



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi

The investigation of flow characteristic around a bus model by CFD method and improvement of drag force by passive flow control method

Yazar(lar) (Author(s)): Cihan BAYINDIRLI¹, Mehmet ÇELİK², Mehmet DEMİRALP³

ORCID¹: 0000-0001-9199-9670

ORCID²: 0000-0002-3390-1716

ORCID³: 0000-0002-7444-5630

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bayındırlı, C., Çelik M., Demiralp, M., “Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 785-795, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.403993

Bir Otobüs Modeli Etrafındaki Akış Yapısının CFD Yöntemi ile İncelenmesi ve Sürüklenme Kuvvetinin Pasif Akış Kontrol Yöntemi ile İyileştirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Cihan BAYINDIRLI^{1*}, Mehmet ÇELİK², Mehmet DEMİRALP³

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Türkiye

³Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 27.11.2017 ; Kabul/Accepted :20.02.2018)

ÖZ

Bu çalışmada, 1/64 ölçekli bir otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile tespit edilmiştir. Akış analizleri x yönünde 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s ve 30 m/s serbest akış hızlarında 173000-346000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Akış analizleri Fluent® programında yapılmıştır. Otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0.657 olarak tespit edilmiş, toplam direncin basınç ve sürtünme kaynaklı dağılımı belirlenmiştir. Model otobüs üzerinde basınç kaynaklı direnç oluşturan bölgeler akış görüntülemeleri ile tespit edilmiştir. Akış yapısını iyileştirmek ve basınç kaynaklı direnci azaltmak için üçgen kesitli akış kontrol elemanı geliştirilmiştir. Akış kontrol elemanı 15 mm çapında eşkenar üçgen şeklinde olup model otobüsün ön tampon üzerine konumlandırılmıştır. Model 1 otobüsün aerodinamik direnç katsayısı 0.623 olarak tespit edilmiştir. Bu pasif akış kontrol yöntemi ile aerodinamik direnç katsayısında ortalama % 5.27 iyileşme sağlanmıştır. Elde edilen bu iyileşmenin yüksek taşıt hızlarında yakıt tüketimine etkisi yaklaşık %3'tür. Bu orandaki bir aerodinamik iyileşmenin bir otobüste yıllık yakıt tüketimine etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürüklenme kuvvet katsayısı, pasif akış kontrolü, akış kontrol elemanı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

The Investigation of Flow Characteristic Around A Bus Model by CFD Method and Improvement of Drag Force by Passive Flow Control Method

ABSTRACT

In this study, aerodynamic drag coefficient of 1/64 scaled bus model was determined by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Flow analyzes were performed at 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s ve 30 m/s in x direction, between the range of 173000-346000 Reynolds numbers. Flow analysis was made in Fluent® program. The aerodynamic drag coefficient (C_D) of the bus model was determined as 0.657 on average, the distribution of total drag was determined as pressure-friction based. After the flow visualization, the areas are detected where forms aerodynamic drag on the model bus. A triangular section flow control element has been developed to improve the flow structure and decrease the pressure based drag. The flow control element is an equilateral triangle with a diameter of 15 mm and positioned on the front bumper of the model bus. The aerodynamic drag coefficient of model 1 bus was determined as 0.623. With this passive flow control method, the aerodynamic drag coefficient improved by %5.27. The effect of this improvement on fuel consumption is about 3 % at the high vehicle speed. The effect of this aerodynamic improvement on the annual fuel consumption of a bus has been evaluated.

Keywords: The drag force coefficient, passive flow control, flow control part, Computational Fluid Dynamics (CFD).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cisimlerin hava içerisindeki hareketini ve hava ile etkileşimlerini inceleyen bilim dalı aerodinamik olarak adlandırılır. Motorlu kara taşıtlarının aerodinamik yapıda olmaları performans, yakıt tüketimi, ivmelenme, yol tutuşu, ses, çevre kirliliği ve konforunu önemli derecede

etkilemektedir. Bu yüzden taşıt üreticileri aerodinamik çalışmalara büyük önem vermekte ve aerodinamik testlere büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Bu konunun toplumun her kesimini ilgilendiren bir husus—haline gelmesine neden olan etken ise tüm tüketim malzemelerinin maliyet analizlerinde taşıma giderlerinin önemli bir yüzde oluşturmasıdır. Türkiye petrol ürünleri bakımından fakir bir ülke olup bu alanda ihtiyaç duyduğu enerjinin tamamına yakını ithal etmektedir. Dünyada

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : cbayindirli@ohu.edu.tr

benzin ve dizel yakıtının en pahalı olduğu ülkelerin başında Türkiye gelmektedir. Yüksek hızlarda hareket eden bir aracın C_D katsayısı %2 düşürüldüğünde yakıt tüketimi yaklaşık %1 azalmasıdır [1]. Öyle ki 100 km/h hızda hareket eden bir otomobil gücünün %50-70'ini aerodinamik direnci yenmeye harcamaktadır. Türkiye'de 2011 verilerine göre şehirlerarası yolcu taşımacılığı alanında faaliyet gösteren 31935 firma olduğu bilinmektedir. Uluslararası planda taşıma yapan firmaların sayısı ise 237'dir. Yurtiçinde şehirlerarası yolcu taşımada kullanılan otobüs sayısı 52707 olup uluslararası yolcu taşımacılığında kullanılan otobüs sayısı 3743'dür [2].

Bu çalışmanın amacı bir otobüs modeline etki eden sürüklenme kuvvetini taşıt üzerinde herhangi bir enerji harcamadan azaltmaktır. Pasif akış kontrol yöntemi olarak tanımlanan bu yöntemin otobüs üzerinde uygulanabilir nitelikte olması ve elde edilen aerodinamik iyileşmenin oranı bu çalışmanın özgün kısmını oluşturmaktadır.

Ortalama 100 km/h hızda hareket eden bir taşıt gücünün %50-70'ini aerodinamik direnç kuvvetlerini yenmek için harcar [3]. Taşıtlarda motorca üretilen güç, hava direnci ve sistem içindeki kayıpları dengeler. Düşük hızlarda hava direnci diğer kayıplar yanında oldukça düşük mertebelindedir. Ancak hız 30-40 km/h değerine ulaşıncaya hava direnci önem kazanır. Bunun sebebi hava direncinin hızın karesiyle doğru orantılı olarak artmasıdır. Katı modeli çizilen bir F1 aracının C_D ve C_L katsayısını ANSYS CFX programında k- ϵ türbülans modeli ile tespit etmiştir. F1 aracının C_D katsayısını 0.516 ve C_L katsayısını 0.425 olarak hesaplamıştır. Bu değerler gerçek değerden çok uzak bir sonuç olduğunu bunun nedenin geometrik benzerliğin tam sağlanamaması, ağ sayısının yetersiz olduğu ve çözümleme yapan bilgisayar kapasitesinin yetersiz olduğundan kaynaklandığını ifade etmiştir. [4]. Perzon, Janson, ve Höglin (1999) 3/10 ölçekli bir çekici ve römork modelinin deneysel sonuçlarını standart k- ϵ , RNG k- ϵ , Non-Linear Eddy Viscosity ve Reynolds Stress Transport Model (RSM) türbülans modellerinin kullanıldığı STARCD ve FLUENT/UNS paket programları yardımı ile elde edilen verilerle karşılaştırmışlar, RNG k- ϵ ve Non-Linear Eddy Viscosity modelleri ile durma noktalarındaki basıncın daha doğru tayin edilebildiğini belirlemişlerdir. Verilerin doğruluğunu arttırmak için çözüm ağını arttırmak gerektiğini tespit etmişlerdir [5]. Perzon ve Davidson (2000) STARCD paket programı ile standart k- ϵ , non-lineer ikinci derece k- ϵ ve non-lineer üçüncü derece k- ϵ türbülans modellerinde transient simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Direnç kuvveti bütün modeller için hesaplanmış ve deneysel verilerden oldukça önemli miktarda sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Transient veya transient olmayan k- ϵ modellerinin direnci çok yüksek belirlediğini ifade etmişlerdir [6]. Lokhande, Sovani ve Khalighi (2003) pikap modelin aerodinamik yapısını Fluent® paket programı ile LES ve RNG k- ϵ türbülans modellerini kullanarak incelemişlerdir. Taşıta gelen akışın durma noktası olarak ön tamponun hemen

