

**T.C.
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

MODEL RÜZGÂR TÜRBİNİ PROJESİ

BİTİRME PROJESİ

Melih Can IŞIK

Onur KAYA

Veli TÜRK

Furkan AYDEMİR

**2021
TRABZON**

TRABZON
T.C.
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

MODEL RÜZGÂR TÜRBİNİ PROJESİ

Melih Can IŞIK

Onur KAYA

Veli TÜRK

Furkan AYDEMİR

Jüri Üyeleri

Danışman.....: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

Üye.....:

Üye.....:

Bölüm Başkanı: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

2021

TRABZON

II

ÖNSÖZ

Rüzgâr türbinleri rüzgârın potansiyel enerjisinden yararlanarak elektrik üretimi sağlayan makinelerdir. Tek, üç ve çok kanatlı gibi çeşitleri vardır. Rüzgâr türbinlerinin rüzgârdan elde edebileceği enerjinin bir limiti olduğundan türbinlerin verimleri arttırılarak rüzgârdan elde edilecek maksimum enerjinin absorbe edilmesi hedeflenir. Bunun için de kanat sayıları kanatların aerodinamiği ve elektronik aksamaları gibi parçalarda iyileştirmeler ve geliştirmeler yapılır. Bu projede rüzgâr türbininin çeşitli amaçlara ve şartlara göre şekillenen tasarımlarından fikir elde edilip düşük hızlarda da çalışabilmesi çok kanatlı ve demonte edilebilen bir yatay eksenli rüzgâr türbin modeli tasarlanıp üretilmiştir.

Çalışmalarımız boyunca bize rehberlik eden ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Burhan Çuhadaroğlu'na teşekkürü borç biliriz.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| ÖZET | VI |
| SUMMARY | VII |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | VIII |
| TABLolar DİZİNİ..... | IX |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR | X |
| 1. GENEL BİLGİLER..... | 1 |
| 1.1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1.1. Rüzgar Türbini..... | 2 |
| 1.1.2. Rüzgar Türbini Çeşitleri | 4 |
| 1.2. Amaç ve Kapsam..... | 11 |
| 1.3. LİTERATÜR TARAMASI | 12 |
| 1.4. KISITLAR VE KOŞULLAR | 15 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 16 |
| 2.1. Kanat Tasarımı | 16 |
| 2.2. Gövde Tasarımı | 20 |
| 2.3. Alternatör bağlantı elemanı tasarımı | 21 |
| 2.4. Kuyruk tasarımı | 22 |
| 2.5. Frenleme sistemi..... | 23 |
| 2.5 MÜHENDİSLİK HESAPLAMALARI VE ANALİZLERİ | 24 |
| 2.6 YAPILAN HESAPLAR..... | 25 |
| 2.6.1 Maksimum Güç Hesabı: | 25 |
| 2.6.2 Tasarım Hesabı: | 27 |
| 3. BULGULAR | 36 |
| 4. TARTIŞMA..... | 37 |
| 4.1. ÇEVRESEL ETKİ DEĞERLENDİRMESİ | 38 |

| | |
|------------------------|----|
| 5. MALİYET HESABI..... | 39 |
| 6. SONUÇLAR..... | 40 |
| 7. KAYNAKLAR..... | 41 |
| 8. EKLER | 43 |
| ÖZGEÇMİŞLER | 58 |

ÖZET

MODEL RÜZGÂR TÜRBİNİ PROJESİ

Bu tasarım çalışmasında ortalama 2,75 m/s rüzgâr hızında güç üretebilecek yatay eksenli bir rüzgâr türbini tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Ortalama 2,75 m/s rüzgâr hızında çalışabilen ve asgari miktarda güç üretebilen bir türbinle rüzgârın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine nasıl dönüştürüldüğü üzerinde durulmuştur. Bir rüzgâr türbini havanın enerjisinden nasıl ve ne kadar yararlanabilir kavramları açıklanmıştır.

Güz yarısında "MM 4007-Mühendislik Tasarımı" kapsamında başlamış olan çalışmamızda, öncelikle endüstriyel boyuttaki rüzgâr türbinleri incelenmiş ve gerek malzeme gerek çalışma prensipleri araştırılmıştır. Proje hesaplarında RES'ler için standart yöntemlerden biri olan momentum teorisi ile Betz Limiti esas alınarak güç hesabı ve kanat tasarımları ve gövde için mukavemet hesapları yapılmıştır. Bununla birlikte tasarımın çevresel etkileri değerlendirilerek maliyet analizi yapılmıştır. Üretim aşamasında; mukavemet hesaplarına göre malzeme seçimi yapılmış jeneratör, şarj ünitesi ve bağlantı elemanları piyasadan satın alınmıştır. Türbin için en kritik yerlerden biri olan kanat üretimi için üretim yöntemleri araştırılıp değerlendirilerek optimum üretim yöntemi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini, Betz Limiti, Kinetik Enerji, Elektrik

SUMMARY

MODEL WIND TURBINE PROJECT

This study aim to design horizontal axis wind turbine that can generate electricity on average 2,75 m/s wind speed. It is focused on how the kinetic enerhy of wind is converted into electricity with a türbine that can operate in the wind at an average of 2.75 m/s and produce power. Stated that how the wind turbine can use kinetic energy of wind and how much it can use. Explained that how wind türbine can benefit winds energy and how much wind türbine absorb wind.

In our Project 'MM 4007-Engineering Design' in fall semester, firstly industrial size of wind turbins were examined and all necessary work projects were researched. The momentum system, which is the one of the standards for wind energy systems, and the Betz Limit based for power calculations, wing design and strength calculations for body. At the same time production cost analysis and environmental impacts were made. At manufacturing stage, materials determined, charge unit and other connection parts were bought on market. The wings which is one of the most critical part of the türbine produced with optimum manufacturing process after researched and determined manufacturing process of high size wind türbine blades.

Keywords: Horizontal Axis Wind Turbine, Betz Limit, Kinetic Energy, Electricity

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1. Rüzgâr türbini parçaları..... | 2 |
| Şekil 2. Yatay ve dikey eksenli rüzgar türbinlerinin bileşenlerinin yerleşimi..... | 3 |
| Şekil 3. Yatay eksenli rüzgâr türbini şeması..... | 5 |
| Şekil 4. Dikey eksenli rüzgâr enerjisi türbinleri..... | 6 |
| Şekil 5. Bal peteği yapısı (Honeycumb structure)..... | 16 |
| Şekil 6. Atık su borusundan kanat imalatı..... | 17 |
| Şekil 7. Türbin kanadı destek profili..... | 18 |
| Şekil 8. Rulmanla yataklanmış gövde..... | 19 |
| Şekil 9. Yıldız bağlantı elemanı..... | 20 |
| Şekil 10. Kuyruk..... | 21 |
| Şekil 11. Frenleme sistemi..... | 22 |
| Şekil 12. Momentum teorisine göre türbin çarkının şematik gösterimi | 23 |
| Şekil 13. Güç katsayısı ve uç hız oranının belirlenmesi..... | 26 |
| Şekil 14. Türbin çarkına etki eden kuvvetler ve hücum açıları..... | 29 |
| Şekil 15. Hücum açlarına göre kaldırma ve direnç katsayıları..... | 32 |
| Şekil 16. Altı ve üç kanatlı modellerde voltaj ve akım değerleri..... | 36 |

TABLÖLAR DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması..... | 4 |
| Tablo 2. Rüzgar türbini tipleri ve kullanım yerleri..... | 4 |
| Tablo 3. Rüzgar hızı ve alana bağlı elde edilebilecek güç miktarları..... | 29 |
| Tablo 4. Maliyet hesabı..... | 38 |

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

| | |
|------------|---------------------------|
| ω | Açısal Hız |
| W | Bileşke hız |
| n | Devir sayısı |
| C_D | Direnç katsayısı |
| F_D | Direnç kuvveti |
| θ | Dönme açısı |
| C_p | Güç katsayısı |
| ρ | Havanın yoğunluğu |
| α | Hücum açısı |
| C_L | Kaldırma katsayısı |
| F_L | Kaldırma kuvveti |
| N | Kanat sayısı |
| c | Kanat uzunluğu |
| σ | Katılık |
| T | Moment |
| C_N | Normal kuvvet katsayısı, |
| F_N | Normal yöndeki kuvvet |
| V_∞ | Ortalama rüzgar hızı |
| A | Rotor süpürme alanı |
| R | Rotor yarıçapı |
| P_w | Rüzgar gücü |
| V | Rüzgar hızı |
| C_T | Teğetsel kuvvet katsayısı |
| F_T | Teğetsel yöndeki kuvvet |
| P | Türbin gücü |
| λ | Uç hız oranı |

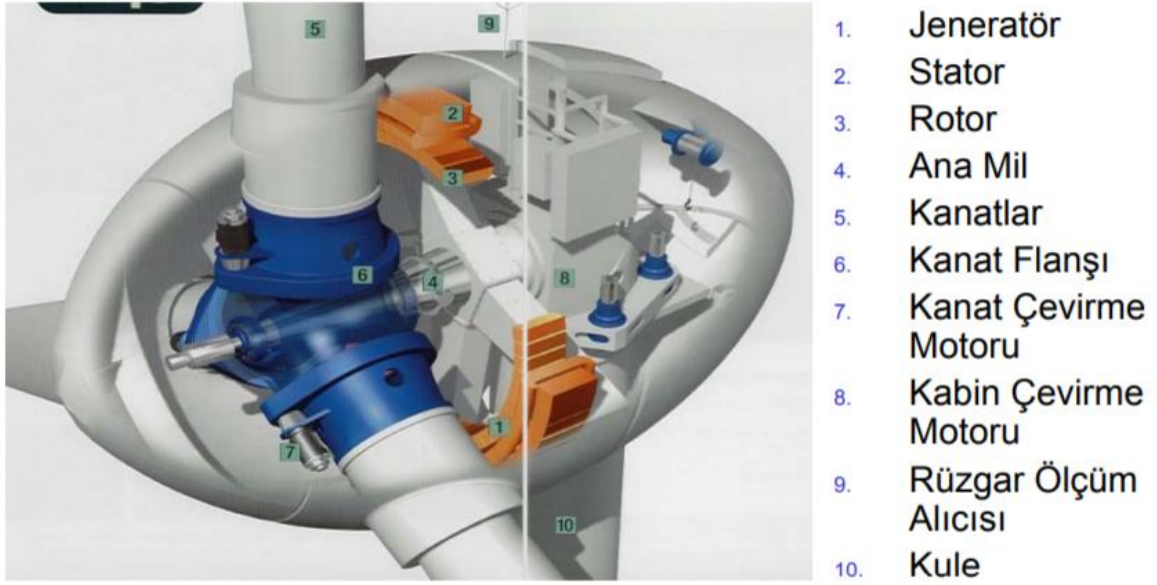
1. GENEL BİLGİLER

1.1. GİRİŞ

Günümüzün en büyük sorunu enerji ihtiyacıdır. Sanayi devrimi ile birlikte kullanımı hızla artan fosil yakıtların gerek çevreye olan zararlarının fark edilmesi gerekse sürekli olmamasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim gün geçtikçe artmaktadır. Teknoloji geliştikçe yenilenebilir enerji kaynaklarının ilk kurulum maliyetlerinin azalması ve verimlerinin artması onları daha da cazip bir alternatif haline getirmiştir. Bu kaynakların başında rüzgâr enerjisi gelmektedir. Dünya rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek amacıyla Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda, 5,1 m/s üzerinde rüzgâr kapasitesine sahip bölgelerin, uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile %4'ünün kullanılacağı öngörüsüne dayanarak, dünya karasal teknik rüzgâr potansiyeli 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır [1]. Açık deniz (offshore) bölgelerinin potansiyeli ise 420.000 TWh/yıl olarak öngörülmektedir [2]. Dünya genel elektrik tüketiminin 2018 yılında 26.203 TWh olduğu dikkate alındığında, önümüzdeki yıllarda bu büyük potansiyelin daha etkin değerlendirilmesine yönelik çalışmaların artarak devam edeceği açıktır [3]. Ülkemizin rüzgâr enerjisi bakımından büyük bir potansiyeli olmasına rağmen enerji ihtiyacının çoğunu hidrolik kaynaklar ve fosil yakıtlar ile sağlamaktadır. Rüzgâr enerjisi, kullanımı giderek artan ve potansiyeli yeni keşfedilmiş tükenmez bir enerji kaynağıdır. Bunun yanında Almanya'da rüzgâr enerjisinin toplam enerji üretimine katkısı 2019'un ilk yarısında toplam %23 olmuştur [4]. Bu da yenilenebilir enerji kaynaklarında ilginin ve verimin ne kadar arttığının ispatı niteliğindedir.

1.1.1. Rüzgar Türbini

Rüzgar türbini, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgar türbini, pervane, kule, jeneratör ve elektronik aksamlar olmak üzere 4 ana parçada oluşur. Rüzgar türbinini oluşturan tüm kısımlar ise şu şekildedir;



Şekil 1. Rüzgar türbini parçaları [5]

Rotor: Rüzgar pervaneleriyle dişli kutusunun yer aldığı bölümdür.

Pervane Kanatları: Rotor miline bağlı olarak rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bölümdür. Genellikle polyester ya da fiber-glass gibi hafif ama dayanıklı malzemelerden yapılır.

Dişli Kutusu: Rüzgar enerjisi vasıtasıyla dönme hızını arttıran bölümdür. Dişli kutusu, rüzgarın döndürme hızını arttırarak jeneratörün ihtiyacı olan hıza ulaştırır.

Rüzgar Vanası: Rüzgarın yönünü belirler. Bu sayede, sapma motoru aracılığıyla türbinin yönü, rüzgarın yönüne göre şekillendirilir.

Jeneratör: Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bölümdür. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit jeneratör kullanılır. Bunlar; doğru akım şönt, senkron ve indüksiyondur.

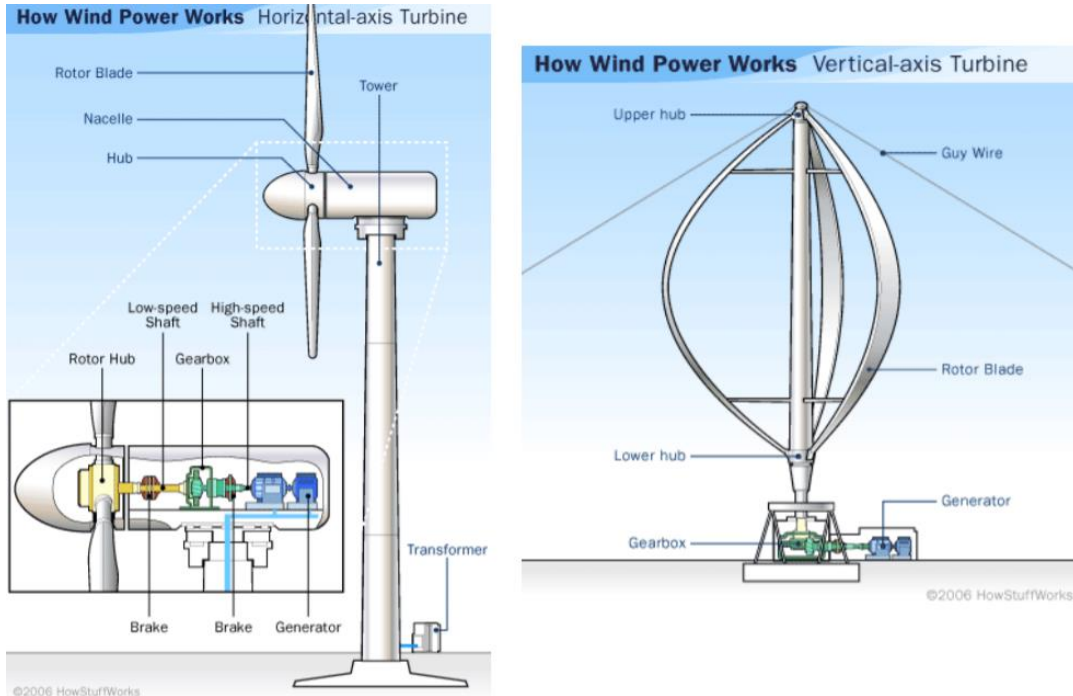
Fren: Acil durumlarda rotoru durduran cihazdır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit fren bulunur. Bunlar; mekanik, hidrolik ve elektrikseldir.

