



Önden ve yanal rüzgar şartı altında Ahmed cisminin sayısal incelenmesi

Baha Zafer*, Furkan Haskaraman

İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Ahmed cismi önden ve yanal rüzgar şartları altında incelenmiştir.
- Araç arkasında oluşan vorteks yapılarının etkileri gösterilmiştir.
- Arka yüzey eğim açısına göre sonuçlar irdelenmiştir.

Makale Bilgileri

Geliş: 09.01.2016

Kabul: 05.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300613

Anahtar Kelimeler:

Ahmed Cismi,
sıkıştırılamaz akış,
türbülans modelleme,
yanal rüzgar durumu

ÖZET

Bu çalışmada Ahmed cismine ait zamana bağlı akış alanı iki farklı arka yüzey eğim açısı için incelenmiştir. Yanal rüzgar şartlarının önden rüzgar şartlarına göre aerodinamik etkilerini nasıl değiştirdiği, 3 boyutlu zamana bağlı akış alanı çözümleri reliable k-ε türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Hesaplanan akış alanı sonuçları deneysel çalışmalar ve daha önce yapılmış sayısal veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Akış alanına ait genel özellikler ve akış yapılarına ait basınç katsayısı, akım çizgileri, türbülans kinetik enerji ve hız büyüklüğü gibi farklı akış alanı değişkenleri birçok tanımlı düzlem üzerinde tüm sayısal hesaplamalar için gösterilmiştir.

Numerical investigation of headwind and crosswind conditions of Ahmed body

H I G H L I G H T S

- Ahmed body is investigated under conditions of headwind and crosswind.
- The effects of rear vortex structure are shown.
- The numerical results are studied with respect to rear angles.

Article Info

Received: 09.01.2016

Accepted: 05.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.300613

Keywords:

Ahmed Body,
incompressible flow,
turbulence modelling,
crosswind

ABSTRACT

In this study, unsteady incompressible flow field 3D Ahmed body are investigated for two different slant angle. In the case of 3D unsteady flow fields, reliable k-ε turbulence model is used to investigate the aerodynamical effects of crosswind conditions over headwind conditions. All numerical results are compared and validated with experimental measurement and previously conducted numerical studies. The general nature of the flow field and its structure demonstrated by different flow field quantities such as pressure coefficient, streamlines, turbulence kinetic energy and velocity magnitude along various cross sections were presented for all numerical cases.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: baha.zafer@istanbul.edu.tr/ Tel: +90 555 466 1298

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

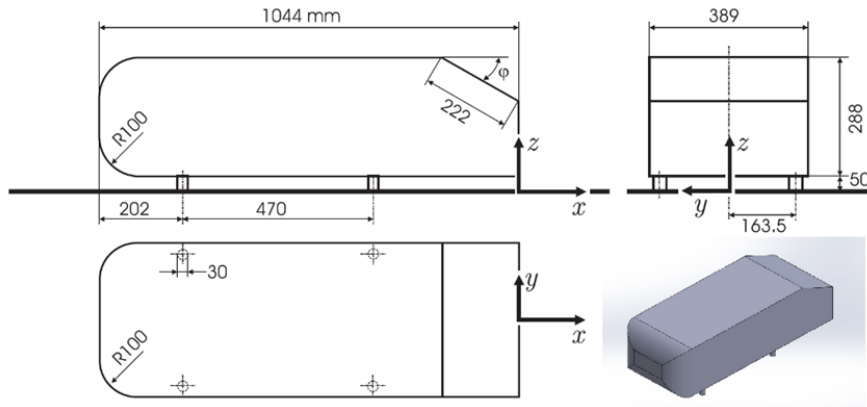
Yirminci yüzyılın başından bugüne kadar yaygın olarak kullandığımız kara taşıtları, günümüz dünyasının tanımlanmasında hem mühendislik hem de sosyolojik açıdan mutlaka kendisine değinilmesi gereken bir olgudur. Temelde, hız kavramının hayatımıza girmesinin en önemli sebepleri, kara taşıtları ve bu açılan yoldan devam ederek ürettiğimiz hava araçlarıdır. Kara taşıtları aynı zamanda toplumların kendi sınırları ve karasal ulaşımın mümkün olduğu kıtasal ilişkiler içinde ticaret hayatını belirleyen en önemli araç grubudur. Bu yaygın kullanımı nedeniyle kara taşıtlarının işler durumlarını sürdürmeleri için harcanan enerji sarfiyatı her ülkenin ekonomisinde önemli bir gider kalemini işaret eder [1]. Bu sarfiyatı azaltmak için üretici firmalar, araçlarının insan ayağını yerden kesmesinin yanında yüksek sürat, yüksek taşıma kapasitesi, uzun ömür, çevreci ve yakıttan tasarruf gibi üstün performans özelliklerine sahip olması gerektiğini fark ettiklerinden günümüze kadar, bir yandan motor ile sağlanan gücü artırma, diğer yandan da hava direncinden kaynaklanan kayıpları azaltma yollarını araştırmışlardır. Ortalama bir hızla yol alan kara aracının harcadığı enerjinin %60'ı hava ile sürtünmeden kaynaklanan sürüklenme direncini yenmek için harcanır [2].

Kara taşıtlarına etkiyen önden (headwind) ve daimi yanal (steady crosswind) rüzgarın zamana bağlı akış alanı içinde aerodinamik kuvvetlere etkisinin incelenmesi son dönemlerde artan bilgisayar gücüne bağlı olarak sıklıkla ele alınan bir durumdur. Kara taşıtlarının aerodinamiği ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların çoğunluğunda, gerçek araçların etrafındaki akış yapısına benzer özellikler oluşturabilecek şekilde basitleştirilmiş model araçlar kullanılmıştır. Çalışmalarda en çok kullanılan basitleştirilmiş araç modeli, Ahmed Cismi (Ahmed Body) olarak adlandırılan modeldir [3], Şekil 1. Her ne kadar taşıt arkası iz bölgesinde küt cisimlerin geneli için geçerli olan kaideye uygun olarak akış alanı, zamana bağlı bir karakter gösterse de zamanda ortalaması alınan akış alanı içinde

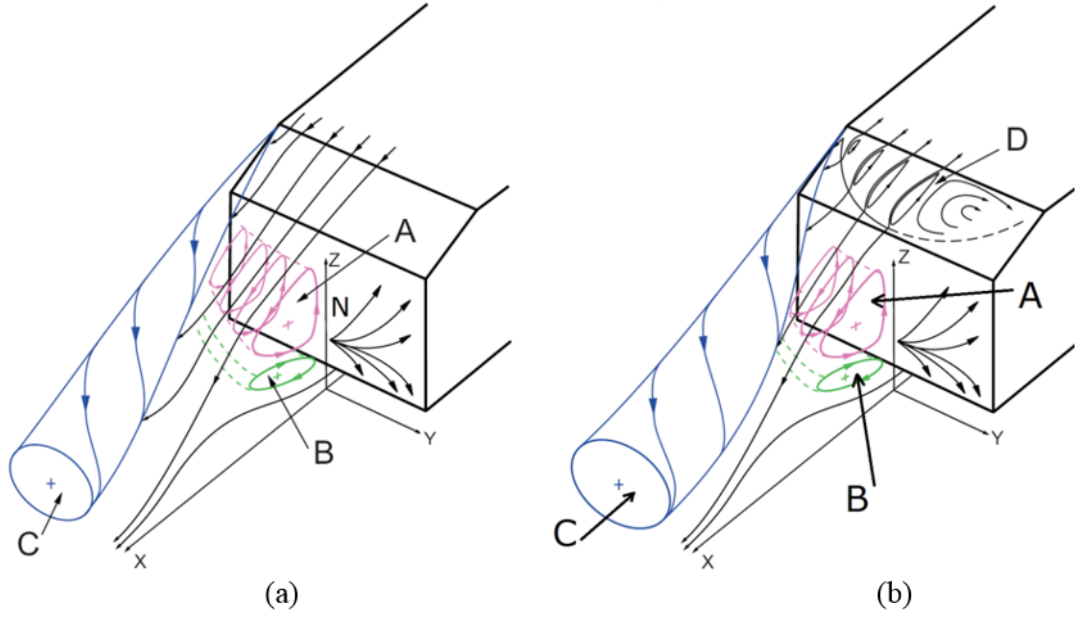
kendini her daim gösteren akış yapıları özellikle büyük vorteks yapıları bulunur. Ahmed cismi üzerine yapılan deneylerde [3] iki kritik arka yüzey eğim açısı belirlenmiştir: $\phi_{1,kr} = 12.5^\circ$ ve $\phi_{2,kr} = 30^\circ$. Araç arkasındaki vorteks yapıları, iki kritik açıya göre şu şekilde özetlenebilir: i) ilk durum arka yüzey eğim açısının ilk kritik açıdan düşük olduğu şart, $\phi < \phi_{1,kr}$ için arka tarafta gözlemlenen vorteks yapısı sanki iki boyutlu iken akım ayrılması hem araç üst duvarında hem de eğimli arka yüzeyde görülmemektedir. İz bölgesinde ise iki tane ters yönlü A ve B olarak adlandırılmış vorteks yapısı gözlemlenmektedir, Şekil 2a. Vorteks yapılarının simetrik özelliğinin bozulduğu yanal rüzgar durumunda cisim üzerindeki kuvvetlerin hesaplanması denge ve kararlılık değerlerinin belirlenmesinde son yıllarda önem kazanmıştır [4].

Girdap A yapısının araç yan duvarından kopan ve araç arka duvar eğimine bağlı olarak şiddeti değişen Girdap C ile etkileşmesi iz bölgesinde toroidal vorteks yapısının oluşmasının en önemli nedenidir. ii) $\phi > \phi_{2,kr}$ içinse, yan yüzeyden kopan Girdap C daha fazla şiddetleneceğinden iz bölgesindeki vorteks yapıları arasında kuvvetli etkileşimlerin gözlemlendiği bir hal alır. Ayrıca araç üst duvarından kopan kayma gerilme tabakası (shear layer) arka eğimli düzlem üzerinde ayrılma kabarcığı (bubble seperation) oluşturmaya başlar, Şekil 2b.

