



A comparison of RANS-based turbulence modeling and PIV experiments for flow over a simplified road vehicle

Muharrem Hilmi Aksoy^{1*}, Abdulkirim Okbaz², Sercan Yağmur¹, Sercan Doğan¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, 42025, Konya, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Dogus University, 34775, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Experimental and numerical investigation of turbulent flow characteristics around a simplified road vehicle
- Different slant angles ($\Theta=15^\circ$, 25° and 35°) are investigated
- The realizable k- ϵ , RNG k- ϵ , and SST k- ω turbulence models are used

Keywords:

- Ahmed Body
- CFD
- PIV
- Simplified road vehicle
- Flow characteristics

Article Info:

Research Article

Received: 07.12.2021

Accepted: 23.06.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1033775

Acknowledgement:

The authors thank Konya Technical University Faculty of Engineering and Natural Sciences for providing laboratory facilities for experimental studies.

Correspondence:

Author: Muharrem Hilmi Aksoy
e-mail: mhaksoy@ktun.edu.tr
phone: +90 555 202 7321

Graphical/Tabular Abstract

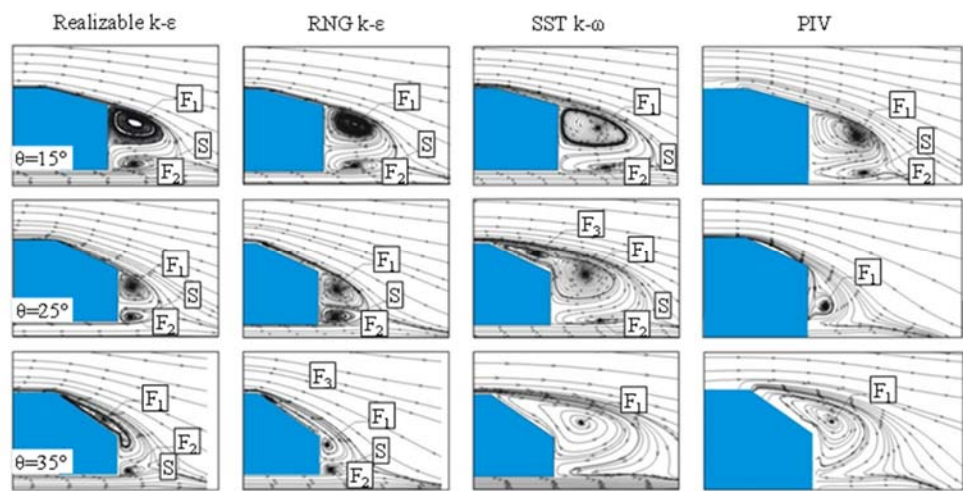


Figure A. Numerical and experimental results of the time-averaged streamline topology with different slant angles

Purpose:

This study compares a simplified car model's numerical and experimental result with different slant angles by PIV and CFD (Figure A)

Theory and Methods:

The freestream velocity on the numerical simulations and PIV measurements was 0.2 m/s, and the Reynolds number defined by the characteristic length of the Ahmed body was 4.18×10^4 . The realizable k- ϵ , RNG k- ϵ , and SST k- ω turbulence models were used. The PIV was used to visualize the flow and to obtain the instantaneous and time-averaged velocity measurements.

Results:

The effect of the back tilt angle $\theta=15^\circ$, 25° , and 35° on the flow characteristics downstream of the wake area of the Ahmed body was studied experimentally and compared with the CFD results. It can be seen that the flow separation point changes with the increasing slant angle. It is evident from SST k- ω , and PIV results that the flow separation from Ahmed body surface occurs at the lower side of the slant surface at $\Theta=15^\circ$, whereas at $\Theta=25^\circ$ and $\Theta=35^\circ$ the separation point shifts upwards and occurs at the upper edge of slant surface. For the results of the realizable k- ϵ and the RNG k- ϵ models, the separation point shifts upwards at the upper edge at $\Theta=35^\circ$. The SST k- ω model predicts the flow separation region in agreement with the experimental results for the cases of $\Theta=15^\circ$ and $\Theta=35^\circ$.

Conclusion:

The flow separation from Ahmed body surface occurs at the lower side of the slant surface at $\Theta=15^\circ$, whereas at $\Theta=25^\circ$ and $\Theta=35^\circ$, the separation point shifts upwards and occurs at the upper edge of the slant surface. Therefore, it is also concluded that the most proper slant angle for aerodynamic and hydrodynamic application flow structure angle is 25° as it has the lowest wake region according to experimental results. Moreover, the pressure drag is around 90% of the total drag and mainly increases with the increasing slant angles.



Basitleştirilmiş bir karayolu taşıtı üzerindeki akış için RANS tabanlı türbülans modellemesi ve PIV deneylerinin karşılaştırılması

Muharrem Hilmi Aksoy^{1*}, Abdulkemim Okbaz², Sercan Yağmur¹, Sercan Doğan¹

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42025, Konya, Türkiye

²Doğuş Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34775, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Basitleştirilmiş bir karayolu taşıtının etrafındaki türbülanslı akış özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi
- Farklı eğim açıları ($\Theta=15^\circ, 25^\circ$ ve 35°) incelenmiştir
- Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.12.2021

Kabul: 23.06.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1033775

Anahtar Kelimeler:

Ahmed modeli,
PIV,
hesaplamalı akışkanlar
dinamiği,
akış karakteristiği

ÖZ

Karayolu taşıtları ve etrafında meydana gelen akış yapıları üzerindeki aerodinamik kuvvetler, akışkan ve yapı arasındaki etkileşimlerin bir sonucudur. Ahmed modeli, gerçek boyutlu kara taşıtlarının etrafındaki akışı ortaya çıkarmak için oluşturulan basitleştirilmiş bir araç modelidir. Bu çalışmada, Ahmed modelinin arka kısmında farklı eğim açıları ($\Theta=15^\circ, 25^\circ$ ve 35°) ile tasarlanan modeller için oluşan akış yapısı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme Tekniği (PIV) ile bir su kanalında gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ve deneysel ölçümler için serbest akış hızı 0,2 m/s olarak ayarlanmıştır ve Ahmed modelinin karakteristik uzunluğu ile tanımlanan Reynolds sayısı $4,18 \times 10^4$ olarak hesaplanmıştır. Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ ve SST k- ω olmak üzere üç farklı türbülans modeli kullanılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneylerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, zaman ortalamalı hız vektörleri ve hız konturları, akım çizgisi topolojisi, girdap ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) gibi farklı akış özellikleri ile sunulmuştur. Deneylere en yakın sonuçlar, Ahmed modelinin tüm eğim açıları için SST k- ω türbülans modeli ile elde edilmiştir. Ayrıca, SST k- ω türbülans modeli ile analiz edilen tüm eğim açıları için sürükleme katsayısı 0,37 civarında bulunmuştur ve bu değer literatürdeki sonuçlara da yakındır.

A comparison of RANS-based turbulence modeling and PIV experiments for flow over a simplified road vehicle

HIGHLIGHTS

- Experimental and numerical investigation of turbulent flow characteristics around a simplified road vehicle
- Different slant angles ($\Theta=15^\circ, 25^\circ$ and 35°) are investigated
- The realizable k- ϵ , RNG k- ϵ , and SST k- ω turbulence models are used

Article Info

Research Article

Received: 07.12.2021

Accepted: 23.06.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1033775

Keywords:

Ahmed Body,
CFD,
PIV,
simplified road vehicle,
flow characteristics

ABSTRACT

The aerodynamic forces on road vehicles and flow structures around them result from complex interactions between fluid and structure. Ahmed body is a simplified car model created to demonstrate and simplify the flow around real-size ground vehicles. In this study, the flow structure on the wake region of Ahmed body with different slant angles ($\Theta=15^\circ, 25^\circ$, and 35°) was investigated. Experimental studies were conducted in a water channel by Particle Image Velocimetry (PIV). The freestream velocity was set to 0.2 m/s, and the Reynolds number defined by the characteristic length of the Ahmed body was 4.16×10^4 for Computational Fluid Dynamics (CFD) and PIV experiments. CFD simulations were performed using three different turbulence models: realizable k- ϵ , RNG k- ϵ , and SST k- ω , and the results were compared to experiments. The results are presented with different flow features such as time-averaged velocity vectors and velocity contours, streamline topology, vorticity, and Turbulence Kinetic Energy. The closest results to the experiments were obtained by the SST k- ω turbulence model for all slant angles of the Ahmed body. In addition, the drag coefficient is found to be 0.37 for all slant angles analyzed by SST k- ω turbulence models, which are also close to the results in the literature.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *maksoy@ktun.edu.tr, aokbaz@dogus.edu.tr, syagmur@ktun.edu.tr, sercandogan@ktun.edu.tr / Tel: +90 555 202 7321

