şartlarında ANSYS-FLOTTRAN programını kullanarak analiz etmişlerdir. Elde edilen nümerik sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu rapor edilmiştir [6].

Zhao ve Lu bir mikro kanalda zorlanmış taşınımıyla

olan ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında yonga üzerinde kanatçık ve gözenekli ortam olmak üzere iki durumu incelemiştir ve Nusselt sayısı üzerine ısı iletim katsayısı ve kanal geometrisinin etkilerini belirlemiştir. Sonuçları, sabit ısı akışı ve sabit yüzey sıcaklığı şartları için test etmişlerdir [7].

Elektronik Sistemlerin Soğutulması ve Isıl Tasarımı

Ana devre kartları üzerine yerleştirilmiş olan dikdörtgenler prizması şeklindeki silikon chipler, değişik metotlarla soğutulabilirler. Şekil 2'de elektronik cihazların soğutulması işlemi, ısı transferi ortamı ve mekanizmasına göre sınıflandırılmıştır [8].



Şekil 2. Elektronik Cihazların Soğutulması. [8]

Elektronik elemanların ısı açıdan kontrolünün ana hedefi, eleman sıcaklığını belirlenen sınırlar içerisinde tutabilmektir. Çalışma sıcaklığının limitleri aşması, performansın azalmasına ve mantıksal hataların oluşmasına neden olur. Arzu edilmeyen bu çalışma ortamının oluşmasını önlemek için uygun bir soğutma metodu kullanılmalıdır. Genel olarak, mikroelektronik elemanların yüzey sıcaklıklarının 50-100°C arasında olması kart üzerindeki üniformluğu, uygun bir fiyatı ve güvenilirliği sağlamaktadır [9]. Şekil 2'den de görüleceği üzere, elektronik elemanların soğutulmasında değişik metotlar ve değişik soğutucu akışkanlar kullanılabilir. Bu çalışmada, zorlanmış taşınım esaslı ve akışkan olarak havanın kullanıldığı soğutma yöntemi incelenmiştir. Bu yöntem en yaygın olarak kullanılan soğutma metodudur. Çünkü, hava istenilen miktarda

atmosferde mevcuttur. Ayrıca, tasarım ve bakım kolaylığı, düşük fiyatı ve yüksek güvenilirliği havayı iyi bir seçenek haline getirmektedir.

Elektronik sistemlerin ısı tasarımı, ısı transferinin uygulama alanlarından birisi olup, incelemek üzere alınan sistem tek bir yongadan (chip) oluşabileceği gibi birden fazla yongadan da oluşabilir. Her iki durumda da yonga veya yongalar baskı devre üzerine, baskı devreyle aynı hızda olacak şekilde ya da baskı devre üzerinde çıkıntı oluşturacak şekilde monte edilebilirler. Buradan hareketle, gerçek sisteme benzer olarak, fiziksel sistemdeki yongaları simüle eden bloklar, düzlem levha üzerinde modellenilebilirler. Böylece birer ısı kaynağı olan ve levhalardan biri üzerine monte edilmiş bloklar için, iki paralel levha arasındaki akış halinde ısı transferi analizi yapılabilir. Bloklarda ve blokların monte edildiği levhada iletimle olan ısı transferi önemli ise analize bu etkinin de ilave edilmesi gerekmektedir ve o zaman bu özel ısı transferi analizi "eşlenik (conjugate)" ısı transferi analizi olarak adlandırılmaktadır. Çünkü bloklarda üretilen ısının bir bölümü, taşınım yanında iletimle çekilmektedir. Birinci durumda ısıtılmış bloklardan olan ısı kaybı sadece soğutucu akışkana taşınım, ancak monte edildiği levhaya iletimle olmaktadır. Bundan dolayı elektronik devreler tasarlanırken devrelerle birlikte, bu devrelerin yapıldığı malzemeler ve monte edildiği plakaların yapıldığı malzemeler de önem kazanmaktadır. Böylece daha önce elektronik imalatında kullanılmayan malzeme ve metotlar elektronik sistemlerin soğutulmaları önem kazandıkça birer birer bu sahaya girmektedir.

İki paralel levhadan alttaki düzlem levha üzerine monte edilmiş bloklar etrafındaki akış analizinde, akış üç kısma ayrılabilir. Bloklar tam gelişmiş akım bölgesinde olabileceği gibi gelişmekte olan akım bölgesinde de olabilir. Her iki durum için de akım, ön basamak akışı, çukur akışı ve geri basamak akışı bölgelerine ayrılabilir. Şekil 3'te sözkonusu akış bölgeleri ve yüzeye monte edilmiş bloklar üzerinden olan akış ve ısı transferi analizinde kullanılan geometrik büyüklükler görülmektedir.

