



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 5.03.2020

Received Date : 5.03.2020

Kabul Tarihi :12.03.2020

Accepted Date : 12.03.2020

### ELEKTRİKLİ BİR ARACIN AERODİNAMİK PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

#### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF AN ELECTRIC VEHICLE

Fahrettin GENCER<sup>1</sup>(ORCID: 0000-0001-7518-4658)Yalın YAMAÇ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-0294-3171)Muhammet İbrahim AŞÇI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-8673-3325)Rahmi GÜNDEŞLİ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-2010-315X)<sup>1</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yalın YAMAÇ, yalinyamac@ksu.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi tarafından TÜBİTAK Efficiency Challenge yarışlarına katılmak üzere tasarlanan elektrikli bir aracın aerodinamik özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar KSÜ Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan araç modelinin ebadı; tünel kapasitesiyle bağlantılı olan blokaj oranı dikkate alınarak belirlenmiş ve araç modeli 1/16 ölçekli olarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda 7 farklı hava hızında (14.66/16.08/17.44/18.93/20.19/21.69/23.81) m/s aracın maruz kaldığı sürüklenme kuvveti  $F_d$  ölçülmüş ve sürüklenme katsayısı  $C_d$  hesaplanmıştır. Sayısal çalışmalar ise Ansys programında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda çözücü model olarak k-epsilon Realizable modeli tercih edilmiştir. Artan hava hızlarına bağlı olarak sürüklenme kuvveti  $F_d$ 'nin 0,1743 N'dan 0,4014 N'a kadar kademeli olarak arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** sürüklenme kuvveti, sürüklenme katsayısı, elektrikli araçlar, araç dizaynı, blokaj oranı

#### ABSTRACT

In this study, the aerodynamic properties of an electric vehicle designed by Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Engineering and Architecture Faculty to participate in TÜBİTAK Efficiency Challenge were investigated experimentally and numerically. Experimental studies were carried out in the wind tunnel in the laboratory of the Mechanical Engineering Department of KSU. The size of the vehicle model used in the experiments; The model of the vehicle was produced with a scale of 1/16. In experimental studies, the drag force  $F_d$  exposed to the vehicle was measured at 7 different air velocities (14.66/16.08/17.44/18.93/20.19/21.69/23.81) m/s and the drag coefficient  $C_d$  was calculated. Numerical studies were carried out in Ansys program. In these studies, the k-epsilon Realizable model was preferred as the solver model. Due to increased air velocities, the drag force  $F_d$  was gradually increased from 0.1743 N to 0.4014 N.

**Keywords:** drag force, drag coefficient, electric cars, car design, blockage ratio

#### GİRİŞ

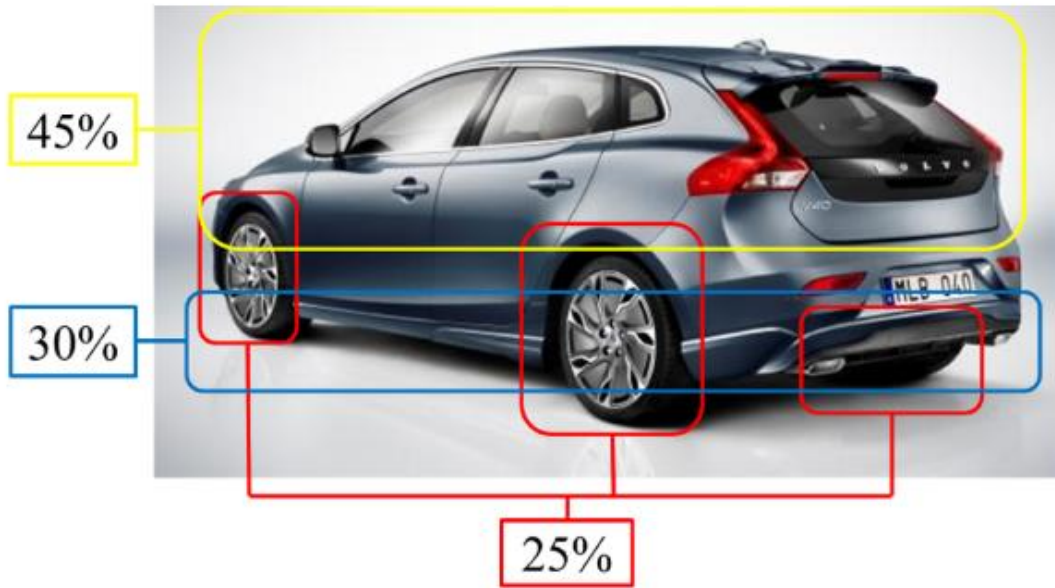
Aerodinamik, katı yapıların veya cisimlerin hava ile etkileşimi sonucunda oluşan dış akışı inceleyen bir bilim dalı olarak adlandırılır. Aerodinamik sürüklenme katsayısı, aracın performansını, yakıt tüketimini, hızlanma özelliklerini, sürüş karakteristiğini, çevre kirliliğini, gürültüyü ve konforu önemli ölçüde etkiler (Wood vd. 2003).

Karayolu taşıt aerodinamiği, aracın performansını, seyir halinde iken konfor ve sürüş güvelliğini, araç soğutma sistemlerini ve dış görünümü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için otomotiv sektörünün önemli bir parçası

