





## Hidrodinamik Yapılı Numune Üzerine Etkiyen Sürüklenme Kuvvetlerinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi

### Numerical and Experimental Investigation of Drag Forces Acting on Hydrodynamic Structured Sample

Murat VONAL<sup>1,\*</sup> , Hasan KARABAY<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, [Orcid: 0000-0001-6960-9189](https://orcid.org/0000-0001-6960-9189)

<sup>2</sup> Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, [Orcid: 0000-0002-4556-6636](https://orcid.org/0000-0002-4556-6636)

#### Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 25/03/2024

Kabul Tarihi : 03/06/2024

#### Ahtar Kelimeler

Sayısal Analiz,  
Deneysel Analiz,  
Sürüklenme Katsayısı,  
Akışkanlar Mekaniği,  
Hidrodinamik

#### Research Paper

Received Date : 25/03/2024

Accepted Date : 03/06/2024

#### Keywords

Numerical Analysis  
Experimental Analysis  
Pressure Drag  
Fluid Mechanics  
Hydrodynamics

#### Özet

Bu çalışmada, torpido benzeri bir cismin düşük Reynolds sayılı akışta bünyesine etkiyen sürüklenme kuvveti deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Cisim, NACA 0012 profil kesitine sahip eksenal simetrik bir numune olup 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Deneyler, viskoz akış bölgesinde 0,37-8,00 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, gliserin tankı içinde serbest düşmeye bırakılan cisim üzerinden alınmıştır. Sayısal çalışmalar numunenin gliserin havuzu içinde serbest düşme hareketi yaptığı limit hız akış koşulları için ticari bir CFD kodu kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalardan oluşmaktadır. Deneysel ve sayısal hesaplama çalışmaları ile elde edilen sürüklenme katsayıları karşılaştırılmış, Reynolds sayısının  $Re \sim 0,37$  değeri için sürüklenme katsayısının  $C_d \sim 215$  mertebelerine ulaştığı Reynolds sayısının  $Re \sim 8,00$  değeri için ise  $C_d \sim 11$  mertebelerine düştüğü belirlenmiştir. Deney şartlarında minimum ve maksimum sürüklenme kuvvetleri sırasıyla 0,01 N ve 0,33 N olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan deney düzeneği, verilen mertebelerdeki ufak sürüklenme kuvveti değerlerini düşük maliyetle ölçebilme kabiliyetine sahiptir. Sayısal analizler, deney koşullarında basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin toplam sürüklenme kuvvetine oranının Reynolds sayısı artışına bağlı olarak %3 mertebelerinden %2 mertebelerine gerilediğini göstermiştir. Basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin bu denli düşük oranlarda kalması sadece viskoz kaynaklı sürüklenme kuvveti ile cisme etkiyen total sürüklenme kuvvetinin temsil edilebileceğini göstermiştir.

#### Abstract

In this study, drag force acting on a torpedo like sample in low Reynolds number flow was experimentally and numerically investigated. The object was an axially symmetric sample with a NACA 0012 profile, produced using a 3D printer. Experiments were conducted in the viscous flow regime within the range of Reynolds numbers from 0,37 to 8,00. Measurements were taken from the object free falling in a glycerin tank. The numerical studies consist of calculations conducted using a commercial CFD code for the terminal velocity conditions of the sample undergoing free-fall motion in the glycerin pool. When comparing drag coefficient values obtained from experimental and numerical calculations, it was found that the drag coefficient reached  $C_d \sim 215$  levels at Reynolds number values of  $Re \sim 0,37$ , while it dropped to  $C_d \sim 11$  levels at Reynolds number  $Re \sim 8,00$ . The minimum and maximum drag forces under experimental conditions were obtained as 0,01 N and 0,33 N, respectively. The experimental setup was capable of measuring small force values at these levels with low cost. Numerical analyses indicated that the ratio of pressure-induced drag force to the total drag force under experimental conditions decreased from the order of %3 to %2 with increasing Reynolds number. This small percentage values suggested that within the given Reynolds number range, the viscous drag force could represent the total drag force acting on the object. The fact that the pressure-induced drag force remains at such low rates shows that only the viscous drag force can represent the total drag force acting on the sample.

## 1. Giriş

Akışkanların katı yüzeylerle etkileşimi, endüstriyel ve mühendislik uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan bir

konudur [1]. Özellikle, akışkanların yüzeye uyguladığı direnç, birçok tasarım ve optimizasyon sürecinde incelenmesi gereken önemli bir parametre olarak kabul edilir. Akışkan içinde hareket eden cisimlerin maruz kaldığı direnç, sıklıkla sürüklenme katsayısı ile genelleştirilir [2].

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): [murat.vonal@gmail.com](mailto:murat.vonal@gmail.com)



Sürüklenme katsayısı, geometrik özellikler ve akış koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmekle birlikte basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme olmak üzere iki bileşenle karakterize edilir [3-6]. Basınç kaynaklı sürüklenmenin büyüklüğü, cismin ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farkına bağlıdır. Bu farkın artması, cisme etki eden net basınç direncinin artmasına sebep olur. Basınç direncinin azaltılması amacıyla hidrodinamik gövdeye sahip cisimler üretilmeye çalışılmakta fakat konfor şartları bu potansiyeli sınırlamaktadır. [7-8]. Viskoz kaynaklı sürüklenme ise cismin katı yüzeyi üzerinde oluşan direnci ifade eder. Cisim hızının ve akışkan viskozitesinin artması viskoz direnci artırabilir.

