



Makale / Research Paper

Parça Kanatlı Savonius Rüzgâr Türbin Performansının İncelenmesi

İsmail GÜL^{*a}, Ahmet KOLİP^b

^aDüzce Üniversitesi, Gölüya Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 81600 Düzce/TÜRKİYE

^bSakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54000 Sakarya/TÜRKİYE

ismailgul@duzce.edu.tr, akolip@sakarya.edu.tr

Received/Geliş: 22.05.2018

Revised/Düzeltilme: 19.07.2018

Accepted/Kabul: 28.07.2018

Öz: Bu çalışmada rüzgâr enerjisinin önemine dikkat çekilerek yeni bir rüzgâr türbini kanat tasarımı yapılmıştır. Dikey eksenli rüzgâr türbini olan Savonius tipi rüzgâr türbininin dış bükey olan kanadındaki ters direnç azaltılarak kanat performansını arttırmak hedeflenmiştir. Parabolik olarak yerleştirilmiş parçalar rüzgârın yönüne göre açılıp kapanarak dış bükeydeki ters direnci azatan parça kanatlar tasarlanmıştır. Deney seti üzerinde klasik Savonius kanatlı, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı modellerin türbin konumlarına göre statik ve dinamik momentleri ölçülmüştür. Daha sonra hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapan solidworks akış simülöründe farklı türbin konumlarında statik moment hesapları yapılmış ve yapılan deneyler doğrulanmıştır. Parça kanatlı tasarımında güç katsayısı 0,38 olarak bulunmuş ve diğer modellere göre %40'a yakın bir iyileştirme olduğu saptanmıştır. Deneysel ve sayısal yöntemlerde değerlerin birbirlerine çok yakın çıkması yapılan performans geliştirilmenin doğruluğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Savonius, rüzgâr, türbin, parça kanat, sayısal çözümleme.

Performance of Production Special Section Profiles

Abstract: In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. In industry, flap discs with various features are used for grinding. The measured and obtained results were compared.

Keywords: Savonius, wind, turbine, piece-blade, numerical analysis.

1. Giriş

Dünyada hızla artan nüfus ve buna bağlı olarak enerji talebinin artması, insanoğlunu farklı enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Sanayi inkılabından sonra makinelerin ihtiyaç duyduğu enerji için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar için dünya savaşları yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Milyonlarca insan bu enerji savaşlarında hayatlarını kaybetmiştir. İnsan hayatının bile önüne geçen enerjiye sahip olma istekleri ülkelerin öncelikleri olmuştur. Enerjinin bu kadar önemli olması fosil yakıtların hızla tükenmesi ve küresel ısınmanın artması farklı enerji kaynaklarının kullanılmasını kaçınılmaz kılmıştır. Bu kaynak arayışı insanoğlunu kimi zaman keşiflere, kimi

Bu makaleye atf yapmak için

Gül İ., Kolip A., "Parça Kanatlı Savonius Rüzgâr Türbin Performansının İncelenmesi", El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(3); 816-827.

How to cite this article

Gül İ., Kolip A., "The Performance analysis of Part-Blade Savonius Wind Turbine", El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2018, 5(3); 816-827.

zaman da eski çağlara dayanan teknolojilerin performanslarını arttırmaya yönlendirmiştir. İnsanoğlu bu arayış içinde son yıllarda doğaya daha az zarar veren yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgâr enerjisi uzun yıllardan bu zamana kadar kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin yenilenebilir olmasının karşısında bazı sıkıntılar da bulunmaktadır. Bu enerji, yer küre üzerinde sürekli değil, kesintilidir ve aynı zamanda rüzgâr enerjisinin anlık olarak gücü ve yönü değişmektedir.

Genel çerçevede rüzgâr enerjisinden yararlanılmak üzere türbinler yatay ve dikey eksenli olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yatay eksenli türbinlerin rüzgâra göre yönlendirilmesine ihtiyaç duyulurken, dikey eksenli olanlar ise rüzgâr yönüne göre yönlendirmeye ihtiyaç duymazlar. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri arasında yer alan Savonius rüzgâr türbinleri, bir iç bükey ve bir dış bükey iki kepeğin dikey bir mil üzerine konumlandırılması ile oluşturulmuştur. Fakat bu kepeğin iç bükey olanı dönme için pozitif bir etki, dış bükey olan kepe ise negatif bir etki göstermektedir.

Savonius rüzgâr türbinleri; düşey eksenli bir rüzgâr türbini olup, 1925 yılında Finlandiya'lı mühendis Sigurd Savonius tarafından bulunmuştur. Savonius rüzgâr türbini, iki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirlerine göre simetrik olarak kaydırılmış kanat adı verilen iki yarım silindirden oluşur [1]. Savonius rüzgâr türbinlerinin yapılarını iyileştirmeye yönelik çok sayıda farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Savonius rüzgâr türbinleri için Fujisawa ve Shirai, 1987 yılında iç bükey ve dış bükey kanatların konumlandırılması üzerine bir çalışma yaparak en ideal kayma oranlarını belirlemişlerdir [2]. Savonius rüzgâr türbininin performansını artırmak için Ogawa vd., 1989 yılında türbin önüne rüzgâr yönlendirme levhası kullanarak bir çalışma yapmışlar ve performans artışı sağlamışlardır [3]. Altan, 2006 yılında türbin önüne perde uygulaması yapmış ideal perde açılarını belirlemiş ve deneylerini Fluent sayısal çözümleme programı ile doğrulamıştır [1]. Kılıç, 2009 yılında helezonik Savonius rüzgâr türbini imal ederek performans çalışmaları ve elektrik enerjisi üretimi yapmıştır [4]. D'Alessandro vd., 2010 yılında yeni bir simülasyon hesaplama yaklaşımı geliştirmişlerdir [5]. Mahmoud 2012'de Savonius rüzgâr türbinleri üzerine farklı tasarımları içinden en etkin çalışma parametrelerini belirlemek için deneysel olarak incelemişlerdir. İki bıçaklı rotorun, üç ve dört bıçaklıdan daha verimli olduğu belirlenmiştir [6]. Acar, 2013 yılında ise Savonius rüzgâr türbinini çok kademeli helezonik pencere ve silindirik olmayan yapıya sahip olarak tasarlamış ve normalden daha yüksek devir sayılarına ulaşmıştır [7]. Savonius rüzgâr türbini geliştirme ve tasarımı üzerine Roy ve Saha 2013 yılında sayısal olarak çalışmışlardır. Farklı hesaplama metodlarını uygulamışlar ve Savonius türbininin performansını iyileştirmeye çalışmışlardır. Savonius rüzgâr türbin parametrelerini tek tek değiştirerek performansa etkilerini incelemişler ve en ideal modeli geliştirip klasik Savonius rotor ile karşılaştırmışlardır. Savonius türbininin moment ve güç katsayısı gibi değerlerinin hız oranı, kanatların örtüşme oranı, en boy oranı, kanat yay açısı ve kanat sayısı gibi birçok parametreye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [8].

