

# İleri Yelken Fiziği

## Yelkenle İlgili Bazı Kavramların Basit Kuramsal Modelleri

MERT ERGEN

7 Nisan 2019



<http://www.sailing.boun.edu.tr/>

## İçindekiler

<b>1</b>	<b>Geniş Seyir</b>	<b>5</b>
1.1	İkinci Kuvvet Yaklaşımı . . . . .	5
1.2	Newton'ın Darbe Teorisi . . . . .	6
1.3	Geniş Seyir Hız Oranı . . . . .	8
1.4	Rüzgar Pisi . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Dar Seyir</b>	<b>10</b>
2.1	Dar Seyrin Fizigi . . . . .	11
2.1.1	Lift ve Drag Olguları . . . . .	11
2.1.2	Salmada Lift ve Drag Kuvveti . . . . .	11
2.1.3	Tekneyi İleri İtmek . . . . .	14
2.1.4	Rüzgarın Lift ve Drag Kuvveti . . . . .	15
2.1.5	Su ve Rüzgar . . . . .	16
2.2	Dar Seyir Neden Bu Kadar Karışık? . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Yalpa, Baş-Kıç Vurma ve Savrulma</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Navier-Stokes Denklemi, Viskozite ve Reynolds Sayısı</b>	<b>25</b>
4.1	Navier-Stokes Denklemi . . . . .	25
4.2	Viskozite . . . . .	26
4.3	Reynolds Sayısı . . . . .	26

## Şekil Listesi

1	Hız - Kuvvet . . . . .	5
2	Akışkan Hacmi . . . . .	6
3	Akışkan Hareketi . . . . .	7
4	Rüzgar Pisi . . . . .	10
5	Kaldırma ve Sürüklenme Kuvveti . . . . .	12
6	Kuvvetler ve Hücüm Açısı . . . . .	13
7	Dar Seyirde Kaldırma ve Sürüklenme . . . . .	14

8	Dar Seyirde Kaldırma ve Sürükleme 2 . . . . .	15
9	Rüzgarın Kaldırma ve Sürükleme Kuvvetleri . . . . .	15
10	Geniş Seyir Bütün Kuvvetler . . . . .	16
11	Farklı Açılarda Kuvvetler 1 . . . . .	17
12	Farklı Açılarda Kuvvetler 2 . . . . .	17
13	Farklı Açılarda Kuvvetler 3 . . . . .	18
14	Tork . . . . .	20
15	Yerçekimi ve Yüzdürme Kuvveti . . . . .	22
16	Trapezde Tork . . . . .	23
17	Geniş Seyirde Tork . . . . .	24
18	Reynolds Sayısı Örneği . . . . .	27

## Teşekkür

Bu yazı fizikçi John Kimball'ın 'Physics of Sailing' adlı kitabının bir derlemesidir. Yazarın anıları ve kullandığı deneysel veriler atlanmış, sadece kuramsal modelleme kısmına odaklanılmıştır. Anlatımı kolaylaştırması açısından birebir çeviriden ziyade yorumlama tercih edilmiştir. John Kimball'a teşekkürlerimi sunar, bu yazıyla ilgilenenlerin kitabı da okumasını şiddetle tavsiye ederim.

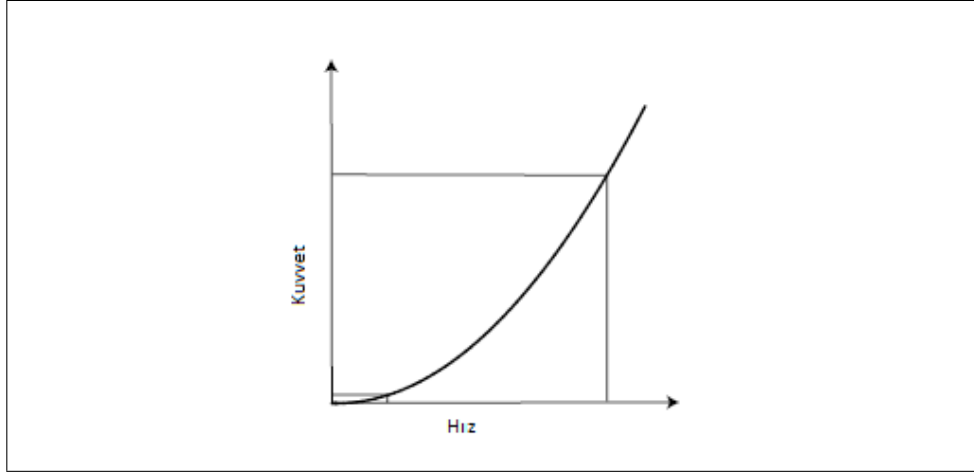
## Giriş

Her yelkenci farkında olsa da olmasa da belirli bir fizik bilgisine sahiptir. İsmi koyamasa da rüzgarın artışıyla gelen kuvvet, teknenin yatınca daha iyi gitmesi gibi kavramlar yelken yaptıkça kafasında oturur. Bu yazının amacı ise bu isim koyamadığımız hisleri ve deneyimleri fizik dilinde ifade etmek ve daha anlaşılır ve iletilebilir hale getirmektir. Yelken üzerindeki temel kuvvetlerin ve akışkanların dinamiğinin inceleneceği bu yazıda üniversitede herkesin aldığı matematik bilgisinin yeterli olması amaçlanmıştır. Hesapların daha kolay olduğu geniş seyirle başlanacak, dar seyir hesapları ile devam edilecektir. Yelken üzerindeki tork ve denge kavramlarına da bakıldıktan sonra eğlenceli bir ek bölüm olarak çok temel seviyede akışkanlar dinamiği işlenmiştir.

## 1 Geniş Seyir

### 1.1 İkinci Kuvvet Yaklaşımı

Hareketli bir akışkanın (hava, su,...) bir nesneye (yelkenli,...) uyguladığı kuvvet, akışkanın (yelkenliye göre) hızının karesine orantılıdır.



Şekil 1: Akışkan hızı ve kuvvet ilişkisi

Şekilde görüldüğü gibi, hızı yalnızca 5 kat artırmak kuvvetleri 25 katına çıkarır. Bu ilişki hafif havada yelken trimlemek kolayken sert rüzgarda inanılmaz bir güç gerektirdiğini gösterir. Şekilde herhangi bir birim olmaması bir hata değildir. İkinci kuvvet yaklaşımının parabolik şekli birimden bağımsızdır, rüzgarın hızının 0 knot'tan 10 ya da 50 knot'a çıkması veya yelkenin

büyüklüğü bu ilkeyi deęiřtirmez.

Isaac Newton, akışkan direncinin “darbe teorisini” icat ederek ikinci dereceden yaklaşımı makul bir şekilde açıklayan ilk kişidir. Basit mekanik prensiplerden akışkanlar mekaniği konseptlerini "Principia"nın ikinci cildinde hesaplamıştır.

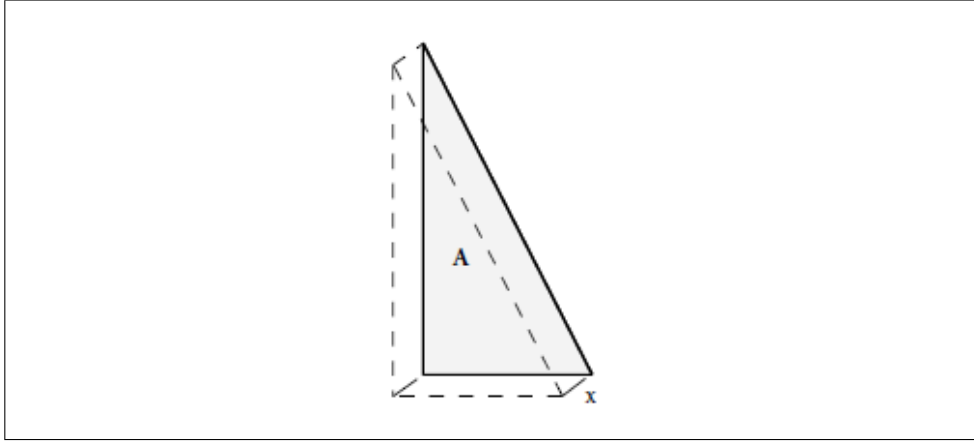
## 1.2 Newton'ın Darbe Teorisi

Bugün, Newton'un darbe teorisi ilkel olarak kabul edilmekle birlikte, Newton'un zamanında, maddenin niteliği hakkında çok fazla şey bilinmiyordu. Newton'ın bir yüzeze çarpan sıvının "zerre"leri(corpuscle) ifadesini kullanması atom ve moleküllerin henüz bilinmemesinden kaynaklanmaktadır.

Bir yelkenli geniş seyirde giderken her hava zerresini yelkene çarpan  $m$  kütleli ve  $V$  ortalama hızlı bir mermi gibi düşünebiliriz. Yelken, kendisine vuran zerrelere durdurmak için her zerreye kısa bir "darbe süresi"( $\tau$ ) içinde belli bir kuvvet uygulamalıdır. Durdurulan zerrelere de aynı şiddette ama ters yönde bir kuvvet uygulayarak yelkeni ileri iter.

$$\tau \cdot f = \tau \cdot m \cdot a \quad (1)$$

$$f = \frac{mV}{\tau} \quad (2)$$



**şekil 2:**  $\tau$  sürede rüzgarın aldığı yol  $x$ , yelken alanı  $A$ 'yla birlikte birim zamandaki hava hacmini verir.

$\tau$  sürede yelkene  $N$  adet zerre çarpar ve net kuvvet  $F_D = N \cdot f$  olur.

N'i bulmak içinse birim hacme düşen zerre sayısını  $\tau$  sürede yelkene çarpan hacimle çarpabiliriz.