haline gelmiştir. Hareket halinde araç etrafındaki havanın sürekli yer değiştirmesiyle araç etrafında aerodinamik direnç ya da aerodinamik sürüklenme olarak adlandırılan boyutsuz olarak temsil edilen bir aerodinamik sürüklenme kuvveti oluşturur. Modern bir otomobilin aerodinamik sürüklenme kuvveti 80 km/h hızda toplam sürüş direncinin %75-%80'ini oluşturur. Taşıtlar üzerinde etkili olan aerodinamik kuvvetlerin deneysel ve sayısal metotlarla incelenmesi geçmişten günümüze kadar üzerinde durulan önemli konulardan birisi olmuştur. Seyir halinde olan taşıta etki eden aerodinamik kuvvetler taşıtların yakıt tüketimi, egzoz emisyon değerleri, ilave motor gücü, yol tutuş özellikleri, değişen yol şartlarında yol dengesini sağlama gibi temel parametrelerini etkilemesi bakımından önemlidir. Taşıt aerodinamiği üzerinde yapılan çalışmalarda deneysel yöntemlerin uzun zaman alması ve maliyetli olması, ölçüm cihazlarının pahalı olması ve taşıtın tüm dış yüzeylerinde ölçümlerin zor yapılması nedeniyle sayısal hesaplama yöntemleri günümüzde daha avantajlı duruma gelmiştir. Genel kişisel bir araç için ortalama aerodinamik sürüklenme katsayı değeri 0.33 iken yapılan iyileştirmelerle ortaya çıkarılan düşük sürüklenme katsayısına sahip araçlardaki değer ise ortalama 0.25 tir. Yapılan aerodinamik çalışmalar, sürüklenme kuvvetindeki %3 oranındaki bir düşüşün yakıt tüketimini %1 oranında azalttığını ortaya çıkarmıştır. Bu tasarruf, dünyadaki karayolu taşıtlarının sayısıyla çarpıldığında, dünya pazarlarındaki ham petrolün fiyatını etkilemek için yeterli olan 10 milyar galon/yıl değerinde bir verim ortaya çıkmaktadır. Azalan yakıt kaynakları ve diğer çevresel kaygılar, yakıt ekonomisi ve gaz emisyonları aerodinamik sürüklenme katsayısını etkileyen merkezi konulardır (Hucho, 1998).

Araç aerodinamik tasarımının temel amacı sürüklenme kuvvetini minimize etmektir. Sürüklenme kuvvetini azaltmada en etkili yaklaşım, toplam sürüklenme kuvvetinin en büyük yüzdesini oluşturan bileşenlere odaklanmaktır. Araç dış gövdesindeki iyileştirmelerle sürüklenme kuvvetinde önemli bir düşüş elde edilmiştir (Hucho, 1998).

Günümüze kadar, aerodinamik iyileştirmeler esas olarak aracın üst gövde optimizasyonları kapsamaktadır. Modern bir araç için aerodinamik sürüklenme kuvvetinin %45 araç gövdesi, %30 tekerlekler ve tekerlek yuvaları, %25 araç alt bölgesi ve detaylar oluşturmaktadır (Alexey, 2013).



Şekil 1. Otomobil Üzerindeki Farklı Bölgelerin Aerodinamik Dirence Olan Etki Dağılımı (Alexey, 2013).

Aerodinamik sürüklenme kuvveti hızın karesiyle orantılı olarak artar. Bu durum yıl içerisinde sürüş süresinin büyük bir bölümünü yüksek hızlarda şehir dışında gerçekleştiren araçlar için sürüklenmeyi daha önemli hale getirmektedir (Miralbes vd. 2012).

Literatürde araçların aerodinamik açıdan geliştirilmesiyle ilgili çok sayıda sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır. Aka (2003), Bir aracın 1 /16 oranında küçültülmüş modelini maksimum hızı 40 m/s olan bir rüzgâr tüneli test düzeneğinde test etmiş ve bunun sonucunda aerodinamik sürüklenme katsayısını belirlemiştir. Aerodinamik sürüklenme katsayısını yapılan deneysel çalışmaların ardından %5 hata oranı elde etmişlerdir ve hata payının nerelerden kaynaklanabileceği konusunda önerilerde bulunmuştur. Dhande ve Bauskar (2013), Dinesh ve Manoj,

Adrene olarak isimlendirdikleri hibrid aracın aerodinamik sürüklenme katsayısını  $C_d$  hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle ve rüzgâr tüneli deneyleri ile incelemiştir. Sayısal ve deneysel yöntemlerle bulunan  $C_d$  değerleri uyumlu bulunmuştur. İpci vd. (2015), Literatürde Ahmed Model olarak geçen basitleştirilmiş araç modeli üzerinde sayısal akışkanlar dinamiği yöntemini kullanarak su tüneli benzetmesi ile 0.218 m/s serbest akış hızında  $1.5 \times 10^4$  Reynolds değerinde k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans modelleri ile çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada karşılaştırılan k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans modelleri arasından deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara RNG k- $\epsilon$  modeli ile daha çok yaklaşıldığını elde etmişlerdir. Desai vd. (2008), 1/15 ölçekli bir model araç etrafındaki akışı incelemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sayısal çalışmalar için bir HAD paket programı, deneysel çalışmalar için 300x300x1000 mm kesit bölgesi ölçülerine sahip bir rüzgâr tüneli kullanmışlardır. Sayısal çalışmalar için Standart k- $\epsilon$  türbülans modelini tercih etmişlerdir. Aerodinamik sürüklenme katsayısı değerini deneysel çalışmayla 0.4, sayısal çalışmayla ise 0.55 olarak belirlemişlerdir. Çağan (2000), Rüzgâr tüneline yapılan deneysel çalışmalarda modelin zemin üzerine oturuyor olması ile zemin açıklığının var olması halinde hesaplanan sürüklenme katsayısı  $C_d$  değerleri arasında bir fark olduğu sonucu elde etmişlerdir. Model altında var olan açıklıktan dolayı meydana gelen hava akışı sürüklenme katsayısının artışına sebep olmuştur. Akışı sınırlayan zeminin ortadan kaldırılması sonucunda serbest hava jetine maruz kalma durumu oluşmuş ve blokaj etkisinin azalmasıyla sürüklenme katsayısı değerinin önemli oranda düştüğü sonucuna varmıştır.

Bu çalışmada ise, TÜBİTAK Efficiency Challenge elektrikli araç yarışmasına katılmak üzere Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi tarafından geliştirilen bir elektrikli aracın aerodinamik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

## MATERYAL METOT

Aerodinamik sürüklenme kuvveti; akışkanın yoğunluğu, karşı akım hızı, cismin geometrik yapısı ve duruş biçiminin de bulunduğu bir dizi parametreye bağlıdır ve aerodinamik analizi yapılan her geometri için bu parametrelerin ayrı ayrı listesini vermek pratik değildir. Bunun yerine cismin direnç karakteristiğini temsil eden uygun boyutsuz bir sayıyla çalışmanın daha elverişli olduğu görülmüştür. Bu sayı sürüklenme katsayısıdır ve Denklem 1'deki gibi hesaplanır. Verilen denklemde;  $A$  ( $m^2$ ) cismin projeksiyon alanı,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) akışkanın yoğunluğu,  $V$  (m/s) akışkanın hızı,  $F_d$  (N) sürüklenme kuvvetidir (Çengel&Cimbala, 2012).

