



Numerical modelling of the aerodynamic effect of the distance between two vehicles following each other

İbrahim Taş¹ , Orhan Dedeoğlu^{2*}

¹Department of Automotive Engineering, Faculty of Technology, Denizli Pamukkale University, 20160, Denizli, Türkiye

²Karsan Automotive Industry and Trade Inc., 16280, Bursa, Türkiye

Highlights:

- Aerodynamic implications of wake interaction in a two-vehicle convoy modeled with Ahmed Body geometry
- Drag and lift coefficient behavior of leading and trailing vehicles under varying inter-vehicle distances
- Relationship between wake structure and aerodynamic parameters (C_d , C_p , C_l) as a function of spacing

Keywords:

- Platoon aerodynamics
- computational fluid dynamics
- wake interaction
- drag coefficient
- Ahmed Body

Article Info:

Research Article

Received: 05.10.2025

Accepted: 07.08.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1561876

Correspondence:

Author: Orhan Dedeoğlu

e-mail:

orhandedeoglu16@gmail.com

phone: +90 507 162 34 23

Graphical/Tabular Abstract

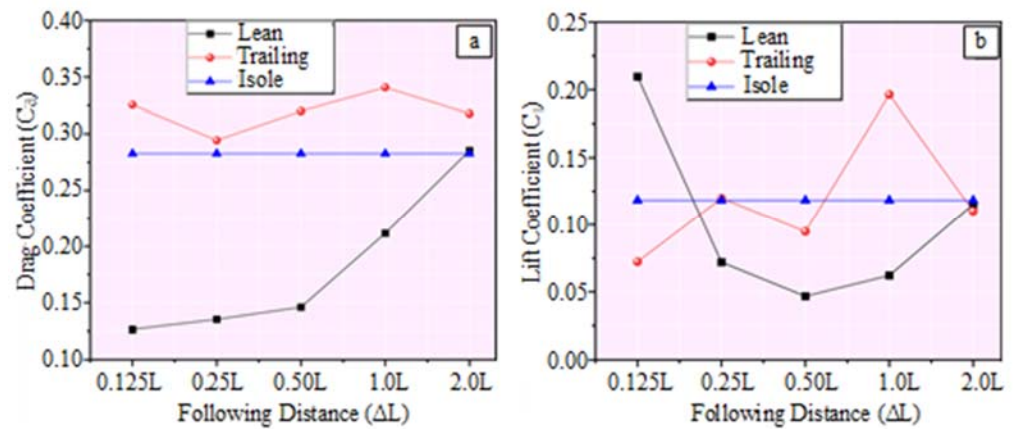


Figure A. Variation of drag (C_d) and pressure (C_p) coefficient according to following distance

Purpose: This study presents a detailed Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the aerodynamic interactions between two vehicles travelling in tandem, based on the reference Ahmed Body geometry. The primary objective is to investigate the influence of inter-vehicle spacing on the wake structure, as well as on drag and lift coefficients (Figure A), with particular emphasis on aerodynamic variations induced by wake interference.

Theory and Methods: Numerical analyses were conducted on a two-vehicle configuration modeled with the Ahmed Body featuring a 35° rear roof slope, with inter-vehicle distances ranging from 0.125 L to 2.0 L. The simulations employed a pressure-based solver in conjunction with the Realizable k- ϵ turbulence model. Initially, a mesh independence study was performed on a single-body setup, and the numerical model was validated against benchmark experimental data from the literature. In the second phase, aerodynamic coefficients—namely drag (C_d), lift (C_l), and pressure (C_p)—were comparatively assessed for various spacing values, focusing on the wake structure's influence in a convoy configuration.

Results: The results demonstrate that at the shorter following distances (particularly at 0.125 L and 0.25 L), the wake of the leading vehicle strongly impinges upon the trailing vehicle, resulting in asymmetrical pressure distributions. A positive pressure effect was observed at the rear of the leading vehicle, while low-pressure regions were formed at the frontal face of the trailing vehicle. As the inter-vehicle distance increased, the wake interaction diminished, and both vehicles exhibited flow characteristics closer to the isolated case. The normalized coefficients ($C_d/C_{d, \text{isolated}}$ and $C_p/C_{p, \text{isolated}}$) confirm the accuracy of the numerical approach and its strong agreement with literature data.

Conclusion: This study clearly highlights the critical role of wake dynamics in two-vehicle convoy aerodynamics. Especially at reduced following distances, wake-vehicle interaction leads to significant variations in drag and lift forces. The findings provide valuable insights for aerodynamic optimization in platooning scenarios and offer a robust physical basis for advanced vehicle arrangement strategies.



Birbirini takip eden iki aracın aralarında bulunan mesafenin aerodinamik etkisinin sayısal modellemesi

İbrahim Taş¹, Orhan Dedeoğlu^{2*}

¹Denizli Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

²Karsan Otomotiv Sanayii ve Tic. A.Ş., 16280, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Ahmed Body temelli iki araçlı konvoy modellemesinde iz etkileşiminin aerodinamiğe yansımaları
- Lider ve takip aracının sürüklenme ve kaldırma katsayısı davranışı
- Takip mesafesine bağlı olarak, iz yapısı ile aerodinamik parametreler (C_d , C_p , Cl) arasındaki ilişki

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.10.2025

Kabul: 07.08.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1561876

Anahtar Kelimeler:

Konvoy aerodinamiği,
hesaplamalı akışkanlar
dinamiği,
iz etkileşimi,
sürüklenme katsayısı,
Ahmed Body

ÖZ

Bu çalışma, konvoy hâlinde seyreden kara taşıtları arasındaki aerodinamik etkileşimleri, Ahmed Body referans geometrisi üzerinden sistematik olarak analiz etmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak yürütülen sayısal simülasyon çalışmalarında, lider ve takip araç konfigürasyonları farklı takip mesafeleri (0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L, 2,0 L) için incelenmiştir. Başlangıçta tekil Ahmed Body modeli için ağdan bağımsızlık çalışması ile elde edilen sürüklenme katsayısı (C_d) literatürde bildirilen deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Doğrulama sonrasında, konvoy araç senaryosunda iz yapısının aerodinamik etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, takip aracının her durumda lider araca kıyasla daha yüksek C_d değerleri sergilediğini ve iz bölgesinden kaynaklanan türbülanslı yapıların bu sonucu doğrudan etkilediğini göstermektedir. Lider araç C_d katsayısında ise takip mesafesi azaldıkça belirgin bir azalma gözlenmiş, bu durum iz bölgesindeki geri besleme basıncı ile ilişkilendirilmiştir. Yüzey basınç (C_p) ve hız dağılımı analizleri, özellikle 0,25 L mesafesinde lider araç arkasında pozitif, takip araç önünde negatif basınç etkileri yarattığını ortaya koymuştur. Normalize edilmiş $C_d/C_{d,izole}$ ve $C_p/C_{p,izole}$ oranları üzerinden yapılan karşılaştırmalı değerlendirmelerde, mevcut literatürle benzer eğilimler gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, konvoy aerodinamiğine yönelik tasarım ve optimizasyon çalışmalarına fiziksel olarak tutarlı bir temel sunmaktadır.

Numerical modelling of the aerodynamic effect of the distance between two vehicles following each other

H I G H L I G H T S

- Aerodynamic implications of wake interaction in a two-vehicle convoy modeled with Ahmed Body geometry
- Drag and lift coefficient behavior of leading and trailing vehicles under varying inter-vehicle distances
- Relationship between wake structure and aerodynamic parameters (C_d , C_p , Cl) as a function of spacing

Article Info

Research Article

Received: 05.10.2025

Accepted: 07.08.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1561876

Keywords:

Platoon aerodynamics,
computational fluid
dynamics,
wake interaction,
drag coefficient,
Ahmed Body

ABSTRACT

This study presents a systematic investigation of aerodynamic interactions between road vehicles traveling in convoys, utilizing the Ahmed Body as a reference geometry. Numerical simulations were conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) to examine the leader-trailing vehicle configuration at various inter-vehicle distances (0.125 L, 0.25 L, 0.50 L, 1.0 L, and 2.0 L). Initially, a mesh independence study was performed for the isolated Ahmed Body model, and the resulting drag coefficient (C_d) showed strong agreement with experimentally reported values in the literature. Following this validation, the aerodynamic influence of wake structures in a convoy scenario was analyzed in detail. The simulation results revealed that the trailing vehicle consistently exhibited higher drag coefficients compared to the leader vehicle, primarily due to turbulent wake structures impinging on its frontal area. In contrast, the drag coefficient of the leader vehicle was observed to decrease significantly at reduced inter-vehicle distances, attributed to the back-pressure effects generated by the follower vehicle within the wake region. Surface pressure (C_p) and velocity distributions demonstrated that, particularly at 0.25 L spacing, the wake induced a positive pressure zone behind the leader and a negative pressure zone ahead of the follower. Comparative evaluations based on normalized $C_d/C_{d,isolated}$ and $C_p/C_{p,isolated}$ ratios indicated consistent trends with existing literature findings. The outcomes of this study provide a physically coherent foundation for future aerodynamic design and optimization efforts targeting platooning and convoy scenarios.

1. Giriş (Introduction)

Aerodinamik, yakıt verimliliğini, araç stabilitesini, yolcu konforunu ve güvenliğini artırmak ve rüzgâr gürültüsünü azaltmak amacıyla otomotiv tasarımında öne çıkan bir konu olmuştur. Son çevre düzenlemeleri nedeniyle, aerodinamik sürtünmeyi azaltarak otomobillerin enerji verimliliğini optimize etmek giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu amaç doğrultusunda araç şekillerinin tasarımı ve optimizasyonu konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. [1]

Araştırmacılar tarafından temel modeller veya belirli ölçeklerde küçültülmüş modeller kullanılarak araştırmalar hem deneysel hem de sanal analiz ile yapılmıştır. [1]. Yeni konseptlerin ve prototiplerin tasarımında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tekniklerinin uygulanmasının güvenilir bir teknik olduğu kanıtlanmıştır. [1]. HAD'nin otomotiv aerodinamik problemlerinin büyük çoğunluğunu ele almasını sağlayan rastgele geometriler için çok yönlülüğüne rağmen, aerodinamik çalışmaları standartlaştırmak ve araştırmacı iş birliğini geliştirmek için genellikle geometri basitleştirmeleri uygulanır. [1]. Bu basitleştirme uygulamaları incelendiğinde Ahmed Body, Windsor Body ve Lorry modeli gibi birçok farklı modelin kullanılmakta olduğu görülmüştür [2]. Literatürde, en sık kullanılan model ise Ahmed Body olduğundan sonraki yapılan çalışmalarda bu model üzerinden ilerlenmiştir. [1]. Ahmed Body karayolu taşıt aerodinamiği alanında en çok araştırılan basitleştirilmiş geometrilerden biridir [1]. Orijinal Ahmed Body geometrisi, yuvarlak bir ön bölgeye ve üst bölümünde bir arka eğime sahip bir küt gövdeden oluşur [1]. Gövdenin bir karayolu taşıtının temel aerodinamik özelliklerine benzemesi amaçlanmış ve arka tarafındaki akış ayrışmasının neden olduğu sürüklenme kuvvetlerine odaklanılmıştır. [1].

