

Zamana bağlı boru akışındaki ısı geçişinin sayısal olarak incelenmesi

Markos ÇAĞAN*, Doğan GÜNEŞ, Ali Cemal BENİM

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, türbülanslı boru akışındaki taşınım yolu ile gerçekleşen ısı geçişi zamana bağlı sayısal olarak çeşitli yöntemlerin kullanımı ile modellenip, incelenmiştir. Bu maksatla, muhtelif türbülans modelleri ile cidar yakını modellemesi yaklaşımları denenerek, bu modellerin performansı etüdü edilmiştir. Çalışmaya ilk olarak daimi akış koşulu altındaki analizler ile başlanmıştır. Daimi hal için, literatürde yer alan ampirik ifadelerden türetilen Nusselt sayıları hesaplamalardan elde edilen Nusselt sayıları ile karşılaştırılarak, hesap değerleri doğrulanmaya çalışılmıştır. Buna göre, denen muhtelif iki denklemlilik türbülans modellerinin birbirlerine çok benzer neticeler ürettikleri, dolayısıyla bu modellerin daimi hal analizlerindeki performansları arasında önemli farkların bulunmadığı gözlemlenmiştir. Zamana bağlı hal analizlerinde ise, daha çok, iki denklemlilik türbülans modellerinin cidar fonksiyonlarıyla birlikte kullanımına odaklanılmıştır. Bunun yanı sıra, cidar fonksiyonlarının kullanılmadığı iki tabaka bölgeli model de bazı haller için kullanılarak elde edilen çözümlerin iyileştirilebilme olasılıkları incelenmiştir. Basamak şeklinde, darbe şeklinde ve sinüzoidal şekilde akış debisinin değiştiği muhtelif zamana bağlı akışlarda çeşitli sayıda Reynolds sayıları ele alınmıştır. Yürütülen hesaplamalardan elde edilen sonuçlar deneyler ile kıyaslanarak sunulmuş, ve elde edilen hesap neticelerinin ölçüm değerlerini öngörebilme kabiliyeti sorgulanmıştır. Burada, hız ve ısı akısı gibi parametrelerin zamana bağlı değişimlerinin hem nitelik hem de nicelik olarak, özellikle yüksek Reynolds sayılarında, makul bir biçimde öngörülebildikleri tespit edilmiştir. Ancak diğer taraftan, cidardaki ısı akısı cevabındaki gecikme gibi bazı hususların hesaplamalar tarafından yeterince yakalanamadığı da gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal akışkanlar dinamiği, türbülans modelleri, ısı geçişi, boru akışı.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Markos ÇAĞAN. cagan@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 10 25.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Programı'nda tamamlanmış olan "Gaz türbini soğutması ön-çevri sistemlerinin sayısal olarak modellenmesi ve incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 27.09.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.01.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Computational investigation of heat transfer in unsteady pipe flow

Extended abstract

Unsteady turbulent flows and the heat transfer which occur in pipe flows take place in a broad range of engineering devices. Investigation of such phenomena and understanding the underlying mechanisms would be very beneficial for the design of such practical devices, i.g. preswirl systems in gas turbine cooling and inlet manifolds in automotive engines. Analyzing the fluid flow problems by numerical simulations has gained such maturity within the last decade that they are utilized as an important design and analysis tool in a wide and ever increasing range of applications. Likewise, convective heat transfer is also analyzed using computational methods. Therefore, validation of numerical methods is a crucial matter for the modeling of such phenomena accurately. Validation of computational procedures has been carried out by some authors, but they were rather interested in solving steady-state problems. Therefore, there is a lack of validation studies of numerical predictions for unsteady convective heat transfer problems. This is the scope of the present investigation.

In this study, unsteady turbulent pipe flow which includes convective heat transfer has been investigated computationally. The numerical predictions have been validated by considering the recent experiments of Barker and Williams. This numerical study has been carried out using the general purpose code Fluent as basis, which utilizes finite volume method to discretize the governing equations, and a pressure correction formulation to handle the pressure-velocity coupling. Ensemble averaged continuity, Navier-Stokes, and energy transport equations have been solved for the incompressible, unsteady, 2D, axisymmetrical, turbulent pipe flow. Various two-equation turbulence models have been tested and examined in different computations in order to validate the models, since they are often used in industrial applications. Those are, namely, the standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, and Realizable $k-\epsilon$ turbulence models. A one-equation model has also been used in steady-state analysis, for comparison. As the modeling of near wall region is very important and have influence on convective heat transfer, different models have been employed. Those are, namely, some formulations including the standard or non-equilibrium wall-functions, and two-layer-zonal methods. Although the two-layer methods which re-

solve the near wall region with fine cells can principally produce better predictions the wall functions approach has been mainly used in this investigation because the two-layer methods demand high computational costs, and their use is still restricted to practical applications.

For steady-state analysis, the predictions have been validated by empirical correlations. The predictions agree quite well with the empirical values where no substantial differences were observed in performance of two-equation models considered. On the other hand, the two-layer methods did not offer a significant advantage over wall-function approach.

The transient analysis has been carried out with step-like, pulse-like and sinusoidal perturbations of the flow rate at different Reynolds numbers, by mainly using, the standard $k-\epsilon$ turbulence model with the standard wall-functions. The computational results have been compared with the experiments. It has been observed that in step-like changes the amount of wall heat flux could be predicted well, but the time delay of the heat flux response to the change of flow rate could not be predicted. In pulse-like changes the peak values and the variation of the wall heat flux with respect to time could be predicted well, especially at higher Reynolds numbers. However, the time delay of wall heat flux response to the change of flow rate has been fairly under-predicted. In sinusoidal perturbations, ensemble averaged measurements of wall heat flux could be predicted reasonably well. However, the deviation between the peak values of the computed wall heat flux and the measurements became greater with increasing relative amplitude of the flow rates. Computations could not predict sufficiently the form of the measured ensemble averaged heat flux curve with respect to time, which deviate from the sinusoidal shape, especially at highest relative amplitude of the flow rate. This might be due to low Reynolds number effects around temporally minimum flow rates during oscillations. It has been shown that the mean computed wall heat flux was not influenced by sinusoidal perturbations, and this finding was also in agreement with the experiments very well. Two-layer-zonal methods did not improve the observed time delay between the wall heat flux and the centerline velocity for the considered cases.

Keywords: CFD, turbulence models, heat transfer, pipe flow.

Giriş

Zamana bağılı boru akışları ve buradaki taşınımsal ısı geçişi bir çok aygıtta yer alan önemli bir hadisedir. Dolayısıyla, bu hadise içerisinde yer alan mekanizmaların ayrıntılı bir biçimde incelenmesi, bir çok mühendislik uygulamalarında yer alan komplike akış ve ısı geçişi olaylarının daha kolayca anlaşılmasına vesile olacaktır. Söz gelimi, gaz türbinleri soğutması ön-çevri sistemlerinde yer alan rotor diski üzerindeki kanallara akan zamana bağılı periyodik veyahut darbeli akışların anlaşılması, bu tür sistemlerin muhtelif işletme şartlarına göre geliştirme ve iyileştirme çabalarına çok önemli bir katkıda bulunabilecektir. Aynı zamanda, otomotiv motorlarındaki emme manifoldu içerisindeki akışlar da benzer kategoriye girmekte olup, uygun emme manifoldu tasarımı ve optimizasyonunda, zamana bağılı türbülanslı akış ve ısı geçişi hadisesinin anlaşılması çok büyük bir önem arz etmektedir (Shayler vd., 1996).