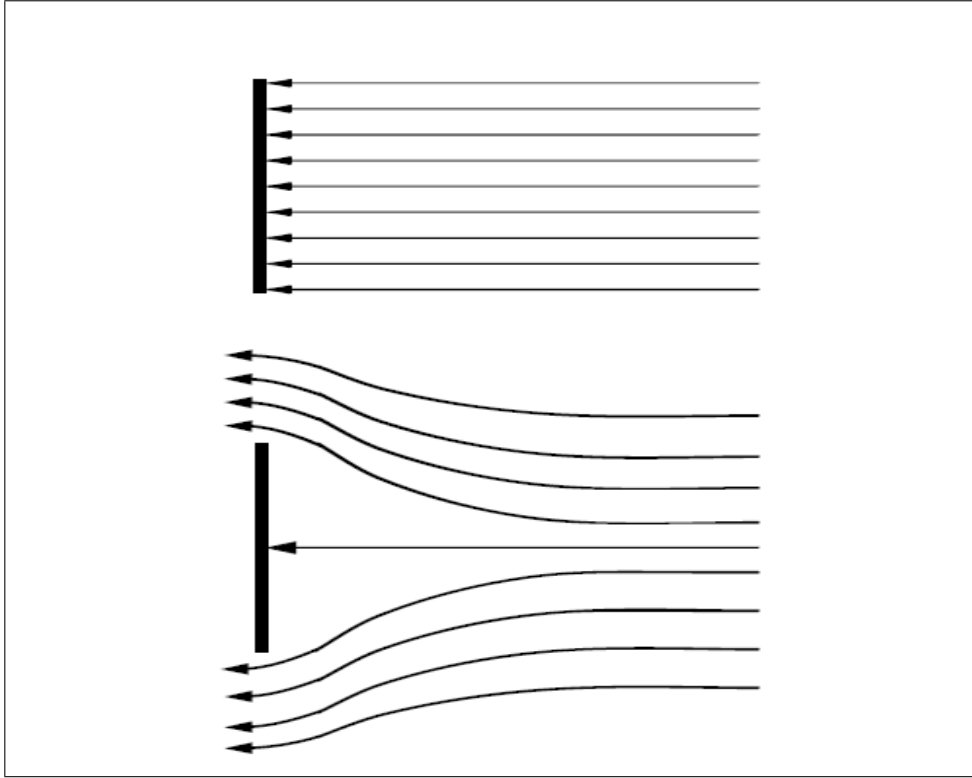
$$N = A_{yelken} \cdot [V\tau] \cdot (\text{zerre sayısı/hacim}) \quad (3)$$

Toplam kuvvet ise;

$$F_D = m \cdot (\text{zerre sayısı/hacim}) \cdot A_{yelken} \cdot V^2 \quad (4)$$

Zerre yoğunluğu(zerre sayısı/hacim) bugün ölçmesi kolay bir değerdir ve yaklaşık değeri  $\rho_{hava} \approx 1,25 \text{ kg/m}^3$  tür. Kuvvetteki alt indis D, akışkan hareketi yönündeki "drag(sürüklenme)" kuvvetini temsil eder.

Newton'ın darbe teorisi basit ve hatalı olmasına rağmen niteliksel bir fikir vermesi açısından önemlidir. Teorinin hesaba katmadığı çokça noktalardan biri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



**Şekil 3:** Newton akışkanın yüzeye çarpıp durduğunu varsayar; aslında olan ikinci şekilde daha doğru temsil edilmiştir.

Bu teori daha sonra biraz değiştirilerek

$$F_D = \frac{C_D}{2} \rho AV^2 \quad (5)$$

haline getirilmiştir.  $C_D$  sürüklenme katsayısıdır ve büyük bir hata payıyla 4/3 alınabilir.

### 1.3 Geniş Seyir Hız Oranı

Geniş seyir hız oranı  $S_0$  teknenin hızının( $U$ ) zahiri rüzgarın hızına( $V$ ) oranı olarak tanımlanır.

$$S_0 = \frac{U}{V}$$

Zahiri rüzgar yerine gerçek rüzgarla çalışmak burada daha faydalı olacaktır. Yelkenlinin hızı gerçek rüzgar hızı( $W = V + U$ ) cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$S_0 = \frac{U}{W - U}$$

$$U = \frac{S_0}{1 + S_0} W$$

Standart bir yelkenli için  $S_0 \cong 1$  kabul edilebilir. Bu da 10 knot'lık bir rüzgarda teknenin yaklaşık 5 knot hızla seyredeceği anlamına gelir. Geniş seyir hız oranını arttırmak yelkenlinin hızını arttırmaya denk geldiği için yelkenciler için önemlidir. Yapacağımız hesaplama hız oranını makul bir çerçeveye oturtacaktır.

$$F_{D(\text{rüzgar})} \cong \frac{1}{2} C_{D(\text{yelken})} \cdot A_{\text{yelken}} \cdot \rho_{\text{hava}} \cdot V^2 \quad (6)$$

$$F_{D(\text{su})} \cong \frac{1}{2} C_{D(\text{gövde})} \cdot A_{\text{gövde}} \cdot \rho_{\text{su}} \cdot U^2 \quad (7)$$

Burada  $\rho_{\text{hava}}$  ve  $\rho_{\text{su}}$  sırasıyla havanın ve suyun yoğunluğunu temsil etmektedir.  $S_0 = U/V$ 'yi de kullanarak;

$$S_0^2 \cong \frac{C_{D(\text{yelken})} A_{\text{yelken}} \rho_{\text{hava}}}{C_{D(\text{gövde})} A_{\text{gövde}} \rho_{\text{su}}} \quad (8)$$

Bu noktada yelkenli gövdesinin alanını hesaplamak için eskilere dönüp Arşimet'in ilkesinden yararlanmak gereklidir. Arşimet ilkesi "Sudaki nesnenin kütlesi, kütlenin yerinden ettiği su kadardır." der. Teknenin hacmini de yaklaşık sudaki yüzey alanı çarpı kabaca tekne boyunun( $L$ ) yarısı olarak düşünersek

$$A_{\text{yelken}} \cdot \frac{L}{2} \cdot \rho_{\text{tekne}} \cong m_{\text{tekne}} \quad (9)$$

ve geniş seyir hız oranı da

$$S_0^2 \cong \frac{C_{D(\text{yelken})} \rho_{\text{hava}} \cdot A_{\text{yelken}} \cdot L}{C_{D(\text{gövde})} 2m_{\text{tekne}}} \quad (10)$$

olur. Dikkat edilmesi gereken noktalardan biri tekne özelliklerinin bu oranın karesini belirliyor olmasıdır. Bu da bileşenlerle oynamanın çok büyük etkisi olmayacağı anlamına gelir. Örneğin, yelken alanını iki katına çıkarmak bu oranı yaklaşık 40% arttırır.



## 1.4 Rüzgar Pisi

Biraz deneyimli her yelkencinin bileceği gibi, herhangi bir büyük nesnenin hemen rüzgaraltında rüzgar neredeyse ortadan kaybolur, nesnenin uzaklaştıkça da yavaş yavaş orijinal hızına geri döner. Buna bir nesnenin “pisinde kalmak” denir. Yarışan yelkenliler diğer teknelerin pisinde kalmayacak şekilde hareket eder. Rakibi kendi pisinde bırakmak da yarışlarda kullanılan bir taktiktir. Rüzgar pisinin şiddetini ve alanını tahmin etmek için yine temel fiziksel prensipleri kullanabiliriz.

Rüzgar pisinde zahiri rüzgar hızı  $V$ 'den  $(V - \Delta V)$ 'ye düşer. Yavaşlayan rüzgarın toparlanma hızına  $\Delta V(x)$  diyelim. Buradaki  $x$  pisinde kaldığımız yelkene uzaklığımız olarak tanımlanmıştır. Rüzgarüstü yelkenden uzaklaştıkça rüzgarımız normale dönmeye başlar ve  $\Delta V(x)$  gittikçe küçülür. Bu sırada unutulmaması gereken bir etki de rüzgar pisinin yelkenden uzaklaştıkça yayılmasıdır. Rüzgar pisinin yayılmasını  $L(x)$ , yayıldığı kesit alanı da  $A(x)$  ile gösterelim.

Pisteki rüzgar hızı momentum korunumu üzerinden hesaplayacağız. Yelken rüzgarın momentumunu düşürüyor olsa da, rüzgar yelkenin arkasına geçtikten sonra üstünde herhangi bir kuvvet olmadığı için momentumu sabittir. Bahsettiğimiz momentum değişimi  $\Delta V \cdot A(x)$ 'tir.  $x \approx 0$  konumunda (yelkenin hemen arkasında) rüzgar pisinin alanı yelken alanı kadardır ( $A(0) \cong A_{yelken}$ ); rüzgar hızı da sıfır olduğu için  $\Delta V \cong V$  diyebiliriz ( $\Delta V(x)$ 'in sıfırlanmasının rüzgarın normale dönmesi demek olduğunu unutmayalım). Bu durumda momentum korunumu

$$\Delta V(x) \cdot A(x) \simeq V \cdot A_{yelken} \quad (11)$$

Rüzgar pisi yatay ve dikeyde yaklaşık aynı oranda büyür.  $A_{yelken} \simeq L_{yelken}^2$  ve  $A(x) \simeq L(x)^2$  dersek, denklem 11 şuna dönüşür:

