



## Numerical investigation of flow over obstacles on a backward-facing step

Seyfettin Bayraktar\*<sup>ID</sup>

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, 34349, Turkey

### Highlights:

- The modified k-omega turbulence model was introduced
- Square, circular and triangle cross-sectional obstacles were placed on a backward-facing step
- Effects of the obstacles on the flow characteristics were presented

### Keywords:

- Backward-facing step
- Separation
- Turbulence
- Recirculation
- Obstacle

### Article Info:

Research Article  
Received: 12.11.2019  
Accepted: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.646073

### Correspondence:

Author: Seyfettin Bayraktar  
e-mail: sbay@yildiz.edu.tr  
phone: +90 212 383 2945

### Graphical/Tabular Abstract

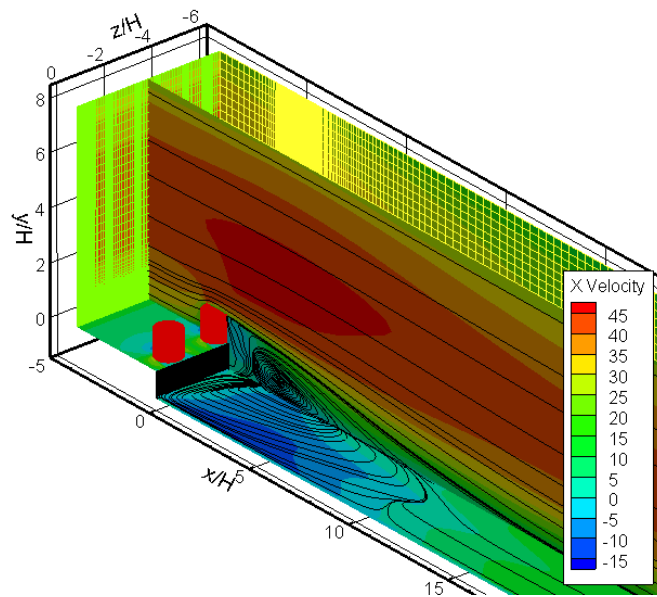


Figure A. Flow over circular obstacles on a backward-facing step.

**Purpose:** The purpose of the present study is to present the effects of the obstacles in various shapes on the flow over a backward-facing step and the effectiveness of the modified k-omega turbulence model.

### Theory and Methods:

Computational fluid dynamics (CFD) method was employed. Modified version of the k-omega turbulence model was used to model the transient, incompressible and three-dimensional turbulent flow over the obstacles that were placed on a backward-facing step.

### Results:

The performance of the modified k-omega turbulence model was presented by comparing the results of the present study with the available experimental data. It was shown that the modified k-omega turbulence model provides 6% better results than the standard k-omega model for the flow over a backward-facing step without any obstacles. It was revealed that the existence of the obstacles located on the backward-facing step increases the length of the recirculation region. Among square, circular and equilateral triangle cross-sectional obstacles, the equilateral triangle one leads to longest recirculation region. Regardless of the shape of the obstacles, the height of the obstacles affects the length of the recirculation region until  $H/h=0.25$  where  $H$  and  $h$  is the height of the step and obstacles, respectively.

### Conclusion:

Modified k-omega turbulence model can be used for flows over the obstacles in various shapes that were located on a backward-facing step. Not only has the existence of the obstacles but also the height of them affected the length of the recirculation region until the ratio of the step to the obstacle height is equal to 0.25.



## Bir ters-basamak üzerindeki engellerin etrafındaki akışın sayısal olarak incelenmesi

Seyfettin Bayraktar\*<sup>ID</sup>

Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, 34349 İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Modifiye k-omega türbülans modeli kullanılmıştır
- Kare, daire ve eşkenar üçgen kesitli engeller ters-basamak üzerine yerleştirilmiştir
- Engellerin akış üzerindeki etkileri sunulmuştur

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 12.11.2019  
Kabul: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.646073

### Anahtar Kelimeler:

Ters-basamak,  
ayırılma,  
türbülans,  
hesaplamalı akışkanlar  
dinamiği,  
engel,  
devridaim

### ÖZET

Bu çalışmada, bir ters-basamak üzerine konumlandırılmış kare, daire ve eşkenar üçgen kesitli prizmatik engellerin akım alanı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Türbülanslı, üç-boyutlu, daimi ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilen akış, modifiye k-omega türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, boyutsuz sürtünme ve boyutsuz basınç katsayıları ile boyutsuz ayrılmış akış bölgesi cinsinden sunulmuşlardır. Çalışmada engellerin geometrik şekillerinin dışında, yüksekliklerinin (h) ilgili değişkenler üzerindeki etkileri basamak yüksekliği (H) ile boyutsuzlaştırılarak H/h=0,125; 0,25; 0,5 ve 1 için sunulmuştur. Üzerinde engel bulunmayan ters-basamak için elde edilen sayısal sonuçlar, Driver and Seegmiller, 1985'in deneysel verileri ile karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu gösterilmiştir. Üzerinde engel olmayan ters-basamak üzerindeki akış göz önüne alındığında, sadece engellerin varlıklarının değil, aynı zamanda kesit şekillerinin de sürtünme katsayısı, basınç katsayısı ve boyutsuz ayrılmış akış bölgesi uzunluğu üzerinde etkilerinin olduğu görülmüştür. Ters-basamak üzerine konulmuş engellerin kesit geometrisi fark etmeksizin herhangi bir engelin varlığının, ayrılmış akış bölgesi uzunğunu artırdığı, ancak uzun bölgeye, eşkenar üçgen kesitli prizma kullanıldığında ulaşıldığı saptanmıştır. Engel yüksekliğinin ayrılmış akış bölgesi üzerindeki etkisinin H/h=0,25 ten sonra oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.

## Numerical investigation of flow over obstacles on a backward-facing step

### H I G H L I G H T S

- The modified k-omega turbulence model was introduced
- Square, circular and triangle cross-sectional obstacles were placed on a backward-facing step
- Effects of the obstacles on the flow characteristics were presented

### Article Info

Research Article  
Received: 12.11.2019  
Accepted: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.646073

### Keywords:

Backward-facing step,  
separation,  
turbulence,  
obstacle,  
recirculation

### ABSTRACT

In the present study, the effects of the square, circular and equilateral triangular cross-sectional obstacles placed on a backward-facing step on the flow-field were investigated numerically. Assumed to be fully turbulent, three-dimensional, steady and incompressible flow was solved by modified k-omega turbulence model. Obtained results were exhibited in terms of non-dimensional friction and non-dimensional pressure coefficients in addition to non-dimensional reattachment length. Apart from the geometric shapes of the obstacles, the influence of their heights (h) on the relevant parameters were presented for H/h=0.125, 0.25, 0.5 and 1 by dimensionalizing with the step height (H). Results obtained for the backward-facing step without any obstacles were compared with the experimental data of Driver and Seegmiller, 1985 to show the accuracy of the model. It was shown that in comparison with the step without the obstacles, not only the existence of the obstacles but their cross-sectional shapes also affect friction and pressure coefficients and the reattachment length. Regardless of the cross-sectional geometry of the obstacles, it was detected that the existence of the obstacles increases the length of the recirculation, however, the longest regions were obtained when equilateral triangular cross-sectional one was used. It was revealed that the effect of the height of the obstacle on the detached flow region is quite low for H/h=0.25.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ters-basamak üzerindeki akışlar; gaz türbinleri, ısı değiştiricileri, yanma odaları, elektronik cihazların soğutulması gibi çok farklı mühendislik sistemlerinde sıklıkla karşılaşılmalardan dolayı literatürde yaygın bir şekilde incelenmişlerdir. Her ne kadar basit bir geometrik düzenlemeye sahip olsalar da, ters-basamak üzerindeki akış karakteristikleri henüz tam anlamıyla anlaşılammıştır. Bir akışkan, ters-basamak üzerinden aktığında, basamağın hemen ilerisinde, geometrideki ani değişimden dolayı, bir ana ayrılmış akış bölgesi oluşur. Akıştaki ters basınç gradyenleri, üst tarafta akışın yüksek, alt tarafta ise düşük hızlı bir serbest kayma tabakası gibi davranmasına yol açar. Belli bir mesafeden sonra kayma tabakası, basamaktan sonra yer alan alt çeper üzerine çarparak içerisinde hareketli akışkan barındıran ayrılmış akış bölgesi oluşmasına neden olur. Akışın karakteristiğine etki eden değişkenlere bağlı olarak, ayrılmış akış bölgesinin uzunluk değişimleri, ayrılma olayının ve bunun gibi ayrılmış akış bölgelerinin varlığının momentum ve ısı transferini etkilemesinden dolayı, çok sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Bu değişkenlerden biri de ters-basamak akışında kullanılan çalışma bölgesi geometrisidir.