Akışa paralel yöndeki uzunluk “boy”, akışa dik yöndeki uzunluk “en” olarak kabul edildiğinde, boy/en oranının düşük olduğu cisimler küt cisimler olarak kabul edilir. Küt cisimler üzerinde yapılan akış çalışmaları, Reynolds sayısına bağlı olarak değişmekle birlikte basınç direncinin viskoz dirence kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir [9]. Boy/en oranının azalmasıyla cisimler hidrodinamik yapıya doğru evrilir ve cisme etkiyen basınç direnci düşmeye başlar. Hidrodinamik cisimler üzerinde yapılan literatür çalışmaları genellikle yüksek Reynolds sayıları için gerçekleştirilmiştir [10-12].

Naca profilleri, aerodinamik gövdeye sahip profillerin bir örneğidir [13]. Naca profilleri üzerindeki yüksek Reynolds sayılı akışta, basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme bileşenleri etkilidir. Düşük Reynolds sayılı akışta ise basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme bileşenlerinin büyüklükleri hakkında literatürde yeterli çalışma yer almamaktadır.

Bu çalışmada, mevcut literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, NACA 0012 profil kesitli aksel simetrik bir gövde üzerindeki düşük Reynolds sayılı akışın sürüklenme durumu incelenmiştir. Öncelikle sürüklenme katsayısının hesaplanmasıyla ilgili genel bilgiler verilmiş devamında ise numunenin serbest düşme hareketini gerçekleştirdiği deney düzeneği açıklanarak düşük değerlerdeki sürüklenme kuvvetinin hesaplanabileceği ölçüm prosedürü verilmiştir. Sonuçlar kısmında, deney düzeneği ile sayısal simülasyon sonuçlarının uyumu incelenmiş ve sayısal simülasyonlar yardımıyla numune üzerine gelen basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme kuvveti bileşenleri irdelenmiştir.

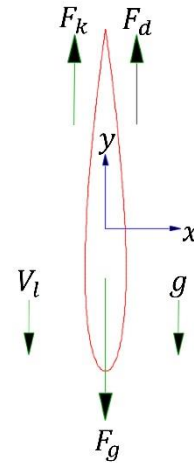
## 2. Temel Tanımlamalar

Akışkan ortamda ilk hızsız serbest düşmeye bırakılan cismin hareketi Denklem (1) ile bir boyutlu olarak tanımlanabilir.

$$F_g - F_k - F_d = ma_y \quad (1)$$

Burada  $F_g$  cismin ağırlığını,  $F_k$  cisme etkiyen kaldırma kuvvetini,  $F_d$  akışkanın harekete karşı gösterdiği sürüklenme kuvvetini,  $m$  cismin kütleini ve  $a_y$  ise cismin ivmesini ifade etmektedir. Kuvvetler, Şekil 1’de şematik olarak verilmiştir.

Serbest düşme esnasında ağırlık kuvveti etkisiyle hareket eden bir cismin hızı artarken, hızıyla orantılı olarak artan sürüklenme kuvveti cismi yavaşlatır ve yeterli hareket mesafesi olması durumunda cisme etki eden kuvvetler dengelenir. Limit hız durumu olarak adlandırılan bu olayda cismin ivmesi sıfırlanır, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri cismin ağırlığıyla dengelenir.



Şekil 1. Serbest düşme hareketi yapan bir cisme etki eden kuvvetler

Limit hızlı hareket esnasında cisme etki eden sürüklenme kuvveti Denklem (2)’de gösterildiği gibi ağırlık ve kaldırma kuvvetleri arasındaki farka eşittir.

$$F_d = F_g - F_k \quad (2)$$

Sıvı içinde hareket eden bir nesnenin maruz kaldığı bu sürüklenme kuvveti, sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) olarak bilinen boyutsuz bir parametre ile karakterize edilir ve Denklem (3) ile tanımlanır.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho A_p V_l^2} \quad (3)$$

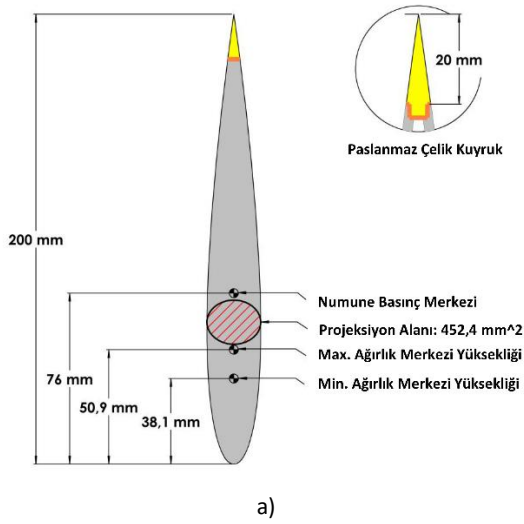
Sürüklenme katsayısı ise literatürde Reynolds sayısının (Re) bir fonksiyonu olarak verilir. Örneğin sıvının küre üzerinden  $Re \ll 1$  değerlerinde akması durumunda kürenin sürüklenme katsayısı  $24/Re$  ile hesaplanabilir [14]. Reynolds sayısı tanımı aşağıda verilmiştir.

