



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



AKIŞ ÜZERİNDEKİ PERİYODİK
DÜZENSİZLİKLER TARAFINDAN
ÜRETİLEN TİTREŞİM İLE REZONANSA
GİREREK OLUŞAN MEKANİK ENERJİYİ
ELEKTRİĞE DÖNÜŞTÜREBİLEN
AEROJENERATÖR TASARIMI VE
OPTİMİZASYONU

Ömer Birhat YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer Birhat YILDIZ tarafından hazırlanan “Akış Üzerindeki Periyodik Düzensizlikler Tarafından Üretilen Titreşim ile Rezonansa Girerek Oluşan Mekanik Enerjiyi Elektrığe Dönüştürebilen Aerojeneratör Tasarımı ve Optimizasyonu” adlı tez çalışması 27/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Haşmet Çağrı SEZGEN

.....

Danışman

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Haşmet Çağrı SEZGEN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ömer Birhat YILDIZ

Tarih: 27/06/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKIŞ ÜZERİNDEKİ PERİYODİK DÜZENSİZLİKLER TARAFINDAN ÜRETİLEN TİTREŞİM İLE REZONANSA GİREREK OLUŞAN MEKANİK ENERJİYİ ELEKTRİĞE DÖNÜŞTÜREBİLEN AEROJENERATÖR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Ömer Birhat YILDIZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa TINKIR

2024, 82 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

Dr. Öğr. Üyesi Haşmet Çağrı SEZGEN

Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE

Günümüz toplumlarının en büyük ihtiyaçlarından biri hiç kuşkusuz enerjidir. Enerji, insanların yaşamlarını sürdürebilmesi ve ihtiyaçlarını karşılayabilmesi adına ele aldıkları tüm faaliyetlerde en büyük gereksinim haline aldı. Hatta su ve besin gibi temel ihtiyaçlarımızın temininde bile enerjiye bağımlıyız. Son zamanlarda enerjinin maliyetindeki artış, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve önemin artmasını sağlamıştır. Yenilenebilir rüzgâr enerji sistemlerinin kullanımı, küresel ısınma ve iklimsel değişiklikler ile mücadele açısından önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle şebeke bağlantısı olmayan kırsal bölgelerdeki küçük yerleşim alanları ve tarımsal faaliyetler için rüzgâr enerjisi dikkate alınması gereken önemli enerji kaynaklarından biridir.

Bu çalışmada yeni bir teknoloji olan rüzgâr kaynaklı titreşim ile rezonansa girerek oluşan mekanik enerjiyi elektrığe dönüştürebilen arojeneratör fikrinin temelleri kapsamında yapı ve geometri, enerji dönüşümü, sistematiği, malzeme ve kullanım ömrü, maliyet etkinliği, üretim kapasitesi, çevresel etkileri başlıkları çerçevesinde verilerin elde edilmesi ve sistemin limitlerinin incelenmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada tasarım için farklı konfigürasyonlar da oluşturulmuş olup analizde maksimum yer değiştirme 0,78m olarak bulunmuştur. Yapılan iki boyutlu model analizinde Cd ve Cl değerleri hesaplanmış, Cd değerinin, -0,8 ile 0,8 değerleri arasında değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Cl değerinin 1.4 ile 1.51 arasında bir aralıkta olduğu bulundu ve bu Re-Cd eğrisindeki değere yakınlığı ile doğrulanmıştır. Yapılan üç boyutlu akış süresi boyunca serbest akış hızının x yönündeki ortalama hız grafiği oluşturulmuş ve grafikteki sayısal verilerle FFT aracılığıyla Güç Yoğunluğu-Frekans grafiği elde edilmiştir. Buna göre birim frekans başına düşen gücün 0.5 Hz'ten düşük frekansta yüksek olduğu görülmüştür. Ulaşılan veriler, diğer türlerine göre daha avantajlı olduğu için yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri hakkında oluşturulan verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Türkiye'nin rüzgâr enerjisinin potansiyeli ve Türkiye'nin sahip olduğu enerji profilindeki yerine göre incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aeroelastisite, Arojeneratör, Girdap Alternatörü, Girdap Kaynaklı Titreşim, Kanatsız Rüzgâr Türbini, Rezonans, Rüzgâr Enerjisi, Titreşim, Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN AND OPTIMIZATION OF AEROGENERATORS THAT CAN CONVERT MECHANICAL ENERGY INTO ELECTRICITY BY RESONATING WITH VIBRATION PRODUCED BY PERIODIC IRREGULARITIES IN THE FLOW

Ömer Birhat YILDIZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Mustafa TINKIR

2024, 82 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. Mustafa TINKIR
Asst. Prof. Haşmet Çağrı SEZGEN
Asst. Prof. Erdi GÜLBAHÇE

One of the greatest needs of today's societies is undoubtedly energy. Energy has become the biggest requirement in all activities that people undertake to sustain their lives and meet their needs. We are even dependent on energy for our basic needs such as water and food. Recently, the increase in the cost of energy has led to an increase in interest and importance to renewable energy sources. The use of renewable wind energy systems has an important place in terms of combating global warming and climatic changes. Wind energy is one of the important energy sources to consider, especially for small settlements and agricultural activities in rural areas without grid connection.

In this study, within the scope of the fundamentals of the aerogenerator idea, which can convert mechanical energy into electricity by entering into resonance with wind-induced vibration, which is a new technology, data are obtained within the framework of structure and geometry, energy conversion, systematics, material and lifespan, cost effectiveness, production capacity, environmental effects and the system is examined. An effort was made to examine its limits. In the study, different configurations were created for the design and in the analysis, the maximum displacement was found to be 0.78m. In the two-dimensional model analysis, Cd and Cl values were calculated, and it was concluded that the Cd value varied between -0.8 and 0.8. The Cl value was found to be in a range between 1.4 and 1.51, and this was confirmed by its closeness to the value in the Re-Cd curve. During the three-dimensional flow period, the average velocity graph of the free flow velocity in the x direction was created and the Power Density-Frequency graph was obtained via FFT with the numerical data in the graph. Accordingly, it was observed that the power per unit frequency was higher at frequencies lower than 0.5 Hz. The data obtained was compared with the data created about horizontal axis wind turbines, which are widely used because they are more advantageous compared to other types. The results were examined according to Turkey's wind energy potential and its place in Turkey's energy profile.

Keywords: Aeroelasticity, Aerogenerator, Bladeless Wind Turbine, Horizontal Axis Wind Turbine, Resonance, Vibration, Vortex Alternator, Vortex Induced Vibration, Wind Energy

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, akış üzerindeki periyodik düzensizlikler tarafından üretilen titreşim ile rezonansa girerek oluşan mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör tasarımı ve optimizasyonu üzerine yapılan araştırmaların ve çalışmaların sonucunu ve bulgularını sunmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, Makine Mühendisliği programı kapsamında tamamlanan bir çalışma olup, Necmettin Erbakan Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sürecinde, birçok kişiye teşekkür borçluyum. İlk olarak, tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa TINKIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunmak isterim. Kendisinin bilgeliği, sabrı ve samimiyeti, bu tezin olgunlaşmasında kritik bir rol oynamıştır. Ayrıca, tezimde yardımcı olan diğer öğretim üyeleri, akademisyenler ve profesyonellerin değerli görüşlerine, eleştirilerine ve önerilerine minnettarım. Sizlerin deneyimlerinden ve bilgilerinizden faydalanmak, bu çalışmayı daha da zenginleştirdi. Aileme ve sevdiklerime teşekkür etmek istiyorum. Onların sürekli desteği ve anlayışı, bu yolculuk boyunca beni motive etti ve güçlendirdi. Sizlerin varlığı, her zaman beni ileriye taşıdı. Son olarak, bu tez çalışmasının tamamlanmasında emeği geçen herkese teşekkür etmek istiyorum. Sizlerin destekleri ve katkıları olmadan, bu çalışma başarıyla tamamlanamazdı.

Umarım bu tez, bilimsel dünyaya ve topluma katkı sağlayan, akışın titreşimsel özelliği konusunda ilgilenenler için faydalı bir kaynak ve gelecek çalışmalara ilham veren bir çalışma olur.

Saygılarımla...

Ömer Birhat YILDIZ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Rüzgâr Kaynaklı Mekanik Enerjiyi Elektriğe Dönüştürebilen Aerojeneratör Tasarımı	17
3.1.1. Sistemin Aerodinamiği ve Sistemde Enerjinin Oluşumu	18
3.1.2. Yapı ve Geometri.....	23
3.1.3. Enerji Dönüşümü	26
3.1.4. Frekans Ayarı.....	27
3.1.5. Girdap Alternatörü.....	30
3.1.6. Malzemeler ve Kullanım Ömrü	31
3.2. Aerojeneratör için Tasarım, Analiz ve Optimizasyon	32
3.2.1. Aerojeneratör için Modelleme ve Analiz Hazırlığı	33
3.2.2. Aerojeneratör için Tasarımın İki Boyutlu Model Analizi	37
3.2.3. Aerojeneratör için Tasarımın Üç Boyutlu Model Analizi	38
3.3. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (HAWT) Tasarımı	41
3.3.1. Türbinin Aerodinamiği	42
3.3.2. Kanat Tasarımı.....	43
3.3.3. Nasel (Makine Yuvası) Tasarımı	43
3.3.4. Türbinin Güç Kontrolü ve Diğer Kontrol Mekanizması Prensipleri	43
3.3.5. Frenleme Sistemi Tasarımı	44
3.3.6. Açık Deniz Kurulumu (Offshore) için Gerekli Olan Destek Yapısı	45
3.3.7. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin (HAWT) Modellenmesi.....	45
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	53
4.1. Akışkan-Yapı Etkileşim Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	53
4.1.1. 2 Boyutlu Model Analizi için Kaldırma ve Sürüklenme Katsayıları Sonucu ve Değerlendirilmesi.....	55
4.1.2. 3 Boyutlu Model Analizi için Sonuçlar ve Değerlendirilmesi	58
4.1.3. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin MATLAB Model Simülasyon Sonuçları	60
4.2. Aerojeneratör ve Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin Karşılaştırılması.....	61
4.2.1. Maliyet Etkinliği	62

4.2.2. Üretim Kapasitesi	63
4.2.3. Çevresel Etki.....	64
4.2.4. Atmosferik Adaptasyon	66
4.3. Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisinin Potansiyeli ve Sonuçların Türkiye'nin Sahip Olduğu Enerji Profilindeki Yerine Göre Değerlendirilmesi.....	69
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
5.1 Sonuçlar	74
5.2 Öneriler	75
6. KAYNAKLAR.....	77



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f	Frekans (Hz)
Φ	Silindirik Yapının Karakteristik Uzunluğu
v	Hız (m/s)
S_t	Strouhal Sayısı
D	Direk Çapının Toplamı
X	Salınım Genliği
a	Reynolds Sayısına Bağlı Olan Bir Ayarlama Faktörü
F	Dış Kuvvetler
k	Yay Elemanı Sabiti
c	Sönüm Eleman Sabiti
b	Manyetik Kuvvet Yay Elemanı Sabiti
k'	Manyetik İtmeye Karşılık Gelen Esneklik Miktarı
ρ	Akış Yoğunluğu
U_∞	Serbest Akış Hızı
L	Karakteristik Uzunluk
μ	Dinamik Viskozite
$f(v)$	Girdap Saçılma Frekansı
$f(n)$	Doğal Frekans
m	Kütle (Kg)
F_D	Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti
F_L	Aerodinamik Kaldırma Kuvveti
A	Hareketli Hava Akımının Dinamik Basıncının Etki Ettiği Yüzey Alanı
C_d	Sürüklenme Katsayısı
C_l	Kaldırma Katsayısı
P	Güç (Watt)
C_P	Boyutsuzlaştırma İlkesi Güç Katsayısı
C_T	Boyutsuzlaştırma İlkesi İtme Katsayısı
λ	Boyutsuzlaştırma İlkesi Hız Oranı
C_L	Boyutsuzlaştırma İlkesi Kaldırma Katsayısı

Kısaltmalar

AC	Alternative Current
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
COP25	BM İklim Değişikliği Konferansı
DC	Direct Current
FFT	Fast Fourier Transform
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
SST	Shear Stress Transport
VIV	Vortex -Induced Vibration
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması
dB	Desibel
GW	Gigawatt
Hz	Hertz
km ²	Kilometrekare
KW	Kilowatt
m	Metre
MW	Megawatt
Re	Reynolds
W	Watt

1. GİRİŞ

Günümüzde yaşanan olayları göz önüne getirdiğimiz zaman enerjinin insan hayatının yanı sıra ülkelerin ayakta durmasında, kalkınmasında önemli rol oynadığını ve enerji özgürlüğünün, ulusal bağımsızlığın temel taşı olduğunu görürüz (Kahriman, 2022).

Temiz enerji ise bu ihtiyacın en trend noktalarından biridir. Enerji elde etmenin yanı sıra enerjinin verimli bir şekilde kullanılması, kullanılan enerji kaynaklarının sorunları giderilip çevresel etkileri olmadan yaygınlaştırılması ve mevcut sistemle senkronize olması da o kadar önemli hale gelmiştir. Artan enerji talebi karşısında fosil kaynakların hızla tükenmesi, çevre üzerindeki yıkıcı tahribatı; ülkeleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Her bir ülke; kendi gücü nispetinde politik kararlara imza atmaktadırlar. Bu kararları alırken, sadece sosyolojik değil, aynı zamanda ekonomik, teknik ve çevresel boyutları da hesaba katmak durumundadırlar. Bu boyutlar da yatırımların temel kriterlerini oluşturmaktadır (Gündüz, 2022).

Madrid'teki COP25 iklim zirvesinde İspanya'yı kapsayan bir iklim gençlik hareketi olan Juventud por el Clima üyeleri, Birleşmiş Milletler'in 2050 yılına kadar karbon nötr bir gezegen hedefine ulaşması için çok geç olduğunu bunun yerine grubun "2030'da karbonun yüzde 80'inin azaltılması için Avrupa İklim Acil Durum Deklarasyonu için bir milyon imza" almaya çalışıldığı belirtilmişti (Fotheringham, 2019).

Dünyada rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi yapan 100'den fazla ülke vardır. En fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip olan ülkelere bakıldığında Çin, ABD ve Almanya uzun süredir ilk 3 sırada yer alır. Türkiye, rüzgâr enerji santrali kurulu gücü olarak Avrupa'da 7'nci, Dünyada ise 12'nci sırada bulunmaktadır (Anonim, 2022b).Türkiye'de yer seviyesinden 50 m yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda km² başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir.

Bu kabuller ışığında, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir (Anonim, 2022c).

IMF Dünya Ekonomik Görünümü Ekim 2023 raporuna göre 17. Sırada yer alan Türkiye, ekonomik gelişme açısından gelişmekte olan ülkeler arasında yer almaktadır (Bakır, 2023).Türkiye’de enerji sektörüne yakından bakıldığında hem birincil enerji kaynaklarına hem de elektrik enerjisine çok hızlı talep artışı vardır. Birincil enerji kaynaklarının sağlanması bakımından %70’leri aşan bir oranda dışa bağımlı bir ülke konumundadır. İkincil enerji olarak elektrik enerjisi üretiminde de dışa bağımlı olan kaynaklar yaklaşık %58 oranındadır. Dışa bağımlılık, hızlı talep artışı, yüksek yatırım gereksinimi enerji sektörünün önemli özellikleri olarak kendini gösteriyor. Türkiye’nin rüzgâr haritası, yılın neredeyse tamamında rüzgâr enerjisinden elektrik üretilebileceğini gösteriyor. Depolama kapasitesi saatlik üretimin ortalama 6 katı civarında oluşturulduğu takdirde başka hiçbir enerji desteğine ihtiyaç duymadan enerji üretebilir (Tureb, 2020).

Bu çalışmada rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratör teknolojisi, rüzgâr enerjisini salınım yoluyla kullanır. Rüzgârdan aldığı enerjiyi kanat kullanmadan ve dişli, fren veya yağ olmadan almasının yanı sıra;

- tasarımının geleneksel rüzgâr türbinlerine göre daha basit olması,
- yaban hayatı için zararsız oluşu,
- bir başka enerji kaynağı veya kendi kendine bağımsız çalışabilmesi,
- hafif ve minimum hammaddeye sahip olması ve bakım maliyetinin düşük olması
- değişken rüzgâr aralığına hızlı cevap vermesi gibi sahip olduğu pek çok olumlu yön bu teknolojiyi daha yeşil bir dünya için güzel bir alternatif haline getiriyor.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Enerji kullanımı, Türkiye'nin de yer aldığı OECD ülkelerinde üretimde temel bir girdi olarak ön plana çıkmaktadır. Kullanılan enerji türü olarak da fosil yakıtların yaygın olduğu görülmektedir. Bu yakıtlar, ekonomik olarak gelişmeye katkı sağlasa da kullanımındaki artış enerjide dışa bağımlı ülkelerde üretim maliyetlerini yükselterek maliyet enflasyonuna sebep olmakta ve ülkelerin rekabet gücü ve diğer ekonomik parametrelerini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte fosil yakıtların kullanımındaki aşırılık ve bilinçsizlik çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Üretim ve tüketimin de asla durdurulamayacağı düşünülürse ülkelerin büyümesindeki sürdürülebilirliği olumsuz etkileyen fosil yakıt kullanımı kaynaklı sorunların yenilenebilir enerji kullanımı ile iyi bir alternatif oluşturulup önüne geçilebilmesi sağlanmalıdır (Çetintaş vd., 2022). AB-15 ülkelerinin 1995-2019 dönemi yıllık verileri incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgâr enerjisi üretiminin ekonomik büyüme ile ilişkisini ekonometrik olarak analiz edildiğinde bu durumu destekleyici bir çalışma olarak ortaya çıkmaktadır (Birol vd., 2021).

Türkiye'de rüzgâr enerjisinin teknik potansiyelinin Türkiye'deki toplam kurulu elektrik üretim kapasitesinin üzerinde olmasından dolayı Türkiye'nin gelecekteki rüzgâr enerjisi arzının çok önemli bir köşe taşı olma potansiyeli vardır. Buna karşın Türkiye'de rüzgâr enerjisi yatırımları teşvik edilen santrallerin teşvik mekanizmaları ile genel olarak oluşan toplam maliyetin ve tedarikçilerin tüketimlerine olan oransal maliyeti olarak hesaplanan yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleme mekanizması (YEKDEM) tarife garantisinin kapsamında kayıtlı 138 rüzgâr enerjisi tesisi için ortalama %5,55 iç getiri oranını tahmin edildiği ve güney doğu avrupa ülkelerine göre bu oranın yetersiz olduğu bulunmuştur (Tagliapietra vd., 2019). Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr değerleri esas alındığında, Türkiye'nin en iyi rüzgâr kaynağı alanları kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır.

Açık alan yakınlarındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgâr hızları Türkiye'nin batı kıyıları boyunca, Marmara Denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddetteki rüzgâr hızına

sahip geniş bölgeler ve rüzgâr gücü yoğunluğu Türkiye'nin orta kesimleri boyunca mevcuttur (Tureb, 2020). Türkiye Rüzgâr Santralleri Atlasına göre Marmara Bölgesinde; Balıkesir, İstanbul, Çanakkale, Ege Bölgesinde; İzmir, Manisa Doğu Akdeniz çevresinde Hatay Rüzgâr Santrallerinin yoğun olarak yer aldığı illerdir. Yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgâr potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgelerinin yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir. 7 m/s'den büyük rüzgâr hızları göz önüne alınarak Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir (Tureb, 2020). 2019 yılında Energy Strategy Reviews dergisinde yayınlanan bildiriye, 55 kıyı bölgesinin rüzgâr enerjisi potansiyeli değerlendirmesi yoluyla Türkiye'nin açık deniz rüzgâr santrali saha yerleri araştırılmıştır (Argın vd., 2019). Şu ana kadar Türkiye'de kurulu 10 GW'lık rüzgâr enerjisinin tamamının karada olduğu ve Türkiye'nin açık deniz rüzgârı geliştirme olasılığına da yöneldiği yer verilmiştir. İzmir Kalkınma Ajansı tarafından açık deniz rüzgâr gelişimini desteklemek için yayınlanan bir yol haritasına göre, Türkiye'nin toplam açık deniz rüzgâr potansiyelini 70 GW olarak tahmin edildiği belirtilmiştir (Tureb, 2021).

Bir rüzgâr türbini tasarlama süreci, çok sayıda mekanik ve elektrik bileşeninin, rüzgârdaki dalgalı gücü faydalı bir forma dönüştürebilen bir makineye kavramsal olarak birleştirilmesini içerir. Bu süreç bir dizi kısıtlamaya tabidir, ancak temel olanlar tasarımın potansiyel ekonomik uygulanabilirliğini içerir. İdeal olarak, rüzgâr türbini, tipik olarak petrol türevli yakıtlar, doğal gaz, nükleer enerji veya diğer yenilenebilir enerji kaynakları olan rakiplerinden daha düşük bir maliyetle güç üretebilmelidir. Teknolojinin mevcut durumunda, bu genellikle zor bir gerekliliktir, bu nedenle bazen hükümetler tarafından farkı telafi etmek için teşvikler sağlanır. Bu durumda bile, enerji maliyetini farklı bir tasarıma sahip bir türbinden daha düşük tutmak temel bir tasarım hedefidir (Manwell vd., 2010). Rüzgâr enerjisinin maliyeti son 10 yılda büyük ölçüde azalmış olsa da teknoloji, fosil yakıtlı jeneratörlerden ve güneş fotovoltaiklerinden daha yüksek bir başlangıç yatırımı gerektiriyor ve bakım maliyetleri bazen daha küçük rüzgâr türbinleri için karlı olmuyor (Morales, 2020b). İyi bir rüzgâr kaynağının olduğu yerler genellikle kuşların göçleri için seçtikleri rotalardır.

Öte yandan, kıyılarda iyi rüzgâr var olmasıyla birlikte genellikle yerleşik bir kentsel nüfus da vardır. Uygun gereksinimleri karşılayan yerlerin seçimi, bu enerjiyi uzak yerlerden yakındaki kasabalara getirmek için büyük bağlantı altyapıları gerektirebilir, bu da rüzgâr gücünün genişlemesini yavaşlatır (Morales, 2020b). Rüzgâr türbinleri genellikle saatte 8 ile 16 kilometre arasında rüzgâr hızlarında enerji üretmeye başlar ve saatte 96 kilometre hıza ulaşırlarsa kendilerine zarar vermemek adına kapanırlar. Rüzgâr türbinlerinin maksimum verimliliği %59'dur ve bu Betz Sınırı olarak bilinir. Bunun nedeni, rüzgârın tüm enerjisini kullanamama ve dönme enerjisini mekanik enerjiye çevirirken kaybedilen ısı enerjisinden dolayıdır (Çapar, 2018). Türbinin ve kurulumun tüm yaşam döngüsünü, üretim maliyetlerini, lojistik, elde edilen tüm harcamaları, bölgenin enerji fiyatını, arazi için yan maliyetleri, vergileri gibi durumlar kullanılacak rüzgâr türbini için dikkat edilmesi gereken parametrelerdir (Gomez, 2021). Rüzgâr türbinlerinin kurulumuna uygun arazi, elektrik üretiminden daha değerli olabilecek arazi için alternatif kullanımlarla rekabet etmelidir. Enerji yakalama biçimlerinin ekonometrik verilerle uyumluluğu bu soruna uzun vadeli bir çözüm olabilir. Öte yandan, karada üretim başka bir kilit nokta olabilir (Morales, 2020b).

Bununla birlikte açık deniz teknolojisi (okyanusta kurulu türbinler) de büyük ölçekli rüzgâr enerjisiyle ilgili olarak çok umut verici olabilir. Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörde rüzgâr enerjisini toplayabilecek cihazlarda dişli, yatak vb. olmaması da özellikle türbinlerin hareketli mekanik aksamalarının korozyonu karşılaşılan sorunlardan biri olan deniz ortamlarının agresifliğine karşı önemli bir avantaj olabilir (Villarreal vd., 2018). Rüzgârın kararsızlığı, yenilenebilir enerjilerin ana dezavantajlarından biridir. Bu nedenle rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör tasarımcıları, farklı enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, hidrolik vb.) birleşiminin önemli olduğunu ve birbirleriyle rekabetçi olmadığını düşünmektedir. Yani ortak kullanımları ayrı ayrı kullanımlarından daha iyidir. Bu cihazlar, bilinen güneş paneli kurulumlarıyla uyumlu olacak şekilde tasarlanmaktadır ve bu nedenle, evsel, tarımsal ve endüstriyel ortamlarda öz tüketimi teşvik etmeye yardımcı olan bir aracı piyasaya sunmaktadır (Yunta vd., 2019).

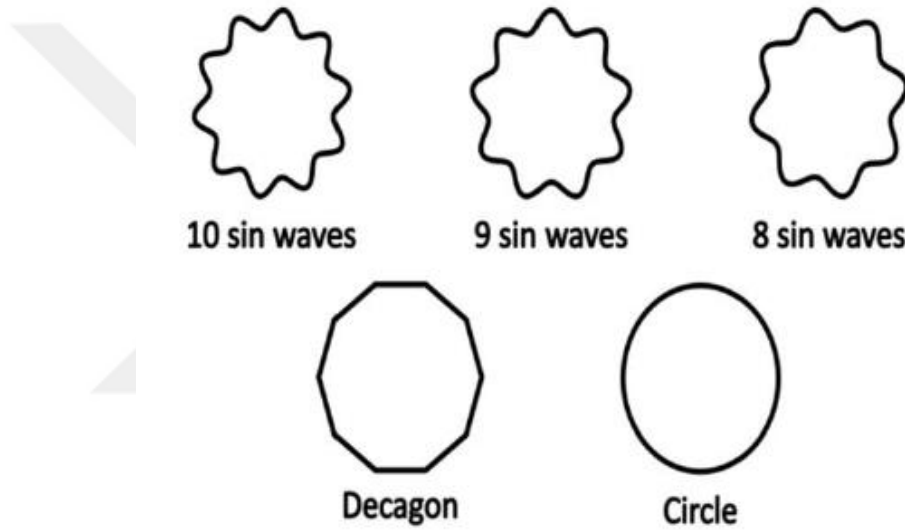
Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör, girdap dökülmesi adı verilen aerodinamik bir etki nedeniyle rezonansa giren rüzgârdan gelen enerjiyi hapseder. Bu kuvvetlerin frekansı aerogeneratörün yapısal frekansına yeterince yakın olduğunda, aerogeneratör salınım yapmaya başlar ve rüzgârla rezonansa girer. Bunun sonucunda girdaplar oluşturur. Bu salınım, elektrik üreten bir kuvvet üretir (Estapé, 2019). Bu, çoğu inşaat projesinde genellikle tasarım hatası olarak kabul edilen bir olgudur. Kimse rüzgârlı bir günde sallanan yüksek bir yapıda yaşamak istemez.

Rezonans olgusu, rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün çalışma prensibinin temelini oluşturur. Bu yeni teknolojiye akışkan etkisine maruz kalan gövdenin hareketi sonucu gövdenin etrafında gerçekleşen Von Karman Girdapları veya Vortex Shedding olarak adlandırılan olgu meydana gelmektedir. Bu olgular birçok araştırma ve geliştirme için ilgi konusu olmuş ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. 1984 yılında Bearman, 1974 ile 2004 yılında Sarpkaya ve 2001 yılında Blevins tarafından bu konu hakkında kitaplar yazılmıştır (Elsayed vd., 2022). Bu konu hakkında yazılan bir başka kitap da 2004 yılında Williamson ve Govardhan tarafından kaleme alınmıştır. Esas olarak elastik olarak monte edilmiş rijit bir silindirin salınımlarıyla ve bu tür yapıların zorlanmış titreşimleri ile ilgili önceki çalışmaların incelemesi niteliğinde olan bu çalışmada ayrıca VIV sistemlerine özgü yeni kavramlar ve olgular, titreşim modlarına yol açan girdap dinamikleri, enerji aktarımı, kütle ve sönümün önemi, kritik kütle kavramı, bunlar arasındaki ilişkiye de değinilmektedir (Williamson vd., 2004). Bu teknolojiye ana olgunun, yani girdap kaynaklı titreşimin (VIV) ve girdap dökülmesinin arkasındaki etkiyi ve teoriyi anlamak önemlidir.

Girdap kaynaklı titreşim olgusu ile ilgili birçok teorik ve numerik analiz çalışmaları günümüze kadar gelmektedir. Bu çalışmalardan biri olan Placzek vd. tarafından yapılan çalışmada düşük Reynolds Sayısında ($Re = 100$) girdap kaynaklı titreşim olgusunun sayısal simülasyonu incelenmiştir. VIV kaynaklı titreşim olgusu dairesel kesitli cisimler için iyi anlaşılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, ortaya çıkan farklı olayları analiz etmek için enine bir akışta salınmaya zorlanan bir silindirin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Frekans

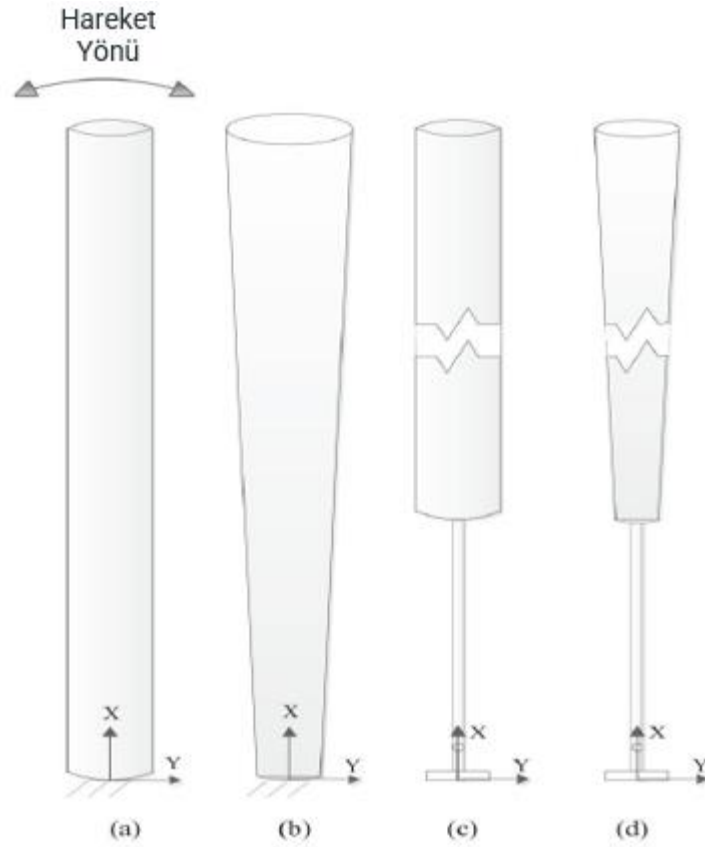
içeriği ve girdap saçılma modları incelenmiş ve uygulanan salınımların frekansı ve genliği değiştirilerek birbirine bağlanmıştır(Placzek vd., 2009). Daha yüksek Reynolds sayısı ($1000 \leq Re \leq 10.000$) için yapılan sayısal simülasyonlar için Menter'in $k-\omega$ SST modeli kullanılarak türbülans modellemesi örnek verilebilir(Menter, 1994).