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

(1)

Reynolds sayısı, laminar akış veya türbülanslı akış gibi farklı akış rejimlerinin karakteristiğini belirlemek için kullanılır. Akış rejimi temelde akışkandaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranına bağlıdır ve Denklem 2'deki gibi hesaplanır. Verilen denklemde;  $Re$  Reynolds sayısı,  $\mu$  (kg/m.s) akışkanın dinamik viskozitesi,  $D$  (m) borunun çapı,  $V$  (m/s) akışkanın hızı,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) akışkanın yoğunluğu olarak ifade edilir (Çengel&Cimbala, 2012).

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

(2)

Reynolds sayısının hesaplanmasında havanın yoğunluğu ve dinamik viskozitesi sırasıyla;  $\rho=1.2250$   $kg/m^3$ ,  $\mu=1.789 \times 10^{-5}$   $kg/m.s$  olarak alınmıştır (Çengel&Boles, 2012).

Bir kesitten birim zamanda geçen akışkan hacmine hacimsel debi denir ve Denklem 3'teki gibi hesaplanır. Verilen denklemde;  $Q$  akışkanın bir kesitten birim zamanda geçen hacimsel debi,  $V_{ort}$  (m/s) ortalama hava hızı ve  $A_c$  ( $m^2$ ) kesit alanıdır (Çengel&Cimbala, 2012).

$$Q = V_{ort} \cdot A_c$$

(3)

Blokaj oranı; modelin ön bakış alanının, rüzgâr tüneli test odasının kesit alanına oranı olarak ifade edilir ve Denklem 4'teki gibi hesaplanır. Verilen denklemde  $BR$  Blokaj oranı,  $M_{PA}$  ( $m^2$ ) modelin ön projeksiyon alanı ve  $RT_{KA}$  ( $m^2$ ) rüzgâr tünelinin test odasının kesit alanıdır (Çengel&Cimbala, 2012).

$$BR = \frac{M_{PA}}{RT_{KA}}$$

(4)

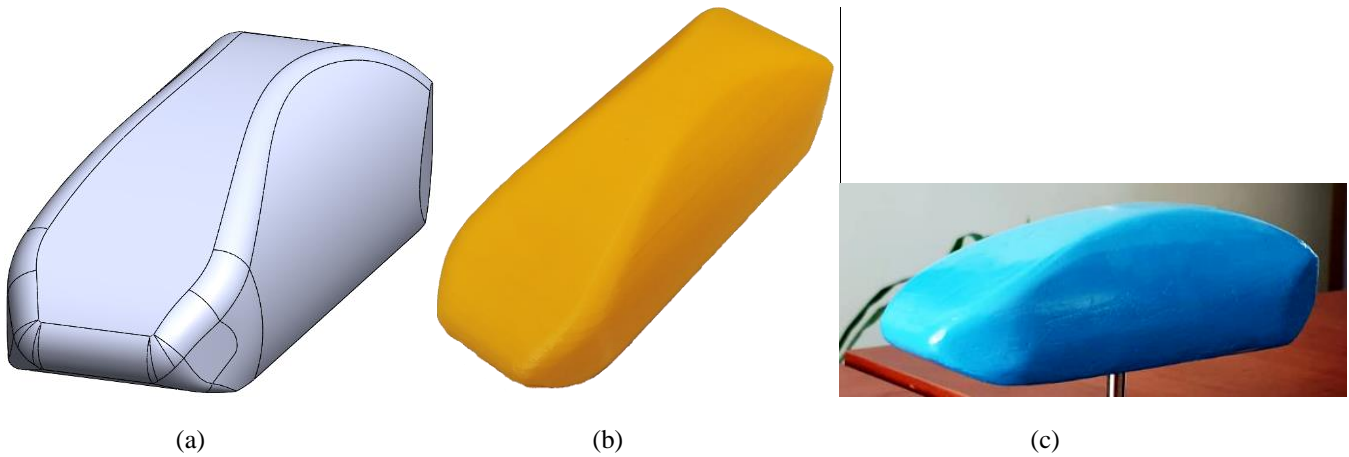
Bu çalışmada blokaj oranı %9.5 olarak hesaplanmıştır.

Aynı hava hızındaki deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının yüzdesel olarak karşılaştırılmasını ifade eden hata oranı Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Hata Oranı} = \left| \frac{\text{DeneyselSonuç} - \text{Sayısal Sonuç}}{\text{DeneyselSonuç}} \right| \cdot 100 \quad (5)$$

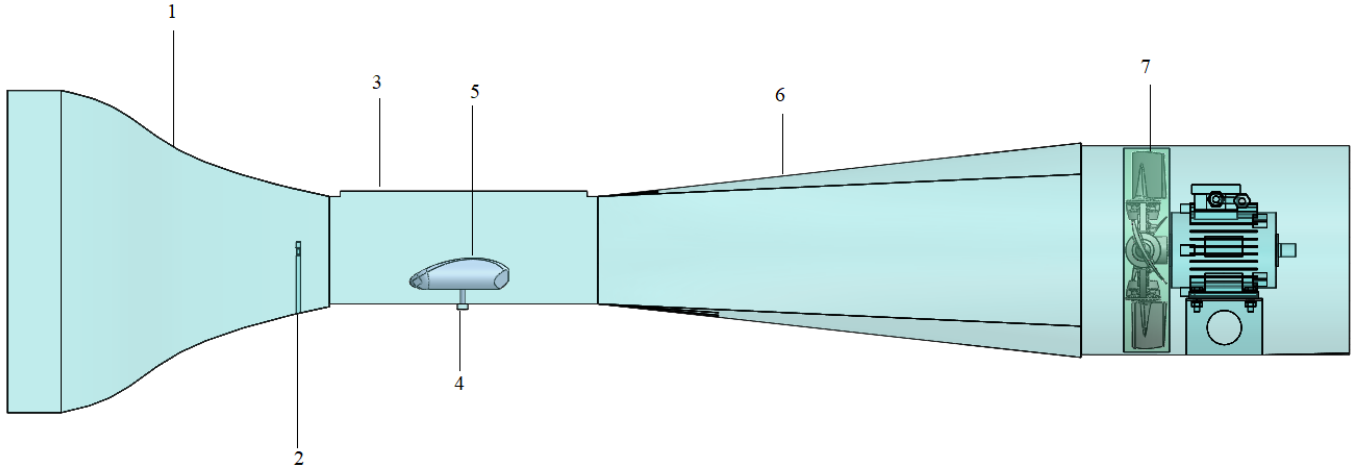
### ***Deneysel Çalışmalar***

Solidworks programında tasarlanan elektrikli aracın üzerine gelen aerodinamik kuvvetlerin ölçülebilmesi için CAD verisi 1/16 ölçeğinde ölçeklendirilmiştir (Şekil 1a).



