

ELEKTRİKLİ ARABALARIN AERODİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN PARÇACIK GÖRÜNTÜLEMELİ HIZ ÖLÇÜM YÖNTEMİ (PGHÖ) VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Investigation Of Aerodynamic Characteristics Of Electric Car With Particle Image Velocimetry (PIV) And Numerical Analysis

Ceyda GÜNAY
Dilek KUMLUTAŞ
Özgün ÖZER
Utku Alp YÜCEKAYA

ÖZET

Elektrikli arabalar, tahrik sisteminde elektrik enerjisini kullanan araçlardır. Bir taşıt motorunun ürettiği gücün büyük bir bölümü aerodinamik kayıplar için harcanır. Harcanan bu enerjinin en aza indirilmesi için yapılan çalışmalarda ideal aerodinamik tasarımdaki araçların üretimi hedeflenmektedir.

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araç modeli üzerindeki aerodinamik karakteristiklerin belirlenmesidir. Bu anlamda, rüzgar tüneline yerleştirilen araç çevresinde oluşacak akış ve akışa bağlı parametreler irdelenmiştir. Bu çalışma kapsamında elektrikli araç belirli ölçekte küçültülerek modellenmiştir. Elde edilen bu model üç boyutlu yazıcı ile deneysel çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Elektrikli araç modeli etrafındaki akış yapısını sağlamak amacıyla hazırlanan rüzgar tüneline Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PGHÖ) deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde, araç modelinin aerodinamik olarak incelenmesinde önem arz eden hız dağılımı ve akış ayrılması yapıları elde edilmiştir. Ek olarak aracın nümerik modeli, ANSYS Fluent paket programı kullanılarak üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak oluşturulan sayısal modelden elde edilen akış profilleri ve hız haritaları PGHÖ deneylerinden elde edilen akış profilleri ve hız haritalarının sayısal analiz sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü Yöntemi (PGHÖ), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Araç Aerodinamiği, Akış Ayrılmaları

ABSTRACT

Electric cars are vehicles that use electrical energy in their drive system. A large part of the power produced by a vehicle engine is spent for aerodynamic losses. In order to minimize this energy consumption, it is aimed to produce the vehicles with ideal aerodynamic design.

The aim of this study is to determine the aerodynamic characteristics of an electric vehicle. In this sense, the parameters that vary according to the flow and flow structure to be formed around the vehicle were examined. Within the scope of this study, the electric vehicle was modeled on a certain scale. This model was prepared for experimental study with three-dimensional printer. Particle Image Velocimetry (PIV) experiments were conducted in the wind tunnel, which prepared for providing the flow domain around the vehicle. With these PIV experiments, the flow separations and velocity distributions were obtained. In addition, the three dimensional numerical model of the car was created by using ANSYS Fluent. The velocity and velocity-related characteristics obtained from this model, which were created by using CFD method, were compared with the data obtained from the PIV experiments. As a result of these comparing between the numerical and experimental study, coherent structure of velocity distributions was observed.

Keywords: Particle Image Velocimetry (PIV), Computational Fluid Dynamics (CFD), Aerodynamics of Road Vehicle, Flow Separations

1. GİRİŞ

Petrol türevi konvansiyonel enerji kaynaklarının hızla değişen maliyetlerini, çevreye verdiği zararları ve kısıtlı rezervlerini göz önünde bulunduran otomotiv firmaları ve ülkeler elektrikli araba teknolojileri konusundaki çalışmalarına yoğunluk vermiştir. Elektrikli arabalar, tahrik sistemlerinde elektrik enerjisi kullanan araçlardır. Elektrikli araçların tasarımında; enerji tüketimi, yol tutuşu ve hızlanmayı etkileyen yuvarlanma, hava, yokuş ve ivmelenme direnci gibi kuvvetlerin dikkate alınması önem arz etmektedir.

Hava ve katı cisim arasındaki bağıl hareket, cisim üzerinde bazı kuvvet ve momentlere neden olur. Bu kuvvet ve momentler aerodinamik yasalarıyla incelenmektedir. Uçak, otomobil ve rüzgar türbini gibi araçların tasarımı, bu kuvvetlerin cisim üzerindeki etkisi analiz edilerek gerçekleştirilir. Aerodinamik kuvvetler, özellikle belirli hız değerlerinde, motor tarafından üretilen gücün önemli bir bölümünü tüketir. Bu nedenle aerodinamik kuvvetler teorik, sayısal ve deneysel olarak birçok araştırmanın konusu olmuştur. Bu çalışmalarda, cisimlerin geometrilerinin direnç ve kaldırma katsayıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu konuda ideal aerodinamik yapının oluşturulması adına araç geometrileri üzerinde optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür [1].

Buchheim ve diğerleri, aerodinamik direnç katsayısı üzerindeki etkili parametreleri belirterek geometrik yenilikler önermiş ve bu yeniliklerin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir [2]. Sims ve diğerleri, Sıcak Tel Anemometresi deneyleri ile iki farklı "Ahmed model" üzerindeki akış kararsızlıklarının yapısını incelemişlerdir [3]. "Ahmed model" 1984 yılında S.R. Ahmed ve G. Ramn tarafından geliştirilen ve çözüm zorluklarını ortadan kaldırarak temel tasarım boyutlarının etkilerini inceleyebilmek için idealize edilen araç geometrisidir [4]. Spohn ve Gillieron "Ahmed model" çevresindeki akış ayrılmaları ve girdap oluşumlarını incelemek için su tüneli deneyleri yapmışlardır. Düşük Reynolds sayılarında çalışmalarına rağmen elde ettikleri görüntülerin literatürle uyum içerisinde olduğunu ve bu tip çalışmalarda su tünellerinin kullanılabilirliğini belirtmişlerdir [5]. Suzuki ve diğerleri, bölgesel altyapının araca ait aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Rüzgar açısı ve köprü kirişi yapılarının araç üzerindeki sınır tabakalarında yarattığı değişimi inceleyerek farkları ortaya koymuşlardır [6]. Watkins ve Vito, iki araç arasında kalan mesafenin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisini inceleyerek, yakın mesafeli araç üzerinde direnç kuvvetlerinin daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır [7]. Nayeri ve diğerleri aracın farklı arka uç geometrilerinin akış ayrılmaları üzerindeki etkisini görselleştirmişlerdir.

Depardon ve diğerleri, küp şeklindeki cismin üzerinde Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PGHÖ) deneyleri ve yağ akışı görselleştirmeleri yaparak farklı Reynolds sayılarında elde ettikleri görüntüleri karşılaştırarak düzlemsel yüzeylerde topoloji haritaları oluşturmaya çalışmışlardır. Reynolds sayısının 160000 değerine ulaştığı akış koşullarında, elde edilen görüntülerin aynı dizilimlere sahip olduğunu görmüşlerdir [8]. Kim ve diğerleri PGHÖ deneyleri ile 1/43 oranında küçültülmüş bir kara taşıtının spoiler geometrisi etrafındaki akış yapısını incelemişlerdir. Kullanılan spoiler araç arkasında bulunan kanat geometrisi olup, direnç kuvvetlerinin azaltılması için tasarlanmıştır. Yaptıkları çalışmadan elde ettikleri sonuçları, spoiler bulunmayan araç geometrisi ile karşılaştırarak farkları ortaya koymuşlardır [9]. McChutcheon ve diğerleri 1/8 oranında farklı arka uç geometrilerine sahip iki Ahmed model üzerinde 20 m/s serbest akış hızında PGHÖ deneyleri yapmışlardır. İki farklı geometri için araç etrafında oluşan hız dağılımı ve girdap yapılarını inceleyerek aralarındaki farkları belirtmişlerdir. Ayrıca oluşan girdap yapılarının şekillerinin aerodinamik karakteristikler üzerindeki etkisinden de bahsetmişlerdir [10]. Gürlek ve diğerleri, ölçeklendirilmiş otobüs geometrisi için su tüneli içerisinde PGHÖ deneyleri yapmışlar ve çeşitli zaman aralıklarında ölçümler alarak bu ölçümleri karşılaştırmışlardır [11].

