

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNİ GÖBEĞİNİN YAPISAL TASARIMI VE  
OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS**

**Makine Müh. Serkan DEMİRCİ**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Danışman: Yrd.Doç.Dr. Murat MAKARACI**

**KOCAELİ,2011**

**RÜZGAR TÜRBİNİ GÖBEĞİNİN YAPISAL TASARIMI VE  
OPTİMİZASYONU**


**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Müh. Serkan DEMİRCİ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 OCAK 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 15 ŞUBAT 2011**

**Tez Danışmanı  
Yrd.Doç.Dr. Murat MAKARACI**

  
(.....)

**Üye  
Doç. Dr. Ali Osman AYHAN**

  
(.....)

**Üye  
Doç.Dr. Yasin KIŞIOĞLU**

  
(.....)

**KOCAELİ, 2011**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Enerji tüketiminin sürekli olarak arttığı dünyamızda fosil yakıtlarının da yakın bir gelecekte tükenecek olmaları insanları pratik olarak bitmeyecek yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Özellikle, Güneş ve rüzgar enerjileri insanlığın geleceğinde çok büyük yer tutacaklardır. Pekçok ülke bu alanda ciddi yatırımlar yapmaktadır. Rüzgar enerjisinin verimliliğinin daha yüksek olması, yatırımlardan daha büyük pay almasını sağlamıştır. Son yirmi yılda yapılan mühendislik çalışmaları sonucunda rüzgar türbini teknolojisinde önemli gelişmeler gerçekleştirilerek türbinlerin çok daha yüksek güçlere çıkmaları sağlanmıştır. Özellikle, Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT) ile ilgili olarak yapılan geliştirmeler sonucunda tek başına 7,5 MW güç sağlayabilen türbinler yapılabilmektedir. İyi rüzgar alan ve dolayısıyla türbin kurulması çok avantajlı olan yerlerin sınırlı olması nedeniyle rüzgar enerjisi sektörü yüksek güçlü türbinlere çok ihtiyaç duymaktadır. Bu türbinlerde her parça çok büyük yüklemelere maruz kalarak güç üretmektedirler. Bu nedenle her parçasının çok iyi tasarlanıp üretilmesi ve kullanılması gerekmektedir. Gelişen teknolojiyle beraber mevcut tasarımların önündeki bazı sorunlar aşıldığında yapılan bunca araştırma insanlığa refah olarak dönecektir.

Türbinin en çok zorlanan parçalarından birisi olan rotor göbeği (hub) ile ilgili olarak yapılan bu çalışmada bana desteğini esirgemeyen değerli hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Murat MAKARACI'ya, bu çalışmayı yapabilecek duruma gelmemi sağlayan tüm öğretmenlerime, bu eğitim olanaklarını bize sunan halkımıza ve bana bu konuda çalışmak için tavsiyede bulunan değerli hocam Sn. Ahmet Hamdi DİNLER'e teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET .....	ix
İNGİLİZCE ÖZET .....	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. ENERJİ VE RÜZGAR ENERJİSİ.....	3
2.1. Rüzgar Enerjisi ve Gücü.....	4
2.1.1. Tanımlar.....	4
2.1.2. Tarihçe.....	4
2.1.3. Kapasite faktörü .....	10
2.1.4. Etki .....	12
2.1.5. Türbin yerleşimi.....	12
BÖLÜM 3. RÜZGAR TÜRBİNİ .....	16
3.1. Betz Limiti.....	17
3.2. Rüzgar Gücü Hesabı .....	17
3.3. Sınıflandırma .....	18
3.3.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	18
3.3.1.1. Tek kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri .....	20
3.3.1.2. İki kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri .....	20
3.3.1.3. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	21
3.3.1.4. Çok kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	21
3.3.2. Düşey eksenli rüzgar türbinleri.....	22
3.3.2.1. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbinleri.....	23
3.3.2.2. Savonius tipi düşey eksenli rüzgar türbinleri.....	24
3.4. Kayıtlar .....	25
BÖLÜM 4. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ (YERT) .....	26
4.1. Tanım ve Çalışma Prensibi.....	26
4.2. Kanada Etkiyen Aerodinamik Kuvvetler .....	27
4.3. Hız Kontrolü .....	28
4.4. Uç Hız Oranı.....	28
4.5. Çalışma Devir Karakteri.....	29
4.6. Rotor / Jeneratör Oranı.....	29
4.7. İlave Bilgiler .....	30
BÖLÜM 5. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN GÖBEĞİ.....	31

BÖLÜM 6. GÖBEK YORULMA ANALİZİ .....	33
6.1. Yorulma Analizinin Yapılması.....	39
6.1.1. Uygulanan kuvvetler .....	44
6.1.1.1. Göbek ağırlığı .....	44
6.1.1.2. Göbek merkezkaç kuvveti .....	45
6.1.1.3. Kanat merkezkaç kuvvetleri .....	46
6.1.1.4. Kanat döndürme kuvvetleri .....	47
6.1.1.5. Kanat eğme kuvvetleri .....	49
6.1.1.6. Kanat ağırlık kuvvetleri .....	50
6.2. İstenenler .....	51
6.3. Sonuçlar .....	53
BÖLÜM 7. 10 – 500 KW GÜÇ ARALIĞINDAKİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN FARKLI EMNİYET KATSAYILARINA KARŞILIK GELEN PLAKA VE KÜRESEL GÖBEK KÜTLELERİNİN BULUNMASI .....	58
7.1. Optimizasyon .....	58
7.2. GDO Çalışması .....	63
7.3. Değerlendirme .....	68
BÖLÜM 8. 500 KW'LIK YERT GÖBEĞİ OPTİMİZASYONU .....	69
8.1. Yorulma Analizinin Yapılması .....	75
8.2. Optimizasyon .....	80
BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	94
9.1. Sonuçlar .....	94
9.2. Öneriler .....	99
KAYNAKLAR .....	102
ÖZGEÇMİŞ .....	105

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Rüzgar gücünden yararlanmanın farklı şekilleri.....	4
Şekil 2.2 : İlk rüzgar türbini .....	6
Şekil 2.3 : 2005 – 2009 En büyük ülkelerin kurulu rüzgar gücü değişimi .....	9
Şekil 2.4 : 2005 – 2009 Ülkelerin toplam kurulu rüzgar gücündeki payları .....	9
Şekil 2.5 : Rüzgar tarlaları .....	10
Şekil 2.6 : Çeşitli yerlerde rüzgar durumunun incelenmesi .....	13
Şekil 2.7: Türkiye rüzgar atlası .....	15
Şekil 3.1 : Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri .....	16
Şekil 3.2 : Rüzgar türbinindeki enerji kayıpları ve elde edilen enerji miktarı .....	17
Şekil 3.3 : Yatay eksenli rüzgar türbini .....	19
Şekil 3.4 : Düşey eksenli Darrieus tipi bir rüzgar türbini .....	24
Şekil 3.5 : Savonius tipi rüzgar türbini .....	25
Şekil 4.1 : 2,5 MW 'lık bir rüzgar türbinine ait güç grafiği .....	26
Şekil 4.2 : Kanada etkileyen kuvvetler .....	27
Şekil 4.3 : Üç Kanatlı YERT için uç hız oranının türbin verimine etkisi .....	28
Şekil 4.4 : Sabit hızlı rotor ile değişken hızlı rotorun verimlilik karşılaştırması .....	29
Şekil 4.5 : Rotor / Jeneratör oranının güce etkisi .....	30
Şekil 5.1 : Rüzgar türbin göbeği örnekleri .....	31
Şekil 6.1 : Plaka göbek katı modeli .....	34
Şekil 6.2 : Küresel göbek katı modeli .....	35
Şekil 6.3 : Named selections seçimi .....	36
Şekil 6.4 : Plaka göbek bağlantı yüzeyleri .....	36
Şekil 6.5 : Plaka göbek yaslanma yüzeyi .....	37
Şekil 6.6 : Plaka göbek transmisyon bağlantı yüzeyi .....	37
Şekil 6.7 : Küresel göbek bağlantı yüzeyi .....	38
Şekil 6.8 : Küresel göbek transmisyon yüzeyi .....	38
Şekil 6.9 : Paslanmaz çelik malzeme özellikleri .....	39
Şekil 6.10 : Paslanmaz çelik malzeme özellikleri 2 .....	40
Şekil 6.11 : EN GJS 400 18-LT Küresel grafitli dökme demir malzeme özellikleri..	40
Şekil 6.12 : EN GJS 400 18-LT Küresel grafitli dökme demir malzeme özellikleri..	41
Şekil 6.13 : Meshing .....	41
Şekil 6.14: Koordinat sistemi ve kuvvetler .....	42
Şekil 6.15 : Koordinat sistemi ve kuvvetler 2 .....	42
Şekil 6.16 : Ağırlık kuvvetleri .....	43
Şekil 6.17 : Analiz adımları .....	43
Şekil 6.18 : Yerçekim ivmesi .....	45
Şekil 6.19 : Göbeğe uygulanan açılma hızı .....	46
Şekil 6.20 : Kanat merkezkaç kuvvetleri .....	47
Şekil 6.21 : Kanat döndürme kuvvetleri .....	48
Şekil 6.22 : Kanat eğme kuvvetleri .....	49
Şekil 6.23 : Kanat ağırlık kuvvetleri .....	51
Şekil 6.24 : İstenenler .....	52
Şekil 6.25 : Yorulma analizi ayarları .....	52