Şahin, 2015 yılında klasik Savonius türbininin etrafına 6 ve 8 adet yönlendirici plakalar yerleştirmiş ve Fluent sayısal çözümlerini yapmıştır [9]. Sharma vd., 2017 yılındaki çalışmalarında klasik Savonius rotor kanatları içine eş merkezli çok sayıda minyatür bıçak ekleyerek sayısal simülasyonlarını yaparak bir iyileşme sağlamışlardır [10]. Kumar 2017'de türbininin bıçak şeklini değiştirmek için bıçak ark açısı ve bıçak şekil faktörü olarak geometrik parametreler kullanılmıştır. CFD analizini kullanarak, bıçak ark açısı ve bıçak şekli faktörü, güç katsayısı, rotor çevresinde bulunan akışkan akış dağılımları analiz edilmiştir. Araştırmaya göre, bıçak yay açısı 150° , bıçak şekli faktörü 0,6 ve 2 m / s akış hızında maksimum güç katsayısı 0,426, kanat uç hız oranı 0,9'a tekabül ettiği optimum değerler olarak belirlenmiştir [11].

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi için mevcut Savonius rüzgâr türbinlerinin dönme için negatif etki gösteren dış bükey kanat üzerindeki negatif yükü azaltmak için yeni bir tasarım yapılmıştır. Parça kanat uygulaması kanatların önce yarısına sonra tamamına uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda klasik, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı modellerin statik ve dinamik momentleri belirlenmiştir. Daha sonra Solidworks Flow Simulation sayısal Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) programında tüm modellerin farklı türbin konumları için statik momentleri bulunmuş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr enerjisi tarihte ilk olarak, kırsal alanlarda ve tarımsal amaçlarla kullanılmıştır. M.Ö 3000 yıllarından günümüze kadar farklı amaçlar içinde olsa rüzgâr türbinleri sürekli olarak kullanılmaktadır. Genel olarak dönme eksenine göre yatay ve dikey eksenli türbinler olarak sınıflandırılmaktadır. Rüzgâr türbinleri ile ilgili ilk teorik çalışma, Göttingen Üniversitesinde Albert Betz tarafından yapılmıştır. Betz; rüzgâr türbinlerini, göbeksiz ve sonsuz kanatlı olduğunu veya diğer bir ifadeyle ideal olduğunu varsayarak hesaplarını yapmıştır. Betz'in teorisine göre, rüzgâr türbinlerinin güç ve performans hesapları aşağıda açıklanmıştır [1].

Havanın sıkıştırılmayacağı varsayılırsa süreklilik deklemini ve Euler hareket miktarı teoremi ile yazılarak eşitlikler düzenlendiğinde;

$$\frac{P_{r,max}}{T} = \frac{8/27 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3}{1/2 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (1)$$

olarak Betz Limiti adı verilen değer elde edilir.

Bir rüzgâr türbininden ideal bir şekilde enerji alınabilmesi için rüzgâr enerjisinin ancak %59,26 kadarının teorik olarak faydalı enerji haline dönüştürülebileceği anlaşılmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinin performansı, moment ve güç katsayıları ile belirlenir. Buna göre rüzgâr türbinlerine ait;

$$C_p = \frac{P_f}{P_r} = \frac{M_d \omega}{1/2 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3} \quad (2)$$

Eşitlik 2.'te C_p , güç katsayısı; P_f , faydalı gücün(W), P_r , rüzgâr gücüne (W) oranı ile belirlenmektedir. Faydalı gücün hesaplanmasında M_d , dinamik moment (Nm) ve ω , açısal hızdan (rad/s) yararlanılmaktadır. Rüzgâr gücünün hesaplanması ise eşitlik 1.'de verilmiştir.

Rüzgâr türbinlerinin performans katsayıları, kanadın hızının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu da; uç hız oranı olarak adlandırılır ve eşitlik 3'teki gibi ifade edilir.

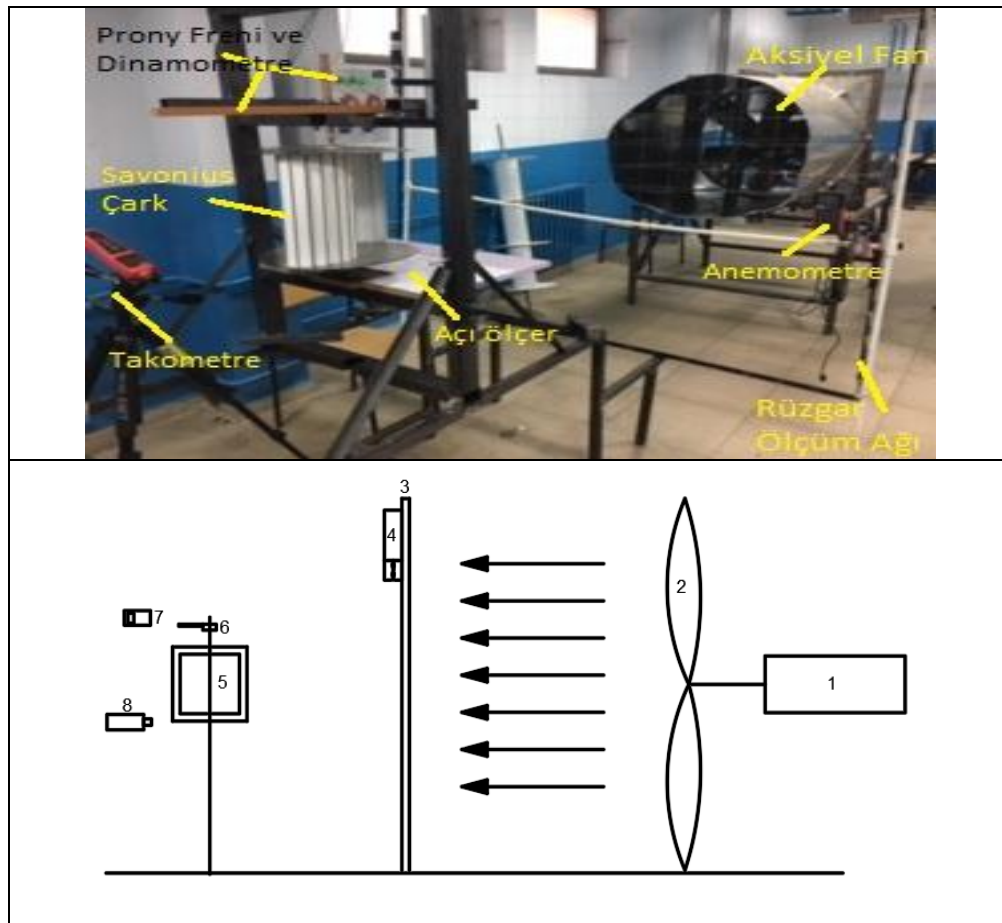
$$\lambda_0 = \frac{U}{V_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{60 \cdot V_1} = \frac{\pi R n}{30 \cdot V_1} \quad (3)$$

