



## Yan rüzgar koşullarında ön kısmı düz plakalı bir otobüs modeli üzerindeki aerodinamik direncin düşürülmesi

### Aerodynamic drag reduction on a bus model with upstream flat plate under crosswind conditions

Mehmet Seyhan<sup>1</sup> , Erhan Fırat<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Munzur Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 62000, Tunceli, Türkiye

#### Öz

Akaryakıt fiyatları ve insanların çevrenin mevcut durumu üzerinde meydana getirdiği değişimler ticari taşıtların yakıt ekonomisinin iyileştirilmesine olan ilgiyi arttırmıştır. Büyük olasılıkla, bir taşıtın yakıt ekonomisini iyileştirmenin en ekonomik yolu taşıtı aerodinamik açıdan daha verimli yapmaktır. Bu çalışmada, sıfır ve sıfırdan farklı sapma açılarında ( $\beta \leq 9^\circ$ ), 1:25 ölçekli otobüs modelinin ön alt yüzeyine paralel ve modele göre daha önde olacak şekilde yerleştirilen düz plakaların aerodinamik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Kıyaslama çalışmaları, düz plakasız otobüs modelini de hesaba katarak, genişliğe-dayalı Reynolds sayısının  $Re_w = 104000 \pm 3000$  değerinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri, zaman ortalamalı sürükleme katsayısında,  $\langle C_D \rangle$ , dik bir artışın gözlemlendiği kritik bir plaka genişliğinin varlığını ortaya koymaktadır. Sıfır sapma açısında, otobüs genişliğinin ( $w$ ) onda yedisi kadar genişlikli bir plakanın otobüs modelinin  $0.16w$  daha önüne yerleştirildiği bir geometrik kurulum, plakasız otobüs modeline etkieninkinin %92.9'u kadarlık bir zaman-ortalama direnç oluşturmaktadır. Bu kurulumun, yan akış şartları altında da  $\langle C_D \rangle$  düşürmede etkin olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Direnç düşürme, Düz plaka, Otobüs, Rüzgar tüneli, Aerodinamik

#### 1 Giriş

Otobüsler ve tırlar (çekici+treyler), Avrupa Birliği (AB) sınırları içerisindeki karayolu taşımacılığı sonucunda oluşan toplam CO<sub>2</sub> miktarının %25'lik kısmından sorumlu taşıtlardır [1]. Türkiye'de, COVID-19 pandemisinin ortaya çıktığı yıl olan 2020'de bile yolcular, trafiğe kayıtlı şehiriçi ve şehirlerarası otobüsler üzerinden 8,767 milyar km yol kat etmişlerdir [2]. Yolcu ve yük taşımacılığının önemli bir kısmını temsil eden bu kara taşıtlarının yakıt sarfiyatlarını, dolayısıyla da yapmış oldukları CO<sub>2</sub> salınımını azaltmak hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir.

Türkiye'de, şehirlerarası ulaşım için tasarlanan otobüsler, ciddi artışlar gösteren akaryakıt fiyatlarına rağmen yolcu taşımacılığının önemli bir kısmını temsil etmektedirler. Ortalama yakıt tüketimleri 20-30 L/100 km

#### Abstract

Fuel costs and environmental pressures increase interest in improving fuel economy in the commercial vehicles. Presumably, the most economical way to improve a vehicle's fuel economy is to make it more aerodynamically efficient. In this work, the aerodynamic performance of flat plates placed upstream of and parallel to the front lower surface of a 1:25 coach model at zero and non-zero yaw angles ( $\beta \leq 9^\circ$ ) has been experimentally investigated. Comparative studies have been performed at a width-based Reynolds number  $Re_w = 104000 \pm 3000$ , considering the coach model without flat plate. The force measurements suggest the existence of a critical plate width at which a steep increase in time-averaged drag coefficient,  $\langle C_D \rangle$ , was observed. At zero yaw, a geometrical configuration consisting of a plate width seven tenth of the coach's width ( $w$ ) placed  $0.16w$  upstream of the coach model produces a time-averaged drag that is 92.9% that of the coach model without plate. It is seen that this configuration is also effective in reducing  $\langle C_D \rangle$  under crosswind conditions.

**Keywords:** Drag reduction, Flat plate, Coach, Wind tunnel, Aerodynamics

bandında olan bu otobüslerin yakıt sarfiyatını daha da düşürebilmek adına atılacak herhangi bir girişim oldukça elzemdir. Bu girişimlerden bir tanesi, bu taşıtları aerodinamik açıdan daha verimli hale getirmekle ilgili olabilir çünkü şehirlerarası yolculuk süresinin çoğunda 70 - 110 km/sa aralığındaki hızlarla hareket eden bu taşıtlara etkien hava direncinin, taşıtın sarf ettiği toplam yakıt içerisindeki payı azımsanamayacak büyüklüktedir.

Yolcu taşımacılığında önemli iki parametre olan yolcu ve bagaj kapasitesi göz önüne alındığında taşıtın mevcut dış tasarımında köklü bir değişikliğe gitmek çok sağlıklı bir yöntem olarak gözükmemektedir. Bu sebeple, çoğu araştırmacı, taşıta etkien toplam dirence en çok katkı sağlayan ön ve arka yüzeyler etrafındaki akış yapısını değiştirmeye odaklanmışlardır. Bu durum, otobüs dışında kalan diğer küt cisimler için de böyledir [3-5]. Otobüsle

\* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: efiat@munzur.edu.tr (E. Fırat)

Geliş / Received: 06.07.2022 Kabul / Accepted: 22.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1141511

