

## Geri basamak akışının deneysel incelenmesi

Özlem İLDAY\*, Veysel ATLI

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

*Bu çalışmada, deneysel olarak geri basamak akışı ve akım ayrılması incelenmiştir. İlgili literatüre tam ve yeni bir seri basınç dağılımı, kayma gerilmesi, hız ve türbülans verisi sunulması hedeflenmiştir. Geri basamak akışı sıklıkla sayısal yöntemler ile hazırlanan bilgisayar kodları ve türbülans modelleri için bir test akışı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, sayısal çalışmalar için güvenilir deneysel veri sağlamayı da amaçlamaktadır. Deneylerde ortak genel boyutlara sahip aynı aileden farklı geometrilerde basamak modelleri kullanılmıştır. Geri basamak akışının incelenmesinde İTÜ Trisonik Aerodinamik Laboratuvarına ait Eiffel tipi açık devreli sesaltı bir hava tüneli kullanılmıştır. Basamak yüksekliği 20 mm olmak üzere 5 değişik basamak geometrisi üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında hava tünelinin serbest akım hızı 20 m/s, serbest akım türbülans değeri ise % 0.5'dir. Basamak yüksekliği gözönüne alınarak hesaplanan Reynolds sayısı  $2.74 \times 10^4$ 'tür. Basamak modellerinin hepsinde açıklık oranı 40'tır. Akımın hız ve türbülans değerleri, ayrıca yüzeydeki kayma gerilmeleri bir sıcak tel anemometresi kullanılarak ölçülmüştür. Basamak öncesi ve sonrası basınç dağılımları yüzey üzerinde çeşitli noktalardaki statik basınç değerlerinin zaman ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Yüzeydeki akım çizgileri ve akım yönünü görünür kılabilmek maksadıyla yüzey yağ-film tekniği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla uyum sağlamaktadır. Akıma dik yöndeki yüzeyi çeyrek daire formunda bir eğime sahip olan basamak modelinin diğer modellere göre daha kısa bir yeniden yapışma uzunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Geri basamak akışı, deneysel çalışma, sıcak tel anemometresi.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Özlem İLDAY. ozlemilday@gmail.com; Tel: (216) 642 29 28.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "An experimental investigation of backward facing step flow" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 03.03.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 02.06.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## An experimental investigation of backward facing step flow

### Extended abstract

Flow separation is one of the complicated aspects of viscous flow. It is a very important phenomena not only for science, but also for practical applications. Separating flow over two dimensional backward facing steps is the simplest class of separated flows because the separation point is fixed and the flow leaves the boundary at zero angle of separation. The separation line is straight and fixed at the edge of the step, and there is only one separated zone instead of two, as seen in the flow over a fence or an obstacle. In addition, the streamlines are nearly parallel to the wall at the separation point, so significant upstream influence occurs only downstream of separation. Because of these features of the backward facing step flow most of the research on separated flows has been done on it.

Although backward facing step flow offers one of the least complex separating and reattaching flows, the flowfield is still very complex. There are several parameters influencing the physical properties of the flowfield. Investigations conducted by a number of independent researchers using different techniques have numerous variations of the results. Although all of these researches are in good quality and they separately serve to different purposes, much work is still needed in this subject.

In the present work the backward facing step flow was chosen to investigate flow separation experimentally. The primary purpose is to add a complete and new set of surface pressure, shear stress, mean velocity and turbulence data to the relating literature. To achieve this purpose different step geometries with common general dimensions were used. The step configurations in the available literature are generally sudden expansion type and channel type geometries with tunnel walls. To prepare a different data, a configuration with free upper boundary and high aspect ratio (step width/step height) was used.

The backward facing step flow is also used often as a test case for CFD codes and turbulence models. Present study is aimed to provide reliable experimental data for numerical studies. The main purpose is expanding the physical understanding of backward facing step flow along with flow separation.

In order to investigate backward facing step flow an Eiffel type open circuit subsonic wind tunnel of ITU Trisonic Aerodynamics Laboratory was used. With the same height of 20 mm 5 different step geometries were employed in a 20 m/s freestream velocity of a freestream turbulence intensity of 0.5%. Reynolds number based on the step height was  $2.74 \times 10^4$ . Step geometries with different bases in addition to basic step were 2 slanted bases of 45 degrees one in the upstream direction and the other in downstream direction and 2 circular bases one a half circle section and the other a quarter circle section. Aspect ratio of the step models was 40. A strip of sand paper was used 24 step height upstream of the step to ensure the turbulent flow. Although separating and reattaching flows have generally an unsteady nature, present study was interested in time-averaged values of flow properties. Vortex shedding and instability in the free-shear layer were not treated.

Mean velocity and turbulence values of the flow and shear stress values on the wall of the steps were measured by utilizing a constant temperature hot wire anemometer. For the mean velocity and turbulence experiments the locations of measurements were between 3 step height upstream and 20 step height downstream of the step. Pressure distribution upstream and downstream of the step surface was obtained by measuring the time-averaged static pressure at various points. The surface oil-film technique was used to visualize the surface streamline or flow direction on the surface by coating the surface of the step model with oil film. All the measurements mentioned above were performed on the centerline of the step models in the direction of the freestream flow, where flow properties were minimally effected by the three dimensionality of the flow.

A complete and new set of data with additional support of flow visualizations were presented. Resulting data represent logical behavior for the model geometries. Basic step case has the results agreeing with the available literature which have similar Reynolds number values and flow characteristics. Curved step cases have smaller recirculation region, while the positive and negative slanted step cases has no significant difference than the basic step case.

**Keywords:** Backward facing step flow, experimental study, hot wire anemometer.

## Giriş

Akım ayrılması akışkanlar mekaniğinde viskoz akışın en karmaşık konularından biridir. Bu sadece bilim için değil aynı zamanda uygulamalar açısından da önem arz etmektedir. Çünkü akım ayrılması sonucunda enerji kayıpları oluşmaktadır. Enerjinin kontrolü, tarihin eski çağlarından beri insanlığın elde etmeye çalıştığı bir hedeftir. Sıvı veya gaz akışının bulunduğu durumlardaki enerji kontrolü ise büyük ölçüde akım ayrılmasının kontrolü anlamına gelmektedir. Bunu başarabilmek için de akım ayrılmasının fiziksel yapısını, mekanizmasını, karakteristiklerini ve oluşturduğu etkileri anlayabilmek gerekmektedir.

İki boyutlu geribasamak üzerindeki ayrılan akım en basit uygulamadır. Çünkü, ayrılma noktası belli ve sabittir, akım yüzeyi sıfır ayrılma açısıyla terk eder. Ayrılma hattı, basamağın kenarında doğrusal ve sabittir. Engel üzerindeki akımda olduğu gibi iki ayrılma bölgesi değil sadece bir ayrılma bölgesi meydana gelmektedir. Geribasamak akışının bu özelliklerinden dolayı ayrılan akımlar üzerinde yapılan çalışmaların çoğu bu konudur.