1. Giriş (Introduction)

Ahmed modeli, gerçek boyutlu araçların etrafındaki akışı ortaya çıkarmak için ilk kez 1984 yılında oluşturulan basitleştirilmiş bir araç modelidir [1]. Akış bilgisi kullanılarak akışın araç yüzeyini takip edebilme özelliğini artıracak tasarımlar ile sürüklenme kuvveti oldukça azaltılabilir. Bu nedenle araç etrafındaki akış yapısının bilinmesi oldukça önem arz etmektedir [2]. Araç etrafındaki akışın anlaşılması deneysel ve sayısal birçok araştırmaya konu olmuştur. Araç benzeri küt cisimlerin etrafındaki dış akışın ilk araştırmaları Ahmed vd. [1] tarafından yapılmıştır. Yaptıkları araştırmalarda temel amaç, küt cismin arkasındaki art izi bölgesini analiz edip temel akış karakteristiklerini ortaya koymaktır. Rüzgâr tüneline gerçekleştirildikleri deneyde, basınç direncinin varsayıldığı gibi toplam sürüklenme direncinin %85'i kadar önemli bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamışlardır. Ayrıca, sürüklenme direncinin büyük çoğunluğu cismin arka kısmında ortaya çıkarken eğim açısının önemini de vurgulamışlardır. Thacker vd. [3], Ahmed modelinin etrafındaki akış yapısı ile ilgili araştırmaları daha da genişletmiştir. İki farklı model etrafındaki akışı araştırmışlardır. İlk model, keskin kenarla 25°'lik bir arka eğim açısında ve diğer model, üst taraf ile aynı arka eğim açısına sahip eğimli yüzey arasında yuvarlak bir kenarı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tunay vd. [4] Ahmed modelinin akış özelliklerini bir su tüneline PIV yöntemi ile deneysel olarak incelemiştir. Eğim açılarının akış yapısı üzerindeki etkilerini zaman ortalamalı akış özelliklerini dikkate alarak araştırmışlardır. Çalışmalarında Reynolds sayısını $1,48 \times 10^4$ olarak hesaplamışlardır ve eğim açıları Ahmet vd. 'nin [1] belirtmiş olduğu kritik eğim açıları olan 25°, 30° ve 35° olarak almışlardır. Çalışmada eğim açısının artmasının, akışın kritik noktalarına (üç kritik nokta tanımlanmıştır) büyük etkisi olduğu, iz

boyutunu arttırdığı ve kritik noktaları aşağı akım yönünde ileri taşıdığı belirtilmiştir. Daimi olmayan akış sonuçlarına göre eğim açılarna bağlı olarak farklı yapılarda girdaplar oluştuğunu rapor etmişlerdir. Meile vd. [5] sapma koşulları altında Ahmed modeli etrafındaki akışı deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler, 25° ve 35° eğim açısı ve birçok Reynolds sayısı için gerçekleştirilmiştir. Sapma hareketinin zamana bağlı olarak sürüklenme kuvveti üzerinde önemli derecede etkileri olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, farklı eğim açıları için bazı deneysel sonuçların özeti Tablo 1'de, yapılan bazı sayısal çalışmaların karşılaştırılması ise Tablo 2'de verilmiştir.

Bello-Millán vd. [6] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmanın sonuçlarını literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Akış modellerinin mevcut araştırılmasına ek olarak, sürüklenme katsayısı ile sapma açısı arasındaki bağımlılığı da incelemiştir. Artan Reynolds sayısı ile sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin parabolik olarak büyüdüğünü tespit etmişlerdir. Ancak, yanal kuvvetlerin neredeyse stabil kaldığını rapor etmişlerdir. Sürüklenme katsayısı ile yalpa açısı arasındaki ilişkiyi ortaya koyup artan yalpa açısı ile sürüklenme katsayısının da arttığını belirtmişlerdir.

Son yıllarda gelişen teknoloji ile yüksek hesaplama kapasitesine sahip bilgisayarlar HAD yaklaşımının etkin olarak kullanılabilmesini sağlamış ve böylece mühendislik aktivitelerinde zaman ve proses maliyetleri oldukça düşmüştür [7, 8]. Parameswaran vd. [9] bir küt cisim etrafındaki dış akışın analiz çalışmalarını nispeten kaba bir ağ yapısı ile gerçekleştirip deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır ve akış yapıları açısından benzer sonuçlar aldıklarını rapor etmişlerdir. Ancak, yeterli olmayan ağ sayısından dolayı analizlerden elde edilen sürüklenme katsayıları deneylerle uyumlu olmamıştır. Chok vd. [10]

Tablo 1. Farklı eğim açıları için deneysel sonuçların karşılaştırılması
(A summary of some experimental results for different slant angles)

Çalışma	Eğim açısı (°)	Tünel türü	Yöntem	Reynolds sayısı	Sürüklenme katsayısı
Ahmed vd. [1]	0°, 5°, 10°, 12,5°, 15°, 20°, 25°	Rüzgâr	-	$1,2 \times 10^6$	0,287 ($\Theta = 25^\circ$)
Thacker vd. [3]	25°	Rüzgâr	PIV	$3,9-7,7 \times 10^5$	0,38
Tunay vd. [4]	25°, 30°, 35°	Su	PIV	$1,48 \times 10^4$	-
Bello-Millán vd. [6]	25°	Su	Sıcak tel ve lazer anemometresi	$2 \times 10^5 - 9 \times 10^5$	0,39-0,42 ($Re=7 \times 10^5$)
Meile vd. [5]	25°, 35°	Rüzgâr	PIV	$0,69 \times 10^6 - 2,73 \times 10^6$	0,33 ($\Theta = 25^\circ$, $Re=1 \times 10^6$)

Tablo 2. Ahmed modeli ile yapılan sayısal çalışmaların karşılaştırılması
(Comparison of some numerical studies for zero yaw angle)

Çalışma	Yöntem	Eğim açısı (°)	Reynolds sayısı	Sürüklenme katsayısı
Parameswaran vd. [9]	RANS (k-ε model)	21°	$1,81 \times 10^6 - 4 \times 10^6$	0,325 ($Re=1.75 \times 10^6$)
Chok vd. [10]	RANS (k-ε modeli)	0° - 35°	$4,33 \times 10^6$	0,32 ($\Theta = 25^\circ$)
Mathey vd. [11]	RANS-LES	25°	$7,68 \times 10^5$	0,364
Fares vd. [12]	LES	25°, 35°	$7,68 \times 10^5$	0,425 (ince eleman, $\Theta = 25^\circ$), 0,25 (kaba eleman, $\Theta = 25^\circ$)
Guilmineau vd. [13]	RANS	25°, 35°	$2,784 \times 10^6$	0,2138 - 0,3291 ($\Theta = 25^\circ$) 0,2356 - 0,3404 ($\Theta = 35^\circ$)
Serre vd. [14]	LES ve DES-SST	25°	$7,68 \times 10^5$	0,317 - 0,431
Corallo vd. [16]	RANS (SST k-ω modeli)	25°	$9,8 \times 10^4$	0,32
Mirzaei vd. [17]	Partially-Averaged Navier-Stokes	25°	3×10^4	0,28 - 0,33
Aljure vd. [15]	LES modelleri	25°	$7,68 \times 10^5$	0,299 - 0,315

ise benzer çalışmayı farklı arka eğim açıları için daha yüksek eleman sayıları ile gerçekleştirmiş deneysel ve hesaplanan sürüklenme katsayıları arasında uyumu yakalayabilmişlerdir. Mathey vd. [11] Ahmet modeli etrafındaki akışı bir Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) – Large Eddy Simulation (LES) yaklaşımıyla analiz etmişler ve bu analizlerden elde ettikleri verileri ve deneysel ölçüm sonuçlarını karşılaştırıp uyumlu sonuçlar elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Fares vd. [12] farklı eğim açıları için (25° ve 35°) iki farklı sayısal analizi birbiriyle ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel ölçümler ve sayısal çözümler arasındaki uyumun yalnızca yüksek çözünürlüklü ağ yapısı için elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Guilmineau vd. [13], sayısal ve deneysel çalışmaların uyumu üzerine daha ayrıntılı bir şekilde durmuşlardır. Eğim açıları 25° ve 35° için deneysel ve altı farklı türbülans modeli ile gerçekleştirdikleri analiz sonuçlarını kıyaslamışlardır. Sonuçların çoğu arasında önemli bir farklılık oluşmadığını belirtmişlerdir. Ancak, Spalart-Allmaras modeli kullanıldığında çok daha yüksek sonuçlar elde etmişlerdir. Eğim açısı 25° durumunda kullanılan türbülans modelleri aynı sonuçları vermiştir. Serre vd. [14] çalışmalarında farklı türbülans modelleri yaklaşımının ve hesaplama maliyetlerinin karşılaştırılması üzerine odaklanmışlardır. LES modelinin farklı yaklaşımları ve Detached Eddy Simulation (DES) modelinin SST $k-\omega$ yaklaşımı ile farklı türbülans modelleri test edilmiştir. Yaptıkları çalışmada LES modellerinin deneylerle oldukça uyumlu sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Ancak zaman ve bilgisayar kapasitesi bakımından hesaplama maliyetinin bu modeller için oldukça yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Girdap özelliklerinin çoğunu tahmin etmek mümkün olsa da eğimli yüzey üzerindeki ortalama akışın kısmi ayrılması yalnızca yüksek dereceli LES modelinin çözümünde başarılı bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Aljure vd. [15] basitleştirilmiş araba modelleri etrafındaki akışı çözmek için farklı LES modellerini karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Analizler kaba ağ yapısı ile gerçekleştirilmesine rağmen yeterince doğru sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ahmet modeli gibi bir küt cisim etrafındaki akışı çözmek için en uygun modelin VMS (the variational multiscale method) modeli olduğunu belirtmişlerdir. Corallo vd. [16] en-boy oranının akış yapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Akış yapısı problemi, RANS denklemleri kullanılarak ve SST $k-\omega$ modeli uygulanarak çözülmüştür. Art izi yapısının önemli ölçüde küt cismin geometrisine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, kritik açının, Reynolds sayısına ve sınır şartlarına bağlı olduğunu rapor etmişlerdir. Modelin arkasında oluşan akıştaki önemli değişimlerin 0,85 ile 0,9 arasındaki en-boy oranı için meydana geldiği sonucunu da elde