Şekil 6.26 : Plaka göbek eşdeğer gerilme sonucu .....	53
Şekil 6.27 : Plaka göbek yorulma ömrü sonucu .....	54
Şekil 6.28 : Plaka göbek yorulma emniyet katsayısı sonucu .....	54
Şekil 6.29 : Plaka göbek eşdeğer gerilme genlemesi sonucu .....	55
Şekil 6.30 : Küresel göbek eşdeğer gerilme sonucu .....	55
Şekil 6.31 : Küresel göbek yorulma ömrü sonucu .....	56
Şekil 6.32 : Küresel göbek emniyet katsayısı sonucu .....	56
Şekil 6.33 : Küresel göbek eşdeğer gerilme genlemesi sonucu .....	57
Şekil 6.34 : Parametre yayınlama .....	57
Şekil 7.1 : Design Xplorer .....	59
Şekil 7.2 : Göbek kütlesi'nin göbek kalınlığı ve göbek çapı'na göre değişimi .....	60
Şekil 7.3 : Maksimum eşdeğer gerilme'nin göbek kalınlığı ve göbek çapı'na göre değişimi .....	61
Şekil 7.4 : Yorulma ömrünün göbek kalınlığı ve göbek çapı'na göre değişimi .....	62
Şekil 7.5 : Yorulma emniyet katsayısının göbek kalınlığı ve göbek çapı'na göre değişimi .....	63
Şekil 7.6 : GDO .....	64
Şekil 7.7 : GDO çözüm .....	65
Şekil 7.8 : Farklı emniyet katsayıları için göbek kütlesi değişimi.....	66
Şekil 7.9 : $S = 1,5$ için göbek kütlesi değişimi .....	67
Şekil 7.10 : 10 – 50 kW güç aralığında göbek kütlesi değişimi .....	67
Şekil 8.1 : Göbek geometrisinin başlangıç durumu .....	70
Şekil 8.2: Halka kalınlık çarpanı 3'ten 5'e çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu .....	71
Şekil 8.3: Köşe yuvarlatma oran yüzdesi 8'den 20'ye çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu .....	72
Şekil 8.4 : Halka yükseklik oran yüzdesi 5'ten 10'a çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu .....	73
Şekil 8.5 : Halka kalınlık çarpanı 3'ten 5'e, köşe yuvarlatma oran yüzdesi 8'den 15'e ve halka yükseklik oran yüzdesi 5'ten 15'e çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu .....	74
Şekil 8.6 : 500 kW'lık YERT küresel göbeği eşdeğer gerilme sonucu .....	76
Şekil 8.7 : 500 kW'lık YERT küresel göbeği yorulma ömrü sonucu .....	77
Şekil 8.8 : 500 kW'lık YERT küresel göbeği yorulma emniyet katsayısı sonucu .....	78
Şekil 8.9 : 500 kW'lık YERT küresel göbeği eşdeğer gerilme genlemesi sonucu .....	79
Şekil 8.10: Göbek kütlesinin halka kalınlık çarpanı ve köşe yuvarlatma oran yüzdesine göre değişimi .....	81
Şekil 8.11: Göbek kütlesinin halka kalınlık çarpanı ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	82
Şekil 8.12: Göbek kütlesinin köşe yuvarlatma oran yüzdesi ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	83
Şekil 8.13: Minimum ömrün halka kalınlık çarpanı ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	84
Şekil 8.14: Minimum emniyet katsayısının halka kalınlık çarpanı ve köşe yuvarlatma oran yüzdesine göre değişimi .....	85
Şekil 8.15: Minimum emniyet katsayısının halka kalınlık çarpanı ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	86
Şekil 8.16: Minimum emniyet katsayısının köşe yuvarlatma oran yüzdesi ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	87

Şekil 8.17: Maksimum eşdeğer gerilme genliğinin halka kalınlık çarpanı ve köşe yuvarlatma oran yüzdesine göre değişimi .....	88
Şekil 8.18: Maksimum eşdeğer gerilme genliğinin halka kalınlık çarpanı ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	89
Şekil 8.19 : Maksimum eşdeğer gerilme genliğinin köşe yuvarlatma oran yüzdesi ve halka yükseklik oran yüzdesine göre değişimi .....	90
Şekil 8.20 : GDO sonucu .....	91
Şekil 8.21 : Tasarım noktası 1 .....	92
Şekil 8.22 : Tasarım noktası 2 .....	92
Şekil 8.23 : Tasarım noktası 3 .....	93



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1 : 2009 yılı itibariyle ülkelerin kurulu rüzgar güç kapasiteleri (MW) .....	8
Tablo 2.2 : En fazla rüzgar gücüne sahip 10 ülkeye ait rüzgar gücü, kapasite faktörü, tüketimi karşılama oranı ve toplam talep bilgileri .....	11
Tablo 6.1 : 10 – 500 kW güç aralığındaki YERT teknik değerleri .....	33
Tablo 6.2 : Adım zamanları .....	44
Tablo 6.3 : Kanat merkezkaç kuvvetlerine ait değerler .....	47
Tablo 6.4 : Kanat döndürme kuvvetleri .....	48
Tablo 6.5 : Kanat ağırlık kuvvetleri .....	50
Tablo 7.1 : Tasarım noktaları .....	65
Tablo 7.2 : Bütün sonuçlar .....	66
Tablo 8.1 : Tasarım değişkenleri ayarları .....	80
Tablo 8.2 : Tasarım noktaları .....	91
Tablo 9.1 : Optimizasyon Kazancı .....	94

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

YERT : Yatay Eksenli Rüzgar Türbini  
HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine  
DERT : Düşey Eksenli Rüzgar Türbini  
VAWT : Vertical Axis Wind Turbine  
WB : ANSYS Workbench  
DXE : Design Xplorer Environment  
DOE : Design Of Experiments (Deney Tasarımı)  
GDO : Goal Driven Optimization (Hedefli Optimizasyon)  
CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)  
P : Güç  
    : Yoğunluk  
c : Hız  
A : Alan  
    : Verim  
D : Rotor Çapı  
n : Rotor Devri  
    : Kanat Kütlesi  
d : Göbek Çapı  
l : Kanat Kütle Merkez Uzaklığı  
 $\omega$  : Açısal Hız  
 $F_g$  : Kanat Ağırlık Kuvveti  
 $F_n$  : Kanat Merkezkaç Kuvveti

# RÜZGAR TÜRBİNİ GÖBEĞİNİN YAPISAL TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Serkan DEMİRCİ

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Türbinleri, Optimizasyon, Tasarım, Tasarım Değişkenleri, Yorulma Analizi

**Özet:** Bu çalışmada 500 kW nominal güç üretecek olan 3 kanatlı Yatay Eksenli Rüzgar Türbin (YERT) rotorunun göbek kısmının optimal yapısal tasarımı hedeflenmiştir. Göbek (hub); türbin kanatlarının bağlandığı parça olup, kanatlardan aldığı gücü transmisyon mili aracılığıyla jeneratöre iletir. 10 – 500 kW güç aralığındaki YERT için göbek şekil, boyut, malzeme ve kuvvet araştırması yapılmış ve boyutlandırmalar türbin gücüne bağlı olarak parametrik oluşturulmuştur. Araştırmalar ışığında plaka ve küresel olmak üzere 2 farklı göbek geometrisi seçilmiştir. Göbeğe etkiyen kuvvetler hesaplanmış ve literatüre göre uygunluğu doğrulanmıştır. Türbin tekrarlı değişken yük altında çalıştığı için göbeğin yapısal tasarımı yorulma analizine göre yapılmıştır. ANSYS Workbench programı kullanılarak göbeğin plaka ve küresel katı modelleri oluşturularak, sonlu elemanlar yorulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra, ANSYS Workbench DesignXplorer yazılımında DOE (Deney Tasarımı) metoduyla göbek çapı ve kalınlığı bağımsız değişkenler olarak seçilmiş, bağımlı değişken olarak belirlenen göbek kütlesi, minimum eşdeğer gerilme, emniyet katsayısı ve parça ömrü ile bağımsız değişkenler arasındaki bağıntılar grafik olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara dayanarak, DesignXplorer yazılımında Goal Driven Optimization (GDO) modülü kullanılarak her bir göbek geometrisine ait 3 farklı emniyet katsayısı için ömür şartını sağlama kısıtıyla minimum göbek kütlesi hesaplanmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen verilere dayanarak 500 kW'lık YERT için minimum ağırlıktan dolayı küresel göbek geometrisi seçilmiş ve göbek çapı ve et kalınlığı için en uygun değerler belirlenmiştir. Son aşamada ise, kanat bağlantı halka kalınlık çarpanı, köşe yuvarlatma oran yüzdesi ve halka yükseklik oran yüzdesi bağımsız değişkenler olarak alınarak statik, yorulma analizleri, DOE ve GDO optimizasyonu yenilenmiştir. Böylelikle göbek kütlesinde ilk optimizasyon değerine göre önemli miktarda ağırlık azaltılması gerçekleştirilmiştir.