Modi ve diğerleri, 100 km/h hızda bir aracın ürettiği gücün ortalama %60'ının aerodinamik dirençler için harcandığını belirtmişlerdir [12]. Bu tüketim değerleri düşünüldüğünde, yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal ortamda oluşturulan modellerin, hem maliyet hem de zaman açısından avantaj sağladığı görülmektedir. Literatürde araç aerodinamiğinin incelendiği farklı sayısal çalışmalar mevcuttur. Rajsingh ve Raj, 20° eğim açısıyla tasarlanan bir Ahmed modelin iki farklı hız değerinde gelişen akış yapılarını incelemişlerdir. Sayısal modeli oluşturmak için ACUSOLVE CFD ticari paket programını kullanarak Spallart- Almaras türbülans modeli ile çözümlenmiş yapıyı oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda aracın etrafındaki akış ve girdap yapısını elde etmişlerdir. Farklı hız değerleri için elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır [13]. Song ve diğerleri sedan bir aracın arka kısmında

değişiklikler önermiş ve yapay sinir ağları metodu ile bu değişikliklerin sayısal analizini yapmıştır. 6 farklı boyutsal parametrenin değiştirilmesiyle elde ettikleri 64 farklı tasarımın direnç katsayısı üzerindeki etkisinin irdelendiği bu çalışmada, nihai direnç katsayısını halihazırda kullanılan modelden %5,639 daha az olarak hesaplamışlardır [14]. Desai ve diğerleri 1/15 oranında ölçeklendirilmiş bir araç geometrisinin direnç katsayısını, sayısal ve deneysel olarak hesaplamışlardır. İki farklı çalışmadan elde ettikleri sonuçları karşılaştırarak Reynolds sayısının direnç katsayısı üzerindeki etkisini incelemişlerdir [15]. Parab ve diğerleri ANSYS CFX ticari paket programını kullanarak araç üzerindeki direnç ve kaldırma kuvvetlerini hesaplamışlar ve elde ettikleri sonuçlardan yola çıkarak geometri üzerinde değişiklikler yaparak ilk sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda araç geometrisi üzerinde direnç katsayısını azaltıcı tasarım iyileştirmeleri önermişlerdir [16].

Bu çalışmada; Ahmed model araç geometrisinden farklı olarak, dış yüzey geometrisinde herhangi bir değişiklik yapılmadan belirli bir oranda ölçeklendirilerek gerçeğe yakın bir biçimde modellenen elektrikli bir araç geometrisi üzerindeki aerodinamik karakteristikler 24 m/s hız değerlerine ulaşan bir rüzgar tüneli içerisinde PGHÖ yöntemiyle incelenmiş ve akış bölgesine ait hız haritaları oluşturulmuştur. Ölçeklendirilmiş araç geometrisi, sayısal analizler için ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent paket programı ile deney düzeneği ile uyumlu bir biçimde modellenmiştir. PGHÖ yöntemiyle araç etrafında gözlemlenen hız ve hıza bağlı karakteristikler, sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK ÇALIŞMA

2.1. Boyutsal Analiz ve Blokaj Etkisi

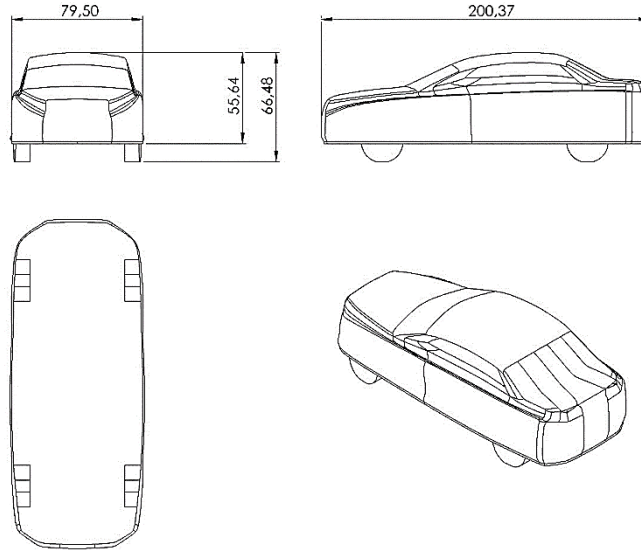
Deneysel çalışmalarda kullanılan düzeneklerin tasarımı maliyet, zaman ve teknik destek gerekliliği göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Bu anlamda gerçek boyutlarda yapılacak bir araç aerodinamiği çalışması yerine ölçeklendirilmiş modeller üzerinden yapılan deneyler daha çok tercih edilmektedir. Ancak, ölçeklendirilmiş modellerin kullanıldığı sistemler belli şartlar gerektirmektedir. Örneğin ölçeklendirilmiş model ve prototipin geometrik, kinematik ve dinamik benzerliği sağlanmalıdır. Model ve prototip arasındaki benzerlik koşullarının sağlanmasında boyutsuz parametreler kullanılmaktadır.

Akış problemlerinde benzerlik koşullarının sağlanmasında en yaygın kullanılan boyutsuz sayı Reynolds sayısıdır. Reynolds sayısı Denklem 1'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Bu denklemde yer alan ρ havanın yoğunluğu (kg/m³), V havanın hızı (m/s), L_{CH} cismin karakteristik boyu (m) ve μ havanın viskozitesidir (kg/ms). L_{CH} , cismin toplam hacminin toplam yüzey alanına oranıdır. Reynolds benzerliği yapıldığında 1/20 oranında küçültülmüş bir aracın 25 m/s hızdaki hareketini model üzerinde yaratmak için 500 m/s hız kullanılan ortamın oluşturulması gerekmektedir. Ancak bu hız değerlerine ulaşmanın imkansızlığı ve akış için yapılan kabullerin güvenilirliği yapılacak deneysel çalışmalar için farklı önerilerin geliştirilmesine sebep olmuştur [17].