alakalı çalışmalara bakacak olursak, Bayındırlı ve Çelik [6], 1:64 ölçekli ve tekerlekleri bulunan bir otobüs modelinin ön cam açısının, modele etkileyen aerodinamik direnç üzerindeki etkilerini k-ε türbülans modelini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Üç-boyutlu otobüs modelleri etrafında daimi olmayan bir akış yapısı olsa da, büyük ihtimalle zamandan tasarruf edebilmek adına, çalışmalarını daimi şartlar için gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmaları sonucunda, ön cam açısının 0°'den 45°'ye artırılması durumunda aerodinamik direnç katsayısında ( $C_D$ ) genellikle bir düşüşün sağlandığını verilen tüm uzunluğa-dayalı Reynolds sayıları için göstermişlerdir. Bhave ve Taherian [7] dört farklı ön kısım tasarımına sahip tekerlekli otobüs modellerine etkileyen direnci sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda, ön yüzeye ait keskin kenarların yuvarlatılmasının ve ön yüzeylerin düzden daha çok, ileriye doğru şişme yapacak şekilde tasarlanmasının otobüs direncini düşürmeye katkı sağladığını göstermişlerdir. Farklı hızlar için (60, 80 ve 100 km/sa) sayısal olarak test edilen otobüs modellerinden en iyi iyileşmeyi gösteren modelin baz modele göre direnç katsayısında %56 civarı bir düşüş sağladığı belirtilmiştir. Bu düşüşün yüksek çıkmasının sebebi baz modelin dikdörtgenler prizması şeklinde tasarlanmış olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışmalarında kullandıkları türbülans modeli ve benzetimlerin daimi şartlar altında mı yoksa daimi olmayan şartlar altında mı gerçekleştirildiği bilgisi ise çalışmalarında belirtilmemiştir. Schmidt vd. [8], oldukça basitleştirilmiş tekerleksiz bir tır modeli arka kısmına hem de arka üst yüzeyden açılan deliklerden gönderilen salınlı jetler yerleştirerek modele etkileyen aerodinamik direnci düşürmeye çalışmışlardır. Bu basit model otobüsü de andırdığından burada atıf yapılmıştır. Deneysel çalışmalarında parametre olarak, kanatçık yerleştirme açısını, kanatçık uzunluğunu, jet momentum katsayısını ve komşu jetler arası açıklık mesafesini kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda, jetlerin aktif olmadığı durumda, yalnızca içe eğimli kanatçıkların açısının 10° olduğu durum için direnç katsayısında baz modele kıyasla %20 düşüş sağlanabildiği belirtilmiştir. Hem jetlerin aktif olduğu hem de içe eğimli kanatçıkların açısının 20° olduğu durum için direnç katsayısında baz modele kıyasla %7'lik bir düşüş sağlanabildiği belirtilmiştir. Sucipto ve Widodo [9] tasarladıkları tekerleksiz otobüs modelinin arka alt kısmında yer alan difüzör bölgesine kanatçıklar yardımıyla çeşitli sayılarda (2, 3 ve 4) oluklar oluşturmuşlar ve oluk sayısının otobüs aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının  $2.19 \times 10^6$  değerinde ve k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmaları sonucunda, test edilen oluk sayılarının direnç katsayısı bakımından aynı ve %0.5 civarı bir düşüş sağladığını belirtmişlerdir. Shao vd. [10] ise tasarladıkları tekerlekli otobüs modelinin arka alt ve üst kenarlarının içerisine dönen silindireler yerleştirmişler ve bu aktif akış kontrol yönteminin aerodinamik performansı iyileştirebilme potansiyelini sayısal olarak test etmişlerdir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının  $1.6 \times 10^6$  değerinde ve k-ε türbülans

modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalarında, üst ve alt silindirlerin, sırasıyla, 293 rad/s ve -1241 rad/s'lik hızlarla döndürülmesi durumunda, silindirlerin dönme yapmadıkları otobüs modeline göre direnç katsayısının %25 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Direnç kuvvetini düşürerek elde edilen kazanım gücünü silindirleri verilen hızlarda döndürebilmek için gerekli güce kıyaslayarak önerdikleri aktif akış kontrol sisteminin verimliliğini çalışmaları içerisinde sunmadıkları için, önerilen sistemin ne derece faydalı olacağı bilinmemektedir. Bayındırlı vd. [11] geri görüş aynaları ve havalandırma/iklimlendirme ünitesi gibi detayları da içeren tekerlekli bir otobüs modeline etkileyen aerodinamik direnci düşürmek adına model arka üst kısmına farklı spoiler türü parçalar yerleştirmişlerdir. Çalışmalarını, hem deneysel hem de sayısal olarak uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının  $3.8 \times 10^5 - 7.9 \times 10^5$  aralığında gerçekleştirmişlerdir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için ve k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Üç numaralı kanal tipi olan spoilerlerin kullanılması durumunda  $Re=7.9 \times 10^5$  için direnç katsayısında spoilerless otobüs modeline nazaran %25'lik bir düşüş sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Silindir, kare gibi basit bir küt cisme etkileyen direnç kuvvetinin, onun ön kısmına yerleştirilen ve boyut olarak ondan daha küçük olan bir ön parça ile düşürülebildiği birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir [12-15]. Bu tekniğin otobüslere de uygulanması düşüncesi, pratikte karşılaşılan bir probleme çözüm üretilebilmesi anlamını taşıdığından oldukça önemlidir. Bu düşünce bazı araştırmacılar tarafından test edilmiştir. Mesela, Bayındırlı [16], 1:33 ölçekli ve tekerlek, geri görüş aynaları ve havalandırma/iklimlendirme ünitesi gibi detayları da içeren bir otobüs modeline etkileyen aerodinamik direnci düşürmek adına model ön kısmına yarım daire şekilli bir parça yerleştirmiştir. Deneysel çalışmada, otobüs modeli ile ön parça arasındaki boyutsuz mesafe (0.10, 0.15 ve 0.20) ve ön kısma yerleştirilen yarım daire şekilli parçanın çapı (10, 20 ve 30 mm) temel parametrelerdir. En yüksek uzunluğa-dayalı Reynolds sayısı olan  $7.9 \times 10^5$  değerinde 30 mm çaplı ön parçanın 0.15'lik boyutsuz mesafeye yerleştirilmesi sonucu zaman-ortalama direnç katsayısında, ön parça bulunmayan otobüs modeline nazaran %11 civarı düşüş sağlanabildiği gösterilmiştir. Bayındırlı vd. [17] tarafından gerçekleştirilen benzer bir diğer çalışmada ise 1:64 ölçekli ve tekerlek ile havalandırma/iklimlendirme ünitesi gibi detayları da içeren bir otobüs modeline etkileyen aerodinamik direnci düşürmek adına model ön kısmına ok ucu şekline sahip plaka yerleştirmiştir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının  $1.73 \times 10^5 - 3,46 \times 10^5$  aralığı için ve k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İlgili parçanın kullanılması durumunda  $Re=3,46 \times 10^5$  için direnç katsayısında ön parçasız otobüs modeline nazaran %6.8'lik bir düşüş sağlanabileceğini göstermişlerdir. Seval [18] ise iki farklı ön tasarıma sahip otobüs modeline etkileyen direnç katsayılarını ön kısma yerleştirilen plakalarla düşürmeye çalışmıştır. O çalışmada kullanılan otobüs modellerinden bir tanesi mevcut çalışmada kullanılan ile aynıdır. Deneysel çalışma uzunluğa-

dayalı Reynolds sayısının  $1.2 \times 10^5 - 2.0 \times 10^5$  aralığı için gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, Reynolds sayısının 200000 olduğu ve boyutsuz uzunluğu 0.7 olan plakanın 0.1'lik bir boyutsuz boşlukla otobüs ön kısmına yerleştirildiği durumda, sırasıyla, Model-1 ve Model-2 kodlu otobüslerin direnç katsayılarının referans modelinkine kıyasla %15.9 ve %1.1 daha düşük olduğunu bildirmiştir. Mevcut çalışma da bu paragrafta atıf yapılan çalışmalar gibi otobüs direncini düşürmek için bir ön parçadan faydalanma ana fikrini taşımaktadır.

