

## Kanatlarına Basamak Açmanın Darrieus Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Güç Üretimine Etkisi

Sercan ACARER\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35620, Çiğli, İzmir

(Alınış / Received: 07.09.2016, Kabul / Accepted: 09.01.2017,  
Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2017)

**Anahtar Kelimeler**  
Darrieus,  
Düşey Eksenli,  
Rüzgar Türbini,  
Kline-Fogleman,  
Basamak,  
HAD

**Özet:** Bir kanadın firar kenarı tarafına basamak açmanın, o kanadın kaldırma/sürüklenme kuvvet oranını arttırabildiği literatürde belirlenmiştir. Bu tip kanatlara Kline-Fogleman kanatları denmektedir. Düşey eksenli Darrieus rüzgar türbinleri ise kanatların kaldırma kuvvetiyle dönen türbinlerdir. Bu türbinlerin güç artış potansiyellerinin ortaya çıkarılması literatürde yoğunlukla çalışılan güncel bir bilimsel araştırma konusudur.

Bu çalışmada Kline-Fogleman kanatlarının Darrieus türbininde, yazarların bilgisi dahilinde, literatürde ilk defa kullanılmasının güç üretimine etkisi, önceden doğrulanmış hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) analizleri vasıtasıyla incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarla, bunun olumlu ve olumsuz etkilerinin olduğu saptanmıştır. İleriki çalışmalarda aktif kontrollü farklı basamak geometrileriyle iyileştirmeler elde edilmesi mümkün gözükmektedir. Bu çalışmanın, konusunda bir referans çalışma olması beklenmektedir.

### The Effect of Airfoil Backward-Facing Step on Power Production of a Darrieus Vertical-Axis Wind Turbine

**Keywords**  
Darrieus,  
Vertical Axis,  
Wind Turbine,  
Kline-Fogleman,  
Step,  
CFD

**Abstract:** Airfoils which have backward facing steps are called Kline-Fogleman airfoils and those have previously shown to have lift/drag enhancement potentials over conventional airfoils. Darrieus vertical-axis wind turbines rotate by the lift generated on its airfoils. The exploration of power enhancement potentials of such turbines is a current scientific topic in the literature.

In this study, the effects of stepped airfoils in a Darrieus turbine is studied by validated computational fluid dynamics (CFD) simulations, to the author's best knowledge, for the first time in the open literature. The comparisons revealed that this has both positive and negative effects. Optimized step geometries with active flow control may eliminate negative aspects and improve overall performance. This study is expected to be a reference study on this area.

\*Sercan ACARER, [sercanacar@gmail.com](mailto:sercanacar@gmail.com)

## 1. Giriş

Rüzgâr enerjisini faydalı işe dönüştüren çeşitli türbin mimarileri bulunmaktadır. Bunlar genelde dönüş eksenlerinin konumuna göre yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT) ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) olarak sınıflandırılırlar. Modern 3 kanatlı YERT'ler geniş bir dönme hızı (veya boyutsuz haliyle uç hız oranı= $\omega R/V_\infty$ ) aralığında en verimli mimariye sahiptirler ve bu sebeple onlarca yıldır en yaygın kullanılan türdür. Bunun ana sebeplerinden biri bu tip türbinlerde kanatların dönüşleri boyunca rüzgara aynı şekilde maruz kalmaları sebebiyle görece daha yüksek güç üretme potansiyeline sahip olmalarıdır. Dolayısıyla YERT'lere yıllar içinde büyük yatırımlar yapılmıştır [1]. Bu türbinlere alternatif kaldırma kuvveti temelli DERT'ler (Darrieus türbinleri) ise en geç 1930'lu yıllardan bu yana bilinmelerine rağmen [2], rüzgârı her yönden karşılama kabiliyeti, jeneratörün türbin altına konabilmesi, yönü değişken ve türbülanslı akışın olduğu şehir ve kırsal bölgelerinde kullanım kolaylığı ve ucuzluk gibi özellikleri dolayısıyla yeniden ilgi görmeye başlamışlardır [3-6].

DERT'lere olan bu yeni yönelim sebebiyle yeni çalışmalarla performans artış ve özellikle küçük ölçekli güç üretiminde YERT'lerle rakabet potansiyelleri bulunmaktadır [1]. Darrieus tipi DERT'lerin performansını inceleyen 1970'li yılların Sandria raporları hariç tutulursa [7-9], konu son yıllara kadar etraflıca incelenmemiştir ve bu konudaki birçok yaygın son yıllara aittir.

Tescione ve ark. [10], H-tipi bir Darrieus türbininin art-izini parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PGHÖ/PIV) tekniğiyle detaylı inceleyerek bu konunun öncülerinden biri olmuştur. Bu çalışma, uç hız oranının ( $\omega R/V_\infty$ ) 4.5,

Reynolds sayısının ( $2\rho\omega R^2/\mu$ ) ise  $1.7\times 10^5$  olduğu tek bir çalışma noktası için gerçekleştirilmiştir. İncelenen türbinin katılık oranı ( $\sigma$ ) 0.11, boy oranı ( $h/D$ ) 1'dir. Çalışmanın ana bulguları şunlardır: 1) türbin art-izinin asimetric olması, 2) yüksek türbülans sayesinde yayılımın artmasıyla art-izinin YERT'lere kıyasla daha erken toparlanması ve 3) ters yönde dönen girdapların etkileşim içine girmesiyle üç çap arka mesafeden sonra tekil girdap yapılarının ve kanat art-izlerinin ortadan kaybolması, sadece kenarlarda ters yönde dönen girdap yapılarının kalması.