Burada, akışı etkileyen geometrik büyüklükler aşağıdaki gibi ifade edilebilir :

$$\frac{h}{H} = \text{Blok yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı}$$

(Blokaj oranı)

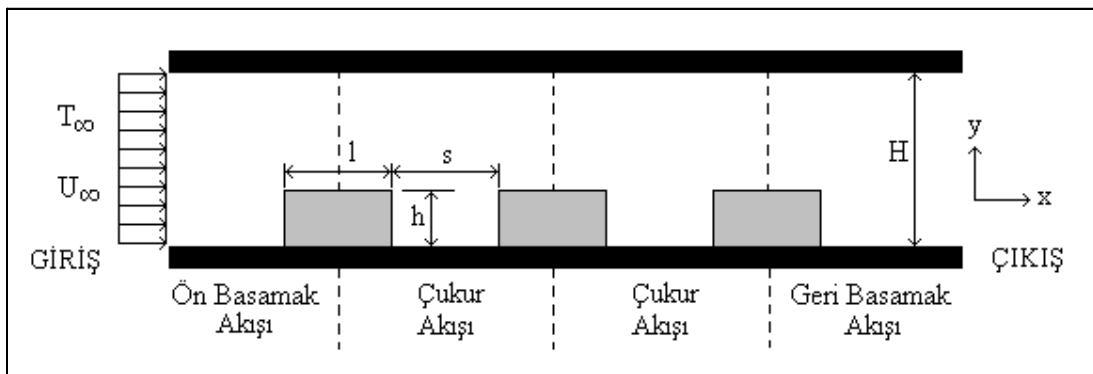
$$\frac{l}{h} = \text{Blok uzunluğunun blok yüksekliğine oranı (Paket}$$

görünüş oranı)

$$\frac{H}{H-h} = \text{Kanal genişleme oranı}$$

$$\frac{s}{l} = \text{Bloklar arası mesafenin blok uzunluğuna oranı}$$

Günümüzde özellikle tüketici elektroniğine yönelik birçok uygulamalarda tek yongalı elektronik sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çok fazla rekabetin olduğu bu alanda gerek tek yongalı (single chip module) gerekse çok yongalı (multichip module) sistemlerin ısı tasarımında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği HAD kullanımı da "virtual prototyping" tasarım mantığı çerçevesinde artmaktadır. HAD ile tasarım ve geliştirme



Şekil 3. Akış Bölgeleri ve Geometrik Büyüklükler.

zamanının kısa oluşu, deneylere göre daha ucuz oluşu ve farklı akış koşullarının rahatlıkla modellenip incelenebilmesi HAD'ın avantajlarından bazılarıdır. Bu çalışmanın amacı artan performans ve hızı paralel olarak gittikçe boyutları küçülen dolayısıyla da ısı üretimindeki artışa karşılık ısı transfer alanı azalan elektronik sistemlerde hem laminer hem türbülanslı akış şartlarında taşınım olan ısı transferini ve bazı akış parametrelerini hesaplamalı olarak analiz etmektir. Bu maksatla yaygın olarak kullanılan tek yongalı elektronik sistemleri simüle eden tek bir blok üzerinden olan akış ve ısı transferi göz önüne alınmıştır. Igarashi ve Takasaki'nin [11] yaptığı deneysel çalışmaya göre blok yüksekliğine göre tanımlanmış Reynolds sayısı 900 olduğu durumda türbülanslı akışa geçiş başlamaktadır. Bundan dolayı laminer ve türbülanslı akış şartlarındaki ortalama kanal giriş hızları bu deneysel çalışma göz önüne alınarak seçilmiştir.

ANALİZ

HAD'ın yukarıdaki avantajları göz önüne alınarak, elektronik elemanların soğutulması sürecini inceleyebilmek amacıyla, korunum denklemleri ANSYS-FLOTTRAN programı kullanılarak Galerkin sonlu elemanlar metoduyla çözülmüştür. Akış sıkıştırılmaz, iki boyutlu ve sürekli rejimdedir. Türbülanslı akış durumu için k-ε türbülans modeli kullanılmıştır ve giriş türbülans şiddeti %1 olarak alınmıştır. Cidar şartı olarak Van Driest yaklaşımı kabul edilmiştir. Havanın termofiziksel özelliklerinin (k, ρ, μ) sıcaklıkla değişimi ve kaldırma kuvveti etkileri dikkate alınmıştır. Problemin çözümünde gerekli olan diğer sınır şartları Şekil 4'de verilmiştir.

Korunum Denklemleri

Laminer Akış :

$$\text{Süreklilik} : \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0$$

$$\text{x-momentum} : \left(\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\text{y-momentum} : \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho g_y$$

$$\text{Enerji} : \frac{\partial(\rho u c_p T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v c_p T)}{\partial y} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_v$$

Türbülanslı Akış:

$$\text{Süreklilik} : \frac{\partial(\overline{\rho u})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v})}{\partial y} = 0$$

$$\left(\frac{\partial(\overline{\rho u u})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v u})}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\text{x-momentum} : \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right)$$

$$\left(\frac{\partial(\overline{\rho u v})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{\rho v v})}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} \right)$$

$$\text{y-momentum} : \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right) + \rho g_y$$

$$\text{Enerji} : \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{\rho u} C_p \overline{T} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{\rho v} C_p \overline{T} \right) = \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\left((k + k_t) \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((k + k_t) \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} \right) + Q_v$$

Burada μ_t ve k_t sırasıyla türbülanslı eddy viskozitesi ve türbülanslı eddy iletkenliğidir. Bu terimlerin hesaplanabilmesi için türbülans kinetik enerjisi, k ve onun yayılma hızı ϵ 'nin bilinmesi gerekmektedir. Türbülans kinetik enerjisi ve onun yayılma hızı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$k = \frac{1}{2} \left[(u')^2 + (v')^2 \right]$$

sabit ısı akısı olduğu kabul edilmiştir. Bu sınır şartlar altında ANSYS-FLOTTRAN kodu kullanılarak laminer ve türbülanslı akış halleri için farklı hızlarda çözümler yapılmıştır.