Geribasamak akışı, en az karmaşıklık içeren, ayrılan ve yapışan akımlardan biri olmasına rağmen akım yapısı yine de son derece karmaşıktır. Akım yapısının fiziksel özelliklerini etkileyen bir çok parametre mevcuttur. Birbirinden bağımsız çok sayıda araştırmacı tarafından farklı teknikler kullanılarak yapılan araştırmaların sonuçları farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmaların hepsi son derece kaliteli ve ayrı ayrı farklı amaçlara hizmet ekmekte olsalar da bu konuda halen daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın birincil amacı, ilgili literatüre tam ve yeni bir seri basınç dağılımı, kayma gerilmesi, hız ve türbülans verisi sunmaktır. Bu amaca hizmet etmek amacıyla ortak genel boyutlara sahip aynı aileden farklı geometrilerde basamak modelleri kullanılmıştır. Mevcut literatürdeki basamak konfigürasyonları ani genişleme tipi ya da kanal şeklinde tünel duvarlarına sahip geometrileri içermektedir. Farklı bir veri

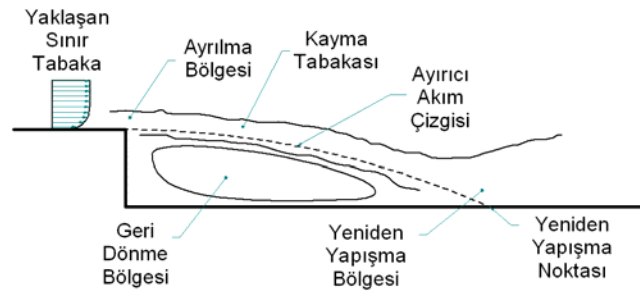
hazırlayabilmek için üst sınırdaki serbest olan ve yüksek açıklık oranına (basamak genişliği/ basamak yüksekliği) sahip olan geometriler kullanılmıştır.

Geribasamak akışı sıklıkla sayısal yöntemler ile hazırlanan bilgisayar kodları ve türbülans modelleri için bir test akışı olarak da kullanılmaktadır. Bu çalışma, sayısal çalışmalar için güvenilir deneysel veri sağlamayı da hedeflemektedir. Geribasamak akışındaki ve akım ayrılmasındaki fiziksel yapının anlaşılması için bilgi dağarcığını arttırmak ise ana hedeftir.

Ayrılan ve yeniden yapışan akışlar durağan olmamasına rağmen bu çalışmada geribasamak akışının zaman ortalaması alınmış değerleri konuları edilmiştir. Girdap kopmaları ve serbest kayma tabakasındaki kararsızlık ile ilgilenilmemiştir.

## Akım yapısı

Bir geribasamak akışı yaklaşan bir sınır tabaka, basamaktan sonra bir geri dönme bölgesi, bu bölgeden ayırıcı bir akım çizgisi ile ayrılan bir kayma tabakası, yeniden yapışma bölgesi ve takip eden bir kayma tabakasından oluşmaktadır. Şekil 1 geribasamak akışının genel yapısını göstermektedir.



Şekil 1. Geribasamak akışı genel yapısı

Yaklaşan sınır tabaka keskin köşede ayrılarak bir serbest kayma tabakası oluşturur. Ayrılan kayma tabakası hızlıca yeniden yapışma bölgesine doğru kıvrılarak taban duvarına çarpar. Kayma tabakasının bir bölümü kuvvetli bir ters basınç gradyanı sayesinde akımın tersi yönüne doğru bir dönme bölgesi oluşturacak şekilde

yönlenir. Kayma tabakası akımı dengelemeye çalışan kıvrılmanın, ters basınç gradyeninin ve yeniden yapışma bölgesindeki duvar ile olan çarpışmanın etkilerine maruz kalır (Eaton ve Johnston, 1981). Yeniden yapışma noktası zaman ortalaması alınmış akıma ait ayırıcı akım çizgisinin yüzey ile buluştuğu noktadır. Yeniden yapışmadan sonra yeni bir sınır tabaka formasyonu oluşur.

Ayrılan ve yeniden yapışan akışların yeniden yapışma bölgesindeki akım yapısı ayrılan bölgenin yapısını etkilemektedir. Ayrıca, yeniden yapışmadan sonraki akım alanı da yeniden yapışma bölgesindeki akım yapısından etkilenmektedir. Çünkü, yeniden yapışma bölgesi ardından gelişecek olan akışın ilk şartlarını şekillendirmektedir. Yeniden yapışma bölgesinin geometrisi ve türbülans yapısı büyük ölçüde ayrılan kayma tabakasının yapısı tarafından belirlenmektedir. Ayrılan kayma tabakasının da türbülans yapısının doğası, boyutları ve şiddeti kendisini şekillendiren ilk koşullara bağlıdır (Adams ve Johnston, 1988a).

Ayrılan ve yeniden yapışan akışları ayırt edici en belirgin özellik yeniden yapışma bölgesidir. Bu bölgenin konumu, genel yapısı ve yapışma noktasının basamağa uzaklığı (yeniden yapışma uzunluğu) geri dönme bölgesinin oluşmasında önemli rol oynar. Bu yüzden geri basamak akışı üzerindeki çalışmaların birçoğu yeniden yapışma konusuna yoğunlaşmıştır.

### **Geri basamak akım yapısına etki eden faktörler**

Geri basamak akışının en karakteristik bağımlı değişkeni yeniden yapışma uzunluğudur. Eaton ve Johnston (1981) tarafından belirtildiği üzere çeşitli deneylere ait yeniden yapışma uzunluklarının karşılaştırılması bağımsız farklı değişkenlerin etkilerini ortaya çıkarmaktadır. Bu değişkenler; yaklaşan sınır tabakanın karakteri ve kalınlığı, serbest akım türbülansı, basınç gradyeni ve basamak açıklık oranı şeklindedir.

*Yaklaşan sınır tabakanın karakteri*-Ayrılan sınır tabakanın karakterini (laminer /türbülanslı) değiştirmek yeniden yapışma uzunluğunu ciddi

şekilde etkilemektedir. Sınır tabaka tam olarak türbülanslı olduğunda akış belirgin bir şekilde Reynolds sayısından bağımsız hale gelmektedir. Laminer sınır tabakadan oluşan kayma tabakaları türbülanslı sınır tabakadan oluşanlara göre daha hızlı gelişmektedir (Eaton ve Johnston, 1981).