Lam ve Peng [11], aynı problemi iki ve üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla incelemişlerdir ve deneylerle HAD arasında uyum gözlemlemişlerdir. Bu sayede, ileriki çalışmaların HAD yardımıyla belli bir güven aralığı içerisinde yapılabilmesinin önü açılmıştır.

Li ve ark. [12], yaptıkları deneysel çalışmada, NACA 0021 kanat kullanan iki kanatlı H-tipi Darrieus türbininin güç ve art-izi karakteristiklerini, ilk defa uç hız oranına bağlı olarak, incelemişlerdir. Bu çalışmada hem rüzgâr tüneli, hem de saha testleri gerçekleştirmişlerdir. Saha testlerinde Reynolds sayısı kontrollü şekilde ayarlanamasa da rüzgâr tüneline  $1.62\times 10^5 - 3.12\times 10^5$  Reynolds aralığında inceleme yapılmıştır. Bu çalışmanın bulguları, güç katsayısının sadece uç hız oranına bağlı olmayıp, Reynolds sayısı da ( $2\rho\omega R^2/\mu$ ) arttığı yönündedir. Saha testlerinde ise güç katsayısı, Reynolds sayısı değişkenliği ve türbülans sebebiyle yayılım göstermektedir. Ayrıca türbülans sebebiyle, saha testlerinde art-izi, rüzgâr tünel testlerine göre, daha çabuk kaybolmaktadır. Yine rüzgâr tüneli testlerine kıyasla, güç katsayısı, optimum uç hız oranı için saha testlerinde daha düşüktür, ancak düşük ve yüksek uç hız oranlarında daha yüksektir. Bu da, rüzgâr

tüneli (veya HAD) ile saha farkını ortaya koymaktadır.

Bahsi geçen detaylı inceleme çalışmalarının yanı sıra DERT'ler için çeşitli başarımla iyileştirme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Bunlar, genellikle rotor dışına stator yahut muhafaza yerleştirilmesi ve böylece akışın istenen şekilde yönlendirilmesi şeklindedir [13-15]. Ayrıca, art-izinin DERT'lerde daha çabuk azalması sebebiyle tarla diziliminde yeni fırsatlar ortaya çıkmaktadır. Buna göre DERT'ler YERT'lere göre daha yakın yerleştirilebilir ve hatta etkileşim sayesinde tekli DERT'lere kıyasla güç artışı gözlemlenebilir [16-17]. Bu konudaki çalışmalar ülkemizde de yakından takip edilmektedir [18].

Bu çalışmada, H-tipi bir Darrieus rüzgar türbininin kanatlarının firar kenarı tarafına basamaklar açılmasının (Şekil 1), türbinin güç katsayısı ve art-izi üzerindeki etkisi incelenecektir. Üzerinde basamak olan kanatlar genelde KF (Kline-Fogleman) kanatları olarak bilinmektedir [19] ve izole kanatlar üzerinde yapılan çalışmalar, bu basamakların bazı durumlarda, girdaplar sayesinde oluşan türbülans artışı ve akışın yeniden kanat yüzeyine yapışmasıyla, kaldırma/sürüklenme kuvvet oranı artışı potansiyelleri barındırdıklarını göstermiştir [20-22]. Bu sebeple, bu kanatların, kaldırma kuvveti temelli Darrieus türbinlerinde kullanılmalarının bir takım performans iyileştirmesi getirmesi beklenebilir. Bu konudaki veri eksikliği, spekülasyonların varlığı ve araştırma yapılması ihtiyacı Bos [23] tarafından da belirtilmiştir. Yazarın bilgisi dahilinde, basamaklı kanatlar bir Darrieus türbininde ilk defa kullanılacaktır.

Bu çalışmada, Tescione ve ark. [10] tarafından kullanılan türbin temel alınmıştır. Bu türbin, iki adet simetrik NACA 0018 kanada sahiptir ve diğer

özelliklerine bu makalenin giriş kısmında değinilmiştir. Kanatlar basamak içerecek şekilde değiştirilmiştir (Şekil 1) ve elde edilen türbinin başarımla, değiştirilmemiş (basamaksız) kanada sahip türbin ile karşılaştırılmıştır. Bunun için, Lam ve Peng [11] tarafından kullanılan HAD yöntemi temel alınmıştır, çünkü bu yöntem, Tescione ve ark. [10] tarafından elde edilen deney verisi ile halihazırda doğrulanmıştır. Aynı doğrulama ayrıca gerçekleştirilmiştir ve yine aynı sonuçlar elde edilmiştir [24].

