

## Determining the Aerodynamic Characteristics of Different Geometries in Low Speed Wind Tunnel

Muhammed Enes Kuyumcu,

Department of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 46100,  
Kahramanmaraş, Turkey, m.enes.kuyumcu@gmail.com

Hakan Oral,

Department of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 46100,  
Kahramanmaraş, Turkey

Muharrem Imal,

Department of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 46100,  
Kahramanmaraş, Turkey

Ahmet Kaya

Department of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 46100,  
Kahramanmaraş, Turkey

### Abstract

In this study, the aerodynamic characteristics ( $F_d$ ,  $F_l$ ,  $C_d$ ,  $C_l$ ) for models in 9 different geometry have been determined experimentally. In order to determine aerodynamic coefficients depending on drag and lift force for each geometry, open circuit and suction type wind tunnel has been used. Wind tunnel test section has 20 cm x 21 cm cross section and 48 cm length, and maximum air flow velocity is 12.5 m/s. The experiments have been performed at different air flow velocity for each model. The variation of drag and lift force with air velocity, and the variation of aerodynamic coefficients with Reynolds number have been investigated for models. The change in geometry that the effects on the drag and lift forces and aerodynamic coefficients have been determined. Because of the lower air flow velocity of the studied wind tunnel, low Reynolds values has been achieved. For this reason, the higher capacity wind tunnel has been needed for obtain stable aerodynamic coefficient values.

**Keywords:** Aerodynamic characteristics, Drag force, Lift force, Reynolds number.

## Düşük Hızlı Rüzgâr Tünelinde Farklı Geometrilerin Aerodinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

### Özet

Bu çalışmada, 9 farklı geometrideki modeller için aerodinamik karakteristikler ( $F_d$ ,  $F_l$ ,  $C_d$ ,  $C_l$ ) deneysel olarak belirlenmiştir. Her bir geometri için aerodinamik katsayılarını sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerine bağlı olarak belirlemek amacıyla, açık devreli ve emişli tip rüzgâr tüneli kullanılmıştır. Rüzgâr tünelinin test bölümü 20 cm x 21 cm kesite ve 48 cm uzunluğa sahiptir ve maksimum hava akış hızı 12,5 m/s'dir. Deneysel her model için farklı hava akış hızlarında yapılmıştır. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin hava hızıyla ve aerodinamik katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimleri modeller için incelenmiştir. Geometrideki değişimin kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ve aerodinamik katsayılarına etkilerinin olduğu belirlenmiştir. Çalışılan rüzgâr tünelinin düşük hava akış hızı sebebi ile düşük Reynolds değerlerine ulaşılmıştır. Bu

nedenden kararlı aerodinamik katsayısı değerlerini elde etmek için daha yüksek kapasiteli rüzgâr tüneline ihtiyaç duyulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Aerodinamik karakteristikler, Sürüklenme kuvveti, Kaldırma kuvveti, Reynolds sayısı.

## 1. Giriş

İçinde yaşadığımız teknolojik çağda teorik bilgilerin deneysel verilerle desteklenmesi çok önemli bir yer tutmaktadır. Yol deneyleri gibi gerçek koşullarda yapılan deneyler aerodinamik incelemelerde önemli bir yer tutmaktadır. Buna karşın gerçek boyutlardaki prototipe ve donanımına sahip olma, deney donanımının prototipler arasında taşınma mecburiyeti ve bundan kaynaklı maliyet artışları, müdahale edilemeyen çevre koşullarındaki değişiklikler ve dolayısıyla deney hassasiyetinde yaşanan kayıplar gibi olumsuzluklar karşısında yirminci yüzyıl başlarıyla birlikte rüzgâr tünelleri kullanılmaya başlanmıştır(Demircioğlu, 2007).

Rüzgâr tünelleri, sabitlenmiş çeşitli şekil ve boyutlardaki cisimler üzerinden geçirilen hava akımı neticesinde cisimler üzerinde meydana gelecek olan aerodinamik değişimlerin gözlemlendiği, incelenip test edildiği deney düzenekleridir. Temel olarak durgun hava içerisinde aynı hızda hareket eden bir cisme etki eden kuvvet ile durgun cisme akan hava akımının etkisi ile vereceği etki aynı neticeleri sağlayacağından bu ikisi arasında prensip olarak herhangi bir fark yoktur. Sürüklenme, kaldırma, basınç gibi tüm aerodinamik kuvvetler cisim ile havanın birbirlerine göre bağlı hızlarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden rüzgâr tüneli deneylerinde cisimlerin aerodinamik karakteristikleri ölçülürken cisim sabit tutularak havaya gerekli akım kuvveti sağlanarak hem daha kolay uygulanabilirlik hem daha az maliyetlerle cisimlere etki eden kuvvet ve momentler hesap edilebilmektedir(Demircioğlu, 2007).

Aerodinamik kuvvetlerin belirlenebilmesi için literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

Aka (2003), bu çalışmasında, test bölgesindeki kesiti 300x300 mm olan bir rüzgâr tüneline, bir binek otomobilinin 1/16 ölçekli modeli üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Bunun için bir kuvvet ölçüm düzeneği tasarlanmış ve kurmuştur. Düzenekteki 3 adet yaprak tip yük hücresi ile simetrik akış koşullarında model üzerindeki sürüklenme direnci kuvveti ve kaldırma kuvvetleri ölçülmüş ve yunuslama momenti belirlenmiştir. Ayrıca, basınç dağılımını belirlemek için, model dış yüzeylerine dik açılan küçük deliklere bağlı bir mikro-manometre kullanmıştır. Modelin aerodinamik karakteristiğini gösteren boyutsuz katsayıların hesaplanmasından sonra, ölçümlerdeki belirsizlikler sayısal olarak incelemiş ve sonuçların bu oranda tekrarlanabilir olduğu göstermiştir. Son olarak yöntemin otomobil aerodinamik karakteristiğinin belirlenmesi ve iyileştirmesi konusundaki çalışmalarda uygulanabilir olduğu göstermiştir(Aka, 2003).

