

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



SAVONIUS TÜRBİNLERİNİN PERFORMANS YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Gürsel Seha GÜLTEKİN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVONIUS TÜRBİNLERİNİN PERFORMANS YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Gürsel Seha GÜLTEKİN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 19/10/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN (Danışman)

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Gülay YAKAR

ÖZET

SAVONIUS TÜRBİNLERİNİN PERFORMANS YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Gürsel Seha GÜLTEKİN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Ekim 2022; 48 sayfa

Bu tez çalışmasında, özellikle son yıllarda literatür çalışmalarına konu olan dikey eksenli rüzgar türbinlerinden Savonius rüzgar türbinleri performans yönünden incelenmiştir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerine göre birçok avantajı olan bu türbinler, daha çok kırsal ve kentsel alanlarda kişisel enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılmaktadır. Dikey eksenli Savonius rüzgar türbininin türbin kanatları çalışma esnasında hem negatif hem de pozitif tork ürettikleri için yatay eksenli türbinlere göre daha düşük verime sahiptir. Savonius rüzgar türbinlerinde dezavantaj olarak görülen bu düşük verimliliklerini iyileştirmek için birçok yenilikçi tasarımlar geliştirilmiş ve dolayısıyla bu türbinlerin performansları arttırılmıştır. Bu yenilikçi tasarımları, türbin üzerindeki yapısal tasarım değişiklikleri şeklinde ve klasik Savonius rüzgar türbininin şeklinde hiçbir değişiklik yapılmadan, türbin dışına yapılmış olan dış tasarım düzenekleri şeklinde olmak üzere iki ana tasarım grubunda toplamak mümkündür. Literatürde Savonius rüzgar türbininin yapısal tasarım değişiklikleri ile elde edilen performans çalışmalarının oldukça kapsamlı bir şekilde yapılmış olmasından dolayı bu tez çalışmasında özellikle son yıllarda Savonius rüzgar türbininin üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan ilave dış tasarım düzenekleriyle elde edilen performans çalışmaları ele alınmıştır. Bu tez çalışması ile çeşitli dış tasarımlar kapsamlı bir şekilde gözden geçirilerek güncel dış tasarım teknikleri hakkında bilgiler sağlanmıştır. Dış tasarım teknikleri ile de türbin performanslarının dolayısıyla güç katsayılarının oldukça iyi bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarım değişiklikleri ile güç katsayısı değerlerinin 0,054 ile 0,400 arasında olduğu tespit edilmiştir. İlave dış tasarım düzenekleri ile de bu güç katsayısı değerlerinin 0,520 seviyelerine kadar çeşitli seviyelerde arttırıldığı tespit edilmiştir. Rüzgar hızını arttırmak ve Savonius rüzgar türbininde oluşan negatif torku azaltmak için kullanılan bu dış tasarımlar ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Böylelikle bu tez çalışması ile son yıllarda oldukça ilgi gösterilen Savonius rüzgar türbinleri için sistematik bir referans sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Enerji, Rüzgar, Savonius Türbini, Performans.

JÜRİ: Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Gülay YAKAR

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SAVONIUS TURBINES IN TERMS OF PERFORMANCE

Gürsel Seha GÜLTEKİN

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burcin DEDA ALTAN

October 2022; 48 pages

In this thesis study, Savonius wind turbines, one of the vertical axis wind turbines that have been the subject of literature studies in recent years, have been examined in terms of performance. These turbines, which have many advantages over horizontal axis wind turbines, are mainly used to meet personal energy needs in rural and urban areas. The turbine blades of the vertical axis Savonius wind turbine have a lower efficiency compared to horizontal axis turbines because they produce both negative and positive torque during operation. In order to improve these low efficiencies, which are seen as a disadvantage in Savonius wind turbines, many innovative designs have been developed and therefore the performance of these turbines has been increased. It is possible to collect these innovative designs in two main design groups: in the form of structural design changes on the turbine and in the form of external design assemblies made outside the turbine, without making any changes to the shape of the classic Savonius wind turbine. Due to the fact that the performance studies of the Savonius wind turbine with structural design changes have been made quite extensively in the literature, in this thesis, the performance studies obtained with the additional external design devices of the Savonius wind turbine, especially in recent years, have been discussed. With this thesis, various exterior designs have been reviewed in a comprehensive way and information about current exterior design techniques has been provided. It has been determined that the turbine performances and thus the power coefficients have increased quite well with the external design techniques. It has been determined that the power coefficient values of Savonius wind turbines are between 0,054 and 0,400 with structural design changes. It has been determined that these power coefficient values have been increased at various levels up to 0,520 levels with additional external design devices. These external designs, which are used to increase the wind speed and reduce the negative torque generated in the Savonius wind turbine, have been discussed in detail. Thus, with this thesis study, a systematic reference for Savonius wind turbines, which have been of great interest in recent years, is presented.

KEYWORDS: Energy, Wind, Savonius Turbine, Performance.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Assoc. Prof. Dr. Gülay YAKAR

ÖNSÖZ

Teknolojik gelişmeler ve insanların enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, ekonomik krizler ve pandemi gibi salgınlar sonrası sürdürülebilir enerji arzı için yeni enerji kaynağı arayışına girmişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan rüzgar enerjisi ve Savonius rüzgar türbinleri bu çalışmada detaylı olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında beni bu çalışmaya yönlendiren ve en çok ihtiyacım olan dönemde yardımlarını esirgemeyen Tez Danışmanım Doç. Dr. Burçin DEDA ALTAN ve Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR'e, kamu kurumunda akademik eğitime değer ve destek veren vizyon sahibi Müdürlerim Abdul Kasım SARİMEHMET'e ve Ramazan GÜLER'e, her ihtiyacım olduğunda desteklerini yanımda hissettiğim başta eşim Ayşenur olmak üzere anneme, babama, kız kardeşime ve birlikte geçirmemiz gereken zamanlardan fedakarlık yapan 8 aylık canım oğlum Güray'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	5
2.1. Yenilenebilir Enerji	5
2.1.1. Güneş enerjisi	5
2.1.2. Hidrolik enerji.....	6
2.1.3. Deniz kökenli enerjiler	6
2.1.4. Jeotermal enerji.....	7
2.1.5. Biyokütle enerjisi.....	7
2.1.6. Rüzgar enerjisi	8
2.2. Rüzgar Türbinleri	8
2.2.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri	8
2.2.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri	10
2.3. Savonius Rüzgar Türbini.....	11
2.4. Literatür Özeti	12
2.4.1. Yapısal tasarım çalışmaları.....	12
2.4.2. Dış tasarım çalışmaları	20
3. MATERYAL VE METOT	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
5. SONUÇLAR	41
6. KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Savonius Türbinlerinin Performans Yönünden İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

19/10/2022

Gürsel Seha GÜLTEKİN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V	: Rüzgar hızı (m/s)
ω	: Açısal hız (rad/s)
C_p	: Güç katsayısı
D	: Savonius rüzgar türbini çapı (m)
D_0	: Kanat uç plakası çapı (m)
P_R	: Rüzgar gücü (W)
P_T	: Türbin çıkış gücü (W)
ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
A	: Türbin süpürme alanı (m ²)
R	: Türbin yarıçapı (m)
T	: Tork (Nm)
λ	: Uç hız oranı

Kısaltmalar

YERT	: Yatay eksenli rüzgar türbinleri
DERT	: Dikey eksenli rüzgar türbinleri
PLA	: Polilaktik asit
PVA	: Polivinil alkol
RES	: Rüzgar enerji santralleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Klasik Savonius rüzgar türbini	3
Şekil 1.2. Savonius rüzgar türbini için tasarım bölgeleri.....	4
Şekil 2.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Çengel ve Cimbala 2015)	9
Şekil 2.2. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Çengel ve Cimbala 2015)	10
Şekil 2.3. Savonius rüzgar türbini.....	11
Şekil 2.4. Kılavuz-kutu tüneli tasarımı (Irabu ve Roy 2007).....	20
Şekil 2.5. Perde tasarımı (Deda Altan vd. 2008)	21
Şekil 2.6. Koruyucu engelli dış tasarım (Mohamed vd. 2010).....	22
Şekil 2.7. Konveyör-yönlendirici perde sistemi (Tartuferi vd. 2015).....	22
Şekil 2.8. Kılavuz plaka tasarımı (El-Askary vd. 2015).....	23
Şekil 2.9. Kılavuz kanat düzeneği (Kalluvila ve Sreejith 2018).....	23
Şekil 2.10. Lüle tasarımı (Mohammadi vd. 2018).....	24
Şekil 2.11. a) Rüzgar merceği; b) Tekli veya çiftli kullanımı (Hesami vd. 2022)	25
Şekil 2.12. Uçak kanadı şekilli saptırıcı tasarımı (Layeghmand vd. 2020)	25
Şekil 2.13. Dairesel silindir (Yuwono vd. 2020)	26
Şekil 2.14. Gözenekli saptırıcı (Nimvari vd. 2020)	26
Şekil 2.15. Kılavuz kanatçık düzeneği (Yahya vd. 2021).....	27
Şekil 2.16. Nanofiber bazlı saptırıcı (Fatahian vd. 2022)	27
Şekil 2.17. Saptırıcı kanatlar (Marinic-Kragic vd. 2022)	28
Şekil 2.18. Pasif saptırıcı (Tian vd. 2022)	28
Şekil 3.1. Çeşitli türbin tiplerinde C_p - λ değişimi (Çengel ve Cimbala 2015).....	32
Şekil 4.1. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız iki kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması.....	33
Şekil 4.2. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız üç kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.3. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat profili; kanat şekli açısından).....	35
Şekil 4.4. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat profili; Kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından)	36
Şekil 4.5. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat profili; Farklı tasarım ve yaklaşım açısından) ...	37
Şekil 4.6. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat tasarım oranları açısından)	38
Şekil 4.7. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Uç plaka açısından)	39
Şekil 4.8. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kat sayısı açısından).....	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat profili; kanat şekli açısından).....	12
Çizelge 2.2. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat profili; Kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından)....	14
Çizelge 2.3. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat profili; Farklı tasarım ve yaklaşım açısından)	16
Çizelge 2.4. Yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat sayısı)	17
Çizelge 2.5. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat tasarım oranları).....	18
Çizelge 2.6. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Uç plaka)	19
Çizelge 2.7. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kat sayısı).....	19
Çizelge 2.8. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız iki kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayısı değerleri.....	29
Çizelge 2.9. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız üç kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayısı değerleri.....	30

1. GİRİŞ

Her canlı, aslında iş yapabilme kapasitesi olan bir makinedir. İş yapabilmenin olmazsa olmaz şartı ise enerjidir. Dünyamızdaki canlılar sadece yaşamlarını sürdürecekt gıda enerjisiyle yetinerek yaşamlarına devam ederler. İnsanların temel yaşam fonksiyonlarını sürdürebilmesi için günlük ortalama 8 ila 10 milyon joule'lük enerji gereksinimi vardır. Ancak insanlar sadece gıda enerjisiyle yetinmeyerek, diğer canlılardan farklı olarak alternatif enerji kaynaklarını kullanarak başka işler yapabilme kabiliyetini zaman içinde kazanmışlardır.

Gıda enerjisinden sonra insanlar ateşi keşfederek sindiremediği gıdalardan yararlanabilmiştir. Toplumsal yaşam ile yeni enerji kaynağı olarak iş yapabilme üstünlüğü olan güçlü insanları kullanarak insanla çalışan makineler ve kürek mahkûmlarını kullanarak kürekli sandallar gibi taşıtlar yapmıştır. Günümüz toplumunda bile insan, iş yapan enerji kaynağı kimliğini halen korumaktadır.

Yarı yerleşik yaşam ve göç ihtiyacına istinaden taşıma, ulaşım, tarla sürme, kuyudan su çekme vb. işlerde yeni bir enerji kaynağı olarak da hayvanlar kullanılmıştır.

İnsanların tam yerleşik hayata geçmesiyle faydalandığı bir diğer enerji türü sudur. Derelere su çarkları yapıp tarım yaparak ürettiği tahılı öğütmüştür.

İnsanların rüzgârı enerji kaynağı olarak kullanımı ise deniz ulaşımı amacıyla yelkenli gemilerde, tarım ürünlerinin öğütülmesi, kuyudan su çekme ve elektrik enerjisi üretimi amacıyla yel değirmenlerinde gerçekleşmiştir.

Odun yerine kömür kullanımıyla birlikte sanayi devrimi dönemine girilmiş olup, elde edilen yüksek sıcaklıktaki ısı enerjisi ile ergitilip işlenemeyen metalleri işleme fırsatı bulunarak, metal işleme teknikleri geliştirilmiştir. 17. Yüzyılda kömür madenlerinde biriken suyun atların kullanıldığı pompalarla dışarı atılması yerine kömür ateşiyle buharlaşan suyun bir pistonu itmesi prensibiyle çalışan buhar makinası icat edilmiş olup ısı enerjisi ile iş yapma amacıyla kullanılmıştır. İnsanoğlunun belli bir amaca hizmet eden, sabit su ve yel değirmenlerinden sonra icat etmiş olduğu ilk taşınabilir iş yaptırma aracı buhar makinası olmuştur.

Sanayi devrimi, kömürün ve ısı makinalarının küresel çapta kullanımıyla birlikte insanlığı etkisi altına almış olup 19. Yüzyılda petrolün bulunmasıyla birlikte daha da büyük kitlelere ulaşmıştır. 19. Yüzyıl teknolojik gelişmelerle birlikte yeni buluşların arttığı ve aynı zamanda enerji ihtiyacının giderek arttığı bir yüzyıl olmuştur.

20. Yüzyılda teknoloji ürünleri kullanımı yaygınlaşarak daha güçlü makinalar yapılmaya başlandığından daha fazla enerji ihtiyacı doğduğundan dolayı kömür ve petrol üretimi artmıştır. Artan enerji talebini karşılayabilmek için nükleer enerji çalışmaları da hızlanmıştır.

Ancak Dünyamız üzerinde bulunan petrol, doğalgaz, kömür, uranyum ve toryum kaynakları insanların enerji ihtiyacını uzun vadeli karşılayabilecek nitelikte yenilenebilir kaynaklar değildir. Ayrıca fosil yakıtlar ve nükleer atıkların doğaya ve insan sağlığına olumsuz etkilerini minimuma indirebilmek için de zaman, para, iş gücü ve enerji harcanmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Güneş, Hidrolik (Su), Dalga, Gel-git Jeotermal, Biyokütle ve Rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ise insanlık için uzun sayılabilecek bir gelecekte de var olacak enerji kaynaklarıdır.

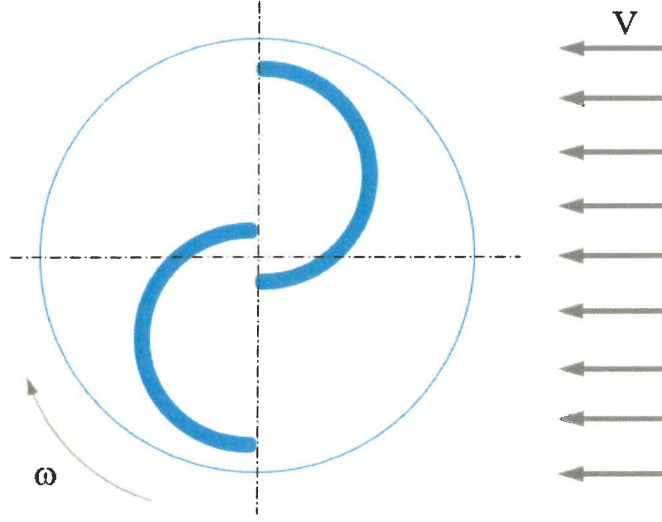
Her geçen gün ülkelerin artan enerji ihtiyacının karşılanmasında daha fazla fosil yakıtların kullanılması sonucu oluşan CO₂ ve diğer sera gazlarının salınımlarının artması büyük çevresel sorunlara neden olmaktadır. Özellikle fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma, var olan ormanların bozulması ve sanayi-endüstri süreçleri gibi insan etkinlikleriyle atmosfere salınan sera gazlarındaki hızlı artış doğal sera etkisini takviye ederek yerkürenin yüzey sıcaklığını artırmakta ve dolayısıyla küresel iklim krizine sebep olmaktadır. Bu çevresel sorunları en aza indirebilmek ve artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için kullanılan fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi hızla artmış ve artmaya her geçen gün devam etmektedir.

Özellikle 1973-1974 yıllarında yaşanan Petrol Krizlerini takip eden yıllarda, tüm dünyada enerji faktörünün önemi daha iyi anlaşılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve alternatif enerji kaynaklarının bulunup kullanılması konusunda önemli adımlar atılmış, bilhassa enerjide dışa bağımlı ülkelerde sürdürülebilir enerji politikaları bağlamında politika arayışları hız kazanmıştır. Son yirmi yıllık süreç incelendiğinde ise alternatif enerji arayışlarının önemli ölçüde ivme kazandığı ve yenilenebilir enerjiye yönelik hem teorik hem de pratik çalışmaların artmaya başladığı görülmüştür (Karagöl ve Kavaz 2017; Apaydın, Taşdoğan ve Güngör 2019)

Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisinden yararlanılırken rüzgar gücü doğrudan kullanılıp ekstra bir yakıt kullanılmadığı için kömür veya doğal gaz gibi fosil yakıtların yanmasına dayanan termik enerji santralleri gibi sera gazları salınımı yaparak havayı kirletmez. Günümüzde en çok kullanılan temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de rüzgar enerjisidir. Rüzgardan enerji elde edilmesi rüzgar türbinleri sayesinde gerçekleştirilir. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT) ve dikey eksenli rüzgar türbinleri (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde türbin dönme eksenini yani türbin mili rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde türbin dönme eksenini yani türbin mili rüzgar yönüne diktir. Savonius tipi rüzgar türbini, Darrieus tipi rüzgar türbini gibi dikey eksenli rüzgar türbinleri çeşitlerindendir.

