



## TAŞIT AERODİNAMİĞİNDE KULLANILAN AHMED CİSMİNİN AKIŞ MODELİ İÇİN PRİZMATİK AĞ KATMANI OLUŞTURURKEN İZLENECEK STRATEJİ

Sinan KEİYİNCİ<sup>1</sup>, Mustafa Atakan AKAR<sup>1</sup>, Oğuz BAŞ<sup>2\*</sup>, Mustafa ÖZCANLI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

<sup>2</sup> Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

HAD,  
Ahmed Cismi,  
Taşıt Aerodinamiği,  
Sınır Tabakası,  
Çözüm Ağı.

### Öz

Bu makalede, otomotiv aerodinamiği literatüründe sıklıkla kullanılan Ahmed cismi için bir HAD benzetiminde ağ oluşturma stratejisi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Genel olarak bu çalışmalarda, türbülanslı sınır tabaka bölgelerini modellemek için prizmatik ağ katmanı oluştururken farklı yöntemler gözlemlenmektedir. Yetersiz bir prizmatik ağ katmanı sınır tabakasını çözmede eksik kalırken, bu katmanın gereğinden fazla olması ise ağ sayısını, dolayısıyla çözüm sürelerini artırmaktadır. Bu çalışmada, Ahmed cisminin akış yapısı, Ansys-Fluent™ programı ile akış hızına ( $U_{\infty}=40$  m/s) ve gövde uzunluğuna bağlı Reynolds sayısı  $Re=2.83 \times 10^6$  olacak şekilde incelenmiştir. Matematiksel ifadelerden yararlanılarak oluşturulan prizmatik ağ katmanı ve bu ağın sonuçları hem nitel hem de nicel yönden incelenip, farklı bir strateji geliştirilen son bir ağ ile sonuçlar tekrar değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, kabaca oluşturulan ilk ağ ile sonradan geliştirilen ağlar arasında, sınır tabakası üzerindeki akış profilini modellemede daha iyi bulgular elde edilmiştir. Ayrıca  $C_D$  ve  $C_L$  için deneysel yöntemle elde edilen sonuçlara, geliştirilen ağlarda, kabaca uygulanan ağa göre daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

## A STRATEGY FOR CREATING PRISMATIC MESH LAYERS FOR MODELLING FLOW OF THE AHMED BODY USED IN VEHICLE AERODYNAMICS

### Keywords

CFD,  
Ahmed Body,  
Vehicle Aerodynamics,  
Boundary Layer,  
Mesh.

### Abstract

In this paper, a mesh generation strategy was investigated on a CFD simulation for Ahmed body which is commonly used in automotive aerodynamics. Generally, in these studies, different kinds of methods can be seen for creating prismatic mesh layers to solve turbulent boundary layers. An insufficient prismatic mesh layer is missing in solving the boundary layer, while the excess of this layer also increases the number of meshes, hence the solution time. In this study, the flow structure of the Ahmed body was studied by using the ANSYS-Fluent™ software at the Reynolds number of  $Re=2.83 \times 10^6$  depending on the flow rate ( $u_{\infty}=40$  m/s) and the body length. The Prismatic mesh layer was generated using mathematical expressions and the results of this mesh were examined both quantitatively and qualitatively and further results were evaluated again with a final mesh with a different strategy. To conclude, better results were obtained with developed meshes for modeling the flow profile on the turbulent boundary layer compared to the roughly generated initial mesh. In addition, closer results to the experimental value of  $C_D$  and  $C_L$  were obtained at developed meshes compared to the mesh that was roughly applied.

### Alıntı / Cite

Keiyinci, S., Akar, M.A., Baş, O., Özcanlı, M., (2022). Taşıt Aerodinamiğinde Kullanılan Ahmed Cisminin Akış Modeli İçin Prizmatik Ağ Katmanı Oluştururken İzlenecek Strateji, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 776-786.

\* İlgili yazar / Corresponding author: oguz.bas@amasya.edu.tr, +90-358-211-5053

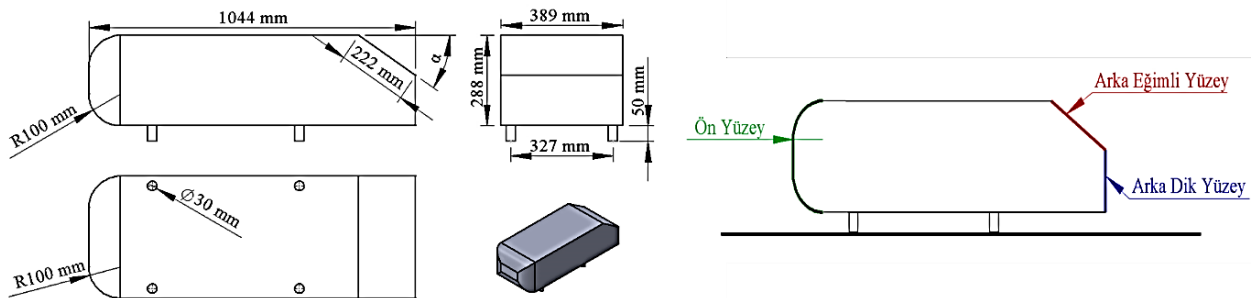
Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Keiyinci, 0000-0003-2948-3846	Başvuru Tarihi / Submission Date	09.08.2021
M.A. Akar, 0000-0002-0192-0605	Revizyon Tarihi / Revision Date	15.02.2022
O. Baş, 0000-0003-2301-2306	Kabul Tarihi / Accepted Date	19.03.2022
M. Özcanlı, 0000-0001-6088-2912	Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2022

## 1. Giriş (Introduction)

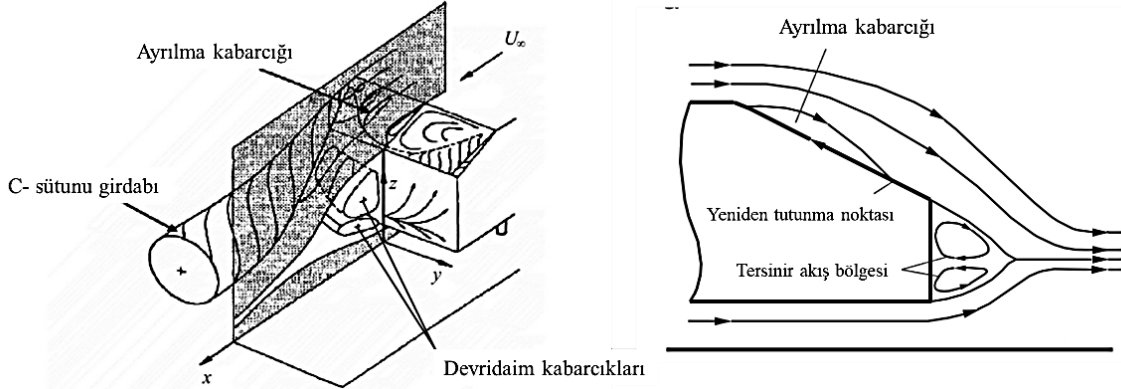
Enerji verimliliği ve taşıt dinamiğini etkileyen en önemli konulardan olan araç aerodinamiğini iyileştirmek için bilim insanları önemli çalışmalar yapmaktadırlar. Öte yandan taşıt aerodinamiği konusu, son yıllarda artan elektrikli araç girişimlerinin de etkisiyle birlikte daha önemli hale gelmiştir. Yapılan son çalışmalar göstermektedir ki, sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ) için elde edilen %10'luk bir iyileştirme, elektrikli araçlar için yaklaşık %5-8 menzil artışı, içten yanmalı araçlar için ise %5 yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir (Bayındırlı vd., 2018; Palin vd., 2012). Ayrıca kaldırma katsayısının da ( $C_L$ ) araç üzerindeki sürüş güvenliği, yere basma kuvveti ve yol tutuşu gibi parametreleri önemli ölçüde etkilediği düşünüldüğünde taşıt aerodinamiğinin önemi ayrı bir anlam daha kazanmaktadır.

