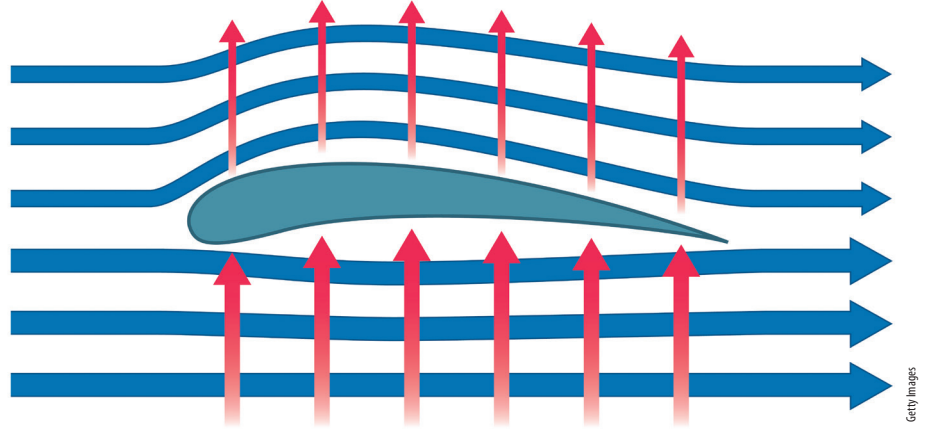


Alp Akođlu

Yelkenli Tekne Fiziđi

*Yelkenler
Fora!*

Denizlere yelken açmak ne kadar keyifliyse, ardındaki fizik de bir o kadar ilginç. Yelkenli teknelerin geçmişte binlerce yıl öncesine gitse de günümüzün en modern yelkenlilerinde "roket bilimi"nin kullanıldığını söylemek çok da yanlış olmaz. Tekne ve yelken tasarımcıları özellikle modern yarış teknelerini tasarlarken hava ve su dinamiklerini en ince ayrıntısına kadar hesaba katar. Elbette burada sizleri aerodinamik ve hidrodinamik hesaplarına boğmak gibi bir niyetimiz yok. İyi bir yelkenci olmak için bunları bilmek gerekli de olmayabilir. Ama yelken tutkunuz varsa, ardındaki basit fiziğin ilginizi çekeceğini düşünüyoruz.



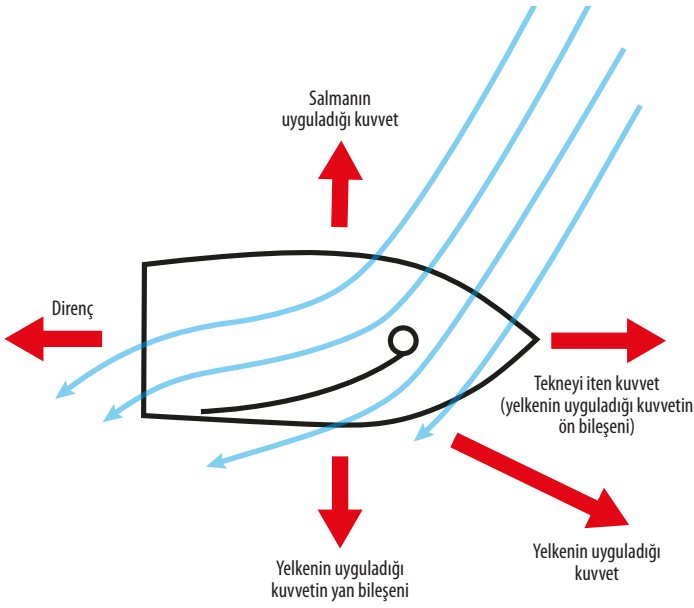
Bir uçak kanadının üzeri bombeli olduğundan buradan akan hava biraz daha uzun yol kat etmek zorunda kalır. "Bernoulli ilkesi"ne göre, hızlı hareket eden havanın yüzeye uyguladığı basınç daha düşük olur. Yani uçağın kanadının altındaki basınç üstündekine göre daha fazladır. Bu da yukarı doğru kuvvet oluşturur. Yelkenler de tıpkı uçak kanadı gibi çalışır.