BULGULAR

Laminer Akış

Şekil 6 ve 7'de $Re=1850$ için, sırasıyla sıcaklık ve hız dağılımları örnek analiz sonuçları olarak verilmiştir. Şekil 6'da verilen sıcaklık dağılımından görülebileceği üzere, en yüksek sıcaklığa bloğun arka yüzünde ulaşılmıştır ($\sim 89^\circ C$). Bu değer güvenilirlik sınırları içerisinde olmasına rağmen yine de dikkat edilmesi gereken bir büyüklüktedir. Bu sonuçtan, etkin soğutmanın yapılması gereken bölgenin blok'un arka yüzü olması gerektiği anlaşılmaktadır.

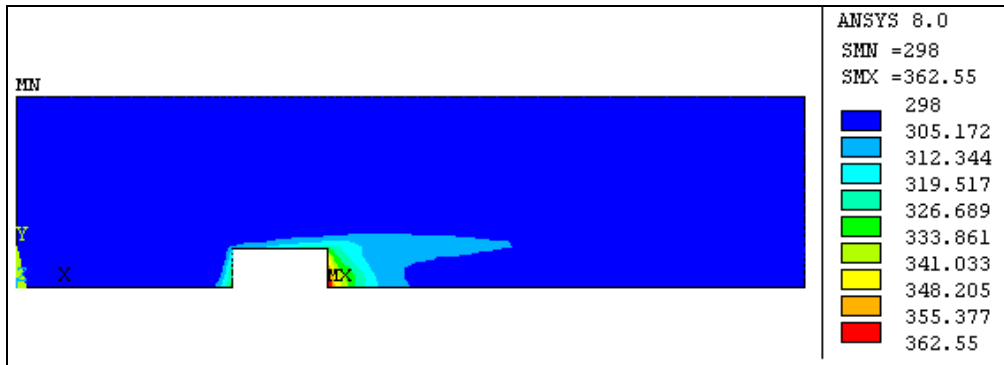
Beklendiği üzere, girişte düzgün olan akış, kanal

içinde gelişmekte ve blok üzerinde bozulmaktadır. Blok'un ön yüzü alt kısmında küçük bir girdap oluşmaktadır. Hız, blok'un ön yüz üst kısmına doğru yükselmekte ve en yüksek değerine ulaşmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü gibi blok'un arka kısmında uzun bir girdap oluşmaktadır.

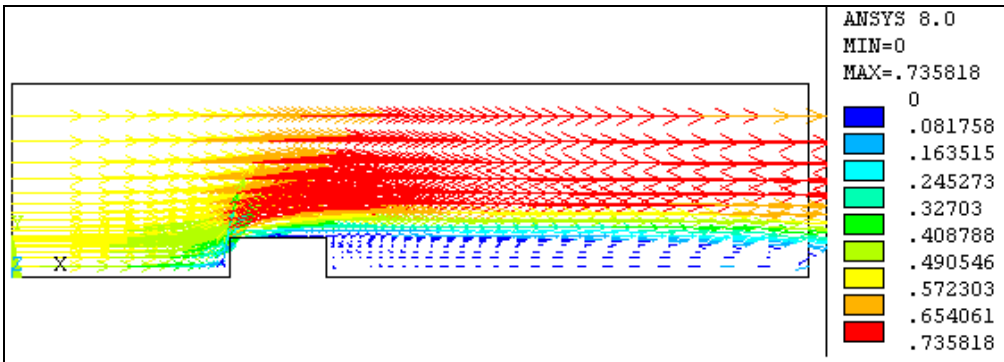
740-1850 Reynolds sayısı aralığında yapılan analizler sonucunda blok ön, üst ve arka yüzeylerinde taşınım katsayılarının değişimi Şekil 8, 9 ve 10'da verildiği gibidir.