*Yaklaşan sınır tabakanın kalınlığı*-Eaton ve Johnston (1981) sınır tabaka kalınlığının yeniden yapışma uzunluğuna kuvvetli bir etkisinin olduğunu belirtmiştir. Bu konuda Westphal ve Johnston'a (1984) ait çalışmada ise artan sınır tabaka kalınlığının yeniden yapışma uzunluğunu arttırdığı gösterilmiştir.

*Serbest akım türbülans seviyesi*-Eaton ve Johnston (1981) farklı çalışmaların sonuçlarından derlenen verilere dayanarak serbest akım türbülans seviyesinin yüksek olduğu durumlarda yeniden yapışma uzunluğunun azaldığını belirtmiştir. Isomoto ve Honami (1989), basamaktan önceki lokal türbülans şiddetini ve serbest akım türbülans seviyesini sistematik olarak değiştirerek ayrılan kayma tabakası ve yeniden yapışma konusunu incelemiş ve aynı sonucu doğrulamıştır. Isomoto ve Honami (1989), ayrıca ayrılma noktasına yakın duvar üzerinde lokal türbülans şiddetinin de baskın bir parametre olduğunu ve ayrılan kayma tabakasının gelişimi ve yeniden yapışma süreci üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir.

*Basınç gradyeni*-Akım yönündeki basınç gradyeni kısmen sistem geometrisi değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Kanal giriş ve çıkış boyutlarını değiştirmek basınç gradyenini değiştirmektedir. Kuehn (1980), ani genişleme türü kanal akışlarında genişleme oranı  $Y1/Y0$  (basamak sonrası kanal yüksekliğinin basamak öncesi kanal yüksekliğine oranı) arttığında yeniden yapışma uzunluğunun arttığını gözlemlemiştir. Konuyu daha kapsamlı ele alan Ötügen'in (1991) çalışması aynı sonucu desteklemektedir.

*Açıklık oranı*-Deney düzeneğinin açıklık oranı (kanal genişliği/basamak yüksekliği) da yeniden yapışma uzunluğuna etki eden bir parametredir. Değeri 10'dan küçük olan açıklık oranları için

yeniden yapışma uzunluğu ayrılan sınır tabaka laminar ise artmakta, türbülanslı ise azalmaktadır. Bu durum açıklık oranının ondan büyük olduğu durumlar için ihmal edilebilir (Eaton ve Johnston, 1981). Berbee ve Ellzey (1989) açıklık oranı etkisini başka bir bakış açısından incelemiştir. Çalışmalarında, açıklık oranının yeniden yapışma uzunluğuna olan etkisi yerine türbülans şiddetine olan etkisi ele alınmıştır. Basamaktan itibaren üç basamak yüksekliği mesafeden sonraki bölümde türbülans şiddetinin tepe değerinin, açıklık oranının büyütülmesi sonucunda artış gösterdiği belirtilmiştir.

### Kullanılan geri basamak modelleri ve deney düzeneği

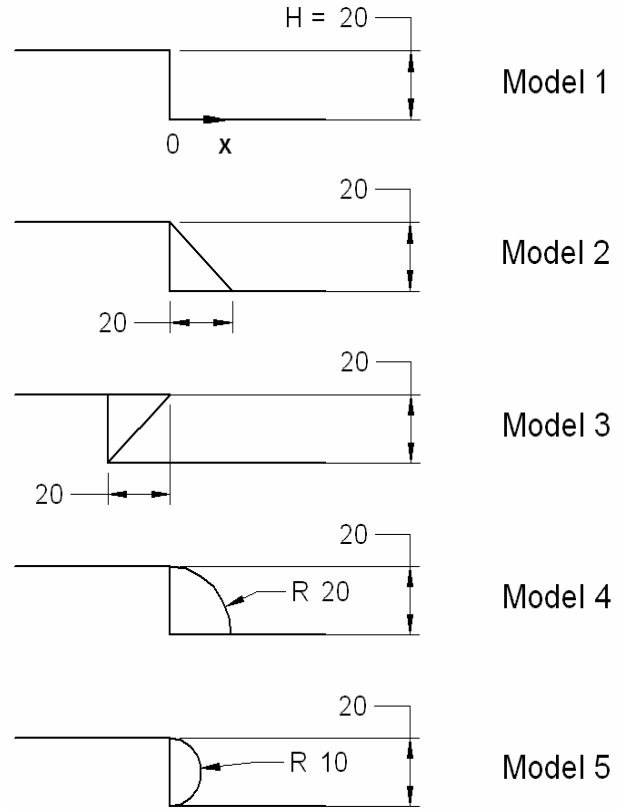
Bu çalışmadaki tüm deneyler İTÜ Trisodik Aerodinamik Laboratuvarına ait Eiffel tipi açık devreli sesaltı bir hava tüneline yapılmıştır. Deney odası boyutları 200x200x240 cm giriş ve çıkış kesitleri 80x80 cm olan tüneline deney yapılabilecek giriş ve çıkış aralığı 140 cm'dir. Deneyler tünel için kararlı olan 20 m/s serbest akım hızında gerçekleştirilmiştir. Bu hız için tüneline serbest akım türbülans değeri %0.5'tir. Basamak üzerindeki akımın türbülanslı olmasını garantilemek amacıyla basamaktan 24 basamak yüksekliği kadar önde, 1.5 cm eninde bir zımpara kağıdı yerleştirilmiştir.

Yükseklikleri 20 mm olan değişik geometrilere sahip 5 farklı geri basamak modeli kullanılmıştır. Sırasıyla:

1. Temel basamak,
2. Akım yönünde 45° eğik yüzeye sahip basamak,
3. Akım yönüne ters yönde 45° eğik yüzeye sahip basamak,
4. Yarıçapı basamak yüksekliği kadar olan çeyrek daire kesitli basamak ve
5. Çapı basamak yüksekliği kadar olan yarım daire kesitli basamak.

Tüm basamak geometrileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu modellerin seçilmesinde amaç basit geometri değişikliklerinin geri basamak akışının akım yapısında ne tür farklılıklar meydana getireceğini görebilmektir. Karşılaştırmayı kolay-

laştırmak için tüm basamak modellerinde temel basamağın dik yüzeyinin olduğu nokta referans olarak alınmıştır.



Şekil 2. Deney modellerine ait geometriler

Hava tüneline tipi ve deney odasının yapısı itibariyle deneylerde iki boyutlu akış mümkün olduğunca gerçekleştirilebilmiştir. Ölçüleri 80x80 cm olan çıkış ağızı için deney modellerinin açıklık oranı 40'tir. Çıkış ağızından gelen serbest jetin üst sınırı göz önüne alınarak belirlenen genişleme oranı 40'tir. Akışın 2 boyutluluğu akım görünürlüğü ve akıma dik yönde derinlemesine alınan basınç ölçümleri ile teyid edilmiştir.