Eşitlik 3.'te λ_0 , kanat uç hız oranı hesaplanırken, U, kanat uç hızından (m/s) ve V_1 , rüzgâr hızından yararlanılır.

3. Deneysel Çalışmalar

3.1. Deneysel Düzenek

Savonius rüzgâr türbininin dış bükey kanadında oluşan negatif yükü azaltmak için kanatları parçalara ayırarak yapılan bu çalışmada klasik Savonius türbinini referans alınarak, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı Savonius rüzgâr türbinlerinin güç ve performans değerlerini arttırmak için deneyler yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı bölgede sürekli rüzgârlar olmadığı için yapay olarak rüzgâr enerjisi elde edebilmek için açık devre bir rüzgâr tüneli düzenek kullanılmıştır. Bu düzenekte 90 cm çapında aksiyal bir fandan yararlanılmıştır. Bu fanın çıkışının 2 metre önüne hava hızını ölçmek için 180x180 cm boyutunda bir ölçüm ağı oluşturulmuştur. Ölçüm ağının 1 metre önüne rüzgâr türbinini monte etmek için montaj sehpası yapılmıştır. Montaj sehpasının üzerine rüzgâr türbinini yerleştirmek için milin alt ve üst kısmına oynar rulman kullanılmıştır. Montaj sehpasının üzerine türbin konumlarını belirleyebilmek için bir açıölçer yerleştirilmiş ve ölçüm aletlerini sabitlemek için uygun yerler yapılmıştır. Deneysel düzenek Şekil 1.'de gösterilmiş olup deneyde kullanılan ölçü aletleri ve düzenekler aşağıda verilmiştir.



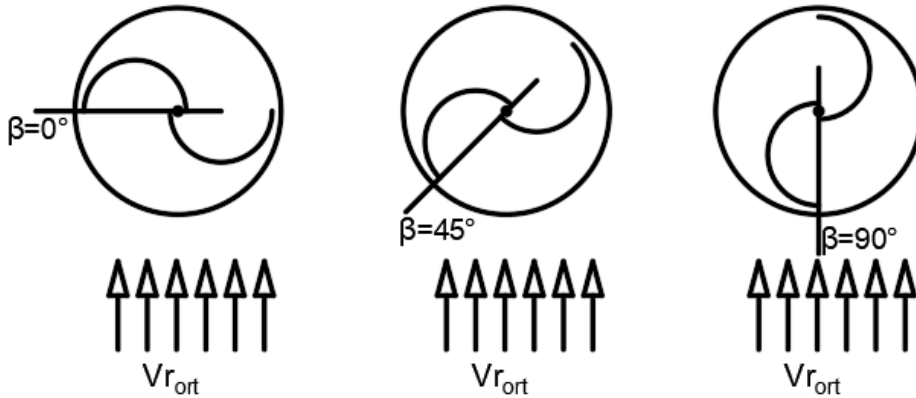
Şekil 1. Deneysel Düzenek 1.Fan motoru; 3 faz, 50 Hz ve 4 kW, 2.Fan: 90 cm çapında ve 2900 d/d aksiyal fan, 3.Ölçüm ağı, 4.Anemometre, 5.Savonius türbinini, 6.Freni freni, 7.Dinamometre, 8.Takometre,

Deneylerin yapıldığı bölgede sürekli rüzgârlar olmadığından yapay olarak rüzgâr enerjisi elde etmek için 90 cm çapında aksiyal bir fandan yararlanılmıştır. Bu fanın çıkışının 2 metre önüne hava hızını belirlemek için ölçüm ağı oluşturulmuştur. Ölçüm ağı üzerine anemometre bağlanmıştır. Türbinin 150 mm ilerisine tripot üzerine takometre sabitlenmiştir. Takometre ve anemometreden alınan veriler bilgisayarda depolanmıştır. Ölçümler için kullanılan cihazların teknik özellikleri Tablo1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri

	TAKOMETRE	ANEMOMETRE	DİNAMOMETRE	
MARKA	UNIT	UNIT	PORTABLE	
MODEL	UT372	UT362	WH-A08	
ÖLÇÜM ARALIĞI	10-99999	2-10 m/s, 10-30 m/s	0-10kg	10-50kg
HASSASİYET	0,04%	3%	5g	10g
GÖRÜNTÜLEME	99999	-	49,99	
TEMASSIZ ÖLÇÜM MESAFESİ	50mm - 200mm	-	-	
UYKU MODU	15 dakika	-	5 dakika	
DÜŞÜK GÜÇ GÖRÜNTÜLEME	4,8 V	9V	1,5V	
HAVA BASINCI	-	500mB-2 Bar		
ÇALIŞMA SICAKLIĞI	-	0-50 °C	0-50 °C	

Rüzgâr verilerini daha net alabilmek için türbin önüne 1 m mesafe yerleştirilen ölçüm ağı 180x180 cm ebatlarında ve iç kısmı 10x10 cm olacak şekilde eşit karelere bölünerek her bir karede belirli sürelerde anemometre probu ile ölçümler alınmıştır. Rüzgâr hızı olarak türbin merkezinden 0,95 m²'lik alandaki veriler alınmıştır. Bu alan 0,1024 m² olan türbinin rüzgara karşılayan alanınının 9 katıdır. Elde edilen rüzgâr hızları bilgisayar ortamında kaydedilerek ortalaması alınmış ve deneylerde kullanılmıştır.