Bu anlamda uzun yıllar boyunca yapılan araç aerodinamiği araştırma ve iyileştirme çalışmalarında, bir kara taşıtına benzer boyutlara sahip Ahmed cismi araştırmacıların çalışma konusu olmuştur. Bu makalenin yazarlarının bilgisine göre, görece olarak daha basit bir araç modeli oluşturulması fikri 1978 yılında Morel tarafından yapılan deneysel çalışma ile ortaya çıkmıştır (Morel, 1978). Bu çalışmada araç üzerinde oluşan kuvvetler incelenmiş ve sonuç olarak, cismin aerodinamik kuvvetlerinin büyük ölçüde arka eğim açısına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, modelin arka eğim açısının değerine göre üç farklı akış rejimine sahip olduğu ortaya koyulmuştur. Ancak bu modelin boyut oranları gününün binek araçlarının boyut oranlarını yansıtmaktan uzaktır (Le Good ve Garry, 2004).

1984 yılında Ahmed 'in (Ahmed vd., 1984) oluşturduğu model ise şekil olarak Morel' in ortaya attığı modele birebir benzemektedir. Ancak, Ahmed cisminin daha uzun ve ince bir forma getirilmesiyle beraber, modelin arka kısmındaki akış, ön kısımdan bağımsız hale getirilmiş, ayrıca model, klasik bir aile arabasının boyut oranlarını yansıtmaya başlamıştır (Şekil 1). Bu sebeptendir ki, aslında kronolojik olarak, ilgili modelin çok benzeri Morel tarafından daha önce literatüre sunulmasına karşın, bu model aerodinamik literatüründe "Ahmed cismi" olarak tanınmaktadır. Yine bu çalışmada, araç üzerinde oluşan sürüklenme kuvvetinin büyük oranda cismin arka bölgesinden kaynaklandığını belirtilmiştir. Ayrıca, bu sürüklenme kuvvetinin, yaklaşık %85 oranına kadar basınç sürüklemesinden kaynaklandığı ortaya koyulmuştur. Ahmed, çalışmasında, Morel' in bulgularına paralel olarak cismin arka eğim açısının ( $\alpha$ ) sürüklenme kuvvetinin değişimine büyük etkisi olduğunu ve bu açığa bağlı olarak üç farklı akış rejimi oluştuğunu yinelemiştir. Rejim I' de,  $\alpha < 12.5^\circ$  iken, akım arka eğimli yüzeye tamamen tutunmuştur ve yakın iz bölgesinde boylamasına bir girdap çifti oluşur. Bu bölgede  $C_D=0.25$ 'dir ve arka eğim açısından hemen hemen bağımsızdır. Rejim II' de ise  $12.5^\circ < \alpha < 30^\circ$  aralığında iz bölgesindeki boylamasına uzun girdaplar daha güçlüdür ve 3 boyutlu forma sahiptir. Ancak arka eğim açısı  $30^\circ$ 'ye yaklaştıkça, akış eğimli yüzeyden koparak D formunda ayrılma kabarcıkları oluşturur ve bu kopma eğimli yüzeyde düşük basınç bölgesi oluşturur (Şekil 2). Bu bölge iz bölgesindeki girdapları şiddetli bir şekilde artırır. Bu sebeple, sürüklenme katsayısı, bu açıda en yüksek değerine ulaşır. Arka eğim açısı  $30^\circ$ ' den büyük olduğu durumlarda ise akış eğimli yüzeyden tamamen kopmuştur ve cismin arka yüzeyine tekrar tutunma eğilimi yoktur. Bu sebeple  $\alpha=30^\circ$  olan duruma göre  $C_D$  değeri önemli bir miktarda azalır, dengeye ulaşır ve  $35^\circ$ 'de arka eğim açısından hemen hemen bağımsız hale gelmektedir.



Şekil 1. Orijinal Ahmed cisminin geometrik ölçüleri (Dimensions of original Ahmed body)



**Şekil 2.**  $\alpha=25^\circ$  için Ahmed cismi arkasında oluşan akış yapısı  
(Flow structure of Ahmed body with  $\alpha=25^\circ$ ) (Vino vd., 2005)

Öte yandan, bu modeller üzerinde yapılan çalışmalarda deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, deneysel yöntemlerin pahalılığı, ulaşılabilirliği, sistemlerin kalibre edilmeleri ve uygulanabilirlikleri gibi pek çok sınırlamalar olduğundan sayısal yöntemler son yıllarda daha da önem kazanmıştır. Özellikle bilgisayar donanımlarının güçlenmesi ve yeni sayısal metotların ortaya çıkması ve yaygınlaşması, sayısal yöntemleri daha da ilgi çekici hale getirmiştir. Sayısal yöntemlerden ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ya da uluslararası bilinen adıyla CFD, yazılım ve donanım alanındaki gelişmeler de dikkate alındığında araştırmacıların sıklıkla kullandığı bir yöntem haline gelmiştir. Ancak bu yöntem kullanılırken doğru sonuçlar alınabilmesi için, geometri oluşturma, ağ oluşturma, türbülans modeli, sınır koşulları ve çözücü ayarı gibi pek çok konunun kusursuza yakın olması gerekmektedir. Özellikle ağ oluşturma, çok zaman alıcı, zahmetli ve belki de bir HAD işleminin en önemli aşamasıdır (Cengel ve Cimbala, 2006). Bununla birlikte HAD kullanıcıları, bazen çok önemli uluslararası çalışmalarda bile ağ oluşturmada önemli hususları ihmal etmekte ya da ciddi hatalar yapmaktadırlar. Bu makalenin yazarlarının deneyimine göre ağ oluşturmada en önemli aşamalardan biri olan ve pek çok kez hata yapılan bir aşama ise sınır tabakanın çözümü için oluşturulan prizmatik ağ katmanlarıdır. Bu katmanlar, sınır tabakanın çözümü ya da modellemesi için her açıdan doğru bir strateji ile oluşturulmalı ve sınır tabakanın, akış kompası başlayana kadar ki bölümünü kapsamalıdır (Soares ve De Souza, 2015a). Özellikle taşıt aerodinamiğinin sınır tabakasının türbülanslı olması (Aljure vd., 2018) ve taşıt modellerinin küt cismine bağlı olarak akış profilinin yüksek gradyanlı olması (Zafer ve Haskaraman, 2017) dikkate alındığında prizmatik ağ elemanlarının doğru oluşturulmasının önemi daha da belirgin olmaktadır. Türbülanslı sınır tabakası ve önemi hakkında daha fazla bilgi olmak isteyen okuyucular Schlichting ve Gersten tarafından oluşturulan ilgili kaynağa (Schlichting ve Gersten, 2016) başvurabilirler.