Tahmin edilebileceği üzere kara taşıtları durağan bir ortam içerisinde hareket etmemektedirler. Otobüs ile ilgili yapılan yukarıdaki çalışmaların çoğunda ise rüzgarın, otobüsün hareket ekseninden farklı bir eksende gelmesi durumunda önerilen sistemlerin aerodinamik etkinliklerini koruyup koruyamadıkları ortaya koyulmamıştır. Bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan ilk güdü budur. Diğer bir güdü ise, otobüs ön kısmı ile ilgili ciddi direnç düşürme potansiyeli taşıyan pasif akış kontrol parçalarının yeterinden az sayıda parametre değeri için incelenmiş olmasıdır. Bu çalışmayı diğerlerinden ayıran temel bileşenler bunlardır. Bu deneysel çalışmada,  $45^\circ$  ön cam açısına sahip ve 1:25 ölçekli bir otobüs modeline etkiyen direnç ve yan kuvvet değerleri 4 farklı plaka uzunluğu, 21 farklı plaka-otobüs arası boyutsuz boşluk değeri ( $g/w$ ) ve 9 adet sapma açısı ( $\beta$ ) için test edilmiştir. Çalışmada test edilen parça ön kısma yerleştirildiği için sürücünün direkt görüş alanında kısıtlama yaratsa da sürücü koltuğunun konumunun değiştirilmesi durumunda bu problemin aşılabileceği düşünülmektedir. Diğer yandan, bu parçanın, sadece yüksek hızlara çıkıldığında aktif hale geçen bir sistem olarak (aktif akış kontrol sistemi) tasarlanması da üreticilere önereceğimiz diğer bir husustur.

## 2 Materyal ve metot

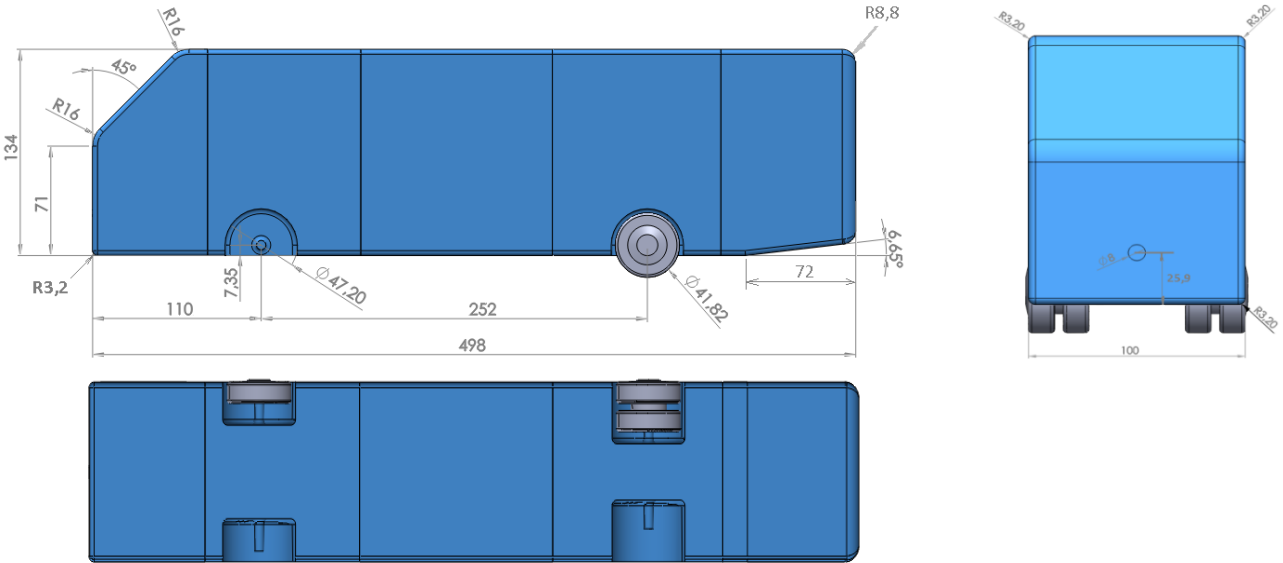
### 2.1 Otobüs modeli ve ön plakalar

Otobüs modeli, günümüz şehirlerarası ticari otobüslerinin (coach) boyutlarından faydalanılarak tasarlanmıştır. Otobüs modeli, plakalar ve plakaları tutan

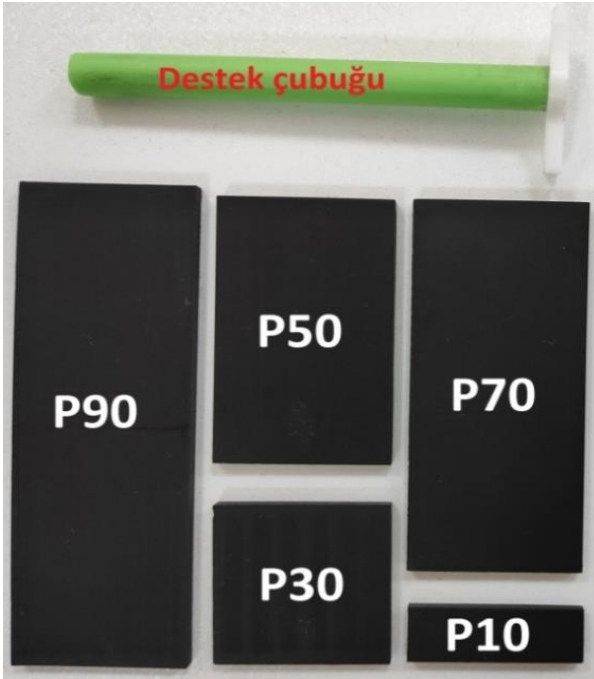
destek çubuğu FDM (Fused Deposition Modelling) teknolojisiyle çalışan bir üç-boyutlu yazıcıda basılmıştır (TEVO 3D Electronic Technology Co.,Ltd., Tornado). Otobüs modeli, çok parçalı olarak basıldıktan sonra yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Basılan tüm parçaların dış yüzeylerine, baskı esnasında oluşan katman pürüzlülüğünü gidermek adına hem polyester macun uygulanmış hem de zımparalama yapılmıştır. İşlemler, parçaların yüzey düzlemselliğini bozmadan uygulanmışlardır. Neredeyse pürüzsüz hale getirilen yüzeyler, yüzey akış görselleştirme uygulaması için, mat siyah renge boyanmıştır.