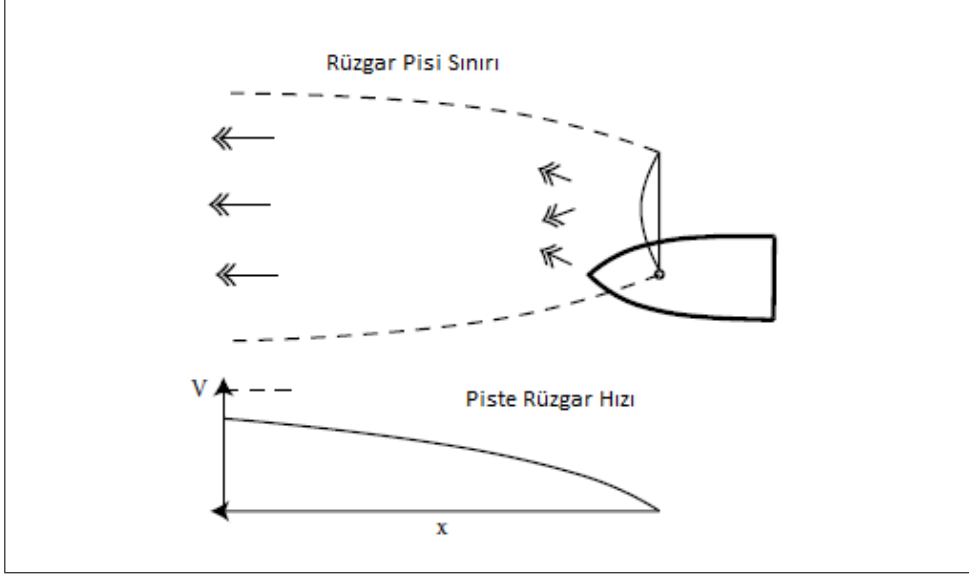
$$\Delta V \simeq V \left( \frac{L_{yelken}}{L(x)} \right)^2 \quad (12)$$

Bu denkleme göre orsa yakası uzunluğu 5 metre olan bir ana yelken, rüzgaraltında 10 metre uzaklıkta yine 10 metre genişlikte bir bölgede zahiri rüzgarı %25 oranında yavaşlatır. Bu azalma 20 metrede yaklaşık %6'lara düşer.

Tabi ki bu hesaplar yaklaşık olarak yapılmıştır ve hesaba dahil edilemediği için dışarıda bırakılan çok etken vardır. Bir teknenin pisinde kalabileceğimiz alanın sınırları kesinlikle sabit ya da belli değildir; üstteki hesapta farklı açılardan gelebilecek rüzgarlar ve rüzgaraltındaki boşluğa dolan hava-

nm yaratacağı türbülans da tamamen göz ardı edilmiştir.

Belirtmekte fayda olan başka bir detay ise pisinde kalabileceğimiz tek şeyin yelken olmadığıdır. Rüzgarüstünde kalan bir tepe de rüzgar hızının düşmesine ve türbülansa sebep olur. Coğrafi şekillerin alanı çok daha büyük olduğu için piserinde kalabileceğimiz alan da büyüktür. Bu yüzden yelken yaparken dağların, tepelerin rüzgaraltına genelde girilmez.



**Şekil 4:** Rüzgaraltı mesafesinin küp köküyle büyüyen rüzgar pisi. Oklar hemen rüzgaraltındaki yavaşlamayı ve türbülansı temsil etmektedir. Rüzgaraltından uzaklaştıkça rüzgar eski hızına kavuşur.

## 2 Dar Seyir

Bir yelkenliyi dar seyirle rüzgara doğru ilerletmek, nasıl ilerlediğini anlamaktan genellikle daha kolaydır. İlk bakışta karşıdan esen rüzgara karşı yol almak imkansız gelebilir. Rüzgar dar açılardan geldiğinde bizi kurtaracak konsept “lift(kaldırma)” kuvvetidir. Rüzgar kaynaklı kaldırma kuvveti ile su kaynaklı kaldırma kuvveti birlikte teknenin dar seyir yapmasını mümkün kılar. Bu kuvvet aynı zamanda uçakların uçuşunu da sağlayan kuvvettir fakat uçaklarda tek akışkan(hava) söz konusuysen iş yelkene geldiğinde iki akışkanla birden baş etmek gerekir.

Yelkenciler için akışkanlar mekaniğinin merkezinde sürükleme ve kaldırma kuvveti bulunur. Hava veya su bir nesneyi kendi hareket yönünde ittiğinde buna sürükleme kuvveti deriz. Bu kuvvet  $F_D$  ile gösterilir. Kaldırma

kuvveti ise sürükleme kuvvetine diktir. Bu kuvvet ise  $F_L$  ile gösterilecektir.

## 2.1 Dar Seyrin Fiziği

Dar seyirdeki kuvvet dengelerini ve yelkenlinin rüzgara karşı nasıl yol aldığını beş adımda inceleyeceğiz.

### 2.1.1 Lift ve Drag Olguları

Kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin sahip olduğu bazı genelgeçer özellikler vardır;

- Bu kuvvetler yaklaşık olarak akışkan hızının (su, hava,...) karesiyle doğru orantılıdır.
- Etki ettikleri nesnenin büyüklüğüne, şekline ve akışkan içindeki yöneline karmaşık bir ilişkiyle bağlıdır.
- Yüzey dokusuyla karmaşık şekillerde etkileşir ve değişirler.
- İkisi de akışkan türbülansına tabidir.

Basit darbe modelinin üzerine yapılacak düzeltmeler ve geliştirmeler kolaylık olması açısından “lift” ve “drag” katsayıları içine gömülmüştür. Kuvvetlerimiz şöyle ifade edilir;

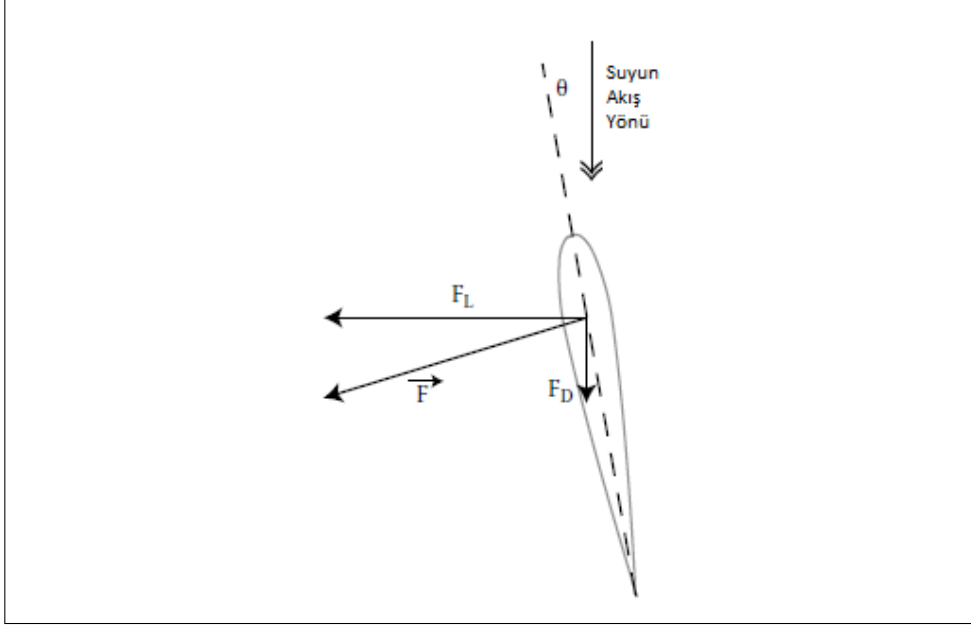
$$F_D = \frac{C_D}{2} \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (13)$$

$$F_L = \frac{C_L}{2} \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (14)$$

Bu formüllerde  $A$  alanı,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $V$  ise zahiri rüzgar hızını belirtir. Bu formülleri su için yazmış olsaydık  $V$  yerine  $U$  (tekne hızı) kullanacaktık. Bu formülleri çok kolayca kullanabiliriz: Geniş seyirde  $A$  yelken alanıdır; ortalama sürükleme katsayı da  $C_D \simeq 4/3$  alınabilir. Geniş seyirde kaldırma kuvveti yoktur, bu yüzden  $C_L = 0$  deriz. Aslında karmaşık ifadeler olmalarına rağmen bazı kabullerle işlem yapılabilir hale gelirler.

### 2.1.2 Salmada Lift ve Drag Kuvveti

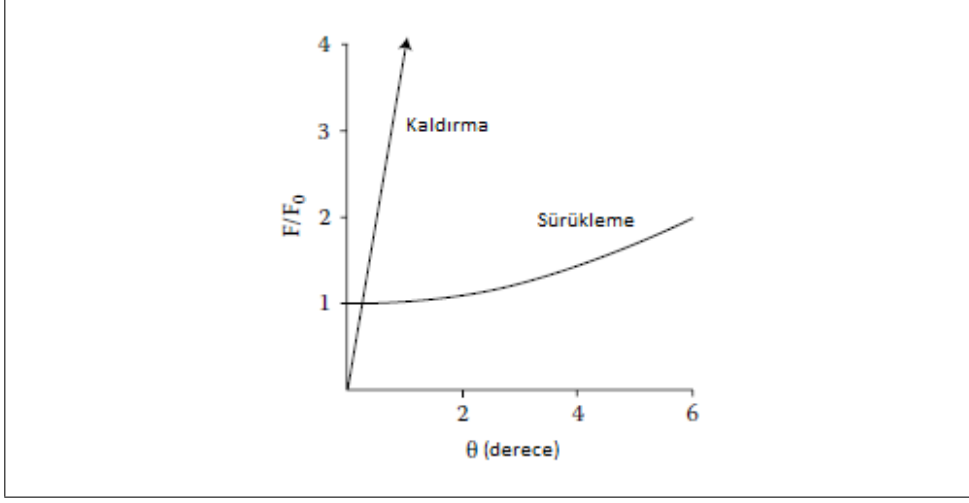
Dar seyirler salma olmadan mümkün değildir. Rüzgar tekneyi yana doğru itmeye çalışırken bu kaymayı durdurup kaldırma kuvvetine dönüştüren kısım salmadır.