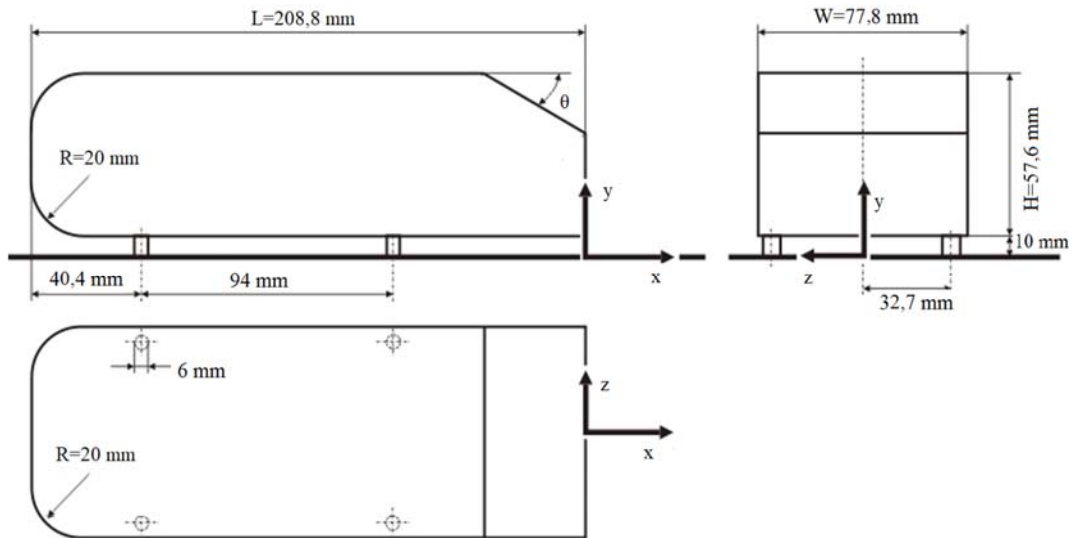
etmişlerdir. Mirzaei vd. [17], PANS (Partially-Averaged Navier-Stokes) modelini kullanarak Ahmed modeli etrafında sayısal bir analiz gerçekleştirmişlerdir ve sonuçları LES türbülans modeli ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Analizler, Ahmed modelinin arka bölgedeki eğik kısmının açıları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Eğim açısı 25° için, PANS tarafından tahmin edilen akış yapılarının, LES analizi ve deneysel çalışmalar ile oldukça benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Tablolarda incelenen çalışmalar yanında literatürdeki sayısal çalışmaların çoğunun C_D değerinin tespit edilmesi ve art izi yapısının modellenmesi üzerine kurulu olduğu görülmüştür. Bunun yanında rüzgar tüneline yapılan deneysel çalışmalarda sürüklenme ve kaldırma dirençlerinin tespit edilmesi, PIV çalışmalarında ise özellikle art izi bölgesindeki akış yapısının belirlenmesi amacıyla yapıldığı tespit edilmiştir [18-20].

Bu çalışmada farklı eğim açılarına sahip basitleştirilmiş bir araba modelinin sayısal ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar PIV yöntemi ile sayısal çalışmalar ise ANSYS-Fluent programı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar görsel olarak ve sayısal veriler halinde sunulmuştur. Sayısal ve deneysel sonuçlar literatürle ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmaya en yakın sonucu veren türbülans modeli tespit edilmiştir. Ayrıca, Ahmed modeli arkasındaki eğik kısmın farklı eğim açılarının art izi bölgesinde oluşturduğu etkiler tartışılmıştır.

2. Teorik Metot (Theoretical Method)

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 1:5 ölçekli olarak üretilmiş Ahmed modelinin boyutları Şekil 1'de verilmiştir. Modelin uzunluğu $L=208,8$ mm, genişliği $W=77,8$ mm ve yüksekliği $H=57,6$ mm'dir. Modelin ön tarafı, akışın ön bölgelerden ayrılmasını önlemek için kavisli ve ortası dikdörtgen kesitli olarak tasarlanmıştır. Ahmed modelinin en önemli kısmı arka eğim açısı, sürüklemeyi büyük ölçüde artıran üç boyutlu girdap ayrımlarının oluşmasını tetikleyebilmektedir. Ahmed modeli bir küt cisim olduğu için sürüklemenin büyük kısmı basınç direncinden kaynaklanmaktadır ve sürtünme direnci ise bunun sadece küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Basınç kaynaklı sürüklemenin neredeyse tamamı eğik açılı yüzeyde meydana gelmektedir. Eğim açısı $12,5^\circ$ 'den küçük olduğunda akış iki boyutludur ve model yüzeyinden akış ayrılması gerçekleşmemektedir [1]. Bu çalışmada 15° , 25° ve 35° gibi farklı eğim açıları (Θ) için



Şekil 1. Ahmed modelinin şematik gösterimi (Schematic view of the Ahmed body)

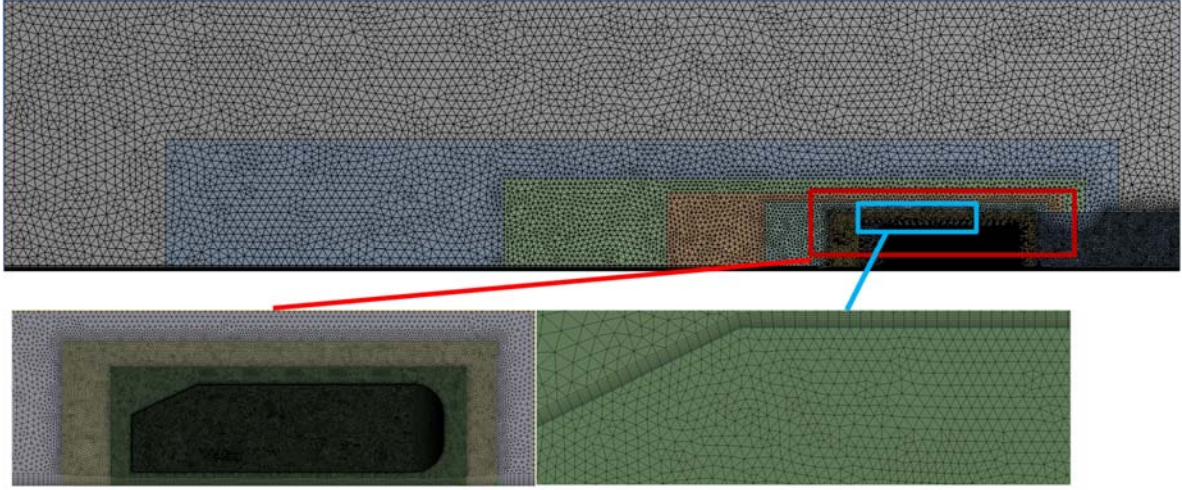
sayısal analizler ve PIV deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler ve PIV ölçümlerindeki serbest akış hızı 0,2 m/s ve Ahmed modelinin karakteristik uzunluğu ile tanımlanan Reynolds sayısı ise $4,16 \times 10^4$ olarak hesaplanmıştır.

2.1. Sınır Şartları ve Ağ Yapısı (Boundary Conditions and Mesh Structure)

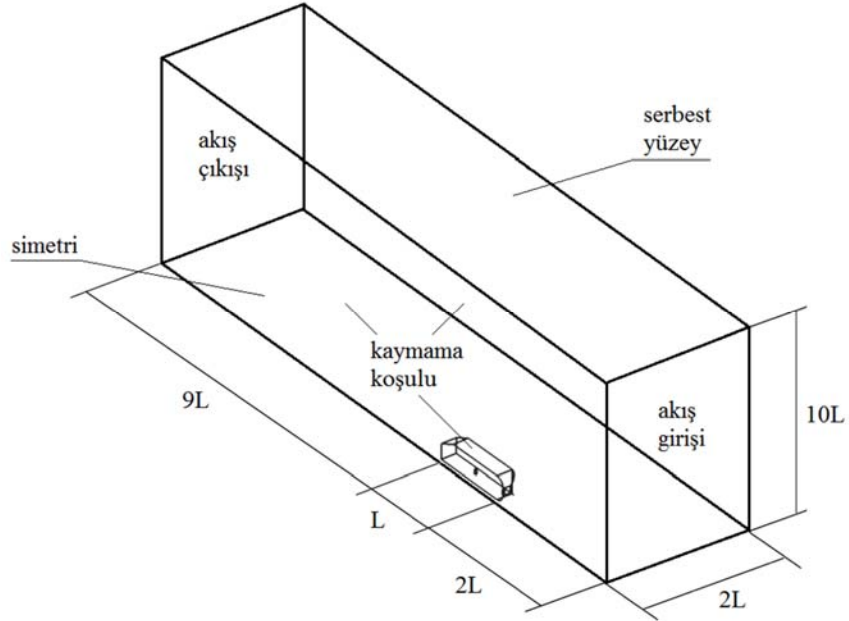
Akış çözümü için oluşturulan ağ yapısı Şekil 2'de sunulmuştur. Ahmed modeli ve zemin yüzeyine yakın bölgelerde daha yoğun ve 10 katman halinde prizmatik elemanlar üretilmiştir. Art izi bölgesinde oluşan üç boyutlu karmaşık akış yapısını çözebilmek için eleman yoğunluğu yüksek tutulmuştur. Cidardan uzak bölgelerde dört yüzeyli üçgen elemanlar üretilmiştir. Eleman boyutları arasındaki geçiş sırasında eleman yapısının bozulmaması için çözüm hacmi birçok alt hacme bölünmüştür. Şekil 3'te ise akış hacmi ve sınır şartlarını gösteren şematik bir şekil verilmiştir. Çalışma kapsamında üç boyutlu akış hacmini çözmek için Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ ve SST k- ω

türbülans modelleri kullanılmıştır. Sonuçların karşılaştırılacağı serbest akış hızı giriş şartı 0,2 m/s ve çıkış sınır şartı olarak basınç çıkışı tanımlanmıştır. Kanal girişinde türbülans şiddeti değeri %2,9 olarak hesaplandığı için analiz çalışmalarında da bu değer kullanılmıştır. Model ve akış yapısı akış yönünde simetrik olduğundan, kanal yan yüzeyine simetri sınır şartı tanımlanmıştır. Böylece, zamandan tasarruf etmek için analizler Ahmed modelinin sadece yarısı için yapılmıştır.