Türbülanslı Akış

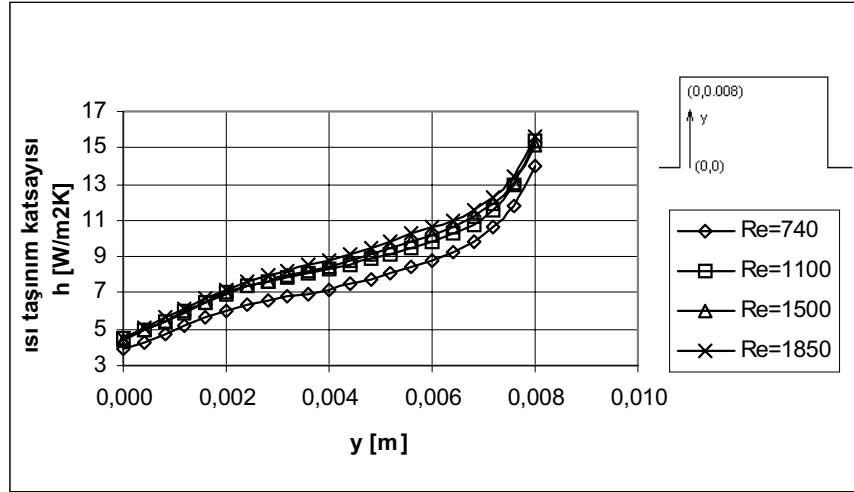
Türbülanslı akış durumu için de laminer akıştakine benzer olarak akış ve ısı transferi analizleri yapılmış, sıcaklık ve hız dağılımları elde edilmiştir. Beklendiği üzere, türbülanslı akışta, ısı taşınım katsayısının daha yüksek oluşuna bağlı olarak, blok yüzey sıcaklıkları daha düşük tespit edilmiştir.



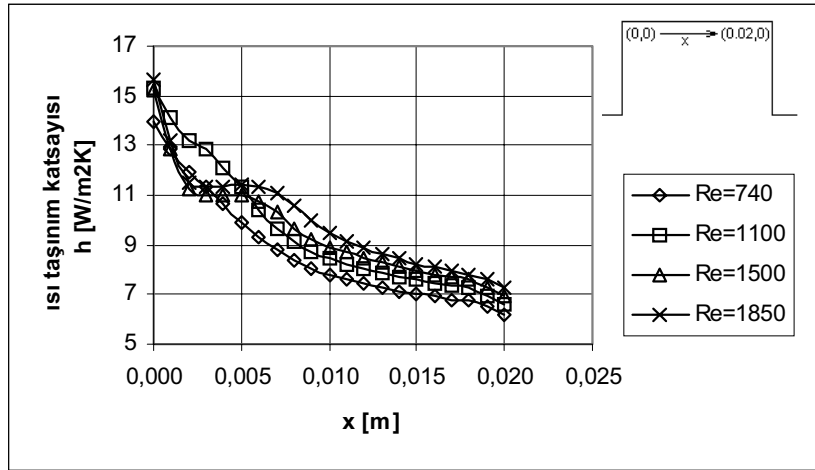
Şekil 6. Laminer Akışta $Re=1850$ İçin Sıcaklık Dağılımı



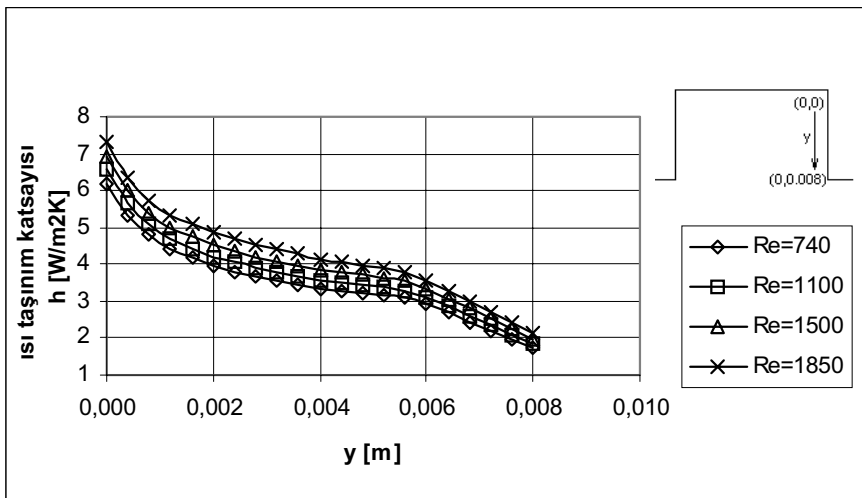
Şekil 7. Laminer Akışta $Re=1850$ İçin Vektörel Hız Dağılımı



Şekil 8. Blok Ön Yüzeyinde Isı Taşınım Katsayısının Aşağıdan Yukarıya Doğru Değişimi



