

Sayı : 85877793-604.0143557

Konu : Proje Yayını

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİNE

Proje yürütücüsü olarak görev yaptığım 2021/2-3 YLS numaralı yüksek lisans projesinde 1 adet tam metin bildirinin Uluslararası kapsamındaki kongrede sözlü sunumu yapılmış ve bildiri tam metin kitabında yayımlanmıştır. Bildirinin teşekkür kısmında BAP birimine teşekkür edilmiştir. Yayın dilekçesi ve ilgili bildiri ekte sunulmuştur.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

e-imzalıdır

Öğr. Gör. Dr. Muhammed Safa KAMER

Öğretim Görevlisi Doktor

Ek:

- 1- Proje Yayın Dilekçesi (1 Sayfa)
- 2- Proje Yayını (Tam Metin) (7 Sayfa)





T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ
PROJE YAYIN DİLEKÇESİ

Proje Adı		
Üç Kanatlı Savonius Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Performansına Merkez Kaçıklığı, Helis Açısı ve Faz Açısının Etkisi		
Proje No	Başlama Tarihi	Bitiş Tarihi
2021/2-3 YLS	20-05-2021	19-05-2024
Yayın Türü	Bildiri Adı / Konferans Adı	
Bildiri	HELİSEL SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AERODİNAMİK PERFORMANSINA MERKEZDEN KAÇIKLIĞIN ETKİSİ / Uluslararası Katılımlı 23. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi	
Düzenlenme Tarihi	Bildiri Adı	
08-09-2021	HELİSEL SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AERODİNAMİK PERFORMANSINA MERKEZDEN KAÇIKLIĞIN ETKİSİ	
Dergi ISSN	DOI	Cilt / Sayfa / Yıl
Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
Yayınlandığı Dergi Kısa Ad	Yayınlandığı Dergi	
Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	

İLGİLİ MAKAMA

Yukarıda bilgileri verilen ilgili otomasyona girilmiş yayın bilgileri içerisinde ; "Söz konusu çalışma/yayın/sunum/poster/bildiri/ **KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ Bilimsel Araştırma Projeleri birimi** tarafından 2021/2-3 YLS proje numaralı "Üç Kanatlı Savonius Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Performansına Merkez Kaçıklığı, Helis Açısı ve Faz Açısının Etkisi" konusu ile ilgili olup, ilgili birimce desteklenmiştir." ("This work is supported by the **Scientific Research Project Fund of KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ** under the project number 2021/2-3 YLS") ifadesi yer almaktadır.

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN

Ünvanı, Adı-Soyadı : Öğr.Gör.Dr. Muhammed Safa KAMER

Tarih : 06-03-2024

İmza :

HELİSEL SAVONIUS RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AERODİNAMİK PERFORMANSINA MERKEZDEN KAÇIKLIĞIN ETKİSİ

Mernuş GÜL*, Ahmet KAYA*

*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
46040 Onikişubat, Kahramanmaraş, mernusdertlii@gmail.com, kaya38@ksu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, dikey eksenli bir rüzgâr türbini olan Savonius Rüzgâr Türbininin (SRT) dört farklı geometrisi tasarlanarak akış analizi yapılmıştır. Türbin üzerinden olan akışa kademe sayısı ve kademelerin merkezden kaçıklığı parametreleri üzerinde çalışılarak en iyi sonucu veren türbin modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan rüzgâr türbinleri 3D yazıcıda imal edilmiştir. On farklı hava hızında deneysel çalışmalarda en iyi sonucu veren türbin modelinin sayısal çalışmaları da yapılmıştır. Sayısal çalışmalar Ansys - Fluent programında, deneysel çalışmalar ise Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan hava tüneline gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda: Merkezden kaçıklığın, klasik savonius rüzgâr türbinlerinden daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Savonius rüzgâr türbini, Kademe sayısı, Aerodinamik özellikler, Ansys.

EFFECT OF CENTRAL SPACING ON AERODYNAMIC PERFORMANCE OF HELICAL SAVONIUS WIND TURBINES

Abstract: In this study, four different geometries of Savonius Wind Turbine (SRT), which is a vertical axis wind turbine, were designed and flow analysis was performed. It is aimed to determine the turbine model that gives the best result by working on the parameters of the number of stages and the offset of the stage to the flow over the turbine. Wind turbines designed for this purpose were manufactured in a 3D printer. Numerical studies of the turbine model, which gave the best results in experimental studies at ten different air speeds, were also performed. Numerical studies were carried out in the Ansys - Fluent program, and experimental studies were carried out in the air tunnel in the laboratory of the Mechanical Engineering Department of Kahramanmaraş Sütçü İmam University. As a result of the studies: It has been determined that the offset performs better than the classical savonius wind turbines.