**Şekil 5:** Hücüm açısı  $\theta$ 'ya bağlı olarak sürüklenme kuvveti  $F_D$  ve kaldırma kuvveti  $F_L$

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri akışkanın yönüne bağlıdır. Akışı kuzeyden güneye kabul ederek teknemizin bu akışla yaptığı açıya “hücüm açısı (angle of attack)” denir ve  $\theta$  ile gösterilir. Bu açı sıfırken kaldırma kuvveti oluşmaz. Teknenin şekli sebebiyle sürüklenme kuvveti de hayli azdır; hatta aynı kesit alanlı düz bir plakaya nazaran kuvvet  $1/30$ 'lara kadar düşer.

Hücüm açısı arttırıldıkça kaldırma kuvveti hızlıca artmaya başlar, sürüklenme kuvveti de onu takip eder. Kaldırma kuvvetinin hücüm açısıyla ilişkisi doğru orantılıdır; sürüklenme ise açının karesiyle artar. Küçük açılar için bu ilişki şöyledir:



**Şekil 6:** Şekildeki değerler  $\theta = 0$ 'da sürüklenme kuvvetine ölçeklenmiştir. Daha büyük açılarda kuvvetler bu kadar basit ifade edilemez.

$$F_{D(salma)} \cong F_0 \left( 1 + \left( \frac{\theta}{d_0} \right)^2 \right) \quad (15)$$

$$F_{L(salma)} \cong F_0 \left( \frac{\theta}{l_0} \right) \quad (16)$$

$F_0$  hücum açısı sıfırken varolan sürüklenme kuvvetidir ve sabit alınabilir.  $d_0$  sürüklemenin iki katına çıktığı açı,  $l_0$  ise sürüklemenin kaldırmaya eşitlendiği açıdır. Standart teknelerde  $d_0$   $5^\circ$  ile  $8^\circ$  arası değer alırken  $l_0$  genelde  $1^\circ$ 'den azdır. Bu hesaplarda kullanılan hücum açısı  $10^\circ$ 'yi geçerse akışkanların karmaşık yapısı nedeniyle bu denklemler çalışmamaya başlar. Kayda değer bir nokta da bu etkilerin teknenin dümen palasında da aynen tekrarlanmasıdır. Buna bağlı olarak dümenin hücum açısının sertçe değiştirilmesi kaldırma kuvvetini azaltacağı için tavsiye edilmez.

Newton'ın darbe teorisini bu bağlamda uygulamak bizi kesinlikle yanlış bir sonuca götürecektir. Parçacık sayısı ve değişen momentum üzerinden yapılan bir hesap kaldırma kuvvetinin hücum açısıyla doğru orantılı olduğunu söyler; bu büyük bir basitleştirmedir ve bu model doğru çalışmaz. Çeşitli daha gelişmiş teoriler olmasına rağmen bu kuvvetleri ve katsayıları belirlemedeki en iyi yöntem hala gözlem ve deneydir.

### 2.1.3 Tekneyi İleri İtmek

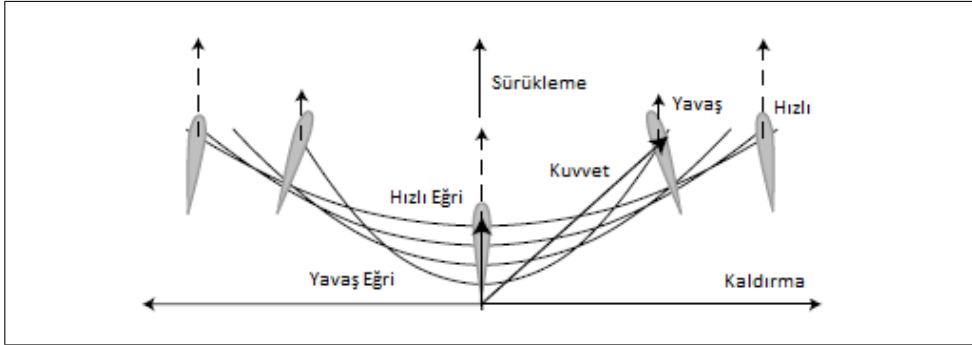
Tekne hızlarını hesaplamak istiyorsak öncelikle suda tekneyi ileri iten mekanizmayı anlamamız gerekir. Bunu da kuvvetleri karşılaştırıp birbirine bağlayarak yapabiliriz.

Teknemizi direkt kuzeye doğru itmeye çalışan bir rüzgâr düşünelim. Eğer salmamız da kuzey-güney eksenindeyse, kaldırma kuvveti hiç oluşmaz ve teknemiz kuzeye doğru ilerler. Ancak teknenin burnu örneğin bir miktar batıya doğru bakıyorsa kuzeye iten kuvvet artmalıdır; bunun sebebi de kaldırma kuvvetinin artık sıfır olmamasıdır. Tekneyi kuzeye doğru götürecektir kuvvet şeklindeki(5) kuvvetin tam zıttıdır.

Kuvvet denklemlerinden hücum açısını çıkarıp direkt kuvvetleri karşılaştırmak için 15 ya da 16'dan  $\theta$  çekilerek diğerinin içine yazılır:

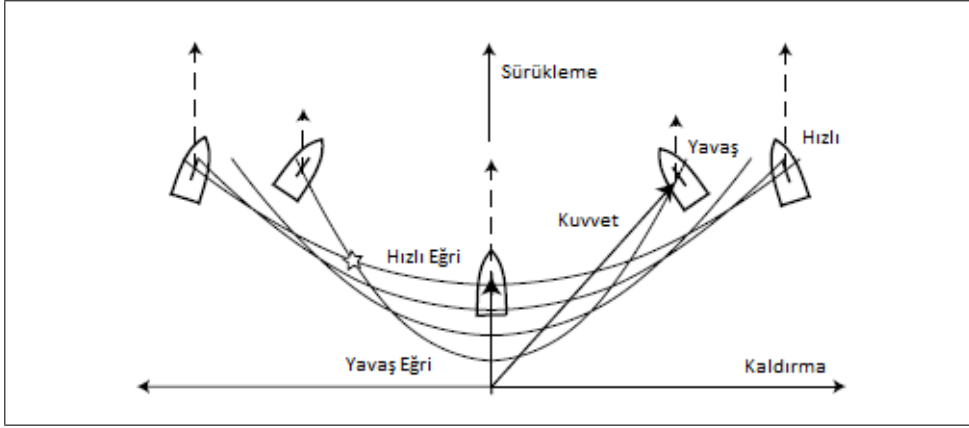
$$F_D = F_0 + \frac{1}{F_0} \left( \frac{l_0}{d_0} \right)^2 F_L^2 \quad (17)$$

Böylece, sürüklenme kuvveti kaldırma kuvveti cinsinden ifade edilmiş olur ve denklemin ikinci dereceden olduğu için grafiğimizde paraboller gözlemleyeceğiz.



**Şekil 7:** Eğriler tekneyi sayfanın yukarısına götürecektir kuvvetleri temsil eder. Her eğri farklı bir hızda itmeye denk gelir.

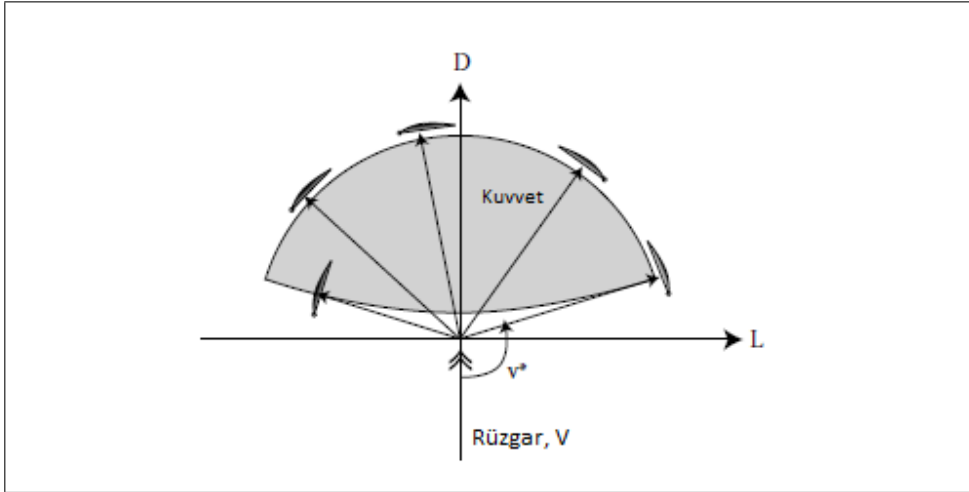
Şekildeki herhangi bir eğrinin üzerindeki her nokta tekneyi kuzeye itmek için gereken sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri oranını verir. Birkaç eğri olması farklı hızları ve dolayısıyla farklı tekneleri temsil etmek içindir. Hesabımıza teknenin geri kalanının sürüklenme kuvvetine katkısını da katarsak aşağıdaki grafiği elde ederiz:



**Şekil 8:** Eğriler tekneyi sayfanın yukarısına götürecektir. Kuvvet vektörleri sürüklenme ve kaldırma olarak gösterilmiştir. Hızlı ve Yavaş eğrileri de göstermektedir.

#### 2.1.4 Rüzgarın Lift ve Drag Kuvveti

Rüzgarın yarattığı kuvvet sürüklenme ve kaldırma parçalarından oluşması bakımından sudan farkı yoktur. Aşağıdaki şekilde rüzgarın kuvvetler grafiği ve yelkenin kuvvetlere konum örnekleri verilmiştir.