$$Re = \frac{\rho V_i D}{\mu} \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4)'de,  $D$  cismin akış yönüne dik projeksiyon çapını,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $A_p$  cismin projeksiyon alanını,  $V_i$  cismin limit hızını ve  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

### 3. Deneysel Yöntem

Bir cismin Denklem (3) ile tanımlanan sürükleme katsayısını ölçebilmek için akışkan içindeki hareketine mani olan sürükleme kuvvetinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sürükleme kuvvetinin ölçümü serbest düşme deneyleriyle Denklem (2)'den yararlanılarak bulunmuştur. Çalışmanın konusu olan



Şekil 2. a) Deneysel numunesi, b) Cıva enjektörü

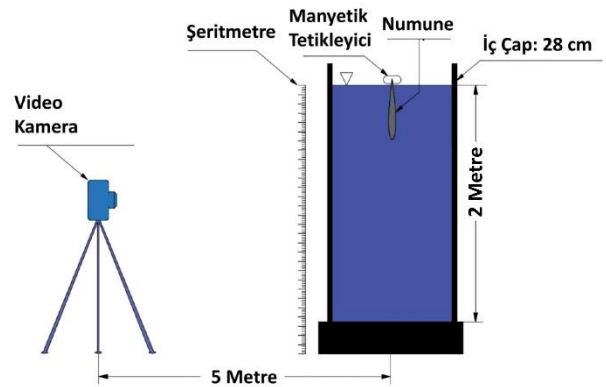
Deneyler, Şekil 3'te gösterildiği gibi gliserin dolu bir tank içinde gerçekleştirilmiştir. Tank, 28 cm iç çap ve 200 cm düşey uzunluğa sahip şeffaf pleksiglas malzemeden oluşmaktadır. Diğer deney ekipmanları ise havuzun üst kısmına konumlandırılan ve cismin ilk hızsız olarak hareketine başlamasını sağlayan manyetik tetikleyici, havuzun sağ ve sol tarafına konumlandırılan 2 adet 100 W projektör ve 4K çözünürlükte görüntü alabilen Sony RX100IV kamera olarak sıralanabilir. Kamera, farklı ortamlar arası geçişte ışığın kırılmasından kaynaklı ölçüm hatalarını minimize etmek için havuzdan 5 m uzağa konumlandırılmıştır. Kamera görüntü alanı ise ölçüm alınan aralığın orta noktası hizasına ayarlanmıştır. Havuz kenarına düşey olarak konumlandırılan şerit metre, görüntüleme esnasında numune konumlarının belirlenmesini sağlamıştır.

Farklı hızlarda serbest düşme hareketi yapan numunelerin gliserin içindeki hız-zaman ölçümleri Tracker 6 isimli ücretsiz görüntü işleme yazılımı kullanılarak tespit

torpido benzeri bir numune, bir sıvı tankı içinde serbest düşüşe bırakılmıştır. Ağırlığı ve kaldırma kuvveti bilinen cismin limit hızı ölçülerek deneyler sürdürülmüştür.

Deneylerin gerçekleştirildiği deney numunesi, Şekil 2a'da gösterildiği gibi 20 cm uzunluğa ve 2,4 cm maksimum projeksiyon çapına sahip olacak şekilde ABS plastik filament kullanılarak 3D yazıcı ile üretilmiş bir torpido numunesidir. Numune, Naca 0012 profil kesimine sahiptir ve et kalınlığı 2 mm'dir. Kuyruk kısmında, paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş açılır kapanır bir tapa bulunmaktadır. Bu sayede iç kısma Şekil 2b'de gösterildiği gibi cıva enjekte edilebilmekte ve numune ağırlıkları değiştirilerek farklı hızlarda düşüşler sağlanabilmektedir

edilmiştir. Numuneler, tüm deney verilerinde ilk 70 cm mesafe geçilmeden limit hızına ulaşmaktadır. Bu çalışmada limit hız verileri havuz yüzeyinden dip kısma ilerlerken 100 cm ile 130 cm aralığı için alınmıştır.



Şekil 3. Deneysel düzeneği

Numunenin verilen aralıktaki yer değiştirmeleri ve geçiş süreleri video kayıtları üzerinden belirlenmiş, daha sonra Denklem (5) kullanılarak numune hızları hesaplanmıştır.