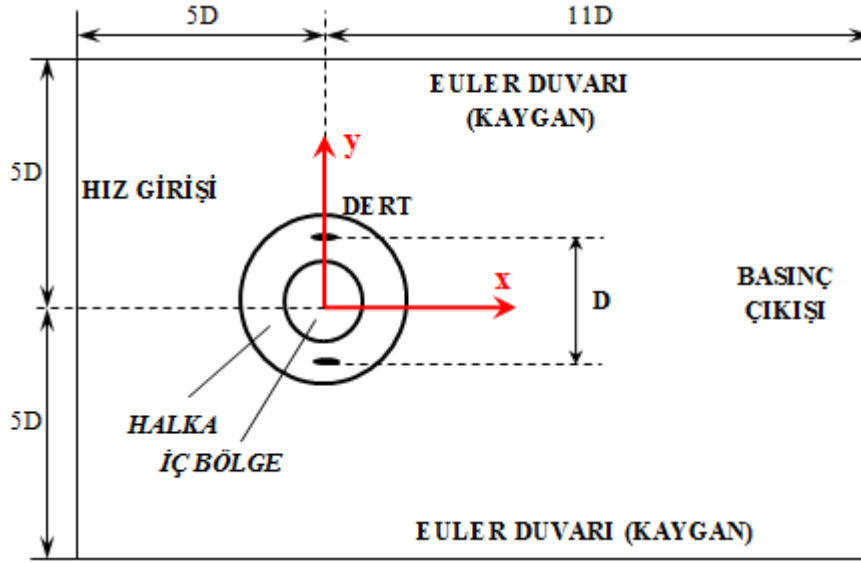


Şekil 1. Basamaklı NACA 0018 kanadı

## 2. Materyal ve Metot

Türbinin türbülanslı akış alanını tahmin etmek için ANSYS Fluent 17<sup>®</sup> sonlu hacim hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılmıştır. Hesaplama alanı Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre türbinin önünde, sağında ve solunda 5 çap mesafe, arkasında ise 11 çap mesafe bırakılmıştır.

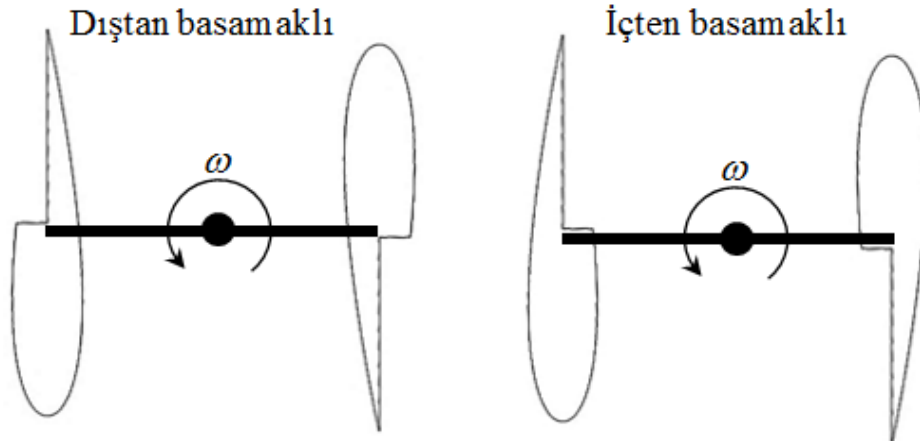
Türbin kanatları, şekilde gösterildiği üzere, halka şeklinde bir bölge içinde dönmektedir. Bu çemberin içerisinde ve dışarısında durağan hesaplama ağı bulunmaktadır. Hesaplama ağı, toplamda 500 bin civarı üçgen ve dörtgen sonlu hacimden oluşmaktadır. Tıpkı doğrulanmış Lam ve Peng [11] çözümünde olduğu gibi, 60 bin civarı hacim Şekil 2'de tanımlanan halkanın içerisindeki iç bölgededir, 150bin hacim, kanatların olduğu halkadadır ve 280bin hacim bu halkanın dışında kalan bölgededir. Kanatların olduğu halkadaki hesaplama ağı kaygan ağ (sliding mesh) yöntemi ile dönerek kanat hareketi istenen dönme hızı için modellenmektedir.