Rüzgârın, yani hareket eden havanın bir enerjisi vardır. En basit şekliyle ele alırsak, hareket eden hava yelkeni iter, yelken de tekneye bağlı olduğundan tekne suda hareket eder. Eğer durum yalnızca bundan ibaret olsaydı, yelkenli teknelerin olabildiğince büyük, dört köşe yelkenlerinin olması gerekirdi. Tıpkı

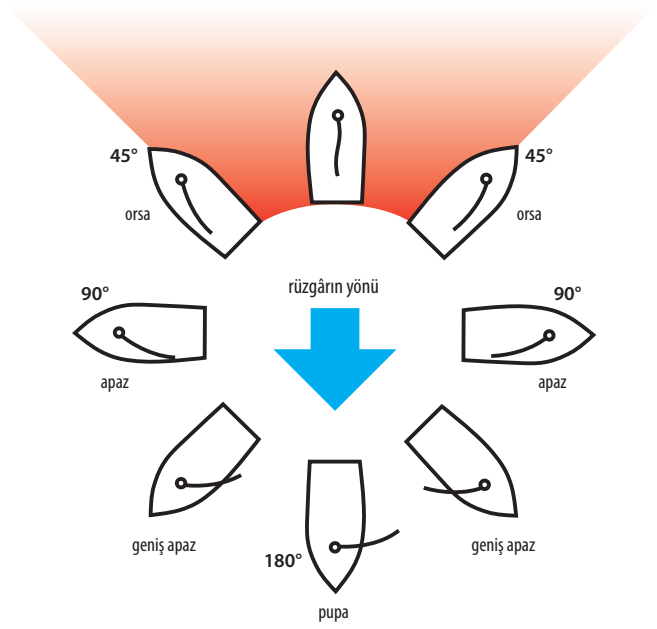
bundan yüzyıllar öncesine kadar gemilerde yaygın olarak kullanılan yelkenler gibi. Gemiler eskiden rüzgârı pupadan yani geminin arkasından aldığı zaman verimli bir şekilde ilerleyebiliyordu. Bu nedenle denizciler bazen günlerce, hatta haftalarca rüzgârın istedikleri yöne esmesini beklemek zorunda kalıyordu.



Kabasorta armalı gemilerde dörtgen yelkenler kullanılırdı. Bu gemiler rüzgân ancak pupadan yani geminin arkasından aldığı zaman verimli bir şekilde ilerleyebiliyordu. Bu nedenle denizciler bazen günlerce, hatta haftalarca rüzgânın istedikleri yöne esmesini beklemek zorunda kalıyordu.



Bir yelkenlinin üzerindeki kuvvetler. Motor kullanmadıkları varsayarsak, yelkenli tekneler güçlerini yalnızca rüzgârdan alır. Yelkenlerle elde edilen kuvvetin ancak bir bölümü, yani teknenin önüne doğru olan bileşeni tekneyi ileri iter. Salma, yelkenin uyguladığı kuvvetin yan bileşenine karşı bir tepki kuvveti oluşturur ve teknenin yana sürüklenmesini önler. Teknenin suda ilerlerken karşılaştığı direnç tekneyi iten kuvvetin ters yönündedir.



Teknenin rüzgârla yaptığı açığa göre yapılan seyre çeşitli adlar verilir. Rüzgârın yandan geldiği apaz seyri çoğu teknenin en hızlı seyridir. Pupa seyri rüzgâr arkadan eser. Orsa ise teknenin en az 45° açıyla rüzgâra karşı gittiği seyirdir. Çoğu tekne bundan daha dar bir açıyla (kırmızıyla boyanmış olan bölge) rüzgâra karşı gidemez.

Binlerce yıllık geçmişine karşın yelkenler son yüz yılda büyük gelişim gösterdi. İşin ilginç bundan yüz yıl önce özellikle ticari gemilerde yelkenli teknelerin yerini motorlu tekneler çoktan almıştı. Yelken daha çok hobi amacıyla kullanılır oldu. Yelkenciler modern yelkenlerin (hatta teknelerin diğer bazı aksamalarının) gelişimini havacılığın gelişmesine borçlu, çünkü yelkendeki gelişmeler havacılıktaki gelişmelerle paralel olarak ilerledi. Son yüz yıl içinde özellikle uçakların kanat yapıları üzerine birçok araştırma yapıldı. Havacılıkta verimlilik her şeyin üzerinde olduğundan, yelkenler de bundan nasibini aldı.