Golkhe ve ark. (2007), basitleştirilmiş bir araç modeli üzerine yanal olarak gelen rüzgârın etkilerini incelemişlerdir. Bunun için rüzgâr tüneline basitleştirilmiş modeli 0°, 10°, 20° ve 30°'lik açılar altında test etmişlerdir. Aynı zamanda model üzerinde rüzgârın direkt olarak geldiği ve gelmediği yan yüzeylerdeki akış yapısını incelemişlerdir. Araca yanal bir rüzgârın etki etmesi sırasında taşıt kararlılığının korunabilmesi için rüzgârın gelmediği tarafta aracın alt kısımlarına doğru oluşan türbülansların özellikle arka kısmına doğru taşıt yüzeyinden ayrılmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunun özellikle büyük yanal açılarda araca etkiyen yanal momente karşı bir kuvvet oluşturacağını söylemişlerdir(Golkhe ve ark., 2007).

Kataoka ve ark. (2008), Mitsubishi Lancer Evolution X modeli için aerodinamik yapıyı iyileştirmek için çalışmışlardır. Hem sürüklenme direnci katsayısını iyileştirmeyi hem de sürüş kararlılığına etkisi olan kaldırma kuvveti katsayısının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Arka spoiler ve ön tamponda yapılan tasarım değişiklikleri ile sürüklenme direnç katsayısı, kaldırma kuvveti katsayısı, ve motor soğutma etkinliğinde iyileşmeler belirlenmiştir(Kataoka ve ark., 2008).

Aider ve ark. (2009), basitleştirilmiş bir araç modeli olan Ahmed Model üzerinde arka girdap bölgesinde akış ayrılması ve türbülansı kontrol ederek sürüklenme direnci katsayısı ve kaldırma kuvveti katsayısını azaltmayı hedeflemişlerdir. Arka kısımda kullandıkları ikizkenar yamuk şeklindeki bıçaklarla sürüklenme direnç katsayısında % 12 kaldırma kuvveti katsayısında % 60 oranında azalma saptamışlardır(Aider ve ark., 2009).

Pujals ve ark. (2010), aerodinamik sürüklenme direnci katsayısını azaltmayı hedefleyerek Ahmed model

üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Aracın arka kısmında meydana gelen akış ayrılmasını geciktirmek için tavan kısmına girdap yaratıcı yerleştirmişlerdir. Ancak diğer çalışmalardan farklı olarak üçgen, eşkenar yamuk yada tamamen küt bir girdap yaratıcı yerine, silindirik girdap yaratıcıyı tavan boyunca enine yerleştirmişlerdir. Yapışkan akış çizgileri olarak adlandırdıkları bu yöntemle sürüklenme direnç katsayısında % 10 azalma kaydetmişlerdir(Pujals ve ark., 2010).

İçingür ve Solmaz (2011), Reynolds sayısı bağımsızlığından yararlanarak üç değişik aracın aerodinamik direnç katsayılarını hesaplamışlardır. Testlerini maksimum 28 m/s olan bir rüzgâr tüneline gerçekleştirmişlerdir. Testler sonucunda Reynold sayısı bağımsızlığının bütün modeller için geçerli olmadığını tespit etmişlerdir (İçingür ve Solmaz, 2011).

Bu çalışmada, maksimum hızı 12,5 m/s olan açık devreli ve emişli tip rüzgâr tüneli kullanılarak farklı geometrilerdeki 9 model deneysel olarak test edilmiş ve sürüklenme, kaldırma kuvvetleri ile aerodinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Bulunan sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin hava hızıyla, boyutsuz sürüklenme ve kaldırma katsayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile olan değişimleri incelenmiştir. Her bir model için deneyler üçer defa tekrar edilmiş ve ortalama değerleri alınmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1 Aerodinamik karakteristikler

Çevresinde dış hava akımı olan cisimler üzerinde aerodinamik kuvvetler oluşur. Bu cisimler için aerodinamik karakteristikler boyutsuz sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) ve kaldırma katsayısı ( $C_l$ ) şeklinde ifade edilirler. Bir cismin dış geometrik formu sebebiyle hava akışının cisim üzerinde akış yönünde uyguladığı sürüklenme kuvveti ( $F_d$ ) sonucu boyutsuz sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) değeri ortaya çıkar ve Denklem 1'deki şekilde hesaplanır (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (1)$$

Aynı şekilde akışa dik yönde uyguladığı kaldırma kuvveti ( $F_l$ ) sonucu boyutsuz kaldırma katsayısı ( $C_l$ ) ortaya çıkar ve Denklem 2'deki şekilde hesaplanır (Çengel ve Cimbala, 2008).

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2)$$

Burada,  $F_d$  sürüklenme kuvvetini,  $F_l$  kaldırma kuvvetini,  $\rho$  havanın yoğunluğunu,  $V$  hava akış hızını ve  $A$  karakteristik alanı ifade etmektedir.

Aerodinamik karakteristiklerin büyüklüğü bir cismin dış geometrik formuna bağlı olarak değişir. Boyutsuz sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) değeri küçüldükçe cisimlerin hava direncini yenmek için harcayacağı enerji miktarı da küçüleceğinden enerji sarfiyatında önemli bir azalma gözlenecektir (Demircioğlu, 2007).