Lienhart H. ve diğerleri [5], son yıllarda taşıt aerodinamiği hesaplamalarında kullanılan türbülans modellerinin doğrulanma çalışmaları için temel deneyleri gerçekleştirmişlerdir. İkinci kritik arka yüzey eğim açısı olan $\phi_{2,kr} = 30^\circ$ göz önüne alınarak iki farklı eğim açısı $\phi = 25^\circ$ ve $\phi = 35^\circ$ için Ahmed modeli üzerinde kapsamlı deneyler yapılmıştır. Ortalama ve zamana bağlı hız ölçümleri için iki bileşenli Laser Doppler Anemometre (LDA) kullanılmıştır. Venning ve diğerleri parçacık izlemeli hız ölçüm yöntemi kullanarak $\phi = 25^\circ$ arka eğim açılı Ahmed modelinin arkasındaki zamana ortalaması alınmış iz bölgesi yapısını incelemişlerdir [6]. Ahmed



Şekil 1. Genelleştirilmiş araç modeli için kullanılan geometrik tanımlar (Geometric definition of generic vehicle model)



Şekil 2. Arka yüzey eğim açısına bağlı olarak araç iz bölgesindeki zamana göre ortalama akış alanı görünüşleri, a) $\varphi < \varphi_{1,kr}$, b) $\varphi > \varphi_{2,kr}$ (Sketch of the time-averaged flow in the near-wake as a function of the slant angle φ , a) $\varphi < \varphi_{1,kr}$, b) $\varphi > \varphi_{2,kr}$)

modelinin, genişliği "W" olmak üzere genişlikleri sırasıyla 0,75W, W, 1,25W olan üç farklı model için serbest akım hızına göre hesaplanan Reynolds sayısının 3×10^4 durumunda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ahmed modeli simetri eksenli eğimli yüzey üzerindeki akış alanında, dar ve orijinal genişlik durumunda akış ayrılması gözlenmemiş iken geniş durumda gözlemlenmişlerdir. Taşıt tasarımı açısından arka eğim açısı ile birlikte genişlik-yükseklik oranının da önemli bir geometrik parametre olduğu bildirilmiştir [6]. Yanal rüzgar şartı altında araç aerodinamiği için yapılan çalışmalarda arka tarafta görülen vorteks yapılarının incelenmesi ağırlık verilmiştir [7]. Bu çalışmada literatürde genel olarak verilen ölçeklendirilmiş araç geometrisi kullanılmış olsa da, tam boyutlu çalışmalar için de benzer sonuçlar elde edilmiştir [8]. Çalışmada iki farklı eğim açısı için elde edilen tüm veriler literatürde bulunan deneysel veriler [9] ve ERCOFTAC doğrulama çalışmaları çalıştayının internet sitesinde araştırmacıların kullanımına açık olarak verilmiş olan değerler ile karşılaştırılmıştır [10].

McNally ve diğerleri [11], arka eğim açılı Ahmed modeli üzerindeki ön ve arka bölgelerdeki akış alanı aktif akış kontrolü yöntemini kullanarak akım ayrılmalarını ve model arkasındaki yakın iz bölgesini hem nicel hem de nitel olarak incelemişlerdir. Ölçümler Ahmed modelinin boyuna ($L = 522$ mm) göre serbest akım hızı 28 m/s değerinde hesaplanan Reynolds Sayısı $9,7 \times 10^5$ olması durumu için gerçekleştirilmiştir. Model arkasındaki ayrılma ve iz bölgesinin daha önce Ahmed ve diğerleri [3] tarafından ortaya konulan yapıdan daha karmaşık olduğunu bildirmişlerdir. Thacker ve diğerleri [12], arka eğimli yüzey açısı $\varphi = 25^\circ$ için araç üst yüzeyinden arka eğimli yüzeye geçiş sırasında oluşan vorteks yapılarının geçiş

geometrisine olan bağlılığı incelenmiştir. Araç üst yüzeyinden arka eğimli yüzeye geçişi keskin ve yuvarlaklaştırılmış olarak iki farklı geometri üzerinde denenmiştir. Yuvarlaklaştırılmış durumda sürüklenme katsayısında %10'luk bir azalma gözlemlenmişken taşıma katsayısında değişim görülmemiştir.

Joseph ve diğerleri, Ahmed modeli arkasındaki akış için aktif ayrılma kontrol metodunu kullanarak akış ayrılmasını düzenlemeyi ve dolayısıyla toplam sürüklenme katsayısını azaltmayı amaçlamışlardır [13]. Arka yüzey eğim açısı $\varphi = 35^\circ$ lik Ahmed modeli Reynolds Sayısı $1,4 \times 10^6$ için akış alanını Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Yöntemi (PIV) ile belirlemişlerdir. MEMS ile oluşturulan periyodik basınç düzensizliği bir yarı boyunca geçirilerek salınımlı jet eğimli yüzeye uygulanmıştır. Jet frekansının 275 Hz olması durumunda iz bölgesinin büyük ölçüde azaldığını ve sürüklenme katsayısında %10'ye varan azalma belirlenmiştir.

Guilmineau ve diğerleri [14], arka yüzey eğim açısı $\varphi = 25^\circ$ ve $\varphi = 35^\circ$ için Ahmed modeli etrafındaki akışı birkaç farklı türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. İz bölgesindeki akış yapısının $\varphi = 30^\circ$ eğimli arka yüzey durumunda üç boyutlu, bunun altındaki ve üstündeki eğim açılarında sanki iki boyutlu (semi two dimensional) olduğunu bildirmişlerdir. Guilmineau'nun çalışmasının en orijinal yönü olan, sayısal analizler modelin ayaklı ve ayaksız olması durumları için tekrarlanmış ve ayakların modele eklenmesi halinde sürüklenme katsayısının arttığı bildirilmiştir [14]. Guilmineau ve diğerleri incelemelerinde yanar rüzgar (cross wind) etkilerini incelemek için tasarlanan Willy kare arka kesitli model kullanarak deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir [15].

Akışın sıkıştırılmaz ve Re sayısının $0,9 \times 10^6$ değeri için sonlu hacim ayrıklaştırması kullanılarak elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sapma (yaw) açısı $\beta = 0^\circ - 30^\circ$ aralığında değiştirilerek aerodinamik kuvvetler, duvar basınçları ve toplam basınç haritaları çıkarılmıştır. Bu çalışmada Ahmed cismi üzerine etki eden önden (headwind) ve yanal (crosswind) rüzgarın araç üzerindeki ve iz bölgesindeki etkileri incelenmiştir. Ahmed cismi için günümüze kadar yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların ortaya koyduğu kritik arka yüzey eğim açısı $\varphi = 30^\circ$ nin hemen altında olan $\varphi = 25^\circ$ ve hemen üzerinde olan $\varphi = 35^\circ$ iki farklı açı denenmiştir. Ayrıca son dönemde araç üretimlerinde kullanılan malzemenin azalmasına bağlı olarak araç tasarımında göz önüne alınmaya başlayan yan rüzgar etkisi hem araç üzerindeki ortalama basınç, hız, türbülans kinetik enerjisi ve akım çizgileri, Ψ , görselleştirilerek incelenmiştir. Yanal rüzgar durumunda sapma açısı (yaw angle) $\beta = 20^\circ$ olarak alınmış ve araç hesaplamalı alan içinde sapma açısı kadar döndürülmüştür. Önden rüzgar durumunda her iki arka yüzey eğim açısı için zamana bağlı k-ε türbülans modeli (uRANS) ile elde edilen sayısal sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

2. SAYISAL YAKLAŞIM (NUMERICAL METHOD)

Akış alanına ait zamana bağlı bünye denklemlerinin sayısal ayrıklaştırması ticari Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Mekansal ayrıklaştırma için sonlu hacim yaklaşımı kullanılırken zamansal ayrıklaştırma için kapalı basınç temelli çözücüsü ile hem mekansal hem de zamansal ayrıklaştırmada ikinci mertebeden ileri gidişli şema (second order upwind scheme) kullanılmıştır. Akış alanına ait korunum denklemleri integral formunda Eş. 1’de verilmiştir [16].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint (F - G) \cdot dA = \int_V H dV \quad (1)$$

akış çözüm vektörü W, konvektif akı matrisi F ve vizkoz akı matrisi G;

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho V \\ \rho V u + p i \\ \rho V v + p j \\ \rho V w + p k \\ V(\rho E + p) \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix} \text{ ve} \quad (2)$$

$$H = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \\ f_z \\ \rho(f_i v_j \delta_{ij}) + \dot{q}_h \end{Bmatrix}$$

şeklinde tanımlanmıştır, Eş. 2. Sırasıyla ρ akışkanın yoğunluğu, $\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ hız vektörü, V kontravariant

hız iken tanımı, $V = \vec{v} \cdot \vec{n}$ olarak verilmiştir ve \vec{n} yüzey normali olarak tanımlanmıştır. E birim kütledeki toplam enerji, p basınç iken τ_{ij} viskoz gerilim tansörü ve q ısı akısı olarak tanımlanmıştır. H kaynak teriminde ise f_j hacmi etkileyen kuvvetleri (yerçekimi, Corralius ivmesi v.b.) ve \dot{q} terimi ise hacim içinde üretilen zamana bağlı ısı kaynağını göstermektedir. Düşük Mach Sayılı akışlar için süreklilik bağıntısında zamana bağlı terimin, yoğunluğu sabit olduğundan düşmesine bağlı olarak momentum denkleminin çözümünde zorluk ortaya çıkmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin sayısal formunda bu sorun ön-koşullandırma (preconditioning) ile ortadan kaldırılır. Zamana göre türev terimi, ön koşullandırma matrisi ile çarpılır, Eş. 3.

$$\frac{\partial W}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint (F - G) \cdot dA = \int_V H dV \quad (3)$$

Q çözüm vektörü, basıncında tanımlandığı birincil değişkenlere göre yeniden yazılır ve ön-koşullandırma matrisi:

$$Q = \begin{Bmatrix} p \\ u \\ v \\ w \\ T \end{Bmatrix}, \frac{\partial W}{\partial Q} = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \rho_p H - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H + \rho C_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

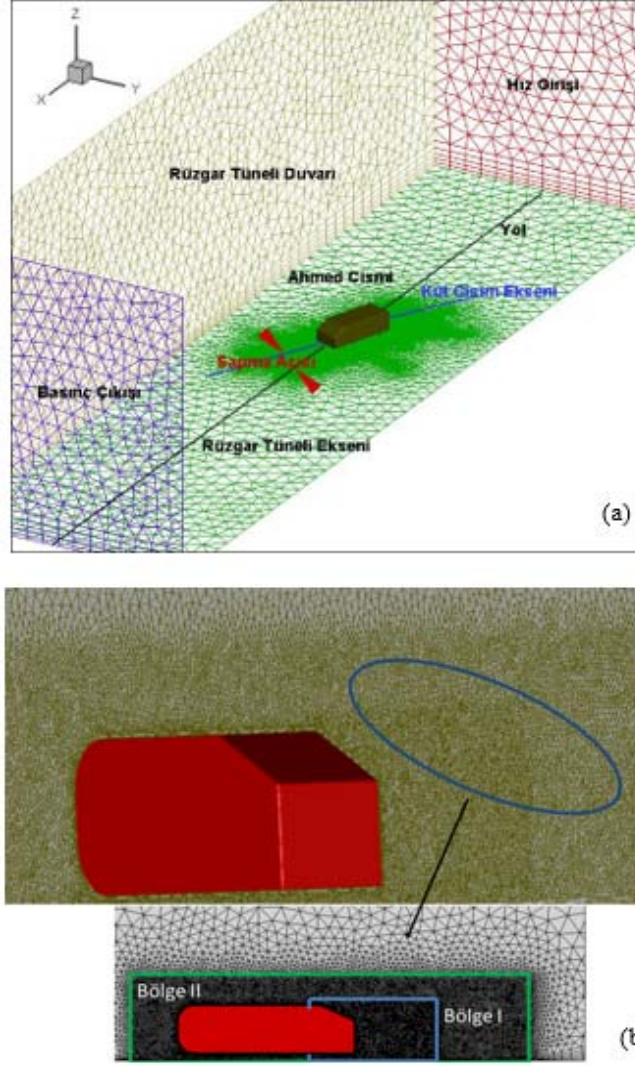
$\rho_p = \frac{\partial \rho}{\partial p}$, $\rho_T = \frac{\partial \rho}{\partial T}$ tanımlanırken, sıkıştırılmaz akış için $\delta = 0$ alınır, Eş. 4. Böylece sıkıştırılmaz akış alanı çözümlerinde kullanılan ayrıklaştırma şeması elde edilir [16]. Eş. 1 ve Eş. 2’de τ_{ij} ise türbülans kayma (Reynolds stress) gerilmesi Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (5)$$

denklemdaki u'_i ve u'_j ise türbülans hız ani değişimlerini (fluctuation), μ_t türbülans viskozitesi, δ_{ij} ise Kronecker Delta’dır, Eş. 5. Bu çalışmada k-ε türbülans (Realizable k-ε turbulence model) modeli kullanılmıştır [17]. Kara taşıtlarına ait akış alanının çözümünde zamana bağlı değişkenlerin davranışını belirleyen ana etken duvarlar olduğundan bu model türbülanslı akışlar için uygun görülmüştür.