### Deney sonuçları

Sıcak Tel Anemometresi kullanılarak yapılan hız ve türbülans, yüzey basınç ve yüzey kayma gerilmesi ölçümlerine ve de akım görünürlüğü deneylerine ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Bu ölçümler için yapılan belirsizlik analizi sonucunda elde edilen deneysel belirsizlik tahminleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Belirsizlik tahminleri

Parametre	Belirsizlik, $\pm\%$
Hız, $u/U_\infty$	1.7
Türbülans, $\sqrt{u'^2}/U_\infty$	1.7
Basınç Katsayısı, $C_p$	0.7
Kayma Gerilmesi Katsayısı, $C_f$	3.0
Yapışma Uzunluğu, $x_R$	0.4

### Hız ve türbülans ölçümleri

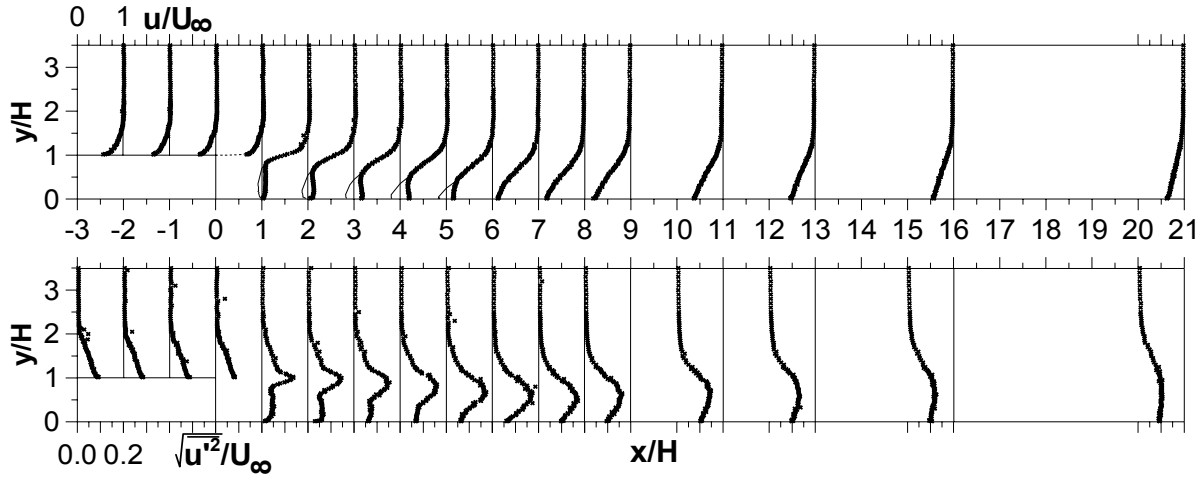
Referans model olan temel basamak geometrisi Model 1 ve Model 4'e ait hız ve türbülans profilleri sırasıyla Şekil 3a ve 3b'de örnek olarak verilmiştir. Bu ölçümler  $x/H=-3$  ila  $x/H=20$  aralığında yapılmıştır.

Tüm modeller için ayrılmadan hemen önceki momentum kalınlığı Reynolds sayısı  $Re_0$ ,

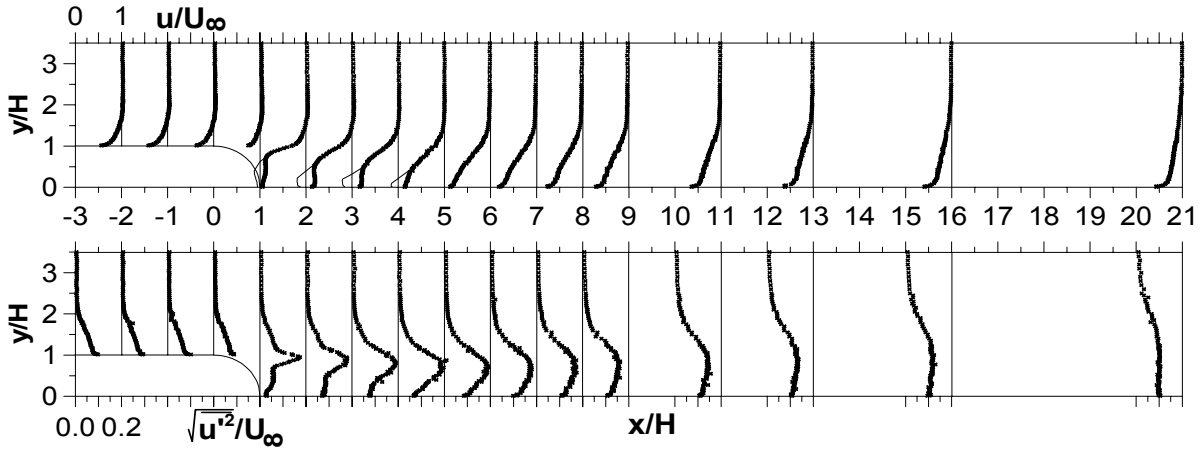
$1.65 \times 10^3$  civarındadır. Adams ve Johnston'a (1988a,b) göre bu değer ayrılan sınır tabakanın türbülanslı olduğundan emin olmak için yeterlidir.

Bilindiği gibi sıcak tel anemometresinin çıktısı akışın yönünü vermemektedir, yani anemometrenin gösterdiği değer daima pozitiftir. Ancak, duvara yaklaşıldıkça anemometrenin pozitif voltaj değerinde görülen ardışık artış ve azalıştan dolayı geri dönme bölgesindeki ters yöndeki akımı tesbit etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada ters akımın olduğu geri dönme bölgesindeki deney sonuçları Atlı'nın (1988) önermiş olduğu yöntem ile düzeltilmiştir.