Girdap kaynaklı titreşim olgusu ile ilgili yapılan çalışmalarda sıklıkla dairesel kesitli geometriler seçilse de farklı geometrik kesitlerinin de performansını değerlendirmeyi amaçlayan çalışmalar da yapılmıştır(Tripathi vd., 2023).

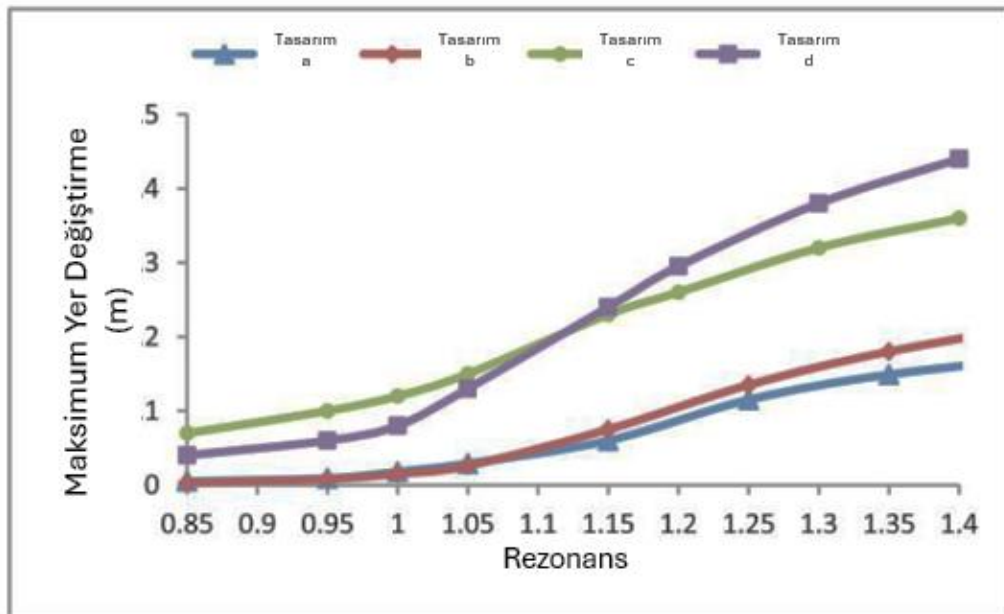


Şekil 1. Gövde geometrilerinin üstten görünüşü(Tripathi vd., 2023)

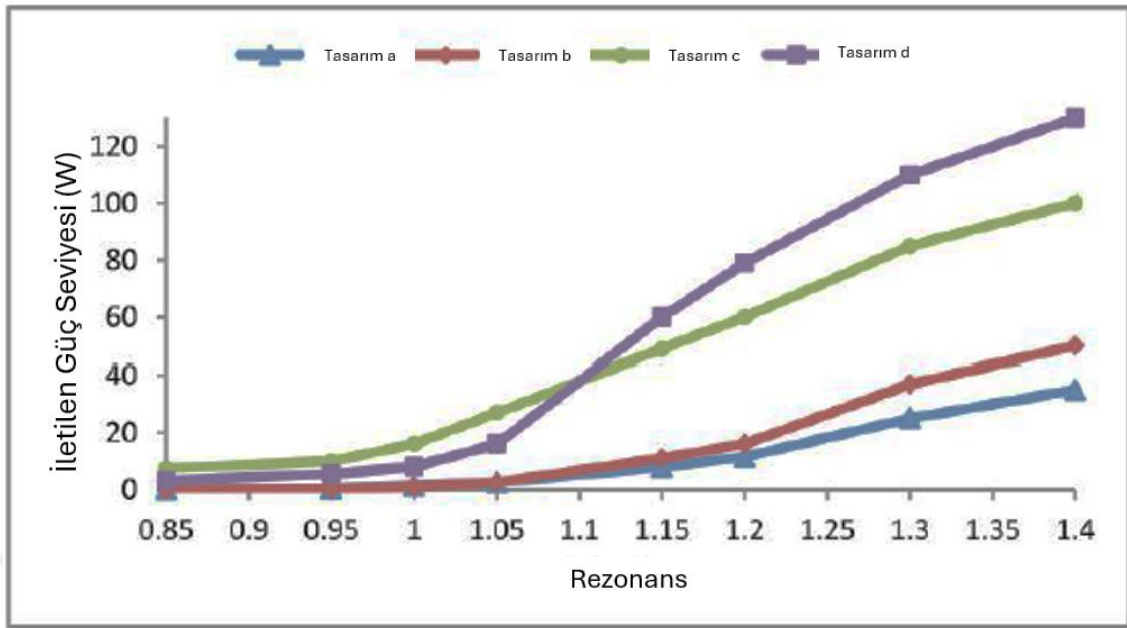
Chizfahm ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün girdap kaynaklı titreşimlerinin dinamik modellenmesi için dört farklı konfigürasyon üzerinde incelenmiştir. Dört farklı konfigürasyonun araştırılıp karşılaştırıldığı çalışmada aerogeneratörler esnek olan veya düzgün bir hava akışına maruz kalan esnek bir yapı üzerine monte edilen nispeten uzun bir silindir veya konikten oluşmuştur. Çalışmada kilitleme aralığına yakın değerlerde maksimum yer değiştirmesi, üç boyutlu CFD analizi sonlu elemanlar metodu simülasyonlarının sonuçlarıyla değerlendirilmiş ve güç çıkışları çeşitli rüzgâr hızlarında incelenmiştir(Chizfahm vd., 2018).



Şekil 2. Aerojeneratörün girdap kaynaklı titreşimlerinin dinamik modellenmesi için dört farklı konfigürasyon (Chizfahm vd., 2018)



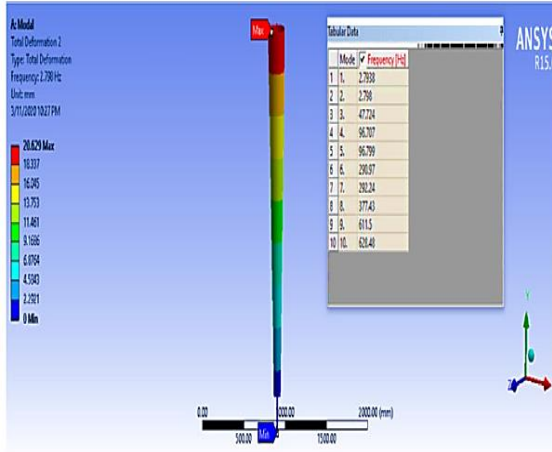
Şekil 3. Tasarımların rezonans değerlerine yakın değerlerde maksimum yer değiştirmesi (Chizfahm vd., 2018)



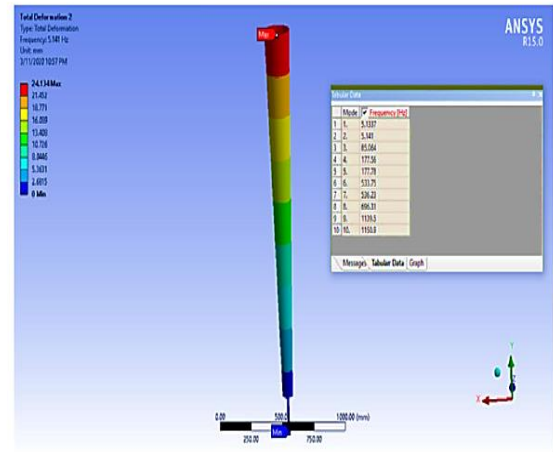
Şekil 4. Rezonans değerlerine yakın değerlerde tasarımlara iletilen güç seviyesi (Chizfahm vd., 2018)

Bir başka çalışmada aerogeneratör, Solidworks'te mevcut belirli boyut parametreleriyle tasarlanmış önemli bir parçası olan direğin farklı malzemeleri ve boyutları için analiz edilmiştir. Ayrıca yer değiştirme, frekans vb. gibi çeşitli performans parametreleri de mevcuttur (Francis vd., 2021).

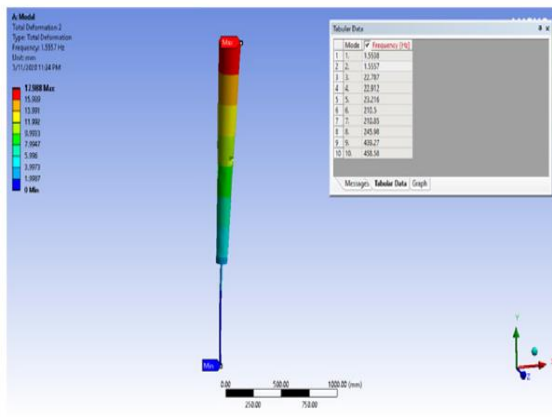
Aerogeneratörün aerodinamik performansı ve rüzgâr enerjisine karşı tepkisini optimize etmek için girdap dökülme frekanslarının gözlemlenmesiyle tasarım iyileştirmesi yapılabilmektedir. Tasarım hazırlığı yapılırken farklı tasarım modellerinin güç üretimi ilişkisi göz önünde bulunmaktadır. Şekil 6'da farklı modellerin karşılaştırılması ve tasarımın güç çıkışı üzerindeki etkisi üzerinde yapılan çalışmalardan birinde kullanılan tasarım önerileri görülmektedir. Bu çalışmada yapılan teorik ve deneysel tasarımlar neticesinde Model 2, artan girdap dökülme frekansı ve güç üretim yaklaşımlarıyla kanıtlandığı gibi aerodinamik performans açısından Model 1'den daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu çalışma, gelecekteki araştırmalar ve optimizasyonlar için içgörüler ve aerogeneratör dinamikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Hamdan vd., 2024).



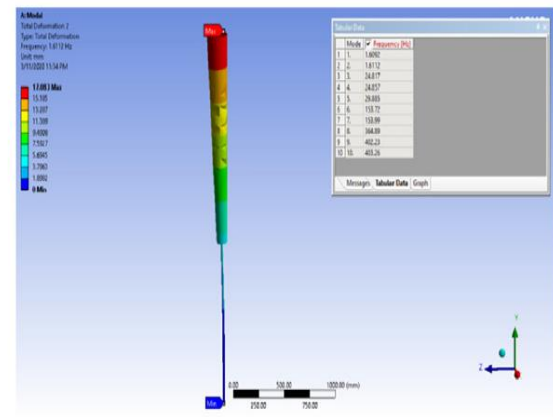
a)



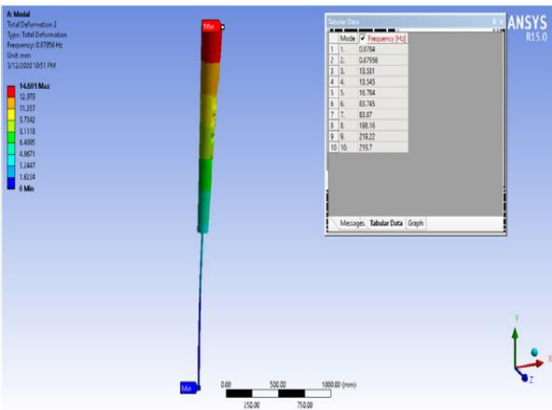
d)



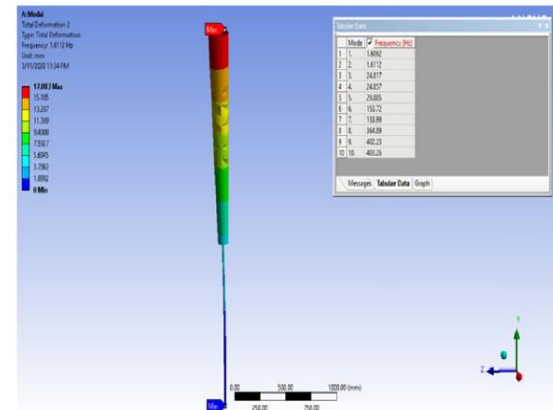
b)



e)

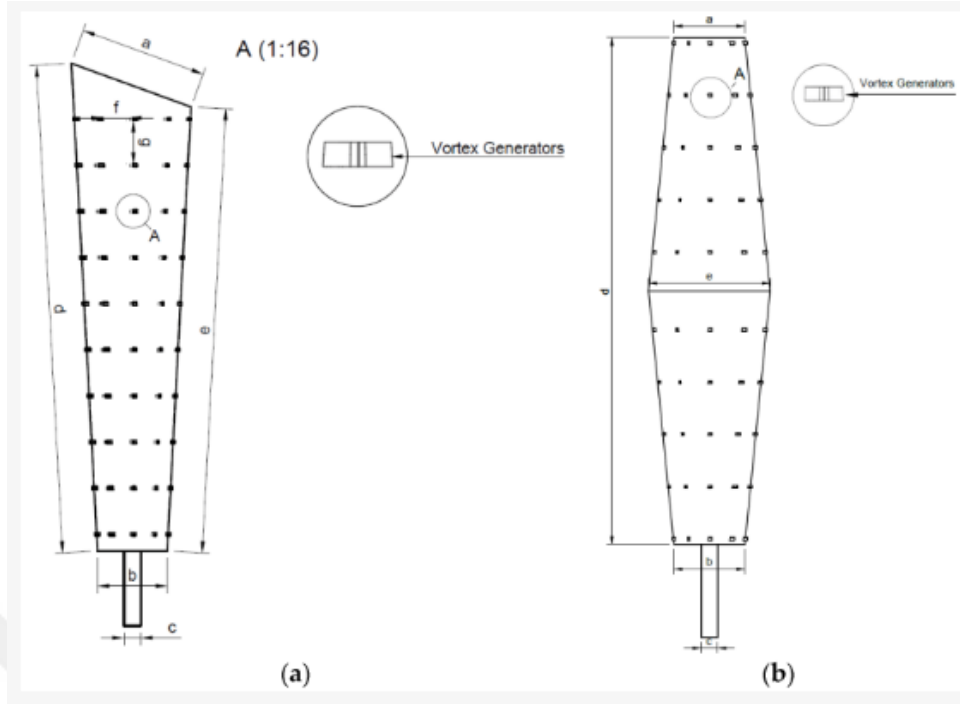


c)



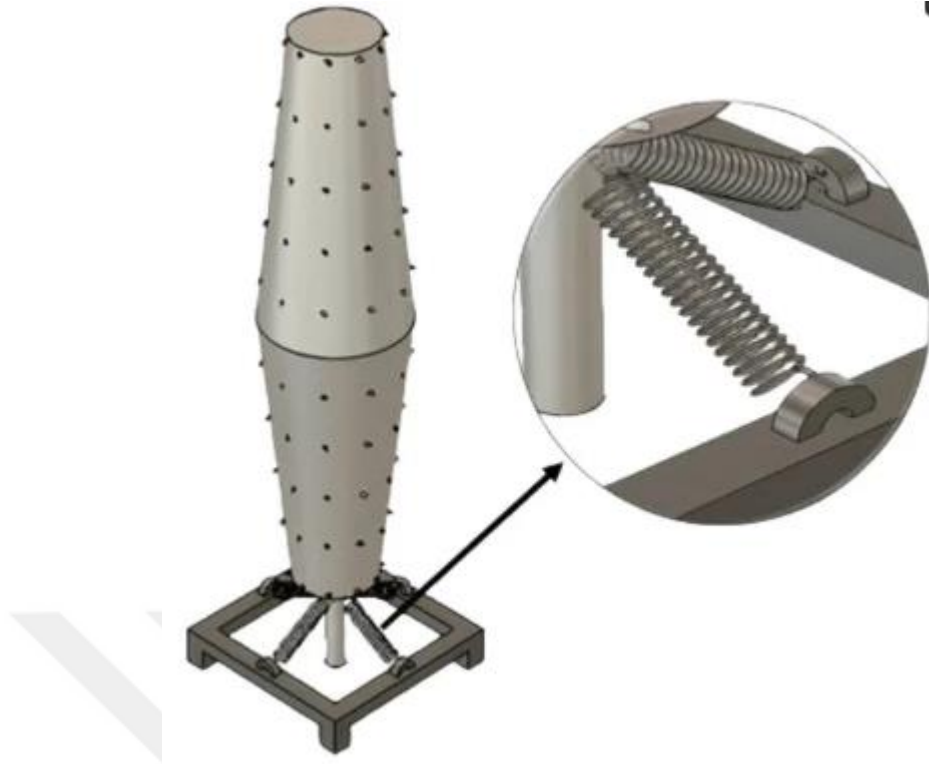
f)

Şekil 5. a), (b), (c) sırasıyla 225 mm, 700 mm ve 1200 mm uzunluğundaki cam elyaf çubuğun modal analizi. (d), (e), (f) Sırasıyla 225 mm, 700 mm ve 1200 mm uzunluğundaki karbon fiber çubuğun modal analizi (Francis vd., 2021)



Şekil 6. Farklı tasarım modellerinin güç üretimi ilişkisi çalışması için önerilen tasarımlar
a) Model 1 b) Model 2 (Hamdan vd., 2024)

Ayrıca Hamdan vd., bu çalışmasında yay kullanmıştır. Genellikle titreşimleri azaltmak veya sönmölemek için kullanılan yaylar bu çalışmada titreşimleri sönmölemekten ziyade artırma amacıyla kullanılmaktadır. İdeal bir yay tasarlanırken istenen sapma, uygulanan yük, yay malzemesi, sertlik ve yay sisteminin yapılandırması dikkatlice düşünölmelidir. Kütle yay sistemi ve konsol düzenlemesi, paralel yay düzenlemesi, burulma yayı tasarımı ve konsol düzenlemesi dahil üzere erişilebilir çeşitli yay düzenlemeleri arasında pratik olasılıklar olarak öne çıkar. Bu düzenlemeler aerojeneratörün çok fazla hareketli elemana sahip olmamasından dolayı basitlikleri ve güvenilirlikleri için kullanılabilir. Bu durum, daha uzun ömürlü olmalarına ve daha az bakım gerektirmelerine katkıda bulunur. Ayrıca, uyarlanabilirlikleri sayesinde çeşitli çalışma durumlarına ve uygun performans entegrasyonu için değıştirilebilir olabilmektedir. (Hamdan vd., 2024).



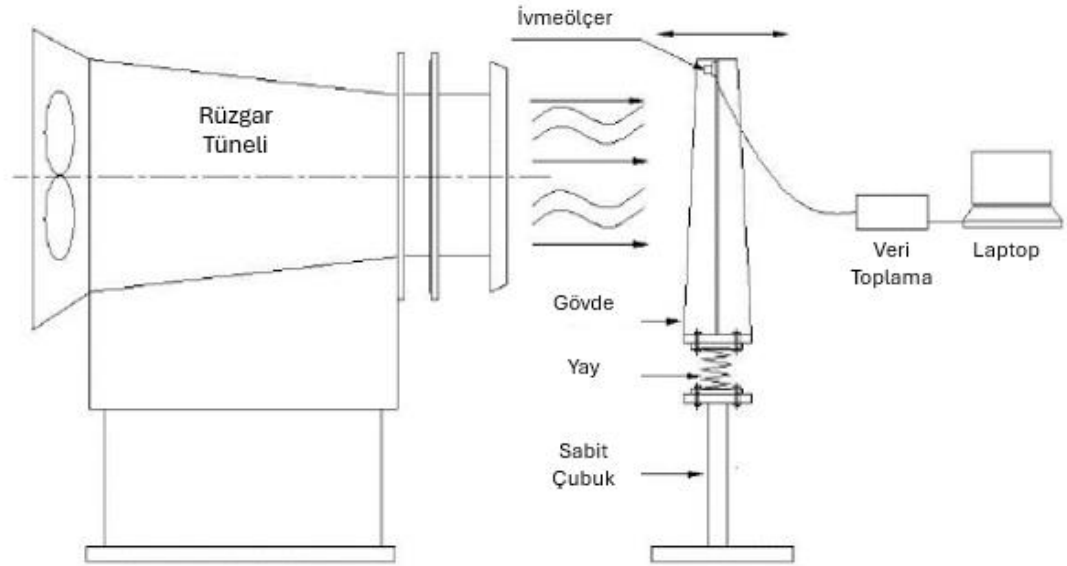
Şekil 7. Hamdan vd. çalışmasından Taban ve yay tasarımına sahip bir tasarımın şeması.

Yukarıdaki sistem her iki model için de kullanılmıştır.(Hamdan vd., 2024)

Kütle yay sisteminin kullanıldığı bir başka çalışmada ayarlanabilir bir mekanizmaya sahip elektromanyetik özellikli bir aerogeneratörün dinamikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Ayarlanabilir mekanizma, elektromanyetik bir bobinin içindeki salınımlı bir mıknatısa bağlı kademeli oranlı bir yaydan oluşmaktadır. Yay sertliği, rüzgâr hızı değişikçe kademeli olarak ayarlanarak, rüzgâr akışının salınımlı direğin üzerinden geçmesi nedeniyle girdap kaynaklı titreşimin (VIV) dökülme frekansına uyması için türbin temel frekansı ayarlanır. Ayarlanabilir türbinin birleşik doğrusal olmayan hareket denklemleri, toplu kütle gösterimi ve Lagrange formülasyonu kullanılarak geliştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, ayarlanabilir türbinin eşik rüzgâr hızının ötesinde etkili bir şekilde performans gösterdiğini göstermektedir(Bahadur, 2022).

Yapılan deneysel çalışmalardan biri olan rüzgâr tüneli testi deney düzenekleri ufak tefek değişiklikler dışında genelde aynı sistem parçalarından oluşur. Thomai vd. tarafından gerçekleştirilen zaman alanı sinyallerini ve çeşitli Reynold Sayıları (Re) için karşılık gelen Hızlı Fourier Dönüşümünü (FFT) içeren çeşitli direk kesitlerinin deneysel sonuçlarına dair deneysel çalışma değişken

frekanslı tahrik ve diğer ölçüm aletlerine sahip bir açık jet rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Titreşim sensörü, salınım yapan direğe yerleştirilmiştir. Şekil 8’de deney düzeneğinin şeması gösterilmektedir(Thomai vd., 2019).



Şekil 8. Deney düzeneğinin şeması(Thomai vd., 2019)

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektrige dönüştürebilen aerogeneratör, kentsel alanlarda tipik olan 3 m/s rüzgâr hızında güç üretmeye başlar. Rüzgâr hızı 6 m/s veya tozu kaldırmaya ve küçük dalları sallamaya yetecek kadar olduğunda, yeterli güç üretebilir. Düşük ile orta rüzgâr hızlarında çalıştığı için enerji açısından verimlidir ve geleneksel 3 kanatlı bir rüzgâr türbininden %45 daha düşük bir maliyetle aynı miktarda enerji üretir. Rüzgâr jeneratörü ayrıca rüzgâr hızı 30 ile 35 m/s'yi, yani jeneratörün kaldırabileceği maksimum hızı aştığında çalışmayı otomatik olarak durduran bir güvenlik cihazı ile donatılmıştır (Anonim, 2019). Alt kısmı ağırlıklı uzun bir kum saatine benzeyen kanatsız bir jeneratör olan rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektrige dönüştürebilen aerogeneratör; dişliler veya diğer mekanik parçalar olmaması, üretim maliyetlerinin geleneksel bir rüzgâr türbininininkinin yaklaşık %53'ü olması ve daha az bakım gerektirmesi gibi özellikleri ile geleneksel türbin tasarımlarına göre daha avantajlı olabilmektedir.

Ayrıca salınımlı sütun işitilebilir bir ses oluşturmaz (<20 Hz), bu da onu gürültü kirliliğine duyarlı kırsal topluluklarda çekici kılar. Ayrıca dönen kanatların olmaması kuşlara verilen zararı en aza indirir. Ve direğin küçük form faktörü, her bir gayrimenkul parçasından maksimum enerji üretimi sağlar (Johnson, 2018).Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün diğer harika özelliği ise silindir içerisine yerleştirilen mıknatısların birbirini itmesi ve hareketli parçaların birbirine değmemesidir. Bu nedenle, aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan hasar neredeyse yoktur, bu da bakım maliyetlerini düşürür. Bu teknolojiyi üreten firmanın hesaplamalarına göre jeneratörün işletme ömrü yaklaşık 20 yıldır(El-Shahat, 2016). Normal rüzgâr türbinlerinin radyo sinyallerine müdahale etme eğiliminde olmasından dolayı askeri üslerin ve havaalanlarının yakınlarına kurulamaması sorunu da mevcuttur. Geliştirilen bu cihazla çeşitli ulusal hava kuvvetleri ve havacılık kurumlarının radyo sinyallerini normal rüzgâr türbinleri kadar etkilemeyeceğini düşündüklerini belirtmişlerdir (Anonim, 2021b).

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün HAWT kanatlarının süpürme hacmine göre daha az olması tercih edilebilirliğini kısıtlamaktadır. Weibull denklemi kullanılarak, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin bu konuda hala daha verimli olduğu rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör daha düşük maliyetli olmasına rağmen, kanatlı türbinler için güç kullanımının güç çıkışına oranı yaklaşık %80 ve aerogeneratörler için yaklaşık %70 olduğu bulunmuştur (Bardakjian vd., 2017). Bu durumu sistemin tasarımcıları geleneksel rüzgâr çiftliklerine karşı olmadıklarını ve geliştirdikleri bu teknolojinin geleneksel rüzgâr çiftliklerinin uygun olmayabileceği boşlukları doldurmaya yardımcı olabilecek farklı özelliklere sahip olduğunu söyleyerek açıklıyorlar (Aydın, 2021).

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörü diğerlerine göre daha çok seçilebilir kılmak, herkesin sahip olabilmesi için mümkün olduğunca uygun maliyetli hale getirmek sistem tasarımcıları için önemli bir hedef olsa da bu durum elde edilebilecek üretim maliyetlerine ve ulaşılabilecek optimizasyon düzeyine bağlıdır ve her ikisi de çok yavaş bir süreçte gerçekleşmektedir. Yeni bir teknoloji olması ve sistemin parçaları için özel

malzemeler ile imalat yöntemleri gerekmesi bu teknolojiyi üretiminin sanayileşmesi açısından zor kılıyor. Direk gibi birçok parça, mevcut üretim yöntemleriyle elde edilebilecek belirli bir kalınlık veya ağırlık gerektirir ve geleneksel imal yöntemleri ile bu pek mümkün olmamaktadır. Hassas üretime ihtiyaç duyulmasından dolayı minimum hata gerektiren bu türbin tasarımı için Alya kodu simülasyonu geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar tatmin edici bir şekilde deneysel verilerle uyumaktadır (Cajas vd., 2016 akt. Mengi, 2018). Ayrıca daha önceki ileri konstrüksiyon çalışmalarında kullanılmış kompozit malzemelerin incelenmesi, direk ağırlığının azaltılması, kompozit malzeme kullanılarak mukavemet iyileştirmeleri ve fiber oryantasyonlarının dayanıklılıklar üzerindeki etkisinin incelenmesi üzerine çeşitli geliştirmeler yapılmaktadır (Raghuwanshi vd, 2020). Bir başka çalışmada Epoksi Karbon UD (230GPa) kullanılarak yapılan aerogeneratörün direk ve taban tasarımını değiştirerek, girdap kaynaklı titreşimlerini artırmaya çalışmıştır (Badri vd., 2023).

Türkiye'de de direk ağırlığının azaltılması amacıyla nümerik analizlerle rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör için doğal kauçuk, alaşım çelik ve titanyum alaşım olacak şekilde 3 farklı malzeme seçilip sistemin doğal frekansı ve salınım hareketini nasıl etkilediği incelenmiştir (Mengi vd., 2018).

Bunun yanı sıra rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör maliyet etkinliği ve fizibilite çalışmaları için yoğun araştırma ve ürün geliştirmeleriyle bu sistemin yenilenebilir enerji pazarındaki yeri hakkında çalışmalar yapılmaktadır. Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör pazarı oluşması bölge bazında Afrika, Orta Doğu, Uzak Doğu, Asya-Pasifik, Kuzey ve Güney Amerika, Batı ve Doğu Avrupa olarak ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Bu alanda Hindistan, Nijerya, Malezya, Çin gibi dünyanın çeşitli bölgelerindeki rüzgâr enerji potansiyeli incelenmiş ve geleneksel rüzgâr türbini ile karşılaştırılıp uygunluk hakkında çeşitli değerlendirmeler yapılmıştır (Ganeshkumar vd., 2020).

Vortex Bladeless tarafından geliştirilen bu proje, başlangıçtan itibaren Gotarrendura Belediyesi'nde ekipmanı test edilmeye başlandı. Vortex Bladeless

şirketi 2020 mevcut durumu raporunda, bu teknolojiden ilk olarak yaklaşık 100 adet üretmeyi ve başta İspanya ve Avrupa ülkeleri olmak üzere sivil toplum kuruluşları, üniversiteler, bağımsız laboratuvarlar, belediyeler, doğal parklar ve dünya çapındaki ortak şirketlerde beta sürümü olarak dağıtmayı hedeflemektedir. Amaç, ölçümler elde etmek, farklı konum ve kurulum türlerindeki davranışlarını incelemek ve cihazların iyileştirilmesine ve ortamın değişkenlerine göre uzun vadeli davranışlarının anlaşılmasına olanak sağlayacak metrikler oluşturmaktır. Bir sonraki adımda ise, numuneyi artırmak ve bu küçük aerogeneratörleri son kullanıcıların eline vermek olacaktır. Bu amaçla, herkesin test etmek için bir Vortex Nano cihazı talep edebileceği, geri bildirimde bulunabileceği genel beta kampanyası için planları var (Gomez, 2020).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör ve yatay eksenli rüzgâr türbini tasarımı yapmak amacıyla şekil ve teknik özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli araştırmalar ve çalışma yapılmıştır. Bu özelliklerin belirlenmesi adına ilk olarak rüzgârdan yüksek verimde enerjiyi yakalaması için uygun yapı ve geometri hesaplamalarının üzerinde durulmuştur. Ayrıca sistemlerde gerçekleşen enerji dönüşümü, sistemlerin sahip olduğu özgün sistematikler ile sistemlerin kurulumu için gerekli malzeme ve kullanım ömrü konusunda veriler incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör ve yatay eksenli rüzgâr türbini için elde edilen veriler birinci kısımda incelenen başlıklar çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen verilerle birlikte sistemlerin maliyet etkinliği, üretim kapasitesi, çevresel etkileri gibi genel konular hakkında veriler üzerinde karşılaştırmada bulunulmuştur. Son olarak rüzgâr enerjisinin avantaj ve zorlukları göz önüne alınarak Türkiye'nin rüzgâr enerjisinin potansiyeli ve Türkiye'nin sahip olduğu enerji profilindeki yerine göre değerlendirilmiştir.