Akışkan akışı problemlerinin sayısal yöntemler ile modellenmesi ve çözümlenmesi son 10-15 yılda önemli derecede bir olgunluk ve yetkinliğe erişmiş olup, Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD) uygulamaları gittikçe artan bir oranda tasarım ve inceleme aracı olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber ısı geçişinin de dahil olduğu akış problemleri de sayısal simülasyonlar ile incelenebilmektedir. Bu kapsamda, taşınımsal ısı geçişi içeren değişik akışların, sayısal yöntemler ile derinlemesine incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Dol vd., 1997, Patel vd., 1985). Elbette, bu tür sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların deneysel veriler ile kıyaslanarak sorgulanması gerekmektedir. Sayısal çözümlerin hassasiyeti, bilindiği gibi, kullanılan türbülans modelleri ile yakından ilişkili olup, bu modellerin çeşitli akış problemleri üzerinde denerek doğrulanmaları çok büyük bir önem taşımaktadır. Bu tür doğrulama çalışmaları Bredberg ve diğerleri (2000), Vieser ve diğerleri (2002) gibi değişik araştırmacılar tarafından yürütülmüş olmakla beraber, bu çalışmalarda zamana bağılı analizler yerine sadece daimi hal problemleri üzerine odaklanılmıştır. Bu nedenle, üzerinde yeterince durulmamış olan zamana bağılı boru akışı ve taşınımsal ısı geçişi problemleri için, kullanılan sayısal modellerin sınanma ve doğrulama çalışmalarının icra edilmesi bu çalışmanın özü olup, bunun, bu araştırma sahasındaki büyük bir gediği kapatacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, ısı geçişini içeren zamana bağılı türbülanslı boru akışı sayısal olarak çözümlenip incelenmiştir. Elde edilen hesap sonuçları, Barker ve Williams (2000)'nin deneyleri ile kıyaslanarak sınanıp, doğrulanmıştır.

Modelleme

Matematiksel modelleme

Bu çalışma, yöneten denklemlerin farklılaştırılmasında sonlu hacimler yöntemini ve basınç-hız eşleştirilmesinde basınç düzeltme formülasyonunu kullanan, genel amaçlı Fluent (Fluent 6, 2003) programı ile yürütülmüştür. Örneklemeye ortalamalı süreklilik, Navier-Stokes ve enerji transportu denklemleri iki boyutlu eksenel simetrik, zamana bağılı hal ve sıkıştırılmaz türbülanslı akış koşulları altında çözümlenmiştir.

İki denklemlili türbülans viskozitesi modellerinin endüstri uygulamalarında oldukça sık kullanılması nedeniyle, bu modellerin bu çalışma içerisinde denenmesi gereği düşünülmüştür. Bu kapsamda sırası ile, standart k-ε (Launder ve Spalding, 1974), RNG k-ε (Yakhot ve Orszag, 1986) ve Realize edilebilir k-ε (Shih vd., 1995) türbülans modelleri kullanılmıştır. Kıyaslama maksadıyla, tek denklemlili Spalart-Allmaras (Spalart ve Allmaras, 1992) türbülans modeli de daimi hal analizlerinde kullanılmıştır. Ayrıca, cidar yakını modellemesinin taşınımsal ısı geçişi üzerinde önemli etkileri olması sebebiyle, muhtelif yaklaşımlar denenmiştir. Bu kapsamda, standart cidar fonksiyonları, dengeli olmayan cidar fonksiyonları (Kim ve Choudhury, 1995) ve iki tabaka bölgeli yöntem kullanılmıştır (Wolfstein, 1969). Cidar yakınının çözünürlüğü yüksek ince ağ ile çözümlendiği iki tabaka bölgeli modelin daha iyi sonuçlar üretebileceği düşünülmüşüne rağmen, bilinmektedir ki, uygulamada bu modelleme yaklaşımının hesaplama maliyetini çok yükseltmesinden ötürü çok fazla yer bulamamaktadır. Özellikle üç boyutlu problemlerde bu zorluk daha çok yaşandığından, ci-

dar fonksiyonlarının kullanımı uygulamada daha çok yer almaktadır. Uygulamadaki bu öneminden ötürü, çalışmanın zamana bağlı hal analizleri kısmında, cidar fonksiyonları ile beraber kullanılan yüksek Reynolds sayılı türbülans modellerinin denenmesine daha çok ağırlık verilmiştir.

Oluşturulan çözüm bölgesi iki boyutlu aksel simetrik akış nedeniyle, $x-r$ düzlemi üzerinde giriş, çıkış, simetri ekseni ve cidar sınırlarını içeren dikdörtgen şeklinde basit bir geometridir. Cidarlar momentum denklemleri için kaymama şartı uygulanmıştır. Ayrıca, enerji denklemleri için cidarlarda deneylerden alınan sabit sıcaklık değeri atanmıştır.

Giriş sınırında deneylerden alınmış olan hız ve sıcaklık değerleri radyal doğrultuda sabit bir profil şeklinde tanımlanmıştır. Giriş hızı değerleri verilen Reynolds sayılarından türetilerek bulunmuştur. Boru çıkışındaki ölçüm noktasının giriş sınırından oldukça uzak bir konumda (40 boru çapı uzaklığında) bulunması nedeniyle, girişte tanımlanan hız profilindeki belirsizliklerin ölçüm noktasındaki değerlere sirayet edip, çözümlerin hassasiyetini etkilemeyeceği düşünülmektedir. Zira, bu konumda tam gelişmiş bir akış profili beklenmektedir. Zamana bağlı hallerde ise deneylerde verildiği şekilde giriş sınırında zamana bağlı olarak değişen hız değerleri atanmıştır. Çıkış sınırında da sıfır gradyeni şartı uygulanmıştır.

Ayrıca ek modelleme yaklaşımı olarak bazı hesaplamalarda, girişte toplam basıncın, çıkışta da statik basıncın atandığı, değişik tipte sınır şartları da momentum denklemleri için denenmiştir. Elde ölçülmüş bir verinin olmaması nedeniyle, giriş sınırında türbülans parametreleri için tahmini değerler atanmıştır. Bu amaçla, türbülans şiddeti için %4, makro karışım uzunluğu için de boru çapının %30'u olan değerlerin uygun olduğu kabul edilmiştir. Bu değerler her ne kadar bir ölçüde belirsizlik ihtiva etse de, bunun ölçüm noktasındaki değerlerin hassasiyeti üzerinde olumsuz bir etki yaratmayacağı beklenmektedir. Zira yukarıda bahsedildiği gibi, ölçüm noktası girişten oldukça uzak olması nedeniyle,

bu konumda dengeli bir türbülans yapısı beklenmekte olup, girişteki türbülans değerleri ve belirsizliklerin bu konumdaki sonuçlar üzerinde etkili olmayacağı düşünülmektedir.