Yönetici: Rüzgar türbinlerini, rüzgarın yönüne doğru çeviren bölümdür.

Transformatör: Jeneratörde üretilen elektrik enerjisini şebekeye aktarmak için uygun voltaj seviyesini ayarlayan bölümdür.

Kule: Rüzgar türbinini taşıyan bölümdür. Genellikle silindirik formda üretilir. Bunun sebebi ise teknik personelin, türbine güvenli bir biçimde ulaşmasını sağlamaktır. Kafes şeklinde kuleler de vardır fakat, güvenlik sebebiyle çok fazla tercih edilmez.

Şebeke Bağlantı Sistemleri: Rüzgar santrallerinde, rüzgar enerjisiyle üretilen elektrik enerjisini şebekeye aktaran sisteme denir.







Şekil 2. Yatay ve dikey eksenli Rüzgar türbinlerinin bileşenlerinin yerleşimi [6]

1.1.2. Rüzgar Türbini Çeşitleri

Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar.



Tablo 1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması [7]

| Rotor Tipleri | λ Uç hız oranı | C_p Güç katsayısı | RPM Devir Sayısı | Tork | Kullanım Yeri |
|--|---------------------------|------------------------|---------------------|-------|------------------------------------|
|  PERVANE TİPİ | 6 10 | 0,42 | Yüksek | Alçak | Elektrik Üretimi |
|  DARRIEUS TİPİ | 5 6 | 0,40 | Yüksek | Alçak | Elektrik Üretimi |
|  CYCLOGIRO TİP | 3 4 | 0,45 | Orta | Orta | Elektrik Üretimi veya Su pompalama |
|  ÇOK KANATLI TİP | 3 4 | 0,35 | Orta | Orta | Elektrik Üretimi veya Su pompalama |

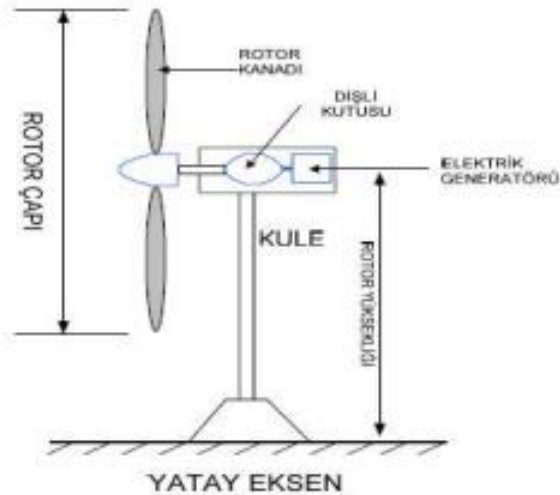
Tablo 2. Rüzgar türbini tipleri ve kullanım yerleri [8]

1.1.2.1. Dönme Eksenlerine Göre Rüzgar Türbini Çeşitleri

Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre üç gruba ayrılırlar; yatay eksenli rüzgar türbinleri, dikey eksenli rüzgar türbinleri, eğik eksenli rüzgar türbinleridir.

A) Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri:

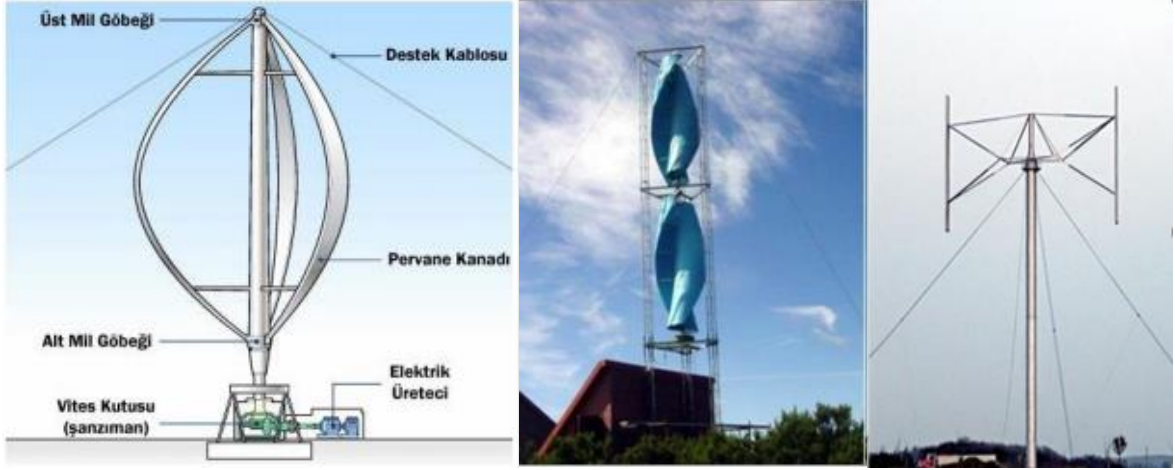
Bu türbinlerde; dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Ticari türbinlerin çoğu yatay eksenlidir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgarı önden en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilir. Bu türbinlerde rotor kanatlarının sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45'dir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri genel olarak yerden 20-30 m yüksekte ve çevredeki engellerden 10 m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. Rüzgar hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı (λ) denir. Eğer; $\lambda=1-5$ Çok kanatlı rotor, $\lambda=6-8$ üç kanatlı rotor, $\lambda=9-15$ iki kanatlı rotor, $\lambda>15$ tek kanatlı rotor kullanılır.



Şekil 3. Yatay eksenli rüzgar türbini şeması [9]

B) Düşey (Dikey) Eksenli Rüzgar Türbinleri

Türbin mili düşeydir ve rüzgarın geliş yönüne diktir. Ticari kullanımdan ziyade deneyler için üretilmektedir. Yere yerleştirilebildikleri için kule ihtiyacı ve maliyeti ortadan kalkmaktadır. Sistem istenilen rüzgar yönüne çevrilebildiği için dümen sistemine gerek kalmıyor. Bu türbinlerin verimleri yatay eksenli rüzgar türbinlere göre düşüktür. Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için kule kullanmak gerekmez, böylece kule masrafı olmaz.



Şekil 4. Dikey eksenli rüzgar enerjisi türbinleri [10]

B.1 Darrieus Rüzgar Türbinleri

Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki tane kanat vardır. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmiştir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgâr türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir.

B.2. Savonius Rüzgar Türbinleri

İki ya da üç adet kepçeye benzer kesitin birleşimi şeklindedir. En yaygını iki adet kepçenin bulunduğu durumdur ve “S” şeklini andıran bir görüntüsü vardır. Savonius türbininde akışkan içbükey kanat üzerinde türbülanslı bir yol izler ve burada dönel akışlar meydana gelir. Bu dönel akışlar Savonius türbininin performansını düşürür, bu nedenle elektrik üretiminde pek fazla kullanılmazlar. Daha çok su pompalama amaçlı ve rüzgâr ölçümlerinde kullanılan anemometre olarak kullanılırlar.

C. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenleri düşeyle rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır.

1.1.2.2. Kanat Sayılarına Göre Rüzgar Türbini Çeşitleri:

Kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere dört çeşide ayrılır.

A. Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin kullanımının temel amacı, pervanelere etkileyen yüksek rotasyonel hızın düşürülmesidir. Diğer yandan, tek kanatlı rüzgâr türbini aerodinamik olarak dengesizdir ve bu durumda ek hareketler ile istenmeyen bazı yüklerle sebep olur. Bu mekanizmayı kontrol etmek için, göbek kısmına ek yapılar yapmayı gerektirir. Diğer dezavantajlarından birisi de yüksek aerodinamik gürültü seviyesidir. Üç hız oranı, 120 m/s civarındaki üç kanatlı pervanelerle kıyaslandığında, üç hızı 2 kat daha yüksektir. Dolayısıyla üç kanatlı rüzgâr türbinlerinden daha gürültülüdür.

B. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Modern rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan model üç kanatlı olmaktadır. Bunun temel nedeni, pervanelerin tüm hızlarda sabit atalet momentine sahip olmasıdır. Üç veya daha fazla kanada sahip olan tüm pervaneler bu avantaja sahiptir. Ayrıca, üç kanatlı pervane bu avantajından dolayı rüzgâr türbinleri üzerinde ek bir yük getirmemektedir.

C. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Çok Kanatlı rüzgâr türbinleri (rüzgârgülleri), rüzgâr türbinlerinin gelişmemiş ilk örnekleridir. Yıllarca sadece su pompalamasında kullanılan bu türbinler, bu işlemdeki moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Çok kanatlı rüzgâr türbinleri düşük hızda çalışırlar. Türbin kanatlarının genişlikleri, pervane göbeğinden uçlara gidildikçe artım gösterir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlanarak, jeneratör mili devir sayısı artırılır ve otomobillerde uygulama alanı bulan jeneratörler kullanılır. Rüzgârgülleri, rüzgârgülü pervane düzleminin rüzgâr hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de rüzgârgülü yönlendiricisi taşımaktadırlar.

1.1.2.3 Rüzgârın Geliş Yönüne Göre Rüzgar Türbini Çeşitleri:

Rüzgârın geliş yönüne göre rüzgâr türbinleri, rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan türbinler olarak ikiye ayrılır.

A. Rüzgârı Önden Alan Rüzgar Türbinleri:

Yatay eksenli türbinlerde rotor yüzü rüzgâra yönelmiş ise önden rüzgârlı türbinler adını alırlar. Bu türbinlerin en önemli üstünlüğü kulenin yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmamasıdır. Yıllardır yaygın olarak bu makineler kullanılmıştır. Öte yandan yine de kulenin önünde, az da olsa, bir rüzgâr gölgelemesi vardır. Yani rüzgâr kuleye eğilerek gelir. Kule yuvarlak ve düz olsa bile, kanatın kule hizasından her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. İşte bu nedenle rüzgâr çekilmesinden dolayı kanatların çok sert yapılması ve kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca önden rüzgârlı makineler, rotoru rüzgâra karşı döndürmek için sapma mekanizması ile donatılmışlardır.

B. Rüzgârı Arkadan Alan Rüzgar Türbinleri:

Arkadan rüzgârlı türbinlerin rotorları kule arkasındadır. Bunların önemli üstünlüğü sapma (yaw) mekanizmasına gerek olmayışıdır. Eğer makine yuvası (nacelle) ve rotor uygun tasarlanırsa makine yuvası rüzgârı pasif olarak izler. Bu rüzgâr türbinlerinde bu kesin bir üstünlük değildir. Rotor pasif olarak belirli bir periyotta her yöne dönebildiği için, bu tip türbinlerin üreteçlerinden inen kabloların dolanabilmesi söz konusudur. İşte “yaw” bu sorunu ortadan kaldırır. Daha önemli üstünlük kanatların esnek özelliğe sahip yapılmasıdır. Bu hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlük sağlar. Böylece kule yükü azalmış olur. Arkadan rüzgârlı türbinlerin temel üstünlüğü böylece önden rüzgârlı türbinlere göre daha hafif yapılması şeklinde ortaya çıkar. Ancak, kanat kule hizasından geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgârlı makinelerden daha çok zarar verebilir.

1.1.2.4. Maksimum Güçlerine Göre Rüzgar Türbini Çeşitleri:

Güçlerine göre rüzgar türbinleri dörde ayrılır.

A) Küçük Güçlü Rüzgar Türbinleri:

Üretebileceği maksimum gücü 30 kW'tan az olan türbinlerdir.

B) Orta Güçlü Rüzgar Türbinleri:

Üretebileceği maksimum gücü 30-100 kW arasında olan türbinlerdir.

C) Büyük Güçlü Rüzgar Türbinleri:

Üretebileceği maksimum gücü 100-1000 kW arasında olan türbinlerdir.

D) Çok Büyük Güçlü Rüzgar Türbinleri:

Üretebileceği maksimum gücü 1 MW ve üstünde olan türbinlerdir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu proje kapsamında temiz enerji kaynaklarından rüzgar enerjisinden kullanılabilir elektrik enerjisine dönüşümünü gerçekleştirmek için bir model rüzgar türbini tasarımı yapılarak konutlar için çevre dostu, ulaşılabilir, kurulumu kolay, düşük maliyetli bir tasarım yapılması amaçlanmıştır.

Elektrik üretimi çoğunlukla fosil yakıtlardan karşılanırsa da günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep artmaya başlayarak bizlere alternatif bir seçenek olmuştur. Kısa vadede yatırım masraflarını karşılayabilir ve çevre dostu olmalarından ötürü bu sistemlerin yaygınlaşması insanlık için önem arz etmektedir. Rüzgar türbinleri de verimi yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarından olmasından ötürü özellikle rüzgar alan sahalarda yaygın bir seçenektir.

Model rüzgar türbini projesi temel olarak jeneratör, türbin kanatları, türbin flanşı, gövde, teleskobik ayak, kuyruk ve şarj ünitesi bileşenlerini içermektedir. Türbin kanadı, türbin flanşı, gövde tasarımları yapılan hesaplamalar kapsamında yer almaktadır.

1.3. LİTERATÜR TARAMASI

Rüzgar enerjisi; M.Ö. 3000 yıllarında Mısır'da toprak sulamada, M.Ö. 250 yıllarında İran'da tahıl öğütmede kullanılmış ve tüm İslam ülkelerine yayılmıştır. Rüzgar çarkları, 11. Yüzyılda Ortadoğu'da çok yaygın bir şekilde kullanılmış, ilk defa 13. Yüzyılda Haçlı seferleri ile Anadolu'dan Avrupa'ya götürülmüştür. 17. Yüzyılda Hollanda'da gemi ve yel değirmenlerinde kullanılmış ve ülkenin gelişmiş endüstriyel bir ülke haline gelmesinde katkı sağlamıştır [11].

Fernando ve Modi yaptıkları çalışmada; Savonius rüzgar türbininin performansını belirlemek için ayrılmış vorteks yöntemine dayanan bir matematik modeli ayrıntıları ile açıklamışlardır. Hem duran hem de dönen Savonius rüzgar çarkı durumları için, ayrılmış vorteks modeli kullanarak elde edilen sonuçları tartışmışlardır [12]. Fernando ve Modi açıkladıkları vorteks modeli sayesinde alışlagelmiş türbinlerin dışında yeni bir türbin modelinin ortaya çıkışında önemli rol oynamışlardır. Bu türbin modeli özellikle türbin kanatlarına çarparak telef olan hayvanlar açısından oldukça önemli bir gelişmedir.

Blackwell vd. yaptıkları çalışmalarında; Savonius rüzgar çarkının aerodinamik performansına karar vermek için, rüzgar tüneline çeşitli parametrelerde on beş farklı tasarım deneyerek, dönme hızlarını ve moment değerlerini ölçmüşlerdir. HAD simülasyonları aracılığı ile belirlenmiş, Reynolds sayısının türbin performansına olan etkileri incelenmiştir. Buna göre, Reynolds sayısının 4×10^6 değerinde en yüksek güç faktörü değerine ulaşılmış olup bu çalışma noktasında devirlik sayısı 1.0 ve güç faktörü değeri 0.27 olarak bulunmuştur [13].

Blackwell, gerçekleştirdiği simülasyon sonucunun doğrulanmasıyla ileri zamanlarda yapılacak tasarım analizleri için öncü olmuşlardır.

Reupke ve Probert yaptıkları çalışmada; Savonius rüzgar çarkının çalışma etkinliğini arttırmak için türbin kanatlarının kavisli kısımlarının yerine bir sıra menteşelenmiş kanatçıklar yerleştirmişlerdir. Bu kanatçıklar rüzgara doğru giderken rüzgarın etkisiyle otomatik olarak açılacağından düşük akış direnci elde etmeye yardımcı olmaktadır.

Tersi durumunda ise kanatlar rüzgardan geriye gelirken yine rüzgarın etkisiyle kanatların güç kaybı esnasında tekrar otomatik olarak kapandığını tespit ederek, düzeltilmiş parçalı rotorlardan çok düşük uç hız oranlarında, klasik Savonius rüzgar çarklarından daha yüksek momentler elde edildiğini belirlemişlerdir [14].

Fujisawa ve Gotoh, Savonius rüzgar çarkının güç mekanizmasını; kanat üzerinde basınç ölçmeleri ve bir akış inceleme deneyi ile irdelenmişlerdir. Düşük basınç bölgesinin; dönen bir rotorun güç üretmeye katkıda bulunan ilerleyen kanadının dış bükey tarafı üzerinde oluştuğunu göstermişlerdir [15].