Elde edilen hız profilleri literatürdeki çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Bu profillerden yeniden yapışma bölgesini tüm modeller için kabaca belirlemek mümkün olmaktadır. Geri

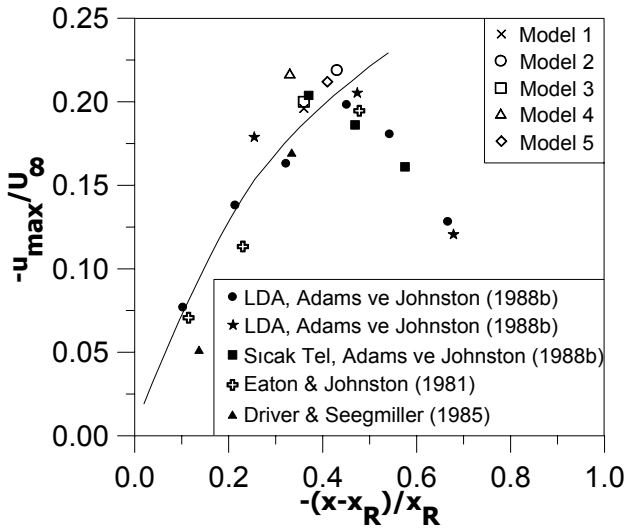


Şekil 3a. Model 1'e ait hız ve türbülans profilleri



Şekil 3b. Model 4'e ait hız ve türbülans profilleri

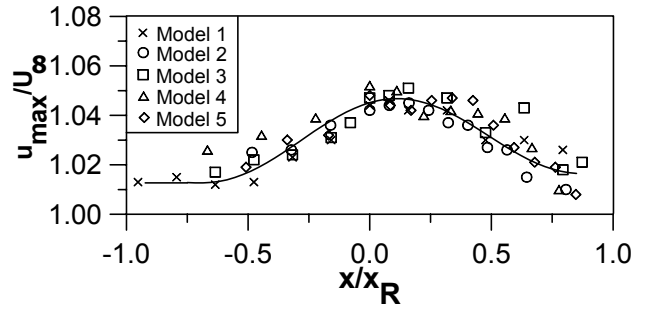
dönme bölgesi ve yeniden yapışma sonrası akım kolayca ayırt edilebilmektedir. Yeniden yapışma bölgesini takip eden hız profilleri türbülanslı bir sınır tabakanın yeniden geliştiğini göstermektedir. Geri dönme bölgesindeki ters yöndeki hızların maksimum değerlerinin ulaştığı tepe değeri  $u_{max}/U_{\infty}$  yaklaşık olarak 0.21 civarındadır. Tepe değerinin olduğu lokasyon tüm modeller için yaklaşık olarak yeniden yapışma uzunluğunun %62'sine karşılık gelmektedir ve duvar basıncının minimum olduğu noktaya oldukça yakındır. Tüm modeller için elde edilen maksimum hız tepe değerleri Adams ve Johnston'un (1988b) sunduğu sonuçlar ile uyum sağlamaktadır (Şekil 4). Ters yöndeki hızın maksimum yaptığı nokta duvardan yaklaşık olarak  $0.1H$  kadar yüksektedir. Bu nedenle tüm ters akım bölgesinin ince bir tabakadan oluştuğu söylenebilir. Bölgedeki kuvvetli basınç gradyeni nedeniyle bu durumun gerçekleşmesi mümkündür. Bahsedilen ince tabaka negatif yönde gelişen bir sınır tabaka gibi dikkate alınabilir (Adams ve Eaton, 1988).



Şekil 4. Geri dönme bölgesinde ters yöndeki maksimum hız değerleri

Yaklaşan sınır tabaka ve geri dönme bölgesinde hız profillerinin yaklaşık olarak alt duvardan  $1.95H$  yüksekliğinde serbest akım hızının üstünde bir maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Profiller serbest akım değerine daha yukarı noktalarda geri dönmektedir. Profillerin ulaştığı maksimum değer akım yönünde ilerledikçe ön-

ce artmakta, yeniden yapışma bölgesine yaklaşırken azalmakta ve yeniden yapışmadan hemen önce kaybolmaktadır. Şekil 5'te tüm modeller için maksimum hızın akım yönündeki dağılımı görülmektedir. Maksimum hız değerlerinin en yükseği yaklaşık olarak  $1.05U_{\infty}$ 'dur ve ayrılmadan hemen sonra basamaktan  $0.2x_R$  kadar uzakta elde edilmektedir.



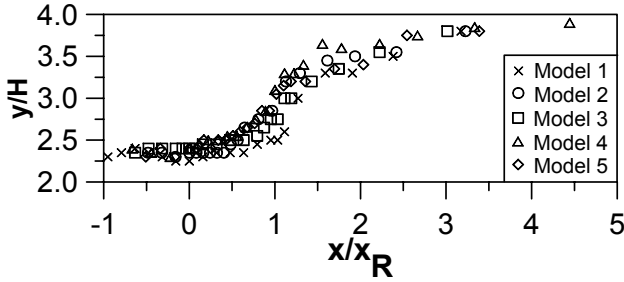
Şekil 5. Akım yönünde maksimum hız dağılımı

Akımın yeniden yapışmayı takip eden bölümünde,  $x/H=20$  mesafesinde dahi hız profillerinin halen bir büküm noktasına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3a ve 3b). Bu henüz dengeli bir sınır tabakanın oluşmadığını göstermektedir. Kaldı ki Bradshaw ve Wong (1972) basamaktan 52 basamak yüksekliği uzaklıkta dahi hız profilinin geleneksel sınır tabaka tanımındaki hız profilinden hala çok farklı olduğunu belirtmiştir.

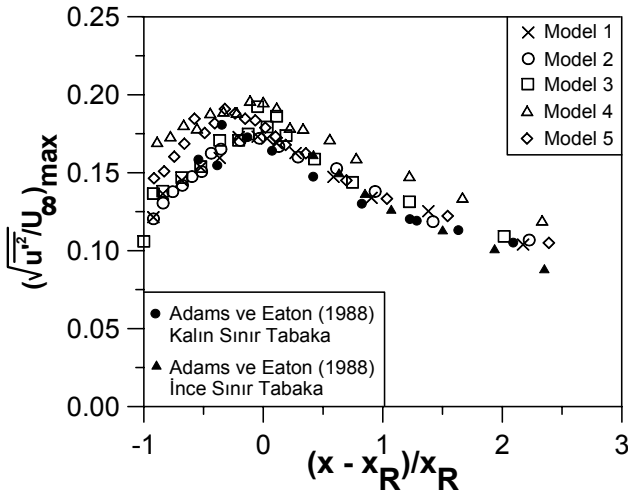
Yeniden yapışma bölgesinden önceki türbülans profilleri Şekil 3a ve 3b'den de görülebileceği üzere serbest akım değerlerine alt duvardan yaklaşık  $2.3H$  yüksekliğinde dönebilmektedir. Fakat yeniden yapışmadan hemen önce başlayarak türbülansın serbest akım değerini aldığı nokta akım yönünde ilerledikçe yükselmektedir. Serbest akım türbülans şartlarının meydana geldiği sınırı belirleyen bu noktaların dağılımları tüm modeller için Şekil 6'da  $x/x_R$  lokasyonlarına göre verilmiştir.

Türbülans ölçümleri, profillerdeki maksimum değer akım yönündeki  $x$  mesafesinin fonksiyonu olarak grafiğe döküldüğünde de tutarlı bir yapı sergilemektedir. Hemen hemen her model için maksimum türbülans değeri yaklaşık olarak  $0.9x_R$  mesafesinde bir tepe değere ulaşmaktadır ve daha sonra hızlıca düşmektedir. Maksimum

değerlere ait dağılımlar Şekil 7’de Adams ve Eaton’un (1988) destekleyen verileriyle beraber verilmiştir.