Ahmed cismi için bir HAD çalışmasında, dış akışı ve aerodinamik performansı modellerken doğru bir prizmatik ağ oluşturulması bu çalışmanın ana kapsamıdır. Bu çalışma ile HAD araştırmacıları için bir rehber oluşturmak ve ilgili çalışmalarda türbülanslı sınır tabakanın daha doğru ve bilimsel yaklaşım ile çözülmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Ahmed cismi, Ansys-Fluent™ programı ile sayısal olarak incelenmiştir. Akış hızı, akış hızı ve uzunluğa bağlı Reynolds sayısı sırasıyla  $U_\infty=40$  m/s ve  $Re=2.83 \times 10^6$  olarak belirlenmiştir. Arka eğim açısı  $\alpha=35^\circ$  ve türbülans modeli  $k-\omega$  SST (RANS) olarak seçilmiştir ki bu seçimler rastlantısal değildir. Bu seçimlerin nedeni ve sayısal yöntem için daha fazla detay 2. bölüm olan Sayısal Yaklaşım başlığı altında paylaşılmıştır.

## 2. Sayısal Yaklaşım (Numerical Approach)

### 2.1. Ön İşlemler (Pre-Processing)

Modelin oluşturulması, yoğunlaştırılacak ağ bölgelerinin belirlenmesi, çözücü için akış alanı ve sınır koşullarının belirlenmesi için bir CAD yazılımı olan SpaceClaim programından yararlanılmıştır. Model orijinal Ahmed cisminin boyutlarına ve  $35^\circ$  lik bir arka eğim açısına sahiptir.

Akış alanı oluşturulurken Ahmed cismi için önceki yapılan HAD çalışmaları da dikkate alınarak yeterince büyük olması sağlanmıştır. Tablo 2'de akış paylaşılan akış alanının büyüklükleri benzer çalışmalardaki

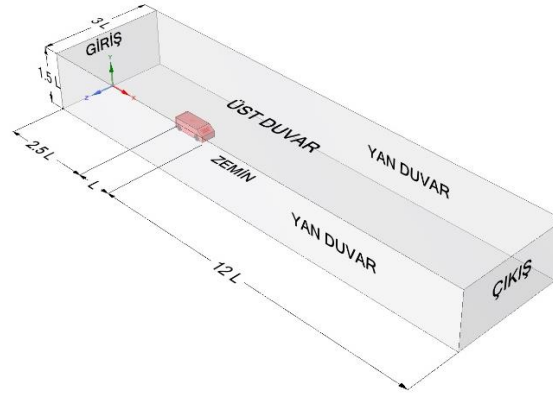
büyüklikler de dikkate alınarak seçilmiştir. Böylelikle akış profilinin hesaplama alanının girişinden cisme ulaşırken tam gelişmiş olması, cismin arkasındaki iz alanının (wake region) tam olarak kapsanması ve blokaj etkilerinin asgari düzeyde tutulması amaçlanmıştır. Blokaj oranı ( $A_{ön}/A_{test}$ )  $< \%3$  olarak belirlenmiştir. Çengel ve Cimbala bu oranın  $\%7.5$ ' ten küçük olmasını önermişlerdir (Cengel ve Cimbala, 2006). Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki, rüzgâr ve su tüneli gibi deneysel metotlarda sabit olan yan ve üst duvarları, bu sayısal çalışmada literatürde de sıklıkla kullanılan bir yöntemle simetri sınır koşulu (symmetry boundary condition) olarak ayarlanmıştır. Bu yöntemle, üst ve yan duvarlar serbest kayma koşulu tanımlaması yapılarak blokaj etkilerinin hemen hemen bertaraf edildiği söylenebilir. Ayrıca  $Re=2.83 \times 10^6$  koşulunun sağlanması için giriş hızı üniform  $U_{\infty}=40$  m/s olarak girilmiştir. Hesaplama alanı ve bu alandaki sınır koşullarına dair detaylar Şekil 3, Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Bu Çalışmadaki kullanılan sınır koşulları (Boundary conditions used in this study)

	Giriş	Çıkış	Zemin	Yan ve üst duvar	Araç yüzeyi
<b>Sınır koşulu</b>	Hız Girişi	Basınç çıkışı	Sabit duvar	Serbest Kayma Sınır Koşulu	Sabit duvar
<b>Değer</b>	40 m/s (üniform)	0 Pa	Kaymamazlık koşulu	Serbest kayma	Kaymamazlık koşulu

**Tablo 2.** Hesaplama alanı özellikleri (Properties of the computational domain)

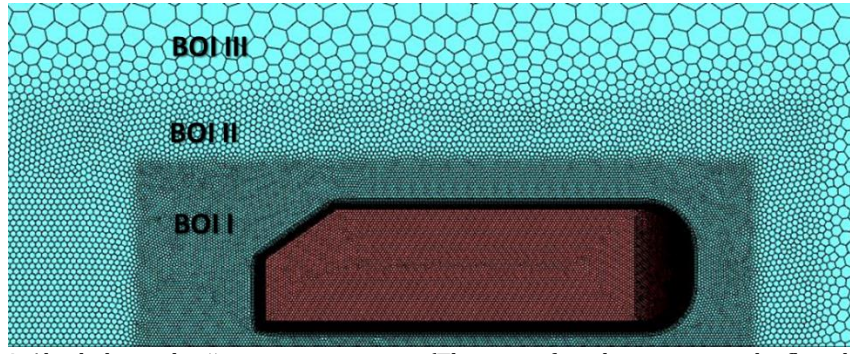
<b>Akış Alanı</b>	Yarı-3D, daimî, türbülanslı ve sıkıştırılmaz
<b>Boy X En X Yükseklik</b>	15.5L X 3L X 1.5L (16182 mm X 3102 mm X 1566 mm)
<b><math>A_{ön}</math></b>	113532 mm <sup>2</sup>
<b><math>A_{ön}/A_{test}</math> (Blokaj oranı)</b>	1.444%