Keywords: Savonius wind turbine, Number of stages, Aerodynamic properties, Ansys.

GİRİŞ

Günümüzde, küresel ısınma ve çevre kirliliğine sebep olan yer altı kaynaklarının azalması ve sınırlılığının fark edilmesi ile sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Savonius rüzgâr türbinleri elektrik üretimi ve mekanik güç elde etmek için rüzgârın kinetik enerjisini kullanan makinelerdir. Rüzgâr türbini grubunda geniş kullanım oranına sahip olan yatay eksenli rüzgâr türbinleri gittikçe yaygınlaşmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin çok fazla çeşidi bulunmaktadır. Rotor eksenlerine göre yapılan sınıflandırmada yatay eksenli rüzgâr türbinleri ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri olarak sınıflandırılmıştır. Geleneksel rüzgâr türbinlerinin birçoğunun performans değeri Wilson tarafından uygulamalı olarak çalışılmıştır (Wilson vd. 1974). Rüzgâr türbinleri hız katsayısı ve güç katsayısına bağlı performans eğrisine göre değerlendirilirler. Performans tüm makinelerde olduğu

gibi rüzgâr türbinlerinde de en önemli faktördür. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri en yüksek verime sahiptir. Savonius rüzgâr türbinleri diğer tipteki türbinlere nazaran daha düşük rüzgâr hızlarında da dönmeye başlayabilmektedir. Buna ek olarak düşük açılabilir hızları ve düşük rüzgâr hızına bağlı olarak teorik tahminleri zor olan aerodinamik davranışa sahiptir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha yavaş çalışan rüzgâr türbinleri değişken rüzgâr hızına bağlı olarak elde edilen elektriğin dağıtım şebekesine aktarılması ve düşük güç katsayısından dolayı düşük performans gibi dezavantajlara sahiptir. Fakat bu dezavantajlara rağmen birçok önemli üstünlüklere de sahiptir. İlk olarak basit makineler olmasından dolayı kolay inşa edilebilirler. Ayrıca iki ve üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin çalışmayacağı kadar düşük rüzgâr hızlarında bile çalışabilmektedir. Son olarak da diğer rüzgâr türbinlerine göre düşük bakım maliyetine sahiptir.

Literatürde Savonius rüzgâr türbinleri (SRT) ile ilgili çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır, bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Reupke ve Probert (1991), Savonius rüzgâr türbinin çalışma etkinliğini arttırmak için, türbin kanatlarının kavisli kısımlarının yerine bir sıra menteşelenmiş kanatçıklar yerleştirmişlerdir. Rüzgâr basıncının etkisinde otomatik olarak açılan kanatçıklarda daha az akış direnci elde etmişlerdir. Kanatçıkların ilk konuma gelirken, tekrar otomatik olarak kapandığını tespit edip, çok düşük uç hız oranlarında, düzeltilmiş parçalı kanatlı çarklardan, klasik Savonius rüzgâr türbinlerine oranla daha yüksek momentler elde edildiğini belirlemişlerdir.

Atılğan ve Deda Altan (2002), Savonius rüzgâr çarkının orijinal şekli bozulmadan çark çevresine rüzgâra göre yön değiştirebilen bir perde tasarlayıp negatif yönde oluşan momenti ortadan kaldırarak ve aynı zamanda çark önünde daralan bir kesit oluşturularak çark performansını artırma yoluna gitmişlerdir.

Grinspan vd. (2004), bükülü kanatlı savonius rüzgar türbini rotorunun farklı ayar açılarında ve boşluk genişliklerinde deneysel incelemesini yapmışlardır. Üç kanatlı bükülmüş kanat, düşük hızlı bir rüzgar tüneline test edilmiş ve performansı, üç kanatlı geleneksel bir yarım daire kanat ile karşılaştırmışlardır. Her durum için devir sayılarını ve güç katsayılarını hesaplamışlardır. En genel hali ile bükülmüş kanatta daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Gupta vd. (2006), savonius rotorunun yanı sıra savonius + darrieus makinesinin performansını örtüşmeli ve örtüşmesiz olarak incelemek için deneysel araştırmalar yapmışlardır. Savonius kanadın kanat uç hız oranı ve güç katsayılarını, savonius + darrieus kanadındaki ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak; savonius+darrieus kanatta daha geniş çalışma aralığı ve daha yüksek güç katsayıları elde edilmiştir. Örtüşmesiz durumda ise 16.2% ve 20% örtüşmeli duruma nazaran daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Deda Altan (2006), rüzgâr hızını, çarkın güç verimini arttırmak ve aynı zamanda çarkın dış bükey yüzeyi üzerinde tesir eden negatif momenti engellemek için Savonius rüzgâr çarkının önüne bir yapay perde düzeneği yerleştirmiştir. İlk olarak, çarkın statik durumunda perdesizken bazı deneysel çalışmalar sürdürülerek, daha sonra çarkın hareketli durumunda benzer deneyler yapmış ve sonra bu durumlarda statik ve dinamik momentleri ölçmüştür. Ölçmelerin dinamik değerleri kullanarak her durum için güç ve performans katsayılarını hesaplamıştır. Ayrıca aynı koşullarda çarkın hareketsiz durumunda Fluent 6.0 programını, sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) için kullanmıştır. Sonuç olarak; perde düzenekli çark ile en iyi sonucun elde edildiğini göstermiştir.

