



CİDAR ISITMASININ DÜZ BİR LEVHA ÜZERİNDEKİ SINIR TABAKA GEÇİŞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Abdussamet SUBAŞI ve Hasan GÜNEŞ

İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
34437 Gümüşsuyu, İstanbul
subasiab@itu.edu.tr, guneshasa@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 27.01.2014, Kabul Tarihi: 29.04.2014)

Özet: Bu çalışmada, düz bir levha üzerindeki akışa aktif akış kontrol yöntemlerinden biri olan ısıtma uygulanmasının sınır tabaka geçişine ve aerodinamik performansa olan etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Isıtmanın uygulanmadığı izotermal durum, levhanın bütününe ısıtılması ve hücum kenarından yapılan kısmi ısıtma durumları ayrı ayrı ele alınarak, iki-boyutlu ve üç-boyutlu analizler Ansys-Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve akış parametreleri olarak seçilen; serbest akımın türbülans şiddetinin (Tu), yüzey sıcaklığının (T_w) ve ısıtılan bölgenin uzunluğunun (ζ) sınır tabaka geçişine, yüzey sürtünme katsayısına (C_f) ve Nusselt sayısına (Nu) olan etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak; çalışmada incelenen durumlar dikkate alındığında, Tu 'nun türbülansa geçişi etkileyen önemli bir parametre olduğu, kısmi ısıtmanın yapılacağı yerin önemli olduğu, düşük Tu 'larda bütün levhanın ısıtılması yerine levhanın hücum kenarından itibaren kısmi ısıtma yapmanın daha uygun olduğu, yine düşük Tu 'larda artan ζ ile C_f 'in azaldığı ve ısıtmanın izotermal duruma kıyasla C_f 'in azaltılmasında alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Düz levha, Aktif akış kontrolü, Isıtma, Aerodinamik.

EFFECTS OF WALL HEATING ON BOUNDARY LAYER TRANSITION OVER A FLAT PLATE

Abstract: In this study, the effects of boundary layer heating, as a means of an active flow control, of the flow over a flat plate on boundary layer transition and aerodynamic performance are numerically investigated. Two-dimensional and three-dimensional CFD simulations are carried out using ANSYS-Fluent software for isothermal, full heating and discrete heating cases. The effects of the free stream turbulence intensity Tu , the surface temperature T_w and the heating section length ζ , being selected as design and flow parameters on boundary layer transition, skin friction coefficient C_f and Nusselt number Nu are parametrically investigated. Simulation results revealed that Tu has a significant effect on the laminar to turbulent transition, and the location of the heater strips has a great importance for discrete heating cases. It is also shown that as compared to full heating of the plate, the discrete heating from the leading edge is more convenient for the low values of free stream turbulence intensities, and the heating may be used as an alternative method for reducing C_f .

Keywords: Computational fluid dynamics (CFD), Flat plate, Active flow control, Heating, Aerodynamics.

SEMBOLLER

A	Alan [m^2]
C	Sabit [$kg/m.s.\sqrt{K}$]
C_f	Yüzey sürtünme katsayısı [$=2 \tau_w/\rho.U^2$]
C_p	Özgül ısı [$J/kg.K$]
D_ω	Karşıt yayılım
g	Yerçekimi ivmesi [m/s^2]
\overline{G}_k	Ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerji üretimi
G_ω	ω 'nın üretimi
h	Isı taşınım katsayısı [$W/m^2.K$]
k	Türbülans kinetik enerjisi [m^2/s^2]
L	Levha uzunluğu [m]
Nu	Nusselt sayısı [$=hx/k$]

P	Basınç [Pa]
q'	Birim uzunluk başına ısı akısı [W/m]
q''	Birim alan başına ısı akısı [W/m^2]
R	Gaz sabiti [$kJ/kg.K$]
Re	Reynolds sayısı [$=\rho Ux/\mu$]
S	Sabit [K]
S_k, S_ω	Kullanıcı tanımlı kaynak terimleri
T	Sıcaklık [K]
Tu	Serbest akımın türbülans şiddeti [%]
u_i	i yönündeki hız bileşeni [m/s]
u_j	j yönündeki hız bileşeni [m/s]
U	Serbest akımın hızı [m/s]
ω	Özgül yayılma hızı [s^{-1}]
X	Levhanın başlangıcından olan mesafe [m]
Y_k	Türbülansın dolayı k 'nin yitimi
Y_ω	Türbülansın dolayı ω 'nın yitimi

y^+	Boyutsuz duvar uzaklığı
ΔC_f	Yüzde değişim [=100×(C _f -C _{f,izt})/C _f]
ΔRe	Yüzde değişim [=100×(Re-Re _{izt})/Re]
ΔT	Sıcaklık farkı [=T _w -T _∞]
λ	Isıl iletkenlik [W/m.K]
λ_t	Türbülans iletkenliği [W/m.K]
μ^*	Viskozite $\mu^* = \mu + \mu_t$ [kg/m.s]
μ	Viskozite [kg/m.s]
μ_t	Türbülans viskozitesi [kg/m.s]
ζ	Isıtılan bölgenin uzunluğu [m]
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
τ	Kayma gerilmesi [N/m ²]
Γ_k	k'nın etkin yayınımlı
Γ_ω	ω 'nın etkin yayınımlı

Alt indisler

etk	Etkin
i, j	Tensör indeksi
izt	İzotermal
krt	Kritik
∞	Serbest akım
w	Cidar
x	Yerel (konuma bağlı)

GİRİŞ

Birçok mühendislik uygulamasında cisimlerin bir akış ortamı içinde bulunması nedeniyle sürtünme kuvveti, gürültü ve titreşim gibi akış kaynaklı problemlerle sıklıkla karşılaşmaktadır. Dolayısıyla akış kaynaklı problemlerin ortadan kaldırılması yada olumsuz etkilerinin azaltılması sıklıkla karşılaşılan ve sürekli geliştirme ihtiyacı duyulan önemli bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek ve aerodinamik performansı arttırmak akış kontrolü ile mümkündür (Akansu vd., 2011; Genç vd., 2012).

Akış kontrol yöntemleri aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Pasif yöntemlerde ilave bir güç kullanılmaksızın sisteme çeşitli düzeneklerin ilave edilmesi söz konusu iken; aktif yöntemlerde ise harici bir enerji girdisi gereklidir. Ayrıcı plaka, küçük bir kontrol çubuğu, yüzey pürüzlülüğünün değiştirilmesi ve yivli (veya çıkıntılı) yüzeyler pasif akış kontrol yöntemlerine; akış içine yapılan üfleme ve emme, ısıtma ve soğutma, mikro-kabarcık yada parçacık gönderme, akustik uyarma, dönen veya salınım yapan cisim, hareketli duvar ve elektromanyetik kuvvetlerin oluşturulması ise aktif akış kontrol yöntemlerine örnek olarak verilebilir (Akansu vd., 2011). Pasif akış kontrolünde, ilave güç gereksinimi olmaması, kullanılan düzeneklerin basit olması ve üretimlerinin düşük maliyetle gerçekleştirilebilmesine karşın bazı önemli dezavantajları vardır. Örneğin, pasif akış kontrol elemanları çoklu uçuş koşullarına (yere inme, kalkış, manevra v.b.) göre optimize edilemezler ve ihtiyaç duyulmadıkları daimi seyir koşullarında ilave sürüklenme etkisi meydana getirirler. Aktif kontrol ile daha pahalı ve karmaşık yapılar kullanılarak bu olumsuzlukların üstesinden gelinir ve uçuşun genel performansı artırılabilir (Çadircı, 2010; Akansu vd., 2011).