Uçakların kanatlarının altı düz, üstü bombelidir. Uçak uçarken hava kanadın altından ve üstünden uçağın arkasına doğru akar. Kanadın üzerinden akan hava, altından akan havaya göre daha hızlı hareket eder. İşin inceliği buradadır. Kanadın üzeri bombeli olduğundan buradan akan hava biraz daha uzun yol kat etmek zorunda kalır. "Bernoulli ilkesi" denen bir olguya göre, hızlı hareket eden havanın yüzeye uyguladığı basınç daha düşük olur. Yani uçağın kanadının altındaki basınç üstündekine göre daha fazladır. Hava

ve su gibi akışkanlar basıncın yüksek olduğu yerden düşük olduğu yere doğru hareket ettiğinden, bu basınç da uçağa yukarı doğru bir kuvvet uygular.

Kanat şeklinin yanı sıra kanadın akan havanın yönünü değiştirmesiyle de kaldırma elde edilir. Örneğin uçağın yükselmesi gerektiğinde kuyruk kanadı yardımıyla uçağın burnu belli bir açıyla yükseltilir. Bu durumda kanat düzlemiyle karşıdan gelen hava arasında bir açı olur. Kanatlar karşıdan gelen havayı aşağı doğru yönlendirir. Bu durumda ne olduğunu, bundan yaklaşık 300 yıl önce Newton açıklamıştı: Bir cisme etki eden her kuvvete karşı bir tepki oluşur. Bu tepkinin yönü ters, ama şiddeti aynıdır. Örneğin büyükçe bir kutuyu ittiğinizde kutu da size aynı kuvvetle karşı koyar. İşte, belli bir hücum açısıyla duran kanatlar da havayı aşağı iterken, hava da kanatları yukarı iter. Bu itme kuvveti uçağın havada kalmasını ve yükselmesini sağlar.

Uçakları uçurabilmek için hem Bernoulli ilkesinden hem de hücum açısından yararlanır. Havada belli bir hızda seyreden bir uçağı havada yalnızca hücum açısıyla tutmak verimli olmaz, çünkü havanın yönünü değiştirmek çok enerji gerek-

tirir. Ayrıca yönü değiştirilen hava uçağın arkasında hava girdapları yani türbülans oluşmasına yol açar. Bu da düşük basınç yaratarak uçağı yavaşlatır. O nedenle düz seyirde hücum açısı olabildiğince düşük tutulur ve Bernoulli ilkesi yardımıyla uçağın havada kalması sağlanır.

Modern teknelerde kullanılan yelkenler de (bazı tipleri hariç) tıpkı bir uçak kanadı gibi çalışır. Bunu özellikle rüzgâr sörfü yelkenlerinde açıkça görmek mümkün. Rüzgâr sörfü yelkenlerinin bir tarafı bombeli ve serttir, gerçekten bir uçak kanadına benzer. Modern teknelerin yelkenleri de kumaştan yapılmış olmasına karşın rüzgârla dolduğunda kanat şeklini alır.

Yelkenli teknelerde yelkenlerin ön (bombeli kısım) ve arka yüzeylerinde yapılan ölçümler, Bernoulli ilkesinin öngörüsünü destekliyor. Yelkenin ön kısmındaki basınç arka kısmındakine göre düşük oluyor. Bir rüzgâr sörfçüsü, yelkenin iskaça köşesinin (direğin karşısındaki köşe) gerginliğini değiştirerek yelkenin bombe ayarını değiştirebilir. Düşük rüzgârdaki bombenin fazla olması hızı artırır. Yüksek hızla esen rüzgârdaysa yelkenin aşırı kuvvet oluşturmasını engellemek için yelken gerilerek bombe azaltılır.

Pupa Yelken

Yelkencilige pek aşına değilseniz rüzgâr arkadan estiğinde teknenin en yüksek hızına ulaşacağını düşünüyor olabilirsiniz. Yelkenciler, bunun böyle olmadığını iyi bilir. Tekne rüzgârı arkadan aldığı yelken alanıyla orantılı olarak ileri doğru bir itki oluşur. Ama teknenin gövdesinin belli bir bölümü suyun altında ilerlediğinden direnç yüksektir. Bu nedenle rüzgâr arkadan eserken rüzgâr hızına yaklaşmak zordur. Direnç sifıra yakın bile olsa rüzgârın hızına ancak yaklaşılabilir. Rüzgâr hızına yaklaştığınızda tekne daha hızlı gidemez, çünkü yelkenler de rüzgârla aynı hızda gittiğinden herhangi bir itki oluşmaz. Pupa seyrindeki bir teknenin yelkeni bir uçağın kanadı gibi değil bir paraşüt gibi çalışır.