**Şekil 2.** Elektrikli Aracın CAD Tasarımı ve Üretimi: (a) Solidworks Programında Oluşturulan Dizayn, (b) 3B Yazıcıdan Elde Edilen Model, (c) Macunlama ve Boyama İşlemi Sonrası Model Görüntüsü

Tasarımı yapılan elektrikli aracın modeli Ultimaker Extended 2 3B yazıcı ile üretilmiş ve üretiminde PLA filamet kullanılmıştır. Katman kalınlığı olarak 0.2 mm tanımlanmış ve 0.8 mm nozul ucu kullanılmıştır. Elde edilen model yüzeyinin pürüzlü olması (Şekil 1b) akış deneyinde rüzgâr direncini olumsuz etkilediğinden dolayı araç yüzeyinin tüm yüzeyleri macunlanmış ve ince bir tabaka elde edilene kadar zımparalanmıştır. Ardından ticari araçlarda kullanılan boyama işlemleri ile modelin tüm yüzeyleri boyanmıştır (Şekil 1c). Deneylerde kullanılan rüzgâr tüneli cihazı şeması Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Rüzgâr Tüneli Şematik Gösterimi

Şekilde; 1 ile numaralandırılan kısım yayıcı, 2 ile numaralandırılan kısım hava hız sensörü, 3 ile numaralandırılan kısım test odası, 4 ile numaralandırılan kısım tutucu, 5 ile numaralandırılan kısım araç modeli, 6 ile numaralandırılan kısım akış düzeltici ve 7 ile numaralandırılan kısım fan olarak adlandırılmaktadır. Rüzgâr tünelinin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Rüzgâr Tüneli Teknik Özellikleri

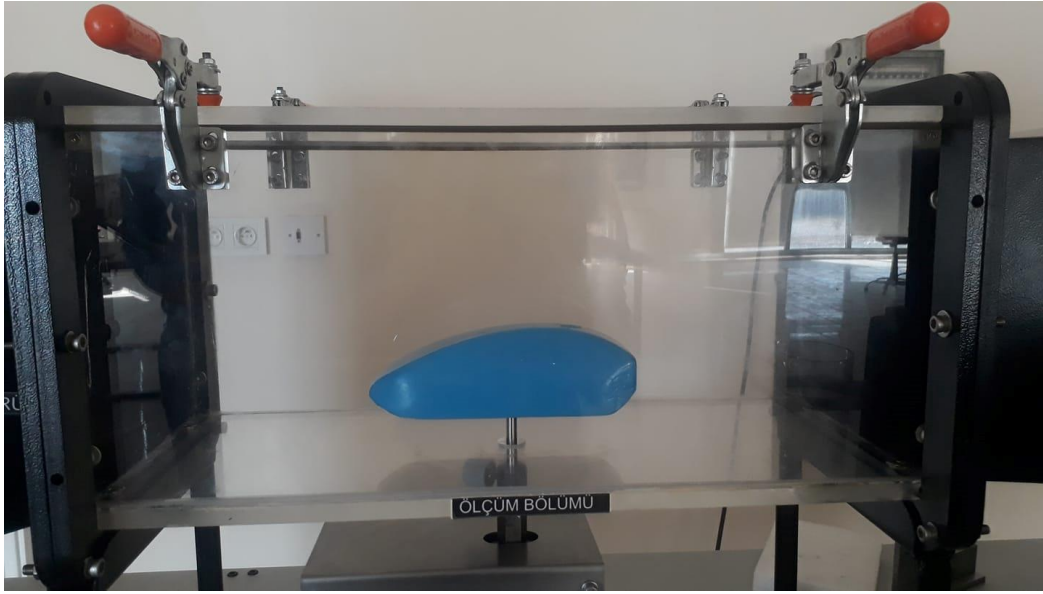
Load Cell Modül	DVP02LC-SL
Lcd Ekran	DOP-B05S101
Hava Hız Sensörü	QVM 62.1
Şeffaf Çalışma Alanı	20x21x48 cm
Fan Motor Deviri	2800 d/d
Fan Debisi	7.000 m <sup>3</sup> /h
Fan Çapı	39.5 cm

Rüzgâr tünelinde 20 farklı kademedeki kontrol edilen motor sayesinde akış, hava sensörünün olduğu kesitte en fazla 25 m/s olarak elde edilebilmektedir. Rüzgâr hızı kızgın tel anemometresi ile ölçülüp veriler anlık olarak PLC ekrana yansımaktadır.

Rüzgâr tünelinde hava hızını ölçen kızgın tel anemometresinin bulunduğu kesit ile araç modelinin yerleştirildiği test odasının kesit alanının aynı olmadığı tespit edilmiştir. Sayısal analizlerde ve deneysel hesaplamalarda test odasından geçen etkin hava hızı Denklem 3 aracılığıyla hesaplanmıştır.

Yüzey işlemleri yapılan model, deney düzeneğine Şekil 3'teki gibi yerleştirilmiştir. Rüzgâr tünelinde 7 farklı hava hızında deneyler yapılmıştır.