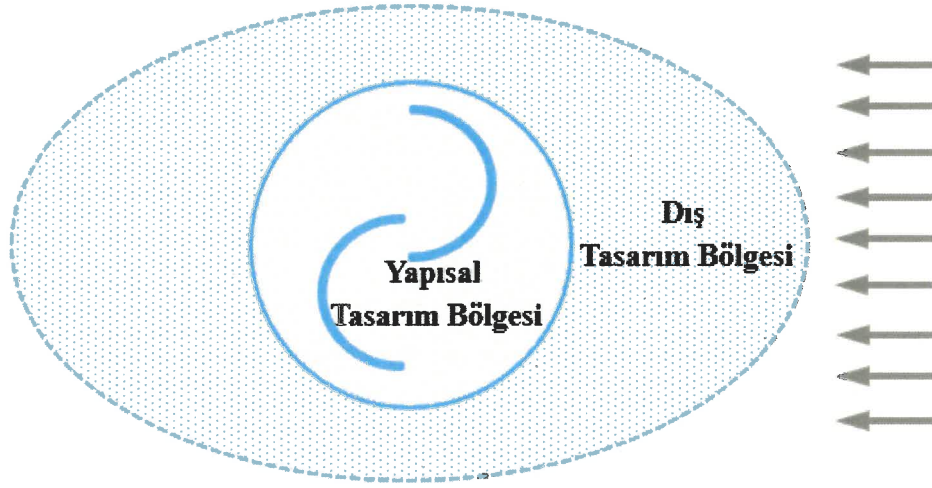
Literatürde rüzgar türbinleri ile yapılmış birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yer almaktadır. Dikey eksenli bir rüzgar türbini olan Savonius rüzgar türbinleri de özellikle literatüre sıkça konu olan rüzgar türbinlerinden birisidir. Savonius rüzgar türbinleri Şekil 1.1'de görüldüğü gibi bir silindirin ortadan ikiye kesilip ve eksenlerinin simetrik olarak kaydırılması ile elde edilen basit bir şekle sahiptir. Şekilden de görüldüğü gibi silindirin bir parçası iç bükey diğer parçası dış bükey kanadını oluşturur. Burada iç bükey kanat üzerinde oluşan kuvvet sayesinde oluşan torkun, dış bükey kanat

üzerinde oluşan kuvvet sayesinde oluşan torktan daha büyük olması sebebiyle türbin gelen rüzgar yönünde dönmeye başlayarak hareket etmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde Savonius rüzgar türbininin düşük olan güç performanslarının artırılmasına yönelik birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu kapsamda yapılan birçok çalışma, Savonius rüzgar türbininin dönüş hareketine ters yönde dönmeye çalışan dış bükey kanat üzerinde meydana gelen torkun azaltılmasını veya türbine gelen rüzgar hızının artırılmasını sağlayarak türbinin düşük olan güç performansının artırılabilmesi üzerine yapılmıştır.



Şekil 1.1. Klasik Savonius rüzgar türbini

Savonius rüzgar türbinleri üzerine yapılan çalışmalarda, bu türbinlerin düşük olan güç performanslarının artırılması amaçlanmış ve bu doğrultuda birçok tasarım değişiklikleri yapılmıştır. Bu tasarım değişiklikleri, Şekil 1.2’de gösterildiği gibi Savonius rüzgar türbinlerin üzerinde yapılan yapısal tasarımlar ve türbin dışında ilave dış tasarımlar şeklinde gruplanmıştır. Şekilde gösterildiği gibi de bu tasarım değişikliklerinin yapıldıkları bölgelere yapısal tasarım ve dış tasarım bölgesi denilmiştir. Bu tez çalışmasında, Savonius rüzgar türbinlerinde yapılan bu tasarım değişikliklerinin türbin performansları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 1.2. Savonius rüzgar türbini için tasarım bölgeleri

Savonius türbinlerinin üzerine yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde rüzgar türbini olarak kullanılan bu türbinin son yıllarda su türbini şeklinde de kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında Savonius rüzgar türbinlerinin sadece rüzgar ortamındaki kullanımı ele alınmıştır. Burada, Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarım değişiklikleri ile elde edilen performans çalışmalarının literatürde oldukça kapsamlı bir şekilde yapılmış olmasından dolayı özellikle son yıllarda yapılan Savonius rüzgar türbinlerinin dış tasarım düzenekleriyle elde edilen performans çalışmaları ele alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda çeşitli dış tasarımlar kapsamlı bir şekilde gözden geçirilerek güncel dış tasarım teknikleri hakkında bilgiler sağlanmıştır. Böylelikle bu çalışma ile özellikle dış tasarımlı Savonius rüzgar türbinleri için sistematik bir referans sunulmuştur.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölümde, tez çalışmasının konusunu oluşturan yenilenebilir enerji, rüzgar enerjisi ve rüzgar türbinleri açıklanarak, bu tez konusu ile ilgili olarak literatürdeki çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji doğal kaynaklardan elde edilen ve tüketildiğinden yenilenen enerjidir. Bir diğer ifadeyle, yenilenebilir enerji, doğanın kendi döngüsü içinde tekrar mevcut olabilen enerjidir. Dolayısıyla geleneksel enerji türlerinin yenilenebilir enerji kaynakları olarak ele alınması mümkün değildir (Kum 2009). Dünyamızdaki hızlı nüfus artışı ve enerjiye olan gereksinimlerin artması, geleneksel yani yenilenemez enerji kaynaklarının azalması ve çevre sorunlarına sebebiyet vermesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi günden güne artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, hidrolik enerji, deniz kökenli enerjiler, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi ve rüzgar enerjisidir (Öztürk 2021).

2.1.1. Güneş enerjisi

İnsanlık, tükenmeyen tabii bir enerji kaynağı olarak güneş enerjisinden tarih boyunca yararlanmışır. Güneş enerjisi; suyun ısıtılması, buharlaştırılması, damıtılması ve havanın ısıtılması, soğutulması, tarımsal ürünlerin kurutulması, elektrik üretimi gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

Güneş enerjisinin diğer enerji türlerine kıyasla avantajları;

- Tükenmeyen tabii bir kaynak olması,
- Temiz çevre dostu olması,
- Dünya üzerinde ihtiyacın olduğu her yerden erişilebilir olması,
- Dünyadaki ekonomik ve siyasal gelişmelerden bağımsız olması

olarak değerlendirilebilir.

Güneş enerjisinin diğer enerji türlerine kıyasla dezavantajları;

- Güneş ışınımının birim yüzeylere az düşmesinden dolayı, coğrafi konuma göre değişen büyük yüzey alanlarına ihtiyaç duyması,
- Dünyamızın yıl içinde değişken olan gece gündüz döngüsüne göre güneşlenme süreleri sabit olmadığından depolamaya ihtiyaç duyması,
- Enerjiye en çok ihtiyaç duyulan kış aylarında yağmur, fırtına vb doğa olayları sebebiyle yeterli güneş ışınımını sağlayamaması,
- İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Güneş enerji üretim sistemi tasarımı yaparken diğer nesnelerin gölge etmeyeceği ve kolay temizlenebilir alanlara ihtiyaç duyması

olarak değerlendirilebilir.

2.1.2. Hidrolik enerji

Hidrolik enerji ilk zamanlarda temel ihtiyaçları karşılamak amacıyla kullanılırken, günümüzde teknolojik gelişmeler ve yükselen yaşam standartları sebebiyle; daha önceleri sadece taşkın koruma ve sulama maksadıyla yapılan barajlara hidroelektrik santraller planlanarak elektrik enerjisi üretimine önem verilmektedir.

Hidrolik (Su) enerjinin diğer enerji türlerine kıyasla avantajları;

- İşletme maliyetlerinin düşük olması,
- İşletme ve bakımının kolay olması,
- Gerektiği durumlarda kapasite artışına gidilerek diğer enerji kaynaklarının pasif olduğu saatlerde büyük enerji ihtiyaçlarını karşılayabilme potansiyeline sahip olması,
- Türbin tasarımlarının gelişmiş bir teknolojiye sahip olması

olarak değerlendirilebilir.

Hidrolik (Su) enerjinin diğer enerji türlerine kıyasla dezavantajları;

- Hidroelektrik Santral inşaatı için orman alanlarından bedelli olarak izin alınması zorunluluğu,
- İnşaat maliyetinin yüksekliği,
- Çevresel etkileri

olarak değerlendirilebilir.

2.1.3. Deniz kökenli enerjiler

Denizlerin su seviyesindeki farklılıktan kaynaklı oluşan ve daha çok bilinen adıyla gel-git enerjisidir. Gel-git enerjisinden faydalanmak için en önemli etken bölgenin coğrafi koşulları ve konumudur. Tek tesirli ve çift tesirli gel git tesisleri mevcuttur. Deniz seviyesinin yükseldiği yani gel döneminde koya ve tam tersi yönde yani git döneminde açık denize doğru hareket eden suyun enerjisi çift tesirli türbinler tarafından alınarak enerji üretilmektedir.

Ayrıca okyanuslardaki yüzey ve dip deniz suyu sıcaklık farkından kaynaklı akıntılar oluşmaktadır. Bu akıntılardan türbinler ve düşük sıcaklıklarda buharlaşan kapalı devre sıvı sistemlerle çalışabilen türbinler yardımıyla enerji üretilebilir.

Diğer deniz kökenli enerjilerden olan dalga enerjisi hesaplanırken durgun deniz suyu seviyesinden başlayarak hareket eden su kütlesinin potansiyel enerjisi ve hareket halindeki su taneciklerinin kinetik enerjisi toplanır. Dalgalardaki güç, dalga cephesinin alanı ve hareketin periyodu ile doğru orantılıdır.

Dalga enerjisi çevre sorunlarına sebep olmayan enerji türlerinden biridir. Ancak kesintili ve ön görülemeyen bir üretim imkânı sunduğundan dolayı enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.4. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yerkürenin farklı derinliklerinde oluşmuş aşırı ısınmış suların enerjisi olarak tanımlanabilir. Bu sıcak su; hazne sıcaklığına, basıncına ve yüksekliğine bağlı olarak kuru buhar, basınçlı sıcak su veya sıcak su şekillerinde yeryüzüne çıkabilmektedir. Kuru buhar ve yüksek sıcaklıklı doymuş buhar elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır.

Jeotermal enerjinin diğer enerji türlerine kıyasla avantajları;

- İleri teknoloji gerektirmemesi,
- Mevsimlerden ve yağışlardan etkilenmemesi,
- İşletme maliyetinin düşük olması,
- Diğer enerjilere kolaylıkla dönüştürülebilir olması

olarak değerlendirilebilir.

Jeotermal enerjinin diğer enerji türlerine kıyasla dezavantajları;

- Jeotermal suyun içerdiği minerallerin kimyasal tepkimeleri sonucunda oluşan çözilemeyen bileşikler sebebiyle boruların daralarak tıkanması,
- Kabuklaşma olarak tanımlanan bu süreçte akışkan miktarının azalarak enerji kaybına ve enerji kesintilerine sebep olması,
- Kabuklaşma sonrası boruların yenilenmesi maliyeti

olarak değerlendirilebilir.

2.1.5. Biyokütle enerjisi

Biyokütle enerjisi çeşitli atıklardan (tarım, orman ürünleri, hayvansal veya kentsel) oksijensiz ortamda çürütülerek elde edilen enerji türüdür. Kısaca ifade etmek gerekirse organik maddelerden elde edilen enerjiye biyokütle enerjisi denilmektedir.

Organik karbon olarak da nitelendirilebilen biyokütle enerjisi, biyolojik kökenli fosil olmayan organik madde kütesinden elde edilen enerji türüdür. Genelde güneş enerjisini fotosentez yardımıyla depolayan bitkisel organizmalar olarak da ifade edilen biyokütleden üretilen enerji, elektrik ve ısı üretiminde kullanılabildiği gibi, yakıt olarak da kullanılabilmektedir. (Karagöl ve Kavaz 2017; Apaydın, Taşdoğan ve Güngör 2019)

Biyokütle enerjisinin diğer enerji türlerine kıyasla avantajları;

- Çevreye daha az zararlı etkilerinin olması,
- Depolanabilmesinin daha kolay olması,
- Hemen hemen her yerde temininin kolay olması

olarak değerlendirilebilir.

Biyokütle enerjisinin diğer enerji türlerine kıyasla dezavantajları;

- Verimlerinin düşük olması

olarak değerlendirilebilir.

2.1.6. Rüzgar enerjisi

Günümüzde en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de rüzgâr enerjisidir. Dünyamızda eşit olmayan güneş ışınımı dağılımı sebebiyle sıcaklık ve basınç farklılıkları oluşur. Bu farklılıklar nedeniyle soğuk iklim kuşağındaki yüksek basınç bölgelerinden, sıcak iklim kuşağındaki alçak basınç bölgelerine doğru hareket eden hava akımları rüzgarların oluşmasına sebep olur. Rüzgar enerjisi, elektrik üretmek için hızlı büyüyen ve yaygın olarak kullanılan bir kaynaktır.

Rüzgar enerjisinin avantajları;

- Yakıtı rüzgar olduğundan yenilenebilir ve maliyeti yoktur.
- Kurulum yeri kısıtlaması azdır, hemen hemen her yere kurulabilir.
- Elektrik üretimi esnasında sera gazı veya zararlı gaz salınımı yoktur.
- Rüzgar enerji santralleri (RES) daha az alana ihtiyaç duyarlar.
- RES'ler gün ışığından bağımsız olduğu için optimum rüzgar koşullarının sağlandığı günün her saatinde enerji üretebilirler.
- RES'nin işletme ve bakımı minimum maliyetlidir.
- RES'ler kırsal, dağlık ve sosyo-ekonomik seviyesi düşük olan bölgelerde istihdam ve altyapı artışına katkı sağlar.

Rüzgar enerjisinin dezavantajları;

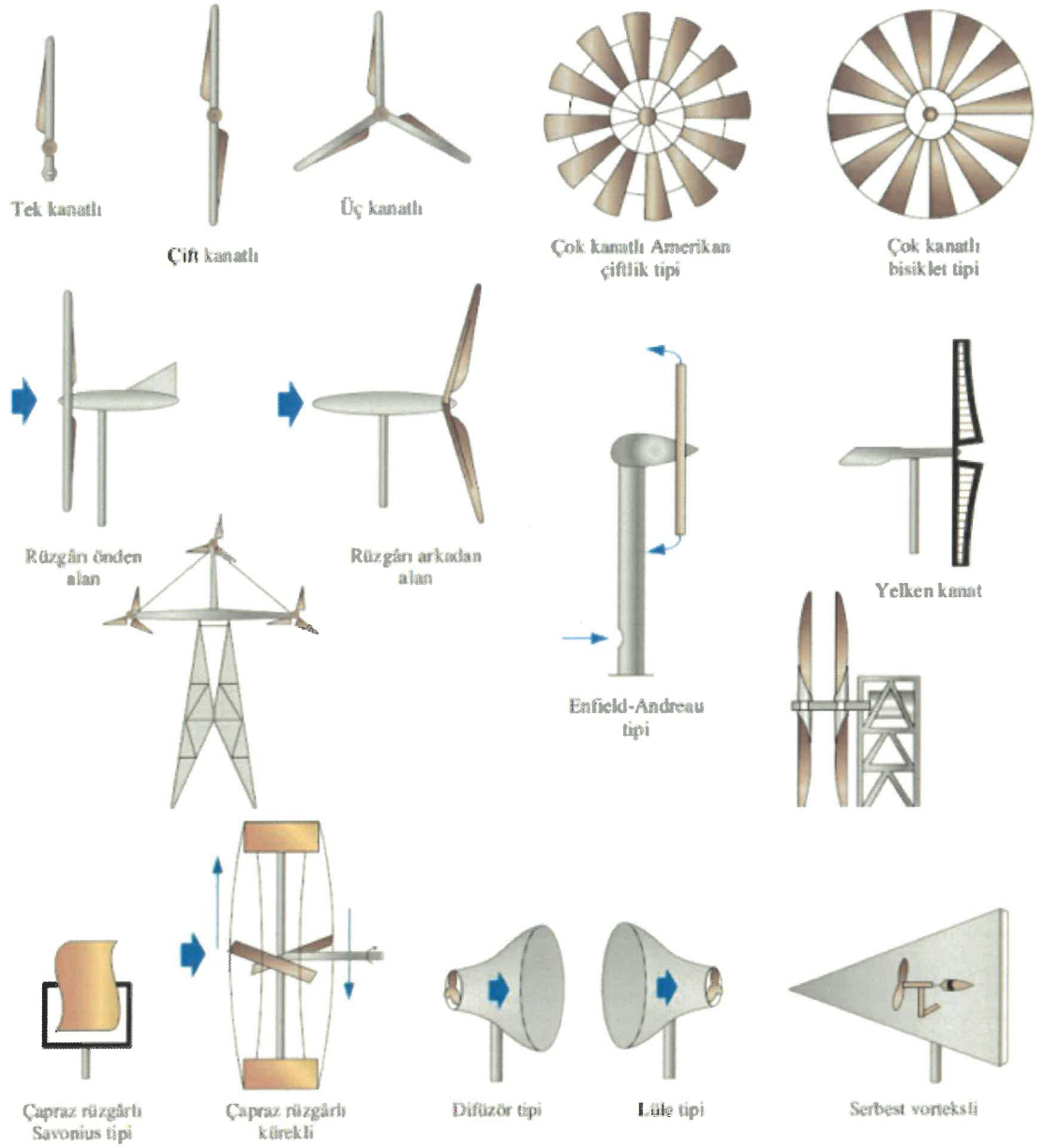
- RES'ler için optimum rüzgar koşulları gereklidir. Eğer rüzgar fazla ya da az eserse türbinler çalışmaz.
- Kesintili bir enerji kaynağıdır.
- RES kurmak için uzun süreli ölçümlerin ve fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir.
- RES ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- RES'ler, göçmen kuşlar için tehlike oluşturabilir.
- Aynı bölgede çok sayıda RES varsa cep telefonu ve televizyon sinyalleri olumsuz etkilenebilir.

2.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar enerjisinin en önemli parçası olan rüzgar türbinleri temel olarak dönme eksenlerine göre yatay eksenli ve dikey eksenli şeklinde isimlendirilerek iki sınıfa ayrılmaktadır (Öztürk 2021).

2.2.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin (YERT) dönme eksenleri gelen rüzgar yönüyle paralel olarak konumlandırılmıştır. Türbin kanatları bu yatay eksen etrafında dönmektedir. Şekil 2.1'de yatay eksenli rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.