Ağ, HAD analizlerinin en önemli aşamalarından biridir. Ağ yapısındaki eleman sayısının miktarı ve kalitesi, HAD analizlerinin hesaplama hassasiyeti ve doğruluğu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, analiz için makul bir hesaplamalı ağ çözünürlüğü gereklidir. Analizlerin yapılabilir olması için yeterince az sayıda, ancak aynı zamanda her önemli fiziksel büyüklüğün iyi bir şekilde yakalanması ve modellenmesi için yeterli yoğunlukta olmalıdır [21, 22]. Bu kapsamda mevcut çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan 25° eğim açılı model için sürükleme katsayısı sonuçlarının



Şekil 2. Akış hacmi içi oluşturulan ağ yapısı (The mesh structure on the flow domain)



Şekil 3. Sınır şartları ve akış hacmi (Boundary conditions and computational domain of the model)

karşılaştırıldığı beş farklı ağ yapısı üzerinde ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Farklı ağ yapıları için elde edilen sürüklenme katsayısı sonucunun karşılaştırılması Tablo 3'te sunulmuştur. SST k- ω türbülans modelinin kullanıldığı ağdan bağımsızlık çalışmasında $12,0 \times 10^6$ eleman ile analizlere başlanılmıştır ve eleman sayısı kademeli olarak artırılmış ve azaltılmıştır. $21,5 \times 10^6$ eleman sayısına kadar çıkarılan analizlerde sürüklenme katsayısının %5 altında değişiklik gösterdiği, eleman sayısının azaldığı durumlarda ise farkın yaklaşık %15'in üzerinde olduğu hesaplanmıştır. Bu nedenle hem çözüm süresi hem de analiz sonuçlarının literatürle uyumu dikkate alındığında nihai analizlerde yaklaşık $12,0 \times 10^6$ elemanın bulunduğu ağ yapısı kullanılmıştır.

Tablo 3. 25° eğim açısında farklı eleman sayılarında sürüklenme katsayısı sonuçlarının karşılaştırılması.
(Comparison of the drag coefficient results for different element numbers at 25° slant angles)

Eleman Sayısı ($\times 10^6$)	Yöntem	C_D (25°)	Yüzde Fark
4,3		0,447	%23,4
7,1		0,413	%14,1
12,0	SST k- ω	0,381	%5,24
16,4		0,374	%3,31
21,5		0,362	%0

2.2. Türbülans Modelleri (Turbulence Models)

Bu çalışmada daha hızlı çözümler için sıklıkla kullanılan Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) modelleri grubuna giren Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır.

2.2.1. RNG ve Realizable k- ϵ Modelleri (RNG and Realizable k- ϵ Models)

RNG ve Realizable k- ϵ Modelleri, mühendislik problemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. RNG k- ϵ modeli, daha küçük hareket ölçeklerinin etkilerini hesaba katmak için Navier-Stokes denklemlerini yeniden normalleştirme için geliştirilmiştir [23, 24]. Verilen model için denklemler Eş.1 ve Eş. 2'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon + S_k \quad 1$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \alpha_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2)$$

RNG modeli ile standart k- ϵ modeli arasındaki temel fark, ϵ denklemindeki ek terimlerin aşağıdaki Eş. 3'teki gibi olmasıdır:

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3)$$

Bu terimdeki sabitler $C_\mu = 0,0845$, $\eta = S_k / \epsilon$, $\eta_0 = 4,38$ ve $\beta = 0,012$ sabitleridir. RNG modeli, $C_{1\epsilon}$ ve $C_{2\epsilon}$ model sabitlerinin sırasıyla 1,44 ve 1,92 olduğu standart k- ϵ modeline kıyasla kayma gerilmesinin ve akım çizgisi eğriliklerinin etkilerine daha duyarlıdır. Ayrıca, Realizable modeli G_k türbülans kinetik enerji üretim terimlerini içermemektedir. Model sabitleri $C_{1\epsilon}$ ve C_2 , Realizable k- ϵ modeli için sırasıyla 1,9 ve 1,44'tür.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + S_\epsilon \quad (5)$$

$$C_1 = \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (6)$$

2.2.2 Shear-Stress transport (SST) k- ω türbülans modeli (Shear-Stress transport (SST) k- ω turbulence model)

SST k- ω türbülans modeli, k- ω ve k- ϵ türbülans modellerinin standart formuna göre bazı avantajlara sahiptir ve genellikle modelin serbest kayma gerilmeli akışları tahmin etme doğruluğunu artırır. Bu modelde, ω denklemindeki çapraz difüzyon terimi ve karışım fonksiyonu, yakın duvar ve uzak alan bölgelerinde daha iyi sonuçlar sağlayabilmektedir. Bu modelin transport eşitlikleri Eş. 7 ve Eş. 8'de aşağıdaki verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + -Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega + D_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (8)$$

2.3. Çözüm Parametreleri ve Yakınsama Kriterleri (Solution Methods and Convergence Criteria)

Çalışmada, her bir konveksiyon terimi için ikinci dereceden ayrıklaştırma şemaları kullanılmıştır. Basınç-hız bağlantısını çözmek için ayrılmış çözüm şemalarına kıyasla daha doğru sonuçlar elde edildiği belirtilen COUPLED algoritması kullanılmıştır. COUPLED algoritmasında momentum ve süreklilik denklemleri birlikte çözülmektedir. Ayrıklaştırmada, Green-Gauss hücre temelli gradyan kullanılmıştır. Yakınsama kriteri, tüm terimler için 10^{-6} 'dan küçük olacak şekilde tanımlanmıştır.

3. Deneysel Metot (Experimental Method)

Deneysel çalışmalar, Konya Teknik Üniversitesi PIV Laboratuvarı'nda bir su tüneline gerçekleştirilmiştir. PIV, akışı görselleştirmek ve anlık ve zaman ortalamalı hız alanlarını elde etmek için kullanılan bir hız ölçme tekniğidir. Bu yöntemde akışkan içine akışkanla aynı yoğunlukta akışı takip edebilecek parçacıklar eklenmektedir. Bu parçacıklar lazer ışığı altında parlayarak kamera tarafından algılanabilir bir boyutta olması gerekmektedir. Parçacıkların hareketinin takip edilmesi ile aynı zamanda akış hareketi de izlenmektedir [25]. Bu çalışmada, gümüş kaplı küresel parçacıklar kullanılmıştır. Deneylerde santrifüj pompa ile akış sirkülasyonu sağlanan açık yüzeyli kapalı döngülü yüksekliği 600 mm genişliği 700 mm ve boyu 6000 mm olan bir su kanalı kullanılmıştır. Akış alanının görselleştirilmesi için su kanalı şeffaf cam malzemeden imal edilmiştir. Araç modeli kanal içinde bir levha üzerine yerleştirilmiştir. Gerçek akış şartlarını sağlamak için sınır tabaka akışının mümkün olduğunca gelişmemesi ve cisim üzerine akışın üniform olarak gelmesi gerekmektedir. Akış alanı, 1632 x 1200 piksel çözünürlüğe sahip modelin karşısına yerleştirilen bir CMOS kamera ile kayda alınmıştır. Akış alanının aydınlatılması için en yüksek frekansı 500 Hz olan ve kanalın alt kısmına yerleştirilen Nd:YAG lazer kullanılmıştır. Üretilen lazer ışığı tabakasının kalınlığı 1 mm olarak ayarlanmıştır. CMOS kamera görüntü alma frekansı 15 Hz ve bir deney için toplam anlık görüntü çifti alma sayısı 2048 olarak ayarlanmıştır. Her bir çift görüntü için hız alanı hesaplanmaktadır ve toplam 1024 vektör alanı oluşturulmuştur. Her görüntü çifti için 32 x 32 piksel boyutunda görüntü ekranı, 1,41 x 1,41 mm² (0,028L x 0,028L) hücre boyutuna dönüştürülmektedir. Daha sonra uyarlanabilir korelasyon metodu kullanılarak toplam 7474 (101 x 74) hız vektörü elde edilmektedir. [26]. Uyarlanabilir korelasyon metodu sırasında Nyquist kriterini sağlamak için görüntü alanları %50 oranında üst üste bindirilmiştir. Son işlem sırasında, gölge veya aşırı aydınlatma nedeniyle olası kötü vektörleri ortadan kaldırmak için Gauss filtresi uygulanmıştır. PIV test kurulumunun detaylı görünümü