üst kısmı olduğunu tespit edilmiştir [7]. Krajnovic ve Davidson (2005) eğimli arka geometriye sahip basitleştirilmiş taşıt üzerinden akışa hareketli bir zeminin etkisini ele almıştır. Yapılan incelemede hareketli zeminin C_D katsayısını %8 C_L katsayısını %16 azalttığı tespit edilmiştir. Türbülans modeli olarak LES (Large Eddy Simulation) kullanılmıştır [8]. Apisakkul ve Kittichai (2005) dört değişik yükseklikte konumlandıkları arka spoilerin bir yarış arabasının C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k- ϵ türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Spoilerin konumlandırıldığı yükseklik arttıkça C_D katsayısında iyileşme tespit etmişlerdir [9]. Fares (2006)

Power FLOW 4.0 programında Lattice Boltzman metoduna göre Ahmed modelini referans alarak yaptığı çalışmada 40m/s hızda taşıtın arkasındaki yaklaşık 30° kritik açıyı temsilen 25° ve 35°'lik eğim açıları için çözümleme yapmış, aracın C_D ve C_L katsayılarını karşılaştırmıştır. Durgun olmayan (unsteady) akışta farklı girdap ve ayrılma davranışları analiz sonuçlarının deneysel verilerle tutarlı olduğunu ifade etmiştir [10]. Desai ve diğerleri (2008) tarafından yapılan sayısal çalışmada aracın çizim datasını Gambit programında oluşturup Fluent® programında çözümleme yapmışlardır. Aracın C_D katsayısını deneysel yöntemle 0.4, sayısal yöntemle 0.55 olarak tespit etmişlerdir. Reynolds sayısına göre sayısal ve deneysel çalışma sonuçların çok farklı olduğunu bu farkın iterasyon sayısı ve çizim datasının geometrik benzerliğinin yetersizliğinden kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir [11]. Cheli, Ripamonti, Sabbioni, ve Tomasini (2011) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalara değişik zeminlerde ve değişik rüzgar açısında etki eden kuvvet değerlerini araştırmışlardır. Araç uzunluğu arttıkça yanal momentinde arttığını tespit etmişlerdir [12]. Hu Xu-xia ve Wong (2011) yaptıkları çalışmada yeni geliştirdikleri arka spoilerin sedan otomobilin C_D ve C_L katsayılarına etkilerini Fluent® paket programında k- ϵ türbülans modeli ile hesaplamışlardır. Geliştirdikleri spoilerin C_D katsayısını %1.7 C_L katsayısını %4 iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [13]. Marinos, M. ve SpyrosG, V (2015) çalışmalarında pasif vorteks üretici kullanarak akış kopması durumunu deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Airfoil profilinde bir geometri tasarlayarak 87×10^4 Reynolds sayısında akış kopması 5° geciktirilmiş, 15° hücum açısında ise lift kuvveti artmıştır. Shim ve diğerleri (2017) Navier- Stokes denklemlerinde faydalanarak kızak şeklinde bir ön tampon ve arka tampon tasarımı yaparak sürüklenme kuvvetini azaltmayı başarmışlardır. Taşıyıcı modelleme olarak tasarladıkları bu tampon modellerinin drag katsayısına etkisinin tespitinde k- ω türbülans modeli kullanmışlardır. Refereans modele göre yaptıkları tampon tasarımı ile %3.8'e kadar sürüklenme kuvvetinde iyileşme sağlamışlardır [14]. Aktaf vd. (2014) CFD yöntemi kullanarak bir model araca eliptik, dikdörtgen ve üçgen kanatçık ekleyerek aerodinamik bakımdan iyileşme elde etmiştir. Eliptik tasarımda %11.1, dikdörtgen kanatçıkta %6.37 ve üçgen kanatçık

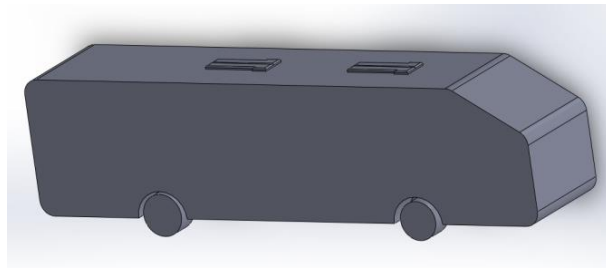
tasarımında %6.87 aerodinamik direnç katsayısında iyileşme sağlamışlardır [15]. Cui ve diğerleri (2015) bir Ahmed body modeli üzerinde sentetik hava püskürtmesi yapmanın aerodinamik direnç katsayısına etkisini CFD yöntemi ile Large Eddy Smilation türbülans modeli kullanarak araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonuçlarını deneysel yöntemlerle de doğrulamışlardır. Ahmed body modeli arkasına düzenli püskürtme yaparak sürüklenme katsayısında %3, sentetik jet püskürtmesi yaparak ise %9 iyileşme sağlamışlardır [16]. Mohamed-Kassim ve Filippone (2010)'e göre çekici römork araçlarında pasif akış parçaları ile yakıt tüketiminde % 1'den % 17 'e kadar iyileşme sağlanabilmektedir. Spoiler yapısı iyileştirilerek %9-17, römork etekleri ile %4-6, hava boşlukları kapatılarak %0-4 aerodinamik iyileşme elde edilebilmektedir [17]. Barden ve Gerova (2016) bir çekici modelinde ortalama 7.1° sapma açısı altında aerodinamik direnç katsayısı hesabını deneysel ve numerik olarak hesaplamıştır. Numerik hesaplama yöntemi olarak MATLAB Simulink programını kullanmış. Numerik analiz sonucunda aerodinamik direnç katsayısını ortalama 0.77, deneysel yöntemle 0.805 olarak hesaplamıştır [18]. Gurlek vd. (2012) bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısını deneysel olarak incelemiştir. Ortalama ve ani hızlanma vektör haritasını, girdap eğrilerini, akış çizgisi topolojisini ve diğer türbülans özelliklerini PIV (particle image velocimetry) yöntemi ile incelemiştir. Girdap oluşumunun asimetrik olduğunu, otobüsün üst tarafındaki negatif girdap hareketinin yatay, pozitif girdap hareketinin modelin kenarına doğru hareket ettiğini ifade etmişlerdir [19]. Lui ve diğerleri (2016) çalışmalarında çekici römork, pick-up, sedan otomobil araçlarının etrafındaki akış yapılarını laminar akış, türbülanslı akış, sınır tabaka akış yapılarında ve değişik rüzgâr açısı altındaki yapılarını incelemiştir. Ağırlık merkezi yükseldikçe aerodinamik momentlerin arttığını belirtmişlerdir. Yapılan diğer çalışmalarda ağırlık merkezinin tespiti yapılmadığından çalışma sonuçlarının birbirinden farklı olabildiğini ifade etmişlerdir [20]. Ji-qiang ve diğerleri (2017) bir yüksek hızlı trenin aerodinamik yapısını değişik türbülans şiddetinde deneysel olarak incelemiştir. Model tren üzerindeki basınç katsayısı değerlerini tespit etmişlerdir. 0.3-8.6 aralığında değişik türbülans şiddetleri altındaki aerodinamik direnç katsayılarını tespit etmişlerdir. Türbülans şiddeti arttıkça C_D katsayısı ve basınç katsayısı değerleri azaltmıştır. Türbülans şiddeti değişiminin model üzerindeki basınç dağılımını değiştirmediğini ifade etmişlerdir [21]. Hassan ve diğerleri (2014) bir sedan yarış aracın arka tamponunu yapısını değiştirerek aerodinamik bakımdan iyileşme elde etmişlerdir. CFD metodu ile k-epsilon türbülans modelinden faydalanarak yaptıklarını numerik analiz sonucunda model aracın C_D katsayısını 0.323 olarak tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri 5 değişik tampon düfüzörleri ile C_D katsayısını %22.13'e kadar azaltmışlardır. Minimum C_D katsayısını 0.25 olarak tespit etmişlerdir. Bunun nedeninin araç arkasında negatif basınç bölgesinin azaltmaktan