Literatürde yaygın olarak ele alınan klasik ters-basamak ardında oluşan ayrılma bölgelerini farklı akış rejimleri için inceledikleri deneysel çalışmalarında Armaly vd. [1], ayrılma bölgesinin uzunluğunun Reynolds (Re) sayısına oldukça bağlı olduğunu göstermişlerdir. Türbülanslı akışa yol açacak yüksek Reynolds sayılarında, üst çeperin altında ilave bir ayrılmış akış bölgesi oluşmakta ve laminlerden türbülanslı akış rejimine geçiş, ayrılmış akış bölgesi uzunluğundaki azalmayla ifade edilmektedir [1]. Reynolds sayısının, yanal çeperlere bitişik olan bir bölgede oluşan geri akış bölgesinin büyüklüğü üzerindeki etkisi de sıklıkla ele alınmıştır. Reynolds sayısının dışında, farklı geometrik düzenlemelerin ters-basamak üzerindeki akış karakteristiğine olan etkilerinin göz önüne alındığı çalışmalar ilgili literatürde önemli yer tutmaktadır [2-5]. Akışın çalışma bölgesinden çıkış yaptığı kesit yüksekliğinin, çalışma bölgesine giriş yaptığı keside oranı olarak tanımlanan genişleme oranının düşürülmesiyle ayrılmış akış bölgesi uzunluğunun arttığı bilinmektedir [6]. Genişleme oranının dışında önemli olan bir diğer geometrik değişken, kanal genişliğinin basamak yüksekliğine oranı olarak tanımlanan uzunluk oranıdır (AR). Reynolds sayısının  $Re=250$  olması durumunda, kanal ortasında iki-boyutlu bir bölge elde etmek için uzunluk oranının en azından  $AR=16$  olması gerektiği ifade belirtilmiştir [7]. Basamak yüksekliğinin artmasıyla, ayrılmış akış bölgesi uzunluğu ve yan çeperde oluşan geri akış bölgesinin boyutları da artmaktadır [8]. İlgili literatürde az sayıda çalışmanın konusu olan basamak eğim açısının, basamaktan sonraki alt çeperde ait sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri ele alınarak, basamak eğim açısının değiştirilmesiyle ayrılmış akış bölgesindeki sürtünme katsayısının arttığı ileri sürülmüştür [9, 10]. Basamak yüksekliğinin artırılmasıyla, basamaktan

hemen sonra oluşan birincil ve ikincil ayrılmış akış bölgelerinin boyutlarının da arttığı çeşitli çalışmalarda ortaya konulmuştur. Ayrılmış akış bölgesi ile ilgili çalışmada, iki farklı basamak yüksekliği göz önüne alınarak, akışa ait genel özelliklerin basamak yüksekliğiyle çok az değişmekte [11], ayrılmış akış bölgesi uzunluğunun, eğim açısının büyümesiyle artmakta ve üst çeperde doğru yükselmekte olduğu ifade edilmiştir [12]. Küçük ölçekli ayrılmış akış bölgeleri ya da daha küçük çevrilerin, bir ters basınç gradyeni olması durumunda, ana çevride oluşabileceği ileri sürülmüştür [13]. Böyle küçük ölçekli çevrilerin saptanabilmesi için literatürde büyük çevri benzeşimi (LES) tekniği kullanılmaktadır. Periyodik akış sarsıntılarının ters-basamak üzerindeki akışa olan etkileri LES ve Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak ele alınmış ve RANS yaklaşımının zamana bağlılık arz eden kayma tabakasında yeterli çözünürlüğü üretmediği belirtilmiştir [14]. Küçük ölçekli etkileri yakalayabilmek için kullanılan Smagorinsky tabanlı LES çözümünde, viskoz alt tabaka bölgesinin Stanton (St) sayısı göz önüne alındığında, ihmal edilemeyecek derecede önemli etkileri olduğu gösterilmiştir [15]. Doğrudan sayısal çözüm, (DNS) ve büyük çevri benzeşimine (LES) nazaran akış probleminin çözümünde daha iyi sonuçlar vermemesine rağmen, daha az hesaplama zamanı, emek ve donanım altyapısı gerektirmesinden dolayı RANS tabanlı çözümler sadece endüstride değil, akademik çalışmalarda da yoğun olarak tercih edilmektedir. Son zamanlarda, DNS ve LES karşısındaki dezavantajlarını azaltmak amacıyla, mevcut türbülans modelleri üzerinde bir takım iyileştirmeler yapılarak RANS tabanlı çözümlerin doğrulukları artırılmaktadır. Azaltılmış model saptama algoritması kullanılarak çok kısa zamanda deneysel verilerle benzer sonuçların elde edilmesi mümkün olmuştur [16]. Navier-Stokes denklemleri sonlu farklar metodu kullanılarak ters-basamak üzerindeki akış için çözdürülmüş ve ters-basamaktan önceki kanal uzunluğunun, basamak yüksekliğinin beş katından az olmaması gerektiği ortaya konulmuştur [17]. Üç farklı çeper-yakın bölge yaklaşımı ve altı farklı türbülans modeli yüksek Reynolds sayıları için test edilerek karşılaştırılmış ve modifiye edilmiş k-epsilon türbülans modelinin dengede-olmayan çeper fonksiyonu (*non-equilibrium wall function*) ile kullanıldığında, ayrılma bölgesi uzunluğunu daha doğru olarak tahmin edebildiği, ancak bununla beraber, tüm akış alanı göz önüne alındığında, iki katmanlı modelin, dengede-olmayan çeper fonksiyonuna nazaran daha iyi sonuçlar verdiği öne sürülmüştür [18]. Doğrusal olmayan k-epsilon türbülans modelinin ayrılmış akışların tahmininde kullanılabilirliğinin iddia edildiği çalışmada; doğrusal olmayan model, ayrılma bölgesi uzunluğunu standart k-epsilon türbülans modeline nazaran daha doğru bulabilmektedir [19]. Referans [20]'de salınımlı laminar akışlara parabolik giriş hız profili eklenerek basamak yüksekliği ve Reynolds sayısının ters-basamak üzerindeki akış ve ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Literatürde, bilinen RANS ve PANS (Kısmi-ortalama Navier-Stokes) modellerinin performanslarını arttırmak amacıyla bir köprüleme metodu

önerilmiştir [21]. Bunlardan sonuncusu olan PANS metodu, çözünmemiş türbülans kinetik enerjisi ( $f_k$ ) ve türbülans kinetik enerjisi yitim oranı ( $f_\epsilon$ ) olmak üzere iki çözünmemiş değişkene dayanmaktadır. Buna göre,  $f_k=0$  ve  $f_k=1$  alınarak DNS metodundan elde edilenlere oldukça yakın sonuçların alınabileceği iddia edilmiştir. Daha öncesinde, PANS modeli farklı problemler için ele alınarak kullanılabilirliği ortaya konulmuştur [22]. Daha sonraki yıllarda,  $f_k$  değerlerini 0,6 ve 0,7 olarak iki-basamaklı PANS modeli ve modifiye PANS modeli (MPANS) elde edilmiş ve ters-basamak üzerindeki türbülanslı akışlar göz önüne alınarak elde edilen sonuçlar standart k-epsilon türbülans modeliyle karşılaştırılmış ve iki basamaklı PANS ve MPANS modellerinin daha iyi sonuçlar verdikleri iddia edilmiştir [23].

Bugüne kadar geliştirilen türbülans modellerinin ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çözücü algoritmalarının doğrulanmasında, kanallardaki ayrılmış akışlar bir kıstas çalışması olarak ele alınmışlardır çünkü bu tip düzenekler basit geometrilerine rağmen oldukça karmaşık akış yapılarına neden olmaktadır. Böyle bir geometri kullanarak yeniden düzenlenmiş k-omega türbülans modelinin performansı ele alınıp değerlendirilmiştir [24]. Yeniden düzenlenmiş k-omega türbülans modeli aslında yeni kapama katsayıları kullanılarak elde edilen modifiye bir k-omega modeli olup, ayrılmış akışlar için klasik k-omega türbülans modeline nazaran daha iyi sonuçlar vermektedir. Aslında daha öncesinde benzer bir yaklaşım, aerodinamikle ilgili akış problemlerinde kullanılmak üzere, k-omega türbülans modeli için geliştirilmiş [25] ve BSL k-omega ve SST k-omega ismi verilerek literatüre sunulmuştur. Ancak, ters basamak üzerindeki akışlar için orijinal k-omega türbülans modelinin özellikle ayrılma bölgesi uzunluğunu tahmin etmede bu iki yeni modelden daha başarılı olduğu ifade edilmiştir. Gerçeklenir (Realizable) Reynolds gerilme cebirsel denklem modeli geliştirilerek, modelin performansı çok sayıda akış konfigürasyonları üzerinde denenmiş ve bu modelin sürtünme ve basınç katsayılarını ve hız profillerini standart k-epsilon türbülans modeline göre daha doğru bir şekilde tahmin edebildiği gösterilmiştir [26].

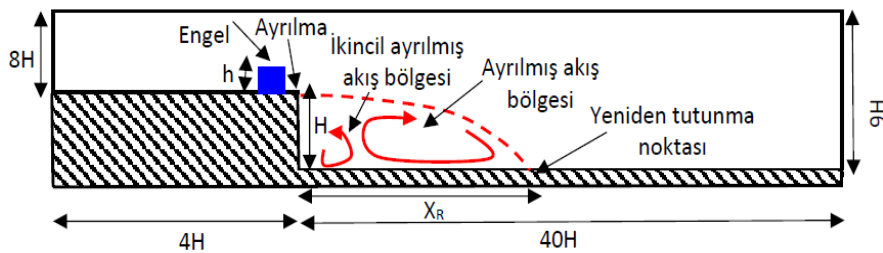
Bu çalışmada, bir ters-basamak üzerine yerleştirilmiş kare, dairesel ve eşkenar üçgen kesitli engellerin akış yapısı üzerindeki etkileri modifiye k-omega türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Cisimlerin geometrik şekillerinin dışında, yükseklikleri ( $h$ ) de değiştirilerek sonuçlar ayrılma bölgesi uzunluğu, sürtünme

ve basınç katsayılarının değişimleri cinsinden sunulmuştur. Yazarın bildiği kadarıyla, ters basamak üzerindeki akışlarla ilgili böyle bir geometrik düzenleme henüz ele alınmamıştır. Bu nedenle, söz konusu çalışmanın ilgili literatürdeki boşluğu dolduracağı ve bu tip problemlerin modifiye k-omega türbülans modeli kullanılarak çözülebileceği gösterilmiştir.