Şekil 9. Blok Üst Yüzeyinde Isı Taşınım Katsayısının Soldan Sağa Doğru Değişimi



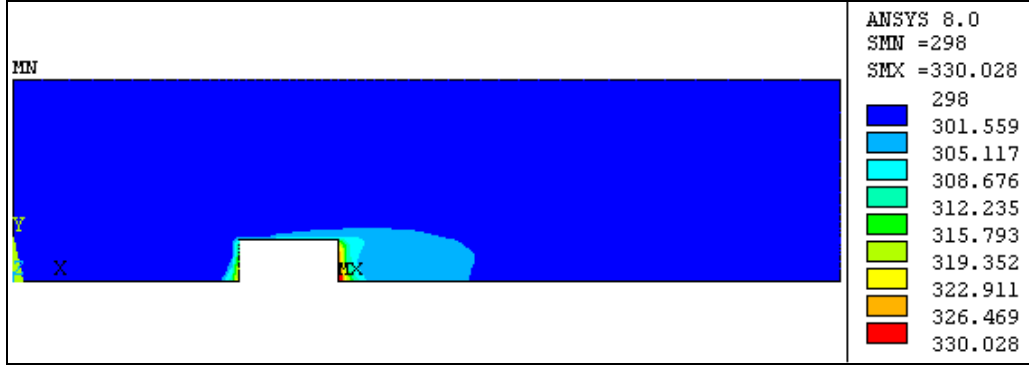
Şekil 10. Blok Arka Yüzeyinde Isı Taşınım Katsayısının Yukarıdan Aşağıya Doğru Değişimi

Şekil 11 ve 12'de $Re=3700$ için sırasıyla sıcaklık ve hız dağılımları örnek analiz sonuçları olarak verilmiştir.

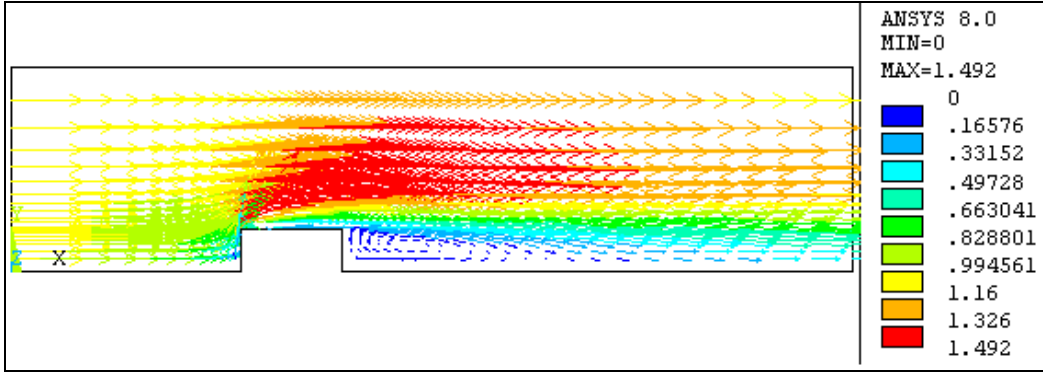
3700-18500 Reynolds sayısı aralığında yapılan diğer analizler sonucunda elde edilen blok ön, üst ve arka

yüzeylerindeki taşınım katsayılarının değişimi Şekil 13, 14 ve 15'deki grafiklerde görülmektedir.

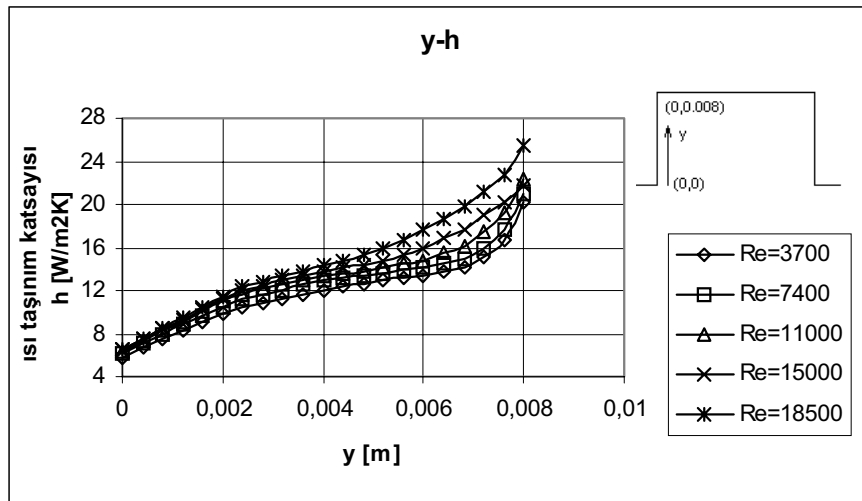
Yonga üzerindeki hız dağılımının net bir şekilde incelenebilmesi için, hız vektörleri Şekil 16'da ayrıntılı olarak verilmiştir.



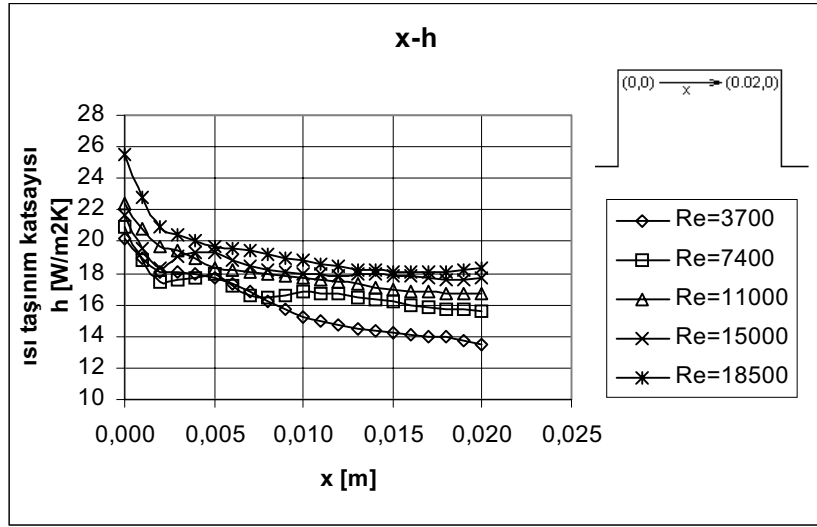
Şekil 11. Türbülanslı Akışta $Re=3700$ İçin Sıcaklık Dağılımı.