Türbülanslı sınır tabakada oluşan yoğun karışımdan dolayı yüzey sürtünmesi; türbülanslı akışta, laminar akışta olduğundan çok daha büyüktür yani toplam yüzey sürtünmesi laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş noktasının yerinden büyük ölçüde etkilenmektedir (Çengel ve Cimbala, 2008). Aktif akış kontrol yöntemlerinden biri olan ısıtma ile sıcaklık farkından dolayı akışkanın yoğunluk ve viskozitesindeki değişimlere bağlı olarak akışın laminardan türbülansa geçişini geciktirmek yani laminar akış bölgesini uzatmak suretiyle sürtünme direncini azaltmak mümkündür. Ayrıca, herhangi bir hava taşıtının özgül yakıt tüketiminin, ona etki eden direnç ile doğrudan ilgili olduğu ve bu direncin önemli bir kısmının ise sürtünmeden kaynaklandığı göz önüne alındığında sürtünme direncinin azalmasına bağlı olarak yakıt tüketiminde de bir azalma sağlanabilmektedir (Wörner vd., 2002). Aktif akış kontrol yöntemlerinden biri olan ısıtma ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalardan aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Dovgal vd. (1989), lokal ısıtma ile türbülansa geçişin geciktirilmesi yani sınır tabaka laminarizasyonunu iki-boyutlu ve üç-boyutlu olmak üzere deneysel olarak incelemiştir. Schmid ve Selberg (1992) ise düz bir levha üzerine yerleştirilen ısıtıcı şeritlerin iki-boyutlu sınır tabaka gelişimi üzerine etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada sabit yüzey sıcaklığı, artan ve azalan yüzey sıcaklığı durumları, farklı ısıtıcı uzunlukları için analiz edilmiş ve sonuç olarak; yüzey sıcaklığı değişiminin ve ısıtıcı uzunluğunun uygun olarak seçilmesiyle laminardan türbülansa geçiş yerinin arttırılıp azaltılabileceği ve uygulanan yöntemin kanatlar üzerindeki türbülansa geçiş ve akış ayrılması yerlerinin modifiye edilmesinde faydalı olabileceği belirtilmiştir. Kral vd. (1994), düz bir levha üzerinde laminar akıştan türbülansa geçişini geciktirmek için uygulanan lokal ısıtmanın etkilerini incelemek amacıyla sayısal (Doğrudan Sayısal Simülasyon - DNS) ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kazakov vd. (1995) ise hücum kenarından ısıtılan bir yüzey üzerindeki akışta sınır tabaka geçiş yerini ve akışın kararlılığını incelemiştir. Çalışmada geçiş yeri lineer stabilite analizi ve e^N metodu ile belirlenmiştir. Sonuç olarak; hücum kenarı yakınında küçük bir alanın, serbest akım sıcaklığının iki ila dört katı sıcaklığına kadar ısıtılması ile laminardan türbülansa geçişin geciktirilebileceğini belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise Kazakov vd. (1996), düz bir levha üzerindeki tam gelişmiş türbülanslı sınır tabaka akışında, levhanın diğer bölgeleri ısı olarak yalıtımlı olacak şekilde yüzeyin bir yada birkaç yerel bölgesinin enerjilendirilmesinin sürtünme kuvveti üzerine olan etkilerini incelemiştir. Yazarlar diğer bir çalışmada ise (1997) düz bir levha üzerindeki süpersonik türbülanslı sınır tabaka akışında sınır tabakaya ısı enerjisi ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında yüzeyin lokal olarak ısıtılması veya belirli bir gaz hacminin lokal olarak ısıtılması durumları incelenmiştir. Bazı koşullarda, aynı miktarda enerji ilave edilmesi durumunda, gaz hacminin lokal olarak ısıtılması ile sürtünme kuvvetinde elde edilen azalmanın yüzeyin lokal olarak ısıtılması durumuna kıyasla daha yüksek olduğunu

belirtmişlerdir. Kramer *vd.* (1999), türbülanslı sınır tabaka akışında cidar ısıtmasının neden olduğu sürtünme katsayısındaki azalmanın, askeri ve ticari hava taşıtları için uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla üç aşamalı deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, ısıtmanın düşük Reynolds sayılı uçuş şartlarında, düşük ısı geçişine bağlı olarak yüksek yüzey sıcaklıklarından ötürü en etkili olduğunu ve ısıtma ile sürtünme katsayısında kayda değer azalmalar sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise Filippov (2002), kısmi ısıtmanın düz bir levha üzerindeki sınır tabaka gelişimine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Nispeten düşük Reynolds sayılarında, ısıtmanın sınır tabakanın laminardan türbülansa geçişini geciktirmesini mümkün kıldığı sonucuna varmıştır. Brooker *vd.* (2002) ise ısıtıcı şeritlerin düz bir levha üzerindeki sınır tabaka akışının kararlılığına olan etkisini parabolik stabilite denklemlerini kullanarak analiz etmişlerdir. Belirli bir ısı girdisi için ısıtıcı şeritlerin akışı daha kararlı hale getirdiğini belirtmişlerdir. Polivanov *vd.* (2002), cidarda ısıtma/soğutma yapan bir eleman tarafından pertürbe edilen hipersonik bir sınır tabaka için stabilite analizi yapmışlardır. Simülasyonlar iki-boyutlu bir kontrol elemanı için farklı lokasyonlarda, farklı uzunluklar ve sıcaklıklarda gerçekleştirilmiş ve DNS sonuçlarıyla lineer stabilite analizinden elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca lokal cidar ısıtmasının, ısıtılan bölgedeki pertürbasyonları stabilize ederken, aşağıakım yönünde pertürbasyon genliğini arttırdığını ve soğutmanın ise tam tersi bir etkiye neden olduğunu belirlemişlerdir. İki-boyutlu analizlere ilave olarak akışa dik yönde uzatılan ve cidarda ısıtma/soğutma yapan elemanın üç-boyutlu etkilerini de incelemişlerdir.