Zaman içinde Ahmed Body deneysel tesislerde çeşitli aerodinamik araştırmalar için kullanılmıştır. Bu geometri üzerindeki ilk çalışma Ahmed ve arkadaşları tarafından 1984 yılında gerçekleştirilmiş ve ana sürüklenme katkısının gövdenin arka ucunda bulunan basınç kuvvetleri tarafından oluşturulduğu sonucuna varmışlardır. Makalede ayrıca arka eğim açısının arkasındaki akış özellikleri üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Soruna ilişkin bu ilk kavrayıştan sonra, akışın anlaşılmasını derinleştirmek ve sayısal doğrulamalar için değerli veriler üretmek amacıyla yeni deneyler gerçekleştirilmiştir. [1]

Bu bağlamda literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, Lienhart vd. [3] çalışmalarında, taşıt aerodinamiğinde kullanılan türbülans modellerini geliştirmeyi ve doğrulamayı hedeflemişlerdir. Ahmed Body modeli, 25° ve 35° arka eğim açıları ve 40 m/s akış hızıyla incelenmiştir. Lazer-Doppler anemometresi (LDA) kullanılarak elde edilen veriler, akış ayrılma ve girdap bölgelerindeki farklılıkları içermektedir. Ahmed Body referans modeli üzerinden yapılan bir diğer çalışma olan Strachan vd. [4] çalışmalarında, farklı arka eğim açılarıyla yapılan LDA ölçülerini paylaşmışlardır. 25 m/s hızla yapılan testlerde, hareketli zemin koşullarının araç arkasında oluşan girdapların boyutu ve gücünü incelemişler, ve ayrıca modelin altından yayılan girdaplar tespitini ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Ahmed Body modeli (arka eğim açısı 25°) üzerinde, arka gövde yuvarlatılmasının sürüklenme üzerindeki etkisi ve akış alanındaki değişiklikleri incelemek için Rossitto vd. [5] deneysel analizler gerçekleştirmişlerdir. Yuvarlatılmış arka uç tasarımının aerodinamik direnç kuvvetini azalttığını saptamışlardır. Ebrahim ve Dominy [6], taşıt modeli olarak 2016 model “hatchback Nissan Leaf” aracını belirlemişlerdir; iki ve üç arabalı taşıt gruplarının hem model rüzgâr tüneli ölçümleri hem de HAD analizi kullanılarak aerodinamik performansı (basınç alanını ve sürüklenme katsayısını) incelenmişlerdir. Zhang vd. [7], iki standart Ahmed Body modeline dayanan HAD yöntemi kullanılarak, iki aracın birbirini yakın takip eden sürüklenme katsayılarındaki değişimini incelemişlerdir.

Aulakh [8], difüzörün iki adet Ahmed Body’den oluşan araç konvoyu için sürüklenme katsayısı (C_d) üzerindeki etkisini; sabit parametre olarak taşıt hızı ve difüzör uzunluğu, değişken parametre olarak difüzör açısı, araçlar arasındaki mesafe ve arka eğim açısı parametrelerinde HAD analizleriyle incelemiştir. Sonuç olarak, konvoyda yer alan hem öndeki hem de takipteki araç gövdesinin sürüklenme özelliklerini, difüzör tarafından üretilen eksenel girdaplardan önemli ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. Robertson vd. [9], uzun bir taşıt konvoyunun aerodinamik akış gelişimi 1/20 ölçekli sekiz adet kamyon, hız ve araçlar arasındaki mesafe parametreleri için akış hızı, basınçlar, araç yüzey basıncı ve sürüklenme katsayısını deneysel olarak rüzgâr tüneline incelenmiştir. Bruneau vd. [10], Ahmed Body taşıt modeli kullanılarak arka arkaya bir, iki veya üç basitleştirilmiş kare arkalı araç (arka eğim açısı 0°) etrafında akışın sayısal simülasyonları yapılmıştır. Ağır [11], tek ve ardışık olarak konumlanmış Ahmed Body etrafındaki akımın hız alanı ve C_d katsayılarını hem HAD hem de deneysel analizlerle incelenmiştir. Değişken ve sabit parametreler sırasıyla; ardışık araçlar arasındaki mesafe, akış hızı 218 mm/s (Yükseklik ve serbest akım hızına bağlı Reynolds sayısı = $1,5 \times 10^4$).

Bu çalışmada, Ahmed Body modeli referans alınarak birbirini takip eden iki aracın takip mesafesinin sürüklenme ve kaldırma katsayısı, hız ve basınç dağılımı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, tekil Ahmed Body modeli için gerçekleştirilen HAD analizi, literatürdeki deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar verecek şekilde ağdan bağımsızlık çalışması doğrultusunda yürütülmüştür. İkinci bölümde ise doğrulanmış modelin ağ yapısı ve sınır şartları kullanılarak ardışık iki araç konfigürasyonu için farklı takip mesafelerinde (0,125 L, 0,25 L, 0,5 L, 1,0 L ve 2,0 L) HAD analizleri uygulanmıştır.

Araç aerodinamiğine ilişkin literatürde [12-15] hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle tekil Ahmed Body modeli detaylı biçimde incelenmiştir. Ancak konvoy halinde seyreden araçlar, yakın takip mesafesinde (0,125 L, 0,25 L, 0,5 L) gelişen iz bölgesi dinamiği ve araçlar arasındaki aerodinamik etkileşimler detaylı olarak ele alınmamıştır. Bu bağlamda, sunulan çalışmanın özgün katkısı; iki araçlı konfigürasyonlarda lider ve takip araç arasındaki aerodinamik etkileşimi HAD analiziyle ayrıntılı şekilde ortaya koymasındır. Böylece, konvoy halinde ilerleyen araçların aerodinamik davranışının anlaşılmasına yönelik literatürdeki önemli bir boşluk doldurulmuş ve ileri düzey konvoy modellemeleri için fiziksel olarak tutarlı bir temel oluşturulmuştur.

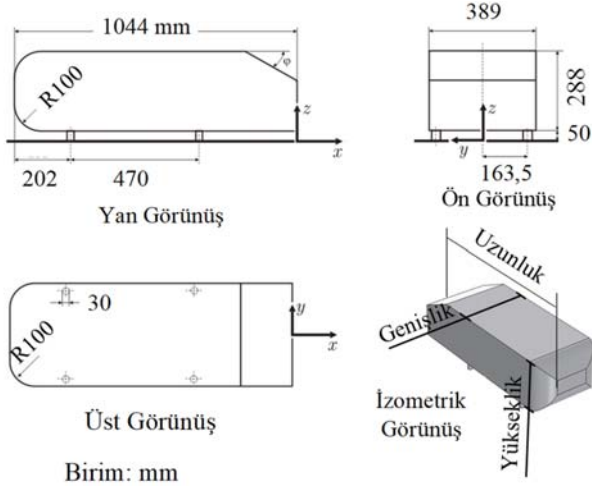
2. Aerodinamik Modelleme (Aerodynamic Modelling)

Bu çalışmada öncelikle test modeli olarak belirlenen tekil Ahmed Body modeli ile ilgili belirlenen parametreler hakkında bilgi verilmiştir. Sonrasında sırasıyla: akış alanı, ağ yapısının oluşturulması, sınır şartları ve parametreler ile ilgili bilgiler bu bölümde yer verilmiştir. Belirlenen sabit ve değişken parametreler çerçevesinde HAD analizleri Ansys-Fluent yazılımı aracılığıyla öncelikle tekil Ahmed Body modelin analizleri ve birbirini takip eden iki aracın analizleri için gerçekleştirilmiştir.

2.1. Test Modeli: Ahmed Body (Test Model: Ahmed Body)

Test modeli olarak “Ahmed Body” modeli kullanılmıştır. Ahmed Body modeli için arka eğim açısı (ϕ) 35°, difüzör açısı 0° parametreleri belirlenmiştir. Ahmed Body ilk olarak S.R. Ahmed tarafından öne sürülmüştür [16]. O zamandan beri, aerodinamik simülasyon araçları için bir ölçüt haline gelmiştir [17]. Bu geometriye ait ölçüler Şekil 1’de verilmiştir. Ahmed Body’nin gövdesi altında 50 mm yüksekliğinde silindirik ayakları bulunmaktadır, yine 0° ila 40°

arasında değişen bir eğime sahip olan arka eğim açısı (ϕ) bulunmaktadır [17].



Şekil 1. Ahmed Body Modelinin Boyutları
(Dimensions of Ahmed Body Model) [17, 18]

2.2. Akış Alanı (Flow Field)

Tekil Ahmed Body araç modelinin test edileceği akış alanı boyutları ve Ahmed Body'nin konumu Şekil 2(a)'da verilmiştir. Bu çalışmaya konu olan ve Şekil 2(b)'de verilen birbirini takip eden iki aracın aralarında bulunan mesafenin aerodinamik etkisinin sayısal modellemesinde kullanılan akış alanının boyutları verilmiştir. Akış alanının boyutları için Banga vd. [19] çalışması referans alınmıştır.

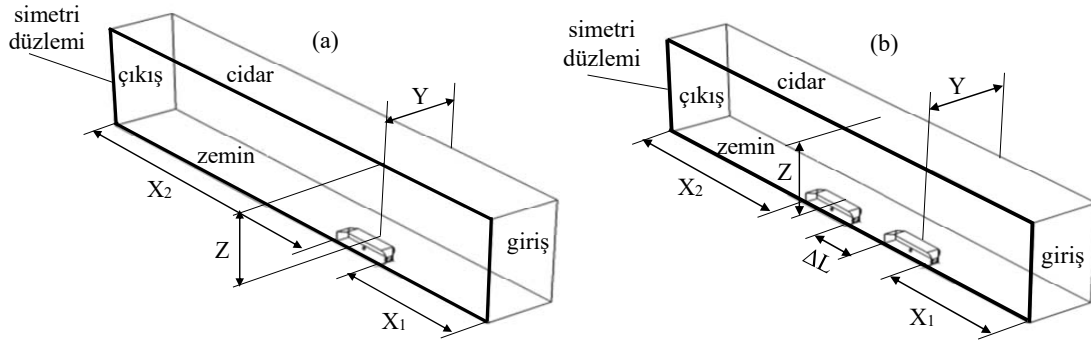
Akış alanı çalışmalarında kullanılan akışkan hava olup akış hızı 40 m/s olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan diğer sabit parametreler: Ahmed Body arka eğim açısı (35°), ve difüzör açısı (0°)

parametreleridir. Bu parametrelere bağlı olarak literatürde çalışılmamış araçlar arası mesafe için 0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L ve 2,0 L değerleri belirlenmiştir.

2.3. Ağ Yapısının Oluşturulması (Meshing)

Bu çalışmada, Ahmed Body geometrisi üzerinde sınır tabaka gelişiminin doğru şekilde çözümlenebilmesi amacıyla ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur. Hesaplama alanı, çözüm hassasiyetini artırmak ve hesaplama yükünü optimize etmek adına üç bölgeye ayrılmıştır (Bölge-1: yakın alan, Bölge-2: orta alan, Bölge-3: uzak alan), bu yapı Şekil 3(a)'da sunulmuştur. Hacimsel ağ yapısı temel olarak dört yüzlü (tetrahedral) elemanlardan oluşturulmuş, Ahmed Body yüzeyine bitişik bölgede ise beş katmanlı hücreler tanımlanarak sınır tabaka bölgesinde hız gradyanlarının hassas şekilde yakalanması sağlanmıştır (Şekil 3 ve Şekil 4). Sınır tabaka karakteristiklerini daha doğru modelleyebilmek amacıyla, araç yüzeyinden dışa doğru hücre boyutları kademeli olarak artırılmıştır. Ayrıca, araç ve akış alanı boyutlarının büyük olması nedeniyle hesaplama yükünü azaltmak amacıyla simetrik yarım model yaklaşımı benimsenmiştir.