## 2. SAYISAL METOT (COMPUTATIONAL METHOD)

Bu kısımda, hesaplama bölgesinin ölçüleri, ağ yapısı, ağdan bağımsızlık çalışmaları, sınır şartlarının akış alanı üzerindeki etkileri ve kullanılan türbülans modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Sayısal çalışmanın doğruluğu, üzerinde herhangi bir cisim bulunmayan ters basamak içeren iki boyutlu (2B) bir hesaplama bölgesi göz önüne alınarak gösterilmiştir. Doğrulama işlemi için Driver and Seegmiller, 1985 [27]'in deneysel çalışması referans alınmıştır. Basamak yüksekliği  $H=0,0127$  m olmak üzere kanalın giriş ve çıkış yükseklikleri, genişleme oranı  $ER=1,125$  olacak şekilde, sırasıyla  $8H$  ve  $9H$  olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Ters-basamak üzerine yerleştirilmiş kare, dairesel ve eşkenar üçgen kesitli engellerin yükseklikleri ( $h$ ), ters-basamak yüksekliği ( $H$ ) ile boyutsuzlaştırılarak farklı  $H/h$  değerleri için çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Genişleme oranı  $ER$ , kanalın giriş ve çıkış yüksekliklerinin oranı olup, çalışma boyunca sabit tutulmuştur ( $ER=9H/8H=1,125$ ). Basamaktan önce ve sonraki kanal uzunlukları, sırasıyla  $4H$  ve  $40H$  olarak tayin edilmiş ve kullanılan kartezyen koordinat sisteminin merkezi, basamağın üst köşesine denk gelecek şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 2a). Kanalın sol ve sağ taraflarına hız girişi ve basınç çıkışı sınır şartları verilerek; basamağın kendisi, kanalın tüm üst ve alt çeperleri ise kaymama sınır şartı (no-slip condition) tanımlanarak duvar olarak ele alınmıştır. Çalışmalar, serbest giriş hızı ve basamak yüksekliğinin 2 katına bağlı olarak tanımlanan Reynolds sayısının  $Re=37,4 \times 10^3$  değeri için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ters-basamak üzerine daire, eşkenar üçgen ve kare kesitli olmak üzere üç farklı geometrik kesitli engel yerleştirilerek bu gibi pasif akış kontrol elemanlarının akış üzerindeki etkileri dört farklı boyutsuz yükseklik değeri  $H/h=0,125; 0,25; 0,5$  ve  $1$  için incelenmiştir. Elemanlar arasındaki mesafe sabit olup, ters-basamak yüksekliğine ( $H$ ) eşit olarak alınmıştır. Analizlerin daha hızlı gerçekleştirilmesi için çalışma bölgesi  $z/H=0$  düzleminde kesilmiş ve buraya simetri şartı uygulanmıştır.



Şekil 1. Ters basamak akışı ve ana ölçüler, ölçeysizdir (Backward-facing step flow and main dimensions, not to scale)

Hesaplama bölgesinin yukarıda ifade edildiği üzere elde edilmesinden sonra, sonlu sayıda küçük hacimlere bölünerek ağ örgüsü oluşturulmuştur. Ağ üretimi esnasında üniform olmayan düzgün ağ yapısı tercih edilerek, hız ve basınç gradyenlerinin büyük olacağı düşünülen bölgeler için daha sık ağ elemanı kullanılarak buralardaki değişimlerin doğru şekilde ortaya konması amaçlanmıştır (Şekil 3). Analizlerin ağ sayısından bağımsızlığını göstermek üzere, çalışma bölgesinde  $N_1=178569$  eleman içeren Ağ-1,  $N_2=598490$  elemandan meydana gelen Ağ-2 ve  $N_3=2138674$  elemanlı Ağ-3 isimli üç farklı ağ oluşturularak Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index, GCI) ile ağ hassasiyeti ve ayırıklaştırma hatalarının kontrolü yapılmıştır [28]. Çalışmada, akım-yönündeki sürtünme ve basınç katsayıları ile boyutsuz ayrılma bölgesi uzunluğunun değişimleri ele alındığından dolayı, sadece bu iki yöndeki ağ eleman sayıları değiştirilmiş, z-yönünde ise toplam 140 adet ağ elemanı üretilmiştir. Tablo 1'den görülebileceği üzere, ayırıklaştırma hatalarından kaynaklanan belirsizlik %0,21 olarak bulunmuştur.

**Tablo 1.** Ağ yakınsama indeksi (Grid convergence index)

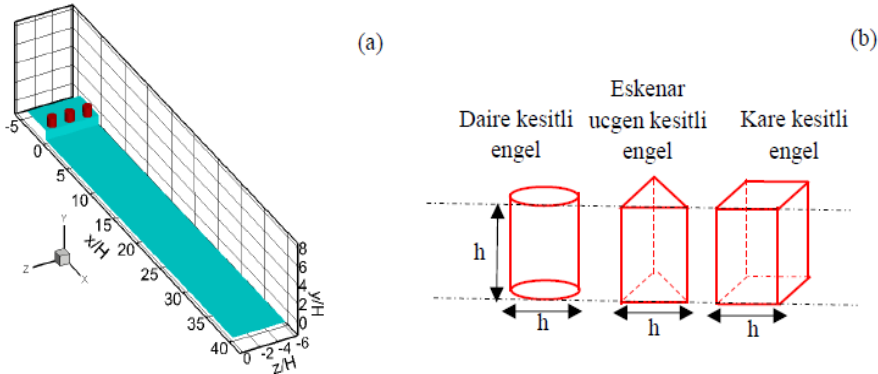
$N_1, N_2, N_3$	2094715	598490	178569
$r_{21}, r_{32}$	3,50	3,35	
$\phi_1, \phi_2, \phi_3$	6,05	6,04	6,59
$p$	3,199		
$\phi_{ext}^{21}$	6,05		
$e_a^{21}, e_{ext}^{21}$	%8,9	%0,003	
$GCI^{21}$	%0,21		

Ağdan bağımsızlık çalışması olarak, boyutsuz ayrılma bölgesi uzunluğu ( $X_R/H$ ), boyutsuz çeper sürtünme ( $C_f$ ) ve boyutsuz basınç ( $C_p$ ) katsayılarının değişimleri de, hem denenen ağlarla hem de Ref.[27]'nin deneysel sonuçlarıyla mukayese edilerek Tablo 2, Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. En az sayıda ağ elemanının kullanıldığı Ağ-1 ile elde edilen boyutsuz ayrılma bölgesi uzunluğunun, Ağ-2 kullanılmasıyla %8 oranında azaldığı saptanırken, ağ elemanlarının yaklaşık 4 kat artırılması durumunda Ağ-2 ile Ağ-3 arasında herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür.

**Tablo 2.** Ağ yapısı (Mesh structure)

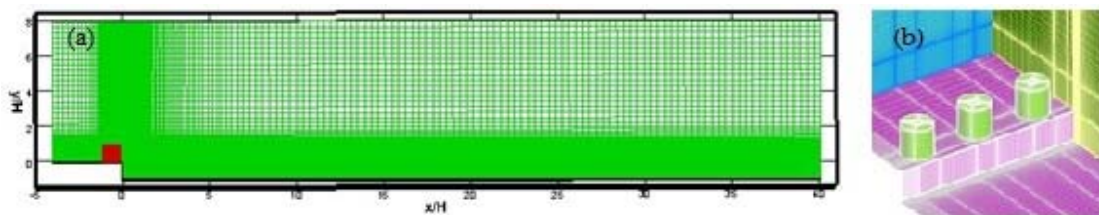
	Ağ elemanı sayıları	$y^+$	$X_R/H$	Sapma (%)
Ağ-1	178569	3	6,59	-
Ağ-2	598490	<1	6,04	8
Ağ-3	2138674	<1	6,04	-

Ağdan bağımsızlık çalışmaları kapsamında boyutsuz ayrılma bölgesi uzunluğunun ( $X_R/H$ ) dışında, çeper sürtünme ve basınç katsayılarının değişimleri de kontrol edilmiştir (Şekil 4). Ağ-1 ile elde edilen gerek sürtünme ( $C_f$ ), gerekse basınç ( $C_p$ ) katsayılarının, Ref.[27] tarafından deneysel olarak elde edilenlerle hemen hemen aynı eğilimi göstermesine rağmen, deneysel değerleri yakalamada, özellikle  $x/H=6$ 'dan sonra, yetersiz kaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, Ağ-2 ve Ağ-3 kullanılarak elde edilen sonuçların, özellikle basınç katsayısı değişim grafiğindeki küçük bir bölge dışında ( $0 < x/H < 5$ ), deneysel verilerle oldukça uyum içinde olduğu söylenebilir.  $0 < x/H < 5$  arasındaki bölge, basamak sonrasında akışın çeperden ayrılıp karmaşık bir hal almaya başladığı bölgedir. Bu nedenle