## STRUCTURAL DESIGN AND OPTIMIZATION OF WIND TURBINE HUB

Serkan DEMİRCİ

**Keywords:** Wind Energy, Wind Turbines, Optimization, Design, Design Variable, Fatigue Analysis

**Abstract:** In this study, optimum structural design of a 3 bladed Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), rated 500 kW, has been aimed. For the HAWT, shape, dimension, material and force investigation has been made and dimensions have been designed as parametric functions of the turbine power. Then, two different hub geometries have been chosen named as plate and spherical hub. The forces acting on the hub have been calculated and verified with literature values. Since the loads are cyclic, the structural design has been made against fatigue failure. Finite element fatigue analysis has been realized with solid models of plate and spherical hubs by using ANSYS Workbench software. Later, hub diameter and thickness have been chosen as independent variables and the relations of hub mass, minimum equivalent stress, safety factor and life with the variables have been obtained by Design of Experiments (DOE) in Design Explorer software. With realization of life condition, Goal Driven Optimization module in Design Explorer software has been used to obtain the minimum hub mass for 3 different safety factor for each hub form. Based on these findings, the spherical hub has been chosen for the 500 kW HAWT because of its minimum weight and thus, optimal hub diameter and thickness values have been determined. Finally, by taking blade connection ring thickness factor, blend radius ratio and ring height ratio percentage as design variables, static and fatigue analyses, DOE and GDO optimizations have been renewed. As a result, an important amount of weight reduction has been achieved.

## 1. GİRİŞ

İnsanlığın enerji tüketimi her geçen yıl sürekli olarak artmaktadır. Gelişmişliğin bir göstergesi de olan enerji tüketimindeki bu artışa karşılık, enerji üretiminin çok büyük bir kısmının fosil kaynaklardan elde ediliyor olması ve bu kaynakların miktarlarının da sınırlı olmalarından dolayı, yakın bir gelecekte tükenecek olmaları, gelişmiş ülkeleri enerji ihtiyaçlarının bir kısmını yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılama yoluna sevketmektedir. Bu kaynakların en önemlileri akarsu, güneş, rüzgar ve jeotermal enerjilerdir. Bunlardan rüzgar enerjisi atmosferdeki hareket halindeki havanın sahip olduğu kinetik enerjidir.

İnsanlığın rüzgar enerjisinden yararlanması çok eskilere dayanmaktadır. Tahıl öğütme ve su çıkarma amacıyla 3000 yıldan daha uzun bir süreden beri yeldeğirmenlerinden yararlanan insanlık, daha da eski dönemlerden beri de yelkenlileri hareket ettirmek amacıyla rüzgardan yararlanmaktadır. Günümüzde ise 1973 yılındaki petrol krizinin ve küresel iklim değişikliğinin de etkisiyle elektrik enerjisi elde etmek için rüzgar enerjisinden sürekli artan bir oranda yararlanılmaktadır [1].

Rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için rüzgarın hareketini mekanik olarak alan parçalara sahip rüzgar türbinlerinin içinde jeneratör aracılığıyla bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Daha sonra bu enerji, ya türbin doğrudan şebekeye bağlanarak ya da elde edilen enerji akülere depolanarak istenilen yerde kullanıma sunulmaktadır [2].

Rüzgar türbinlerinin çeşitli tipleri vardır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan tip Üç Kanatlı Yatay Eksenli Rüzgar Türbini'dir. Bu türbinlerin en güçlü modelleri 7,5

MW güce ulaşmıştır. Bu türbinler rotor, nasel ve kule parçalarından oluşmaktadır. Rotor rüzgardan enerjiyi alan parça olup 3 adet kanat ile bir adet göbek (hub)'den oluşur. Nasel, rotorun bağlandığı ve içinde transmisyon sistemi, jeneratör ve kontrol sistemlerinin olduğu kabin şeklindeki yapıdır. Kule ise naseli tutan yapıdır.

Rüzgar türbininin kanatlarını tutan rotor göbeği küçük güçlerde (1-10 kW) plaka, orta ve büyük güçlerde (>100 kW) boru ve küre geometrisinde olan bir parçadır. Rotorun dönmesi nedeniyle kanatlar üzerinden çok sayıda değişken kuvvet göbeğe iletilmektedir. Göbeğin hem kanatların rüzgardan aldığı enerjiyi transmisyon sistemine iletmesi hem de etkisi altında kaldığı çok sayıda büyük ve değişken kuvvete karşı dayanabilmesi için iyi bir şekilde tasarlanıp üretilmesi gerekmektedir.

Göbeğe etkiyen kuvvetlerin dinamik karakterde olmaları nedeniyle göbekte metal yorulması ortaya çıkabileceğinden dolayı tasarımın yorulmaya göre yapılması gerekmektedir. Ayrıca yüksek güçlerdeki türbinlerde göbek kütlelerinin çok artmasının tüm sistemi olumsuz etkilemesi nedeniyle emniyet katsayısı istenildiği kadar yüksek seçilememektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada dayanım ve kütleye göre optimum tasarım bulunmalıdır. Bunun için optimizasyon çalışması yapılmalıdır.

Optimizasyon, verilmiş sınırlamalara göre en iyi sonucun bulunması işlemidir. Mühendisler pekçok kez birden fazla faktöre göre tasarım yapmak zorunda kalırlar. Böyle durumlarda herhangi bir faktöre göre çok iyi olan bir tasarım başka bir faktöre göre kötü olabilir. Aynı anda birden çok faktörü dikkate alarak karar verebilmek için optimizasyon yapılarak optimum çözüm bulunur. Yapılan çalışmada 500 kW'lık rüzgar türbini için göbek tasarımı yapılmıştır. ANSYS WorkBench (WB) programı kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile yorulma analizi yapılmış ve arkasından bu analize dayanarak kütlede optimizasyon yapılmıştır. Böylece göbek dayanımı ile kütlesi arasında optimum bir nokta bulunmaya çalışılmıştır.

## 2. ENERJİ VE RÜZGAR ENERJİSİ

Enerji, maddenin iş yapabilme yeteneğinin bir ölçüsü olup soyut fiziksel bir niceliktir. Bundan dolayı doğrudan ölçülemeyip cisimlerde farklı şekillerde gözlemlenir. Bir cismin enerjisi, cismin enerjisiz olduğu başlangıç halinden, o hale gelebilmesi için cismin üzerine yapılan iştir. Cisim enerjisini başka bir cisme iletğinde iş yapmış olur. Bu nedenle cisim en fazla sahip olduğu enerji kadar iş yapabilir. Pratikte cisimler iş yaparken enerjilerinin bir kısmı ısı enerjisine dönüştüğünden cismin yaptığı iş kaybettiği enerjiden küçük olur. Cismin yaptığı işin kaybettiği enerjiye oranına verim denir [3].

Enerji doğada farklı şekillerde karşımıza çıkar. Potansiyel enerji, kinetik enerji, ısı enerjisi ve manyetik enerji bunlardan bazılarıdır. Alman fizikçi Hermann von Helmholtz enerjinin farklı şekillerinin eşdeğer olduğunu göstermiştir. Herhangibir türdeki enerji yok olduğunda aynı miktarda başka bir tür enerji ortaya çıkmaktadır. Yani enerji bir türden diğerine dönüşmektedir. Buna enerjinin korunumu denilmektedir. Enerjinin korunumunu ilk kez James Prescott Joule göstermiştir [4].

Her ne kadar enerji korunsun da insanlar açısından işe yarar, güç üretir durumundan işe yaramaz ve güç üretemez bir duruma dönüştüğünde insanlar enerjinin tükendiğini söylerler. İnsanlık her an çok büyük miktarlarda enerjiyi farklı işler için tüketmektedir. İhtiyaç duyulan enerjiyi elde edebilmek için bugüne kadar ağırlıklı olarak fosil yakıtları kullanan insanlık, bu yakıtların tükenmez olmadıklarını anladıktan sonra pratik olarak hiç tükenmeyecek yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Her geçen yıl güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli yatırımlar yapılmaktadır [5].

## 2.1. Rüzgar Enerjisi ve Gücü

### 2.1.1. Tanımlar

Rüzgar enerjisi, rüzgarı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisidir. Bu enerjinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [6].

### 2.1.2. Tarihçe

İnsanlığın rüzgar enerjisinden yararlanması çok eskilere dayanmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi güç ihtiyacı nedeniyle tarih boyunca farklı şekillerde rüzgar enerjisinden yararlanılmıştır. Tahıl öğütme ve su çıkarma amacıyla 3000 yıldan daha uzun bir süreden beri yeldeğirmenlerinden yararlanan insanlık daha da eski dönemlerden beri de yelkenlileri hareket ettirmek amacıyla rüzgardan yararlanmaktadır [1].