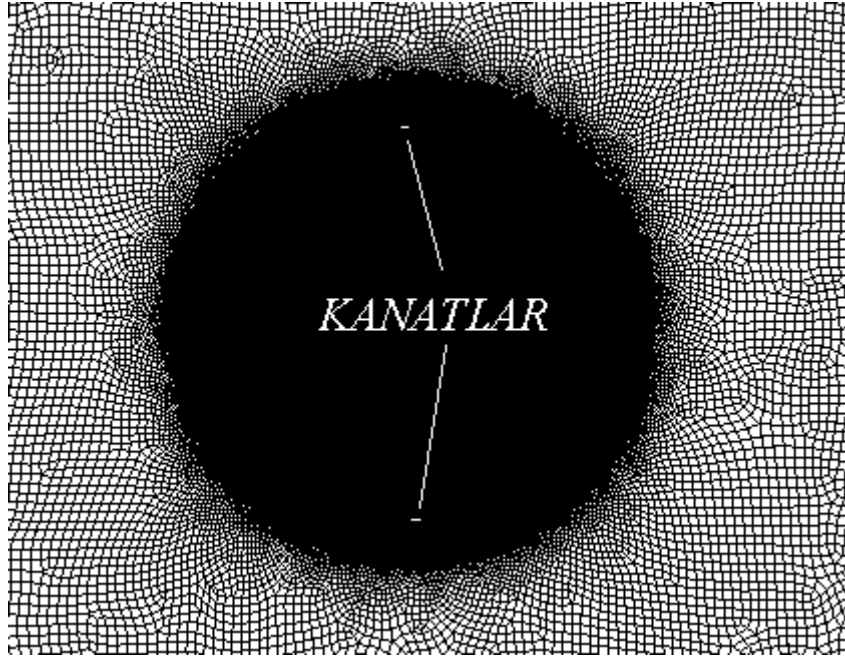
Şekil 2. Hesaplama bölgesi ve tanımlar

Türbülanslı sınır tabakayı çözmek için duvardan başlayarak 1.1 oranı ile büyüyen 20 dörtgen sınır tabakası elemanları kullanılmıştır. Duvara en yakın sınır tabaka elemanı, laminar alt bölgeyi (laminar sublayer) çözmektedir ( $y^+ < 3$ ). Bu bölgenin modellenmesi (ilk sınır tabaka elemanının  $y^+ > 40$  olması durumu) yerine doğrudan çözülmesi, özellikle akış ayrılmalarının yoğun

olduğu Darrieus türbinlerinde doğruluk için çok önemlidir. Hesaplama açısından bazı kritik kesitler Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Bu parametrelere sahip hesaplama açısından 3 adet yaratılmıştır. Birisi basamaksız durum için, diğerleri dıştan ve içten basamaklı durumlar içindir (Şekil 3).



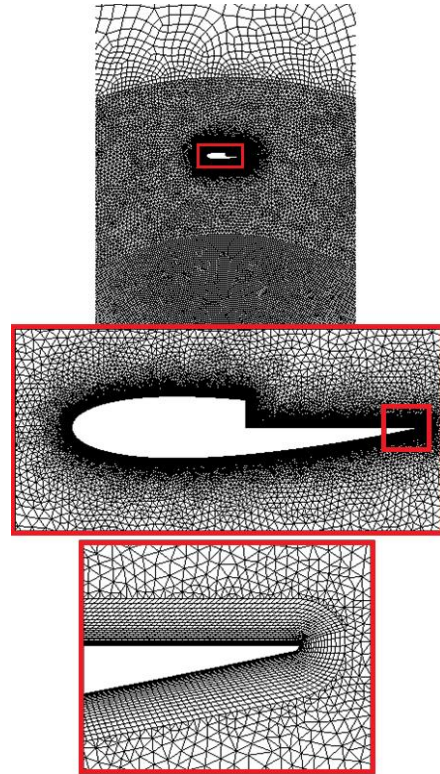
Şekil 3. İçten ve dıştan basamaklı tanımları



Şekil 4. Hesaplama ağı, uzaktan görünüş

Çözümde zamana bağlı Reynolds-ortalananmış Navier-Stokes (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes-URANS) çözüm yöntemi kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum bağlantısı için SIMPLEC şeması, hücre merkezi ve yüzeyi arası ara değeri bulmak için ikinci dereceden ve akış yönünü hesaba katan şema (second order upwind scheme) kullanılmıştır. Tüm bu yöntemlere, türbülansı çözmek için 4 denklemlilik "Transition SST" türbülans modeli eşlik etmektedir. Bu model, k-w SST modelinin, 2 ek denklem vasıtasıyla laminar-türbülans geçiş modellemesi eklenmesiyle oluşmuştur ve Darrieus türbini hesaplamalarında deneyler ile uyumlu tahminler üretmiştir [11].

Zaman adımı, tıpkı doğrulanmış Lam ve Peng [11] çalışmasında olduğu gibi, bir turda 720 adım olacak şekilde seçilmiştir. Bir başka deyişle, bir zaman adımı 0.5 derecelik bir dönmeye karşılık gelmektedir. Bu da, yaklaşık  $1 \times 10^{-4}$  sn'lik bir zamana karşılık gelmektedir.



Şekil 5. Hesaplama ağı, yakından görünüşler

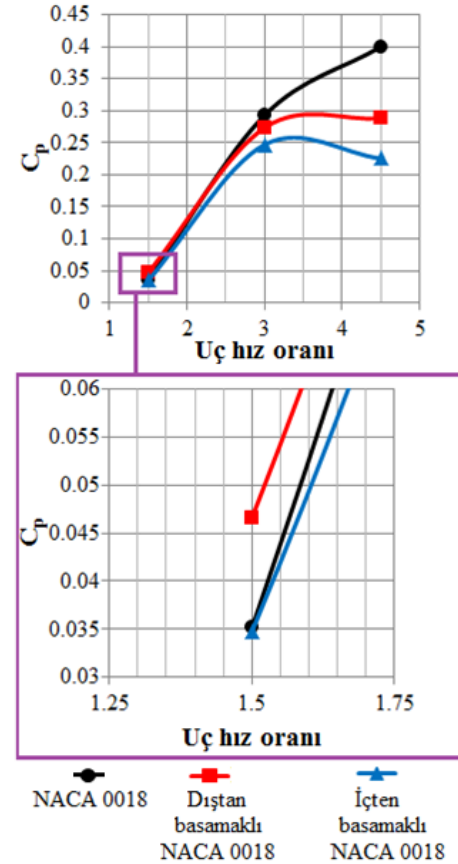
### 3. Bulgular

Türbinlerin genel güç karakteristiğini gösteren boyutsuz dönme hızı olan uç hız oranı ( $\omega R/V_\infty$ ) ve güç katsayısı ( $C_p=P/(0.5\rho V_\infty^3 A)$ ) grafiği Şekil 6'da sunulmuştur. Burada kanat üzerindeki ortalama Reynolds sayısı sabit tutulmuştur. Bu da, dönme hızı sabit tutularak rüzgâr hızının değiştirilmesiyle mümkün olmaktadır.