3.1. Rüzgâr Kaynaklı Mekanik Enerjiyi Elektriğe Dönüştürebilen Aerogeneratör Tasarımı

Temel olarak elastik bir çubukla dikey olarak sabitlenmiş bir silindirden oluşan rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör, belirli bir rüzgâr aralığında rezonansa girerek basit bir sarkaç gibi salınım yapar ve daha sonra bir alternatör sistemi aracılığıyla elektrik üretir. Geleneksel rüzgâr türbinlerinden farklı olan bu sistem normal rüzgâr türbinlerine kıyasla güneş panellerine zaman içinde özellik ve maliyet etkinliği açısından daha çok benzetilebilmektedir.

Yenilenebilir enerji alanındaki bu özgün sistem için aerodinamik ve rezonansla enerji oluşumu, sahip olduğu yapı ve geometri, rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü, diğerlerinden ayıran teknik özellikleri, kullanılan

malzeme ve kullanım ömrü, maliyet etkinliği, üretim kapasitesi, çevresel etkileri gibi başlıklar altında çalışmalar yapılmıştır.

3.1.1. Sistemin Aerodinamiği ve Sistemde Enerjinin Oluşumu

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör fikrinin temellerine inilecek olunursa bu sistem girdap kaynaklı titreşim rezonanslı bir rüzgâr jeneratörü olarak düşünülebilir. Dolayısıyla rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör için şekil ve teknik özelliklerin belirlenmesinden önce başlangıçta akışkan-yapı etkileşimi, aeroelastisite ve girdap kaynaklı titreşim kavramı üzerinde çalışılmıştır.

3.1.1.1 Akışkan-Yapı Etkileşimi

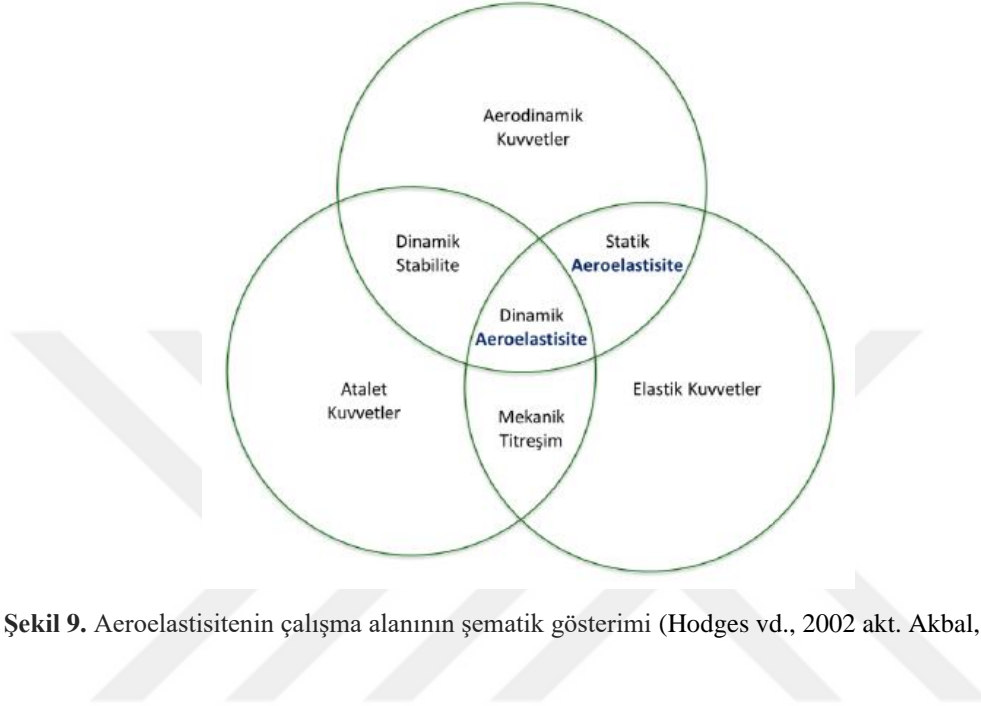
Akışkan-yapı etkileşim problemleri, bir akışkanın, üzerine kuvvet uygulayan deforme olabilen bir katı cisimle etkileşime girdiği çoklu fizik problemleridir. Bu kuvvetler katı gövdeyi deforme eder ve bu da hareket ettikçe sıvı akışını değiştirir. Bu tür bir etkileşim oldukça karmaşıktır ve farklı ilginç fiziksel olaylar ortaya çıkar. Bunlardan biri, girdap saçılma frekansı ile yapının doğal titreşim frekanslarının kilitleme etkisi yoluyla senkronizasyonundan kaynaklanan katı cisimdeki titreşimler olan girdap kaynaklı titreşimlerdir (Cajas vd., 2016).

3.1.1.2 Aeroelastisite

Aeroelastisite, elastik bir gövde bir sıvı akışına maruz kaldığında meydana gelen atalet, elastik ve aerodinamik kuvvetler arasındaki etkileşimleri inceleyen fizik ve mühendislik dalıdır(Akbal, 2018). Aeroelastisite çalışması genel olarak iki alana ayrılabilir:

- Elastik bir cismin bir sıvı akışına karşı statik veya sabit durum tepkisini ele alan statik aeroelastisite,
- Cismin dinamik (tipik olarak titreşimsel) tepkisini ele alan dinamik aeroelastisite (Anonim, 2023a).

Ayrıca, Hodges in tanımına göre elastik yapının hava akımı içerisindeki deformasyonu ile aerodinamik kuvvetlerin sonucundaki etkileşimi ile ilişkili çalışmaları simgeleyen ifade aeroelastisite olarak adlandırılır. Bu interdisipliner yapı Şekil 9’da görselleştirilmiştir (Hodges vd., 2002 akt. Akbal, 2018).



Şekil 9. Aeroelastisitenin çalışma alanının şematik gösterimi (Hodges vd., 2002 akt. Akbal, 2018)

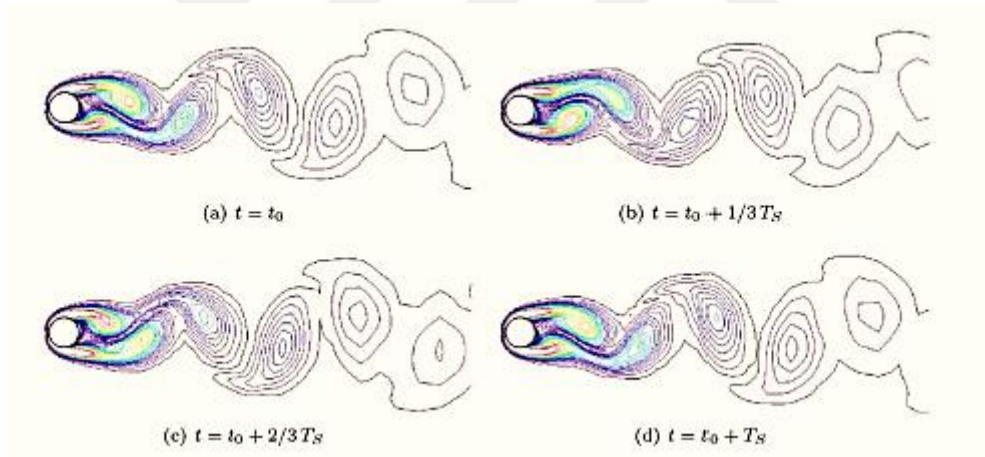
3.1.1.3 Girdap Kaynaklı Titreşim (VIV)

Rüzgâr, bir yapının etrafından geçtiğinde basınç girdapları oluşur. Girdapların frekansı rüzgâr hızına bağlıdır ve eğer yapı benzer bir doğal rezonans frekansına sahipse, salınmaya ve enerjilerini kullanmaya başlar. Bu aeroelastik rezonans olgusuna girdap saçılması adı verilir ve doğada düzenli olarak meydana gelir.

Girdap kaynaklı titreşim, sabit bir cisim üzerinden akan bir akışkanın oluşturduğu etkinin sonucu oluşan bir olgudur. Bütün akışkanlar gerçekte viskoz etki gösterirler. Bu viskoz etki sebebiyle sabit olan cismin gövdesinde sınır tabakası oluşur. Akışkan, bu sınır tabakayı aşarak genellikle simetrik olmayan girdaplar oluşturur ve cisim üzerinde hareketini sağlayacak basınç dağılımı oluşturur (King, 2022).

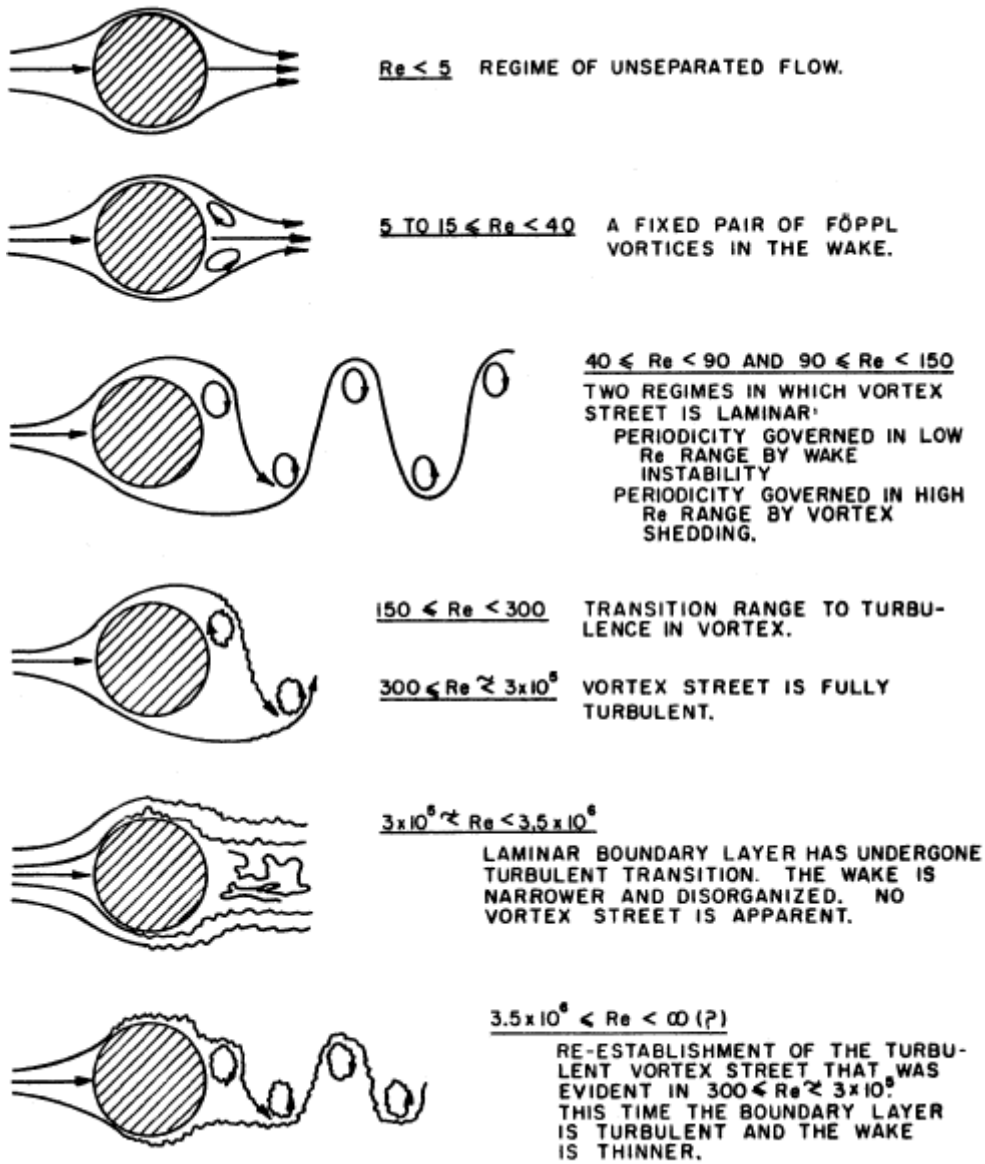
Girdap kaynaklı titreşim (VIV), klasik bir akışkan-yapı etkileşimi olgusu olmakla birlikte etkileşim halinde olan dış akış üzerindeki periyodik düzensizlik kaynaklı yapı üzerindeki harekettir. Örnek olarak bir silindirin gövdesinden geçen akışkan, belli şartlarda ‘‘Von Karman Vortex Street’’ olarak adlandırılan akışın aşağı tarafındaki bölgede oluşan dönen girdapların dönüşümlü olarak dökülmesine yol açabilir.

Bir cismin bir akışkanla etkileşime girmesi sonucu akıştaki periyodik düzensizlikler sonucu oluşan titreşimler ve cismin üzerinde depolanan hareketler olarak adlandırılan bu olgu açık denizde bulunan mühendislik yapılarında ve uçak kontrol yüzeyleri gibi hava etkileşimli yapılarda yorulma hasarı kaynağıdır. Akışın Reynolds sayısının (Re) düşük olması durumunda düzenli, Reynolds sayısını artmasıyla birlikte asimetrik bir hale dönüşür ve Von-Karman Vortex Street olarak adlandırılan akışın cisim etrafındaki kararsız akışın oluşmasına sebebiyet verir (Placzek vd., 2009).



Şekil 10. CFD analizde $Re = 100$ 'de bir Strouhal periyodu boyunca art izindeki girdap akış çizgileri (Placzek vd., 2009)

Akışkanın üzerine tesir ettiği cismin boyutu ve şekline bağlı olarak yaptığı salınımlı bir akış olan girdap dökülmesinin sebep olduğu tekrarlı girdap modeli olarak da Von- Karman Street olgusu olarak düşünülebilir. VIV nispeten düşük Reynolds sayılarında (düşük hızlarda) mevcut olabilir ve eğer söz konusu akışkan hava ise, daha yüksek hızlarda aeroelastik 'çarpınmaya' dönüşebilir (King, 2022).



Şekil 11. Farklı Reynolds sayıları için girdap dökülme modeli (Lienhard, 1966 akt. Dalton, 2004)

“Vortex shedding” olarak adlandırılan bir girdap olgusu üzerinden rüzgâr enerjisi elde edilir. Akışkanlar dinamiğinde, rüzgâr küt bir gövdeden geçtiğinde akış değiştirilir, bu da döngüsel bir girdap modeliyle sonuçlanır. Bu kuvvetlerin frekansı sistemin doğal frekansı ile aynı olduğu zaman sistem kararsız bir hal alarak salınım yapmaya başlar ve rüzgârla rezonansa girer. Rezonans süresince sürekli olarak titreşmesine neden olabilecek periyodik olarak akışkan kuvvetleri üretir (Shterev, 2021).



Şekil 12. Tacoma Narrows Köprüsü'nün çöküşü, Washington eyaleti, 1940 (Britannica)

Akışkanlar mekaniği, yapısal mekanik, titreşim, deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akustik vb. konuları içeren çok disiplinli ve disiplinler arası bir araştırma problemi olan girdap kaynaklı titreşim (VIV) için yapılan çalışmalar incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen bilgiler ışığında numerik ve analitik olarak hesap yöntemi konusunda çalışmalar yapılmış ve modellenmesi üzerinde çalışılmıştır.

Sistemin aerodinamik davranışının simüle edilebilmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), akışkan-yapı etkileşimi için doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon yazılımı kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) modelleriyle farklı rüzgâr yoğunluklarında bu sistemin hareketinin tahmin edilebilmesi gerekmektedir. Bu analizlere ek olarak yapı üzerinde harici aerodinamik analiz yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu analizlerin gerçekleştirildiği çalışmalar arasında Beverly'nin çalışmasında (2017) son geliştirme çabaları, alternatör tasarımının yanı sıra sistemin geometrisini optimize etmesini de içermektedir. Yeni geometri ile sistem, rüzgârın kinetik enerjisinin neredeyse geleneksel rüzgâr türbinlerine benzer şekilde %40'ını yakalayabileceği ve Betz Yasasına göre, bir rüzgâr türbininin tasarımından bağımsız olarak rüzgârdan elde edilebilecek maksimum güç, kinetik enerjisinin %59,3'ü kadar olabileceği sonucu elde edilmiştir (Beverly, 2017).

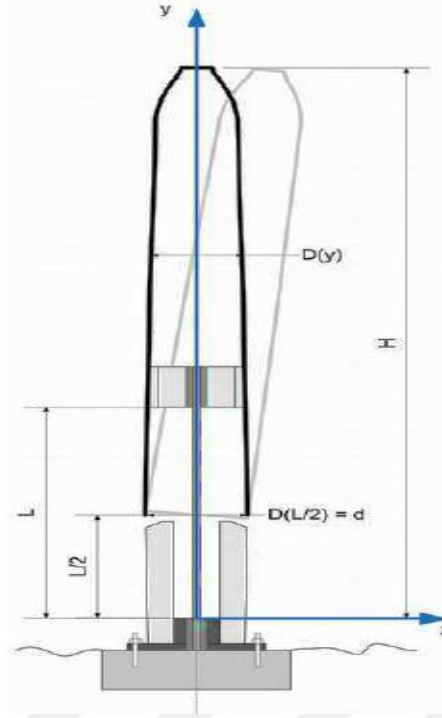
Aeroelastisite kanunlarına göre sistemde oluşan rezonansın frekansı girdap dökülmesinin başlama frekansı ile aynı olursa sistemdeki salınım hareketi hava tarafından indüklenebilir. VIV olgusu olarak bilinen girdap tarafından indüklenen bu titreşimler, gelen rüzgâr akış yönüne dik kuvvetlerle periyodik bir hal alır. Bu periyodik durum girdap dökülmesinin frekansı (f), silindirik yapının karakteristik uzunluğu (Φ) ve rüzgârın ortalama hızı (v) arasında bir boyutsuz Strouhal sayısı olan S_t orantılılık sabiti ile ifade edilir.

$$S_t = \frac{f \times \Phi}{v} \quad (1)$$

3.1.2. Yapı ve Geometri

Rüzgâr yönünün değişken olmasından dolayı bu sistemde yapı, şaft vb. aksamlar olmadığından her zaman rüzgâr yönüne iyi yönlendirilmesi gerekir. Bunun için kesitin dairesel olması düşünülmüştür. Böylece dairesel kesitli bir gövdede girdap dökülmesi, düzensiz dalgalanma veya hızla artış gibi diğer dinamik olayların aksine kolayca oluşur. Ayrıca, yükseklik ile rüzgâr hızları doğru orantılıdır. Bu sebeplerden dolayı, mekanik mil gerektirmeden rüzgâr enerjisini toplamak için dikey, ince ve dairesel kesitli bir yapının uygun olabileceği düşünülmüştür.

Rüzgârın kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesindeki verim, Betz sınırına mümkün olduğunca yakın olmalıdır. Buna binaen direk, rüzgârla doğrudan etkileşime giren sert kısımdır. Rüzgâr akış yönüne dik olan kuvvetlerin tümünün aynı fazda çalışması ve farklı fazda çalışmalarından daha yüksek bir verimde olmaları amacıyla Şekil 13'te görüldüğü üzere çapı yüksekliğe göre değiştirilerek tüm direk boyunca senkronize bir girdap dökülmesine ulaşılması amaçlanmaktadır.



Şekil 13. Yüksekliğe göre direk çapının değişimi (Villarreal, 2018)

(1) numaralı denklemde belirtilen silindirik yapıların karakteristik uzunluğu, direğin çapına bağlıdır. Bu yaklaşım statik yapılar için uygundur, ancak salınımı ihmal edilemeyen yapılarda, (2) numaralı denklem kullanılarak daha iyi bir uyumun elde edildiği tespit edilmiştir.

$$\Phi = D + a \cdot X \quad (2)$$

Φ : silindirik yapının karakteristik uzunluğu,

D: direğin çapının toplamı

X: salınımının genliği

a: Reynolds Sayısına bağlı olan bir ayarlama faktörü

Şekil 13'te görülen üst kısmı direğe ve alt kısım zemine gömülü esnek ve serbest çubuğun L uzunluğunda olduğu kabul edilip direğin küçük açılarda salınım yapabilen bir yapı olduğu düşünülürse; salınımının genliği olan X değeri $y = L/2$ yüksekliği için sıfır olduğu kabul edilebilir.

Bu durumda (2) denklemine göre $\Phi = D(L/2) = d$ sonucu elde edilir ve

rüzgâr hızının $v_{\infty}(L/2)$ değeri için girdap dökülme frekans olan f değeri (3) numaralı denklemindeki değeri alır:

$$f = \frac{S_t \times v_{\infty} \times (L/2)}{d} \quad (3)$$

Salınım değerinin ihmal edilebilir olmadığı direğin diğer herhangi bir bölümünde, girdap dökülmesinin frekansı (4) numaralı denklemindeki değeri alır.

$$f(y) = \frac{S_t \times v_{\infty}(y)}{D(y) + a \times X(y)} \quad (4)$$

$v_{\infty}(y)$: akışın hızı

$X(y)$: direğin y yüksekliğindeki salınım genliği

Esnek çubuğun zemin ankrajı ile cihazın en yüksek kısmı arasındaki mesafe H olduğu varsayılırsa sistemin üst kısmındaki yer değiştirme (5) numaralı denklemindeki hali alır.

$$X(y) = \frac{y-L/2}{H-L/2} \times \gamma \times d \quad (5)$$

d : en alt kısımdaki direk çapı

Girdap dökülme frekansı direğin uzunluğu boyunca aynı olduğundan, sonunda (6) numaralı denklem elde edilebilir:

$$D(y) = d \times \frac{v_{\infty}(y)}{v_{\infty}(L/2)} - a \times X(y) \quad (6)$$

Direğin en yüksek kısmındaki süreksizlik etkisi de dahil olmak üzere hız gradyanının uygun bir tahmini, tüm direk boyunca aynı girdap dökülme frekansını bulmaya hizmet etmelidir. İstenen rezonansa ulaşmak için bu frekansın tüm yapının normal salınım modlarından biriyle çakışması gerekir (Villarreal, 2018).

3.1.3. Enerji Dönüşümü

Sistemin aerodinamiği ve sistemde enerjinin oluşumu başlığında da değinildiği gibi rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör, girdap dökülmesi adı verilen aerodinamik etki sonucu üretilen rezonans olgusu ile rüzgârdan gelen enerjiyi kullanmaktadır. Enerjinin elde edilmesinde kullanılan rüzgârın silindir yapıdaki gövdeden geçirilmesiyle akış değişikliğe uğrattırılıp döngüsel girdap modeli oluşturulacaktır. Girdap modelindeki var olan kuvvetlerin sahip olduğu frekans ile sistemin frekansının birbirine yaklaşması sonucu salınım yapmaya başlar ve kararsız bir hal alıp rezonansa girer.

3.1.3.1 Rezonans

Rezonans, belli bir frekansta titreşen bir sistemin aynı frekanstaki dış titreşimin etkisinde kalarak yüksek genlikte titreşmesi olayıdır. Diğer bir tanımla genliğin sonsuza gitmesi olayıdır. Aerodinamik olarak tasarlanmış bir sistemde titreşimler optimize edilerek enerji üretimi artırılabilir.

Aerogeneratörde rezonansın olması için ilk olarak doğal frekansı belirlenmelidir. Titreşim frekansı, sistemin boyutu, malzemesi, yapısal ve aerodinamik özelliklerine bağlı olarak yapısal modelleme ve analizleri ile belirlenir.

Sonrasında uygun rüzgâr hız aralığının belirlenmesi gerekir. Aerodinamik özellikler, çalışma ortamı ve boyutları gibi değişkenlere bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir.

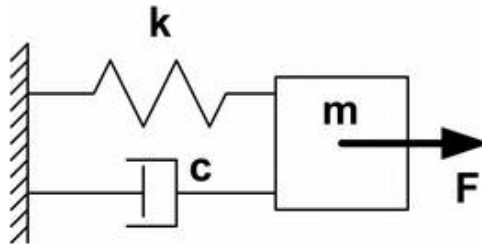
Bu değişkenlerin ve titreşimsel özelliklerin bulunması rezonansın doğru bir şekilde başlaması ve kontrol edilmesi, performans verimliliği, istenmeyen titreşimlerin önlenmesi açısından önemlidir ve yapılacak tasarım mühendislik hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken noktalardandır. Çünkü değişken rüzgâr hızlarında makine üzerindeki aerodinamik kuvvetler de değişecek ve bu da aerogeneratörün titreşim karakteristiğini de etkileyecektir. Bu değişkenlerin ve titreşimsel özelliklerin bulunması rezonansın doğru bir şekilde başlaması ve kontrol edilmesi, performans verimliliği, istenmeyen titreşimlerin önlenmesi açısından önemlidir ve yapılacak tasarım

mühendislik hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken noktalardandır. Çünkü değişken rüzgâr hızlarında makine üzerindeki aerodinamik kuvvetler de değişecek ve bu da aerogeneratörün titreşim karakteristiğini de etkileyecektir.

3.1.4. Frekans Ayarı

Manyetik kuvvetler, yapının rijitliğini arttırmak, istenmeyen titreşimleri azaltmak, istenen titreşimleri yönlendirmek gibi amaçlarla da kullanılabilir. Mekanik özelliklerinde herhangi bir değişikliğe sebebiyet vermeden sadece dış kuvvet olarak sisteme etki ederek yapının davranışını değiştirebilir. Bu kuvvetlerin rezonanslı bir yapıya etki etmesi de yapının sertliğini pasif olarak değiştirecek ve girdap saçılma frekansının sistemin doğal frekansına yaklaşması sonucu oluşan kilitleme aralığının artmasını sağlayacaktır. Bu da sistemin uzun süre kullanımı noktasında verimliliği arttıracaktır.

Her sistemin özgün bir doğal frekansı vardır. Bununla birlikte sistemin kütlesi arttıkça doğal frekansı düşer. Sistem daha rijit bir yapıya geldikçe daha yüksek doğal frekansı olur. Girdap dökülmesinin frekansının rüzgâr akış hızıyla orantılı olmasının yanı sıra rüzgâr frekansını etki ettiği yapının frekansına eşitlenmesi için diğer parametrelerle birlikte sistemin kütle, rijitlik vb. etmenleri de göz önüne alınmalıdır.



Şekil 14. Sönümlü Harmonik Salınım Diyagramı (Uribarri, 2022)

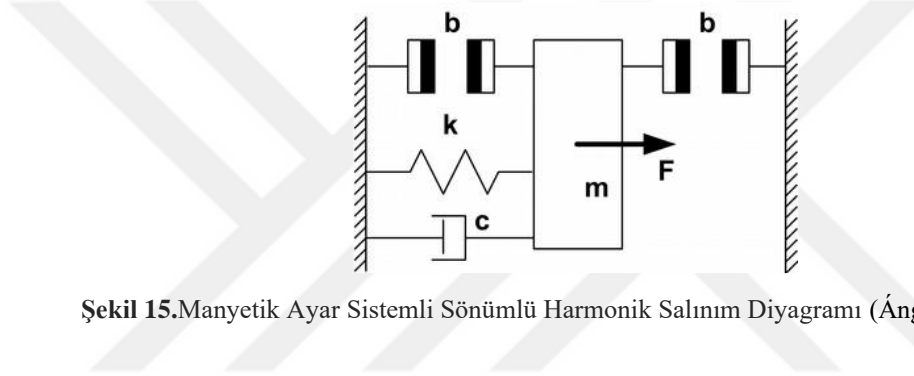
Şekil 14'te m kütleli bir cismin F kuvveti etkisinde zorlanmış ve sönümlü bir titreşimin matematiksel modeli görülmektedir.

Aerogeneratörün tasarımında frekans ayarlama sisteminin olmaması durumunda temelde bu modelde düşünülebilir. Burada m kütlesi direğin kütlesini, belirli bir rijitliğe sahip olan çubuk k yay elemanını, alternatör ve diğer güç kayıpları da c sönüm elemanını temsil edebilir.

Buna göre aerogeneratörün frekansı aşağıdaki gibi olur:

$$f(n) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (7)$$

Rüzgârın neden olduğu salınım kuvvetinin frekans değeri sistemin değeri ile aynı olduğu takdirde sistem rezonansa girecektir. Burada yapının titreşim frekansının tek olmasından dolayı kilitleme aralığı dardır. Kilitleme aralığı yapı içindeki rüzgâr hızlarının rezonans aralığıdır (Uribarri, 2022).



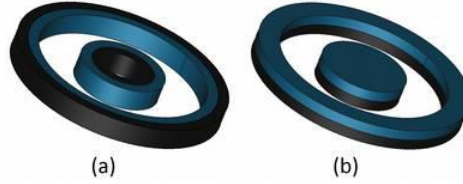
Şekil 15. Manyetik Ayar Sistemli Sönümlü Harmonik Salınım Diyagramı (Ángel vd., 2017)

F kuvveti etkisinde zorlanmış ve sönümlü bir titreşimli sisteme diyagramda b ile gösterilen aynı yönlü biri yere diğeri kütleye sabitlenen iki neodimyum mıknatısın eklenmesi ile birlikte ortaya çıkan manyetik kuvvet yay elemanı gibi davranırlar. Bu manyetik kuvvet kutupları arasındaki ortalama mesafenin karesiyle ters orantılı olup, yer değiştirmeye bağlı olarak sabit olmayan elastikiyete sahip bir sıkıştırma yayı gibi davranır. Burada “k” manyetik itmeye karşılık gelen esneklik miktarını temsil eder (Ángel vd., 2017). Bu durumda frekans (8) numaralı denklem şeklini alır

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(k+k'(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (8)$$

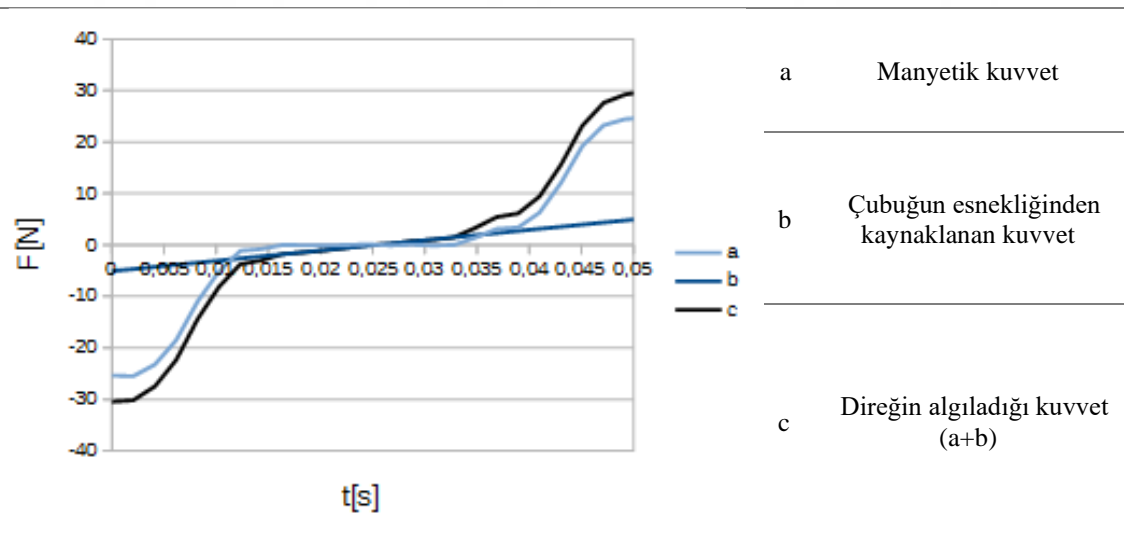
Buna göre sistemin doğal frekansını değiştirmek için kompleks mekanizmalara ihtiyaç duyulacaktır. Bunu önlemek adına rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün tasarımı sahip olduğu rijitliğinin esneme derecelerine göre arttıran kalıcı neodimyum mıknatıslara sahip manyetik bir sınırlama sistemi

kullanılacaktır. Rüzgâr şiddetlendikçe esneme derecesi artar. Bu sistem akort (frekans ayarlama) sistemi olarak adlandırılabilir (Ángel vd., 2017).