Mahmoud vd. (2010), savonius rotor performansının iyileştirilmesi üzerine farklı en-boy oranlarında, farklı örtüşme oranlarında ve tek ve çift kademeli olarak

deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda güç katsayılarını, mekanik güçlerini ve statik tork katsayılarını karşılaştırmışlardır. Son olarak da uç plakalı ve uç plakasız davranışlarını gözlemlemişlerdir.

Avcı ve Yılmaz (2012), Çeşme dolaylarında kurulabilecek; yatay eksenli, 3 kanatlı rüzgâr türbini için kanat üzerinde meydana gelen gerilmeler ve deformasyon miktarlarını araştırmışlardır. Solidworks programını kullanarak damla yapısı NACA 4415 için kanat tasarımı yapmışlardır. Daha sonra bu kanat tasarımının akış analizi için meteoroloji verilerinden yararlanarak rüzgâr hızını araştırmışlardır. Bu rüzgâr hızını kullanarak kanat yapısında meydana gelen gelen hızı, basıncı ve kuvveti bulmuşlardır. Ansys kullanılarak elde edilen maksimum basınç değeri için hem kompozit malzeme için hem de alüminyum alaşım için kanat yapısında meydana gelen gerilme ve toplam deformasyon miktarlarını elde etmişlerdir. Bu çalışma ile malzeme özelliklerinin kanat yapısı için ne kadar önemli olduğunu göstermişlerdir.

Wenhehunun vd. (2014), savonius rüzgâr türbinlerinin kanat sayısı ile ilgili performansı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bir, iki, üç, dört ve beş kanatlı savonius rotorunun belirli rüzgar hızlarında güç katsayılarını, kanat uç hız oranlarını ve torklarını karşılaştırmışlardır.

Şahin (2015), rüzgâr türbini performansını iyileştirmek için klasik Savonius türbin etrafına 6 ve 8 adet yönlendirici plakalar yerleştirmiştir. Yönlendirici levhanın adet, uzunluk ve konumunun değişimi ile Savonius rüzgâr türbininin performansı hız oranı, tork ve momentum katsayılarını dikkate alarak incelemiştir. Yeni tasarlanmış Savonius türbinin, klasik türbine göre güç katsayısında ortalama % 30 değerinde artış tespit etmiştir.

Aydınyüz (2015), dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin kanatlarının yapısal analizlerini çeşitli hücum açılarında HAD ile incelemiştir. Yaptığı analizler sonucunda NACA 0018 profil kanadının 16°'lik hücum açısında maksimum gerilmeye maruz kaldığını belirlemiştir. Bu duruma bağlı olarak toplam şekil değiştirmenin en fazla olduğu açı 16° olmuştur. Ancak Cl/Cd değerinin maksimum olduğu açı 9° olduğu için en yüksek verim de bu hücum açısı sırasında elde etmiştir. Kanat maksimum gerilmeye maruz kaldığında dahi akma mukavemetini geçmediğini belirlemiştir.

Şentürk ve Özdamar (2018), Reynolds sayısının, bir Savonius Rüzgâr Türbinin performansına etkisini, HAD ile incelemişlerdir. Yöntemi öncelikle literatürde verilen deneysel sonuçlar yardımıyla doğrulamışlardır. Çeşitli Reynolds değerlerinde yaptığı parametrik simülasyonlar sonucunda en yüksek güç faktörü değerini belirlemişlerdir.