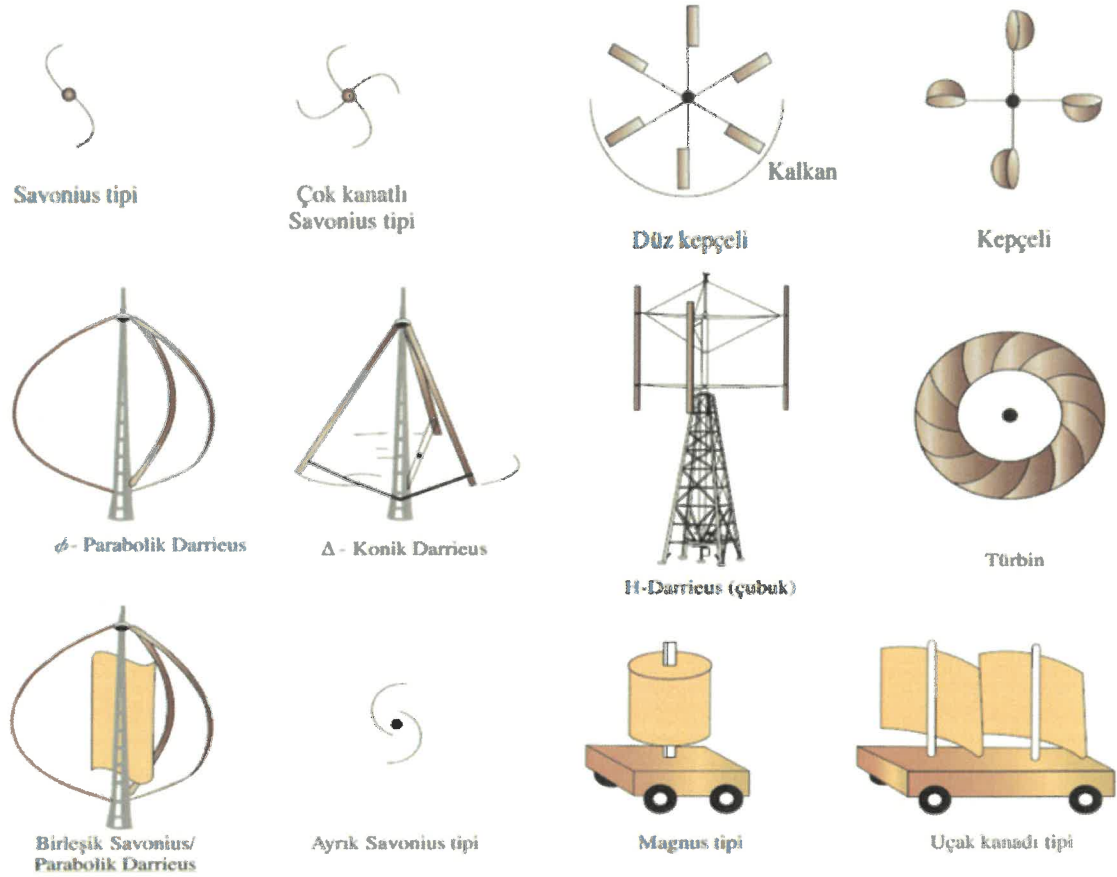


Şekil 2.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Çengel ve Cimbala 2015)

Yatay eksenli türbinler temel olarak kanat sayısına göre; tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve kullanılan türbin kanatlarının kulenin önünde veya arkasında olmasına göre alt sınıflara ayrılmaktadır. Yapılan birçok çalışma sonucunda 3 kanatlı türbinler elektrik üretiminde günümüzde en çok kullanılan türbinler olurken çok kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri ise sulama amaçlı su pompalamasında en çok kullanılan türbinler olarak dikkati çekmektedir.

2.2.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde (DERT) gelen rüzgar yönü türbin kanatlarına diktir ve türbin kanatları dikey bir eksen etrafında döndüğü için bu şekilde isimlendirilmiştir. Şekil 2.2’de dikey eksenli rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir.



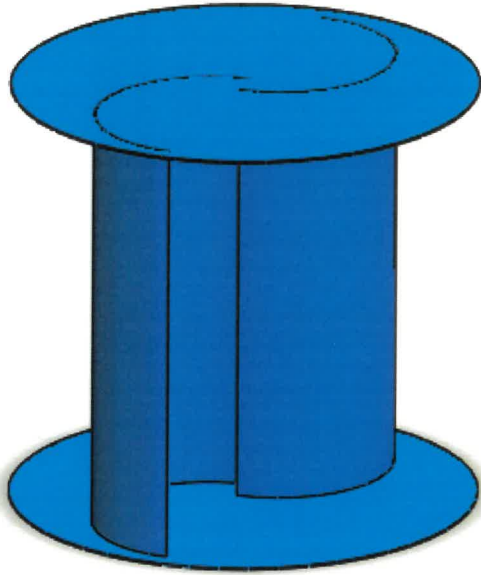
Şekil 2.2. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Çengel ve Cimbala 2015)

Dikey eksenli rüzgar türbinlerini en genel haliyle Darrieus, Savonius ve birleşik Darrieus-Savonius türbinleri şeklinde sınıflandırmak mümkündür. Bu türbinlerden Darrieus rüzgar türbinlerinin performansları diğerlerine göre daha iyi olduğu için en çok kullanılan dikey eksenli rüzgar türbinleridir. Darrieus rüzgar türbinlerinin ilk harekete başlama momentleri düşük olduğu için Savonius türbinlerinin ilk harekete başlama momentinin yüksekliğinden yararlanarak Birleşik Darrieus-Savonius türbinleri kullanılabilmektedir.

Savonius rüzgar türbinleri Darrieus rüzgar türbinlerin yanında daha düşük güç katsayısı değerine sahiptir. Fakat bu türbinlerin konstrüksiyonlarının basit ve maliyetinin az olması ayrıca düşük rüzgar hızlarında kullanılabiliyor olması gibi üstünlükleri bu tür türbinlerin de üzerine birçok çalışma yapılmasına neden olmuştur.

2.3. Savonius Rüzgar Türbini

İnsanların Savonius rüzgar türbinleri ile tanışması 1925 yılında Sigurd Johannes Savonius tarafından bulunması ile gerçekleşmiştir (Öztürk 2021). Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bu türbinler bir silindirin ortadan ikiye kesilip simetrik olarak kaydırılması ile oluşan çok basit bir konstrüksiyona sahiptirler. Bu iki yarım silindirin şekli ele alındığında iç bükey ve dış bükey kanat adı verilen iki yarım silindirin iki ince daire plakanın arasına yerleştirilmesiyle klasik Savonius rüzgar türbini oluşmaktadır. Bu ince daire plakalara türbin uç plakaları adı verilmektedir. Klasik Savonius rüzgar türbini ilk etapta uç plakasız olarak keşfedilse de daha sonra yapılan çalışmalarla uç plakalı türbinin daha yüksek güç performansı göstermesi nedeniyle uç plakalı şeklinde kullanımı yaygınlaşmıştır.



Şekil 2.3. Savonius rüzgar türbini

Savonius rüzgar türbinleri rüzgarı her yönden aldığı için kendi kendine harekete başlama gibi bir özelliği ile ilk harekete başlama momentinin de yüksek olması sayesinde hem Darrieus hem de yatay eksenli rüzgar türbinlerine göre önemli bir avantaja sahiptir. Rüzgara karşı yönlendirmeye gerek duyulmadığı için özellikle yatay eksenli türbinlerde kullanılan ek yaw sistemi yada dümen sistemine gerek duyulmamaktadır. Özellikle düşük rüzgar hızlarında kullanılabilen olması bu türbinlerin kule masrafinin olmamasını sağlamaktadır. Böylelikle kişisel güç ve elektrik ihtiyaçlarının karşılanmasında özellikle kırsal alanlardaki bağ, bahçe ve çiftlik evi gibi konutlarda enerji ihtiyacının sağlanmasında oldukça etkili bir türbin olarak kullanılabilir. Bu özellikleri sebebiyle bu türbinlerden daha çok ve yüksek performansta yararlanabilmek için günümüze kadar Savonius rüzgar türbinleri ile birçok çalışma yapılmış ve hala da yapılmaya devam edilmektedir. Bu çalışmalar ilk etapta Savonius rüzgar türbininin yapısında (kanat profil şekli, kanat ayrılma ve kayma oranı, uç plakalı veya uç plakasız türbin gibi) yapılan değişiklikler ile gerçekleştirilmiştir. Bu

değişiklikler ile türbinin güç katsayısı C_p değerinin artırılması sağlanmıştır. Daha sonraki etapta ise Savonius rüzgar türbininin yapısında değişiklik yapılmadan türbinin dış alanında ya da etrafında tasarlanan tasarımlar ile türbinin güç katsayısı değerleri arttırılmaya çalışılmış ve çok dikkate değer çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.4. Literatür Özeti

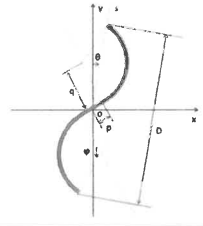
Savonius rüzgar türbinlerinin türbin performansını arttırmak amacıyla dış bükey kanadın oluşturduğu negatif yöndeki torku azaltmak veya gelen rüzgar akışını arttırmak için birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla literatürde yapılan çalışmaların bir grubunda Savonius rüzgar türbininin bünyesindeki yapısal tasarım değişiklikleri yapılarak performans durumları ve diğer bir grup çalışma ile de Savonius rüzgar türbininin kendisini koruyarak türbin etrafına dış tasarımlar ilave yapılarak performans durumları incelenmiştir. Çalışmaların verilerinden elde edilen türbin performanslarını gösteren güç katsayıları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda incelenen yapısal ve dış tasarım modelleri ile elde edilen güç katsayılarındaki artış yüzdeleri iki kanatlı klasik versiyonlarına göre tespit edilerek de karşılaştırılmıştır.

2.4.1. Yapısal tasarım çalışmaları

Günümüze kadar çeşitli bilim adamları ve araştırmacılar tarafından Savonius rüzgar türbininin performansını arttırmak için farklı geometrik parametrelerin etkileri optimize edilerek yeni yapısal tasarımlar sayısal ve deneysel olarak geliştirilmiş ve daha hala daha iyi türbin veriminin elde edilebilmesi için araştırmalar yapılmaya devam etmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında yapısal tasarım olarak, daha çok kanat sayısı, kanat tipi tasarımı, kanat kaydırma oranı, kanat ayrılma oranı, türbin en-boy oranı ve kanat uç plakası gibi değişik tasarım parametreleri ele alınmıştır.

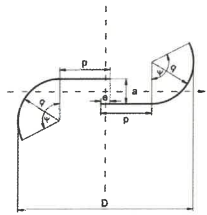
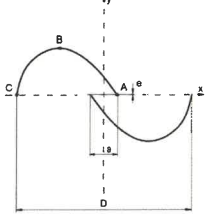
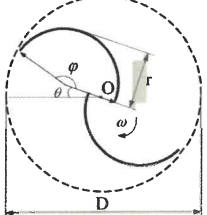
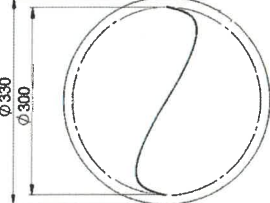
Kanat profilinin şekil açısından yapılan Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımsız ve yapısal tasarımlı çalışmaların maksimum güç katsayılarına ait detaylar Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat profili; kanat şekli açısından)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Yapısal Tasarım Adı	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p	Yapısal Tasarım Şekli
1	Zhou ve Rempfer (2013)	Karşılaştırılmış Sayısal	Bach tipi	0,189	0,264	

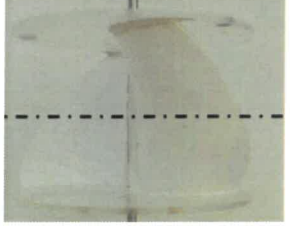
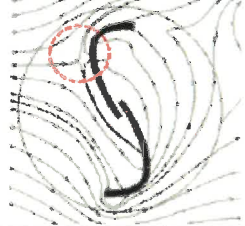
Devamı Arkada

Çizelge 2.1'nin devamı

2	Kacprzak vd. (2013)	Karşılaştırılmış Sayısal	Bach tipi	0,155	0,180	
3	Kacprzak vd. (2013)	Karşılaştırılmış Sayısal	Eliptik kanat	0,155	0,170	
4	Mao ve Tian (2015)	Doğrulanmış sayısal	Kanat kavis açısı	0,262	0,284	
5	Alom ve Saha (2018)	Deneysel Sayısal	Havalandırmalı eliptik kanat	0,112	0,146	
6	Alom ve Saha (2018)	Deneysel Sayısal	Havalandırmasız eliptik kanat	0,112	0,134	
7	Ramadan vd. (2018)	Deneysel Sayısal Genetik algoritma	S-şekilli optimum bıçak tasarımı	0,140	0,280	
8	El-Askary vd. (2018)	Deneysel Sayısal	Bükülmüş modifiye tasarım	0,140	0,220	

Devamı Arkada

Çizelge 2.1'nin devamı

9	Damak vd. (2018)	Deneysel Sayısal	Helisel Bach tasarımı	0,180	0,20	
10	Zemamou vd. (2020)	Doğrulanmış sayısal Optimizasyon Taguchi metot	Bezier eğrili kanat	0,270	0,350	
11	Ramarajan ve Jayavel (2022)	Doğrulanmış sayısal	Dörtte üçü modifiyeli kanat	0,230	0,250	

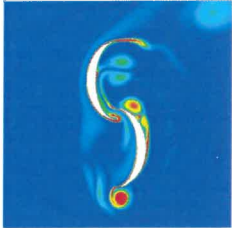
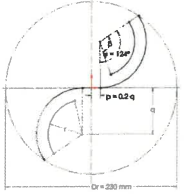
Kanat profilinin kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından yapılmış Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımsız ve yapısal tasarımlı çalışmaların maksimum güç katsayılarına ait detaylar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat profili; Kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Yapısal Tasarım Adı	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p	Yapısal Tasarım Şekli
12	Sharma S. ve Sharma (2016)	Doğrulanmış sayısal	Çoklu çeyrek kanatlar	0,208	0,227	
13	Deda Altan vd. (2016)	Deneysel Sayısal	Ek tasarım	0,099	0,119	

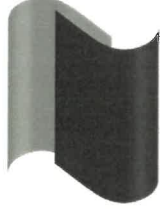
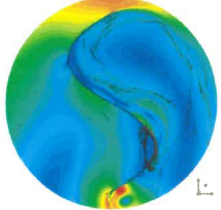
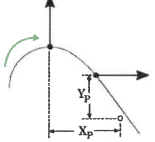
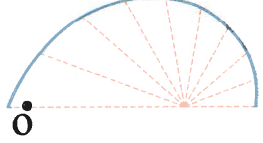
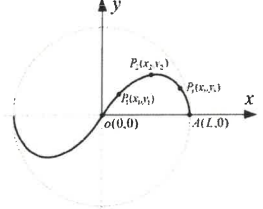
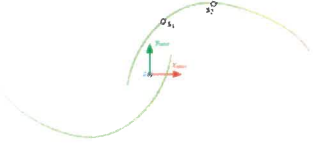
Devamı Arkada

Çizelge 2.2'nin devamı

14	Sharma S. ve Sharma (2017)	Doğrulanmış sayısal	Çoklu minyatür kanatlar	0,192	0,213	
15	Tian vd. (2018)	Doğrulanmış sayısal Optimizasyon	Optimum tasarım	0,247	0,258	
16	Ostos vd. (2019)	Doğrulanmış sayısal	İki çeyrek geleneksel kanat	0,214	0,252	
17	Haddad vd. (2021)	Doğrulanmış sayısal	Ek iç kanat	0,196	0,243	
18	Gallo vd. (2021)	Deneysel Sayısal	Çok kanatlı geometri	0,195	0,295	
19	Al Absi vd. (2021)	Deneysel Sayısal	Zikzak yüzeyli kanat	0,260	0,292	

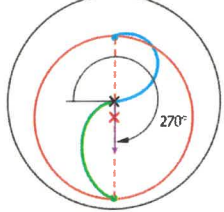
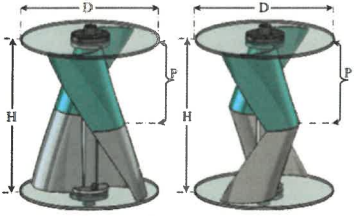
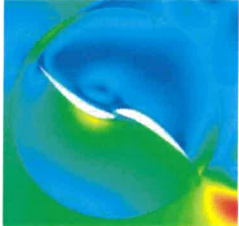
Kanat profilinin farklı tasarım ve yaklaşım açısından yapılmış Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımsız ve yapısal tasarımlı çalışmaların maksimum güç katsayılarına ait detaylar Çizelge 2.3'te verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi klasik kanat şeklinin dışında birçok kanat profil modelleri tasarlanmış ve performans açısından incelenmiştir.

Çizelge 2.3. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarısız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat profili; Farklı tasarım ve yaklaşım açısından)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Yapısal Tasarım Adı	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p	Yapısal Tasarım Şekli
20	Roy ve Saha (2015)	Deneysel Sayısal	Yeni geliştirilen kanat	0,230	0,310	
21	Tian vd. (2015)	Doğrulanmış sayısal	Kanat dolgunluğu	0,232	0,2573	
22	Roy ve Ducoin (2016)	Doğrulanmış sayısal	Moment kollu yeni kanat tasarımı	0,280	0,370	
23	Zhang vd. (2017)	Doğrulanmış sayısal Optimizasyon	Optimum tasarım	0,247	0,2623	
24	Chan vd. (2018)	Sayısal Genetik algoritma	Optimize edilmiş kanat	0,169	0,2255	
25	Marinic-Kragic vd. (2019)	Doğrulanmış sayısal Optimizasyon Genetik algoritma	Esnek kanat	0,220	0,238	

Devamı Arkada

Çizelge 2.3'ün devamı

26	Sobczak vd. (2020)	Doğrulanmış sayısal	Deforme olabilen kanat	0,210	0,400	
27	Lajnef vd. (2020)	Deneysel Sayısal	Yeni delta kanatlı	0,124	0,142	
28	Imeni vd. (2022)	Doğrulanmış sayısal	Uçak kanat şekilli kanat	0,229	0,259	

Kanat sayısı açısından çalışılmış yapısal tasarımı Savonius rüzgar türbinlerinin maksimum güç katsayılarına ait detaylar Çizelge 2.4'de verilmiştir. Literatürde bu konuda yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde kanat sayısındaki artışın Savonius rüzgar türbininin performansını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir (Saeed vd. 2019; Halmy vd. 2021). Ayrıca yapılan çalışmalardan iki kanatlı türbinin güç katsayısının üç kanatlı türbininkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 2.4. Yapısal tasarımı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat sayısı)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Yapısal Tasarım Adı	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p	Yapısal Tasarım Şekli
1	Ramadan vd. (2018)	Deneysel Sayısal Genetik algoritma	3 kanatlı	0,140	0,110	

Kanat tasarım oranları açısından yapılmış Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımı ve yapısal tasarımı çalışmaları maksimum güç katsayılarına ait detaylar Çizelge 2.5'te verilmiştir. Savonius rüzgar türbinleriyle yapılan ilk çalışmalarda da türbin tasarım oranlarının türbin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Sheldahl vd. 1978; Ogawa ve Yoshida 1986; Fujisawa 1992). Özellikle kanat kaydırma oranı açısından incelendiğinde; üst üste binen kanatlara sahip klasik Savonius türbinlerin, üst üste binmeyen kanatlara kıyasla daha iyi başlangıç özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Nasef vd. 2013).