Çoğu geometride yüksek Reynolds sayılarında sürüklenme katsayısı sabit kalır. Ancak özellikle  $10^4$ 'ten düşük Reynolds sayılarında sürüklenme katsayısı Reynolds sayısına bağlıdır (Çengel ve Cimbala, 2008). Dış akışta Reynolds sayısı Denklem 3'deki şekilde hesaplanır.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3)$$

Burada,  $\rho$  havanın yoğunluğunu,  $V$  hava akış hızını,  $L$  karakteristik uzunluğu ve  $\mu$  dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.

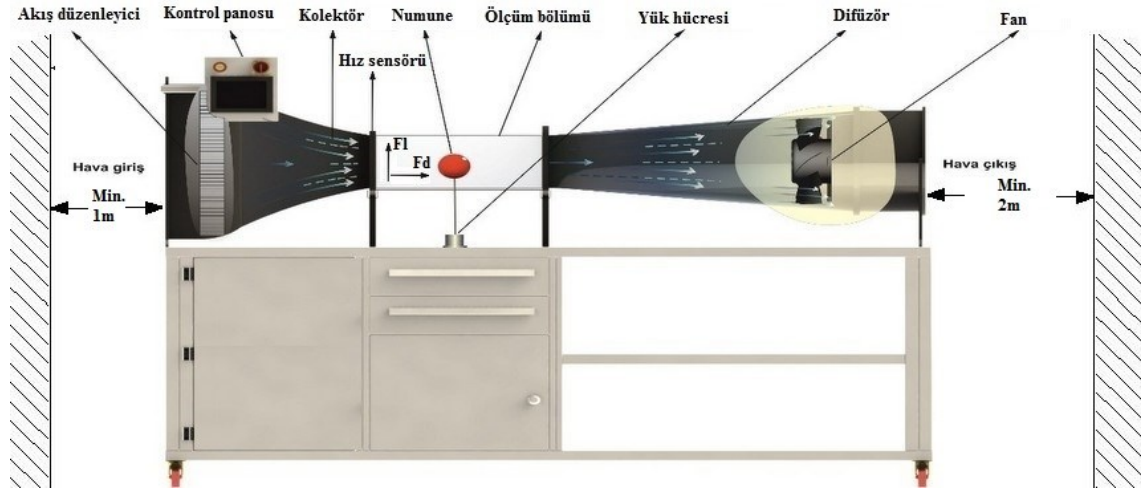
## 2.2 Deneysel çalışmalar

### 2.2.1 Modellerin tanımı

Bu çalışmada test işlemleri için Tablo 1’de gösterilen dokuz farklı geometrideki şekle sahip modeller kullanılmıştır. Bu modellerin seçilmesinin nedeni gündelik hayatta en sık karşılaşılan geometrik şekillere olan benzerlikleridir.

### 2.2.2 Rüzgâr tüneli

Bu deneysel çalışmada Şekil 1’de gösterilen Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan ve teknik özellikleri Tablo 3’te verilen açık devreli ve emişli tip rüzgâr tüneli kullanılmıştır. Bu tip hava tünellerinde hava atmosferden alınır ve yine atmosfere verilir. Rüzgâr tünelinin test bölgesi 20 cm x 21 cm kesite ve 48 cm uzunluğa sahip olup toplam uzunluğu 2,4 m’dir. Tüneldeki hava akışı difüzörden sonra yerleştirilen frekans dönüştürücü hız kontrolü aksiyel fan vasıtasıyla sağlanır ve hava girişi emiş yönündendir. Test bölgesindeki en yüksek serbest akış hızı 12,5 m/s olarak ölçülmüştür. Rüzgâr tüneline nominal performans elde etmek için Şekil 1’deki gibi hava giriş tarafının en az 1m ve hava çıkış tarafının da en az 2m önünde hava giriş ve çıkışını engelleyebilecek duvar yada herhangi bir cismin bulunmaması gerekmektedir (İçingür ve Solmaz, 2011).



Şekil 1. Rüzgâr tünelinin şematik gösterimi.

Tünelin hava giriş tarafında hava hareketini düzenleyen akış düzenleyicisi bulunmaktadır. Akış düzenleyicisinden sonra hava kapalı ölçüm bölümündeki hızın kararlı dağıtılmasını kontrol altına almak için kolektörden geçirilir. Tüneldeki havanın akış hızı, Lcd dokunmatik kontrol ünitesindeki Şekil 2’de gösterilen fan kontrol menüsünden aksiyel fanın elektrik motorunun frekansının yüzdelik oranlarda artırılıp azaltılmasıyla hassas bir şekilde kontrol edilmektedir. Hava akış hızı rüzgâr tüneli test bölgesinin hemen önüne monte edilmiş sıcak telli hız sensörü ile ölçülerek Lcd dokunmatik kontrol ünitesinden okunmaktadır.

Modeller üzerine etki eden kuvvetlerin ölçümü için rüzgâr tüneli üzerine takılabilen kaldırma ve sürüklenme kuvvetini ölçen iki ayrı yük hücresi kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kaldırma kuvvetini ölçen yük hücresi 3N’a kadar ve sürüklenme kuvvetini ölçen yük hücresi 10N’a kadar ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 2. Rüzgar tüneli kontrol menüsü.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan modeller.