Fujisawa ve Gotoh bir Savonius rüzgar çarkının aerodinamik performansını; çeşitli çark açılarında ve uç hız oranlarında, kanat yüzeylerindeki basınç dağılımlarını ölçerek incelemişlerdir. Dönen çark üzerindeki basınç dağılımlarının duran kanatlara göre fark edilecek bir şekilde değiştiğini görmüşler ve hareketli kanatların konveks tarafında özellikle kanadın hareket eden cidarı tarafında alçak basıncın oluştuğu yerde bu olayın meydana geldiğini belirlemişlerdir [16]. Yaptıkları bu çalışma günümüzdeki modellenen türbin kanatlarının tasarımında öncü olarak görülmektedir.

Deda rüzgar enerjisinin önemini, dünyada ve Türkiye'deki potansiyelini, rüzgar çarklarının tiplerini, Savonius rüzgar çarklarının özelliklerini, üstünlüklerini, güç hesaplamalarını araştırarak, Savonius tipi rüzgar çarklarının düşük olan aerodinamik performanslarını arttırmak için uygulanan perdenin performansa etkisini matematiksel olarak incelemiştir [17].

Kawamura vd. yaptıkları çalışmalarında; alan ayrışma yöntemini kullanarak Savonius rüzgar çarkı etrafındaki akış alanını hesaplamışlar; moment katsayısı ve güç katsayısı gibi değerleri çeşitli uç hız oranları için yaptıkları deneylerle elde etmişlerdir. Elde edilen bu deneysel sonuçlar günümüzde yapılan tasarımların tasarlanma süresini-tasarımda kullanılacak katsayılar tablolarından seçilebilecek- ve tasarım maliyetini azaltmaktadır.

Avşar vd. çalışmalarında, Savonius rüzgar çarkının Türkiye'deki uygulama örnekleri üzerine araştırma yapmışlardır. Afyon yöresinin rüzgar potansiyelini inceleyip, rüzgar potansiyeline göre Savonius rüzgar türbini tasarlayarak, imalatını yapmışlardır. Tasarladıkları türbinin, Afyon yöresinin rüzgar alan yüksek kesimlerinde ve etrafı açık olan ovalarda sorunsuz çalıştığını ve aküyü şarj ettiğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları bu tasarım ülkemizde gerçekleştirilen birçok yenilenebilir enerji kaynaklarına olan güvenin artmasına oldukça katkıda bulunmuştur.

Percival vd. çalışmalarında; ev için elektrik üretiminde kullanılmak üzere Savonius rüzgar türbini yapmışlardır. Tasarlanan Savonius rüzgar türbininin yapım aşamasını anlatarak, türbinin inşa edileceği yeri seçmişler ve türbini kurarak, test etmişler ve güç katsayısı değerini 0,25 civarında bulmuşlardır.

Türkiye'de genel kullanıma dönük ilk rüzgar elektriği, 1986 yılında Çeşme Altinyunus Tesisleri'nde kurulan Vestas marka 55 kW nominal güçlü rüzgar türbininden elde edilmiştir. Bu türbinin göbek yüksekliği 24,5 m ve pervane çapı 14 m'dir. 55 kW'lık nominal güce 12 m/s'lik rüzgar hızında erişen bu türbinden, Çeşme şartlarında yılda ortalama 100.000 kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu miktar, tesis elektrik enerjisi ihtiyacının %4'ünü oluşturmaktadır [18].

1.4. KISITLAR VE KOŞULLAR

Rüzgâr türbininde üretilen elektrik enerjisi miktarını yerel rüzgâr hızı belirlemektedir. Genellikle rüzgâr hızı arttıkça üretilen çıkış gücünde artmaktadır. Bu yüzden RES bölgesindeki yerel rüzgâr hızının olabildiğince yüksek olması istenmektedir. Ancak bunun yanında bir RES üretim miktarı ve maliyeti türbinlerin mikro konuşlandırılmasıyla da doğrudan ilişkilidir. Bazen rüzgâr türbinlerinde üretilen güç beklenilenden daha düşük olabilmektedir. Bu durumun nedeni genelde rüzgâr türbinlerinin en yüksek üretim yapacakları konumlara yerleştirilememesidir. Yanlış yerleşim yapıldığında türbinlere düşük hızda bir rüzgâr ulaşmakta ve bu yüzden üretim düşmektedir. Üretim düşüşüne engel olabilmek için rüzgâr türbinlerinin yerleşimi en iyi şekilde yapılmalıdır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan bu projede hem ergonomik olması bakımından hem de fiyat - performans bakımından diğer yapılan rüzgâr türbini projelerinden farklı olarak birtakım bulgular elde edilmiştir. Bu bulgular eşliğinde projenin imalat kısmında atılan adımlar aşağıdaki gibidir:

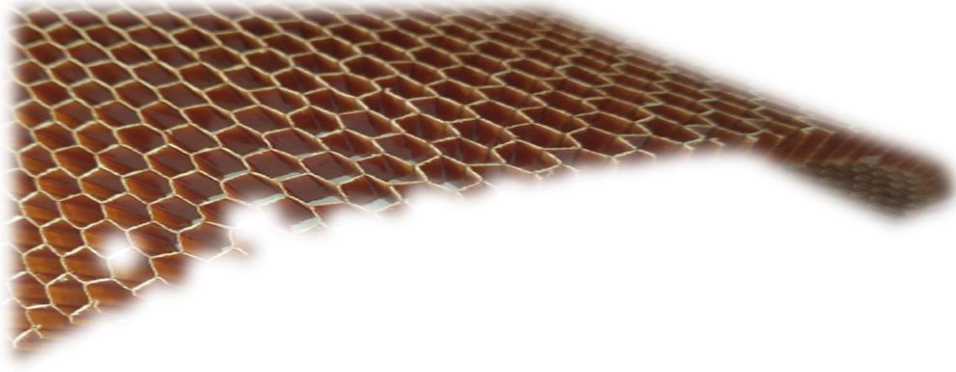
2.1. Kanat Tasarımı

Rüzgâr türbini kanatlarının üretim aşamasında çoğunlukla kompozit malzemeler kullanılır. Her kompozit malzemede genellikle iki tip malzeme bulunur. Bunlar matris ve takviye malzemesi olarak adlandırılır. Takviye malzemesi taşıyıcı görev üstlenir ve onu sarmalayan matris de onu bir arada tutmaya desteklemeye yarar.

Rüzgâr türbinlerinde takviye malzemeleri genel olarak cam elyaf ve karbon kumaşlar kullanılır. Bunlar arasındaki en belirgin farklar karbon kumaşın yüksek mukavemet değerlerinin yanı sıra hafif olması, elektriksel iletkenliklerinin yüksek olması, cam elyafın ise el ile yatırma işlemine daha uygun olması ve daha kolay izlenebilirliğinin sağlanması ile daha ucuz ve yaygın olarak elde edilebilmesidir.

Bir kompozit malzeme olan rüzgâr türbini kanatlarında matris elemanı olarak polimer yapıda termoset reçineler kullanılır. Bunların içindeki epoksi reçineler ise üstün mekanik dayanımları sayesinde çok fazla tercih edilir. Kompozit malzemede matris ve takviye elemanı birleştirilmeden önce epoksi reçineler uygun derecede sertleştiriciler ile karıştırılır. Endüstriyel ölçekte üretimlerde dozaj ayarlayıcı makinelerle bunlar yapılır.

Sandviç yapıli kompozit ürünlerde kullanılan ara malzemeler kompozit kanadın düşük bir ağırlık artışı ile daha yüksek bir rijitliğe ve eğilme dayanımına sahip olmasını sağlar. Genel olarak köpük türevleri (PVC, PET vb.), balsa ağacı ya da kontrplak gibi ahşap malzemeler, çeşitli malzemelerden oluşmuş (Kraft kâğıdı, alüminyum, çelik, karbon, polietilen vb.) bal peteği yapısındaki (honeycomb structure) ürünler ara eleman görevini ihtiva eder.

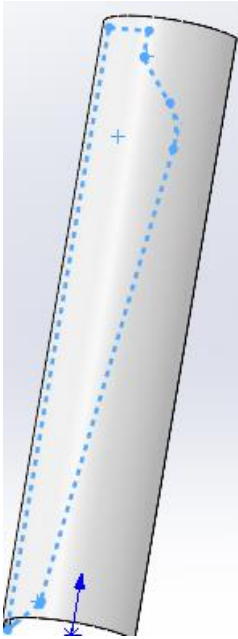


Şekil 5. Bal peteği yapısı (Honeycomb Structure) [19]

Kanatlar üretilmeden önce reçineler ile kalıplar hazırlanır. Daha sonra karbon kumaş ya da cam elyaf gibi takviye malzemeler ile sıvanır. Uygun tasarımlar ile ara malzeme ve matris elemanı da eklenip kanat vakum yöntemleri ya da el yatırma işlemi eşliğinde üretilir. Kanatlar paket halinde üretilir ve balansları ona göre ayarlanır. Her paketteki kanatların ağırlıkları mümkün olduğunca yakın yapılmaya çalışılır ve ona göre gruplandırılır.

Maliyet ve ulaşılabilirlik açısından 200'lük PVC atık su borusu kullanılması kararlaştırıldı. Bununla birlikte borunun dairesel profilinden dolayı kanadın bombeli yapısı daha kolay elde edilmiş oldu.

Borulara yapıştırılan kanat şablonu ile borular kesilip zımpara yapıldı. Buradaki önemli husus her bir kanadın aynı ağırlıkta ve ölçüde kesilmiş olmasıdır. Aksi takdirde farklı ağırlıklar ve geometrik farklılıklardan dolayı sistem dönerken titreşim ve dengesizlik oluşur. Bu dönen cisimlerde oluşan dengesizlik balansın ayarlanması ile önlenir.



şekil 6. Atık su borusundan kanat imalatı

Kanatların rüzgar karşısında direncini arttırmak için alüminyum profiller ile kanatların arka iskeleti desteklendi. Böylelikle suni iskelet sistemi ile kanat profillerinin yapısının rüzgar ve dış etkenler karşısında korunması sağlandı.

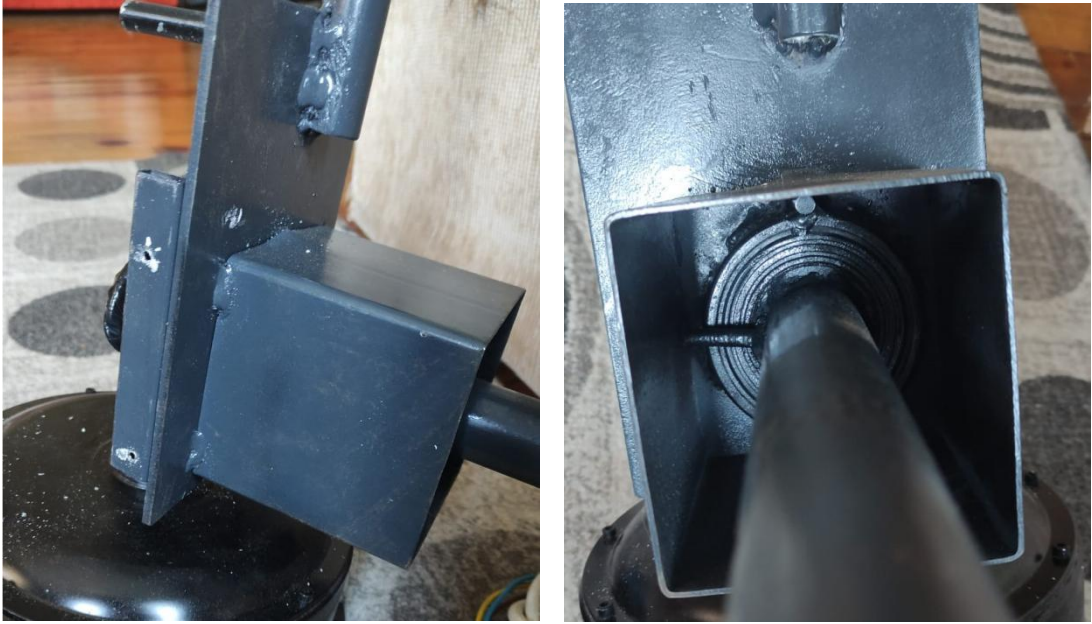


Şekil 7. Türbin kanadı destek profili

2.2. Gövde Tasarımı

Gövde, kuyruk sayesinde rüzgâr yönüne doğrultulacağı için gövde ve ayak montajında rulman ile yataklama yapıldı. Sistemde yaw motorları gibi yn tayin edici unsurlar olmayıp sadece kuyruk olduğu için sistem a noktasına saat yönünün tersi yönünde ulaşabilirken saat yönünde dönerek $360 + x$ derece bir hareket sergilemiş olur. Bu da sistem için gereksiz bir hareket olmakla birlikte elektrik bağlantı elemanlarının birbirine dolaşarak kopmasına sebep olabilir.

Bunu önlemek için sistem 360 derece döndüğünde kendini kilitler. Yeniden rüzgâra dönebilmesi için $360 + x$ derece yerine $-x$ derece dönmesine zorlanır. Böylelikle sistem gereksiz titreşim ve hareketlerden uzak durur. Bu da sistemin ömrünü uzatır.



şekil 8. Rulmanla yataklanmış gövde

2.3. Alternatör bağlantı elemanı tasarımı

Sistemin ağırlığını azaltmak için en başta disk şeklinde tasarlanan bağlantı elemanı yerine sadece yıldız şeklinde tasarım tercih edilmiştir. Böylelikle sistemin ölü hacimleri tasarımdan çıkarılmıştır.



Şekil 9. Yıldız bağlantı elemanı

2.4.Kuyruk tasarımı

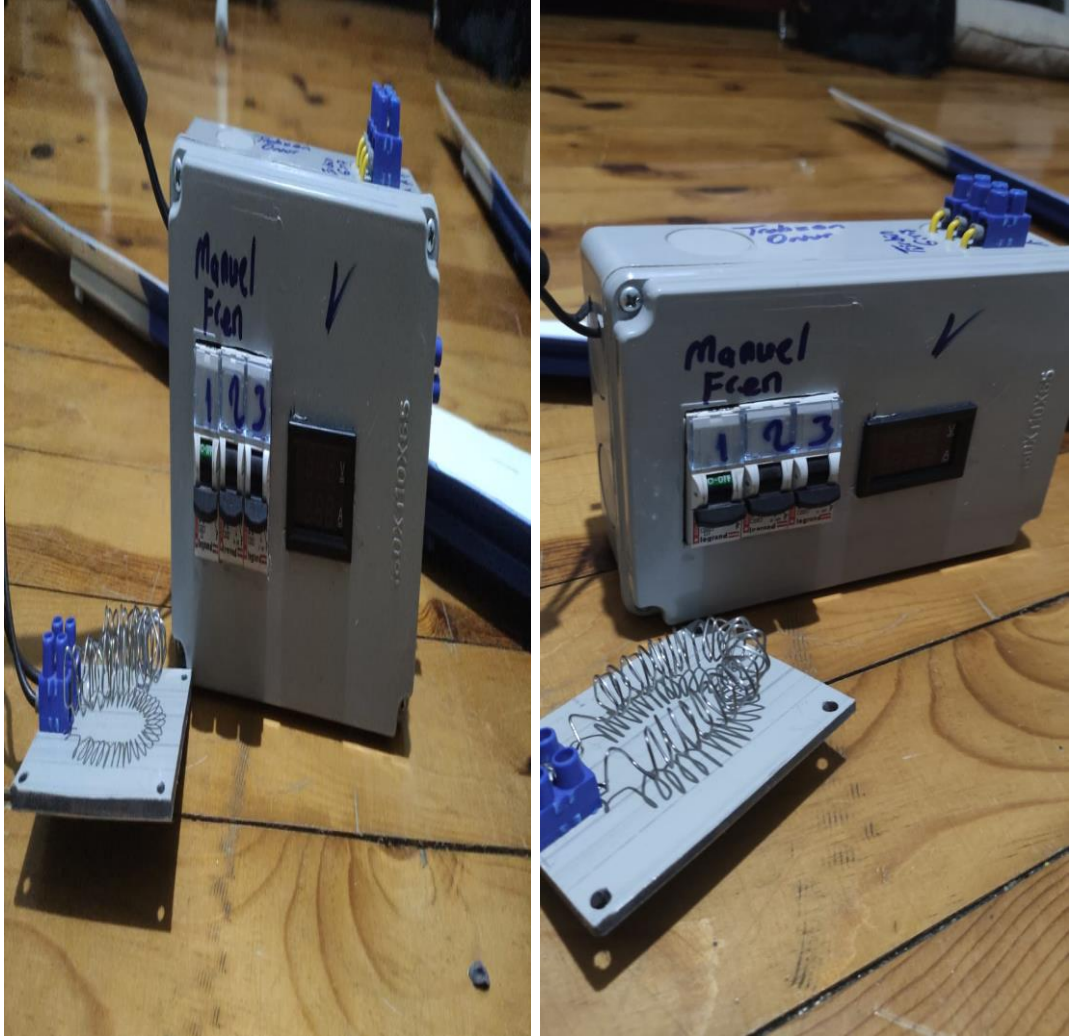
Çeşitli yönlerden esen rüzgarlardan yararlanabilmek için türbin gövdesinin, her an rüzgar doğrultusuna dikey konumda olması istenmektedir. Bu yöneltmeyi de alüminyum kompozit plakadan uygun ölçülerde kesimi yapılarak aşağıdaki parça elde edilmiştir.