Çizelge 2.5. Yapısal tasarımı ve yapısal tasarımı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kanat tasarım oranları)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Tasarım Notları	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p
1	Kamoji vd. (2009)	Deneysel	Kaydırma oranı = 0 En boy oranı = 0,7 Kanat kavis açısı = 124° Kanat şekil faktörü (p/q) = 0,2 Uç plaka oranı = 1,2	0,175	0,210
2	Akwa vd. (2012)	Doğrulanmış Sayısal	Kaydırma oranı (0-0,6) (Maks. Kaydırma oranı: 0,15)	0,200	0,3161
3	Nasef vd. (2013)	Deneysel Sayısal	Kaydırma oranları; 0, 0,15, 0,2, 0,3, 0,5 (Maks. Kaydırma oranı:0,15)	0,170	0,210
4	Mohammadi vd. (2018)	Doğrulanmış sayısal Optimizasyon Genetik algoritma Yapay sinir ağı	Kaydırma oranı = 0,159 En-boy oranı = 0,90	0,196	0,222

Uç plakaların kullanımı açısından çalışılan Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımı ve yapısal tasarımı maksimum güç katsayılarına ait bilgiler Çizelge 2.6'da verilmiştir. Klasik Savonius türbinlerin aerodinamik performanslarının iyileştirilmesi için en basit yöntemlerden birisi de kanat uç plakalarıdır (Alexander ve Holownia 1978; Saha ve Rajkumar 2006; Jeon vd. 2015). Kanat uç plakalarının optimum çapı (D_0) 1,1D türbin dönme çapı olarak tespit edilmiştir. (Fujisawa ve Gotoh 1992; Kamoji vd. 2009).

Çizelge 2.6. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Uç plaka)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Tasarım Notları	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p
1	Jeon vd. (2015)	Deneysel	Helisel Savonius	0,060	0,082
2	Premkumar vd. (2018)	Deneysel	Helisel Savonius	0,042	0,054
3	Goodarzi ve Salimi (2021)	Doğrulanmış sayısal	Geleneksel Savonius Çeyrek küresel uç plakası, Yarı dairesel uç plakası, Dairesel uç plakası	0,047	0,163

Kat sayısı açısından çalışılmış Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız güç katsayıları ve ilgili detayları Çizelge 2.7’de verilmiştir. Klasik Savonius türbinleri, belirli türbin açılarında negatif tork ile dalgalı değişken bir tork değişimine sahiptir. Türbin tork karakteristiklerini iyileştirmek için, katlı Savonius türbinleri de önerilmiştir. Ancak güç katsayısının artışının tek katlı türbine kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir (Kamoji vd. 2008; Menet 2004; Frikha vd. 2016; Kothe vd. 2020; Bhayo ve Al-kayiem 2017).

Çizelge 2.7. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları (Kat sayısı)

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Tasarım Notları	Y.T.sız C_p	Y.T.lı C_p
1	Saha vd. (2018)	Deneysel	Tek, iki ve üç katlı (Maks. İki katlı) Yarım daire ve bükülmüş kanat (Maks. Bükülmüş kanat) iki ve üç kanatlı (Maks. İki kanatlı)	0,150	0,310
2	Mrigua vd. (2020)	Sayısal	Eliptik kanatlı çok katlı (bir, iki, üç katlı) (Maks. İki katlı)	0,130	0,195

Devamı Arkada

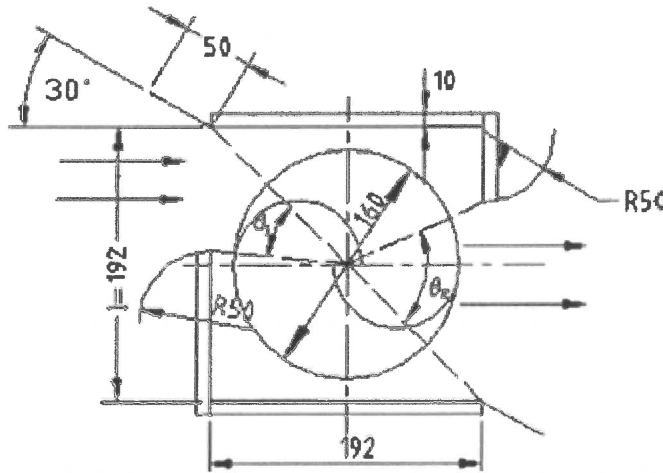
Çizelge 2.3'ün devamı

3	Saad vd. (2021)	Sayısal	Bükümlü kanatlı çok katlı türbinler (a) Tek katlı, (b) İki katlı, (c) Üç katlı, (d) Dört katlı (Maks. Dört katlı)	0,223	0,261
---	--------------------	---------	---	-------	-------

2.4.2. Dış tasarım çalışmaları

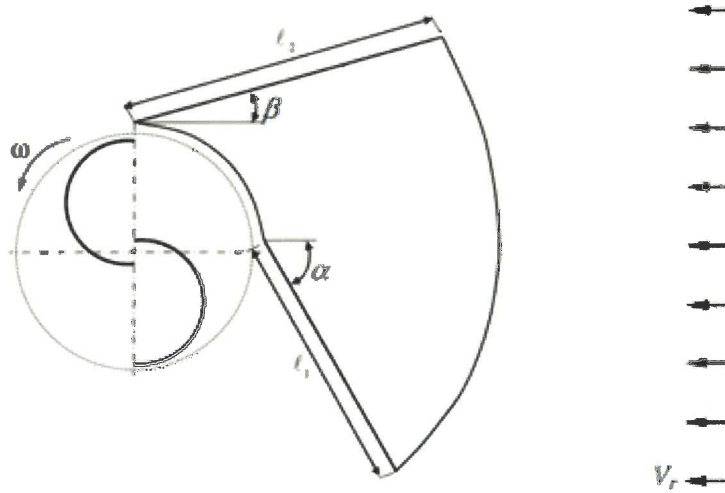
Genel olarak yapılan dış tasarım çalışmalarında türbinin performansını arttırmak için dış tasarım düzenekleri ile türbinde oluşan pozitif torku arttırmaya ve negatif torku da azaltmaya çalışılmaktadır. Burada, özellikle klasik Savonius rüzgar türbini üzerinde yapısal bir değişiklik yapılmadan türbin etrafına tasarlanan dış tasarım düzenekleri ele alınmıştır. Genel olarak dış tasarımların geometrik parametreleri değiştirilerek türbin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dış tasarımların optimum geometrik parametrelerindeki maksimum güç katsayıları tespit edilmiştir. Böylelikle dış tasarımların tek başlarına türbin performanslarına etkileri incelenmiştir.

Irabu ve Roy (2007) yaptıkları çalışmada, Savonius türbininin çıkış gücünü iyileştirmek için türbin etrafına Şekil 2.4'te görüldüğü gibi kılavuz kutu tüneli düzeneği yerleştirmişlerdir. Kılavuz kutu tüneli düzeneğinin değişik giriş ve çıkış arasındaki alan oranında deneyler yaparak en iyi performansı sağlayan tasarım konfigürasyonunu deneysel olarak tespit etmişlerdir. Bu deneylerde iki kanatlı ve üç kanatlı türbinler kullanılmıştır. Deneyler rüzgar tünelinin dış kısmında yapılmıştır. Kılavuz kutu tünelinin genişlik oranı 1,4 ve alan oranı 0,43 iken iki kanatlı türbin için maksimum çıkış gücü katsayısı, kılavuz kutu tüneli tasarımı kullanılmadan elde edilen güç katsayısının 1,23 katı olarak tespit edilmiştir. Aynı tasarım oranlarında üç kanatlı türbin için ise 1,5 kat olarak tespit edilmiştir. Yapılan deneylere göre maksimum güç katsayısı kılavuz kutu tünelli dış tasarım ile iki kanatlı türbinden 0,27 civarında elde edilmiştir.



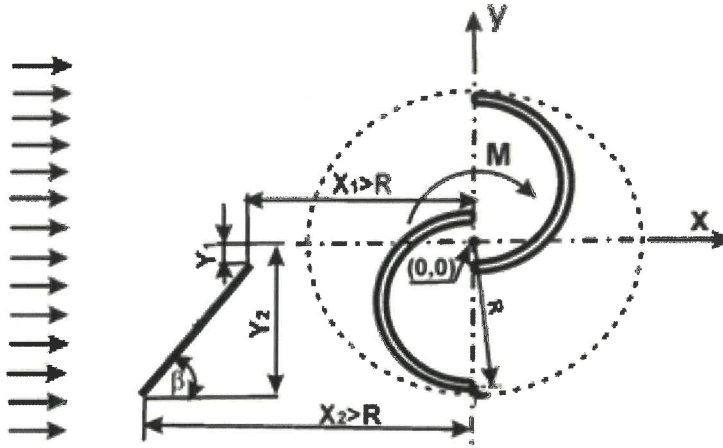
Şekil 2.4. Kılavuz-kutu tüneli tasarımı (Irabu ve Roy 2007)

Deda Altan vd. (2008) Klasik Savonius rüzgar türbinlerinin düşük olan performans seviyelerini iyileştirmek için Şekil 2.5’de görüldüğü gibi bir perde düzeneği tasarlamışlardır. Özellikle türbinin dış bükey kanadında oluşan negatif torku önlemek için tasarlanan bu perde düzeneğini türbinin önüne yerleştirerek perdeli ve perdesiz türbin performanslarını deneysel olarak tespit etmişlerdir. Perde tasarımının geometrik parametrelerinin türbin performans üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için farklı açılardaki üç farklı perde tipini incelemişlerdir. Böylelikle perde düzeneğinin geometrik parametreleri optimum türbin performansını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Birinci perde tasarımı boyutlarında optimum perde açıları $\alpha=45^\circ$ ve $\beta=15^\circ$ olarak belirlenerek maksimum güç katsayısı 0,38 civarında tespit edilmiştir. Perde düzenekli ve performans karşılaştırılması için kullanılan klasik Savonius rüzgar türbinlerinin, aynı koşullardaki bir rüzgar tünelinin dışında ve atmosfere açık bir şekilde deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bu çalışma sayısal analiz ile desteklenerek de ayrıntılı bir şekilde statik ve dinamik olarak incelenmiştir (Deda Altan ve Atılğan 2010).



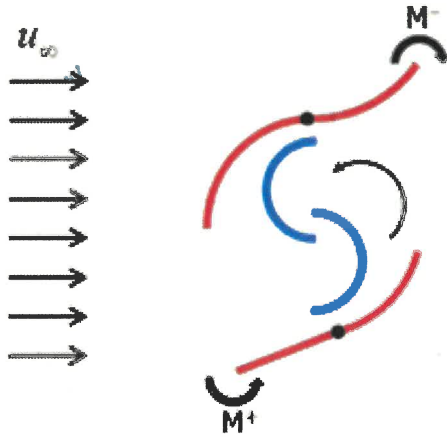
Şekil 2.5. Perde tasarımı (Deda Altan vd. 2008)

Mohamed vd. (2010) Savonius türbinlerinin performanslarını arttırmak için dönen kanat üzerinde oluşan negatif torkun etkisini yok edebilmek için Şekil 2.6’da görüldüğü gibi koruyucu engel yerleştirmişlerdir. Maksimum güç katsayısını elde edebilmek için bu koruyucu engelin en iyi konumunu ve açısını bir matematiksel optimizasyon ile hem iki hem de üç kanatlı Savonius rüzgar türbinleri için belirlemişlerdir. Optimizasyon işleminde evrimsel algoritmalar kullanılmıştır. Burada hedef fonksiyon olarak güç katsayısı dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre iki kanatlı Savonius türbini içeren optimize edilmiş düzeneğin üç kanatlı Savonius türbini içeren optimize edilmiş düzeneğe göre daha iyi olduğu gösterilmiştir. Buna göre maksimum güç katsayısı iki kanatlı türbin ile 0,258 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.6. Koruyucu engelli dış tasarım (Mohamed vd. 2010)

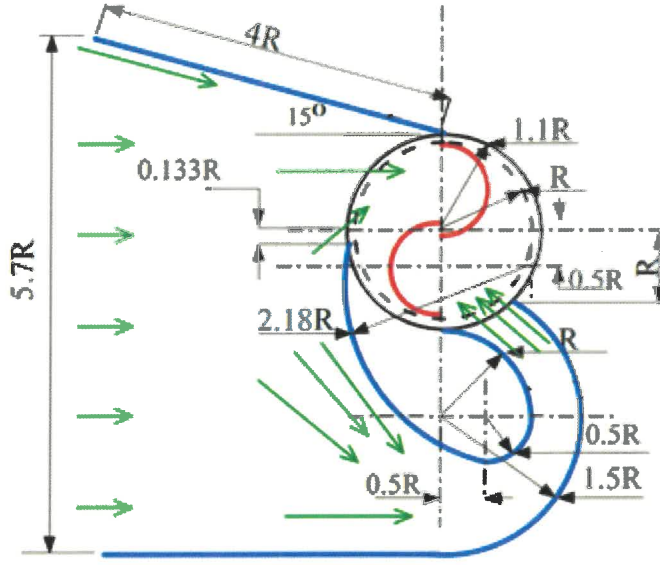
Tartuferi vd. (2015) Savonius rüzgar türbininin aerodinamik performansını Şekil 2.7’de gösterildiği gibi rüzgar yönüne göre kendi kendine yönlendirilen konveyör-yönlendirici perde sistemi ile geliştirmişlerdir. Perde sisteminin şeklinden dolayı rüzgar yönüne göre düzenek kendi kendini yönlendirmesi sağlanmıştır. Bu durumun doğruluğu için ise düzenekli türbin sisteminin deneyleri 4 ile 12 m/s arasında değişen rüzgar hızında rüzgar tüneline yapılmıştır. Maksimum güç katsayısı yaklaşık olarak 0,30 civarında tespit edilmiştir.



Şekil 2.7. Konveyör-yönlendirici perde sistemi (Tartuferi vd. 2015)

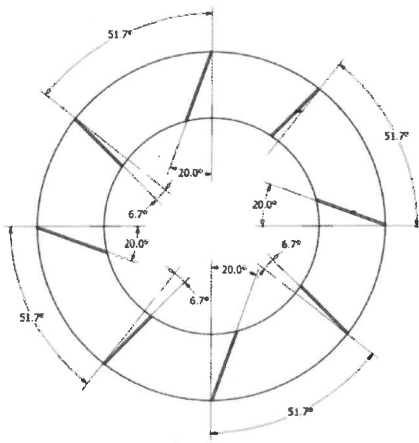
El-Askary vd. (2015) Savonius rüzgar türbin performanslarını iyileştirmek için rüzgar enerjisini toplamayı hedeflemişlerdir. Bu hedef doğrultusunda Şekil 2.8’de gösterilen kılavuz plaka tasarımı ile rüzgar yönünü kontrol etmişlerdir. Bu kılavuz plaka tasarımının üst plakası ile rüzgar, Savonius rüzgar türbininin rüzgar yönünde dönen kanadın iç büküye tarafına yönlendirilmiştir. Kılavuz plaka tasarımının orta kısmındaki plaka tasarımıyla Savonius rüzgar türbininin üzerinde oluşan negatif tork

engellenmiştir. Kılavuz plaka tasarımının alt plakası ile de rüzgar, Savonius rüzgar türbininin rüzgara ters yönde dönen kanadın iç bükey tarafına yönlendirilmiştir. Böylece Savonius rüzgar türbininin her iki kanadında da pozitif tork oluşumu sağlanmıştır. Yapılan doğrulanmış sayısal çalışmaların neticesinde, Savonius rüzgar türbininden elde edilen maksimum güç katsayısı 0,52 civarında bulunmuştur.



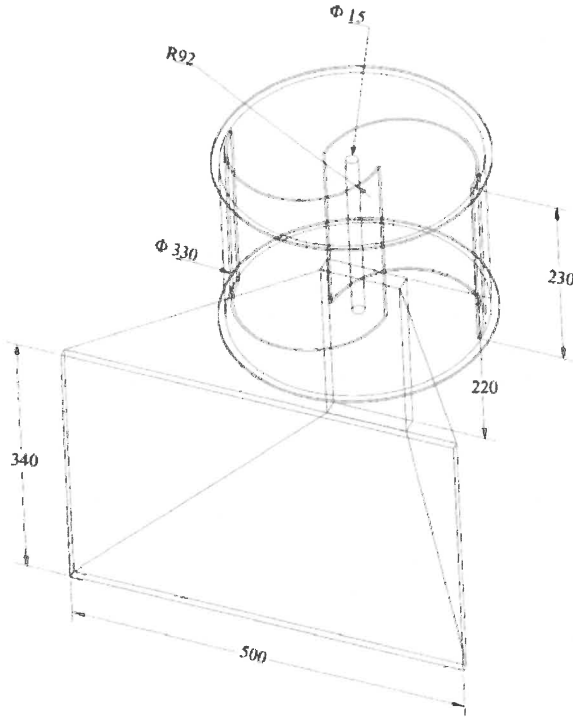
Şekil 2.8. Kılavuz plaka tasarımı (El-Askary vd. 2015)

Kalluvila ve Sreejith (2018) yaptıkları deneysel ve sayısal çalışma ile Şekil 2.9’da görüldüğü gibi Savonius türbininin etrafına kılavuz kanatları yerleştirerek türbin verimliliğini arttırmaya odaklanmışlardır. Çevresel şekilde yerleştirilen bu düzenek ile Savonius rüzgar türbininin gelen rüzgarı her yönden alabilme kabiliyetini devam ettirdiği belirtilmiştir. Türbin etrafında kılavuz kanat düzeneği kullanılarak maksimum güç katsayısı değeri olarak 0,28 seviyelerine ulaşılmıştır.