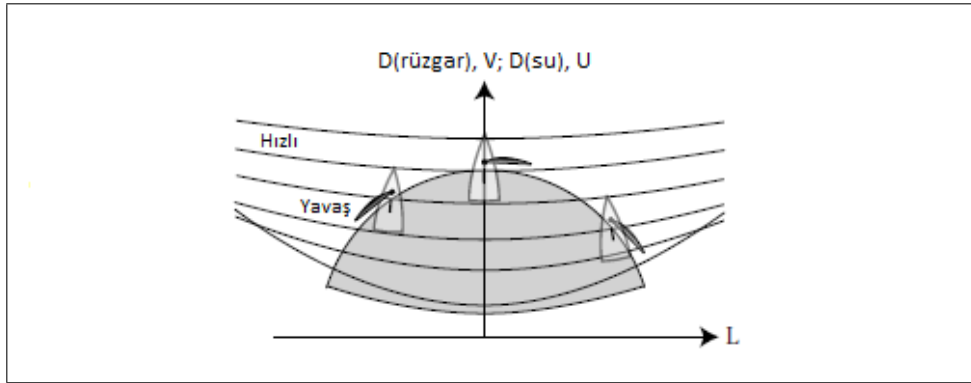
**Şekil 9:** Rüzgarın kuvvet vektörü boyalı alanın sınırındaki herhangi bir nokta olabilir. Ayrıca şekilde beş farklı yelken trim örneği gösterilmiştir.

Rüzgarın sudan ayrıldığı kısım hücum açısıdır. Bütün açıları hesaba katmak su kuvvetlerindeki parabolün aksine burada kapalı bir eğri oluşmasına sebep olur. Bu kapalı eğri yatay kesilirse kabaca bir parabol ve bir yarım daireden oluşmuş denilebilir. Bunun sebepleri;

1. Hücüm açısı küçük olduğu için alt yarıda rüzgar kuvveti su kuvvetine benzer davranır ve daha önce gördüğümüz parabolü yaratır. Parabolün en alt noktası zahiri rüzgarla tam aynı yönde, boşlanmış bir yelkeni temsil eder.
2. Üst yarı yelkenle rüzgarın arasındaki hücüm açısı büyük durumları temsil eder. Burası geniş seyirde seyretmekle aynıdır ve kuvvetlerin ilişkisi parabolik değildir. En orta tepedeki nokta ise rüzgarı iğnecikten almaya denk gelir ve teorik olarak hiç kaldırma kuvveti bulundurmaz.
3. Üst ve alt parçaların birleştiği iki uç nokta özel bir öneme sahiptir. Azami kaldırma kuvveti elde etmek için (azami L/D oranı) yelkenciler kuvvet dengesini bu noktalarda tutmaya çalışmalıdır.

### 2.1.5 Su ve Rüzgar

Bu kısımda su ve rüzgar kuvvetlerinin etkilerini birlikte ele alacağız. Stabil bir seyir için bu iki kuvvet birbirini tam dengelemelidir; öyleyse bu kuvvetlerin eğrilerini çizip eğrilerin kesiştiği yerleri aramalıyız. Bunu gerçekleştirmek için yapılması gereken ölçekleme sadece kafa karıştırıcı olacağı düşünülmüş bu yazıya dahil edilmemiştir. Nihayetinde elde edilen şekil şudur:

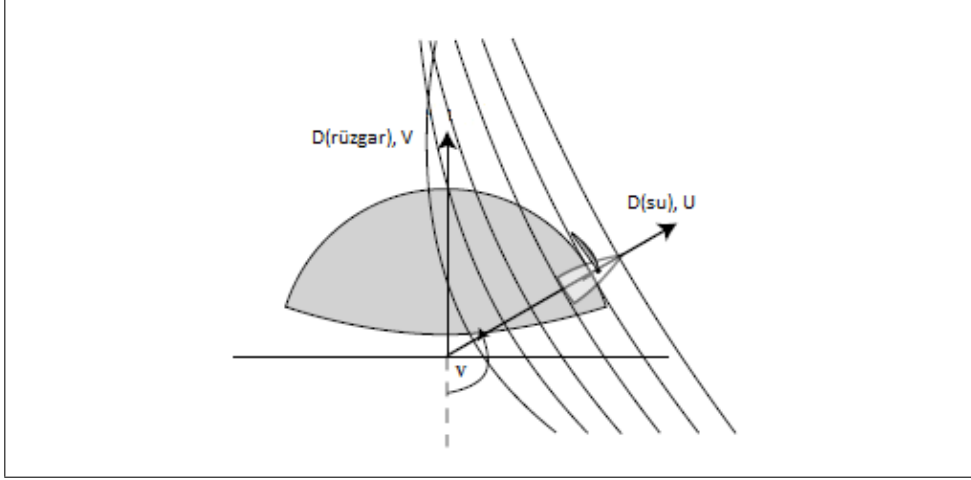


**Şekil 10:** Geniş seyirde rüzgarın ve suyun kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri. Farklı eğriler farklı tekne hızlarını temsil eder. Su ve hava kuvvetlerinin eşit olduğu üç yere yelkenliler çizilmiştir.

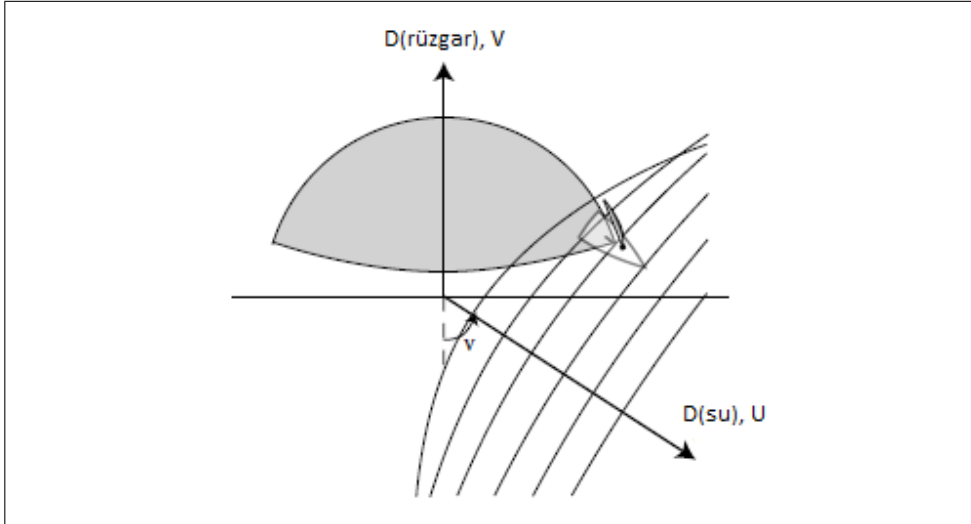
Kapalı şeklin kenarlarıyla eğrilerin kesiştiği noktalar stabil bir seyir sağlayan, kuvvetlerin dengelendiği noktalardır. Suyun kuvvetleri olarak gösterilen büyüklükler ise aslında suda ilerleyen teknenin kuvvetleridir. Farklı paraboller farklı hızlarda giden yelkenlileri temsil eder ve bunlardan en üstteki mümkün olandan fazla bir hıza denk gelir. Kapalı şekille kesişen bir



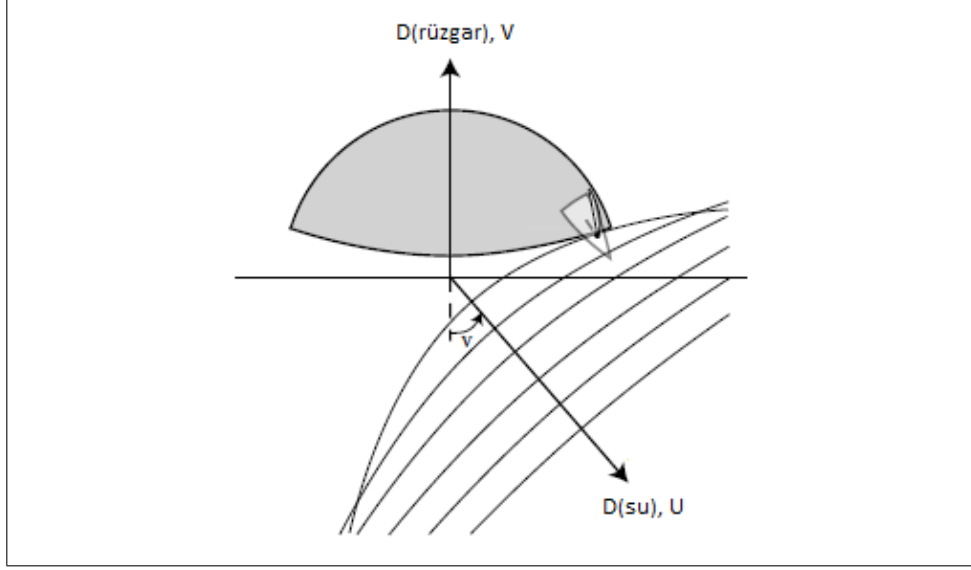
noktası olmaması bize bu hızın stabil bir seyir olmadığını ve uzun süre korunamayacağını gösterir. Bu şekli sindirdikten sonra aşağıda verilen şekiller farklı seyirlerdeki rüzgar - su ilişkisini anlamamızı kolaylaştıracaktır.