Şekilde açıkça görüldüğü üzere en yüksek gücün üretildiği uç hız oranında (4.5) en yüksek başarımlı, basamaksız (normal) kanatlara aittir. Kanatlara basamak eklenmesi gücü düşürmektedir. Bu uç hız oranında güç düşümü, dıştan basamak eklenmesi durumunda (Şekil 3) yaklaşık %28, içten basamak eklenmesi durumunda ise yaklaşık %44'tür. Ancak düşük uç hız oranında (1.5) tam tersi bir durum söz konusudur. Dıştan basamaklı durumda, basamaksız duruma göre yaklaşık %33 güç artışı gözlemlenmiştir. Bu sayede türbinin başlangıç momenti artmakta ve çalışma aralığı genişlemektedir.

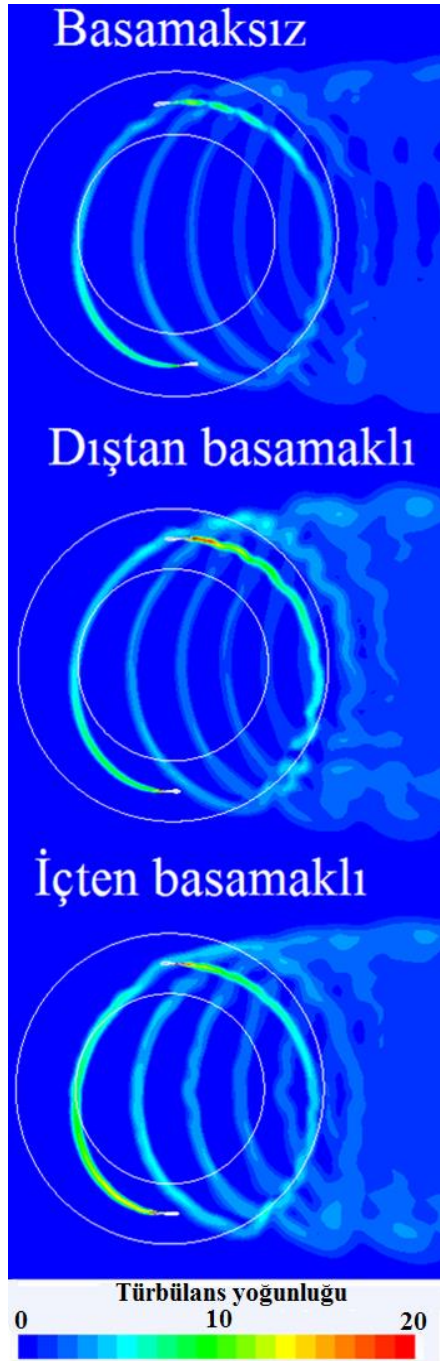
Yüksek uç hız oranında güç düşüşünün sebebini bulmak için türbülans yoğunluğu Şekil 7'de gösterilmiştir. Burada açıkça görüleceği üzere basamaklı durumlarda türbülans yoğunluğu artmaktadır. Bunun ise artan sürüklenme (drag) ile türbin gücünü düşürdüğü tahmin edilmektedir. Bu duruma daha yakından bakmak için, uç durum için, türbin kanadının bir dönüşü boyunca oluşturduğu moment katsayıları ( $Moment/(0.5\rho V_\infty^2 A_{kanat})$ ) Şekil 8'de sunulmuştur. Burada dıştan basamaklı kanat ilk 180 derecelik dönüşte (rüzgârı karşılayan yönde) basamaksız kanada göre daha fazla moment üretse de son 180 derecede (türbinin arka bölgesinde) daha az moment üretmektedir. İçten basamaklı durumda ise tam tersi bir durum söz konusudur. Rüzgârı karşılayan yön olan

ilk 180 derecelik yönde içten basamaklı kanatlar, basamaksız kanada göre daha az moment üretse de son 180 derecede daha fazla moment üretmektedir.



Şekil 6. Genel performans karşılaştırması

Şekil 9'da aynı yüksek uç hız oranında (4.5) her üç türbin tipi için art-izi kıyaslamaları sunulmuştur. Burada her bir zaman adımında veriler kaydedilmiştir, daha sonra tüm bu veriler yazılan bir bilgisayar programı yoluyla ortalanmıştır. Kısacası, sunulan art-izleri zamanda ortalanmış verileri göstermektedir.