**Şekil 3.** 3-Boyutlu hesaplama alanı (3-D Computational domain)

## 2.2. Ağ Hazırlama (Meshing)

Bu sayısal çalışmada ağ hazırlanırken Ansys'in Fluent-Meshing'de sunduğu Watertight Geometry Workflow görev-tabanlı ağ geliştirme yazılımı kullanılmıştır. HAD çalışmalarında ağ oluşturulurken temel amaç sayısal doğruluktan ödün vermeden uygun kalite ve sayıda eleman ile ağ yapısı oluşturmaktır. Böylelikle hesaplama zamanı ve sayısal doğruluk arasındaki denge sağlanabilmektedir. Bu amaçla, akış alanında çözüm hassasiyeti kritik olan alanlarda, ağı etkileme bölgeleri (Body of Influence ya da BOI) kullanılarak akışın uzak bölgelerinde kullanılan ağ sayısına oranla kademeli olarak daha fazla ağ elemanı oluşturulmuştur. 3 bölgeden oluşan ağ yoğunlaştırma bölgeleri Şekil 4'te görülebilir. Ağdan bağımsızlık testlerinde de BOI maksimum eleman sayısı artırılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uygun kalitede ağ üretmek için yazılımın, hacim ve yüzeylerde ağ iyileştirme özelliklerinden faydalanılmıştır. Bu sayede ağ kalitesinin bütün benzetim durumlarında çarpıklık (skewness)  $< 0.8$  olması sağlanmıştır ki bu, böyle karmaşıklıkta bir akış alanı için oldukça iyi bir değerdir (Lanfrut, 2005). Bu değer yüksek olması durumunda HAD kullanıcıları yakınsamada zorluklar ve doğru olmayan sonuçlarla karşılaşabilmektedirler.



**Şekil 4.** Akış bölgesinde ağ yapısının görünüşü (The view of mesh structure at the flow domain)

Bu çalışmada daha az ağ elemanı ile daha iyi ağ kalitesi ve sayısal sonuçlar elde etmek için son yıllarda geliştirilen Poly-Hexcore ağ elemanı tipi kullanılmıştır. Bu ağ elemanı tipi sayesinde karmaşık ve dar alanlardan serbest akış alanına geçerken daha iyi sonuçlar veren (Balafas, 2014) çok yüzeyle (Polyhedral) ağ elemanları kullanılırken, serbest akış alanında ise altı yüzeyle (Hexahedral) ağ elemanları kullanılır.

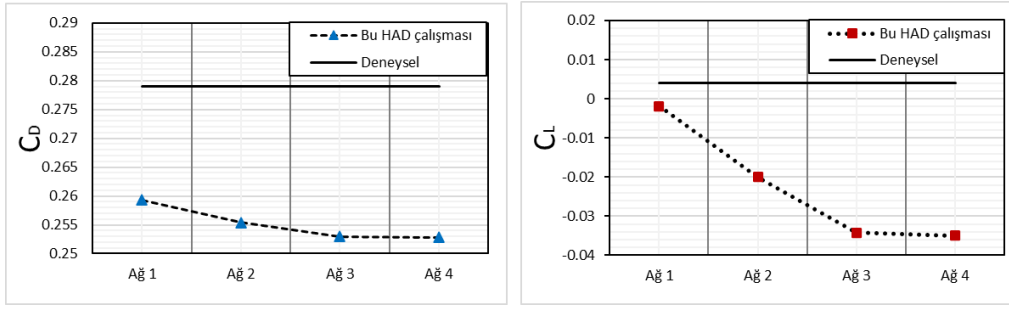
Diğer yandan türbülanslı sınır tabakasının doğru olarak çözülmesi, HAD benzetimlerinde, akışa maruz kalan cisimlerin üzerindeki kuvvetleri doğru hesaplayabilmek için önemli bir husustur (Schlichting & Gersten, 2016). Bu anlamda bazı kullanıcılar çözüm ağlarında, yetersiz prizmatik ağ katmanı ya da türbülans modeli ile uyumsuz ilk ağ yüksekliği kullanabilmektedirler. Bütün ağlarda ilk hücre yüksekliği  $h_0=0.04$  mm olacak şekilde benzetimler yapılmıştır. İlk hücre yüksekliğinin bu değeri ile, bu çalışmada kullanılan türbülans modelinin ( $k-\omega$  SST) doğru sonuçlar vermesi için bir gereklilik olan  $y^+<5$  şartı sağlanmıştır (Menter, 1992). Türbülanslı sınır tabakası,  $y^+$  ve nasıl hesaplandığına dair daha fazla detay için okuyucular (Cengel ve Cimbala, 2006; Schlichting ve Gersten, 2016; Soares ve De Souza, 2015b) referanslarına göz atabilirler.

Ağdan bağımsızlık testi, taşıt aerodinamiği benzetimleri için, ağ sayısı kademeli olarak artırılırken, nicel bir sonucun (yaygın olarak  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_P$  veya cismin arkasındaki iz bölgesinden alınan hız profili vb) sabitlendiği ağ sayısının belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır (Şimşek, 2020; Yılmaz ve Çiçek, 2017). Buna göre, ağ sayısı (%50, %100 veya  $10^6$  vb.) artırım oranıyla artırılır ve genelde  $C_D$  ve  $C_L$ 'nin, bir önceki düşük yoğunluklu ağ sayısına göre yüzde değişiminin belirli bir limitin altına düşmesi beklenir. SAE'ye göre, yeterli bir ağdan bağımsızlık için bu limit, ağ sayısı %50 artarken  $C_D$ 'deki değişimin  $\Delta C_D=0.0003$ 'ten küçük olduğu durumdur. (Huminic ve Huminic, 2017). Ancak literatürde, taşıt aerodinamiği için yapılan pek çok çalışmada,  $C_D$ 'daki değişimin %1'in altına düştüğü ağ sayısı, ağdan bağımsız ilkesinin sağlandığı seviye olarak kabul edilmiştir (Guilmineau vd., 2018; Mohammadikalakoo vd., 2020; Wang, Wu vd., 2017; Yang vd., 2018). Bu çalışmada da ağı etkileme bölgelerindeki ağ eleman sayısı değiştirilerek elde edilen 4 farklı ağ durumu (150000, 500000, 800000 ve 930000) test edilmiş ve 800000 ağ sayısından 900000 ağ sayısına geçişte  $C_D$ 'nin değişimi  $\Delta C_D=\%0.1$  olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak,  $C_D$ 'nin ağ sayısından bağımsız hale geldiği ağ sayısı 800000 olarak bulunmuştur. Ağ seviyelerinin özellikleri ve bu ağ seviyelerine göre  $C_D$  ve  $C_L$ 'nin değişimleri sırasıyla Tablo 3 ve Şekil 5' te paylaşılmıştır.