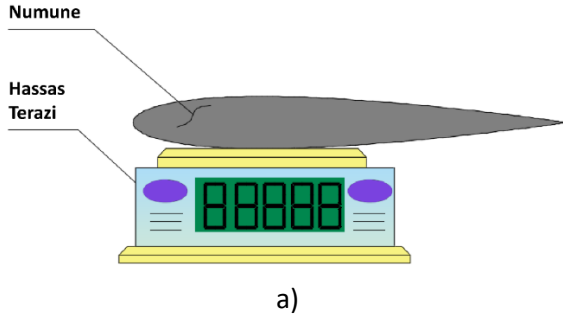
$$V_t = \frac{\Delta H}{n \cdot \Delta t} \quad (5)$$

Denklem (5)'te  $\Delta H$  verilerin alındığı sabit düşey mesafeyi,  $n$  bu mesafeyi katetmek için alınan görüntü karesi sayısını,  $\Delta t$  ise iki görüntü karesi arasında geçen süreyi ifade etmektedir. Gliserinin dinamik viskozitesi, Stokes yasasına dayanan düşen küre yöntemi kullanılarak Denklem (6) ile ölçülmüştür [15]. Viskozite deneylerinde küre olarak 5 mm çapa sahip çelik bir bilye kullanılmıştır.

$$\mu = \frac{1}{18} \frac{(\rho_k - \rho_g)}{V_l} g D_k^2 \quad (6)$$

Denklem (6)'da  $\rho_k$  küre yoğunluğunu,  $\rho_g$  gliserin yoğunluğunu,  $V_l$  kürenin limit hızını,  $g$  yerçekimi ivmesini ve  $D_k$  kürenin projeksiyon çapını ifade etmektedir.

Uzunluk ölçümlerinde 250 mm skala uzunluğuna ve  $\pm 0,05$  mm doğruluğa sahip kumpas kullanılırken, kütle



Şekil 4. a) Ağırlık ölçümü, b) Kaldırma kuvveti ölçümü

#### 4. Belirsizlik Analizi

Denklem (3) ve Denklem (4) kullanılarak hesaplanan Reynolds sayıları ve sürüklenme katsayıları belli bir ölçüm belirsizliğine sahiptir. Bu belirsizlik, denklem içinde bulunan her bir parametrenin ölçüm belirsizliğinden ileri gelir. Denklem (9) ve Denklem (10) yardımıyla her bir parametrenin belirsizliğe olan katkısı hesaplanabilir ve böylece sürüklenme katsayısı ile Reynolds sayısının belirsizlik değerleri bulunabilir.[16].

$$W_{C_d} = \left[ \left( \frac{\partial}{\partial F_d} \left( \frac{2}{\rho A_p V_l^2} \right) w_{F_d} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial \rho} \left( -\frac{2 F_d}{\rho^2 A_p V_l^2} \right) w_{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial A_p} \left( -\frac{2 F_d}{\rho A_p^2 V_l^2} \right) w_{A_p} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial V_l} \left( -\frac{4 F_d}{\rho A_p V_l^3} \right) w_{V_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

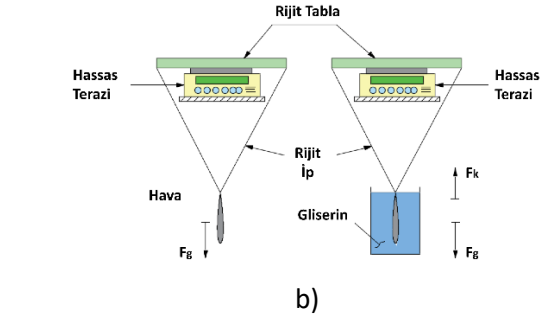
ölçümlerinde  $\pm 0,01$  g doğruluğa sahip hassas terazi kullanılmıştır. Cisme etkiyen ağırlık kuvveti, cismin kütesinin Şekil 4a'da gösterildiği gibi ölçülüp ilgili değerler Denklem 7'de yerine koyulmasıyla hesaplanmıştır.

$$F_g = m_c g \quad (7)$$

Denklem (7)'de  $F_g$  cismin ağırlığını,  $m_c$  cismin kütesini ve  $g$  yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Cisme etkiyen kaldırma kuvvetinin ölçülebilmesi için Şekil 4b'de gösterilen düzenek kurulmuştur. Cisim hava ortamında ve gliserin ortamında iken terazinin gösterge değerleri okunmuş ve cisme etkiyen kaldırma kuvveti Denklem (8) ile hesaplanmıştır.

$$F_k = (m_h - m_g) g \quad (8)$$

Denklem (8)'de  $F_k$  cisme gliserin içinde etkiyen kaldırma kuvvetini,  $m_h$  cisim hava ortamında iken terazide okunan gösterge değerini,  $m_g$  cisim gliserin ortamında iken terazide okunan gösterge değerini ve  $g$  yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.



$$W_{Re} = \left[ \left( \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{V_l D}{\mu} \right) w_{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial V_l} \left( \frac{\rho D}{\mu} \right) w_{V_l} \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial D} \left( \frac{\rho V_l}{\mu} \right) w_D \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial \mu} \left( -\frac{\rho V_l D}{\mu^2} \right) w_{\mu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Denklem (9) ve Denklem (10)'da  $W_{C_d}$ ,  $w_{F_d}$ ,  $w_{A_p}$ ,  $w_{V_l}$ ,  $W_{Re}$ ,  $w_D$  değerleri sırası ile numune sürüklenme katsayısının, sürüklenme kuvvetinin, projeksiyon alanının, limit hızın, Reynolds sayısının ve projeksiyon çapının ölçüm belirsizliğini ifade ederken  $w_{\rho}$ ,  $w_{\mu}$  değerleri ise akışkan yoğunluğunun ve viskozitesinin ölçüm belirsizliğini ifade etmektedir.