Şekil 10. Kuyruk

2.5.Frenleme sistemi

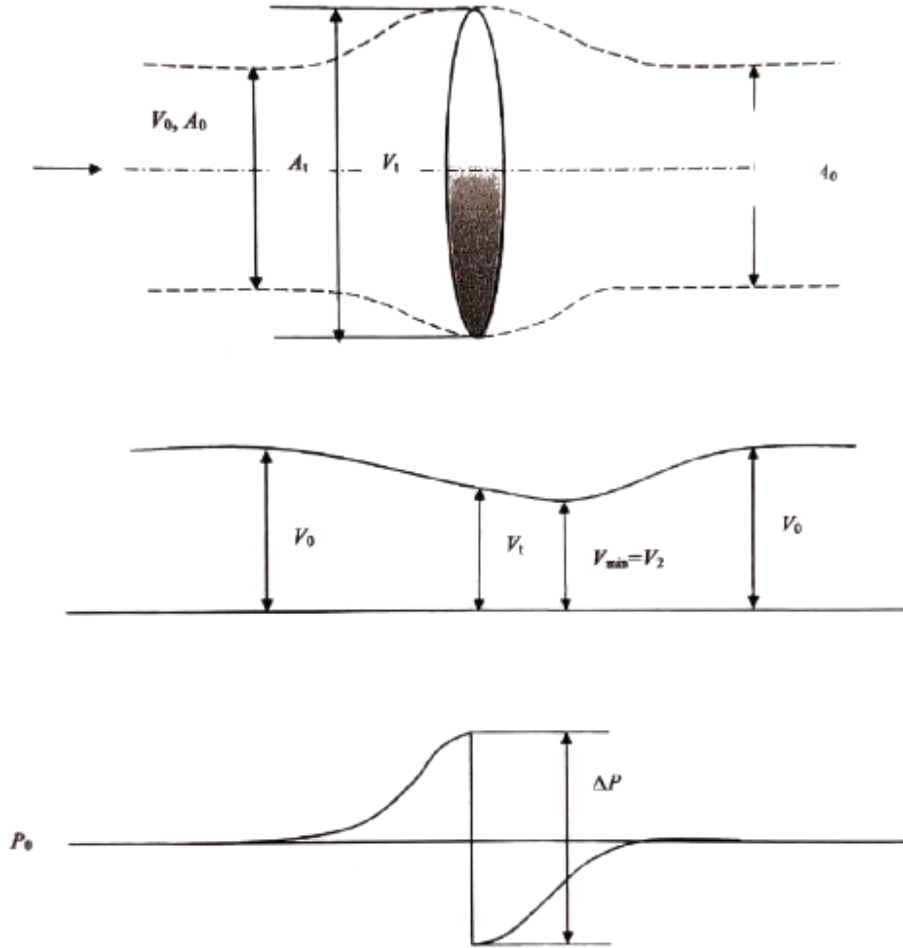
Fırtınalı havalarda kanatların hasar görmemesi için elektronik frenleme yaparak kademeli şekilde sistemin dönüş hızını kontrol altında tutar. Aynı zamanda sistem jeneratörden gelen akımı kontrollü bir şekilde aküye ileterek enerjinin depolanmasını sağlar. Üzerindeki led ekran sayesinde de jeneratörün ürettiği anlık gerilim ve akım değerleri okunabilir.



Şekil 11. Frenleme sistemi

2.5 MÜHENDİSLİK HESAPLAMALARI VE ANALİZLERİ

Rüzgarla karşılaşan bir cisim rüzgar yönünde itme ve rüzgara dik yönde kaldırma kuvvetlerine maruz kalır. Rüzgar türbinlerinin performansını belirlemek için kullanılan en basit aerodinamik model momentum teorisidir. Bu teoriye göre türbin hareketli bir geçirgen disk olarak göz önüne alınır. Akışın sıkıştırılmaz olduğu ve sürtünmesiz bir diskin hava akımına yerleştirildiği düşünülür. Bu durumda, diskteki momentum değişiminin havanın kinetik enerjisindeki değişime eşit olması gerekir. Yani rotor veya disk üzerindeki aksel kuvvet, rotor veya diskten geçen hava akımının momentumunun zamana göre türevine eşit olmalıdır. Kütlelenin korunumu, aksel kuvvetin korunumu, Bernoulli denklemi ve termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak ayrıca akışın da izotermal olduğu varsayılarak türbin tarafından üretilen güç belirlenmektedir.



Şekil 12. Momentum teorisine göre türbin çarkının şematik gösterimi [20]

2.6 YAPILAN HESAPLAR

2.6.1 Maksimum Güç Hesabı:

Çarkın önünde ve arkasında belirli mesafede rüzgar hızı V_0 serbest rüzgar hızını eşittir. Çarka yaklaştıkça rüzgar hızı azalacak ve enerjisinin bir bölümünü çarka bıraktıktan sonra yola devam edecektir. Hız çarkın gerisinde V_2 gibi minimum bir değere ulaştıktan sonra çarktan belirli bir uzaklıkta tekrardan V_0 serbest rüzgar hızına eşit olacaktır. Süreklilik denkleminde;

$$V_1 \cdot A_1 = V_0 \cdot A_0 = V_T \cdot A_T = V_2 \cdot A_2$$

Euler teoremine göre çarka uygulanan kuvvet:

$$F = \dot{m} (V_1 - V_2) = \rho \cdot A_T \cdot V_T (V_1 - V_2) \quad (1)$$

Çark kanatları tarafından absorbe edilen güç:

$$P = F \cdot V_T = \rho \cdot A_T \cdot V_T^2 (V_1 - V_2) \quad (2)$$

Rüzgarın kinetik enerjisindeki değişim:

$$\Delta T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (3)$$

$P = \Delta T$ yazılarak,

$$\rho \cdot A_T \cdot V_T^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_T (V_1^2 - V_2^2) \Rightarrow V_T = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \text{ elde edilir.}$$

(1) ve (2) denklemleri yeniden düzenlenirse;

$$F = \rho \cdot A_T \cdot (V_1 + V_2) (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$

$$P = \rho \cdot A_T \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} (V_1 - V_2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

(5) denkleminde gücün maksimum olabilmesi için $V_1 = V_0$ ve $V_2 = 0$ olması gerekir. Fakat hava akımından enerji elde edebilmek için diskten kütle akışının olması gerekir. Bu nedenle çark çıkışında rüzgar hızı (V_2) sıfır olamaz. Şu çıkarımı yapabiliriz. Rüzgardan elde edilebilecek maksimum enerji sınırlıdır. Bu sınırı Betz Limiti denir ve (5) denkleminde aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial V_2} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial V_2} &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T \cdot [(V_1^2 - V_2^2) - 2V_2(V_1 + V_2)] = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T [V_1^2 - V_2^2 - 2V_1V_2 - 2V_2^2] \\ &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T [V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T (V_1 + V_2) (V_1 - 3V_2)\end{aligned}\quad (6)$$

Rüzgar çarkından elde edilen gücün (P 'nin) maksimum olabilmesi için $V_1 = V_0$ olmalıdır. Bu durumda (6) denklemini sıfıra eşitlenirse $V_2 = -V_0$ ve $V_2 = V_0/3$ şeklinde iki çözüm elde edilir. Burada fiziksel olarak anlamlı olan $V_2 = V_0/3$ kabul edilerek maksimum güç elde edilir. Maksimum güç denklemini aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T \left(V_0 + \frac{V_0}{3}\right) \cdot \left(V_0^2 - \frac{V_0^2}{9}\right) = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_0^3 \quad (7)$$

Hava V_0 hızında A_T alanından geçerken rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç havanın kinetik enerjisine (T 'ye) eşittir.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0 A_T \cdot V_0^2 \quad (8)$$

P_{\max} T 'ye oranlanırsa Betz Limiti elde edilir.

$$\frac{P_{\max}}{T} = \frac{\left(\frac{8}{27} \rho \cdot A_T \cdot V_0^3\right)}{\left(\frac{1}{2} \rho \cdot A_T \cdot V_0^3\right)} = \frac{16}{27} = \%59.26 \quad (9)$$

Böylece rüzgar çarkı ile rüzgar enerjisinin maksimum %59.26'sından yararlanılabilir.

2.6.2 Tasarım Hesabı:

2.6.2.1. Güç Kaynağı Hesabı

Uç hız oranı λ şekil 6'dan 6 seçilmiştir.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (10)$$

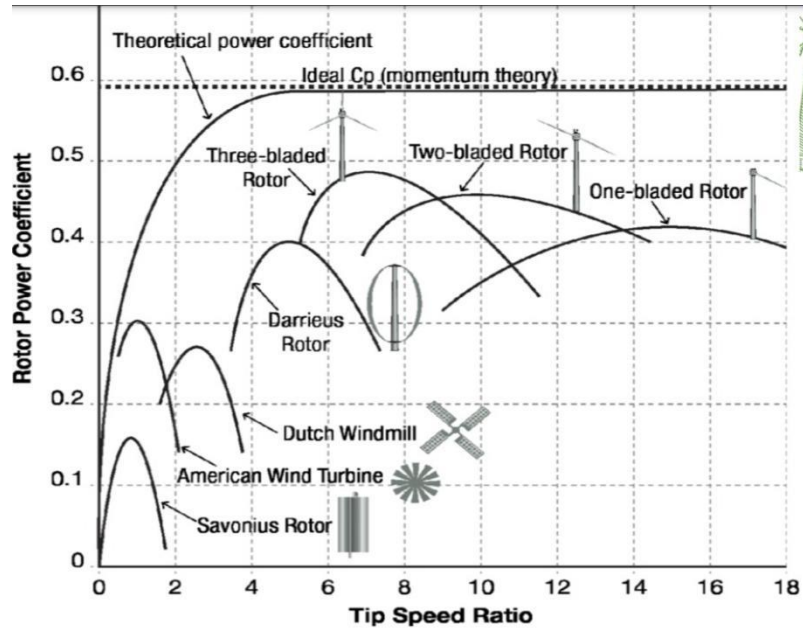
$$\omega = \frac{6 \cdot (2,75)}{1}$$

$$\omega = 16,5 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (11)$$

$$n = \frac{(33) \cdot 30}{\pi}$$

$$n = 157,56 \text{ dev/dak}$$



Şekil 13. Güç katsayısı ve uç hız oranının belirlenmesi [21]

2.6.2.2. Mil Hesabı

Mil uzunluğu 150 mm ve mil malzemesi St37-2 seçilmiştir.

$$M_b = 9550 \cdot \frac{P}{n} \quad (12)$$

$$M_b = 9550 \cdot \frac{0,01[\text{kW}]}{157,56[\frac{\text{dev}}{\text{dak}}]}$$

$$M_b = 0,606 \text{ N.m} = 606 \text{ N.mm}$$

Maksimum eğilme momentinin hesabı ;

$$(M_e)_{\text{max}} = M_b$$

$$(M_e)_{\text{max}} = 606 \text{ N.mm}$$

Yüklemeye tam değişken olduğundan $\sigma_0 = 0$ 'dir.

$$\sigma_g = \frac{M_{e,\text{max}}}{W_e} = \frac{32 \cdot M_{e,\text{max}}}{\pi \cdot d_i^3} \quad (13)$$

$$\sigma_g = \frac{6172,66}{d_i^3}$$

$K_b = 0,9$; $K_y = 0,85$ ve $K_t = 1,58$ seçilerek K_ζ değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$K_\zeta = 1 + q(K_t - 1) \quad (14)$$

$$K_\zeta = 1 + 0,7 \cdot (1,58 - 1) = 1,4$$

$$\sigma_D^* = \frac{K_b \cdot K_y}{K_\zeta} \cdot \sigma_{eD} = \frac{(0,9) \cdot (0,85)}{1,4} \cdot 180 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (15)$$

$$\sigma_D^* = 98,35 \text{ N/mm}^2$$

Soderberg denklemini kullanarak ;

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{\sigma_{AK}}{\sigma_D^*} \cdot \sigma_g \quad (16)$$

$$\sigma = 0 + \frac{235}{98,35} \cdot \frac{6172,66}{d_i^3} = \frac{14749,11}{d_i^3}$$

$$\tau_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{16 \cdot (606)}{\pi \cdot d_i^3} = \frac{3086,33}{d_i^3} \quad (17)$$

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau_b^2} \leq \frac{\sigma_{AK}}{S} \quad (18)$$

$$\sigma_B = \frac{15687,97}{d_i^3} \leq \frac{235}{2}$$

$$d_i \geq 5,11 \text{ mm} \cong 5,2 \text{ mm}$$

2.6.2.3. Burulma Açısına Göre Kontrol

$$\theta = \frac{M_b \cdot L}{G \cdot I} \leq \theta_{em} \quad (19)$$

$$\frac{32 \cdot (606) \cdot (150)}{80000 \cdot \pi \cdot d_i^4} \leq 0,005 \cdot (0,15)$$

$$d_i \geq \sqrt[4]{\frac{32 \cdot (606) \cdot 150}{80000 \cdot \pi \cdot 0,005 \cdot (0,15)}}$$

$$d_i \geq 11,14 \text{ mm} \cong 11,2 \text{ mm}$$

Burulmaya göre yapılan kontrolde mil çapının 11,2 mm'den küçük olması durumunda tasarım emniyetsiz olacağından çap 11,2 mm'den büyük değer alınmalıdır.

Yapılan hesaplamalara göre rotor yarıçapı $R = 1 \text{ m}$ olarak belirlenmiştir.

$$A_T = \pi R^2 = 3,14 \text{ m}^2$$

Rüzgar gücü aşağıdaki eşitlikten,

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A_T \cdot V^3$$

Rüzgar hızının yaklaşık değeri $V_\infty = 2,75 \text{ m/s}$ olarak alınmıştır.

$$P = \frac{1}{2} \left(1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (3,14 \text{ m}^2) \cdot (2,75 \text{ m/s})^3 = 39,99 \text{ W} \cong 40 \text{ W}$$

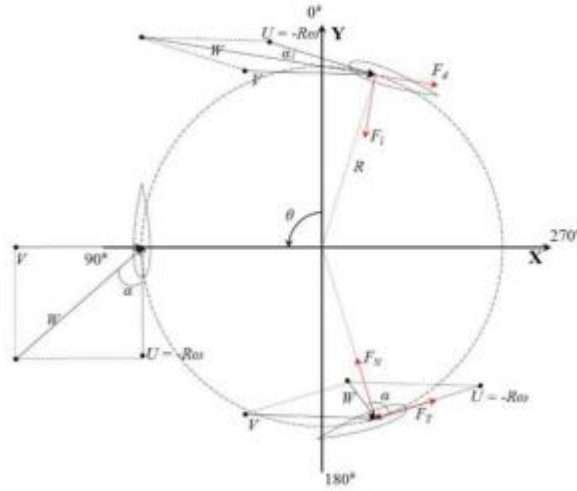
| | Rüzgâr hızı=5 m/s | Rüzgâr hızı=10m/s | Rüzgâr hızı=15m/s |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 metre yarıçaplı pervane (A ~ 3 m ²) | Güç ~ 75 Watt | Güç ~ 600 Watt | Güç ~ 2 KWatt |
| 3 metre yarıçaplı pervane (A ~ 27 m ²) | Güç ~ 700 Watt | Güç ~ 6 KWatt | Güç ~ 20 Watt |
| 10 metre yarıçaplı pervane(A~300m ²) | Güç ~ 7.5 KWatt | Güç ~ 60 KW | Güç ~ 200 Watt |
| 30 metre yarıçaplı pervane(A~2700m ²) | Güç ~ 70 KWatt | Güç ~ 600 KW | Güç ~ 2 MWatt |

Tablo 3. Rüzgar hızı ve alana bağlı elde edilebilecek güç miktarları [22]

Katılık değeri $\sigma = 2,2$ seçilir

$$\sigma = \frac{N.C}{R} \quad (20)$$

$$c = \frac{\sigma.R}{N} = \frac{(2,2).1}{5} = 0,44 \text{ m}$$



Şekil 14. Türbin çarkına etki eden kuvvetler ve hücum açıları [23]

Uç hız oranı kullanılarak bileşke kuvvet hesabı eşitlik (21) ile hesaplanır.

$$W=V\sqrt{1+2.\lambda.\cos\theta+\lambda^2} \quad (21)$$

Hücum açısı eşitlik (22) ile hesaplanır.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta+\lambda}\right) \quad (22)$$

Kaldırma katsayısı eşitlik (23) ile hesaplanır.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho.c.V_\infty^2} \quad (23)$$

Direnç katsayısı eşitlik (24) ile hesaplanır.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho.c.V_\infty^2} \quad (24)$$

Normal kuvvet katsayısı eşitlik (25) ile hesaplanır.

$$C_N = C_L.\cos\alpha + C_D.\sin\alpha \quad (25)$$

Teğetsel kuvvet katsayısı eşitlik (26) ile hesaplanır.

$$C_T = C_L.\sin\alpha - C_D.\cos\alpha \quad (26)$$

Teğetsel kuvvet eşitlik (27) ile hesaplanır.