Şekil 16. Sistemi ayarlamak için kullanılan kalıcı mıknatıs halkalarının olası düzeni. Dış halka direğe (osilatöre) ve iç halka yere (stator) sabitlenir (Villarreal, 2018)

HAWT gibi geleneksel türbinlerde bulunan güç aktarım elemanları olmayan bu sistemde tasarım, sürekli değişen rüzgârın yönünü etkin kullanmak için dairesel kesitli ve eksenal simetrik olmalıdır. İstenilen etkinin oluşması için manyetik itmeye dayalı şekil 8'deki gibi polarizasyonu eksenal (şekil 16a) veya radyal (şekil 16b) vb. olabilen mıknatıs halka çifti ile oluşturulabilir. Şekil 16'da görülen mıknatıs çiftinden küçük olan sabit, büyük olanın manyetik olarak sınırlandırılmıştır (Villarreal, 2018).



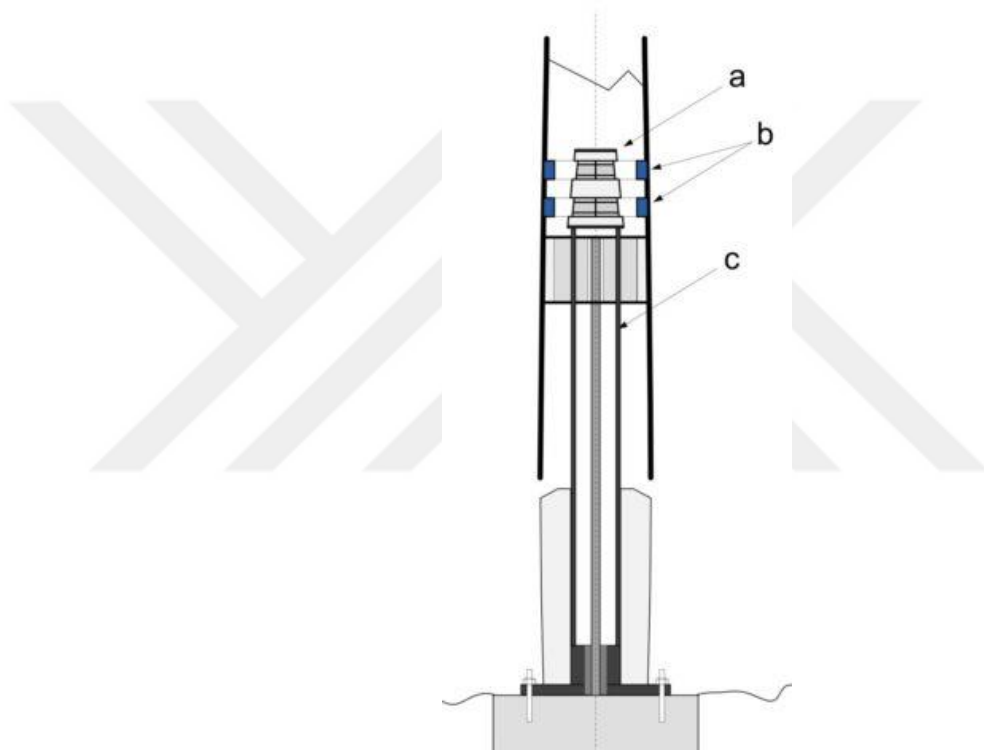
Şekil 17. Herhangi bir salınım genliğine göre çubuğun esnekliğinden ve ayar sisteminin manyetik itmesinden kaynaklanan kuvvetlerin zamansal gelişimi (Villarreal, 2018).

Sonuç olarak, Vortex Bladeless patentli kendi kendine senkronizasyon sistemi devreye girme noktası yaklaşık 3 m/s (başlangıç hızı) ile daha geniş bir rüzgâr hızı aralığını çaba harcamadan yakalamaya olanak tanır. Herhangi bir

mekanik veya manuel müdahale olmadan rezonansa kalmak için sertliği otomatik olarak değiştirebilir ve gelen rüzgâr hızıyla "senkronize" olabilir. Bu şekilde aerogeneratörün kilitlenme aralığı artar (Morales, 2021).

3.1.5. Girdap Alternatörü

Rezonans sonucu oluşan girdap dişliler, şaftlar veya herhangi bir dönen parça olmaksızın girdap dinamiğine uyarlanmış bobinler ve mıknatıslar tarafından yapılan bir alternatör sistemi aracılığıyla elektrik üretmesi düşünülmektedir.



Şekil 18. a. Statorun sabit kısmı b. Alternatörün hareketli kısmı c. Statorun desteği (Morales, 2021)

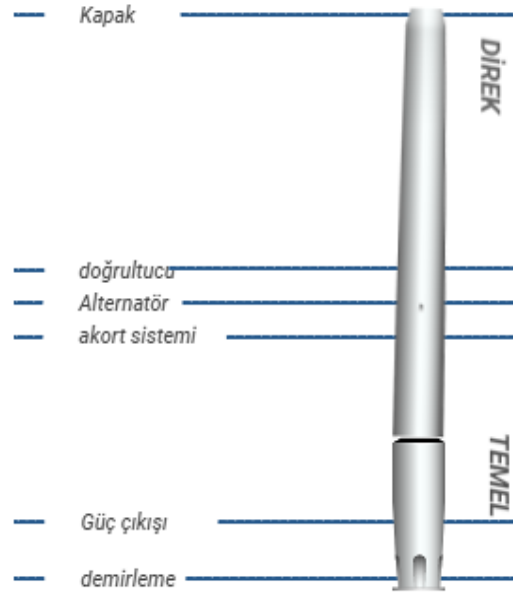
Frekans ayarı başlığı altında da belirtildiği gibi sürekli değişen rüzgârın yönünü etkin kullanmak için tasarımın dairesel kesitli ve aksel simetrik olması gerekmektedir. Rüzgârın yönünden etkilenmeden hareketine devam etmelidir. Dolayısıyla mıknatısların konumu ve yapısı alternatörün tasarımında önemli role sahiptir. Kullanım şekline göre diğer alternatörler gibi elektrik güç çıkışı değişken genlik ve frekansa sahip AC'dir. Düzeltme ve filtrelemeden sonra DC'ye dönüştürülür (Ángel vd., 2017).

Alternatörler iyi bilinen bir teknolojidir, ancak rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratörde kullanılan alternatör kullanma şekliyle yenilikçi ve patentlidir. Bu tasarım, bakımın azaltılmasını sağlar ve gresleme ihtiyacını ortadan kaldırır (Morales, 2021).

3.1.6. Malzemeler ve Kullanım Ömrü

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratör, sürtünme nedeniyle aşınmaya maruz kalabilecek dişliler, yataklar, burçlar veya frenler gibi mekanik iletim elemanları bulundurmaz. Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratörün üretiminde kullanılan ana malzemeler karbon fiber polimerler, plastikler, çelik, neodimyum ve bakırdır.

Yüksek rijitliğe sahip olan dış silindir, alt çubuğa bağlı kalarak titreşim özelliğine sahip olacaktır. Kapak kısmı salınımın maksimum genlikte olacağı yerdir. Silindir karbon fiber veya cam elyaftan üretilmektedir. Direk içinde bulunan çubuğun üstü direği destekler ve alt kısmı temele sıkıca sabitlenir. Çok yüksek bir yorulmaya maruz kalabilmektedir. Bu yüzden yorulma direnci yüksek ve minimum enerji kaybının olduğu karbon fiber takviyeli polimerden yapılmalıdır.



Şekil 19. VIV kaynaklı arojeneratörü oluşturan parçalar (Morales, 2021)

3.2. Aerojeneratör için Tasarım, Analiz ve Optimizasyon

Tasarım, analiz ve optimizasyon süreçleri bir tasarımın performans iyileştirmeleri ve değerlendirmeleri amacıyla uygulanan işlevsellik, güvenilirlik, verimlilik gibi birçok özelliği belirlemeyi sağlayan mühendislik sürecidir. Bu teknolojinin geliştirilmesinde geometrik konfigürasyonlar enerji üretim verimliliği çalışma koşulları iyileştirmeleri önemli bir yer tutmaktadır. Bu tarz teknolojik geliştirmelerin gerçek dünya koşullarında testi oldukça zor ve pahalıdır.

Ayrıca karmaşık ve multidisipliner olan bu tür akışkan-yapı problemlerinin sayısal çözümlemesi ve simülasyonu zordur. Girdap dökülmesi ve girdap kaynaklı titreşimler üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve sayısal çözümleme için farklı yaklaşımlar ve metodoloji geliştirilmiştir. Akışkan akışı, katı dinamiği arasındaki etkileşim sınır koşulları ve cisim yüzey etkileşimi gibi birçok parametreyi barındıran matematiksel modelleme üzerinden hesaplama yapılması gerekmektedir.

Çalışmanın bu kısmında akışkan-yapı problemlerinin sayısal çözümlemesi ve simülasyonu için belirli değişkenlerin belirlenmesi ve buradan hareketle çözümleme yapılması gerekmektedir. Bu değişkenler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Akışkan-yapı problemlerinin sayısal çözümlemesi ve simülasyonu için gerekli parametreler

Parametre	Denklem	Açıklama
Reynolds Sayısı (Re)	$Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu}$	$\rho =$ akış yoğunluğu $U_{\infty} =$ serbest akış hızı $L =$ Karakteristik Uzunluk $\mu =$ Dinamik Viskozite $f(v) =$ girdap saçılma frekansı $f(n) =$ doğal frekans $k =$ yay eleman sabiti $m =$ kütle $F_D =$ aerodinamik sürüklenme kuvveti $F_L =$ aerodinamik kaldırma kuvveti $A =$ Hareketli hava akımının dinamik basıncının etki ettiği yüzey alanı
Strouhal Sayısı (S_t)	$S_t = \frac{f(v)L}{U_{\infty}}$	
Rezonans (Kilitlenme Olgusu) $\frac{f(v)}{f(n)} = 1$	$f(v) = \frac{S_t U_{\infty}}{L}$ $f(n) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$	
İndirgenmiş Hız (V_r)	$V_r = \frac{U_{\infty}}{f_n L}$	
Sürüklenme (C_D) ve Kaldırma (C_L) Katsayıları	$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_D}$ $C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_L}$	

Reynolds Sayısı, akışkanın laminer ve türbülanslı gibi akış rejimlerinden biri olup olmadığının belirlenmesinde kullanılan akışkanın atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine oranı ile elde edilen akışkanlar mekaniği katsayılarından biridir.

Strouhal sayısı, girdap saçılma frekansının etki ettiği cismin doğal frekansına yaklaşması sonucu oluşan rezonans olayının oluşması durumundaki titreşim kaynaklı ilişkinin karakterize edilmesinde kullanılan sayıdır.

Rezonans, girdap saçılma frekansının etki ettiği cismin doğal frekansına yaklaşması sonucu cismin kararsız bir hal alıp titreşmesi olayıdır ve yüksek enerji potansiyeli taşır.

İndirgenmiş hız, girdap kaynaklı titreşimin oluşma hız aralığının belirlenmesinde kullanılan parametredir.

Sürüklenme kuvveti katsayısı, bir cismin akışkan içerisindeki hareketi sonucunda akış hızına ters yönde ortaya çıkan sürüklenme kuvveti olarak adlandırılan direnç kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan parametredir.

Kaldırma kuvveti katsayısı, Cismin gövdesi etrafından geçen akışkanın hareketi ile oluşan hareketli cismin akışkan üzerinde tutunmasını sağlayan hareket yönüne dik, cismin ağırlığına zıt yön vektörüne sahip girdap dökülmesi olayında ise tüm döngüsünde dönüşümlü değişen kaldırma kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan parametredir.

3.2.1 Aerojeneratör için Modelleme ve Analiz Hazırlığı

Geçmişten günümüze girdap kaynaklı titreşimler hakkında yapılan çalışmalara bakıldığında dairesel kesitli şekiller üzerinde titreşimin yapısı iyi anlaşılmıştır. Girdap kaynaklı titreşim problemleri için iki boyutlu olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve girdap kaynaklı titreşimin fiziğini anlamak için iki boyutlu incelemek yeterli bir yaklaşım olmasına karşın girdap kaynaklı titreşimlerin matematiksel modellenmesinin üç boyutlu incelenmesi daha karmaşık bir durum oluşturmaktadır. Bu da sayısal simülasyonlara ihtiyacı doğurmaktadır.

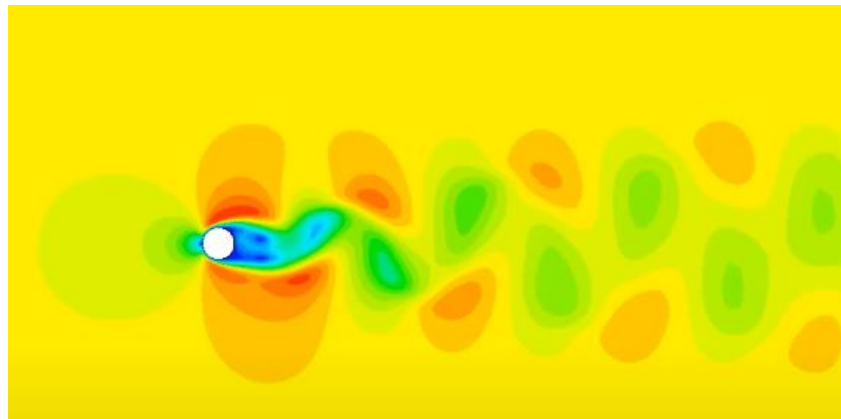
Tablo 2. Reynolds sayısı için akış bilgileri

Hava Yoğunluğu (15 °C)	ρ	1,225 kg/m ³
Serbest Akış Hızı	U_{∞}	5 m/s
Karakteristik Uzunluk	L	1m
Dinamik Viskozite	μ	1,79x10 ⁻⁵ kg/m.s

Verilen değerlerle yapılan hesaplamadan sonra Reynolds sayısı bize akışın türbülanslı olacağını göstermektedir.

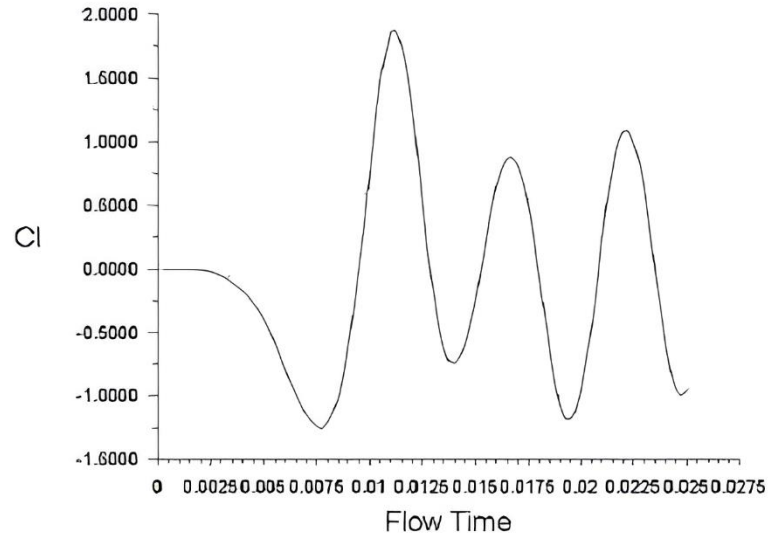
İki boyutlu ve üç boyutlu CFD modelinde türbülanslı Von Karman Vortex Street olgununu doğru çözümlenmede ve aynı değerler için simülasyonun Şekil 11'de gösterilen deneysel görüntü ile benzer görüntüyü yakalamada hangi türbülans modelini kullanmak gerektiği önemlidir. Türbülans modellerinin performansını kontrol etmek amacıyla bir akış etrafındaki akış durumunda hem iki boyutlu hem de üç boyutlu yapılan çalışmalar neticesinde iki boyutlu dairesel silindir için deneylerle en uyumlu sonuçları veren türbülans modeli SST k-omega'nın türbülans modeli; üç boyutlu dairesel silindir durumunda deneylere göre en iyi sonucu veren türbülans modeli Reynolds Stresi modeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca zaman adımı büyüklüğünün sayısal hesaplama sonucuna çok önemli etkisi vardır. Daha küçük zaman adımı boyutu, daha fazla yenileme sayısına rağmen daha hızlı ve daha doğru sonuç verir (Amalia vd., 2018).

SST k-omega türbülans modelinin iki boyutlu model analizi için en iyi sonucu verdiği sonucuna şekil 20 ile şekil 11 'de Re sayısına göre gösterilen akış hareketinin aynısını yakalamasıyla da görebiliriz.

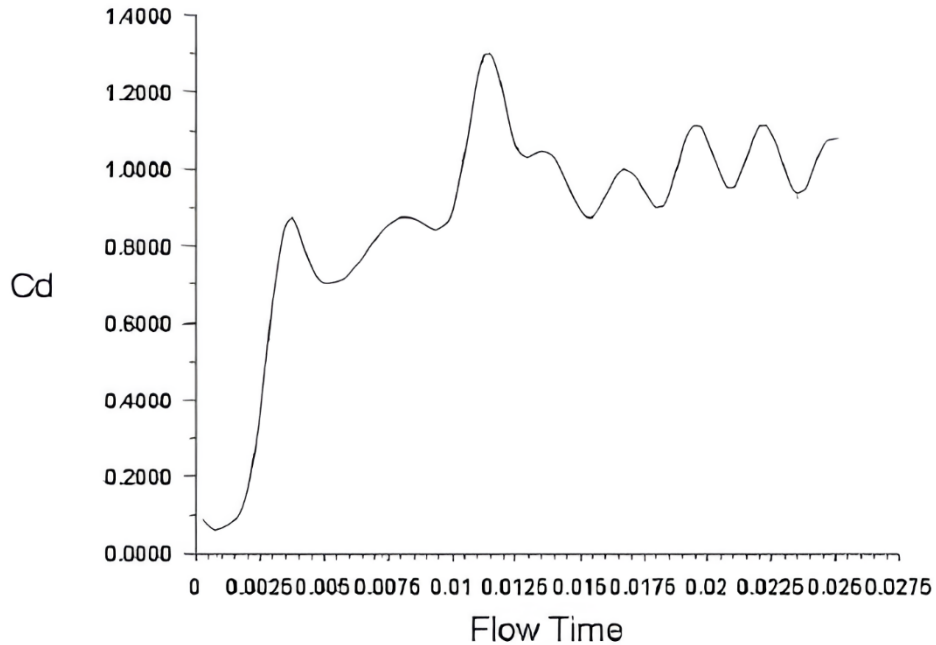


Şekil 20. SST k-omega Türbülans Modeli kullanılarak $Re=2,5 \times 10^6$ değerine göre iki boyutlu dairesel silindirin hız simülasyonu

Ayrıca SST k-omega türbülans modelinin iki boyutlu model analizi için şekil 21'deki grafikte kaldırma katsayısı (Cl) eğrisinin ve şekil 22'deki grafikte sürüklenme katsayısı (Cd) eğrisinin daha düzgün sonucunu verdiği şekil görülebilir.

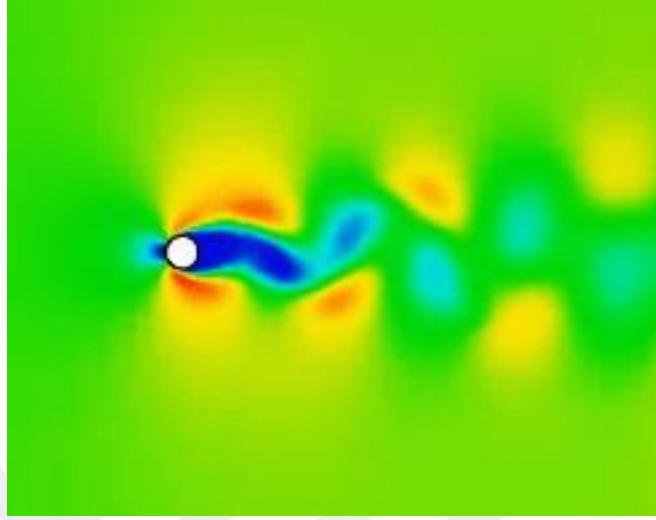


Şekil 21 SST k-omega Türbülans Modeli kullanılarak $Re=2,5 \times 10^6$ değerine göre iki boyutlu dairesel silindirin kaldırma katsayısı eğrisi (Amalia vd., 2018)



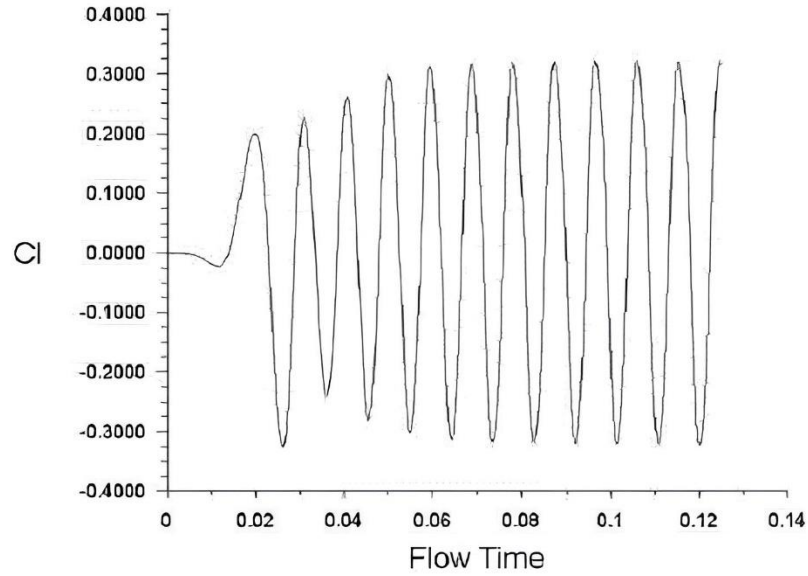
Şekil 22. SST k-omega Türbülans Modeli kullanılarak $Re=2,5 \times 10^6$ değerine göre iki boyutlu dairesel silindirin sürüklenme katsayısı eğrisi (Amalia vd., 2018)

Üç boyutlu model analizi için ise Reynolds gerilmesinin türbülans modelinin iyi sonucu verdiği sonucuna şekil 23 ile şekil 11 'de Re sayısına göre gösterilen olayın aynısını yakalamasıyla da görebiliriz.

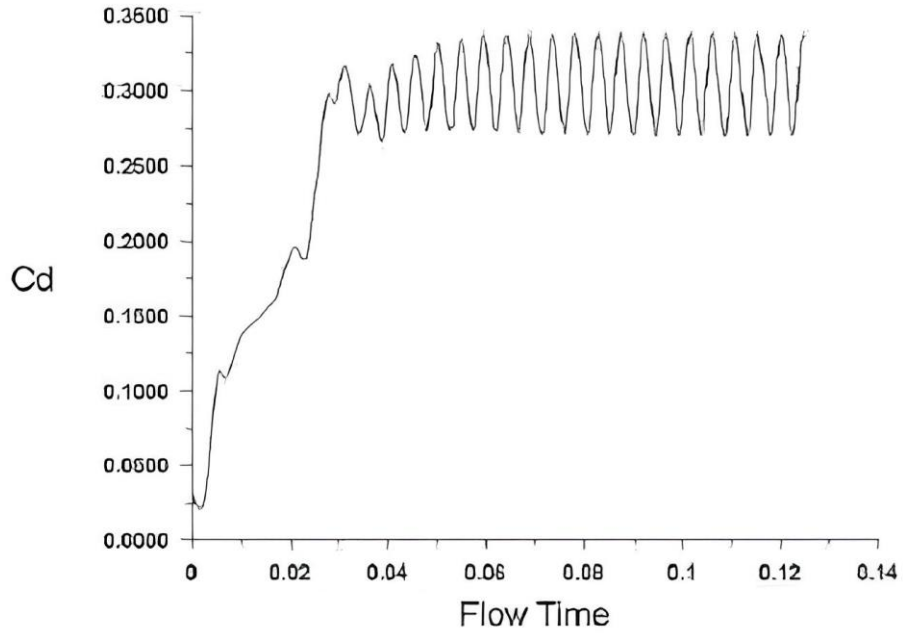


Şekil 23 Reynolds Stresi Türbülans Modeli kullanılarak $Re=2,5 \times 10^6$ değerine göre üç boyutlu dairesel silindirin hız simülasyonu

Ayrıca Reynolds Stresi Türbülans Modeli'nin üç boyutlu model analizi için şekil 24'teki grafikte kaldırma katsayısı (C_l) eğrisinin ve şekil 25'deki grafikte sürüklenme katsayısı (C_d) eğrisinin daha düzgün sonucunu verdiği şekil görülebilir.



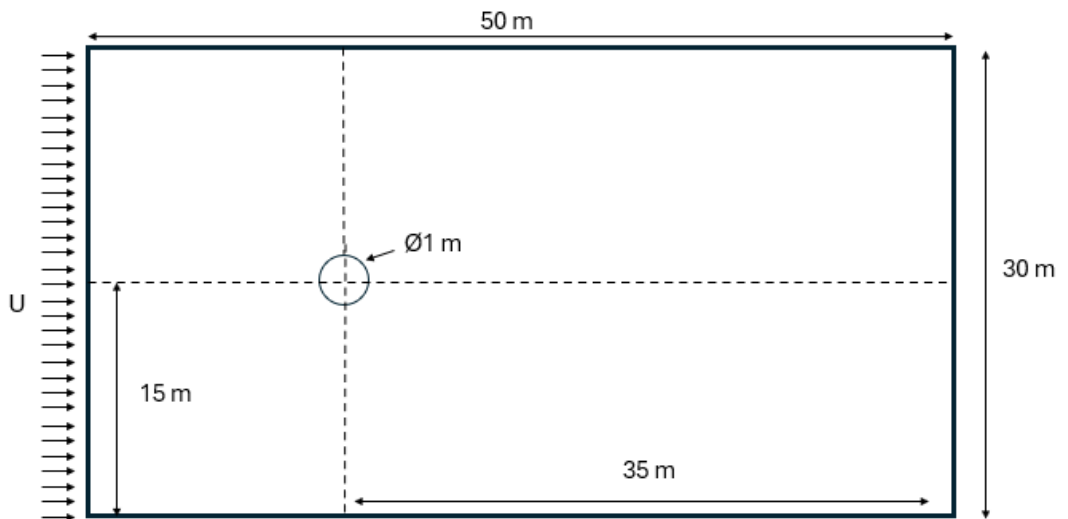
Şekil 24. Reynolds Stresinin türbülans modeli kullanılarak $Re=2,5 \times 10^6$ değerine göre üç boyutlu dairesel silindirin kaldırma katsayısı eğrisi (Amalia vd., 2018)



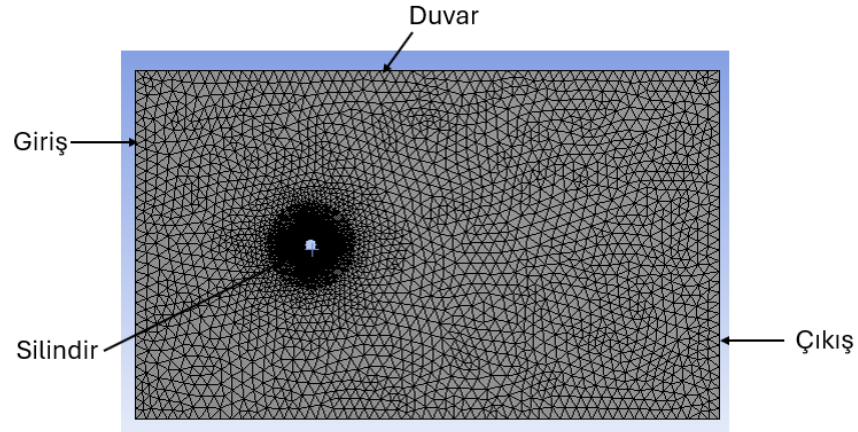
Şekil 25. Reynolds Stresinin türbülans modeli kullanılarak $Re=2,5 \times 10^6$ değerine göre üç boyutlu dairesel silindirin sürüklenme katsayısı eğrisi (Amalia vd., 2018)

3.2.2 Aerojeneratör için Tasarımın İki Boyutlu Model Analizi

Modelin analizi için kullanılacak çözüm alanının şekli ve boyutu, çözümün bulunması açısından daha fazla yinelemeye ihtiyaç doğuracağı için problemin sonucunu etkileyebilir. Dolayısıyla daha küçük boyutlu ve homojen bir çözüm alanı daha doğru ve hızlı sonuçlar verecektir.