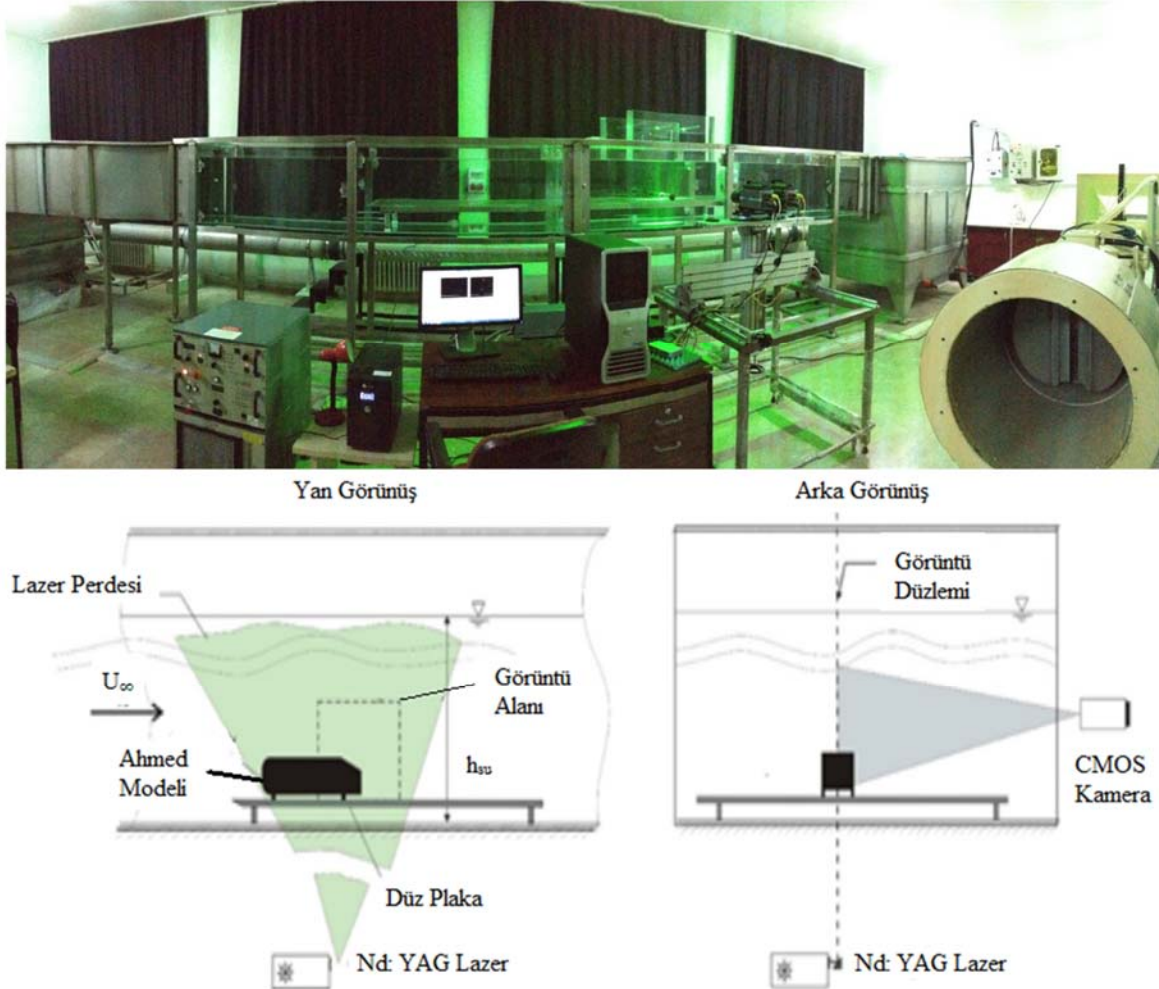
Okbaz vd. [27] tarafından ayrıntılı olarak anlatılmıştır. PIV sisteminin fotoğrafı ve şematik görünümü ise Şekil 4'te verilmiştir. PIV sisteminde ölçüm için kullanılan gümüş kaplı partiküllerin çapı, bu partiküllerin birbirine yapışma durumu, görüntü alanındaki anlık partikül yoğunluğu, kamera lensinin açısı, kamera-lazer odağı ve açısı, görüntü alanındaki lazer kalınlığı, lazerin kanal duvarından geçerken kırılma miktarı, ölçüm alanındaki parlamalar ve yansımalar, ölçüm sistemini kullanan insan odaklı hatalar vb. gibi pek çok neden sisteminin belirsizliğini etkilemektedir. Bu nedenle kanal içerisindeki akışkan hızının ölçümünde kullanılan PIV sisteminin toplam belirsizliği deneysel kurulum, akış özellikleri, kullanıcı girdileri ve PIV algoritması gibi çeşitli faktörlere bağlıdır ve sistemin toplam belirsizliğinin doğru tahmin edilmesi zordur [28]. Literatürde de PIV sisteminin kullanıldığı birçok çalışma değerlendirildiğinde, bazı çalışmalarda belirli kabuller yapılarak sistem belirsizliği hesaplanırken, bazı çalışmalarda ise sistem belirsizliği %2-3 aralığında tahmin edilmiştir. Mevcut çalışmada, kullanılan Dantec marka PIV cihazının ve sistem elemanlarının çalışma koşullarına bağlı olarak literatürdeki kabul edilen değerler dikkate alınmış ve hız ölçüm sisteminin belirsizliği %2,0 olarak kabul edilmiştir [29, 30].

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results And Discussions)

Bu çalışmada $\theta=15^\circ$, 25° ve 35° geri eğim açılarının Ahmed modelinin art izi bölgesindeki akış özellikleri üzerine etkisi deneysel

olarak incelenmiştir ve HAD sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te, deneysel olarak ve HAD ile elde edilen zaman ortalamalı akım çizgisi topolojileri sunulmuştur. Ahmed modeli etrafındaki akışın ayrılma, odak ve aşağı akım durma noktalarının konumları simetri düzleminde verilmiştir. Artan eğim açısı ile akış ayrılma noktasının değiştiği görülmüştür. SST k- ω ve PIV sonuçlarından, $\theta=15^\circ$ durumunda Ahmed modeli yüzeyinden meydana gelen akış ayrılmasının eğik yüzeyin alt tarafında meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak, $\theta=35^\circ$ durumunda ayrılma noktasının yukarı doğru kaydığı ve eğimli yüzeyin üst kenarında meydana geldiği görülmüştür. Açılı değeri $\theta=15^\circ$ durumunda Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri PIV sonuçlarına benzer akış yapıları tahmin etmiştir.

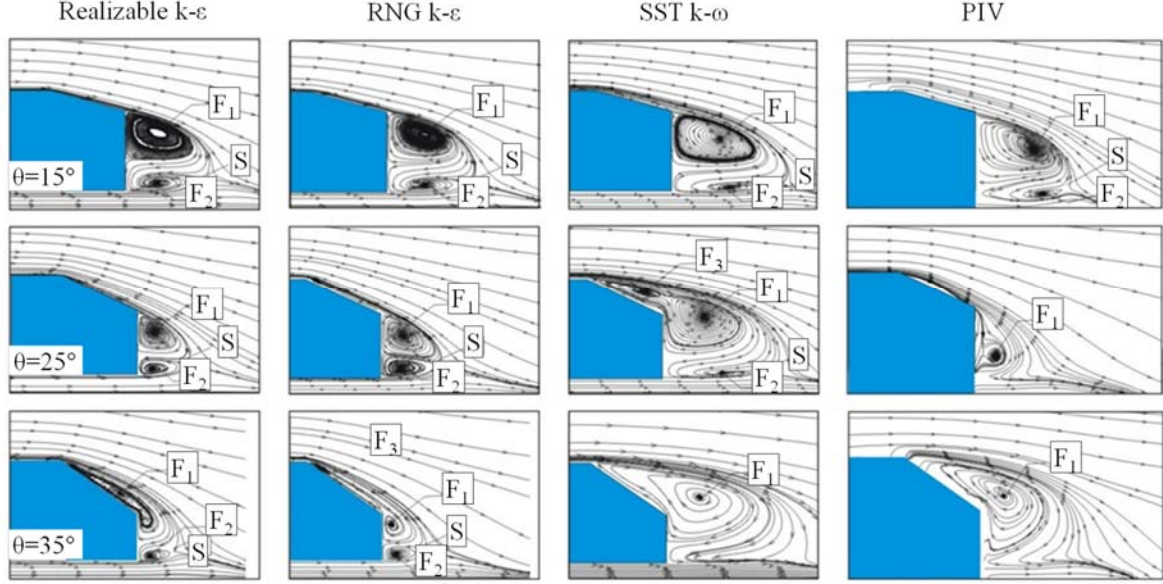
Eğim açısı $\theta=25^\circ$ durumunda PIV deneylerinde iki farklı akış ayrılma noktası oluşmuştur. Eğimli yüzeyin üst kenarında yerel bir akış ayrılması oluşmuştur ve daha sonra ayrılan akış eğimli yüzeye tekrar birleşmiştir. Eğimli yüzeyin aşağı kenarında ise ana akış ayrılması meydana gelmiştir. SST k- ω türbülans modelinde eğimli kenarın üst yüzeyinde bir akış ayrılması oluşmuştur. Ancak, bu akış yüzeye tekrar birleşmeden aşağı akım doğrultusunda ilerlemiştir ve odak noktası F_1 ve F_2 ile gösterilen iki dönümlü akış bölgesi oluşturmuştur. Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ modelleri ise eğimli yüzeyin alt kenarında bir akış ayrılması ve ikişer adet odak noktası tahmin etmiştir. Eğim açısı 35° 'ye kadar yükseldiğinde, PIV sonuçlarından görüldüğü üzere akış