 1) Kare Plaka	 2) Dikdörtgen Plaka	 3) Dairesel Disk
 4) Dairesel Halka	 5) Silindir	 6) Küre
 7) Yarım Küre	 8) Parabolaid	 9) Dairesel Konkav

**Tablo 2.** Modellerin karakteristik özellikleri.

<b>Model Adı</b>	<b>Karakteristik Alan (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Karakteristik Uzunluk (m)</b>
1) Kare Plaka	0,00360	0,01
2) Dikdörtgen Plaka	0,00180	0,01
3) Dairesel Disk	0,00283	0,01
4) Dairesel Halka	0,00212	0,01
5) Silindir	0,00180	0,03
6) Küre	0,00283	0,06
7) Yarım Küre	0,00283	0,03
8) Parabolaid	0,00283	0,06
9) Dairesel Konkav	0,00283	0,06

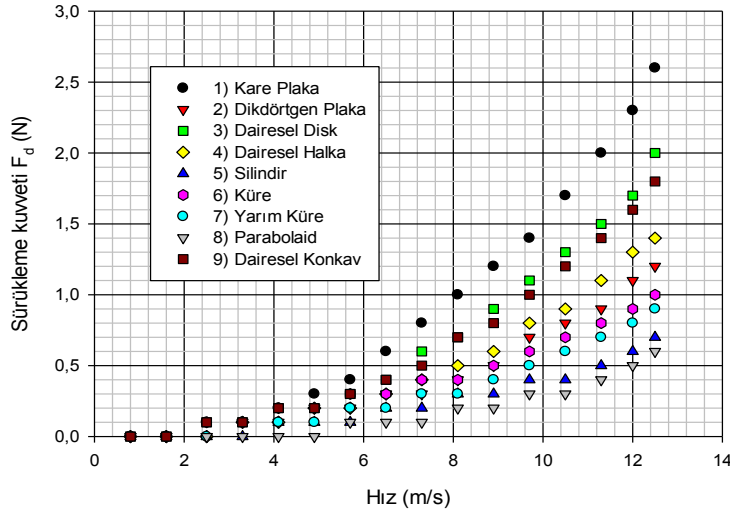
**Tablo 3.** Rüzgâr tünelinin teknik özellikleri.

<b>Parça Adı</b>	<b>Özelliği</b>
Load cell modülü	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

### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu deneysel çalışmada farklı geometrilerdeki 9 model için rüzgar tüneli test bölgesinde 0,8-12,5 m/s hız aralığında hava akımı karşısındaki sürükleme ( $F_d$ ) ve kaldırma ( $F_l$ ) kuvvetleri değerleri elde edilmiştir ve bu verilere bağlı olarak boyutsuz sürükleme ( $C_d$ ) ve kaldırma ( $C_l$ ) katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra bu verilerin hava hızı ve Reynolds sayısı ile olan ilişkileri irdelenmiştir. Bu deneylerde aksiyel fanın elektrik motorunun frekansı % 5 artırılarak 0,8-12,5 m/s hız aralığında elde edilen değerler üçer defa tekrar edilerek ortalamaları alınmıştır. Elde edilen ortalama değerlerin ve bu değerlerden elde edilen aerodinamik karakteristik değerlerinin hız ve Reynolds sayısına bağlı dağılımları verilmiştir.

Sürükleme kuvvetine etkiyen değişkenler havanın yoğunluğu ve hızı ile kullanılmış olan modelin karakteristik alanıdır. Deneyde kullanılmış olan açık devreli rüzgar tüneli atmosferik şartlarda olduğundan havanın yoğunluğunda test sürecinde herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Modellerin karakteristik alanlarının da sabit olması sebebiyle sürükleme kuvveti değeri yalnızca hava hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



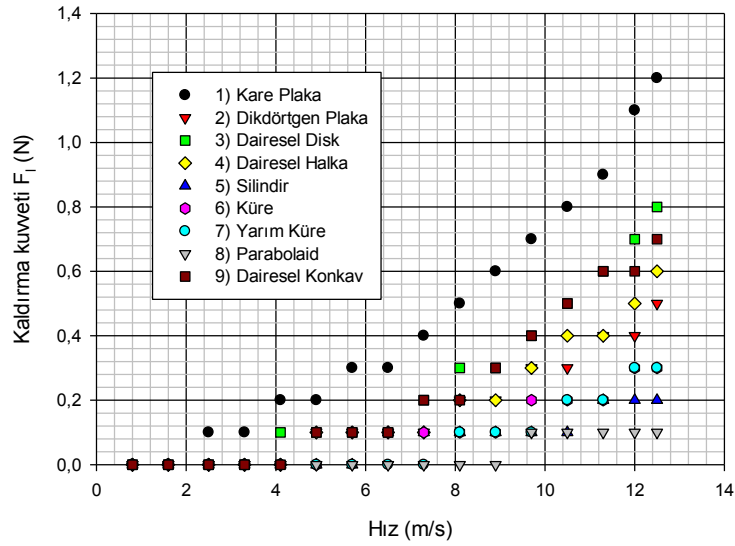
Şekil 3. Sürüklenme kuvvetinin rüzgar hızına bağlı olarak değişimi.

Şekil 3'te sürüklenme kuvveti değerinin rüzgâr hızına bağlı değişimi verilmiştir. Grafikteki değerler üç farklı deney sonucunda elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sürüklenme kuvveti değerleri hava hızı arttıkça artmaktadır. Sürüklenme kuvvetindeki en fazla artışın kare plaka modelinde olduğu tespit edilmiştir. Kare plaka modelini dairesel disk ve dairesel konkav modelleri izlemiştir. Sürüklenme kuvvetine en az maruz kalan model ise paraboloid modeli olmuştur. Bu modeli de silindir ve yarım küre modelleri takip etmiştir. Kare plaka modelinin sürüklenme kuvvetine en fazla maruz kalan geometri olmasının temel sebebi, bu plakanın sahip olduğu karakteristik alanın diğerlerinden daha büyük olmasıdır. Ayrıca bu modelin oldukça küt bir yapıya sahip olması hava akımının cismin yüzeyine oldukça sert olarak çarparak keskin bir şekilde ayrılıp akış bozulmasıyla sürüklenme kuvvetini arttırmaktadır. Dış geometri itibari ile cisim ne derece az akış bozulmasına sebep olursa sürüklenme kuvveti de o derece az olur (İçingür ve Solmaz, 2011). Paraboloid modeline sürüklenme kuvvetinin en az şekilde etkimesinin temel sebebi ise bu modelin yağmur damlası formuna benzer olmasındandır. Yapılan deneysel çalışmalarda da yağmur damlası formuna benzeyen paraboloid geometride en düşük sürüklenme kuvveti değeri elde edilmiştir. Bu sebeple sürüklenme kuvvetine en fazla maruz kalan araçlardan olan uçakların kanat yapıları tasarlanırken yağmur formu esas alınmaktadır. Zira bu form sayesinde hava akımı, modele küt bir şekilde çarpmamakta, model yüzeyini takip ederek yüzeyden üniform bir şekilde ayrılmaktadır.