**Şekil 11:** Teknenin ve dolayısıyla suyun açısı rüzgarla aynı olmadığında şeklimiz döner.



**Şekil 12:** En hızlı yelken için en fazla kaldırma kuvveti istenir.



**Şekil 13:** En dar seyir. Bu yelkenli çok orsa girmiştir ve daha fazla hız için kafayı açması gerekir.

Bu hesaplamaları toparlayıp hem dar seyri hem geniş seyri kapsayan bir formül yazmak istersek, yapılması gereken ilk şey geniş seyir hız oranını ( $S_0$ ) seyirden bağımsız ve açıya bağlı bir büyüklük haline getirmektir.

$$U = S(v)V \quad (18)$$

Şekil (12)'de teknenin bulunduğu yer kuvvet dengesi ve azami hız anlamına gelir. Bu noktayı  $v < v^*$  durumu için cebirsel olarak ifade edersek ( $v > v^*$  durumu için  $S(v) = S_0$  kabul ederek),

$$S(v)^2 = S_0^2 \begin{cases} \frac{1}{2} \cos(v^* - v) \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1}{[L/D]_{su}} \right)^2 \tan^2(v^* - v)} \right) & , v < v^* \\ 1 & , v > v^* \end{cases} \quad (19)$$

Gördüğümüz gibi hız oranı  $S_0$  geniş seyirde sabit olarak alınabilirken dar seyirde ise teknemizin zahiri rüzgarla yaptığı açıya doğrudan bağlıdır ve yelkenlimizin hızının zahiri rüzgar hızına oranı rüzgarla yaptığımız açı azaldıkça azalır.

## 2.2 Dar Seyir Neden Bu Kadar Karışık?

Kullandığımız bu kadar formüle ve şekle rağmen yelkenciliği yeterince kağıda dökemiyoruz. Vardığımız sonuçlara ulaşmak için yapmamız gereken

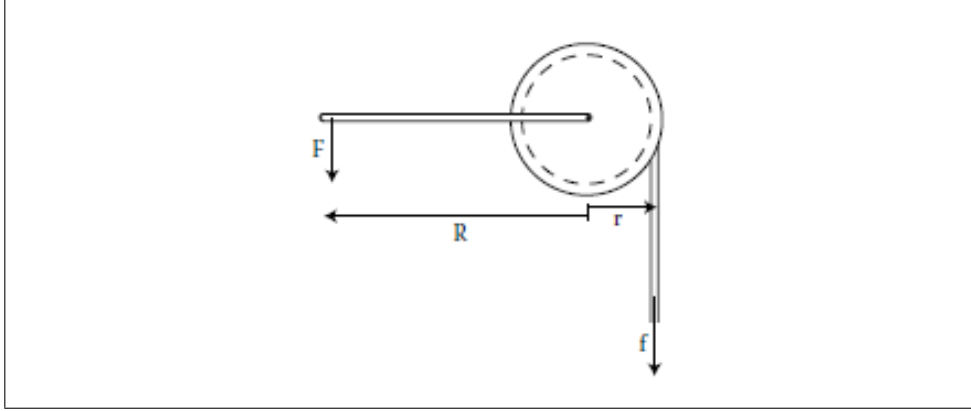
bazı basitleştirmeler ve kabuller vardı. Durumun doğasını daha iyi anlatabilmek için bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- İkincil kuvvet yaklaşımına göre teknenin hızı rüzgar hızına doğru orantılıdır. Fakat ne rüzgarın ne de suyun kuvveti tam olarak rüzgar hızının karesiyle gitmez. Dikkatlice ölçüldüğünde artan rüzgar hızıyla tekne hızının artışının azaldığı görülür.
- Yelkenliler geniş seyirde balon yelken kullanır. Balon yelkenin hız şemaları ve hesapları bizim hesaplarımıza hiç dahil edilmemiştir. Balon yelken hız oranlarını ve kuvvet dengelerini dramatik şekilde değiştirir.
- Rüzgar hızı parabolleri içeren şekillerimizdeki eğriler idealize edilmiştir. Hiçbiri tam bir parabol ya da tam bir çember değildir; daha gerçekçi bir grafik için ölçüm yapılmalıdır.
- Yelken üzerindeki kuvvet sadece basınç kaynaklı değildir. Havanın viskozitesi yüzünden oluşan ve kaldırma kuvvetiyle dengelenmesi gereken bir kuvvet daha vardır. Bu kuvvet burada hesaba katılmamıştır.
- Tekne trapez gerektirecek kadar yatmaya başladığında bu kuvvetlerin hepsi maalesef tekrar düzenlenmeli ve hesaplanmalıdır.

Bu ve benzeri göz ardı edilen noktaları katmak bile bizi tam bir anlayışa kavuşturmayacaktır; akışkanlar mekaniği doğası gereği karmaşık ve teorik açıdan uğraşması zor bir alandır.

### 3 Yalpa, Baş-Kıç Vurma ve Savrulma

Yelkenli tekneler rüzgarla, dalgalarla ve dümencinin hareketleriyle çeşitli sallanmalar, sarsılmalar ve savrulmalar yaşar. Teknenin tecrübe ettiği bu hareketleri üç ana başlıkta toplayabiliriz. Yalpa(roll), teknenin omurga eksenini etrafında yatma ve düzelmesine denir. Fazla yalpa sonucunda tekneimiz alabora olabilir. Baş-kıç vurma(pitch), teknenin başının ve kıçının aşağı-yukarı hareketidir. Çok sıradışı durumlarda bu hareket de tekneye öne doğru takla attırabilir. Savrulma(yaw) ise teknenin burnunun çeşitli sarsıntılarla açı değiştirmesidir. Bu üç etkiyi dengeleyip asgari seviyede tutmak dengeli ve rahat bir yelken kullanımı için gereklidir. Çok temel olduğu ve herhangi bir kaynaktan ana prensipleri öğrenilebileceği için tork(torque) konsepti bu yazıda anlatılmamıştır, fakat küçük bir görselle genel fikir verilebilir:



**Şekil 14:** Bir vinçte ters yöndeki torklar  $\tau_1 = F \times R$  ve  $\tau_2 = -f \times r$ . Saat yönünün tersi artı olarak alınmıştır.

Yelken bağlamında tork hesabı için ise şu prensipler önemlidir:

- Yelkenli, konu başlığında da geçen üç farklı eksende torka maruz kalır.
- Yelkenlinin dönme eksenini tam olarak belli olmamasına tork hesapları için kütle merkezini referans noktası almak yeterlidir.
- Uygulanan kuvvet, kuvvet koluna dik değilse tork hesaplanırken kuvvetin dik bileşeni alınır.
- Tekneye bütün kuvvetler tek bir noktadan uygulanmaz, fakat tek bir noktadan uygulanan toplam bir kuvvet olarak modellenmekte bir sakınca yoktur. Toplam kuvvetin uygulandığı bu noktaya “itme merkezi (center of effort)” denir.

Yelkende düşünülmesi gereken torklar rüzgar, su ve yüzerlik kaynaklıdır. Dengeli bir seyir için bu torkların ayrı ayrı sıfırlanması gerekir. Hesapları kolaylaştırmak için tekne üzerindeki üç özel nokta kullanılacaktır. Bunlar;

1. Kütle Merkezi: En çok bilinen noktamız budur. Tekneyi herhangi bir yerinden kaldırdığımızda yere doğru çizilen bir çizgi kütle merkezinden geçmek zorundadır. İki farklı yerden tekneyi kaldırarak bu noktayı keşiften doğrulardan bulabiliriz. Teknenin sancağı ve iskelesi simetrik olduğu için bu nokta omurga hattı üzerindedir.
2. Yüzerlik Merkezi: Yerçekimi tekneyi aşağı çektikçe yüzerlik ona direnen etkidir. Bütün tekneye etki etmesine rağmen tek bir noktadan etki eder gibi modelleyeceğiz. Kütle merkezinin aksine yüzerlik merkezi tekne hareket ettikçe yer değiştirir.

3. İtme Merkezi: Rüzgarın yelkene uyguladığı kuvveti bu merkezden etki ediyormuş gibi modelleyeceğiz. Suyun salma üzerindeki yatay kuvveti de aynı şekilde bir itme merkezi olarak tek nokta olarak alınacak.

Bu noktaları belirledikten sonra bütün torkları tek tek ifade edip denge koşuluna bakacağız.

İlk tork kaynağımız rüzgarın yelkene uyguladığı kuvvet kaynaklı. İtme merkezi kütle merkezinin  $h_1$  kadar yukarısında ise

$$\tau_1 = -F \times h_1 \quad (20)$$

Eksi işareti torkun yönü nedeniyledir. İkinci tork kaynağımız teknenin gövdesine yatay olarak etki eden suyun kuvvetidir. Suyun itme merkezi kütle merkezinin  $h_2$  kadar aşağısında alınarak

$$\tau_2 = -F \times h_2 \quad (21)$$

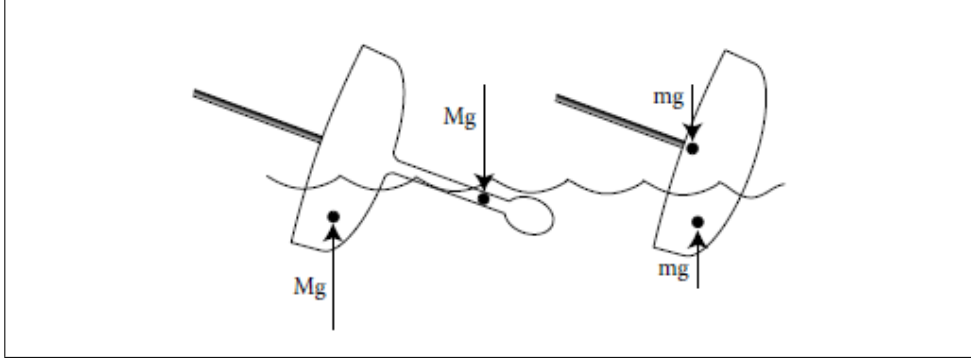
En son olarak da yerçekimine eşit şiddette yüzerliğin getirdiği bir tork vardır. Teknenin batan kısmına daha yakındır. Yüzerlik merkezini teknenin ucunda kabul ederek, eni  $B$  olan bir teknenin kütle merkezine  $B/2$  uzaklıkta alıyoruz:

$$\tau_3 = Mg \times \frac{B}{2} \quad (22)$$

Diğer torklara ters yönde olduğu için burada eksi işareti yoktur. Bu torklar toplamı sıfır olduğunda tekne dengeli bir şekilde yol alabilir:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0 \quad (23)$$

Salması olan bir teknenin alabora olması, alabora olsa da öyle kalması imkansıza yakındır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi salma daha ağır ve tekneden daha uzak oldukça alabora riski de gittikçe azalır. Salmasız bir tekne ise belli bir yatıklıktan sonra torkları dengeleyemez ve devrilir.