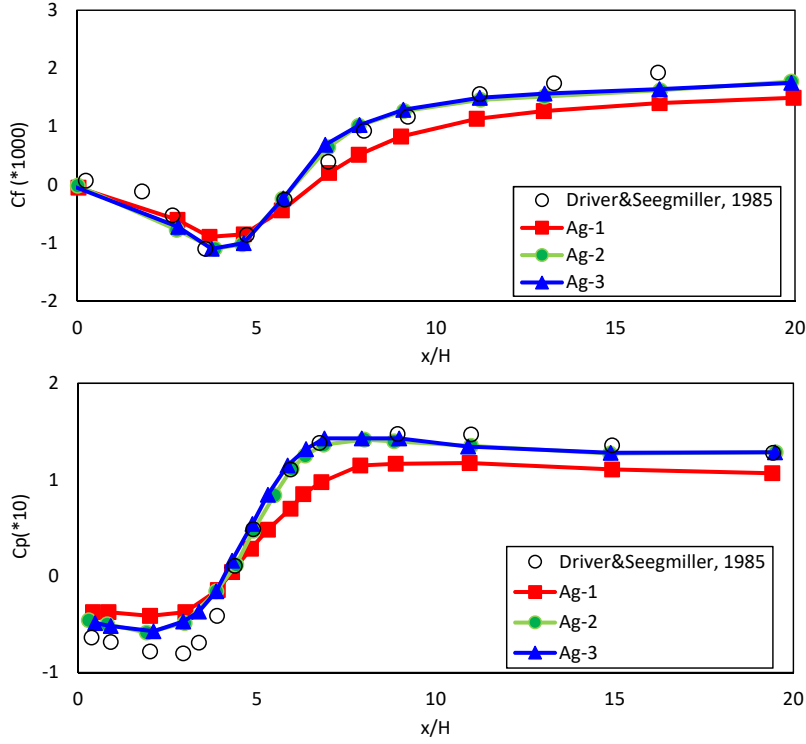
**Şekil 2.** Ters-basamak üzerinde konumlandırılmış daire-kesitli engeller ve kullanılan koordinat sistemi (a), çalışmada kullanılan daire, eşkenar üçgen ve kare kesitli engeller (b)

(Circular cross-sectional obstacles located on the backward-facing step and the used coordinate system (a) circular, equilateral triangle and square cross-sectional obstacles used in the present study (b))

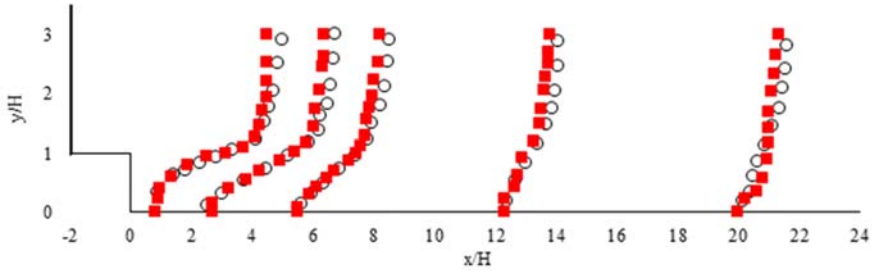


**Şekil 3.** Hesaplama bölgesine uygulanan ağ yapısı (a) engeller civarındaki ağ yapısının yakın görünüşü (b)

(Grid structure applied to the computational domain (a) Close view of grid structure around the obstacles (b))



Şekil 4. Sürtünme,  $C_f$  (üst) ve basınç katsayılarının,  $C_p$  (alt) dağılımları  
(Friction,  $C_f$ (top) and pressure coefficients (bottom) distributions)



Şekil 5. Hız profillerinin çalışma bölgesinin alt çeperi boyunca olan değişimleri, (o; Deneysel, [27], ■; Bu çalışma)  
(The change in velocity profiles along the bottom of the computational domain (o; Experiment t, [27], ■; Present Study)

sayısal çözüm bu bölgede, yüksek ağ sayılarına rağmen, deneysel verilerden %2 kadar sapmıştır. Sonuç olarak, gerek boyutsuz ayrılma bölgesi uzunluğu, gerekse basınç ve sürtünme katsayılarının değişimi göz önüne alındığında, Ağ-3 ile hemen hemen aynı sonuçları verdiği için, hesaplama altyapısı da göz önüne alındığında, Ağ-2 ile çalışmanın daha uygun olacağına karar verilmiş ve tüm çalışmalar Ağ-2 kullanılarak elde gerçekleştirilmiştir.

Bunların dışında, ayrıca üzerinde engel bulunmayan bir ters-basamak üzerindeki hız profillerinin değişimi de Ağ-2 kullanılarak sunulmuştur. Şekil 5'te görüldüğü üzere,  $0 < y/H < 1,5$  ve  $0 < x/H < 14$  arasındaki bölgede bu çalışmanın sonuçları ile Ref. [27] tarafından sunulmuş veriler oldukça uyum içerisindedirler.  $1,5 < y/H < 3,0$  arasındaki üst bölgede, bu çalışmanın sonuçları deneysel olarak elde edilenlerle birebir uyuşmamakta ise de, burası ayrılma bölgesi dışında

kalan bir bölge olduğundan ve bu nedenle nispeten daha seyrek ağ elemanı kullanıldığından dolayı, çalışmanın hedef bölgesi olmayıp, buraya ait veriler göz önüne alınmamıştır.

Bu çalışmada, hız-basınç bağlantısı için SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-Consistent) algoritması kullanılmıştır. SIMPLEC, SIMPLE algoritmasının geliştirilmiş bir üst versiyonu olup, yüksek gevşeme faktörleri için daha uygun sonuçlar sağlamaktadır. Basitlik ve sağlamış olduğu yüksek doğruluktan dolayı, kısmi diferansiyel denklemlerin ayrıştırılmasında ileri farklar yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada ikinci dereceden ileri farklar metodu kullanılmıştır. Ters basamak üzerindeki akışla ilgili denklemler olan süreklilik (Denklem 1) ve momentum denkleminin üç yöndeki bileşenleri (Eş. 2-Eş. 4) genel formda aşağıdaki gibi sunulmuşlardır [29].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) \quad (4)$$

Burada  $S_{My} = -\rho g$ ,  $y$ -yönündeki yerçekimi kuvvetini temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan  $k$ -omega ( $\omega$ ) türbülans modelindeki  $k$ , türbülansa kinetik enerjisini,  $\omega$  ise türbülans kinetik enerji yitimini göstermektedir.  $k$ -omega türbülans modelinin özellikle radyal jetler, karışım tabakaları ve çepelerle sınırlanmış akışlarda deneysel verilerle oldukça uyum içerisinde olduğu literatürde rapor edilmiştir [30]. Büyük çevri benzeşimine (LES) nazaran, RANS temelli çözümlerin deneysel verilerle genel olarak uyum içerisinde olmadığı literatürde belirtilmişse de, oldukça yüksek hafıza ve hızla sahip bilgisayarlar ve hesap zamanı gerektirdiğinden dolayı akademik ve endüstriyel problemlerin çözümünde henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Buna alternatif olarak görülen RANS temelli çözümlerin DNS ve LES karşısındaki eksikliklerini gidermek amacıyla, en azından belirli problemler için, RANS temelli orijinal türbülans modellerinin geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu türbülans modellerinden biri de, Eş. 5 ve Eş. 6'da verilen  $k$ -omega türbülans modelidir [31].

$$\rho \frac{\partial(k)}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan katsayılar ve değerleri şöyledir:  $\alpha=5/9$ ,  $\beta=3/40$ ,  $\beta^*=9/100$ ,  $\sigma=\sigma^*=1/2$  Kanallı girişindeki hız profiline tanımlanmasında Eş. 7'de verilen  $1/7$  üs kanunu kullanılmıştır.

$$\frac{u}{u_\infty} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \quad (7)$$

Burada  $u$ ,  $u_\infty$ ,  $\delta$  sırasıyla  $x$ -yönündeki hız bileşeni, serbest akış hızı ve hız sınırlı tabakası kalınlığını göstermektedir. Çepere yakın ve çepere uzak bölgelerdeki türbülans kinetik enerji dağılımları sırasıyla Eş. 8 ve Eş. 9 ile, türbülans kinetik enerjisi yitimi ise Eş. 10 göz önüne alınarak hesaplanmıştır [31, 32].

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (8)$$

$$k_{in} = \frac{3}{2} (u_\infty I)^2 \quad (9)$$

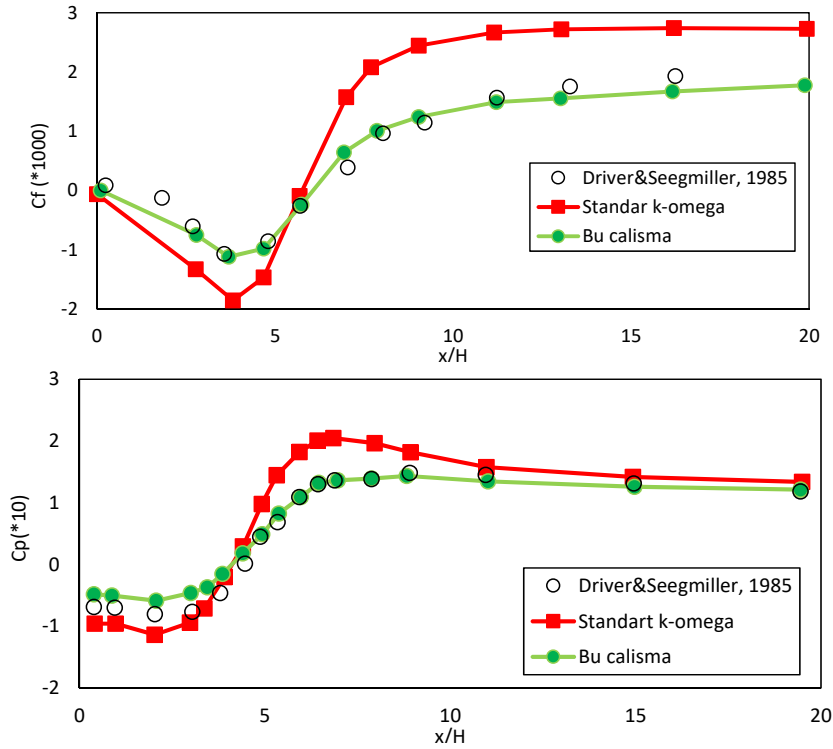
$$\omega = \frac{k^{1/2}}{(\beta^*)^{1/4} \kappa y} \quad (10)$$

Eş. 8'de  $u_\tau$  ve Eş. 9'da kullanılan  $I$ , sırasıyla, konvansiyonel sürtünme hızı ve türbülans kinetik enerjisi yoğunluğu olup,  $\beta^*=9/100$  ve  $\kappa=0,41$  ise sabitlerdir.