**Tablo 3.** Ağdan bağımsızlık testlerinde kullanılan ağların özellikleri  
(Properties of the meshes used in the mesh independence study)

Ağ Seviyesi	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3	Ağ 4
<b>Maksimum eleman uzunluğu (BOI I)</b>	20 mm	10 mm	8 mm	7 mm
<b>Maksimum eleman uzunluğu (BOI II)</b>	40 mm	30 mm	20 mm	15 mm
<b>Maksimum eleman uzunluğu (BOI III)</b>	250 mm	200	150 mm	75 mm
<b>Duvara yakın ilk ağ yüksekliği (<math>h_0</math>)</b>	0.04 mm	0.04 mm	0.04 mm	0.04 mm
<b>Prizmatik ağ elemanı sayısı (<math>n_p</math>)</b>	10	10	10	10
<b>Prizmatik ağ elemanı büyüme oranı (GR)</b>	1.2	1.2	1.2	1.2
<b>Toplam ağ elemanı sayısı</b>	150000	500000	800000	930000





Şekil 5. Ağ seviyelerine göre  $C_D$  ve  $C_L$ 'nin değişimi (Variations of  $C_D$  and  $C_L$  vs. mesh levels)

### 2.3. Prizmatik Ağ Geliştirme Yöntemi (The Development Method of Prism Layers)

Bu çalışmada, ilk ağ seviyesi (M0) için, büyüme oranı  $GR=1.2$  olan 10 prizmatik ağ katmanı kullanılmıştır. Ancak ağdan bağımsızlık testlerinden de görüleceği üzere deneysel verilere yaklaşımda bu ağ yapısının yetersiz olduğu söylenebilir (Bakınız Şekil 5). Ağ yapısının yeterliliğini sağlamak için M1 ve M2 ağ seviyeleri oluşturulmuştur. Bu ağ yapılarının özelliklerini belirlerken aşağıdaki verilen matematiksel ifadeden yararlanılmıştır:

$$P_T = \sum_{n=1}^{n=n_p} \{(h_0) \times (GR)^{n-1}\} = (h_0) \times \frac{1 - GR^{n_p}}{1 - GR} \quad (1)$$

Bu denklemde  $P_T$ ,  $n_p$ ,  $h_0$  ve  $GR$  ifadeleri sırasıyla; prizmatik ağın toplam kalınlığı, prizmatik ağ katmanı sayısı, ilk ağ elemanı yüksekliğini ve büyüme oranını ifade etmektedir. Diğer yandan türbülanslı sınır tabakasının kalınlığını tahmin etmede kullanılan denklem ise aşağıdaki gibidir (Schlichting ve Gersten, 2016):

$$\delta = \frac{0.377 \times x}{Re_x^{0.2}} \quad (2)$$

Bu denklemde ise  $\delta$ ,  $x$  ve  $Re_x$  ifadeleri sırasıyla türbülanslı sınır tabakasının kalınlığı, karakteristik uzunluk ve karakteristik uzunluğa bağlı Reynolds sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmadaki karakteristik uzunluğun, Ahmed cisminin boyu ( $l=1.044$  m) olduğu bilinmelidir. Denklem 1 ve 2'den yararlanılarak yazılan yeni ifade ile prizmatik ağ katmanının türbülanslı sınır tabakasını karşılama oranı (K.O.) şu şekilde oluşturulmuştur.

$$K.O. = \frac{P_T}{\delta} \times 100 (\%) \quad (3)$$

Bu oluşturulan ifade ile prizmatik ağ katmanının sınır tabakasını çözmede yeterli olup olmadığını değerlendirmek için yararlanılan yeni bir parametre araştırılmıştır. Prizmatik ağ katmanı, HAD sonuçları bölümünde de görülen akış görselleri aracılığıyla nicel olarak ve yukarıda ifade edilen denklemlerin yardımıyla da nitel olarak geliştirilmeye çalışılmıştır. M1 ve M2 ağ seviyelerindeki temel farklılık, sınır tabakayı çözmek için, M1 ağ seviyesinde; düşük büyüme oranı-daha fazla prizmatik ağ katmanı sayısı iken, M2 ağ seviyesi için; yüksek büyüme oranı-daha az prizmatik ağ katmanı sayısıdır. Bu farklılığı oluşturmadaki temel strateji, daha az ağ elemanı sayısı ile sınır tabakayı çözerek benzer sonuçları elde etmek ve çözüm süresini azaltmaktır.

### 2.4. Çözücü Ayarları ve Son İşlemler (Solver Settings and Post-Processing)

Bu çalışmada çözüm için sıkıştırılamaz (incompressible) ve daimi RANS ve süreklilik denklemleri modellenmiştir. Modelleme için  $k-\omega$  SST türbülans modeli kullanılmıştır. Kuşkusuz, büyük girdap benzetimleri (LES), doğrudan sayısal benzetimleri (DNS) ya da melez türbülans modelleri (DES, DDES ve IDDES gibi) bu tip akış problemlerinin çözülmesinde daha etkili olmaktadır. Ancak, bu yöntemler ciddi hesaplama zamanı gerektirmektedir. Ayrıca Guilmineau ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada,  $\alpha=35^\circ$  için hem Ahmed cismi üzerindeki akış kuvvetlerini hem de cismin arkasındaki iz alanının özelliklerini belirlemede daimi RANS türbülans modellerinin,  $\alpha=25^\circ$  açılı Ahmed cismini modellemenin aksine, başarılı ve yeterli olabildiği vurgulanmıştır (Guilmineau vd., 2018). Bu bakımdan daha önce ifade edildiği gibi, bu çalışmada kullanılan Ahmed cisminin arka yüzey eğim açısının  $\alpha=35^\circ$  olarak seçilmesi rastlantısal değildir. RANS modelleri ve uygun arka eğim açılı Ahmed cismi ikilisiyle, hesaplama zamanı açısından büyük bir kazanç sağlanması hedeflenmiştir. Bu çalışmada RANS, LES, DNS,  $k-w$  SST türbülans modeli hakkında makalenin kısa tutulması bakımından ayrıntı verilmemiştir, fakat okuyucular ilgili bu konular hakkında sırasıyla (Launder ve Spalding, 1974; Menter, 1992; Orszag, 1970; Shih vd., 1999; Tunay vd., 2016; Zhang vd., 2019) referanslarına bakabilirler.

Öte yandan son işlemlerde (post-processing), deneysel veya sayısal akış görselleştirme için hususi bir yazılım olan Techplot yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılım aracılığı ile türbülans viskozite oranı (TVR) ve akış profili grafikleri elde edilmiştir.