Çalışmada belirsizlik oluşturan ölçüm cihazları kumpas ve hassas terazidir. Görüntü işleme yardımıyla numunenin kat ettiği mesafenin ve geçen sürenin belirlenmesi de belirsizlik oluşturur. Bu belirsizlikler, görüntünün bir pikselinin kenar uzunluğuna ve bir görüntü karesinin

kaydedilmesi için geçen süreye eşittir. Direk olarak belirlenebilen bu ölçüm belirsizlikleri Tablo (1)'de verilmiştir.

Denklem (5) ile hesaplanan numune hızının belirsizliği ve Denklem (6) ile hesaplanan akışkan viskozitesinin belirsizliği direk ölçümler ile belirlenemeyen ve Denklem (9)'da gösterildiği gibi hesap edilmesi gereken parametrelerdir. Fakat bu çalışmada işlem karmaşası olmaması açısından bu değerlerin hesaplanması ayrı ayrı gösterilmemiştir. Dolaylı olarak belirlenebilen bu ölçüm belirsizlik sonuçları Tablo (1)'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Belirsizlik kaynağı ve değerleri

Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri
Kumpas	$\pm 0,00005$ m
Hassas terazi	$\pm 0,00001$ kg
Piksel kenar uzunluğu	$\pm 0,00006250$ m
Görüntü süresi	$\pm 0,01666667$ s
Minimum numune hızı	$\pm 0,00001295$ m/s
Maksimum numune hızı	$\pm 0,00584700$ m/s
Akışkan viskozitesi	$\pm 0,05817055$ kg/ms

Denklem (9) ve Denklem (10) kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda minimum ve maksimum Reynolds sayılarının belirsizlik değerleri sırasıyla  $0,37 \pm 0,02$  ve  $7,84 \pm 0,39$  olarak minimum ve maksimum sürüklenme katsayılarının belirsizlik değerleri ise sırasıyla  $215,64 \pm 1,08$  ve  $11,68 \pm 0,05$  olarak belirlenmiştir.

## 5. Sayısal Yöntem

Yukarıda tanımlanan deney düzeneğinin doğruluğu bir sayısal çalışma yürütülerek sorgulanmıştır. Sorgulama işlemi, deney düzeneğinde testleri yapılmış numunelere ait sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayısı verilerinin sayısal analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması şeklindedir. Analizlerde numune hızı düşük, akış laminar ve Reynolds sayısı  $0,37 < Re < 8,00$  aralığında kaldığından

Navier-Stokes denklemindeki non-linear terimler (ivme terimleri) viskoz terimlerin yanında ihmal edilebilir mertebelindedir. Bu durum, yeterince ince bir çözüm ağı yapısı ile analitik çözümlere yakın bir sayısal çözümün elde edilebilmesine ve sayısal yöntem çözümünün deney düzeneğini doğrulama amacıyla kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Sayısal sonuçlar, sonlu hacimler esasına dayanan yöntemle çözüm yapan ANSYS FLUENT ticari çözücü ile elde edilmiştir. Analizler, laminar çözücü ile zamandan bağımsız ve iki boyutlu (eksenel simetrik) olarak gerçekleştirilmiştir. Akışkanın fiziksel özellikleri sabit alınmış, hız-basınç geçişleri için SIMPLER seçilmiştir.

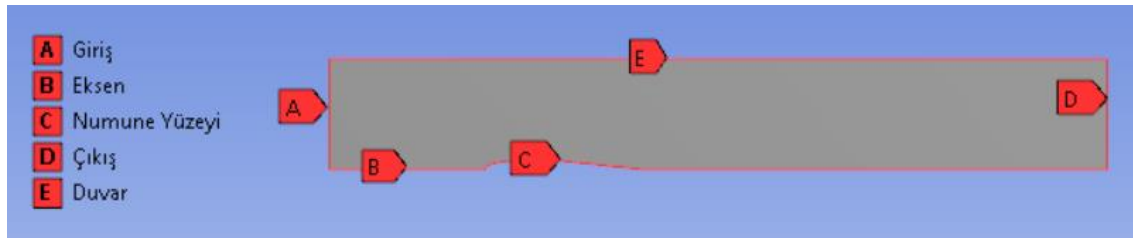
Ticari çözücü, hesaplamalarda korunum denklemlerini çözmektedir. Sıkıştırılmaz Newtonian akışkanın daimi laminar akışı için çözülen süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri sırasıyla Denklem (11) ve Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (11)$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P + \vec{g} + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{V} \quad (12)$$

Denklemlerde  $V$  akışkan hızını,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $P$  akışkan basıncını ve  $\mu$  akışkan dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