Şekil 2.1: Rüzgar gücünden yararlanmanın farklı şekilleri [7-9]



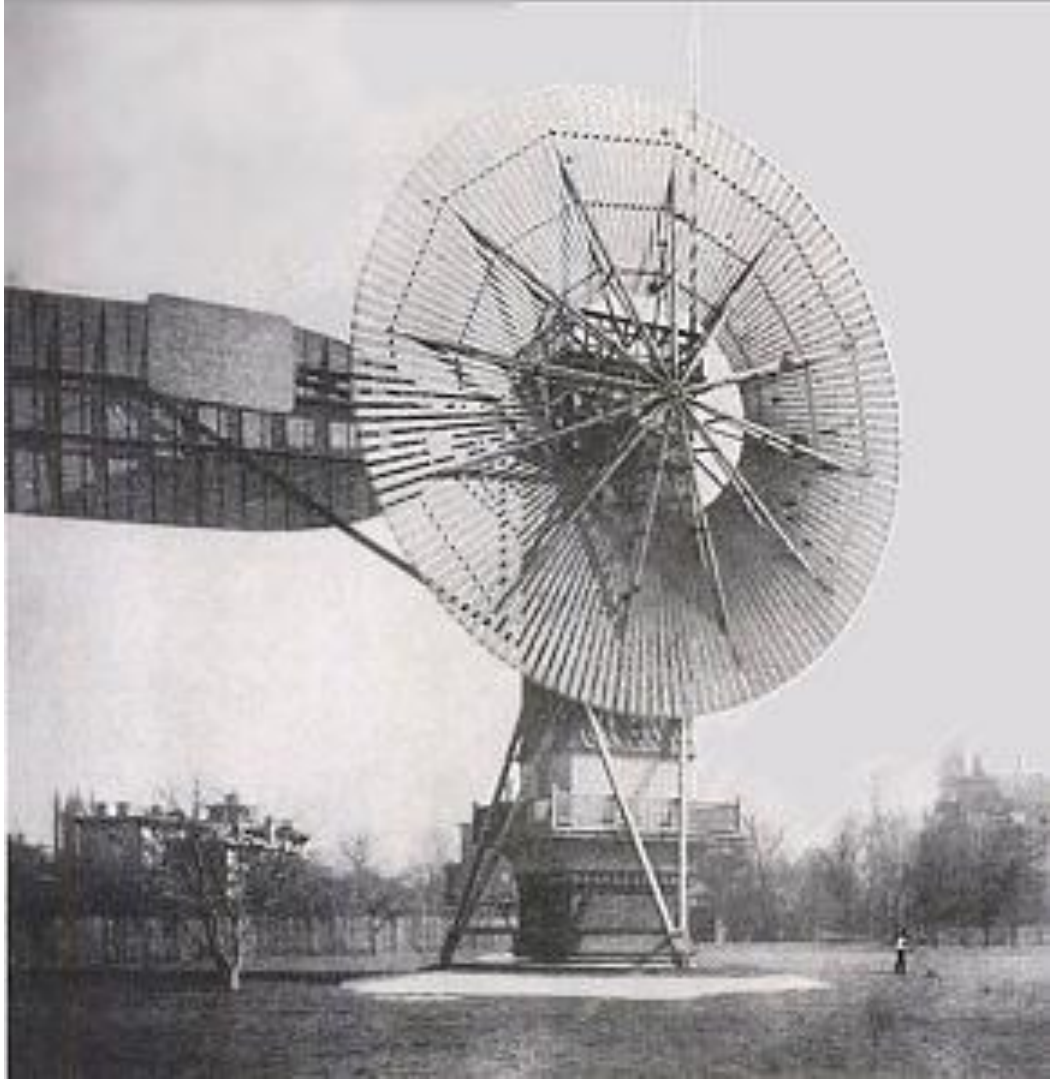
Yeldeğirmenleriyle ilgili ilk yazılı kayıt MÖ 400 yılı civarında yazılmış olan bir Hint kitabındadır. MS 400'lü yıllardan itibaren ise çeşitli kaynaklarda Orta Asya'nın Budist ülkelerinde rüzgar tarafından çalıştırılan dua tekerleklerinden bahsedilmektedir. Bazı tarihçilere göre ilk yeldeğirmenleri yaklaşık 2000 yıl önce Çin'de yapılmıştır ancak bunlara ait herhangi bir kayıt bulunmamaktadır. İlk yazılı kayıtlar MS 7. yy'dan o zamanlar Pers İmparatorluğu'nun Sijistan ili olan bugünkü Afganistan'dan başlamaktadır. Halife Ömer zamanında Arabistan'da inşa edilen yeldeğirmenleri su çıkarma ve tahıl öğütme amacıyla kullanılmıştır. MS 12. yy civarında Moğol İmparatoru Cengiz Han aracılığıyla da yeldeğirmenleri Çin'e ulaştırmıştır [5].

Haçlı Seferleri sonucunda yeldeğirmenleri 12. yy'dan itibaren Avrupa'da da yapılmaya başlanmıştır. Orta Doğu ve Asya'daki yeldeğirmenleri dikey eksenliken Avrupa'dakiler yatay eksenli olarak yapılmışlardır. Hollanda, yeldeğirmenlerini en yaygın kullanan ülke olarak 16. yy'da yeldeğirmeni sahiplerine vergi dahi koymuştur. 19. yy sonunda Avrupa'da 30000'den fazla yeldeğirmeni çalışıyordu [5].

17. ve 18. yy'larda Amerika'ya göç eden Hollandalılar aracılığıyla bu teknoloji Amerika'ya ulaşmıştır. İlk başlarda doğudaki şehirlerde kurulan yeldeğirmenleri sorunsuz bir şekilde çalışmıştır. Ancak zamanla yerleşimcilerin batıya göç etmesi sonucunda batıya kurulan yeldeğirmenleri batının yüksek hızlı rüzgarlarına maruz kalınca dayanım sorunları ortaya çıkmıştır. Buna çözüm olarak Daniel Halladay çok kanatlı yeldeğirmenini yapmıştır. Ayrıca yeldeğirmenin yönünü kontrol eden bir kuyruk da eklenmiştir [5].

1870'li yıllarda kanat yapımında çelik kullanımı ve kanadın eğik olarak yapımı başlamıştır. 1886'da Thomas Perry 21. yy'ın başına kadar kullanılan aerodinamik bir kanat profili tasarlamıştır [5].

19. yy'ın sonlarına doğru yeldeğirmenlerinden elektrik elde etmek için yararlanılabileceği anlaşılmıştır. İlk elektrik üreten rüzgar türbinini 1888 yılında Charles F. Brush 17 m çaplı ve 144 kanatlı olarak yapmıştır. Şekil 2.2'de görülen bu türbin 20 yıllık ömrü boyunca yaklaşık 12 kW'lık güç üretmiştir [5].



Şekil 2.2: İlk rüzgar türbini [10]

1931'de Rusya'da Balacava'da 100 kW'lık bir rüzgar türbini yapılmıştır. 33 m çaplı bu türbin yine 33 m yüksekliğindeki bir kuleye konulmuştur [5].

Avrupa'da 2. Dünya Savaşı'nın neden olduğu yıkım nedeniyle pekçok yerde elektrik ihtiyacı rüzgar türbinleriyle sağlanmıştır. Örneğin Danimarka'da yapılan 200 kW'lık bir rüzgar türbini 1960'lara kadar kullanılmıştır. Bu alanda Avrupa'nın liderliğine rağmen en büyük rüzgar türbini 1941 yılında Vermont'ta 610 m yükseklikteki bir tepeye kurulan 1,25 MW gücündeki Smith-Putnam türbinidir. 4 yıl çalıştıktan sonra metal yorulması nedeniyle bir kanadın ve yatakların kırılması sonucunda durdurulmuştur. Savaşa hazırlanan ülkenin metalleri silah yapma amacıyla kullanması nedeniyle türbin için yeni parçalar yapılamamıştır. Bu türbin teknik olarak bir başarı örneği kabul edilmektedir [5].

1970'lerdeki petrol krizi sonucunda gelişmiş ülkeler rüzgar enerjisi alanında araştırmalar yapmışlardır. Bu araştırmalar sonucunda 1980'lerden itibaren Modern Rüzgar Güç Endüstrisi şekillenmiştir. Başlarda 3 kanatlı sabit hızlı ve stall kontrollü Danimarka Konsepti etrafında kurulan endüstri son yıllarda değişken hız, 2 kanatlılık ve kanat açısı kontrolünü de kullanmaya başlamıştır [1].

1997'de küresel iklim değişikliğini durdurma amacıyla Avrupa Birliği üyesi devletlerde 2010'da enerji ihtiyacının %12'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanması kararının alınmasıyla rüzgar türbinleri hızla gelişmeye başlamışlardır. Ayrıca 1980'lerde kurulan rüzgar santrallerindeki eski türbinler de yeni modern türbinlerle değiştirilerek güç kazancı sağlanmaktadır [1].