2.1. Hesaplama Alanı (Computational Domain)

Sayısal çözüm için oluşturulan hesaplama alanı Şekil 3’de gösterilmiştir. Sayısal sonuçlar ile deneysel bulguların uyumlu olacağı en uygun sonlu hacim elemanları ile ayrıklaştırılmış ve literatürde yapılan ağ sıklığı çalışmaları



Şekil 3. a) 3-Boyutlu hesaplama alanı sınır şartları ve b) Ahmed cismi yakın bölgesi sayısal ağ yapısı
(a) 3D computational domain with boundary conditions and b) Ahmed body near region mesh structure)

örnek alınarak Ahmed cismi üzerinde daha sık sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur [18]. Uygulanan türbülans modeline ait duvar yakınındaki ilk hücre uzaklığı 30 ile 80 aralığını sağlayacak şekilde seçilmiştir [19].

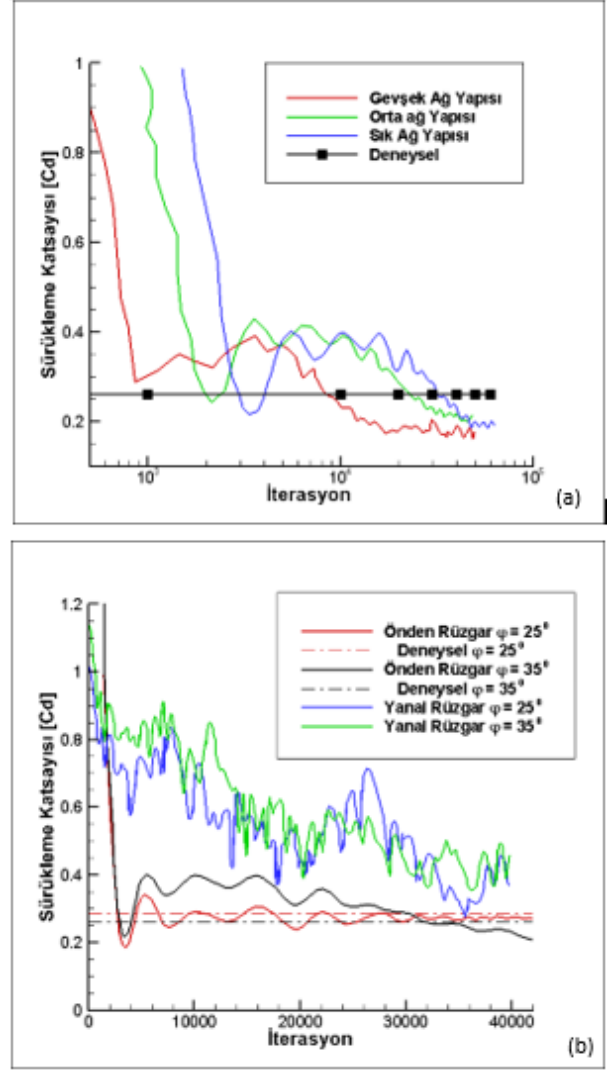
Hesaplama alanında giriş şartı 40 m/s' lik üniform hız profili olarak verilmişken çıkış şartı atmosfere açık olarak basınç değeri verilmiştir, Şekil 3a. Araç yüzeyinde ve tünel yan duvarlarında viskos duvar şartı girilmiştir. Şekil 3b' de görüldüğü üzere araç model duvarına yaklaştıkça sıklaşan ve yoğunlaşan iki ayrı bölge kullanılmıştır. Ahmed cisminin yakın bölgesinde gerçekleştirilen bu iki kademeli sıklaştırma ile, hem incelenen kara taşıtının arka eğim yüzeyindeki akış alanının zamana bağlı çözümünün deneysel veriler ile karşılaştırılmasını sağlayacak y^+ değerinin sağlanması hem de araç yakın iz bölgesinde oluşan vorteks yapılarının doğru çözülmesi hedeflenmiştir. Kara aracının etrafına atılan sayısal ağ yapısını inşa eden sonlu hacim eleman sayıları, önden rüzgar durumunda

simetri nedeniyle yarım hesaplama alanı alınmıştır ve yaklaşık 1,8 milyon iken yanal rüzgar durumunda ise 5 milyondur. Ayrıca araç katı yüzeyine ait yakın alanın modellenmesinde duvar fonksiyonları (the wall functions) kullanılmıştır. Birçok farklı yaklaşımdan, akım ayrılması ve yeniden yüzey üzerine değen akış tiplerini daha iyi modelleyeceği bilinen denge konumunda olmayan duvar fonksiyonu (the non-equilibrium wall functions) kullanılmıştır.

Deney verileri ile karşılaştırılması için deneyde kullanılan boyutlara sahip araç geometrisi kullanılırken, hesaplama alanı araç önünde akış alanının yeterli sınır tabaka oluşumu destekleyecek kadar uzun alınmıştır ($1,5xL_{\text{araç}}$). Ayrıca araç arkasındaki güçlü vorteks yapılarına bağlı olarak oluşan etkileşim bölgesindeki yüksek zamana bağlı değişimlerin sınır şartlarında hata oluşumunu engellemesi için hesaplama alanı araç arkasında daha önce belirtildiği gibi yeterli uzunlukta hazırlanmıştır ($4,5xL_{\text{araç}}$).

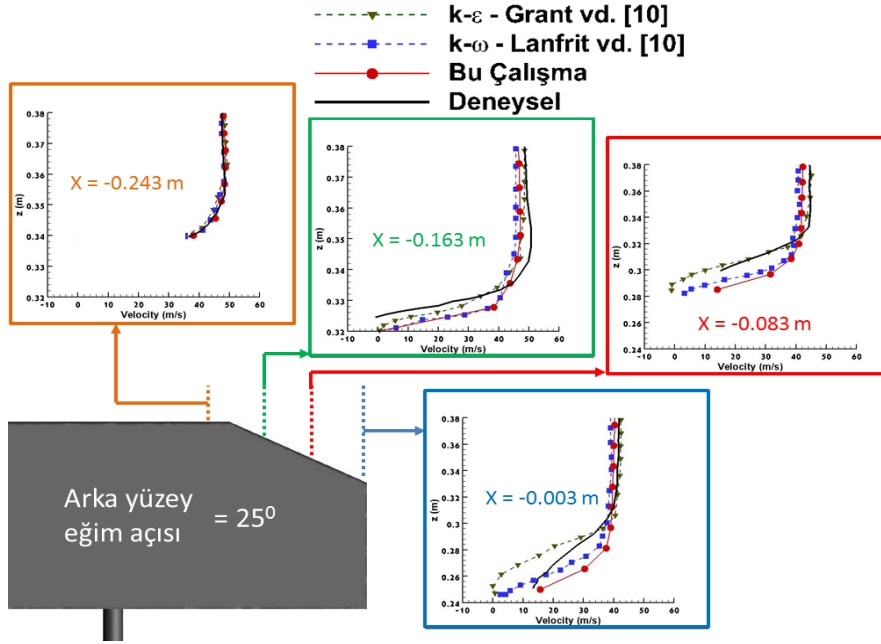
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Ahmed modeli $Re_L = 2,8 \times 10^6$ için model etrafındaki zamana bağlı akış alanı önden ve yanal rüzgar durumunda iki farklı arka yüzey eğim açısı için sayısal olarak incelenmiştir. Zamana bağlı olarak çözülen hesaplamalarda birim zaman adımı $\Delta t = 10^{-5}$ s. olarak alınmış ve yineleme sayısı 40.000 adım olarak belirlenmiştir. Tüm sayısal hesaplamalar Düsseldorf Üniversitesi bünyesinde kurulu CFS (Center of Flow Simulation) merkezinde bulunan yüksek başarılı bilgisayarlarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde ağdan bağımsızlık için üç farklı sayısal ağ yapısı kullanılmıştır. Arka eğim açısı $\phi = 35^\circ$ için yapılan incelemede gevşek sayısal ağ yapısı için yaklaşık 0,5 milyon eleman kullanılmış iken orta sıklıktaki ağ yapısında 1,15 milyon ağ elemanı üretilmiştir. Sık sayısal ağ yapısı için yaklaşık 1,5 milyon eleman ile hesaplama alanı modellenmiştir. Deneysel sürüklenme katsayısı Ahmed ve diğerlerinin 1984 yılında yaptıkları deneysel çalışmaya göre $C_{d, deneysel} = 0,26$ olarak verilmiştir [3]. Her üç ağ yapısı ile deneysel verinin karşılaştırması Şekil 4a verilmiştir. Şekil 4b' de verilen sürüklenme katsayıları incelendiğinde, arka eğim açısı $\phi = 25^\circ$ için önden rüzgar şartı altında hesaplanan C_d değerinin deneysel veri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak aynı şart altında hesaplanan arka yüzey eğim açısı $\phi = 35^\circ$ durumunda ise deneysel veri ile hesaplanan sürüklenme katsayısı arasında % 4'lük bir sapma görülmüştür. Ayrıca yanal rüzgar şartı altında incelenen her iki arka yüzey eğim açısına ait akış alanı yapılarının gösterdiği zamana bağlılık (unsteadiness) sürüklenme katsayısı çizimlerinde görülmektedir. Bu sonuçlar gözönüne alındığında yanal rüzgar şartı altında hesaplanan C_d değerinin en az iki kat artmasının beklenebileceği görülmektedir. Çalışmada hesaplama süresi Şekil 4'de görüldüğü gibi $t_{son} = 0,4$ sn. olarak alınmıştır. Akış alanına ait tüm ortalama değerler için sonuçların başlangıç süresizliklerinden bağımsızlaştığı $t_{ilk} = 0,2$ sn. ile en yüksek zaman değeri $t_{son} = 0,4$ sn. zaman aralığı kullanılmıştır. İki farklı arka yüzey eğim açısı için zamana bağlı k-ε türbülans modeli kullanarak elde edilen kara taşıtı arka yüzeyinde konumlanmış 4 kesitte sayısal ve deneysel hız dağılımları ile literatürde daha önce gerçekleştirilmiş üç farklı sayısal sonuç Şekil 5 ve Şekil 6'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda kullanılan daha önce gerçekleştirilmiş literatürdeki çalışmalardan ilki, Manchester Üniversitesinde (UMIST) yapılmıştır [10]. Bu modelde duvar yakınındaki akış alanı lineer olmayan yaklaşım ile modellenmiş ve k-ε türbülans modeli kullanılmıştır [UMIST-KE-STD1]. İkincisi ise, Fluent'in Almanya ofisinde görevli mühendisler tarafından Ahmed cisminde uygulanmıştır [10] ve SST k-ω modeli yine duvar yakınındaki akış alanı dikkate alınarak modellenmiştir [FLUENT-KW-SST]. Üçüncü model, ilk model ile birlikte arka eğim açısı $\phi = 35^\circ$ lik araç için kullanılmıştır [10]. Bu son modelde k-ω türbülans modelini Launder-Reece ve Rodi (LRR) tarafından geliştirilen Reynolds Gerilim Taşınımı (RST) modeli ile uyumlu olarak kullanılmıştır [EDF-RSM-LRR].