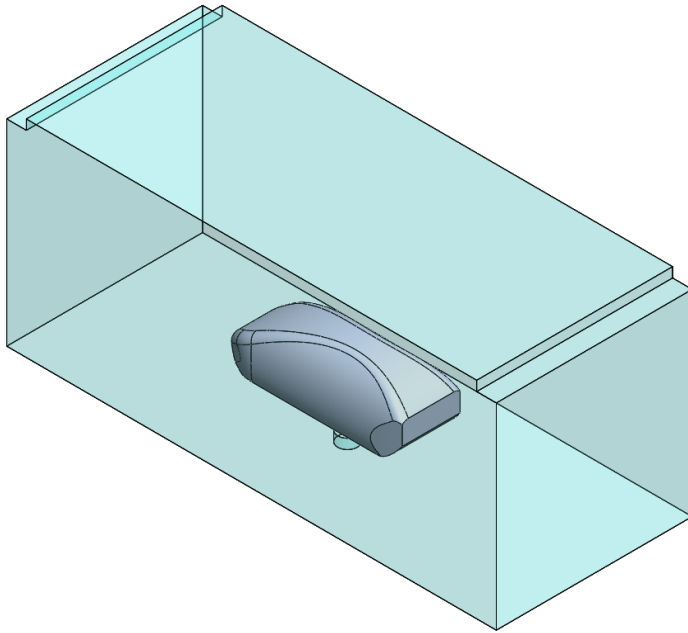


Şekil 4. Deneysel Düzeneği ve Model

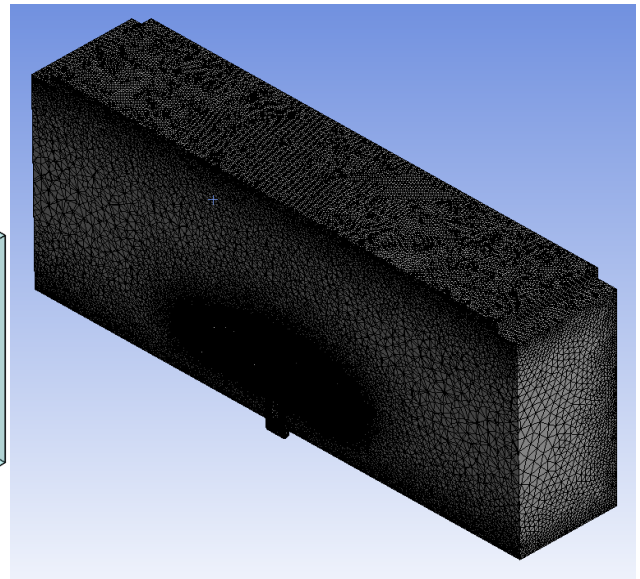
TÜBİTAK Efficiency Challenge elektrikli araç yarışında başarılı olabilmek için 65 dakika içerisinde en az enerji tüketimi ile 2 km uzunluğundaki pisti 30 turu tamamlayarak bitirmek gerekmektedir (URL 1). Yarışı bu şartlarda başarılı bir şekilde bitirebilmek için gereken ortalama seyir hızı 57 km/h olarak hesaplanmaktadır. Ancak virajlar ve sollamalar gibi farklı seyir hızı gerektiren durumlardan dolayı 50 km/h ile 85 km/h arasında sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.

### Sayısal Çalışmalar

1/16 oranında ölçeklendirilmiş elektrikli araç geometrisi 210x200x500 mm<sup>3</sup> hacmindeki test odasına yerleştirildiğinde oluşan akış hacmi Solidworks programı aracılığıyla CAD verisi olarak elde edilmiş ve bu geometriye Ansys- Fluent programında bir mesh tanımlanmıştır. Yapılan deneyler ve analiz sonuçları karşılaştırılarak deney düzeneğinden ya da analizden kaynaklanabilecek sorunlar araştırılmış ve en uygun mesh yapısı elde edilmiştir.



(a)



(b)

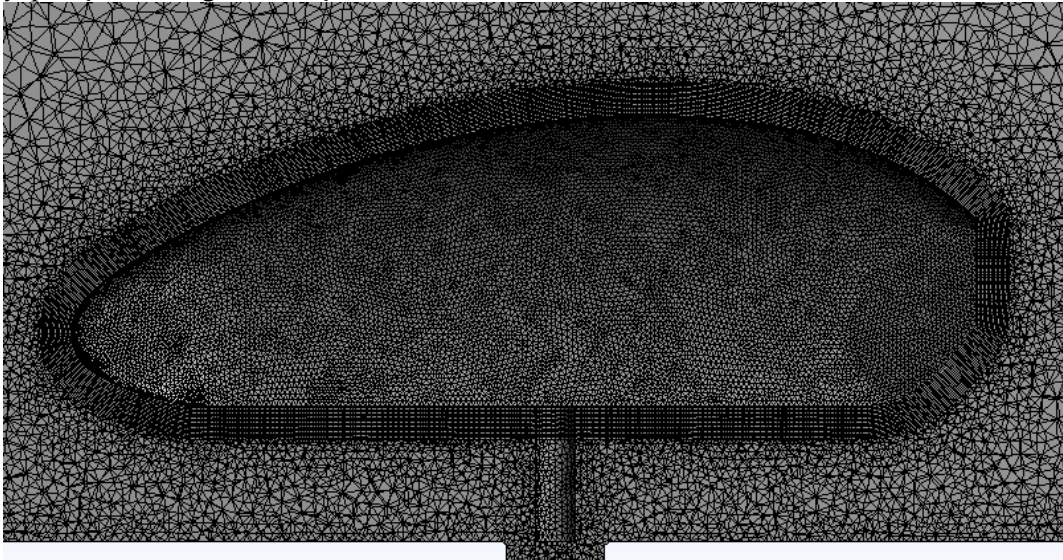
Şekil 5. Test Odasının CAD Çizimi (a) Ve Ağ Yapısı (b)

Mesh tanımlamada yüzey ölçülendirme metodu kullanılmıştır. Yüzey ölçülendirirken aracın bütün yüzeyleri seçilmiştir. Ayrıca daha hassas bir ölçüm için kanalın duvarlarına da yüzey ölçülendirme yapılmıştır. Aracın yüzeyi üzerinde akışın daha doğru çözülmesi için inflation yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca test odasının tamamı body olarak tanımlanmıştır. Ağ yapısı ile ilgili tanımlamalar Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Ağ Yapısı (Mesh) Tanımlamaları

Body sizing - Kanal	10 mm
Face sizing-kanal	2 mm
Face sizing - araba	1 mm
y+	35
Inflation Option	Last Aspect Ratio
Aspect Ratio	3
Maximum Layers	18
Grow rate	1.1
Skewness	0.87
Nodes	1775089
Elements	6711461

Yüzey fonksiyonu; hız, sıcaklık, türbülans parametrelerinin, sınır tabakadaki değerlerini belirleyebilmek için geliştirilmiş matematiksel bir fonksiyon olarak düşünülebilir. Elde edilen değerlerin gerçekçi ve doğru olabilmesi için; yüzeyin, yüzeye en yakın ağın merkezine uzaklığı  $y^+$ ’yi belirleyen boyutsuz değeri  $y^+$ ’ın  $30 < y^+ < 500$  aralığında olması gerekir (Versteeg & Malalasekera 1995). Bu çalışmada  $y^+$  değeri 35 olarak belirlenmiştir. Elde edilen mesh yapısı Şekil 5’te gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Elektrikli Aracın Ağ Yapısı ve Sınır Tabaka Çizgileri