Otobüsün 1:25 ölçekli halinin bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak gerçekleştirilen çizimi Şekil 1 içerisinde sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere otobüsün tüm kenarları belirli değerlerle yuvarlatılmıştır, arka alt kısmı belirli bir açıyla yerleştirilmiş difüzör kısmına sahiptir, ön tarafında tekli arka tarafında ikili tekerlekler bulunmaktadır ve ön yüzeyinin üst kısmı  $45^\circ$ lik içe doğru bir eğime sahiptir. Plakaları, otobüs ön kısmında belirli bir mesafede ve sabit tutabilmek adına ön yüzeyde, otobüs tabanından 25.9 mm mesafede, yanlara eşit mesafede ve 8 mm çapta açılan delik de yine şekil içerisinde görülmektedir. Model otobüsün uzunluğu  $l=498$  mm, genişliği  $w=100$  mm ve yoldan olan yüksekliği ise 147.56 mm'dir.

Destek çubuğu, destek çubuğunun ön kısmına yerleştirilen plaka sabitleme parçası ve üç-boyutlu yazıcıda basımı yapılan 5 adet düz plakaya ait görsel Şekil 2 içerisinde sunulmuştur. Tüm plakaların kalınlıkları 3 mm yükseklikleri ise 30 mm'dir. Genişlikleri ise sırasıyla 10 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm ve 90 mm'dir. Bu sebeple plakaların kodları genişliklerine göre verilmiştir. Örneğin, P50 kodu boyutu 50 mm  $\times$  30 mm  $\times$  3 mm olan plakayı temsil etmektedir. Yapılan ön testler sonucunda P10'un otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnci düşürmede yeterli etkinliği sağlayamadığı görüldüğünden testlerden çıkarılmıştır. Plakalar, ağırlık merkezleri destek çubuğunun eksenine ile çakışacak şekilde ve çift taraflı ince bant yardımıyla destek çubuğuna sabitlenmişlerdir.



Şekil 1. Otobüs modelinin ön, yan ve alt görünüşlerine ait görseller. Tüm uzunluklar mm cinsindedir.



Şekil 2. Plakalar ve destek çubuğu

## 2.2 Rüzgar tüneli olanakları

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü içerisinde yer alan 570 mm × 570 mm test bölgesi en-kesit alanına sahip açık çevrim rüzgar tüneli içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tünel daralma konisinin daralma oranı 6,3:1'dir. Tünel test bölgesi içerisindeki serbest akım hızı  $U_\infty=8\pm0,2$  m/s iken serbest akım türbülans şiddeti %0,5,  $U_\infty=22\pm0,6$  m/s iken serbest akım türbülans şiddeti %0,9 olmakla birlikte aralıktaki değişim neredeyse doğrusaldır. Testler tünel içi serbest akım sıcaklığının  $22.5\pm1$  °C ve yerel atmosfer basıncının  $101\pm1$  kPa olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Tünel içi serbest akım hızı değeri Pitot-statik tüplü mikromanometre ile ölçülmüştür (PCE Inst., PCE PFM2). Deneyler, plakasız model için, genişliğe-dayalı Reynolds sayısının  $Re_w=52000\pm2000 - 143000\pm4000$  aralığında, uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının  $Re_l=25900\pm8000 - 710000\pm20000$  aralığında gerçekleştirilmiştir. Genişliğe-dayalı Reynolds sayısı şu formülle hesaplanmıştır.

$$Re_w = \frac{\rho \cdot \langle U_\infty \rangle \cdot w}{\mu} \quad (1)$$

Burada yer alan  $\rho$  simgesi  $\text{kg/m}^3$  cinsinden hava yoğunluğunu,  $\mu$  simgesi  $\text{kg/m-s}$  cinsinden hava viskozitesini ve  $\langle \dots \rangle$  operatörü ise zaman-ortalamasını ifade etmektedir. Plakalı modellere ait kuvvet ölçümleri  $Re_w=104000\pm3000$  değerinde gerçekleştirilmiştir.

Model, hız ölçümleri esnasında tünel içerisine yerleştirilmiştir. Modelin tekerlekleri ile sınır tabaka cam plakası arasındaki mesafe 2 mm'den düşük olacak ve plaka yüzeyine temas etmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu mesafe, tünel çalışır konuma geçtiğinde dahi tekerleklerin

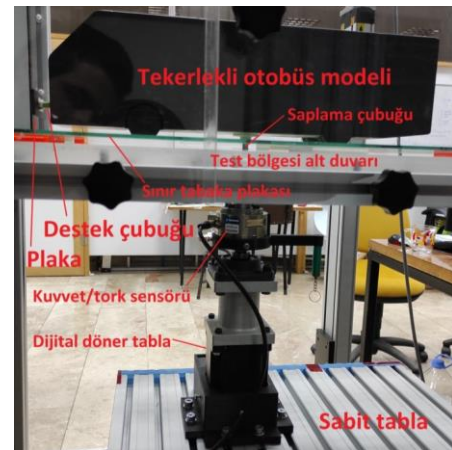
yüzeye temas etmesini engellemekte ve sağlıklı kuvvet ölçümleri almaya olanak sunmaktadır. Çalışmada iki adet aerodinamik kuvvetin boyutsuzlaştırılmış halleri olan direnç ve yan katsayısının zaman-ortalama değerleri, sırasıyla, aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$\langle C_D \rangle = \frac{2 \cdot \langle F_D \rangle}{\rho \cdot \langle U_\infty \rangle^2 \cdot A_F} \quad (2)$$

$$\langle C_S \rangle = \frac{2 \cdot \langle F_S \rangle}{\rho \cdot \langle U_\infty \rangle^2 \cdot A_F} \quad (3)$$

Burada,  $F_D$  simgesi N cinsinden direnç kuvvetini,  $F_S$  simgesi N cinsinden yan kuvveti,  $A_F$  simgesi ise  $\text{m}^2$  cinsinden otobüsün ön görünüş alanını temsil etmektedir. Otobüs modelinin alt kısmında tam otobüsün orta noktasından ve yüzey normaline çakışık şekilde bir delik açılmıştır. Daha sonra açılan bu deliğe saplama çubuğu yerleştirilmiştir (Şekil 3). Otobüse rijit şekilde bağlantılı hale getirilen saplama çubuğunun açıkta kalan ucu ise aerodinamik kuvvet ölçümünde kullanılan kuvvet/tork sensörüne yerleştirilmiştir (Schunk, FTD-Gamma SI-32-2.5). Bu sensörün alt kısmında laboratuvar personeli tarafından tasarlanmış ve imal edilmiş olan bilgisayar kontrollü döner tabla yer almaktadır. En altta ise tüm sisteme zemin olan sabit tabla yer almaktadır.