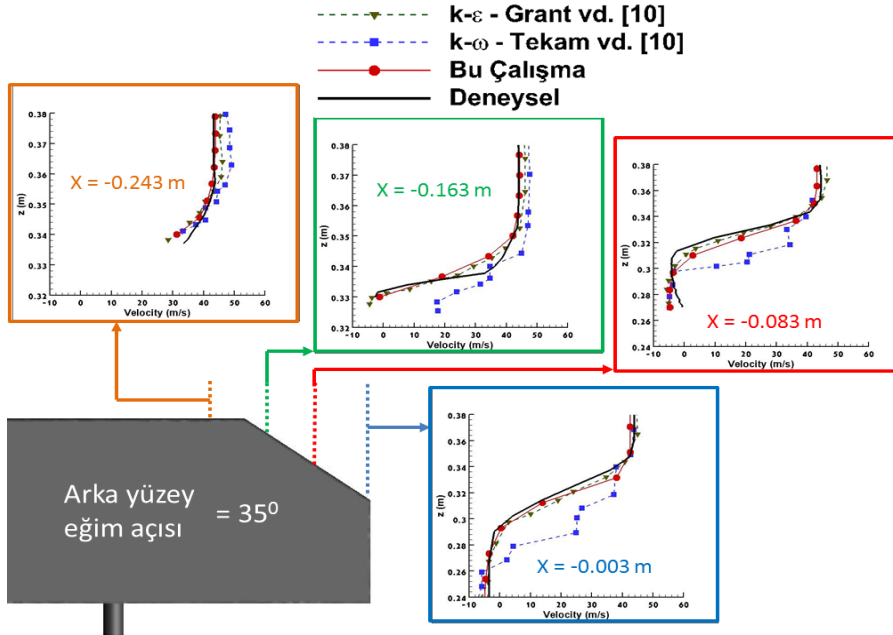


Şekil 4. a) Ahmed cismi ($\phi = 35^\circ$) arka eğim yüzeyi için ağdan bağımsızlık sonuçları b) Arka eğim açılarının her ikisi için hem önden hem de yanal rüzgar şartı altında sürüklenme katsayısının iterasyona göre değişimi ((a) Grid independency results for Ahmed body at slant surface, $\phi = 35^\circ$ b) Drag coefficient vs. Iteration results in the case of either headwind or crosswind for both slant angles)

Model arka eğimli yüzeyi üzerindeki akış alanında deneysel ve sayısal hız dağılımlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle her iki arka yüzey eğim açısı içinde arka eğimli yüzeyin hemen öncesinde konumlanmış istasyonda ($x = -0,243$) sayısal sonuçlar deneysel veriler ile son derece uyumludur. Arka yüzey eğim açısı $\phi = 25^\circ$ için Şekil 5, ikinci ($x = -0,163$) ve üçüncü ($x = -0,083$) istasyonda daha önce yapılmış sayısal çalışmalardan SST k-ω modeli deneysel veriler ile daha uyumlu iken bu çalışmada kullanılan k-ε modeli ile daha önce yapılmış sayısal çalışmalardan k-ε UMITS modeli hemen hemen aynı sonucu üretmiştir. İkinci istasyonda her iki k-ε türbülans modeli içinde hata % 2,5 civarında iken üçüncü istasyonda hata % 6,5 olarak hesaplanmıştır. Aynı türbülans modeli $\phi = 35^\circ$ lik çözümde akım ayrılması eğimli yüzey



Şekil 5. Ahmed cismi ($\phi = 25^\circ$) arka eğim yüzeyinde hız profillerinin deneysel ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması (Comparison of velocity profiles between experimental and numerical results for Ahmed body at slant surface, $\phi = 25^\circ$)



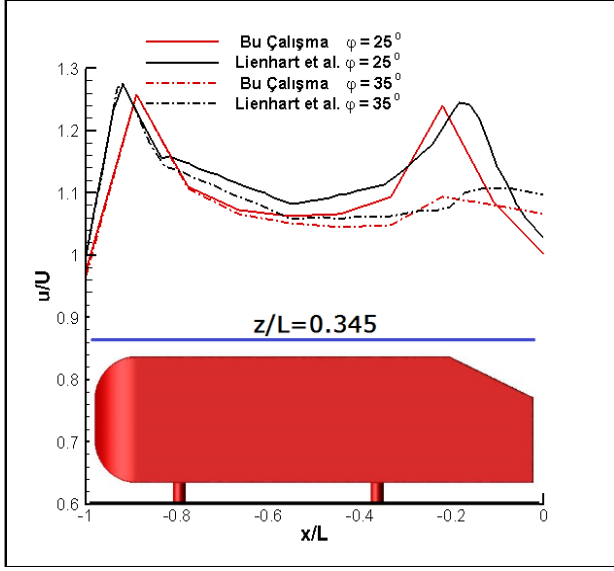
Şekil 6. Ahmed cismi ($\phi = 35^\circ$) arka eğim yüzeyinde hız profillerinin deneysel ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması (Comparison of velocity profiles between experimental and numerical results for Ahmed body at slant surface, $\phi = 35^\circ$)

üzerinde gerçekleştiği halde SST $k-\omega$ türbülans modeline göre daha iyi sonuçlar vermiş ve deneysel veriler ile tüm istasyonlar için oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Arka yüzey eğim açısı $\phi = 35^\circ$ için Şekil 6, son üç istasyonda ($x = -0,163, -0,083, -0,0003$) bu çalışmada kullanılan $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile daha önce yapılmış sayısal çalışmada kullanılan $k-\varepsilon$ UMIST türbülans modeli deneysel veriler ile çok uyumlu sonuçlar verirken SST $k-\omega$

modeli ise son üç istasyon için genelde %10 hatanın üzerinde sonuç üretmiştir. Hatta son istasyonda üretilen sonuç SST $k-\omega$ modeli için kabul edilebilir hata aralığının dışında kalmaktadır.

Leinhart ve diğerleri [5] tarafından LDA ölçüm tekniği kullanılarak yapılan deneylerde incelenen önemli değerlerden biri de hemen araç üzerinde ($z/L = 0,345$) ve

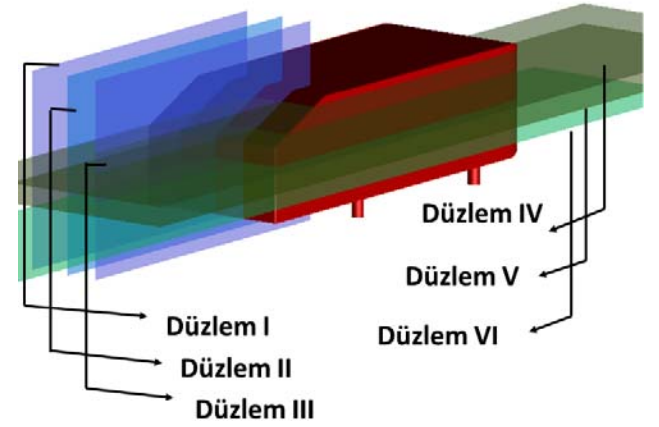
simetri ekseninde konumlanan ($y/L = 0,0$) araç boyunca hesaplanan x-yönündeki hız değişkeninin serbest akım ile normalleştirilmesi ait veridir. Bu konum için zamana bağlı hesaplanan sayısal sonuçlar her iki arka yüzey eğim açısı içinde Şekil 7’de verilmiştir. Her iki arka yüzey eğim açısına göre, araç ön tarafındaki normalleştirilmiş x-yönündeki hız büyüklükleri aynı mertebede sonuç üretmişken, arka eğimli yüzey civarında eğim açısına bağlı değişiklikler gözlenmektedir.



Şekil 7. Ahmed cismi üst duvarı civarında ($z/L = 0,345$) konumlanan veri istasyonunda her iki arka yüzey eğim açısı için normalleştirilmiş x-yönü hız profilinin Leinhart ve diğerlerinin [5] deneysel verileri ile karşılaştırılması (Comparison of experimental results of Leinhart *et al.*[5] with normalized x-direction velocity profiles for both slant surface angles at the nearly position of Ahmed body’s upper surface $z/L = 0,345$)

Arka yüzey eğim açısı $\phi = 25^\circ$ için eğimli arka yüzey başlangıcından hemen önce normalleştirilmiş x-yönündeki hız değeri artmaya başlarken deneysel veride $x/L = -0,2$ eğim başlangıcından hemen sonra en yüksek değerine ulaşmaktadır. Ancak sayısal verilerden elde edilen sonuçlarda ise, normalleştirilmiş hız değeri için en yüksek değer eğimli yüzey başlangıcının ($x/L = -0,2$) hemen öncesinde hesaplanmıştır. Arka yüzey eğim açısı $\phi = 35^\circ$ için ise diğer eğim açısında gözlemlendiği şekliyle herhangi bir hız artışı tespit edilmemiştir. Ancak $\phi = 35^\circ$ lik Ahmed cismi gövdesi üzerinde hemen hemen değişmeden gelen hız değerlerinin eğim açısına doğru artış eğilimi göstermesi $\phi = 25^\circ$ lik araçta olduğu gibidir. Her iki araç eğim açısı için karşılaştırma yaptığımızda ise, araç gövdesinin bittiği $x/L = 0,0$ konumunda $\phi = 35^\circ$ lik eğim açısı için normalleştirilmiş hız değerleri veri alanının çizgi üzerinde en düşük değerine ulaşmaktadır, Şekil 7. Bu sonuç, akım çizgileri, Ψ , incelendiğinde de görülmektedir. Arka yüzey eğim açısı $\phi = 35^\circ$ için akım çizgileri eğimli arka yüzey üzerinde ayrılma bölgesini görülmektedir Şekil 9c, bu olgu hızla düşen normalleştirilmiş x-yönündeki hız değerini açıklamaktadır. Araç arka eğimli yüzeyini ve iz

bölgesini kapsayan veri serimi, akış alanı ile araç arasındaki etkileşimin ortaya çıkarttığı tüm akış alanı değişkenlerini kapsamaktadır. Bu nedenle araç iz bölgesi içine 6 adet düzlem yerleştirilmiştir, Şekil 7 Akış alanı içinde hesaplanan ortalama değerlerin incelendiği düzlemlerin konumları Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca akış alanı içindeki akım çizgileri, Ψ , ortalama hız büyüklükleri, ortalama basınç katsayısı, C_p ve ortalama türbülans kinetik enerji değişkenleri incelenmiştir. Ahmed cisminin iz bölgesine yerleştirilmiş Düzlem I, Düzlem II ve Düzlem III’ den alınan akış alanı değişkenlerinden hız büyüklüklerine bağlı olarak görselleştirilen akım çizgileri Şekil 9’ de verilmiştir.