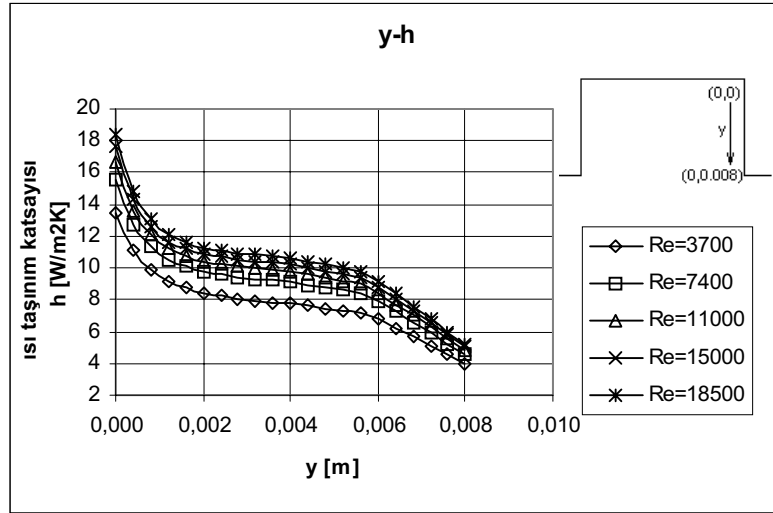
Şekil 12. Türbülanslı Akışta $Re=3700$ İçin Vektörel Hız Dağılımı.



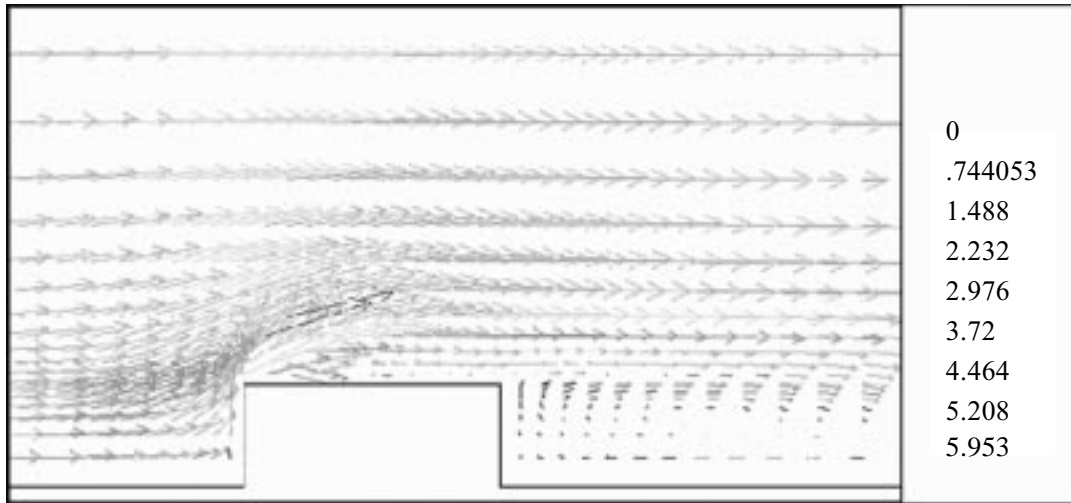
Şekil 13. Blok Ön Yüzeyinde Isı Taşınım Katsayısının Aşağıdan Yukarıya Doğru Değişimi



Şekil 14. Blok Üst Yüzeyinde Isı Taşınım Katsayısının Soldan Sağa Değişimi



Şekil 15. Blok Arka Yüzeyinde Isı Taşınım Katsayısının Yukarıdan Aşağıya Doğru Değişimi



Şekil 16. $Re=1500$ İçin Yonga Üzerindeki Vektörel Hız Dağılımı.

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Şekil 7 ve Şekil 12 incelendiğinde blok arkasında oluşan yeniden birleşme uzunluklarının göz önüne alınan Reynolds sayılarında türbülanslı akışta laminer akıştan daha kısa olduğu görülmektedir. Bu durum literatürdeki birçok çalışma tarafından da teyit edilmiştir [12] ve türbülanslı akışta Reynolds sayısının artmasıyla azalmakta ve belli bir değerden sonra Reynolds sayısından bağımsız olarak sabit kalmaktadır. Bu durum çok yongalı elektronik sistemlerde ikinci ve diğer yongaların ısı transferi göz önüne alınarak kart üzerinde nerelere yerleştirilmeleri gerektiği açısından önem arz etmektedir.