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot V_\infty^2 \cdot C_T \quad (27)$$

Normal kuvvet eşitlik (28) ile hesaplanır.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot V_\infty^2 \cdot C_N \quad (28)$$

Teğetsel kuvvetin varlığıyla kanatta bir moment meydana gelir ve eşitlik (29) ile hesaplanır.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot V_\infty^2 \cdot C_T \cdot R \quad (29)$$

Aşağıda $\theta = 30^\circ$ için hesaplamalar yapılmıştır.

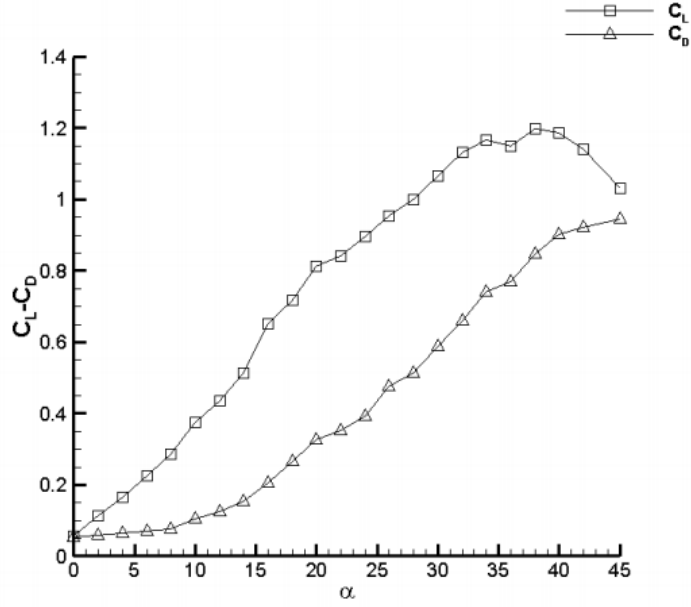
$$W_{(\theta=30)} = (2,75) \sqrt{1 + 2(6 \cdot \cos 30) + 6^2}$$

$$W_{(\theta=30)} = 18,93 \text{ N}$$

$$\alpha_{(\theta=30)} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin 30}{\cos 30 + 6}\right)$$

$$\alpha_{(\theta=30)} = 4,16^\circ$$

$\theta = 30^\circ$ olduğu anda hücum açısı $\alpha = 4,16^\circ$ olduğuna göre kaldırma ve direnç katsayıları şekil 8'den sırasıyla $C_L = 0,1677$ ve $C_D = 0,0523$ okunmuştur.



Şekil 15. Hücüm açılarına göre kaldırma ve direnç katsayıları [24]

Bulunan değerlere göre normal kuvvet katsayısı;

$$C_N = 0,1677 \cdot \cos 0 + 0,0523 \cdot \sin 0 = 0,1677$$

Teğetsel kuvvet katsayısı;

$$C_T = 0,1677 \cdot \sin 0 - 0,0523 \cdot \cos 0 = -0,0523$$

Teğetsel kuvvet;

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot (1,225) \cdot (0,44) \cdot (2,75)^2 \cdot (-0,0523)$$

$$F_T = -0.1065 \text{ N}$$

Normal kuvvet;

$$F_N = \frac{1}{2} (1,225).(0,44).(2,75)^2.(0,1677)$$

$$F_N = 0,3417 \text{ N}$$

Moment;

$$T = \frac{1}{2} (1,225).(0,44).(2,75)^2.(-0,0523).(1)$$

$$T = -0,1065 \text{ N.m}$$

2.6.2.4 Rulman Hesabı

Rulmanın Nominal Ömür Hesabı:

n devir sayısı ve L_h işletme (çalışma) saatini temsil etmek üzere ;

$$n = 157,56 \text{ dev/dk}$$

$$L_h = 10000 \text{ saat}$$

$$L = \frac{60.n.L_h}{10^6} = \frac{60.(157.56).10000}{10^6} = 94,5 \text{ milyon devir} \quad (30)$$

Rulmana Etkiyen Kuvvet ;

C dinamik yük sayısı ve F rulmana gelen radyal kuvveti temsil etmek üzere ;

$$F = (10,5).(9.81) = 103 \text{ N}$$

$$C = F.\sqrt[3]{L} \quad (31)$$

$$C = 103 . \sqrt[3]{94,5} = 469,15 \text{ N}$$

P güç , d rulmanın iç çapı ve n devir sayısını temsil etmek üzere ;

$$P = \frac{M_{b.n}}{9550} = \frac{606 \text{ (N.mm)} \cdot 157.56 \left(\frac{\text{dev}}{\text{dak}}\right)}{9550} = 9.99\text{W} \cong 10\text{W} = 0.01 \text{ kW}$$

$$d \geq 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad (32)$$

$$d \geq 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{0.01 \text{ (kW)}}{157.56 \left(\frac{\text{dev}}{\text{dak}}\right)}} = 6,38 \text{ mm}$$

NSK rulman katalogunda hesaplanan çapta bir rulman bulunamamaktadır. Hesaplanan kuvveti baz alarak seçim yapılırsa EK kısmındaki rulman katalogundan uygun rulman 6203 serisi olarak seçilmiştir.

3.BULGULAR

Üretimi yapılan model rüzgâr türbini projesi gerekli ekipmanlar sağlandığı takdirde bir imalathane gerekmeksizin yapılabilir düzeydedir. Projede kullanılan alternatörün üretebileceği elektriksel güç ne kadar fazla olursa türbinin kullanılacağı alanlar o kadar geniş olur. Türbin gövdesiyle kuyruk bağlantısını sağlayan profilin yatayla yaptığı açı ne kadar fazla olursa türbin kanatlarının rüzgâra doğru yönelimi o kadar artacaktır. Bunun sonucunda da kanatların rüzgârdan yararlanma oranı artacaktır. Yapılan testler sonucunda model altı kanatlı test edildiğinde düşük rüzgarlarda çok daha çabuk dönmeye başladığı ve rüzgâr hızı kesildikçe sistemin tamamen durmaktan ziyade yavaşlama eğiliminde dönmeye devam ettiği saptanmıştır. Bununla birlikte model üç kanatla test edildiğinde uygun rüzgâr hızında momenti yüksek ve güçlü bir şekilde dönerken aynı voltaj aralığında daha fazla akım ürettiği saptanmıştır. Buna karşın 3 kanatlı model daha güçlü olsa da düşük rüzgar hızında direkt durma eğilimi gösterir. Kanatlarda kullanılan PVC kanatların aerodinamik yapıları ne kadar başarılıysa kanatların rüzgârdan aldığı enerji bir o kadar verimli olmaktadır.

Altı kanatlı modelde 4.6 V voltaja karşılık 0.39 akım geçerken üç kanatlı modelde 5.3 V voltaja karşılık 1.72 A akım değeri ölçülmüştür



Şekil 16. Altı ve üç kanatlı modellerde voltaj ve akım değerleri

4. TARTIŞMA

Ticari amaç gözetmeden deneysel amaçla yapılan rüzgâr türbinleri genellikle Savanois tipi rüzgar türbinleridir. Fakat bu türbinlerin verimleri ve ürettikleri güç yatay eksenli rüzgar türbinlerinden oldukça düşüktür. Ayrıca Savanois tipi rüzgâr türbini seçilmesi taktirde tasarım açısından fazla bir şey katılamayacak olmasından dolayı proje yatay eksenli rüzgar türbini üzerinden gerçekleştirilmiştir. Günümüzde ticari amaçla kullanılan rüzgâr türbinlerimim de birçoğu yatay eksenli rüzgâr türbinleri olmaları açısından yapılan projeye ilham vermesi açısından RES'deki türbinlerle kıyas ederek tasarımı iyileştirilmiştir. RES'deki rüzgar türbinleri incelendiğinde genel olarak 3 adet kanada sahip olduğu fakat yapılan projedeki koşullar RES'deki rüzgar türbinleri kadar uygun olmadığından şartların iyileştirilmesi adına kanat sayısı 3 yerine 6 olarak seçilmiştir.

4.1. ÇEVRESEL ETKİ DEĞERLENDİRMESİ

Rüzgâr türbinlerinin yapılacağı konumlar belirlenirken rüzgar hızının dışında çevre, bölgede yaşayan hayvanların ve insanların üzerinde oluşturacağı olumlu veya olumsuz koşullar da değerlendirilmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbinleri çalışırken yüksek oranda ses çıkarmaktadır. Bu ses çevrede ikamet eden insanları rahatsız etmektedir ve ayrıca türbinlerin yakınlığında radyo, telefon, telsiz gibi iletişim araçlarında çalışmama sorunu doğurabilir. Bu yüzden mümkün mertebede yerleşim yerlerinden uzak kesimlere yapılmalıdır. Rüzgârın etkisiyle dönen türbin çarkları bölgede yaşayan ve göç eden hayvanlar için -özellikle kuş gibi uçan hayvanlar- tehlike oluşturmaktadır. Bu hayvanlar türbin çarklarına çarparak veya parçalanarak telef olmaktadır. İspanya'da Navarra eyaletinde yapılan bir araştırmanın sonuçlarına göre büyük ve orta büyüklükteki kuşların yıllık ölüm oranı türbin başına 0,13 olarak belirlenmiştir [25]. Bunun yanında çevredeki çiftliklerde yaşayan keçi, koyun hayvanlar otlanırken elektrik akımına kapılarak telef olmaktadır

Rüzgâr türbinlerinin kurulum faaliyetlerini etkileyen bir unsur da tarım faaliyetlerinin dolayısıyla çiftçiler üzerindeki etkisidir. Türbinlerin boyutları çok büyük olduğu için kurulu olduğu arazilerin boyutunun büyük tutulması gerekir. Bu nedenle tarım arazilerinin bir kısmını istiklak ederler. Diğer enerji üretim sistemlerinin aksine zararlı atıklar çıkartmadığından rüzgar türbinleri çevre dostu enerji sistemleridir. Bu da rüzgâr türbinlerinin diğer enerji üretim sistemlerinden çevre adına büyük bir artısıdır.

5. MALİYET HESABI

Yapılan tasarım için kullanılacak malzemelerin maliyeti aşağıdaki şekildedir.

| Birim Adı | Fiyat |
|----------------------------------|----------------|
| PVC Dupleks Boru | 400 TL |
| Alternatör: | 300 TL |
| Kuyruk | 50 TL |
| Gövde | 150 TL |
| Kuyruk profili | 100 TL |
| Ayak profili | 150 TL |
| Rulman | 200 TL |
| Conta Takoz | 5 TL |
| Bağlantı Elemanları | 30 TL |
| Şarj Kontrol ve Frenleme Ünitesi | 300 TL |
| Toplam Maliyet | 1685 TL |

Tablo 4. Maliyet hesabı

6. SONUÇLAR

Model rüzgâr türbini tasarımı projesinde bir enerji düzeyi elde etmek için gerekli enerjiyi karşılayabilecek kapasitede yatay eksenli rüzgâr türbini tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Türbinden 40W güç elde etmek için gerekli hesaplamalar 2,75 m/s rüzgâr hızını referans alınarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda gerekli kanat uzunluğu ve rotor yarıçapı hesaplanmıştır.

Yapılan tasarımdan da anlaşıldığı üzere rüzgâr hızının değişimi türbinden elde edilebilecek güce doğrudan etkilidir. Bu yüzden türbin tasarımı yaparken türbinin konumlandırılacağı yerin iklim özelliklerine göre kanat uzunluğu, rotor yarıçapı ve gücü değişeceğinden bölgenin iklim özelliklerini de göz önüne alınması gereklidir. Ayrıca türbin üzerine etki eden kuvvetlerden dolayı birtakım yapısal analizler yapılmıştır. Bu analizler doğrultusunda ortaya çıkan sorunlar en uygun çözüm yolları bulunmuştur ve üretim esnasında kolaylıklar sağlamıştır.



7. KAYNAKLAR

1. Şenel, M. C., Koç, E., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makine Dergisi, 56: 633, 2015, 44-45.
2. www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019, 01 Nisan 2020.
3. IEA World Energy Outlook, 2019.
4. www.yesilekonomi.com/almanyada-yenilenebilir-enerjinin-payi-pye-yaklasti/ , 15 Aralık 2020 .
5. Şenel, M. C., ve Koç, E., Kanat Tasarım Parametrelerinin Rüzgâr Türbini Aerodinamik Performansına Etkisinin Belirlenmesi, 5. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 2014, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
6. Şenel, M. C., Rüzgar Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları ve Dinamik Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2012.
7. Elibüyük, U., ve Üçgül, İ., Rüzgar Türbinleri Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri, 2: 3, 2014, 3.
8. Vardar, A., Rüzgar Türbin Tipleri ve Kullanım Alanları Sunumu.
9. Temiz, F., Rüzgar Enerji Sistemlerinde Optimizasyon, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul, 2010.
10. Çakır, B., ve Helvacı, E., Rüzgar Türbinleri Tasarım Esasları, Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, Karabük, 2016.
11. Atılğan, M., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ders Notları, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 1995.
12. Yıldırım, A., Pelüt, H., Şentürk, S., ve Şimşek, A., Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Projesi, Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, K.T.Ü., Trabzon, 2020.
13. Şentürk, U., ve Özdamar, A., DÜMF Mühendislik Dergisi, 9:1, 2018, 185-193.
14. Çetin, S., Genç, M., ve Daldaban F., Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri, Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6:2, 2019, 539-551
15. Gül, İ., Perdeleme Yöntemi İle Savonius Rüzgar Türbin Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2018.
16. Yıldırım, A., Pelüt, H., Şentürk, S., ve Şimşek, A., Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Projesi, Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, K.T.Ü., Trabzon, 2020.

17. Deda , B., Perdeleme Yöntemi İle Savonius Rüzgar Çarkının Performansının İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2006.
18. Özdamar, A., Rüzgar Enerjisi Kullanımının Tarihçesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6:2-3, 2000, 133-145.
19. Avcı, B., ve Yılmaz, T., Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı Ve Analizi, Bitirme Projesi, D.E.Ü, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 2012.
20. Bayraktar, H., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ders Notları, K.T.Ü., Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 2018
21. Özmen, Y., Hidrolik Akım Makinaları Ders Notları, K.T.Ü., Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 2019.
22. Aydınüz, G., Rüzgar Türbinlerinin Yapısal Analizi, Bitirme Projesi, D.E.Ü., İzmir, 2015.
23. Yıldırım, A., Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Projesi, Bitirme Projesi, K.T.Ü., Trabzon, 2020.
24. Yıldız, S., Rüzgar Türbini İçin Farklı Tip Kanat Profillerinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2017.
25. 'Anonim,' Rüzgar Enerjisi Hakkında Doğru Bilinen Yanlışlar, Enerji ve Isı Tasarrufu Derneği (ETADER), İstanbul, 2014.