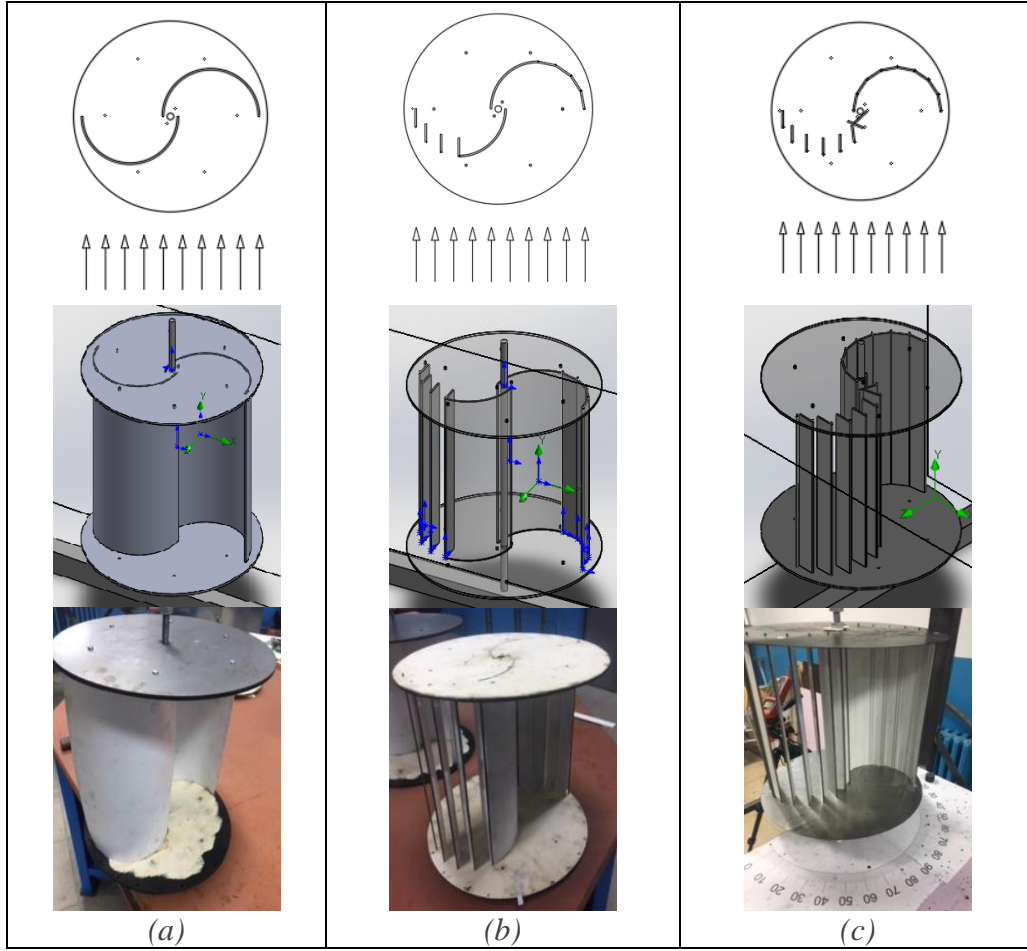


Şekil 2. Türbin konum açısı (β)

Şekil 1'deki deney seti üzerinde, öncelikle fan çalıştırılmış ve kararlı hale gelmesi beklenilmiştir. Türbin serbest şekilde dönerken yüksüz durumdaki devir sayısı ölçülmüştür. Daha sonra türbin konumları Şekil 2.'de gösterildiği gibi 0 (sıfır) dereceden başlayarak 15 derecelik artışlarla 90 derece açığa kadar Prony freni ve dinamometre yarımıyla güç ölçümü yapılmış ve kaydedilmiştir. Ölçümler sonrası hesaplamalarla statik moment değerleri bulunmuştur. Dinamik momentler ölçülürken yine fan çalıştırılmış kararlı hale geldikten sonra serbest dönen türbin mili üzerine bağlı bulunan Prony freni sıkılarak belirli devirlerdeki yükler ölçülmüştür.

Eşitlikler yardımıyla ρ ; havanın yoğunluğu (1,24 kg/m³), A_T ; türbinin rüzgâr yönündeki kesit alanı (0,1024m²) ve V_1 ; ortalama rüzgâr (4,605m/s) hızı değerlerine göre rüzgâr gücü hesaplandığında 6,19 W değeri elde edilmektedir. Bu değer güç katsayısının hesaplanmasında sürekli olarak kullanılmıştır.

Şekil 3'te gösterildiği gibi klasik kanatlı Savonius referans alınarak, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı Savonius türbinleri imalatı deneylerde kullanılmak üzere yapılmıştır. İmalatta çelik, ahşap ve plastik malzemelerden yararlanılmıştır.



Şekil 3. Kanat tasarımları (a) Klasik kanatlı, (b) yarı parça kanatlı, (c) parça kanatlı

3.2. Sayısal yöntem

Solidworks akış simülasyonu 2013 yılından sonra akış analizi eklenti paketi olarak oluşturulan akışkanların hareketini düzenleyen tam Navier-Stokes eşitliklerine göre çözümler elde etmek amacıyla kullanılan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıdır. Navier-Stokes eşitliğini, akışkana hareketine ait Newton'un ikinci yasaının (momentum korunumu) bir akışkan parçacığı dikkate alınarak ve Newton tipi akışkanlar için viskoz gerilme tensörü yerine gerilme ile şekil değiştirme arasındaki bünye eşitliği yazılarak elde edilmiş biçimdir. Bu yüzden Navier-Stokes eşitliği, basitçe Newton tipi akışkanlar için yazılmış Newton'un ikinci yasasıdır. Navier-Stokes eşitliği akışkanlar mekaniğinin en önemli eşitlikleri arasındadır. Her ne kadar akışı tarif eden diferansiyel eşitliklere (süreklilik ve Navier-Stokes) sahip olsak da bunları çözmek ayrı bir meseledir. Bazı basit geometrilerde, eşitlikler analitik olarak çözebileceğimiz hale getirilebilir. Daha karmaşık geometriler için doğrusal olmayan, birbirine bağlı, ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemler söz konusudur. Bu durumda ya yaklaşık çözümlere ya da sayısal çözümlere (bilgisayar yardımıyla) başvurulması gerekmektedir [12].