Akışkan olarak kullanılan havanın malzeme özelliklerinin tanımlanmasında, ortalama sıcaklık değerine tekabül eden, sabit değerler kullanılmıştır. Bu ortalama sıcaklık değeri, cidar sıcaklığı ile akışkanın boru kesitindeki tahmini ortalama sıcaklık değerinin ortalanmasıyla elde edilmiştir. Ayrıca, cidar sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının oldukça düşük olması (25-30 K) sebebiyle, sabit malzeme özellikleri kabulünün sonuçların hassasiyetini etkileyebilecek derecede bir önem taşımayacağı düşünülmektedir.

Sayısal modelleme

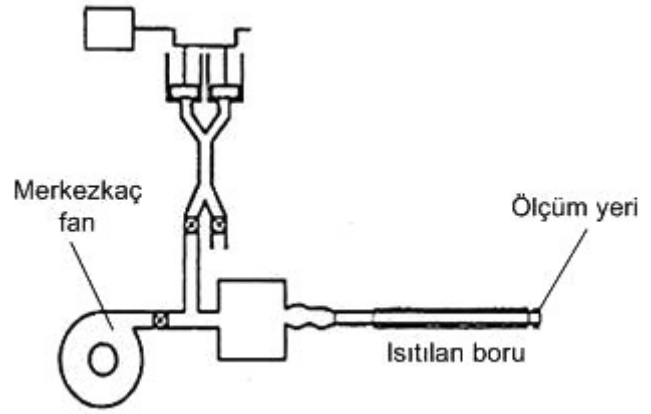
Çıkıştaki ölçüm noktasının, hesaplama bölgesinin çıkışında bulunması halinde buradaki sayısal sınır şartından ötürü oluşabilecek tedirginliklerden etkilenmesi söz konusu olacağından, boru uzunluğu gerçek boyu yerine beş boru çapı boyu kadar daha uzun olarak modellenmiştir. Hesaplama bölgesi dikdörtgenel elemanlardan oluşan düzgün yapıli ağ ile ayrıklaştırılmıştır. Ağ elemanları Reynolds sayılarına, kullanılan türbülans ve cidar yakını modellemelerine uyacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, ağların ağdan bağımsız çözüm üretebilecek nitelikte olmalarına dikkat edilmiştir. Cidar bitişiğindeki elemanların cidar fonksiyonlarının kullanıldığı hallerde $y^+ \approx 30$ civarında, iki tabaka bölgeli modelin kullanıldığı hallerde $y^+ < 1$ olarak boyutsuz cidar mesafesi değerlerine sahip olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca iki tabaka bölgeli model uygulamasında $y^+ < 5$ mesafesi içerisindeki cidar yakını bölgesi en az 5 elemanla çözülmüştür. Hesaplamaların değişik Reynolds sayılarında yapılmasından ötürü, cidar yakını y^+ değerleri değişeceğinden, değişik sayıda eleman içeren ağ sistemleri oluşturulmuştur. Uygulanan türbülans modelleri ve Reynolds sayılarına göre, radyal yönde 10-70 adet elemandan oluşacak şekilde çeşitli ağlar üretilmiştir. Bunun yanı sıra, akışın geliştiği aksel yöndeki gradyenlerin yakalanabilmesi amacıyla 200 adet elemanın yeterli olduğu görülmüş, ama bazı hallerde eleman

yüksekliğinin genişliğine oranının 1'den çok farklı değerlere çıkmasını engellemek için eksenel yöndeki eleman sayıları bazı ağlarda 400 adete kadar artırılmıştır.

Hesaplamalar ilk olarak daimi akış koşulu altında gerçekleştirilmiş; sonrasında da daimi akış hesabı sonuçları başlangıç şartı olarak alınıp, zamana bağılı çözümler yapılmıştır. Sinüzoidal akış debisi formunun mevcut olduğu hesaplamalarda, 1 periyodun en az 60 zaman adımı ile ayrıştırılması ile zaman adımından bağımsız neticeler elde edildiği gözlemlenmiş ve 1 periyodun 80 eşit zaman adımı ile ayrıştırılması tercih edilmiştir. Periyodik akış yapısının tam olarak elde edilmesi için en az 10 periyot boyunca hesaplamaların sürdürülmesi gerektiği görülmüş, ancak deneyler ile kıyaslama için 15 periyot boyunca hesaplamalar yapılmıştır.

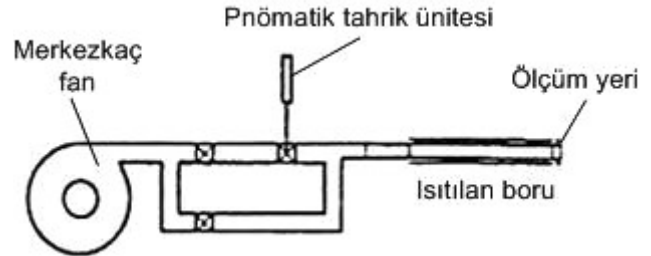
İncelenen deneyler

Hesaplamaların doğrulanmasında Barker ve Williams'ın (2000) yürüttükleri bir deneysel çalışma temel olarak alınmıştır. Deneyler değişik akış debisi şartları altında yapılmış olup, Şekil 1 ve Şekil 2'de deney düzenekleri gösterilmektedir. Şekil 1'de verilen düzenek ile sinüzoidal akış debisi sağlanmaktadır. Akışın daimi bileşeni merkezkaç pompa çıkışında bulunan yuvarlak bir valf ile kontrol edilirken akıştaki salınımlar (osilasyonlar) ana boruya bir bağlantı borusu ile bağlı olan dönel bir pompa aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu dönel pompa iki silindirden oluşup, bir elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. Deneyde kullanılan frekans 0.5-30 Hz arası olup, genlik bağlantı borusu çıkışındaki iki valf ile kontrol edilmektedir. Bunlardan biri bağlantı borusunu düzeneğin kalan kısmına bağlarken, diğeri atmosfere açılmaktadır. Geniş bir plastik hazne de ana hat içerisinde bulunup burada yüksek harmoniğe sahip dalga formlarını düzleştirip akış debisinin sinüzoidale yakın bir form almasını sağlamaktadır. Akışın geçtiği ana boru 38 mm çapında ve 1500 mm uzunluğundadır. Boru cidarları ısıtılmakta olup sıcaklığı 80 °C civarında tutulmaktadır. Borunun çıkış kısmında hava akışının sıcaklığı ve cidardaki ısı akışı ölçülmektedir (Barker ve Williams, 2000).