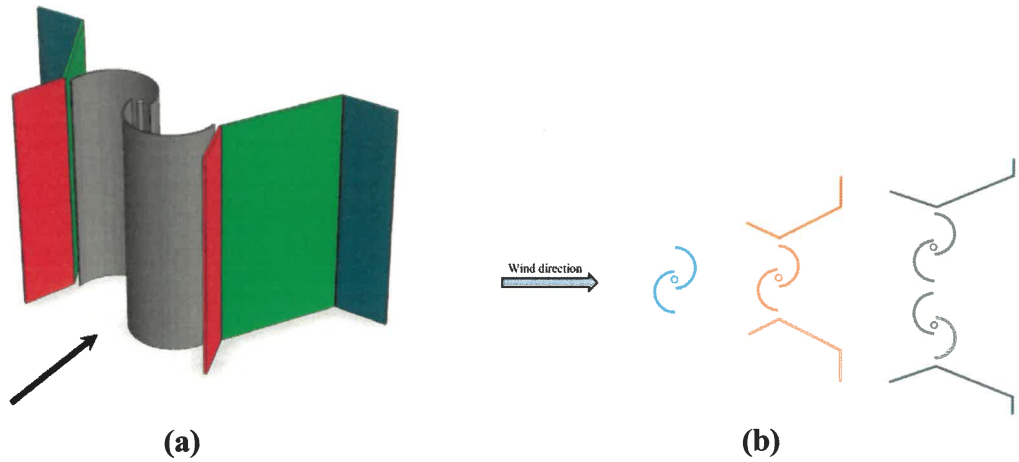
Şekil 2.9. Kılavuz kanat düzeneği (Kalluvila ve Sreejith 2018)

Mohammadi vd. (2018) dikey eksenli Savonius rüzgar türbininin performansını artırmak için Şekil 2.10'da görüldüğü gibi türbin önüne lüle tasarımı yerleştirmişlerdir. Lüle tasarımı ile rüzgarı, rüzgar yönünde dönen türbin kanadına yönlendirmeye ve rüzgar yönünün tersine dönen türbin kanadına gitmesini engellemeye çalışmışlardır. Lüle tasarımı geometrik olarak geliştirerek en iyi performans değerlerini deneysel literatür verileriyle doğrulanmış sayısal yöntem ile bulmuşlardır. Basit lüle, kuyruklu basit lüle, eğrisel lüle ve kuyruklu eğrisel lüle isimli dört lüle tasarımı incelemiştir. Maksimum güç katsayısı kuyruklu basit lüle tasarımı ile 0,363 civarında tespit edilmiştir.



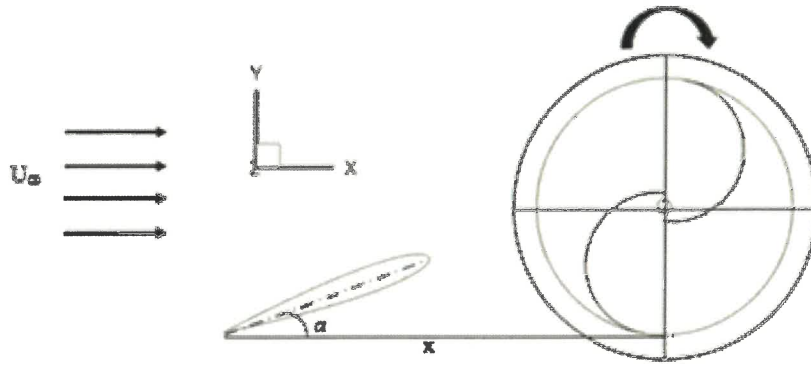
Şekil 2.10. Lüle tasarımı (Mohammadi vd. 2018)

Hesami vd. (2022) tekli ve çiftli Savonius rüzgar türbini için Şekil 2.11'de görüldüğü gibi rüzgar merceği isimli dış tasarım ile türbine gelen rüzgarı hızlandırarak düşük olan güç performanslarının değişimlerini incelemişlerdir. Tek Savonius rüzgar türbinli rüzgar merceği ile 0,21 güç performansına ulaşmışlardır. Rüzgar merceğinin farklı geometrik parametrelerindeki türbin performans değerleri incelenerek özellikle çiftli türbin kullanımdaki optimum rüzgar merceği tespit edilmiştir. Buna göre çift Savonius rüzgar türbinli rüzgar merceği ile 0,358 değerinde maksimum güç performansına ulaşmışlardır.



Şekil 2.11. a) Rüzgar merceği; b) Tekli veya çiftli kullanımı (Hesami vd. 2022)

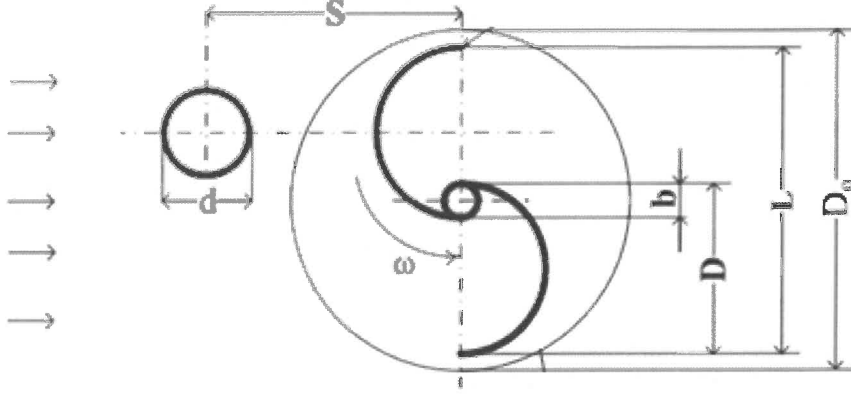
Layeghmand vd. (2020) yaptıkları çalışmada, Savonius rüzgar türbininin performansını iyileştirmek için Şekil 2.12’de görüldüğü gibi türbin önüne yerleştirilmek üzere uçak kanadı şekilli bir saptırıcı dış tasarımı önermişlerdir. Bu dış tasarım ile türbin performansını iyileştirmek için geri dönen türbin kanadının dışbükey yüzeyinde oluşan negatif torkun önlenmesi ve aynı zamanda rüzgarın ilerleyen türbin kanadına yönlendirilmesi sağlanmıştır. Yapılan çalışma ile Savonius rüzgar türbininin en iyi performansı için uçak kanadı şekilli saptırıcı tasarımının optimum konumu ve açısı bulunmuştur. Optimum koşullardaki dış tasarımlı Savonius rüzgar türbininden maksimum güç katsayısı değerinin 0,3132 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.12. Uçak kanadı şekilli saptırıcı tasarımı (Layeghmand vd. 2020)

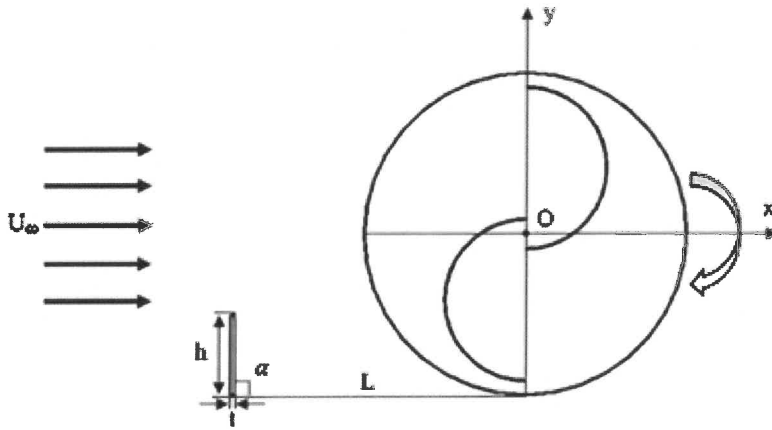
Yuwono vd. (2020) yaptıkları çalışmalarında Şekil 2.13’de gösterildiği gibi türbine gelen rüzgara karşı dönen türbin kanadının önüne dairesel bir silindirin yerleştirilmesiyle silindir tasarımıdaki bu silindirin Savonius rüzgar türbininin performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Türbin kanadının çapına göre değişik çapa ve konum mesafesine sahip dairesel silindir deneye tabi

tutularak en iyi performans değerlerinin elde edildiği parametreler bulunmuştur. $d/D = 0,54$ ve $S/D = 1,4$ oranlarında maksimum güç katsayısı 0,2 değerlerinde tespit edilmiştir.



Şekil 2.13. Dairesel silindir (Yuwono vd. 2020)

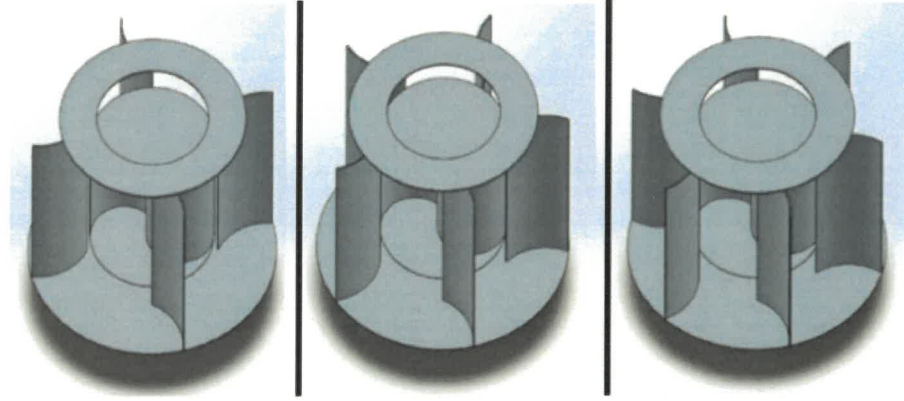
Nimvari vd. (2020) çalışmalarında, klasik Savonius rüzgar türbininin performansını arttırmak için Şekil 2.14'te görüldüğü gibi türbin önünde gözenekli bir saptırıcı önermişlerdir. Bu gözenekli saptırıcı ile geleneksel olan gözeneksiz katı saptırıcının arkasında oluşan karmaşık akış bölgesinin etkilerini en aza indirerek türbin performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Saptırıcı için en uygun gözeneklilik değerinin tespiti ile türbinden elde edilebilecek en yüksek tork ve güç katsayıları sayısal olarak bulunmuştur. Güç katsayısının maksimum değeri, gözenekli saptırıcının optimum konfigürasyonu ile 0,274 civarında tespit edilmiştir.



Şekil 2.14. Gözenekli saptırıcı (Nimvari vd. 2020)

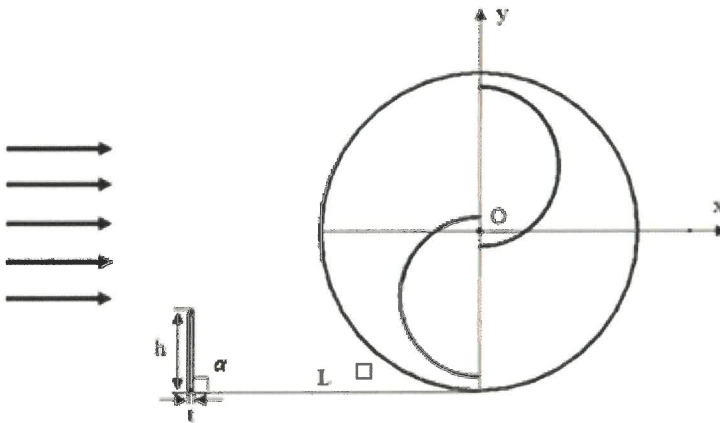
Yahya vd. (2021) düşük türbin performanslarını arttırmak için Şekil 2.15'de görüldüğü gibi Savonius rüzgar türbini etrafına ilave kılavuz kanatçık düzeneği yerleştirmişlerdir. Bu çalışma, farklı sayıdaki kılavuz kanatçıklarının kanat eğim

açılarındaki deneysel olarak rüzgar tüneline yürütülmüştür. En iyi güç katsayısı 60° eğim açılı 6 kanatlı kılavuz kanatçığı düzeneği ile 0,0279 değerlerinde elde edilmiştir.



Şekil 2.15. Kılavuz kanatçık düzeneği (Yahya vd. 2021)

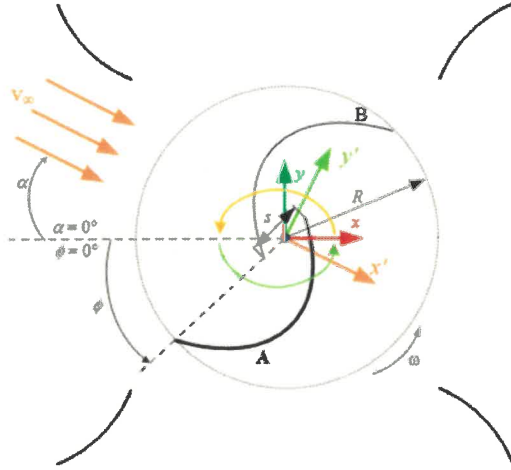
Fatahian vd. (2022) çalışmalarında, Savonius rüzgar türbininin en iyi performansını elde etmek için Şekil 2.16'da görüldüğü gibi türbin önüne nanofiber bazlı bir saptırıcı yerleştirmişlerdir. Böylelikle katı saptırıcının arkasında oluşan karmaşık akış bölgesinin zararlı etkilerini en aza indirerek türbin performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Önce nanofiber bazlı saptırıcı için farklı PVA ve PLA nanofiber konsantrasyon oranlarında en uygun gözeneklilik değerini ve ortalama gözenek boyutunu elde etmek için deneyler yapmışlardır. Daha sonra elde edilen parametreler ile türbin performansları doğrulanmış sayısal ile elde edilmiştir. Maksimum güç katsayısı değerinin yaklaşık olarak 0,272 değerlerinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.16. Nanofiber bazlı saptırıcı (Fatahian vd. 2022)

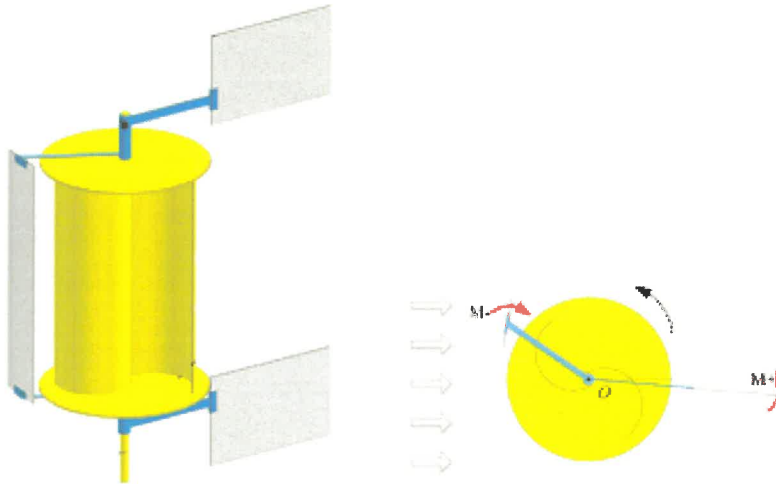
Marinic-Kragic vd. (2022) Savonius tipi dikey eksenli rüzgar türbininin verimliliğini arttırmak için Şekil 2.17'de gösterildiği gibi türbin etrafında belli sayılarda sabit kanatlı saptırıcı kullanmışlardır. Sabit saptırıcıdaki kanat sayısı türbin performans göstergesi olan güç katsayısı değerlerine göre optimizasyon sonucunda belirlenmiştir.

Dolayısıyla tüm rüzgar yönü aralığını göz önünde bulundurarak saptırıcı kanat şeklinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre klasik Savonius rüzgar türbini ile birleştirilmiş 8 kanatlı optimize edilmiş bir saptırıcı ile ortalama güç katsayısının 0,35 seviyelerine kadar yükseldiği gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Saptırıcı kanatlar (Marinic-Kragic vd. 2022)

Tian vd. (2022) yaptıkları çalışmada Şekil 2.18’de gösterildiği gibi rüzgar yönüne göre kendi kendine konumlanabilen pasif bir saptırıcı tasarlamışlardır. Pasif saptırıcının rüzgar yönündeki değişikliklerle konumunu kendisi pasif olarak ayarlayabilmesi ile Savonius rüzgar türbininin verimliliği geliştirilmiştir. Yapılan doğrulanmış sayısal sonuçlara göre klasik Savonius rüzgar türbininin güç katsayısı pasif saptırıcı kullanılarak 0,3124 seviyelerinde maksimum olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.18. Pasif saptırıcı (Tian vd. 2022)

Literatürde son yıllarda gerçekleştirilen iki kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin dış tasarımsız ve dış tasarımlı çalışmaların güç katsayısı değerleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

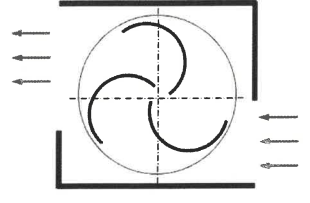
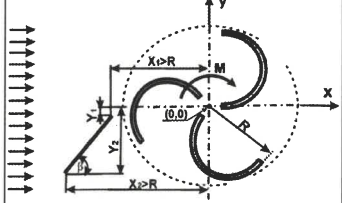
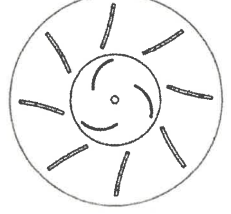
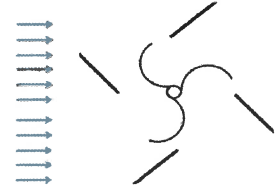
Çizelge 2.8. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız iki kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayısı değerleri

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Dış Tasarım Adı	D.T.sız C_p	D.T.lı C_p
1	Irabu ve Roy (2007)	Deneysel	Kılavuz-kutu tüneli	0,225	0,276
2	Deda Altan vd. (2008)	Deneysel	Perde düzeneği	0,160	0,380
3	Mohamed vd. (2010)	Doğrulanmış Sayısal Optimizasyon	Koruyucu engel	0,170	0,258
4	Tartuferi vd. (2015)	Deneysel Sayısal	Konveyör-yönlendirici perde sistemi	0,250	0,300
5	El-Askary vd. (2015)	Doğrulanmış Sayısal	Kılavuz plaka tasarımı	0,190	0,520
6	Kalluvila ve Sreejith (2018)	Deneysel Sayısal	Kılavuz kanat düzeneği	0,180	0,280
7	Mohammadi vd. (2018)	Doğrulanmış Sayısal	Lüle tasarımı	0,130	0,363
8	Layeghmand vd. (2020)	Doğrulanmış Sayısal	Uçak kanadı şekilli saptırıcı	0,237	0,313
9	Yuwono vd. (2020)	Deneysel	Dairesel silindir	0,178	0,200
10	Nimvari vd. (2020)	Doğrulanmış Sayısal	Gözenekli saptırıcı	0,249	0,274
11	Yahya vd. (2021)	Deneysel	Kılavuz kanatçık	0,017	0,028
12	Hesami vd. (2022)	Doğrulanmış Sayısal	Rüzgar merceği	0,167	0,210
13	Hesami vd. (2022)	Doğrulanmış Sayısal	Rüzgar merceği (ikili türbin ile)	0,167	0,358
14	Fatahian vd. (2022)	Doğrulanmış Sayısal	Nanofiber bazlı saptırıcı	0,250	0,272
15	Marinic-Kragic vd. (2022)	Doğrulanmış Sayısal Optimizasyon	Saptırıcı kanatlar	0,240	0,350
16	Tian vd. (2022)	Doğrulanmış Sayısal	Pasif saptırıcı	0,250	0,313

İki kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin performanslarının dış tasarım ile iyileştirilmesi gibi üç kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin performanslarının

iyileştirilmesi içinde dış tasarımlar geliştirilmiş ve etkileri incelenmiştir. Üç kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin dış tasarımlı ve dış tasarımsız maksimum güç katsayısı değerleri Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız üç kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayısı değerleri

T. No	Kaynak	Çalışma Tipi	Dış Tasarım Adı	D.T.sız C_p	D.T.lı C_p	Dış Tasarım Şekli
1	Irabu ve Roy (2007)	Deneyssel	Kılavuz-kutu tüneli	0,160	0,240	
2	Mohamed vd. (2010)	Doğrulanmış Sayısal Optimizasyon	Koruyucu engel	0,151	0,212	
3	Yao vd. (2013)	Sayısal Deneyssel	Kule davlumbazı	0,200	0480	
4	Manganhar vd. (2019)	Deneyssel	Çark evi	0,125	0,218	

3. MATERYAL VE METOT

Rüzgar türbinleri ile ilgili ilk teorik çalışma, Albert Betz tarafından 1919 yılında yapılmıştır (Dorel vd. 2021). Betz tarafından yapılan bu teorik çalışmada rüzgar türbini ideal olarak kabul edilmiştir. Bu kabule göre Betz, rüzgar türbinleri için teorik maksimum verimlilik değerinin yani Betz limitinin değeri %59,3 olarak hesaplanmıştır. Betz limiti bir rüzgar türbini için ulaşılacak maksimum teorik verim olarak bilinmektedir. Gerçek uygulamalarda ise özellikle rüzgar türbini dişlileri, jenaratörü, güç iletim sistemleri gibi bileşenlerin sistem verimliliği de göz önüne alındığında rüzgar türbinlerinin gerçek verimliliği Betz limitinin oldukça altındadır.