Yapılan literatür taramalarında çap miktarı kadar uç plaka eklenmiş 3 kanatlı silindirik SRT'nin en iyi performansı verdiği belirlenmiştir (Gencer, 2020). Bu

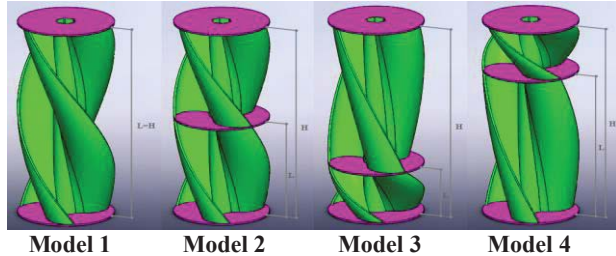
çalışmada ise, dikey eksenli bir rüzgâr türbini olan SRT'nin aerodinamik performansına (sürüklenme kuvveti, kanat uç hız oranı, sürüklenme katsayısı, reynolds sayısı ve devir sayısı), kademe sayısı ve kademenin merkezden kaçıklığının etkisi deneysel olarak incelenmiştir ve en iyi sonucu veren türbin modelinin sayısal çalışmaları yapılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Tasarım Aşamaları

Üç kanatlı helisel silindirik SRT ve üç kanatlı çift kademeli helisel silindirik SRT olmak üzere iki temel geometri belirlenmiştir. Belirlenen bu SRT'lerin kanatlarına 180° helis açısı verilmiştir ve kanat tipi olarak SRT'lerde yaygın olarak kullanılan yarı dairesel kanat tipi seçilmiştir. Geometrik detaylar Tablo 1.'de verilmiştir. Üç kanatlı helisel silindirik SRT ile üç kanatlı çift kademeli helisel silindirik SRT'nin aerodinamik performansına, kademe sayısı ve kademenin merkezden kaçıklığının etkisinin incelenmesi adına Şekil 1.'de gösterilen toplam dört farklı (üç kanatlı helisel silindirik SRT, üç kanatlı çift kademeli helisel silindirik SRT; kademelerin merkezden kaçıklıkları sırası ile, $L/H = 1/2$, $L/H = 1/4$ ve $L/H = 3/4$ olan) rüzgâr türbini tasarlanmıştır.

Rüzgâr türbinlerinin CAD çizimleri Solidworks programında yapılmış ve tasarlanan rüzgâr türbinleri 3B yazıcı aracılığıyla imal edilmiştir. İmal edilen dört farklı geometrinin deneysel çalışmaları farklı hava hızlarında hava tüneline gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Solidworks programında tasarlanan silindirik savonius rüzgâr türbinleri

Deneysel çalışmalarda en iyi performansı veren rüzgâr türbini tipi belirlenmiş ve belirlenen türbin modelinin akış analizi ise on farklı hava hızında (7,18 m/s, 8,97 m/s, 10,62 m/s, 12,48 m/s, 14,29 m/s, 16,09 m/s, 18,20 m/s, 19,78 m/s, 21,41 m/s ve 23,16 m/s) Ansys-Fluent programında yapılmıştır. Her hava hızında SRT'lerin, devir sayısı ve üzerine gelen sürüklenme kuvveti ölçülerek, sürüklenme katsayısı, kanat uç hız oranı ve reynolds sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 1. Geometrilerin ölçüleri

Rotor Uzunluğu (H)	110 mm	
Rotor Çapı (D)	46 mm	
Rotor Uzunluk/Çap (H/D)	2,39	[Mahmoud vd., 2012]
Kanat Tipi	Yarı dairesel	[Alom & Saha, 2019]

Kanat Sayısı	3	
Kanat Helis Açısı	180°	[Jeon, 2015]
Mil Çapı	8,5 mm	
Çap Oran (Co=Dup/D)	1	

Deneysel Çalışmalar

Deneyler, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan çok amaçlı sesaltı bir hava tüneline gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan hava tüneli Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Hava tüneli

Hava tüneline on farklı hava hızında dört farklı rüzgâr türbin modeli için deneyler yapılmıştır. Hava tüneli test bölgesi Şekil 3.'te verilmiştir.



Şekil 3. Hava tüneli test bölgesi

Rüzgâr türbinlerinin performansı, kanat hızının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu da kanat uç hız oranı olarak adlandırılır (Altan, 2006). Kanat uç hız oranı Denklem 1'de verilmiştir.

$$\lambda = \frac{U}{V_1} = \frac{2\pi R n}{60 V_1} = \frac{\pi R n}{30 V_1} \quad (1)$$

Verilen bu denklemde; λ kanat uç hız oranı, V_1 hava hızı, U rüzgâr türbininin uç hızı, R rotorun yarıçapı, n devir sayısıdır.