Bunun da ötesinde, yelkenciler pupa seyrini pek sevmez. Çünkü pupa seyrinde tekne dengesizdir. Rüzgâr yandan geldiğinde, yani apaz seyrinde düzenli esen rüzgâr tekneyi hafifçe yatırır ve tekne sudaki dalga hareketlerinden daha az etkilenir. Pupa seyrinde ise tekne bir kuvvet tarafından dengelenmediğinden yanlara doğru çok daha fazla sallanır. Rüzgâr gidecekleri yöne doğru esiyor olsa bile, yelkenciler çoğu zaman geniş apaz seyri yaparak ve zikzaklı bir yol izleyerek hedefe varma yolunu seçer.

Rüzgârdan Hızlı

Apaz seyrinde, teknenin yönü rüzgârın yönüne yaklaşık diktir. Bu durumda yelken bir uçağın kanadı gibi iş görmeye başlar. Tekne hızlandıkça yelkenle rüzgâr arasındaki açı küçülür ve yelken kanat işlevi görmeye başlar. Bu durumda rüzgârın hızı artık bir sınır değildir. Direnç düşürülebilirse tekne rüzgârdan hızlı gidebilir. Günümüzde özel tasarlanmış teknelerle ve rüzgâr sörfleriyle rüzgâr hızının iki katını aşmak mümkün.

Rüzgârdan ne kadar hızlı gidilebileceğinin en güzel örnekleri, yelkenli buz sörfleri. Bunlar buzda gitmek üzere tasarlanmış yelkenliler ve çok az dirençle karşılaşılır. Bu tür yelkenlilerle 50 km hızla esen bir rüzgârdan 150 km hızla ulaşılabilir.

Bir yelkenli teknenin performansı yalnız yelkenin tasarımına değil, teknenin de tasarımına bağlı. Yelkenli tekne tasarımcılarının karşı karşıya olduğu en büyük sorunlardan biri yelkenin tekneyi yana doğru itmesi. Tekne rüzgârı yandan alıyorsa, yelken tekneyi başta rüzgârın estiği yöne doğru iter. Halbuki teknenin ileri doğru ilerlemesi gerekir. Bunun için teknelerin tasarımları ileri doğru ilerlemelerini kolaylaştıracak, yanlara doğru ilerlemelerini ise zorlaştıracak özelliklere sahiptir.

Her şeyden önce tekneler ince uzundur. Bu ileri doğru olan direnci azaltırken yanlara doğru olan direnci artırır. Direnç yalnızca sürtünmeden kaynaklanmaz. Hatta yüzeyin suyla sürtünmesi görece küçük bir dirençtir. Asıl direnci teknenin ilerlerken yarmak zorunda olduğu su kütlesi oluşturur.

Salma

Özellikle yelkenlilerde teknenin suyla karşılaştığı kesiti azaltmak için tekneler ince uzun olacak şekilde tasarlanır. Bu tasarım sürüklenmeyi azaltsa da teknenin rüzgâra göre sürüklenmesini engellemez. İşte burada salma yardımı yetişir. Salma

teknenin altında, ortada duran ince kesitli bir kanada benzer. Salma bir bıçağa da benzetilebilir. Bir bıçağı suyun içinde hareket ettirdiğinizi düşünün. Bıçak, kenarları doğrultusunda hareket ederken neredeyse hiç dirençle karşılaşmazken, yüzeyler doğrultusunda büyük bir dirençle karşılaşır.

Özellikle yarış teknelerinde salmanın tasarımı da yelken tasarımı kadar önemli. Üstelik salmanın tek görevi teknenin yana doğru sürüklenmesini önlemek değil. Yelkenleri iten rüzgâr teknenin yan yatmasına neden olur. Salma buna karşı bir denge mekanizmasıdır aynı zamanda. Bu nedenle bazı yelkenlilerin salmalarının alt kısmına ağırlık konur. Salma ne kadar uzun olursa kuvvet kolu da o kadar uzun olacak ve teknenin yan yatmasını bir o kadar önleyecektir.