Şekil 1. Sinüzoidal akış debisi sağlayan deney düzeni (Barker ve Williams, 2000)

Şekil 2'de akış debisinde basamak şeklinde veya darbe şeklinde (puls) kısa süreli artımların oluşturulabildiği deney düzeni gösterilmektedir. Fandan gelen akış iki paralel kola ayrılmakta olup, biri üzerinde bulunan pnömomatik valfin açılıp kapatılması ile debi ayarlanmaktadır. Valfin açık halde iken sonradan kapatılması ile debide basamak şeklinde azalma elde edilmekte; valfin önce açılması sonra da hemen kapatılması ile de debide kısa süreli artım, yani puls elde edilmektedir.



Şekil 2. Akış debisinde ani basamak veya kısa artımlar şeklinde değişimler sağlayan deney düzeni (Barker ve Williams, 2000)

Sonuçlar

Daimi akış analizi sonuçları

Boru içerisindeki hava akışı simülasyonu daha evvelden bahsedildiği gibi ilk olarak daimi akış şartı altında yapılmıştır. Bu hesaplamalarda çeşitli türbülans modelleri ile çeşitli cidar yakını bölgesi modellemeleri kullanılmıştır. Spalart-Allmaras (S-A), Standart k-ε (S k-ε), RNG k-ε, Realize edilebilir k-ε (R k-ε), türbülans modelle-

ri, standart ve dengeli olmayan cidar fonksiyonları ile beraber kullanılmış, bunun yanında S k-ε türbülans modeli ile iki tabaka bölgesi cidar yakını modellenmesinin de beraber kullanıldığı hesaplamalar yapılmıştır.

Isı geçişi analizlerinde Nusselt sayısı önemli bir parametre olup, değişik Reynolds sayılarında elde edilen hesaplamalı çözümlerin deney verileri ile kıyasında kullanılmıştır. Hesaplamalardan elde edilen Nusselt sayısı boru çapına dayalı olarak tanımlanmıştır. Ancak, Barker ve Williams'ın deneylerindeki ölçümler zamana bağlı değerler olduğundan daimi akış simülasyonu sonuçlarının doğrulanmasında kullanılmayıp, bunun yerine literatürde bulunan denklem (1)'deki ampirik ifadeden (Dittus-Boelter korelasyonu) faydalanılmıştır (Kays, 1975; Baehr ve Stephan, 1994). Bu ifadenin geçerlilik bölgesi $Re > 10000$ olduğundan, Reynolds sayısının 30000 olduğu hesap değerleri ile kıyaslamada daha iyi neticeler verebileceği düşünülebilir. Tablo 1'de her iki Reynolds sayısı için ampirik Nusselt sayısı değerleri verilmektedir.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

Tablo 1. Ampirik Nusselt sayıları

$Re=8000$	$Re=30000$
26.5	76.4

Deneylerde 8000 ile 30000 değerleri arasında çeşitli Reynolds sayıları incelenmişken, burada daimi akış simülasyonları sadece, deneylerdeki en küçük ve en büyük Reynolds sayıları için yapılmıştır. Tablo 2'de değişik modellerin kullanıldığı hesap sonuçları gösterilmekte olup, parantez içerisindeki değerler de hesap değerlerinin ampirik değerlere göre olan % sapmasını göstermektedir.

$Re=8000$ değerinde cidar fonksiyonları ile beraber kullanılan Spalart-Allmaras (S-A) modeli diğer modellere göre çok farklı Nusselts sayısı değerleri hesaplamakta olup, hatalı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu nedenle, S-A modelinin gerçekte düşük Reynolds sayısı modeli olduğu ve cidar fonksiyonları ile beraber kulla-

nılmasının uygun olmadığı düşünülebilir. Bu durumda, S-A modelinin cidar fonksiyonları yerine, cidar yakını bölgesinin yeterli çözünürlüğü haiz ağ ile beraber kullanılmasının daha iyi neticeler verebileceği beklenebilir.

Tablo 2. Değişik hesaplama modelleri ile elde edilen Nusselt sayıları ve ampirik Nusselt sayılarına göre % sapma değerleri. (gkü: girdap kaynaklı üretim, dkü: deformasyon kaynaklı üretim, SCF: standart cidar fonksiyonu, DOCF: dengeli olmayan cidar fonksiyonu, İTBM: iki tabaka bölgesi model)

Türbülans modeli ve cidar yakını modellemesi	Nusselt Sayısı (Hesap Değerleri)	
	$Re=8000$	$Re=30000$
S k-ε, SCF	28.6 (%8)	75.0 (-%2)
S k-ε, DOCF	28.0 (%6)	74.6 (-%2)
RNG k-ε, SCF	29.4 (%11)	78.2 (%2)
RNG k-ε, DOCF	28.8 (%9)	77.4 (%1)
R k-ε, SCF	28.2 (%6)	71.9 (-%6)
R k-ε, DOCF	27.7 (%5)	77.2 (-%5)
S-A, gkü, SCF	15.6 (-%41)	-
S-A, dkü, SCF	15.6 (-%41)	-
S k-ε, İTBM	29.1 (%10)	79.4 (%4)

$Re=8000$ için S-A haricindeki bütün modeller Nusselt sayısını ampirik değer üzerinde hesaplamakta olup, en yüksek sapma RNG k-ε modelinde gözlemlenmektedir. $Re=30000$ için, RNG k-ε ve iki tabaka bölgesi model ile kullanılan Standart k-ε (S k-ε) modeli ampirik değer üzerinde sonuç verir iken, diğerleri ampirik değer altında sonuçlar vermektedir. Bunun yanında, standart veya dengeli olmayan cidar fonksiyonları kullanımının sonuçlar üzerinde ciddi bir etkisinin bulunmadığı da gözlemlenmektedir. Ayrıca bu etkinin düşük Reynolds sayısında ($Re=8000$) daha da etkili olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, iki denklemliler benzer sonuçlar verdiği ve yaklaşık $\pm 5\%$ 'lik sapma ile ampirik değerleri öngörebildiği söylenebilir.

Zamana bağlı akış analizi sonuçları

Zamana bağlı analizlerde akış debisinin basamak halindeki değişimi, puls halindeki değişimi ve sinüzoidal değişiminin ısı geçişi cevabına olan etkisi incelenmiştir.

Bu hesaplamalarda temel olarak S k-ε modeli dengeli olmayan cidar fonksiyonları ile beraber kullanılmıştır. Bazı haller için değişik türbülans modelleri ve iki tabaka bölgesel model de dahil olmak üzere değişik cidar yakını modellemeleri deneyerek sonuçlar iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Akış debisinin basamak şeklindeki değişiminin incelenmesi - Çalışmanın bu kısmında, boru içerisindeki hava akışının debisi aniden azaltılarak debide basamak şeklinde bir değişim oluşturulmuş ve bu şekilde cidarlardaki ısı geçişi davranışı incelenmiştir. Borunun ölçüm (çıkış) kısmında, simetri eksenini üzerindeki hız değerinin (u_c) zamana bağılı değişimi Şekil 3'ün sol kısmındaki grafikte verilmektedir.