Şekil 26. 2 boyutlu model analizi için çözüm alanı plan görünümü



Şekil 27. Çözüm alanı ağ oluşumu

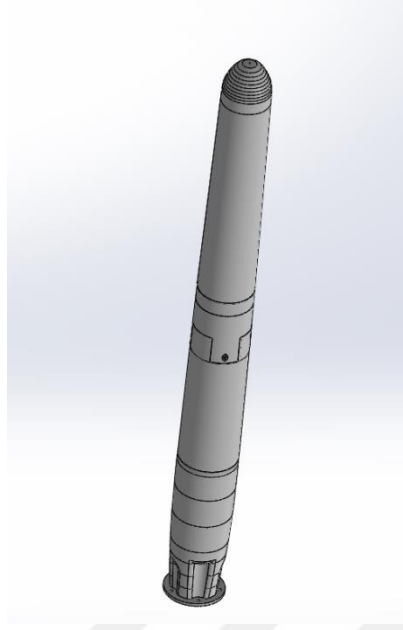
Çözüm Yönteminde tercih edilen SIMPLE, Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Örtülü Yöntem'in kısaltmasıdır. Navier-Stokes denklemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılır ve birçok araştırmacı tarafından farklı türdeki akışkan akışı ve ısı transferi problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılır. (Sabab vd., 2021)

Tablo3. 2 Boyutlu Model Analiz Değerleri

Türbülans Modeli	SST k-omega	
Malzeme	Air-Density and Dynamics Viscosity	
Sınır Şartları	Inlet Velocity 8m/s Pressure Outlet 0 Pa	
Referans Değeri	İnlet	
Çözüm Yöntemi	SIMPLE Second Order for All	
Başlangıç	From Inlet	
Hesaplama	Save Every 1 Time Step	
Zaman Adımı	0,05 s	Hesaplama Süresi 0,05*500=25 s
Adım Sayısı	500	
Yineleme	60	

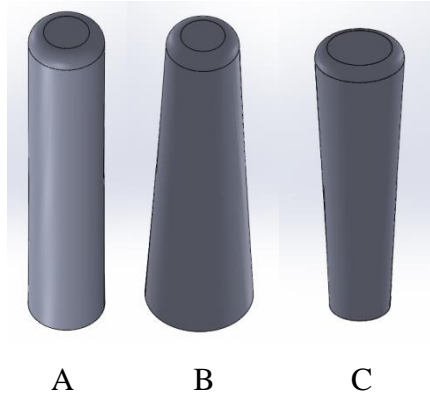
3.2.3 Aerojeneratör için Tasarımın Üç Boyutlu Model Analizi

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerojeneratör fikrinin sahipleri tarafından önerilen ve çeşitli basitleştirilmiş konfigürasyonlarla üzerinde modelleme ve analiz yapılan tasarım Şekil 28'deki gibidir.



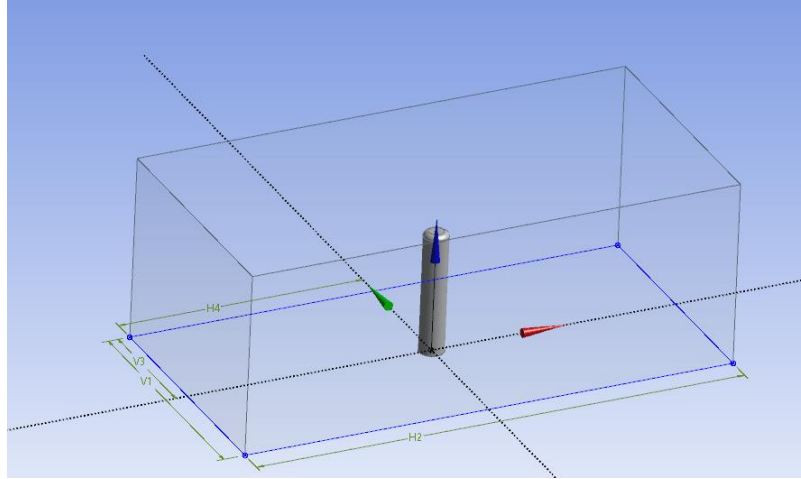
Şekil 28. Aerojeneratör fikrinin sahipleri tarafından sunulması planlanan tasarım

Tasarımın aerodinamik davranışının simüle edilebilmesi ve farklı rüzgâr yoğunluklarında bu sistemin hareketinin analizi için akışkan-yapı hesaplamasındaki karmaşıklığı azaltmak adına alternatif olarak tasarımın homojen bir şekilde basitleştirilme yoluna gidilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bunun yanı sıra arzu edilen veriler elde etmek amacıyla farklı konfigürasyon ve en-boy oranları kullanılmıştır.



Şekil 29. Aerojeneratörün basitleştirilmiş farklı konfigürasyonları

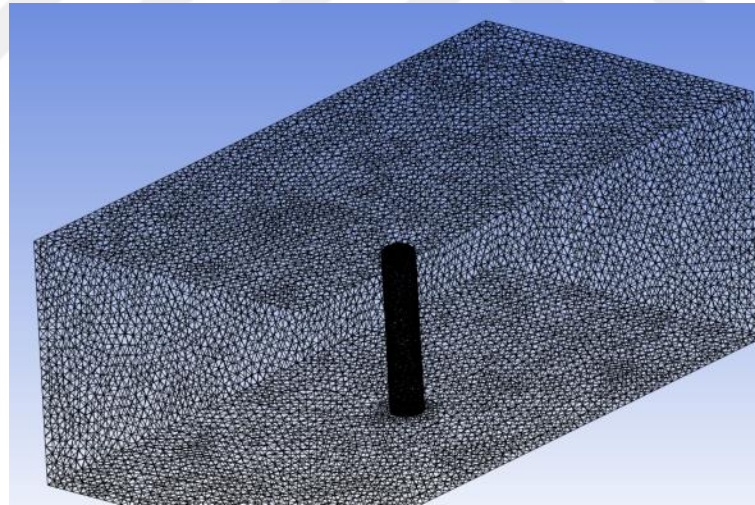
İki boyutlu modelin analizinde olduğu gibi kullanılacak çözüm alanının şekli ve boyutu, çözümün bulunması açısından daha fazla yinelemeye ihtiyaç doğuracağı için problemin sonucunu etkileyebilir. Dolayısıyla 3 boyutlu analizde de daha küçük boyutlu ve homojen bir çözüm alanı oluşturulması düşünülmüştür.



Şekil 30. 3 boyutlu model analizi için çözüm alanı plan görünümü

Tablo4. 3 Boyutlu Model Analizi için çözüm alanı ölçüleri

H2	20 m
H4	10 m
V1	10 m
V3	5 m
Yükseklik	7,5 m



Şekil 31. 3 boyutlu model analizi için çözüm alanı ağ oluşumu

Tablo 5. 3 Boyutlu Model Analiz Değerleri

Türbülans Modeli	Reynolds Stress	
Malzeme	Air-Density and Dynamics Viscosity	
Sınır Şartları	Inlet Velocity 8m/s Pressure Outlet 0 Pa	
Referans Değeri	İnlet	
Çözüm Yöntemi	PISO Second Order for All	
Başlangıç	From Inlet	
Hesaplama	Save Every 1 Time Step	
Zaman Adımı	0,05 s	Hesaplama Süresi
Adım Sayısı	500	0,05*500=25 s
Yineleme	60	

3 Boyutlu Model Analiz için Çözüm Yönteminde PISO tercih edilmiştir. Çünkü sabit bir silindirin geçici uygulaması için kararlı bir çözüm sunmaktadır. Momentum uzamsal ayrıklaştırma bölümü için, negatif hücre hacminden dolayı bir hata ürettiği için akış yönü ile hizalanmış yapılandırılmış ağlarda tipik olarak daha doğru olacağından, QUICK Second Order Upwind seçilir(Sabab vd., 2021).

Üç Boyutlu Model Analizin değerlendirilmesinde iki Boyutlu Model Analizde olduğu gibi akış süresine karşı sürüklenme katsayısı (C_D) ve kaldırma katsayısı (C_L) grafiklerinin yerine akış süresi boyunca serbest akış hızının x yönündeki ortalama hız grafiği oluşturulup grafikten belli anlardan sayısal verilerin belirlenip hangi titreşim frekanslarının çevrelerine en fazla enerji verdiğini göstermesi amacıyla Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanır(Sabab vd., 2021).

Tablo 6. 3 Boyutlu Model Analiz Katı Malzeme Özellikleri

Malzeme Özellikleri	Fiberglas ve Karbon Fiber Takviyeli Polimer
Kimyasal Formül	CFRP-GFRP
Yoğunluk	1365 kg/m ³
C_p (Özısı)	787 [J/(kg.K)]
Termal İletkenlik	0,36 [W/(m.K)]

3.3. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (HAWT) Tasarımı

Yatay eksenli rüzgâr türbini (HAWT), ismini rotor ekseninin yönü yatay olmasından dolayı almıştır. Rüzgâr türbinleri arasında en yaygın kullanıma sahip olan türbindir. Fikrin temelleri bakımından geleneksel rüzgâr türbinlerinden olan bu türbinler rüzgârdan enerji elde edilmesi amacıyla tüm bileşenleri (kanatlar, şaft ve jeneratör) bir kulenin üzerinde olduğu tasarımıdır. Bu rüzgâr türbininde kanatlar rüzgâra dönük, şaft yere yataydır. Şaftın ucunda jeneratörü döndüren bir dişli vardır. Büyük türbinlerde ek olarak rüzgârın çok fazla olması durumunda yavaşlatmak amacıyla yer alan frenleme sistemi de mevcuttur.

3.3.1. Türbinin Aerodinamiği

Aerodinamik, havanın çevrelediği madde ile girdiği etkileşimin üzerinde çalışan bir bilim dalıdır. Yatay eksenli bir rüzgâr türbini için kanat tasarımında en önemli parametredir. Aerodinamik olarak incelenen kanatların rüzgâr enerjisini verimli alması amacıyla kanata etkiyen kuvvetlere dayanımına göre tasarımı yapılmıştır. Yatay eksenli bir rüzgâr türbini için aerodinamik hesaplamalar oldukça komplekstir.

Kaldırma kuvvet ile kanatlarının dönmesi bu türbinin yüksek verimle çalışmasına sebep olan etmenlerdendir. Bir başka etmen ise bu türbinin geometrisidir. Aerodinamik hesaplamalarda kullanılan katsayılar her bir tasarım için değişse de tüm hesaplamalarda kullanılan parametreler de vardır.

Kanata etki eden kuvvetin boyutu ve dağılımı tüm aerodinamik hesaplamalarda önemli bir husustur. Kanatın etkiyen kuvvetlerin yönünde hareket etmesi ile iş meydana gelmiş ve güç elde edilmiştir.

$$P = F \times v \quad (14)$$

Kaldırma kuvvetli özelliği olan bu türbinin akışa dik hareket eden kaldırma yüzeylerinden dolayı rüzgâr rotor hızıyla artar ve diğer rüzgâr türbinlerine oranla daha yüksek güç sınırına ulaşılmış olur. Bu durum ticari olarak daha çok tercih edilme sebeplerindedir.

Aerodinamik hesaplamalarda boyut faktörü devreye girdikçe çok fazla değişkenlik durumu ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Bu sürekli değişen parametrelerin varlığı hesabı zorlaştıracağı düşünülmektedir. Bu durumu aşmak adına boyut ve rüzgâr koşulları parametrelerini kullanmadan hesap yapılmasına olanak sağlayan boyutsuzlaştırma ilkesine gidilecektir. Boyutsuzlaştırma ilkesi güç katsayısı (C_P) itki katsayısı (C_T), hız oranı (λ), kaldırma katsayısı (C_L), sürüklenme katsayısı (C_D) ve bağıl hız gibi birçok karakteristik parametreler barındırır. Bu parametrelerin kullanılmasıyla yapılan aerodinamik

hesaplamlarda kompleks bir durumdan daha kolay çözülebilir bir duruma getirilebilir.

3.3.2. Kanat Tasarımı

İncelenen çalışmalarda aerodinamik hesaplamalar nezdinde kanat tasarımı için yapılmış olan çeşitli hesaplamaların yanında üretim ve saha performansı açısından belirli hesaplamalar yapılması yoluna gidildiği gözlemlenmiştir. Bu hesaplamalardan biri olan uç hızı oranı için kanadın uç kısmının hız ile rüzgâr arasındaki orandan faydalanılacaktır. Bunun yanında kanat üretiminde atalet momentinin düşük olan bir malzeme seçilmesi düşünülmüştür. Böylece rüzgârlı bir ortamda kanadın çabuk hızlanacağı uç kısmı sabit kalmaya yakın olacağı düşünülmüştür.

3.3.3. Nasel (Makine Yuvası) Tasarımı

Nasel, rüzgâr türbinindeki kule ve rotoru birbirine bağlayan makine yuvasıdır ve içinde şanzıman ve jeneratör yer almaktadır. Naselde yer alan jeneratör sayesinde nominal değerinin altına düşen rüzgâr hızının mümkün olduğunca fazla güç alması amacıyla rotor hızını kontrol etmesi sağlanmıştır. Jeneratöre şanzıman yoluyla bağlı olan mil kanatlar tarafından döndürülmüş olur.

3.3.4. Türbinin Güç Kontrolü ve Diğer Kontrol Mekanizması Prensipleri

Türbin kontrol sistemleri enerji dönüşümünün verimli olması ile belli hız ve moment aralığında çalışması için ciddi önem arz etmektedir.

Aşırı hız sonucu kanatlardaki merkezkaç kuvveti hızın karesiyle, ortaya çıkan güç ise hızın küpü ile orantılı bir şekilde oluşmaktadır. Dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda türbin maliyetleri göz önünde bulundurularak belirli kontrol mekanizmaları oluşturulmuştur. İncelenecekler arasında bazıları şunlardır:

- Şiddetli rüzgâra maruz bir kanata etkiyen kuvvetlerin olumsuz etkisini azaltarak türbinin kontrollü ve yavaş bir şekilde dönmesini sağlayan ani yavaşlayıp durma prensibi ile çalışan Stall mekanizması oluşturulmuştur.
- HAWT sistemlerinde meydana gelen en kritik problemlerden olan rüzgârın ani hızlanmasına karşı kanatların kısa sürede durdurulması ve kapanmasını sağlayan kapatma sistemi oluşturulmuştur. Bu şekilde kanatlar rüzgâr enerjisine kendini kapatarak sistem üzerinde yük azaltılmış olacaktır. Kanat tasarımında yapılacak iyileştirmeler neticesinde kapatma sisteminin daha etkin olabilmesi sağlanmıştır.
- Kanat tasarımı başlığında bahsedilen uç hız oranı 6 ile 7 arasında tutulduğu takdirde türbinden yüksek miktarda güç elde edilebilir. Günümüz HAWT türbinleri değişken hızlarda çalışabilen makineler olması nedeniyle rüzgâr hızının belirli aralıkta tutulması amaçlanmıştır. Bu denge, jeneratörün torku ile sağlanabilir. Rotor hızının rüzgâr hızıyla doğru orantılı olması ve jeneratör torku ile ters orantılı olması kanatlarda oluşan aerodinamik tork hakkında bilgi edinilmesini sağlar.
- Naselde bulunan rüzgâr gülü ile yapılan ölçümle rüzgâr yönü belirlenip türbinin rüzgâr yönüne çevrilmesi sağlanmaktadır.

3.3.5. Frenleme Sistemi Tasarımı

Yatay eksenli rüzgâr türbini, çok hızlı bir şekilde döndüğü takdirde merkezkaç kuvveti etkisiyle patlayabilir. Daha çok orta ve büyük türbinlerde oluşma ihtimali olan bu durumu önlemek için frenleme sistemi geliştirilmiştir. Aşırı hızlanma veya ciddi bir durumda türbini kapana veya diskli fren bulunduran mekanik frenleme sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca küçük ölçekli bir HAWT'ta böyle bir durumla karşılaşılma ihtimaline karşı elektrikle frenleme sistemi tasarlanmıştır. Türbindeki kinetik enerjinin ısıya dönüştürülmesi amacıyla jeneratörden direnç takımına enerji boşaltımı sağlamaktadır. Bu frenleme sistemi jeneratördeki kinetik enerjinin ani azalması ve türbin hızının türbin hız aralığının altında olması durumunda da kullanılmaktadır.

3.3.6. Açık Deniz Kurulumu (Offshore) için Gerekli Olan Destek Yapısı

Açık deniz kurulumları için bir dizi farklı destek yapısı tasarımı olmak zorundadır. Bu tasarımlardan en yaygını deniz tabanında büyük kayaların olmadığı alanlarda kullanılan destek yapısı türü çapları 2,5-4,5 m aralığında olan çelik boru monopildir. En yaygın ikinci seçenek, yerçekimi yapısıdır. Yerçekimi yapıları, toplam ağırlıkları (balast dahil) ve geniş taban alanı sayesinde stabilite sağlar. Taban alanı, deniz tabanına iletilen yüklerin dağılımını pasif olarak değiştirerek rüzgâr türbininin devrilme anını önlemeye yardımcı olabilir. Yerçekimi yapısı, 12-18 m çapında ve 500-1000 ton ağırlığında dairesel bir tabandan oluşur. Yerçekimi yapısı yerine indirilmeden önce deniz tabanı hazırlanmalıdır (Manwell vd., 2010).

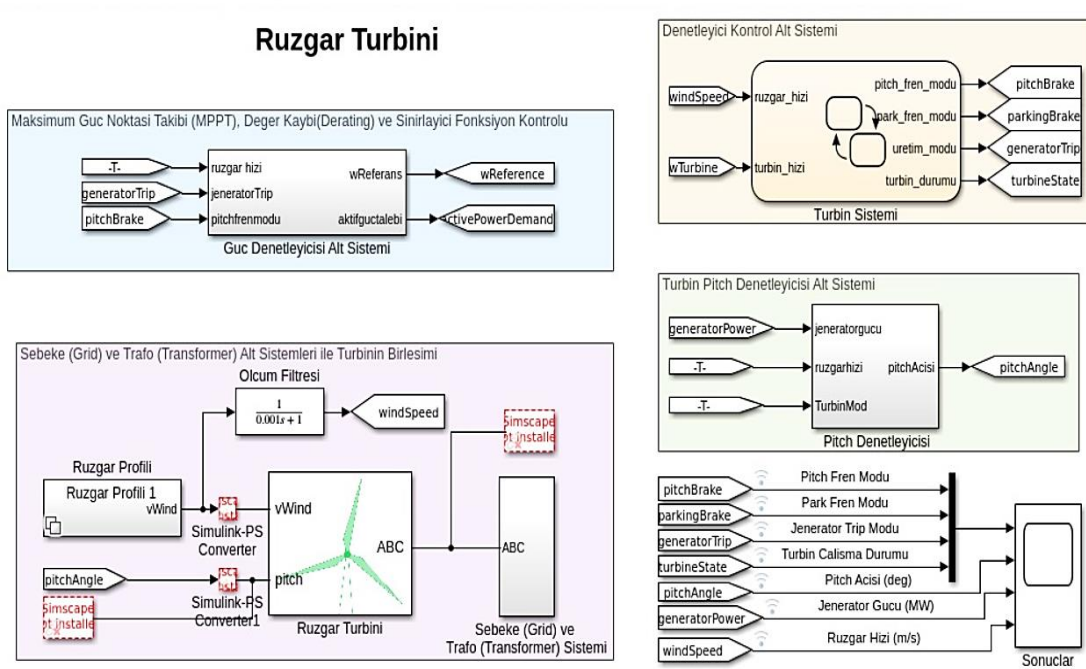
3.3.7. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin (HAWT) Modellenmesi

Gerçek koşullarda çalışan bir rüzgâr türbininin sahip olduğu bütün bileşenler göz önüne getirildiği zaman uygun yapı ve geometri, aerodinamik davranışının simülasyonu, hareketinin analizi ile sahip olduğu elektronik, mekanik ve diğer fiziksel bileşenlerinin modellenmesi ve simülasyonu oldukça karmaşık ve ayrı çözücü yapılandırılması gerekmesinden dolayı içerisinde birçok grafik düzenleyici, özelleştirilebilir blok kütüphaneleri ve çözücü, sonlu elemanlar analiz araç seti barındıran ve farklı modelleme bulunduran ve farklı sistemlere kolay entegre olmasından dolayı MATLAB uygulaması kullanılmıştır.

Bu çalışmada dönme ve öteleme mekanik sistemlerinin modellenmesi ve simüle edilmesi için Simscape Driveline (Simscape Aktarma Organı), elektronik, mekatronik ve elektrik güç sistemlerinin modellenmesi ve simüle edilmesi için Simscape Electric, durum geçiş diyagramlarını, akış şemalarını, durum geçiş tablolarını ve doğruluk tabloları için Stateflow (Durum Akışı), sistem düzeyinde tasarım, simülasyon, otomatik kod oluşturma ve gömülü sistemlerin sürekli test ve doğrulaması için Simulink, fiziksel sistem modelleri için Simscape bileşen kütüphaneleri kullanılmıştır.

Bu sayede bir rüzgâr türbininin denetleyici, eğim açısı, MPPT (maksimum güç noktası takibi) ve güç kaybı kontrolü ile nasıl modelleneceği, parametrelendirileceği ve

test edileceği gösterilmiş ve durum geçişlerinin, rüzgâr hızı, rüzgâr türbini dönüş hızı, jeneratör gücü ve eğim açısı gibi durumların grafikleri elde edilmiş olacaktır.



Şekil 31. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin MATLAB ortamında oluşturulması

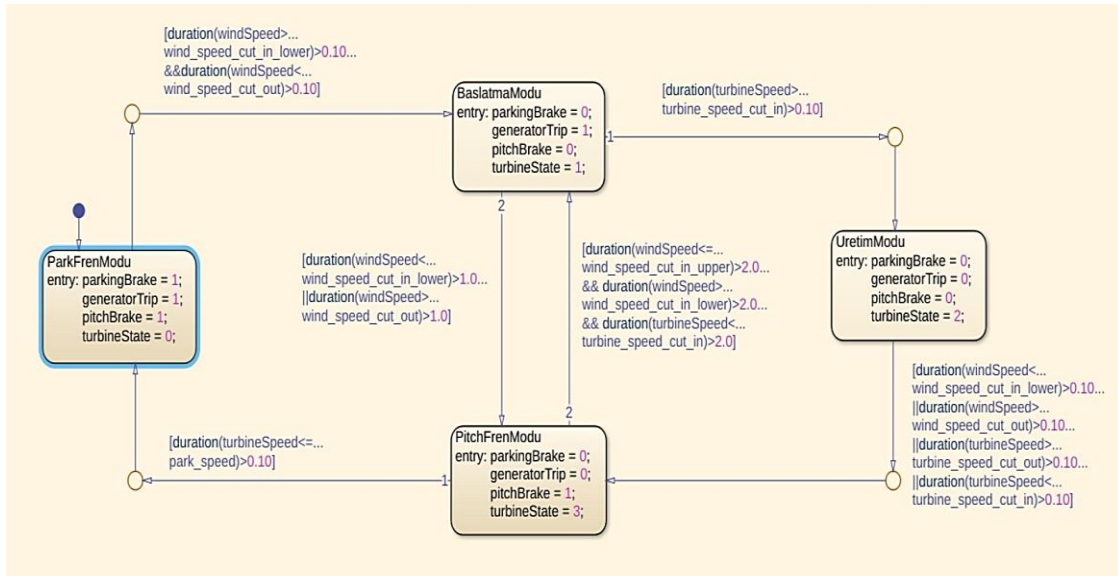
3.3.7.1 Denetleyici Kontrol Alt Sistemi

Denetleyici kontrol alt sistemi rüzgâr türbininin nasıl modellendiğini göstermektedir. Bu sistemde park freni, başlatma, üretim, pitch fren modları olmak üzere dört rüzgâr türbini durumu bulunmaktadır. Rotorun hızının güvenli çalışma şartı sınırının altına inmesi anında türbin pitch fren modundan çıkar ve jeneratör tetiklenerek rüzgâr türbininin çalışmasının giriş moduna girer. Bu giriş modu park fren modu olarak adlandırılır ve devrede olduğu anda rotor kanatları aerodinamik frenleme için frenleme açısına göre eğilir. Hidrolik fren modu rüzgâr türbini frenleme için acil durum çekici görülebilir.

Rotorun hızının güvenli çalışma şartı sınırının altında olduğu zaman türbin pitch fren modundan başlatma moduna geçer. Yine jeneratör tetiklenir ve hidrolik park freni serbest bırakılır. Bu anda rotor kanatları minimum açığa eğilerek maksimum rotor ivmesi kazandırır. Rotorun hızının güvenli çalışma şartı sınırının üstüne çıkması durumuna geldiği zaman türbin başlatma modundan üretim moduna geçer. Bu modda

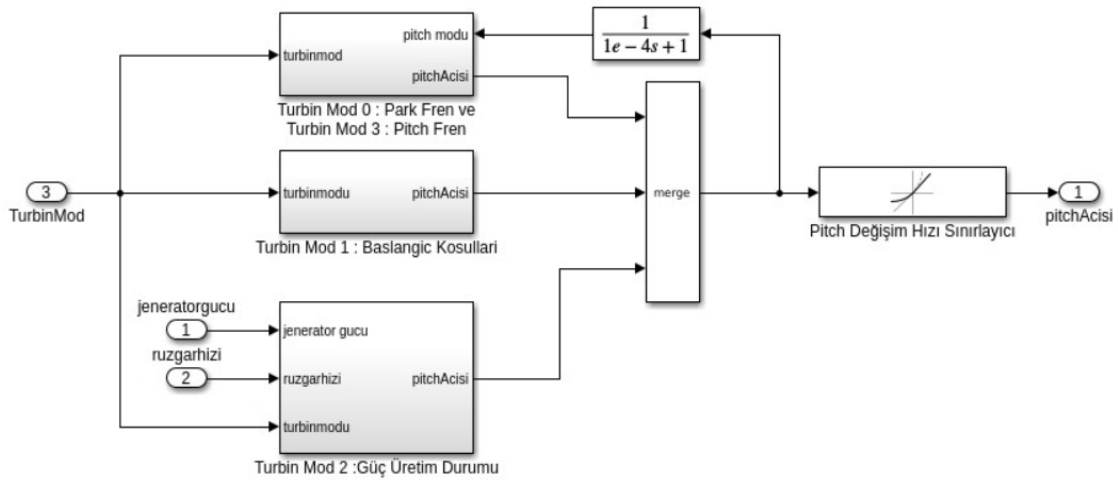
jeneratör transformatöre bağlanır ve park freni boşa çıkar. Rotor kanatları bu modda çalışma koşullarına göre en verimli elektrik enerjisini üretecek konuma gelecek şekilde eğilir.

Rüzgâr hızı türbin kanatlarını döndürebilecek seviyede olmadığı zaman türbin üretim modundan çıkar. Bu durumda pitch fren modu devreye girer ve jeneratör rotor kanadındaki mevcut olan enerjiyi de kullanmak için transformatöre bağlanır. Bu durumda da hidrolik park freni boşa çıkar ve rotor kanatları aerodinamik frenleme için frenleme açısına eğilir. Rüzgâr türbininin durması için temel öncelikli yöntem aerodinamik frenleme durumudur



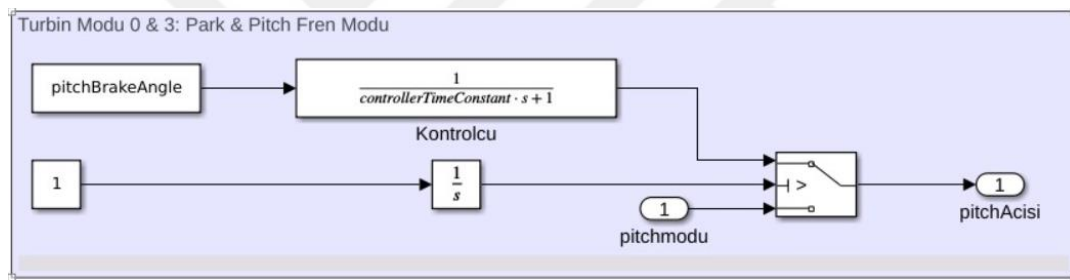
Şekil 33. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin Denetleyici Kontrol Alt Sistemi

Şekil 34'te rüzgâr türbininin eğim açısı kontrolörünü sağlayan pitch denetleyici alt sistemi görülmektedir.



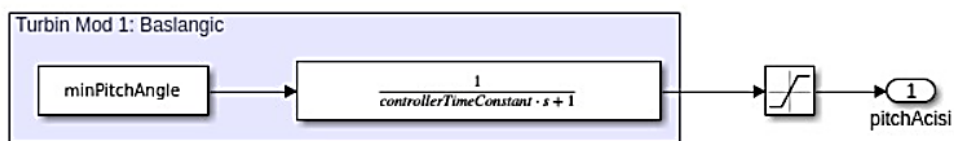
Şekil 34. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin Pitch Denetleyici Alt Sistemi

Şekil 35'te rüzgâr türbininin aerodinamik frenleme için park ve pitch fren modu oluşturulmuş ve pitch açısı 95 dereceye ayarlanmıştır.



Şekil 35. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini için Park ve Pitch Fren Modu

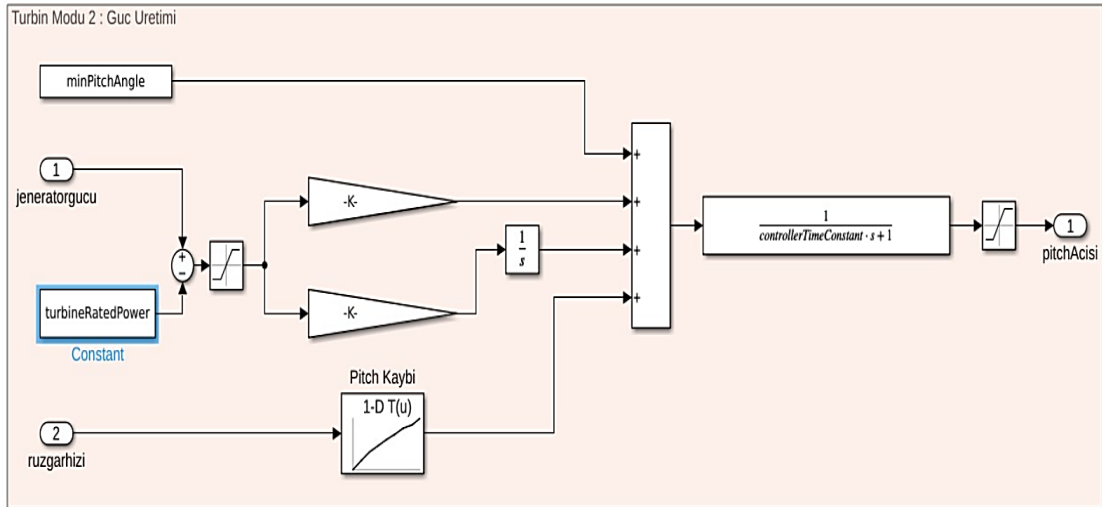
Şekil 36'da denetleyici kontrol alt sisteminin başlatma modu görülmektedir.