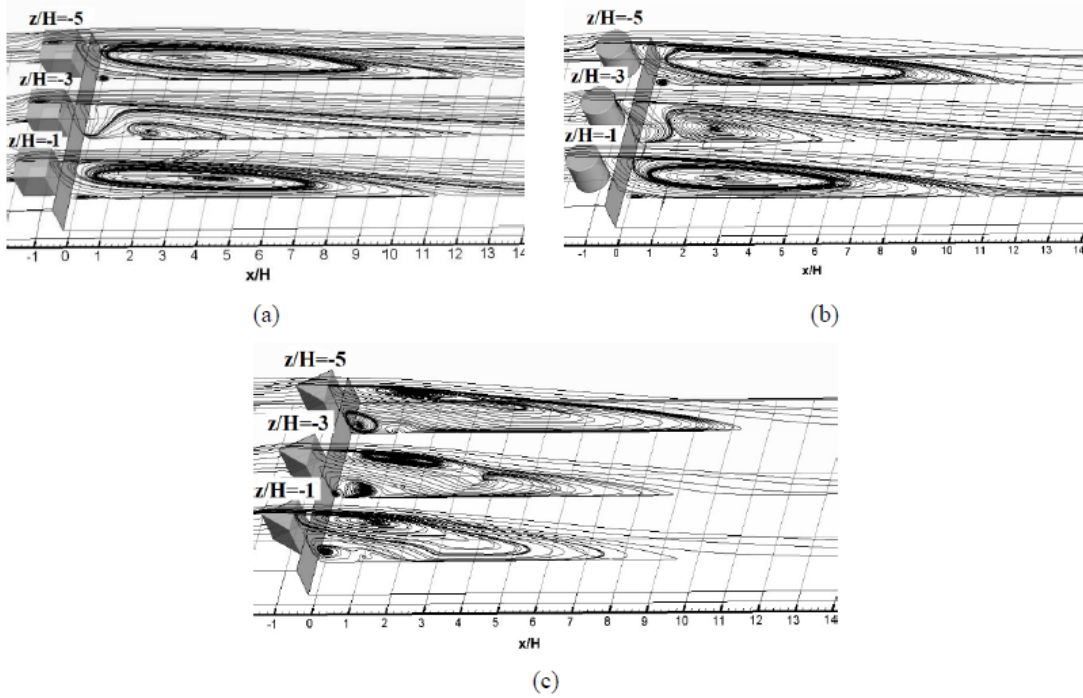
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Ters-basamak üzerindeki farklı kesit geometrilerine sahip cisimlerin akış üzerindeki etkilerini incelemeye önce,  $k$ -omega türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçların doğruluğu için referans [27] tarafından deneysel olarak elde edilen sürtünme ve basınç katsayılarının değişimleri ele alınmıştır. Bunun dışında, geliştirilmiş  $k$ -omega olarak adlandırılacak türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmanın, standart  $k$ -omega türbülans modelinden üstünlüğünü göstermek üzere, her iki türbülans modeliyle elde edilen veriler sunulmuştur. Şekil 6'da görüldüğü üzere, standart  $k$ -omega türbülans modeli ne sürtünme, ne de basınç katsayılarının dağılımını tahmin etmede başarılı olmaktadır. Çeper sürtünme katsayısı ( $C_f$ ) göz önüne alındığında  $x/H=6$ 'dan önce, basınç katsayısı ( $C_p$ ) değişimi dikkate alındığında ise  $x/H=4$ 'ten evvel deneysel verilerin altında değerler veren standart  $k$ -omega türbülans modeli, bu noktalardan itibaren, özellikle sürtünme katsayısının tahmininde, deneysel sonuçların oldukça üzerinde sonuçlar vermektedir. Basınç dağılımlarına bakıldığında, sürtünme katsayısının tahmininde olduğu kadar deneysel verilerden uzak sonuçlar vermese de, standart  $k$ -omega türbülans modelinin geliştirilmiş  $k$ -omega türbülans modelinin kullanıldığı bu çalışma kadar iyi sonuçlar veremediği görülmektedir. Bu nedenle, ileride verilecek olan ve üzerinde farklı geometrik şekillere sahip engeller konulan bir ters-basamak üzerindeki akışla ilgili sonuçların geliştirilmiş  $k$ -omega türbülans modeli kullanılarak elde edildiği not edilmelidir.

Çalışmanın daha önce gösterilen doğrulama işlemlerinden sonra, bir ters-basamak üzerine farklı geometrilere sahip cisimlerin yerleştirilmesinin klasik ters-basamak üzerindeki akıştan ne gibi farklılıklara sebep olabileceği ve bu cisimlerin varlığının akış üzerindeki etkilerinin incelenmesine geçilmiştir. Bu amaçla, kare, daire ve eşkenar üçgen kesitli engeller bir ters-basamak üzerine  $z$ -yönünde yan yana konumlandırılmışlardır. Daha önceki kısımlarda hakkında bilgiler verilen iki-boyutlu çalışma bölgesi kullanılmış ancak bu çalışmanın üç-boyutlu olması hedeflendiğinden dolayı daha önceki çalışma bölgesi  $z$ -yönünde  $12H$  kadar uzatılmıştır. Üç-boyutlu bu kanalın yan yüzeylerinin engellere olan mesafesi, basamak yüksekliğinin yarısı ( $H/2$ ) olacak şekilde engeller ters-basamak üzerine konumlandırılmışlardır. Kare, daire ve eşkenar üçgen kesitli engellere sahip üç-boyutlu ters-basamak üzerindeki akışta görülen akış ayrılması ve ayrılma bölgesi noktası Şekil 7'de  $z/H=-1$  (simetri eksenine en yakın),  $z/H=-3$  ve  $z/H=-5$  (çepere en yakın) istasyonları için gösterilmiştir. Cisimlerin farklı kesitlerinden dolayı sadece ayrılma bölgesi uzunluklarının değil, aynı zamanda ters-basamak alt



**Şekil 6.** Sürtünme,  $C_f$  (üst) ve basınç katsayılarının,  $C_p$  (alt) deneysel verilerle Ref.[27] mukayesesi (Friction,  $C_f$  (top) and pressure coefficients,  $C_p$  (bottom) comparisons with the experimental data of Ref. [27])



**Şekil 7.** Üzerinde kare (a), daire (b) ve eşkenar üçgen kesitli engel (c) bulunan ters-basamak üzerindeki akım çizgileri (Streamlines over the backward-facing step with a) square, b) circular and c) triangular obstacles)

köşesinde oluşan ikincil baloncukların büyüklüklerinin de birbirlerinden farklı oldukları görülmektedir. Engellerin şeklinden bağımsız olarak, kanalın yan yüzeyine en yakın cisimden sonra oluşan ayrılma bölgesi, simetri eksenine en yakın olan cisimden sonra oluşan ayrılma bölgesinden daha

uzundur. Üç farklı geometri arasında en kısa ve en uzun ayrılma bölgesine sahip olanların kare ve eşkenar üçgen kesitli engeller olduğu görülmektedir. Eşkenar üçgen kesitli engelden sonra ters-basamağın köşesinde oluşan ikincil baloncuk ölçek olarak daha büyük olmaktadır.



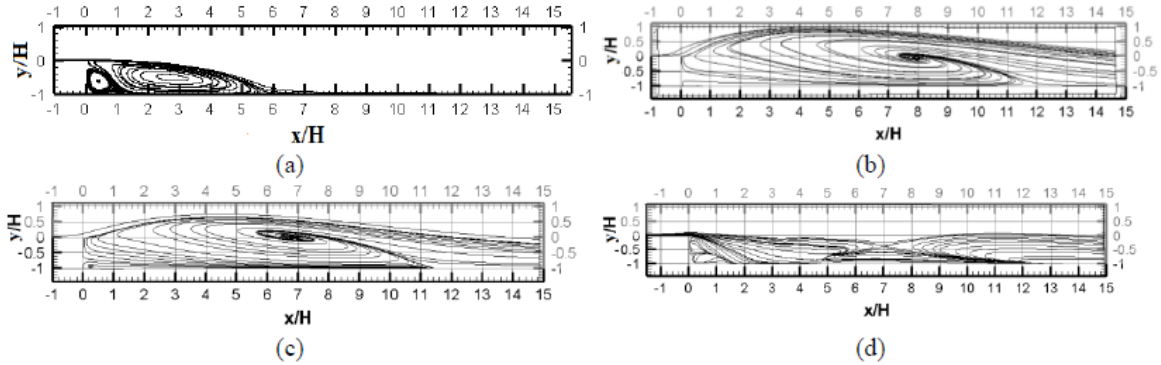
Şekil 8’de kanalın simetri hattındaki (xy-düzlemi) akış çizgileri hem klasik ters basamak, hem de üzerinde farklı geometrilere sahip engellerin olduğu ters-basamak üzerindeki akış için gösterilmiştir. Üzerinde herhangi bir engel olmayan ters-basamak üzerindeki akışla karşılaştırıldığında, ters-basamak üzerinde herhangi bir geometriye sahip engel bulunduğu oluşan ayrılma bölgesi uzunluğu, üzerinde engel olmayan ters-basamak üzerindeki akış durumunda oluşan ayrılma bölgesi uzunluğunun hemen hemen iki katı olmaktadır. Ters-basamak üzerinde kare ve daire kesitli engel bulunduğu oluşan ayrılma bölgesi uzunluğu yaklaşık olarak aynı olurken, eşkenar üçgen kesitli engel varken oluşan ayrılma bölgesi uzunluğu daha kısa olmaktadır.