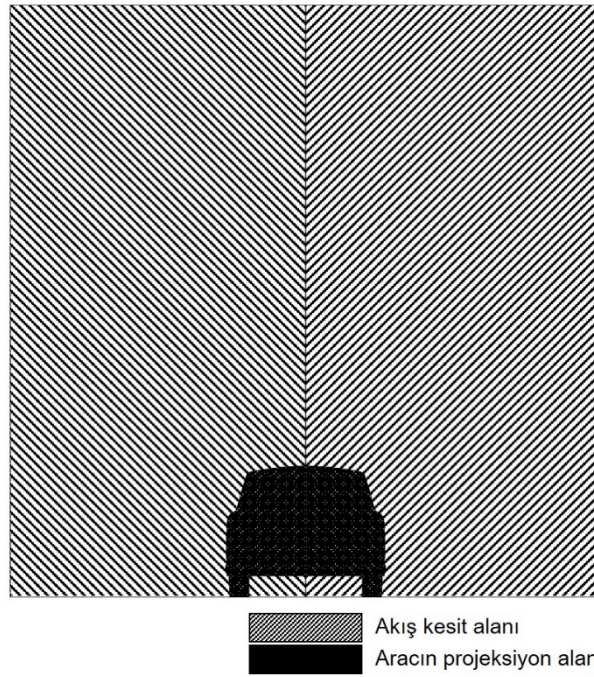
$$Re = \frac{\rho V L_{CH}}{\mu} \quad (1)$$

Belirli Reynolds sayılarına ulaştıktan sonra direnç katsayısının değişim göstermemesi durumu Reynolds bağımsızlığı olarak adlandırılır. Bu sayede düşük Reynolds sayılarında cismin geometrisi ve tasarımının akış ayrılmaları ve direnç katsayısı üzerindeki etkisi incelenebilir. Deneysel ve sayısal çalışmalar kapsamında kullanılan ve 1/24 oranında ölçeklendirilen araca ait geometrik yapı ve boyutlandırma Şekil 1'de görülmektedir.

Ayrıca tünel geometrisi içinde yapılacak çalışmalarda blokaj oranı göz önünde bulundurulması gereken bir etmendir. Blokaj oranı, cismin akış yönündeki projeksiyon alanının akış bölgesinin kesit alanına oranıdır. Bu oran, %7,5 değerinin altında olmalıdır [17]. Tasarımı yapılan geometrinin 300*300 mm kesit uzunluklarına sahip gözlemlene bölgesinde sebep olduğu blokaj oranı %4,6 olup kritik değerinin altında kalmasından dolayı hem deneysel hem de sayısal model için uygundur. Aracın yaratacağı blokaj etkisinin kesit görüntüsü Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



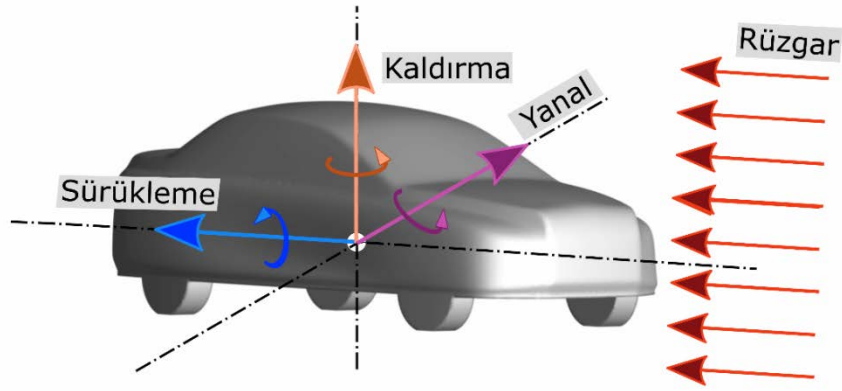
Şekil 1. Ölçeklendirilmiş araç geometrisi (mm)



Şekil 2. Blokaj oranı kesit görüntüsü

2.2 Direnç ve Kaldırma Kuvvetleri

Hava içinde hareket eden cisimler üzerinde, belirli kuvvetler meydana gelmektedir. Bu kuvvetler cismin hava ile görelî hareketinin sebep olduğu basınç ve kayma gerilmelerinin bileşkeleridir. Cisim normalinde oluşan bileşke kuvvet kaldırma direnci, cismin teğeti yönünde oluşan kuvvet ise sürüklenme direncidir. Rüzgarın araç simetri eksenine aynı doğrultuda olmadığı zamanlarda bir de yanâl direnç meydana gelmektedir. Bu kuvvetler havanın yoğunluğu, hızı, cismin geometrisi ve yönelimine göre değişmektedir [1]. Hava ile görelî hareket yapan bir cismin üzerine etkiyen tüm kuvvetler Şekil 3 te verilmiştir.



Şekil 3. Araca etkiyen aerodinamik kuvvetler

Cisim üzerine etkiyen aerodinamik direnç kuvveti Denklem 2'deki gibi hesaplanır.

$$F_D = 0.5\rho V^2 A C_D \quad (2)$$

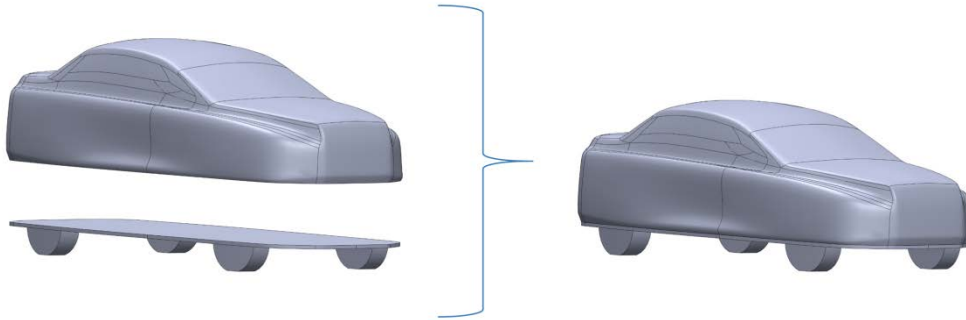
Bu denklemde yer alan ρ havanın yoğunluğu (kg/m^3), V havanın hızı (m/s), A aracın ön bakış alanı (m^2) ve C_D cismin sürüklenme direnç katsayısıdır. C_D katsayısı, cismin aerodinamik direnç karakteristiğinin boyutsuz temsilcisidir [17]. Bu katsayının değerinin düşürülmesi için yapılan çalışmalar ayrıca ideal aerodinamik yapının da elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

3. SAYISAL ÇALIŞMA

Kara taşıtlarının aerodinamik incelenmesinde, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemini kullanan birçok ticari program, zaman ve maliyet gerektiren deneysel çalışmalara göre sıkça tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, ölçeklendirilmiş araç etrafında gelişen akış yapısı PGHÖ deneylerinden elde edilen verilerle karşılaştırılmak üzere sayısal olarak ANSYS Fluent paket programı ile çözdürülmüştür. Sayısal akış modeli; belirli adımlar (geometrinin ve ağ yapısının oluşturulması, başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi vb.) ve teorik altyapı (yönetici denklemler, ayrıklaştırma şemaları vb.) göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur.

3.1 Geometrinin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında kullanılan araç geometrisi, günlük hayatta kullanılmakta olan bir binek arabanın SolidWorks programında 3 boyutlu modellenmesi ile oluşturulmuştur. Modelde; araca ait yapısal boşluklar, ayna geometrileri ve tekerleklerin ana gövdeyle birleşim noktalarının detayları sayısal model için kolaylık oluşturması açısından ihmal edilmiştir. Bu anlamda araç, iki ayrı gövde şeklinde modellenerek montajlanmıştır. Bu durum, aynı zamanda deneysel çalışma için kullanılan 3 Boyutlu yazıcının basım sürecinin de kolaylaşmasını sağlamıştır. SolidWorks paket programı kullanılarak 1/24 oranında ölçeklendirilerek oluşturulan model ve alt geometrileri Şekil 4'de verilmiştir.