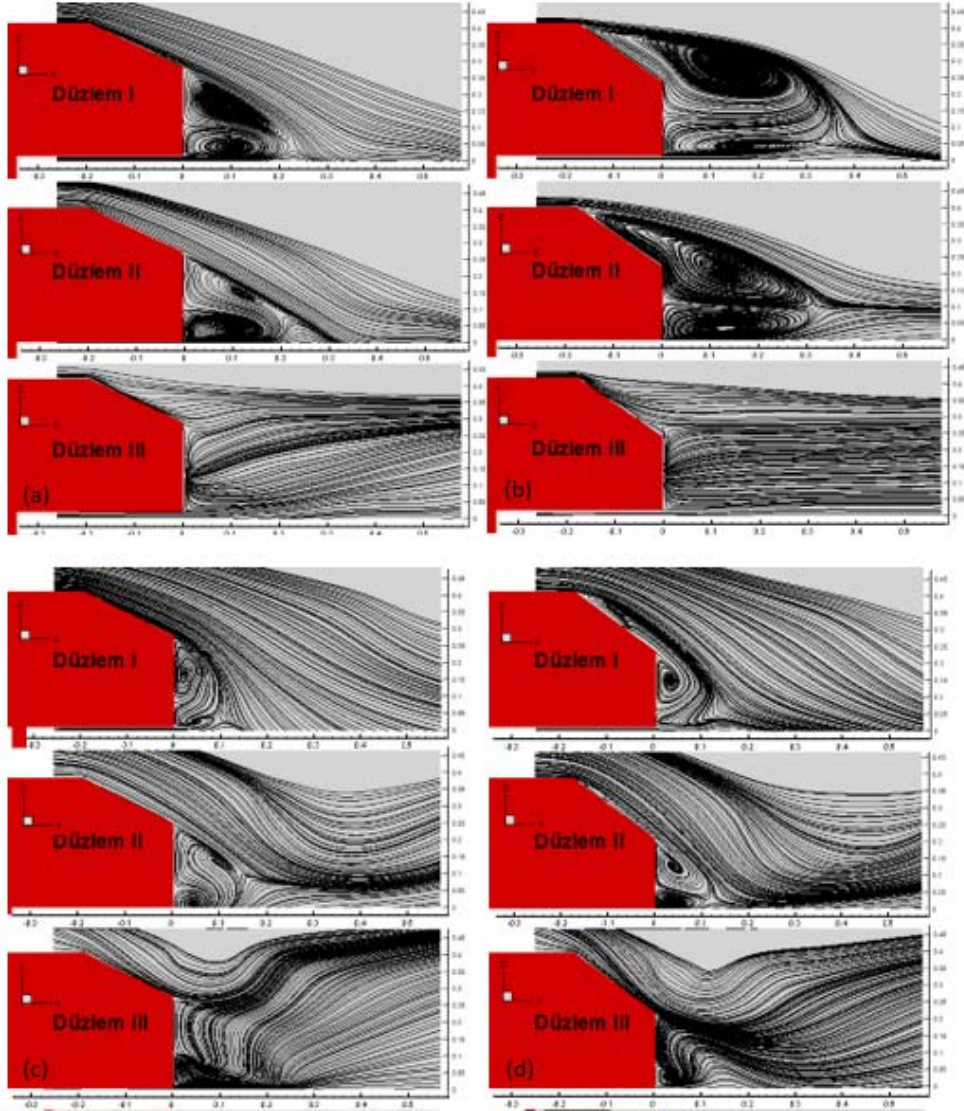
Şekil 8. Akış alanı değişkenlerinin incelendiği düzlemler (Planes which are used to investigate the flow fields)

Tablo 1. Hesaplama alanı içinde kullanılan veri düzlemlerinin konum bilgileri

(Location informations of data plane which are used at computational domain)

	Konum		Konum
Düzlem I	$y = -0,175$ m	Düzlem IV	$z = 0,32$ m
Düzlem II	$y = 0,0$ m	Düzlem V	$z = 0,25$ m
Düzlem III	$y = 0,175$ m	Düzlem VI	$z = 0,18$ m

Hem önden hem de yanal rüzgar durumunda Düzlem I ve Düzlem II’ de her iki arka yüzey eğim açısı içinde taşıt arkası akış alanında birbiri üzerinde ters yönde dönen simetrik olmayan vorteks çifti açıkça görülmektedir. Saat yönünde dönen vorteks (negatif girdap) model arkasında genel olarak daha büyük bir alanı kaplamaktadır. Aracın yerden yüksekliğine bağlı olarak oluşan geometrik kanal içinde hızlanan ve alt yüzeyden kopan vorteks (pozitif girdap) yapısı ise daha küçük bir yapı göstermektedir. Düzlem III’ de ise tüm durumlar için araç yan yüzeyine en yakın konumda olduğundan alt ve üst vorteks ile Girdap C’ nin anlık etkileşimine bağlı olarak ters yönlü ikili vorteks yapısı görülmemektedir, Şekil 9a-d. Kara taşıt arkasında oluşan vorteks yapısı merkezleri, $\phi = 25^\circ$ lik eğim açısı durumunda önden rüzgar için negatif girdap odağı Düzlem I’de $x/L = 0,1$ ve $z/L = 0,15$ konumunda iken pozitif olan girdap odağı $x/L = 0,1$ ve $z/L = 0,075$ konumundadır.



Şekil 9. Ahmed cismi arka düzleminde hesaplanan akım çizgileri a) $\phi = 25^\circ$ için önden rüzgar b) $\phi = 25^\circ$ için yanal rüzgar c) $\phi = 35^\circ$ için önden rüzgar ve d) $\phi = 35^\circ$ için yanal rüzgar (Numerical streamlines of Ahmed body at the slant surface a) headwind for $\phi = 25^\circ$ b) crosswind for $\phi = 25^\circ$ c) headwind for $\phi = 35^\circ$ d) crosswind for $\phi = 35^\circ$)

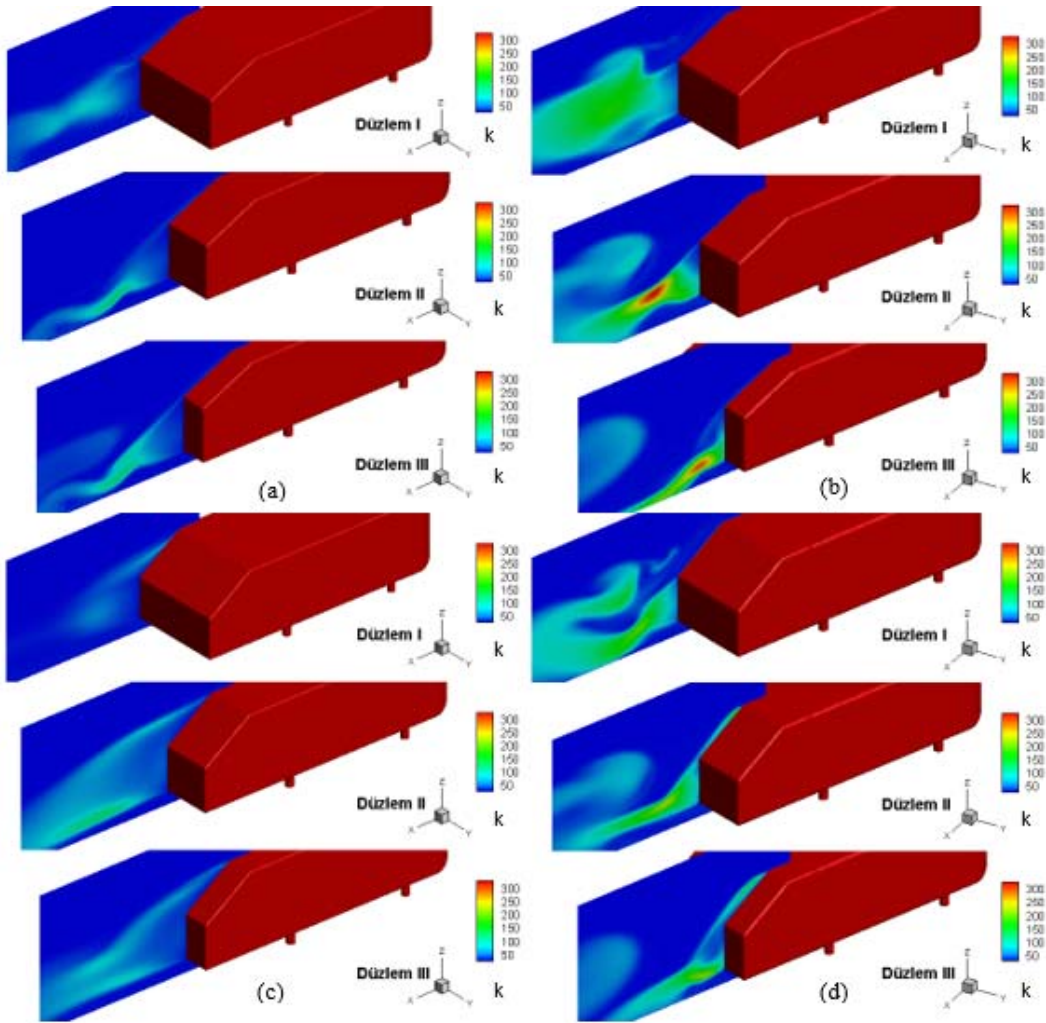
Tunay ve diğerleri [20] tarafından gerçekleştirilen $\frac{1}{4}$ boyutlarına sahip Ahmed cismi üzerinde gerçekleştirilen deneylerde $Re_h = 1,48 \times 10^4$ olarak alınmıştır. Su tüneline yapılan bu deneylerde elde edilen girdap konumları, negatif girdap odağı pozisyonu için $x/L = 0,05$, $z/L = 0,13$ ve pozitif girdap odağı pozisyonu için $x/L = 0,1$, $z/L = 0,06$ olarak hesaplanmıştır [20]. İz bölgesinde oluşan ters yönlü iki girdabı içeren iz bölgesi ayrılma genişliği $L_{iz} = 0,25$ olarak hesaplanmıştır. L_{iz} uzunluğu ters yönlü iki vorteksi içine alan bölgesinin hemen bitiminde gözlemlenen ayrılma noktası temel alınarak hesaplanmış ve araç uzunluğu ile boyutsuzlaştırılmıştır. Aynı arka yüzey eğim açısı için Düzlem II' de negatif girdap odağı $x/L = 0,15$ ve $z/L = 0,175$ iken pozitif girdap için $x/L = 0,12$ ve $z/L = 0,075$ noktasında gözlemlenmiştir. İz bölgesi ayrılma genişliği ise $L_{iz} = 0,22$ dir, Şekil 9a. Düzlem II için deneysel L_{iz} değeri 0,18 olarak ölçülmüştür [5]. Ahmed cismi arka yüzey eğim

açısı $\phi = 35^\circ$ için önden rüzgar durumunda Düzlem I' de negatif girdap (Girdap A, bkz. Şekil 2) $x/L = 0,2$ ve $z/L = 0,25$ iken pozitif girdap (Girdap B, bkz. Şekil 2) $x/L = 0,2$ ve $z/L = 0,075$ konumlanmıştır, Şekil 9c. Tunay ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen deneylerde, arka eğimli yüzey açısı $\phi = 35^\circ$ için negatif girdap odak konumu $x/L = 0,08$, $z/L = 0,24$ ve pozitif girdap odak konumu $x/L = 0,2$, $z/L = 0,075$ olarak hesaplanmıştır [20]. Bu değerler üzerinden hem sayısal sonuçlarda hem de deneysel verilere göre özellikle Girdap A' nın arka yüzey eğim açısı $\phi = 25^\circ$ ye göre pozitif z yönünde vorteks odağının yukarı doğru hareket ettiği görülmektedir. Ayrıca iz bölgesi ayrılma alanı taşıt arka dikey yüzeyi boyutlarını aşarak arka eğimli yüzey üzerine kadar genişlemiş ve iz bölgesi genişliği % 60 artarak $L_{iz} = 0,4$ 'e ulaşmıştır. Düzlem II' de ise Girdap A ve Girdap B için odak noktalarının konumları çok fazla değişmemişken $\phi = 35^\circ$ lik eğim açısı için iz bölgesi

ayrılma genişliği $L_{iz} = 0,35$ 'e kadar genişlemiştir. Ayrıca Leinhart *ve diğerleri* tarafından gerçekleştirilen deneylerde L_{iz} değeri $\varphi = 35^\circ$ lik eğim açısı için Düzlem II'de 0,33 olarak gözlemlenmiştir [5]. Düzlem II için $\varphi = 35^\circ$ de artış % 55 civarında hesaplanmıştır, Şekil 9c. Ahmed cismine etkiyen yanal rüzgar şartlarında ise, ters yönlü ikili vorteks yapısı Düzlem I ve Düzlem II için gözlemlenmiştir.