Akışta görülen birincil ve ikincil ayrılmış akış bölgelerinin z-yönündeki değişimleri her bir farklı engel için Şekil 9’da  $z/H=-3$ ,  $-2,5$  ve  $-2$  düzlemlerinde sunulmuşlardır.  $z/H=-3$  engel ortasından geçen kesit olup,  $z/H=-2,5$  düzlemi engelin kenarından,  $z/H=-2$  ise iki engel arasındaki boşluktan geçmektedir. Aynı geometri için farklı  $z/H$  kesitlerine dikkat edildiğinde, akış engeller üzerinden ters-basamak üzerine düştüğünde ( $z/H=-3$ ), düşey yüksekliğin büyük olmasından dolayı daha uzun bir mesafeden sonra alt yüzeye tutunmaktadır. Ancak, mesafeler arasındaki boşluktan akış

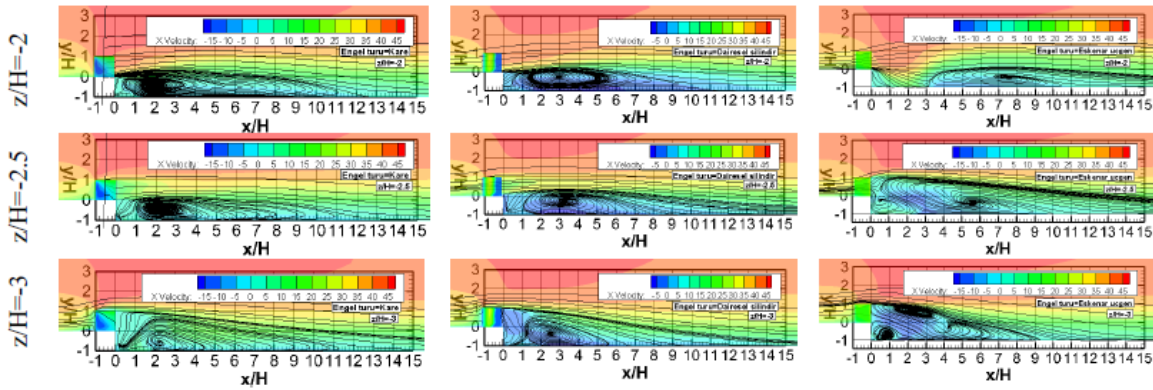
olması durumunda, klasik bir ters-basamak akışı gibi davranmakta ve kısa ayrılma bölgesine neden olmaktadır.

Akış yapılarının yatay düzlemdeki gelişimi için ters-basamak üst kösesinden basamak yüksekliğinin yarısı kadar yukarıdan ( $y/H=0,5$ ) ve aşağıdan ( $y/H=0,5$ ) kesitler alınarak akış yapıları incelendiğinde, ters-basamağın  $0,5H$  kadar ustu ile  $0,5H$  kadar aşağısı arasında birbirlerinden oldukça farklı akış yapılarının meydana geldiği görülebilir (Şekil 10).  $y/H=0,5$  düzlemindeki akış yapıları, literatürdeki klasik köşeli katı cisimler etrafındaki gibidir. Akış, engellerin köşelerinden ayrılmakta ve cisim ardında ve akış yönünde iz bölgelerinin oluşumuna neden olmaktadır. Engellerin farklı geometrik şekillerinden dolayı, oluşan iz bölgesinin yapısı ve uzunluğu farklıdır. Ters-basamaktan itibaren ters-basamak yüksekliğinin yarısı kadar ( $H/2$ ) kadar aşağı inildiğinde ise akış yapılarının kararsızlığından ve engellerin şekillerinin birbirlerinden farklı olmasından dolayı, oldukça farklı karakterdeki yapılar oluşmaktadır.(Şekil 10)

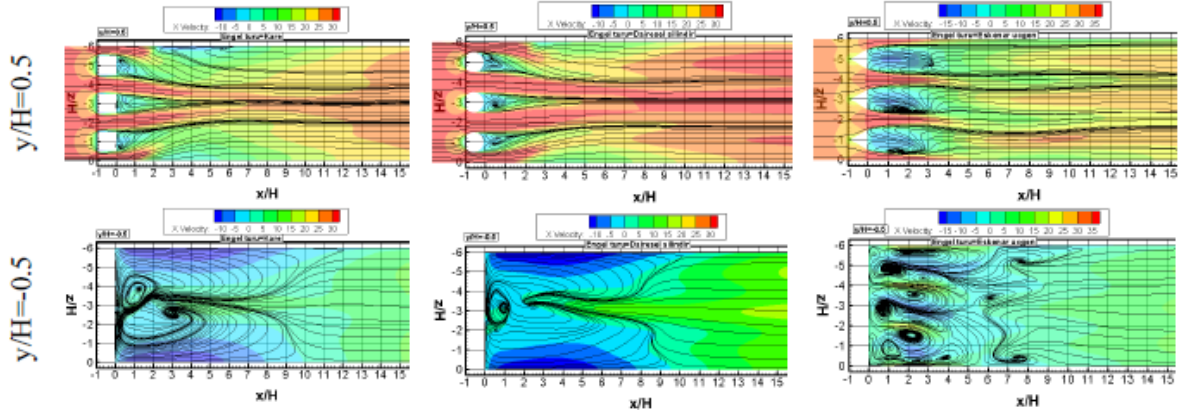
Şekil 11’de üzerinde farklı geometrik şekillere sahip engeller bulunan ters-basamak üzerindeki akışa ait çeper sürtünme ( $C_f$ ) ve basınç katsayıları ( $C_p$ ) dağılımları simetri eksenini olan  $z/H=0$  için gösterilmektedir. Çeper sürtünme katsayılarının ters-basamak üzerinde daire ve kare kesitli engeller



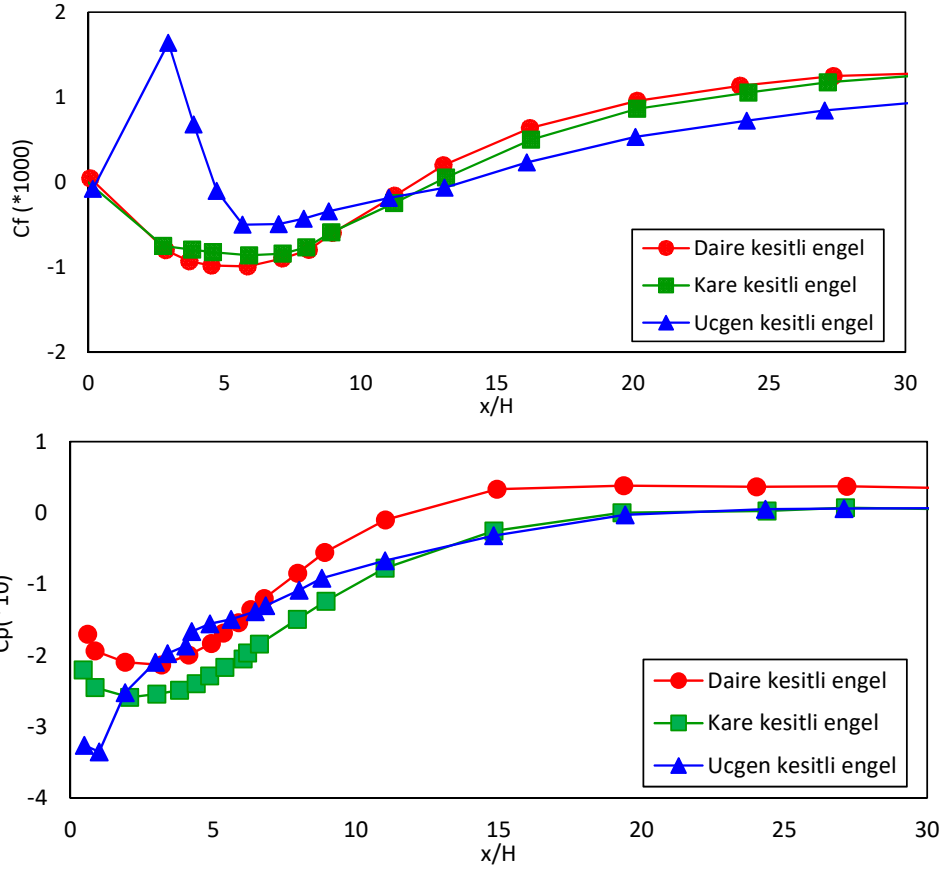
Şekil 8. Üzerinde engel bulunmayan (a), kare kesitli engel bulunan (b), daire kesitli engel bulunan (c) ve eşkenar üçgen kesitli engel bulunan (d) ters basamak üzerinde simetri hattındaki ( $z/H=0$ ) akım çizgileri (Streamlines over the BFS a) without obstacle and with b) square, c) circular, d) equilateral triangular cross-sectional obstacles at symmetry axis ( $z/H=0$ )