Bir yelkenli teknenin alabora olması çok zordur, çünkü ağırlık merkezi aşağıdadır. Yelkenlere dolan rüzgâr tekneyi ancak belli bir açıda yatırabilir. Tekne yattığında yelkenler de yatar, yelkenin rüzgârı gören kesiti küçüldüğü için rüzgârın etkisi azalır. Rüzgâr aşırı hızla ulaştığında yelkenciler yelken alanını küçültür ya da yelkenlerden birini ya da birkaçını tümüyle indirir.

Bir yelkenci yelken üzerindeki rüzgâr kuvvetinin tekneyi yatırmasını ve yelkenin güç kaybetmesini önlemek için vücut ağırlığıyla bu kuvveti dengelemeye çalışıyor. Bu, özellikle küçük teknelerle yarışanların her zaman başvurduğu bir yöntemdir.





Pupa ya da geniş apaz seyirinde teknenin ön kısmına açılan ve rüzgârın balon gibi şişirdiği "balon yelkenler" (spinnaker olarak da bilinir) rüzgârın itme kuvvetinin zayıf olduğu bu tür seyirlerde paraşüt gibi işlev görerek rüzgârdan olabildiğince verim alınmasını sağlar.

Yelkenleri anlatırken uçak kanatlarından yola çıkmıştık. Aerodinamik, modern teknelerin salma tasarımlarında da imdada yetişiyor. Önceleri yelkenlilerde yana sürüklenmeyi önlemek için derin ve uzun salmaların gerekli olduğu düşünülürdü. Ancak suda hızla yol alan bir teknedeki geniş bir salmanın, sürtünmeyle ve yarattığı türbülansla tekneyi önemli ölçüde yavaşlattığı anlaşıldı. Günümüzde uzun, yani derin ve dar salmalar kullanılıyor.

Modern salmalar bir uçağın kanadını andırır da her iki yüzleri de simetrik. Yani bir uçağın kanadı gibi bir yüzeyi bombeli bir yüzeyi düz değil. Tekne rüzgârı her iki yönden de alabildiği için bu şekilde olması gerekiyor.

Tekne rüzgârı yandan alırken rüzgârın kuvveti tekneyi yana doğru sürüklemeye çalışır. Tekne ileri doğru hareket ederken de bu kuvvet etkilidir. Suyun salmanın yanlarından akışı, havanın bir uçağın kanatlarının yüzeylerinden akışı gibidir. Yazının başında uçağı havada tutan etkenlerden birinin kanatlardaki hücum açısı olduğunu belirtmiştik. Aynı şekilde tekne rüzgârla bir yana doğru itildiğinden, salma da suda bir hücum açısıyla hareket eder. Rüzgâraltına doğru itilen salmanın önündeki basınç arkasındakinden daha yüksek olur, bu da teknenin sürüklenmesini önler.

Uçuşun yaklaşık 100 yıllık tarihi boyunca mühendisler en verimli kanat biçimini bulmak için çalıştı. Bunun sonu-

cunda uzun ve dar kanatların daha verimli olduğu anlaşıldı. Kanat uçlarında oluşan hava girdapları kanatların verimini düşürüyor, daha fazla yakıt tüketimine yol açıyordu. Uzun ve dar kanatlarsa aynı yüzey alanıyla daha yüksek verim sağlıyordu. Günümüzde tekne tasarımcıları bu deneyimleri hem yelken hem de salma tasarımına uyguluyor. İşte yelkenlerin ve salmaların uzun ve dar şekilleri bunun sonucunda ortaya çıkmış.

Özetle, yelkenin tekneye uyguladığı itme kuvvetini iki bileşene ayırırsak bunlardan biri ileri doğru, diğeri yana doğru yani rüzgârın estiği yöne doğru olur. Salmanın görevi ileri doğru olan kuvveti olabildiğince koruyup yana doğru olan kuvveti bertaraf etmektir.

Direnç

Bir tekne suda ilerlerken dirençle karşılaşır. Bu direnç birçok bileşenden oluşur. En büyük direnç gövdenin sudaki hareketinden kaynaklanır. Tekne suda ilerlerken suyu ayırır ve içinden geçer. Bu, hem su molekülleri arasındaki bağları kırmayı, hem de büyükçe bir miktar suyun yerini değiştirmeyi gerektirir. Teknenin hızı arttıkça bunları yenmek için gereken kuvvet de artar.