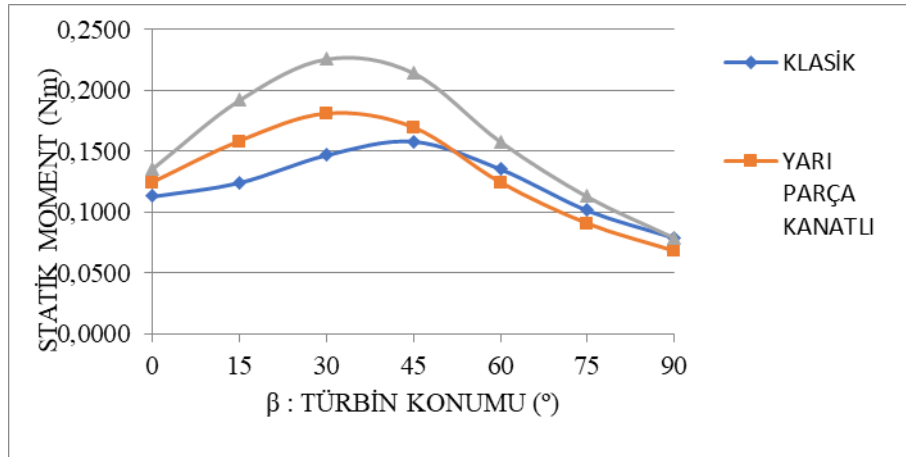
CFD mühendislik sorunlarını gidermek üzere geliştirilmiş olan Solidworks Flow Simulation, mühendislerin kullanım kolaylığından veya doğruluktan ödün vermeden CAD entegrasyonundan, gelişmiş geometrik mesh yeteneklerinden, güçlü çözüm yakınsamasından ve otomatik akış düzeni belirlemeden yararlanmasını sağlamaktadır. Solidworks Flow Simulation'u ile akış alanlarını, karıştırma proseslerini ve ısı transferini öngörebilir ve basınç düşüşünü, konfor parametrelerini, akış güçlerini ve sıvı yapısı etkileşimini tasarım sırasında doğrudan belirlenebilmektedir. Solidworks

Flow Simulation, ileri seviyede CFD uzmanlığına gerek kalmadan gerçek eş zamanlı CFD'ye olanak tanımaktadır. Bu yazılım, analizlerdeki karmaşıklığa son vererek, mühendislerin akışkan akışını, ısı transferini ve akışkan kuvvetlerini hızla ve kolayca analiz etmesini sağlamaktadır. Bu sayede mühendisler bir sıvının ya da gaz akışının ürün performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmektedirler [13]. Bu çalışmada Solidworks 2016 sürümünün içinde yer alan Flow Simulation uygulaması kullanılmıştır.

4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.1. Hareketsiz türbin durumunda yapılan deney verileri

Klasik, yarı parça ve parça kanatlı Savonius rüzgâr türbinlerinin statik momentleri yapılan deneyler sonucunda Tablo 1.'deki gibi belirlenmiştir. Veriler karşılaştırıldığında, en yüksek değer parça kanatlı modelin 30° türbin konumunda belirlenmiştir. Yarı parça kanatlı modelde 45°'den sonraki statik moment değerleri klasik kanatlı modelin de altında kalmıştır. Bu durum yarısı bütün olan kısımdan sonraki parça kanatların açılarak dönme için gerekli pozitif direncin azaldığını göstermektedir. Statik moment değerleri 30° türbin konumu dikkate alındığında klasik kanatlı modele göre yarı parça kanatlı model % 7 ve parça kanatlı model ise % 33 artış olduğu bulunmuştur. Tüm türbin konumlarındaki statik moment değerlerinin ortalaması alındığında ise yarı parça kanatlı modelde %10 azalma, parça kanatlı modelde ise %10 artış olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. Kanat Modellerinin Türbin Konumuna Göre Statik Moment Değişimi

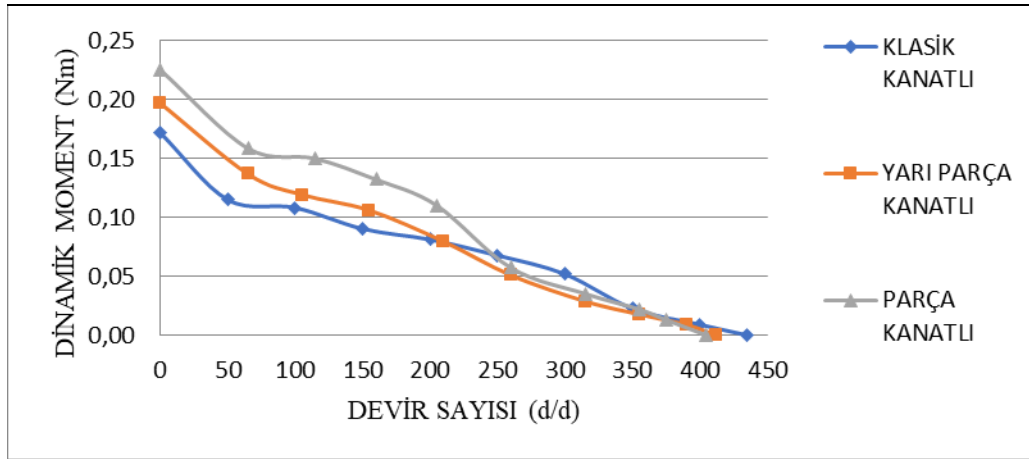
Şekil 5'teki grafik incelendiğinde statik moment değeri 0°'den 45°'ye doğru artmakta ve daha sonra düşerken 90°'de en düşük değer elde edilmektedir. Bu durum Savonius türbininin 45°'ye kadar iç bükey kanadın daha yüksek bir kuvvete maruz kaldığını 45°'den sonra dış bükey yüzeylerin ve ters dirençlerin arttığını göstermektedir.

4.2. Hareketli türbin durumunda yapılan deney verileri

Hareketli türbin durumları için deneyler yapılırken türbin montaj sehpasına yerleştirilip balans ayarı yapıldıktan sonra serbest olarak dönerken takometreden devir sayısı bilgisayara kaydedilmiştir. Daha sonra Prony freni yardımıyla yük uygulanarak devir sayıları kademeli olarak düşürülerek uygulanan yükler kaydedilmiştir. Bu sayede hangi yük uygulandığında devir sayısının ne olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler yardımıyla açısal hız, dinamik moment, faydalı güç, güç katsayısı ve uç hız oranı hesaplamaları yapılmıştır.