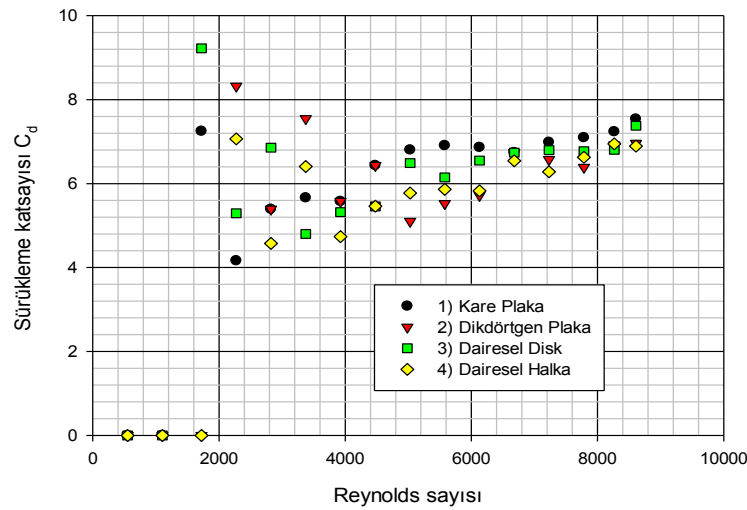
Şekil 4'te kaldırma kuvvetinin hava akış hızına göre değişimi gösterilmiştir. Sürüklenme kuvvetinde olduğu gibi kaldırma kuvvetinin de hızın yükselmesiyle arttığı görülmektedir. Ancak sürüklenme ve kaldırma kuvvet değerleri göz önüne alındığında sürüklenme kuvveti değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu ise aerodinamik karakteristiğinin belirlenirken asıl etkenin sürüklenme kuvveti olduğunu ortaya koymakta ve bu sonucun şu ana kadar yapılmış olan çalışmaları desteklediği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kaldırma kuvvetinin en fazla kare plakayı, en az paraboloid plakayı etkilediği görülmektedir. Kare plakanın hem küt yapıya sahip olması hem de en büyük karakteristik alana sahip olması, kaldırma kuvvetinin bu modelde en yüksek değerde çıkmasına sebep olmuştur. Modelin altındaki çeşitli girinti-çıkıntılar veya keskin köşeli kenarlar, modelin alt ve üst bölgesi arasında statik basınç farkına sebep olacak ve bu durumda aerodinamik kaldırma kuvvetinin model üzerindeki etkisinin belirgin bir biçimde gözlemlenmesine sebebiyet verecektir (Demircioğlu, 2007). Bu durum kare plakada en fazla, paraboloid modelde ise en az olduğundan kaldırma kuvvetinin kare plakaya en fazla, paraboloid modele ise en az etki edeceği görülmektedir.

Modellere etkileyen sürüklenme kuvvetlerinin tek başına bilinmesi o modele ait aerodinamik karakteristiği tam olarak belirlemede yeterli olmayabilir. Çünkü farklı boyut ve hızlardaki cisimlere etkileyen kuvvetler farklı

farklı olacağından bu modellere etkiyen sürüklenme kuvvetlerini karşılaştırmak her zaman doğru sonuçlar vermeyebilir. Bu sebeple bu modeller hız ve boyutlardan bağımsız olan boyutsuz katsayılarla karşılaştırılarak verilmelidir. Şekil 5'te boyutsuz sürüklenme katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 0,8-12,5 m/s hız aralığında Reynolds sayıları  $10^4$ ' ten küçük olduğu için bu modellerin sürüklenme katsayıları ( $C_d$ ), Reynolds sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple Reynolds bağımsızlığı elde edilememiş olup kararsız bir dağılım gözlenmiştir. Düşük Reynolds sayılarındaki bu kararsızlığın temel nedeni düşük hızlarda akış yapısının çok fazla bozulmaması ve dolayısıyla akış ayrılmasının hemen gerçekleşmemesidir (İçingür ve Solmaz, 2011). Daha yüksek hızlara ulaşıldığında grafik kararlı eğilime girmiştir ancak net olarak kararlılık durumu gözlenmemiştir.