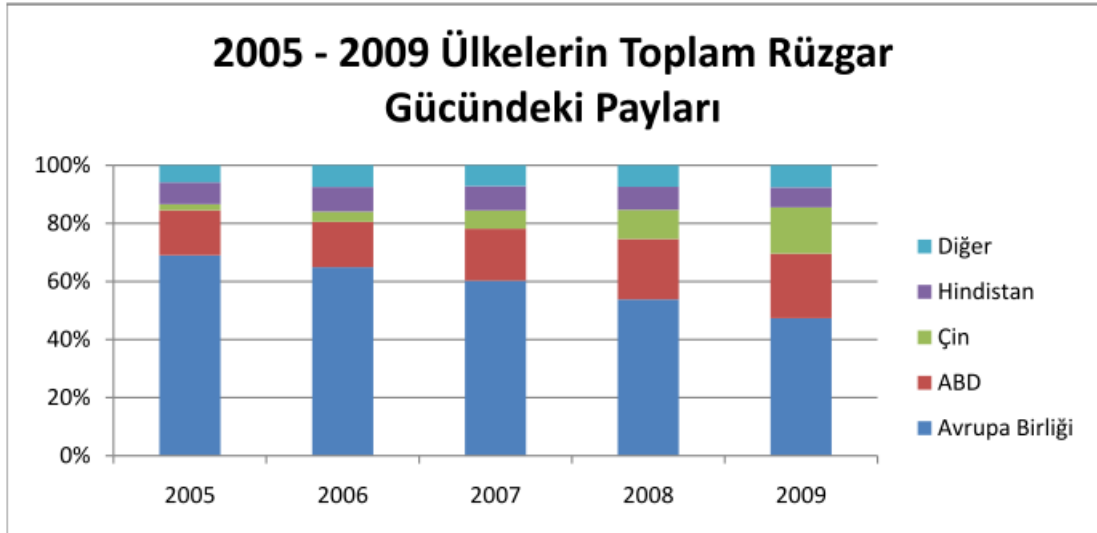
2009'un sonunda dünya üzerindeki kurulu rüzgar türbinlerinin kapasitesi Tablo 2.1'de görüldüğü gibi 157,9 GW olmuştur. Enerji üretimi ise 340 TWh olmuştur. Bu da dünyada kullanılan elektriğin %2'si anlamına gelmektedir. Enerji üretimi, 2007, 2008 ve 2009 yıllarında hızlı bir şekilde artmıştır. 2009'da rüzgardan elektrik üretimi Danimarka'da %19, İspanya ve Portekiz'de %13, Almanya ve İrlanda'da %7 artmıştır. Avrupa Birliği bu alanda dünyada en ileridedir. Ancak son yıllarda Tablo 2.1, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de görüleceği gibi özellikle ABD ve Çin çok hızlı bir biçimde ilerlemiştir [6].

Tablo 2.1: 2009 yılı itibariyle ülkelerin kurulu rüzgar gücü kapasiteleri (MW) [6]

<b>KURULU RÜZGAR GÜCÜ KAPASİTESİ (MW)</b>						
<b>Sıra</b>	<b>Ülke</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
1	 Birleşik Devletler	9.149	11.603	16.819	25.170	35.159
2	 Almanya	18.428	20.622	22.247	23.903	25.777
3	 Çin	1.266	2.599	5.912	12.210	25.104
4	 İspanya	10.028	11.630	15.145	16.740	19.149
5	 Hindistan	4.430	6.270	7.850	9.587	10.925
6	 İtalya	1.718	2.123	2.726	3.537	4.850
7	 Fransa	779	1.589	2.477	3.426	4.410
8	 Birleşik Krallık	1.353	1.963	2.389	3.288	4.070
9	 Portekiz	1.022	1.716	2.130	2.862	3.535
10	 Danimarka	3.132	3.140	3.129	3.164	3.465
11	 Kanada	683	1.460	1.846	2.369	3.319
12	 Hollanda	1.236	1.571	1.759	2.237	2.229
13	 Japonya	1.040	1.309	1.528	1.880	2.056
14	 Avustralya	579	817	817	1.494	1.712
15	 İsveç	509	571	831	1.067	1.560
16	 İrlanda	495	746	805	1.245	1.260
17	 Yunanistan	573	758	873	990	1.087
18	 Avusturya	819	965	982	995	995
19	 Türkiye	20	65	207	433	801
20	 Polonya	83	153	276	472	725
21	 Brezilya	29	237	247	339	606
22	 Belçika	167	194	287	384	563
23	 Meksika	2	84	85	85	500
24	 Yeni Zelanda	168	171	322	325	497
25	 Tayvan	104	188	280	358	436
26	 Norveç	268	325	333	428	431
27	 Mısır	145	230	310	390	430
28	 Güney Kore	119	176	192	278	348
29	 Fas	64	64	125	125	253
30	 Macaristan	18	61	65	127	201
31	 Çek Cumhuriyeti	30	57	116	150	192
32	 Bulgaristan	14	36	57	158	177
33	 Şili	?	?	?	20	168
34	 Finlandiya	82	86	110	143	147
35	 Estonya	?	?	59	78	142
36	 Kosta Rika	?	?	?	74	123
37	 Ukrayna	77	86	89	90	94
38	 İran	32	47	67	82	91
39	 Litvanya	7	56	50	54	91
	 <b>Avrupa Birliği</b>	<b>40.722</b>	<b>48.122</b>	<b>56.614</b>	<b>65.255</b>	<b>74.767</b>
	<b>Diğer Avrupa (EU27 olmayan)</b>	<b>391</b>	<b>494</b>	<b>601</b>	<b>1.022</b>	<b>1.385</b>
	<b>Amerika'nın geri kalanı</b>	<b>155</b>	<b>159</b>	<b>184</b>	<b>210</b>	<b>175</b>
	<b>Afrika'nın geri kalanı &amp; Orta Doğu</b>	<b>52</b>	<b>52</b>	<b>51</b>	<b>56</b>	<b>91</b>
	<b>Asya'nın geri kalanı &amp; Okyanusya</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>36</b>	<b>51</b>
	<b>Dünya toplamı (MW)</b>	<b>59.024</b>	<b>74.151</b>	<b>93.927</b>	<b>121.188</b>	<b>157.899</b>



Şekil 2.3: 2005 – 2009 En büyük ülkelerin kurulu rüzgar gücü değişimi [6]



Şekil 2.4: 2005 – 2009 Ülkelerin toplam kurulu rüzgar gücündeki payları [6]

Pekçok rüzgar türbinininden oluşan rüzgar tarlaları (Şekil 2.5) elektrik iletim sistemine bağlanırlar. Daha küçük tesisler, üretilen elektriği sistemden ayrılan yerlerde kullanır. Bazı şirketler, küçük tesislerde üretilen fazla elektriği satın alır. Görüntü kirliliğine neden olması ve çevreye verdiği zararlardan dolayı rüzgar tarlalarını inşa etmek bazı yerlerde hoş karşılanmamaktadır [6].



Şekil 2.5: Rüzgar tarlaları [11-14]

### 2.1.3. Kapasite faktörü

Rüzgar hızının sabit olmamasından dolayı, rüzgar tarlasının yıllık enerji üretimi, jeneratör üzerindeki etikete yazılan saatlik değerlerin bir yıldaki toplam saatle çarpılması sonucu çıkan değer ile hiçbir zaman aynı olmaz. Bir yıldaki gerçek üretim değerinin teorik maksimum değere oranı kapasite faktörü olarak adlandırılır. Tipik olarak kapasite faktörü %20 ile %40 arasındadır. Örneğin, kapasite faktörü %35 olan 1 MW'lık bir türbin, yılda 8760 MWh üretmez. Sadece 3066 MWh üretir. Tablo 2.2 de en fazla rüzgar gücüne sahip 10 ülkeye ait çeşitli değerler verilmiştir [6].

Tablo 2.2: En fazla rüzgar gücüne sahip 10 ülkeye ait rüzgar gücü, kapasite faktörü, tüketimi karşılama oranı ve toplam talep bilgileri [6]