Rüzgar gücü ifadesi denklem 1’de verildiği gibi rüzgar hızına bağlı olarak hızın küpü ile orantılı olarak değişmektedir.

$$P_R = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3.1)$$

Burada;

P_R : Rüzgar Gücü (W)

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m³)

V : Rüzgarın hızı (m/s)

A : Türbin süpürme alanı (m²)’dir.

Rüzgar türbinlerinin performansı, güç katsayısı ile belirlenir. Güç katsayısı (C_p) denklem 2’de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$C_p = \frac{\text{Türbin çıkış gücü}}{\text{Rüzgar gücü}} = \frac{P_T}{P_R} = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (3.2)$$

Rüzgar türbinlerinin güç katsayıları, aynı zamanda kanat hızına bağlı olarak ta değişmektedir. Denklem 3’te verildiği gibi uç hız oranı (λ) kanat uç hızının rüzgar hızına bölümüyle hesaplanır.

$$\lambda = \frac{\text{Kanat uç hızı}}{\text{Rüzgar hızı}} = \frac{U}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (3.3)$$

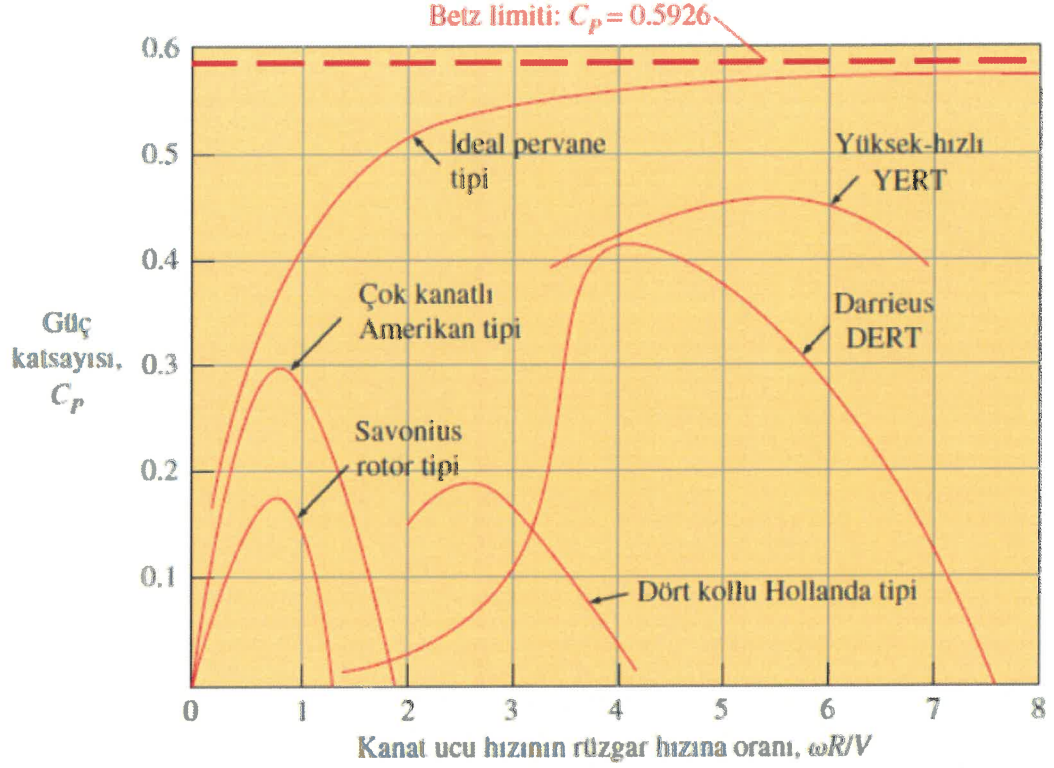
Burada;

ω : Açısal dönüş hızı (rad/s)

R : Türbin yarıçapı (m)

Çeşitli türbin tiplerinde C_p - λ değişimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi türbinlerin güç katsayıları Betz limitinin altında yer almaktadır. En

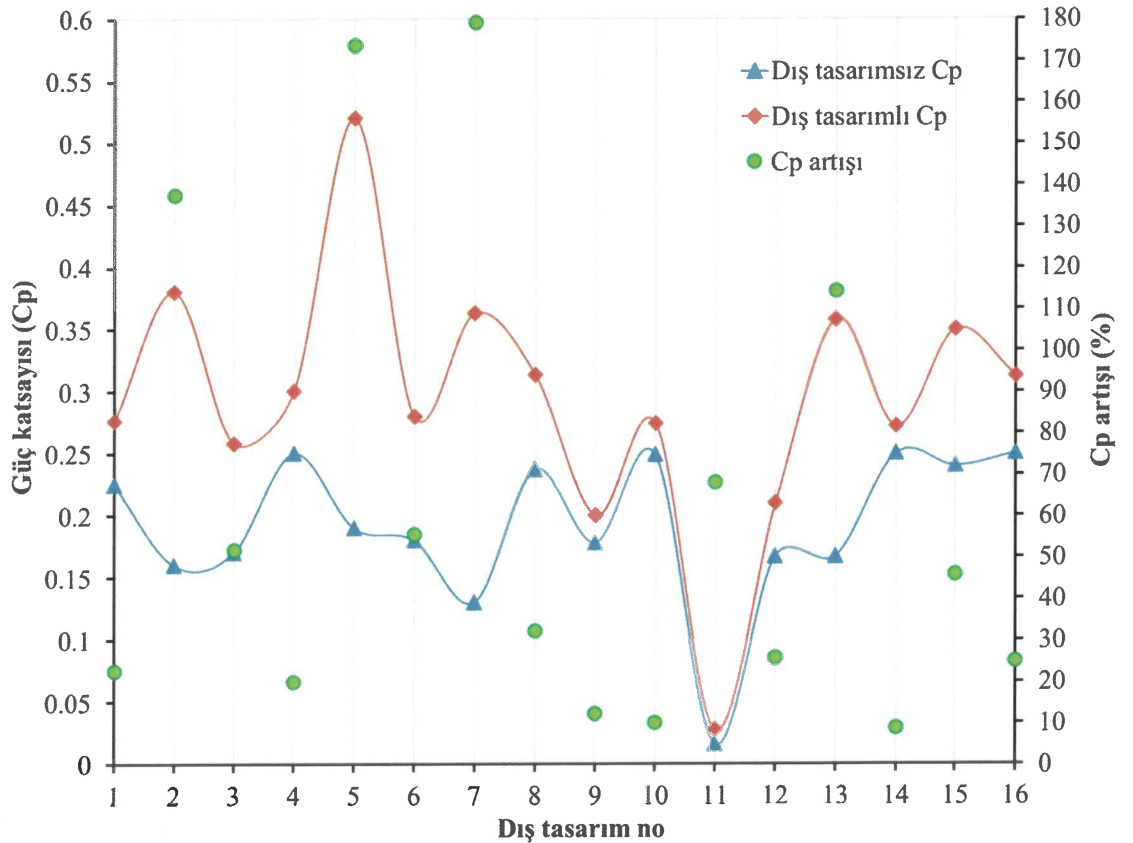
yüksek güç katsayısı değerlerinin yüksek hızlı yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT) ile elde edildiği şekilden de görülmektedir. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinden (DERT) Darrieus rüzgar türbinlerinin güç katsayıları diğer dikey eksenli Savonius rüzgar türbinlerine göre daha yüksektir. Şekilden de görüldüğü gibi Savonius rüzgar türbinin güç katsayısı 0,2 değerinin altındadır.



Şekil 3.1. Çeşitli türbin tiplerinde C_p - λ değişimi (Çengel ve Cimbala 2015)

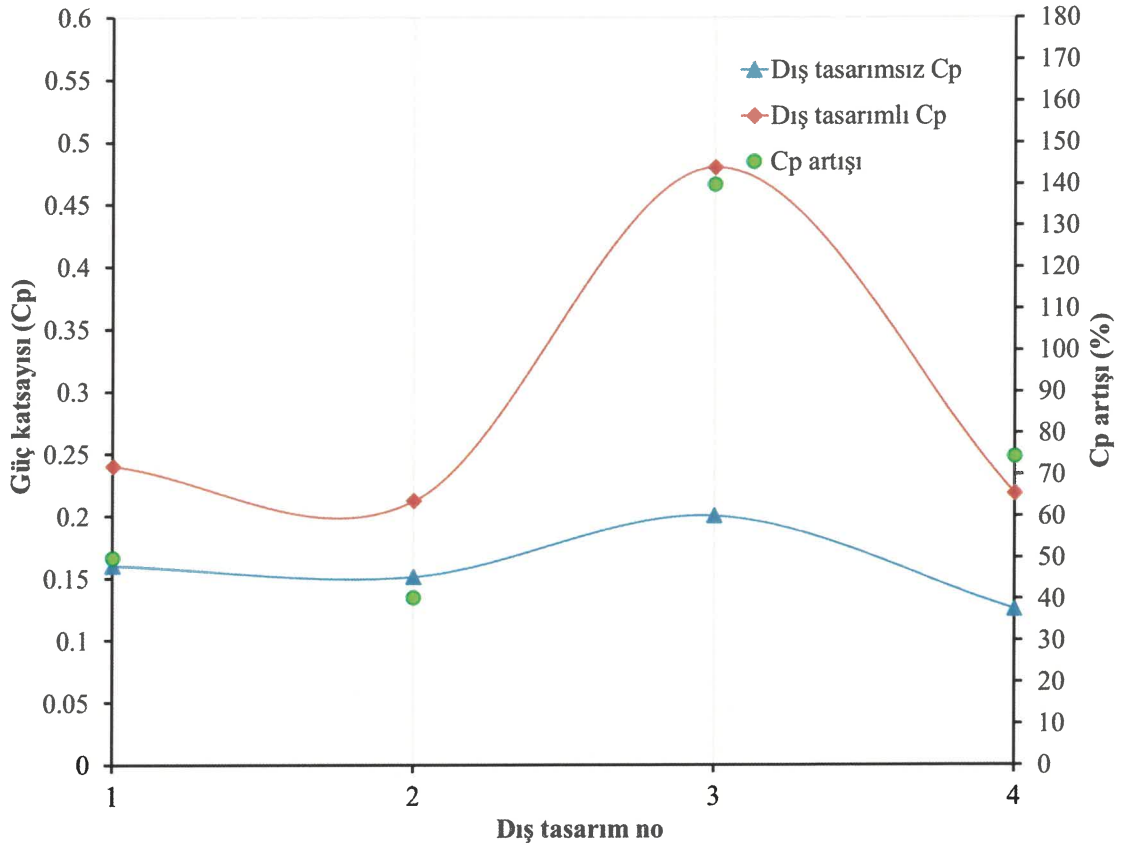
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Savonius rüzgar türbinlerinin klasik, dış ve yapısal tasarımı durumlarına göre literatür çalışmalarından elde edilen güç katsayıları grafikler halinde incelenmiştir. Aynı zamanda Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal veya dış tasarım koşullarına göre en iyi performans artışlarını değerlendirebilmek için güç katsayısının yüzdesel olarak artış değerleri de karşılaştırılmıştır. Güç katsayısının yüzdesel artışları Savonius rüzgar türbinlerinin klasik durumlarına göre hesaplanmıştır. Şekil 4.1’de gösterilen iki kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin dış tasarımı ve dış tasarımsız güç katsayıları ile artış yüzdesi Çizelge 2.8’e göre alınmıştır. Burada özellikle 2000’li yıllardan sonraki çalışmalar ele alınmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi dış tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları 0,016 ile 0,250 arasında değişik değerlerde elde edilmiştir. Savonius rüzgar türbinlerinin kendilerini değiştirmeden dış tasarım ilavesi ile bu güç katsayılarının 0,028 ile 0,520 aralığındaki değerlere arttırıldığı tespit edilmiştir. Yapılan dış tasarımların türbin üzerindeki verimliliklerini birbirleriyle karşılaştırabilmek için yüzdesel güç katsayısı artışları hesaplanmıştır. Yüzdesel güç katsayısı artışlarına göre en büyük artışın 7 numaralı lüle tasarımı isimli dış tasarım ile ve en düşük artışın da 14 numaralı nanofiber bazlı saptırıcı isimli dış tasarım ile elde edildiği tespit edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi %100’ün üzerinde güç katsayısı artışı sağlayan dış tasarımlar büyükten küçüğe sırasıyla; 7 numaralı lüle tasarımı, 5 numaralı kılavuz plaka tasarımı, 2 numaralı perde düzeneği ve 13 numaralı rüzgar merceği olarak tespit edilmiştir.



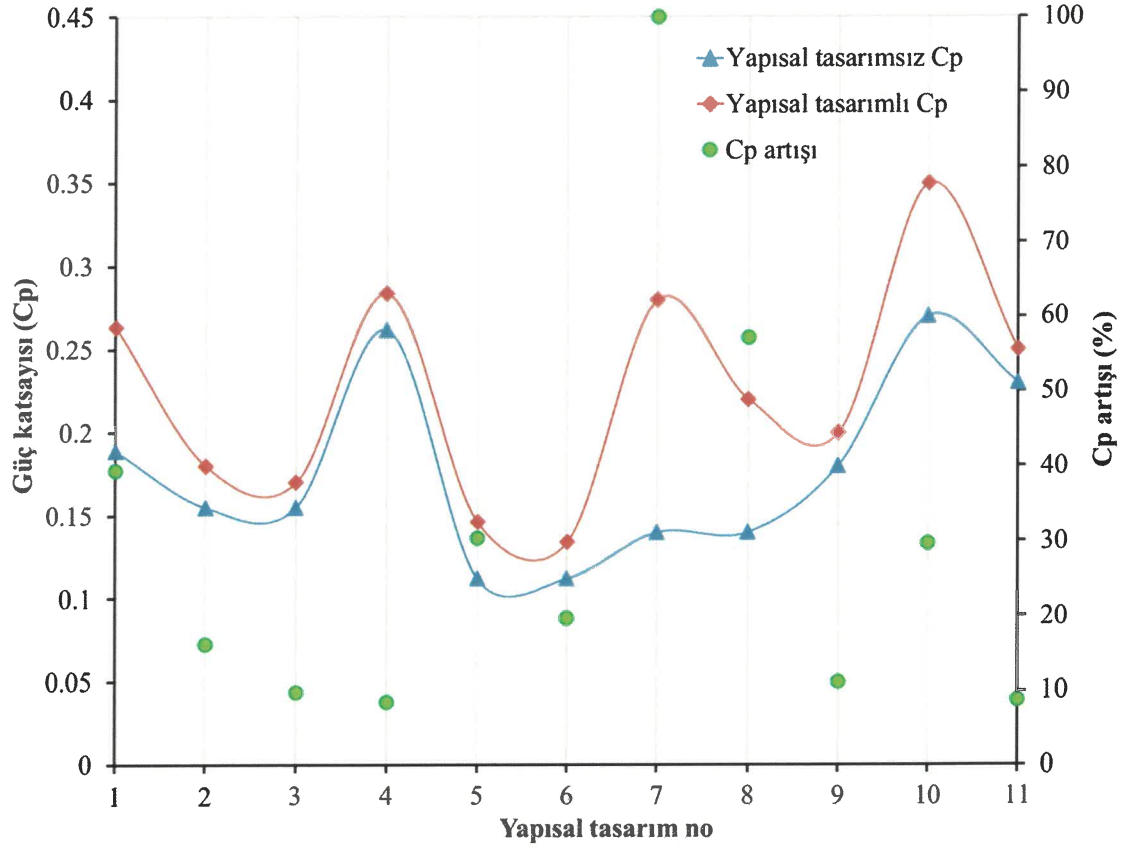
Şekil 4.1. Dış tasarımı ve dış tasarımsız iki kanatlı klasik Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması

Üç kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin dış tasarımlı ve dış tasarımsız güç katsayılarının karşılaştırılması Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Buradaki değerler Çizelge 2.9’a göre alınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi dış tasarımsız Savonius türbini ile güç katsayıları 0,125 ile 0,200 arasında elde edilmiştir. Dış tasarımlı Savonius türbini ile de güç katsayıları 0,212 ile 0,480 arasında elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en düşük güç katsayısı artışı %40 ile 2 numaralı koruyucu engel isimli dış tasarım ile elde edilmiştir. En büyük güç katsayısı artışı da %140 ile 3 numaralı kule davlumbazı isimli dış tasarım ile elde edilmiştir.