Savonius rüzgâr türbini kanatlarına dönme esnasında sürüklenme kuvveti etki eder (Şahin, 2015). Söz konusu kuvvet Denklemi 2'de verilmiştir.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot V_1^2 \cdot A \quad (2)$$

Verilen denklemde; F_D sürüklenme kuvveti, ρ havanın yoğunluğu, A projeksiyon alanı, V_1 hava hızı, C_d sürüklenme katsayısıdır.

Reynolds sayısı, laminar akış ve ya türbülanslı akış gibi farklı akış rejimlerinin karakteristiğini belirlemek için kullanılır. Akış rejimi temelde akışkanındaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranına bağlıdır (Çengel & Cimbala, 2012). Reynolds sayısı Denklem 3'te verilmiştir.

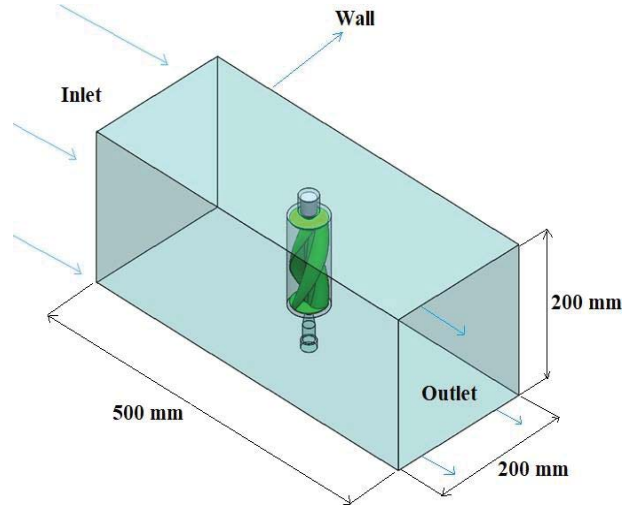
$$Re = \frac{\rho \cdot V_s \cdot d}{\mu} \quad (3)$$

Verilen denklemde; Re Reynolds sayısı, μ akışkanın dinamik viskozitesi, d borunun çapı, V_s akışkanın hızı, ρ akışkanın yoğunluğu olarak ifade edilir.

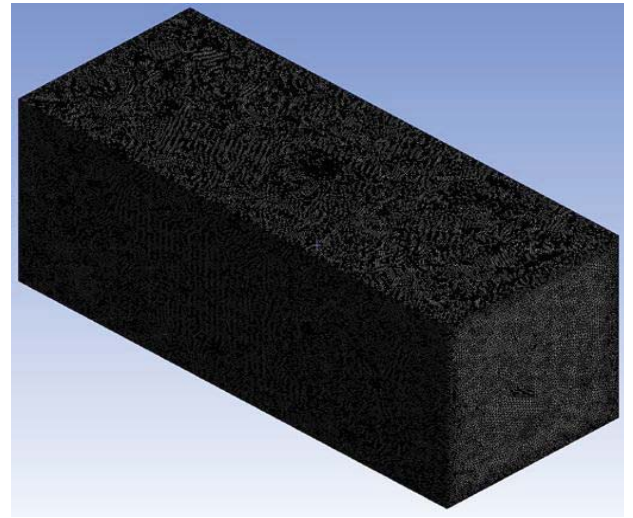
$\rho = 1,2250 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,789 \times 10^{-5}$ olarak alınmıştır (Çengel & Boles 2012).

Sayısal Çalışmalar

SRT'lerin aerodinamik performansının araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde; birçok çalışmada hava tünelinin yalnızca test bölgesinin modellendiği belirlenmiştir. Bu çalışmada da benzer şekilde; analiz süreleri ve iş istasyonunun çalışma kapasitesi de göz önüne alınarak rüzgâr türbini modelinin test odasına yerleştirildiğinde oluşan akış hacmi modellenmiştir ve hava akışı doğrusal olarak tanımlanmıştır. Rüzgâr türbini modeli hava tünelinin 200mm x200mm x500mm hacmindeki test odasına yerleştirildiğinde oluşan akış hacmi Solidworks programı aracılığıyla CAD verisi olarak elde edilmiş ve bu geometriye Ansys-Fluent programında bir ağ yapısı tanımlanmıştır. Yapılan deneyler ve analiz sonuçları karşılaştırılarak deney düzeneğinden ya da analizden kaynaklanabilecek sorunlar araştırılmış ve analizler için en uygun ağ yapısı elde edilmiştir. Hava tüneli test bölgesi CAD çizimi ve ağ yapısı sırasıyla Şekil 4. ve Şekil 5.'te verilmiştir.