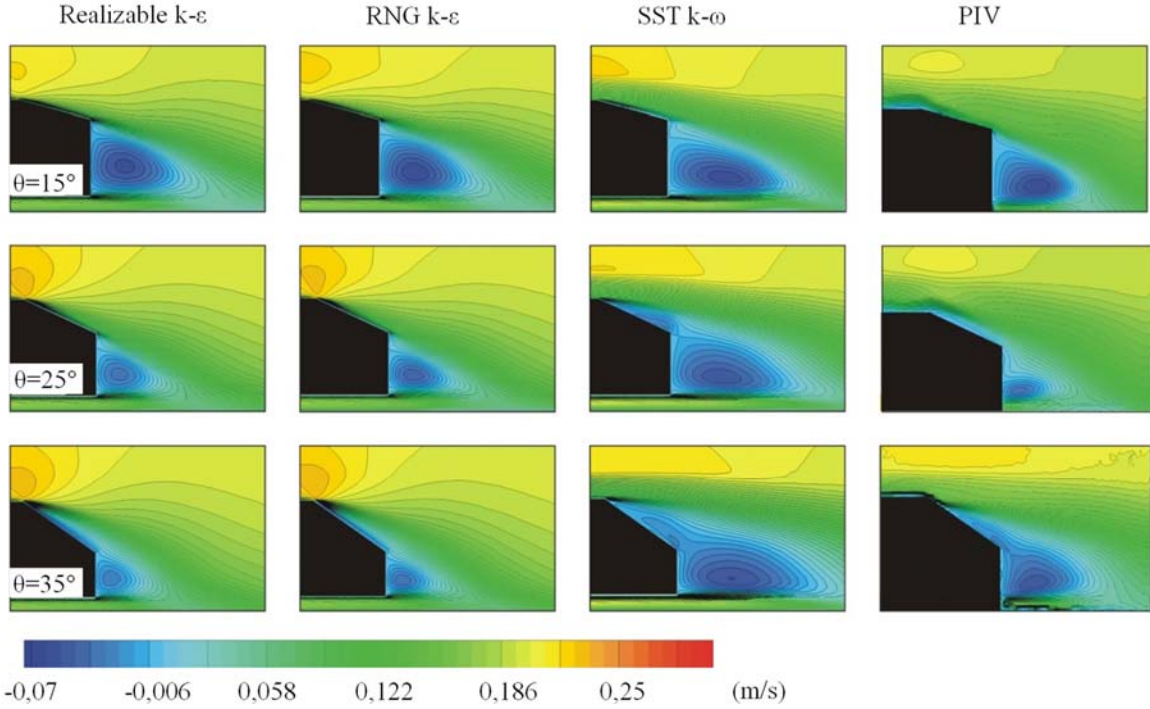
Şekil 4. PIV sisteminin fotoğrafı ve şematik görünümü (Photograph and schematic view of the PIV system)

ayrılması eğimli yüzeyin hemen üst kısmında meydana gelmektedir. Artan eğimle birlikte ters basınç gradyeninin etkisi şiddetlenmiştir ve akış cisim yüzeyini takip edememiştir. Dolayısıyla yüzeyden akışın ayrılması gerçekleşmiştir. Bu durumu en doğru tahmin eden türbülans modeli SST k- ω olarak belirlenmiştir. Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modelleri ise akış ayrılmasının yaklaşık yerini doğru tahmin etse de art izi bölgesindeki ayrılma baloncuğunun büyüklüğünü olduğundan çok daha küçük tahmin etmiştir. Bunların yanı sıra,

Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modellerinde üst kenardan ayrılan akışın bir kısmı eğimli yüzey üzerine tekrar birleşmiştir. PIV sonuçlarına göre en küçük ayrılma baloncuğu $\Theta=25^\circ$ durumunda meydana gelmiştir. Bunun yanında Ahmed modelinin altında geçen akış bir jet etkisi oluşturmaktadır ve akım çizgisi sonuçlarından da görüleceği üzere sirkülasyon halindeki akış bölgesini etkilemektedir. Şekil 6'da PIV deneyleri ve HAD analizleri için zaman ortalamalı akış yönündeki hız konturları sunulmuştur. Eğim açısı $\Theta=15^\circ$ için PIV ve



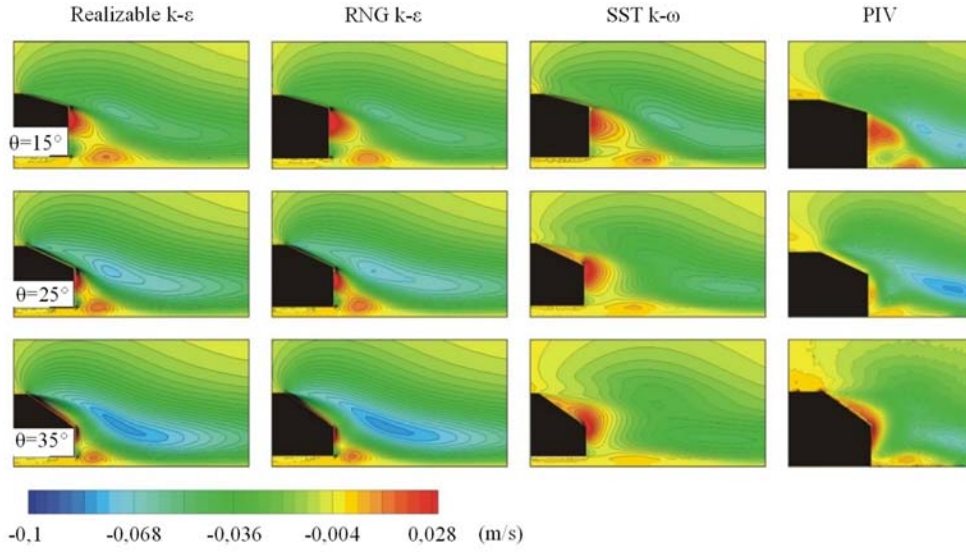
Şekil 5. $\theta=15^\circ$, 25° ve 35° için simetri düzleminde HAD ve deneysel çalışmalardan elde edilmiş zaman ortalamalı akım çizgisi sonuçları (Numerical and experimental of the time-averaged streamline topology with slant angles $\theta=15^\circ$, 25° , and 35° in the symmetry plane $z=0$)



Şekil 6. $\theta=15^\circ$, 25° and 35° için simetri düzleminde HAD ve deneysel çalışmalardan elde edilmiş zaman ortalamalı akış yönündeki hız konturları (Numerical and experimental results of the time-averaged streamwise velocity components with slant angles of $\theta=15^\circ$, 25° , and 35° in the symmetry plane $z=0$)

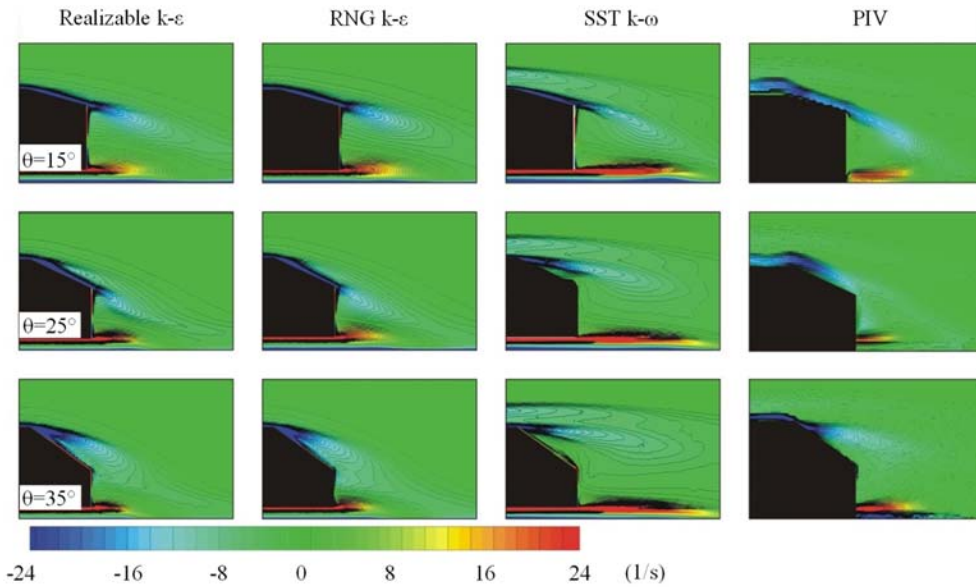
HAD sonuçlarında birbirlerine yakın değerlere ve şekle sahip hız konturları oluşmuştur. Eğim açısı 25° olduğunda ise HAD ve PIV sonuçları birbirlerinden farklılık göstermeye başlamıştır. SST k- ω sonuçlarına göre negatif hız konturlarının büyüklüğü PIV ölçümlerine göre oldukça geniş bir yapıya sahiptir. Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modelleri ise PIV sonuçlarına benzer boyutta oluşmuştur. Ancak daha farklı bir yapıya sahip negatif hız kontur bölgeleri tahmin etmiştir. Eğim açısı $\theta=35^\circ$ durumunda PIV ölçümlerine göre negatif hız konturlarının büyüklüğü artmıştır. Bunun nedeni, akım çizgisi modellerinde daha net olarak görünmektedir. Akış ayrılması sonucu oluşan ayrılma baloncuğu büyümüştür ve bu durum daha fazla ters akışın oluşmasına sebep olmuştur. SST k- ω modeli de benzer şekilde bir akış alanı tahmin ederken, Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modellerine göre negatif hız konturlarının boyutları daralmıştır. Modelin altından geçen jet akışının art izi bölgesinde hareket ettiği ve

hız değerlerini etkilediği gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde; negatif hız konturlarının art izi bölgesi üzerinde en az etkiye sahip olduğu ve en dar boyutun PIV sonuçlarında meydana geldiği durum $\theta=25^\circ$ olarak belirlenmiştir. PIV deneyleri ve HAD analizleri için zaman ortalamalı akışa dik yöndeki hız konturları Şekil 7'de sunulmuştur. Akışa dik yöndeki negatif hız konturları, akışın çoğunlukla negatif yönde baskın olduğunu göstermektedir. Akışa dik yöndeki pozitif hız konturları genel olarak eğik yüzeyin alt tarafına yakın bölgelerde meydana gelmiştir. PIV ölçümlerinin ve HAD tahminlerinin en yakın değerlerde olduğu durum eğim açısının $\theta=15^\circ$ olduğu durumdur. Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ sonuçları dışında, $\theta=35^\circ$ için akışa dik yöndeki hız konturlarının dağılımları farklıdır. Diğer akış özelliklerine benzer şekilde, PIV sonuçları $\theta=25^\circ$ 'deki tüm HAD sonuçlarından farklıdır. Zaman ortalaması alınmış girdap konturları Şekil 8'de verilmiştir. Eğim açısına bağlı olarak, akış