Plaka destek çubuğu otobüs modeline sıkı geçme ile geçmektedir. Otobüs ön kısmına yerleştirilen plaka ile otobüs ön yüzeyi arasındaki boyutsuz boşluk ( $g/w$ ) 0.1 ile 0.5 arasında 0.02'lik adımlarla değişecek şekilde çelik cetvelle ayarlanmıştır (Şekil 4). Cep tipi hassas terazi de plaka üst yüzeyinin tabanı temsil eden sınır tabaka plakasına paralel olmasını sağlamak için kullanılmıştır. Otobüs modelinin uzunluğu boyunca olan eksenin serbest akım hızı doğrultusundan olan sapmasını temsil eden sapma açısı için müsaade edilebilir değer aralığı  $\beta=\pm 9^\circ$  olduğundan, ölçümler bu aralıkta ve  $1^\circ$ 'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir [19]. Sapma açısız durumda otobüs modeli blokaj oranı %5 değerinden düşük olduğu için elde edilen kuvvet verilerine herhangi bir blokaj düzeltmesi uygulanmamıştır [19].



Şekil 3. Plakalı otobüsün tünel test bölgesi içerisinde kuvvet ölçümüne hazır hali



Şekil 4. Ön kısmına belirli bir boşlukla (g) plaka yerleştirilmiş otobüs modeli

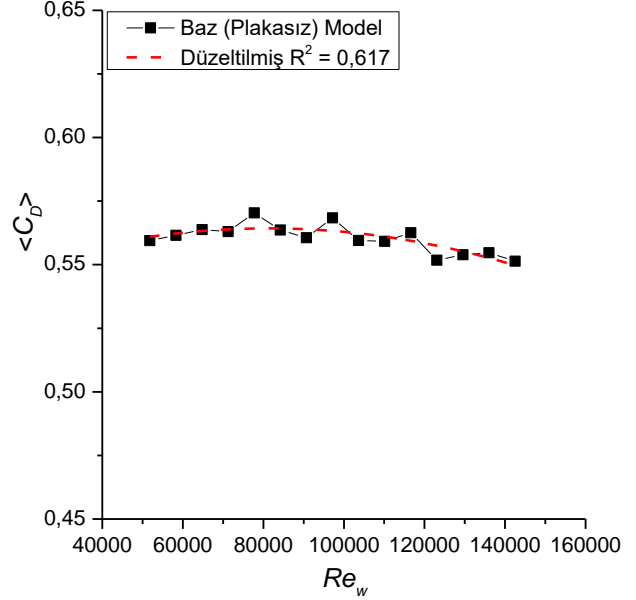
Her bir serbest akım hız ölçümünde 2 Hz ile 100 s boyunca veri alınmış ve ortalama değeri belirleyebilmek adına toplam 200 veri kullanılmıştır. Her bir direnç ve yan kuvvet ölçümünde ise 2000 Hz ile 30 s boyunca veri alınmış ve ortalama değeri belirleyebilmek adına toplam 60000 veri kullanılmıştır. Genişliğe-dayalı Reynolds sayısı için belirsizlik değeri  $\pm\%3$ , boyutsuz boşluk için belirsizlik değeri  $\pm\%1$ , direnç ve yan katsayıları için belirsizlik değeri  $\pm\%4$  ve sapma açısı için belirsizlik değeri  $\pm 0.3^\circ$  olarak hesaplanmıştır.

Zaman-ortalama direnç düşürme etkinliği en yüksek olan plaka için yüzey-yağ akış görselleştirme tekniği kullanılarak bu etkinliği nasıl sağladığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu sebeple, 1:5:7 oranında oleik asit, titanyum dioksit ve gaz yağı karışımı ile elde edilen nihai karışım model ön yüzüne uygulanmıştır. Bu karışım oranı, Seyhan ve Sarioğlu [20] tarafından yapılan çalışmadaki yüz yağ karışımı hazırlama oranıyla benzer olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu karışım içerisinde kullanılan oleik asit titanyum dioksitin gaz yağı içerisinde topaklanmasını önlemek için kullanılmıştır. Yüzey-yağ görselleştirme işlemi plakasız model için de yapılmış ve oluşan duvar akım çizgileri kıyaslanmıştır.

Otobüs modeli yan aynalar, klima ünitesi, taban ayrıntıları ve çamurluklar gibi bazı ufak detayların dışında prototipe geometrik olarak benzemektedir. Bununla birlikte eldeki rüzgar tüneli, model ile prototipin Reynolds sayısını eşleştirmeye olanak vermemektedir. Bu da kinematik benzerliğin sağlanamadığı anlamına gelmektedir. Aerodinamik direnç katsayısı ile genişliğe-dayalı Reynolds sayısı arasındaki ilişkiye bakıldığında (Şekil 5) Reynolds sayısı bağımsızlığının ve/veya dinamik benzerliğin de elde edilemediği görülmüştür. Tüm bunlar, çalışmanın, tam olmayan benzerlik durumunda gerçekleştirildiğini göstermektedir. Bu da, mevcut model üzerinde test edilen plakaların aerodinamik açıdan etkinlikleri ile prototip üzerinde test edilmesi planlanan plakaların aerodinamik açıdan etkinliklerinin birebir aynı değerde olmayacağını bizlere açıklamaktadır.

### 3 Bulgular ve tartışma

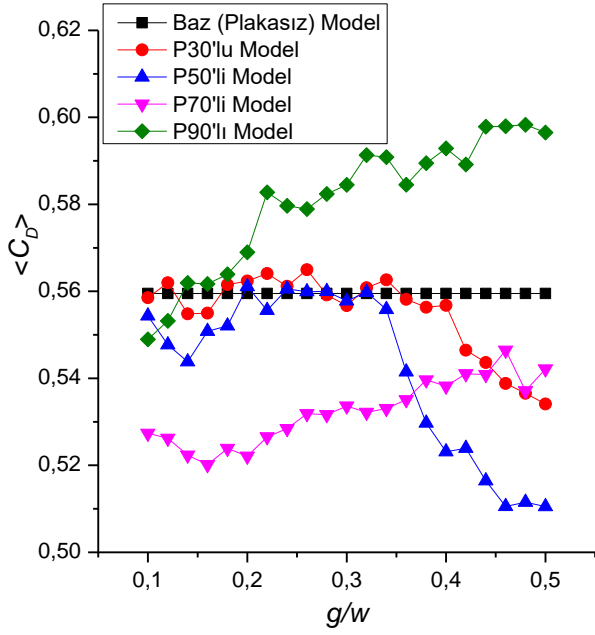
Şekil 5 içerisinde baz (plakasız) modele etkileyen zaman-ortalama direnç katsayısının,  $\langle C_D \rangle$  genişliğe-dayalı Reynolds sayısı ( $Re_w$ ) ile değişimi verilmiştir.