Sayısal sonuçların güvenilirliğini değerlendirmek için dört farklı ağ tipi oluşturularak ağ bağımsızlık çalışması yürütülmüştür. Tüm ağlarda geometrik yapı sabit tutulmuş, eleman boyutu küçültülerek ağ yoğunluğunun sürüklenme katsayısı (C_d) üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, hesaplama yükünü makul seviyede tutmak amacıyla Bölge-2 ve Bölge-3'teki eleman boyutları sırasıyla 50 mm ve 250 mm olarak belirlenmiştir. Kritik akış bölgelerini içeren Bölge-1, hassasiyet analizinin odak noktası olarak seçilmiş ve Tip-1, Tip-2, Tip-3 ve Tip-4 olmak üzere dört farklı ağ konfigürasyonu üzerinden HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Düşük eleman sayısına sahip ağ yapıları ile yüksek eleman sayısına sahip ağ yapıları arasında sürüklenme katsayısı açısından anlamlı farklar görülmüştür. Ancak, eleman boyutunun 6,25 mm'ye kadar düşürüldüğü durumda elde edilen sürüklenme katsayısı Tip-1 ağ yapısındaki gibi yüksek oranda sapma göstermiştir.



Şekil 2. a) Tekil Ahmed Body ve b) konvoy halindeki iki Ahmed Body araç modeli için akış alanı boyutları ve araçların yerleşimi
(X_1 : 5000 mm, X_2 : 7500 mm, Y : 3000 mm, Z : 3000 mm; ΔL : 0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L, 2,0 L)

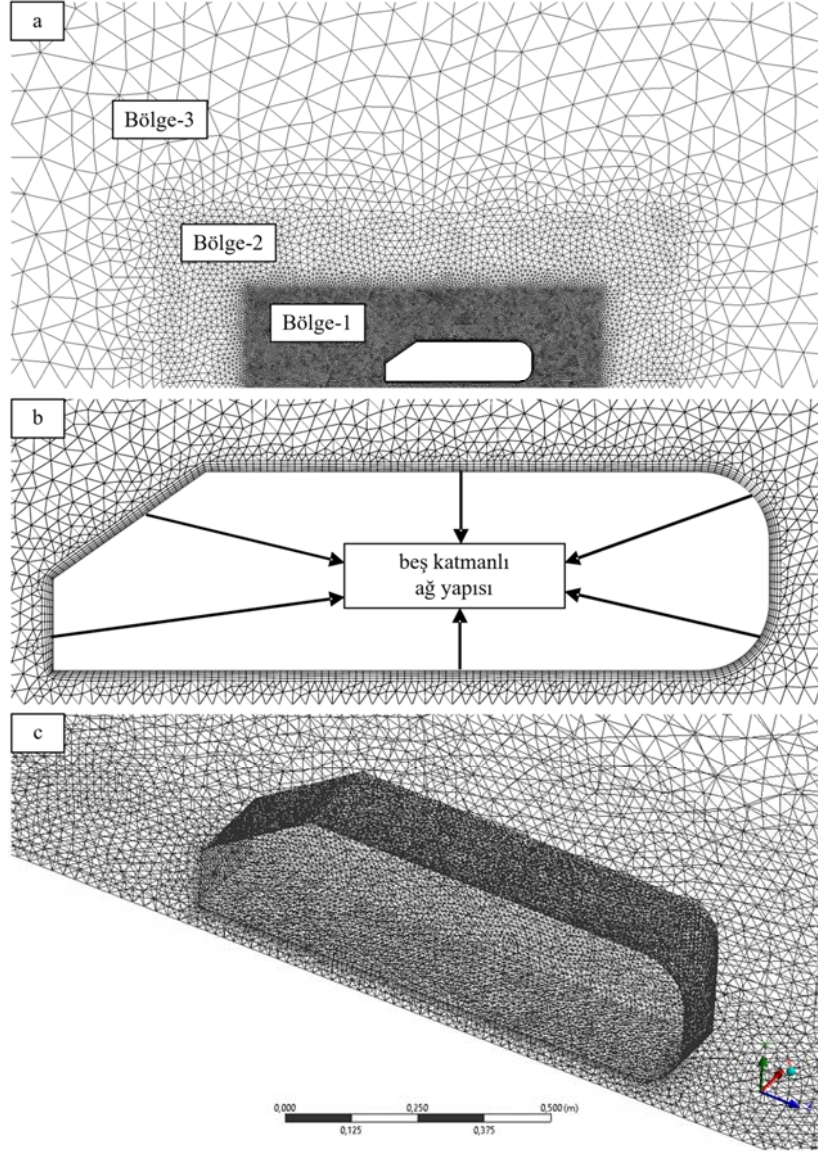
(Illustration of the computational domain dimensions and the spatial arrangement of the vehicles for a) the isolated Ahmed Body model and b) the two-vehicle convoy configuration (X_1 : 5000 mm, X_2 : 7500 mm, Y : 3000 mm, Z : 3000 mm; ΔL : 0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L, 2,0 L))

Tablo 1. Tip-1, 2, 3, 4 ağ konfigürasyonları için eleman boyutu ve sayısı, C_d katsayısı
(Element size, number of elements, and C_d Coefficient for Mesh Configurations: Type-1 to Type-4)

Ağ Tipi	Bölge-1 Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	HAD (C_d)	Literatür (C_d) Pagliarella vd. [20]
Tip-1	50	605305	0,4069	0,27
Tip-2	25	854578	0,3077	
Tip-3	12,5	2764623	0,2820	
Tip-4	6,25	17613565	0,4076	

Tablo 2. Takip mesafesine göre ağ yapılarındaki eleman ve nodes sayıları (Number of elements and nodes in the meshing)

	Eleman Sayısı	Nodes Sayısı
Tekil Ahmed Body	2764623	509896
0,125 L	3044911	592898
0,25 L	2234320	452462
0,50 L	2837176	557741
1,0 L	4186422	788994
2,0 L	4729756	881383

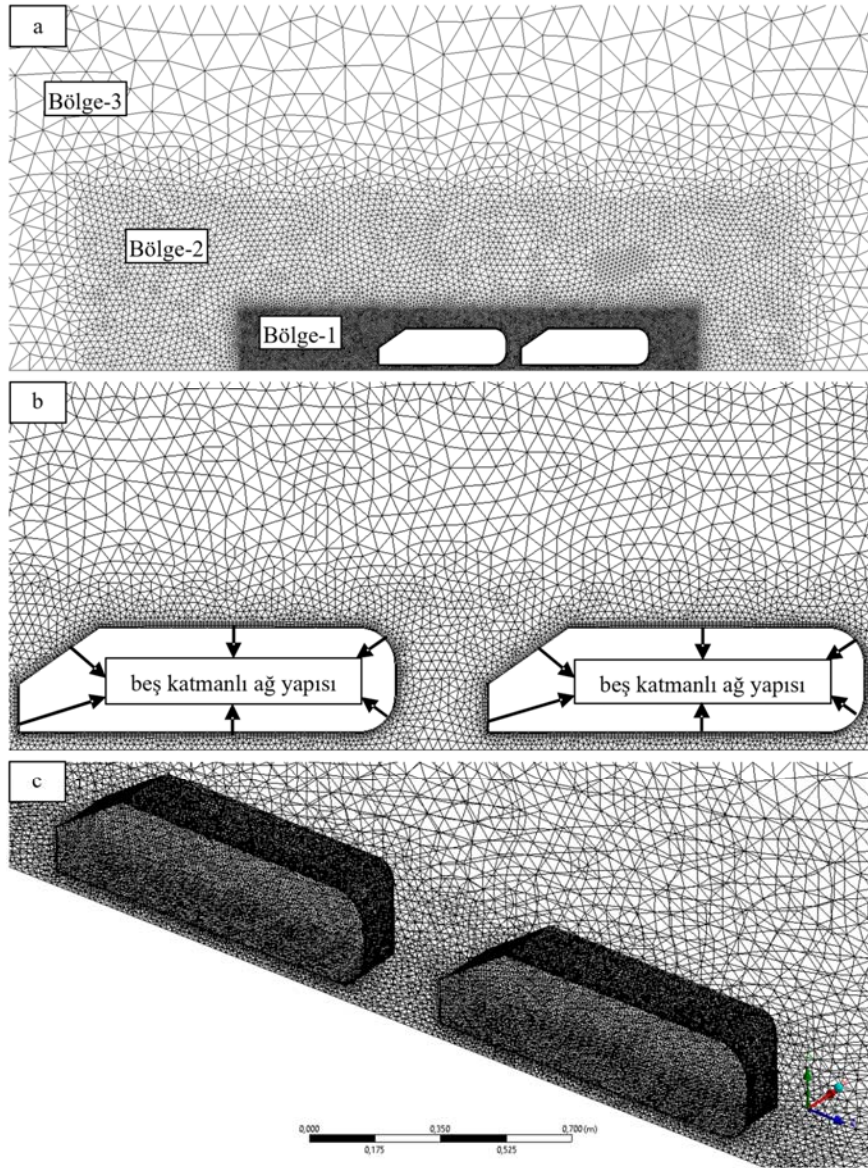
**Şekil 3.** Tekil Ahmed Body modelinin ağ yapısı: a) genel görünüş, b) araç çevresi yakın plan görünüş, c) izometrik görünüş (Meshing of the single Ahmed Body model: a) general view, b) close-up view of vehicle surroundings, c) isometric view)

Literatürdeki [20] deneysel bulguyla kıyaslandığında Tip-3 ağı ile elde edilen sürüklenme katsayısı %4,25'lik sapma ile uyumludur. Bu nedenle çalışmanın devamındaki tüm durumlarda ağ yapısı için Tip-3 kullanılarak analizler yapılmıştır.