**Şekil 15:** Salmalı ve salmasız teknelerde yerçekimi ve yüzdürme kuvveti torkları.

## Dengeli Seyir

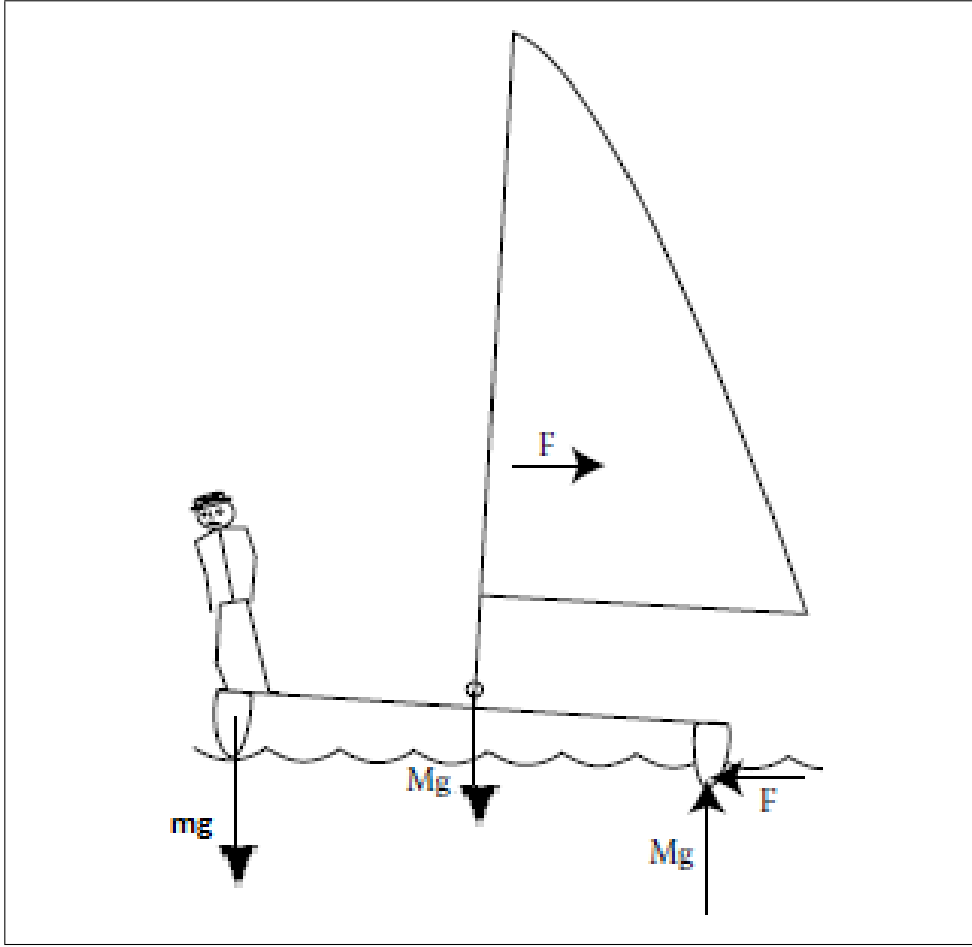
Teknenin fazla yatması ya da bayılması sürati ve konforu azaltacağı için istenmeyen bir durumdur. Torkların dengelenmemesi sonucunda yana yatan tekneyi dengelemek için iki metod vardır: teknenin üzerindeki torkları azaltmak ya da bayılmaya direnen torkları arttırmak.

## Torku Azaltmak

Tork, kuvvet ve referans noktasına uzaklıkla doğru orantılı olduğu için bu değerleri azaltmak gereklidir. Camadan vurmak dediğimiz işlemle bu iki değer de azaltılır. Bir yelkeni 10% kadar kapatmak alanını  $(0,9)^2$  kadar azaltırken itme merkezini de 10% kadar aşağı çeker. Bu da torkta yaklaşık 25% oranında azalma sağlar. Camadan vurulamıyorsa yelken boşlanarak da tork azaltılabilir.

## Karşıt Torku Arttırmak

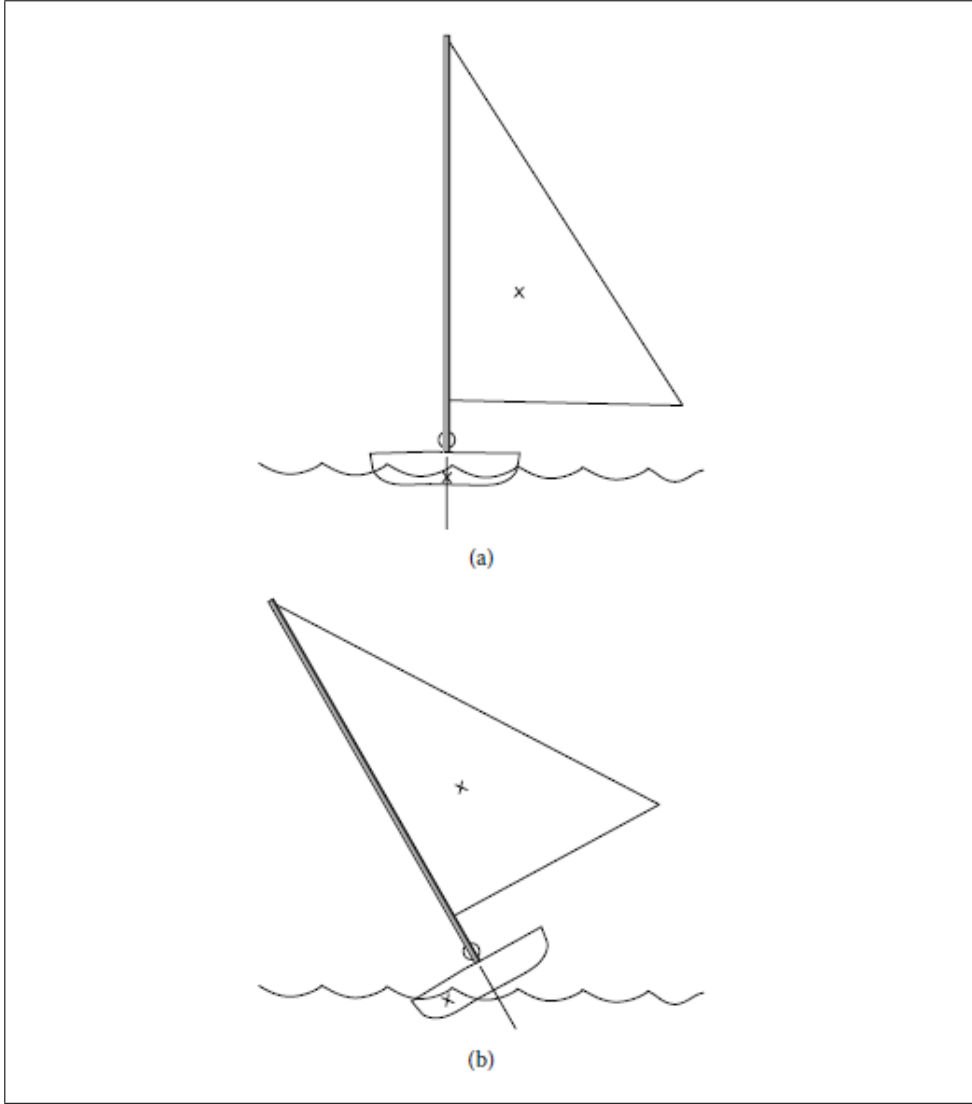
Yelkenciler olarak hız kaybetmemek adına tekne üzerindeki kuvvetleri azaltmayı sevmeyiz. Bunun yerine karşıt kuvvetleri arttırarak rüzgardan tam verim almak amaçlanır. Trapeze çıkmak dediğimiz hareket, bir ağırlığı yelkenliden olabildiğince uzağa koyarak bayılmayı azaltır. Uzaklık arttıkça değişmeyen bir kuvvetten alınan tork ( $\tau = F \times d$ ) da artar. Trapeze çıkmak tork dengesi düşünüldüğünde teknenin yüzerliğinin artmasıyla denk bir etkidir. Eskiden bu etki için tekne içinde kum torbaları ya da su tankları da kullanılmıştır. Modern teknelerin bazılarında da torkla oynayabilmek için hareketli salma bulunur.



**Şekil 16:** Torkların toplamı sıfır olduğunda yelkenli dengeli seyrederek. Torkları dengelemek için kendi ağırlığımızı kullanırız.

### Dümen İdaresi

Teknenin gideceği yönü belirlerken tek söz sahibi dümen değildir. Şekilde de görüldüğü gibi torklar toplamı teknenin burnunu savurup yönünü değiştirebilir.



**Şekil 17:** Geniş seyirde kıçtan görünüş. Yelkendeki X itme merkezini, gövdedeki X ise sudan kaynaklanan direncini gösterir.

Şekilde yelkenin üzerindeki X rüzgarın itme merkezi, teknenin üzerindeki X ise suyun itme merkezidir. Yelkenliyi yatırmadan kullanırsak bu iki merkezin arasındaki yatay mesafe bir tork yaratacaktır. Bu sebeple tekne yatırılır ve yataydaki net tork sıfırlanır.