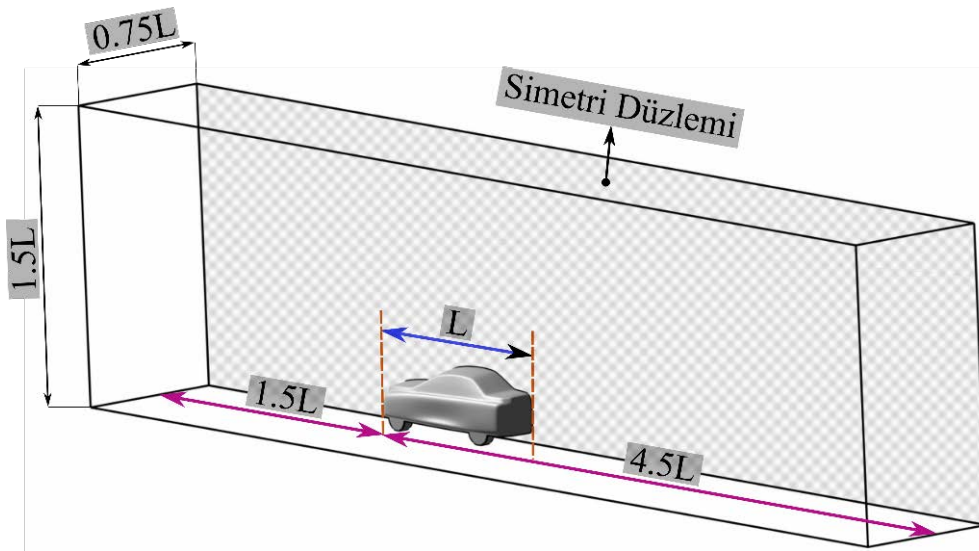
Şekil 4. Araç geometrisi ve alt geometrileri

3.2 Akış Bölgesinin Oluşturulması

Deney düzeneği ile uyumlu olacak şekilde hazırlanan akış bölgesi, araç orta düzleminin simetri eksenini olmasından dolayı yarısı modellenerek oluşturulmuştur. Akış bölgesi oluşturulurken teorik çalışmada bahsedilen %7,5 üst sınır değeri dikkate alınarak blokaj oranı %4,6 olarak modellenmiştir.

Araç boyu ($L=200$ mm) ile orantılı olacak şekilde boyutlandırılan akış bölgesinin geometrisi Şekil 6'da verilmiştir. Kullanılan geometriye ait boyutların, yapılan ilk analizler sonucunda kanal içerisindeki akış gelişiminin gözlemlenmesinde yeterli olduğu görülmüştür.

Araç arkasında modellenen akış bölgesinin daha uzun olmasının nedeni bu bölgede oluşan girdapların daha fazla mesafede gözlemlenmesidir. Ayrıca, oluşturulan deneysel düzeneğin ölçüleri de dikkate alındığında sayısal analizlerle uyum sağlaması için bu geometrik oranların kullanılması uygundur.