8. EKLER

EK.1 Alüminyum profiller için standart tablolar

| STANDARD PROFİLLER | | | | |
|---|-------|-------|--------|--------|
| BORU | | | | |
|  | | | | |
| Profil No | D mm | d mm | s mm | Kg/m |
| 3119 | 54 | 38 | 8.0 | 3.133 |
| 2846 | 54.5 | 50.5 | 2.0 | 0.894 |
| 2799 | 55 | 40.5 | 7.25 | 2.947 |
| 1016 | 55.3 | 50.3 | 2.5 | 1.124 |
| 1276 | 56.5 | 52.5 | 2.0 | 0.928 |
| 4528 | 56.6 | 54 | 1.3 | 0.612 |
| 2663 | 60 | 58 | 1.0 | 0.503 |
| 593 | 60 | 56 | 2.0 | 0.987 |
| 909 | 60 | 55 | 2.5 | 1.223 |
| 563 | 60 | 54 | 3.0 | 1.455 |
| 3924 | 60 | 50 | 5.0 | 2.341 |
| 1014 | 60 | 20.5 | 19.75 | 6.767 |
| 5937 | 63.5 | 57.5 | 3.0 | 1.545 |
| 1295 | 63.5 | 60.5 | 1.5 | 0.792 |
| 968 | 65 | 60.3 | 2.35 | 1.254 |
| 4054 | 67 | 22.5 | 22.3 | 8.476 |
| 920 | 68 | 56 | 6.0 | 3.120 |
| 4051 | 70 | 40.5 | 14.8 | 6.938 |
| 786 | 70 | 67 | 1.5 | 0.875 |
| 913 | 72 | 40.2 | 15.9 | 7.596 |
| 4955 | 75 | 50.4 | 12.3 | 6.566 |
| 2064 | 75 | 45 | 15 | 7.662 |
| 3144 | 76 | 72 | 2.0 | 1.260 |
| 1290 | 76.1 | 73.1 | 1.5 | 0.954 |
| 7401 | 76.1 | 66.1 | 5.0 | 3.025 |
| 5938 | 76.2 | 70.2 | 3.0 | 1.869 |
| 3813 | 80 | 76 | 2.0 | 1.328 |
| 2664 | 80 | 78 | 1.0 | 0.673 |
| 912 | 82 | 50.2 | 15.9 | 8.948 |
| 4053 | 85 | 75 | 5.0 | 3.405 |
| 6907 | 85 | 76 | 4.5 | 3.084 |
| 4283 | 86 | 78 | 4.0 | 2.792 |
| 2538 | 90 | 86 | 2.0 | 1.498 |
| 1038 | 92 | 28 | 32 | 16.346 |
| 2599 | 95 | 36 | 29.5 | 16.451 |
| 10031 | 97 | 85 | 6.0 | 4.648 |
| 6403 | 99 | 93 | 3.0 | 2.452 |
| 5790 | 100 | 95 | 2.5 | 2.075 |
| 2665 | 100 | 97.8 | 1.1 | 0.926 |
| 6402 | 106 | 100 | 3.0 | 2.631 |
| 4725 | 123 | 51 | 36 | 26.665 |
| 2053 | 125 | 50 | 37.5 | 27.936 |
| 6401 | 125 | 111 | 7.0 | 7.032 |
| 6173 | 125 | 109 | 8.0 | 7.969 |
| 1274 | 127 | 45 | 41 | 30.019 |
| 7889 | 128 | 122.8 | 2.6 | 2.776 |
| 930 | 130 | 47 | 41.5 | 31.267 |
| 6171 | 135 | 121 | 7.0 | 7.628 |
| 5305 | 135 | 81 | 27.0 | 24.826 |
| 949 | 135 | 55 | 40.0 | 32.352 |
| 934 | 150 | 145 | 2.5 | 3.139 |
| 921 | 151.5 | 48.25 | 51.625 | 43.900 |
| 933 | 155 | 145 | 5.0 | 6.388 |
| 2596 | 180 | 174 | 3.0 | 4.520 |
| KARE KUTU | | | | |
|  | | | | |
| Profil No | a mm | s mm | Kg/m | |
| 1576 | 10 | 1.8 | 0.160 | |
| 9698 | 14 | 1.5 | 0.201 | |
| 1409 | 14 | 2.0 | 0.258 | |
| 5861 | 16 | 1.2 | 0.192 | |
| 5637 | 16.9 | 1.2 | 0.194 | |
| 4971 | 20 | 1.0 | 0.206 | |
| 3752 | 20 | 1.2 | 0.245 | |
| 7399 | 20 | 2.0 | 0.390 | |
| 212 | 25 | 1.5 | 0.382 | |
| 274 | 25 | 2.0 | 0.499 | |
| 275 | 25 | 2.5 | 0.609 | |
| 4316 | 26 | 1.6 | 0.418 | |
| 213 | 30 | 1.5 | 0.463 | |
| 8340 | 30 | 2.0 | 0.607 | |
| 214 | 35 | 1.5 | 0.545 | |
| 7346 | 39.5 | 0.9 | 0.377 | |
| 6450 | 39.6 | 1.0 | 0.418 | |
| 116 | 40 | 1.1 | 0.464 | |
| 215 | 40 | 1.5 | 0.626 | |
| 6041 | 40 | 2.0 | 0.824 | |
| 4174 | 40 | 2.3 | 0.950 | |
| 3925 | 40 | 3.0 | 1.202 | |
| 5771 | 45 | 1.4 | 0.662 | |
| 3067 | 45 | 2.0 | 0.932 | |
| 4336 | 45.5 | 5.0 | 2.193 | |
| 4123 | 48.4 | 4.0 | 1.925 | |
| 3124 | 50 | 1.8 | 0.940 | |
| 627 | 50 | 2.0 | 1.040 | |
| 3923 | 50 | 3.0 | 1.528 | |
| 4103 | 53.8 | 6.7 | 3.423 | |
| 2611 | 60 | 1.5 | 0.951 | |
| 3927 | 60 | 3.0 | 1.853 | |
| 8804 | 70 | 4.0 | 2.861 | |
| 7273 | 70 | 4.5 | 3.195 | |
| 9702 | 75 | 1.8 | 1.428 | |
| 2612 | 80 | 2.0 | 1.691 | |
| 6580 | 90 | 2.0 | 1.908 | |
| 629 | 94 | 2.0 | 1.994 | |
| 2613 | 100 | 2.0 | 2.124 | |
| 5433 | 100 | 4.0 | 4.163 | |
| 4692 | 110 | 2.0 | 2.341 | |
| 5492 | 110 | 3.0 | 3.431 | |
| 9743 | 150 | 2.5 | 3.997 | |
| 9906 | 150 | 3.0 | 4.780 | |

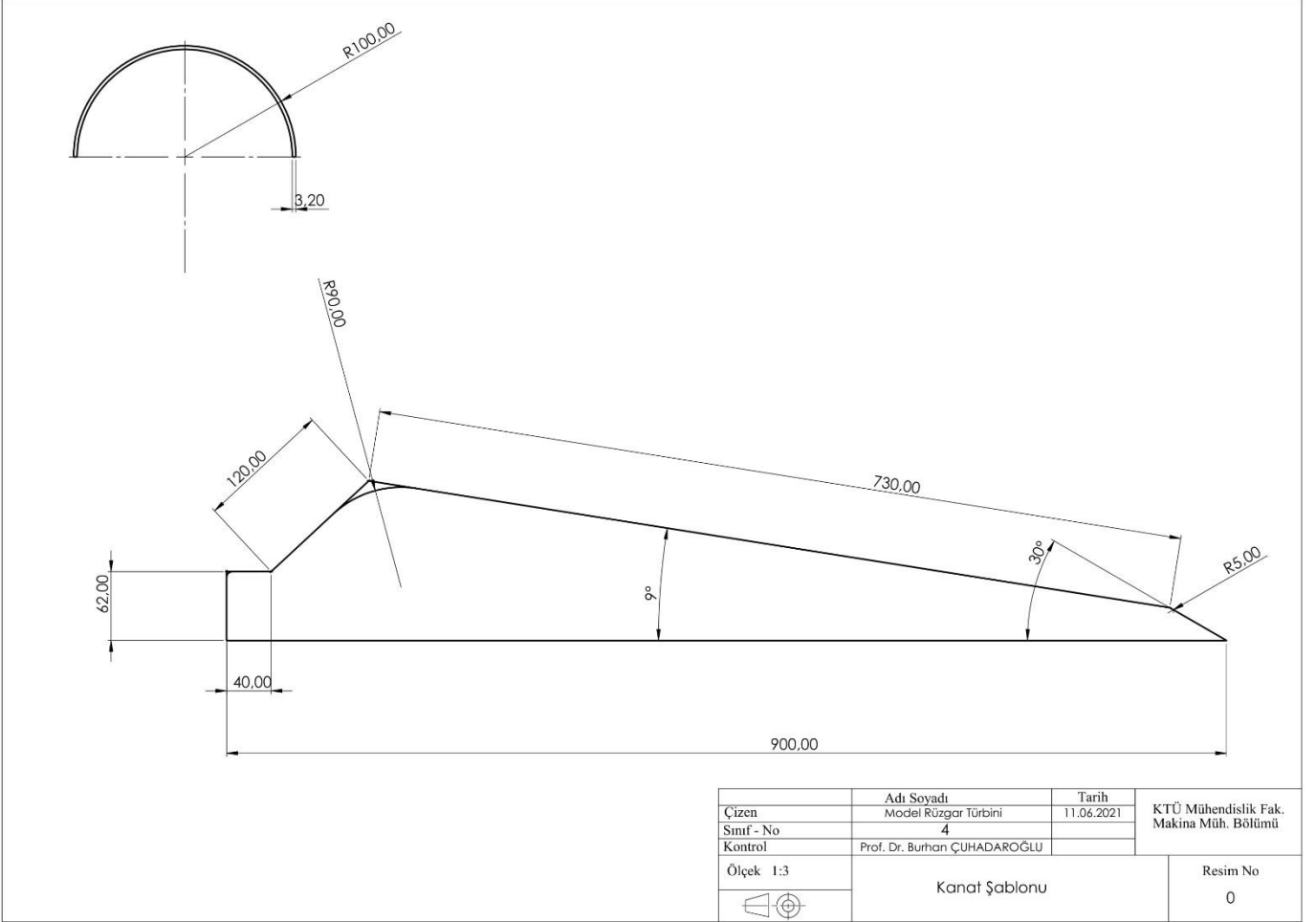
EK 3. PVC borular için ebat tablosu

| Dış Çap | Dış Çap Toleransı | Et Kalınlığı (B sınıfı) min. | Et Kalınlığı (BD sınıfı) min. |
|---------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 50 | +0,2 | 3,0 | 3,0 |
| 75 | +0,3 | 3,0 | 3,0 |
| 110 | +0,3 | 3,2 | 3,2 |
| 125 | +0,3 | 3,2 | 3,2 |
| 160 | +0,4 | 3,2 | 4,0 |
| 200 | +0,5 | 3,9 | 4,9 |
| 250 | +0,5 | 4,9 | 6,2 |
| 315 | +0,6 | 6,2 | 7,7 |