Şekil 7. $\theta=15^\circ$, 25° and 35° için simetri düzleminde HAD ve deneysel çalışmalardan elde edilmiş zaman ortalamalı akışa dik yöndeki hız konturları

(Numerical and experimental results of the time-averaged cross stream velocity components for $\theta=15^\circ$, 25° , and 35° in the symmetry plane $z=0$)

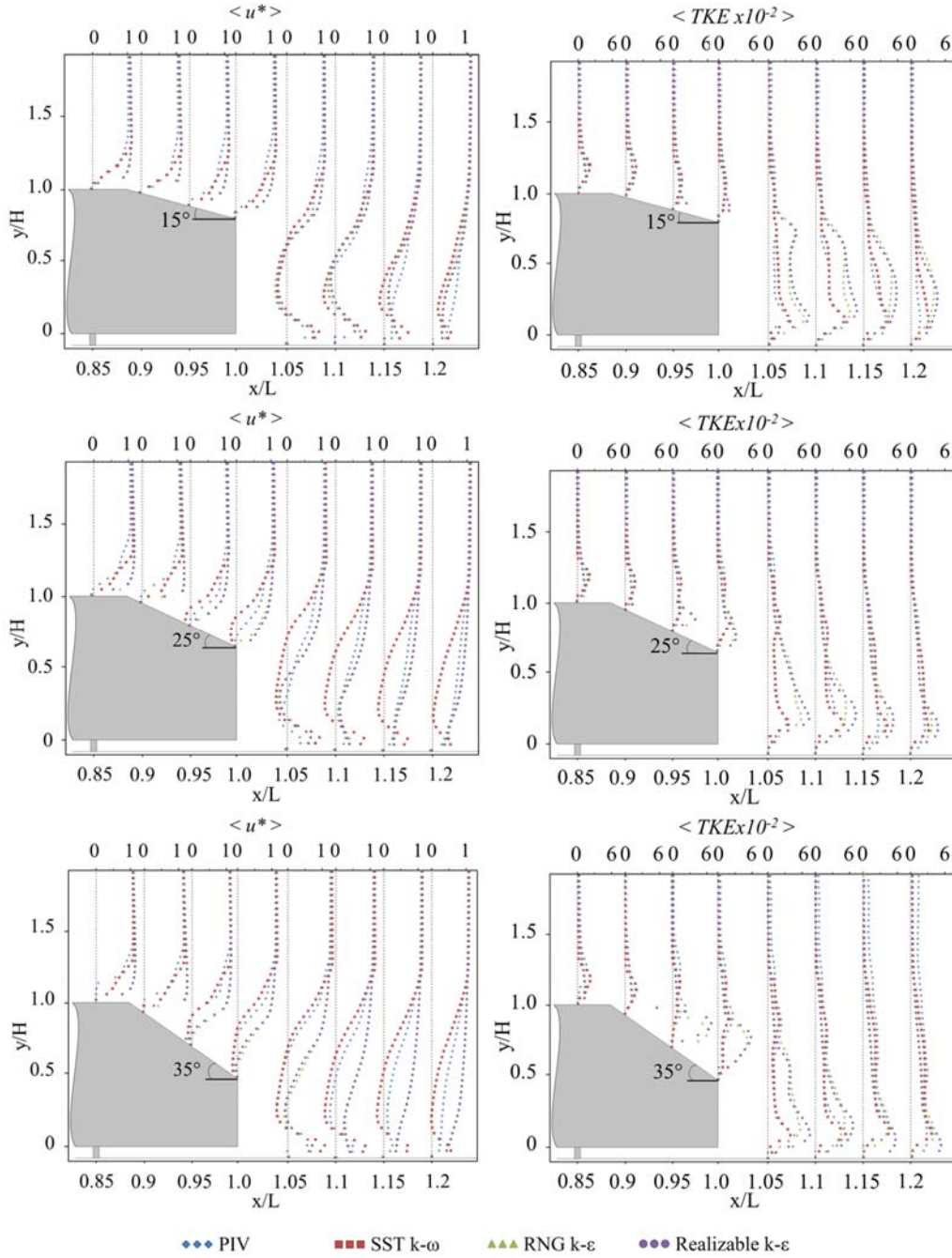


Şekil 8. $\theta=15^\circ$, 25° ve 35° için simetri düzleminde HAD ve deneysel çalışmalardan elde edilmiş zaman ortalamalı girdap konturları
(The numerical and experimental results of the time-averaged vorticity contours at $\theta=15^\circ$, 25° , and 35° in the symmetry plane $z=0$)

ayrılmalarının başladığı noktalar değiştiğinden dolayı, kayma tabakalarının şiddeti de buna bağlı olarak değişmiştir. Deneysel akım çizgisi sonuçlarından (Şekil 5) da anlaşılacağı gibi, daha yüksek eğim açısı daha erken akış ayrılmalarına neden olmaktadır. Ancak, eğim açısı 15° 'den 25° 'ye çıkarıldığında, firar kenar açısının azalması nedeniyle art izi boyutu küçülmüştür. Sonuç olarak, ters akış bölgelerinin boyutu da art izi bölgesinin boyutuna bağlı olarak değişmektedir ve girdap değerlerini etkilemektedir. Eğim açısı 35° olduğunda, hücum kenar açısının (eğim açısı) etkisi arka kenar açısından daha keskindir ve art izi boyutu tekrar artmıştır. Eğim açısı 15° olduğunda PIV ölçümlerinin ve RANS hesaplamalarının sonuçları örtüşmektedir. Ancak, eğim açısı 25° olduğunda RANS ve

PIV sonuçları oldukça farklıdır. Eğim açısı 35° olduğunda, türbülans modeli SST k- ω ve PIV sonuçları diğer modellere göre daha yakın girdap kontur değerleri tahmin etmiştir.

Şekil 9'da sol sütunda noktasal hız değişimi profilleri ve sağ sütunda simetri düzlemindeki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımları çizilmiştir. Hız profilleri için $\theta = 35^\circ$ eğim açısında PIV ve SST k- ω modeli arasında önemli bir fark oluşmamıştır. Öte yandan Realizable k- ϵ ve RNG k- ϵ modellerinin sonuçları birbirine benzer elde edilmiştir. Ancak bu hız profili değişimleri deneysel sonuçlara göre farklı bir yönde olduğu tespit edilmiştir. Ahmed modelinin eğimli yüzeyinde tüm modeller ve PIV arasında önemli bir fark



Şekil 9 Simetri düzlemindeki hız değişim profilleri (sol sütun) ve Türbülans Kinetik Enerji dağılımı (sağ sütun)
(The velocity profiles in the symmetry plane (left column) and Turbulence Kinetic Energy distribution (right column))

Tablo 5. Farklı türbülans modelleri ve eğim açılarında C_D sonuçlarının karşılaştırılması.
(C_D results for different turbulence models and slant angles)

Çalışma	Yöntem	Re	15°	25°	35°
Mevcut Çalışma	Realizable k-ε	4,18×10 ⁴	0,426	0,455	0,494
Mevcut Çalışma	RNG k-ε	4,18×10 ⁴	0,426	0,454	0,495
Mevcut Çalışma	SST k-ω	4,18×10 ⁴	0,376	0,381	0,372
Mathey vd. [11]	Standart k-ε	7,68 ×10 ⁵	-	0,364	-
Fares vd. [12]	LES	7,68 ×10 ⁵	-	0,325	0,283
Corallo vd. [16]	SST k-ω	9,8×10 ⁴	-	0,32	-
Guilmineau vd. [13]	DES-SST	2,78×10 ⁶	-	0,4	-

oluşmamıştır. Ancak art izi bölgesinde, PIV sonuçları ve Realizable k-ε ve RNG k-ε türbülans modelleri sadece $\theta = 25^\circ$ eğim açısında benzer bir davranış sergilemiştir. Eğim açısı $\theta = 15^\circ$ durumu için tüm modeller ve PIV sonuçları aynı hız profillerine sahiptir. Şekil 9'un sağ sütununda farklı bölgelerden elde edilen (x/L) TKE noktasal değişim profilleri sunulmuştur. RNG ve Realizable k-ε türbülans modelleri TKE değerlerini daha büyük olarak tahmin etmiştir. Öte yandan, SST k-ω modelinin sonuçları, özellikle ters akışın baskın olduğu bölgelerde PIV sonuçlarına daha yakındır. Eğim açısı 25° olduğunda, SST k-ω ve PIV sonuçları birbirine daha yakın olurken, diğer türbülans modelleri yine TKE değerlerini fazla tahmin etmektedir. Ayrıca, Realizable k-ε türbülans modeli, TKE değerlerini diğer modellere göre oldukça yüksek tahmin etmektedir. Eğim açısının 35° olması durumunda Realizable ve RNG k-ε türbülans modellerinin TKE değerleri $x/L = 0.95$ konumundan itibaren aralıklı olarak yükselmektedir ve aşağı yönde PIV ölçümleri ile modeller arasındaki fark biraz daha azalmaktadır. Bu eğim açısında PIV sonuçlarına en yakın TKE değeri SST k-ω türbülans modeli ile hesaplanmıştır. Bütün eğim açılarında TKE değerleri için deneysel sonuçlar ile SST k-ω modeli arasındaki mutlak fark yaklaşık %0-8 arasında iken, akış yönündeki hız bileşeninde bu değerler biraz daha yüksektir. Özellikle ters akış bölgesinde sayısal analizler akış yapısını modellemekte yetersiz kaldığından, deneysel sonuçlar ile SST k-ω modeli arasındaki mutlak fark bazı bölgelerde %18 mertebesine kadar çıkmaktadır.