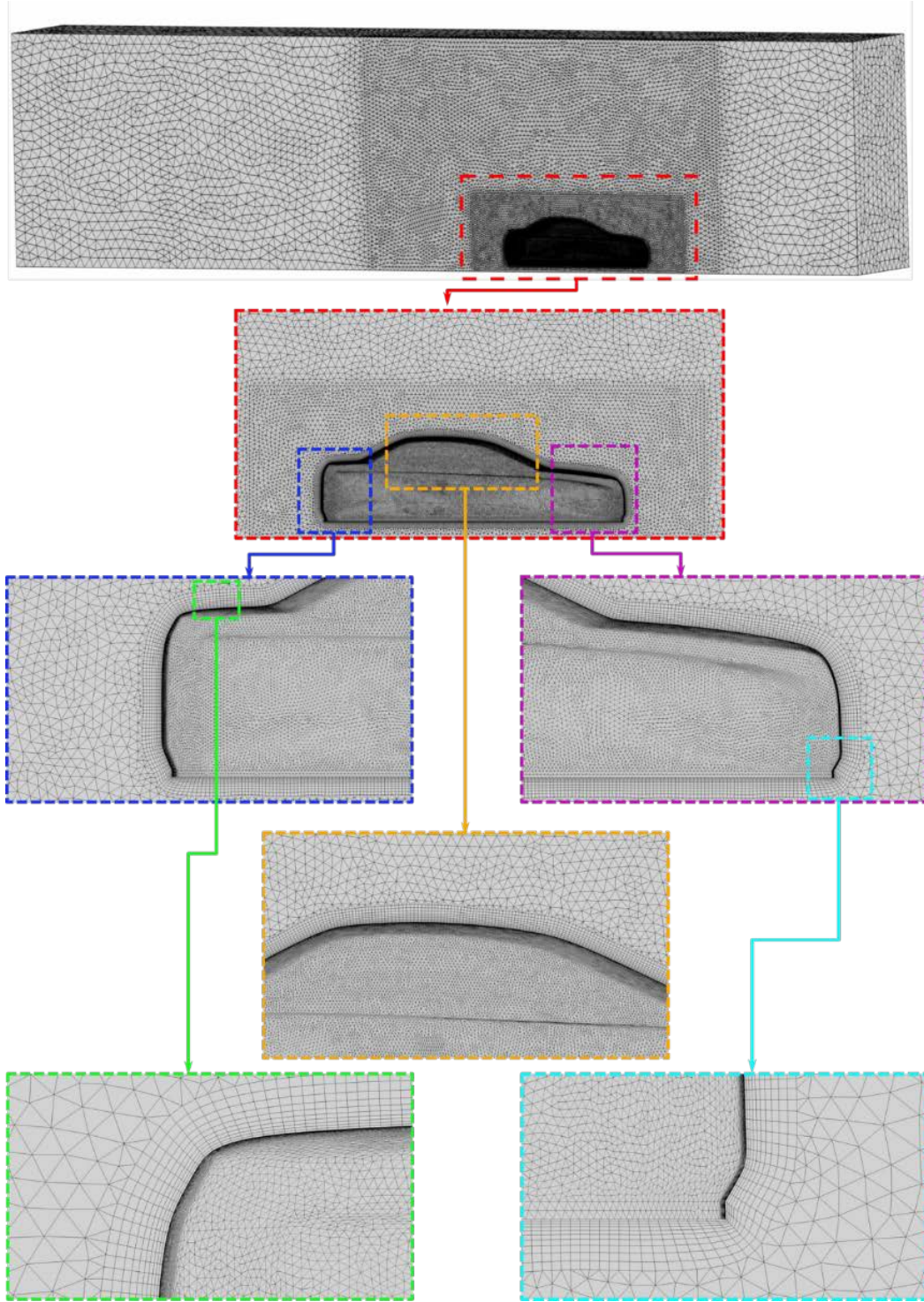


Şekil 5. Akış bölgesi geometrisi

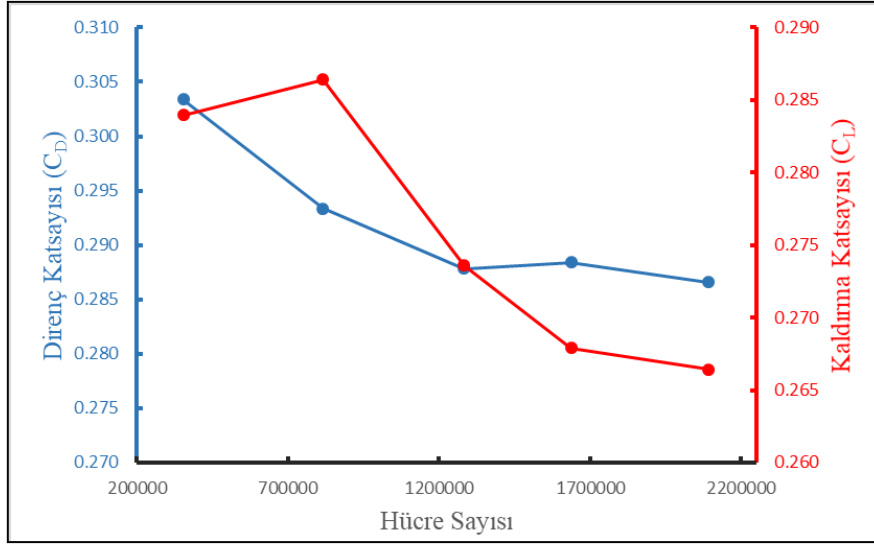
3.3 Ağ Yapısının Oluşturulması

Sayısal çözümü yapılacağı akış bölgesinin sonlu hacimlere bölünmesi gerekmektedir. Bu çalışmada oluşturulan 3 boyutlu model ANSYS Meshing kullanılarak hesaplama bölgelerine ayrılmıştır. Ağ yapısı, y^+ değerinin kullanılacak türbülans modeli ve sınır tabaka çözüm hassasiyeti üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Boyutsuz bir parametre olan y^+ , katı cisim ile etkileşimde olan ilk tabakanın kalınlığının hesaplanmasında kullanılır. Bu parametre kullanılacak türbülans modeline bağlı olarak belirli değer aralıklarında değişim göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan ağ yapısı ve detayları Şekil 6'da verilmiştir.

Ayrıca sayısal modeller için kullanılan hücre sayısı da önemli bir parametredir. Artan mesh sayısının sonuçlar üzerindeki etkisinin kaybolduğu durumda "Meshten Bağımsız" bir model elde edilmiş olur. Bu çalışmada 5 farklı hücre sayısı ile 30 m/s hız değeri için yapılan analizlerin direnç ve kaldırma sayıları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar üzerindeki değişimin (hata oranının) % 0,2 olarak elde edilmesi ile hücre sayısı yaklaşık 1600000 olarak seçilmiştir. Kullanılan hücre sayısının direnç ve kaldırma katsayısı üzerinde yarattığı etkiler Şekil 7'de verilmiştir.



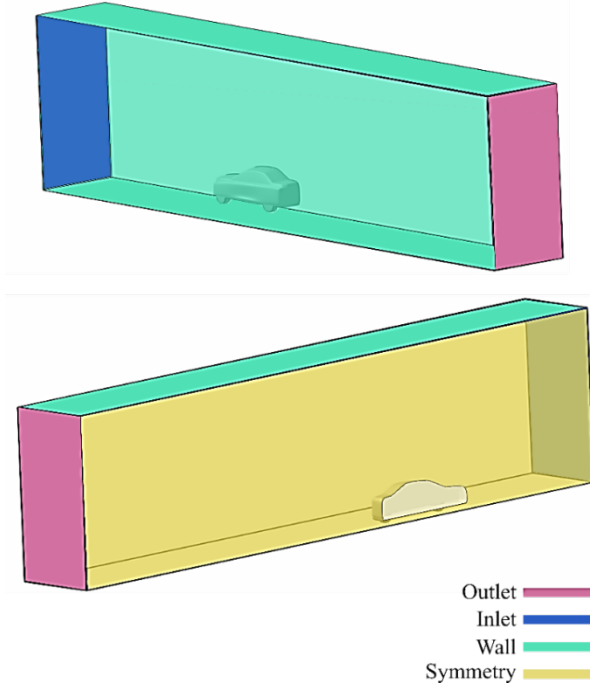
Şekil 6. Akış bölgesi için oluşturulan ağ yapısı



Şekil 7. Meshten bağımsızlık

3.4 Sınır Koşulları

Araca ait simetri düzlemi göz önünde bulundurularak yarısı modellenen akış bölgesinin sınır koşulları Şekil 8 ile verildiği gibidir. Burada giriş “Velocity inlet (Hız girişi)”, çıkış ise “Pressure outlet (Basınç çıkışı)” sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Hız değeri, deney düzeneğiyle uyumlu olması açısından 24 m/s olarak belirlenmiştir. Simetri düzlemi dışındaki bölgeler “Wall(duvar)” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 8. Akış bölgesi sınır koşulları

Bu çalışmada kullanılan akış problemi kararlı akış koşullarında, “Pressure based” olarak çözdürülmüştür. Türbülans modeli olarak Realizable $k-\epsilon$ seçilmiştir. COUPLED Algoritması ile hesaplanan model için yakınsama kriteri 10^{-4} olarak alınmıştır. Bu kriterin sağlandığı bölgelerde direnç ve kaldırma katsayılarının salınım yapmaması önemli bir çıktır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Sayısal anlamda yapılan analizler doğrultusunda elde edilen sonuçlar, kullanılan matematiksel modellere ve yapılan kabullere bağlı olarak değişim göstermektedir. Sayısal bir modelden elde edilen sonuçlar yakınsama ve yuvarlama gibi hataların birikimini içermektedir. Bu anlamda belirli kabuller altında yapılan sayısal analizler, deneysel olarak kullanılan yöntem ve düzeneklerle doğrulanmalıdır. Kullanılan deneysel yöntemin, sayısal çalışmayla olan uyumu devam edecek sayısal analizler için doğrulama altyapısı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçların doğrulanması için araç etrafında gelişen akış yapısı Stereo PGHÖ yöntemiyle incelenmiştir. PGHÖ yöntemi, akış bölgesine eklenerek mevcut akışla uyum içerisinde hareket eden parçacıkların, lazerin yaydığı ışık şeridinden geçerken yüksek çözünürlüklü kameralarla görüntülenmesi ve bu görüntülerin işlenmesiyle hız değerlerinin elde edilmesi ilkesine dayanmaktadır [18]. Akışa eklenen parçacıkların hem akışla uyum içerisinde hareket edebilecek kadar küçük hem de lazerin yaydığı ışığı yansıtarak görüntülenebilecek kadar büyük olması gerekmektedir. Çalışma kapsamında taneciklendirme için sis, aydınlatma için 532 nm dalga boyunda çift atımlı ND:YAG lazer ve görüntüleme için 4 MPx kare sensörlü kameralar kullanılmıştır. Akış düzlemine farklı bir açı ile bakan ikinci kameranın varlığı üç boyutlu hız değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Elde edilen görüntülerin işlenmesi matematiksel ve istatistiksel süreçler içermektedir. Bu çalışmada hız vektörlerinin oluşturulması için kullanılan sorgulama bölgeleri (interrogation area) 32*32 piksel, overlap oranı %50 olarak ayarlanmıştır. Kameralardan biri araç geometrisini yandan dik görecek şekilde yerleştirilmiştir. Lazer ise akış düzlemi ile paralel olarak konumlandırılmıştır.

Deneyler kapsamında, sayısal çalışmada sunulan akış bölgesi geometrisi kullanılmıştır. Araç, SolidWorks programı ile CAD modeli oluşturulmuş geometrinin 3 boyutlu yazıcı kullanılarak basımıyla elde edilmiştir. Basım sırasında PLA (Polylactic Acid) malzeme kullanılmıştır. 3 boyutlu basımı yapılan iki alt geometri yapıştırılarak araç geometrisi oluşturulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında üretilen araç geometrisi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Üç boyutlu yazıcı kullanılarak basılan araç geometrisi

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan rüzgar tünelinin giriş çapı 630 mm, gözleme bölgesi ise 1200 mm uzunluğundadır. Şekil 10'da deneysel çalışmalar sırasında çekilen görsel verilmiştir.