Ağdan bağımsızlığı ölçmek için farklı eleman sayılarında ağ yapıları oluşturulmuş ve analizler bu ağ yapılarıyla tekrar çözülmüştür. Yapılan ağ bağımsızlığı çalışmaları için 23.81 m/s hava hızında 4 farklı analiz yapılmıştır. Eleman sayısı 6711461 ve üzeri olan analizlerde sonucun değişmediği görülmüştür. Analiz sürelerini minimum seviyede tutmak için eleman sayısı 6711461 olan ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ bağımsızlığı ile ilgili yapılan çalışmalar Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Ağdan Bağımsızlığın (Mesh Independence) İncelenmesi

Eleman Sayısı	$F_d$ [N] (Sayısal)	$F_d$ [N] (Deneysel)
5226869	0.44	
6308218	0.39	0.4
6711461	0.4	
7276025	0.4	

Türbülanslı akışlar için; Navier-Stokes denklemi kullanılarak türbülans viskozitesi denklemlerinin çözülmesi gerekir. Türbülans viskozitesi denklemi  $k$  ve  $\epsilon$  gibi iki bilinmeyen terim içerir. Bu terimleri hesaplayabilmek için, iki yeni denkleme ihtiyaç vardır. Bu amaçla; farklı türbülans modelleri geliştirilerek bu bilinmeyenler hesaplanmıştır (Altan, 2006). Bir akışın temel olarak incelenmesi için süreklilik denklemi (Denklem 6) ve momentum denkleminin (Denklem 7), uygun başlangıç ve sınır koşulları ile beraber çözülmesi gerekmektedir (Bayındırlı vd. 2018). Sayısal akışa ait korunum ve türbülans denklemleri aşağıda verilmiştir.

Süreklilik denklemi:

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

(6)

Momentum denkleminin x yönünde bileşeni:

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-\rho + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx}$$

(7)

Momentum denkleminin y yönünde bileşeni:

$$\rho \cdot \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial + \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My}$$

(8)

Momentum denkleminin z yönünde bileşeni:

$$\rho \cdot \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz}$$

(9)

Navier-Stokes denklemleri

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad} \cdot u) + S_{Mx}$$

(10)

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

(11)

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

(12)

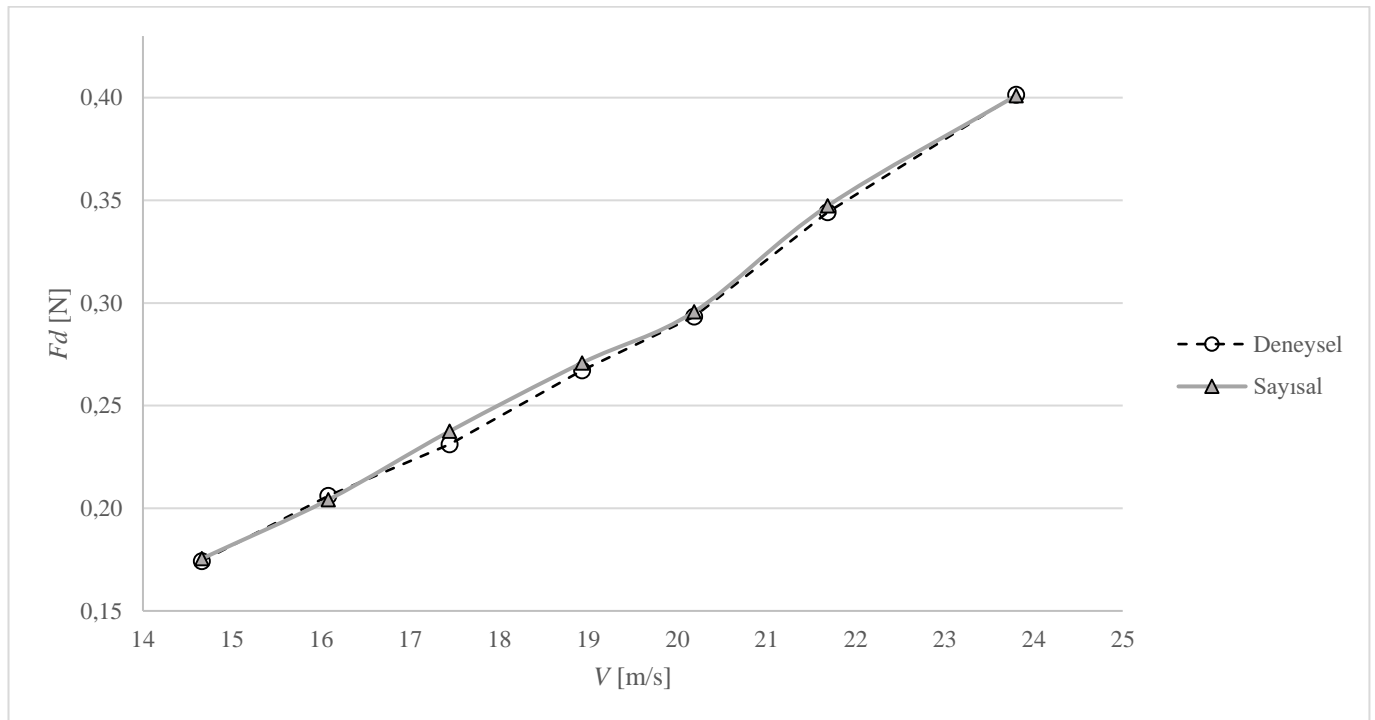
Bu çalışmada; türbülanslı akışın çözümlemesinde  $k$ - $\epsilon$  Realizable türbülans modeli, Scalable Wall Function özelliği ile birlikte çözümlemelerde kullanılmıştır. Sınır hız şartları girişinde  $k$ - $\epsilon$  metodu olarak seçilmiş ve analizin sınır



şartları başlangıç koşulları olarak seçilmiştir. Ayrıca basınç dağılımının uygunluğunu ve kütle korunumunu sağlamak için basınç düzeltmesi çözülmüştür. Basınç ve hız dağılımlarının hesaplanmasına, coupled çözüm algoritması kullanılmıştır.