Şekil 4. Hava tüneli test bölgesinin CAD çizimi



Şekil 5. Hava tüneli test bölgesinin ağ yapısı

Ansys-Fluent programında gerçekleştirilen analizlerde akışkan olarak hava seçilmiştir. Havanın hava tüneli test bölgesine giriş kesitine 'velocity-inlet' tanımlanmıştır. Analizlerde tanımlanan hava giriş hızları, her rüzgâr türbini için hava tünelinin çalıştığı on farklı kademenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Her rüzgâr türbini için bir kademede elli farklı deneysel çalışma yapılmış ve bu çalışmalarda ortalama hava hızı değerleri (7,18 m/s, 8,97 m/s, 10,62 m/s, 12,48 m/s, 14,29 m/s, 16,09 m/s, 18,20 m/s, 19,78 m/s, 21,41 m/s ve 23,16 m/s) alınmıştır. Analizler, zamandan bağımsız (Steady) olarak gerçekleştirilmiştir. Havanın test bölgesinden çıktığı kesit için 'pressure-outlet' tanımlanmıştır. Test bölgesinin, velocity-inlet ve pressure-outlet olarak tanımlanan kısımlar hariç diğer dış bölgeleri 'wall' olarak tanımlanmıştır. SRT'nin aerodinamik özelliklerini inceleyen sayısal çalışmalar incelenmiş ve türbülans modeli olarak k-ε realizable türbülans modeli seçilmiştir. Analizlerde tanımlanan sınır koşulları Tablo 2.'de ve Ansys-Fluent programında oluşturulan ağ yapısı Tablo 3.'te verilmiştir.

Tablo 2. Sayısal analizde tanımlanan sınır koşulları

Hava giriş kesiti	Velocity-inlet
Hava çıkış kesiti	Pressure-outlet
Hava tüneli duvarları	Wall
Basınç ve hız dağılım algoritması	Coupled
Akışkan türü	Hava
Seçilen türbülans modeli	k-ε- realizable
Akış türü	Zamandan bağımsız (Steady)

Tablo 3. Ağ yapısı (mesh) tanımlamaları

Body sizing – Kanal	10 mm
Body sizing – Rotary	3 mm
Face sizing – Türbin	0,5 mm
Face sizing – Yatak	1 mm
Relevance	100
Maximum Layers	5
Grow rate	1,20
Skewness	0,881

Türbülans Modeli

Literatürde SRT'nin aerodinamik performansının geliştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde k-ε realizable türbülans modelinin yaygınca kullanıldığı ve bu türbülans modelinin daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. k-ε realizable türbülans modelinin SRT akış analizlerindeki başarısından dolayı bu çalışmada da türbülans modeli olarak k-ε realizable seçilmiştir.

Türbülanslı akışlarda; türbülans viskozitesi denklemlerinin çözümü Navier-Stokes denklemi yardımıyla gerçekleştirilir. Türbülans viskozitesi ifadesi k ve ε olmak üzere iki bilinmeyen içerir. Yarı ampirik bir model olan k-ε realizable türbülans denklemi, kayıp oranı (ε) ve türbülans kinetik enerjisi (k) için transport denklemleri modeline dayanmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve kayıp oranı (ε) için geçerli olan transport denklemleri sırası ile Denklem 4 ve Denklem 5'te verilen şekilde yazılabilir.

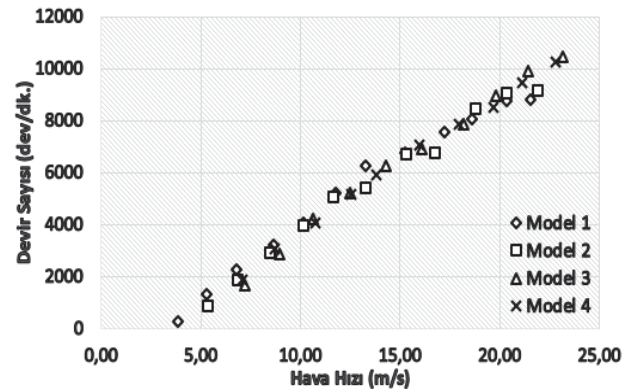
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