-Hareketli durumdaki türbinlerin devir sayısı ve dinamik moment değerlerin karşılaştırılması

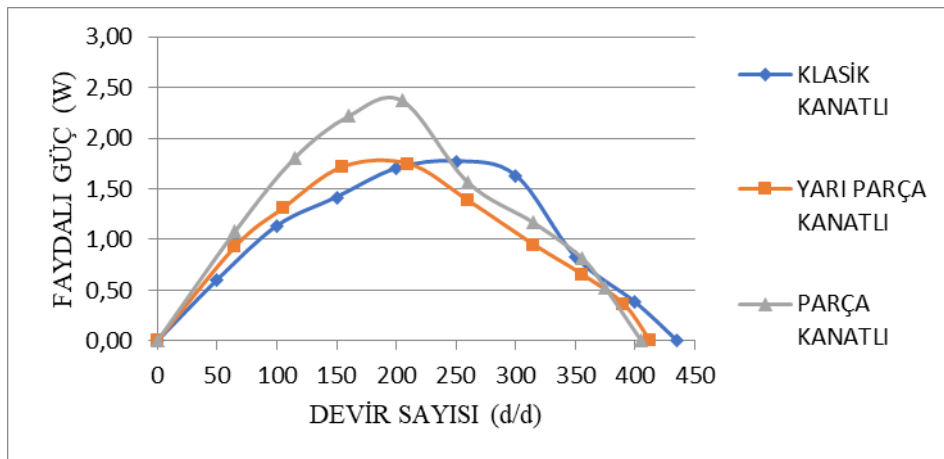
Şekil 6'da deneyler neticesinde elde edilen en yüksek dinamik moment değerleri klasik kanatlı Savonius türbini için 0,11 Nm, Yarı parça kanatlı için 0,13 Nm ve Parça kanatlı Savonius türbini için 0,15 Nm en düşük devirde elde edilmiştir. Üç kanat modelinin dinamik momentleri karşılaştırıldığında düşük devirlerde en iyi performansı parça kanatlı model gösterirken, devir yükseldikçe klasik kanatlı model, dinamik moment açısından daha iyi performans göstermiştir. Bu da yüksek kalkış momenti gerektiğinde parça kanatlı modelin daha avantajlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Savonius türbinlerinin devir sayısına göre moment değişimi

-Hareketli durumdaki türbinlerin devir sayısı ve faydalı güç değerlerin karşılaştırılması

Şekil 7'de deneyler sonucunda elde edilen en yüksek faydalı güç değerleri, klasik kanatlı Savonius türbini için 250d/d'da 1,77W, Yarı parça kanatlı için 210d/d'da 1,74W ve parça kanatlı Savonius türbini için 205 d/d'da 2,36W olarak serbest şekildeki devir sayılarının yarısında iken bulunmuştur.

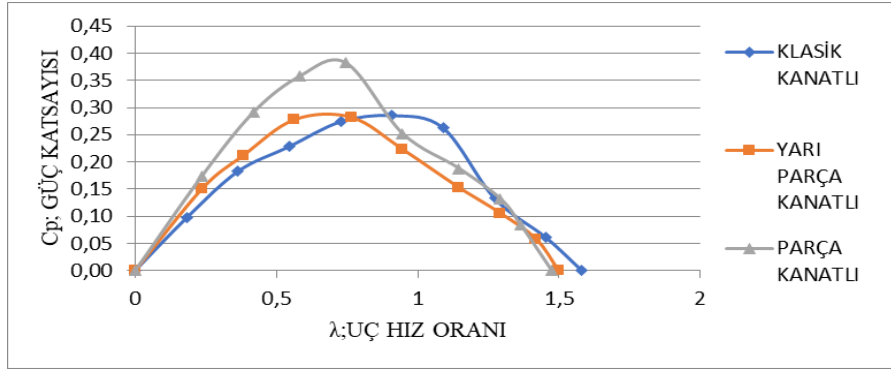


Şekil 7. Savonius Türbinlerinin Faydalı Güç Değişimi

-Hareketli durumdaki türbinlerin güç katsayısı ve uç hız oranlarının karşılaştırılması

Şekil 8'de kanat modelleri ve güç katsayıları karşılaştırıldığında, klasik kanat ile yarı parça kanatlı tasarımlar için yapılan deneylerde en yüksek olarak 0,28 değerinin elde edildiği görülmektedir.

Parça kanatlı tasarımda ise en yüksek güç katsayısı 0,38 elde edilmiş olup, bu da yaklaşık %40 performans artışı sağlandığını göstermektedir.