Yapılan çalışmada yer alan tüm analizlerde (tekil model, 0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L, 2,0 L) kullanılan eleman ve node (düğüm) sayıları Tablo 2'de, kullanılan ağ yapısı parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Analizde kullanılan ağ yapısı parametreleri (Mesh parameters used in the analysis)

Parametreler	Değer
Eleman Tipi	Dört Yüzlü (Tetrahedral)
Bölge-1 Eleman Boyutu	12,5 mm
Bölge-2 Eleman Boyutu	50 mm
Bölge-3 Eleman Boyutu	250 mm
Aracın Yüzey Ağ Yapısı	Beş Katmanlı Yapı



Şekil 4. Birbirini takip eden iki Ahmed Body araç modeli ağ yapısı: a) genel görünüş, b) araç çevresinin yakın görünüş, c) izometrik görünüş (Meshing of two successive Ahmed Body vehicle models: a) general view, b) close-up view of vehicle surroundings, c) isometric view)

2.4. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Bu çalışmada hava, sıkıştırılmaz, kararlı ve sürekli rejimde akan bir akışkan olarak modellenmiştir. Sayısal çözümler, basınca dayalı çözüm algoritması ile birlikte Realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Realizable k- ϵ modeli, özellikle mühendislik uygulamalarında yüksek Reynolds sayılarında dış akışların simülasyonunda hesaplama verimliliği ile doğruluk arasında iyi bir denge sağlaması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir [21, 22]. Literatürde Ahmed Body geometrisi üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar [20, 23-25] da bu modelin deneysel verilerle tatmin edici bir uyum gösterdiğini doğrulamaktadır. Bu nedenle mevcut çalışmada türbülans modellemesi için Realizable k- ϵ modeli tercih edilmiştir. Mevcut çalışmada giriş sınır şartlarımızdan akış hızı parametresi olarak 40 m/s olarak belirlenmiştir, ayrıca literatür çalışmaları [8, 19, 26] referans alınarak sırasıyla türbülans yoğunluğu ve türbülans viskozite oranı; %5 ve 10 olacak şekilde tanımlanmıştır. Çıkış sınır şartlarında ise sabit atmosferik basınç koşulu ve aynı türbülans parametreleri korunmuştur. Akış alanı cidarlarında, özellikle duvar

yakınındaki yüksek hız ve basınç değişimlerinin daha doğru modellenmesi amacıyla, Kim ve Choudhury [27] tarafından geliştirilen “non-equilibrium wall function” yaklaşımı tercih edilmiştir. Son olarak, hesaplama yükünü azaltmak amacıyla akış alanı ve test modeli için simetri şartı kullanılmıştır. Bu çalışmada, süreklilik, momentum (hız) ve türbülans model katsayıları için yakınsama kriteri 10^{-3} olarak alınmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

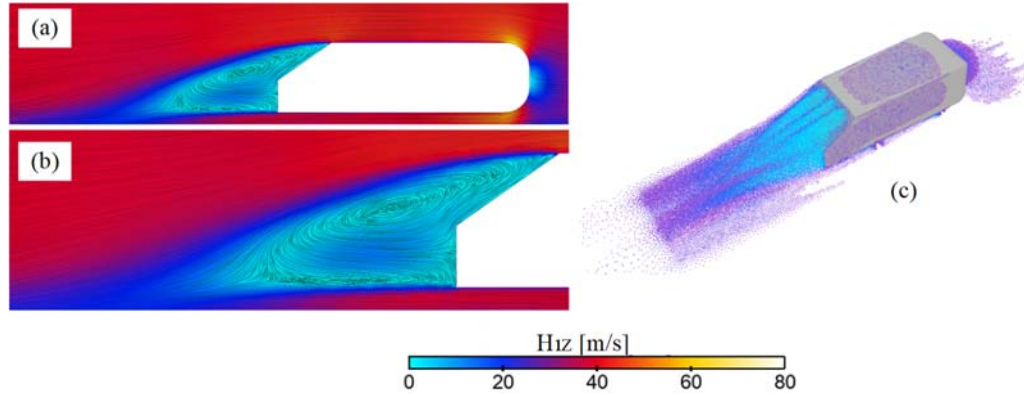
Bu bölümde sonuçlara ilişkin bilgiler tekil model ve takip araç modelleri için aralarındaki mesafenin 0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L ve 2,0 L olduğu durumlar için verilmiştir.

3.1. Tekil Ahmed Body Modeli (Singular Ahmed Body Model)

Şekil 5 ve Şekil 6’da sunulan HAD sonuçları, tekil Ahmed Body modeli etrafındaki akış yapılarının fiziksel olarak tutarlı olduğunu ve literatürde Ahmed Body geometrisiyle yapılan önceki çalışmalarla

Tablo 4. Ahmed Body modeli için yürütülen çalışma ile literatür karşılaştırması, C_d katsayısı
(C_d coefficient comparison between present study and literature for the Ahmed Body model)

Çalışma	Yöntem	Akışkan Hızı	Analiz Tipi	C_d
Yürütülen Çalışma	Realizable k- ϵ	40 m/s	Sayısal	0,2820
Ahmed vd. [16]	-----	60 m/s	Deneyisel	0,28
Pagliarella [20]	-----	40 m/s	Deneyisel	0,27
Abbaspour vd.[12]	-----	$2,8 \times 10^6$ Re	Deneyisel	0,295-0,315
Luo vd. [28]	Realizable k- ϵ	$1,85 \times 10^6$ Re	Sayısal	0,2728
Banga vd. [19]	Realizable k- ϵ	40 m/s	Sayısal	0,295

**Şekil 5.** Tekil Ahmed Body modeli için hız değişimi analizi (2D): a) genel görünüş, b) arka taraf yakın plan görünüş, c) 3D izometrik görünüş (Velocity variation analysis for the singular Ahmed Body model (2D): a) general view, b) rear side close-up view, c) 3D isometric view)

[16, 20] büyük ölçüde uyumlu olduğunu göstermektedir. Modelin ön yüzüne çarpan hava akımının durağan hale gelmesiyle oluşan stagnasyon/durgunluk bölgesinde maksimum basınç (Şekil 6(a)) gözlemlenmiştir. Ardından akışın, modelin yan yüzeylerine doğru yönelmesiyle birlikte basınç hızlı bir şekilde azalmıştır. Bu durum, Bernoulli ilkesi doğrultusunda beklenen bir sonuç olup, modelin geometrik yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Taban bölgesinde gözlemlenen basınç dağılımı, akışın bu bölgede ayrıldığını ve iz bölgesinin oluşumunu tetiklediğini göstermektedir. Şekil 5'te sunulan hız dağılımları ve akış çizgileri incelendiğinde, modelin arka eğimli yüzeyinde akışın ayrılması net bir şekilde görülmektedir. Bu ayrılma, keskin köşe nedeniyle oluşan ani geometrik değişimden kaynaklanan hız gradyanı değişimiyle ilişkilidir. Arka yüzeyde iki karşı yönlü dönen girdap yapısı gözlemlenmiş olup, bunlardan biri eğimli yüzey boyunca yukarı yönlü gelişirken, diğeri alt yüzeyde, difüzör bölgesi yakınında meydana gelmektedir. Özellikle Şekil 5(b)'de, bu girdapların etkisiyle oluşan düşük hızlı geri akım bölgesi net bir şekilde tanımlanabilmektedir. Üst bölgede oluşan girdap, model geometrisinin eğimi nedeniyle aşağıya doğru eğilim göstermekte, alt bölgede ise yuvarlanma girdabı modelin alt yüzeyinde, ön bölmenin hemen arkasında gelişmektedir.

Tekil Ahmed Body konfigürasyona ait sayısal analizler sonucunda ulaşılan sürüklenme katsayısı (C_d) 0,2820, kaldırma katsayısı (C_l) ise 0,1183 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4'de, tekil Ahmed Body modeli ($\phi = 35^\circ$) için literatürde bildirilen sürüklenme katsayısı (C_d) değerleri sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen C_d değeri, literatürdeki sayısal ve deneysel sonuçlarla uyum içindedir. Bu bulgular, Realizable k- ϵ türbülans yaklaşımının, Ahmed Body için dış akış problemlerinde aerodinamik çözümlemeler için güvenilir bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır.

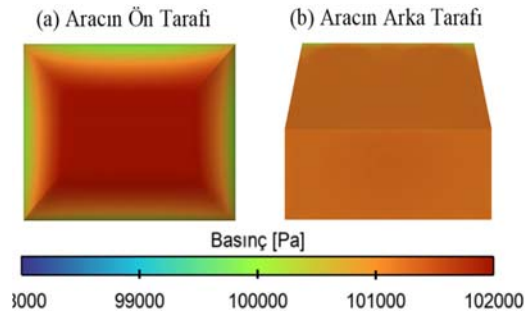
3.1.1. Tekil Ahmed Body modeli için hız değişimi bulguları (Velocity variation results for the singular Ahmed Body model)

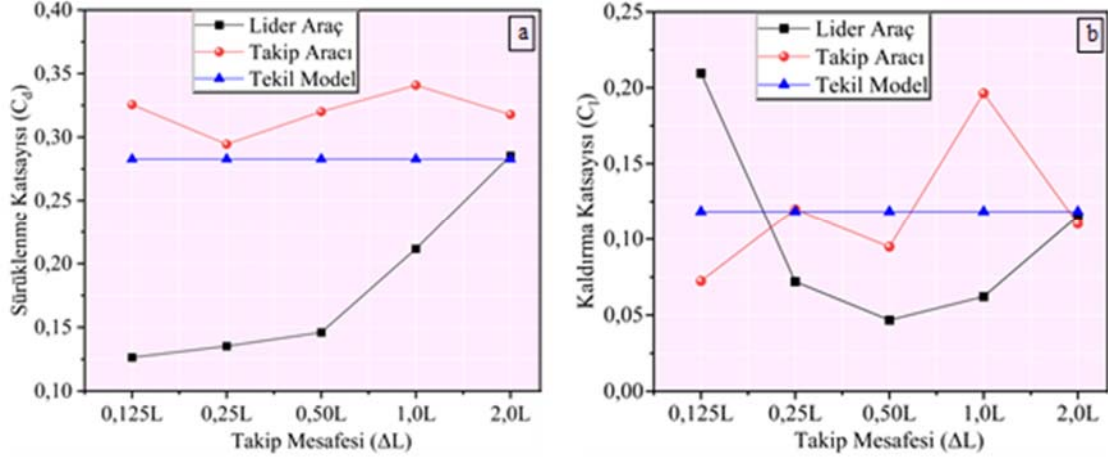
Şekil 5'teki hız dağılımı incelendiğinde, kırmızı bölgeler modelin üzerine etki eden serbest akış hızına (40 m/s) karşılık gelmektedir.

Sarı ve beyaz tonlar, hızın arttığı ve basıncın düştüğü alanları gösterirken; mavi bölgeler, daha düşük hızlara ve dolayısıyla daha yüksek basınca işaret etmektedir. Özellikle modelin arka kısmında gözlemlenen mavi tonlar, akış ayrılması sonucu oluşan yavaş ve düzensiz akış temsil etmektedir.

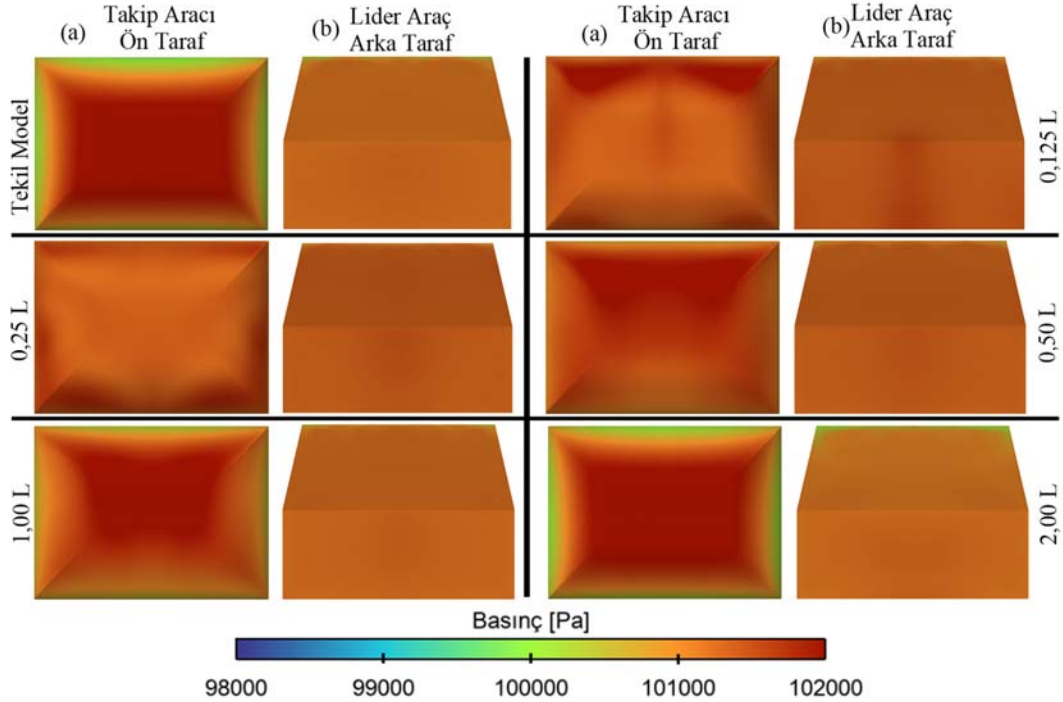
3.1.2. Tekil Ahmed Body modeli için basınç değişimi bulguları (Pressure variation results for the singular Ahmed Body model)