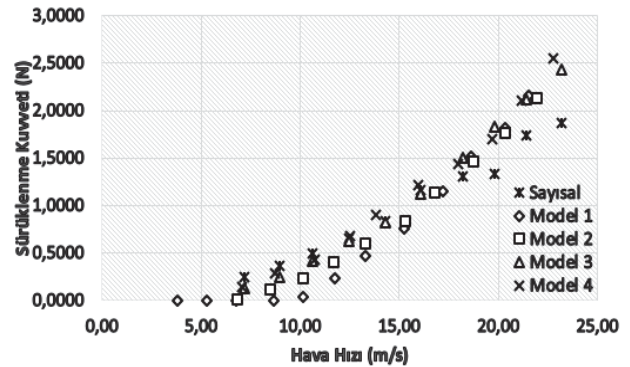
Bu çalışmada dikey eksenli bir rüzgâr türbini olan Savonius rüzgâr türbininin (SRT) aerodinamik performansı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Her hava hızı için SRT'lerin üzerine gelen; sürüklenme kuvveti F_d ve SRT'lerin devir sayısı n ölçülmüştür. 50 kez tekrar edilen deneylerden elde edilen parametrelerin ortalama değerleri alınarak Reynolds sayısı Re , sürüklenme katsayısı C_d ve kanat uç hız oranı λ hesaplanmıştır.

Şekil 6.'da tüm modeller için devir sayısının hava hızı ile değişimi verilmiştir. Ölçülen maksimum hava hızında (21 m/s) geliştirilen yeni tasarımların hepsinin Model 1'e göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Model 1'e kıyasla devir sayısı; Model 2'de; %3,83, Model 3'te; %12,13 ve Model 4'te; %7,44 oranında artmıştır.

**Şekil 6.** SRT'lerin devir sayısına hava hızının etkisi

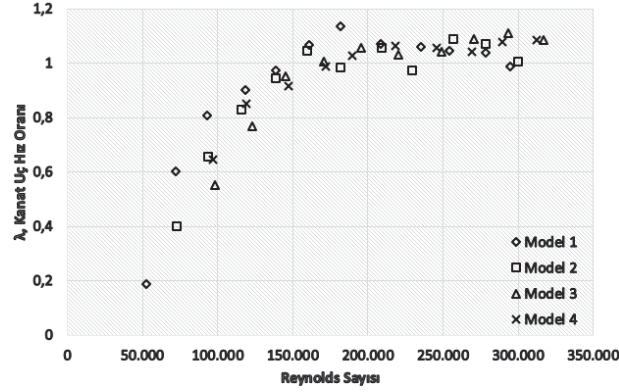
Şekil 7.'de tüm modeller için sürüklenme kuvvetinin hava hızı ile değişimi verilmiştir. Bütün SRT'lerin sürüklenme kuvvetleri incelendiğinde, çift kademeli silindirik geometrilili SRT'lerin sürüklenme kuvvetinin tek kademeli silindirik geometrilili SRT'lerin sürüklenme kuvvetinden fazla olduğu belirlenmiştir.

Deneysel olarak çalışılan bütün hava hızlarında, sürüklenme kuvvetinin maksimum olduğu rüzgâr türbin tipinin Model 4'e ($L/H = 3/4$) ait olduğu görülmüştür.

**Şekil 7.** SRT'lerin sürüklenme kuvvetine hava hızının etkisi

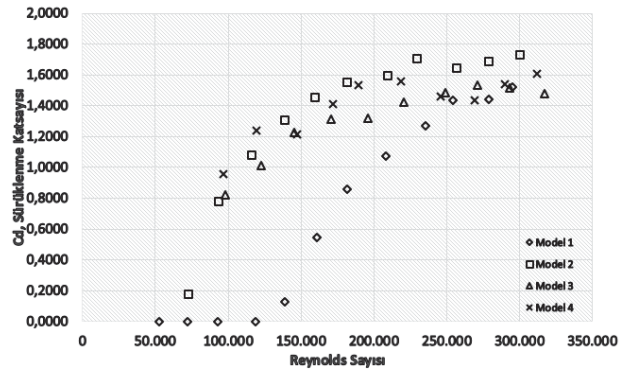
Şekil 8.'de kanat uç hız oranının Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Reynolds sayısının (300.000) değeri

için, Model 1'e kıyasla kanat uç hız oranı; Model 2'de % 2,03; Model 3'te %12,75 ve Model 4'te %9,36 oranında artmıştır. Reynolds sayısının maksimum değeri için (320.000), en yüksek kanat uç hız oranının Model 3'e ait olduğu belirlenmiştir ($\lambda = 1,0854$). Literatürde SRT ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde kanat uç hız oranının $\lambda = 0 - 1,2$ arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 8. SRT'lerin kanat uç hız oranına Reynolds sayısının etkisi

Şekil 9.'da sürüklenme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Hem hava tüneli loadcell hassasiyetinin 0,01 N olması hem de daha düşük hava hızlarında belirtilen bu hassasiyetin büyük önem taşıması sebebiyle bu etkilerin daha az hissedildiği ve genel olarak Reynolds sayısının 170.000 değeri ve üzerinde deneysel ve sayısal sonuçların birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Model 3'ün C_d Sürüklenme katsayıları arasındaki deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında çıkan hata sonuçları Tablo 4.'te verilmiştir.