Şekil 36. Denetleyici Kontrol Alt Sisteminin Başlatma Modu

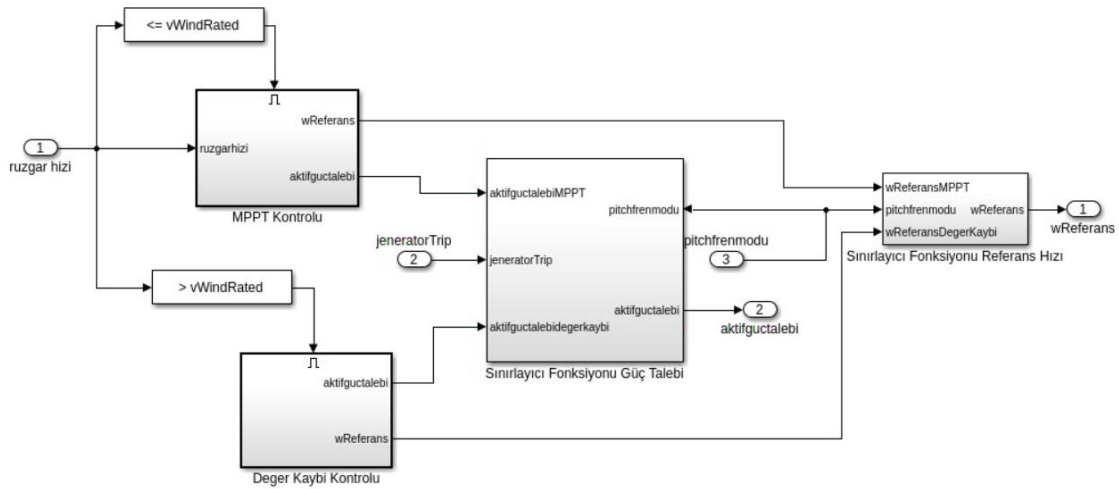
Üretim modunda eğim açısı, çalışma koşullarına göre optimum elektrik enerjisi üretimini sağlayacak şekilde ayarlanır. Eğim açısı, nominal rüzgâr hızına kadar 1 derecelik en düşük ayarda kalır. Bu kontrol rüzgâr türbininin MPPT güç kontrolü ile senkronize olarak hareket eder. Rüzgâr hızı, nominal rüzgâr hızının üzerinde olduğunda,

eğim açısı, rüzgâr türbininin güç kaybı kontrolüyle senkronize olarak değişir(Anonim, 2023b).



Şekil 37. Denetleyici Kontrol Alt Sisteminin Üretim Modu

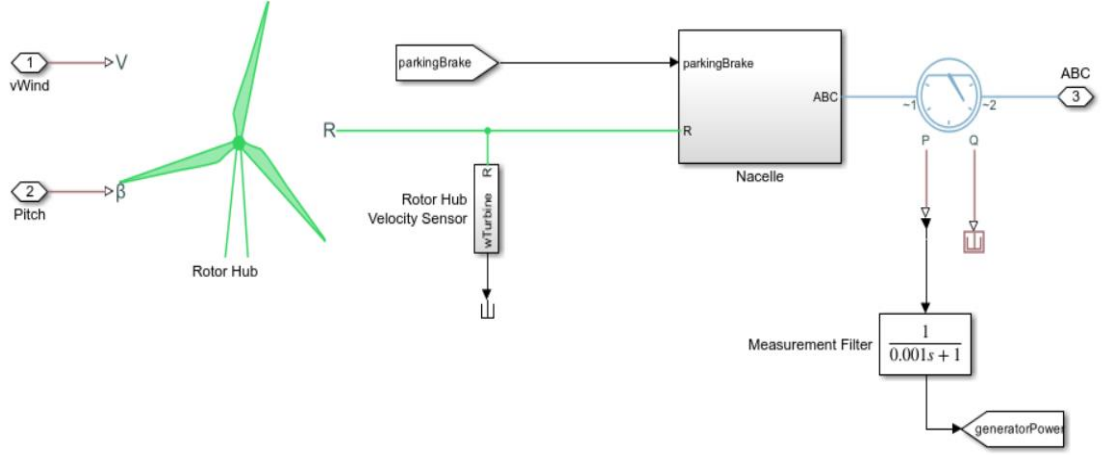
3.3.7.2 Güç Denetleyicisi Alt Sistemi



Şekil 38. Güç Denetleyicisi Alt Sistemi(Anonim, 2023b)

Jeneratörün rüzgâr türbini karakteristik güç performans eğrisine göre normal şartlar altındaki rüzgâr hızına kadar aktifliğin kontrolü, güç talebi ve jeneratör referans hızının değişkenliği, rüzgâr türbininin çalışma moduna göre güç talebinin ve hız referansının sınırlandırılma durumunun ayarlanması güç denetleyicisi alt sisteminin modellenmesi ile sağlanmaktadır.

3.3.7.3 Rüzgâr Türbini Alt Sistemi



Şekil 39. Rüzgâr Türbini Alt Sistemi (Anonim, 2023b)

Yatay eksenli bir rüzgâr türbininin rotoru, Simscape Driveline Rüzgâr Türbini bloğu kullanılarak modellenmiştir. Bu blokta rüzgârdan elde edilen mekanik güç P şu şekilde hesaplanır:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A_r \times V^3 \times C_p \quad (15)$$

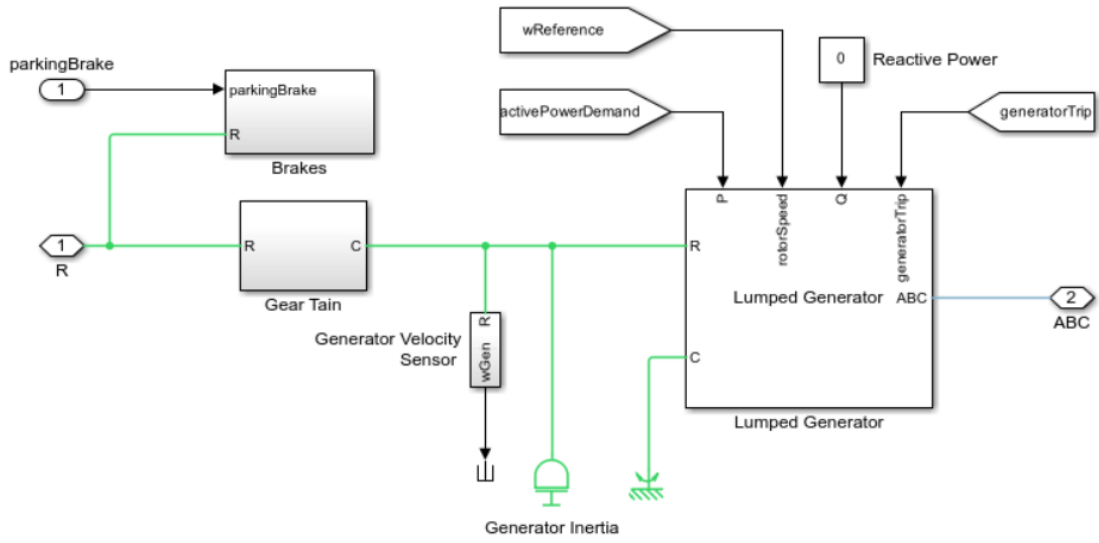
ρ = havanın yoğunluğu

A_r = rotor kanatlarının taradığı alan

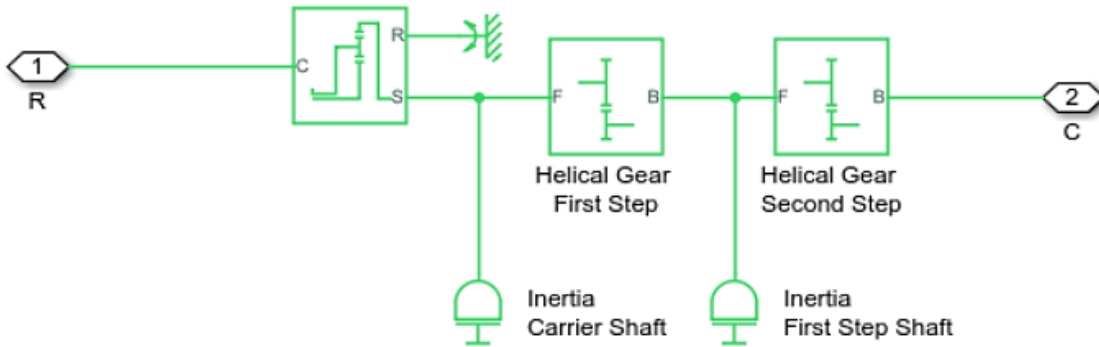
V = rüzgar hızı

C_p = Boyutsuzlaştırma İlkesi Güç Katsayısı

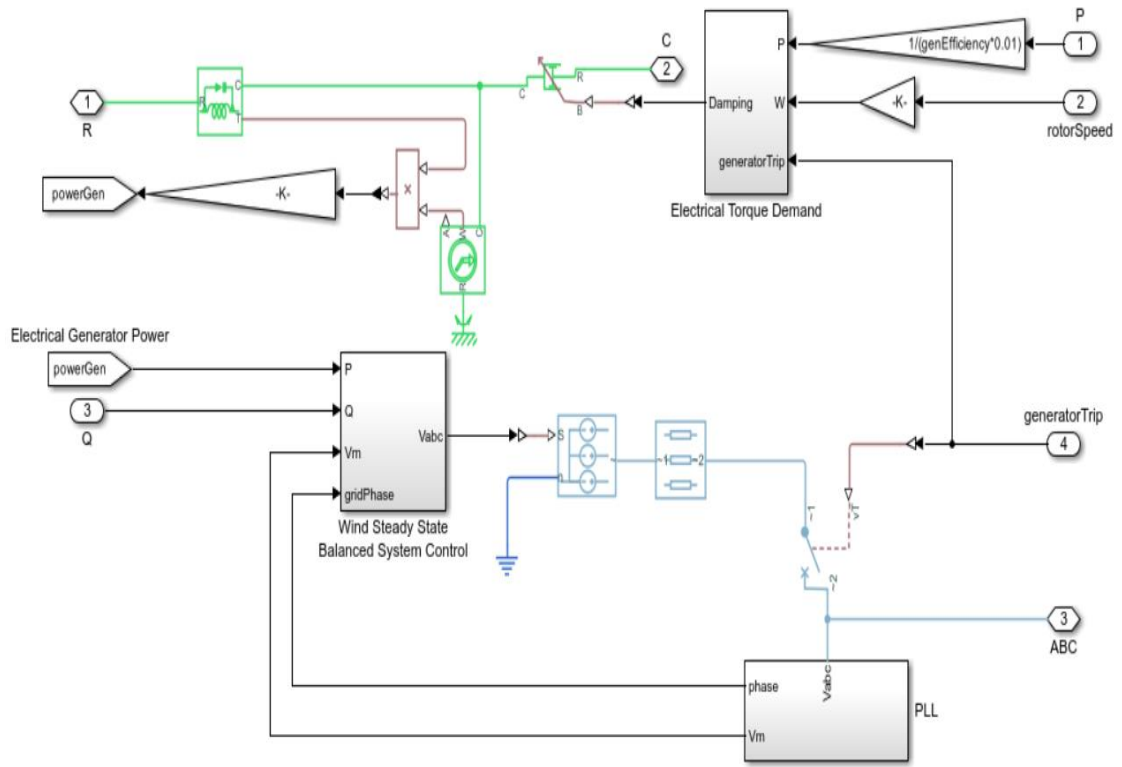
Şekil 40'ta rüzgâr türbini alt sisteminde yer alan fren sistemi görülmektedir. Rüzgâr türbininde ikincil frenleme yöntemi olarak kullanılan hidrolik fren sistemi, HAWT park freni modunda park freni hızının türbinin normal hızı üzerinde olmaya başladığı anda çalışmaktadır. Hidrolik fren sisteminin aktif olduğu anlardan birisi bakım çalışması durumudur. Park freni hızı üzerinde olması durumunda aşırı sürtünme kaynaklı yanma riski taşır. Motor bölmesindeki dişli takımının modellenmesi Şekil 41'de görülmektedir. Şekil 42'de ise jeneratörün modellenmesi görülmektedir.



Şekil 40. Rüzgâr Türbini Fren Sistemi (Anonim, 2023b)



Şekil 41. Rüzgâr Türbini Dişli Takımı (Anonim, 2023b)



Şekil 42. Rüzgâr Türbini Jeneratörü (Anonim, 2023b)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

“Akış Üzerindeki Periyodik Düzensizlikler Tarafından Üretilen Titreşim ile Rezonansa Girerek Oluşan Mekanik Enerjiyi Elektrığe Dönüştürebilen Aerojeneratör” tasarım fikrinin temelinde rüzgârın doğal dinamiklerinden faydalanarak aerodinamik bir rezonans oluşturması ve enerji üretmesi yatmaktadır. Bu dinamiklerden olan ve vortex shedding olarak tanımlanan girdap saçılması olgusundan faydalanan sistemin hareketini kolaylaştırmak ve enerji üretim verimliliğini arttırmak amacıyla hafif ve rüzgârın sistem üzerindeki etkisini daha kolay optimize etmesi için silindirik makine olarak tasarlanması gerekmektedir. Böylece hafif bir malzemedен yapılmış silindirik bir gövdenin rüzgâr etkisi altında doğru titreşimler yapması beklenebilir.

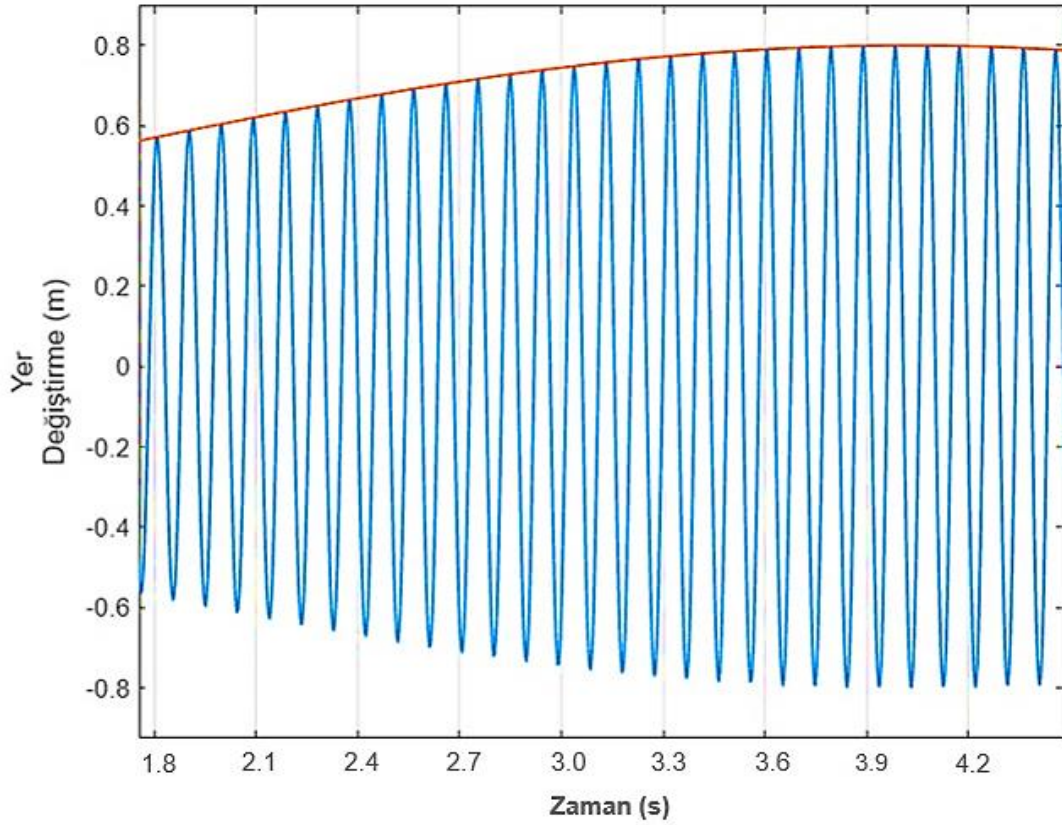
Rüzgâr yönü daima değişkendir. HAWT gibi geleneksel türbinlerde bulunan güç aktarım elemanları olmayan bir sistemde rüzgârın yönünü etkin kullanmak için makine dairesel kesitli ve simetrik olmalıdır. Çünkü girdap kaynaklı bir akışta gerçekleşen dinamik olaylar dairesel bir yüzeyde daha kolay oluşacaktır.

Hafif bir malzeme tercihinde aerojeneratörün yapısında değişken rüzgâr yönü ve hız aralığına kolay uyum sağlaması amacıyla esnekliği arttırmak gerekir. Bu nedenle aeroelastik bir malzeme kullanılmalıdır.

Aerojeneratörün rüzgârın dinamiklerinden daha verimli faydalanması ya da daha genel bir ifade ile rüzgâr etkisi altında titreşimi arttırarak daha fazla enerji üretmesi için aerodinamik unsurlar göz önünde bulundurularak tasarlanması gerekmektedir. Bu sayede aerodinamik bir yüzeye sahip bir gövde rüzgâr akışını daha kolay optimize edebilir.

4.1. Akışkan-Yapı Etkileşim Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Aerojeneratörün akışkan yapı etkileşimi için akışa bağlı tepkisel salınım aralığı incelenmiştir. Salınım değerlerinin maksimum yer değiştirme değişkenliği aerojeneratörün rezonansa girme durumu ile ilişkilidir. Salınım süresince farklı frekans görülebilmektedir.



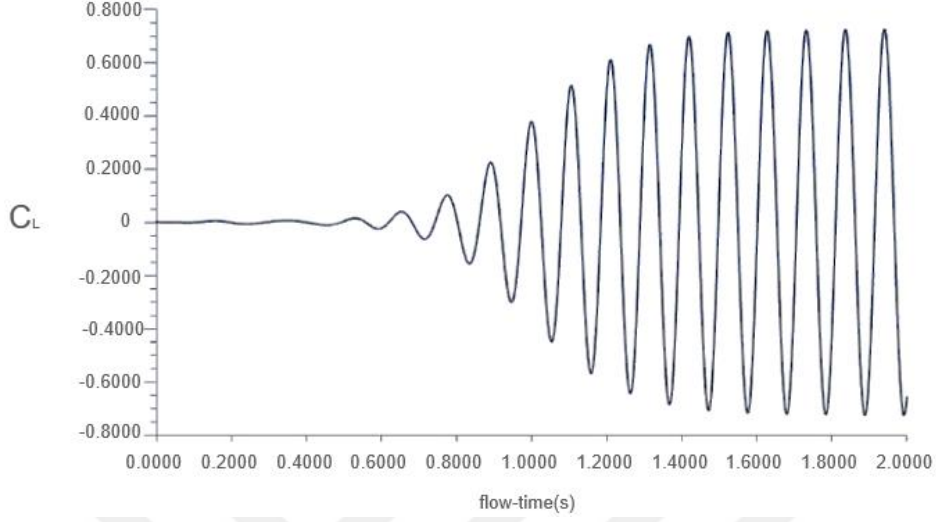
Şekil 43. A tasarımı için simülasyonda havanın frekansının tasarımın kilitlenme aralığına yaklaşmasındaki tepkisi

Şekil 43'te A tasarımı için simülasyonda havanın frekansının tasarımın kilitlenme aralığına yaklaşmasındaki tepkisi görülmektedir. Analizde belli bir süre sonra maksimum genliğin sabit olduğu görülmektedir. Bu durum akışın frekansının aerogeneratörü kilitlenme aralığına girmesini sebep olduğunu ve aynı yer değiştirme aralığında hareketi sağladığı şeklinde yorumlanabilir.

Tablo 7. Tasarım konfigürasyonlarının ölçü ve yer değiştirmeleri

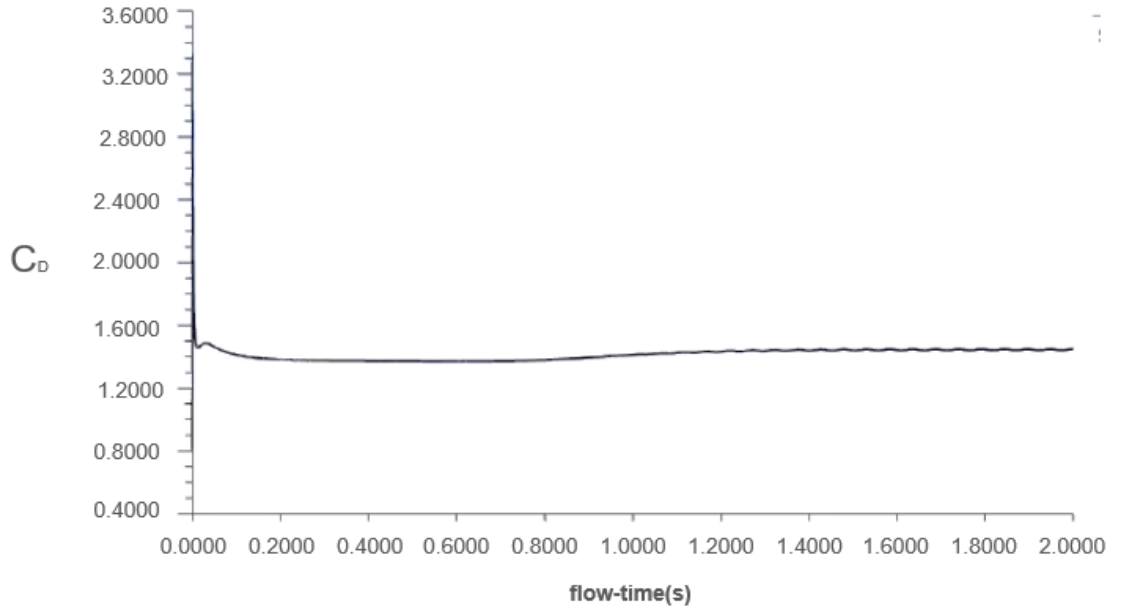
Tasarım	Boyutlar	Yer Değişirme (m)
A	(Alt: 1,7.5) (Üst: 1,7.5)	0.78
B	(Alt: 2,7.5) (Üst: 1,7.5)	0.596
C	(Alt: 1,7.5) (Üst: 2,7.5)	0.54

4.1.1. 2 Boyutlu Model Analizi için Kaldırma ve Sürüklenme Katsayıları Sonucu ve Değerlendirilmesi



Şekil 44. İki Boyutlu model analizinde silindirin akış değerlerine karşın kaldırma katsayısının zamana göre değişimi

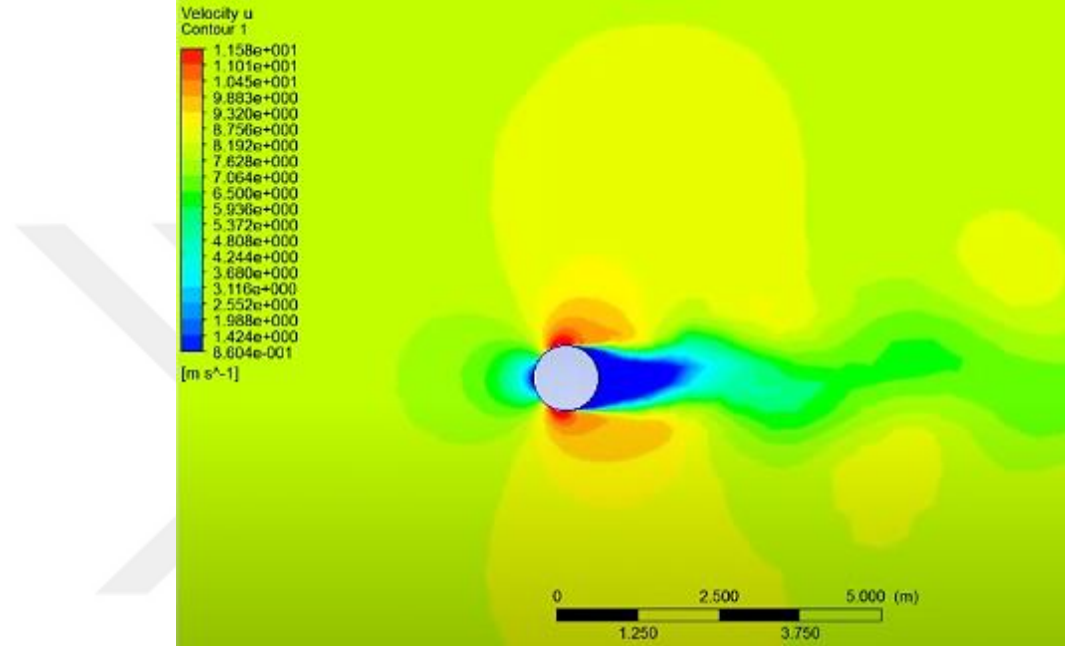
Şekil 44'te görüldüğü gibi kaldırma katsayısı değeri, -0,8 ile 0,8 değerleri arasında değişir. Bu durum silindirin her iki tarafta dönüşümlü olarak girdaplar tuttuğunu gösterir.



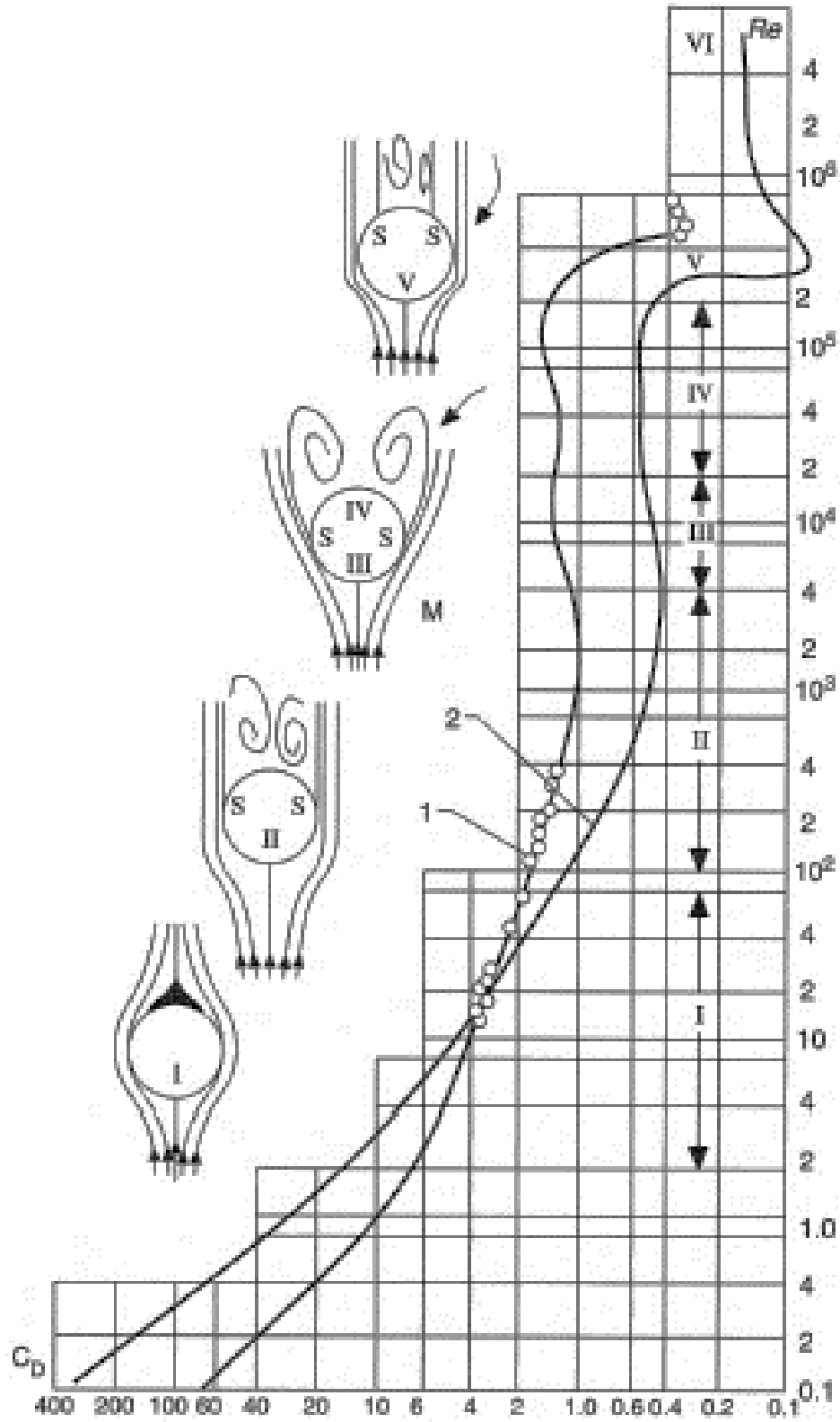
Şekil 45. İki Boyutlu model analizinde silindirin akış değerlerine karşın sürüklenme katsayısının zamana göre değişimi

Şekil 45'te görüldüğü gibi sürüklenme katsayısı değeri 1.4 ile 1.51 arasında çıkmaktadır. Bu da Şekil 47'deki Re-Cd eğrisinde hesaplanan Re sayısı için yakınlığını doğrulamaktadır.

Şekil 46'da iki boyutlu model analizinde girdapların silindirin etrafından ayrılıp türbülanslı Von Kármán Street oluşumunun olduğu hız akım çizgileri görülmektedir.



Şekil 46. Girdapların silindirin etrafından ayrılıp türbülanslı Von Kármán Street oluşumunun olduğu hız akım çizgileri

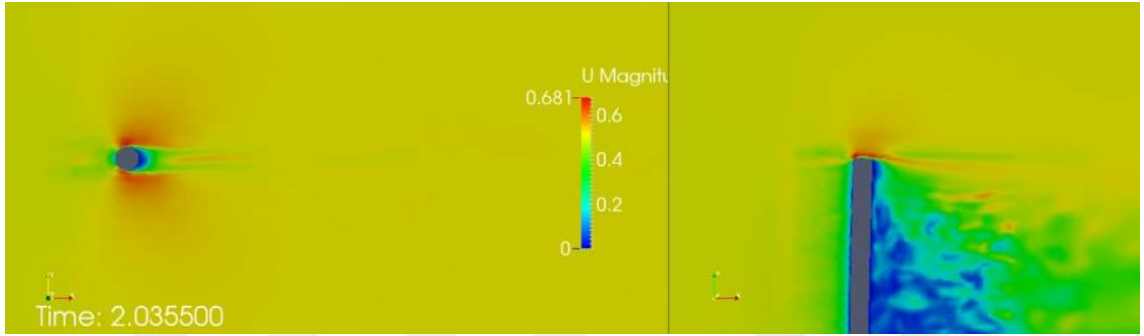


Şekil 47. Reynolds sayısının (Re) bir fonksiyonu olarak silindirler (1) ve küreler (2) için sürüklenme katsayısı (Polezhaev vd., 2011)

4.1.2. 3 Boyutlu Model Analizi için Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

Aerogeneratörün üç boyutlu model analizi için 3 ayrı basitleştirilmiş konfigürasyon tercih edilmiştir.