Şekil 6'da modelin ön yüzüne çarpan hava, burada durağan hale gelerek yüksek basınç bölgesi oluşturmuştur. Bu alan, renk skalasında kırmızıyla ifade edilmiştir. Hava daha sonra üst ve alt yüzeylere yönelmiş; bu sırada hız artışına bağlı olarak basınç düşüşü gerçekleşmiştir. Bu durum yeşil ile mavi renk tonlarında kendini göstermiştir. Ayrıca bu düşük basınç bölgesi aracın ön kısmında kaldırma kuvveti oluşturmuştur. Akış, modelin arka kısmına ulaştığında yüzeyden ayrılmış ve bu bölgede hava tarafından doldurulamayan bir hacim ortaya çıkmıştır. Bu durum, arka yüzeyde düşük basınçlı bir alanın gelişmesine neden olmuştur. Söz konusu düşük basınç bölgesi, arkadaki eğimli yüzeye yukarı yönlü bir kuvvet uygulayarak ilave bir kaldırma etkisi meydana getirmiştir. [19]

**Şekil 6.** Tekil Ahmed Body modeli için basınç değişimi analizi: a) aracın ön tarafı, b) aracın arka tarafı
(Pressure variation analysis for the singular Ahmed Body model: a) front side of the vehicle, b) rear side of the vehicle)



Şekil 7. Takip mesafesine göre a) sürüklenme katsayısının (C_d) değişimi, b) kaldırma katsayısının (C_l) değişimi
(Variation of a) drag coefficient (C_d) and b) lift coefficient (C_l) with respect to following distance)



Şekil 8. Tüm takip mesafesine (tekil model, 0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L, 2,0 L) göre basınç değişimi analizleri: a) takip aracı ön taraf, b) lider araç arka taraf (Analyses of velocity variation according to the whole following distance (singular model, 0.125 L, 0.25 L, 0.50 L, 1.0 L, 2.0 L): a) front side of the follow vehicle, b) rear side of the lead vehicle)

3.2. Birbirini Takip Eden İki Ahmed Body Modeli (Two Successive Ahmed Body Vehicle Models)

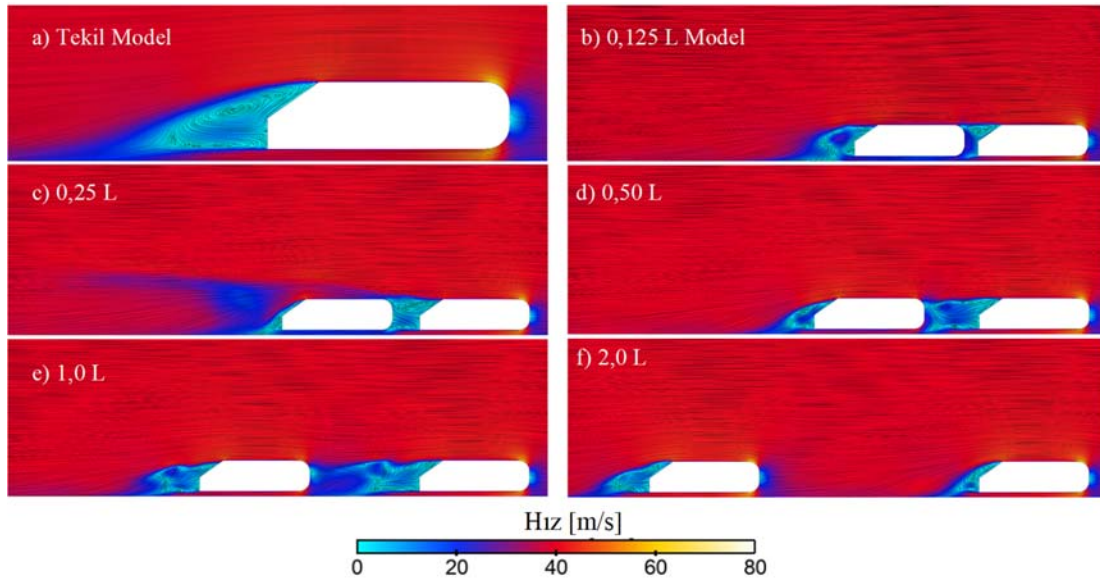
Bu bölümde takip mesafesine göre sürüklenme ve kaldırma katsayılarının davranışı, iz yapısı ile C_d , C_l ve C_p katsayı ilişkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3.2.1. Takip Mesafesine Göre Sürüklenme Katsayısı Davranışı (Effect of Following Distance on Drag Coefficient)

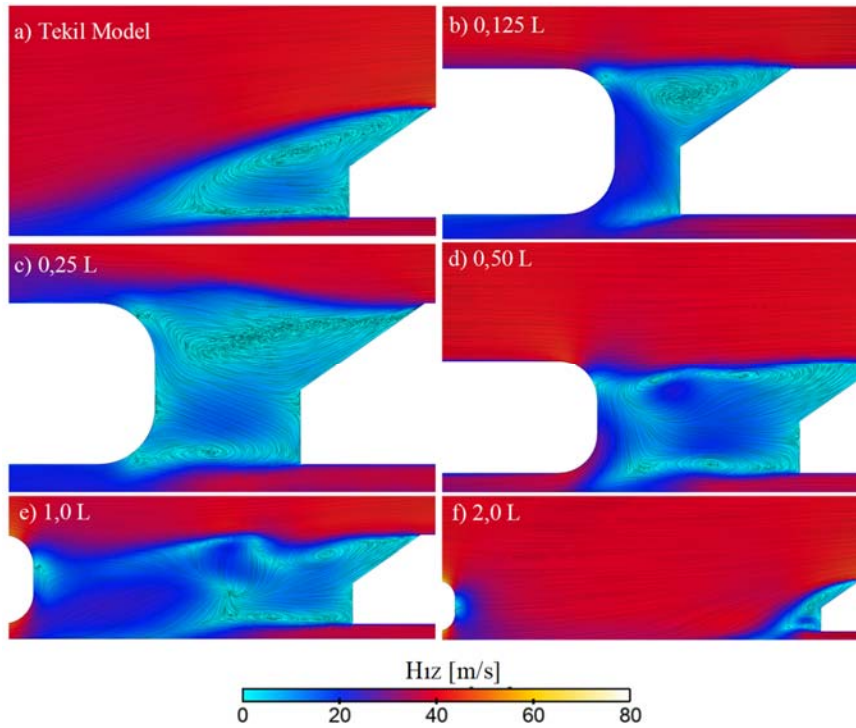
Çalışma kapsamında elde edilen sürüklenme (C_d) ve kaldırma katsayısı (C_l), lider araç, takip araç ve tekil araç için Şekil 7'de sunulmuştur.

2620

Şekil 7(a)'da sunulan C_d verilerine göre, takip araç modeline ait sürüklenme katsayıları, hem tekil (izole) modele hem de lider araca kıyasla daha yüksek olduğunu görülmektedir. Bu durum, takip mesafesinin artmasıyla birlikte lider araç tarafından oluşturulan iz yapısı ve girdap etkilerinin atmosferik dağılmaya maruz kalarak zayıfladığını göstermektedir. Bu zayıflama sonucunda hem lider hem de takip araçların sürüklenme katsayılarının tekil (izole) model değerlerine doğru yakınsadığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, takip aracı lider araca yaklaştıkça, lider aracın arka yüzeyinde pozitif basınç bölgesi oluşmakta ve bu durum, lider aracın sürüklenme katsayısında (C_d) anlamlı bir azalmaya sağlamıştır (Şekil 8, Tablo 8). Sürüklenme katsayısındaki bu düşüş; lider aracın arkasında oluşan iz yapısının,



Şekil 9. Tüm takip mesafesine göre hız değişimi analizleri (2D): a) tekil model, b) 0,125 L, c) 0,25 L, d) 0,50 L, e) 1,0 L, f) 2,0 L
(Analyses of velocity variation according to the whole following distance (2D): a) singular model, b) 0.125 L, c) 0.25 L, d) 0.50 L, e) 1.0 L, f) 2.0 L)

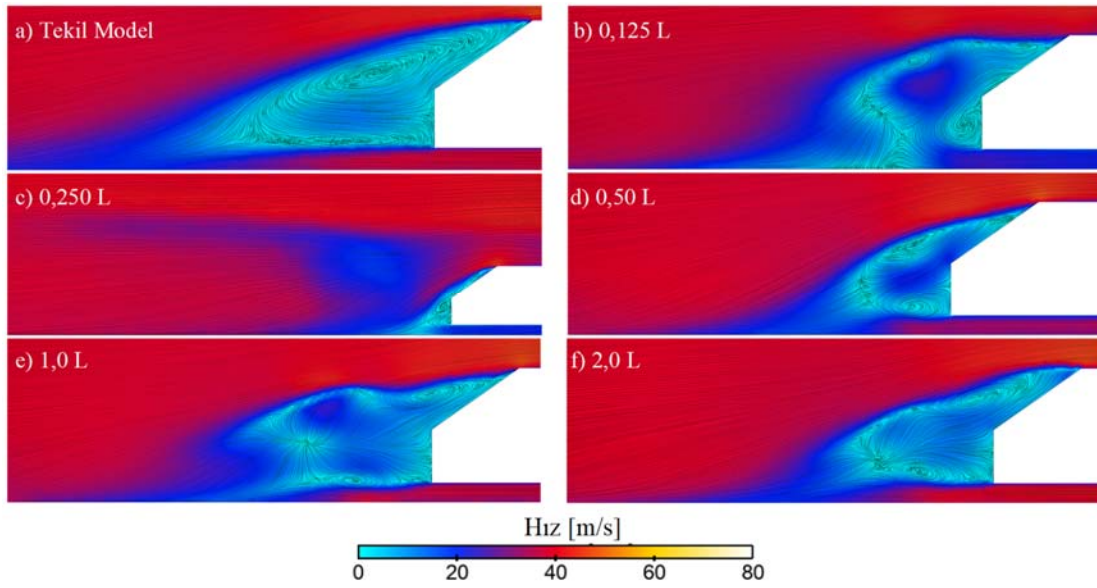


Şekil 10. Tüm takip mesafesine göre hız değişimi analizleri (2D) – araçlar arasındaki durum: a) tekil model, b) 0,125 L, c) 0,25 L, d) 0,50 L, e) 1,0 L, f) 2,0 L
(Analyses of velocity variation according to the whole following distance (2D) - the situation between vehicles: a) singular model, b) 0.125 L, c) 0.25 L, d) 0.50 L, e) 1.0 L, f) 2.0 L)

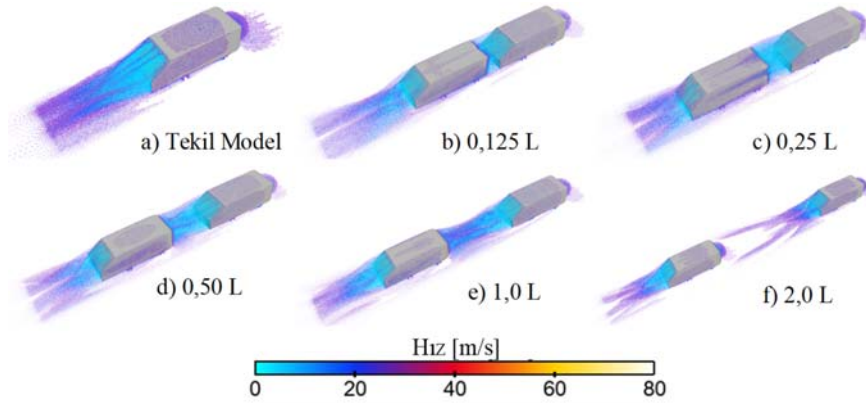
takip araç gövdesine çarptıktan sonra lider araç arkasında geri yönlü bir basınç bölgesi oluşturarak sürüklenmeyi azalttığı şeklinde Aulakh [8] tarafından açıklanmıştır.

Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, ve Şekil 12’de farklı takip mesafelerine bağlı olarak elde edilen hız dağılımları sunulmuştur. Takip mesafesi 0,125 L olduğunda, lider aracın arka kısmında oluşan iz yapısı nedeniyle takip aracının ön bölgesinde belirgin bir hız artışı meydana

gelmiştir. Bu durumda, lider araçtan ayrılan girdaplı akış yapısı, takip aracının ön-alt ve yan bölgelerine yönelerek yerel hız gradyanlarını artırmıştır. Takip mesafesi 0,250 L’ye çıkarıldığında, lider aracın arka eğimli yüzeyinin alt kısmında oluşan girdap ile alt tekerlek bölgesinden gelen akışın ayrılması sonucu ortaya çıkan girdap, iz bölgesinin ön tarafında çakışmıştır. Bu olay, 0,125 L mesafesine kıyasla daha dengeli bir akış yapısı meydana getirmiştir. Bu dengeli iz yapısı, takip aracının çevresindeki aerodinamik yüklerin daha



Şekil 11. Tüm takip mesafesine göre hız değişimi analizleri (2D) – takip aracı arka taraf yakın plan görünüşü: a) tekil model, b) 0,125 L, c) 0,25 L, d) 0,50 L, e) 1,0 L, f) 2,0 L
(Analyses of velocity variation according to the whole following distance (2D) - following vehicle rear side close-up view: a) singular model, b) 0.125 L, c) 0.25 L, d) 0.50 L, e) 1.0 L, f) 2.0 L)



Şekil 12. Tüm takip mesafesine göre hız değişimi analizleri (3D): a) tekil model, b) 0,125 L, c) 0,25 L, d) 0,50 L, e) 1,0 L, f) 2,0 L
(Analyses of velocity variation according to the whole following distance (3D): a) singular model, b) 0.125 L, c) 0.25 L, d) 0.50 L, e) 1.0 L, f) 2.0 L)

homojen dağılmasına ve sonuç olarak daha düşük bir sürüklenme katsayısına (C_d) katkı sağlamıştır. Ek olarak, Şekil 8'de ve bkz. Tablo 8'de sunulan 0,250L mesafesi için takip aracının ön bölgesindeki basınç düşüşü, bu analizleri destekler niteliktedir. Takip mesafesi arttıkça, takip aracının C_d değeri düşme eğilimi göstermiştir. Ancak tüm mesafelerde, takip aracının C_d değeri lider araca göre daha yüksek kalmaya devam etmiştir. Araçlar arası mesafe 2,0 L olduğunda, lider aracın sürüklenme katsayısı (C_d), tekil araç ile benzer bir seviyeye yaklaşma eğilimi göstermiştir. Lider araç, iz etkisinin dışına çıktıkça izole koşullardaki aerodinamik karakterine geri dönmektedir.

Tablo 5'te, bu çalışmada elde edilen normalize edilmiş sürüklenme katsayısı ($C_d/C_{d,izole}$) oranları, literatürde bildirilen ilgili deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırmalı olarak yer verilmiştir. Referans olarak kullanılan çalışmalardaki veriler, grafiklerinden sayısal okuma yöntemiyle çıkarılmıştır. Zhang vd. [7] tarafından yapılan çalışmada, deneysel ve sayısal analiz sonuçları C_d ve $C_{d,izole}$ katsayıları şeklinde

ayrı ayrı vermiştir; diğer çalışmalar da ise normalize edilmiş $C_d/C_{d,izole}$ oranları sunulmuştur. Tablo 6'da sunulan Zhang vd. [7] çalışmasındaki C_d verileri; $C_{d,izole}$ değerleri (deneysel ve sayısal analizler için sırasıyla 0,33 ve 0,29) kullanılarak $C_d/C_{d,izole}$ şeklinde Tablo 5'te belirtilmiştir.

İz etkisinin aerodinamik davranışlar üzerindeki belirleyici rolü göz önünde bulundurularak, bu bölümde takip mesafesinin C_d üzerindeki etkileri literatürdeki çalışmalarla -takip aracı üzerinden- karşılaştırılmıştır. Takip aracı için elde edilen $C_d/C_{d,izole}$ değerleri 0,125L ile 2,0L arasında 1,15 – 1,13 aralığında değişmektedir. İz etkisinin belirgin olduğu 0,125L mesafesindeki değer 1,15 olarak tespit edilmiş, mesafe arttıkça bu etkinin azaldığı görülmüştür. Ancak 2,0L mesafesinde dahi bu değer 1,13 seviyesinde kalmıştır. Bu gözlem, iz yapısının türbülans açısından yoğun olduğunu ve etkisinin uzun mesafelerde dahi sürdüğünü ortaya koymaktadır. Özellikle 0,50L mesafesinde takip aracı için elde edilen 1,14 değeri, Zhang vd. [7]'nin deneysel çalışmasındaki 1,24 ve sayısal çalışmasındaki 1,17

Tablo 5. Yürütülen çalışma ile literatür karşılaştırması; $C_d/C_{d,izole}$ oranları
(Comparison of $C_d/C_{d,isolated}$ Ratios Between Present Study and Literature)

Takip Mesafesi (L)	Çalışma Model	Yürütülen Çalışma Ahmed Body	Zhang vd. [7] Ahmed Body	Zhang vd. [7] Ahmed Body	Aulakh [8] Ahmed Body	Ebrahim vd. [6] Nissan Leaf	Ebrahim vd. [6] Nissan Leaf	Pagliarella [20] Ahmed Body
	Analiz Tipi	Sayısal	Sayısal	Deneyisel	Sayısal	Sayısal	Deneyisel	Deneyisel
0,125	Lider Araç	0,45		0,45				0,49
	Takip Aracı	1,15		0,94				1,12
0,200	Lider Araç		0,31					
	Takip Aracı		1,1					
0,250	Lider Araç	0,48			0,53	0,64	0,58	0,43
	Takip Aracı	1,04			1,4	1,06	1,04	1,29
0,500	Lider Araç	0,52	0,48	0,76		0,78	0,72	0,46
	Takip Aracı	1,14	1,17	1,24		1,03	0,97	1,35
0,750	Lider Araç				0,72	0,88	0,82	0,68
	Takip Aracı				1,21	0,97	0,94	1,13
1,000	Lider Araç	0,75	0,89	0,93		0,94		0,81
	Takip Aracı	1,21	0,93	0,76		0,93		1,03
2,000	Lider Araç	1,01	0,97	1,0				0,98
	Takip Aracı	1,13	0,89	0,82				0,94

Tablo 6. Zhang vd. [7] çalışmasındaki deneyisel ve sayısal analiz sonuçları, C_d katsayısı
(Experimental and Numerical C_d Results from Zhang et al. [7])

Takip Mesafesi (L)		0,125	0,200	0,500	1,000	2,000
	Lider Araç		Lider Araç	Lider Araç	Lider Araç	Lider Araç
	Takip Aracı		Takip Aracı	Takip Aracı	Takip Aracı	Takip Aracı
C_d	Sayısal Analiz		0,09	0,14	0,26	0,28
	Deneyisel Analiz	0,15	0,31	0,25	0,31	0,33

Tablo 7. Takip aracının araçlar arasındaki iz yapısı ile C_d ve C_l katsayısı arasındaki ilişkisi
(The relationship between the inter-vehicle wake field with the drag (C_d) and lift (C_l) coefficients of the following vehicle)

Takip Mesafesi (L)	C_d	C_l	Araçlar Arasındaki İz Bölgesi
Tekil Model	0,28	0,12	İzole iz oluşumu gözlenmiştir; akış arka yüzeyden simetrik şekilde ayrılmıştır. Referans konumudur.
0,125	0,33	0,07	İz bölgesi örtüşmesi sonucu lider araç izi bastırılmış, türbülans artmıştır [16]. C_d artarken, C_l azalmıştır.
0,25	0,29	0,12	İz bölgesi örtüşmesi diğer durumlara göre en iyi seviyeye ulaşmıştır; takip aracı, lider aracın iz bölgesinde simetrik ve dengeli konumlanmıştır [20].
0,50	0,32	0,09	İz bölgesi çözülmeye başlamış, koherent yapıların bozulması ve iz bölgesinin simetri kaybı, yukarı yönlü kuvvetlerin zayıflamıştır [29]. Bu durum C_l katsayısında dalgalanmaya yol açmıştır.
1,0	0,34	0,20	İz geçiş bölgesi etkisiyle, akış düzensizleşmiş ve üst yüzey basınç farkları C_l artışına yol açmıştır [30].
2,0	0,32	0,11	İz etkisi zayıflamış, takip aracı tekrar izole duruma geçmiştir; C_d ve C_l referans değerlere yaklaşmıştır.

değerleriyle oldukça yakın seviyededir. Benzer şekilde, lider araca ait 0,52 değeri de Zhang vd. [7]'in sayısal analiziyle tutarlıdır. Bu durum, yürütülen çalışmada kullanılan sayısal yöntemin doğruluğunu desteklemektedir. Pagliarella [20] ve Aulakh [8] çalışmalarında, kısa mesafelerde takip aracına ait $C_d/C_{d,izole}$ değerlerinin mevcut çalışmaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, Pagliarella [20] çalışmasında 0,25L mesafe için değer 1,29, Aulakh [8] çalışmasında ise 1,40 olarak raporlanmıştır. Bu farklılıkların temel nedeni; her çalışmada kullanılan araç geometrisi, ağ yapısı ve türbülans modeli unsurlarının değişiklik göstermesidir.

Ayrıca, referans çalışmalarda 1,0L ve sonrasındaki mesafelerde iz etkisinin azaldığı ve takip aracı $C_d/C_{d,izole}$ değerlerinin 1,0'ın altına düştüğü bildirilmektedir. Buna karşın, yapılan çalışmada 1,0L ve 2,0L için sırasıyla 1,21 ve 1,13 daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu durum, iz bölgesinin çözüm içinde geniş bir alana yayıldığını ve takip aracının hâlâ bu bölgeden etkilenmeye devam ettiğini göstermektedir.