Literatür özetinden de anlaşılacağı gibi akış kontrol yöntemlerinin laminar akıştan türbülansa geçiş üzerine olan etkilerini sayısal ve deneysel olarak belirlemek mümkündür. Deneysel yöntemler kullanılarak doğru ve kesin sonuçlar elde edilebilmesine rağmen, deney sistemlerinin yüksek maliyetli olması sebebiyle birçok araştırmacı bu yöntemleri kullanma fırsatı bulamamaktadır (Genç *vd.*, 2012). Bu durum çoğu araştırmacıyı maliyet ve zaman tasarrufu düşünceleri doğrultusunda, laboratuvar altyapısına ihtiyaç duymayan ve kontrollü parametrik analizler yapmak imkânı sağlayan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programlarını kullanarak çalışma yapmaya itmiştir. Bu çalışmada düz bir levhaya uygulanan ısıtmanın sınır tabaka geçişine ve aerodinamik performansa olan etkileri Ansys-Fluent ticari yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Isıtmanın uygulanmadığı izotermal durum, levhanın bütününe ısıtılması ve hücum kenarından yapılan kısmi ısıtma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilen parametrik çalışmada analizler iki-boyutlu ve üç-boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları literatürde sunulan deneysel verilerle, yapılan diğer sayısal çalışmalarla, ayrıca analitik ve ampirik ifadelerle karşılaştırılarak çalışmada kullanılan yöntemin geçerliliği doğrulandıktan sonra serbest akımın türbülans şiddetinin Tu , yüzey sıcaklığının T_w ve ısıtılan bölgenin uzunluğunun ζ , sınır tabaka

geçişine, performans ölçütü olarak seçilen yüzey sürtünme katsayısına C_f ve Nusselt sayısına Nu olan etkileri incelenmiştir.

PROBLEMİN TANIMI ve MATEMATİKSEL MODEL

Sayısal model olarak Şekil 1’de gösterilen $2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ boyutlarında ince ve düz bir levha dikkate alınmıştır. Hesaplama alanı oluşturulurken levhanın başlangıcından önce 0.15 m ’lik bir boşluk bırakılarak giriş bölgesinde verilen sabit hız değerinin geçerliliği sağlanmıştır. Akışın levhadan uzakta viskoz etkilerden etkilenmesini önleyecek yeterli bir akış alanı oluşturmak için hesaplama alanının yüksekliği 0.3 m olarak seçilmiştir.

Yönetici Denklemler

Kartezyen koordinatlarda türbülanslı akış için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i ; \tau_{ij} = \mu^* \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

Enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) ; \lambda^* = \lambda + \lambda_r \quad (3)$$

Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport - SST) $k-\omega$ Türbülans-Geçiş Modeli

Evrensel olarak bütün problemler için geçerli bir türbülans modeli olmadığı için farklı problemlerde farklı türbülans modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki amaç laminar akıştan türbülanslı akışa geçişini geciktirmek olduğu için öncelikle türbülanslı akış için geçerli olan herhangi bir türbülans modeli yerine, hem laminar hem de türbülanslı akışı bir arada modelleme imkânı sağlayan ve Ansys-Fluent yazılımı bünyesinde yer alan SST $k-\omega$ türbülans-geçiş modeli kullanılmıştır. SST $k-\omega$ türbülans-geçiş modelindeki k ve ω sırasıyla Eş. (4) ve (5)’de verilmiştir.

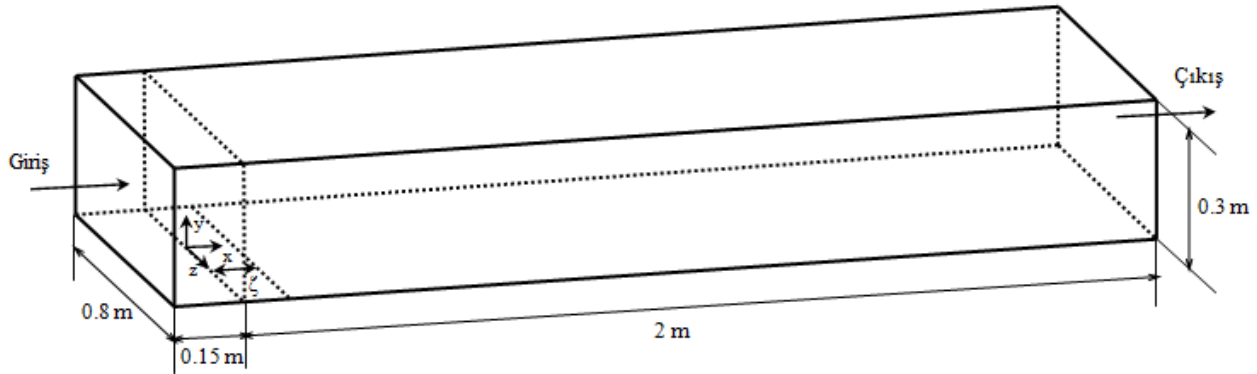
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \overline{G_k} - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

Eş. (4) ve (5)’te $\overline{G_k}$ ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerji üretimini, G_ω ω ’nın üretimini,

Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω 'nın etkin yayınımları, Y_k ve Y_ω sırasıyla türbülans dolaylı k ve ω 'nın yitimini, D_ω karışıt yayınımları, S_k ve S_ω ise kullanıcı tanımlı kaynak

terimlerini ifade etmektedir. Modelde kullanılan terimler ve sabitlerle ilgili daha detaylı bilgi için Ansys-Fluent kullanım kılavuzu incelenebilir (Ansys Fluent, 2013).



Şekil 1. Hesaplama alanının şematik gösterimi.

Sınır Şartları

Giriş sınır şartı olarak akışkanın hızı $U=20$ m/s ve sıcaklığı $T_\infty=300$ K, çıkış sınır şartı olarak ise sabit basınç $P_{\text{etik}}=0$ alınmıştır. Levha üzerinde kaymama sınır şartı geçerli iken, levhanın başlangıcından önce bırakılan 0.15 m'lik boşluk ile üst sınır ise hareketli duvar olarak dikkate alınarak serbest akımın özellikleri atanmıştır. Üç-boyutlu analizlerde yan duvarlara simetri sınır şartı uygulanırken, ısıtma yapılan analizlerde ısıtılan bölgeye (ζ) sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı verilmiştir. Akışkan olarak hava seçilmiştir. Transport denklemlerine ek olarak sıcaklık farkının neden olduğu yoğunluktaki değişimleri dikkate almak için ideal gaz denkleminde (Eş. (6)), viskozitedeki değişimleri dikkate almak için de gazların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimini veren Sutherland Yasası'ndan (Eş. (7)) faydalanılmıştır.

$$P = \rho RT \quad (6)$$

$$\mu = \frac{C T^{3/2}}{T + S} \quad (7)$$

Eş. (7)'deki C ve S sabitleri ise hava için $C = 1.458 \times 10^{-6} \left[\text{kg/m s} \sqrt{\text{K}} \right]$ ve $S = 110 \left[\text{K} \right]$ olarak alınmıştır (White, 2004).