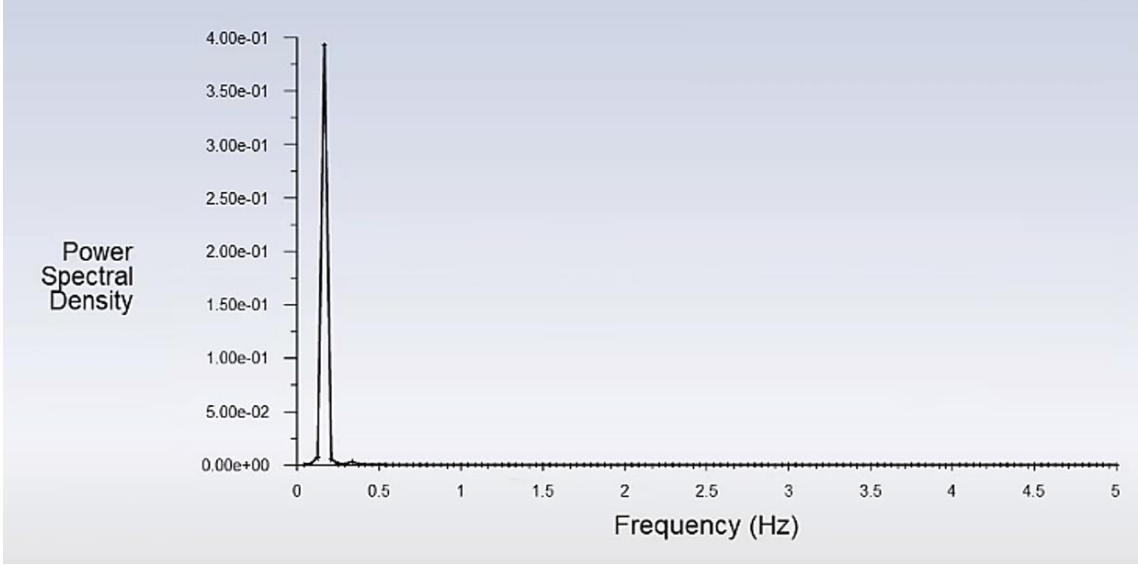
Tasarımın akışkan-yapı etkileşimi için en uygun tasarımı bulmak adına Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmış ve bu dönüşümle girdap saçılma frekansı olan f_v , doğal frekans f_n ve Strouhal Sayısı da hesaplanmıştır. Tasarım etrafında oluşan akış için hız değeri 5m/s olarak tercih edilmiştir. Şekil 48 3 boyutlu analizde girdapların silindirin etrafından ayrılıp türbülanslı Von Kármán Street oluşumunun olduğunu göstermektedir.



Şekil 48. Tasarım A için 3 boyutlu analizde girdapların salınımlı silindirin etrafından ayrılıp türbülanslı Von Kármán Street oluşumunun olduğu hız akım çizgileri

Üç Boyutlu Model Analizinde akış süresine karşı sürüklenme katsayısı (C_D) ve kaldırma katsayısı (C_L) grafiklerinin yerine akış süresi boyunca serbest akış hızının x yönündeki ortalama hız grafiği oluşturulma yoluna gidilmiştir. Grafikten belli anlardan sayısal verilerin belirlenip FFT kullanılarak hangi titreşim frekanslarının çevrelerine en fazla enerji verdiğini göstermesi amaçlanmıştır.

Mekanizmanın titreşimi ile oluşan harmonik hareketi sonucu ortaya çıkan gücün frekansa karşı ölçümünü sağlamak için kullanılan spektral güç yoğunluğu ile birim frekans başına düşen güç bulunabilir. Birimi W/Hz'dir. Şekil 49'da Birim frekans başına düşen spektral güç yoğunluğu grafiği gösterilmektedir.



Şekil 49. Birim frekans başına düşen spektral güç yoğunluğu(W/Hz)

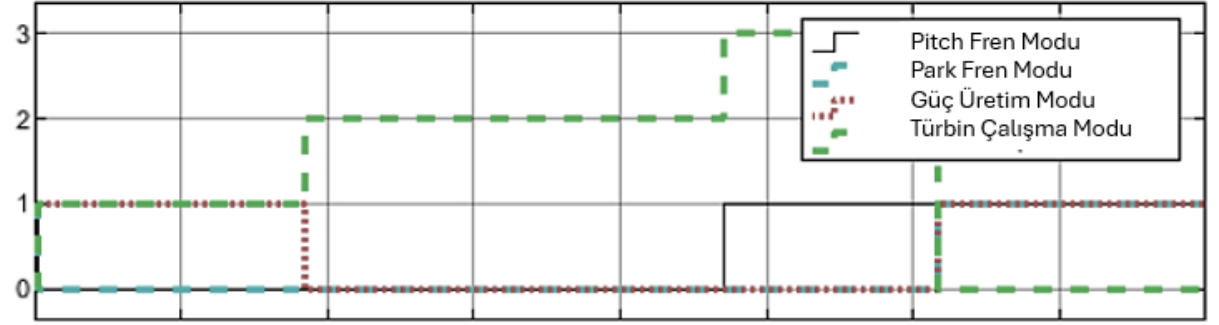
Bu hesaplama diğer tasarımlar için de yapılmıştır ve Tablo 8’de sonuçlar gösterilmiştir. Girdap saçılma frekansı ve doğal frekansı hesaplayarak tasarımın rezonans aralığı (f_v/f_n) bulunur. Bu iki değer birbirine yakınlığıyla tasarımların rüzgâr yakalaması hakkında fikir oluşturup rüzgâr saçılması sonucu oluşan kaldırma kuvvetinin tasarımın hareketi ile senkronize olarak salınım yaparak maksimum yer değiştirmeleri ile sonuçlar elde edilmiştir. Bunun neticesinde en hızlı rezonansa girmeleri ilgili değerlendirmeler yapıp uygun tasarımla ilgili optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Tablo 8. FFT dönüşümü ile her bir tasarım için bulunan f_v f_n S_t değerleri

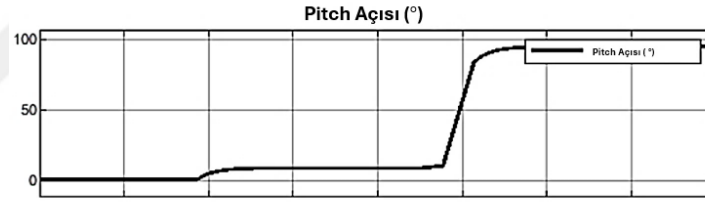
Tasarım	Boyutlar	Girdap Saçılma Frekansı (f_v)	Doğal Frekans (f_n)	Strouhal Sayısı (S_t)
A	(Alt: 1,7.5) (Üst: 1,7.5)	0.25	0.4	0.55
B	(Alt: 2,7.5) (Üst: 1,7.5)	0.18	0.7	0.34
C	(Alt: 1,7.5) (Üst: 2,7.5)	0.25	0.7	0.47

4.1.3. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin MATLAB Model Simülasyon Sonuçları

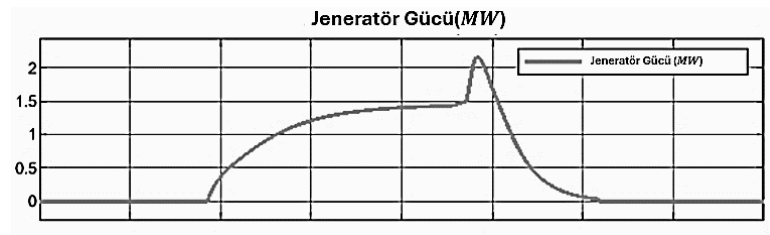
Bu bölümde yatay eksenli rüzgâr türbininin MATLAB'ta modelleme ve simülasyon sonucunda denetleyici kontrol durumlarını, türbin kanadı eğim açısını, jeneratör gücünü ve rüzgâr hızını gösteren grafikler paylaşılmıştır.



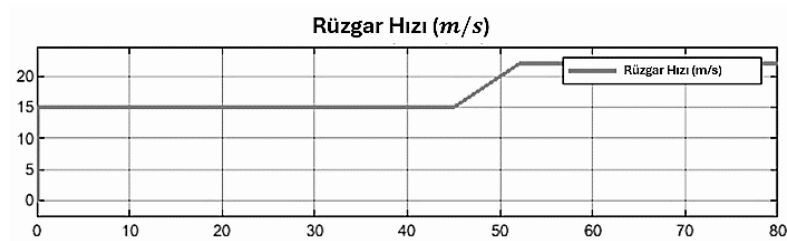
Şekil 50. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinini Denetleyici Kontrol Durumları



Şekil 51. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinini Pitch Açısı Grafiği



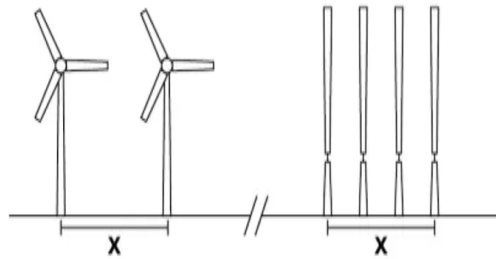
Şekil 52. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinini Jeneratör Gücü Grafiği



Şekil 53. Rüzgâr Hızı Grafiği

4.2. Aerojeneratör ve Yatay Eksenli Rüzgâr Türbininin Karşılaştırılması

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratör ve yatay eksenli rüzgâr türbini, yenilenebilir enerji sistemleri arasında önemli seçenekler gibi gözükse de bu alana yatırım yapılmasına ilişkin yatırım kararlarını etkileyen çeşitli kriterler bulunmalıdır. Batmaz (2016) tarafından yapılan çalışmaya benzer bir şekilde bu kriterler; verim, teknolojinin güvenilirliği, sistemin üretim kapasitesi, uygulama ve operasyonel riskler, yerel teknik bilgi, yıllık kullanılabilirlik gibi teknik yönler; yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, gerçekleşme süresi, finansal göstergeler, dayanma ömrü, enerji politikaları ve düzenlemeler, yatırımcıların risk tutumu, piyasaya güven, makroekonomik ortam, fonların kullanılabilirliği gibi ekonomik yönler; emisyon oranları, arazi kullanımı, gürültü, doğal çevreye etkileri, sosyal kabul edilebilirlik, iş alanları açma ve güvenlik gibi çevresel ve sosyal yönler gibi karar alma sürecini şekillendiren faktörleri belirlenmeli ve karşılaştırma yapılmalıdır (Batmaz, 2016).



Şekil 54. Aerojeneratör ve yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin karşılaştırılması(Shterev, 2021)

Bu bölümde rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratör ve yatay eksenli rüzgâr türbini için birinci kısımda incelenen başlıklar çerçevesinde elde edilen veriler ekseninde sistemlerin maliyet etkinliği, üretim kapasitesi, çevresel etkileri gibi genel konular kapsamında karşılaştırma yapılacak ve Türkiye'nin rüzgâr enerjisinin potansiyeli açısından değerlendirilecektir.

4.2.1. Maliyet Etkinliği

Maroto'nun maliyet etkinliği ve fizibilite analizi (2018) alışmasında bazı basit ekonomik sonuçlara ulaşmak için bir yaklaşım üzerinde çalışılmış, türbin için gerekli yatırım ihtimali göz önünde bulundurularak ve karşılaştırmanın aynı koşullar altında yapılacağı varsayılarak, farklı rüzgâr hızlarında üretilen yıllık enerji analizi yapılmıştır (Maroto, 2018). Enerji sektöründe enerji kaynaklarının maliyet-rekabet gücü incelenmesinde rüzgâr enerjisi tartışmaya açık bir konumdadır. Küçük konut rüzgâr türbinleri ve kamu hizmeti ölçeğindeki rüzgâr çiftlikleri büyük oranda finansal teşviklerle kurulur. Geleneksel ve kökleşmiş fosil yakıtlar ile rekabette teşvikler önemli bir yer tutmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin ekonomik yönleri, üreticilerin türbin özellikleri hakkında iyimser oldukları, kurulum ve bakım maliyetleri ve türbin için gereklilikler konusunda bilgi vermeme eğilimi olması düşünülerek incelenecektir. Çünkü beklenen enerji üretimi ile gerçek enerji üretimi uygun atmosferik şartlar sürekli olmayacağından dolayı asla uyuşmaz.

Yatay eksenli rüzgâr türbini, bazı durumlarda enerji üreticisi için mükemmel bir alternatif oluşturabilir, ancak net bir üretim için rüzgâr türbinlerinin yaklaşık 10 kilowatt ve 40.000 ile 70.000 \$ arasında olması gerektiğine ulaşılmıştır. Bu tarz yatırımlar, genellikle oldukça uzun bir süre olan 10 ile 20 yıl sonra bile bozulabilir (Rinkesh, 2020).

Vortex Bladeless şirketinin paylaşımına göre ticarileştirme için prototip aşamasında olan Vortex Nano kanatsız türbini 85 cm yüksekliğe ve 3 W güç çıkışına sahip küçük bir modeldir. Konutların yalnız başına üretim ve tarım arazileri için kullanılmak üzere tasarlanan Vortex Tacoma, 2,75 m yükseklikte ve 100 W güç çıkışına sahip model ve kendi kendine üretim ve fabrikalarda kurulum için düşünülen Vortex Atlantis/Grand 9-13 m boyunda ve yaklaşık 1 kW güç çıkışına sahip bir model olarak tasarlanmıştır. Gerektiğinde sklp takılması kolay olan tasarımı sayesinde şebeke üzerinde veya şebekeden bağımsız çalışan diğer aerogeneratör veya güneş panelleriyle çalışarak verimli bir şekilde g üretme özelliği de bulunmaktadır. şirketin 2020'nin ikinci

yarısından itibaren ticarileştirme için yapılan prototipinin yaklaşık olarak 200 Euro olacağı öngörülmüştür.

4.2.2. Üretim Kapasitesi

Rüzgâr enerjisi dönüşümünde, güç üretimi rüzgâr türbininin süpürme alanı ile orantılıdır. Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör aynı yükseklikteki yatay eksenli rüzgâr türbininin çalışma alanının %30'u kadar bir alana sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu durum rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör gücünün daha düşük verimli olduğu anlamına gelir. Ancak süpürme alanının kısıtlı olması, aynı yüzey alanına daha fazla aerogeneratör kurulmasına izin vererek, güç verimliliğini alan verimliliği ile daha ucuz bir şekilde dengelenmesi sağlanabilir.

Türbin tasarımında en yüksek güç üretimine daha erken ulaşmak adına düşük rüzgâr hızında enerji üretmek önemlidir. Yatay eksenli rüzgâr türbini için başlangıç hızı 4 m/s civarında iken Vortex Tacoma rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör (2,75 m) için 3m/s olarak ölçüldüğü bilgisine ulaşılmıştır. Örneğin, 7 m/s rüzgâr için güç değerleri hesaplandığı takdirde yatay eksenli rüzgâr türbininin 104 W, Vortex Tacoma ise 60 W güç üretebilmektedir. Nominal hız (en uygun koşullar için hızı) değeri için Vortex Tacoma 100W, aynı boyuttaki yatay eksenli rüzgâr türbini için 400 W güç üretebileceği bilgisine ulaşılmıştır.

Tablo 9.Yüksekliğin 10 m olduğu yerler için bir yıl boyunca alınan rüzgâr hızlarının ortalaması ve aerogeneratör-HAWT karşılaştırması

Rüzgâr Sınıfı	Yıllık Ortalama Rüzgâr güç yoğunluğu (W/m ²)	Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgâr Hızı değeri (m/s)	Aerogeneratör için Ön Görülen Güç (W) (Yaklaşık Yükseklik =3 m)	HAWT için Ön Görülen Güç (W) (Yaklaşık Yükseklik =3 m)
1	0-100	0-4,4	3	3	0
2	100-150	4,4-5,1	5	24	47
3	150-200	5,1-5,6	5.5	28.7	58
4	200-250	5,6-6,0	6	35	72
5	250-300	6,0-6,4			
6	300-400	6,4-7,0	6.6	80	132
7	400-1000	7,0-9,4	9	93	160

Yatay eksenli rüzgâr türbini ile ilgili temel sorunlardan birisi de kullanım ömrü boyunca birden çok kez değiştirilmesi gereken birçok hareketli bileşenin olmasıdır. Örneğin, dişli kutusunun her 1,5 yılda bir değiştirilmesi gerekir. HAWT'nin 20-25 yıl arasındaki ömrü ile, HAWT'nin bakımına sürekli olarak eklenen 13-17 dişli kutusu gerektireceği (Bardakjian vd., 2017) bilgisi elde edilmiştir. Üretim, nakliye, depolama ve kurulum açısından yatay eksenli türbine göre rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör tasarımında yatak, dişli veya diğer hareketli parçalar bulunmadığından bakımları kolay olacağı düşünülmektedir.

Üretime geçildiği takdirde Vortex Tacomanın toplam kütesinin 15kg'dan az olduğu tahmin edilmektedir. Basit tasarımı ve hafifliği, hammaddelerin çok verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Aerogeneratör inşa etmek için karmaşık bir üretim süreci gerekmesede seri üretimi için mevcut yöntemlerin gözle görülür şekilde farklı olması gerektiği düşünülmektedir.

4.2.3. Çevresel Etki

Yatay eksenli rüzgâr türbinine göre daha temiz bir rüzgâr enerjisi alternatifi olarak tasarlanan rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün ekolojik hayata bazı ek faydaları olabilir. Bunun için detaylı

karbon ayak izi analizine ihtiyaç olduğu düşünülmüştür.

Bu aerogeneratörlerin konutların yanına veya çatının üzerine yerleştirilmeye uygun olduğu düşünülmektedir. Şebeke üzerinde ve şebekeden bağımsız olarak bir başka rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratör veya güneş enerjisi sistemleri ile senkronize çalışabileceği ve çok düşük frekanslarda salınım yapma prensibi sayesinde sessiz çalışacağı düşünülmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin inşası ele alınmadan önce, rüzgâr çiftliklerinin yerleşimi için kararlı ve düzenli hızda rüzgârın olacağı uygun bir alan belirlenmelidir. Türbinler arasındaki engellerin neden olduğu kayıpları azaltmak için bir rüzgâr tarlası, açık alanda Megawatt başına kabaca 0,1 km² ve 200 MW'lık rüzgâr tarlası yaklaşık olarak 20 km²'lik bir kullanım sahası olmalıdır (Anonim, 2022d).

Güneş ve su kaynaklı yenilenebilir enerji üretim sistemlerine göre rüzgâr türbini için arazi kullanım oranı, gürültü etkisi, habitata etkisi, elektromanyetik alan etkisi, görüntü ve estetik etki, çevresel etkileri gibi konularda daha avantajlı olduğu bilinen bir durumdur (Şenel vd., 2016). Buna karşın geleneksel rüzgâr türbinleri, kuşların ölümlerinin en büyük sebebi olmasa da büyük bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bunun başlıca nedeni, göçmen kuşlar tarafından kullanılan sabit ve laminer hava akımlarının aynı zamanda rüzgâr çiftlikleri için mükemmel bir yer olması ve bu da onları kuşların uçuş rotaları boyunca kelimenin tam anlamıyla “rüzgâr gücüyle çalışan kırıcılar” haline getirmesidir. Aynı zamanda hızlı dönüşün yaydığı ses frekansı yarasaları olumsuz etkiler (Morales, 2020a).

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün kuş popülasyonu üzerindeki etkisinin çok daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Tasarımı sayesinde, salınım hareketinin bir ağaçtaki yaprak gibi olması sebebiyle vahşi yaşamı rahatsız etmez ve kuşların ile yarasaların uçarken onlardan kolayca kaçınmasına olanak sağladığı tespit edilmiştir.

4.2.4. Atmosferik Adaptasyon

Nüfusun yoğun olduğu kentsel bölgelerde genellikle türbülanslı rüzgâr akışı bulunmaktadır. Bu durum yatay eksenli rüzgâr türbini için sorun oluşturur. Akışın laminer veya türbülanslı olmasına bakılmaksızın etkin bir performans göstereceği belirlenmiştir. Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektrige dönüştürebilen aerogeneratör VIV etkisi türbülanslı akışa dayanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca yatay eksenli rüzgâr türbinleri süpürme alanının yüksek olmasından dolayı yakın mesafede bir arada etkin çalışması çok zordur. Bununla birlikte yatay eksenli rüzgâr türbini rüzgâr akış yönünü yakalaması için bir yönlendirme sistemi bulundurması gerekirken rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektrige dönüştürebilen aerogeneratör kesitinin dairesel olmasından dolayı böyle bir sisteme ihtiyaç duyulmaz.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri genellikle nominal rüzgâr hızlarına 12 ile 24 m/s arasında ulaşırlar, bu rüzgâr hızları yerin yakınında nadiren bulunur, bu durum onları yüksek olmasına sebebiyet verir. Merkezkaç kuvveti tarafından parçalanmamak için, büyük olanlar çok kuvvetli rüzgâr durumunda onları maksimum dönüş hızında tutan frenlere sahiptir (Morales, 2020a). Rezonans olayı rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektrige dönüştürebilen aerogeneratörün kilitleme aralığının dışına çıkmasından dolayı rüzgâr hızı türbinin eşliğini aşarsa frene ihtiyaç duymadan kendi kendine salınımını durdurur.

Sonuç olarak rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektrige dönüştürebilen aerogeneratör yatay eksenli rüzgâr türbinine göre akışın tür, yön, yoğunluk değişmelerine çok hızlı ve kolay adapte olabilir.

Bu çalışmanın konusu olan VIV kaynaklı aerogeneratör ile HAWT rüzgâr türbini arasında çevresel etkileri üzerinde kıyaslama yapmak amacıyla Tablo 10 oluşturulmuştur. İspanyol doğa koruma sivil toplum kuruluşu olan SEO Bird Life tarafından hazırlanan ortam etkinliği çalışmasından da dikkate alınarak hazırlanmıştır. Rüzgârdaki enerjiyi elektrige dönüştürme yollarında yenilikçi bir yaklaşım sunan bu aerogeneratör teknolojisinin fiziksel testleri devam etmektedir ve teknoloji geliştirme aşamasındadır. Dolayısıyla son kullanıcı verisi bulunamadığından gerçek etki

değerlendirmeleri yapılamamıştır. Bu alanda akademik araştırmalar, mühendislik hesaplamalar, nümerik analizler ve sanal prototipler gibi çalışmalar üzerinden varsayımlar göz önünde bulundurularak değerlendirmeler yapılmıştır.

Tablo 10. VIV Kaynaklı Aerojeneratör ve HAWT ortam etkinliği karşılaştırması

	VIV Kaynaklı Aerojeneratör	HAWT	Nedeni
<i>Kurulu Güç Yoğunluğu</i>	Yüksek	Düşük	HAWT türbinlerinin inşası ele alınmadan önce kararlı ve düzenli rüzgârın olması ve kayıpların azaltılması için kurulu alanın daha büyük olması gerekmektedir. VIV kaynaklı aerojeneratörün birbirine yakın kurulumu herhangi bir kayıp oluşturmaz.
<i>Tedarik ve Montaj Sürecinin Habitata Etkisi</i>	Düşük	Yüksek	VIV kaynaklı aerojeneratörü oluşturan bileşenlerin sayısı ve çeşitliliği daha azdır. Bununla birlikte boyutu ve ağırlığı açısından HAWT türbinine göre daha küçüktür. Bu da üretiminden tüm tedarik süreci de dahil olmak üzere (Malzemelerin taşınmasında kullanılan araçların oluşturduğu maliyet ve sera gaz emisyonlarının azalması) kurulumuna kadar (daha hızlı ve kolay kurulum) oluşan süreçte daha az olumsuz etki oluşturacaktır.
<i>Akustik</i>	Düşük	Yüksek	VIV kaynaklı aerojeneratör işitilebilir bir ses oluşturmaz. Bu da yerleşim alanına yakın olması avantajını beraberinde getirir. HAWT türbinlerinde bu sorunu çözmek adına hava kabarcığı perdeleri ve hidro ses sönümleyiciler gibi ek teknolojik geliştirmeler ek maliyet eklenmektedir. Fakat HAWT teknolojisindeki teknolojik ilerlemeler daha az gürültülü sistemler geliştirmeye başlamışlardır.

<i>Yapı ve Malzemenin Çevresel Etkisi</i>	Eşit	Eşit	Her iki teknolojide de temellerinde kullanılan çimento gibi toprağı kirletmeyen inert bir malzeme standart malzemeler ve yapı malzemeleri kompozit malzemelerden yapılmaktadır. HAWT türbinlerinde çelik ve beton malzemeler daha fazla kullanımı olmasına karşın iki teknolojinin çevresel etkisi birbirine yakındır.
<i>Kullanım Ömrü</i>	Yüksek	Düşük	VIV kaynaklı aerogeneratörde bulunan alternatör diğer alternatörler gibi bobinler ve manyetik alanlar arasında etkileşime girmektedir. Buna karşın bir şaft veya dişli kutusu üzerinde dönmeye ihtiyaç duymadan elektromanyetik indüksiyonla elektrik üretmektedir
<i>Bakım Aralığı</i>	Düşük	Yüksek	Mıknatıslar aynı zamanda direğin görünen esneklik sabitini değiştiren ve böylece salınımların meydana geldiği rüzgâr hızı aralığını genişleten "Ayar Sistemi" görevi de görür. İç kısımların birbiriyle çarpışmadan etkileşime girerek elektrik üretmesi kaynaklı kullanım ömrü daha fazladır. Ayrıca frenleme sistemine de gerek duymaz.
<i>Çalışma Koşulları</i>	Benzer	Benzer	HAWT türbinlerinin daha büyük süpürme alanı avantajına sahip olmasına karşın (Bu sayede üretimleri 100 KW dan 12 MW a kadar değişiyor). VIV kaynaklı aerogeneratör daha düşük rüzgâr aralığında ve daha aktif rüzgâr yakalama potansiyeline sahiptir.
<i>Şebeke Uyumluluğu</i>	Aynı	Aynı	Her iki sistemde de jeneratör tipik olarak alternatif akım (AC) elektriği üretir. Elektrik, sistemdeki kablolarla ve ardından yer altı kabloları aracılığıyla bir trafo merkezine gönderilir. Trafo merkezinde voltaj, elektrik şebekesine beslenebilecek ve elektrik tüketicilerine taşınabilecek şekilde değiştirilir.

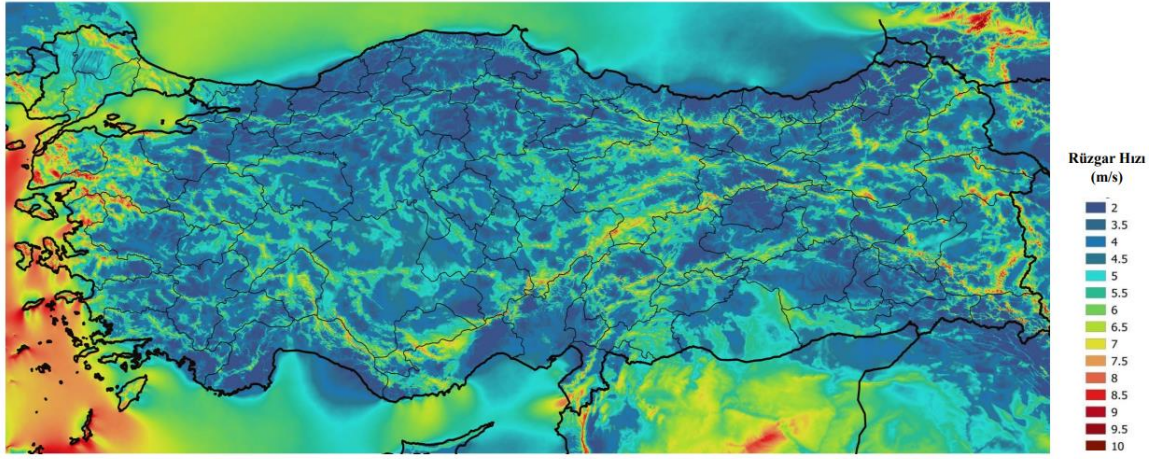
<i>Yabani Hayata Etkisi</i>	Düşük	Yüksek	<p>HAWT türbinler kapladığı alanın fazla olması bazı canlı türleri için habitat kaybı anlamına gelebilir; bu, üreme alanlarında popülasyon azalmasına, kışlama alanlarında da göç yollarının değişmesine neden olabilecektir. Gürültülü çalışması (kanatları üzerinden geçen hava akışı, 7-12 m/s rüzgâr hızıyla, motor bölümü içinde 800 Hz frekansta maksimum 100 dB gürültü üretir. Ayrıca ülkeler de bu konuda çeşitli kısıtlamalar ve düzenlemeler getirmektedir. Bundan dolayı da HAWT üreticileri de daha az gürültülü teknoloji üzerinde geliştirmeler yapmaktadır.) Bu da HAWT türbinlerin kurulum aşamasının belirli dönemlerde yapmalarına ve zaman açısından sınırlı olmasına sebebiyet veriyor.</p>
-----------------------------	-------	--------	--

4.3. Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisinin Potansiyeli ve Sonuçların Türkiye'nin Sahip Olduğu Enerji Profilindeki Yerine Göre Değerlendirilmesi

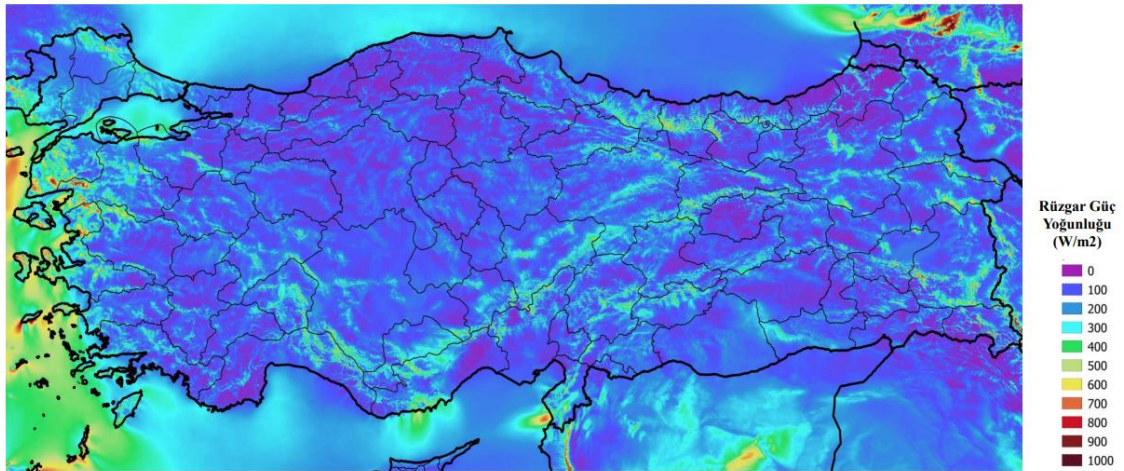
Daha önce de belirtildiği gibi Türkiye, birincil enerji kaynaklarının sağlanması açısından %70 ten fazla ve ikincil enerji olarak elektrik enerjisi üretiminde ise yaklaşık %58 oranında dışa bağımlılığı ile enerji ithalatçısı bir ülke konumundadır. Türkiye'de fosil yakıtların yaygın olarak kullanılan enerji türü olması ekonomik getirisinin yanında kullanımındaki artışa bağlı olarak üretim maliyetlerinin yükselmesine yol açmaktadır. Bu durum çeşitli ekonomik olumsuzlukları beraberinde getirmekte ve buna bağlı olarak ülkenin gelişmesini yavaşlatmaktadır. Bunun neticesinde diğer ülkelerle rekabet gücünü de azaltmaktadır.