Şekildeki, “d” eğrisi deneyden elde edilen ölçümleri, “h” eğrisi ise hesaplama ile elde edilen değerleri göstermektedir. Hız değeri için deneyde oluşan küçük sıçrama bölgesi hesaplama ile elde edilememektedir. Bunun nedeni, simülasyonun akış debisindeki ani değişimleri ideal olarak modelleyebilirken, bu tür bir zamana bağılı değişimin deney şartlarında ideal olarak modellenememesi olabilir. Hız değerindeki bu değişime karşılık gelen ölçüm bölgesindeki boru cidarında oluşan ısı geçişinin (q) davranışı Şekil 3'ün sağ kısmındaki grafikte verilmektedir.

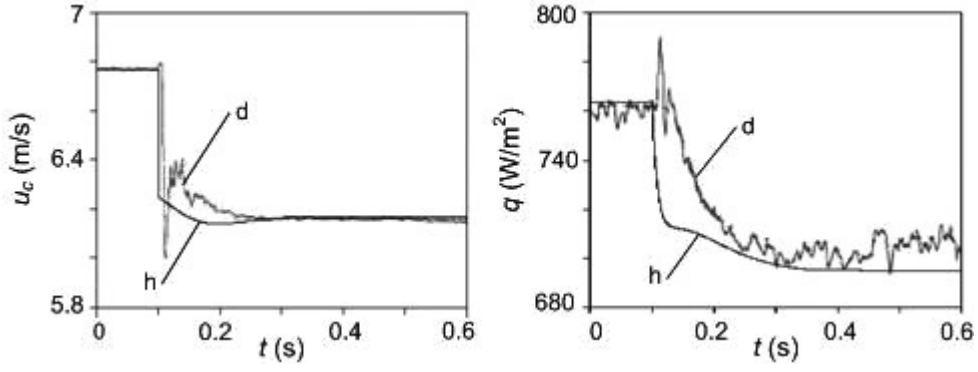
Şekil 3'ten açıkça görüldüğü gibi, hem hesaplamada hem de deneyde, hızdaki ani düşüş ısı geçişinde de ani bir düşüşe sebep olmaktadır. Ancak hesaplamadaki düşüş daha dik bir biçimde olup, bunun nedeni hesaplamadaki hız değerinin de dik bir biçimde düşmesi olabilir. Deneydeki ısı akısı değerinin düşüş zamanı ile hesaplamadaki ısı akısı düşüş zamanı arasındaki fark 0.1 saniye civarında olup, sonrasında hesap değerinin deney değerinin biraz altında olmak üzere oldukça yakın seyir ettiği görülmektedir.

Akış debisinin darbe (puls) şeklindeki değişiminin incelenmesi - Bu kısımda değişik Reynolds sayılarında, akış debisinin kısa bir süreliğine ani olarak artırılıp sonradan tekrar azaltıldığı boru akışı deneyi hesaplanmıştır. Kullanılan Reynolds sayıları sırasıyla 8000, 13500, 18000'dir. Bu deneye ve hesaplama ait ölçüm

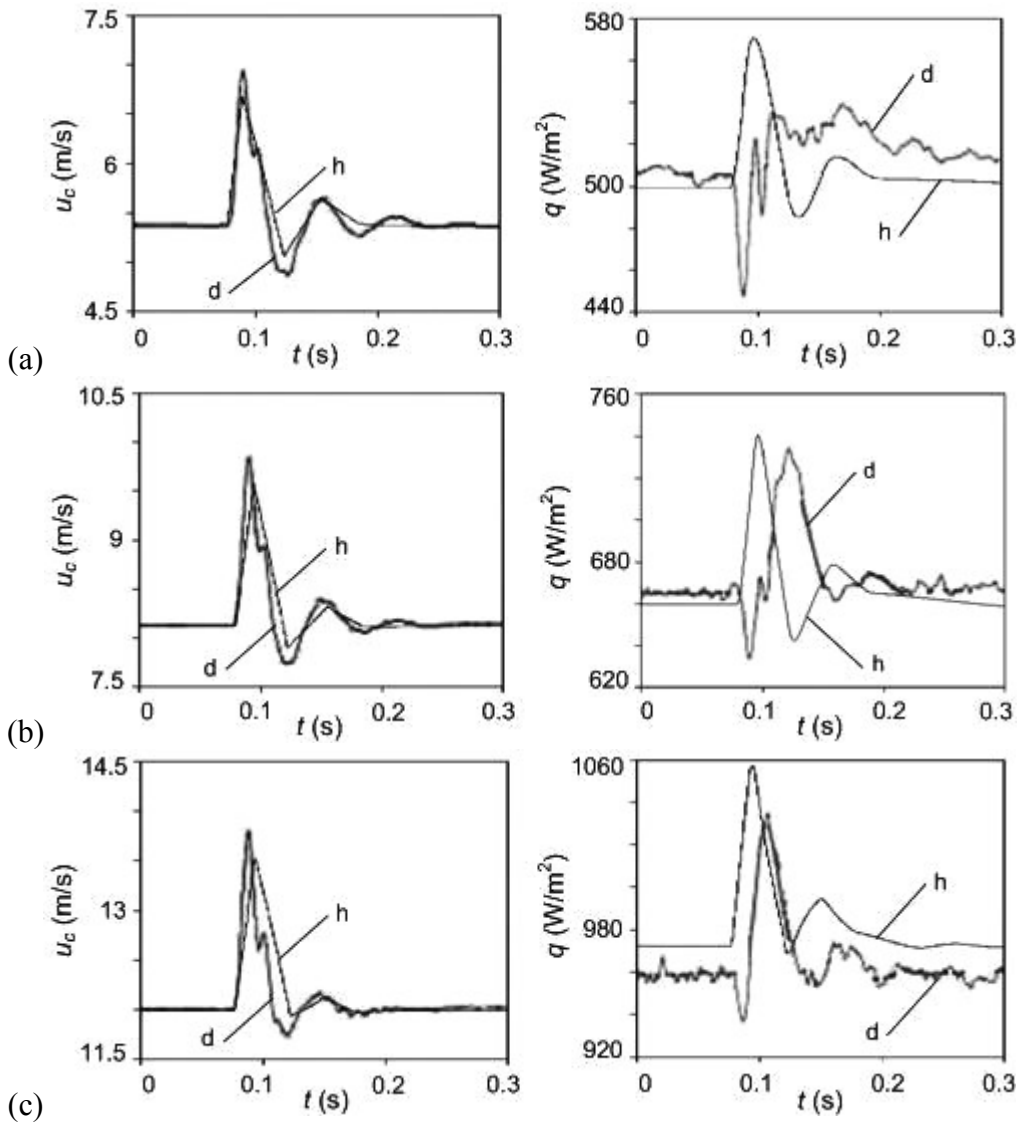
kısımındaki simetri eksenini hız değerinin (u_c) ve boru cidarındaki ısı akısı değerinin (q) zamana bağılı olarak değişimi değişik Reynolds sayıları için Şekil 4'te gösterilmektedir. $Re=8000$ için hesaplanan ısı akısı değerleri ile deney değerleri birbirleri ile pek uyuşmamaktadır. Buna karşın $Re=13500$ ve $Re=18000$ için hesaplanan ısı akısı değerleri ile deney değerleri birbirleri ile iyi bir uyum içerisindedir. Ancak deneylerde cidardaki ısı akısının zirve değerleri ile boru simetri eksenindeki hızın zirve değerleri arasında bir zaman gecikmesi gözlenmekte olup, bu durum hesaplamalarda elde edilememektedir. Bu zaman gecikmesi düşük Reynolds sayılarında daha belirgin olarak ortaya çıkmakta olup, bu açıdan deney ve hesap arasındaki uyum $Re=18000$ 'de daha iyi olmaktadır.