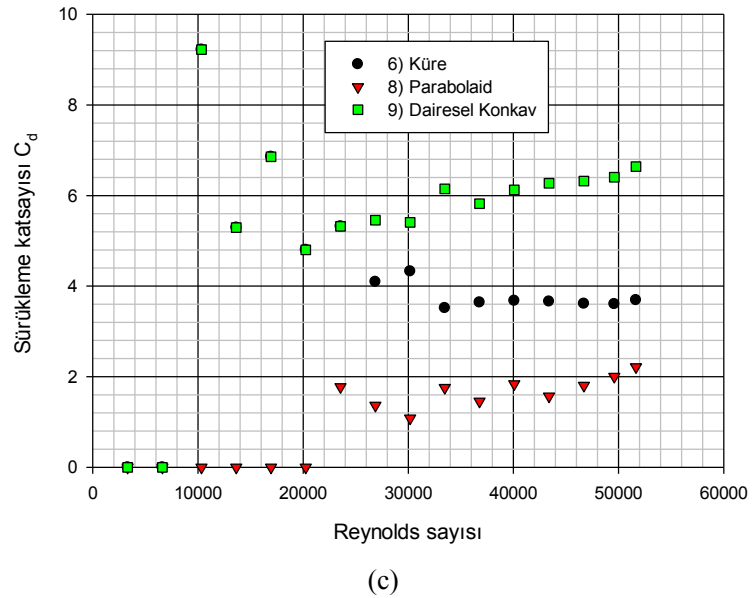
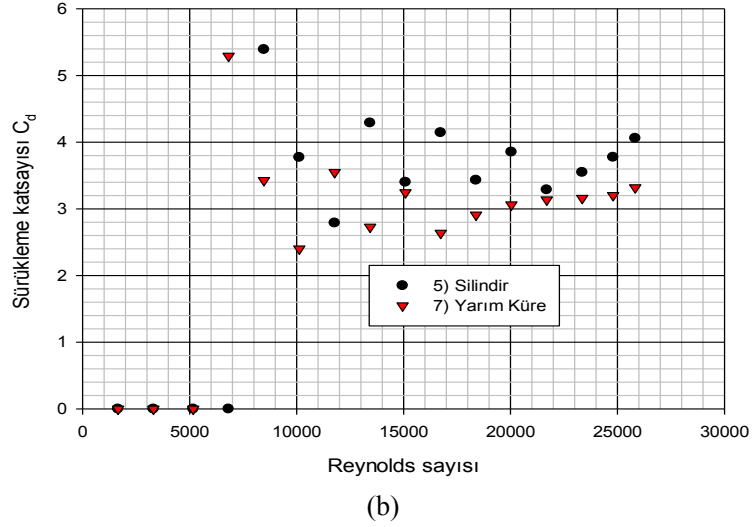


Şekil 4. Kaldırma kuvvetinin rüzgar hızına bağlı olarak değişimi



(a)





Şekil 5. Sürüklenme katsayılarının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi.

Şekil 5a'da karakteristik uzunlukları düşük olan 4 geometri için sürüklenme katsayısı ( $C_d$ )- Reynolds sayısı için değerler verilmiştir. 4 geometri için Reynolds 550-8500 aralığında belirlenmiştir. Şekilden görüldüğü gibi küçük Reynolds sayılarından dolayı kararsız bir durum görülmüştür. Reynolds değeri 4000'den sonra kararlı bir artış gözlemlenmiştir. Ancak Reynolds bağımsızlığı elde edilememiştir.

Şekil 5b'de 2 farklı geometri için sürüklenme katsayısı ( $C_d$ )- Reynolds sayısı grafiği verilmiştir. Bu iki geometri için Reynolds değerleri 5500-25500 aralığında tespit edilmiştir. Reynolds değeri 20000 değerine kadar  $C_d$  değerinde kararsızlıklar görülmüştür. Ancak bu değerden sonra kararlı bir artış eğilimi belirlenmiştir. Ancak burada da Reynolds bağımsızlığına ulaşılamamıştır.

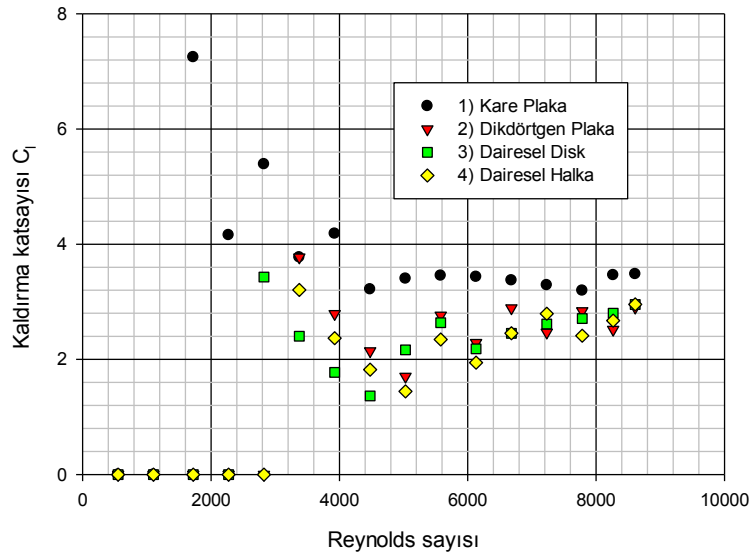
Şekil 5c'de karakteristik uzunluğu en büyük olan 3 geometrinin Reynolds sayısı- Sürüklenme katsayısı değişimi tespit edilmiştir. Bu 3 farklı geometri için Re 30000 değerine kadar kararsızlıklar görülmesine rağmen, bu değerden daha büyük değerler için özellikle küre modeli için oldukça kararlı bir eğilim tespit edilmiştir. Ancak bu durumun tam olarak tespit edilebilmesi için daha yüksek Reynolds sayılarına çıkılması gerekmektedir. Diğer iki model için ise yine kararlı duruma geçiş eğilimi belirlenmiştir.

Şekil 6a'da 4 farklı geometri için kaldırma katsayısı- Reynolds değişimi verilmiştir. Düşük Reynolds sayılarında oldukça değişken değerlere ulaşıldığı halde Reynolds sayısının 6000 değerini geçmesi ile birlikte 4 geometri için de daha kararlı  $C_1$  değerleri okunmuştur.