Konut tüketimi, tarımsal ve endüstriyel ortamlar gibi kullanım alanlarının artması ve üretim-tüketim sürdürülebilirliği için gerekli olan enerji talebine karşılık bu enerji kaynaklarına olan teşvikin artması çeşitli olumsuz ekonomik etkileri ile birlikte çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Üretim ve tüketim de durdurulamayacağına göre dışa bağımlılığı azaltmak ve fosil yakıt kaynaklı olumsuzlukların önüne geçilmesi adına yerel ve yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı ile ilgili yeni politika ve yatırım modellerinin oluşturulması ve uygulanması en önemli odak noktası olmalıdır.

Dışa bağımlılık, hızlı talep artışı, yüksek yatırım gereksinimi enerji sektörünün önemli özellikleri olarak kendini gösteriyor. Daha önce de belirtildiği gibi Türkiye, rüzgâr enerji santrali kurulu gücü olarak Avrupa'da 7'nci, Dünyada ise 12'nci sırada bulunmaktadır. Türkiye'nin rüzgâr haritası, yılın neredeyse tamamında rüzgâr enerjisinden elektrik üretilebileceğini gösteriyor (Anonim, 2022a). Türkiye'de yer seviyesinden 50 m yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda km² başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,3'üne denk gelmektedir. (Anonim, 2022b).

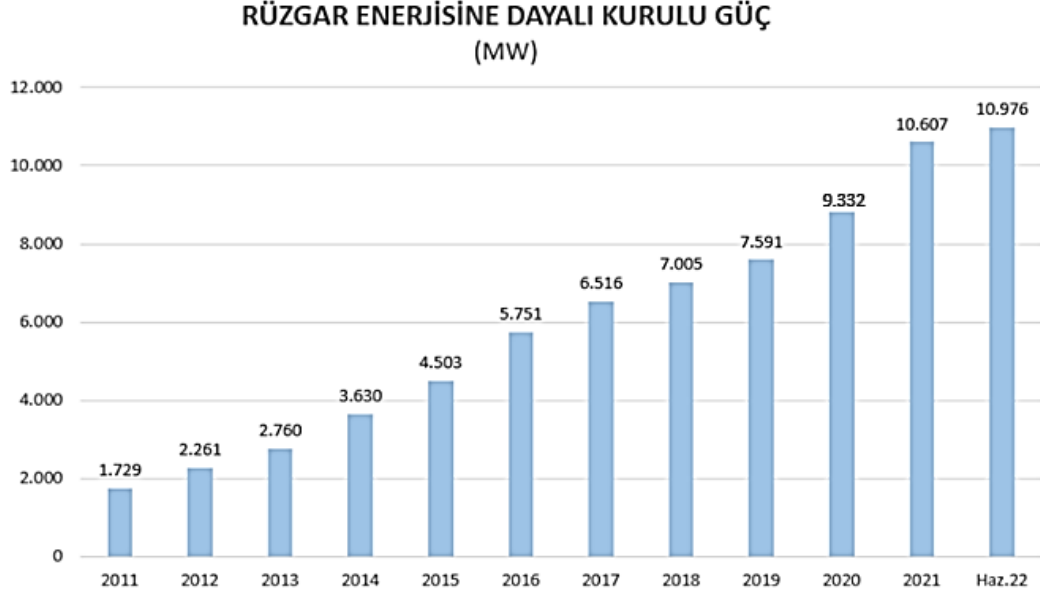


Şekil 55. Türkiye'nin yer seviyesinden 100 m yükseklikteki alanları için Yıllık Ortalama rüzgâr dağılımı (Anonim, 2022c)

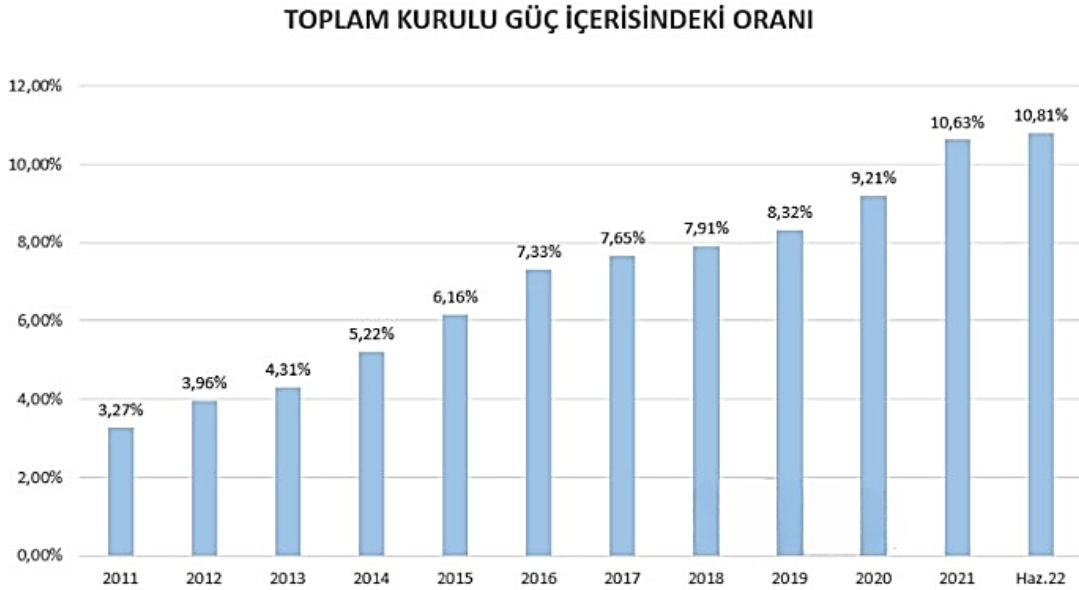


Şekil 56. Türkiye'nin yer seviyesinden 100 m yükseklikteki alanları için yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı (Anonim, 2022c)

Türkiye'nin Haziran 2022 sonu itibariyle rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 10.976 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı %10,81 olup yıllara göre kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı şekil 57 ve 58'deki grafiklerde yer almaktadır(Anonim, 2022a).

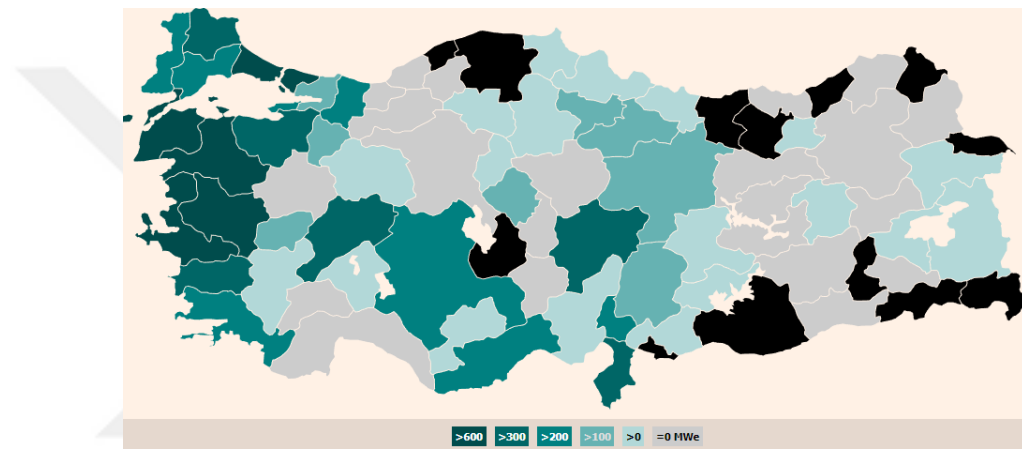


Şekil 57. Türkiye'nin yıl bazlı rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç gelişimi (Anonim, 2022c)



Şekil 58. Türkiye'nin yıl bazlı rüzgâr enerjisine dayalı kurulu gücün toplam kurulu güç içerisindeki değişimi (Anonim, 2022c)

Şekil 59' da Türkiye'nin Rüzgâr Santrallerinin Dağılımı görülmektedir. Marmara Bölgesinde; Balıkesir, İstanbul, Çanakkale, Ege Bölgesinde; İzmir, Manisa Doğu Akdeniz çevresinde Hatay Rüzgâr Santrallerinin yoğun olarak yer aldığı illerdir. Aşağıdaki şekilde yayınlanan teorik potansiyel değeri 50 metre yükseklikte 6,8 metre/saniye ve üzerinde rüzgâr alan, türbin kurulabilir kara alanı için hesaplanmış değerler olup, 7 m/s üzerinde rüzgâr hızına sahip bölgeler için Türkiye toplam RES potansiyelinin 48.000 MW olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir. Karalar haricinde, deniz üstüne kurulacak rüzgâr potansiyelinin ise 17.393 MW olduğu hesaplanmış olup bu verinin dağılımı tabloya dahil değildir(Anonim, 2022c).



Şekil 59. Türkiye rüzgâr santrallerinin dağılımı (Anonim, 2021a)

Rüzgâr Türbini kurulmadan önce tedarik ve montajından kullanım ömrünün sonuna kadar ki sürecin değerlendirilmesi, kurulacak bölgedeki kurulumu uygun arazi için üretim maliyeti ve çeşitli yan maliyetler, lojistiği, gelir gider dengesi, bölgesel enerji fiyatı gibi unsurlar dikkat edilmesi gereken değişkenlerin başında gelmelidir. Çünkü elektrik üretiminden daha değerli olabilecek arazi için farklı kullanımlarına karşın türbin kurulumuna uygunluğunun tercih edilebilirliği yüksek olmalıdır.

Rüzgâr türbinleri için enerji üretmeye başladığı rüzgâr hızları genellikle 8-16 km/sa iken rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörün güç üretmeye başladığı rüzgâr hızı kentsel alanlarda tipik olan 3 m/s olarak ve rüzgâr hızının yaprakları sallamaya yetecek kadar sallamaya yeterli olduğu değerlerde güç üretme potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir.

Bu durum düşük ve orta rüzgâr hız aralıklarında enerji verimliliğini ön plana çıkarmakta ve geleneksel rüzgâr türbinlerinden daha düşük bir maliyetle enerji üretilebilirliği sonucuna ulaştırmaktadır.

Rüzgâr enerjisini en önemli kısıtlarından birisi hiç kuşkusuz rüzgârın kararsızlığıdır. Türkiye yüksek rüzgâr potansiyeli ile güneş zengini de bir ülkedir. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde kullanılacak sistemlerden hangisi olursa olsun farklı enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, hidrolik vb.) birleşiminin önemli bir unsur olarak görülmelidir ve ortak kullanımlarını sağlayacak teknolojiler üzerinde de durulmalıdır. Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerogeneratörler fotovoltaik sistemlerin kurulumlarıyla uyumlu olacak şekilde tasarlanmaktadır ve bu nedenle, evsel, tarımsal ve endüstriyel ortamlarda öz tüketimi teşvik etmeye yardımcı bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yenilenebilir enerji alanındaki bu özgün sistem için aerodinamik ve rezonansla enerji oluşumu, sahip olduğu yapı ve geometri, rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü, diğerlerinden ayıran teknik özellikleri, kullanılan malzeme ve yorulma ömrü, maliyet etkinliği, üretim kapasitesi, çevresel etkileri gibi başlıklar altında çalışmalar yapılmıştır.

Bu başlıklar altındaki çalışmaların tek tek sonuçlarına değinilecek olunursa öncelikle sistemin yapısal tasarımı için aerodinamik yapı analiz edilmiştir. Akışkan-yapı etkileşimi problemi olan bu yapının analizinde odaklanılacak nokta girdap saçılma frekansı ile yapının doğal titreşim frekanslarının kilitleme etkisi yoluyla senkronizasyonundan kaynaklanan katı cisimdeki titreşimler olan girdap kaynaklı titreşimdir. Burada dikkatle üzerinde durulması gereken en önemli değişken rezonans olgusudur ve tasarımın akış hızına bağlı olarak en iyi kilitlenme aralığı sunması beklenmelidir. Yapılan hesaplama ve analizde kolaylık sağlaması ve karmaşıklığın ortadan kalkması adına tasarımlar basit konfigürasyonlara dönüştürülmüştür. Bunun yanı sıra çeşitli konfigürasyonlar eklenerek akışkan akışına kolay entegre olmayı sağlamak adına uygun tasarımı elde etme yoluna gidilmiştir. Tasarımın üzerine etkileyen akışkan akışı neticesinde oluşan aerodinamik kuvvetler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar iki boyutlu ve üç boyutlu modellemeler yapılarak incelenmiştir.

Yapılan iki boyutlu model analizinde iki boyutlu akış düzleminde silindir yüzeyinin akış süresine karşı sürükleme katsayısı (Cd) ve kaldırma katsayısı (Cl) değerleri hesaplanmıştır. Cd değerinin, -0,8 ile 0,8 değerleri arasında değiştiği ve bu durumun silindirin her iki tarafta dönüşümlü olarak girdaplar tuttuğu sonucuna ulaşılmıştır. Cl değerinin 1.4 ile 1.51 arasında bir aralıkta olduğu bulundu ve bu şekil 47'de Re-Cd eğrisindeki değere yakınlığı ile doğrulanmıştır.

Üç Boyutlu Model Analizinde ise akış süresine karşı sürükleme katsayısı (Cd) ve kaldırma katsayısı (Cl) grafiklerinin yerine akış süresi boyunca serbest akış hızının x yönündeki ortalama hız grafiği oluşturulmuş ve grafikteki sayısal verilerle FFT

aracılığıyla Güç Yoğunluğu-Frekans grafiği elde edilmiştir. Bununla birlikte her bir tasarım için girdap saçılma frekansı, doğal frekans ve strouhal sayıları bulunmuştur.

Her üç tasarım da f_v/f_n değeri bire yaklaştıkça salınım gösterecektir. Bu çalışmada rezonans değerinin birden küçük olması durumunda A tasarımının B ve C tasarımlarından daha büyük salınım yaptığı görülmüştür. Ancak rezonans değeri birden büyük olduğu durumda B ve C tasarımındaki üst kısım ile alt kısım arasındaki koniklik oranının birden farklı olmasından dolayı daha fazla salınım yapma olasılığının olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebi olarak tasarım karakteristik uzunluğunun artmasıyla yükseklik boyunca girdap dökülme frekansının eşit olmayacağıdır. B tasarımının üst uç kısmının daha geniş olması nedeniyle bu bölgeye yakın girdap dökülme frekansı ve moment kolu sebebiyle daha büyük sapmalar gerçekleştirebileceği düşünülmektedir. Büyük sapmalar ve girdap dökülmesi arasında doğrusal bir ilişki vardır. A tasarımında uzunluk boyunca üst ve alt kısımlarda aynı kalınlıktadır. Tasarımın uzunluğu boyunca sahip olacağı farklı kesit yapıları rüzgâra karşı performansını arttıracığı düşünülmektedir.

Düşük akış hızlarında A tasarımı daha verimli performans sergilemektedir.

Rüzgâr kaynaklı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen arojeneratörün daha az maliyetli olmasına rağmen süpürme hacmi açısından HAWT kanatlarının süpürme hacmine göre daha azdır. Bu da geleneksel sistemlerin güç çıkışı açısından hala daha verimli olacağını gösterir. Fakat bu durum daha basit, hafif ve minimum hammaddeye sahip ve bakım maliyetinin düşük olan arojeneratörden aynı alana daha fazla konularak veya geleneksel rüzgâr çiftliklerinin uygun olmayabileceği boşlukları doldurmasında ve farklı enerji yönetim yollarıyla senkronize edilerek çözülebilir.

5.2 Öneriler

Yenilenebilir enerjilerin verimliliği son yıllarda önemli ölçüde artmış ve rüzgâr enerjisi teknolojisindeki gelişmeler ve iyileştirmeler, yenilenebilir enerji kullanımındaki verimlilikte en önemli kaynaklarından biri olmuştur. Rüzgâr Türbinlerin boyutları ile enerji üretimindeki verimlilik arasında doğrusal ilişki güneş enerjisi teknolojisiyle birlikte en önemli konum haline getiriyor.

Ancak rüzgâr enerjisi teknolojisinin fotovoltaik teknolojilere göre dezavantajları bulunmaktadır ve bu kısıtlamalar teknolojiye olan yatırımları güneş enerjisi teknolojiye olan yatırımların arkasında bırakmaktadır. Enerjinin kullanım noktasına yakın bir yerde üretildiği dağıtık enerji sektöründe en dikkat çekici teknoloji fotovoltaik güneş enerjisi olabilir. Hareketli mekanik parçaların bulunmaması, minimum bakımla ve çevresel gürültü etkisi olmaksızın güneşten enerji toplanmasına olanak tanır.

Ayrıca farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının bir arada kullanılmasının rüzgârın, güneş ışığının vb. olmadığı dönemlerde karşılıklı dengeleme nedeniyle sinerjik olduğu da iyi bilinmektedir. Yeni bir rüzgâr jeneratörünün geliştirilmesi, eğer taklit edilebilirse çok faydalı olabilir. Bu çalışmada rüzgâr enerjisinin VIV girdap kaynaklı titreşim kaynaklı yenilikçi bir yaklaşımını sunan bu sistem ile HAWT geleneksel türbinlerinin fotovoltaik güneş enerjisi teknolojisine karşı dezavantajlarını minimum hale getiriyor ve farklı yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bir arada kullanılması ve güneş ışığının olmadığı günlerde karşılıklı dengeleme olanağı sunuyor.

Neredeyse bütün mühendislik tasarımlarında sorun olarak kabul edilen bir unsur olan rezonans sahip olduğu enerji ile yeni bir teknolojinin temelini oluşturabilir. Bu tasarımda dikkat edilen aeroelastik rezonans olayı rüzgâr enerjisinin dönüşümünde odak noktası olma potansiyeli taşımaktadır.

Büyük ölçekli rüzgâr enerjisiyle ilgili olarak, açık deniz teknolojisi (okyanusa kurulan türbinler) oldukça ümit vericidir. Karşılaşılan sorunlardan biri deniz ortamlarının agresifliği, özellikle de değirmenlerin hareketli mekanik parçalarının korozyonudur. Dolayısıyla rüzgâr enerjisini toplayabilecek bir cihazda dişli, rulman vb. bulunmaması da önemli bir avantaj olabilir.

Enerji üretiminde sürdürülebilirliği sağlamak adına yenilikçi bir yaklaşım sunan bu sistemin detaylı mühendislik çalışmaları, bilgisayar destekli simülasyon ve sanal prototipler aracılığıyla yapılan testlerinin yanı sıra birçok üniversite veya araştırma kuruluşlarında rüzgâr enerjisi teknolojilerinin test edilmesi için kurulan tesislerde de gerçek dünya koşullarında test edilmesi gerekmektedir. Şiddetli rüzgâr etkisine karşı dayanımının arttırılması üzerinde çalışmalar yapılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Akbal, Ö. (2018). *Hafif Bir Uçağın CFD Yöntemi ile Aeroelastik Analizi*.
- Amalia, E., Moelyadi, M. A., & Ihsan, M. (2018). Effects of Turbulence Model and Numerical Time Steps on von Karman Flow Behavior and Drag Accuracy of Circular Cylinder. *Journal of Physics: Conference Series*, 1005(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1005/1/012012>
- Ángel, M., Hidalgo, S., & Pascual, R. A. (2017). NUEVO CONCEPTO DE GENERACION EOLICA. AEROGENERADOR SIN PALAS POR VORTICIDAD. *Tecnología y Desarrollo*, 15(0). https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/1182
- Anonim. (2019, November 13). A pole-shaped wind turbine generates power by shaking. *Vortex Bladeless Blog*. <https://www.bridgestone.com/bwsc/stories/article/2019/11/13-2.html>
- Anonim. (2021a). *Türkiye'deki Rüzgar Enerji Santrallerinin Dağılımı*. Enerji Atlası. <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/>
- Anonim. (2021b, April 9). *Features and Vortex's pros*. Vortex Bladeless Blog. <https://vortexbladeless.com/features-and-vortexs-pros/>
- Anonim. (2022a). *Rüzgar - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>
- Anonim. (2022b). *Ülkelere göre rüzgar enerjisi*. Enerji Atlası. <https://www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html>
- Anonim. (2022c, January 4). *Rüzgar*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>
- Anonim. (2022d, March 22). *Rüzgâr gücünün çevre üzerindeki etkisi*. Wikipedia. https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_g%C3%BCc%C3%BAn%C3%BCn_%C3%A7evre_%C3%BCzerindeki_etkisi
- Anonim. (2023a). *Aeroelasticity - Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroelasticity#Flutter>
- Anonim. (2023b). *Wind Turbine - MATLAB & Simulink*. <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/wind-turbine.html>
- Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., & Cali, U. (2019). Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection. *Energy Strategy Reviews*, 23, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.005>

- Aydın, D. (2021, April 30). *Pervanesiz rüzgar türbinleri geliştiriliyor*.
<https://www.elektrikport.com/makale-detay/pervanesiz-ruzgar-turbinleri-gelistiriliyor/23113#ad-image-0>
- Badri, N., Peddolla, V., Gottumukkala, H., Jyothi, U. S., & Aparna, S. (2023). Design and Analysis of Bladeless Wind Turbine. *E3S Web of Conferences*, 391. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101040>
- Bahadur, I. (2022). Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine. *Energies*, 15(18).
<https://doi.org/10.3390/en15186773>
- Bakır Naki. (2023). IMF: Türkiye 2023'te 17'nci büyük ekonomi. *Dünya Gazetesi*.
<https://www.dunya.com/kose-yazisi/imf-turkiye-2023te-17nci-buyuk-ekonomi/707595>
- Bardakjian, A. T., Mandadakis, P. P., & Tingle, A. (2017). Efficiency comparison of horizontal axis wind turbines and bladeless turbines. *PAM Review Energy Science & Technology*, 4, 59–75. <https://doi.org/10.5130/pamr.v4i0.1461>
- Batmaz, A. (2016). *Investment decision-making in renewable energy investments* [Graduate Study]. Bogazici University.
- Beverly, A. B. (2017, April). *A unique design enables bladeless wind turbines to harness energy*. Altair-Energy Innovation.
<https://www.altair.com.cn/c2r/ws2017/unique-design-enables-bladeless-wind-turbines-harness-energy>
- Biröl, Y. E., & Demirgil, B. (2021). Rüzgâr enerjisi üretimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: AB-15 ülkeleri için bir panel veri analizi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 61, 305–327.
<https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.952820>
- Britannica. (n.d.). Tacoma Narrows Bridge. In *Encyclopædia Britannica*. Retrieved August 23, 2022, from <https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>
- Cajas, J. C., Houzeaux, G., Yáñez, D. J., & Mier-Torrecilla, M. (2016). *Partnership for advanced computing in Europe SHAPE Project Vortex Bladeless: Parallel multi-code coupling for Fluid-Structure Interaction in Wind Energy Generation*.
- Çapar, M. (2018). *Yel değirmeni ve rüzgâr türbini nedir, nasıl çalışır, farkları nelerdir?* <https://bibaktim.net/yel-degirmeni-ve-ruzgar-turbini-nedir-nasil-calisir-farklari-nelerdir/>
- Çetintaş, Y., & Aydın, C. (2022). Yenilenebilir enerji bağlamında çevre ve ekonomik büyüme ilişkisi: OECD ülkeleri örneği. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 20(1), 292–312.
<https://doi.org/10.11611/yead.1061056>

- Chizfahm, A., Yazdi, E. A., & Egtesad, M. (2018). Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines. *Renewable Energy*, *121*, 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.038>
- Dalton, C. (2004). *FUNDAMENTALS OF VORTEX-INDUCED VIBRATION*.
- Elsayed, A. M., & Farghaly, M. B. (2022). Theoretical and numerical analysis of vortex bladeless wind turbines. *Wind Engineering*, *46*(5), 1408–1426. <https://doi.org/10.1177/0309524X221080468>
- El-Shahat, A. (2016). Bladeless wind turbine as wind energy possible future technology. *Natural Gas & Electricity*, *33*(4), 16–20. <https://doi.org/10.1002/gas.21942>
- Etapé, J. A. P. (2019, June 27). Tecnología española permite fabricar molinos más baratos y sin aspas (Daha verimli ve daha ucuza üretim sağlayan kanatsız türbin teknolojisi İspanya’da geliştiriliyor). *Business Insider*.
- Fotheringham, A. (2019, December 7). Five bright ideas for the future from COP25’s ‘green zone.’ *Al Jazeera*.
- Francis, S., Umesh, V., & Shivakumar, S. (2021). Design and Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbine. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 5584–5588. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.469>
- Ganeshkumar S, Navin kumar R, Rakesh V, Sujith kumar R, & Ramkumar G. (2020). A review on unconventional bladeless vortex-induced wind turbines. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, *3*(2), 486–490.
- Gomez, G. L. (2020, August 4). *Vortex Bladeless biography & current stage*. Vortex Bladeless Blog. <https://vortexbladeless.com/story-vortex-bladeless-tech-startup/>
- Gomez, G. L. (2021, March 18). *Objections and Vortex’s limitations*. Vortex Bladeless Blog. <https://vortexbladeless.com/objections-and-vortex-limitations/>
- Gündüz, N. K., & Bicil, İ. (2022). Yenilenebilir enerji yatırımlarını belirleyen faktörler ve gelir gruplarına göre seçilmiş ülkelerin analizi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *7*(13), 1–28. <https://doi.org/10.54831/vanyyuiibfd.1052486>
- Hamdan, H., Dol, S. S., Gomaa, A. H., Tahhan, A. B. Al, Al Ramahi, A., Turkmani, H. F., Alkhedher, M., & Ajaj, R. (2024). Experimental and Numerical Study of Novel Vortex Bladeless Wind Turbine with an Economic Feasibility Analysis and Investigation of Environmental Benefits. *Energies*, *17*(1). <https://doi.org/10.3390/en17010214>

- Johnson, R. (2018, April 6). Generating electricity with bladeless wind turbines. *Enterprise.Ai*.
- Kahriman, A. (2022, April 28). Rusya-Ukrayna krizi enerji özgürlüğünün ulusal bağımsızlığın temel taşı olduğunu göstermiştir. *Dünya Gazetesi*.
<https://www.dunya.com/kose-yazisi/rusya-ukrayna-krizi-enerji-ozgurlugunun-ulusal-bagimsizligin-temel-tasi-oldugunu-gostermistir/656437>
- King, S. (2022, December 1). *Simulating 3-Dimensional Vortex-Induced-Vibration (VIV)*. <https://blog.3ds.com/brands/simulia/simulating-3-dimensional-vortex-induced-vibration-viv-3dexperience-platform/>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010a). Wind energy applications. In *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (Vol. 2, pp. 449–504). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010b). Wind turbine design and testing. In *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (Vol. 2, pp. 311–357). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Maroto, L. P. (2018, September 27). Cost-effectiveness & feasibility analysis. *Vortex Bladeless Blog*. <https://vortexbladeless.com/cost-effectiveness-analysis-bladeless/>
- Mengi, O. Ö., Akköse, E., & Yanmaz, K. (2018). Kanatsız rüzgâr türbini tasarımı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 56–69.
<https://doi.org/10.31466/kfbd.425547>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
<https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Morales, S. S. (2020a). *10 Facts you didn't know about wind energy*. Vortex Bladeless Blog. <https://vortexbladeless.com/10-facts-you-didnt-know-wind-energy/>
- Morales, S. S. (2020b). *Ventajas y desafíos de la energía eólica (Rüzgar enerjisinin avantajları ve zorlukları)*. Vortex Bladeless Blog.
<https://vortexbladeless.com/es/ventajas-desafios-energia-eolica/>
- Morales, S. S. (2021). *How does it work? - Vortex wind turbine in a nutshell*. Vortex Bladeless Blog. <https://vortexbladeless.com/technology-design/>
- Placzek, A., Sigrist, J. F., & Hamdouni, A. (2009). Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: Forced and free oscillations. *Computers and Fluids*, 38(1), 80–100.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPFLUID.2008.01.007>

- Polezhaev, Y. V., & Chircov, I. V. (2011). Drag Coefficient. *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*. https://doi.org/10.1615/ATOZ.D.DRAG_COEFFICIENT
- Raghuwanshi, S., Mourya, C. S., Pandey, A., Shrivastava, A., Sonanis, A., & Banwariya, M. (2020). Design and fabrication of vortex bladeless wind turbine. *SSRN Electronic Journal*, 1–11. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3609291>
- Rinkesh. (2020). *7 pros and cons of wind energy (wind power)*. Conserve Energy Future. <https://www.conserve-energy-future.com/pros-and-cons-of-wind-energy.php>
- Sabab, M. W., & Mohd, S. (2021). Aerodynamic Characteristic Of Vortex Bladeless Wind Turbine: A Short Review. *RESEARCH PROGRESS IN MECHANICAL AND MANUFACTURING ENGINEERING*, 2(1), 183–192. <https://doi.org/10.30880/rpmme.2021.02.01.021>
- Şenel, M. C., & Koç, E. (2016, December 16). Rüzgâr türbinlerinde çevresel etkilerin değerlendirilmesi. *Rüzgâr Enerjisi Dergisi*, 16(Aralık), 11–14.
- Shterev, I. (2021, November 23). Bladeless wind turbines: Are they worth the hype? *Semprius*. <https://www.semprius.com/bladeless-wind-turbines/>
- Tagliapietra, S., Zachmann, G., & Fredriksson, G. (2019). Estimating the cost of capital for wind energy investments in Turkey. *Energy Policy*, 131, 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.011>
- Thomai, M. P., Kharsati, L., Rama Samy, N., Sivamani, S., & Venkatesan, H. (2019). *Experimental Analysis Of Vortex Induced Vibration In The Bladeless Small Wind Turbine*.
- Tripathi, A., Thakur, S., & Aggarwal, T. (2023). Modal and Static Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbines with Different Geometries. *E3S Web of Conferences*, 430. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001254>
- Tureb. (2020). *Neden rüzgar enerjisi*. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği. <https://tureb.com.tr/eng/kurumsal/neden-ruzgar-enerjisi/3>
- Tureb. (2021, September 9). *Turkey reaches 10 GW wind energy milestone*. TUREB-Wind Europe. <https://windeurope.org/newsroom/news/turkey-reaches-10-gw-wind-energy-milestone/>
- Uribarri, L. L. (2022). *Análisis de ruido en aerogeneradores sin palas*.
- Villarreal, D. Y. J. (2018). *VIV resonant wind generators*.
- Williamson, C. H. K., & Govardhan, R. (2004). Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 413–455. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>

Yunta, R. M., Villarreal, D. J. Y., & Garcinuño, B. (2019, January 17). Molino sin aspas diseñado para generar energía eléctrica en entornos residenciales e industriales(Konut ve endüstriyel ortamlarda elektrik enerjisi üretmek için tasarlanmış kanatsız türbin). *IV Congreso de Ciudades Inteligentes*.