Ancak her iki arka yüzey eğimi içinde verilen sapma ($\beta = 20^\circ$) açısına bağlı olarak gelişen yanal vorteks, iz bölgesinde önden rüzgar durumunda görülen ikili vorteks yapısının oluşumunu engellemiştir. Etkin yanal vorteks yapısı ile güçlü etkileşimin gerçekleşiyor olmasına bağlı olarak iz bölgesi ayrılma genişliği arka yüzey eğim açısı $\varphi = 25^\circ$ için Düzlem I' de % 60 azalarak $L_{iz} = 0,1$, Düzlem II' de ise % 45 azalarak $L_{iz} = 0,12$ değerine gerilemiştir. Aynı şekilde $\varphi = 35^\circ$ lik eğim açısı için Düzlem I ve Düzlem II' ye ait iz bölgesi ayrılma genişliği % 70 oranında azalarak sırasıyla $L_{iz} = 0,12$ ve $L_{iz} = 0,10$ olarak ölçülmüştür. Ahmed cismi iz bölgesinde incelediğimiz bir

diğer akış alanı değişkeni türbülans kinetik enerjidir. Önden ve yanal rüzgar giriş sınır şartı altında incelenen kara taşıtına ait görseller iki farklı arka yüzey eğim açısı için Şekil 10a-d' de verilmiştir. Tüm incelenen durumlar ve her üç düzlem içinde en yüksek türbülans kinetik enerji değerleri araç arka iz bölgesi içinde ve ters yönlü ikili vorteks yapısının etkileşimine göre konumlanmıştır. Şekil 10a'da verilen araç arka eğim yüzeyi açısı $\varphi = 25^\circ$ için önden rüzgar durumunda en yüksek türbülans kinetik enerji değeri her üç düzlem içinde $120 \text{ m}^2/\text{s}^2$ mertebesinde hesaplanmışken konum olarak pozitif vorteks yörüngesi üzerinde gözlemlenmiştir. Aynı arka yüzey eğim açısı için yanal rüzgar durumunda Düzlem I' de yanal vorteks etkisine bağlı olarak oluşan vorteks etkileşim bölgesi nedeniyle türbülans kinetik enerji değeri düzlem içinde özellikle Girdap A ile yanal vorteksin etkileştiği $z/L = 0,35$ merkezli olarak düzlemin tamamına yayılmıştır, Şekil 10b. Bu yayılmaya bağlı olarak türbülans kinetik enerji değeri Düzlem II' de hesaplanan en yüksek değerden daha azdır ve yaklaşık $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak bulunmuştur. Düzlem II ve



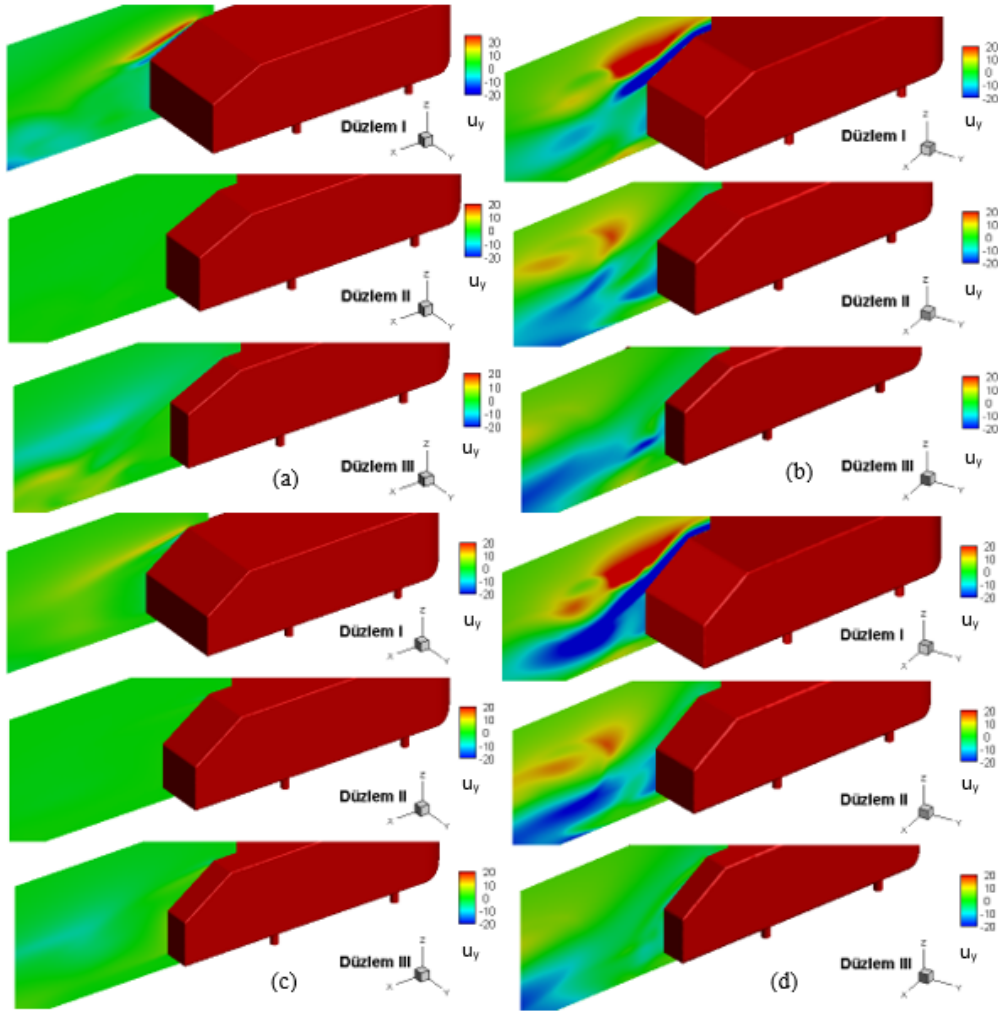
Şekil 10. Ahmed cismi için sayısal türbülans kinetik enerji (k) dağılımı a) önden rüzgar $\varphi = 25^\circ$ b) yanal rüzgar $\varphi = 25^\circ$ c) önden rüzgar $\varphi = 35^\circ$ ve d) yanal rüzgar $\varphi = 35^\circ$ (Numerical turbulence kinetic energy distribution of Ahmed body a) head wind $\varphi = 25^\circ$ b) crosswind $\varphi = 25^\circ$ c) headwind $\varphi = 35^\circ$ and d) crosswind $\varphi = 35^\circ$)

Düzlem III' de Girdap A ve yanal vorteksleri arasındaki etkileşim önce $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ sonrasında $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ civarındaki değerlere doğru azalmıştır. Bu her iki düzlemde de en yüksek türbülans kinetik enerji değeri pozitif yönlü Girdap B yörüngesi üzerinde ve $300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ civarında hesaplanmıştır. Ahmed cismi $\phi = 35^\circ$ için, önden rüzgar durumunda Şekil 13c, en yüksek türbülans kinetik enerji değeri araç iz bölgesinde oluşan ayrılma bölgesinin sınırlarını işaret edecek şekilde hem negatif hem de pozitif yönlü vorteks yapılarının yörüngeleri üzerinde yaklaşık $120 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak hesaplanmıştır. Düzlem II ve Düzlem III' de hem araç üst duvar hem de alt duvar hizasında en yüksek türbülans değerleri görülürken Düzlem I' de sadece üst duvarda en yüksek değer gözlemlenmiştir.

Aynı arka eğim açısı için yanal rüzgarın uygulandığı araç geometrisinde ise, Düzlem I yandan etkiyen rüzgara bağlı olarak gelişen yan vorteksin Girdap A ile etkileşime bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi tüm düzlem içinde yayılmış ve en yüksek değeri $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Düzlem II ve Düzlem III' de yan vorteks ile Girdap A' nın etkileşimi araç arka düzleminden değeri azalarak yayılmaktadır. Düzlem II ve Düzlem III içinse, en yüksek türbülans kinetik enerji değeri pozitif yönlü vorteks yörüngesi üzerinde yoğunlaşmış görünmektedir. Aracın yola yakın bölgesinde oluşan en yüksek türbülans kinetik enerji değeri $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ iken araç eğimli yüzeyi üzerinde $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak hesaplanmıştır, Şekil 10d.

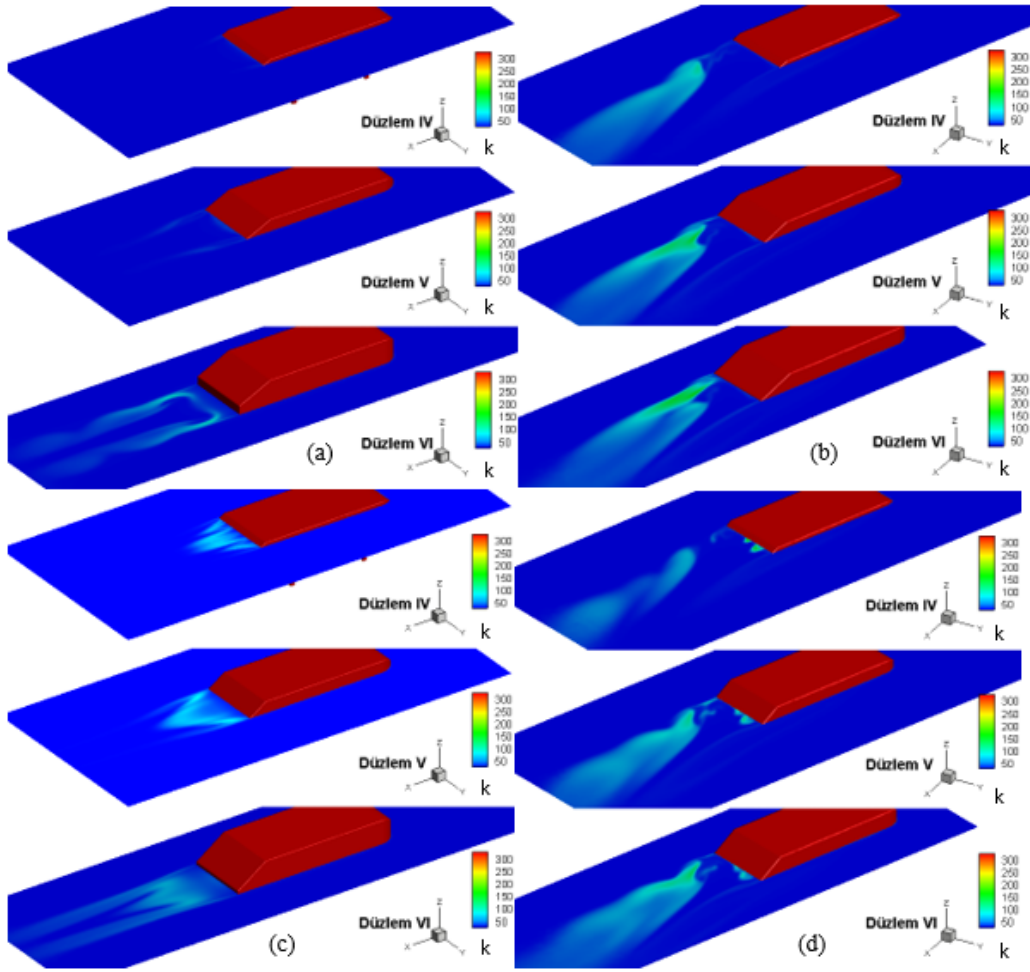
Kara taşıtlarında görülen önemli akış olaylarından biride araç yan duvarlarından kopan vorteks yapılarıdır. Akım çizgileri ve türbülans kinetik enerji görsellerinden bildiğimiz gibi bu yanal vorteks yapısının araç arka bölgesindeki Girdap A ve B ile etkileşimleri akış üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Şekil 11a-d' de üç farklı düzlemde araç arka yüzeyine paralel konumlanan y-yönündeki hız değişkeni incelenmiştir. Önden rüzgar durumunda sadece $\phi = 25^\circ$ için Düzlem I' de Şekil 11a, y yönündeki hız bileşeni sayfa düzleminden dışarıya pozitif olacak şekilde yaklaşık 15 m/s 'lik hız değerine sahip yanal