Çözüm Ağı ve Sayısal Çözüm Yöntemi

Çözüm ağı, sınır tabakadaki değişimlerin doğru bir şekilde çözülmesi amacıyla levhanın cidarına yaklaştıkça sıklaşacak şekilde ve türbülans hız profilinin gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için y^+ değeri 1'den küçük olacak şekilde oluşturulmuştur. Çözüm ağından bağımsız sonuçlar; iki-boyutlu analizlerde 54000, üç-boyutlu analizlerde ise 3380000 yapısal eleman ile elde edilmiştir. Analizlerde basınç tabanlı ve zamandan bağımsız çözüm yöntemi seçilmiştir. Tüm transport denklemleri için ikinci mertebeden sonlu hacimler ayrıklaştırılması kullanılmıştır. Denklemler "SIMPLE" çözüm algoritması kullanılarak

çözdürülmüştür. Simülasyonlar çift kat sayısal hassaslık (double precision) ile gerçekleştirilmiştir. Her bir değişkene ait artıklar 1×10^{-6} 'dan küçük olacak şekilde, akış alanı içerisinde seçilen kritik noktalar için kayma gerilmesi, hız, sıcaklık v.b. değişkenler izlenerek bu parametreler sabitleninceye kadar çözüme devam edilmiştir.

Hidrodinamik ve Isıl Sınır Tabaka Karakteristikleri

Herhangi bir geometriye sahip bir cisme etkiyen aerodinamik direnç genellikle sürtünme direnci ve basınç direncinden meydana gelmektedir. Düz bir levha üzerindeki paralel akışta ise sıfır basınç gradyeni dolayısıyla basınç direnci sıfırdır ve aerodinamik direnç bütünüyle sürtünme direncinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla direnç katsayısı, sürtünme katsayısına eşittir (Çengel ve Cimbala, 2008). Bu sebeple, çalışmada yüzey sürtünme katsayısı aerodinamik performansın ölçüsü olarak seçilmiş ve yerel yüzey sürtünme katsayısı Eş. (8) yardımıyla hesaplanmıştır. Tüm yüzey için ortalama yüzey sürtünme katsayısı ise Eş. (8)'de verilen yerel yüzey sürtünme katsayısının levha uzunluğu boyunca integre edilmesiyle (Eş. (9)) elde edilmiştir.

$$C_{f,x} = \frac{2 \tau_w}{\rho U^2} \quad (8)$$

$$C_f = \frac{1}{L} \int_0^L C_{f,x} dx \quad (9)$$

Akışı karakterize eden boyutsuz büyüklük olan yerel Reynolds sayısı Eş. (10) yardımıyla ve ısıtma yapılan analizler için kullanılan yerel Nusselt sayısı da Eş. (11) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Re_x = \frac{\rho U x}{\mu} \quad (10)$$

$$Nu_x = \frac{h_x x}{\lambda} = \left(\frac{q''}{T_w - T_\infty} \right) \left(\frac{x}{k} \right) \quad (11)$$

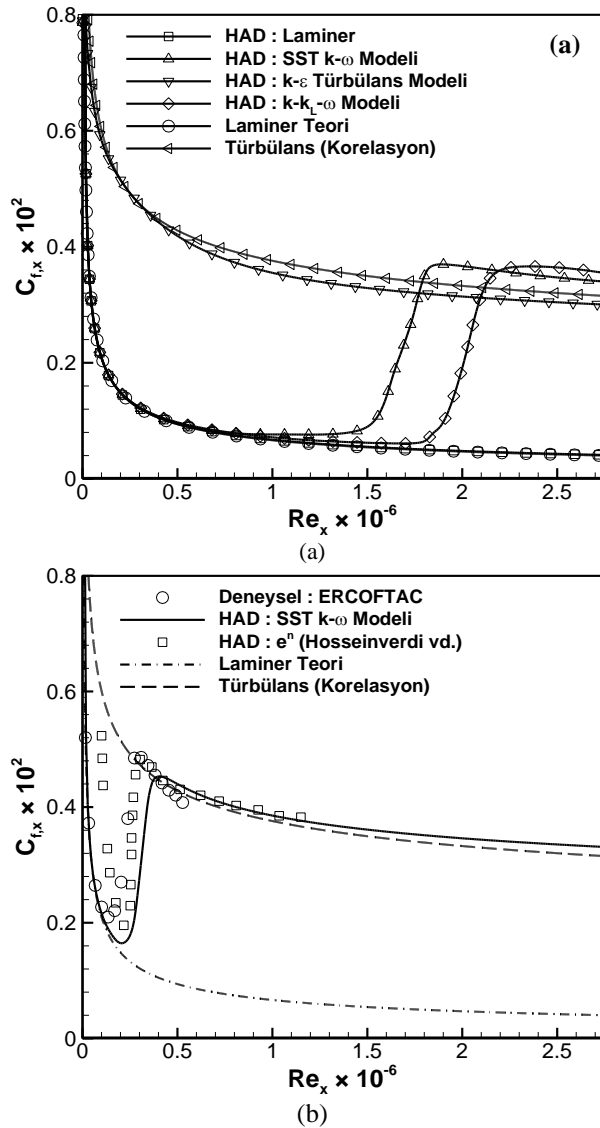
Ortalama Nusselt sayısı ise ortalama yüzey sürtünme katsayısına benzer olarak Eş. (11)'de verilen yerel Nusselt sayısının ısıtılan bölgenin uzunluğu (ζ) boyunca entegre edilmesiyle (Eş. (12)) elde edilmiştir.

$$Nu = \frac{1}{\zeta} \int_0^{\zeta} Nu_x dx \quad (12)$$

Levha ısıtması yapılan analizler için birim alan başına verilen ortalama ısı miktarı Eş. (13) ile birim derinlik başına verilen ortalama ısı miktarı ise Eş. (14) ile hesaplanmıştır. Bütün levhanın ısıtılması durumunda ise Eş. (12) ve (14)'da $\zeta = L$ olarak dikkate alınmıştır.

$$\dot{q} = \frac{1}{A} \int_A \dot{q}_x dA \quad (13)$$

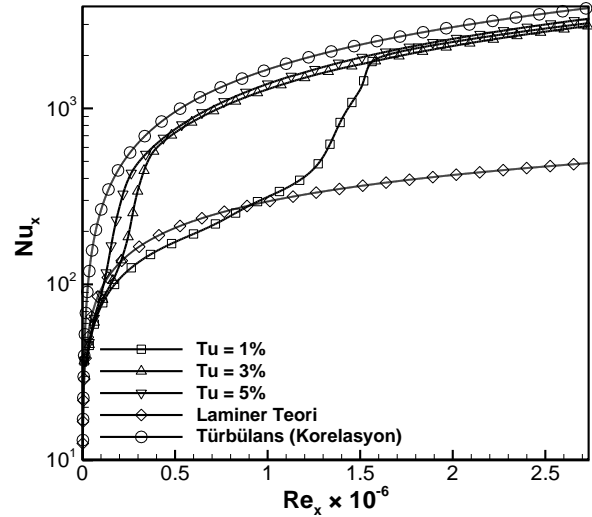
$$\dot{q} = \dot{q} \times \zeta \quad (14)$$