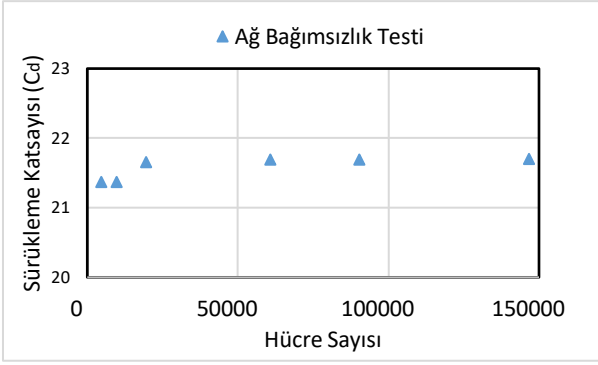
Sayısal analizler için oluşturulan domain Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde gösterilen B çizgisi eksen, E çizgisi havuz yan yüzeyini (kaymaz duvar sınır şartı), C çizgisi numune duvarlarını (kaymaz duvar sınır şartı), A çizgisi akışkan giriş yüzeyini (hız sınır şartı), D yüzeyi ise akışkan çıkış yüzeyini (basınç sınır şartı) göstermektedir. Numune boyu  $L=0,2$  m olmak üzere, domain uzunluğu numune uzunluğunun 5 katı olacak şekilde 1 m alınmıştır. Bu mesafenin  $0,2$  m'lik ( $L$ ) kısmı numune baş kısmı ile havuz dip yüzeyi arasındaki mesafedir.  $0,6$  m'lik ( $3L$ ) kısmı ise numune kuyruk kısmı ile havuz üst yüzeyi arasındaki mesafedir. Domain genişliği, havuz yarıçapı olan  $0,14$  m olarak alınmıştır.



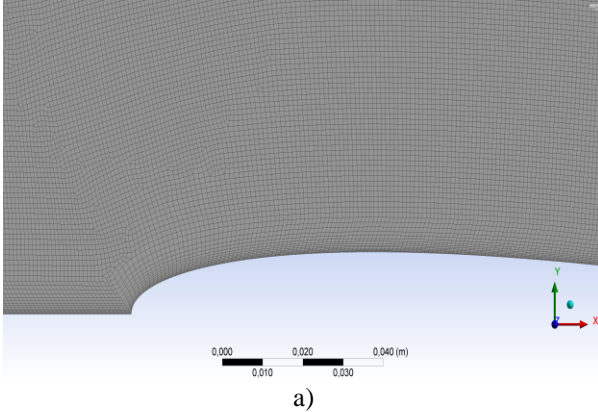
**Şekil 5.** Hesaplama domaini

Sonuçların çözüm ağındaki hücre sayısına bağlılığının tespiti için ağ bağımsızlık testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da Reynolds sayısının  $3,76$  değeri için farklı hücre sayısı

değerlerine karşılık gelen sürüklenme katsayısı değerleri görülmektedir.



Şekil 6. Hücre sayısı ve sürüklenme katsayısı ilişkisi

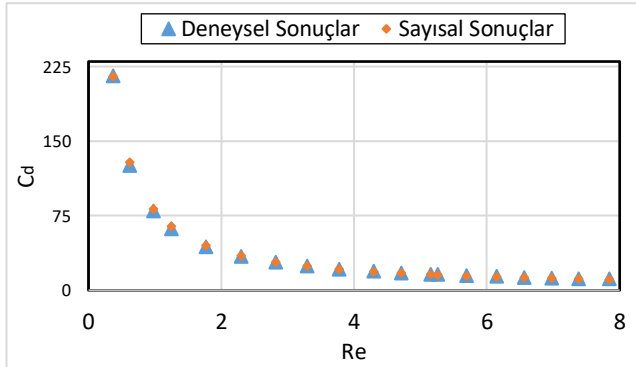


Şekil 7. a) Ağ yapısı, b) Yüzey ağ yapısı

## 6. Bulgular ve Tartışma

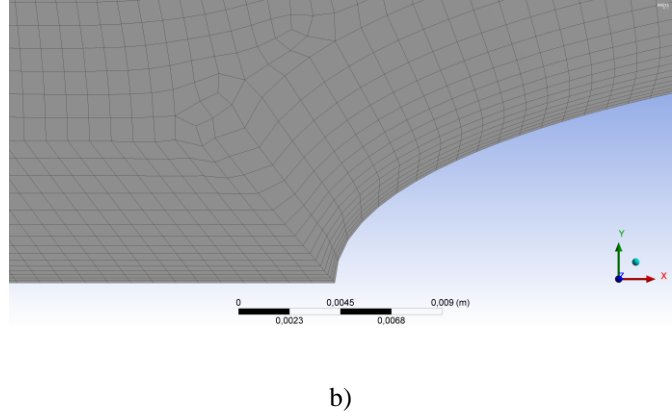
Reynolds sayısının 0,37 ile 8,00 aralığında değiştiği laminar akış koşullarında Naca 0012 profil kesitli torpido şekilli bir cismin akış direnci deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel serbest düşen bir cismin limit hız ölçümleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümler ise kütle ve momentum denklemlerinin sonlu hacimler metodu kullanılarak çözülmesiyle elde edilmiştir.