Genel olarak, elde edilen $C_d/C_{d,izole}$ değerleri literatürle uyumlu sonuçlar sunmaktadır. Ek olarak, "Nissan Leaf" araç modelini kullanılarak Ebrahim ve Dominy [6] tarafından yapılan deneyisel ve sayısal analizler ile yürütülen çalışma karşılaştırıldığında, $C_d/C_{d,izole}$ değerleri benzer eğilim göstermiştir. Ancak, mutlak $C_d/C_{d,izole}$ değerleri arasında sapmalar mevcuttur; bu durum araç geometrilerinin birbirinden ayrılan tasarım özelliklerine bağlı olarak gelişen iz yapısıyla ilişkilendirilebilir. İz bölgesinde oluşan düzensiz akış yapıları, lider ve takip araçlarının aerodinamik davranışlarını farklı şekillerde etkilemiş; bu da her iki aracın takip mesafesine göre değişken sürüklenme katsayılarıyla sonuçlanmıştır.

3.2.2. Takip Mesafesine Göre Kaldırma Katsayısı Davranışı (Effect of Following Distance on Lift Coefficient)

Şekil 7(b)'de verilen C_l verileri incelendiğinde; araçlar arası mesafenin artmasıyla birlikte, lider ve takip araçlarının kaldırma

katsayısı (C_l) önemli ölçüde değişim göstermiştir. 0,125L mesafesinde, lider aracın kaldırma katsayısı en yüksek değere ulaşmakta, bu durum iz yapısının henüz gelişimini tamamlamadan takip araç tarafından bastırılmasıyla açıklanabilir. Ahmed vd. [16], iz bölgesine yakın bir cisim konumlandırıldığında arka basınç bölgesinin sıkıştığını ve bu durumun yukarı yönlü basınç gradyanını artırdığını belirtmiştir. Bu nedenle, iz bölgesi geri beslemesinin lider araç üzerinde C_l artışına yol açarken, takip aracı bu bölge içerisinde kaldığından dolayı düşük kaldırma katsayısı sergilemiştir. Takip mesafesi 0,25 L olduğunda, C_l değerlerinin 0,125L durumuna kıyasla birbirine yaklaştığı gözlemlenmiştir; takip aracına ait C_l değeri, tekil modele yakınsamıştır. Bu mesafede (0,25L) iz örtüşmesinin dengeli seviyeye ulaştığı ve akışın daha stabil hâle geldiği tespit edilmiştir [20]. İz bölgesinde oluşan düzenli akış, takip araç üzerinde daha güçlü bir üst yüzey basınç farkı oluşturarak C_l değerinin artırmıştır. Lider araçta ise iz bölgesinin gelişmesine olanak tanınması kaldırma katsayısının azalmasına neden olmuştur. 0,50L mesafesinde lider araçta C_l değeri minimum seviyeye inerken, takip araçta görece daha yüksektir. Bu durum, iz yapısının ayrılmasıyla lider aracın arka bölgesindeki koherent yapıların bozulması ve iz bölgesinde simetrisinin kaybı, yukarı yönlü kuvvetlerin zayıflamasıyla ilişkilidir [29]. 1,0L mesafesine gelindiğinde, takip aracın C_l değeri belirgin bir artış göstermektedir. İz bölgesi etkisiyle, akış düzensizleşmiş ve üst yüzey basınç farkları C_l değerini artırmıştır [30]. Bu noktada (1,0L) lider araçta C_l yeniden artış eğilimindedir, çünkü iz yapısı yeniden gelişme fırsatı bulmuştur. 2,0L mesafesinde iz yapısı etkileşimi sona ermekte ve her iki araç da izole akış rejimine geçmektedir. Bu koşullar altında hem lider hem de takip aracının kaldırma katsayısı tekil modele yaklaşmakta, iz bölgesi kaynaklı kuvvet dalgalanmaları büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Sonuç olarak hem lider hem de takip aracı, iz bölgesi sınırında oluşan düzensiz türbülans yapılarından etkilenerek konuma bağlı olarak değişken kaldırma katsayısı sergilemiştir.

3.2.3. Takip Mesafesine Göre İz Yapısı ile C_d ve C_l Katsayısı Arasındaki İlişkisi

(The relationship between the inter-vehicle wake field with the drag (C_d) and lift (C_l) coefficients)

Konvoy halinde hareket eden kara taşıtlarında, araçlar arasındaki aerodinamik etkileşimler önemli performans farklılıklarına neden

olabilmektedir. Bu bölümünde takip aracına ait aerodinamik parametreler incelenmiştir; bu durumunun temel nedeni, iz bölgesi etkileşimlerinin bu araç üzerindeki etkisinin daha yoğun ve değişken olmasıdır. Lider araç, kendi oluşturduğu iz alanında daha stabil akış koşullarına sahiptir. Takip aracı ise araçlar arasındaki iz bölgesi içinde sürekli değişen basınç ve hız değişimine maruz kalmaktadır. Bu durum takip aracı için, C_d ve C_l katsayılarının duyarlılığını artırmıştır.

Tablo 7’de yer alan veriler, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de sunulan basınç ve hız alanı analizleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Özellikle kısa takip mesafelerinde; iz yapısında örtüşme ve türbülans artışı, tekil modele göre sürüklenme (C_d) ile kaldırma (C_l) katsayılarında belirgin sapmalara yol açmıştır. 0,25L mesafesi, iz yapısı örtüşmesinin daha dengeli olduğu nokta olarak öne çıkmakta ve takip aracının aerodinamik karakteristiklerinin iyileştiği rejimi ortaya koymuştur. Takip mesafesi arttıkça iz etkisi zayıflamakta, akış izole hâle dönmekte ve bu da C_d artışına neden olurken, C_l katsayısında ise yeniden stabilize sağlamıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar, literatürdeki [16, 20, 29, 30] deneysel ve sayısal çalışmalar ile tutarlılık göstermiştir.

3.2.4. Takip Mesafesine Göre İz Yapısı ile Basınç Katsayısı (C_p) İlişkisi

(The relationship between the inter-vehicle wake field with the pressure coefficients (C_p))

Şekil 8’de basınç konturları ve Tablo 8’de ise basınç katsayısı (C_p) ve normalize oranı ($C_p/C_{p,izole}$) verileri sunulmuştur. Bu veriler üzerinden iz bölgesinin araçlar üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. C_p katsayısı konvoy halinde hareket eden araçlar için kritik bölge olan lider aracın arka tabanında ve takip aracın ön yüzeyinden alınmıştır. Tabloda, bu çalışmada konvoy halindeki Ahmed Body modeline ait sayısal veriler ve Altınışık vd. [25] tarafından yürütülen deneysel çalışmaya yer verilmiştir Altınışık vd. [25] çalışmasındaki veriler grafiklerinden sayısal okuma yöntemiyle belirlenmiştir.

Şekil 8(b) ve Tablo 8’de sunulan veriler değerlendirildiğinde, takip mesafesinin 0,50 L’den 0,25 L’ye düşürülmesi durumunda; lider aracın arka taban bölgesinde basınç artışı ($C_p = -0,002 \rightarrow 0,045$), takip

Tablo 8. Yürütülen çalışma ile literatür karşılaştırması, C_p katsayısı ve $C_p/C_{p,izole}$ oranları
(Comparison of C_p coefficient and $C_p/C_{p,isolated}$ ratios between the present study and the literature)

Takip Mesafesi (L)	C_p			$C_p/C_{p,izole}$	
	Çalışma	Yürütülen Çalışma	Altınışık vd. [25]	Yürütülen Çalışma	Altınışık vd. [25]
	Model	Ahmed Body	Fiat Linea	Ahmed Body	Fiat Linea
	Analiz Tipi	Sayısal	Deneysel	Sayısal	Deneysel
-----	İzole Araç - Arka Taraf	-0,132	0,064	1	1
	İzole Araç - Ön Taraf	0,978	0,892	1	1
0,000	Lider Araç - Arka Taraf		0,070		1,094
	Takip Aracı - Ön Taraf		0,033		0,037
0,125	Lider Araç - Arka Taraf	0,195		-1,481	
	Takip Aracı - Ön Taraf	0,146		0,149	
0,250	Lider Araç - Arka Taraf	0,045		-0,341	
	Takip Aracı - Ön Taraf	0,057		0,058	
0,500	Lider Araç - Arka Taraf	-0,002	0,027	0,016	0,422
	Takip Aracı - Ön Taraf	0,404	0,791	0,413	0,887
1,000	Lider Araç - Arka Taraf	-0,112	0,032	0,853	0,500
	Takip Aracı - Ön Taraf	0,707	0,880	0,723	0,987
2,000	Lider Araç - Arka Taraf	-0,102		0,775	
	Takip Aracı - Ön Taraf	1,005		1,028	

aracın ön yüzeyinde ise belirgin bir basınç düşüşü ($C_p = 0,404 \rightarrow 0,057$) meydana gelmiştir. Bu değişimler, iz yapısının takip araca yönelmesiyle birlikte, lider araç arkasında pozitif basınç etkisinin, takip aracın ön bölgesinde ise düşük basınç alanlarının oluştuğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu eğilim, sürüklenme katsayısı (C_d) değerleriyle de desteklenmektedir; takip mesafesi azaldıkça lider aracın C_d katsayısında düşüş gözlenmektedir. Takip mesafesi 0,5L için lider aracın arka taban bölgesinde ve takip aracının ön yüzey bölgesinde oluşan basınç katsayısı, sırasıyla -0,002 ve 0,404'tür. Aynı takip mesafesinde Altınışık vd. [25] çalışmasında ise bu değerler 0,027 ve 0,791'dir. Her iki çalışmada da iz bölgesi lider araçtan ayrılıp takip araca yönelerek karşılıklı basınç alanlarını şekillendirmektedir. Bu durum, iz bölgesi etkileşiminin sadece sürüklenme katsayısına değil, aynı zamanda basınç dağılımına da yansımaları göstermektedir.

Çalışmanın bu bölümünde iz bölgesinin lider ve takip aracı üzerindeki etkisi normalize edilmiş basınç katsayısı oranı ($C_p/C_{p,izole}$), izole koşullara göre incelenmiştir. Altınışık vd. [25] ve yürütülen bu çalışmada araç geometrileri birbirinden farklı olması nedeniyle normalize basınç katsayısı oranları üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Tablo 8'de bu oranlar verilmiştir.

Takip mesafesi 0,5 L olduğunda:

- Yürütülen çalışmada; lider araç arka yüzeyinde $C_p/C_{p,izole} = 0,016$ iken takip araç ön yüzeyinde 0,413 olarak tespit edilmiştir. İzole araca ($C_p/C_{p,izole} = 1$) göre sırasıyla %98,4 ve %58,7 oranında azalmıştır.
- Altınışık vd. [25] çalışmalarında; lider araç arka yüzeyi için normalize basınç oranı $C_p/C_{p,izole} = 0,422$ iken takip araç ön yüzeyinde bu değer 0,887 olarak bildirilmiştir. Normalize basınç oranları, izole duruma göre ($C_p/C_{p,izole} = 1$) göre sırasıyla %57,8 ve %11,3 oranında düşmüştür.