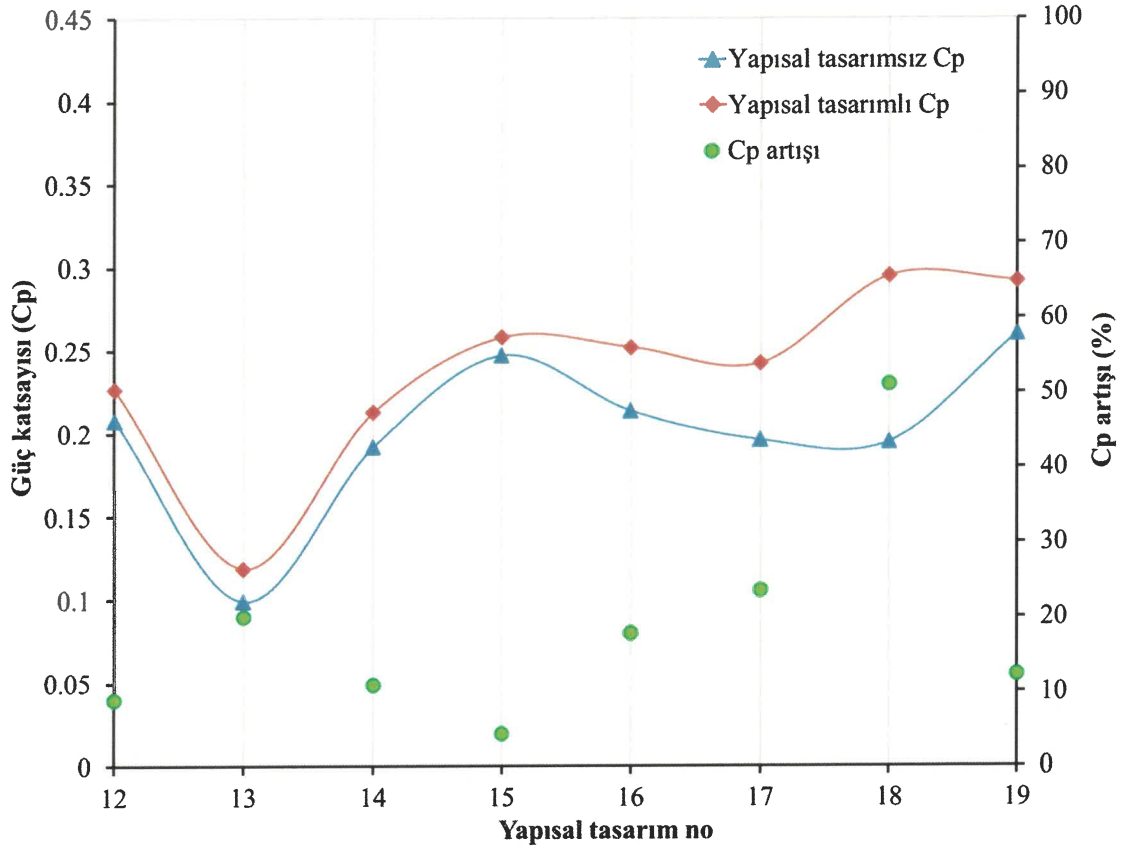
Şekil 4.2. Dış tasarımlı ve dış tasarımsız üç kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması

Savonius rüzgar türbinlerinin kanat profilinin kanat şekli açısından yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız güç katsayıları Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Buradaki güç katsayısı değerleri Çizelge 2.1’deki çalışmalardan alınmıştır. Yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbinleri arasında maksimum güç katsayısı 0,350 değerinde 10 numaralı Bezier eğrili kanat ile elde edilmiştir. Yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinde maksimum güç katsayısı 4 numaralı ve 10 numaralı çalışma ile elde edilmiştir. En büyük güç katsayısı artışı %100 ile 7 numaralı S-şekilli optimum bıçak tasarımı isimli yapısal tasarım ile elde edilmiştir. En düşük güç katsayısı artışı 4 numaralı kanat kavis açısı isimli yapısal tasarım ile elde edilmiştir. Diğer güç katsayısı artışları da incelendiğinde artışın ortalama %23 civarında olduğu belirlenmiştir.



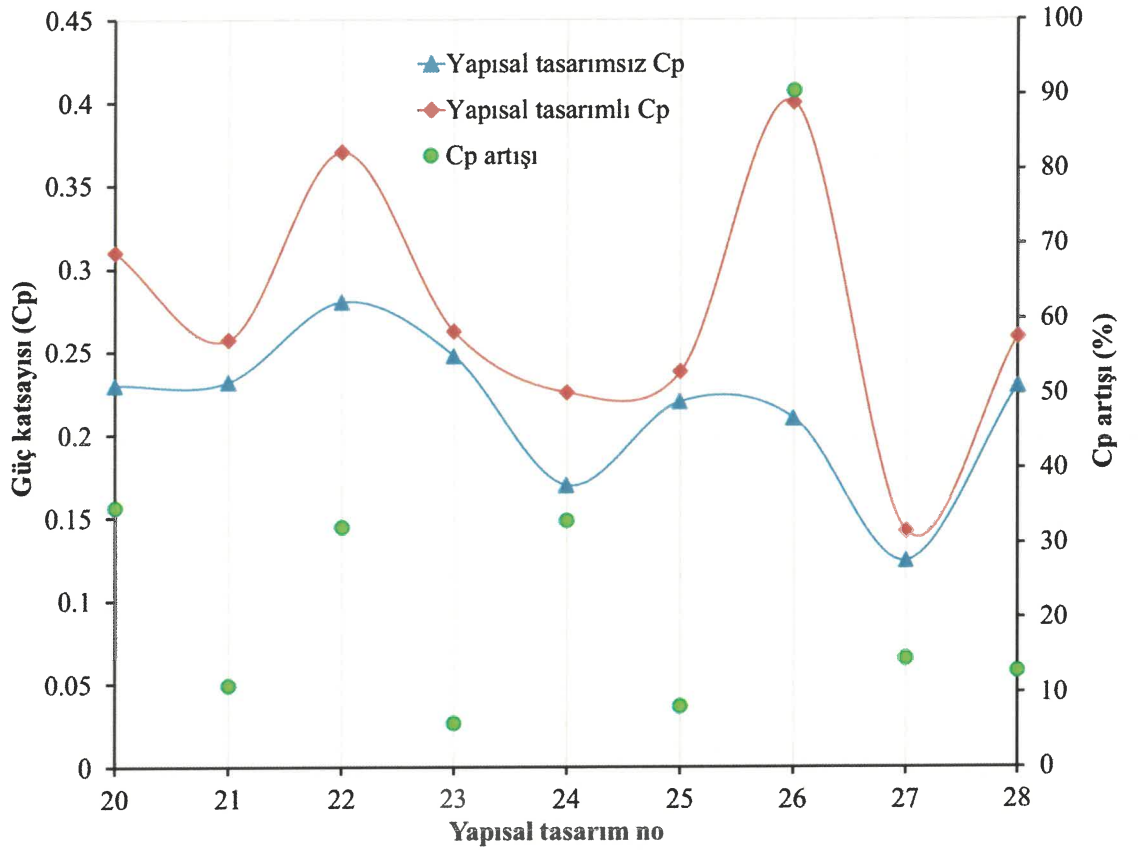
Şekil 4.3. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat profili; kanat şekli açısından)

Savonius rüzgar türbinlerinin kanat profilinin kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından yapılmış Çizelge 2.2'deki çalışmalardan elde edilen yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız güç katsayıları Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Kanat profilinin kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından güç katsayısı artışı incelendiğinde genel olarak %10 ile %20 aralığında artışların olduğu gözlemlenmiştir. En iyi güç katsayısı artışının 18 numaralı çok kanatlı geometri isimli yapısal tasarım ile %51 civarında olduğu tespit edilmiştir. Kanat eklentisi veya yüzey geometrisi ile yapılan yapısal tasarımlar ile güç katsayısının ortalama %18 civarında arttığı belirlenmiştir.



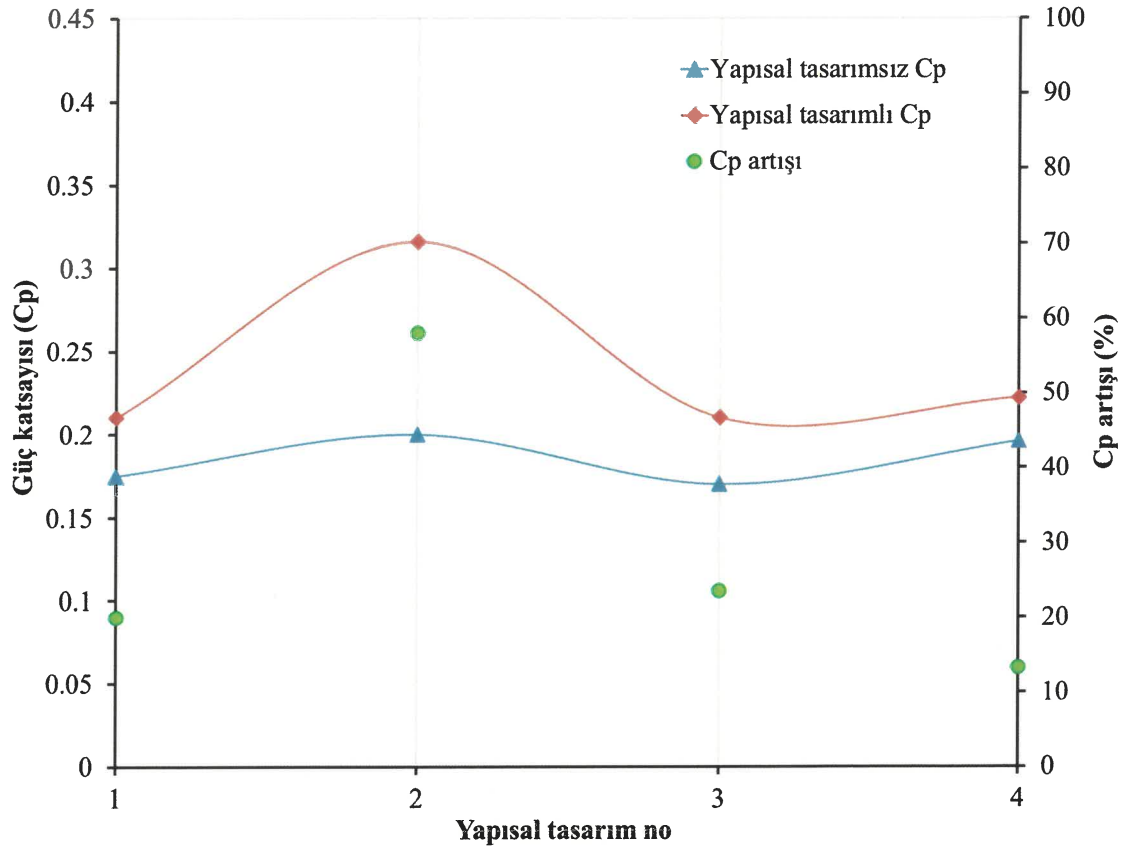
Şekil 4.4. Yapısal tasarımı ve yapısal tasarımı olmayan Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat profili; Kanat eklentisi ve kanat yüzey geometrisi açısından)

Savonius rüzgar türbinlerinin kanat profilinin farklı tasarım ve yaklaşım açısından yapısal tasarımı ve yapısal tasarımı olmayan çalışmaların güç katsayılarının karşılaştırılması Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Buradaki güç katsayıları için Çizelge 2.3’te ele alınan çalışmalardan yararlanılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi en büyük güç katsayısı 26 numaralı deforme olabilen kanat yapısal tasarımı ile 0,400 civarında tespit edilmiştir. Aynı yapısal tasarım ile de %90 civarında en iyi güç katsayısı artışı elde edilmiştir. En düşük güç katsayısı artışı da 23 numaralı optimum tasarım isimli yapısal tasarım ile %6 civarında tespit edilmiştir. Farklı tasarım ve yaklaşım açısından yapılan kanat profili değişikliği ile güç katsayısında ortalama %27 civarında iyileştirme yapılabildiği tespit edilmiştir.



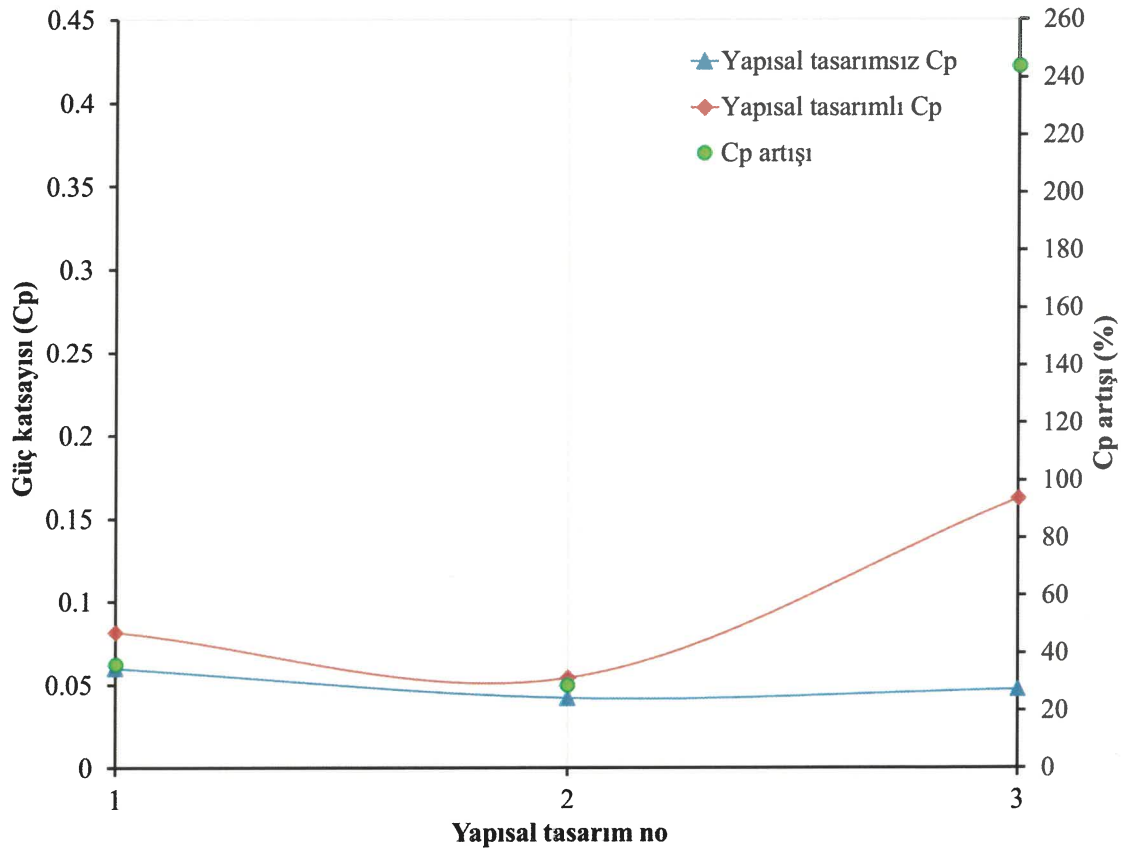
Şekil 4.5. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat profili; Farklı tasarım ve yaklaşım açısından)

Kanat tasarım oranları ile yapılan yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Buradaki değerler için Çizelge 2.5'te ele alınan çalışmalardan faydalanılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi güç katsayısındaki iyileştirmelerin %13 ile %58 aralığında ve ortalama %28 civarında olduğu tespit edilmiştir. En iyi güç katsayısı değerinin 2 numaralı yapısal tasarım koşullarında elde edildiği şekilden de görülmektedir.



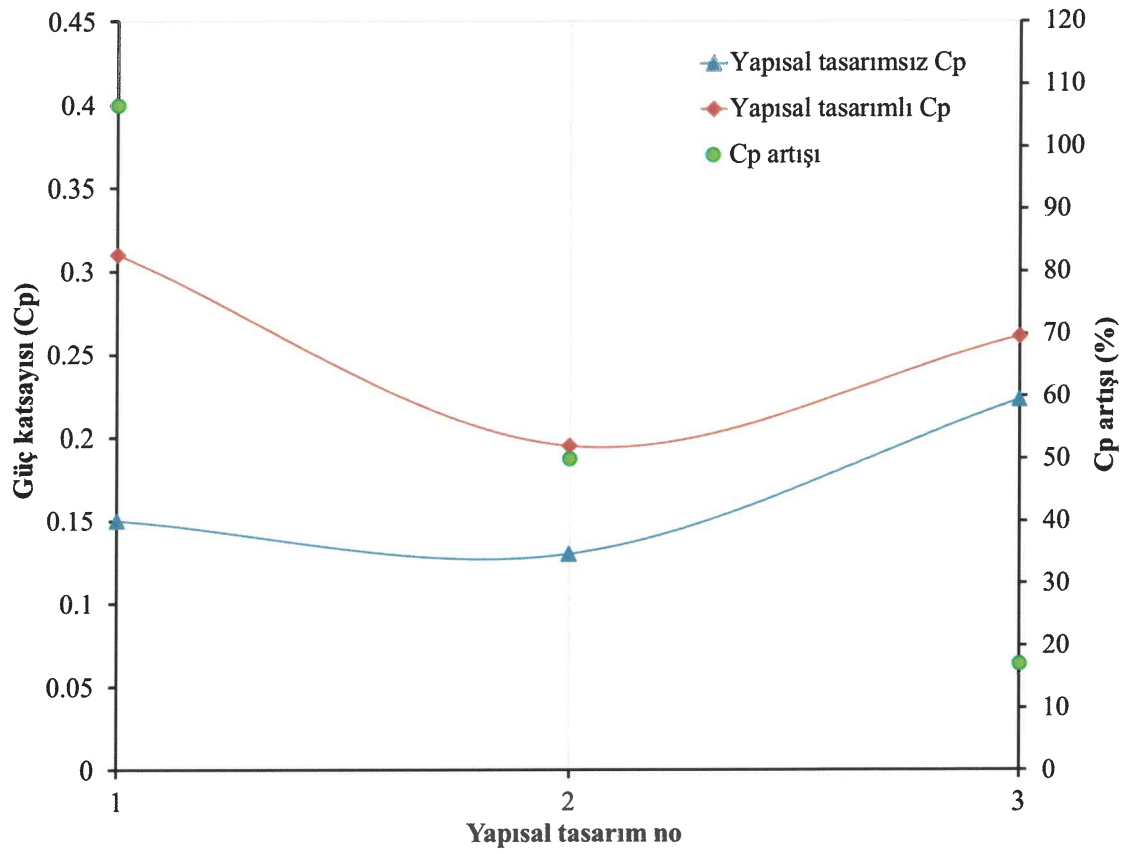
Şekil 4.6. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kanat tasarım oranları açısından)

Çizelge 2.6'da verilen uç plaka ile yapılan yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 1 ve 2 numaralı yapısal tasarımlı helisel Savonius rüzgar türbinlerindeki güç katsayısı iyileştirmelerinin ortalama %30 civarında olduğu tespit edilmiştir. 3 numaralı yapısal tasarımlı klasik Savonius türbininde ise güç katsayısının %244 civarında iyileştiği tespit edilmiştir. 3 numaralı klasik Savonius türbinin güç katsayısı uç plakasız durumunda 0,04 civarında oldukça düşük tespit edilirken uç plakalı halinde ise 0,16 civarında tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Uç plaka açısından)

Çizelge 2.7’de verilen kat sayısı ile ilgili yapılan yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayıları 0,13 ile 0,22 arasında değişik değerlerde elde edilmiştir. Yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbinleri ile bu güç katsayılarının 0,19 ile 0,31 aralığında arttırıldığı tespit edilmiştir. En büyük güç katsayısının artışı %105 ile 1 numaralı yapısal tasarımlı Savonius rüzgar türbini ile elde edilirken en düşük güç katsayısının artışı da %17 ile 3 numaralı yapısal tasarım ile elde edilmiştir.