Şekil 8'de torpido şekilli cisme, serbest düşme esnasında etki eden sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. 64 g ile 97 g aralığında değişen numune kütlelerine karşılık gelen 19 veri seti için gerçekleştirilen deneylere ait veriler ile aynı koşullarda elde edilmiş sayısal veriler birlikte değerlendirilmiştir. Verilen koşullarda Reynolds sayısı 0,37-8 aralığında değişmekte, sürüklenme katsayısı ise Reynolds sayısı artışına bağlı olarak 215 mertebelerinden 11 mertebelerine kadar gerilemektedir.



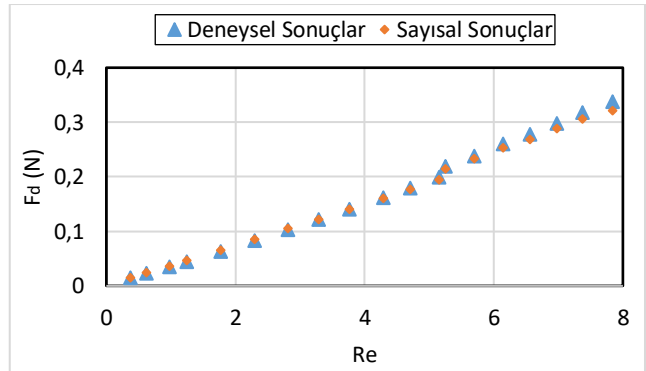
Sonuçlar, 20020 ve 146784 hücre sayısı aralığı için elde edilen sürüklenme katsayısı değerlerinin kararlı hale geldiğini göstermiştir.

Hesaplamalarda Şekil 7a'da gösterildiği gibi dörtgen ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama ağı toplam 146784 hücreden oluşan ince bir ağ yapısına sahiptir. Maksimum hücre boyu 1 mm'dir. Sınır tabakanın daha iyi analiz edilmesi amacıyla kanat yüzeyindeki ağ Şekil 7b'de gösterildiği gibi sıklaştırılmış olup en düşük ağ kalınlığı 0,1 mm'ye kadar düşürülmüştür. İterasyonlar, RMS değerleri  $10^{-9}$  mertebesinde iken durdurulmuştur.



Şekil 8. Deneysel ve sayısal sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

Verilen akış koşullarında cisme etki eden sürüklenme kuvveti verileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen değerler 0,01 N ile 0,33 N mertebeleri aralığında değişmektedir.

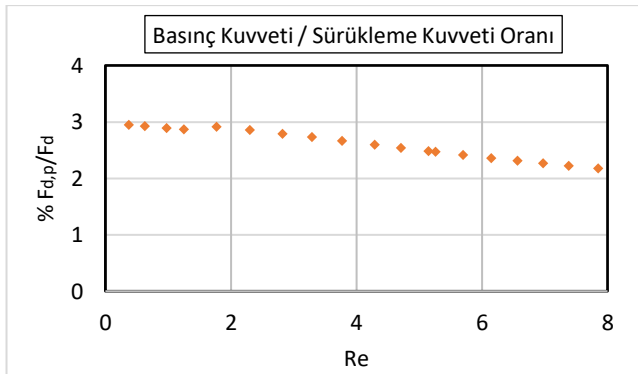


Şekil 9. Deneysel ve sayısal sürüklenme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Burada ölçülen 0,01 Newton kuvvet değeri kütlesi yaklaşık 1 g olan bir cismin ağırlığına tekabül etmektedir. Bir akışkan içinde hareket eden bir cisme etki eden bu mertebelerde zayıf bir kuvveti deneysel olarak ölçmek zor ve pahalı bir işlem gerektirir. Eğer numune akışkan bir kanal içinde tutulup cisme etkiyen kuvvetin ölçüleceği bir deney planlansaydı, kanalda oluşabilecek çalkantılar ve bağlantı elemanlarının sebep olabileceği çalkantılar bu

denli zayıf bir kuvvetin ölçümünün doğruluğunu etkileyecekti. Bu çalışmada kullanılan yöntemle, zayıf kuvvetleri ölçmek için bir sensöre ihtiyaç duyulmadan, sadece görüntü analizi ile doğru sonuçlara ulaşılabileceği gösterilmiştir. Grafikte sunulan deneysel ölçümlerin sayısal çalışmalardan elde edilen değerlerle örtüşmesi deney düzeneğinde tespit edilen sürüklenme kuvvetlerinin doğruluğunun çok iyi olduğunu göstermektedir. Sayısal ve deneysel değerler arasındaki sapmaların ortalaması 0,0047 N olarak hesaplanmıştır.

Akışkan içinde hareket eden bir cisim üzerinde oluşan sürüklenme kuvveti, cidarlarında oluşan viskoz kuvvetler ile ön ve arka kısımlardaki basınç farkı kaynaklı kuvvetlerin toplamından oluşmaktadır. Şekil 10, basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti ( $F_{d,p}$ ) ile toplam sürüklenme kuvveti ( $F_d$ ) oranının Reynolds sayısına bağlı olarak yüzdesel değişimini göstermektedir.



Şekil 10. Sürüklenme kuvveti bileşenleri

Reynolds sayısının 0,37 değeri için basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti toplam sürüklenme kuvvetinin %3 ünü oluşturmaktadır. Bu oran Reynolds sayısı büyüdükçe azalmakta ve Reynolds sayısının 7,84 değeri için %2 mertebelerine düşmektedir.