EN FAZLA RÜZGAR GÜCÜNE SAHİP 10 ÜLKENİN YILLIK RÜZGARDAN ENERJİ ÜRETİMİ (TWh) VE TOPLAM ELEKTRİK TÜKETİMİ (Twh)												
Ülkeler	2005				2006				2007			
	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep
1 ABD	17,8	22,20%	0,40	4048,9	26,6	26,10%	0,70	4058,1	34,5	23,40%	0,80	4149,9
2 Almanya	27,2	16,90%	5,10	533,7	30,7	17,00%	5,40	569,9	38,5	19,70%	6,60	584,9
3 İspanya	20,7	23,50%	7,90	260,7	22,9	22,40%	8,50	268,8	27,2	20,50%	9,80	276,8
4 Hindistan	6,3	16,20%	0,90	679,2	7,6	13,80%	1,00	726,7	14,7	21,00%	1,90	774,7
5 Çin	1,9	17,20%	0,10	2474,7	3,7	16,20%	0,10	2834,4	5,6	10,60%	0,20	3255,9
6 İtalya	2,3	15,30%	0,70	330,4	3	16,10%	0,90	337,5	4	16,70%	1,20	339,9
7 Fransa	0,9	13,60%	0,20	482,4	2,2	16,00%	0,50	478,4	4	18,60%	0,80	480,3
8 Birleşik Krallık	2,9	24,00%	0,80	355	4,2	23,20%	1,20	352,9	5,3	27,50%	1,50	352
9 Portekiz	1,7	19,00%	3,60	47,9	2,9	19,30%	5,90	49,2	4	21,20%	8,00	50,1
10 Danimarka	6,6	24,00%	18,50	35,7	6,1	22,20%	16,80	36,4	7,2	26,30%	19,70	36,4
<b>Dünya Toplamı (TWh)</b>	<b>99,5</b>	<b>19,20%</b>	<b>0,60</b>	<b>15746</b>	<b>124,9</b>	<b>19,20%</b>	<b>0,70</b>	<b>16790</b>	<b>173,3</b>	<b>21,10%</b>	<b>0,90</b>	<b>19853</b>
2008												
Ülkeler	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep
1 ABD	52	23,50%	1,30	4108,6	70,8		1,80	3951,1				
2 Almanya	40,4	19,30%	6,60	611,9	37,2		6,40	581,3				
3 İspanya	31,4	21,70%	11,10	282,1	36,6		13,70	267				
4 Hindistan	14,8	17,60%	1,77	834,3								
5 Çin	12,8	12,00%	0,40	3426,8	26,9	12,20%	0,74	3640,3				
6 İtalya	4,9	15,70%	1,40	339,5								
7 Fransa	5,6	18,80%	1,10	494,5	7,8	20,20%	1,60	486				
8 Birleşik Krallık	7,1	30,40%	2,00	350,5								
9 Portekiz	5,7	22,70%	11,30	50,6	7,5		15,00	49,9				
10 Danimarka	6,9	24,90%	19,10	36,2								
<b>Dünya Toplamı (TWh)</b>	<b>260</b>	<b>24,50%</b>	<b>1,50</b>		<b>340</b>		<b>2,00</b>					
2009												
Ülkeler	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep	Rüzgar Gücü	Kapasite Faktörü	Tük. Karş. %	Toplam Talep
1 ABD												
2 Almanya												
3 İspanya												
4 Hindistan												
5 Çin												
6 İtalya												
7 Fransa												
8 Birleşik Krallık												
9 Portekiz												
10 Danimarka												
<b>Dünya Toplamı (TWh)</b>												

#### **2.1.4. Etki**

Rüzgar enerji etkisi, rüzgar tarafından üretilen enerjinin, şebekenin kullanılabilir toplam kapasitesi ile karşılaştırılmasıdır. Genellikle rüzgar etkisinin maksimum bir seviyesinin olmadığı kabul edilir. Belirli şebekedeki sınır var olan üretim santrallerine, mekanizmaların fiyatına, arz-talep yönetimine, verime ve diğer faktörlere bağlıdır. Çalışmalar tüketilen toplam elektrik enerjisinin %20'sinin fazla zorlanmadan rüzgardan elde edilebileceğini göstermiştir [6].

Şu anda, birkaç şebeke sistemindeki rüzgar enerjisinin etkisi %5'in üzerindedir: Danimarka (%19'un üzerinde), İspanya ve Portekiz (%11'in üzerinde), Almanya ve İrlanda Cumhuriyeti (%6'nın üzerinde). Örneğin, 8 Kasım 2009'un sabah saatlerinde, İspanya 'daki elektrik arzında, ülkenin elektriğinin yarıdan fazlası rüzgar enerjisinden sağlanmıştır. Bu durum şebekede hiçbir sorun teşkil etmemiştir [6].

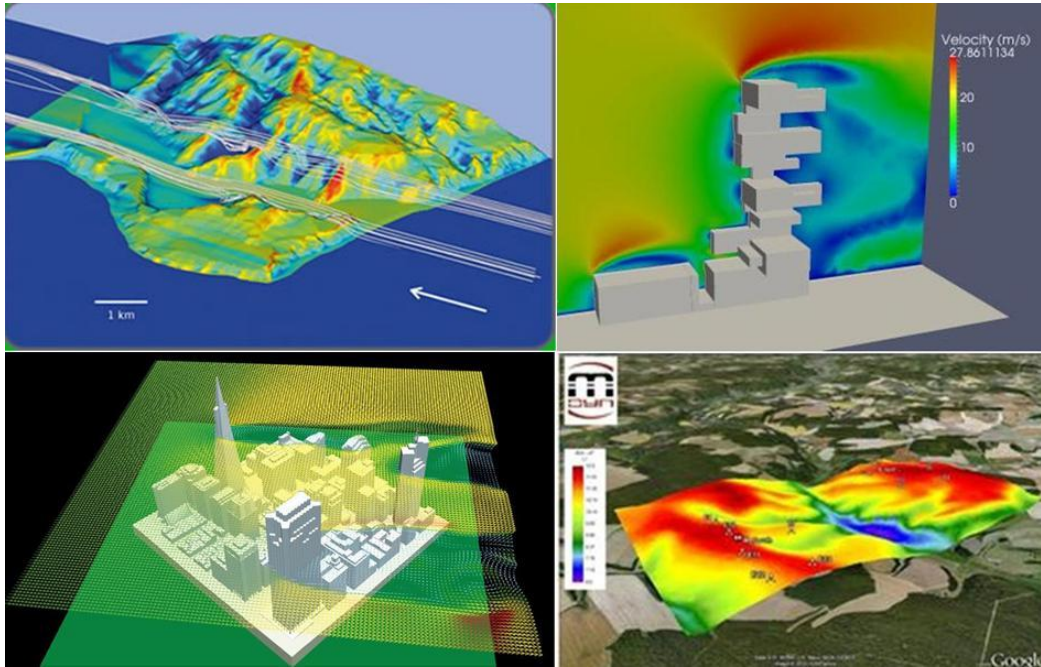
Rüzgar gücünden üretilen elektrik, farklı zaman aralıklarında, saatlik, günlük, mevsimlik ve yıllık olarak yüksek oranda değişebilir. Değişim rüzgar santral çıkışının kısa vadeli tahmin edilebilirliği ile ifade edilir. Diğer elektrik kaynakları gibi rüzgar gücü de planlanmalıdır. Rüzgar gücünde tahmini yöntemler kullanılır fakat rüzgar santral çıkışının tahmin edilebilirliği kısa vadede düşük kalır [6].

#### **2.1.5. Türbin yerleşimi**

Herhangibir rüzgar türbin kurulumu için proje geliştirme ve yönetmenin yanında yapılması gereken temel ve yol yapımı, elektrik bağlantılarının hazırlanması ve türbin dikme gibi ilave işler de vardır. Düz karasal alanlarda toplam yatırım maliyeti türbin maliyetinin 1,3 katı kadarken engebeli arazide bu maliyet artmaktadır. Sabit giderlerin etkisinin daha büyük bir yatırımda daha az olmasından dolayı ticari yatırımlarda büyük projeler tercih edilmektedir [1].