Şekil 9. Üzerinde kare (sol sütun), daire (orta sütun) ve eşkenar üçgen (sağ sütun) kesitli engeller bulunan ters-basamak üzerindeki akış yapılarının farklı  $z/H$  düzlemlerindeki değişimi (The change of flow structures at different  $z/H$  planes on the backward-facing step with square (a), circular (b) and equilateral triangle (c) cross-sectional obstacles)



**Şekil 10.** Üzerinde kare (sol sütun), daire (orta sütun) ve eşkenar üçgen (sağ sütun) kesitli engeller bulunan ters-basamak üzerindeki akış yapılarının farklı  $y/H$  düzlemlerindeki değişimi (The change of flow structures at different  $y/H$  planes on the backward-facing step with square (a), circular (b) and equilateral triangle (c) cross-sectional obstacles)



**Şekil 11.** Çeşitli geometrilere sahip engeller içeren ters-basamak üzerindeki akışa ait çeper sürtünme (üst) ve basınç katsayılarının (orta) dağılımları

(Skin friction (top) and pressure coefficients (bottom) distributions for flow over BFS with obstacles in various geometries)

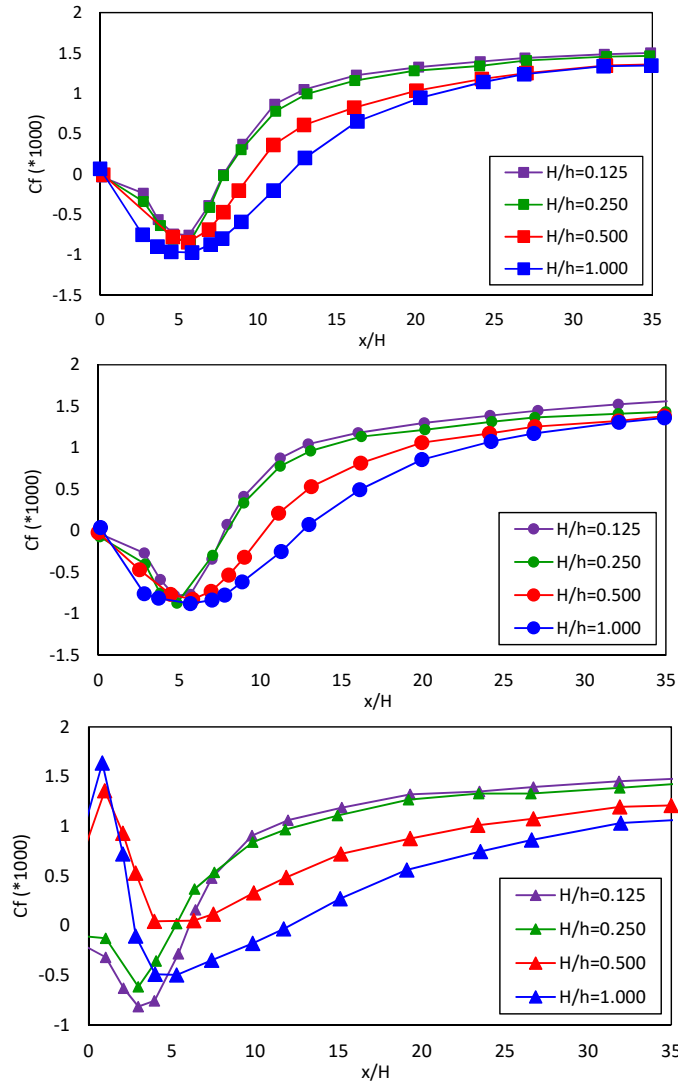
kullanıldığında hemen hemen aynı dağılımları verdiği dikkat edilmelidir. Ancak, diğer iki engelde görüldüğünün aksine, eşkenar üçgen kesitli engel kullanıldığında elde edilen çeper sürtünme katsayısı dağılımı oldukça farklı olup,  $x/H=4,6$ 'ya kadar pozitifdir. Engellerin geometrik şekillerinden bağımsız olarak, ayrılmanın başladığı basamak sonrasındaki noktada, özellikle alt çeper üzerinde, akışkanın viskozitesinin kayma gerilmelerine sebep olması ve bunun

etkilerinin momentumun minimum olduğu çepere yakın bölgede oldukça kuvvetli olmasından dolayı ters basınç gradyenleri oluşmaktadır. Ayrılma bölgesi uzunluğu, basamak ile çeper sürtünme katsayısının negatiften pozitif değerlere doğru değiştiği nokta arasındaki uzunluğu olarak tanımlandığından dolayı, çeper sürtünme katsayısının dağılımı, ayrılma bölgesi uzunluğunun belirlenmesinde büyük öneme sahiptir. Silindirik kesitli engel içeren ters-

basamaktan sonraki akışa ait basınç katsayısı dağılımı, silindirik kesitli engel içeren durumda diğerlerine nazaran daha yüksek ise de, genel olarak farklı geometrilere sahip tüm engellere ait basınç dağılımları birbirlerine benzer şekilde değişmektedirler. Her üç vakada da, basınç katsayıları tekrar tutunma noktasından sonra artmaktadır. Çalışma bölgesinin içerisinde statik basınç değişiminin sebebinin akım çizgilerinin eğriliklerinden ve türbülans yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Tekrar tutunma noktasından uzak bölgelerde türbülans etkilerinin değişimlerin çoğunun sebebi olduğu referans [11] tarafından ifade edilmiştir. Eşkenar üçgen kesitli engel var iken, basınç katsayısının ters-basamak ardında ani olarak azaldığı ve minimum değere ulaştığı ancak kare ve daire kesitli engeller kullanıldığında ise ters-basamaktan evvel yüksek basınç bölgelerinin oluştuğu gözlenmektedir.

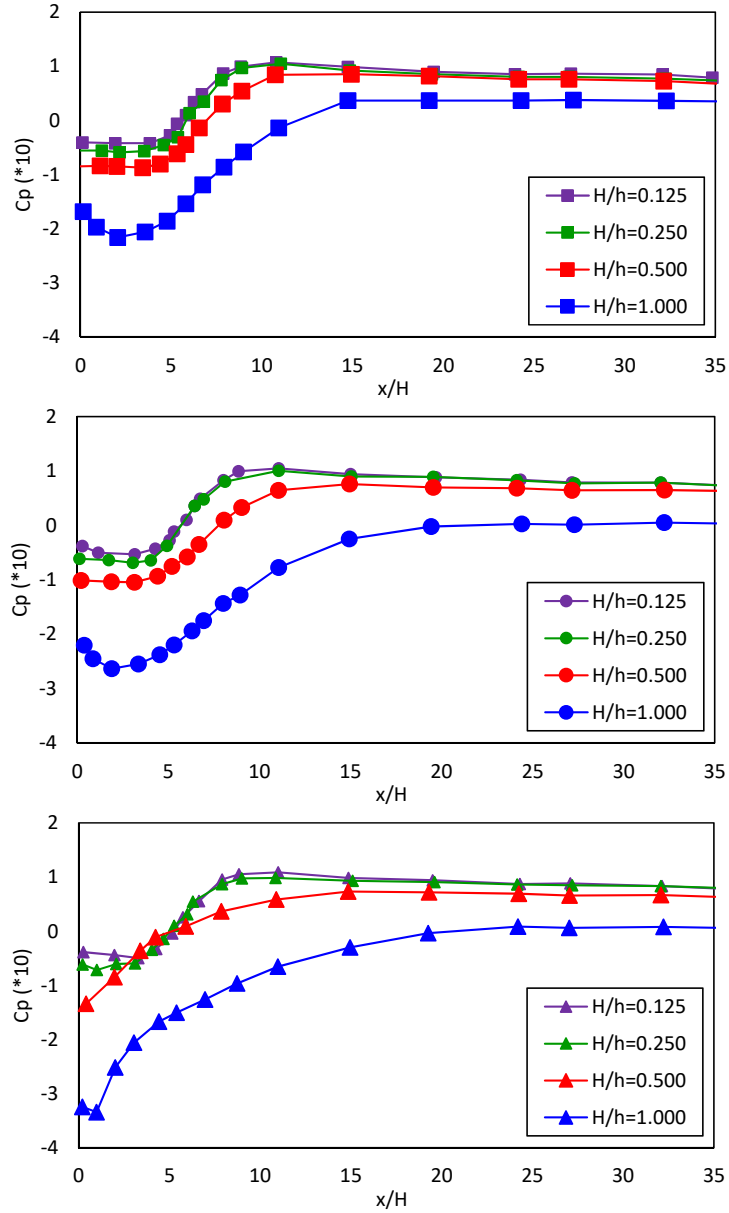
Basınç katsayılarının dağılımına benzer bir korelasyon Şekil 12'da farklı engel yükseklikleri için elde edilen çeper

sürtünme katsayıları için elde edilmiştir. Engel yüksekliğinin azaltılmasıyla, ters-basamaktan sonraki kanal boyunca daha yüksek basınç katsayısı değerlerinin oluştuğu dikkat çekmektedir. Engellerin sahip olduğu şekillerin basınç katsayısının değişimi üzerinde etkileri -eşkenar üçgen kesitli engelin  $H/h=1$  olması hariç- her bir durum için benzerdir. Engellerin yüksekliklerinin  $H/h=1$ 'den  $H/h=0,5$ 'e ve daha sonra  $H/h=0,25$ 'e düşürülmesi, basınç katsayısı değerlerinin bir önceki engel yüksekliğinde elde edilene nazaran önemli miktarda artmasına sebep olmasına rağmen, engel yüksekliğinin  $H/h=0,25$ 'ten  $H/h=0,125$ 'e düşürülmesinin çeper sürtünme katsayısı değişimi üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Daha önce de ifade edildiği üzere, ayrılma bölgesi uzunluğu, basamak ile akışın tekrar tutunma noktası arasındaki mesafe olarak tarif edilmektedir, bu nedenle değeri, alt çeper üzerindeki sürtünme katsayısının sıfır olduğu yerler göz önüne alınarak saptanabilir. Sunulan grafiklere göre, engellerin kesit şekli fark etmeksizin, engellerin yüksekliği arttırıldıkça daha uzun devridaim