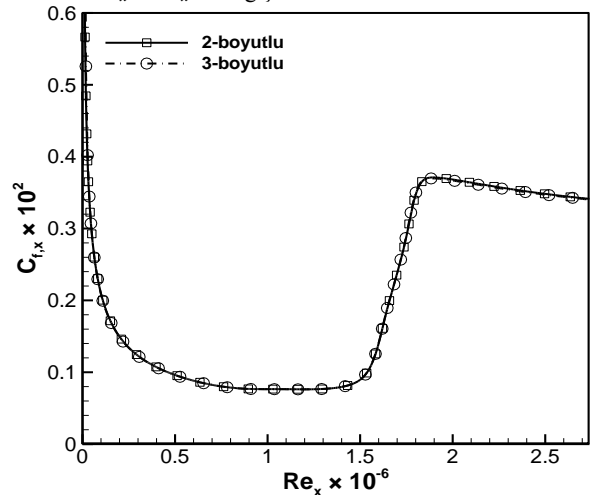
Şekil 2 İzotermal durumda (a) $Tu=1\%$ ve (b) $Tu=3\%$ için $C_{f,x}$ 'in Re_x ile değişimi ($z=0$). (Laminar akış için, $C_{f,x} = 0.664 Re_x^{-1/2}$ türbülanslı akış için ise $C_{f,x} = 0.455/\ln^2(0.06 Re_x)$ korelasyonu kullanılmıştır.)

Sayısal Yöntemin Geçerliliği

Bu çalışmada, sayısal modelleme üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada düz levha üç-boyutlu ve izotermal olarak modellenmiştir. İkinci aşamada ise; düz levha yine üç-boyutlu olarak modellenmiş, izotermal durumdan farklı olarak C_f 'i azaltmak amacıyla levhanın cidarı farklı sıcaklıklara ısıtılarak analizler yapılmıştır. Her iki aşama için de elde edilen sonuçlar literatürde sunulan deneysel verilerle, yapılan diğer sayısal çalışmalarla, ayrıca analitik ve ampirik ifadelerle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalardan bazıları izotermal durum için Şekil 2'de, bütün ısıtma durumu için ise Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde SST $k-\omega$ türbülans-geçiş modeli kullanılarak yapılan analizlerin gerek teoriyle, gerek literatürde yapılan diğer çalışmalarla gerekse de deneysel veriler ile uyum içerisinde olduğu açıkça görülmektedir. İncelenen durumlar için üç-boyutlu modellemenin yanı sıra iki-boyutlu modelleme de yapılmıştır. Şekil 4'te yapılan karşılaştırmada z-yönündeki etkilerin önemli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle zamandan ve hesaplama maliyetinden tasarruf etmek amacıyla tüm durumlar için analizler iki-boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3 Bütün ısıtma durumunda $\Delta T=100 K$ için $z=0$ 'da farklı Tu 'larda Nu_x 'in Re_x ile değişimi.



Şekil 4. İzotermal durumda $Tu=1\%$ için 2-boyutlu ve 3-boyutlu ($z=0$) analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bütün ısıtma yapılan durumda C_f 'in izotermal duruma kıyasla serbest akımın türbülans şiddetine bağlı olmak üzere yaklaşık olarak %10 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu amacı gerçekleştirmek için levhaya verilmesi gereken ısı miktarının oldukça yüksek olduğu dikkate alındığında daha az enerji harcayarak kısmi ısıtma yapmak suretiyle benzer bir iyileştirmenin yapılabilirliğini tespit etmek amacıyla üçüncü ve son aşamada levhanın hücum kenarından itibaren belirli bir bölgeye farklı sıcaklıklarda kısmi ısıtma yapılması durumu analiz edilmiştir. Tasarım ve akış parametreleri olarak; serbest akımın türbülans şiddeti Tu , levha yüzey sıcaklığı T_w ve ısıtılan bölgenin uzunluğu ζ ; performans değişkeni olarak da C_f ve Nu seçilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Her bir aşamada incelenen

parametreler ve değerleri ise Tablo 1'de verilmiştir. Üç aşama için toplam 39 farklı durum incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmada incelenen her bir durum için levha ısıtmasının izotermal duruma kıyasla kritik Reynolds sayısını (Re_{krit}) farklı oranlarda arttırdığı yani türbülansa geçişi geciktirdiği ve buna bağlı olarak da C_f 'de bir azalma sağlandığı Tablo 2'den açıkça görülmektedir.

Levhanın bütününe ısıtılması ile izotermal duruma göre C_f 'de ~%7.2 ila ~%14.7 oranında bir azalma sağlanırken kısmi ısıtma yapılması durumunda ise ~%2.6 ila ~%23.6 oranında bir azalma sağlanmaktadır. Azalma miktarı; serbest akımın türbülans şiddetine (Tu), ısıtılan bölgenin uzunluğuna (ζ) ve levha sıcaklığına (T_w) bağlı olarak değişim göstermektedir. Her bir parametrenin etkisi aşağıda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Tablo 1. İzotermal, bütün ısıtma ve kısmi ısıtma durumları için çalışmada incelenen parametre değerleri.

Parametreler	Seviyeler	İzotermal			Bütün Isıtma			Kısmi Isıtma		
		-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
Serbest akımın türbülans şiddeti, Tu	[%]	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Yüzey sıcaklığı, T_w	[K]		300		350	400	450	350	400	450
Isıtılan bölgenin uzunluğu, ζ	[m]		-----			2		0.1	0.3	0.5

Serbest Akımın Türbülans Şiddetinin (Tu) Etkisi

Tablo 2 ve Şekil 6 incelendiğinde tüm durumlar için serbest akımın türbülans şiddetinin (Tu) türbülansa geçiş üzerinde etkili bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. Artan Tu ile C_f de artmaktadır. Çünkü Tu arttıkça türbülansa geçiş daha erken gerçekleşmektedir. Örneğin bu çalışmada incelenen 2 m uzunluğundaki düz bir levha dikkate alındığında izotermal şartlar altında $Tu=1$ iken $x_{krit}=1.349$ m'de tam türbülanslı akışa geçiş gerçekleşirken, $Tu=3$ iken $x_{krit}=0.274$ m'de ve $Tu=5$ iken de $x_{krit}=0.193$ m'de gerçekleşmektedir. Bilindiği gibi C_f türbülanslı akışta laminar akışta olduğundan çok daha büyüktür. Dolayısıyla artan Tu ile türbülansa geçiş yeri levhanın hücum kenarına yaklaştığı için aynı uzunluktaki levhada akışın laminar kalma mesafesi daha kısa olduğundan C_f de artmaktadır.

Levha Sıcaklığının (T_w) Etkisi

Kısmi ısıtma durumunda düşük Tu 'larda (%1) T_w 'u arttırmak yüksek Tu 'larda arttırmaya kıyasla, bütün ısıtma durumunda ise kısmi ısıtmanın tam tersine yüksek Tu 'larda (%3 ve %5) T_w 'u arttırmak düşük Tu 'larda (%1) arttırmaya kıyasla C_f 'de daha fazla bir iyileştirmeye neden olmaktadır. Örneğin bütün ısıtma durumunda $Tu=1$ iken $\Delta T=T_w-T_\infty$ 'yi üç kat arttırmakla C_f 'de ~%1.4'lük bir iyileştirme sağlarken $Tu=3$ iken bu değer ~%6.6 değerlerine ulaşmaktadır.