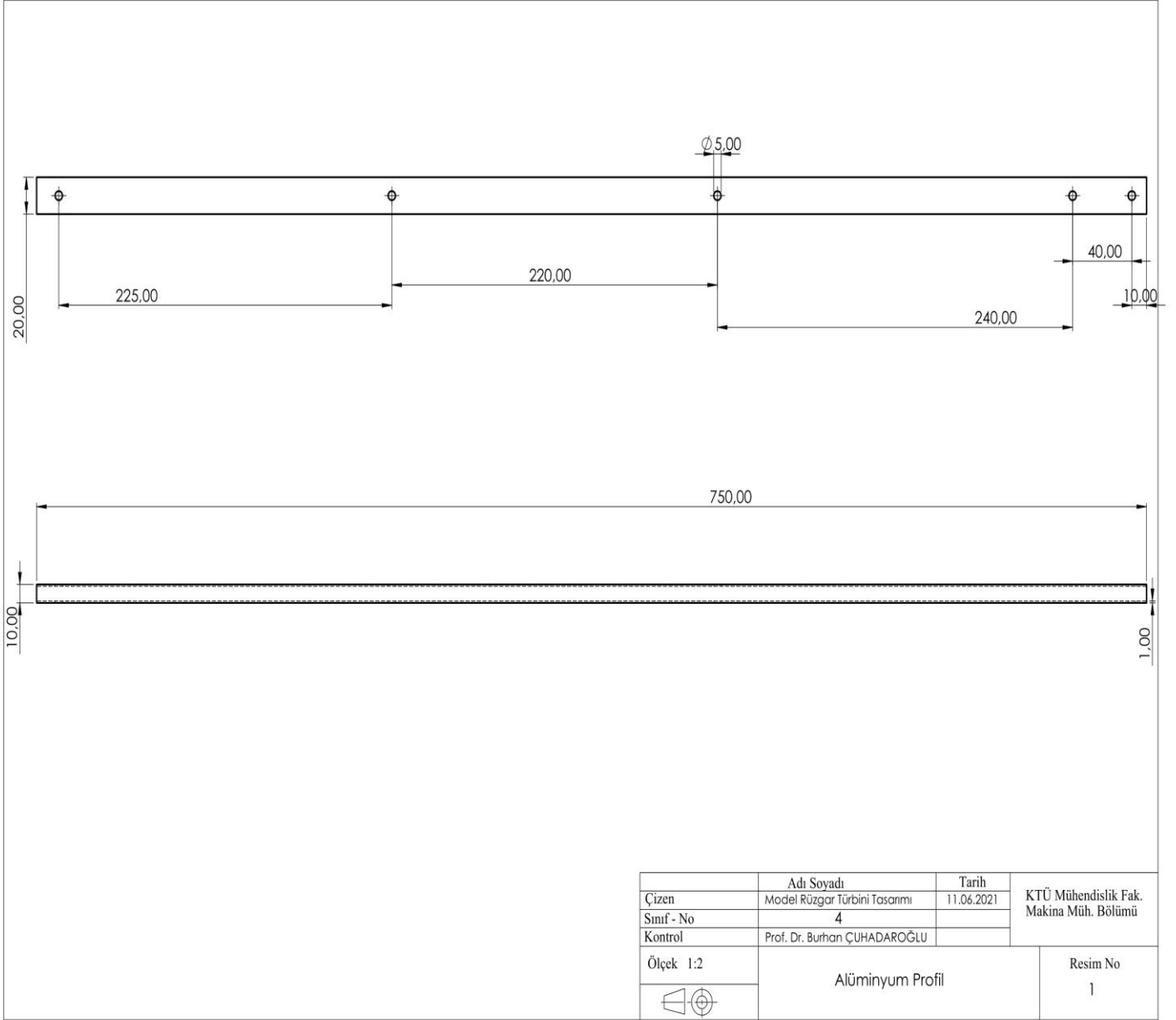
EK 4. Rulman Standartları

| Temel Ölçüler (mm) | | | | Temel Yük Değerleri (N) | | | | Faktör f_0 | Limit Hızları (dak ⁻¹) | | | Rulman Numaraları | | | |
|--------------------|-----|-----|-------------|-------------------------|----------|-------|----------|------------------|------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|---------|--------|-----|
| d | D | B | r min. | C_z | C_{0z} | C_z | C_{0z} | | Gres | | Yağ | Açık | Kapaklı | Keçeli | |
| | | | | | | | | $\frac{Açık}{Z}$ | $\frac{ZZ}{V-W}$ | $\frac{DU}{DDU}$ | $\frac{Açık}{Z}$ | | | | |
| 10 | 19 | 5 | 0.3 | 1 720 | 840 | 175 | 86 | 14.8 | 34 000 | 24 000 | 40 000 | 6800 | ZZ | W | DD |
| | 22 | 6 | 0.3 | 2 700 | 1 270 | 275 | 129 | 14.0 | 32 000 | 22 000 | 38 000 | 6900 | ZZ | W | DD |
| | 26 | 8 | 0.3 | 4 550 | 1 970 | 465 | 201 | 12.4 | 30 000 | 22 000 | 36 000 | 6000 | ZZ | W | DDU |
| | 30 | 9 | 0.6 | 5 100 | 2 390 | 520 | 244 | 13.2 | 24 000 | 18 000 | 30 000 | 6200 | ZZ | W | DDU |
| | 35 | 11 | 0.6 | 8 100 | 3 450 | 825 | 350 | 11.2 | 22 000 | 17 000 | 26 000 | 6300 | ZZ | W | DDU |
| | 12 | 21 | 5 | 0.3 | 1 920 | 1 040 | 195 | 106 | 15.3 | 32 000 | 20 000 | 38 000 | 6801 | ZZ | W |
| 12 | 24 | 6 | 0.3 | 2 890 | 1 460 | 295 | 149 | 14.5 | 30 000 | 20 000 | 36 000 | 6901 | ZZ | W | DD |
| | 28 | 7 | 0.3 | 5 100 | 2 370 | 520 | 241 | 13.0 | 28 000 | — | 32 000 | 16001 | — | — | — |
| | 28 | 8 | 0.3 | 5 100 | 2 370 | 520 | 241 | 13.0 | 28 000 | 18 000 | 32 000 | 6001 | ZZ | W | DDU |
| | 32 | 10 | 0.6 | 6 800 | 3 050 | 695 | 310 | 12.3 | 22 000 | 17 000 | 28 000 | 6201 | ZZ | W | DDU |
| | 37 | 12 | 1 | 9 700 | 4 200 | 990 | 425 | 11.1 | 20 000 | 16 000 | 24 000 | 6301 | ZZ | W | DDU |
| | 15 | 24 | 5 | 0.3 | 2 070 | 1 260 | 212 | 128 | 15.8 | 28 000 | 17 000 | 34 000 | 6802 | ZZ | W |
| 15 | 28 | 7 | 0.3 | 4 350 | 2 260 | 440 | 230 | 14.3 | 26 000 | 17 000 | 30 000 | 6902 | ZZ | W | DD |
| | 32 | 8 | 0.3 | 5 600 | 2 830 | 570 | 289 | 13.9 | 24 000 | — | 28 000 | 16002 | — | — | — |
| | 32 | 9 | 0.3 | 5 600 | 2 830 | 570 | 289 | 13.9 | 24 000 | 15 000 | 28 000 | 6002 | ZZ | W | DDU |
| | 35 | 11 | 0.6 | 7 650 | 3 750 | 780 | 380 | 13.2 | 20 000 | 14 000 | 24 000 | 6202 | ZZ | W | DDU |
| | 42 | 13 | 1 | 11 400 | 5 450 | 1 170 | 555 | 12.3 | 17 000 | 13 000 | 20 000 | 6302 | ZZ | W | DDU |
| | 17 | 26 | 5 | 0.3 | 2 630 | 1 570 | 268 | 160 | 15.7 | 26 000 | 15 000 | 30 000 | 6803 | ZZ | W |
| 17 | 30 | 7 | 0.3 | 4 600 | 2 550 | 470 | 260 | 14.7 | 24 000 | 15 000 | 28 000 | 6903 | ZZ | W | DDU |
| | 35 | 8 | 0.3 | 6 000 | 3 250 | 610 | 330 | 14.4 | 22 000 | — | 26 000 | 16003 | — | — | — |
| | 35 | 10 | 0.3 | 6 000 | 3 250 | 610 | 330 | 14.4 | 22 000 | 13 000 | 26 000 | 6003 | ZZ | W | DDU |
| | 40 | 12 | 0.6 | 9 550 | 4 800 | 975 | 490 | 13.2 | 17 000 | 12 000 | 20 000 | 6203 | ZZ | W | DDU |
| | 47 | 14 | 1 | 13 600 | 6 650 | 1 390 | 675 | 12.4 | 15 000 | 11 000 | 18 000 | 6303 | ZZ | W | DDU |

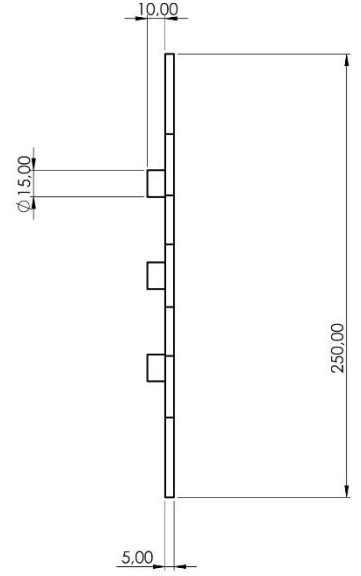
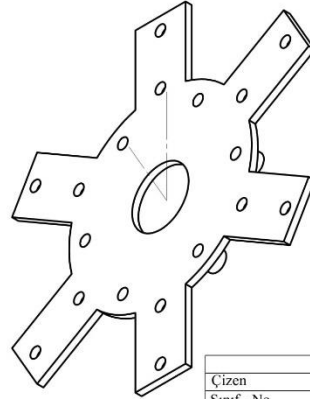
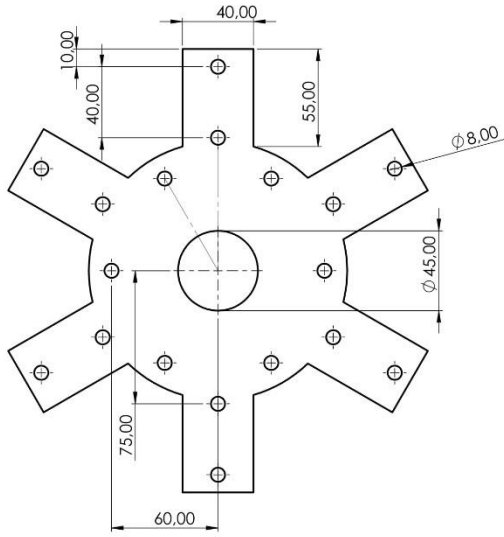
EK 5. Kanat şablonu



EK 6. Alüminyum profil

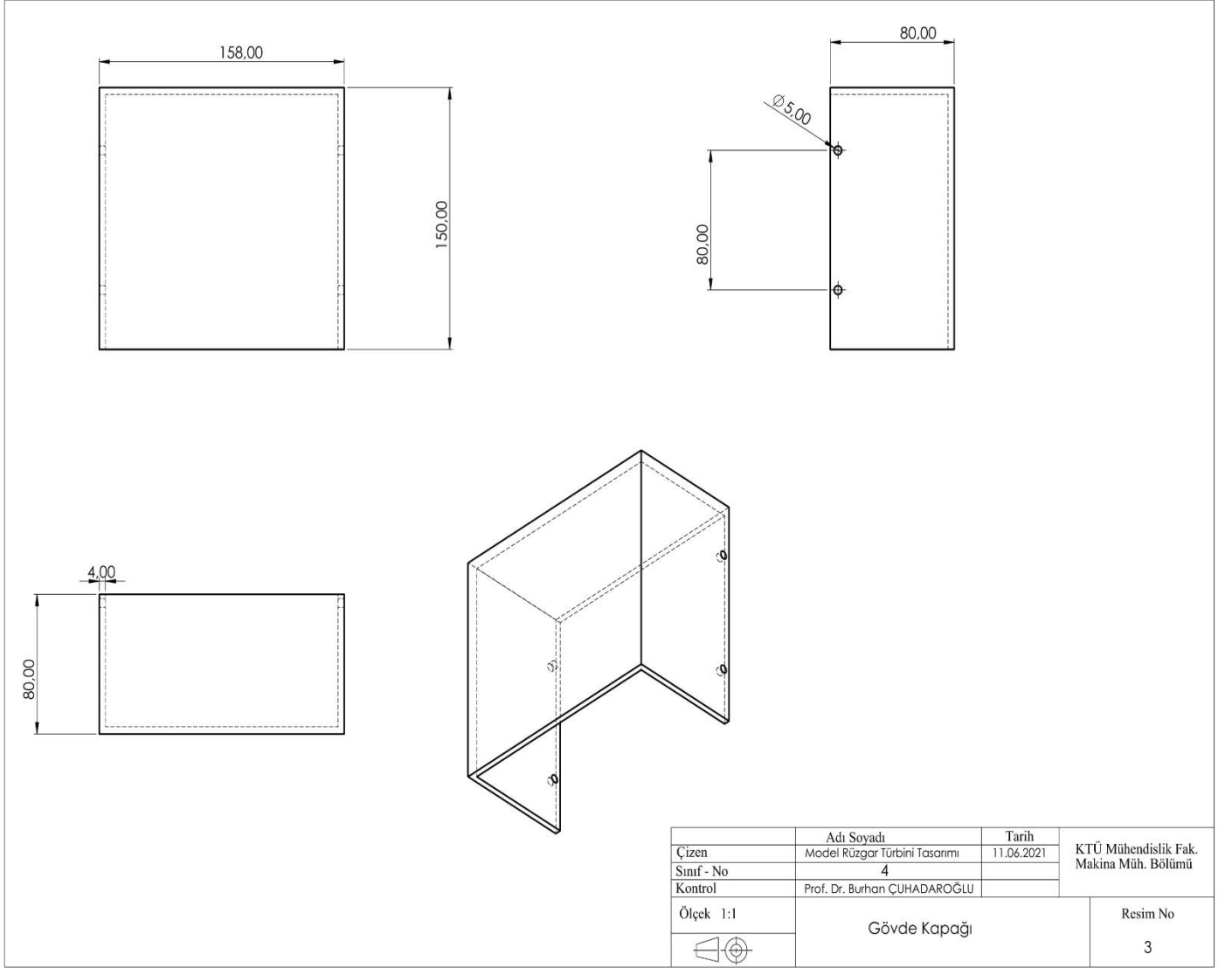


EK 7. Jeneratör bağlantı elemanı

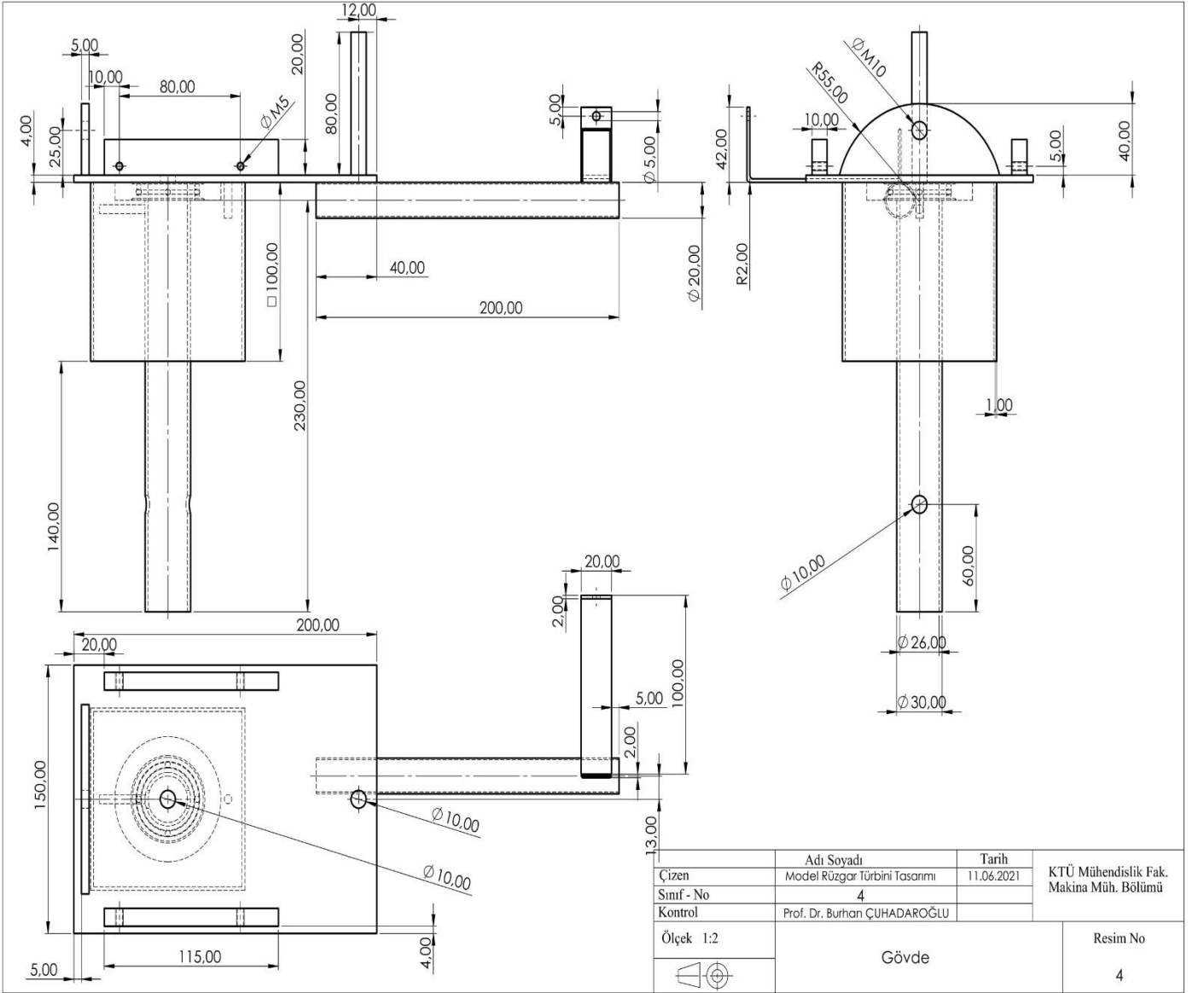


| | | | |
|------------|-------------------------------|------------|--|
| Çizen | Adı Soyadı | Tarih | KTÜ Mühendislik Fak. Makina Müh. Bölümü |
| Sınıf - No | Model Rüzgar Türbini Tasarımı | 11.06.2021 | |
| Kontrol | 4 | | |
| Ölçek 1:2 | Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU | | Resim No 2 |
| | Jeneratör Bağlantı Elemanı | | |