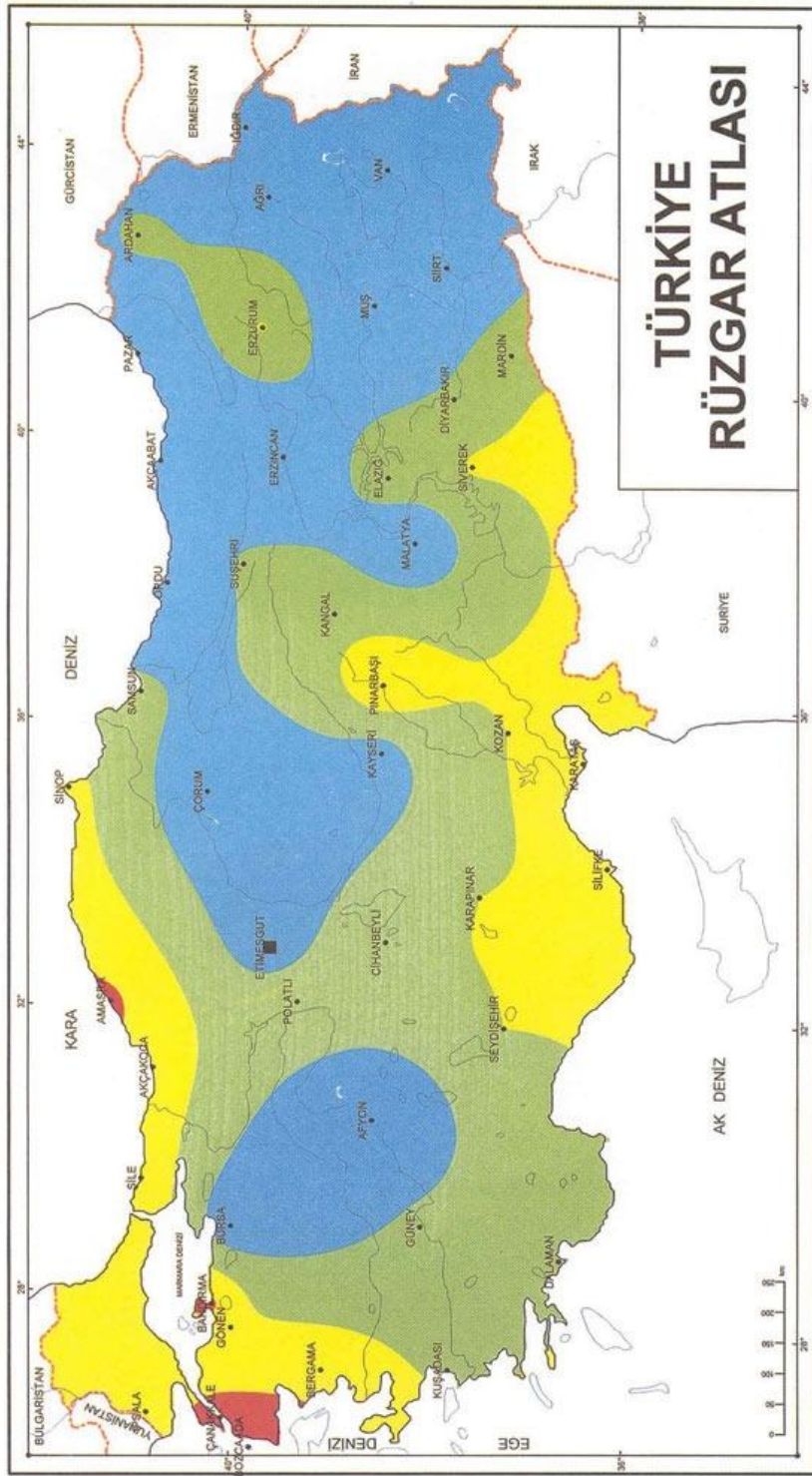
Türbinin yerleştirileceği yerin seçiminde enerji üretiminin maksimum olmasına dikkat edilir. Bu nedenle rüzgar tarlası tasarımcıları Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bu iş için hazırlanmış yazılımları kullanarak analiz yaparlar. Ayrıca kurulacak türbinlerin mevcut elektrik iletim hatlarına olan uzaklığı da değerlendirilmelidir. Rüzgar türbininin büyüklüğü de görsel açıdan çevreye önemli miktarda etki etmektedir. Rüzgar türbinlerinden hoşlanan insanların yanında rahatsız olanlar da vardır. Türbinin çalışması süresince yaptığı gürültü de rahatsız edici bir özellik olarak dikkate alınmalıdır. Türbinin çalışması süresince kuşlar tarafından farkedilememesi nedeniyle kuş ölümlerine de neden olmaktadır [1].



Şekil 2.6: Çeşitli yerlerde rüzgar durumunun incelenmesi [15-18]

Rüzgar türbin yerlerinin iyi tesbit edilmesi rüzgar gücünün ekonomik kullanılması açısından kritik önem taşır. Rüzgarın kendi kullanılabilirliği bir tarafa, iletim hatlarının kullanılabilirliği, üretilen enerjinin değeri, bulunduğu yerin bedeli gibi diğer faktörlerde göz önüne alınmalıdır. Denizdeki yerleşimler, yapıları daha büyük inşa ederek, daha fazla yıllık yük faktörlerinin getirisiyle maliyeti dengeleyebilir [6].

Rüzgar güç yoğunluğu (Wind Power Density), belirli bir yerdeki rüzgarın etkin gücünün hesabıdır. Rüzgar güç yoğunluğunun dağılımını gösteren bir harita (Şekil 2.7), rüzgar türbinlerini uygun olarak yerleştirmek için başvurulacak ilk adımdır. Bir yerde rüzgar güç yoğunluğu ne kadar büyükse, sınıflandırma o derece büyük olur. Rüzgar güç yoğunluğunun 3. dereceden (50 m'lik rakımda 300–400 W/m<sup>2</sup>) 7. dereceye (50 m'lik rakımda 800–2000 W/m<sup>2</sup>) kadar olan sınıfları genellikle rüzgar güç üretimi için uygun bulunmaktadır [6].



Baş farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri<sup>1</sup>

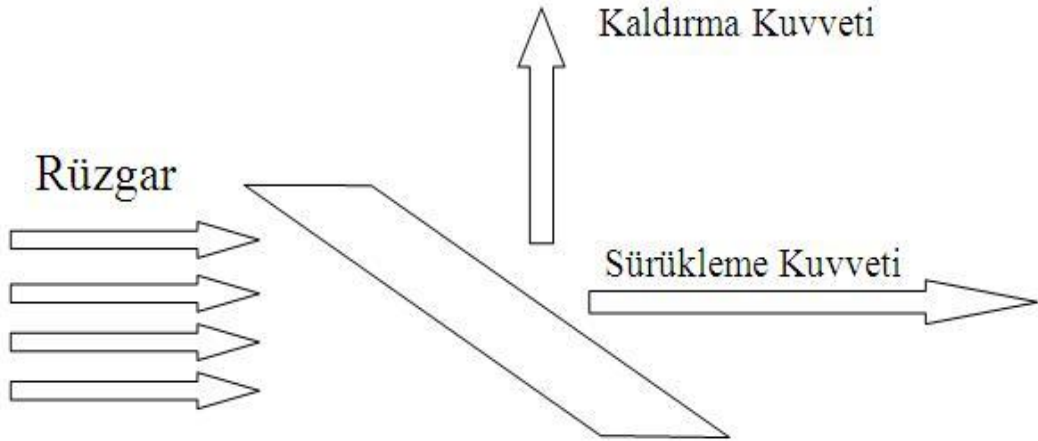
Kapalı Alanlar <sup>2</sup> m <sup>2</sup>	Açık Alanlar <sup>3</sup> m <sup>2</sup>	Köyler <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	Açık Deniz <sup>5</sup> m <sup>2</sup>	Tepe ve Bayır <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
>60	>75	>85	>80	>115
50-60	65-75	70-85	80-80	100-115
45-50	55-65	60-70	70-80	85-100
35-45	45-55	50-60	55-70	70-85
<35	<45	<50	<55	<70

1. Rüzgar potansiyeli, rüzgarın gücünü temsil etmektedir. Rüzgar türbini halihazırda potansiyelin % 20 ile % 30 luk bölümünü kullanabilir. Potansiyel hesaplamaları; deniz seviyesinde 1 Atm lik standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1,23 kg/m<sup>3</sup> hava yoğunluğuna göre yapılmıştır.
  2. Yerleşim alanları, ormanlar ve rüzgar kırıcıların yoğun olduğu tarım alanları (pürüzlülük sınıfı 3)
  3. Az sayıda rüzgar kırıcının olduğu açık araziler (pürüzlülük sınıfı 1). İç bölgelerde en fazla tercih edilen alanlar genellikle bu sınıfta bulunmaktadır.
  4. Düzgün kıyı alanları ve çok az sayıda rüzgar kırıcı içeren kara yüzeyleri (pürüzlülük sınıfı 1). Eğer hakim rüzgar yönü deniz tarafından az olabilir.
  5. Kıyılardan en az 0,5 km uzadıktaki açık denizler (pürüzlülük sınıfı 0).
  6. Bütün sınıflarda % 50 ye varan bir hız artışı görülmektedir ve bu sonuç 400 m yüksekliğinde ve 4 km çapındaki simetrik bir tepede yapılan hesaplamalarda elde edilmiştir.
- Rüzgar hızındaki artış; tepenin yükseliğine, uzunluğuna ve yapısına bağlıdır.

Şekil 2.7: Türkiye rüzgar atlası [19]

### 3. RÜZGAR TÜRBİNİ

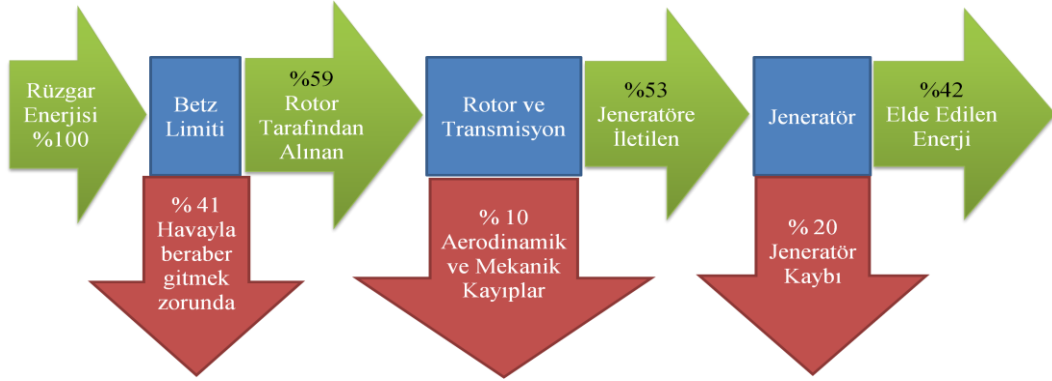
Rüzgar türbini, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için iki önemli aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir (Şekil 3.1). Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelebilecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine dik geldiği durumda iken; minimum sürüklenme kuvveti ise hava akışı cismin yüzeyine paralel iken meydana gelir. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır [2].