Şekil 5. Plakasız modelin zaman-ortalama direnç katsayısının genişliğe-dayalı Reynolds sayısı ile değişimi. Veri noktalarına en küçük kareler yöntemiyle uydurulan 2. dereceden polinom da grafik içerisinde verilmiştir

Otobüs modeline plaka takılı olmadığı durumda, model ön yüzünde yer alan delik ince, dairesel şekilli bir bant ile kapatılmıştır. Şekil,  $Re_w \cong 80000$  değerinden başlamak üzere baz modelin  $\langle C_D \rangle$  değerinin artan  $Re_w$  ile birlikte hafifçe azaldığını göstermektedir. Bu durum, model yüzeyinde gelişen sınır tabaka kalınlığı ile ilişkilendirilmiştir [21]. Tünel hız ve boyut kapasitesinin yetersiz olmasında dolayı Reynolds sayısından bağımsızlık sağlanamadığı için bu tarz bir azalış yaklaşık  $Re_w \cong 1000000$  değerine kadar beklenmektedir. Bu sebeple geriye kalan testlerin hepsi  $Re_w = 104000 \pm 3000$  değerinde gerçekleştirilecektir. Bu  $Re_w$  değerinde baz modele ait zaman-ortalama direnç katsayısının değeri  $\langle C_D \rangle = 0.56$ 'dır.

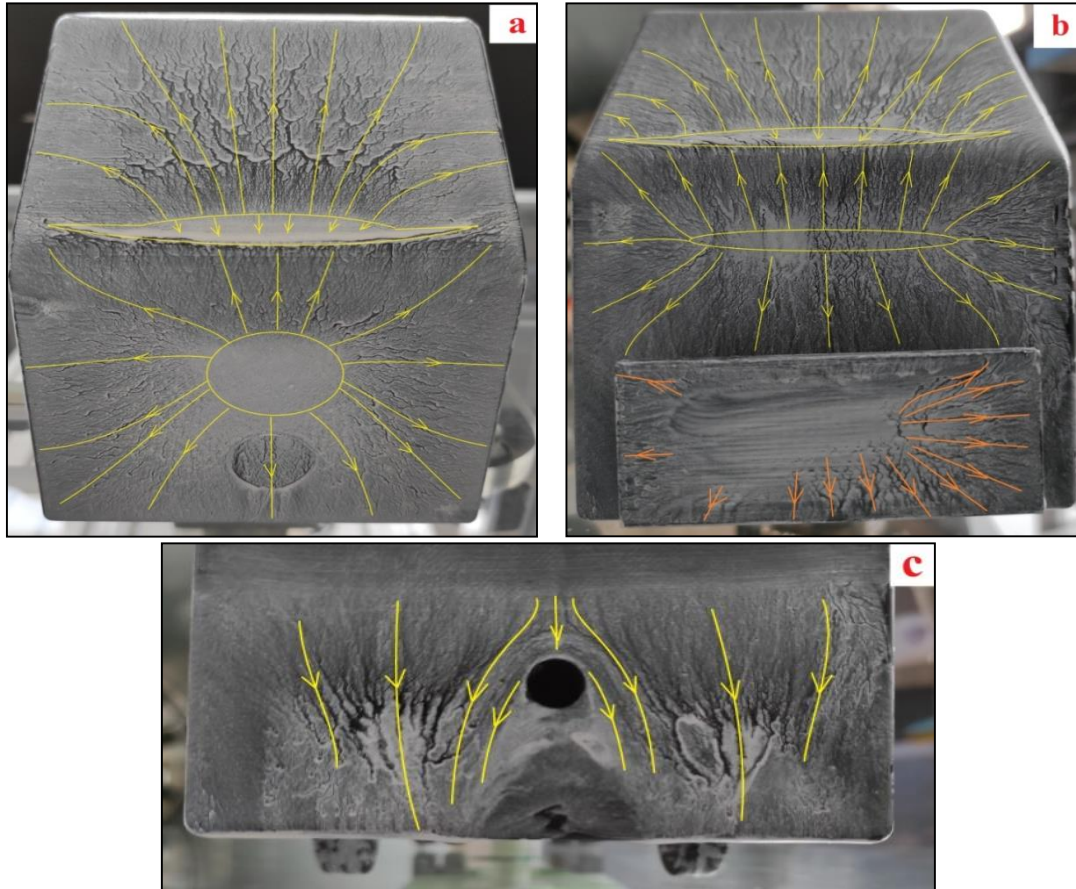
Şekil 6 içerisinde farklı genişliğe sahip plakaların otobüs modelinin sapma açısız durumdaki zaman-ortalama direnç katsayısı üzerindeki etkileri farklı boyutsuz boşluk değerleri için sunulmuştur. P30'lu otobüs modelinin  $\langle C_D \rangle$  değeri  $g/w = 0.4$  boyutsuz boşluk değerine kadar baz modelinkine çok yakındır. Bu boyutsuz boşluktan sonra artan  $g/w$  ile birlikte azalmaya başlamıştır. Bu azalış, muhtemelen bu boyutsuz boşluk değerinden sonra plakadan dökülmeye başlayan çevrilerin model yüzeyinde gelişen sınır tabakayı daha erkenden türbülanslıya geçirmesine ve model ön yüzünde bir miktar basınç düşüşü oluşturmasına dayandırılmıştır [14, 15, 22]. P30'lu otobüs modelinin minimum  $\langle C_D \rangle$  değeri test edilen en büyük boşluk değeri olan  $g/w = 0.5$ 'te 0.534 olarak elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Sapma açısız durumda, farklı genişlikli plakalara sahip otobüs modeline etkiyen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının boyutsuz boşluk ile değişimleri. Plakasız model verisi kıyaslama amaçlı verilmiştir.  $Re_w=104000\pm 3000$

P50'li otobüs modelinin  $\langle C_D \rangle$  değeri  $g/w=0.14$  ve  $0.46$  değerlerinde iki adet minimum görmüştür. İlk minimum değer  $\langle C_D \rangle=0.544$  ikincisi ise  $\langle C_D \rangle=0.511$ 'dir. İkinci minimum, tüm testler içerisinde baz modele kıyasla elde edilen en düşük  $\langle C_D \rangle$ 'yi temsil etmektedir ve ona da, P30'lu modeldeki düşüğe sebep olan aynı fiziksel olayın sebep olduğu düşünülmektedir. Aerodinamik açıdan elde edilen bu düşüş çok kıymetli olsa da pratiklik açısından bu denli uzun bir mesafeye plaka yerleştirmek, mühendislik tasarımı açısından oldukça zorlayıcıdır ve sürücünün direkt görüş alanının daha da kısıtlanması gibi sıkıntılar doğurmaktadır. P50'li otobüs modelinin  $\langle C_D \rangle$  değerinde  $g/w<0.2$ 'de görülen ilk düşüş ise muhtemelen plakadan çevri dökülmesinin olmadığı durumda gerçekleşmiştir. Bu durumda, plaka, otobüs ön yüzünde bir kalkan etkisi (shielding effect) yaratmakta ve art izinde kalan otobüs yüzeyinde basınç düşüşüne sebep olmaktadır [14-15].