Kısmi ısıtma durumunda ise $Tu=1$ ve $\zeta=0.5$ m iken ΔT 'yi üç kat arttırmakla C_f 'de ~%7.1'lik bir azalma sağlanırken $Tu=5$ ve $\zeta=0.5$ m olması halinde bu değer ~%1.1'e düşmektedir (Şekil 5). Çünkü ısıtma ile C_f de sağlanan iyileştirme laminar türbülansa geçişi

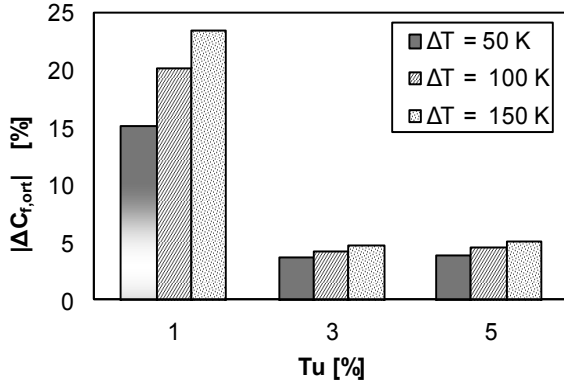
geciktirerek yada türbülanslı akıştaki yüzey sürtünme katsayısını azaltarak sağlanmaktadır (Kramer vd., 1999). Bu çalışmada akış levha boyunca gelişip laminar türbülansa geçiş gerçekleştiği için komple ısıtma durumunda bahsedilen bu iki durum birlikte gerçekleşerek C_f 'de azalma sağlanmaktadır. Bu durum Tablo 2, Şekil 7 ve 9'dan da açıkça görülmektedir. Kısmi ısıtma durumu için ısıtma yapılan bölge boyunca $C_{f,x}$ 'de bir azalma olduğu gözlemlenirken ısıtma biter bitmez $C_{f,x}$ 'in yine izotermal durumla yaklaşık olarak aynı mertebelere geldiği görülmektedir. Komple ısıtmanın ise Re_{krit} 'te bir artma sağladığı ve buna ilaveten tam türbülanslı akışta da C_f 'de bir azalma sağladığı görülmektedir. Öte yandan artan ΔT ile C_f azalmakta ancak levhaya verilmesi gereken ısı miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla nihai bir değerlendirme yaparken bu iki durum birlikte ele alınmalıdır. Bu nedenle kısmi ısıtmada düşük Tu 'larda bütün ısıtmada ise yüksek Tu 'larda T_w 'u arttırmak düşünülebilir. Yüksek Tu 'larda ise ısıtma yapılan yerin konumu geçiş bölgesine uygun bir şekilde seçilerek kısmi ısıtma da kullanılabilir.

Isıtılan Levha Boyunun (ζ) Etkisi

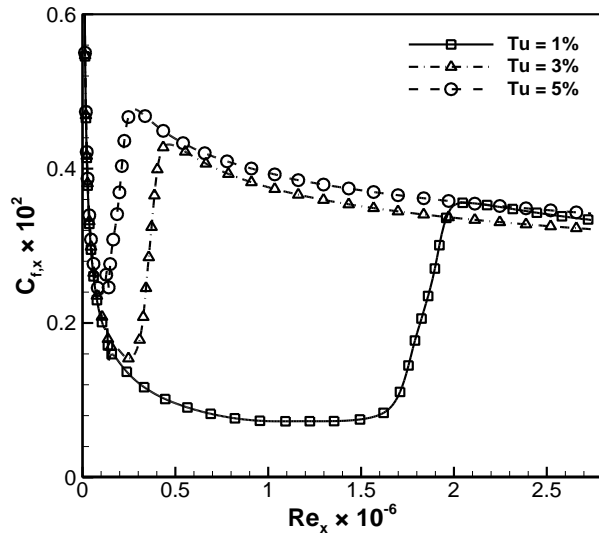
Kısmi ısıtma durumunda düşük Tu 'larda (%1) T_w 'a da bağlı olarak ζ 'nin üç kat yada beş kat artırılması ile C_f 'de maksimum ~%11.3'lere varan bir iyileştirme sağlanırken, yüksek Tu 'larda bu değer maksimum ~%2.3'lere düşmektedir (Şekil 8). Düşük Tu 'larda komple ısıtmaya kıyasla kısmi ısıtmanın daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Fakat yüksek Tu 'larda (%3 ve %5 için) her ne kadar levhaya verilen ısı miktarı kısmi ısıtmaya kıyasla çok yüksek olsa da bütün ısıtma kısmi ısıtmaya kıyasla

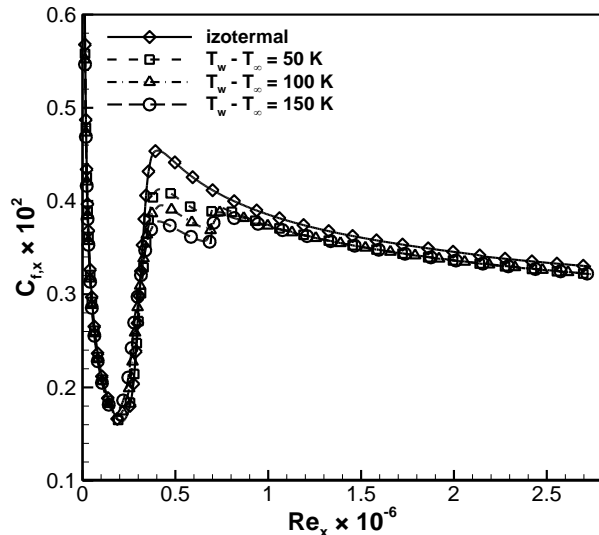
C_f 'de daha fazla azalmaya neden olmaktadır. Öte yandan ζ 'nin artması ile C_f 'de bir azalma sağlanırken ısıtma yapılan bölgenin uzunluğu arttığı için aynı şartlarda levhaya verilmesi gereken ısı miktarı dolayısıyla maliyette artmaktadır. Bu nedenle karar aşamasında bu iki durum birlikte ele alınmalıdır.



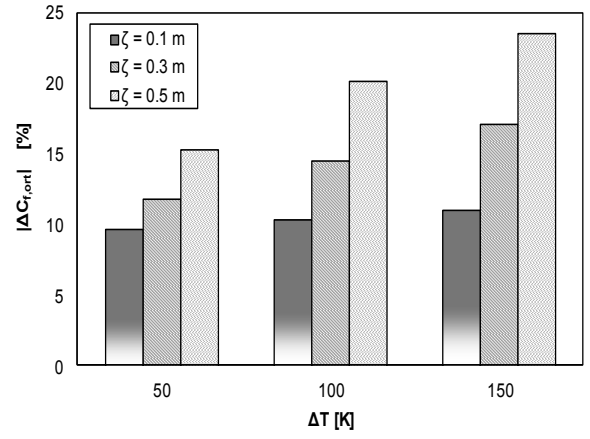
Şekil 5. Kısmi ısıtma durumunda $\zeta=0.5$ m için farklı Tu 'larda ve ΔT 'lerde $|\Delta C_f|$ 'in değişimi.