Şekil 8'de laminer akışta blok ön yüzeyinde ısı taşınım katsayısının aşağıdan yukarıya doğru değişimi verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi tüm Reynolds sayılarında, blok yüzeyinde aşağıdan yukarıya doğru h artmaktadır. Blok dibinden yukarıya doğru 0,2 cm'ye kadar hemen hemen tüm Reynolds sayılarında h fazla değişmemesine rağmen 0,2 cm'den sonra $Re=740$ 'da h yaklaşık 2 W/m²K daha düşük kalmakta fakat benzer eğilim sergilemekte ve blok ucunda bu farklılık ortadan kalkmaktadır. Genel olarak laminer akışta blok ön yüzeyi üzerindeki ısı taşınımına Reynolds sayısının etkisi ihmal edilebilecek mertebededir ve bu durum Igarashi ve Takasaki'nin [4] 5 mm blok yüksekliği için olan deneysel çalışmasıyla uyumludur.

Şekil 9'da blok üst yüzeyinde ısı taşınım katsayısının değişimi görülmektedir. Şekil incelendiğinde bütün Re sayılarında en yüksek ısı taşınım katsayısının blok ucunda olduğu görülmektedir. Burada kesit daralmasından dolayı maksimum hıza ulaşılmakta ve ayrıca blok üst yüzeyi küçük bir düzlem levha gibi düşünüldüğünde levhanın başında ısı taşınım katsayısının maksimum olması zaten beklenilmektedir. $Re=740$ ve $Re=1100$ de blok ucundan itibaren blok yüzeyi boyunca h gittikçe azalmaktadır. $Re=1500$ ve 1850 'de ise h blok ucundan itibaren kısa bir mesafede, $Re=740$ ve 1100 'e göre daha hızlı azalmakta sonra $Re=740$ ve 1100 'e göre daha yüksek bir değere çıkmakta ve onlarla aynı eğilimde azalmaktadır. Blok girişinden itibaren sınır tabaka kalınlığı

gittikçe arttığından ısı taşınım katsayısı da gittikçe azalmaktadır. Igarashi ve Takasaki'nin [11] $H=5$ mm blok yüksekliği için yüksek hızlarda (4m/s) blok ortasından itibaren bir yükselme göze çarpmaktadır. Bizim çalışmamızda bu duruma blok ortasından önce karşılaşılmaktadır. Diğer durumlar bu çalışmayla uyumludur.

Şekil 10'dan da blok arka yüzeyinde yukarıdan aşağıya doğru ısı taşınım katsayısının değişimi verilmiştir. Tüm Re sayılarında blok arka yüzünün üst ucunda en yüksek h değerine ulaşılmaktadır. Blok arkasında çevrim yapan akışkan blok altından blok üstüne doğru akarken sıcaklık etkisiyle hızlanmaktadır ve dolayısıyla ısı taşınım katsayısı artmaktadır.

Şekil 11 ve 12'de $Re=3700$ için sırasıyla sıcaklık dağılımı ve vektörel hız dağılımı verilmiştir. Maksimum sıcaklık ($\approx 57^\circ\text{C}$) yine blok arka yüz alt noktasında oluşmaktadır. Ve laminer akış durumundan oldukça düşük değerdedir. Fakat türbülanslı durumda da etkin soğutmanın yapılması gereken yerin yine bu nokta olduğu görülmektedir.

Şekil 13'de türbülanslı akışta blok ön yüzeyinde ısı taşınım katsayısının aşağıdan yukarıya değişimi verilmiştir. Yine şekilden görüleceği gibi tüm Re sayılarında blok ortasına kadar ($y=0,004\text{m}$) ısı taşınım katsayısının hemen hemen aynı değerlerde olmasına karşılık blok ortasından sonra Re sayısının artmasıyla artmaktadır. Akış hızının artması blok ön yüzeyi dibinde oluşan ve neredeyse sabitleşen akış yapısını bozmamakta ancak blok ön yüzeyi ortasından sonra sıcaklık etkisinden dolayı yukarı doğru bir hızlanmaya neden olmuş gibi gözükmektedir.

Şekil 14'de blok üst yüzeyinde ısı taşınım katsayısının değişimi görülmektedir. Şekil 9'dakine benzer bir yapı burada da göze çarpmaktadır. $Re=3700$, 7400 ve $Re=15000$ için h azalmakta sonra bir miktar yükselmekte ($x=0,005$) sonra $Re=3700$ 'de daha fazla olmak üzere gittikçe düşmektedir. Ancak dikkat çekici bir diğer husus da $x=0,005$ m'ye kadar olan bu bölgede $Re=11000$ 'de h değerlerinin azda olsa $Re=15000$ 'deki h değerlerinin biraz üstünde olmasıdır. Bu durum muhtemelen blok

üst yüzeyinde ağ sayısının yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Hem laminar (Şekil 9) hem de türbülanslı akış (Şekil 14) bazı Re sayılarında karşılaştığımız ısı taşınım katsayısının blok ucundan itibaren bir müddet düştükten sonra yükselip tekrar azalması durumu bu Re sayılarında blok üst yüzeyinde bir çevrim oluşması yüzündendir. Isı taşınım katsayısının arttığı bölgeler bu çevrim bölgesinin yeniden birleştiği noktalardır ve bu durum Igarashi ve Takasaki'nin [11] çalışmalarında da görülmektedir.