Şekil 9. SRT'lerin sürüklenme katsayısına Reynolds sayısının etkisi

Tablo 4. Model 3'ün ($L/H = 1/4$) C_d Sürüklenme Katsayılarının Reynolds Sayısına Göre Değişimi

Reynolds Sayısı	Vs Hava hızı	Cd Deneysel	Cd Sayısal	Hata Oranı
170.000	12,48	1,3150	1,3592	3,4%
195.000	14,29	1,3203	1,3304	0,8%
220.000	16,09	1,4226	1,4661	3,1%
250.000	18,20	1,4872	1,2896	13,3%
270.000	19,78	1,5352	1,1096	27,7%
295.000	21,41	1,5139	1,2426	17,9%
320.000	23,16	1,4803	1,1370	23,2%

SONUÇLAR

Bu çalışmada dikey eksenli helisel savonius rüzgâr türbininin performansı üzerinde çalışılmış ve tasarım üzerindeki parametrelerin etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada dört farklı tasarım üretilmiş olup deneysel analizler sonucu en iyi sonucu veren türbin modeli belirlenmiş ve bu belirlenen modelin sayısal analizler sonucu elde edilen veriler kıyaslanarak en iyi türbin modeli belirlenmiştir. Üç kanatlı helisel silindirik ve üç kanatlı çift kademeli helisel silindirik geometride SRT'ye kademe sayısı eklenmesi ile aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır;

- Devir sayısında Model 1'e kıyasla; Model 2'de; %3,83, Model 3'te; %12,13 ve Model 4'te; %7,44 oranında artış olmuştur.

- Kanat uç hız oranında Model 1'e kıyasla; Model 2'de % 2,03; Model 3'te %12,75 ve Model 4'te %9,36 oranında artış olmuştur.

- Bütün SRT'lerin sürüklenme kuvvetleri incelendiğinde SRT'ye kademe eklenmesi ile sürüklenme kuvvetinde artış olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; KSÜ Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2021/2-3YLS nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı KSÜ Rektörlüğü BAP Birimine teşekkür ederiz.

SEMBOLLER

C_d Sürüklenme katsayısı

Cl	Kaldırma katsayısı
Ço	Çap oranı
D	Rotor çapı [m]
Dup	Uç plaka çapı [m]
Fd	Sürüklenme kuvveti [N]
H	Rotor yüksekliği [m]
L	Merkezden kaçıklık [m]
Re	Reynolds sayısı
Vs	Hava hızı [m/s]
λ	Kanat uç hız oranı [kanat uç hızı/rüzgar hızı]
Gk	Türbülans kinetik enerjisi üretimi [kg/(m.s ³)]
k	Türbülans kinetik enerjisi [m ² /s ²]
t	Zaman [s]
u	Yatay doğrultudaki ortalama hız bileşeni [m/s]
u'	Yatay doğrultudaki çalkantı hız bileşeni [m/s]
x	Yatay koordinat [m]
μ	Dinamik viskozite [kg/(m.s)]
μt	Türbülans viskozitesi [kg/(m.s)]
ε	Türbülans kinetik enerji dağılımı [m ² /s ³],
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
σk	k için türbülanslı Prandtl sayısı,
$\sigma \varepsilon$	ε için türbülanslı Prandtl sayısı,

KAYNAKLAR

Altan, B. (2006). Perdeleme Yöntemi İle Savonius Rüzgâr Çarkının Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Altan, B., Altan, G., Kovan, V. (2016). Investigation Of 3D Printed Savonius Rotor Performance. *Renewable Energy*, 99, 584-591.

Lee, J., Lee, Y., Lim, H., (2016). Effect Of Twist Angle On The Performance Of Savonius Wind Turbine. *Renewable Energy*, 89, 231-244.

Damak, A., Driss, Z., Abid, M. S., (2018). Optimization Of The Helical Savonius Rotor Through Wind Tunnel Experiments. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 174, 80-93.

Ferrari, G., Schito, P., Inzilo, F., Mereu, R., (2017). CFD Study of Savonius Wind Turbine: 3D Model Validation and Parametric Analysis, *Renewable Energy*, 105, 722-734.

Zhou, T., Rempfer, D. (2013). Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 51, 373-381.

Colmenero, J.M.M., Paramio, M.A., Villar, F.G., (2018). A Numerical And Experimental Study Of A New Savonius Wind Rotor Adaptation Based On Product Design Requirements. *Energy Conversion and Management*, 158, 210-234.