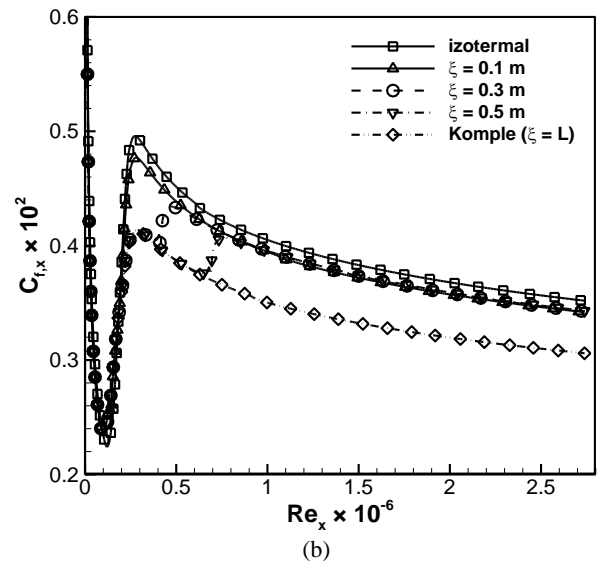
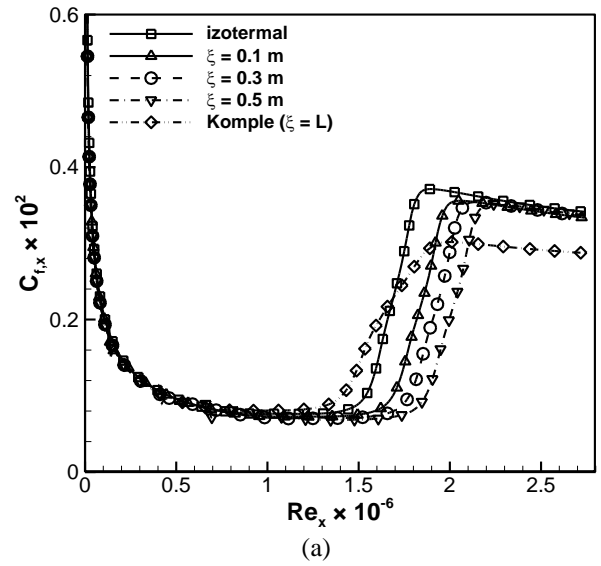
Şekil 6. Kısmi ısıtma durumunda $\Delta T=150$ K ve $\zeta=0.1$ m için farklı Tu 'larda $C_{f,x}$ 'in Re_x ile değişimi



Şekil 7. $Tu=3$ için izotermal durumda ve $\zeta=0.5$ m'de farklı ΔT 'lerde kısmi ısıtma durumunda $C_{f,x}$ 'in Re_x ile değişimi.



Şekil 8. Kısmi ısıtma durumunda $Tu=1$ için farklı ζ 'larda ve ΔT 'lerde $|\Delta C_f|$ 'in değişimi.



Şekil 9. (a) $Tu=1$ (b) $Tu=5$ için izotermal durumda, $\Delta T=150$ 'de farklı ζ 'larda kısmi ısıtma ve bütün ısıtma durumlarında $C_{f,x}$ 'in Re_x ile değişimi.

Tablo 2. İncelenen tüm durumlar için elde edilen sonuçlar.

Durumlar		İzotermal		Bütün Isıtma						Kısmi Isıtma								
No	Tu [%]	Re _{krt} × 10 ⁻⁶	C _f × 10 ²	ΔT [K]	Re _{krt} × 10 ⁻⁶	ΔRe _{krt} [%]	q' [W/m]	Nu	C _f × 10 ²	ΔC _f [%]	ζ [m]	ΔT [K]	Re _{krt} × 10 ⁻⁶	ΔRe _{krt} [%]	q' [W/m]	Nu	C _f × 10 ²	ΔC _f [%]
1												50	1.971	6.291	250.698	58.905	0.18898	-9.694
2				50	1.9500	5.282	2674.003	1219.596	0.19121	-8.415	0.1	100	1.984	6.905	479.582	56.026	0.18781	-10.378
3												150	1.996	7.465	691.232	53.546	0.18666	-11.058
4												50	2.013	8.246	432.566	107.114	0.18545	-11.782
5	1	1.8470	0.2073	100	1.9350	4.548	5165.724	1168.581	0.19078	-8.659	0.3	100	2.055	10.122	825.618	101.997	0.18104	-14.505
6												150	2.083	11.330	1187.364	97.584	0.17703	-17.099
7												50	2.074	10.945	559.860	140.647	0.17979	-15.301
8				150	1.9650	6.005	7451.903	1114.259	0.18906	-9.648	0.5	100	2.122	12.959	1068.748	134.223	0.17247	-20.195
9												150	2.172	14.963	1537.803	128.803	0.16775	-23.577
10												50	0.413	9.395	254.587	60.655	0.34506	-3.620
11				50	0.3925	4.662	4642.910	1730.050	0.33050	-8.185	0.1	100	0.424	11.745	486.917	57.674	0.34422	-3.873
12												150	0.445	15.910	701.708	55.113	0.34314	-4.199
13												50	0.443	15.530	619.757	217.651	0.34679	-3.103
14	3	0.3742	0.35755	100	0.3971	5.767	8715.197	1616.943	0.32185	-11.092	0.3	100	0.452	17.212	1209.182	213.727	0.34691	-3.067
15												150	0.462	19.004	1763.102	207.904	0.34676	-3.112
16												50	0.393	4.784	1177.353	466.111	0.34481	-3.695
17				150	0.3834	2.400	12321.426	1518.707	0.31177	-14.684	0.5	100	0.406	7.833	2248.647	440.993	0.34341	-4.118
18												150	0.406	7.833	3214.656	415.940	0.34169	-4.642
19												50	0.275	3.745	266.160	65.896	0.38044	-2.952
20				50	0.2693	1.708	5129.247	1865.966	0.36530	-7.219	0.1	100	0.279	5.125	513.230	63.850	0.38101	-2.798
21												150	0.284	6.796	746.360	62.269	0.38165	-2.625
22												50	0.288	8.090	834.242	314.131	0.37903	-3.335
23	5	0.2647	0.39167	100	0.2738	3.324	9618.015	1746.449	0.35293	-10.977	0.3	100	0.274	3.394	1584.000	294.814	0.37818	-3.567
24												150	0.278	4.784	2273.673	279.659	0.37750	-3.754
25												50	0.283	6.466	1415.980	538.706	0.37714	-3.853
26				150	0.2784	4.921	13615.150	1644.972	0.34255	-14.340	0.5	100	0.278	4.784	2665.748	502.578	0.37484	-4.490
27												150	0.274	3.394	3800.813	474.359	0.37304	-4.994