## BULGULAR

Bu çalışmada TÜBİTAK Efficiency Challenge elektrikli araç yarışmasına katılmak üzere Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi tarafından geliştirilen bir elektrikli aracın aerodinamik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Üretimi yapılan elektrikli araç modeli için KSÜ Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan rüzgâr tüneline 7 farklı hava hızında deney yapılmıştır. Her hava hızı  $V$  için elektrikli aracın üzerine gelen; sürüklenme kuvveti  $F_d$  ölçülmüş, Reynolds sayısı  $Re$  ve sürüklenme katsayısı  $C_d$  hesaplanmıştır. Elektrikli araç modelinin sürüklenme kuvveti  $F_d$  hava hızı  $V$  grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Elektrikli Aracın Sürüklenme Kuvvetinin  $F_d$  Hava Hızına  $V$  Göre Değişimi

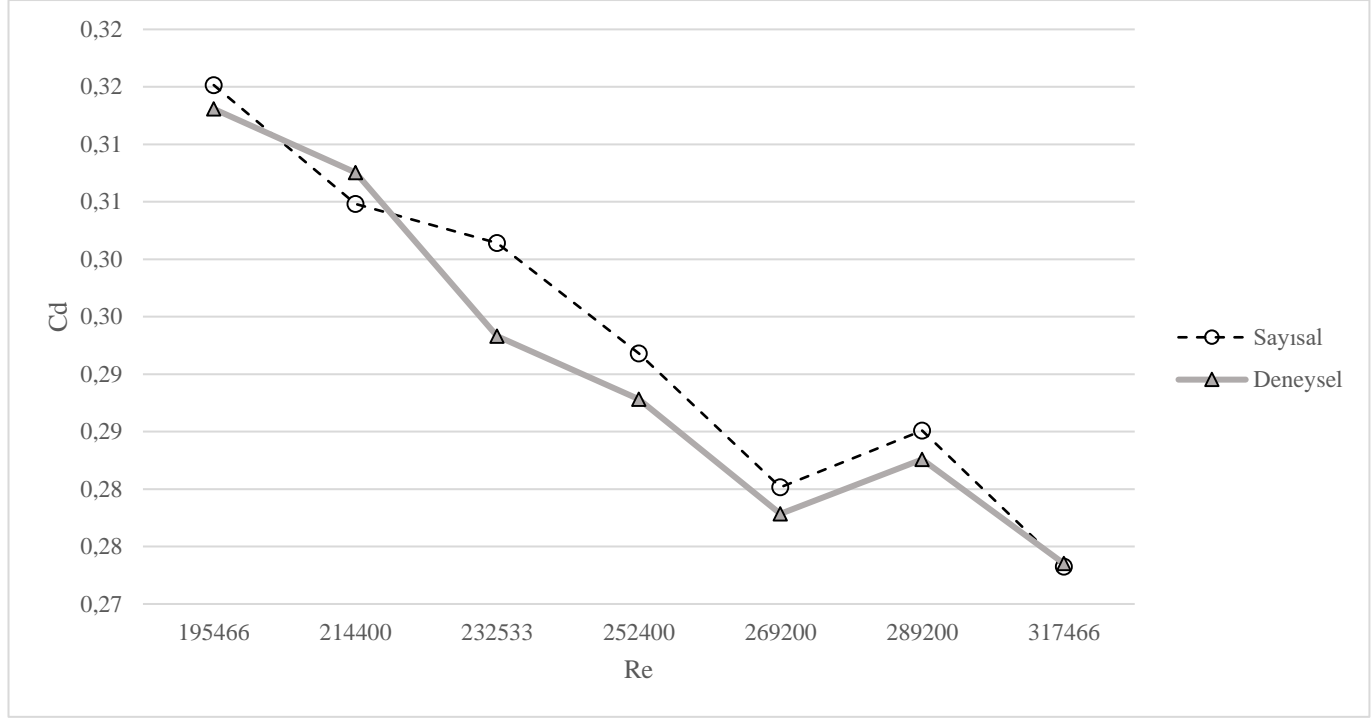
Yapılan deneysel ve sayısal analizlerde hava hızı arttıkça sürüklenme kuvvetleri  $F_d$  artış göstermiştir. Farklı fan kademelerinde yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların sürüklenme kuvveti  $F_d$  sonuçları karşılaştırıldığında en büyük hata oranının %2.69 olduğu belirlenmiştir. Elektrikli araç modelinin farklı hava hızları için gerçekleştirilen analizlerin hata oranları Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Elektrikli Aracın Deneysel ve Sayısal Sürüklenme Kuvvetleri ve Hata Oranı

Deney Düzeneği Kademe No	Hava hızı m/s	Deneysel $F_d$	Sayısal $F_d$	Hata oranı %
9	14.66	0.1743	0.17544	0.66
10	16.08	0.2060	0.20416	0.90
11	17.44	0.2311	0.2375	2.69
12	18.93	0.2671	0.27083	1.36
13	20.19	0.2933	0.29578	0.83

14	21.69	0.3443	0.34732	0.87
15	23.81	0.4014	0.40102	0.10

Deneysel çalışmalarda hava hızının 14.66 m/s'den 23.81 m/s'ye çıkartılmasıyla sürüklenme kuvveti  $F_d$  yaklaşık %130 oranında artış göstermiştir. Elektrikli araç modelinin farklı hava hızları için Reynolds sayısına  $Re$  bağlı olarak sürüklenme katsayısı  $C_d$  grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 8. Elektrikli Aracın Sürüklenme Katsayısının  $C_d$  Reynolds Sayısına  $Re$  Göre Değişimi

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda Reynolds sayısı  $Re$  arttıkça sürüklenme katsayısının  $C_d$  azaldığı belirlenmiştir. Farklı Reynolds değerlerinde yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların sürüklenme katsayısı  $C_d$  sonuçları karşılaştırıldığında Reynolds sayısının  $Re=317466$  olduğu bölgede en düşük sürüklenme katsayısının  $C_d=0.2732362$  olduğu belirlenmiştir. Elektrikli araç modelinin farklı Reynolds değerleri  $Re$  için deneysel ve sayısal olarak hesaplanan sürüklenme katsayısı  $C_d$  sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Elektrikli Aracın Reynolds Sayısına  $Re$  Bağlı Olarak Hesaplanan Deneysel ve Sayısal Sürüklenme Katsayıları

Reynolds değeri $Re$	Deneysel $C_d$	Sayısal $C_d$
195466	0.313077362	0.3151509
214400	0.307551117	0.3048041
232533	0.293306471	0.3014147
252400	0.287820313	0.2917928
269200	0.277837082	0.2801545
289200	0.282584635	0.2850751

317466

0.273514596

0.2732362

Deneysel çalışmalarda Reynolds sayısının  $Re$  195466'dan 317366'ya çıkartılmasıyla sürüklenme katsayısının  $C_d$  %12.7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalarda en düşük sürüklenme katsayısı  $C_d$  değeri olan 0.273 değeri blokaj etkileri hesaba katıldığında 0.227882 olarak hesaplanmıştır.