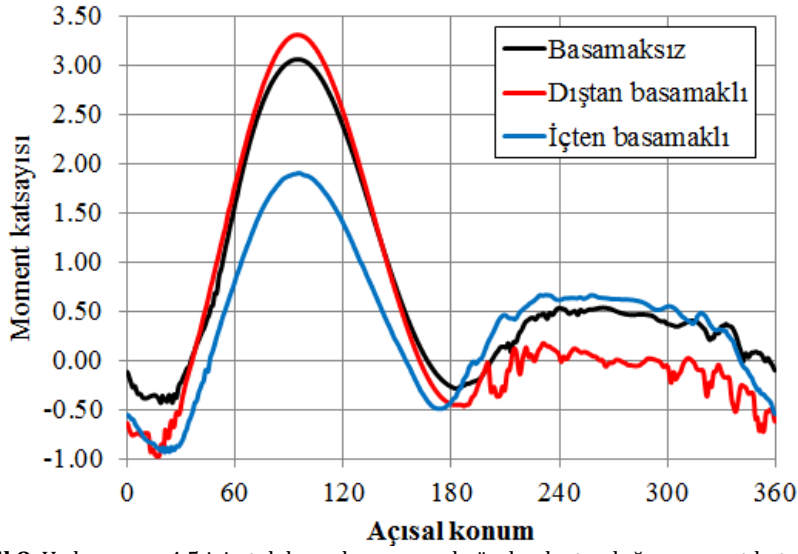


Şekil 7. Uç hız oranı 4.5 için türbülans yoğunluğu karşılaştırması

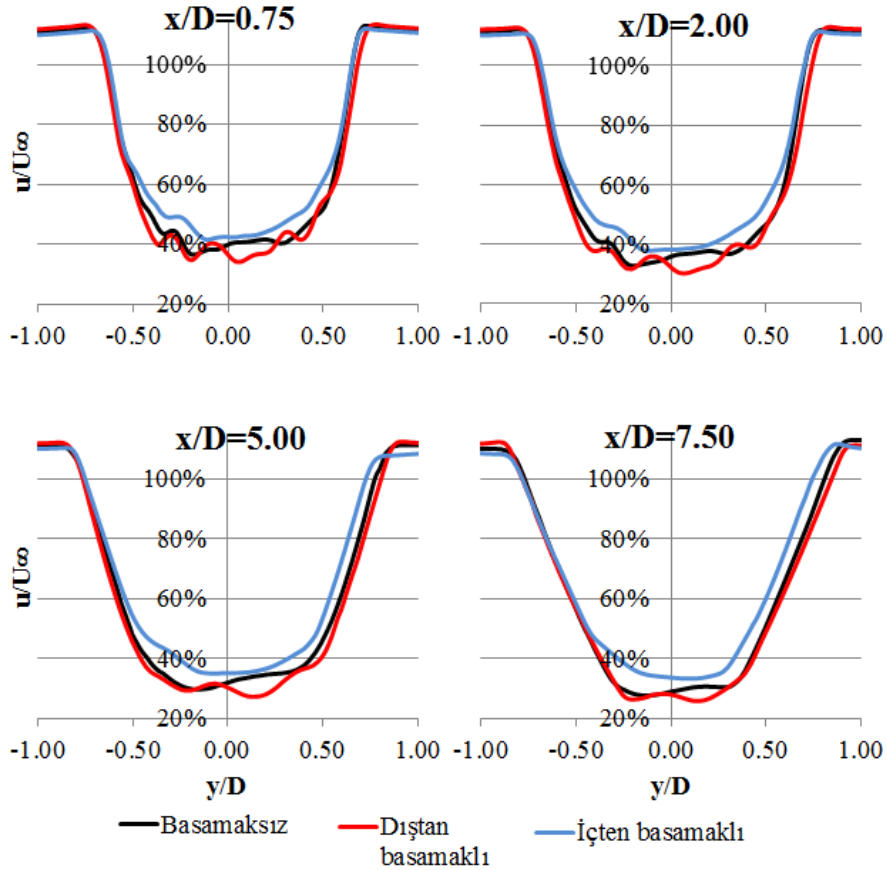
Şekil 9 incelendiğinde, basamaksız ve dıştan basamaklı türbinler benzer art-izlerine sahiptirler. İçten basamaklı durumda ise hızlar genelde daha

yüksektir. Buna sebep olarak içten basamaklı durumda rüzgardan az enerji soğurulması gösterilebilir. Bu sayede rüzgar hızları yüksek kalmaktadır. Dıştan basamaklı durumda ise rüzgardan daha az enerji soğurulmasına rağmen türbülans kaynaklı basınç kayıpları vasıtasıyla basamaksız durumla benzer art-izi karakteristiği gözlemlenmiştir. Bu tahminler ve çıkarımlar haricinde art-izi hız karşılaştırmaları arasında anlamlı bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır.

Düşük uç hız oranında (1.5), dıştan basamaklı kanatların, normal kanatlara göre daha yüksek güç üretmesinin sebebini bulmak için, tıpkı yüksek dönme hızlı durumda yapıldığı gibi, bir kanadın dönüş boyunca oluşturduğu moment katsayısı  $(Moment/(0.5\rho V_{\infty}^2 A_{kanat}))$  Şekil 10'da sunulmuştur. İçten basamaklı durum, güç artışı getirmede için karşılaştırmaya dahil edilmemiştir ve sadece dıştan basamaklı ve normal kanat arasındaki fark vurgulanmıştır. Burada ilk bakışta büyük farklar gözükme de, dıştan basamaklı durumda, normal kanatlı durumda gözlemlenen eksi moment dip noktalarının daha yumuşak olduğu görülmüştür. Bu da, yüksek hücum açısı değişikliklerinin olduğu düşük dönme hızlarında basamak eklemenin daha yumuşak bir perdövites (stall) karakteristiği yarattığını ortaya koymaktadır. İlk 60-70 derecede (kanadın üstte bulunduğu konum sıfır derece olmak üzere) büyük artı momentler üretilse de, sonraki açılarda üretilen eksi momentler bu kazanımı azaltmaktadır. Dıştan basamaklı durumda daha az olan eksi moment dip değerlerinin ortalama moment ve gücü arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bu artışın miktarı ise, yukarıda da bahsedildiği üzere 33% olarak tahmin edilmiştir.