kaynakladığını ifade etmişlerdir [22]. Chillbule ve diğerleri (2014) bir çekici römork modelinin aerodinamik yapısını CDF yöntemi ile incelemiştir. Spoiler altı adet girdap tutucu ve römork arka uzantısından oluşan pasif akış kontrol parçaları ekleyerek çekici römork modelinin C_D katsayısını %21 iyileştirmişlerdir. Bu sonucun 100 km mesafede 4 litre yakıt tasarrufu oluşturacağını belirtmişlerdir [23]. Muthuvel ve diğerleri (2013) çalışmalarında dört değişik otobüs modelinin aerodinamik yapılarını numerik ve deneysel olarak incelemiştir. Otobüs modelinin ön yüzey alanını ve ön tampon yapısını konikleştirerek akış yapısını aerodinamik bakımdan iyileştirmiş ve C_D katsayısında %20.11-35 arasında iyileşme olabileceğini ifade etmişlerdir [24]. Patil ve diğerleri (2012) bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısını CFD metodu ile incelemiştir. Otobüs modelinin sürüklenme kuvvetini azaltmak için 3 model geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada base model otobüsün C_D katsayısını 0.53 olarak tespit etmişlerdir. Otobüsün ön ve arka yüzeyini modifiye ederek C_D katsayısını 0.49'a yan panel ekleyerek 0,39 'a arka spoiler ekleyerek 0.40'a düşürmeyi başarmışlardır. Böylece sırası ile %6.57, %25.82 ve %24,42 aerodinamik iyileşme sağlamışlardır [25]. Sarı (2007) Renault Kangoo marka hafif ticari araç modellenmiş, numerik yaklaşık çözüm yöntemi olan sonlu hacimler yöntemi ile Fluent® programında analiz edilerek, sanal koşullarda aracın ön formuna etkileyen hava direnci ve C_D direnç katsayıları bulunmuş, bu verilerin yakıt sarfiyatına olan etkileri araştırılmıştır [25]. Nisugi ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan, "Fundamental Study of Aerodynamic Drag Reduction for Vehicle with Feedback Flow Control" başlıklı bir çalışmada (Şekil 3c.) geri beslemeli bir akış kontrolü ile bir kara taşıtı için aerodinamik sürüklenme kuvvetinin azaltılması incelenmiştir. Sonuçta bu çalışma ile %21 lik bir güç tasarrufu sağlandığı ifade edilmiştir [26]. Minoru, Katsuji ve Tatsuo (2003) yaptıkları çalışmada trenlerin ve araçların çapraz rüzgârlar altındaki aerodinamik karakterleri sadece araçların şekline değil aynı zamanda araç alt yüzeylerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [27]. Rohatgi (2012) bir SUV aracının arka kaporta kısmının geometrik yapısını değiştirerek aerodinamik yapısını iyileştirme denemiştir. Aracın arka kaporta kısmının %26 iyileşme sağlanabileceğini ifade etmiştir [28]. Chowdhury, ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada ağır vasıtalar aerodinamik direnç katsayısının azaltacak eklemeler yapmışlardır. Ağır vasıtanın spoiler yapısını iyileştirip çekici ve römork arasında kapatmış ve tekerleklerin neden olduğu sürüklenme direncini azaltacak eklemeler yaparak ortalama %26.1 iyileştirme elde etmişlerdir. Sadece ön spoiler ile %17.6 iyileştirme olabileceğini ifade etmişlerdir [29]. Akansu ve diğerleri. (2011) pasif akış kontrol elemanı olarak kullanılan dairesel kesitli bir çubuk ile kare kesitli bir küt cisim etrafındaki akış durumunda hücum açısının girdap kopma olayına etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Akış ayrılması, yeniden tutunması ve girdap oluşum bölgesinin özellikleri ortaya konulmuştur. $L/D=2$ ve 3

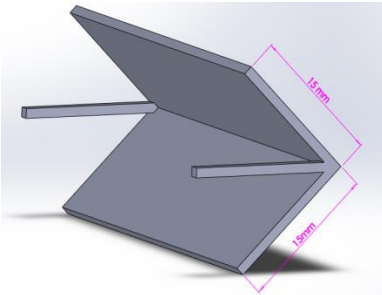
konumlarındaki $\alpha=0^\circ$ hücum açısında, sürüklenme kuvvetinde dikkate değer azalmalar elde etmişlerdir [30]. Solmaz (2010) bir otobüs modelini ANSYS 12.1 programı ile analiz etmiş ve analiz sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Otobüs modelinin aerodinamik direnç katsayısı deney sonuçlarına göre 0.65 ANSYS verilerine göre ise 0.66 olarak belirlenmiştir [31]. J. McNally ve diğerleri (2015) Çalışmalarında bir Honda Simplified Body (HSB) geometrisinde aktif akış kontrol yöntemi ile sürüklenme kuvvetinde iyileşme sağlamışlardır. Yapılan çalışmada HSB geometrisi üzerine 13 adet değişik çaplarda jet ile hava püskürtmesi yaparak akış kopmasını geciktirerek sürüklenme kuvvetine bağlı güç kaybını %3 azaltmışlardır[32].

2. MATERYAL METOD (MATERIALS AND METHOD)

Bu çalışmada aerodinamik bakımdan incelenen otobüs (base model) 1/64 ölçekli lisanslı modeldir. Otobüs modelinin çizim datası bilgisayar destekli çizim yöntemi ile oluşturulmuştur. Akış kontrol elemanı da aynı yöntemle geliştirilmiş ve otobüse montajı gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de model otobüsü Şekil 2-3'te akış kontrol elemanı çizim dataları verilmiştir.



Şekil 1. 1/64 ölçekli model otobüsün SolidWorks çizimi (SolidWorks drawing 1/64 scale model bus)



Şekil 2. Üçgen kesitli akış kontrol elemanının SolidWorks çizimi (SolidWorks drawing of a triangular section flow control part)

2.1. Benzerlik (Similarity)

Taşıt aerodinamiği ile ilgili çalışmalarında prototip ve model arasında üç farklı benzerlik şartı aranır. Bunlar geometrik, kinematik ve dinamik benzerlik şartlarıdır. Geometrik benzerlik şartını sağlamak için lisanslı model otobüs kullanılmış olup yüzey pürüzlülüğü, çok küçük parçalar ve hava akış kanallarından dolayı meydana

gelebilecek hatalar ihmal edilmiştir. Kinematik benzerlikte blokaj oranı belirleyicidir. Bu çalışmada kullanılan model aracın ön yüzey alanı 0.0019 m^2 , test bölgesi ön yüzey alanı 0.04 m^2 , blokaj oranı ise %4.75'dir. Çengel Y.A., (2008) blokaj oranının %7.5

den daha düşük olmasını önermektedir [33]. Çalışmada dinamik benzerliğin sağlanmasında ise Reynold sayısı bağımsızlığı kullanılmıştır.