Farklı türbülans modelleri ile $Re=4,18 \times 10^4$ 'te hesaplanan sürüklenme katsayısı (C_D) değerleri Tablo 5'te karşılaştırılmıştır. Türbülans modeli k-ε ile bulunan C_D değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Ancak SST k-ω ile elde edilen sonuçlar, eğim açısına bağlı olarak 0,37-0,38 civarındadır ve bu sonuçlar literatürdeki değerlere daha yakındır (Tablo 1 ve 2).

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada farklı eğim açılara sahip Ahmed modeli ($\theta=15^\circ, 25^\circ$ ve 35°) etrafındaki akış özellikleri HAD yaklaşımı ve PIV ile deneysel olarak incelenmiştir. HAD analizleri Realizable k-ε, RNG k-ε ve SST k-ω olmak üzere üç farklı türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ahmed modelinin boyutları 1:5 ölçeğinde 208,8 mm uzunluğunda, $W=77,8$ mm genişliğinde ve $H=57,6$ mm yüksekliğindedir. Ahmed modelinin karakteristik uzunluğu ve serbest akım hızı ile tanımlanan Reynolds sayısı $4,18 \times 10^4$ olarak sabit tutulmuştur. Modelin altından geçen jet akışın art izi bölgesinde hareket ettiği ve negatif yönünde hız değerlerini etkilediği gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, negatif hız konturlarının art izi bölgesi üzerinde en az etkiye sahip olduğu ve art izi bölgesinin PIV ve HAD sonuçlarına göre en dar olduğu durum $\theta=35^\circ$ 'dir. Eğim açısı akış ayrılmasının olduğu bölgeyi önemli ölçüde etkilemiştir. Akış ayrılması $\theta=15^\circ$ durumunda eğik yüzeyin alt tarafında meydana gelirken, $\theta=25^\circ$ ve $\theta=35^\circ$ 'de ayrılma noktası yukarı doğru kaymış ve eğik yüzeyin üst kenarında meydana gelmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlara göre; en dar art izi bölgesine sahip olmasından dolayı akış yapısı açısından aerodinamik uygulamaya için en uygun eğim açısının 25° olduğu sonucuna varılmıştır. Basınç

direnci toplam sürüklemenin %90'ı civarında bulunmuştur ve genel olarak artan eğim açısı ile artmıştır. Ayrıca, özellikle ters akışın baskın olduğu bölgelerde, RNG ve Realizable k-ε türbülans modellerinin TKE değerlerini genellikle olduğundan fazla tahmin ettiği, SST k-ω modelinin sonuçlarının ise deneysel sonuçlara daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Ahmed modeli pek çok aksesuarlarından ve tekerleklerinden arındırılmış araç aerodinamiğinin temel davranışını temsil eden çalışmaları kapsamaktadır. Bu çalışmadan elde edilen verilerle, araç aerodinamiği çalışmalarında SST k-ω modelinin uygun bir türbülans modeli olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Ayrıca incelenen eğim açısı parametrelerinde ise modelin arka bölgesinden akış ayrılmasını etkilediği görülmüştür. Bu da sürüklenme katsayısını önemli ölçüde etkilemektedir. Enerji krizlerinin farklı sebepler ile yinelenen günümüz dünyasında yakıt verimliliği önem arz etmektedir. Bu nedenle de mevcut çalışmanın, araçların tüm detaylarını içeren sayısal çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Gelecek çalışmalar kapsamında deneysel olarak sürüklenme katsayısının ölçülmesi ve Ahmed modeli etrafında üç boyutlu akış görüntüleme çalışmasının yapılması önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, deneysel çalışmalar için laboratuvar olanakları sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi'ne teşekkür eder.

Kaynaklar (References)

1. Ahmed S.R., Ramm G., Faltin G., Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake, SAE Technical Paper, 840300, 1984.
2. Aksoy M.H., Okbaz A., Yagmur S., Dogan S., PIV and CFD Investigation of Aerodynamic Characteristics For A Simplified Road Vehicle, Proceedings of Experimental Fluid Mechanics Conference, Prague-Czech Republic, 20-27, November 13-16 2018.
3. Thacker A., Aubrun S., Leroy A., Devinant P., Effects of suppressing the 3D separation on the rear slant on the flow structures around an Ahmed body, J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 107, 237-243, 2012.
4. Tunay T., Sahin B., Ozbolat V., Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body, Exp. Therm. Fluid Sci., 57, 165-176, 2014.
5. Meile W., Ladinek T., Brenn G., Reppenhagen A., Fuchs A., Non-symmetric bi-stable flow around the Ahmed body, Int. J. Heat Fluid Flow 57, 34-47, 2016.
6. Bello-Millán F.J., Mäkelä T., Parras L., Del Pino C., Ferrera C., Experimental study on Ahmed's body drag coefficient for different yaw angles, J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 157, 140-144, 2016.
7. Bayraktar S., Numerical investigation of flow over obstacles on a backward-facing step, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (2), 1145-1158, 2021.
8. Göv I., Dogru M.H., Korkmaz U., Improvement of the aerodynamic performance of NACA 4412 using the adjustable airfoil profile during the flight, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 1110-1125, 2019.
9. Parameswaran S., Kiris I., Sun R., Gleason M., Flow Structure around a 3D Bluff Body in Ground Proximity: A computational Study, J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn., 1, 791-800, 1993.

10. Chok C., Parameswaran S., Sun R., Gleason M., Numerical investigation of the effects of base slant on the wake pattern and drag of three-dimensional bluff bodies with a rear blunt end, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 51 (3), 269-285, 1994.
11. Mathey F., Cokljat D., Zonal multi-domain RANS/LES simulation of airflow over the Ahmed body, *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, 6, 647-656, 2005.
12. Fares E., Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, *Comput. Fluids*, 35 (8-9), 940-950, 2006.
13. Guilmineau E., Deng G., Wackers J., Numerical simulation with a DES approach for automotive flows, *J. Fluids Struct.*, 27 (5-6) 807-816, 2011.
14. Serre E., Minguez M., Pasquetti R., Guilmineau E., Deng G. B., Kornhaas M., Rodi W., On simulating the turbulent flow around the Ahmed body: A French-German collaborative evaluation of LES and DES, *Comput. Fluids*, 78, 10-23, 2013.
15. Aljure D. E., Lehmkuhl O., Rodríguez I., Oliva A., Flow and turbulent structures around simplified car models, *Comput. Fluids*, 96, 122-135, 2014.
16. Corallo M., Sheridan J., Thompson M. C., Effect of aspect ratio on the near-wake flow structure of an Ahmed body, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 147, 95-103, 2015.
17. Mirzaei M., Krajnović S., Basara B., Partially-Averaged Navier-Stokes simulations of flows around two different Ahmed bodies, *Comput. Fluids*, 117, 273-286, 2015.
18. Tunay T., Yaniktepe B., Sahin B., Computational and experimental investigations of the vortical flow structures in the near wake region downstream of the Ahmed vehicle model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 159, 48-64, 2016.
19. Pınarbaşı A., Güleren K.M., Gürlek C., Temel Ü.N., Ağır A., Ahmed Modeli Üzerindeki Akış Yapısının İncelenmesi, III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı Eskişehir, Türkiye, 1-8, 16-18 Eylül, 2010.
20. Zafer B., Haskaraman F., Numerical investigation of headwind and crosswind conditions of Ahmed body, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 215-229, 2017.
21. Menter F. R., Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective, *International journal of computational fluid dynamics*, 23 (4) 305-316, 2009.
22. Bayraktar S., Bilgili Y.O., Effects of under body diffuser on the aerodynamics of a generic car, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7 (2), 99-109, 2018.
23. Aksoy M.H., Yagmur S., Dogan S., CFD Modelling of Industrial Air Curtains with Heating Unit, *EPJ Web of Conferences*, 213, 02001, 2019.
24. Özmen Y., Aksu E., Özmen N.G., Experimental and numerical investigation of effects of different cavity geometries on flow in a rectangular channel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 627-640, 2021.
25. Doğan S., Özgören M., Okbaz A., Şahin B., Akilli H., Investigation of interactions between a sphere wake and free surface, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 1123-1134, 2018.
26. Yagmur S., Dogan S., Aksoy M.H., Goktepe I., Ozgoren M., Comparison of flow characteristics around an equilateral triangular cylinder via PIV and Large Eddy Simulation methods, *Flow Meas. Instrum.*, 55, 23-36, 2017.
27. Okbaz A., Pınarbaşı A., Olcay A.B., Aksoy M.H., An experimental, computational and flow visualization study on the air-side thermal and hydraulic performance of louvered fin and round tube heat exchangers, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 121, 153-169, 2018.
28. Westerweel J., Elsinga G.E., Adrian R.J., Particle image velocimetry for complex and turbulent flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 45, 409-436, 2013.
29. Durhasan T., Pinar E., Ozkan G.M., Aksoy M.M., Akilli H., Sahin B., PIV measurement downstream of perforated cylinder in deep water, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 72, 225-234, 2018.
30. Firat E., Ozkan G.M., Akilli H., PIV measurements in the near wakes of hollow cylinders with holes, *Experiments in Fluids*, 58 (5), 1-19, 2017.