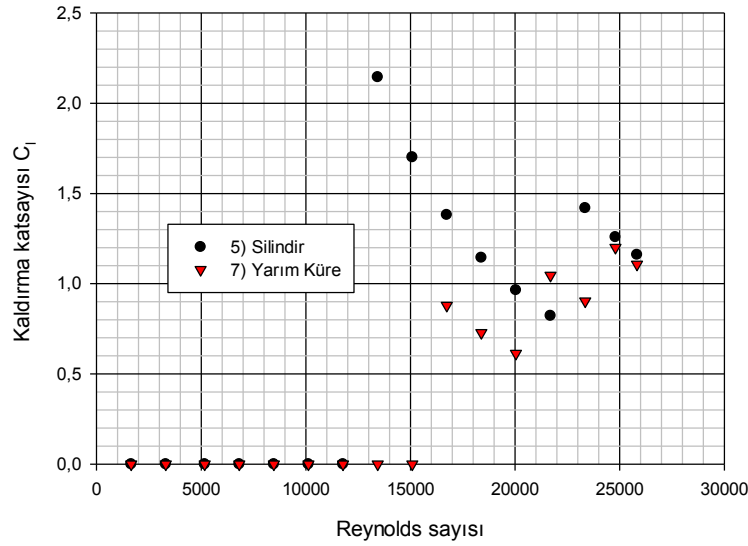
Şekil 6b'de 2 geometrinin Re- $C_1$  değişimi belirlenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bu iki geometri için de oldukça kararsız değerler tespit edilmiştir.

Şekil 6c'de 3 farklı geometrinin yine aynı şekilde Re- $C_1$  grafiği verilmiştir. Küre için 30000 Re sayısı değerinden sonra bir dalgalanma hali görülmektedir. Dairesel konkav modeli için ise Re sayısı yükseldikçe  $C_1$  değerinde yükseliş görülmektedir. Paraboloid model için ise Re sayısı artışı ile birlikte düzenli olarak  $C_1$  değerinde düşüş tespit edilmiştir.

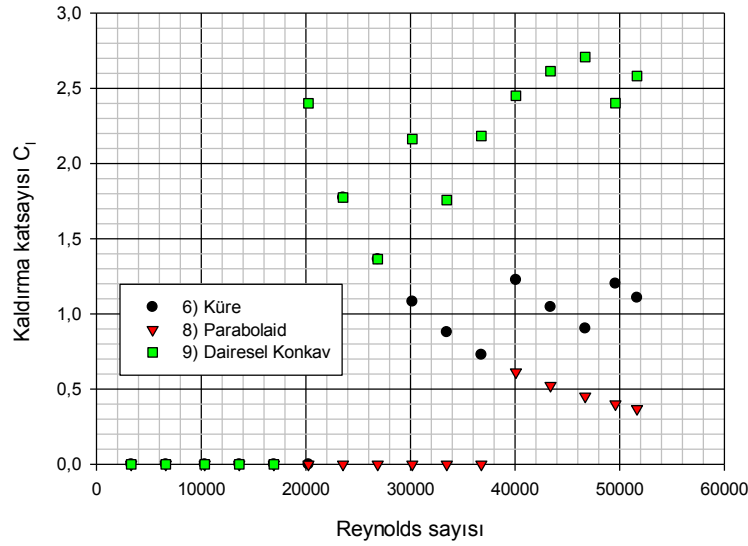
Sürüklenme katsayısı ile kaldırma katsayısı grafikleri arasında dikkat çeken en bariz fark, elde edilen katsayı değerlerinin kaldırma direncinde daha küçük değerlere sahip olmasıdır. 9 model arasında sürüklenme katsayısı en büyük olan 7,54 (12,5 m/s için) ile kare plaka, en küçük olan ise 2,21 (12,5 m/s için) ile paraboloid olmuştur. Kaldırma katsayıları karşılaştırıldığında ise yine aynı şekilde en büyük olan 3,48 (12,5 m/s için) kare plaka, en küçük olan ise 0,37 ile paraboloid model olmuştur. Şekillerde görülen sıfır(0) değerleri ise o hızlarda sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin sıfır olmasıdır. Aerodinamik katsayılarının daha kararlı değerlerine ulaşmak için daha yüksek Reynolds değerine çıkmak, dolayısıyla da daha büyük rüzgar hızlarına ulaşmak gereklidir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6. Kaldırma katsayılarının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi

#### 4. Sonuçlar

Bu deneysel çalışmada, 9 farklı geometriye sahip modeller açık devreli tip rüzgar tüneline teste tabi tutularak sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin hava hızıyla, boyutsuz sürüklenme ve kaldırma katsayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile olan değişimleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Hava hızının artmasıyla sürüklenme kuvveti ( $F_d$ )'nin arttığı ve en yüksek kare plakada (2,6), en düşük

paraboloid modelde (0,6) olduğu tespit edilmiştir.

- Hava hızının artmasıyla kaldırma kuvveti ( $F_k$ )'nin arttığı ve en yüksek kare plakada (1,2), en düşük paraboloid modelde (0,1) olduğu belirlenmiştir.
- Sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ), Reynolds sayısı (0-10000) aralığında en yüksek kare plakada (7,54), en düşük dairesel halkada (6,89); (0-30000) aralığında en yüksek silindirde (4,06), en düşük yarım kürede (3,32) ve (0-60000) aralığında en yüksek dairesel konkavda (6,64), en düşük paraboloid modelde (2,21) elde edilmiştir.
- Kaldırma katsayısı ( $C_l$ ), Reynolds sayısı (0-10000) aralığında en yüksek kare plakada (3,48) en düşük dairesel halkada (2,95); (0-30000) aralığında en yüksek silindirde (1,16), en düşük yarım kürede (1,11) ve (0-60000) aralığında en yüksek dairesel konkavda (2,58), en düşük paraboloid modelde (0,37) elde edilmiştir.