İzotermal durum için; $Tu=1\%$ iken $x_{krt}=1.349$ m, $Tu=3\%$ iken $x_{krt}=0.274$ m ve $Tu=5\%$ iken $x_{krt}=0.193$ m

SONUÇLAR

Bu çalışmada, düz bir levha üzerindeki akışta levhaya uygulanan ısıtmanın sürtünme direncine olan etkisini incelemek amacıyla Ansys-Fluent yazılımı kullanılarak sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Serbest akımın türbülans şiddeti, yüzey sıcaklığı ve ısıtılan bölgenin uzunluğunun; türbülansa geçiş, yüzey sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Yeni ve verimli hibrit bir akış kontrol sistemi tasarımının ön çalışması niteliğinde olan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- SST $k-\omega$ türbülans-geçiş modelinin, laminer akıştan türbülanslı akışa geçişi doğru bir şekilde tespit ettiği gösterilmiştir.
- Serbest akımın türbülans şiddeti (Tu), gerek izotermal gerekse de levhanın ısıtılması durumunda türbülansa geçişi etkileyen önemli bir parametredir.
- Türbülansa geçişi geciktirmek için geçişin gerçekleştiği yerden önce kısmi ısıtma yapılması gerekmektedir.
- Kısmi ısıtma durumunda düşük Tu 'larda bütün ısıtmada ise yüksek Tu 'larda T_w 'u arttırmak daha etkili olmaktadır.
- ζ 'nin artması düşük Tu 'larda (%1) C_f üzerinde önemli bir etki sağlamaktadır.
- Düşük Tu 'larda bütün ısıtma yapmak yerine levhanın hücum kenarından kısmi ısıtma yapılması gerek maliyet gerekse de C_f 'de sağlanan azalma miktarı bakımından daha uygundur.
- Isıtma yapılan tüm durumlarda izotermal duruma kıyasla C_f 'de belirli oranlarda azalma sağlandığı görülmüştür. Dolayısıyla maliyetin arka planda olduğu uygulamalarda ısıtma uygulaması C_f 'in azaltılmasında alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Akansu Y.E., Özmert M. ve Fırat E., 2011, Akış Kontrol Çubuğu İle Kare Kesitli Bir Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünde Hücum Açısının Girdap Kopma Olayına Etkisi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31, 1, 109-120.

ANSYS FLUENT, *Computational Fluid Dynamics Code Version 13*, ANSYS Inc. (<http://www.ansys.com>).

Brooker A.M.H., Severin J. ve Herwig H., 2002, Analysis of Boundary Layer Control by Heat Transfer Strips Using an Asymptotic Approach to the PSE, *Forschung im Ingenieurwesen*, 67/1, 11-18.

Çadircı S., *Aktif akış kontrolü için jet ve vorteks aktüatörünün deneysel ve sayısal araştırılması*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.

Çengel Y.A. ve Cimbala J.M., 2008, *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları* (1. Basım'dan Çeviri), Güven Kitabevi, İzmir.

Dovgal A.V., Levchenko V.Y.A. ve Timofeev V.A., 1989, Boundary Layer Control by a Local Heating of the Wall, *IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition*, Toulouse, France.

ERCOFTAC (*European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion*) Nexus. [Online veritabanı], URL: <http://www.ercofac.org> [15 Mart 2013].

Filippov V.M., 2002, Influence of Plate Nose Heating on Boundary Layer Development, *Fluid Dynamics*, 37/1, 27-36.

Genç M. S., Karasu İ, Açikel H. H. ve Akpolat M.T., 2012, Low Reynolds Number Flows and Transition, *Low Reynolds Number Aerodynamics and Transition*, Editor: M. Serdar GENÇ, InTech-Open Access Publishing.

Hosseinverdi S. ve Broomand M., 2010, Prediction of Laminar-Turbulent Transitional Flow over Single and Two-Element Airfoils, *40th Fluid Dynamics Conference & Exhibit*, Chicago, Illinois.

Kazakov A.V., Kogan M.N. ve Kuparev V.A., 1995, Optimization of Laminar-Turbulent Transition Delay by means of Local Heating of the Surface, *Fluid Dynamics*, 30/4, 563-570.

Kazakov A.V., Kogan M.N. ve Kuryachii A.P., 1996, Reduction of Turbulent Friction under Local Surface Heating, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 37/6, 832-838.

Kazakov A.V., Kogan M.N. ve Kuryachii A.P., 1997, Effects of Local Heat Supply to a Turbulent Boundary Layer on the Friction, *Fluid Dynamics*, 32/1, 39-45.

Kral L.D., Wlezien R.W., Smith J.M. ve Masad J.A., 1994, Boundary-Layer Transition Control by Localized Heating: DNS and Experiment, *Transition, Turbulence and Combustion*, Vol. I, 355-367.

Kramer B.R., Smith B.C., Heid J.P., Noffz G.K., Richwine D.M. ve Ng T., 1999, Drag Reduction Experiments Using Boundary Layer Heating, *37th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, NV.

Polivanov P., Gromyko Y., Sidorenko A., Maslov A., Keller M., Groskopf G. ve Kloker M.J., 2011, Effects of Local Wall Heating and Cooling on Hypersonic Boundary-Layer Stability, *Proceedings of the Summer Program*, Sonderforschungsbereich/Transregio 40.

Schmid, S. ve Selberg, B., 1992, Analysis of the Effect of Heat Strips on Boundary Layer Development Over a Flat Plate, *SAE Technical Paper 921923*.

White F.M., 2004, *Akışkanlar Mekaniği* (4. Basım'dan Çeviri), Literatür Yayınevi, İstanbul.

Wörner A., Rist U. ve Wagner S., 2002, Investigation of the Flow in the Vicinity of an Isolated 3D Surface Roughness, *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics IV / Contributionstothe 13th STAB/DGLR Symposium*, Munich, Germany.



Abdussamet SUBAŞI, 1986 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden, 2009 yılında Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecelerini, 2010 yılında ise Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan yüksek lisans derecesini aldı. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı doktora öğrenimine halen devam eden Subaşı Eylül 2010'dan beri Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.



Hasan GÜNEŞ, 1968 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini, yüksek lisans ve doktora derecelerini ise sırasıyla 1993 ve 1997 yıllarında Lehigh Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden aldı. 1997 yılında yardımcı doçent, 2003 yılında Doçent ve 2009 yılında ise Profesör ünvanı aldı. Stuttgart Üniversitesi ve Brown Üniversitesi'nde misafir öğretim üyesi/araştırmacı olarak çalışmıştır. Halen İTÜ Makina Fakültesi'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma konularında uluslararası dergilerde yayınlanmış ve konferanslarda sunulmuş çok sayıda bilimsel makalesi bulunmaktadır.