Literatürde bir aracın sürüklenme katsayısının incelenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar yapılmıştır. Benzer hızlarda yapılan çalışmalar incelendiğinde: Gebel vd. (2018) bir elektrikli aracın sürüklenme katsayısını  $C_d$  incelemiş ve 0.39 bulmuşlardır. Gören vd. (2019) elektrikli bir aracın jant kağının aracın sürüklenme katsayısına olan etkisini incelemiş ve sürüklenme kuvvetinin  $C_d$  0.26'dan 0.24'e düştüğünü tespit etmişlerdir. Scurtu vd. (2019) elektrikli bir aracın performansı üzerine yaptıkları çalışmada sürüklenme katsayısını  $C_d$  0.3 olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada ise sürüklenme katsayısı  $C_d$  0.227882 olarak bulunmuştur.

## SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada TÜBİTAK Efficiency Challenge elektrikli araç yarışmasına katılmak üzere Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi tarafından geliştirilen bir elektrikli aracın aerodinamik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Hava hızı arttıkça elektrikli araç üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti  $F_d$  artmıştır.
2. Reynolds sayısı  $Re$  arttıkça sürüklenme katsayısı  $C_d$  azalmıştır.
3. Deneysel ve sayısal çalışmalarda sürüklenme kuvvetleri  $F_d$  ve sürüklenme katsayıları  $C_d$  büyük oranda örtüşmüş ve en büyük hata oranının %2.69 olduğu tespit edilmiştir.
4. En iyi  $C_d$  sürüklenme katsayısı olan 0.273 değeri blokaj etkisi ile düzenlendiğinde 0.227882'ye düşmüştür.

Farklı hava hızlarında elektrikli bir aracın performansının incelendiği bu çalışmada deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Aerodinamiği iyileştirilmiş genel binek bir araç için ortalama 0.25 olan sürüklenme katsayısının altında bir değer elde edilmiştir ( $C_d=0.227882$ ).

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi 2016/5-73 ve 2017/7-195A numaralı projeler ve TÜBİTAK 217M865 numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Çalışmamıza verdikleri destek için ilgili kurumlara teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- Aka, H. Y. (2003). Otomobillerin Aerodinamik Karakteristiğinin Bir Rüzgâr Tünelinde İncelenmesi ( Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara). Erişim adresi: <http://www.metroloji-okulu.com.tr/tez/tez.htm>
- Bayındırlı, C., Akansu, Y. E., & Salman, M. S. (2016). The Determination of Aerodynamic Drag Coefficient of Truck and Trailer Model by Wind Tunnel Tests. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2, 53-60.
- Bayındırlı, C., Çelik, M., Demiralp, M., (2018), Bir Otobüs Modeli Etrafındaki Akış Yapısının CFD Yöntemi İle İncelenmesi Ve Sürüklenme Kuvvetinin Pasif Akış Kontrol Yöntemi İle İyileştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(4), 785-795.
- Cağan, M. (2000). Taşıt Aerodinamik Özelliklerinin Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul). Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11527/10720>
- Çengel, Y.A., Cimbala, J.M. (2012). Akışkanlar Mekaniği Temelleri Ve Uygulamaları, *Nobel Matbaacılık*, İstanbul.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2012). Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla, *İzmir Güven Yayınevi*, İstanbul.

Deda, B. (2006). Perdeleme Yöntemi İle Savonius Rüzgâr Çarkının Performansının İncelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi*, Denizli.

Dhande, D., & Bauskar, M. ( 2013). Analysis of Aerodynamic Aspects of SUV by Analytical and Experimental Method. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 7, 447-451.

Desai, M., Channiwala, S.A., Nagarsheth, H.J. ( 2003). Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car. *Wseas Transactions on Fluid Mechanics*, 3, 359-367.

Gebel, M.E, Önalı, S., Korkmaz, S. Osmanođlu S., Özçelik, B., Ermurat. M., İmal. M., (2018). Bir Elektrikli Aracın Aerodinamik Özelliklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. *International Automotive Technologies Congress, OTEKON*.

Hucho, W. H. (1998). Aerodynamics of Road Vehicles 4th Edition. *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, Pa.

İpci, D., Yılmaz, E., Aysal, F. E., & Solmaz, H. (2015). Bir Kara Taşıt Modeli Etrafındaki Akış Yapısının Sayısal Olarak İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 51-64.

Scurtu, L., Jurko, A., Borza, E. V., Mariasiu, F., Vlad, N., Morariu, S. (2019), Aerodinamic Study Of An Electric Vehicle Prototype, 30th SIAR International Congress Of Automotive and Transport Engineering

URL1, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu. 'Efficiency Challenge 2020 Etkinlik Kitapçığı'. <https://challenge.tubitak.gov.tr/kurallar.html> Son erişim tarihi 05.03.2020

URL 2, Türk Kimya Sanayi Haber Portalı, 'Elektrikli Otomobillerde Kompozit Jant Kapağı Kullanımının Aerodinamik Etkisi-2'. <http://www.turkchem.net/elektrikli-otomobillerde-kompozit-jant-kapagi-kullaniminin-aerodinamik-etkisi-2.html> Son erişim tarihi 05.03.2020

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method, *Longman Group Ltd.*, Malaysia.

Vdovin, A. (2013). Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars (Lisans Tezi, Chalmers University Of Technology, Sweden). Erişim adresi: <https://www.semanticscholar.org/paper/Investigation-of-Aerodynamic-Resistance-of-Rotating-Vdovin/3c2f5bd8d30d7a05597743a3b5156cc49ed0823d#citing-papers>  
<https://core.ac.uk/download/pdf/70600281.pdf>