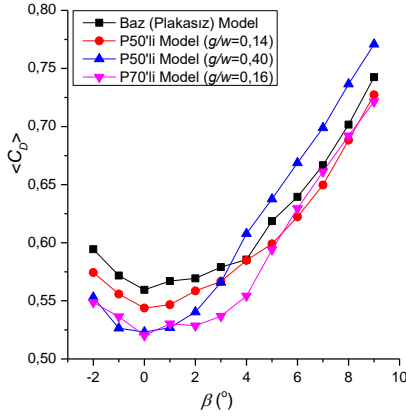
P70'li otobüs modelinin  $\langle C_D \rangle$  değeri test edilen tüm  $g/w$  değerleri için baz modelinkinin altında kalmıştır. P70'li otobüs modelinin  $\langle C_D \rangle$  değeri oldukça düşük bir boyutsuz boşluk değerinde,  $g/w=0.16$ , minimuma erişmiştir. Bu değer baz modelinkinden %7.1 daha düşüktür.



**Şekil 7.** Yüzey-yağ akış görselleştirme fotoğrafları: a) Baz model, b) P70'li model ( $g/w=0.16$ ), c) plakası çıkarılmış durumdaki P70'li model ( $g/w=0.16$ )

P90'lı model ise test edilenler arasında aerodinamik direnç açısından en kötü performansı göstermiştir. En düşük boyutsuz boşluk değerinde,  $g/w=0.10$ , P90'lı otobüs modelinin  $\langle C_D \rangle$  değeri minimuma, 0.549, erişmiştir. Bu modelin  $\langle C_D \rangle$  değeri artan  $g/w$  ile birlikte genellikle artış sergilemiştir. Plaka genişliği 70 mm'den 90 mm'ye uzatıldığında, plakadan ayrılan kayma tabakaları otobüs ön yüzeyinin dışına taşacak şekilde bir art izi bölgesi oluşturduklarından, sadece P90 plakasına etkiyen dirençteki artışın P90'lı otobüsün direncini bu denli arttırdığı düşünülmektedir. Bu da plaka genişliği için aerodinamik verimlilik açısından kritik bir değer varlığına işaret etmektedir.

P70'li otobüs modelinin bu denli bir etkinliği nasıl sağladığına dair kanıtlar elde edebilmek için P70'li modelin ve baz modelin ön kısmına yüzey-yağ akış görselleştirme tekniği uygulanmıştır (Şekil 7). Modelin ön kısmına, test bölgesi açıklıklarından erişim zorlu olduğu için fotoğraf çekimi esnasında plakaya temas sonucu bazı yüzey akım çizgileri bozulmuştur. Karmaşık akış yapısı olmasa da plaka üzerinde kalan akım çizgileri şekilde turuncu renkle sunulmuştur. Otobüs modeline P70 plakasının eklenmesi sonucunda baz otobüs modeli ön yüzeyinin alt kısmının ortasında meydana gelen durma noktasının daha yukarıya taşındığı görülmektedir. Dahası, otobüsün, plaka arkasında kalan ve plaka ön görünüş alanından daha geniş olan bir kısımda P70 tarafından oluşturulan kalkan etkisi sayesinde daha düşük basınçlı bir bölge oluşturulmuştur [14-15]. serbest akım tarafından oluşturulan yüksek basınçlı bölgenin plaka art izi içerisinde kaldığı için daha düşük basınçlı bir bölgeye dönüştüğü çıkarımı yapılabilmektedir [14-15].

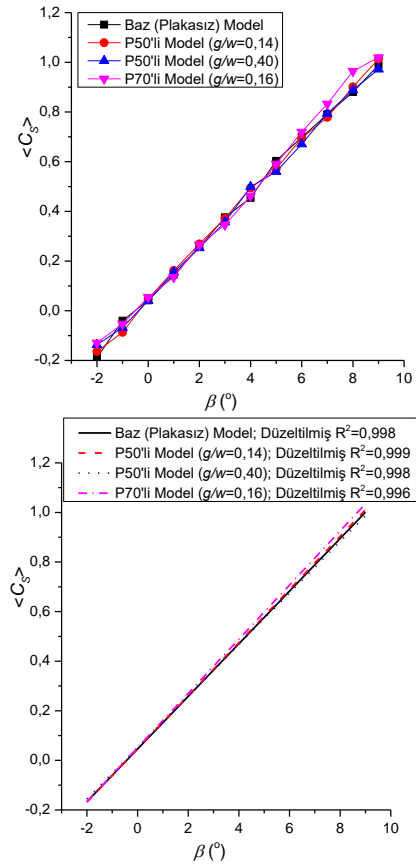


Şekil 8. Direnç düşürme bakımından farklı genişlikli plakalardan en verimlilerine sahip otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnç katsayılarının sapma açısı ile değişimleri. Plakasız model verisi kıyaslama amaçlı verilmiştir.  $Re_w=104000\pm 3000$

Yan rüzgarın, direnç düşürme açısından verimli bulunan bazı durumlar (P50'li otobüs modeli  $g/w=0,14$ , P50'li otobüs modeli  $g/w=0,40$  ve P70'li otobüs modeli  $g/w=0,16$ ) üzerindeki etkisi ise Şekil 8 içerisinde sunulmuştur. Yan rüzgar durumunda en iyi performansı  $g/w=0,16$ 'ya yerleştirilmiş P70'li otobüs modelinin sergilediği

görülmüştür. Baz modele kıyasla en kararlı performansı ise  $g/w=0,40$ 'a yerleştirilmiş P50'li otobüs modeli sergilemiştir. Diğer bir deyişle, bu otobüs modeli, baz modelinkinden olan fark direnç katsayısını,  $\Delta\langle C_D \rangle$ , test edilen tüm sapma açıları için neredeyse sabit bir değerde tutabilmeyi başarmıştır. Sapma açısının  $\beta>5^\circ$  olduğu durumlarda sergilediği performans  $g/w=0,16$ 'ya yerleştirilmiş P70'li otobüs modeli ile aynı olmaktadır. Sapma açısız durumda gayet iyi direnç performansı gösteren  $g/w=0,40$ 'a yerleştirilmiş P50'li otobüs modelinin  $\beta>3^\circ$  durumunda baz model karşısındaki bu etkinliğini kaybettiği görülmektedir.

Şekil 9'da ise verimli bulunan yukarıdaki durumlara ait yan katsayılarının sapma açısı ile değişimleri verilmiştir. En küçük kareler regresyonu alt taraftaki grafikte verilen doğrular incelendiğinde, boyutsuz boşluk değeri düşük olan P50 ve P70'li modellere etkiyen yan kuvvetin baz modelinkinden hafifçe yüksek olduğu, boyutuz boşluk değeri yüksek olan P50'li modele etkiyen yan kuvvetin ise baz modelinkinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, baz modelle kıyaslandığında, plakalı modellerin cüzi bir fark oluşturdukları söylenebilir.