Teknenin karşılaştığı bir diğer direnç de sürtünme. Buna sürtünme dense de aslında ortam su olduğundan bildiğimiz anlamda iki katı maddenin birbirine sürtünmesi gibi bir sürtünme değil. Daha çok teknenin yüzeyi ve çevresindeki su moleküllerinin birbirleriyle etkileşimi dolayısıyla oluşan, yavaşlatıcı bir kuvvet. İki katı yüzey arasındaki sürtünmeyi yüzeyleri pürüzsüz hale getirerek azaltmak mümkün olsa da teknenin yüzeyi ve su arasındaki sürtünmeyi azaltmak için pürüzsüz bir yüzeyin pek yardımı olmaz.

Direnç oluşturan bir etken de türbülans. Tekne suda ilerlerken gövdesinin su altında kalan kısmının çevresinden akan su karışır ve türbülans oluşur. Bu türbülans teknenin arkasında düşük basınçlı bölgeler yaratır, bu düşük basınçlı bölgeler tekneyi kendine doğru çeker. Bu nedenle tekne tasarımcıları gövde tasarımının olabildiğince az türbülansa yol açacak şekilde olması için çalışır.

Direnç oluşturan tüm etkileri azaltmanın etkili yolu teknenin suyla temas eden yüzey alanını azaltmak. Bunun için özellikle yarış teknelerinde teknelerin tabanları olabildiğince düz, salmalarsa türbülansı azaltmak için dar ve uzun yapılıdır. Altlarının düz olması teknelerin yüksek hızlarda suyun üzerinde daha rahat kaymasını ve ayırmaları gereken su miktarının daha az olmasını sağlar.

Kaymak ya da Kaymamak

Her tekne suda ilerlerken dalga oluşturur. Teknenin harcadığı enerjinin büyük bölümü bu dalgayı oluşturan enerjidir. Tekne yavaşça hareket ederken teknenin kenarlarından açığa doğru hareket eden dalgalar görürüz. Tekne hızlandıkça dalga boyları uzar ve teknenin yanlarında giderek daha az sayıda dalga görülür. Sonunda tekne belli bir hıza ulaştığında tekne boyunca uzanan büyük bir dalga oluşur. Tekneye yandan bakarsanız tekne sanki yokuş yukarı gidiyor gibidir. Bu noktada direnç önemli ölçüde artar. Bu, çoğu teknenin hızının sınırınıdır. Çünkü bu hızı aşmak için çok daha büyük kuvvet gerekir. Yine havacılıkla kıyaslayacak olursak, bu bir uçağın ses hızına ulaştığı andır.



İdileşim / Çiğdem Kibar

Bazı motorlu ve yelkenli tekneler "dalga hızı" ya da "gövde hızı" denen bu sınırı aşabilir. Motorlu bir tekne, güçlü bir motor ve uygun gövde tasarımıyla gücünü iyice artırarak bu dalganın üzerinden atlar ve tekne suyun üzerinde kaymaya başlar. Bu aşamada teknenin gövdesinin çok daha küçük bir bölümü suyla temas eder. Tekne artık çok daha az miktarda suyu yarmak zorunda olduğundan harcadığı enerji önemli ölçüde düşer.

Yine bazı yelkenliler (daha çok küçük sürat yelkenlileri, katamaran gibi çift gövdeli bazı yelkenliler ve rüzgâr sörfleri) gövde hızını aşıp suda kayarak ilerleyebilir. Özellikle rüzgâr sörfleri, gövdeleri küçük ve hafif olduğu halde yelkenleri büyük olduğundan, çok kısa sürede kaymaya başlayarak rüzgâr hızının iki katı hıza çıkabilir.

Rüzgâr sörfü küçük teknesi (bordu) ve bir uçak kanadı yapısındaki büyük yelkeniyle rüzgârın gücünü etkin bir biçimde itkiye dönüştürür. Bu kuvvet bordun kısa sürede suda kaymaya başlamasına ve sörfçünün rüzgâr hızının iki katını aşan hızlara erişmesine olanak tanır.

Kaynaklar

Anderson, B. D., "The Physics of Sailing",

Physics Today, Şubat 2008.

Radhakrishnan, V., "From Square Sails to Wing Sails:

The Physics of Sailing Craft", *Current Science*,

Eylül 1997.

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/>

[airplane/lift.html](http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/lift.html)