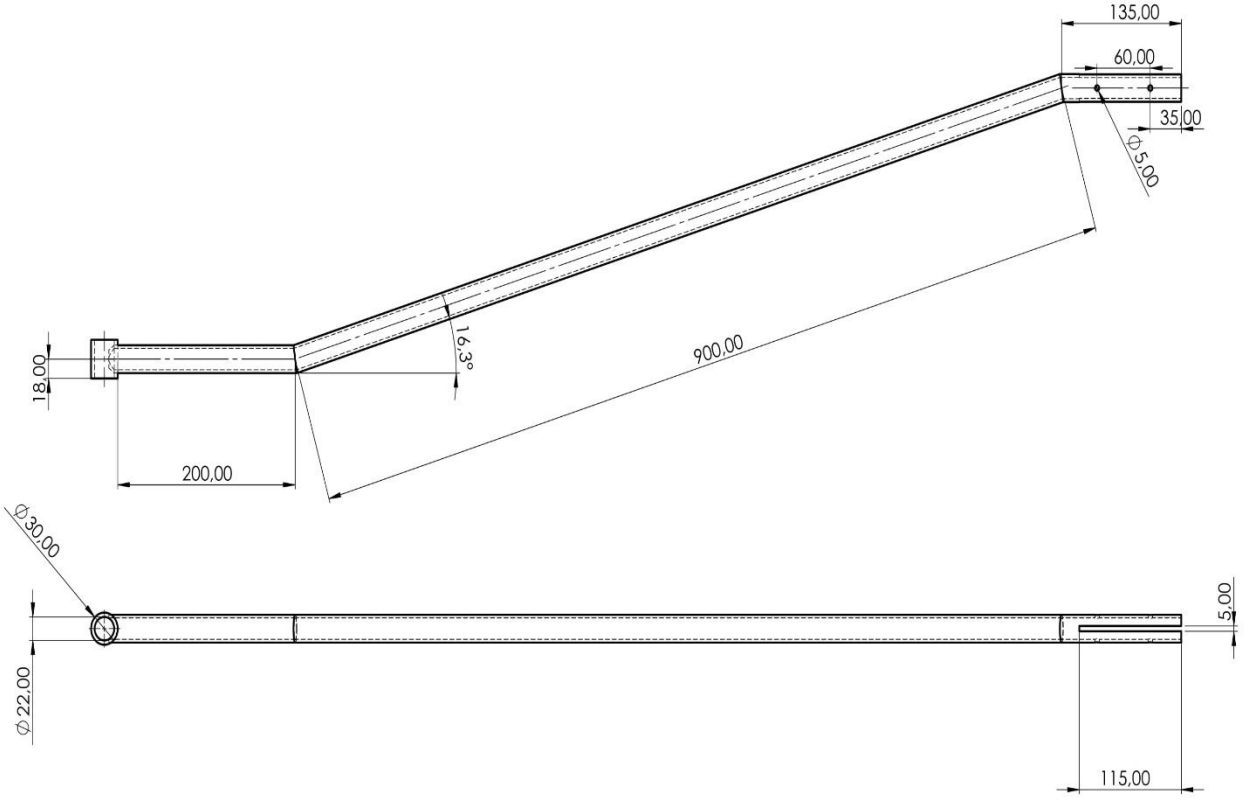
EK 8. Gövde kapağı




EK 9. Gövde

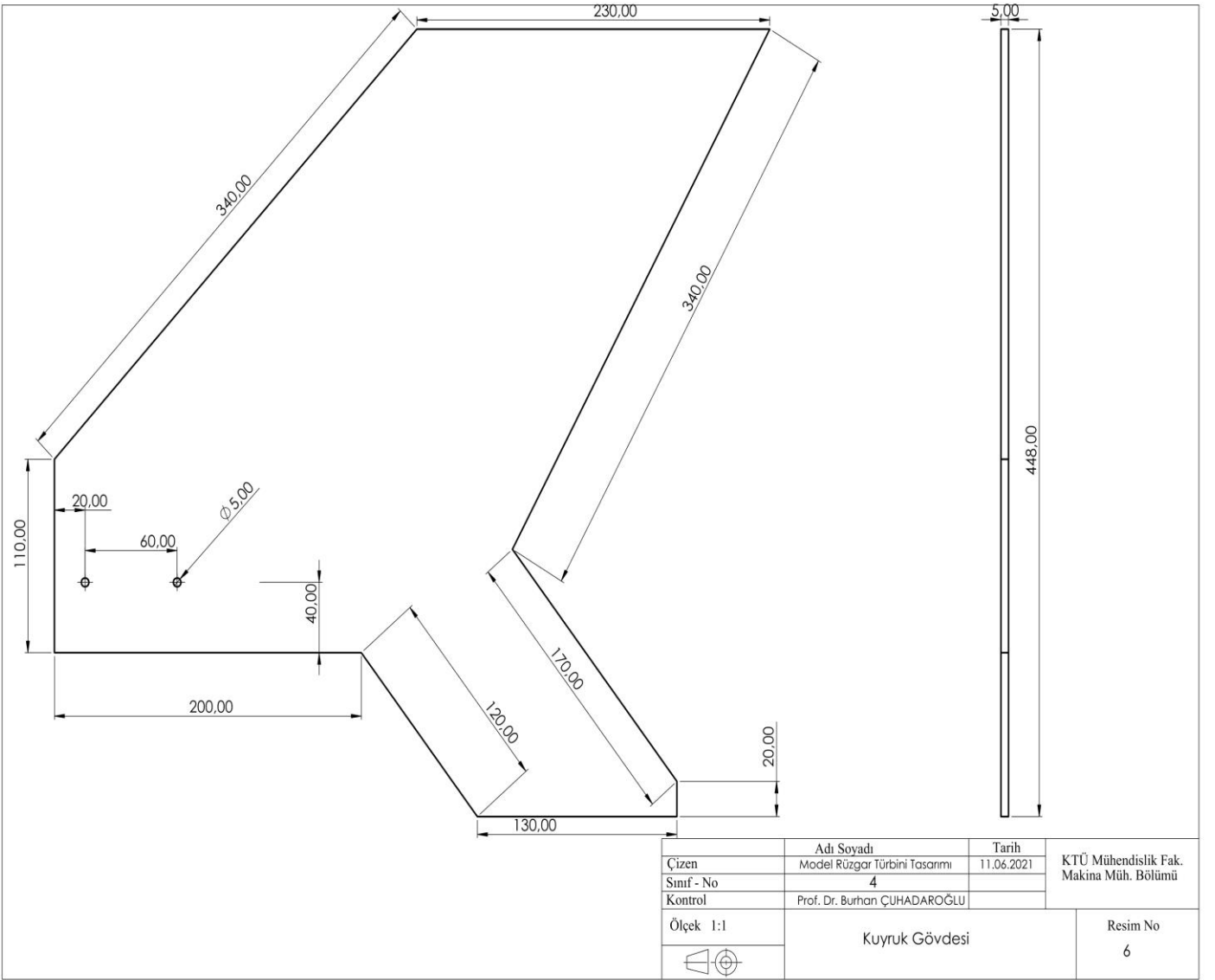


EK 10. Kuyruk



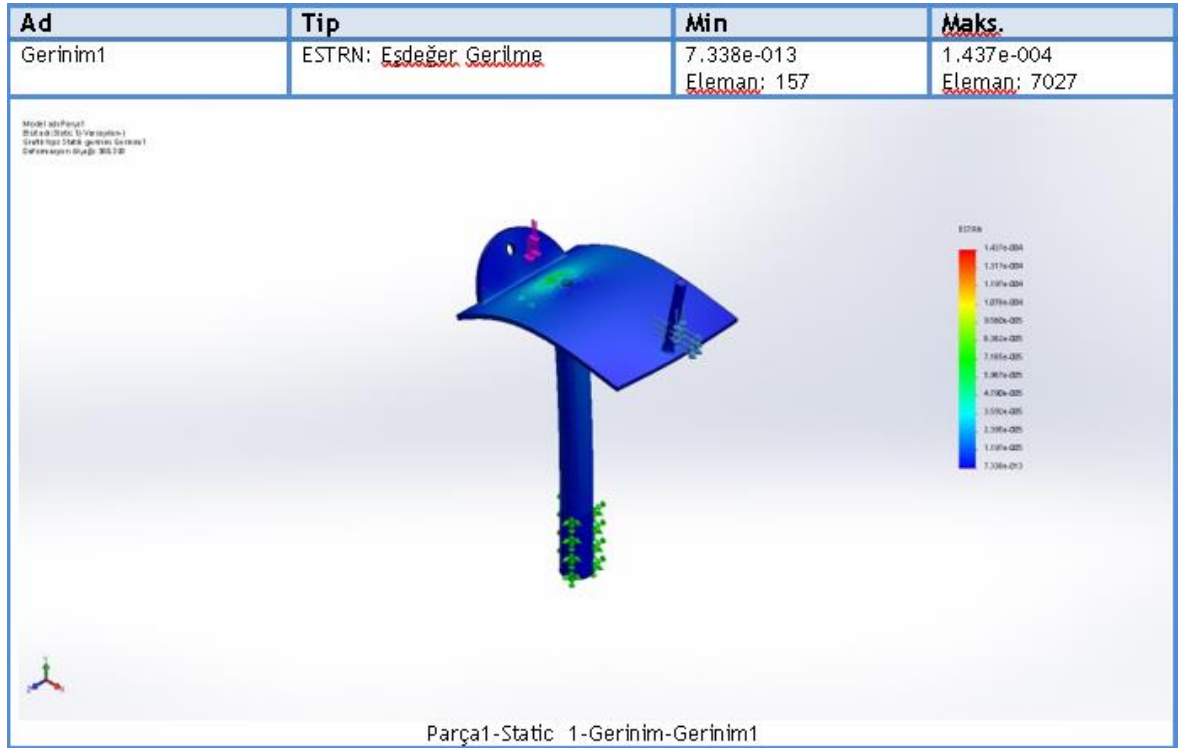
| | Adı Soyadı | Tarih | KTÜ Mühendislik Fak. Makina Müh. Bölümü |
|---|-------------------------------|------------|--|
| Çizen | Model Rüzgâr Türbini Tasarımı | 11.06.2021 | |
| Sınıf - No | 4 | | |
| Kontrol | Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU | | |
| Ölçek 1:4 | Kuyruk | | Resim No 5 |
|  | | | |

EK 11. Kuyruk gövdesi

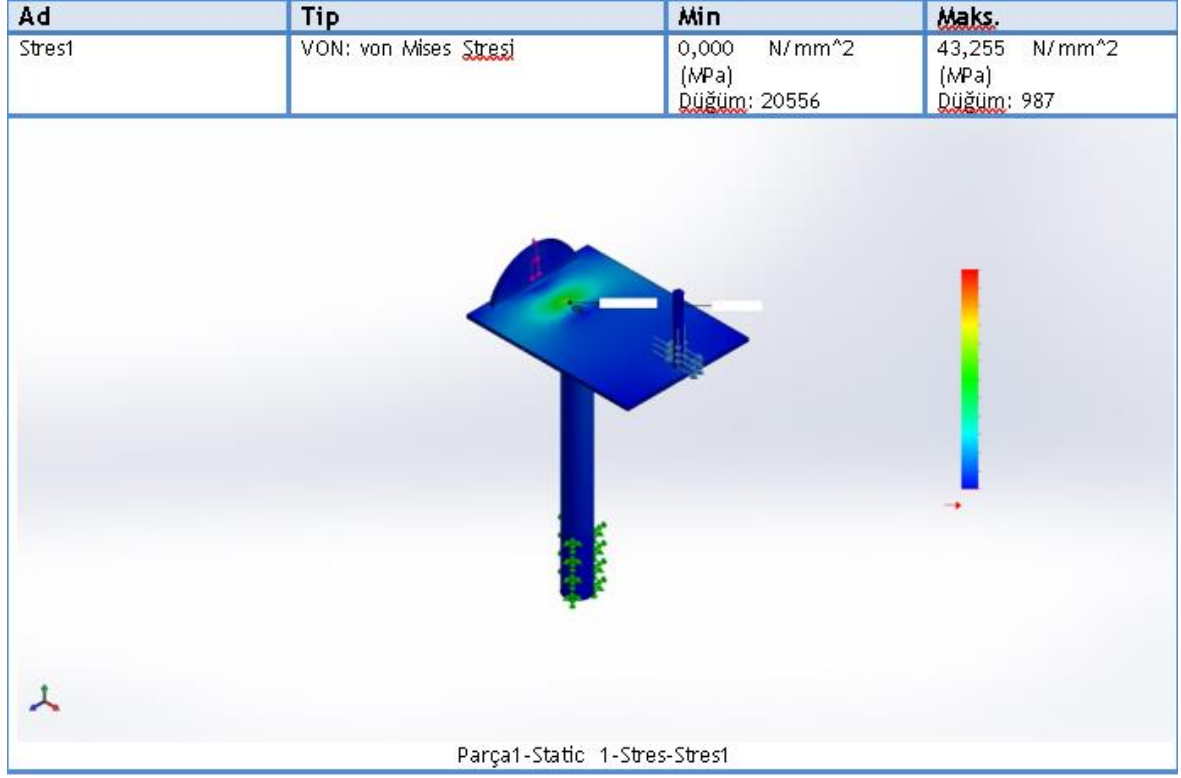


EK 13. Gövde gerilme analizi

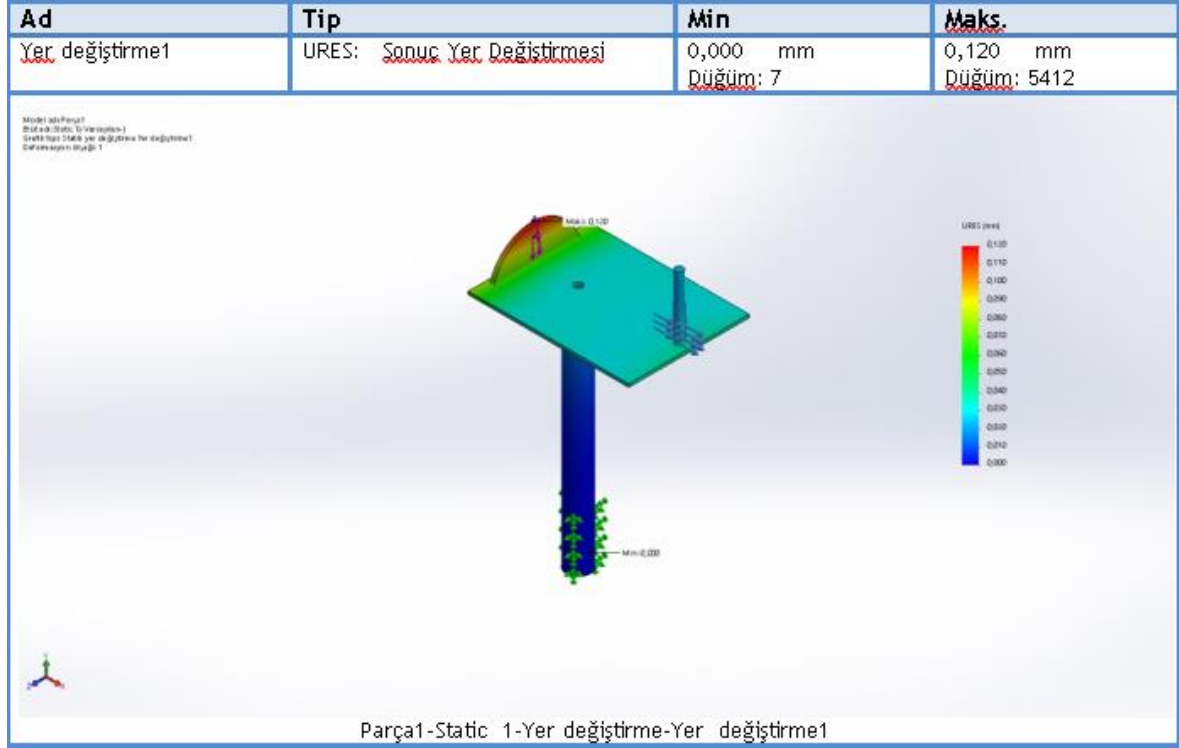
Taşıyıcı gövdenin kanat flanş, alternatör ve bağlantı elemanları ile ortalama 10 kg ağırlığı saptanmıştır. Gövdeye yerçekimi ile birlikte elde edilen kuvvet 150 N kabul edilerek analizler yapılmıştır.



EK 14. Gövde von Mises gerilme analizi



EK 15. Gövde yer değiştirme analizi



ÖZGEÇMİŞLER

Melih Can Işık: 05.10.1998 tarihinde İstanbul ilinin Bakırköy ilçesinde dünyaya geldi. İlk öğrenimini Mersin Üç Ocak İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Hacı Zarife-Çelebi Aygar Anadolu Lisesinde tamamladı. Mersin Berdan Cıvata ve Somun A.Ş’de 20 günlük genel atölye, Kayseri Dedeman Madencilik A.Ş’de 20 günlük işletme ve organizasyon stajını tamamladı. 2017 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine devam etmektedir. Orta seviyede İngilizce bilmektedir. SolidWorks ve Ansys proglamlarını iyi seviyede, Matlab yazılım programını orta seviyede bilmektedir. MS Office uygulamalarını iyi seviyede kullanma becerisine sahiptir.

Onur Kaya: 01.09.1997 tarihinde İzmir ilinin Konak ilçesinde dünyaya geldi. İlk öğrenimini Şehit Fethi Bey İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Vali Vecdi Gönül Anadolu Lisesinde tamamladı. T.C.D.D ‘de 20 günlük genel atölye stajını tamamladı. 2017 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine devam etmektedir. 2020 bahar yarıyılında VSB – Technical University of Ostrava’da Erasmus + değişim hareketine katılmıştır. İyi seviyede İngilizce bilmektedir. SolidWorks iyi seviyede, Matlab ve HTML & CSS yazılım programını başlangıç seviyede bilmektedir. MS Office uygulamalarını iyi seviyede kullanma becerisine sahiptir.

Veli Türk: 07.05.1999 tarihinde Denizli ilinin ilçesinde dünyaya geldi. İlk öğrenimini Nermin Osman Akça İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Denizli Anadolu Lisesinde tamamladı. İnoksan Mutfak Sanayi A.Ş’de 20 günlük genel atölye stajını tamamladı. 2017 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine devam etmektedir. Başlangıç seviyesinde İngilizce bilmektedir. SolidWorks programını orta seviyede bilmektedir. MS Office uygulamalarını orta seviyede kullanma becerisine sahiptir.

Furkan Aydemir: 25.03.1996 tarihinde Trabzon ilinin Akçaabat ilçesinde dünyaya geldi. İlk öğrenimini Merinos İlköğretim Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Hürriyet Anadolu Lisesinde tamamladı. Vatan Pres Otomotiv A.Ş'de 20 günlük genel atölye, Unimak Makine Sanayi A.Ş'de 20 günlük işletme ve organizasyon stajlarını tamamladı. 2016 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine devam etmektedir. Orta seviyesinde İngilizce bilmektedir. SolidWorks programını orta seviyede bilmektedir. MS Office uygulamalarını iyi seviyede kullanma becerisine sahiptir.