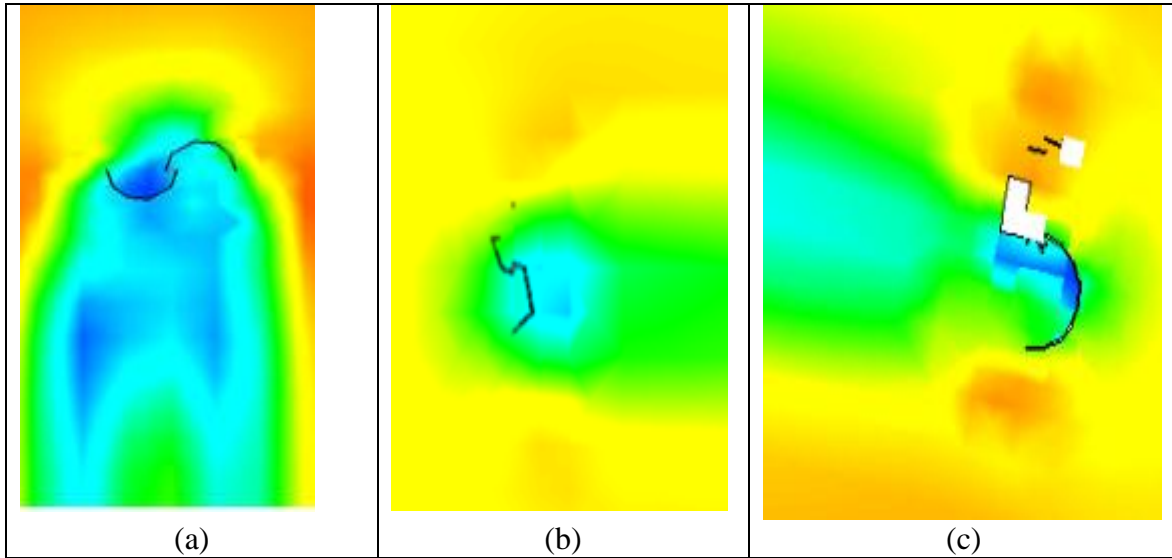


Şekil 8. Savonius Türbinlerinin Güç katsayısı Değişimi

4.3. Hareketsiz Türbin Durumlarında Sayısal Çözümleme ile Elde Edilen Sonuçlar

Solid Works Flow Simülöründe akış analiz için giriş parametreleri normal şartlar altında, adyabatik, dış akış, hava hızı ölçüm ağındaki ortalama rüzgâr hızı olan 4,605 m/s ve üç boyutlu olarak belirlenmiştir. Ağ örüntüsü oluşturulurken kullanılan bilgisayarın performansı göz önüne alınarak programda orta düzey olarak otomatik olan seçenek tercih edilmiştir. Sonuç parametreleri olarak tüm model için güç ve y doğrultusundaki tork değerlerinin gösterilmesi seçilmiştir. Tüm türbin modelleri için akış analizinde türbin konumları 15°'lik farklarla tekrarlanarak yapılmış ve sonuç verileri elde edilmiştir.

Klasik kanatlı Savonius modeli için hız dağılımı Şekil 9a'da türbinin bir metre önündeki ortalama hız, türbinin iç bükey kısmının temas ettiği durma noktası oluşmaktadır. Özellikle türbinin dış bükey kısmın temas ettiği yerde rüzgâr hızı durma noktasına yaklaşmakta fakat sıfır değerini görmemektedir. Bu da dış bükey kanat üzerinde dönme yönüne ters bir yük oluştuğunu göstermektedir. Ters yükün oluştuğu dış bükey kısmın temas alanı geniş olduğundan moment değerlerini düşürmektedir.



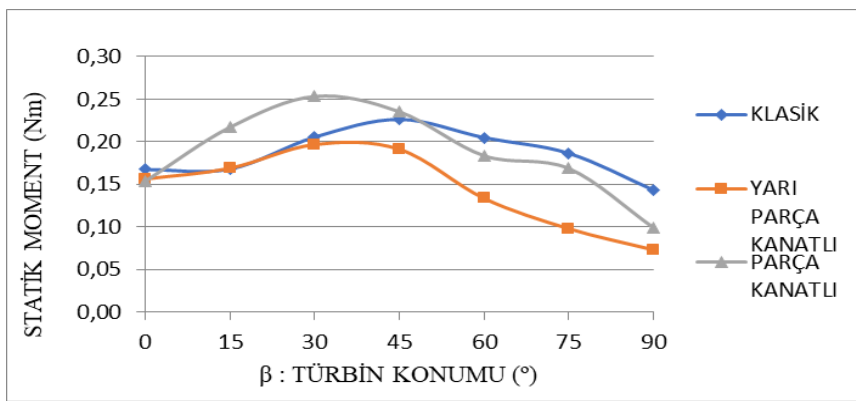
Şekil 9. Yarı Parça Kanatlı Savonius Türbin Konumu $\beta=0^\circ$ için Hız Dağılımı

Şekil 9b'de yarı parça kanatlı Savonius türbini sayısal analizinin görüntüsü incelendiğinde rüzgâr hızı ne iç bükey ne de dış bükey kısımda durma noktası değerine düşmemektedir. Bunun sebebi ise

yarı sabit kanat ile parça kanatların birleşme noktasında tam bir sızdırmazlık sağlanamamasıdır. Bu sızdırmadan dolayı statik moment değeri, klasik kanata göre düşük kalmaktadır. Fakat bu durum dış bükey kanat tarafındaki parça kanatlar ile ters yük oluşumunu azalttığı için güç katsayısını ve devir sayısını olumsuz etkilememektedir.

Şekil 9c’de parça kanatlı modelin rüzgâr hızı analiz görüntüsü incelendiğinde, rüzgâr hızının durma noktası iç bükey yüzeyde gözlemlerken, dış bükey kısımda rüzgâr hızı durma noktası oluşmamaktadır. Bu durum parça kanatlı türbin modelinde dış bükey kısımda negatif direnç oluşmadığını ispatlamaktadır.

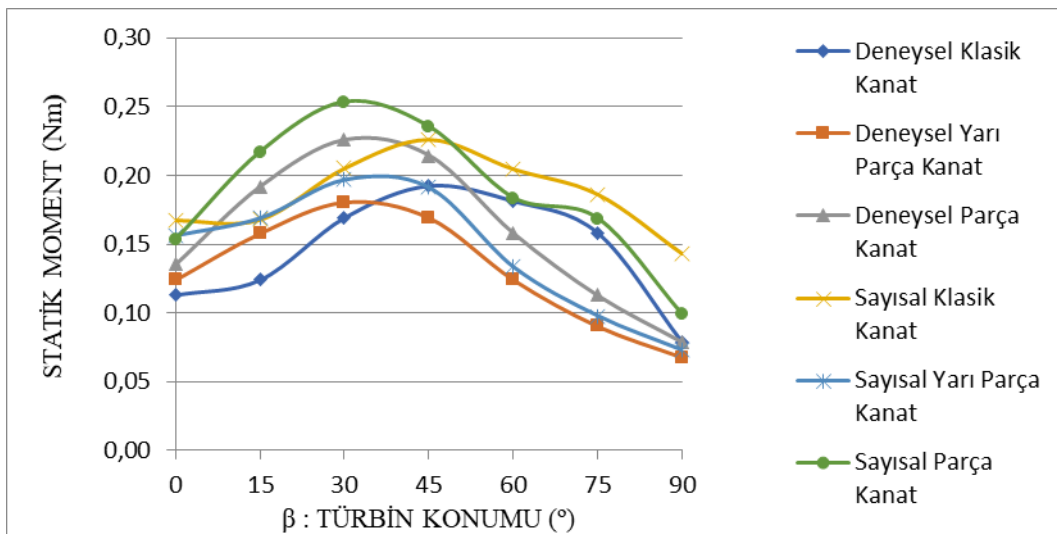
Sayısal çözümlene analizleri Şekil 10’da kanat modelleri için değerlendirildiğinde, en yüksek statik moment değerleri, klasik kanat için 45° türbin konumunda 0,22 Nm, yarı parça kanatlı model için 30° türbin konumunda 0,19 Nm ve parça kanatlı model için ise 45° türbin konumunda 0,23 Nm olarak bulunmuştur.