Şekil 9. Direnç düşürme bakımından farklı genişlikli plakalardan en verimlilerine sahip otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama yan katsayılarının sapma açısı ile değişimleri. Veri noktalarına en küçük kareler yöntemiyle uydurulan 1. dereceden polinomlar alttaki grafik içerisinde verilmiştir. Plakasız model verisi kıyaslama amaçlı verilmiştir.  $Re_w=104000\pm 3000$

#### 4 Sonuçlar

Kara, hava ve deniz taşıtlarının birim mesafeyi alabilmek için tükettikleri enerjiyi minimize edebilmek adına halen birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bunların bir kısmı yeni motor teknolojileri üzerine, bir kısmı ağırlık azaltma üzerine, bir kısmı aerodinamik direnci düşürebilme üzerine ve diğer kısmı da bir takım diğer enerji kayıplarını azaltma üzerinedir. Bu deneysel çalışmada da 1:25 ölçekli bir otobüs modeli baz alınmış ve ona etkiyen aerodinamik kuvvetler yan rüzgarın olduğu ve olmadığı durumlar için ön kısma yerleştirilen plakalar yardımıyla düşürülmeye çalışılmıştır. Reynolds sayısından bağımsızlık sağlanamamış olsa da çalışmalar genişliğe-dayalı Reynolds sayısının  $Re_w=104000\pm 3000$  değerinde gerçekleştirilmiştir.

Genişliği otobüs modeli genişliğinin 0.7'si kadar ve yüksekliği de otobüs modeli genişliğinin 0.3'ü kadar olan ince bir plakanın otobüs modeli ön alt yüzeyine paralel ve aralarındaki boyutsuz boşluk  $g/w=0.16$  olacak şekilde konumlandırıldığı durumda, otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnç katsayısında,  $\langle C_D \rangle$ , %7.1'lik bir düşüş elde edildiği görülmüştür. Yan rüzgar durumunda da aynı kurulum baz (plakasız) modele göre  $\langle C_D \rangle$ 'de kayda değer bir düşüş sağlamıştır. Plakanın, otobüs modeli ön yüzeyindeki basınç dağılımını değiştirerek bunu sağladığı akış görselleştirme fotoğraflarından görüleceği gibi, plaka ile otobüs ön yüzeyi arasında nasıl bir akış etkileşimi olduğunun elde edilememiş olması,  $\langle C_D \rangle$ 'deki bu düşüşün altında yatan fiziksel olayların yeterli açıklıkla ortaya koyulamamasına sebep olmuştur.

Çalışma, öne yerleştirilen düz plaka genişliği için bir kritik değerin olduğunu ve bu kritik değerin üzerindeki bir genişliğe sahip plakanın aerodinamik açıdan verimsizlik oluşturacağını da göstermiştir.

Mevcut bulgular, ön kısma konumlandırılacak plakaların, otobüs direncini düşürmek adına ciddi bir potansiyel taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %5

#### Kaynaklar

- [1] European Commission, Reducing CO<sub>2</sub> emissions from heavy-duty vehicles, [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en), Accessed 22June 2022.
- [2] TÜİK, Taşıt-kilometre İstatistikleri 2020, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2020-45784>, Accessed 22June 2022.
- [3] A. Şumnu, Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 824-832, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.879584>.
- [4] M. Lorite-Díez, J.I. Jiménez-González, L. Pastur, O. Cadot and C. Martínez-Bazán, Drag reduction on a three-dimensional blunt body with different rear

- cavities under cross-wind conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 200,104145 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104145>.
- [5] M. Sarioglu, Control of flow around a square cylinder at incidence by using a splitter plate. Flow Measurement and Instrumentation, 53, 221-229, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.06.024>.
- [6] C. Bayındırlı and M. Çelik, The determination of effect of windshield inclination angle on drag coefficient of a bus model by CFD method. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 9(3), 122-129, 2020. <https://doi.org/10.18245/ijaet.723755>.
- [7] A. Bhave and H. Taherian, Aerodynamics of intercity bus and its impact on CO<sub>2</sub> reductions. Proceedings of the Fourteenth Annual Early Career Technical Conference, pp. 165-172, Alabama, USA, 2014.
- [8] H.-J. Schmidt, R. Wozidlo, C. N. Nayeri, and C. O. Paschereit, Drag reduction on arectangular bluff body with base flaps and fluidic oscillators. Experiments in Fluids, 56, 151, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-2018-3>.
- [9] A.S. Sucipto and W.A. Widodo, Numerical Study of Multiple-Channel Diffusers on The Rear Bus Body. AIP Conference Proceedings, 1788, 030094, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4968347>.
- [10] N. Shao, G. Yao, C. Zhang, and M. Wang, A New Method to Optimize the Wake Flow of a Vehicle: The Leading Edge Rotating Cylinder. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 5781038, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5781038>.
- [11] C. Bayındırlı, Y.E. Akansu, and M. Celik, Experimental and numerical studies on improvement of drag force of a bus model using different spoiler models. International Journal of Heavy Vehicle Systems. 27(6), 743-776, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2020.112975>.
- [12] T. Igarashi, Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 141-153, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00150-5).
- [13] S.-J. Lee, S.-I. Lee, and C.-W. Park, Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod. Fluid Dynamics Research, 34, 233-250, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fluidyn.2004.01.001>.
- [14] A. Prasad and C.H.K. Williamson, A method for the reduction of bluff body drag. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 155-167, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00151-7).
- [15] E. Firat, Y. E. Akansu, and H. Akilli, Flow past a square prism with an upstream control rod at incidence to uniform stream. Ocean Engineering, 108, 504-518, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.041>.
- [16] C. Bayındırlı, Reducing of Pressure Based Drag Force of a Bus Model by Flow Control Rod in Wind Tunnel. International Journal of Automotive Science and Technology, 5(4), 412-418, 2021. <https://doi.org/10.30939/ijastech.994351>.



- [17] C. Bayındırlı, M. Çelikve M. Demiralp, Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürükleme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 785-795, 2018. <https://doi.org/10.2339/politeknik.403993>.
- [18] S. Yiğit. Otobüs direncini düşürmek için bir yöntem. Yüksek Lisans Tezi, Munzur Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [19] SAE J1252\_198107, SAE Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses. SAE International, 1981. [https://doi.org/10.4271/J1252\\_198107](https://doi.org/10.4271/J1252_198107).
- [20] M. Seyhan and M. Sarioglu, Investigation of drag reduction performance of half NACA 0009 and 0012 airfoils placed over a trailer on the flow around truck-trailer. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(7), 2971-2979, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0620-2>.
- [21] M. Hassaan, D. Badlani, and M. Nazarinia, Numerical study of the effect of aspect ratio on the flow characteristics of the Ground Transportation System. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, 104314, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104314>.
- [22] M. Breuer, Effect of Inflow Turbulence on an Airfoil Flow with Laminar Separation Bubble: An LES Study. *Flow, Turbulence and Combustion*, 101, 433-456, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10494-017-9890-2>.