Akış debisinin sinüzoidal şeklindeki değişiminin incelenmesi - Akış debisinin sinüzoidal salınım şeklinde değiştiği hal de incelenmiştir. İncelenen akışın ortalama Reynolds sayısı 10500 olup, frekansı 3 Hz'dir. Ayrıca çeşitli büyüklükte izafi genlikler ele alınmış olup, bunlar sırasıyla %10, %30, %50, %80'dir. Sinüzoidal debi değişimlerinde ve bilhassa yüksek genlikli olanlarında ağ sisteminin cidar yakını modellemesine uygun olarak oluşturulmasına dikkat edilmelidir. Bu yüzden, hem cidar fonksiyonu hem de iki tabaka bölgesel model kullanımında, ağ sistemi, hem maksimum hem de minimum debi esnasında, cidar yakınında uygun y^+ değerlerine sahip olmalıdır. Bu açıdan en kritik hal olan %80 izafi genlikli akışta, cidar fonksiyonu kullanılmış ise minimum debi esnasında bile $y^+>15$, iki tabaka bölgesel yöntem kullanılmış ise maksimum debi esnasında bile $y^+<1$ şartı yerine getirilmiştir (Benim ve Arnal, 1994).

Şekil 5'de üç farklı hesaplama modeli ile elde edilen viskozite oranı (μ_T/μ), aksenal hız (u) ve sıcaklık (T) değerlerinin %80 izafi genlikli akış için, minimum debi esnasındaki radyal değişimleri verilmektedir. Cidar fonksiyonlarının kullanıldığı haller için grafiklerdeki eğrilerin sağ tarafında bir boşluk gözükmemekte olup, burası ağ ile ayrıklaştırılmayan (cidar fonksiyonu ile çözümlenen) cidar yakınındaki kısmı göstermektedir.



Şekil 3. Akış debisinin basamak şeklindeki değişimi karşısında simetri eksenini hız değeri (soldaki) ve cidardaki ısı akısı değerinin (sağdaki) zamana bağlı olarak değişimi (d: deney, h: hesap)



Şekil 4. Akış debisinin puls şeklindeki değişimi karşısında, simetri eksenini hız değerinin (soldaki) ve boru cidarındaki ısı akısının (sağdaki) zamana bağlı olarak değişimi (d: deney, h: hesap);
(a) $Re=8000$, (b) $Re=13500$, (c) $Re=18000$

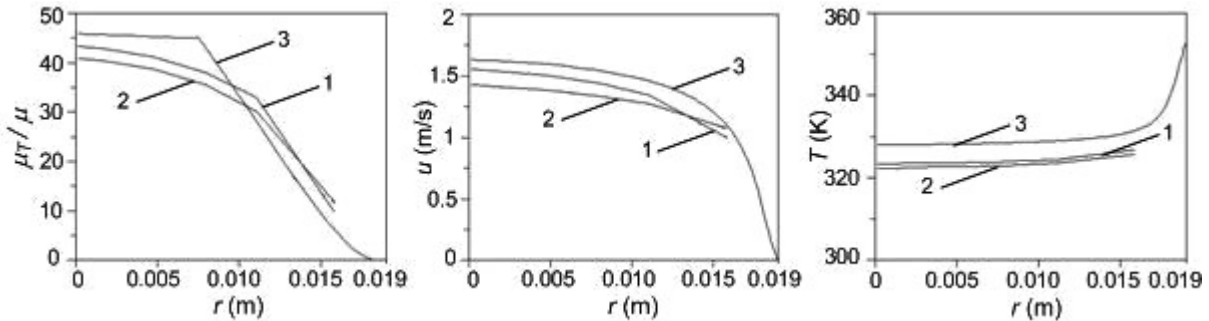
Şekil 5'teki grafiklere göre farklı modeller ile benzer hesap sonucu eğrileri elde edilir iken, diğer taraftan birbirlerine nazaran $\pm\%10$ civarı aralığında yerel sapmalar da gözlenmektedir. Ancak değişik modeller ile hesap edilen cidardaki ısı akısı değerleri birbirlerine oldukça yakın olup, $\pm\%2$ civarında bir aralıkta dağılmaktadır.

Değişik izafi genlikler için deney ve hesaplamalardan elde edilmiş zamana bağlı simetri eksenindeki hız değeri ile cidardaki ısı akısı değerleri sırası ile Şekil 6'da verilmektedir. Gösterilen ısı akısı deney değerleri tek bir ölçüme dayanıp oldukça salınımlı haldedir. Bu nedenle daha iyi bir mukayese, örnekleme ortalamasına dayalı ölçüm değerlerinin gösterilmesi ile yapılabilir. Bu nedenle, Şekil 7'de zamana bağlı olarak hesaplanmış ısı akısı değerleri kendi ortalama değerleri ile boyutsuzlaştırılıp, örnekleme ortalamalı deney değerleri ile beraber Şekil 6'da gösterilmiş olan haller için, sadece 1 periyot boyunca gösterilmiştir. Bu deney eğrileri, deneylerde 1000 civarında örnek alınıp ortalamasının hesaplanması ile elde edilmiştir. Hesaplamalarda zamana bağlı salınımların ortalama ısı akısı değerlerini pek etkilemediği görülmekte olup, bu bulguya deneylerde de rastlanılmıştır (Barker ve Williams, 2000).