2.2. Genel Denklemler (General Equations)

Fluent programı sonlu hacimler metodunu kullanarak süreklilik, momentum, enerji, türbülans için genel integral denklemlerini çözmektedir. Sonlu hacimlerin hesaplamalı akışanlar dinamiği (HAD) ile çözümlenmesinde süreklilik ve momentum denklemleri kullanılır. Uygulamada bu denklemleri analitik olarak çözmek zordur. Bu yüzden bu denklemler paket programlar kullanılarak numerik olarak çözümlenir.

2.1.1. Süreklilik denklemi (Continuity equation)

Süreklilik denklemi, bir akış içerisinde yer alan kontrol hacmindeki kütle dengesi olarak ifade edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

2.1.2. Momentum denklemi (Momentum equation)

Newton'un ikinci kanununa göre bir akışkan parçasının momentumunun değişim hızı bu akışkan parçasına etki eden kuvvetlerin toplamına eşittir. Bir akışkan parçasının birim hacminin x, y ve z yönlerindeki momentum artış hızı sırasıyla $\rho \frac{Du}{Dt}$, $\rho \frac{Dv}{Dt}$ ve $\rho \frac{Dw}{Dt}$ terimleri ile ifade edilir [34].

Momentum denkleminin x-bileşeni;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (2)$$

Momentum denkleminin y-bileşeni;

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad (3)$$

Momentum denkleminin z-bileşeni;

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{M_z} \quad (4)$$

2.1.3. Navier – Stokes denklemleri (Navier – Stokes equation)

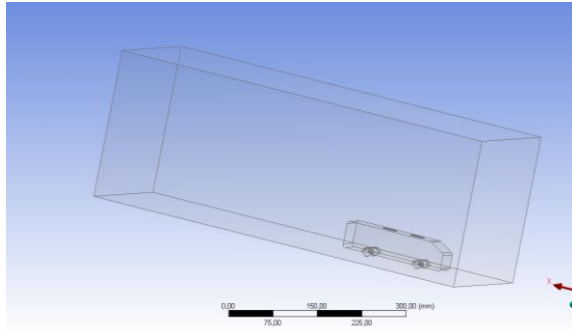
Navier – Stokes ve süreklilik denklemleri diferansiyel hareket denklemleri olarak da ifade edilir. Bu denklemleri çözümlenmesinde bazı kabuller alınarak basınç ve hızın üç bileşeni (x,y,z) hesaplanır. Navier – Stokes denklemlerinin sonlu hacimler metodunun geliştirilmesi için en kullanışlı hali;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ gradu}) + S_{M_x} \quad (5)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (6)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (7)$$

Akış analizleri Fluent programında gerçekleştirilmiştir. Model otobüs 200 mm*200 mm*1000 mm deney alanı içerisinde zemine konumlandırılmış, kalıp boşluğu oluşturulmuştur. Setup bölümünde bu denklemler çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman Fluent programı ile yapılan çözümlerde yakınsama gerçekleşmektedir. Her akışkan değişkeni için artıklar çözümdeki hatanın şiddetini belirtmektedir. Bu çalışmada yakınsama kriterleri süreklilik, x-hızı, y-hızı ve z-hızı için 1.0×10^{-5} olarak alınmıştır. Türbülans şiddeti ise %1 olarak alınmıştır. Aracın ön yüzey alanı reports-projected area bölümünde 0.0019 m^2 olarak hesaplanmıştır. Çözümler SIMPLE Least Squared Cell Based, k-ε RNG türbülans modeli standart duvar fonksiyonları kullanılarak standart initialization olarak gerçekleştirilmiştir. Çözümler Fluent® programında, Intel® Xeon® CPU E3-1270 V5 3.60 GHz işlemci ve 32 GB ram özelliklerine sahip iş istasyonu (Work Station) bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’de ara yüzü verilen bu bölümde model aracın kalıp boşluğu oluşturulmuş, çizim datası programa tanımlanmış ve meshing bölümüne aktarılmıştır.

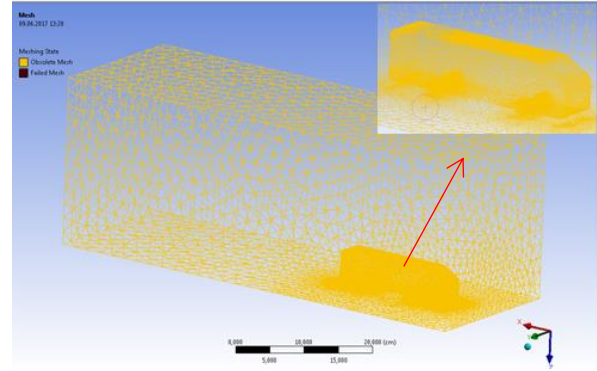


Şekil 3. Model otobüsün “design modeler” ara yüzündeki görünümü ve kalıp boşluğu (The appearance mold cavity and design modeler interface of the model bus)

Şekil 4’de ara yüzü verilen bölümde model otobüsün aerodinamik yapısını önemli derecede etkileyen bölgelerinde daha sık ağ yapısı oluşturulmuş, sınır tanımlamaları yapılmış ve ağ dosyası setup bölüme aktarılmıştır. Model otobüs için 1030562 üçgensel hacim (tetrahedrons) hücre yapısı oluşturulmuştur. Çözüm alanındaki sınırlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- ✓ Giriş: Akışkanın girdiği yüzey olup sabit hız sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Çıkış: Akışkanın çıktığı yüzey olup sabit basınç sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

- ✓ Duvar ve yol: Duvar deney alanını oluşturan dikdörtgen hacmin kenar yüzeyleri olup duvar sınır şartı kullanılmıştır. Yol aracın konumlandırıldığı taban yüzeyi olup duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.
- ✓ Otobüsün çizim datasına ait kalıp boşluğu: Analizi yapılan model araçtır. Duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Model otobüsün “meshing” ara yüzündeki görünümü (The view "meshing" interface of model bus)

Yapılan akış analizi sonuçlarında model otobüse etki eden sürüklenme kuvveti 1000 iterasyon sonucu elde edilmiştir ve C_D katsayısı tespit edilmiştir. Aerodinamik direnç katsayısı C_D Eşitlik 8’de verilmiş olup sürüklenme kuvveti F_D , yoğunluk ρ , serbest akış hızı V ve ön bakış alanı $A_{\text{ön}}$ parametrelerinin fonksiyonudur.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{\text{ön}}} \quad (8)$$

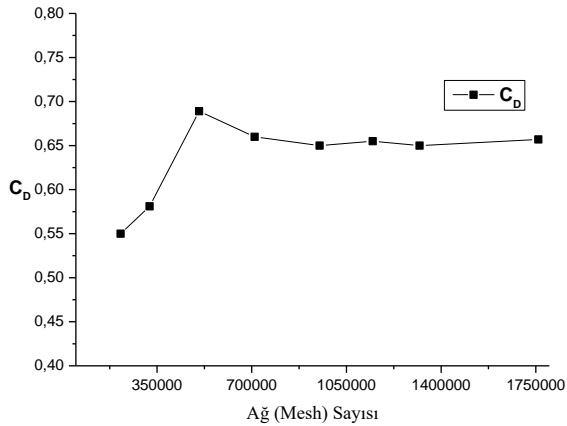
2.3. CFD Çözümlemede Ağdan Bağımsızlık (Mesh Independent In CFD Analysis)