Ŗekil 4.8. Yapısal tasarımlı ve yapısal tasarımsız Savonius rüzgar türbinlerinin güç katsayılarının karşılaştırılması (Kat sayısı açısından)

5. SONUÇLAR

Yenilenebilir ve temiz enerjinin hızla önem kazandığı günümüzde bu yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisinden daha iyi yararlanabilmek için rüzgar türbinleri ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinden birisi olan Savonius rüzgar türbinleri ise bu tez çalışmasının ana konusunu oluşturmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında Savonius türbinlerinin düşük olan güç performanslarını arttırmak amaçlı literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar araştırılmış, bu çalışmalar iki grupta toplanarak yapısal tasarımlar ve dış tasarımlar şeklinde incelenmiştir. Burada literatürde yapılan çalışmaların sonuçları çizelgeler halinde verilmiş ve bu sonuçlar değerlendirilerek güç katsayılarının değişimleri şekiller üzerinde incelenmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasına göre;

- Savonius rüzgar türbini üzerinde yapılan yapısal tasarım değişiklikleri ile türbin performanslarının arttırıla bilindiği gibi türbin üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan türbin dışına ilave edilen düzenekler ile de türbin performanslarının arttırıla bilineceği belirlenmiştir.
- Savonius rüzgar türbinlerinin yapısal tasarım değişiklikleri ile 0,200 değerinin altında olan güç katsayısı değerlerinin 0,400 seviyelerine kadar arttırıldığı tespit edilmiştir.
- Yapılan dış tasarımlar sayesinde dış tasarımlı Savonius rüzgar türbinleri ile güç katsayısı değerlerinin 0,520 seviyelerine kadar çeşitli seviyelerde arttırıldığı tespit edilmiştir.
- Dış tasarımlı iki kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin en büyük güç katsayısı artışının 7 numaralı lüle tasarımı isimli dış tasarım ile %180 civarında elde edildiği tespit edilmiştir.
- Dış tasarımlı iki kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinde %100'ün üzerinde güç katsayısı artışını sağlayan dış tasarımlar büyükten küçüğe sırasıyla; 7 numaralı lüle tasarımı (%180), 5 numaralı kılavuz plaka tasarımı (%173), 2 numaralı perde düzeneği (%138) ve 13 numaralı rüzgar merceği (%114) olarak tespit edilmiştir.
- Dış tasarımlı üç kanatlı Savonius rüzgar türbinlerinin en büyük güç katsayısı artışı %140 ile 3 numaralı kule davlumbazı isimli dış tasarım ile elde edilmiştir.
- Ele alınan çalışmalara göre Savonius rüzgar türbinlerinin ortalama güç katsayısı artışları yapısal tasarımlı durumunda %33 civarında elde edilirken dış tasarımlı durumunda ise %64 civarında elde edilmiştir.

Sonuç olarak literatürde yapılan bu çalışmalar Savonius rüzgar türbininin düşük olan performansının arttırılması yönünde oldukça önemli çalışmalardır. Temiz bir enerji olan rüzgar enerjisinden çok daha yaygın yararlanabilmek adına bu türbinlerin performanslarının arttırılması oldukça önemlidir. Böylelikle özellikle çevre ve hava kirliliği artışının son derece önemli olduğu günümüzde Savonius rüzgar türbinleri ile

rüzgar enerjisinden çok daha fazla yararlanabilmek adına bu çalışmaların değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılan bu tez çalışması ile de Savonius rüzgar türbinlerinin performanslarının arttırılmasında son yıllarda yapılan yapısal tasarımı ve dış tasarımı çalışmaların toplu halde bir araya getirilmesi sağlanarak literatüre bir kaynak oluşturulmuştur.

6. KAYNAKLAR

- Akwa, J.V. Junior, G.A.S. and Petry, A.P. 2012. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 38: 141-149.
- Akwa, J.V. Vielmo, H.A. and Petry, A.P. 2012. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(5): 3054-3064.
- Al Absi, S.M. Jabbar, A.H. Mezan, S.O. Al-Rawi, B.A. and Al Attabi, S.T. 2021. An experimental test of the performance enhancement of a Savonius turbine by modifying the inner surface of a blade. *Materials Today: Proceedings*, 42: 2233-2240.
- Alexander, A.I. and Holownia, B.P. 1978. Wind-tunnel tests on a Savonius rotor. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 3(4): 343-351.
- Alom N. and Saha U.K. 2018. Performance evaluation of vent-augmented elliptical-bladed Savonius rotors by numerical simulation and wind tunnel experiments. *Energy*, 152: 277-290.
- Apaydın, Ş. Güngör, A. ve Taşdoğan, C. 2019. Türkiye’de yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme üzerindeki asimetrik etkileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*. 6(1): 117-134.
- Bhayo, B.A. and Al-Kayiem, H.H. 2017. Experimental characterization and comparison of performance parameters of S-rotors for standalone wind power system. *Energy*, 138: 752-763.
- Chan, C.M. Bai, H.L. and He, D.Q. 2018. Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Applied Energy*, 213: 148-157.
- Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M. 2015. Akışkanlar Mekaniği. Palme Yayıncılık, Ankara, 984 s.
- Damak, A. Driss, Z. and Abid, M.S. 2018. Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 174: 80-93.
- Deda Altan, B. Altan, G. and Kovan, V. 2016. Investigation of 3D printed Savonius rotor performance. *Renewable Energy*, 99: 584-591.
- Deda Altan, B. and Atılğan, M. 2010. The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. *Renewable Energy*, 35: 821-829.
- Deda Altan, B. Atılğan, M. and Ozdamar, A. 2008. An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32: 1673–1678.
- Dorel, S.F. Mihai, G.A. and Nicusor; D. 2021. Review of specific performance parameters of vertical wind turbine rotors based on the Savonius type. *Energies*, 14: 1962.
- El-Askary, W.A. Nasef, M.H. Abdel-Hamid, A.A. and Gad, H.E. 2015. Harvesting wind energy for improving performance of Savonius rotor. *Journal of Wind*

- Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139: 8-15.
- El-Askary, W.A. Saad, A.S. AbdelSalam, A.M. and Sakr, I.M. 2018. Investigating the performance of a twisted modified Savonius rotor. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 182: 344-355.
- Fatahian, H. Hosseini, E. Nimvari, M.E. Fatahian, R. Jouybari, N.F. and Fatahian, E. 2022. Performance enhancement of Savonius wind turbine using a nanofiber-based deflector. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44: 98.
- Frikha, S.Driss, Z. Ayadi, E. Masmoudi, Z. and Abid, M.S. 2016. Numerical and experimental characterization of multi-stage Savonius rotors. *Energy*, 114: 382-404.
- Fujisawa, N. 1992. On the torque mechanism of Savonius rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40(3): 277-292.
- Fujisawa, N. and Gotoh, F. 1992. Visualization study of the flow in and around a Savonius rotor. *Experiments in Fluids*, 12(6): 407-412.
- Gallo, L.A. Chica, E.L. Florez, E.G. and Obando, F.A. 2021. Numerical and experimental study of the blade profile of a Savonius type rotor implementing a multi-blade geometry. *Applied Sciences*, 11: 10580.
- Goodarzi, M. and Salimi, S. 2021. Numerical assessment of the effect of different end-plates on the performance of a finite-height Savonius turbine, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, DOI:10.1080/15567036.2021.1976324.
- Haddad, H.Z. Elsayed, K. Shabana, Y.M. and Mohamed, M.H. 2021. Comprehensive influence of the additional inner blades with different configurations on the performance of a Savonius wind turbine, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, DOI: 10.1080/15567036.2021.1956645.
- Halmy, M.S.M. Didane, D.H. Afolabi, L.O. and Al-Alimi, S. 2021. Computational fluid dynamics (CFD) study on the effect of the number of blades on the performance of double-stage Savonius rotor. *CFD Letters*, 13(4): 1-10.
- Hesami, A. Nikseresht, A.H. and Mohamed, M.H. 2022. Feasibility study of twin-rotor Savonius wind turbine incorporated with a wind-lens. *Ocean Engineering*, 247: 110654.
- Imeni, S.Z.H. Kaabinejadian, A. Ahmadi, H.A. and Moghimi, M. 2022. Optimal design and sensitivity analysis of airfoil-shaped rotor blade for Savonius wind turbine by using response surface methodology. *Wind Engineering*, 1-21. DOI: 10.1177/0309524X211072868.
- Irabu, K. and Roy, J.N. 2007. Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32: 580-586.
- Jeon, K.S. Jeong, J.I. Pan, J.K. and Ryu, K.W. 2015. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 79: 167-176.
- Kacprzak K. Liskiewicz G. and Sobczak K. 2013. Numerical investigation of

- conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 60: 578-585.
- Kalluvila, J.B.S. and Sreejith, B. 2018. Numerical and experimental study on a modified Savonius rotor with guide blades. *International Journal of Green Energy*, 15(12): 744-757.
- Kamoji, M.A. Kedare, S.B. and Prabhu, S.V. 2008. Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor. *International Journal of Energy Research*, 32(10): 877-895.
- Kamoji, M.A. Kedare, S.B. and Prabhu, S.V. 2009. Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86: 1064-1073.
- Karagöl, E.T. ve Kavaz, İ. 2017. Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji. *Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları (SETA) Vakfı Yayınları*, 197: 7-28.
- Kothe, L.B. Möller, S.V. and Petry, A.P. 2020. Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine. *Renewable Energy*, 148: 627-638.
- Kum, H. 2009. Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Dünya piyasalarındaki son gelişmeler ve politikalar. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33: 207-223.
- Lajnef, M. Mosbahi, M. Chouaibi, Y. and Driss, Z. 2020. Performance improvement in a helical Savonius wind rotor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45: 9305-9323.
- Layeghmand, K. Tabari, N.G. and Zarkesh, M. 2020. Improving efficiency of Savonius wind turbine by means of an airfoil-shaped deflector. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42: 528.
- Manganhar, A.L. Rajpar, A.H. Luhur, M.R. Samo, S.R. and Manganhar, M. 2019. Performance analysis of a savonius vertical axis wind turbine integrated with wind accelerating and guiding rotor house. *Renewable Energy*, 136: 512-520.
- Mao, Z. and Tian, W. 2015. Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(5): 1-10.
- Marinic-Kragic, I. Vucina, D. and Milas, Z. 2019. Concept offlexible vertical-axis wind turbine with numerical simulation and shape optimization. *Energy*, 167: 841-852.
- Marinic-Kragic, I. Vucina, D. and Milas, Z. 2022. Robust optimization of Savonius-type wind turbine deflector blades considering wind direction sensitivity and production material decrease. *Renewable Energy*, 192: 150-163.
- Menet, J.L. 2004. Adouble-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Renewable Energy*, 29: 1843-1862.
- Mohamed, M.H. Janiga, G. Pap, E. and Thévenin, D. 2010. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. *Renewable Energy*, 35: 2618-2626.
- Mohammadi, M. Lakestani, M. and Mohamed, M.H. 2018. Intelligent parameter optimization of Savonius rotor using Artificial Neural Network and Genetic

- Algorithm. *Energy*, 143: 56-68.
- Mohammadi, M. Mohammadi, R. Ramadan, A. and Mohamed, M.H. 2018. Numerical investigation of performance refinement of a drag wind rotor using flow augmentation and momentum exchange optimization. *Energy*, 158: 592-606.
- Mrigua, K. Toumib, A. Zemamoua, M. Ouhammoua, B. Lahloua, Y. and Aggoura, M. 2020. CFD Investigation of a new elliptical-bladed multistage Savonius rotors. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 9(3): 383-392.
- Nasef, M.H. El-Askary, W.A. AbdEL-Hamid, A.A. and Gad, H.E. 2013. Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 123: 1-11.
- Nimvari, M.E. Fatahian, H. and Fatahian, E. 2020. Performance improvement of a Savonius vertical axis wind turbine using a porous deflector. *Energy Conversion and Management*, 220: 113062.
- Ogawa, T. and Yoshida, H. 1986. The effects of a deflecting plate and rotor end plates on performances of Savonius-type wind turbine. *Bulletin of the Jsme-Japan Society of Mechanical Engineers*, 29(253): 2115-2121.
- Ostos, I. Ruiz, I. Gajic, M. Gomez, W. Bonilla, A. and Collazos, C. 2019. A modified novel blade configuration proposal for a more efficient VAWT using CFD tools. *Energy Conversion and Management*, 180: 733-746.
- Öztürk, H. 2021. Yenilenebilir Enerji Kaynakları. Birsen Yayın Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul, 677 s.
- Premkumar, T.M. Sivamani, S. Kirthies, E. Hariram, V. and Mohan, T. 2018. Data set on the experimental investigations of a helical Savonius style VAWT with and without end plates. *Data in Brief*, 19: 1925-1932.
- Ramadan, A. Yousef, K. Said, M. and Mohamed, M.H. 2018. Shape optimization and experimental validation of a drag vertical axis wind turbine. *Energy*, 151: 839-853.
- Ramarajan, J. and Jayavel, S. 2022. Performance improvement in Savonius wind turbine by modification of blade shape. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(1): 99-107.
- Roy, S. and Ducoin, A. 2016. Unsteady analysis on the instantaneous forces and moment arms acting on a novel Savonius-style wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 121: 281-296.
- Roy, S. and Saha, U.K. 2015. Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy*, 137: 117-125.
- Saad, A.S. Elwardany, A. El-Sharkawy, I.I. Ookawara, S. and Ahmed, M. 2021. Performance evaluation of a novel vertical axis wind turbine using twisted blades in multi-stage Savonius rotors. *Energy Conversion and Management*, 235:114013.
- Saeed, H.A.H. Elmekawy, A.M.N. and Kassab, S.Z. 2019. Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes. *Alexandria Engineering Journal*, 58: 429-441.

- Saha, U.K. and Rajkumar, M.J. 2006. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 31(11): 1776-1788.
- Saha, U.K. Thotla, S. and Maity, D. 2008. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 1359-1375.
- Sharma, S. and Sharma, R.K. 2016. Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades-A CFD investigation. *Energy Conversion and Management*, 127: 43-54.
- Sharma, S. and Sharma, R.K. 2017. CFD investigation to quantify the effect of layered multiple miniature blades on the performance of Savonius rotor. *Energy Conversion and Management*, 144: 275-285.
- Sheldahl, R.E. Blackwell, B.F. and Feltz, L.V. 1978. Wind-tunnel performance data for 2-bucket and 3-bucket Savonius rotors. *Journal of Energy*, 2 (3): 160-164.
- Sobczak, K. Obidowski, D. Reorowicz, P. and Marchewka, E. 2020. Numerical investigations of the Savonius turbine with deformable blades. *Energies*, 13:3717.
- Tartuferia, M. D'Alessandro, V. Montelpare, S. and Ricci, R. 2015. Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: a computational study of new blade shapes and curtain systems. *Energy*, 79: 371-384.
- Tian, W. Bian, J. Yang, G. Ni, X. and Mao, Z. 2022. Influence of a passive upstream deflector on the performance of the Savonius wind turbine. *Energy Reports*, 8: 7488-7499.
- Tian, W. Song, B. VanZwieten, J.H. and Pyakurel, P. 2015. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*, 8: 7915-7929.
- Tiana, W. Mao, Z. Zhang, B. and Li, Y. 2018. Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides. *Renewable Energy*, 117: 287-299.
- Yahya, W. Ziming, K. Juan, W. Qurashi, M.S. Al-Nehari, M. and Salim, E. 2021. Influence of tilt angle and the number of guide vane blades towards the Savonius rotor performance. *Energy Reports*, 7: 3317-3327.
- Yao, Y.X. Tang, Z.P. and Wang, X.W. 2013. Design based on a parametric analysis of a drag driven VAWT with a tower cowling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 116: 32-39.
- Yuwono, T. Sakti, G. Aulia, F.N. A and Wijaya, A.C. 2020. Improving the performance of Savonius wind turbine by installation of a circular cylinder upstream of returning turbine blade. *Alexandria Engineering Journal*, 59: 4923-4932.
- Zemamou, M. Toumi, A. Mrigua, K. Lahlou Y. and Aggour M. 2020. A novel blade design for Savonius wind turbine based on polynomial bezier curves for aerodynamic performance enhancement. *International Journal of Green Energy*, 17(11): 652-665.
- Zhang, B. Song, B. Mao, Z. Tian, W. Li, B. and Li, B. 2017. A Novel parametric modeling method and optimal design for Savonius wind turbines. *Energies*,

10(301): 1-20.

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

ÖZGEÇMİŞ

Gürsel Seha GÜLTEKİN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2019-2022	Akdeniz Üniversitesi, Antalya Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans 2012	Akademia Obrony Narodowej, Varşova/Polonya (National Defence University) E-Learning Module Programmer
Lisans 2008-2009	Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği İntibak Eğitimi
Lisans 2003-2008	Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Kontrol Mühendisi 2017-Devam Ediyor	DSİ 13. Bölge Müdürlüğü, Antalya Elektromekanik Teçhizat Şube Müdürlüğü
Kontrol Mühendisi 2012-2017	DSİ KKTC Proje Müdürlüğü, Girne/KKTC KKTC Su Temin Projesi Deniz Geçişi İsale Hattı
Mühendis 2010-2012	DSİ 22. Bölge Müdürlüğü, Trabzon 223. Şube Müdürlüğü, Gümüşhane
Gemi Makineleri İşletme Mühendisi 2008-2010	KIRAN Holding, İstanbul M/V KIRAN ASYA, 66533 DWT, 238.15 m. M/V GÖKHAN KIRAN, 36626 DWT, 193.81 m. M/V GÖKAY K., 7690 DWT, 116,1 m TK Tuzla (Sadıkoğlu) Tersanesi