Şekil 6. Türbülans profillerinin serbest akım değerine eriştiği noktalar



Şekil 7. Türbülans profillerinin maksimum değerlerinin akım doğrultusu boyunca dağılımı

Akımın yeniden yapışmadan sonraki bölümünde akım yönünde ilerledikçe türbülans profillerinin daha yumuşak bir forma sahip olduğu görülmektedir. Ancak, son lokasyon olan  $x/H=20$ 'de dahi görülen türbülans profili dengeli bir sınır tabaka profilinin türbülans profilinden oldukça farklıdır. Bu durum tüm modellerin türbülans profillerinde gözlemlenmiştir.

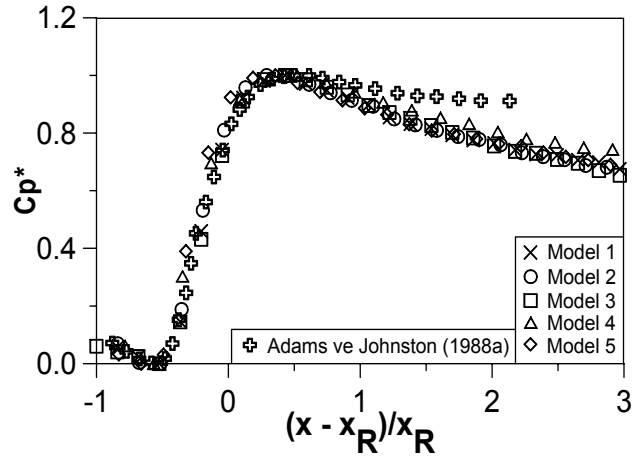
### Basınç dağılımları

Şekil 8’de tüm modellere ait basınç dağılımları ve Adams ve Johnston’un (1988a) temel basamak için ölçtüğü basınç dağılımı verilmiştir. Geri basamak akışına ait karakteristik basınç dağılımında basamağın hemen ardından negatif bir değer görülmektedir. Daha sonra ani bir yükseliş ve yeniden yapışmadan hemen sonra

bir maksimum değer gözlemlenmektedir. Basınç daha sonra basamaktan önceki konumuna toparlanmaya çalışmaktadır. Literatürde farklı çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmak için ölçüm değerleri genellikle belli karakteristik değerler ile normalize edilmeye çalışılır. Basınç katsayısını normalize etme için (1) denklemi kullanılmıştır:

$$C_p^* = \frac{C_{p,i} - C_{p,\min}}{C_{p,\max} - C_{p,\min}} \quad (1)$$

Şekil 8’deki Adams ve Johnston’a (1988a) ait sonuçların maksimum değerden sonraki dağılımı mevcut çalışmanın sonuçlarından farklılık göstermektedir. Bunun nedeni deney düzenekleri arasındaki farklılıktır. Adams ve Johnston’un (1988a) deney düzeneğinin genişleme oranı mevcut çalışmanınkine göre küçüktür.



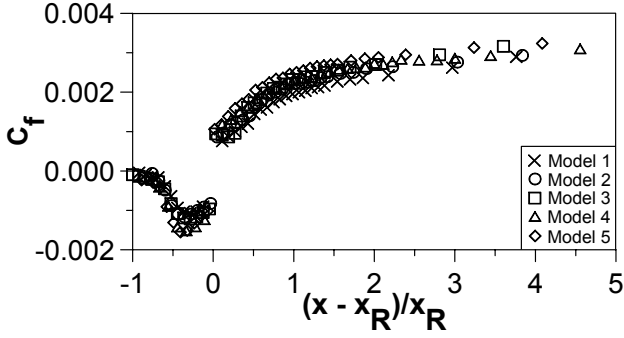
Şekil 8. Basınç dağılımları

### Yüzey kayma gerilmesi dağılımları

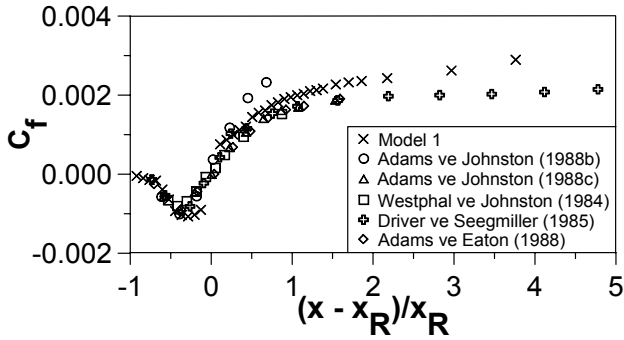
Şekil 9’da tüm modellere ait kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Karışıklığı önlemek amacıyla diğer çalışmalar ile yapılan karşılaştırma sadece Model 1 dikkate alınarak ayrı bir şekilde sunulmuştur (Şekil 10). Mevcut çalışmanın sonuçları yaklaşık olarak üst üste gelmektedir. Karşılaştırılan diğer çalışmalara ait sonuçlar yeniden yapışma bölgesinden önce uyumlu olmasına rağmen yine deney şartlarındaki farklılıklar nedeniyle daha ileri lokasyonlarda farklılıklara sahiptir.



Kayma gerilmesi katsayısı  $C_f$  değerinin sıfır olduğu  $x$  noktası yeniden yapışma noktasını tanımlamaktadır. Kayma gerilmesi dağılımları tüm modeller için yeniden yapışma noktasını belirlemede akım görünürlüğü deneyleri ile beraber kullanılmıştır.