Şekil 12. Kare (üst), daire (orta) ve eşkenar üçgen kesitli engel (alt) kullanılması durumunda elde edilen çeper sürtünme katsayı dağılımları

(Distribution of friction coefficients for the square (top), circular (middle) and triangular (bottom) cross-sectional obstacles)



**Şekil 13.** Farklı engel yüksekliklerinin kare (üst), daire (orta) ve eşkenar üçgen (alt) kesitli engeller üzerindeki basınç katsayısı değişimleri (Distribution of pressure coefficients for the square (top), circular (middle) and triangular (bottom) cross-sectional obstacles)

bölgeleri oluşmaktadır. Ancak,  $H/h=0,25$  ile  $H/h=0,125$  yüksekliklerinin aynı uzunluktaki devridaim bölgesine sebep olduklarına dikkat edilmelidir. Bunun sebebi,  $H/h=0,25$ 'ten küçük engel yüksekliklerinin devridaim uzunluğu üzerinde etkisinin az olmasıdır.

Engel yüksekliklerinin basınç katsayısının değişimi üzerindeki etkileri Şekil 13'te gösterilmektedir. En düşük basınç değerleri,  $H/h=1$  yüksekliğindeki eşkenar üçgen engel kullanıldığında elde edilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, bir ters-basamak üzerine konumlandırılmış kare, daire ve eşkenar üçgen kesitli engellerin akış

karakteristikleri üzerine olan etkileri üç-boyutlu ve daimi olarak incelenmiştir. Ters-basamak üzerindeki akışın tahmini için üzerinde bazı değişiklikler yapılmış standart  $k-\omega$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bunun için, kullanıcı tarafından tanımlanmış bir takım fonksiyonlar kullanılarak giriş hızı, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans kinetik enerjisi yitimi tanımlanmıştır. Bu düzenlemelerin ardından, çeper sürtünme ve basınç katsayılarının değişimlerinin literatürde sunulan verilerle oldukça uyum içinde olmaları sağlanmıştır. Yapılan analizlerde, üzerinde bir takım düzenlemeler yapılmış  $k-\omega$  türbülans modelinin, ayrılma bölgesi uzunluğunun tahmininde, standart  $k-\omega$  türbülans modeline nazaran %6'lık bir iyileştirme sağladığı görülmüştür. Ters-basamak üzerine konumlandırılmış engellerin akım üzerindeki etkileri alt çeper boyunca

sürtünme ve basınç katsayılarının değişimleri cinsinden gösterilmiş ve engellerin varlığının ayrılma bölgesinin uzunluğunu arttırdığı saptanmıştır. Kare, dairesel ve eşkenar üçgen kesitli engeller içerisinde, en uzun ayrılma bölgesi uzunluğuna sebep olanın eşkenar üçgen kesitli engel olduğu görülmüştür. Bunun dışında, ters-basamaktan sonra akışın oldukça karmaşık bir hal aldığı, bazı durumlarda zıt-dönümlü girdap çiftinin oluşmasına yol açığı ve engelin şekline bağlı olarak olmak üzere engellerin yüksekliklerinin değiştirilmesiyle, ayrılma bölgesinin uzunluğunun değiştiği gösterilmiştir. Engel yüksekliği ile ayrılmış akış bölgesinin büyüklüğü arasında doğrusal bir ilişki olduğu,  $H/h=0, 25^\circ$  ten sonra engel yüksekliğinin etkisini yitirdiği ortaya konulmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., Schönung, B., Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, *J. Fluid Mech.*, 127, 473-496, 1983.
2. Nie, J.H., Armaly, B.F., Three-dimensional convective flow adjacent to backward-facing step-effects of step height, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 45, 2431-2438, 2002.
3. Xie, W.A., Xi, G.N., Fluid flow and heat transfer characteristics of separation and reattachment flow over a backward-facing step, *Int. J. Refrig.*, 74, 177-189, 2017.
4. Xie, W.A., Xi, G.N., Geometry effect o flow fluctuation and heat transfer in unsteady forced convection over backward and forward facing steps, *Energy*, 132, 49-56, 2017.
5. Kondoh, T., Nagano, Y., Tsuji, T., Computational study of laminar heat transfer downstream of a backward-facing step, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 36, 577-591, 2017.
6. Xu, J.H., Zou, S., Inaoka, K., Xi, G.N., Effect of Reynolds number on flow and heat transfer in incompressible forced convection over a 3D backward-facing step, *Int. J. Refrig.*, 79, 164-175, 2017.
7. Iwai, H., Nakabe, K., Suzuki, K., Flow and heat transfer characteristics of backward-facing step laminar flow in a rectangular duct, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 43, 457-471, 2000.
8. Nie, J.H., Armaly, B.F., Reverse flow regions in three-dimensional backward-facing step flow, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 4, 4713-4720, 2004.
9. Mushyam, A., Bergada, J.M., Nayeri, C.N., A numerical investigation of laminar flow over a backward facing inclined step, *Meccanica*, 51, 1739-1762, 2016.
10. Chen, Y.T., Nie, J.H., Armaly, B.F., Hsieh, H.T., Turbulent separated convection flow adjacent to backward-facing step-effects of step height, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 49, 3670-3680, 2006.
11. Essel, E.E., Tachie, M.F., Roughness effects on turbulent flow downstream of a backward facing step, *Flow Turbulence Combust.*, 94, 125-153, 2015.
12. Bayraktar, S., Numerical solution of three-dimensional flow over angled backward-facing step with raised upper wall, *J. Appl. Fluid Mech.*, 7, 155-167, 2014.
13. Chiang, T.P., Sheu, T.W.H., Fang, C.C., Numerical investigation of vortical evolution in a backward-facing step expansion flow, *Appl. Math. Model*, 23, 915-932, 1999.
14. Davidson, L., Two-equation hybrid RANS-LES models: A novel way to treat  $k$  and  $\omega$  at inlets and at embedded interfaces, *J. Turbul.*, 18(4), 291-315, 2017.
15. Avancha, R.V.R., Pletcher, R.H., Large eddy simulation of the turbulent flow past a backward-facing step with heat transfer and property variations, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 23, 601-614, 2002.
16. Rouizi, Y., Favennec, Y., Ventura, J., Petit, D., Numerical model reduction of 2d steady incompressible laminar flows: application on the flow over a backward-facing step, *J. Comput. Phys.*, 228, 2239-2255, 2009.
17. Erturk, E., Numerical solutions of 2-D steady incompressible flow over a backward-facing step, part i: high Reynolds number solutions, *Comput. Fluids*, 37, 633-655, 2008.
18. Kim, J.Y., Ghajar, A.J., Tang, C., Foutch, G.L., Comparison of near-wall treatment methods for high Reynolds number backward-facing step flow, *Int. J. Comput Fluid D.*, 19, 493-500, 2005.
19. Speziale, C.G., Ngo, T., Numerical solution of turbulent flow past a backward facing step using a nonlinear k- $\epsilon$  model, *Int. J. Eng. Sci.*, 26, 1099-1112, 1988.
20. Valencia, A., Hinojosa, L., Numerical solutions of pulsating flow and heat transfer characteristics in a channel with a backward-facing step, *Heat Mass Transfer*, 32, 143-148, 1997.
21. Huang, R., Luo, X., Ji, B., Ji, Q., Turbulent flows over a backward-facing step simulated using a modified partially averaged Navier-Stokes model, *J. Fluid Eng.*, 139, 044501-1/044501-7, 2017.
22. Girimaji, S.S., Abdol-Hamid, K.S., Partially-averaged Navier-Stokes model for turbulence: implementation and validation, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, Jan. 10-13, 2005.
23. Huang, R., Luo, X., Ji, B., Ji, Q., Turbulent flows over a backward facing step simulated using a modified partially averaged Navier-Stokes model, *J. Fluid Eng.*, 139 (4), 044501, 2017.
24. Wilcox, D.C., Formulation of k- $\omega$  turbulence model revisited, *AIAA Journal*, 46, 2823-2838, 2008.
25. Menter, F.R., Improved two equation k- $\omega$  turbulence models for aerodynamic flows, NASA Technical Memorandum 103975, 1992.
26. Shih, T.H., Zhu, J., Lumley, J.L., A realizable Reynolds stress algebraic equation model, NASA Technical Memorandum 105993, 1993.
27. Driver, D.M., Seegmiller, H.L., Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow, *AIAA Journal* 23, 163-171, 1985.
28. P.J. Celik, I.B., Ghia, U., Roache, Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in (CFD) applications, *J. Fluids*, 130, 2008.

29. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method, Pearson Education Ltd, Harlow, 2007.
30. Rumsey, C.L., Compressibility considerations for  $k-\omega$  turbulence models in hypersonic boundary-layer applications, *J. Spacecraft Rockets*, 47(1), 11-20, 2010.
31. Wilcox, D.W., Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, La Canada, Kanada, 1994.
32. Naphon, P., Suwagari, J., Effect of curvature ratios on the heat transfer and flow developments in the horizontal spirally coiled tubes, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 50, 444-451, 2007.