Şekil 11. Ahmed cismi için sayısal y-eksenindeki hız (u_y) dağılımı a) önden rüzgar $\phi = 25^\circ$ b) yanal rüzgar $\phi = 25^\circ$ c) önden rüzgar $\phi = 35^\circ$ ve d) yanal rüzgar $\phi = 35^\circ$ (Numerical turbulence y-direction velocity magnitude of Ahmed body a) head wind $\phi = 25^\circ$ b) crosswind $\phi = 25^\circ$ c) headwind $\phi = 35^\circ$ and d) crosswind $\phi = 35^\circ$)

vorteks araç arka eğimli yüzey üzerinden araç iz bölgesine doğru koparken negatif yönlü hız bileşeni -10 m/s olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde yanal rüzgar uygulanan durumda ise, $\phi = 25^\circ$ lik arka yüzey eğim açısında Düzlem I' de vorteks yapısı y yönündeki hız büyüklüğü grafikte tüm arka eğimli yüzeyi kapsayacak genişlikte 20 m/s ile -20 m/s hız değerlerinde hesaplanmıştır. Aynı eğim açısı için Düzlem II' de vorteks yapısı iz bölgesin içinde daha fazla yayılarak şiddetini kaybetmiştir. Ayrıca Düzlem III' de Girdap B yörüngesi boyunca güçlü kabul edilebilecek negatif değerli y yönünde hız değeri yaklaşık olarak 15 m/s olarak belirlenmiştir, Şekil 11b. Yanal rüzgar durumunda $\phi = 35^\circ$ lik arka yüzey eğimi için, Düzlem I' de oluşan yanal vorteks yapısı en şiddetli değerine ulaşmıştır. Yanal vorteks

düzlemlerde türbülans kinetik enerji değişkeni akış alanı için incelenmiştir, Şekil 12a-d. Önden rüzgar durumunda $\phi = 25^\circ$ için Düzlem IV ve Düzlem V' de $50 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ile serbest akım değeri civarında bir değer hesaplanmışken Düzlem VI' da araç boyu kadar iz bölgesine uzanan $75 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerinde çok düşük değerlerde türbülans kinetik enerji değerleri bulunmuştur, Şekil 12a. Yine önden rüzgar durumunda $\phi = 35^\circ$ için Düzlem IV ve Düzlem V' de araç iz bölgesi yakın alanında $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerinde türbülans kinetik enerji izi belirlenmişken Düzlem VI için aynı değeri koruyarak iz bölgesine araç boyu kadar yayılmıştır, Şekil 12c. Yanal rüzgar durumunda ise, arka eğimli yüzey açısı $\phi = 25^\circ$ için özellikle Girdap A ile etkileşimin olduğu Düzlem V ve Düzlem VI' da $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerine kadar yükselmiştir.



Şekil 12. Ahmed cismi için sayısal türbülans kinetik enerji (k) a) önden rüzgar $\phi = 25^\circ$ b) yanal rüzgar $\phi = 25^\circ$ c) önden rüzgar $\phi = 35^\circ$ ve d) yanal rüzgar $\phi = 35^\circ$ (Numerical turbulence kinetic energy of Ahmed body a) head wind $\phi = 25^\circ$ b) crosswind $\phi = 25^\circ$ c) headwind $\phi = 35^\circ$ and d) crosswind $\phi = 35^\circ$)

yapısı araç arka eğim yüzeyi ile birlikte iz bölgesi içinde de etkili olarak pozitif yönlü 20 m/s ile negatif yönde -20 m/s' lik değere ulaşmıştır, Şekil 11d. Düzlem II için diğer eğim açısında olduğu gibi vorteks şiddetini kaybederek iz bölgesi içine doğru yayılmıştır. Düzlem III' de önemli bir vorteks yapısına ait oluşum gözlemlenmemiştir. Yola paralel olarak araç arka eğimli yüzeyinde üzerinde tanımlanan

Bu, en yüksek türbülans kinetik enerji değerinin gözlemlendiği konum yan vorteks ile Girdap A' nın etkileşiminin en yoğun olduğu bölge olarak tanımlanabilir, Şekil 12b. Aynı şekilde yanal rüzgar için eğimli yüzey açısı $\phi = 35^\circ$ durumunda ise, Düzlem V ve Düzlem VI' da iki vorteks yapısının etkileşimi görülmektedir ve türbülans kinetik enerji değeri yaklaşık $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak

hesaplanmıştır. Ayrıca hemen eğimli yüzey üzerinde sağ tarafta her üç düzlemde de $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değeri civarında türbülans kinetik enerji oluşumu gözlemlenmiştir. Bu bölgede oluşan akış alanı etkileşime ait gözlemler Şekil 9b'de akım çizgileri, Ψ , için de verilmiştir. Ahmed cismi üzerine etkiyen sürüklenme kuvvetinin belirlenmesinde arka yüzeye etkiyen basınç en önemli bileşendir. Araç yüzeyinde görselleştirilen ortalama basınç katsayısı dağılımına ait sonuçlar $P_0 = P_{\text{atm}}$ için Şekil 13-15'de verilmiştir.

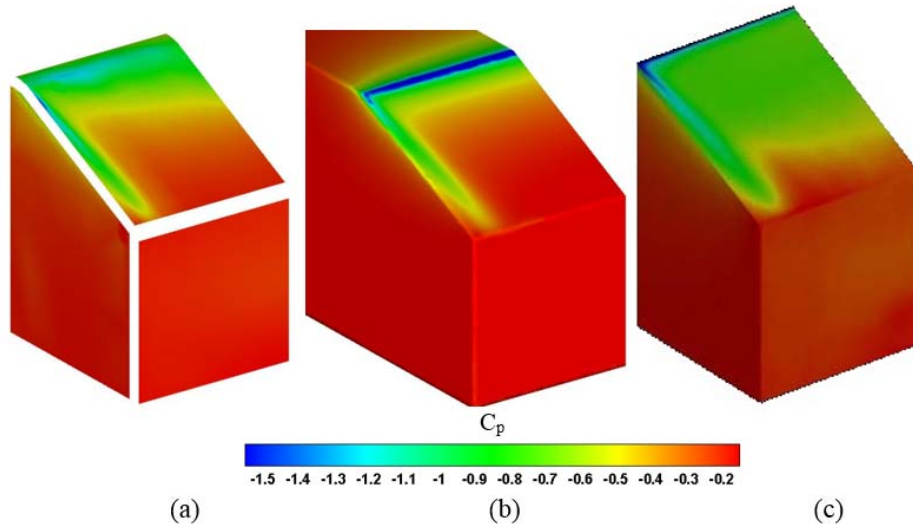
$$C_p = \frac{(p - p_0)}{0.5\rho U^2} \quad (6)$$

Önden rüzgar durumunda $\phi = 25^\circ$ için ortalama basınç katsayısı araç eğimli arka duvar üzerinde yanal vorteksin oluşmasına bağlı olarak en sol uç bölgede eğimli yüzey boyunca düşük değerler alırken tam üst yüzeyden eğimli yüzeye geçişte en küçük değeri olan -1,4'e kadar azalmıştır. Arka yüzeyin kalan bölgesinde ise, düşük basınç katsayılı alan eğimli yüzeyin üçte birlik kısmına karşılık gelmektedir [5, 10], Şekil 13a.

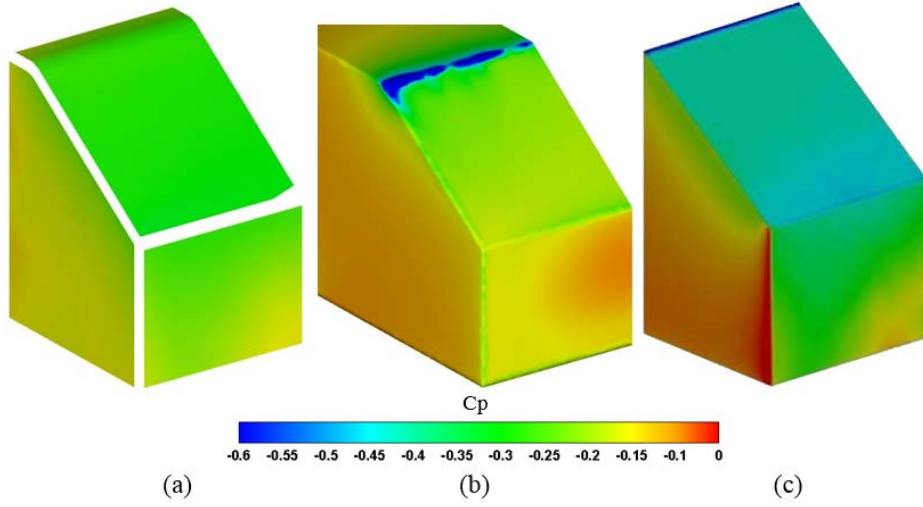
Leinhart ve diğerleri [5] tarafından elde edilen deneysel veriler ile bu çalışmada hesaplanan dağılımı karşılaştırdığımızda, oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Eğimli arka yüzeyin solunda düşük basınç katsayısını, C_p , işaret eden bölgenin konumu deney verileri ile uyumludur. Eğimli arka yüzeyin sağında yer alan -0,7 değerindeki bölge deneysel verinin gösterdiği genişlikten biraz küçüktür. Ayrıca üst yüzeyden eğimli yüzeye geçerken oluşan deneysel değeri -1,2 olan basınç alanı sayısal hesaplamalarda -1,5 değerinde ve tüm arka yüzey genişliği boyunca gözlemlenmiştir, Şekil 13b. Fares ve diğerleri [21] tarafından Lattice – Boltzmann sayısal yöntemi ile karşılaştırıldığında ise bu çalışmada hesaplanan

sonuçlar deneysel verilerle daha iyi uyum göstermiştir, Şekil 13c. Önden rüzgar durumunda $\phi = 35^\circ$ için ortalama basınç katsayısı, C_p , araç eğimli arka duvar üzerinde araç arkasında oluşan geniş vorteks yapısına bağlı olarak yüzey üzerinde $\phi = 25^\circ$ 'den farklı olarak çok büyük negatif basınç bölgesi oluşmamıştır. Leinhart ve diğerleri tarafından [5, 10] gerçekleştirilen deneysel sonuçlara göre eğimli arka yüzey üzerinde basınç katsayısı dağılımı oldukça homojen bir yapı gösterirken yaklaşık -0,35 civarındadır, Şekil 14a.