Şekil 9. Kayma gerilmesi dağılımları



Şekil 10. Kayma gerilmesi dağılımlarının karşılaştırılması

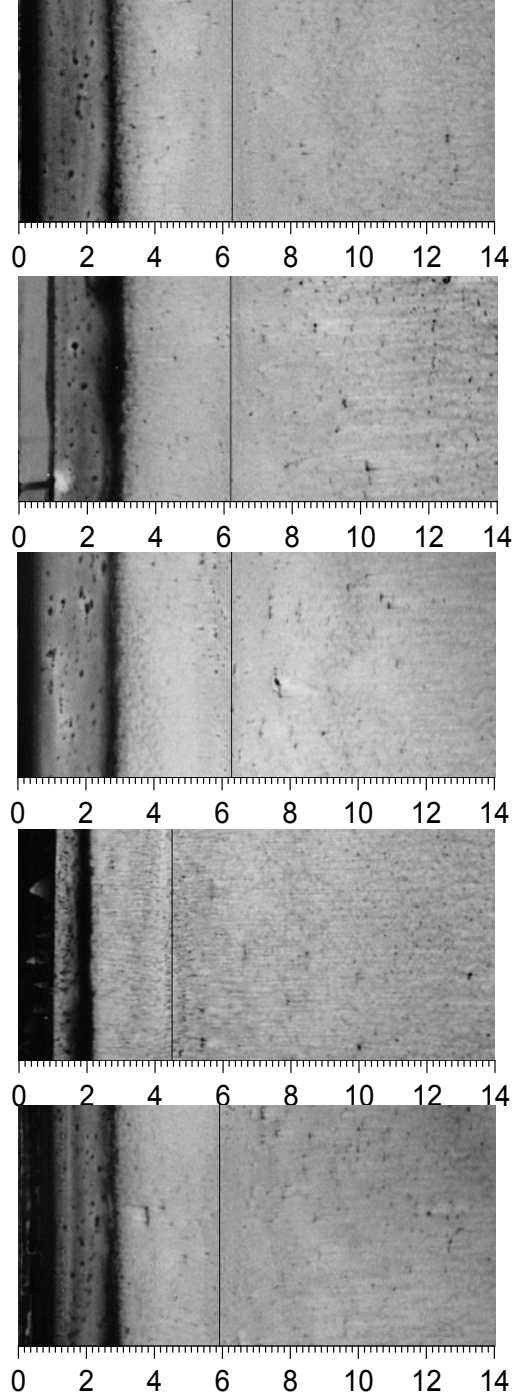
### Akım görünürlüğü

Yağ ve karbon tozu karışımının deney modellerinin yüzeyleri üzerine sürülerek akıma maruz bırakılması ile yüzey kayma gerilmesi çizgileri görünür hale getirilmiştir. Tüm modellere ait bu akım görünürlüğü deneylerinin fotoğrafları Şekil 11'de görülmektedir. Fotoğraflardaki ölçekte akım yönü doğrultusu  $x/H$  kullanılmıştır. Fotoğraflardan açıkça akımın nerede yeniden yapıştığı görülmektedir. Yeniden yapışma uzunlukları oluşan yüzey şekillerinden rahatlıkla ölçülmüştür.

### Yeniden yapışma uzunluğu

Akım görünürlüğü ve kayma gerilmesi ölçümleri neticesinde elde edilen yeniden yapışma uzunlukları Tablo 2'de listelenmiş ve Şekil 12'de literatürde yayınlanmış veriler (Tablo 3)

ile karşılaştırılmıştır. Şekil 12'den görüldüğü üzere basamak yüksekliği Reynold sayısının  $Re_H$   $10^4$ 'ten büyük olduğu durumlar için yeniden yapışma uzunluğu 6 civarındadır (Sinha vd., 1981). Mevcut çalışmada temel basamak için elde edilen değer olan 6.3 bunu desteklemektedir.



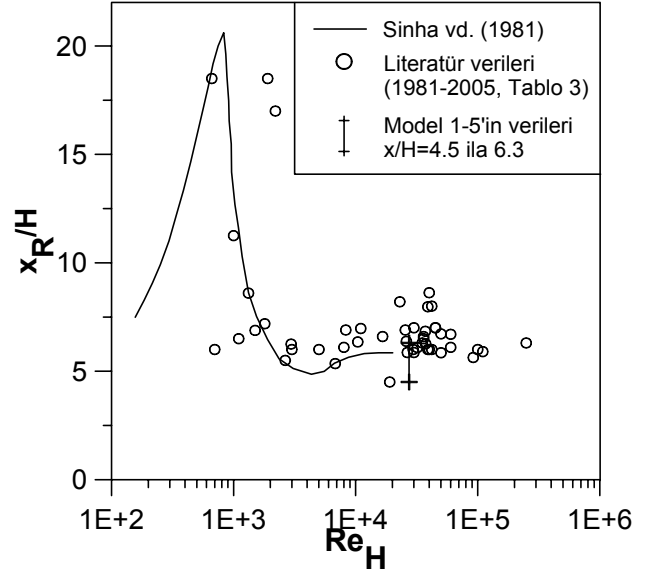
Şekil 11. Akım görünürlüğü fotoğrafları, Model 1'den 5'e kadar yukarıdan aşağıya sırayla verilmiştir

Tablo 2. Tüm modeller için yeniden yapışma uzunlukları

Model	$x_R/H$
1	6.3
2	6.2
3	6.3
4	4.5
5	5.9

Tablo 3. Literatürde yayınlanmış yeniden yapışma uzunlukları

$Re_H$	$x_R/H$	Kaynak
36000	6.6	Adams ve Eaton (1988)
40000	6.5	Adams ve Johnston (1988a,b)
36000	6.4	Adams ve Johnston (1988c)
29600	6.0	Alemdaroğlu (1992)
40000	8.62	
50000	6.72	Armaly vd. (1983)
60000	6.10	
42000	6.0	Bradshaw ve Wong (1972)
37400	6.26	Driver ve Seegmiller (1985)
11000	6.97	
23000	8.2	Eaton ve Johnston (1981)
39000	7.97	
11000	6.5	Gai ve Sharma (1987)
32000	6.09	Isomoto ve Honami (1989)
6800	5.35	
10400	6.35	
25500	6.9	Jovic ve Driver (1995)
37200	6.84	
1900	18.5	
2200	17.0	Lee ve Mateescu (1998)
1000	11.25	
1500	6.88	
1800	7.19	Mouza vd. (2005)
8300	6.9	
16600	6.6	
35135	6.3	Ötügen (1991)
8000	6.1	Sasaki vd. (2001)
662	18.5	
1324	8.6	
2648	5.5	Sinha vd. (1981)
2956	6.25	
42000	8.0	Westphal ve Johnston (1984)
26000	6.38	
92000	5.63	Yoshikawa vd. (2005)



Şekil 12. Yeniden yapışma uzunluğu karşılaştırması

## Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bu çalışma, karşılaştırmalar için güvenilir deneysel veri üretmeyi amaçlamıştır. Tam ve yeni bir seri basınç dağılımı, kayma gerilmesi, hız ve türbülans verisine ek olarak akım görünürlüğü deneyleri de gerçekleştirilerek bu amaca ulaşılmıştır.
- Temel basamak hali mevcut literatür ile uygunluk göstermektedir. Dairesel yüzeye sahip basamak halleri daha küçük yeniden yapışma uzunluğu verirken pozitif ve negatif eğik yüzeyli basamak halleri temel basamak haline göre kayda değer bir farklılık oluşturmamaktadır.
- Akıma dik derinlemesine yapılan akım görünürlüğü deneyleri ve basınç ölçümleri basamak akışının orta ekseninden her iki yöne doğru 12.5 basamak boyu kadar mesafe içinde (toplam 25 basamak boyu) iki boyutlu kaldığını göstermektedir.
- Geri dönme bölgesindeki ters yöndeki maksimum hız,  $u/U_\infty=0.21$ , tüm modeller için yaklaşık olarak yeniden yapışma uzunluğunun %62'sine karşılık gelmektedir. Bu lokasyon duvar basıncının minimum olduğu noktaya oldukça yakındır. Ters yöndeki hızın maksimum yaptığı nokta duvardan yaklaşık olarak  $0.1H$  kadar yüksektedir.