Kararlı aerodinamik katsayıları elde etmek için Reynolds bağımsızlığına ulaşılmalıdır. Sahip olunan düşük rüzgar tüneli hızı dolayısı ile düşük Reynolds değerlerine ulaşılmıştır. Bu yüzden daha yüksek kapasiteli rüzgar tüneli kullanılmalıdır. 9 farklı model ile yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, kullanılan modeller yağmur damlası formuna yaklaştıkça sürüklenme ve kaldırma kuvveti etkisine daha az maruz kalmaktadır. Bu sebeple mühendislik uygulamalarında rüzgar hızı etkisine maruz kalan modeller tasarlanırken yağmur damlası formuna uygun tasarımlar tercih edilmelidir.

### Teşekkür

Bu çalışma; KSÜ Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince 2013/7-19M nolu proje ile desteklenmiştir.

### Semboller

$C_d$  Sürüklenme katsayısı

$C_l$  Kaldırma katsayısı

$F_d$  Sürüklenme kuvveti (N)

$F_l$  Kaldırma kuvveti (N)

$\rho$  Havanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  Hava akış hızı (m/s)

$A$  Karakteristik alan ( $\text{m}^2$ )

$Re$  Reynolds sayısı

$L$  Karakteristik uzunluk (m)

$\mu$  Dinamik viskozite ( $\text{kg/ms}$ )

### Kaynaklar

İçingür, Y., Solmaz H. (2011), “Düşük Hızlı Bir Rüzgar Tünelinde Değişik Otomobil Modellerinin Aerodinamik Direnç Katsayılarının Belirlenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. **26**(2), 455-460.

Pujals, G., Depardon, S., Cossu, C. (2010), “Drag Reduction Of A Bluff Body Using Coherent Streamwise Streaks”, Springer, **49**(5), 1085-1094.

Aider, J. L., Beaudoin, J. F., Wesfreid, J. E. (2010), “Drag And Lift Reduction Of A 3D Bluff-Body Using Active Vortex Generators” , Springer, **48**(5), 771-789.

Kataoka, S., Hashimoto, N., Yoshida, M., Kimura, T. And Hamamoto, N. (2008), “Aerodynamics For Lancer Evolution X”, Mitsubishi Motors Technical Review, **20**, 38-41.

Golkhe, M., Beaudoin, J. F., Amielh, M. And Anselmet, F. (2007), “Experimental Analysis Of Flow Structures And Forces On A 3D-Bluff Body İn Constant Cross-Wind” , Springer, **43**(4), 579-594.

Aka, H. Y. (2003), “Otomobillerin Aerodinamik Karakteristiğinin Bir Rüzgar Tünelinde İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Demircioğlu, T. K (2007), “Bir Araç Modelinin Aerodinamik Analizi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Simülasyonu”, Yüksek lisans tezi, Balıkesir üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, Balıkesir.

Çengel, Y.A, Cimbala, J.M. (2008), “Akışkanlar Mekaniği”, McGraw Hill, London 562–599.

**Muhammed Enes KUYUMCU** İzmir’de doğdu, 1984. Sakarya Üniversitesin’de Makine mühendisliği alanında 2006 yılında ve Anadolu Üniversitesin’de İşletme alanında 2013 yılında Lisans derecelerini aldı. Drexel University, ABD’de Makine mühendisliği alanında 2010 yılında Yüksek Lisans derecesini aldı. İlgili alanları: Enerji transferi, Enerji depolama, Akışkanlar mekaniği, Isı transferi. Kuyumcu uluslararası konferanslarda 1 ve ulusal konferanslarda 4 adet yayınlanmış yayına sahiptir.

E-mail: [m.enes.kuyumcu@gmail.com](mailto:m.enes.kuyumcu@gmail.com)

**Hakan ORAL** Malatya’da doğdu, 1988. Kocaeli Üniversitesi’nde Makine mühendisliği alanında 2012 yılında Lisans derecesini aldı. 2013 yılında başladığı yüksek lisans eğitimine Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi’nde devam etmektedir. İlgili alanları; Makine Teorisi, Aerodinamik, Robotik, Alternatif Enerji Kaynakları. Oral uluslararası konferanslarda 1, ulusal konferanslarda 1 ve ulusal dergilerde 3 adet yayınlanmış yayına sahiptir.

E-mail: [horal@ksu.edu.tr](mailto:horal@ksu.edu.tr)

**Muharrem İMAL** Kahramanmaraş’ta doğdu, 1966. İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği alanında 1988 yılında Lisans, 1991 yılında aynı üniversiteden Yüksek Lisans derecesini aldı. Çukurova Üniversitesi’nde Makine Mühendisliği alanında 2004 yılında doktora derecesini aldı. İlgili alanları; Isı transferi, Termodinamik, Akışkanlar Mekaniği. İmal uluslararası arası dergilerde 3, uluslararası konferanslarda 1, ulusal dergilerde 5, ulusal konferanslarda 1 adet yayınlanmış yayına sahiptir.

E-mail: [muharremimal@ksu.edu.tr](mailto:muharremimal@ksu.edu.tr)

**Ahmet KAYA** Kayseri’de doğdu, 1978. Niğde Üniversitesin’de Makine mühendisliği alanında 1999 yılında Lisans ve 2002 yılında Yüksek Lisans derecelerini aldı. Karadeniz Teknik Üniversitesin’de Makine mühendisliği alanında 2008 yılında Doktora derecesini aldı. İlgili alanları: Akışkanlar mekaniği, Konveksiyon ile kurutma, Isı transferi, Dış akış, Benzerlik çözümü. Kaya uluslararası dergilerde 35, uluslararası konferanslarda 3 ve ulusal konferanslarda 4 adet yayınlanmış yayına sahiptir.

E-mail: [ekaya38@gmail.com](mailto:ekaya38@gmail.com), [kaya38@ksu.edu.tr](mailto:kaya38@ksu.edu.tr)