Sonlu hacimler ile ilgili yapılan sayısal çalışmalarda düzgün ve kaliteli bir ağ oluşturmak sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu yüzden sayısal çalışmalarda ağ kalitesi aranmaktadır. Ancak analizi yapılan geometrilerin karmaşıklığı arttıkça bu ağ kalitesini elde etmek zorlaşmaktadır. Otobüs ve pasif akış kontrol çubuğunda küçük ve kavis açısı bulunan parçalar bulunmaktadır. Bu durum da istenilen düzeyde ağ kalitesi elde edilememiştir. Daha iyi ağ kalitesini elde etmek için çizim datasını daha da basitleştirmek, kavis açısı olan parçaların yerine daha düz parçalar çizmek ya da küçük parçaları kapatmak ve daha çok sayıda ağ yapısı oluşturmak gerekecektir. Bu durumda da çizim datası geometrik benzerlikten uzaklaşacak istenilen iyileşme sağlanamayacaktır. Bu çalışmada ağ kalitesi (element quality) ortalama 0.78 olmuştur. Bu değer 0.5 den yüksek olması önerilmemektedir. Sayısal çalışmaların doğrulanmasında başvurulan yöntemlerden birisi de ağdan bağımsızlık testleridir. Sayısal çözümlemede ağ

sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmektedir. Bu çalışmada Çizelge 1’de görüldüğü üzere model otobüs için 20 m/s serbest akış hızında 8 değişik üçgenel hacim (tetrahedrons) ağ yapısı için ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır. Aracın ağ yapılandırılmasında üçgenel ağların minimum ve maksimum boyutları değiştirilerek değişik çarpıklık oranında ve istenilen sayıda ağ yapısı oluşturulmuş ve aynı türbülans modellerinde çözümleme yapılmıştır.

Çizelge 1. 20 m/s hızda yapılan ağdan bağımsızlık testi sonuçları (The mesh independence test results at 20 m / s)

Reynolds Sayısı sayısı	Ağ sayısı	Kuvvet (N)	C_D
230 760	215 403	0.230	0.55
230 760	322 400	0.221	0.581
230 760	505 366	0.262	0.689
230 760	710 667	0.251	0.660
230 760	950 765	0.247	0.650
230 760	1 147 306	0.249	0.655
230 760	1 320 251	0.247	0.650
230 760	1 759 230	0.250	0.657



Şekil 5. Ağ bağımsızlığı grafiği (The mesh independence graph)

Ağdan bağımsızlık testleri sırası 8 değişik ağ sayılarında yapılmıştır. Şekil 5’de görüleceği üzere 710 667 ağ sayısında yapılan çözümlemelerden sonra C_D katsayısı yaklaşık değerlerde elde edilmiştir. Bu çalışmada ağ sayısı 1030562 olarak belirlenmiştir. Bu ağ sayıları ağdan bağımsızlığın elde edildiği bölgede olduğundan akış analizleri ağdan bağımsız olarak gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Numerik sonuçlarda ağ sayısı ve kalitesinden kaynaklanan hatalar ihmal edilmiştir.

3. AERODİNAMİK İYİLEŞTİRME SONUÇLARI (RESULTS OF AERODYNAMIC IMPROVEMENT)

4 değişik Reynolds sayısında yapılan ve 1000 iterasyon sonucunda elde edilen sürüklenme kuvvetine göre model otobüsün C_D katsayısı ortalama 0.658 olarak tespit

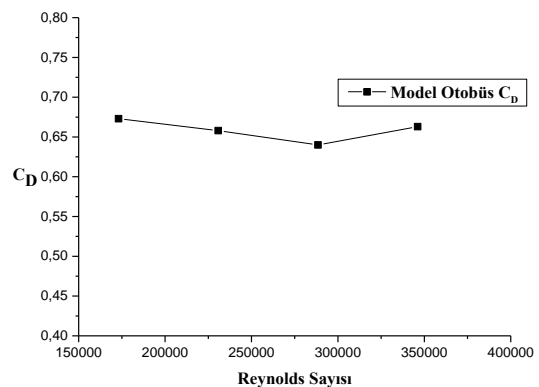
edilmiştir. Toplam sürüklenme kuvvetinin %86.42’si basınç kaynaklı, %13.38’i sürtünme kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Her hız değerinde tespit edilen basınç ve sürtünme kaynaklı dağılım Çizelge 2’de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen C_D değerleri Çizelge 3’de Reynolds sayısına göre C_D grafiği ise Şekil 6’de verilmiştir.

Çizelge 2. Model otobüsün toplam sürüklenme kuvvetinin dağılımı (Distribution of the total drag force of the model bus)

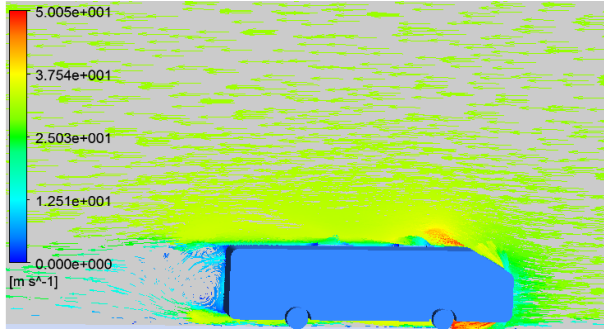
		Kuvvet (N)	Toplam	Yüzde	
Model Otobüs 15 m/s	Basınç	0.122	0.144	%84.78	
	Sürtünme	0.022		%15.08	
Model Otobüs 20 m/s	Basınç	0.214	0.249	%85.94	
	Sürtünme	0.034		%13.65	
Model Otobüs 25 m/s	Basınç	0.331	0.380	%87.11	
	Sürtünme	0.048		%12.63	
Model Otobüs 30 m/s	Basınç	0.498	0.567	%87.83	
	Sürtünme	0.069		%12.17	
				Ortalama	
				Basınç	%86.42
				Sürtünme	%13.38

Çizelge 3. Model otobüsün C_D katsayısı (C_D coefficient of model bus)

Reynolds Sayısı	Hız(m/s)	C_D
173076	15	0.673
230769	20	0.658
288461	25	0.640
346153	30	0.663
Ortalama		0.658



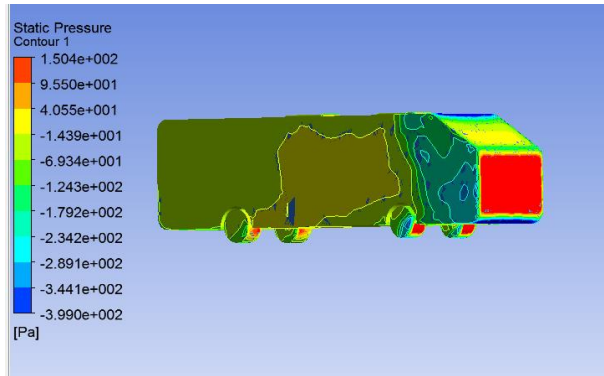
Şekil 6. Model otobüsün sürüklenme katsayısı (C_D) grafiği (The drag coefficient (C_D) graph of model bus)



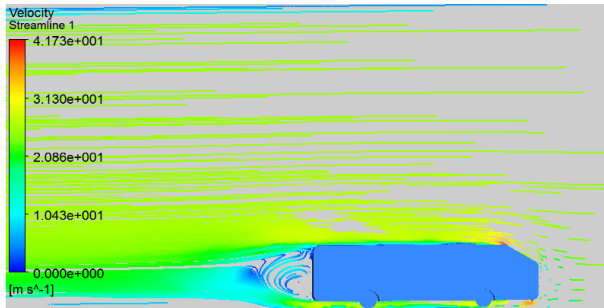
Şekil 7. 25 m/s hızda akış hızının vektörel olarak gösterilişi (Vector image of flow speed at 25 m/s)