- Yaklaşan sınır tabaka ve geri dönme bölgesinde hız profillerinin yaklaşık olarak alt duvardan  $1.95H$  yüksekliğinde serbest akım hızının üstünde bir maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Maksimum hız değerlerinin en yükseği yaklaşık olarak  $1.05U_{\infty}$ 'dur ve ayrılmadan hemen sonra basamaktan  $0.2x_R$  kadar uzakta elde edil-mektedir.
- Akımın yeniden yapışmadan sonraki bölümünde  $x/H=20$  noktasında dahi hız profillerinin halen bir büküm noktasına sahip olduğu görülmektedir. Bu henüz dengeli bir sınır tabakanın oluşmadığını göstermektedir.
- Akımın yeniden yapışmadan sonraki bölümünde akım yönünde ilerledikçe türbülans profillerinin daha yumuşak bir forma sahip olduğu görülmektedir. Ancak, son lokasyon olan  $x/H=20$ 'de dahi görülen türbülans profili dengeli bir sınır tabaka profilinin türbülans profilinden oldukça farklıdır.
- Yeniden yapışma bölgesinden önceki türbülans profilleri serbest akım değerlerine alt duvardan yaklaşık  $2.3H$  yüksekliğinde dönebilmektedir. Fakat yeniden yapışmadan hemen önce başlayarak türbülansın serbest akım değerini aldığı nokta akım yönünde ilerledikçe yükselmektedir.
- Maksimum türbülans değeri yaklaşık olarak  $0.9x_R$  mesafesinde bir tepe değere ulaşmaktadır ve daha sonra hızlıca düşmektedir.
- Tüm modeller için basınç ve kayma gerilmesi dağılımları uygun normalleştir-meler ile birbirleriyle karşılaştırılmış, kendi içlerinde ve mevcut literatür ile uyum sağladıkları görülmüştür.
- Elde edilen yeniden yapışma uzunlukları literatürde tanımlı olan aralıktadır. Temel basamak için elde edilen  $6.3$  değeri yaklaşık olarak öngörülen  $6$  değerine oldukça yakındır.

## Kaynaklar

- Adams, E.W. ve Eaton, J.K., (1988). An LDA study of the backward-facing step flow, including the effects of velocity bias, *Journal of Fluids Engineering – Transactions of ASME*, **110**, 275-282.
- Adams, E.W. ve Johnston, J.P., (1988a). Effects of the separating shear layer on the reattachment

- flow structure part 1: pressure and turbulence quantities, *Experiments in Fluids*, **6**, 400-408.
- Adams, E.W. ve Johnston, J.P., (1988b). effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure part 2: Reattachment length and wall shear stress, *Experiments in Fluids*, **6**, 493-499.
- Adams, E.W. ve Johnston, J.P., (1988c). Flow structure in the near-wall zone of a turbulent separated flow, *AIAA Journal*, **26**, 932-939.
- Alemdaroğlu, N., (1992). Measurements in a back step flow, *ODTÜ Havacılık Mühendisliği Bölümünün 10. Kuruluş Yılı Sempozyumu*, Ankara, Haziran 22-26.
- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F. ve Schönung, B., (1983). Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, *Journal of Fluid Mechanics*, **127**, 473-496.
- Atlı, V., (1988). Subsonic flow over a two-dimensional obstacle immersed in a turbulent boundary layer on a flat surface, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **31**, 225-239.
- Berbee, J.G. ve Ellzey, J.L., (1989). The effect of aspect ratio on the flow over a rearward-facing step, *Experiments in Fluids*, **7**, 447-452.
- Bradshaw, P. ve Wong, F.Y.F., (1972). the reattachment and relaxation of a turbulent shear layer, *Journal of Fluid Mechanics*, **52**, Part 1, 113-135.
- Driver, D. M. ve Seegmiller, H. L., (1985). Features of a reattaching shear layer in divergent channel flow, *AIAA Journal*, **23**, 163-171.
- Eaton, J.K. ve Johnston, J.P., (1981). A review of research on subsonic turbulent flow reattachment, *AIAA Journal*, **19**, 1093-1100.
- Gai, S.L. ve Sharma, S.D., (1987). pressure distributions behind a rearward facing segmented step, *Experiments in Fluids*, **5**, 154-158.
- Isomoto, K. ve Honami, S., (1989). The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward-facing step, *Journal of Fluids Engineering – Transactions of the ASME*, **111**, 87-92.
- Jovic, S. ve Driver, D., (1995) Reynolds number effect on the skin friction in separated flows behind a backward-facing step, *Experiments in Fluids*, **18**, 464-467.
- Kuehn, D. M., (1980). Effects of adverse pressure gradient on the incompressible reattaching flow over a rearward-facing step, *AIAA Journal*, **18**, 343-344.

- Lee, T. ve Mateescu, D., (1998). Experimental and numerical investigation of 2-D backward-facing step flow, *Journal of Fluids and Structures*, **12**, 703-716.
- Mouza, A.A., Pantzali, M.N., Paras, S.V. ve Tihon, J., (2005). Experimental & numerical study of backward-facing step flow, *5<sup>th</sup> National Chemical Engineering Conference*, Selanik, Yunanistan.
- Ötügen, M.V., (1991). Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step, *Experiments in Fluids*, **10**, 273-280.
- Sasaki, K., Fukushima, C., Inoue, Y. ve Yamashita, S., (2001). Experiments on the flow behind a swept backward-facing step – mean flow field, *Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, New Orleans, Louisiana, Mayıs 29 – Haziran 1.
- Sinha, S.N., Gupta, A.K. ve Oberai, M.M., (1981). Laminar separating flow over backsteps and cavities part I: Backsteps, *AIAA Journal*, **19**, 1527-1530.
- Westphal, R.V. ve Johnston, J.P., (1984). Effect of initial conditions on turbulent reattachment downstream of a backward-facing step, *AIAA Journal*, **22**, 1727-1732.
- Yoshikawa, H., Suga, T. ve Ota, T., (2005). Turbulent heat transfer around a downward facing step –effects of step height-, *6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, Matsushima, Miyagi, Japonya, Nisan 17-21.