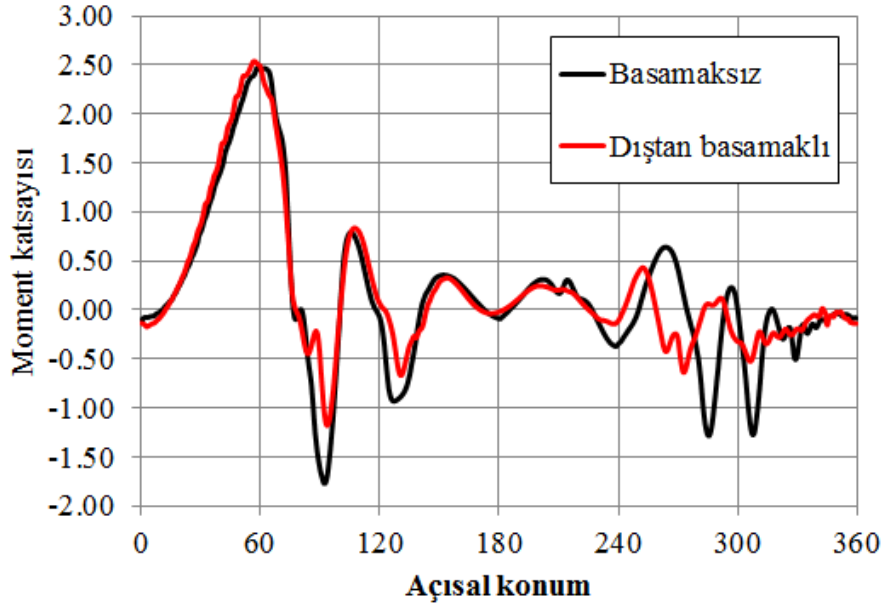


Şekil 8. Uç hız oranı 4.5 için tek kanadın çevresel yönde oluşturduğu moment katsayısı



Şekil 9. Uç hız oranı 4.5 için art-izi hız karşılaştırması





Şekil 10. Uç hız oranı 1.5 için tek kanadın çevresel yönde oluşturduğu moment katsayısı

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, bir kanadın firar tarafına basamak açmanın (Kline-Fogleman kanatları), literatürde belirtildiği üzere, o kanadın kaldırma/sürüklenme kuvvet oranını arttırma yönünde bir etkiye sahip olabileceği tezinden yola çıkmıştır. Buna göre, kanada basamak açmanın, kaldırma kuvveti temelli bir türbin olan ve yoğunlukla çalışılan güncel bir bilimsel araştırma konusu olan Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbinlerinde güç üretimi yönünden olumlu etkisinin olabileceği değerlendirilmiştir. Darrieus türbinlerinde gözlemlenen dinamik perdövites (stall) ve karmaşık akış özellikleri sebebiyle izole kanat verisiyle bir çıkarımda bulunmak, özellikle niceliksel veri gerektiğinde, zordur. Bu sebeple kanatlar doğrudan türbin üzerinde denenmiştir.

Gerçekleştirilen doğrulanmış hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri sonucunda, kanada basamak açmanın yüksek uç hız oranlarında (dönme hızlarında), beklentinin aksine,

elde edilen gücü %28 (dıştan basamaklı) ile %44 (içten basamaklı) arasında düşürdüğü belirlenmiştir. Ancak, düşük uç hız oranlarında (dönme hızlarında), dıştan basamak açmanın, gücü ve momenti 33% oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu da, türbinin dönmeye başlamasını kolaylaştırmaktadır ve çalışma aralığını genişletmektedir.

Yüksek uç hız oranında güç düşümünün sebebinin, türbin arkasında yaratılan yüksek türbülans ve sürüklenme kuvvetinin olduğu düşünülmektedir. Ancak olumlu bir şekilde, yine aynı yüksek uç hız oranında ve dıştan basamak açılan durumda, türbinin rüzgarı karşıladığı ön bölgede önemli bir güç artışı gözlemlenmiştir (maksimum değerde ~%10 artış). Kısacası güç düşümü, verimsizliklerin olduğu arka kısımda ortaya çıkmıştır. Düşük uç hız oranlarında güç artışının ise daha yumuşak perdövites (stall) karakteristikleri sebebiyle çevresel yönde moment hareketliliğini yumuşatarak (dip değerleri

yükselterek), ortalama momenti yükselttiği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak yapılan çalışmalar, ileriki çalışmalarda çalışılabilecek olan optimize edilmiş basamak geometrilerinin (basit çentikler açma gibi) ve aktif akış kontrol yöntemlerinin, bahsi geçen olumsuzlukları ortadan kaldırarak, güç artış potansiyeli vadedebileceği gerçeğini ortaya koymaktadır.

### Teşekkür

Başta Yrd. Doç. Dr. Ziya Haktan Karadeniz olmak üzere, Doç. Dr. Alparslan Turgut'a, Araş. Gör. Erinç Baytekin'e ve Mak. Yük. Müh. İskender Kökey'e Darrieus rüzgar türbinleri ve bu türbinlerin incelenmesi konusunda açtığı ufuklar sebebiyle teşekkür ederim. Araş. Gör. Erinç Baytekin'e ayrıca geometri oluşturma konusunda gösterdiği yardım için teşekkür ederim.