Şekil 8a. 25 m/s hızda model otobüs üzerindeki basınç dağılımı



Şekil 8b. 25 m/s hızda model otobüs üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model bus at 25 m/s)

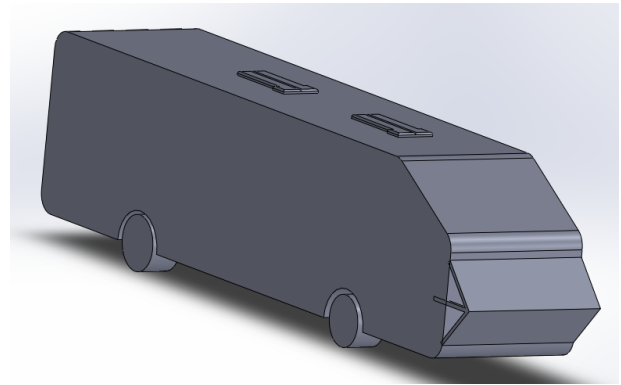


Şekil 9. 25 m/s hızda model otobüs etrafındaki akışın stramline olarak görüntüsü (The stramline image of flow around model bus at 25 m/s)

Yapılan analiz sonuçları ve Şekil 7, Şekil 8a, 8b ve Şekil 9'da akış görüntülemelerinde tespit edildiği üzere toplam sürüklenme kuvvetinin %84.60'ı basınç kaynaklıdır. Bu basınç kaynaklı direncin çok büyük kısmı ise otobüsün ön tampon ve ön cam bölgesinde oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bölgede durma basıncı oluşmaktadır. Bu çalışmada bu bölgedeki basınç kaynaklı direnci azaltmak ve akışı ön cam üzerine aktarmak amacıyla üçgen kesitli akış kontrol elemanı geliştirilmiş ve aynı deney şartlarında analizi gerçekleştirilmiştir.

3.1. Pasif Akış Kontrolü (Passive Flow Control)

Akış kontrolünde enerji harcanmasına dayalı olarak aktif akış kontrolü ve pasif akış kontrol yöntemi olmak üzere iki çeşit akış kontrol yöntemi vardır. Pasif akış kontrolünde sistem içerisine herhangi bir enerji harcamadan genel olarak aerodinamik yapısı incelenen geometrinin şeklinde yapılan değişiklikler ile gerçekleştirilen akış kontrol yöntemidir [35]. Bu çalışmada aerodinamik iyileşme elde etmek amacıyla model otobüse üçgen kesitli akış kontrol elemanı geliştirilmiş ve numerik yöntemlerle elde edilen aerodinamik iyileşme oranı belirlenmiştir. Boyutları ve şekli Şekil 2'de verilen akış kontrol elemanı model otobüse basınç kaynaklı direncin en yüksek olduğu ön tampon üzeri ile ön cam arasındaki bölgeye konumlandırılmıştır. Montaj sonucu elde edilen model 1 otobüsü Şekil 10'da verilmiştir. Akış kontrol çubuğu ile model otobüsün ön bölümüne çarpan akışın ön cam üzerine aktarılması ve ön tampon ve ön cam bölgesinde oluşan ve basınç kaynaklı direncin azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 10. Model 1 otobüsü (Model 1 bus)

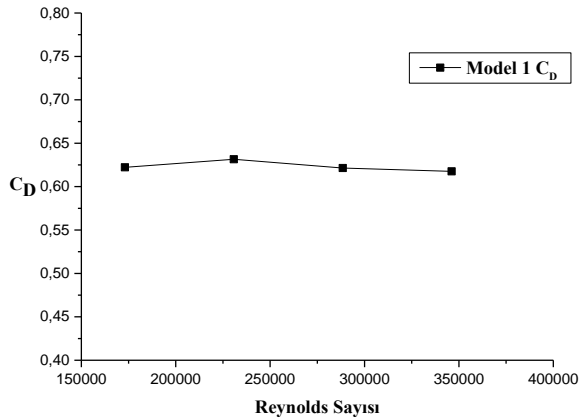
Model 1 ve model otobüsüne etki eden sürüklenme kuvveti aynı analiz şartlarında 1000 iterasyon sonucunda tespit edilmiştir. Toplam sürüklenme kuvvetinin basınç-sürtünme kaynaklı dağılımı Çizelge 4'de verilmiştir. Model 1 otobüsün C_D değerleri Çizelge 5'de Reynolds sayısına göre C_D grafiği ise Şekil 11'de verilmiştir.

Çizelge 4. Model 1 otobüsün toplam sürüklenme kuvvetinin dağılımı (Distribution of the total drag force of the model 1 bus)

		Kuvvet (N)	Toplam	Yüzde
Model 1 15ms	Basınç	0.110	0,133	%82.71
	Sürtünme	0.023		%17.29
Model 1 20ms	Basınç	0.202	0,240	%84.17
	Sürtünme	0.038		%15.83
Model 1 25ms	Basınç	0.313	0,369	%84.82
	Sürtünme	0.055		%14.91
Model 1 30ms	Basınç	0.452	0,528	%85.61
	Sürtünme	0.076		%14.39
				Ortalama
				Basınç %84.33
				Sürtünme %15.61

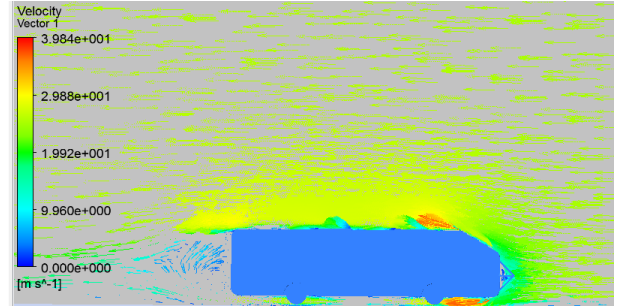
Çizelge 5. Model 1 otobüsün C_D katsayısı C_D coefficient of model 1 bus)

Reynolds Sayısı	Hız(m/s)	C_D
173076	15	0.622
230769	20	0.632
288461	25	0.621
346153	30	0.618
Ortalama		0.623

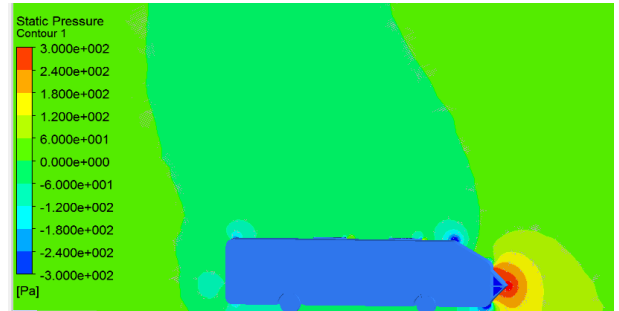


Şekil 11. Model 1 otobüsün sürüklenme katsayısı (C_D) grafiği (The drag coefficient (C_D) graph of model 1 bus)

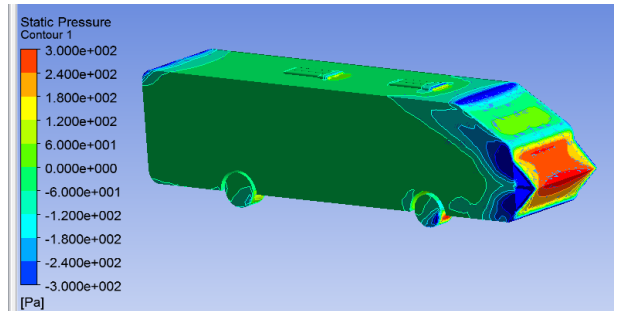
Şekil 15' de 4 değişik hızda yapılan analiz çalışmaları sonucunda model 1 aracının C_D katsayısı ortalama 0,623 model olarak hesaplanmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşme oranı %5,27 olmuştur. CFD analizi sonucunda elde edilen akış görüntülemeleri Şekil 12, 13a, 13b, 13c ve Şekil 14'te verilmiştir.