## 4 Navier-Stokes Denklemi, Viskozite ve Reynolds Sayısı

Makalenin geri kalanı akışkanlar mekaniğiyle ilgili daha derin bilgiler içermektedir. Her ne kadar yeterli zaman ayrıldığında anlaşılması zor olmasa da, okuyucunun bu noktadan sonrasını eğlenceli ek bir bölüm olarak görmesini beklemekteyiz.

Su ve havanın hareketi Navier-Stokes denklemiyle tamamen tarif edilmiş durumda olmasına rağmen, denklemin doğrusal olmayan(non-linear) yapısından ötürü herhangi bir sonuç elde etmek ve bu sonuçları anlamlandırmak çeşitli kabuller, sınamalar, hayalgücü ve tecrübe gerektirir. Yazımızda bu denklem ve ilgili kavramların bulunma amacı yelkene yönelik hesaplardan ziyade genel kültür ve aşinalık kazanmaktır.

### 4.1 Navier-Stokes Denklemi

Newton'ın en temel denkleminde başlayacağız;

$$m\vec{a} = \vec{F} \quad (24)$$

Akışkanlar için bu denklemi düzenlememiz gerekecek. Katı bir cismin ivmesi( $\vec{a}$ ) yerine akışkanın küçük bir kısmının ivmesinden, kütlesi( $m$ ) yerine de küçük bir hacimle çarpılmış akışkan yoğunluğundan( $\rho$ ) bahsediyor olacağız. Bu sistemin üzerindeki kuvvetlerden biri basınç farkları kaynaklı, diğeri ise sürtünme ve viskozite kaynaklı. Newton'ın denkleminde uygulandığında;

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}p + [\rho\zeta]\nabla^2\vec{u} \quad (25)$$

Bu denklemde  $\vec{u}$  bir anda bir konumdaki akışkan hızı,  $D\vec{u}/Dt$  ise akışkanın ivmesidir. Eşitliğin sağındaki ilk terim basınç, ikinci terim sürtünme kuvvetidir. Basınçtan gelen kuvvetin başındaki eksi kuvvetin doğru yönde olması için gereklidir. "Dinamik viskozite"  $[\rho\zeta]$  ikinci kuvvetin şiddetini belirler. İvme terimi hareket eden bir akışkanın ivmesi olduğu için karmaşıktır ve tam ifadesi şu şekildedir;

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} \quad (26)$$

Bu türevi normal zaman türevinden farklı kılan kısım ikinci terimdir. Bir akışkan ilk terimin sıfır olduğu(hızın değişmediği) durumlarda bile ivmelenebileceği için bu terim hayatidir. İkinci terimdeki hızın( $u$ ) karesi bu denklemi doğrusal olmayan(non-linear) ve çözümsüz yapan kısımdır.

Yelkenciler kuvvetlerden ziyade akışkanın hızı ve ivmesiyle ilgileneceği için denklemi o şekle sokalım:

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}p + \zeta\nabla^2\vec{u} \quad (27)$$

Denklemini tamamlamak için iki kabulden bahsetmemiz gerekiyor. Bunlardan ilki "kaymazlık" şartıdır. Akışkanın temas ettiği yüzeylerde akışkan hızını sıfır almaya denk gelir. İkinci şart ise "akışkanın korunması" şartıdır. Denklemi hem  $p$  hem  $\vec{u}$  cinsinden çözmek ümitsiz olduğu için bu şartla basınç terimi verili kabul edilir.

## 4.2 Viskozite

Newton viskoziteyi ilk kez tanımlayan kişi olmuştur. Bulduğu tanıma uyan akışkanların viskozitesi şöyle hesaplanır:  $A$  alanlı ve küçük bir  $d$  uzaklıkta iki plaka düşünelim. Aralarını akışkanla doldurup bir plakayı  $U$  hızıyla diğerinin üstünden kaydıralım. Kaymazlık şartı sebebiyle akışkanın plakayla temastaki kısımları kaymayacak kabul edilir. Bu sebeple de aradaki akışkan makaslanır(shear). Akışkanın makaslanıp farklı katmanlarda farklı hızlarda ilerlemesine direnen kuvvete viskozite kuvveti denir. Bu kuvvet şöyle ifade edilir;

$$F_{viskozite} = [\rho\zeta] \frac{U \cdot A}{d} \quad (28)$$

Bu kuvveti yelkenimizde modellemeye çalıştığımızda  $d$  tam olarak tanımlanamadığı için bu yaklaşım yetersizdir. Havanın ve suyun viskozitesiyle ilgili birçok teorik ve deneysel hesaplama yapılmıştır fakat bu makalenin kapsamı dışındadır.

## 4.3 Reynolds Sayısı

Reynolds sayısı şimdiye kadar gördüğümüz analitik olarak hesaplanması imkansız ya da çözümleri çok zor akışkanlar mekaniği içinde hayatı kolaylaştıran kavramlardan biridir. Aslen çeşitli kürelerin üzerindeki sürüklenme kuvvetini bulmak için kullanılır. Bu sayıyı bulmak için öncelikle  $\rho$  yoğunluğunda bir akışkanın  $L$  yarıçaplı bir kürenin etrafından  $U$  hızıyla aktığını düşünelim. Kürenin kesit alanı  $A = \rho(L/2)^2$  olur. Sürüklenme kuvveti(13) ise;

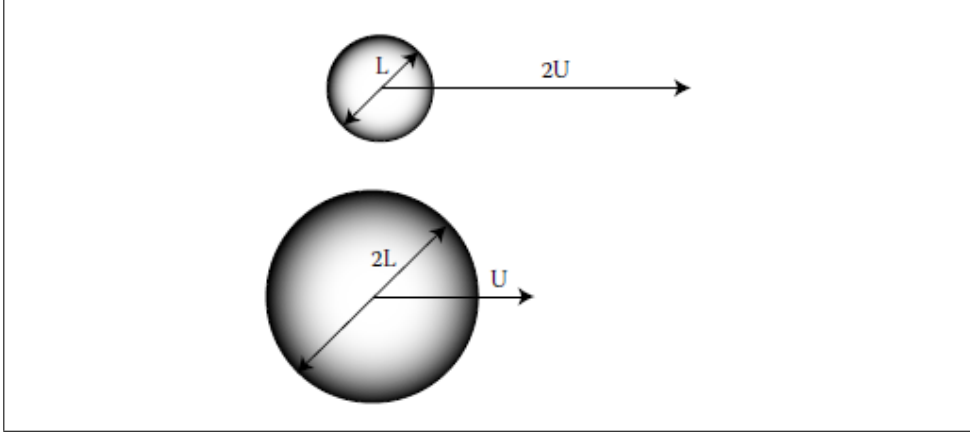
$$F_D = \frac{1}{2}C_D\rho\pi \left(\frac{L}{2}\right)^2 U^2 \quad (29)$$

Bu denklemin birimleri incelendiğinde sürüklenme katsayısı  $C_D$ 'nin birimsiz bir büyüklük olduğu görülür. Elimizdeki  $\rho, U, L$  ve  $\zeta$ 'dan inşa edilebilecek

tek birimsiz katsayı ise Reynolds sayısıdır;

$$R = \frac{U \cdot L}{\zeta} \quad (30)$$

Buradan çıkan ilginç bir sonuç hızlı giden küçük bir kürenin yavaş giden büyük bir küreye göre bir avantajının olmamasıdır.



**Şekil 18:**  $2L$  yarıçaplı,  $U$  hızıyla giden büyük küre,  $L$  yarıçaplı ve  $2U$  ile giden küçük küreye aynı Reynolds sayısına sahiptir.

Reynolds sayısını mükemmel kürelerden başka alanlarda kullanmak istersek cismin kendine has uzunluk ve hız değerlerini kullanmamız gerekir. Ayrıca bu sayının eldeki cismin boyutlarıyla doğrusal bir şekilde artması, küçük modeller üzerinde deney yapıp sonuçları büyük ebatlara taşımamıza olanak sağlar. Yine de Reynolds sayısını yelkenlilere uygulamak kolay değildir; dalgalar ve türbülans gibi etkiler tahminleri büyük miktarda saptırır.

## Sonuç

Görüldüğü gibi aslında yelkende karşılaştığımız her durum temel bir fizik ve matematik bilgisi ile ya açıklanabilir ya da modellenabilir. Fiziği ve matematiği yelkene uygulamanın asıl zorluğu iki tane akışkanla birden baş etmektir. Yazıda da değinildiği gibi akışkanlar mekaniği doğası gereği hesaplaması zor ve sonuç elde etmek için belli bir birikim gerektiren bir konudur. Bu durum da sadece kağıt kalemle bir yelkenlinin hareketini tasvir etmeyi neredeyse imkansız hale getirir. Bu yüzden tamamen anlaşılmasın bir denklem silsilesi yerine matematik yönünden daha hafif bir üslup tercih edilmiştir. Umarız bu yazı meraklısına iyi bir temel sağlar ve bazı belirsizlikleri temizler.

## Kaynaklar

- John Kimball - Physics of Sailing, Crc Press, December 24, 2009
- <http://www.grenadabluewatersailing.com/learning-to-sail-heeling-over/>
- [https://www.researchgate.net/publication/311662283\\_The\\_Rim\\_and\\_the\\_Ancient\\_Mariner\\_The\\_Nautical\\_Horizon\\_Affects\\_Postural\\_Sway\\_in\\_Older\\_Adults](https://www.researchgate.net/publication/311662283_The_Rim_and_the_Ancient_Mariner_The_Nautical_Horizon_Affects_Postural_Sway_in_Older_Adults)
- [www.tubaterim.gov.tr](http://www.tubaterim.gov.tr)