Şekil 15'de blok arka yüzeyinde ısı taşınım katsayısının değişimi görülmektedir ve genel eğilim laminar durumdakine (Şekil 10) uymaktadır. En düşük Re sayısında ($Re=3700$) eğrinin aynı eğilimde olmasına rağmen ısı taşınım katsayısı diğerlerine nazaran oldukça küçüktür.

Yukarıdaki sonuçlar ve tartışmalar göz önüne alındığında ele alınan durum için maksimum sıcaklık blok arka alt köşesinde oluşmaktadır. Bu durumda özellikle laminar durumda iletim etkileri de hesaba katılarak eşlenik bir analizle türbülanslı akışa geçmeden devre kartından olan iletim katkısıyla yani pasif metotlarla bu sıcaklık düşürülmeye çalışılmalıdır. Türbülanslı akış ısı transferini arttırmakta fakat gerekli fan gücünü de arttırarak soğutma maliyetlerini arttırmaktadır.

SEMBOLLER

f	: hata oranı, (-)
k	: ısı iletim katsayısı (W/mK)
u, v	: x,y koordinatlarındaki hız bileşenleri (m/s)
ρ	: yoğunluk (kg/m^3)
T	: Sıcaklık, ($^{\circ}C$)
μ	: viskozite (Ns/m^2)
U	: hız, (m/s)
c_p	: özgül ısınma ısısı (J/kgK)
Re	: Reynolds sayısı ($=U.D_h/\nu_{hava}$)
P	: basınç (Pa)
D_h	: Hidrolik çap ($=(4.H.Z)/(2H+2Z)$)
PCB	: Baskı devre kartı
H,Z	: Kanalın yüksekliği ve genişliği

KAYNAKÇA

1. **Çengel, Y.A.**, Heat Transfer-A Practical Approach (2nd Ed.), The McGraw-Hill Companies Inc. USA, 932 p., 2003.
2. **Davalath, J. and Bayazitoğlu, Y.**, Forced Convection Cooling Across Rectangular Blocks, Trans. of the ASME J. of Heat Transfer, 109, 321-328, 1987.
3. **Can, M. and Pulat, E.**, Cooling of Electronic Systems by Impinging Air Jets, Cooling of Electronic Systems (Eds. S.Kakaç, H.Yüncü, K.Hijikata)-NATO ASI Series, Serie E:Applied Sciences, Kluwer Academic Publishers, 258, 339-359, 1994.
4. **Poulikakos, D. and Wietrzak, A.**, Cooling of Microelectronic Sensor by Turbulent Forced Convection, Cooling of Electronic Systems (Eds. S.Kakaç, H.Yüncü, K.Hijikata)-NATO ASI Series, Serie E:Applied Sciences, Kluwer Academic Publishers, 203-224, 1994.
5. **Igarashi, T. and Takasaki H.**, Fluid Flow and Heat Transfer Around A Rectangular Block Fixed on a Flat Plate Laminar Boundary Layer, Proc. of the ASME/JSME Thermal Engineering, Book No.H0933A, pp.295-302, 1995.
6. **Zahn, B.A., Stout, R.P. and Billings, D.**, A Thermal Comparative Study of a Ceramic Dual In-Line Pressed Microelectronics Package Using Both Computational Fluid Dynamics and Solid Modelling Techniques on the ANSYS Finite Element Analysis System, ANSYS Conference Proceedings, II, pp.371-380, 1996.
7. **Zhao, C.Y. and Lu, T.J.**, Analysis of Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 4857-4869, 2002.
8. **Abboud, J.B.**, Heat Transfer Investigation of Microelectronic Equipment Using Finite Element Modelling Techniques, PhD Thesis, University of Bath, 298 p., 1987.
9. **Sözber, N., Sözber, M., Ekmekçi, İ., Saraç, H.İ. ve Çallı, İ.**, Elektronik Sistemlerin Isı Taşınımı İle Soğutulması, ULIBTK'97-11. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı, Edirne, 546-555, 1997.
10. **Pulat, E.**, Mikroelektronik Devre Elemanlarının Zorlanmış Taşınımıyla Soğutulmasının Simülasyonu, Doktora Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
11. **Igarashi, T. and Takasaki H.**, "Fluid Flow Around Three Rectangular Bloks in a Flat-Plate Laminar Boundary Layer" Experimental Heat Transfer, Vol.5, 17-31, 1992.
12. **Morris G. K. And Garimella S. V.**, "Thermal Wake Downstream of a Three Dimensional Obstacle" Experimental Thermal and Fluid Science, 12-1, 65-74,1996.