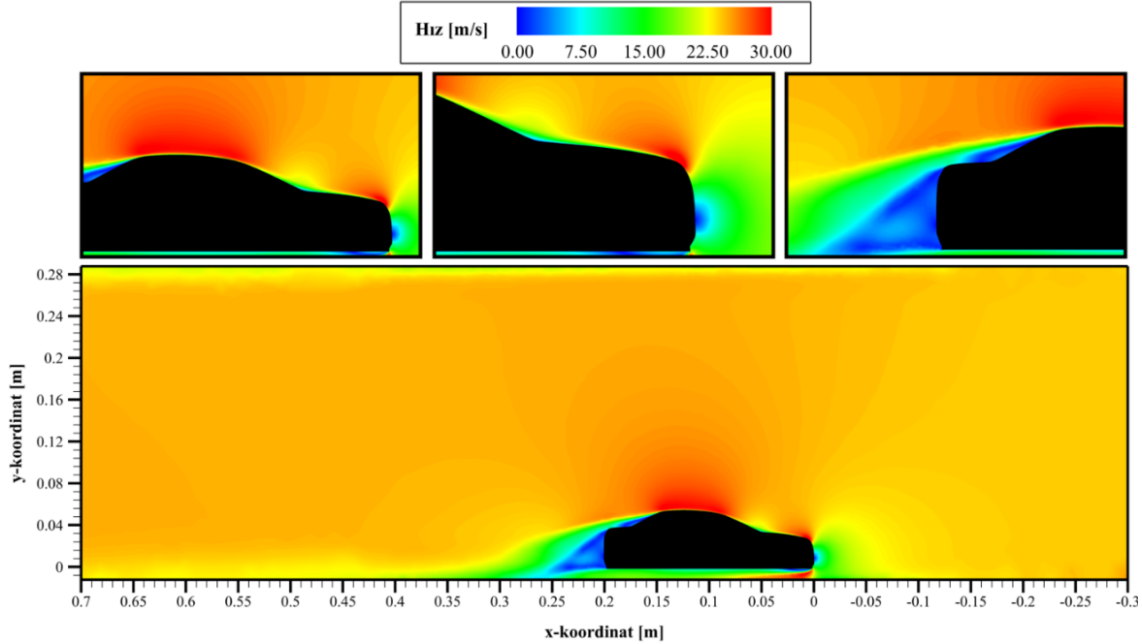


Şekil 10. Deneysel düzeneğin görüntüsü

SONUÇLAR

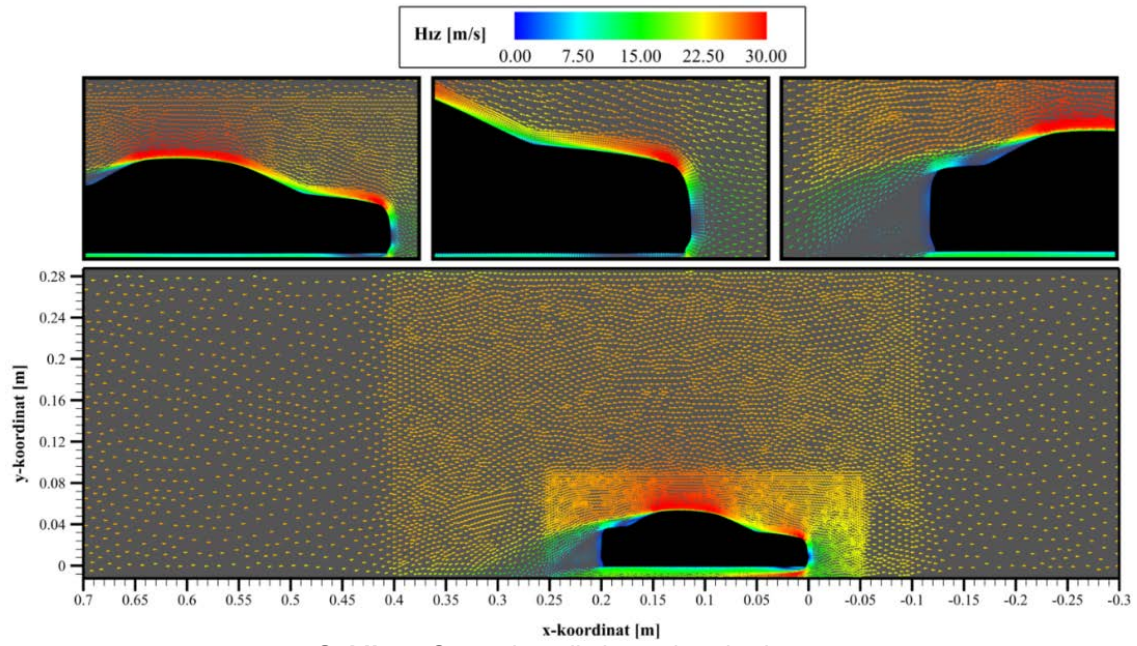
Literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalar incelendiğinde, çoğunlukla gerçek model yerine Ahmed modelin ölçeklendirilerek kullanıldığı görülmektedir. Çalışma kapsamında, 24 m/s hız değerindeki bir rüzgar tüneline yerleştirilen, birebir model üzerinden ölçeklendirilmiş bir elektrikli aracın üzerinde oluşacak hız ve hıza bağlı karakteristikler sayısal analizler ve PGHÖ deneyleriyle incelenmiştir.

Sayısal analiz çalışmalarında elde edilen skaler hız değerlerinin akış bölgesindeki dağılımı Şekil 11’de sunulmuştur. Şekil 11’de görüldüğü gibi araç ön burnunda durma noktasında ($V=0$, stagnation point) olan rüzgar, alt ve üst bölgelere ayrılarak, akış ayrılması bölgelerinde maksimum hız değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca, araç geometrisinin arka bölgesinde, akış ayrılmalarının etkisi nedeniyle hız değerlerinin azaldığı görülmektedir.