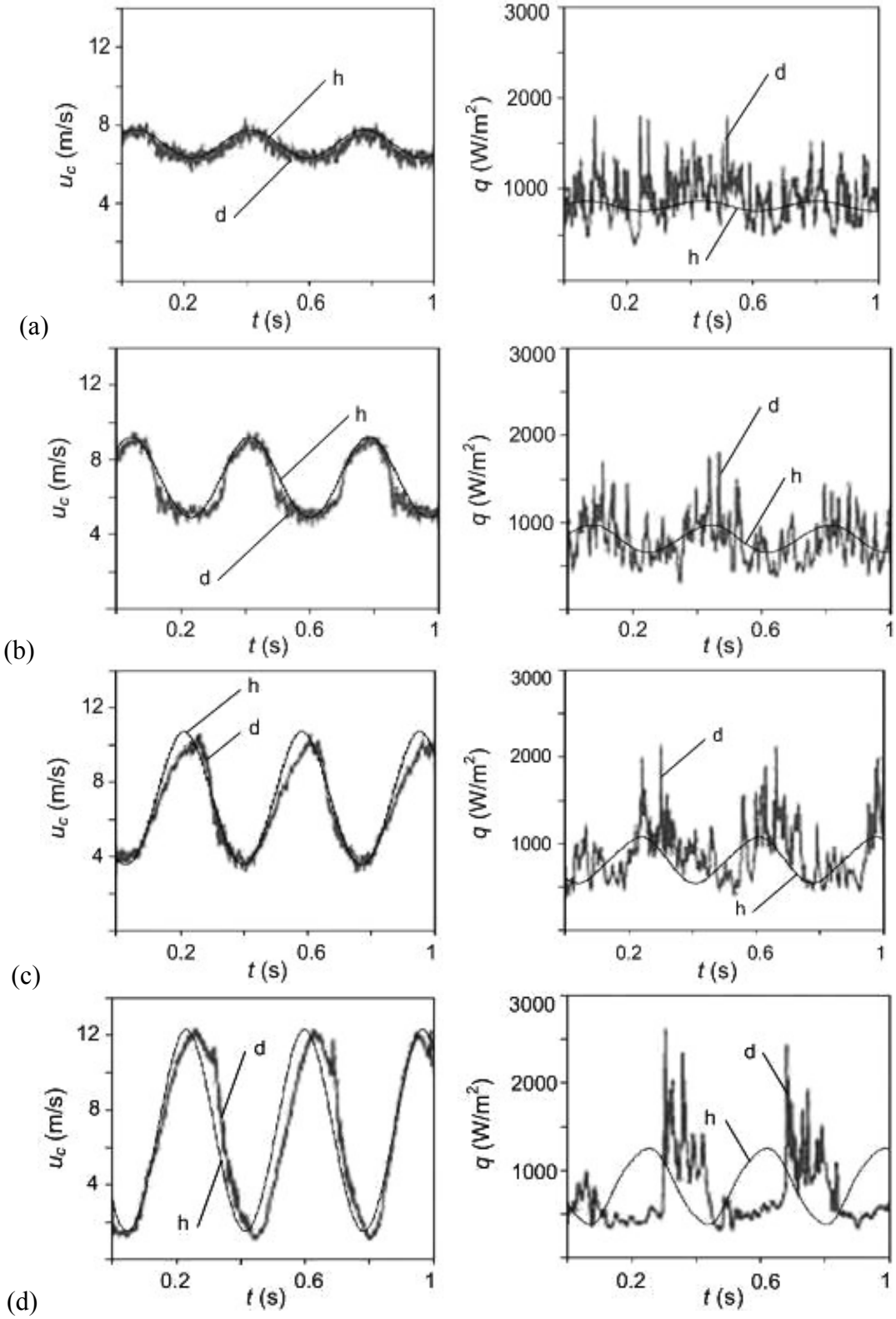
Şekil 7'de görüldüğü gibi normalize edilmiş ısı akısı değerleri simülasyonlarda yaklaşık $\%40$ 'a kadar varan bir sapma ile daha düşük olarak hesaplanmıştır. Deney eğrileri daha düşük izafi genliklerde, özellikle $\%10$ izafi genlikte, sinüzoidal

şekle daha yakın olmakta; ancak yüksek genliklerde, özellikle $\%50$ ve $\%80$ izafi genlik değerlerinde, sinüzoidal şekilden sapmaktadır. Bu duruma sebep olarak sinüzoidal değişim esnasındaki akış debisinin en küçük değerinde, Reynolds sayısının da düşmesi nedeniyle, akışta yeniden laminarleşme etkilerinin ortaya çıkması gösterilebilir. Zira $\%80$ izafi genlikli akışta zamana bağlı en düşük Reynolds sayısı 2100 olup, bu değer boru akışlarındaki laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin olduğu kuramsal sınır değerine yakındır. Ancak hesaplamalardaki bu sinüzoidal karakterden sapma eğilimi, özellikle $\%80$ izafi genlikli hal için, deneylere nazaran daha zayıf olarak gözükmemektedir. Şekil 6 ve 7'deki grafiklerden görüldüğü gibi, deneylerde hız değeri salınımları ile buna karşılık gelen cidardaki ısı geçişi cevabı arasında bir zaman gecikmesi mevcut olup, bu durum özellikle yüksek genliklerde daha fazladır. Bu zaman gecikmesi hesaplamalarda ise tutturulamamıştır.

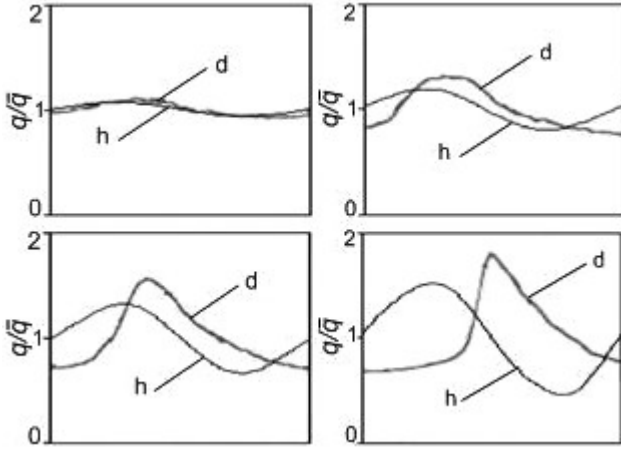
Hesaplanan cidardaki ısı geçişi cevabının hız salınımlarına nazaran gecikme değerleri deneysel değerler ile Tablo 3'te verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, hesaplamalar ile elde edilen zaman gecikmesi değerleri deneylere nazaran oldukça düşük çıkmaktadır. Bu durum, yüksek izafi genlikli akışta daha da fazlalaşmaktadır. Bu zaman gecikmesi davranışı puls şeklindeki debili akışlarda da gözlenmekte olup, özellikle düşük Reynolds sayılarında hesaplamaların bu zayıf yönü daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 5. $Re=10500$ ve $\%80$ izafi genlikli akışta, minimum debi esnasındaki viskozite oranının (soldaki), aksenal hızın (ortadaki) ve sıcaklığın (sağdaki) radyal doğrultudaki değişimi (1: $S k-\epsilon$, SCF; 2: $S k-\epsilon$, DOCF; 3: $S k-\epsilon$, İTBM)



Şekil 6. $Re=10500$ için sinüzoidal debi değişimi karşısında, simetri eksenindeki hız değerinin (soldaki) ve boru cidarındaki ısı akısının (sağdaki) zamana bağlı olarak değişimi (d: deney, h: hesap); (a) %10 izafi genlik, (b) %30 izafi genlik, (c) %50 izafi genlik, (d) %80 izafi genlik



Şekil 7. Cidardaki ısı akısı hesap değerleri ile örnekleme ortalamalı deney değerlerinin 1 periyot boyunca değişimleri (d: deney, h: hesap; sol üst: %10 izafi genlik, sağ üst: %30 izafi genlik, sol alt: %50 izafi genlik, sağ alt: %80 izafi genlik)

Tablo 3. Isı akısı cevabı gecikmesinin periyot ile oranlanmış olarak miktarı

İzafi genlik	Zaman gecikmesi / Periyot			
	%10	%30	%50	%80
Deney	0.13	0.13	0.16	0.21
Hesap	0.04	0.04	0.05	0.06

Cidardaki ısı akısının hızın gerisinde kalmasının sebebi olarak Barker ve Williams (2000), cidar yakınındaki yavaş hareket eden akışkan ile daha yüksek enerjili akışın çekirdek (kor) kısmının akış debisindeki zamansal değişimlere farklı biçimde tepki göstermesini öne sürmüşlerdir. Ancak böyle bir davranış hesaplamalar tarafından öngörülememiştir.