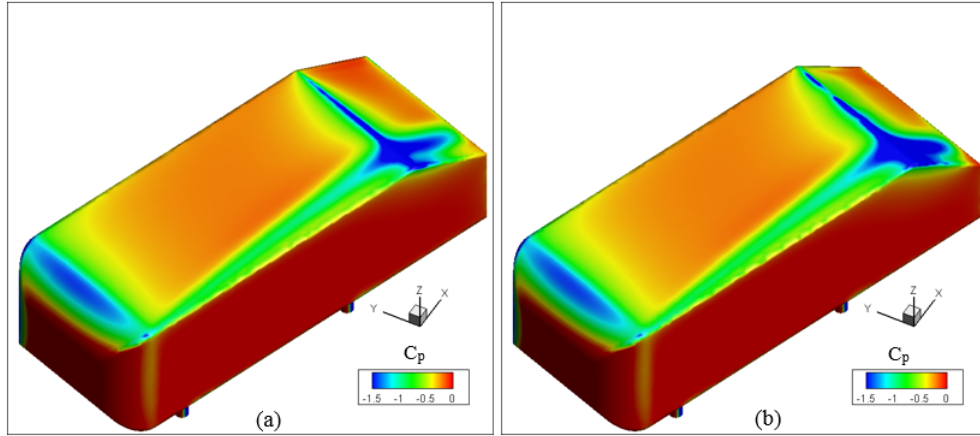
Bu çalışmada hesaplanan basınç dağılımı deneysel veri ile uyumlu olarak eğimli üzerinden homojen dağılırken basınç katsayısı değeri -0,25 iken Fares ve diğerleri [21] tarafından elde edilen değer -0,50 olarak hesaplanmıştır, Şekil 14b-c. Ayrıca araç yan yüzeyinde ve araç arka dikey yüzeyinde yine hem deneysel hem de bu çalışmada homojen bir yapı gözlemlenmişken Fares ve diğerleri [21]'nde basınç dağılımı -0,3 ile 0,0 değerleri arasında dağılmıştır. Ayrıca her iki sayısal yaklaşımda da araç üst yüzeyinden araç eğimli arka yüzeyine geçişte araç genişliğinde -0,6 değerinde basınç katsayısı şeridi belirlenmiştir. Bu bölgeye atılacak sayısal ağ yapısının yüzey normaline dik olmasına dikkat edilmesi halinde sonuçların daha iyi elde edilebileceği düşünülmektedir. Yanal rüzgar durumunda ise her iki arka yüzey eğim açısı için Ahmed cismi üst yüzeyinde ve eğimli yüzey üzerinde benzer bir basınç katsayısı dağılımı gözlemlenmiştir, Şekil 15. Her iki durumda da araç üst yüzeyinde yanal vorteks yapısının üst yüzey üzerindeki izlediği yörünge ve araç arkasına ilerlerken uzamsal yarıçapının artışı görülmektedir. Eğimli arka yüzey üzerinde oluşan negatif basınç bölgesi eğim açısı $\phi = 35^\circ$ için yaklaşık %15 kadar eğim açısı $\phi = 25^\circ$ ürettiği basınç değerinden daha fazladır. Ayrıca her iki eğim açısı içinde ön ve yan yüzeylerde aynı basınç dağılımı karakteri gözlemlenmiştir, Şekil 15a-b.



Şekil 13. Ahmed cismi arka eğimli yüzey açısı $\phi = 25^\circ$ için a) Leinhart ve diğerleri [5, 10] deneysel veriler, b) zamana bağlı k-ε ile hesaplanan sayısal değer ve c) Fares ve diğerleri [21] Lattice Boltzmann sayısal yaklaşımı ile elde edilen basınç katsayısı (C_p) dağılımı (Numerical pressure coefficient (C_p) distribution of Ahmed body for the slant angle $\phi = 25^\circ$ a) Leinhart *et al.* [5, 10] experimental results b) numerical results of unsteady k-ε turbulence model and c) Fares *et al.* [21] numerical results of Lattice-Boltzmann solution)



Şekil 14. Ahmed cismi arka eğimli yüzey açısı $\phi = 35^\circ$ için a) Leinhart ve diğerleri [5, 10] deneysel veriler, b) zamana bağlı k- ϵ ile hesaplanan sayısal değer ve c) Fares ve diğerleri [21] Lattice Boltzmann sayısal yaklaşımı ile elde edilen ortalama basınç katsayısı (C_p) dağılımı (Numerical pressure coefficient (C_p) distribution of Ahmed body for the slant angle $\phi = 35^\circ$ a) Leinhart *et al.* [5, 10] experimental results b) numerical results of unsteady k- ϵ turbulence model and c) Fares *et al.* [21] numerical results of Lattice-Boltzmann solution)



Şekil 15. Ahmed cismi için yanal rüzgar şartları altında hesaplanan basınç katsayısı (C_p) dağılımları arka eğimli yüzey açısı a) $\phi = 25^\circ$ b) $\phi = 35^\circ$ için (Numerical pressure coefficient (C_p) distribution in the case of crosswind condition over the slant surface for a) $\phi = 25^\circ$ b) $\phi = 35^\circ$)

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada Ahmed modeli kritik arka yüzey eğim açısı $\phi_{kr,2} = 30^\circ$ 'nin hemen altında ve üstündeki iki eğim açısı için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ticari sonlu hacim çözücü programı FLUENT ile sayısal olarak incelenmiştir. İncelemede akış alanı hem önden hem de yanal rüzgar durumunu içerecek şekilde $Re_L=2,8 \times 10^6$ için zaman bağlı k- ϵ türbülans (uRANS) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akış alanındaki zamanda ortalaması alınmış akım çizgileri, türbülans kinetik enerji büyüklükleri ve araç yüzeyindeki basınç katsayısının yanı sıra, model etrafındaki düşey simetri ekseninde yüzeye dik doğrultuda hız profilleri belirlenmiş ve hız alanı ile ilgili sayısal bulgular ile deneysel veriler karşılaştırılarak akımın yapısı irdelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve eğimli arka yüzeyinde farklı

istasyonlarda hesaplanan hız büyüklükleri ile tüm araç boyu verilen x-yönündeki hız değerleri için sayısal sonuçlar oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca eğimli arka yüzey üzerindeki basınç katsayısı, C_p , hem deneysel hem de literatürde verilmiş Lattice – Boltzmann sayısal yaklaşımı ile hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve bu çalışmada elde edilen sonuçların deneysel veriler ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Ahmed modeli için zamansal ortalama akım çizgilerinin, Ψ , incelenmesinden, düşey ekseninde belirlenen her üç düzlemde de modelin eğimli arka yüzeyi üzerinde akış ayrılmasının olduğu gözlemlenmiştir. Model iz bölgesinde simetrik olmayan ve birbirine göre ters yönde dönen iki adet vorteks yapısı gözlemlenmiştir. Bu ters yönlü vorteks yapılarının içinde bulunduğu iz bölgesi genişliği yanal rüzgar durumunda önden rüzgar durumuna göre yaklaşık

olarak % 60-70 oranında küçülmüştür. Ancak yanal rüzgar durumuna bağlı olarak araç yan duvarlarıyla etkileşime girerek oluşan güçlü girdap yapıları ile araç arkasında oluşan negatif yönlü Girdap A ile pozitif yönlü Girdap B'nin etkileşimine ait türbülans kinetik enerji değişkeni alanda ortalama $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ civarında hesaplanarak, önden rüzgar durumunda bulunan büyüklüğün iki katı kadar değer üretmiştir. Model arkasındaki akış ayrılma alanında birbiri üzerinde ters yönde dönen iki girdabın düzlemlere göre merkez koordinatları ve durma noktası verilerine bakılarak kesitlere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Negatif girdabın merkez noktası model yüzeyine yaklaştıkça yatay ekseninde ilerlemesine rağmen boyutları küçülmektedir. Pozitif girdabın merkez noktası ise model yüzeyine doğru düşey ekseninde modelin arka yüzeyine yaklaşmakta ve boyutu küçülmektedir.

TEŞEKKÜR (ANKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar olarak Düsseldorf Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'nde (Düsseldorf University of Applied Sciences) kurulu Akış Benzeşimi Merkezi'nin (Center of Flow Simulation (CFS)) yüksek başarılı bilgisayarlarını bize açan Prof. Dr. Ali Cemal Benim'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Choi H., Lee J., Park H., Aerodynamics of heavy vehicles, Annual Review of Fluid Mechanics, 46, 441–468, 2014.
- Hucho W.H., Aerodynamics of road vehicles, SAE International Press, 1998.
- Ahmed S.R., Ramm, G., Faltin, G., Some salient features of the time averaged ground vehicle wake, SAE Paper 840300, 1984.
- Önder E.T., Başlamışlı S.C., Torque distribution based on central differential mechanism control for lateral handling stability, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 491-500, 2016.
- Lienhart H., Becker S., Flow and turbulente structure in the wake of a simplified car model, SAE Paper 2003-01-0656, 2003.
- Venning J., Jacono D.L., Burton D., Sheridan J., The effect of aspect ratio on the wake of the Ahmed body, Experiments in Fluids, 56, 126, 2015.
- Volpe R., Da Silva A., Ferrand V., Le Moyne M., Experimental and Numerical Validation of a Wind Gust Facility, Journal of Fluids Engineering, 135 (1), FE-12-1254, 2013.
- Grandemange M., Cadot O., Courbois A., Herbert V., Ricot D., Ruizb T., Vigneron R., A study of wake effects on the drag of Ahmed's squareback model at the industrial scale, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145, 282–291, 2015.
- Bayraktar I, Landman D, Baysal O., Experimental and computational investigation of Ahmed body for ground vehicle aerodynamics, SAE Paper, 2001-01-2742, 2001.
- Basara B. Case 9.4: flow around a simplified car body (Ahmed body). In: 10th joint ERCOFTAC (SIG-15)-IAHR-QNET/CFD workshop on refined turbulence modeling, University of Poitiers, France, October 10–11, 2002.
- McNally J., Fernandez E., Robertson G., Kumar R., Taira K., Alvi F., Yamaguchi Y., Murayama K., Drag reduction on a flat-back ground vehicle with active flow control, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145, 292–303, 2015.
- Thacker A., Aubrun S., Leroy A., Effects of suppressing the 3D separation on the rear slant on the flow structures around an Ahmed body, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 107–108, 237–243, 2012.
- Joseph P., Amandolese X., Edouard Aider J., Flow control using MEMS pulsed micro-jets on the Ahmed body, Experiment in Fluids, 54, 1442, 2013.
- Guilmineau E., Computational study of flow around a simplified car body, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, 1207–1217, 2008.
- Guilmineau E., Chikhaoui O., Visonneau M., Cross wind effects on a simplified car model by a DES approach, Computers and Fluids, 78, 29–40, 2013.
- FLUENT Theory Guide 14.0, 2011.
- Benim A.C., Nahavandi A., Syed K.J., URANS and LES analysis of turbulent swirling flows, Progress in Computational Fluid Dynamics, 5 (8), 444-454, 2005.
- Krajnovic S., Davidson L., Large-Eddy Simulation of the Flow Around Simplified Car Model, SAE, 2004-01-0227, 2004.
- Ashton N., Revell A., Key factors in the use of DDES for the flow around a simplified car, International Journal of Heat and Fluid Flow, 54, 236–249, 2015.
- Tunay T., Sahin B., Ozbolat V., Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body, Experimental Thermal and Fluid Science, 57, 165-176, 2014.
- Fares E., Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, Computers and Fluids, 35, 940–950, 2006.