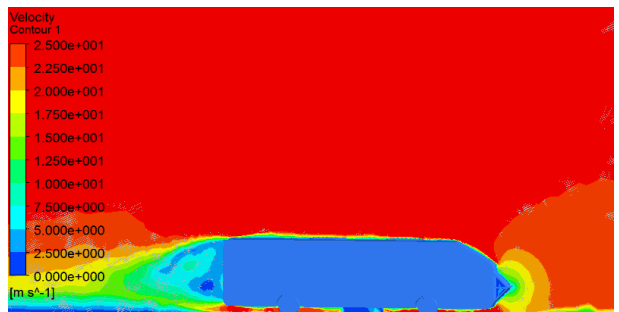
Şekil 12. 25 m/s hızda model 1 otobüsü etrafındaki akışın vektörel olarak gösterilişi (The vector image of flow at 25 m/s around the model 1 bus)



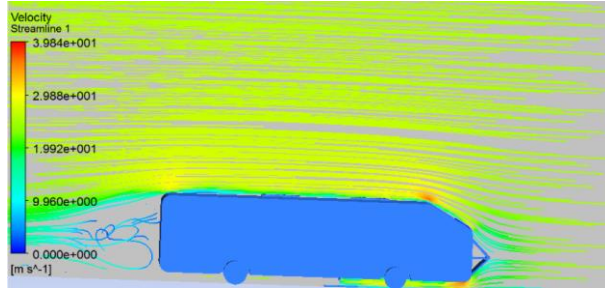
Şekil 13a. 25 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model 1 bus at 25 m / s)



Şekil 13b. 25 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model 1 bus at 25 m / s)



Şekil 13c. 25 m/s hızda model 1 üzerindeki basınç dağılımı (Pressure distribution on model 1 bus at 25 m / s)



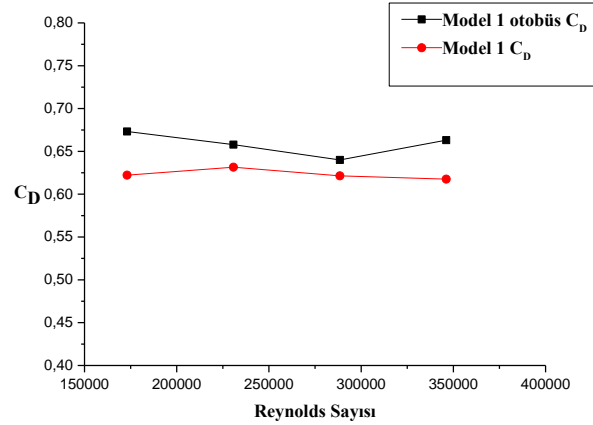
Şekil 14. 25 m/s hızda model etrafındaki akış hızının streamline olarak görüntüsü (The streamline image of flow around model bus at 25 m/s)

Bu çalışmada basınç kaynaklı aerodinamik direnci azaltmak amacı ile bir pasif akış kontrol yöntemi uygulanmış ve olumlu sonuçları elde edilmiştir. Hareket halindeki katı bir cisme, yüzeyine dik yönde basınç kuvvetleri ve yüzeyi boyunca yüzeye paralel kayma kuvvetleri etki etmekte olup bu kuvvetlerin bileşenine sürüklenme kuvveti denilmektedir. Toplam sürüklenme kuvveti basınç ve sürtünme kaynaklıdır. Taşıtlarda toplam sürüklenme kuvvetinin çok büyük bir kısmı basınca bağlıdır. Basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti cismin akışa dik olan yüzey bileşenlerine etki eden basınç dağılımı nedeniyle oluşmaktadır.

Üçgen profilli akış kontrol elemanı ile otobüsün akışa dik ön yüzey alanına gelen akış ön cam üzerinden otobüsün üst bölümüne aktarılmıştır. Böylece istenilen akış yönlendirmesi yapılabilmeye ve basınç kaynaklı direncin çok yüksek olduğu ön yüzey alanında iyileşme elde edilmiştir. Akışın vektörel ve streamline görüntülenmesinde bu durum görülmektedir. Yüksek basınç katsayısının olduğu bölge azaltılmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşmenin kaynağı da budur. Bu yöntemle yüksek basıncın meydana geldiği otobüsün ön yüzey alanında basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti azaltılmıştır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Türkiye’de halen yolcu taşımacılığında en çok otobüsler kullanılmaktadır. Otobüsler yılda uzun mesafeler kat etmektedir. Gerek firmalar gerekse yolcular açısından araçların yakıt tüketimi maliyet analizinde önemli bir konuyu teşkil etmektedir. Bu çalışmada bir otobüs modelinin mevcut aerodinamik yapısı incelenmiştir. Taşıt üzerinde enerji harcamasına gerek duyulmadan pasif akış kontrol yöntemi ile aerodinamik iyileşme elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların özetleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 15. Model otobüs ve, model 1 otobüsün aerodinamik direnç katsayılarının karşılaştırma grafiği (Comparison graph of aerodynamic drag coefficients for model bus and model 1 bus)

Model otobüsün aerodinamik direnç katsayısı ortalama 0.658 olarak, model 1 otobüsün C_D katsayısı ise ortalama 0.623 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen aerodinamik iyileşme oranı %5.37 olmuştur. Bu orandaki aerodinamik iyileşme yüksek hızlarda (96 km/h üzeri) yakıt tüketimini yaklaşık %3 azaltmaktadır [1,33].

Bayındırlı ve ark. (2015) yaptıkları numerik çalışmada bir çekici römork aracının toplam sürüklenme kuvvetinin %94.2’sinin basınç %5.8’inin sürtünme kaynaklı olduğunu tespit etmişlerdir[36]. Bu çalışmada model otobüsün toplam sürüklenme kuvvetinin %86.42’i basınç kaynaklı, %13.38’i sürtünme kaynaklıdır. Otobüs modelinde sürtünme kaynaklı direnci azaltmaya yönelik çalışmaların yapılabileceği görülmüştür.

Bu çalışmada geliştirilen ve olumlu etkisi ortaya konulan üçgen profilli akış elemanı otobüs üzerine uygulanabilir niteliktedir. Bu çalışmada analizi yapılan otobüs modelinin prototipinde kullanılan motorun hacmi 12,40 litre olup ortalama 100 kilometre mesafede 25 litre yakıt tüketmektedirler. Bu otobüs yılda 200000 km mesafe kat etmesi durumunda yılda 50000 litre yakıt tüketmektedir. Bu çalışmada elde edilen ve yaklaşık %3 yakıt tasarrufu yıllık 1500 litre daha az yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Türkiye’de yurtiçinde şehirlerarası yolcu taşımada kullanılan otobüs sayısı 52707’dir. Toplam otobüs sayısı düşünüldüğünde bu çalışmada ortaya konulan yöntemin sonuçları ülke ekonomisi ve çevresel faktörler bakımından önemlidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından FEB 2016/24-BAGEP no’lu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne ve