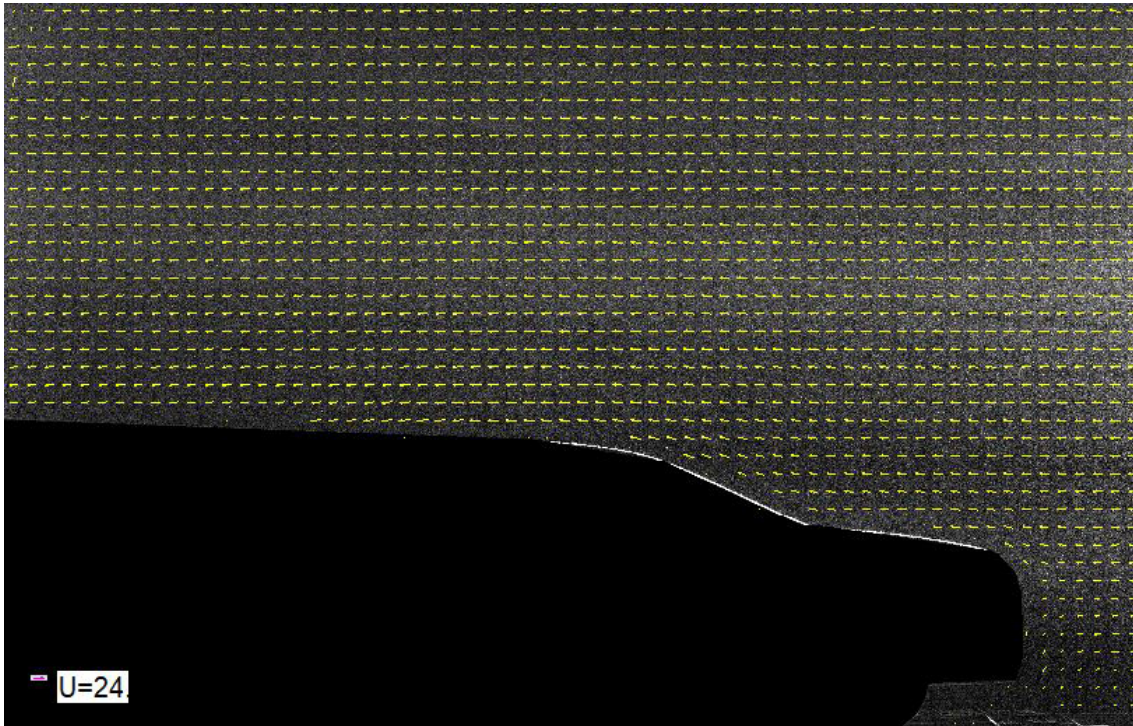
Şekil 11. Sayısal analiz skaler hız dağılım haritası

Araç etrafında (simetri ekseninde) oluşan akış bölgesine ait hız vektörleri Şekil 12’de gösterilmiştir. Bu vektörler, PGHÖ sonuçlarıyla karşılaştırmak için kullanılacak olan asıl çıktılardır. Şekil 12’de görüldüğü gibi araç ön burnundan ayrılan akış, araç ön kısmının üst ve alt tepe noktalarında maksimum hıza ulaşmıştır. Aracın üst kısmı boyunca ilerleyen akış tepe noktada maksimum hız değerlerine geldikten sonra ön bakış bölgesinin bitimiyle akış ayrılmalarına uğrayarak hız değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.



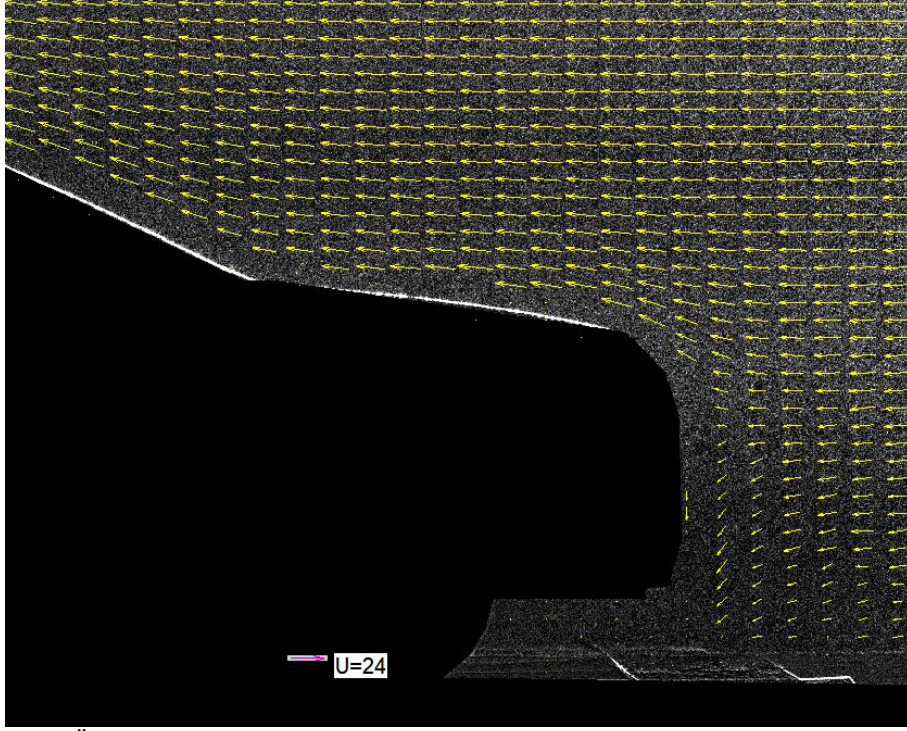
Şekil 12. Sayısal analiz hız vektör haritası

PGHÖ yöntemi kullanılarak araç simetri düzleminde elde edilen hız vektörlerinin dağılımı Şekil 13'de gösterildiği gibidir. Sayısal çalışma ile elde edilen vektör yönelimleri, araç ön burnundan iki tepe noktaya ayrılan akış yapısı burada da gözlemlenmiştir. Ayrıca aracın üst tepe noktasında elde edilmesi beklenen maksimum hız değerleri de sayısal analizden alınan sonuçlarla uyum içerisindedir. Vektör büyüklükleri için belirtilen referans, Şekil 13'de verilen 24 m/s değeridir.



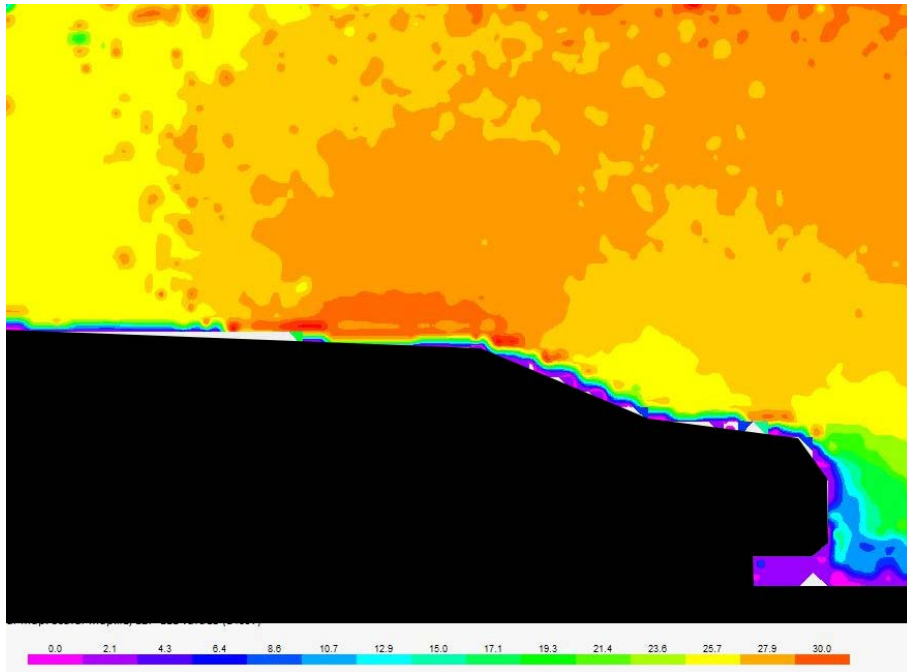
Şekil 13. PGHÖ yöntemiyle elde edilen simetri eksenli hız vektörleri [m/s]

Araç geometrisinin ön burnunda oluşan akış ayrılmasına ait detay görseli Şekil 14'de sunulmuştur.