## 7. Sonuçlar

Bu çalışmada NACA 0012 profil kesitine sahip torpido şekilli bir cismin düşük Reynolds sayılarındaki (0,37-8,00) akış içinde maruz kaldığı sürüklenme kuvvetleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Numunenin  $C_d$  sürüklenme katsayısı düşük Reynolds sayılarında ( $Re=0,37$ ) 215 mertebelerine kadar çıkmışken  $Re$  sayısı 8,00 mertebelerine arttığında 11 mertebelerine düşmektedir. Akışkanın cisme uyguladığı harekete ters yönlü sürüklenme kuvvetlerinin ölçümü, serbest düşüş yapan cismin gözlemleri üzerinden hesaplanmıştır. Ölçülen sürüklenme kuvvetinin büyüklüğü 0,01 N ile 0,33 N aralığında kalmıştır. Bu değerler sayısal olarak da elde edilerek düzeneğin doğrulaması yapılmıştır. Ölçülen değerlerle hesaplanan değerler arasındaki standart sapma 0,0047 N

mertebelerindedir. Numuneye etki eden basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin verilen aralıkta yaklaşık %2,5 mertebelerinde olduğu cisme etkiyen baskın kuvvet bileşeninin ise yaklaşık %97 oranıyla viskoz kuvvet olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan deney düzeneğinin, düşük Reynolds sayılarında karşılaşılabilecek düşük sürüklenme kuvvetlerini yüksek hassasiyetle ve düşük maliyetle ölçme potansiyeli bulunmaktadır. Çalışma, hidrodinamik yapıların tasarımı ve optimize edilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle, düşük Reynolds sayılarında sürüklenme kuvveti ve bileşenlerinin belirlenebilmesi, hidrodinamik performansın geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. Bununla birlikte, sürüklenme kuvveti bileşenlerinin ayrı ayrı belirlenebilme potansiyeli, tasarımcılara hangi faktörlerin daha belirleyici olduğunu anlaşılacak optimum dizayn kriterlerinin belirlenebilmesinde yardımcı olacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No: KOU/BAP/2019/029 ve KOU/BAP/2018/114)

## Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkı Beyanı

Yazar 1: Veri düzenlemesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, tasarımın yapılması, makalenin kontrol edilmesi, gerekli literatür taraması ve sonuçların değerlendirilmesi

Yazar 2: Metodoloji (Fikrin oluşması), tasarımın yapılması, makalenin kontrol edilmesi

## Kaynaklar

- [1] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Engin, T., 2008. Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları. Güven Kitabevi.
- [2] Sadraey, M., Müller, D., 2009. Drag force and drag coefficient. M. Sadraey, Aircraft Performance Analysis. VDM Verlag Dr. Müller.

- [3] Yow, H. N., Pitt, M. J., Salman, A. D., 2005. Drag correlations for particles of regular shape. *Advanced Powder Technology*, 16(4), 363-372.
- [4] Goossens, W. R., 2019. Review of the empirical correlations for the drag coefficient of rigid spheres. *Powder Technology*, 352, 350-359.
- [5] Alam, M. M., Zhou, Y., 2008. Alternative drag coefficient in the wake of an isolated bluff body. *Physical Review E*, 78(3), 036320.
- [6] Sooraj, P., Agrawal, A., Sharma, A., 2018. Measurement of drag coefficient for an elliptical cylinder. *J. Energy Environ. Sustainability*, 5, 1-7.
- [7] Sivaraj, G., Parammasivam, K. M., Suganya, G., 2018. Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6), 1489-1495.
- [8] Ahmadzadehtalatapeh, M., Mousavi, M., 2015. A review on the drag reduction methods of the ship hulls for improving the hydrodynamic performance. *International Journal of Maritime Technology*, 4, 51-64.
- [9] Homsy, , GM, Koseff, , J, Robertson, , C, Aref, , H, Thoroddsen, , S, Breuer, , K, Hochgreb, , S, Munson, , B, Powell, , K, & Balsa, , TF., 2001. Multi-Media Fluid Mechanics. *Applied Mechanics Reviews*, 54(4), B69–B71.
- [10] Panda, J. P., Mitra, A., Warrior, H. V., 2021. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 235(1), 15-29.
- [11] Blanco, M., & Wilson, P. A., 2012. A review of external hydrodynamics with experimental data assessment for low-speed ocean flows. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 134(3).
- [12] Kibar, A., Karabay, H., Yiğit, K. S., Ucar, I. O., Erbil, H. Y., 2010. Experimental investigation of inclined liquid water jet flow onto vertically located superhydrophobic surfaces. *Experiments in fluids*, 49, 1135-1145.
- [13] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., Stivers Jr, L., 1945. Summary of airfoil data. No. NACA-TR-824 .
- [14] Blevins, R. D., 1984. *Applied fluid dynamics handbook*. New York.
- [15] Stokes, G. G., 2009. On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. *Mathematical and Physical Papers*, 1–10.
- [16] Kline, S.J. & McClintock, F.A., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical engineering*, 75(1), 3–8.