### Kaynakça

- [1] Paraschivoiu I. 2002. Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept. Polytechnic International Concept, Montreal, 450 s.
- [2] Darrieus G. 1931. Turbine Having Its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current. U.S. Patent 1,835,018 08.
- [3] Howell R, Qin N, Edwards J, Durrani, N. 2010. Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical-Axis Wind Turbine, Renewable Energy, Cilt 35, s. 412-422. DOI:10.1016/j.renene.2009.07.025
- [4] Sutherland H J, Berg, D E, Ashwill T D. 2012. A Retrospective of VAWT Technology. Sandia Report SAND2012-0304.
- [5] Balduzzi F, Bianchini A, Maleci R, Ferrara G. 2016. Critical Issues in the CFD Simulation of Darrieus Wind Turbines, Renewable Energy, Cilt 85, s. 419-435. DOI: 0.1016/j.renene.2015.06.048
- [6] Goude, A. 2012. Fluid Mechanics of Vertical Axis Turbines: Simulations and Model Development. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 998, Uppsala University.
- [7] Banas J F, Sullivan W N. Sandia. 1976. Vertical-Axis Wind Turbine Program Technical Quarterly Report. Sandia Laboratuvarları.
- [8] Worstell M H. 1978. Aerodynamic Performance of the 17 Meter Diameter Darrieus Wind Turbine. Sandia Laboratuvarları.
- [9] Sheldal R E, Klimas P C, Feltz L V. 1980. Aerodynamic Performance of a 5-Metre-Diameter Darrieus Turbine With Extruded Aluminum NACA-0015 Blades. Sandia Laboratuvarları.
- [10] Tescione G, Ragni D, He C, Ferreira C J S, Bussel C J W. 2014. Near Wake Flow Analysis of a Vertical-Axis Wind Turbine By Stereoscopic Particle Image Velocimetry. Renewable Energy, Cilt 70, s. 47-61. DOI:10.1016/j.renene.2014.02.042
- [11] Lam H F, Peng H Y. 2016. Study of Wake Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine by Two and Three Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulations, Renewable Energy, Cilt 90, s. 386-398. DOI:10.1016/j.renene.2016.01.011
- [12] Li Q, Maeda T, Kamada Y, Murata J, Yamamoto M, Ogasawara T, Shimizu K, Kogaki T. 2016. Study on Power Performance for

- Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine by Field and Wind Tunnel Tests. *Renewable Energy*, Cilt 90, s. 291-300.  
DOI:10.1016/j.renene.2016.01.002
- [13] Khosrowponah, S. 1984. Experimental Study of the Cross-Flow Turbine: Colorado State University, Doktora Tezi.
- [14] Colley G, Mishra R, Rao H V, Woolhead R. 2010. Effect of Rotor Blade Position on Vertical Axis Wind Turbine Performance. International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ 10), Granada, İspanya.
- [15] Fukutomi J, Shigemitsu T, Daito H. 2011. Study on Performance and Flow Condition of a Cross-Flow Wind Turbine With a Symmetrical Casing, *Journal of Fluids Engineering*, Cilt 133, s. 490-501.  
DOI:10.1115/1.4004023
- [16] Araya D B, Craing A E, Kinzel M, Dabiri J. 2014. Low order Modeling of Wind Farm Aerodynamics Using Leaky Rankine Bodies, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Cilt 6.  
DOI: 10.1063/1.4905127
- [17] Dabiri J, Greer J R, Koseff J R, Moin P, Peng J. 2015. A New Approach to Wind Energy: Opportunities and Challenges, AIP Conference Proceedings 1652 (51), Berkeley, ABD.
- [18] Karadeniz, Z.H. 2015. Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Araştırmalarında Son Gelişmeler. 8. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Adana, Türkiye.
- [19] Kline R. 1985. The Ultimate Paper Airplane. Simon and Schuster Publication, New York.
- [20] Fertis D G. 1994. New Airfoil Design Concept with Improved Aerodynamic Characteristics, *Journal of Aerospace Engineering*, Cilt 7, s. 328-339.  
DOI:10.1061/(ASCE)0893-1321(1994)7:3(328)
- [21] Witherspoon S, Finaish F. 1996. Experimental and Computational Studies of Flow Developments Around an Airfoil With Backward Facing Steps. AIAA-96-2481-CP.
- [22] Karunakaran C S. 2013. Study of Flow Field over Fabricated Airfoil Models of NACA 23015 with Its Kline-Fogleman Variant, *Advances in Aerospace Science and Applications*, s. 95-100.
- [23] Bos R. 2012. Self-Starting of a Small Urban Darrieus Rotor: Strategies to Boost Performance in Low-Reynolds-Number Flows. Delft University of Technology, Yüksek Lisans Tezi.
- [24] Baytekin, E., Acarer, S., Karadeniz, Z.H., Turgut, A. 2016. Darrieus Tipi Bir Rüzgar Türbininde Kanat Ucu Hızı Oranının Art İzine Etkisi, 10. Uluslararası Temiz Enerji Sempozyumu (UTES), İstanbul, Türkiye.