Elde edilen bu bulgular neticesinde, iz bölgesinin etkisi izole koşullara göre belirgin bir basınç değişimi oluşturduğunu göstermiştir. Ancak, yürütülen çalışmada iz etkisi daha ani bir C_p düşüşüyle sonuçlanırken, Altınışık vd. [25] çalışmasında bu etki daha sınırlıdır. Bu oluşan farklılığın temel sebebi olarak Ahmed Body geometrisinin daha ani bir iz yayılımı oluşturmasıyla açıklanabilir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma kapsamında, Ahmed Body geometrisi referans alınarak konvoy hâlinde ilerleyen iki aracın farklı takip mesafelerinde (0,125 L, 0,25 L, 0,50 L, 1,0 L ve 2,0 L) oluşturduğu aerodinamik etkileşimler yüksek doğruluklu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri ile incelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

Sürüklenme Katsayısı (C_d) Değerlendirmesi: Takip aracı, tüm takip mesafelerinde lider araca göre daha yüksek C_d değerleri sergilemiştir. Bu durum, iz bölgesindeki düzensiz türbülans yapılarının takip araç üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve konvoy hâlinde seyreden araçlarda aerodinamik sürüklenmenin belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Ayrıca, takip mesafesi azaldıkça lider aracın C_d değerinin düştüğü, bu düşüşün iz bölgesinin geri besleme etkisinden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Kaldırma Katsayısı (C_l) Analizi: C_l katsayısı, takip mesafesine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Özellikle 0,25 L mesafesinde C_l değerlerinin 0,125 L mesafesine göre birbirine daha fazla yakınsadığı ve takip aracın C_l değerinin tekil modele yaklaştığı saptanmıştır. Bu durum, iz bölgesinin yapısı ve türbülans değişimine bağlı olarak meydana gelen kaldırma kuvvetinin bir sonucudur.

Basınç ve Hız Dağılımları: Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulan hız ve basınç konturları incelendiğinde, iz bölgesinin lider aracın arkasından takip araca yönelmesiyle lider araç arkasında pozitif basınç etkisi ve takip aracın ön bölgesinde düşük basınç oluştuğu belirlenmiştir. Bu etki, takip mesafesi kısaltıldıkça daha belirgin hâle gelmiş; özellikle 0,50 L'den 0,25 L'ye mesafe düşürüldüğünde; takip aracın ön yüzeyinde belirgin bir basınç düşüşü ($C_p = 0,404 \rightarrow 0,057$) ve lider araç arkasında pozitif basınç artışı ($C_p = -0,002 \rightarrow 0,045$) kaydedilmiştir. Ayrıca bu durum; kısalan takip mesafesi ile lider aracın C_d değerlerinin düşmesi ile doğrulanmaktadır.

Normalize Değerlerle Karşılaştırmalı Analiz: Yürütülen çalışmada elde edilen bulgular, normalize sürüklenme ve basınç katsayısı üzerinden literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Takip aracına ait elde edilen normalize sürüklenme katsayısı ($C_d/C_{d,izole}$) değerlerinin, farklı takip mesafelerinde literatürle uyumludur; bu bulgu iz etkisinin çözüm doğruluğunu ve sayısal modellemenin güvenilirliğini teyit etmektedir. İz etkisinin belirgin olduğu 0,125L mesafesinde değer 1,15 olarak tespit edilmiş, mesafe arttıkça bu etkinin azaldığı görülmüştür. Ancak 2,0L mesafesinde dahi bu değer 1,13 seviyesinde kalmıştır. Bu gözlem, iz yapısının türbülans açısından yoğun olduğunu ve etkisinin uzun mesafelerde dahi sürdüğünü ortaya koymaktadır. Ayrıca, normalize edilmiş basınç katsayısı ($C_p/C_{p,izole}$) analizlerinde takip mesafesi 0,5L için: lider araç arka yüzeyinde ve takip araç ön yüzeyindeki $C_p/C_{p,izole}$ değerleri izole (tekil) araca göre sırasıyla %98,4 ve %58,7 azalma görülmüştür. Altınışık vd. [25] çalışması da benzer şekilde eğilim bildirmiştir. Sonuç olarak, iz yapısının etkisi, izole koşullara kıyasla hem lider hem de takip aracı üzerinde anlamlı basınç farklılıkları oluşturmuştur.

Tasarım Açısından Öneriler: Elde edilen bulgular doğrultusunda, konvoy hâlinde çalışan taşıtlarda özellikle iz bölgesi etkisinin şekli ve yayılımı karakteristiğinin, araçların arka gövde geometrisi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, lider araç tasarımında arka taban bölgesinin daha keskin veya kontrollü ayrılma kenarlarına sahip olacak şekilde optimize edilmesi, iz yapısının yönlendirilmesini sağlayarak takip araç üzerindeki olumsuz basınç etkilerini azaltabilir. Takip aracın yüksek C_d değerlerinden kaynaklanan aerodinamik kayıpları azaltmak için, ön yüzeyinde yer alacak eğimli veya kavisli hat geçişlerinin, iz bölgesine daha uyumlu hâle getirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, araç tavanı ve yan yüzeylerinde yer alacak akış yönlendirici pasif aerodinamik elemanlar-vorteks jeneratör- iz bölgesinden gelen türbülans yapılarının kontrolüne katkı sağlayabilir. Simülasyon verileri ışığında, 0,25 L ve daha kısa takip mesafelerinde, lider araçta C_d düşüşü ile aerodinamik avantaj oluştuğu, ancak bu durumun takip araçta tersine dönerek yüksek sürüklenme değerlerine yol açtığı görülmüştür. Bu nedenle konvoy halinde hareket eden araçlar için tasarımlar sadece tekil araç performansına göre değil, etkileşimli sürüş senaryoları göz önüne alınarak optimize edilmelidir.

Yakıt Tüketimi ve Enerji Verimliliği: Sürüklenme katsayısında (C_d) meydana gelen değişimlerin, taşıtların yakıt tüketimi ve karbon salımı üzerinde doğrudan etkili olduğu dikkate alındığında, özellikle takip araç için yakın takip senaryolarında görülen C_d artışları enerji verimliliğini önemli ölçüde düşürmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, optimum aerodinamik konfigürasyonun sağlanabilmesi için takip mesafesinin 0,50 L veya üzeri olacak şekilde sınırlandırılması gerektiğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, ticari taşıt filolarında yakıt ekonomisini maksimize edebilmek için yalnızca motor verimliliği değil, aynı zamanda konvoy halinde hareket eden araçların geometrisi ve aerodinamik eşleşme stratejileri de tasarım parametreleri arasında yer almalıdır. Bu sayede hem daha sürdürülebilir enerji kullanımı hem de emisyon azaltımı açısından önemli kazanımlar sağlanabilir.

Bu bağlamda, bu çalışma yalnızca araçlar arası etkileşimi modellemekle kalmamış, aynı zamanda konvoy aerodinamiğine ilişkin tasarım, performans ve verimlilik açılarından bütüncül bir değerlendirme sunmuştur.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde sağladıkları değerli katkılar ve desteklerinden dolayı Karsan Otomotiv Sanayii ve Tic. A.Ş.'ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar (References)

- Horacio J. A., Juan M. G., Francisco E., Norberto M. N., Aerodynamic study of a moving Ahmed Body by numerical simulation, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 245 (105635), 1-19, 2024.
- Kang N., Effect of approach flow condition on the wake of an Ahmed Body, Yüksek Lisans Tezi, Windsor Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Windsor, 2021.
- Lienhart, H., Stoots, C., Becker, S., Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed model), *Notes on Numerical Fluid Mechanics (NNFM)*, Cilt 77, Editör: Hilbig H., Heinemann H.-J., Rist U., Wanger S., Springer, Berlin, Heidelberg, 323-330, 2002.
- Strachan R., Knowles K., Lawson N., The vortex structure behind an Ahmed reference model in the presence of a moving ground plane, *Exp. Fluids*, 42 (5), 659-669, 2007.
- Rosito G., Sicot C., Ferrand V., Borée J., Harambat F., Influence of afterbody rounding on the pressure distribution over a fastback vehicle, *Exp. Fluids*, 57 (3), 1-12, 2016.
- Ebrahim H., Dominy R., Wake and surface pressure analysis of vehicles in platoon, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 201 (104144), 1-15, 2020.
- Zhang J., Li Z., Bai B., Zhang L., Analysis and Simulation of Air Drag in Vehicles Close-following, *Applied Mechanics and Materials*, 152-154, 1438-1442, 2012.
- Aulakh D.J.S., Effect of underbody diffuser on the aerodynamic drag of vehicles in convoy, *Cogent Engineering*, 3 (1), 1230310, 2016.
- Robertson F.H., Bourriez F., He M., Soper D., Baker C., Hemida H., Sterling M., An experimental investigation of the aerodynamic flows created by lorries travelling in a long platoon, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 193 (103966), 1-13, 2019.
- Bruneau C.-H., Khadra K., Mortazavi I., Flow analysis of square-back simplified vehicles in platoon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 66, 43-59, 2017.
- Ağır A., Tek ve ardışık konumlanmış model kara taşıtı etrafındaki akış yapısının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2011.
- Abbaspour, M., & Jahanmiri, M., Experimental investigation of drag reduction on Ahmed car model using a combination of active flow control, *International Journal of Automotive Engineering*, 1 (2), 111-118, 2011.
- Fares, E., Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, *Computers & Fluids*, 35 (8-9), 940-950, 2016.
- Aksoy M.H., Okbaz A., Yağmur S., Doğan S., A comparison of RANS-based turbulence modeling and PIV experiments for flow over a simplified road vehicle, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1481-1492, 2022.
- Zafer B., Haskarman 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.
- Ahmed S. R., Ramm G., Faltin G., Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, *SAE Technical Paper Series*, 840300, 1984.
- Gopala A., A study of automotive aerodynamics using cfd, Yüksek Lisans Tezi, Kettering University, Mühendislik Fakültesi, Michigan, 2021.
- Veeraghanta B. K., Numerical investigations on the aerodynamics of overtaking maneuvers using simplified road vehicle models, Yüksek Lisans Tezi, North Carolina Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Charlotte, 2021.
- Banga S., Zunaid Md., Ansari N. A., Sharma S., Dungriyal R. S., CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 12 (4), 87-94, 2015.
- Pagliarella, R. M., On the aerodynamic performance of automotive vehicle platoons featuring pre and post-critical leading forms, Doktora Tezi, RMIT University, School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, Melbourne, 2009.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B., The numerical computation of turbulent flows, *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering*, 3 (2), 269-289, 1974.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd ed.), Pearson Education, Glasgow, UK, 2007.
- Hughes, T. CFD study of flow over a simplified car (Ahmed Body) using different turbulence models, researchgate: <https://www.researchgate.net/publication/325451944.2018.03.06.2025>.
- Şumnu, A., Shape modification of Ahmed Body to reduce drag coefficient and turbulence models comparison, *NOHU Journal of Engineering Sciences*, 10 (2), 824-832, 2021.
- Altınışık, A., Yemenici, O., Umur, H., Aerodynamic analysis of a passenger car at yaw angle and two-vehicle platoon, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 137 (12), 1-10, 2015.
- Bangar, S. R., Gadekar, S. S., CFD analysis and optimization of geometrical modifications of Ahmed Body, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 12 (5), 37-49, 2015.
- Kim, S. W., Choudhury, D., A near-wall treatment using wall functions sensitized to pressure gradient, *Fluent Inc. Technical Memo*, 217,273-280, 1995.
- Luo, J., Mi, K., Tan, D., Zhang, Z., Li, M., Qing, J., & Huang, H., Investigation of the aerodynamic characteristics of platoon vehicles based on Ahmed Body, *Shock and Vibration*, 2022 (1), 3269604, 2022.
- Grandemange, M., Gohlke, M., Cadot, O., Turbulent wake past a three-dimensional blunt body. Part 1. Global modes and bi-stability, *Journal of Fluid Mechanics*, 722, 51-84, 2013.
- Zabat, M., Stabile, N., Frascaroli, J., & Browand, F. (1995). The aerodynamic performance of platoons: Final report. PATH Research Report UCB-ITS-PRR-95-23. <https://escholarship.org/uc/item/8ph187fw#main>. 1995. 03.06.2025.