Şekil 14. PGHÖ yöntemiyle elde edilen simetri eksenli hız vektörleri araç ön burnu detayı [m/s]

PGHÖ deneylerinden elde edilen hız değerlerinin skaler dağılımı ise Şekil 15'de verilmiştir. Şekil 15 incelendiğinde, Şekil 11'de görülen araç üst ve alt bölgelerindeki maksimum hız konumlarının PGHÖ sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu görülmektedir. PGHÖ deneylerinde oluşan araç arka ve tekerleklerden itibaren alt kısmındaki aydınlatılmayan bölgeler görüntüler için veri alınmasına engel teşkil etmektedir.



Şekil 15. PGHÖ yöntemiyle elde edilen simetri eksenli skaler hız değerlerinin dağılımı [m/s]

PGHÖ deneyleri ile doğrulanan sayısal çalışmalar sonucunda, farklı hızlar için C_D katsayıları hesaplanmıştır. Bu katsayılar 20 m/s hız değeri için 0,133; 24 m/s hız değeri için 0,18; 30 m/s hız değeri içinse 0,289 olarak hesaplanmıştır. Sayısal analizler ve PGHÖ deneylerinden elde edilen maksimum hızlar değerlendirildiğinde %4,8'lik bir fark olduğu görülmüştür.

6. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; genellikle literatürde yer alan Ahmed model üzerinden yapılan sayısal ve deneysel çalışmalardan farklı olarak, rüzgar tüneli içerisinde 24 m/s hız değerlerine ulaşan havanın, 1/24 oranında birebir ölçeklendirilmiş bir elektrikli araç modelinin üzerinde gelişen akış yapısı ve aerodinamik karakteristikleri PGHÖ deneyleri ile elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler, sayısal analiz sonuçlarıyla araç üzerinde oluşan akış profilleri ve hız haritaları bakımından karşılaştırılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmanın birbirini doğrulaması sayesinde hem oluşturulan rüzgar tünelinin işlerliği kanıtlanmış hem de bu araştırma ile ilgili metodoloji sistematik hale getirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışma, gelecekte yapılabilecek rüzgar tüneli deneylerinin PGHÖ yöntemiyle farklı hız, konum, geometri vb. parametrelerin değerlendirildiği çalışmalar için taban oluşturmuştur. Ayrıca sadece elektrikli araçlar değil, aerodinamik karakteristiklerin önemli olduğu tüm tasarımlar sayısal ve deneysel olarak incelenerek karşılaştırılabilir duruma getirilebilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki katkılarından dolayı Vestel Klima Fabrikası, Beşok Kalıp ve Plastik Ticaret A.Ş., Prodek Endüstriyel Fan Sistemleri'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Hucho, W.H. (1986). "Aerodynamics of Road Vehicles from Fluid Mechanics to Vehicle Engineering (First Ed.)". Butterworth-Heinemann.
- [2] Buchheim, R., Deutenbach, K., & Lückoff, H. (1981). "Necessity and Premises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars. SAE Transactions", 90, 758-771.
- [3] Sims-Williams, D. & Dominy, R., (1998). "Experimental Investigation into Unsteadiness and Instability in Passenger Car Aerodynamics", SAE Technical Paper, 980391.
- [4] S.R. Ahmed, G. Ramm, Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, SAE-Paper 840300, 1984.
- [5] Spohn A. & Gillieron P. (2002) . Flow separations generated by a simplified geometry of an automotive vehicle. In IUTAM Symposium: Unsteady Separated Flows, April 8-12, Toulouse, France.
- [6] Suzuki, M., Tanemoto, K. & Maeda, T. (2003). Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 209-218.
- [7] Watkins, S. & Vio, G. (2008). The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, (6-7), 1232-1239.
- [8] Depardon, S., Lasserre, J. J., Boueilh, J.C., Brizzi, L. E. & Boree, J. (2005). Skin friction pattern analysis using near-wall PIV. Experiments in Fluids, 39, 805-818.
- [9] Kim, J. S., Kim, S., Sung, J., Kim, J.D. & Choi, J. (2006). Effects of an Air Spoiler on the Wake of a Road Vehicle by PIV Measurements. Journal of Visualization. 9(4), 411- 418.
- [10] McCutcheon, G., McColgan, A. H., Grant, I. & Hurst, D. Wake Studies of a Model Passenger Car Using PIV. SAE Motorsports Engineering Conference and Exhibition. 382-393. Indianapolis, Indiana.



- [11] Gurlek, C., Sahin, B. & Ozkan, G. M. (2012). PIV studies around a bus model. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 38, 115–126.
- [12] Modi, V.J., Hill, S.S. & Yokomizo, T. (1995). Drag reduction of trucks through boundary-layer control. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 54/55, 583-594.
- [13] Rajsinh B. C. & Raj T. K. R. (2012). Numerical Investigation of External Flow around the Ahmed Reference Body Using Computational Fluid Dynamics. *Research Journal of Recent Sciences*. 1(9), 1-5.
- [14] Song, K.S., Kang, S. O., Jun, S.O., Park, H. I., Kee, J. D., Kim, K. H., & Lee, D.H. Aerodynamic Design Optimization of Rear Body Shapes of a Sedan for Drag Reduction. *International Journal of Automotive Technology*, 13(6), 905–914.
- [15] Desai, M., Channiwala, S. A. & Nagarsheth, H.J. Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 4(3), 359-368.
- [16] Parab, A., Sakarwala, A., Paste, B., Patil, V. & Mangrulkar, A. (2014). Aerodynamic Analysis of a Car Model Using ANSYS- Fluent 14.5. *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE)*. 1(4), 7-13.
- [17] Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (First Edition)*, McGraw-Hill.
- [18] Raffel M., Willert C., Wereley S. & Kompenhans J., (2007). *Particle image velocimetry a practical guide (2nd Ed.)*. New York: Springer.

ÖZGEÇMİŞ

Ceyda GÜNAY

1994 Eskişehir doğumludur. 2017 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Şu anda aynı üniversitenin Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.

Dilek KUMLUTAŞ

İzmir doğumludur. 1990 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı Üniversite'nin Enerji Anabilim dalında 1994 yılında Yüksek Lisans, 1999 yılında Doktora Eğitimini tamamlamıştır. 1990-1999 yılları arasında Araştırma Görevlisi, 1999- 2007 yılları arasında Yardımcı Doçent, 2007-2013 yılları arasında Doçent olarak görev yapmıştır. 2013 yılından beri Makina Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak çalışmakta ve 2016 yılından itibaren de Enerji Anabilim Dalı Başkanlığı görevini yürütmektedir.

Özgün ÖZER

1984 İzmir doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 2008 yılında, Anadolu Üniversitesi Fotoğrafçılık ve Kameramanlık Bölümünü 2011 yılında, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Enerji Yüksek Lisans programını 2011 yılında ve Anadolu Üniversitesi Felsefe Bölümünü 2015 yılında tamamlamıştır. 2017 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Enerji Doktora programını tamamlamıştır. Ayrıca İzmir Fotoğrafçılar Odasında 2005 yılından beri gönüllü uzman fotoğraf eğitmeni olarak çalışmaktadır. 2016'dan itibaren İzmir Fotoğrafçılar Odası Eğitim Müdürlüğü görevini sürdürmektedir.

Utku Alp YÜCEKAYA

1991'de Sivas'ta doğmuştur. 2014 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Yüksek Lisans programını 2017 yılında tamamlamıştır. 2017 yılından beri Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında Araştırma Görevliliğini ve doktora eğitimini sürdürmektedir.