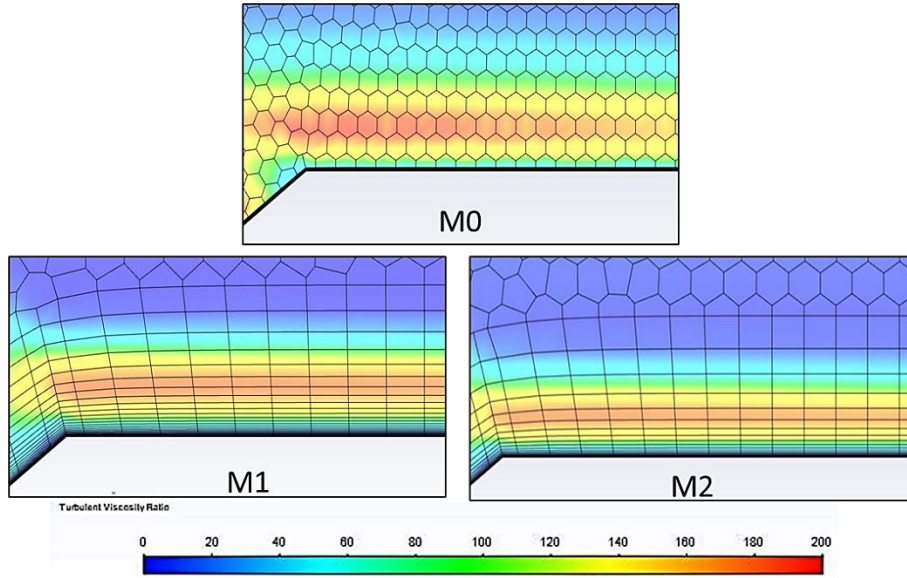
### 3. HAD Sonuçları (CFD Results)

Ağ seviyelerinin özellikleri ve ağ seviyelerine göre değişen  $C_D$  ve  $C_L$  sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tablodaki deneysel veriler, Meile vd. tarafından, bu çalışmayla aynı Reynolds sayısı ile elde edilmiştir (Meile vd., 2011). Buna göre nitel ve nicel verilere göre geliştirilen M1 ve M2 ağ seviyelerinin ağ eleman sayıları, M0 ağ seviyesinin eleman sayısına göre %39.78 ve %7.53 oranında artmıştır. Ayrıca M1 ve M2 ağ seviyelerinin K.O. değerleri, GR ve  $n_p$  parametreleri tekrarlı çözümlerle (iterative solution) değiştirilerek yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak M1 ve M2 ağ seviyeleri için prizmatik ağ elemanı katmanının, türbülanslı sınır tabakasını karşılama oranları sırasıyla %112 ve %124 olarak elde edilmiştir.  $C_D$  ve  $C_L$  sonuçları irdelendiğinde, geliştirilen M1 ve M2 ağ seviyeleri ile, deneysel olarak elde edilen sonuçlara daha yakın değerler elde edilmiştir. Bu sonucun, ilgili ağ seviyelerinde K.O.'larının daha yüksek olmasıyla elde edildiği söylenebilir. Öte yandan M1 ve M2 ağ seviyeleri kıyaslandığında ise, deneysel verilere yakınsamada yaklaşık olarak benzer sonuçlar ortaya çıktığı görülmektedir. M1 ağ seviyesi için deneysel  $C_D$  ve  $C_L$  sonuçlarına kıyasla hata oranı sırasıyla %5.48 ve 27.8 sayım iken, M2 ağ seviyesi için hata oranları sırasıyla %5.91 ve 31.5 sayımdır. Burada,  $C_L$  sonuçlarını kıyaslamada literatürde sıklıkla kullanılan 1 sayımın (counts), 0.0001'e eşit olduğu not edilmelidir (Josefsson vd., 2018).

**Tablo 4.** Farklı ağ seviyelerine göre elde edilen sonuçlar (The results obtained vs. different mesh levels)

	<b>M0</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>
<b>Ağ Sayısı</b>	0.93 Milyon	1.3 Milyon	1 Milyon
<b><math>y^+</math> değeri</b>	<5	<5	<5
<b>İlk Hücre Yüksekliği (mm)</b>	0.04	0.04	0.04
<b>Prizmatik ağ katman sayısı (<math>n_p</math>)</b>	10	27	20
<b>Büyüme oranı (GR)</b>	1.2	1.2	1.3
<b>Prizmatik ağ elemanı kalınlığı (mm)</b>	1.0383	27.2741	25.2066
<b>K.O.</b>	5%	134%	124%
<b><math>C_D</math></b>	0.2528	0.2637	0.2625
<b><math>C_L</math></b>	-0.0350	-0.0238	-0.0275
<b><math>C_D</math> için hata oranı (Deneysel yöntemle kıyasla)</b>	9.39%	5.48%	5.91%
<b><math>C_L</math> için hata oranı (Deneysel yöntemle kıyasla)</b>	39.00	27.80	31.50

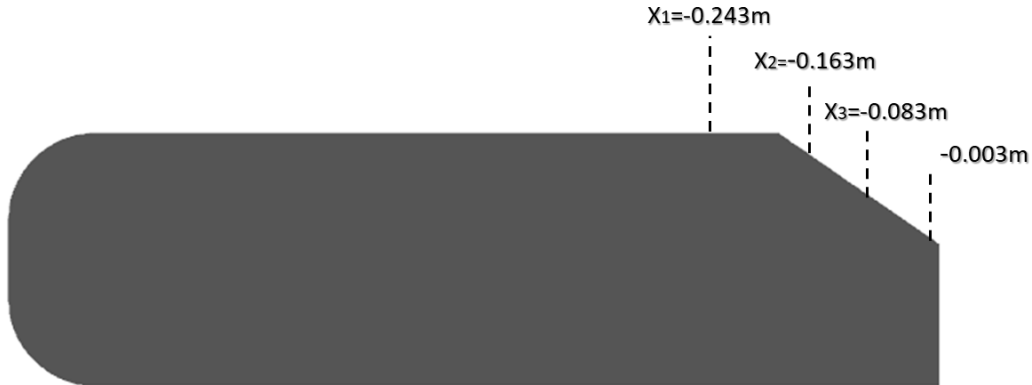
Öte yandan HAD testlerinde, nitel (kantitatif) sonuçların yanı sıra, nicel (kalitatif) sonuçları incelemek de uygulanan yöntemler hakkında fikir verebilmektedir. Bu amaçla, öncelikle çözüm ağı ve TVR konturunun üst düşümü (super-position) grafiği elde edilmiştir. TVR konturu, türbülans viskozitesinin, dinamik viskoziteye oranını ve dolayısıyla akış gradyanlarının yüksek olduğu bölgeleri HAD kullanıcılarına görsel olarak sunar. M0, M1 ve M2 için çözüm ağı-TV R konturu üst düşümü grafiği Şekil 6' da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, M0 ağ seviyesinde, prizmatik ağ katmanının akış gradyanlarını çözmede yetersiz kaldığı görülmektedir. Özellikle, akış gradyanlarının yüksek olduğu bölgede, Polyhedral ağ elemanı tipine keskin geçişlerin mevcut olduğu ve sınır tabakasını modelleme işinin, bu ağ tipinin çözümüne bırakıldığı anlaşılmaktadır. Öte yandan M1 ve M2 ağ seviyelerinin, akışın kopmaya başladığı arka eğimli yüzeye kadar, akış gradyanlarını modellemede daha iyi prizmatik ağ katmanlarına sahip olduğu görülmektedir. M1 ve M2 ağ seviyeleri kıyaslandığında ise, daha düşük büyüme oranına sahip olması sayesinde, özellikle prizmatik ağ katmanının ortalarında daha şiddetli gradyanlar modellenmiştir. Bu sonuç, M1 ağ seviyesinin, neden daha yüksek  $C_D$  ve  $C_L$  sonuçlarını verdiğinin ve deneysel verilere daha yakın sonuçlar elde edildiğinin bir göstergesidir.