Yukarıda da bahsedildiği üzere, değişik türbülans modelleri ve iki tabaka bölgesi yaklaşım da dahil olmak üzere değişik cidar yakını modellemeleri hesaplamalarda denenmiş, ancak hesap sonuçlarında zaman gecikmesine dair herhangi bir iyileşme elde edilememiştir. Buna ilaveten, değişik sınır şartı uygulamaları da hesaplamalarda ele alınmıştır. Burada sunulan hesap sonuçları, kütleli akış debisinin giriş sınırında zamana bağılı ve radyal yönde sabit olarak verildiği sınır şartı uygulaması ile elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, hesaplamalar, giriş sınırında

toplam basıncın zamana bağılı ve radyal yönde sabit olarak verilmesi ile de yapılmıştır. Bu şekilde, elde edilecek hız profilinin ve fiziki şartların belki de daha iyi temsil edilebileceği düşünülmüştür. Fakat bu uygulama ile cidardaki ısı akısının akış debisindeki değişimlere göre olan zaman gecikmesinin öngörülebilmemesine dair herhangi bir iyileşme elde edilememiştir.

Sonuçların değerlendirilmesi

Taşınımsal ısı geçişini içeren türbülanslı boru akışı problemi zamana bağılı hal için sayısal simülasyonlar ile çözümlenmiştir. Bu çalışmada çeşitli türbülans modelleri ile cidar yakını bölgesi modellemeleri kullanılmıştır. Çalışmanın başlangıcında ilk olarak daimi hal hesaplamaları yürütülmüş ve bu incelemede denenen iki denklemli muhtelif türbülans modellerinin performansları arasında kayda değer bir farklılık gözlenmemiştir. Zamana bağılı analizlerde, daha çok yüksek sayılı türbülans modellerinin cidar fonksiyonları ile birlikte kullanımları üzerinde durulmuş olmakla beraber, bazı hallerde, düşük Reynolds sayılı türbülans modelleri de denenmiştir. Bu kapsamda, akış debisinin basamak şeklinde, darbeli (puls) şekilde ve sinüzoidal şekildeki değişimlerinin mevcut olduğu muhtelif Reynolds sayılarını haiz akışların hesaplamalı sonuçları deneyler ile kıyaslanarak incelenmiştir. Akış debisinde sinüzoidal değişimlerin mevcut olduğu hallerde, deneylerde gözlenen cidardaki ısı akısı değerinin zamansal ortalamasının, akıştaki zamansal salınımların genlik değerlerinden etkilenmediği hususu hesaplamalarda da elde edilmiştir. Darbe şeklindeki akış debisi değişimlerinin mevcut olduğu hallerde hesaplamalar bazı Reynolds sayılarında deney eğrilerinin şeklini ve ısı akısının zirve değerlerini yeterince öngörebilmiştir. Ancak hesap sonuçlarının deneyleri öngörebilme kabiliyeti yüksek Reynolds sayılarında daha iyi çıkmıştır. Sinüzoidal debi değişimlerinde ısı akısı simülasyonlarda her zaman daha düşük olarak hesaplanmış ve bu sapma miktarı sinüzoidal değişimin genliği yükseldikçe artmıştır. Darbe şekilli ve sinüzoidal şekilli debili akışlardaki; ortalama Reynolds sayısı, izafi genlik ve frekans gibi parametrelere bağımlı akış debisindeki değişimlere deneylerde gözlenen cidardaki ısı akısı ceva-

bının gecikmesi hesaplamalar tarafından hemen hemen yakalanamamıştır.

Semboller

μ	: Dinamik moleküler (laminer) viskozite
μ_T	: Türbülans viskozitesi
Nu	: Nusselt sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
q	: Cidardaki ısı akısı
\bar{q}	: Cidardaki zamansal ortalamalı ısı akısı
Re	: Reynolds sayısı
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
u	: Eksenel hız
u_c	: Simetri eksenindeki hız
y^+	: Boyutsuz cidar mesafesi

Kaynaklar

- Baehr, H. D., Stephan, K., (1994). *Waerme-und Stoffuebertragung*, Springer, Berlin.
- Barker, A. R. ve Williams, J. E. F., (2000). Transient measurements of the heat transfer in unsteady turbulent pipe flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**, 3197-3207.
- Benim, A. C. ve Arnal, M., (1994). A numerical analysis of the labyrinth seal flow, in Wagner, S., Hirschel, E. H., Periaux, J., ve Piva R., eds, *Proceedings of Second European Fluid Dynamics Conference*, John Wiley & Sons, 839-846, Chichester.
- Bredberg, J., Davidson, L. ve Iacovides, H., (2000). Comparison of near wall behavior and its effect on heat transfer for k- ω and k- ϵ turbulence models in rib-roughened channels, in Nagano, Y., Hanjalic, K., Tsuji, T., eds, *Proceedings of the Third International Symposium of Turbulent Heat and Mass Transfer*, 381-388.
- Dol, H., Hanjalic, K. ve Kenjeres, S., (1997). A comparative assessment of the second moment differential and algebraic models in turbulent natural convection, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **18**, 4-14.
- Fluent 6, (2003). *Fluent User's Guide*, Fluent, Lebanon, New Hampshire.
- Kays, W. M., (1975). *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- Kim, S. E. ve Choudhury, D., (1995). A near-wall treatment using wall functions sensitized to pressure gradient, in *Separated and Complex Flows*, ASME FED, **217**.
- Launder, B. E. ve Spalding, D. B., (1974). The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **3**, 269-289.
- Patel, V. C., Rodi, W. ve Scheuerer, G., (1985). Turbulence models for near-wall and low Reynolds number flows: a review, *AIAA Journal*, **23**, 1308-1319.
- Shayler, P. J., Colechin, M. J. F. ve Scarisbrick, A., (1996). Heat transfer measurements in the intake port of a spark ignition engine, *SAE Transactions Journal of Materials & Manufacturing*, **5**, 257-267.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A. ve Zhu, J., (1995). A new k- ϵ eddy-viscosity model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation, *Computers & Fluids*, **24**, 227-238.
- Spalart, P. ve Allmaras, S., (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *AIAA Report*, No. 92-2439, Reston.
- Vieser, W., Esch, T. ve Menter, F., (2002). Heat transfer predictions using advanced two equation turbulence models, *CFX Technical Memorandum CFX-VAL 10/0602*, AEA Technology, Otterfing.
- Wolfstein, M., (1969). The velocity and temperature distribution of one dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **12**, 301-318.
- Yakhot, V. ve Orszag, S. A., (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence, I. Basic Theory, *Journal of Scientific Computing*, **1**, 3-51.