proje danışmanı Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wood R.M. and Bauer, S.X.S., "Simple and low cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer Trucks", *SAE Technical Paper*, 01-3377: 1-18, (2003).
- [2] <http://www.udhb.gov.tr/>, İstatistiklerle Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Raporu, (2003-2011).
- [3] Modi, V.J., Hill, S.St. and Yokomimizo, T., "Drag reduction of trucks through boundary-layer control", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 54/55: 583-594, (1995).
- [4] Demircioğlu, T.K., "Bir araç modelinin Aerodinamik Analizi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 54-98, (2007).
- [5] Perzon, S., Janson, J., and Höglin, L., "On comparisons between CFD methods and wind tunnel tests on a bluff bod", *SAE Technical Paper Series*, 01-0805, 1-11, (1999).
- [6] Perzon, S., and Davidson, L., "On transient modeling of the flow around vehicles using the Reynolds equation", *International Conference on Applied Computational Fluid Dynamics (ACFD)* Beijing China, 720-727 (2000).
- [7] Lokhande, B., Sovani, S., and Khalighi, B. "Transient simulation of the flow field around a generic pickup truck", *SAE Technical Paper Series*, 01-1313: 1- 19, (2003).
- [8] Krajnovic, S., and Davidson, L. "Influence of flow motions in wind tunnels on the aerodynamicsof road vehicles", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93: 677-696 (2005).
- [9] Apisakkul, K.T., and Kittichaikarn, C. "Numerical analysis of flow over car spoiler". *The Ninth Annual National Symposium on Computational Science and Engineering Papers ANSCSE-9*, Bangkok, Thailand (2005).
- [10] Fares, E. "Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach", *Computers & Fluids*, 35: 8-9, (2006).
- [11] Desai M., Channiwala S. A., and Nagarsheth, H. J. Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car", *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics* 4(3): 359-366 (2008).
- [12] Cheli, F., Ripamonti, E., Sabbioni, E., and Tomasini, G. "Wind Tunnel Tests on Heavy Road Vehicles: Cross Wind Induced Load", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 99: 1011-1024, (2011).
- [13] Hu, Xu-xia., and Wong, E.T.T. " A Numerical Study On Rear-spoiler Of Passenger Vehicl". *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 57: 636-641, (2011).
- [14] Marinos, M., and SpyrosG, V., "Experimental investigation of the flow past passive vortex generators on an airfoil experiencing three-dimensional separation", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 142: 130-148, (2015).
- [15] Aktaf, A., Omar Ashraf A., Asrar W., "Passive drag reduction of square back road vehicles", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 134: 30-43, (2014).
- [16] Cui, W., Zhu, H., Xia, C., Yanga, Z., "Comparison of steady blowing and synthetic jets for aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle", *Procedia Engineering*, 126: 388 - 392, (2015).
- [17] Mohamed-Kassim, Z., and Filippone, A., "Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction", *Transportation Research Part D*, 15: 275-284, (2010).
- [18] Barden, J., and Gerova, K., "An on-road investigation into the conditions experienced by a heavy goods vehicle operating within the United Kingdom", *Transportation Research Part D*, 48: 284-297, (2016).
- [19] Gurlek, C., Sahin, B., and Ozkan, G.M., "PIV studies around a bus model", *Experimental Thermal and Fluid Science* 38: 115-126, (2012).
- [20] Liu, X., Han, Y., Cai, C.S., Levitan, M., Nikitopoulos D., "Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 150: 15-21, (2016).
- [21] Ji-qiang, N., Dan, Z., Xi-feng, L., "Experimental research on the aerodynamic characteristics of a high-speed train under different turbulence conditions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80: 117-125, (2017).
- [22] Hassan S.M.R., Islam, T., Ali, M., Islam, Md. Q., "Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars", *Procedia Engineering*, 90: 308 - 313, (2014).
- [23] Chilbule, C., Upadhyay, A., Mukkamala, Y., "Analyzing the profile modification of truck-trailer to prune the aerodynamic drag and its repercussion on fuel consumption", *Procedia Engineering*, 97: 1208 - 1219, (2014).
- [24] Muthuvel, A., Murthi, M.K. Sachin, N.P, Vinay.M.K., Sakthi, S., Selvakumar, E., "Aerodynamic Exterior Body Design of Bus", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7): 2453-2457, (2013).
- [25] Patil, C.N., Shashishekar, K.S., Balasubramanian, A.K., Subbaramaiah, S.V., "Aerodynamic Study and drag coefficient optimization of passenger

- vehicle”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1(7): 1-8, (2012).
- [26] Sarı, M.F., “Hafif Ticari Taşıtlarda Taşıt Ön Formuna Etkiyen Hava Direncinin Aerodinamik Analizi ve Yakıt Sarfiyatına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 28-54, (2007).
- [27] Minoru, S., Katsuji, T., and Tatsuo, M., Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *Journal of Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 91(1-2): 209-218, (2003).
- [28] Rohatgi, U.S., “Methods of Reducing Vehicle Aerodynamic Drag”, ASME Heat Transfer Conference Puesto Rico, USA, (2012).
- [29] Chowdhury, H., Moria, H., Abdulkadir, A., Khan I., Alam, F., and Watkins, S., “A Study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck”, *Procedia Engineering*, 56: 201–205, (2013).
- [30] Akansu, Y. E., Özmert, M., Fırat E., “Akış Kontrol Çubuğu İle Kare Kesitli Bir Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünde Hücum Açısının Girdap Kopma Olayına Etkisi”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31(1): 109-120, (2011).
- [31] Solmaz, H., İcingur, Y., ”Drag Coefficient Determination Of A Bus Model Using Reynolds Number Independence”, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4(3): 146-151, (2015).
- [32] Jonathan, M., , Erik, F., Gregory, R., Rajan, K., Kunihiro, T., Farrukh, A., Yoshihiro, Y., and Kei M., “Drag reduction on a flat-back ground vehicle with active flow control”, *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*. 145: 292–303, (2015).
- [33] Çengel, Y.A., and Cimbala, J.M., “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları” Güven Bilimsel Yayınları, İzmir, 562-599, (2008).
- [34] İnce, İ.T. “GTD Model İdari Hizmet Pikap Aracının Aerodinamik Analizi. Doktora Tezi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-66, (2010).
- [35] Saygı, M.I., “Kare Model Etrafındaki Akışın Üfleme ve Emme İle Aktif Kontrolünde Hücum Açısının Ve Slot Kanal Konumunun Etkisinin Deneysel İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 88-95, (2008).
- [36] Bayındırlı, C., Akansu, Y.E., Salman, M.S., and Çolak, D., ”The Numerical Investigation of Aerodynamic Structures of Truck and Trailer Combinations”, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4 (3): 139-145, (2015).

SEMOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

A	Araç ön yüzeyi izdüşümü alanı, m ²
C _D	Sürüklenme kuvvet katsayısı
F _D	Sürüklenme kuvveti, N
U _∞	Serbest akış hızı, m/s
Re	Reynolds sayısı
ν	Kinematik viskozite, m ² /s
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics
v	Anlık hız vektörünün y bileşeni
w	Anlık hız vektörünün z bileşeni
d/dt	Toplam türev
ϑ	Türbülans hız skalası, m/s
U	Ortalama hızın x bileşeni, m/s
V	Ortalama hızın y bileşeni, m/s
W	Ortalama hızın z bileşeni, m/s
w	Yüzey, duvar indisi
Y	Yutulma
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi indisi
ε	Türbülans kinetik enerji yutulması, m ² /s ³
φ	Genel diferansiyel denklemde bir değişken
φ	Herhangi bir akış değişkeni
ψ	Herhangi bir akış değişkeninin ortalama bileşeni
λ	Viskozite sabiti
μ	Laminar viskozite, Pa.s
μ _{eff}	Efektif viskozite, Pa.s
LES	Large Eddy Simulation
RNG	Renormalization-Group
τ _{xx} , τ _{yy} , τ _{zz}	Normal gerilmeler, N
τ _{xy} , τ _{yz} , τ _{xz}	Kayma gerilmeleri, N