Şekil 10. Sayısal Çözümlemede Statik Momentlerin Değişimi

4.4. Deneysel ve Sayısal Çözümleme Verilerinin Karşılaştırılması

Deneylerde elde edilen sonuçlar ile sayısal çözümlemedeki sonuçlar Şekil 11’de karşılaştırıldığında, klasik kanat tasarımında %10, yarı parça kanatlı tasarımda %5 ve parça kanatlı tasarımda %10 olarak değerlerin birbirlerine yakınlıkları tespit edilmiştir. Fakat 75° türbin konumundaki değerlerde bir farklılık olmuştur.



Şekil 11. Tüm Modellerin Deneysel ve Sayısal Statik Moment Değişimi

Bu durumun mesh seçeneklerinin ortalama seçildiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Mesh yoğunluğu arttırıldığında sonuçların yaklaşacağı düşünülmektedir. Karşılaştırma yapılabilmek için tüm deneylerde aynı mesh yoğunluğu uygulanmıştır.

5. Sonuçlar

Klasik kanatlı Savonius türbini referans alınarak yapılan bu çalışmada yarı parça kanatlı ve parça kanatlı Savonius türbinleri karşılaştırılmıştır. Hareketsiz türbin durumlarında yapılan deneylerde statik moment, yarı parça kanatlı model için % 7 ve parça kanatlı model için ise % 33 artış olduğu tespit edilmiştir. Tüm türbin konumlarındaki statik moment değerlerinin ortalaması alındığında ise yarı parça kanatlı modelde %10 azalma, parça kanatlı modelde ise %10 artış olduğu belirlenmiştir. Statik momentlerdeki artış yeni tasarlanan parça kanatlı modelin daha düşük rüzgâr hızlarında ilk hareketin olabileceğini göstermektedir. Yarı parça kanatlı modelin ise ilk hareket için, daha yüksek rüzgâr hızları gerekecektir.

Hareketli türbin üzerinde yapılan deneylerde yeni önerilen iki kanat modeli klasik kanatlı model ile karşılaştırıldığında, güç katsayılarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Güç katsayıları dikkate alındığında, klasik modelde 0.28, yarı kanatlı modelde 0.28 ve parça kanatlı modelde 0.38 olduğu bulunmuştur. Parça kanatlı tasarımın güç katsayısında diğer kanat modellerine göre %40'a yakın bir iyileştirme olduğu tespit edilmiştir. Bu performans artışı çalışmanın ideal olan Betz limiti değerine daha çok yaklaştığı görülmektedir.

Rüzgâr yönüne bağımlı olmadan çalışan Savonius rüzgâr türbinlerine olan ilgi montaj kolaylığı, basit tasarımı, estetik görünümü, ekonomik oluşundan dolayı her geçen gün artmaktadır. Çalışmada bu durumları göz önüne alınarak yeni bir model olan parça kanatlı Savonius ile küçük kapasiteli ihtiyaçlar için bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarım özellikle şehir için uygulamalarda kullanılabileceği düşünülmektedir.

Simgeler ve Kısaltmalar

A	: Rüzgârı karşılayan alan (m^2)	n	: Devir sayısı (d/d)
CFD	: Sayısal Akışkanlar Dinamiği	P	: Basınç (Pa)
C_p	: Güç katsayısı	P_f	: Faydalı güç (W)
D	: Türbin Çapı (m)	t	: Zaman (saniye)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s^2)	u	: x-yönündeki Kartezyen hız bileşeni
HAD	: hesaplamalı akışkanlar dinamiği	V	: Hız (m/s)
L	: Prony fren kolu (kuvvet kolu) (m)	v	: y-yönündeki Kartezyen hız bileşeni
m	: Kütle (kg)	V_r	: Rüzgâr hızı (m/s)
M_d	: Dinamik moment (Nm)	w	: z-yönündeki Kartezyen hız bileşeni
M_s	: Statik Moment (Nm)	x	: Kartezyen koordinatları
y	: Kartezyen koordinatları	λ	: Uç hız oranı
z	: Kartezyen koordinatları		

Kaynaklar

- [1]. Altan B. D., "Perdeleme yöntemi ile Savonius rüzgâr çarkının performansının incelenmesi", Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [2]. Fujisawa N. ve Shirai H., "Experimental Investigation on the Unsteady Flow Field Around a Savonius Rotor at the Maximum Power Performance", Wind Engineering, 1987,11(4): 195-206.
- [3]. Ogawa T., Yoshida H. ve Yokota Y., "Development of Rotational Speed Control Systems for a Savonius-Type Wind Turbine," Journal of Fluid Engineering, 1989, 111(1): 53-58.

- [4]. Kılıç F., “Helezonik Savonius Türbini İmalatı Ve Denenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [5]. D’Alessandro V., Montelpare S., Ricci R. ve Secchiaroli A., “Unsteady Aerodynamics of a Savonius rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance”, *Energy*, 2010, 35 (8): 3349-3363.
- [6]. Mahmoud N., El-Haroun A.A., Wahba E. Nasef M.H. “An experimental study on improvement of Savonius rotor performance,» *Alexandria Engineering Journal*, 2012, 51(1):19-25.
- [7]. Acar M., “Pencereli ve helezonik tip bir düşey eksenli rüzgâr türbininin tasarımı ve performansının deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [8]. Roy S. ve Saha K. U., “Review on the numerical investigation into the design and development of Savonius wind rotors”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 73-83.
- [9]. Şahin İ., “Bir Savonius Rüzgar Türbininin Performansının Sayısal İncelenmesi Ve İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [10]. Sharma S., Sharma R. K., “CFD investigation to quantify the effect of layered multiple miniature blades on the performance of Savonius rotor”, *Energy Conversion and Management*, 2017, 144: 275-285.
- [11]. KUMAR A. Saini R.P., “Performance analysis of a single stage modified Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades”, *Renewable Energy*, 2017, 113: 461-478.
- [12]. Çengel Y. A. ve Cimbala J. M., “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları (2.Basım)”, İzmir Güven Kitapevi, İzmir, 2012.
- [13]. [http://www.metropolsoft.com/wp-content/uploads/2014/11/\(21.06.2018\)](http://www.metropolsoft.com/wp-content/uploads/2014/11/(21.06.2018))