Şekil 6. Çözüm ağı - TVR konturu üst düşümü grafiği (The mesh - TVR contour super-position graphic)

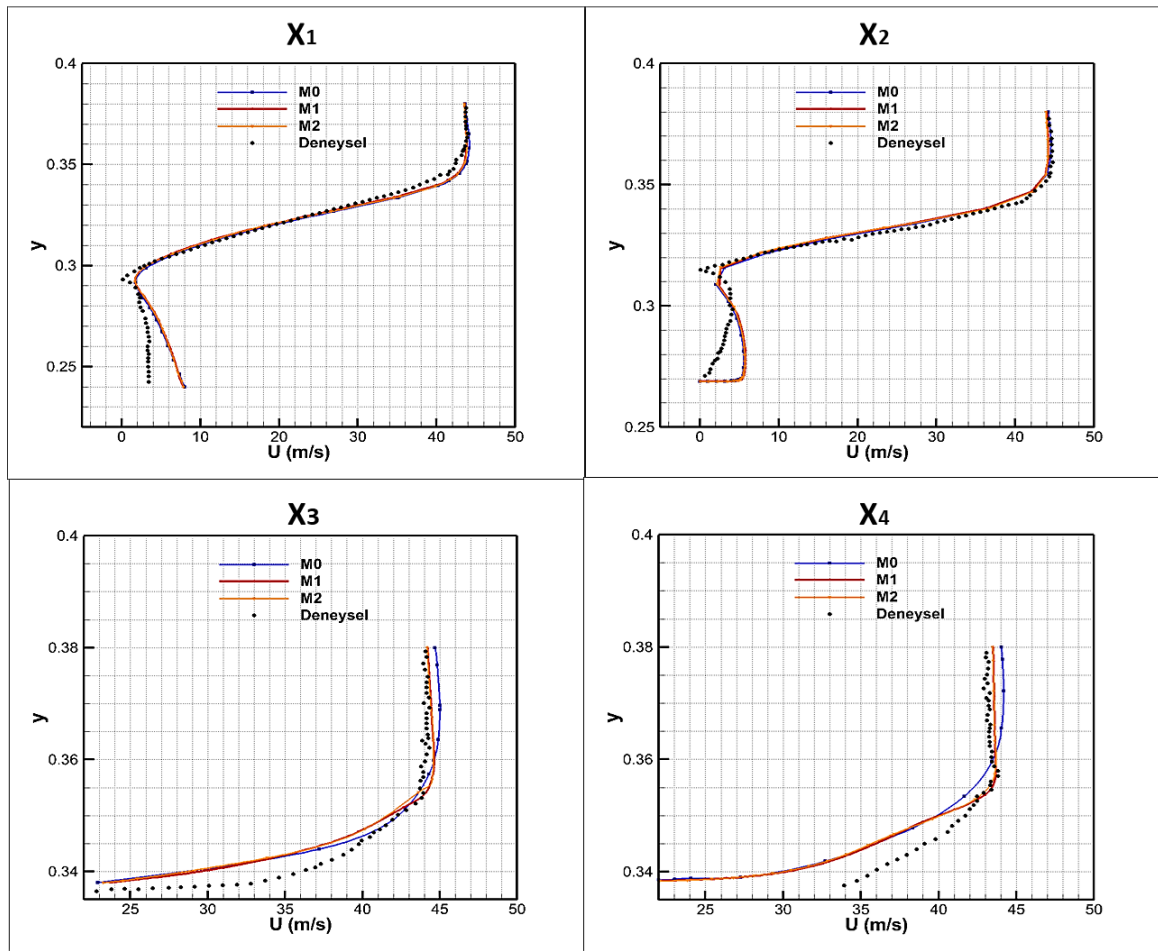
Diğer taraftan, HAD kullanıcıları için Ahmed cismi gibi küt yapı bir modelde art izi bölgesindeki (wake region) türbülanslı akış yapısını modellemek oldukça güçtür. Bu akış yapısını modellemede, bu çalışmada kullanılan ağ seviyelerinin ne kadar verimli olduğunu belirlemek için cismin arka bölgesinden rastgele dört doğru seçilmiştir (Şekil 7). Bu doğrular üzerindeki akış hızı büyüklüğü profilleri Şekil 8’de verilmiştir.

Şekil 8’deki hız profilleri incelendiğinde akışın kopmaya başlamadan hemen önceki ve hemen sonraki bölgelerde ( $X_1$  ve  $X_2$ ) bütün ağ seviyeleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sınır tabakasının duvara yakın bölgelerinde bütün ağ seviyeleri deneysel sonuçlara göre hatalı sonuçlar verirken, duvardan uzaklaştıkça serbest akış hızına ulaşana kadar bütün ağ seviyeleri için deneysel sonuçlara çok yakın hız profili elde edilmiştir. Ancak cismin arkasına doğru gidildikçe,  $X_3$  ve  $X_4$  doğrularında elde edilen hız profillerinde deneysel verilere göre sapmalar artmıştır. Özellikle duvara yakın bölgelerde bu sapmaların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, yine de geliştirilen M1 ve M2 ağ seviyelerinde, M0 ağ seviyesine kıyasla bu sapmaların çok daha az olduğu görülmektedir. M1 ve M2 ağ seviyeleri arasında ise hız profillerini modellemede belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir.



Şekil 7. Cisim arkasından seçilen doğrular (Lines which are chosen from back part of the body)





Şekil 8. X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> ve X<sub>4</sub> doğrularındaki hız büyüklüğü profilleri (Velocity magnitude profiles at X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> and X<sub>4</sub> lines)

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu makalede, Ahmed cismi için bir HAD çalışmasında, prizmatik ağ katmanı için izlenecek strateji üzerine matematiksel ifadelerden yararlanılmış ve kabaca oluşturulan M0 ağ seviyesi üzerinde yapılan geliştirmelerle iki farklı ağ seviyesi (M1 ve M2) daha oluşturulmuştur. Bu ağ seviyelerinden M1 için düşük büyüme oranı-fazla prizmatik ağ katmanı sayısı, M2 için yüksek büyüme oranı-daha az prizmatik ağ elemanı sayısı stratejileri izlenmiştir. Bu HAD çalışmasında, akış hızı, akış hızı ve uzunluğuna bağlı Reynolds sayısı sırasıyla  $U_{\infty}=40$  m/s ve  $Re=2.83 \times 10^6$  olarak belirlenmiştir. Arka eğim açısı  $\alpha=35^\circ$  ve türbülans modeli  $k-\omega$  SST (RANS) olarak seçilmiştir. Bu sınır koşulları, geometri, türbülans modeli ve ağ seviyeleri için bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar şunlardır:

- Kabaca oluşturulan prizmatik ağ katmanı deneysel sonuçlardan uzaklaşılmasına neden olabilmektedir.
- Bunun yerine prizmatik ağ katmanı kalınlığının, türbülanslı sınır tabakasını karşılama oranı dikkate alınarak çözüm ağı geliştirilmesi cisim üzerindeki kuvvetlerin ve art izi akış bölgelerinin daha iyi belirlenebilmesini sağlamaktadır.
- $k-\omega$  SST türbülans modeli ile uyumlu, düşük ilk ağ katmanı yüksekliği ile oluşturulan çözüm ağları için yüksek büyüme oranı-daha az ağ katmanı sayısı stratejisi ağ elemanı sayısının yaklaşık %23 azalmasına karşın düşük büyüme oranı- daha fazla ağ katmanı sayısı stratejisine benzer sonuçlar vermiştir.
- Böylelikle, HAD çözümlerinin, deneysel verilere yakınsamasında doğruluktan çok fazla ödün vermeden, çözüm süreleri azaltılabilmektedir.
- Ancak, ağ geliştirmelerine rağmen,  $k-\omega$  SST ve  $\alpha=35^\circ$  Ahmed cismi kombinasyonu için, art izi bölgesinin akış yapısını belirlemede deneysel verilere kıyasla, dikkate değer derecede sapmalar gözlemlenmiştir.
- Daha sonraki çalışmalarda bu farklı stratejilerin, DES, DDES, IDDES, LES vb gelişmiş türbülans modelleriyle, farklı arka eğim açısına ve tekerlek ve hareketli zemin ve dönen tekerlere sahip modellerle uyumu değerlendirilecektir.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

**Kaynaklar (References)**

- Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some Salient Features Of The Time-Average d Ground Vehicle. SAE Technical Paper Series, (840300).
- Aljure, D. E., Calafell, J., Baez, A., & Oliva, A. (2018). Flow over a realistic car model: Wall modeled large eddy simulations assessment and unsteady effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 174(December 2017), 225–240. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.12.027>
- Balafas, G. (2014). Polyhedral Mesh Generation for CFD-Analysis of Complex Structures (Technical University of Munich). Retrieved from [http://www.cie.bgu.tum.de/publications/masterthesis/2014\\_Balafas.pdf](http://www.cie.bgu.tum.de/publications/masterthesis/2014_Balafas.pdf)
- Bayındrılı, C., Çelik, M., & Demiralp, M. (2018). Bir Otobüs Modeli Etrafındaki Akış Yapısının CFD Yöntemi İle İncelenmesi ve Sürükleme Kuvvetinin Pasif Akış Kontrol Yöntemi İle İyileştirilmesi. *Journal of Polytechnic*, 0900(4), 785–795. <https://doi.org/10.2339/politeknik.403993>
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Application*. McGraw-Hill, 342.
- Guilmineau, E., Deng, G. B., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M., & Wackers, J. (2018). Assessment of hybrid RANS-LES formulations for flow simulation around the Ahmed body. *Computers and Fluids*, 176, 302–319. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.01.005>
- Huminc, A., & Huminc, G. (2017). Aerodynamic Study of A Generic Car Model with Wheels and Underbody Diffuser. *International Journal of Automotive Technology*, 18(2), 397–404. <https://doi.org/10.1007/s12239>
- Josefsson, E., Hagvall, R., Urquhart, M., & Sebben, S. (2018). Numerical Analysis of Aerodynamic Impact on Passenger Vehicles during Cornering. SAE Technical Papers, 2018-May(May). <https://doi.org/10.4271/2018-37-0014>
- Lanfrit, M. (2005). Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT. *Fluent*, 2, 1–14.
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269–289. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- Le Good, G. M., & Garry, K. P. (2004). On the use of reference models in automotive aerodynamics. SAE Technical Papers, 2004(724). <https://doi.org/10.4271/2004-01-1308>
- Meile, W., Brenn, G., Reppenhagen, A., Lechner, B., & Fuchs, A. (2011). Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the ahmed body. *CFD Letters*, 3(1), 32–38.
- Menter, F. (1992). Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. NASA Technical Memorandum, (103978), 1–31.
- Mohammadikalakoo, B., Schito, P., & Mani, M. (2020). Passive flow control on Ahmed body by rear linking tunnels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205(June), 104330. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104330>
- Morel, T. (1978). Aerodynamic drag of bluff body shapes characteristic of hatch-back cars. SAE Technical Papers, 1270–1279. <https://doi.org/10.4271/780267>
- Orszag, S. A. (1970). Analytical theories of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 41(2), 363–386. <https://doi.org/10.1017/S0022112070000642>
- Palin, R., Johnston, V., Johnson, S., D'Hooge, A., Duncan, B., & Gargoloff, J. I. (2012). The aerodynamic development of the Tesla model S-part 1: Overview. SAE Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0177>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). Boundary-Layer Theory. In *Boundary-Layer Theory*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- Shih, T.-H., Povinelli, L. A., Liu, N.-S., Potapczuk, M. G., & Lumley, J. L. (1999). A Generalized Wall Function. *National Aeronautics and Space Administration*, (July), 1–20. <https://doi.org/19990081113>
- Şimşek, O. (2020). Üstten Akışlı Kapak Akiminin Sayısal Modellemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 808–819. <https://doi.org/10.21923/jesd.752914>
- Soares, R. F., & De Souza, J. L. F. (2015a). Influence of CFD Setup and Brief Analysis of Flow Over a 3D Realistic Car Model. SAE Technical Paper Series.
- Soares, R. F., & De Souza, J. L. F. (2015b). Tailpipe Position over a Realistic 3D Road Car Model: The Effect on Drag Coefficient Copyright. SAE Technical Paper Series.
- Tunay, T., Yaniktepe, B., & Sahin, B. (2016). 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(January), 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.10.006>
- Vino, G., Watkins, S., Mousley, P., Watmuff, J., & Prasad, S. (2005). Flow structures in the near-wake of the Ahmed model. *Journal of Fluids and Structures*, 20(5), 673–695. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.03.006>
- Wang, Y., Wu, C., Tan, G., & Deng, Y. (2017). Reduction in the aerodynamic drag around a generic vehicle by using a non-smooth surface. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231(1), 130–144. <https://doi.org/10.1177/0954407016636970>
- Yang, Y., Zhang, D., & Liu, Z. (2018). Optimization and design method for a rough rear surface on the notchback MIRA model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(10), 1297–1309. <https://doi.org/10.1177/0954407017728840>
- Yılmaz, N., & Çiçek, İ. (2017). Standart Test Pervanesi Analizleri ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analiz Altyapısının Doğrulanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(4), 681–690. <https://doi.org/10.21923/jesd.400115>
- Zafer, B., & Haskaraman, F. (2017). Önden ve yanal rüzgar şartı altında Ahmed cisminin sayısal incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(1), 237–251. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.300613>
- Zhang, C., Bounds, C. P., Foster, L., & Uddin, M. (2019). Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a detailed full-scale sedan vehicle. *Fluids*, 4(3), 1–28. <https://doi.org/10.3390/fluids4030148>