Şekil 3.1 : Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri

### 3.1. Betz Limiti

Rüzgarda bulunan enerjinin tamamı sürekli bir biçimde alınamaz. Çünkü enerjisini kaybeden hava durur. Türbinin sürekli olarak enerji üretebilmesi için havanın da sürekli olarak hareket etmesi gerekir. Bundan dolayı rüzgardan elde edilebilecek maksimum enerji daha azdır. Bu konuda yapılan çalışmalar göstermiştir ki rüzgarın enerjisinin yararlanılabilen kısmının teorik üst limiti %59,3 tür. Bu değere Betz Limiti denir. Aşılması olan bu limit türbinle ilgili değildir. Güç kayıpları da dikkate alındığında türbinin ürettiği enerji rüzgar enerjisinin Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yaklaşık %42' si civarındadır [1,20].



Şekil 3.2: Rüzgar türbinindeki enerji kayıpları ve elde edilen enerji miktarı [20]

### 3.2. Rüzgar Gücü Hesabı

Rüzgarın enerjisi hızının kübünün bir fonksiyonudur. Eğer rüzgar hızı iki katına çıkarsa rüzgardaki enerji sekiz katına çıkar. Örneğin, 20 m/s hızındaki bir rüzgar ile üretilebilecek enerji miktarı, 10 m/s hızındaki bir rüzgardan üretilebilecek enerjinin 8 katıdır ( $20^3/10^3 = 8000/1000 = 8$ ) [6].

Yer seçimi veya ölçüm hataları ile yapılabilecek küçük rüzgar hızı hataları bir rüzgar türbini yatırımında büyük hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, rüzgar türbini satın almadan önce, doğru ve sürekli bir rüzgar çalışması yapılmalıdır. Ekonomik olarak uygulanabilir olması için, bir rüzgar türbini kurulacak yerde yıllık ortalama en az 5,4 m/s rüzgar hızı olmalıdır [2].

Rüzgardaki güç miktarı (3.1) :

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

### 3.3. Sınıflandırma

Kullanımdaki rüzgar türbinleri boyut ve tip olarak çok çeşitlilik gösterse de genelde dönme eksenine göre sınıflandırılır. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre "Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri" (YERT) ve "Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri" (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılır [6].

#### 3.3.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir (Şekil 3.3). Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Bu türbinlerde gücü oluşturan kuvvet kaldırma kuvvetidir [6].

Bu türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerin yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı,

kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelemesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır. Ayrıca kanatlar fazla esnek olmamalıdır. Rüzgarı arkadan alanlarda ise güçte titremeler olur. Ayrıca yorulma daha fazladır [2].

Bu türbinler kanat sayısına göre tek kanatlı, 2 kanatlı, 3 kanatlı ve çok kanatlı olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 3.3: Yatay eksenli rüzgar türbini [7]

### **3.3.1.1. Tek kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri**

Bu türbinlerde kanat sayısının azlığı ve dönme hızının yüksek olması sayesinde makine kütlesi ve rotorun döndürme momenti azalmaktadır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için, tek menteşe ile sabitleştirilip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlarda, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için kanat bağlantı noktaları çok iyi yapılmalıdır. Bir kanatlı RT'nin kanat uç hızı, üç kanatlı RT ile karşılaştırıldığında, iki kat daha yüksektir. Bu da çalışma esnasında aşırı gürültüye sebebiyet vermektedir [21].

### **3.3.1.2. İki kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri**

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 ila 100 m rotor çaplı ölçülerde türbinler tasarlanıp, Avrupa ve ABD'de çalışmaya başlamıştır. Bu ticari türbinlerden sadece birkaç tanesi prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat maalesef iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için ilave teknik güç, maliyetin daha fazla artışına sebep olmaktadır. Kanat bağlantı noktalarının titreşimi azaltmak için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu kadran, rotor shaftına dikey ve iki rotor kanadına dik yerleştirilir. Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında en büyük avantajı; kanat uç hızlarının yüksek olmasıdır. Bu türbinlerin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgar hızlarında (3 m/s) çalıştırılması dezavantajıdır [21].



### 3.3.1.3. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi, dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, Kanat bağlantı göbeğinin içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70 m/s altında olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır. Küçük güçlü türbinlerde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde dönen rotorun devir sayısını  $1/n$  oranında arttıran dişliler kullanılır ve devreye girme hızına ulaşıncaya kadar, jeneratör boşa çalıştırılır [21].

### 3.3.1.4. Çok kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri

Çok Kanatlı türbinler rüzgar türbinlerinin ilk örnekleridir. Yıllarca sadece su pompalamasında kullanılan bu türbinler, bu işlemdeki moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Çok kanatlı türbinler düşük hızda çalışırlar. Türbin kanatlarının genişlikleri, rotor göbeğinden uçlara gidildikçe artım gösterir. Rotor mili, dişli kutusuna bağlanarak, jeneratör mili devir sayısı artırılır ve otomobillerde uygulama alanı bulan jeneratörler kullanılır. Bu türbinler, rotor düzleminin rüzgar hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de, türbin yönlendiricisi taşımaktadırlar [22].

Bu türbinlerin üstünlükleri şöyledir:

- Yerden yüksek oldukları için rüzgar hızları yüksektir.
- Verimi yüksektir.

- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekmez, bu yüzden ilk hareket motoruna ihtiyacı yoktur.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekmez [2].

Olumsuzlukları ise şöyledir:

- Jeneratör ve dişli kutusunun bulunduğu nasel isimli parça ile rotor kule üzerine yerleştirildiğinden kule masrafı vardır.
- Rüzgarı önden alan türbinlerde türbini rüzgar yönüne çevirmeye, dolayısıyla dümen sistemine ihtiyaç vardır.
- Parçaların bakım ve onarımı zordur.
- Elde edilen güç rotor göbeği seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha zordur [2].

### **3.3.2. Düşey eksenli rüzgar türbinleri**

Türbin mili düşeydir ve rüzgarın geliş yönüne diktir (Şekil 3.4). Bunda da güç üretimini kaldırma kuvveti sağlar. Savonius tipi, Darrieus tipi gibi çeşitleri vardır. Daha çok deney amaçlı üretilmiştir. Ticari kullanımı çok azdır [2].

Bu türbinlerin üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez, böylece kule masrafı olmaz.

- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye, dolayısıyla dmen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğr parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından nakledilmesi kolaydır [2].

Sakıncaları ise Őyledir:

- Yere yakın oldukları için alt noktalardaki rüzgar hızları dŖktr.
- Verimi dŖktr.
- alıŖmaya baŖlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir, bu yüzden ilk hareket motoruna ihtiyaı vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir, bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının deđiŖmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir [2].

### **3.3.2.1. Darrieus tipi dŖey eksenli rüzgar türbinleri**

Darrieus tipi dŖey eksenli rüzgar türbininde, dŖey Ŗekilde yerleŖtirilmiŖ iki tane kanat vardır (Ŗekil 3.4). Kanatlar genellikle türbin mili yaklaŖık olarak uzun ekseni olan bir elips oluŖturacak biçimde yerleŖtirilmiŖtir. Düz kanatlı olanlar da vardır. Kanatların içbükey ve dıŖbkey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluŖur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgar türbinlerinde, devir baŖına iki kere en yüksek tork elde edilir. Rüzgarın tek yönden estiği dŖnlrse; türbinin verdiği g, sinüsoidal bir eğri oluŖturur [2].



Şekil 3.4: Düşey eksenli Darrieus tipi bir rüzgar türbini [23]

### 3.3.2.2. Savonius tipi düşey eksenli rüzgar türbinleri

Savonius türbinleri, iki ya da üç adet kepçeye benzer kesitin birleşimi şeklindedir (Şekil 3.5). Farklı tasarımlar olmakla beraber en yaygını iki adet kepçenin bulunduğu durumdur ve S şeklini andıran bir görüntüsü vardır. Bu türbinlerde güç üretimini sağlayan kuvvet sürüklenme kuvvetidir. Rüzgar, içbükey kanat üzerinde türbülanslı bir yol izlediği ve burada dönel akışlar meydana geldiği için Savonius türbininin performansı düşer, bu nedenle elektrik üretiminde pek fazla kullanılmazlar. Daha çok su pompalama amaçlı, deneysel ve rüzgar ölçümlerinde kullanılan anemometre olarak kullanılırlar [2].

### 3.4. Kayıtlar:

En Büyük Kapasite : Enercon E126 (2007) 7,5 MW, 198 m yükseklik, 126 m çap

En Büyük Süpürme Alanı : Gamesa G10X (2009) 4,5 MW, 128 m çap

En Yüksek: Fuhrlander Wind Turbine Laasow : Göbek yüksekliği 160 m, yükseklik 205 m

En büyük DERT - VAWT : Eole : 110 m 3,8 MW

En üretken : Danimarka Ronland Rüzgar Tarlasındaki 4 türbinin herbiri Haziran 2010 itibariyle 63,2 GWh enerji üretmiştir.

En Yüksekçe kurulan: Arjantinde And Dağlarında 4100 m'de. Altın madenine elektrik sağlıyor.[6]



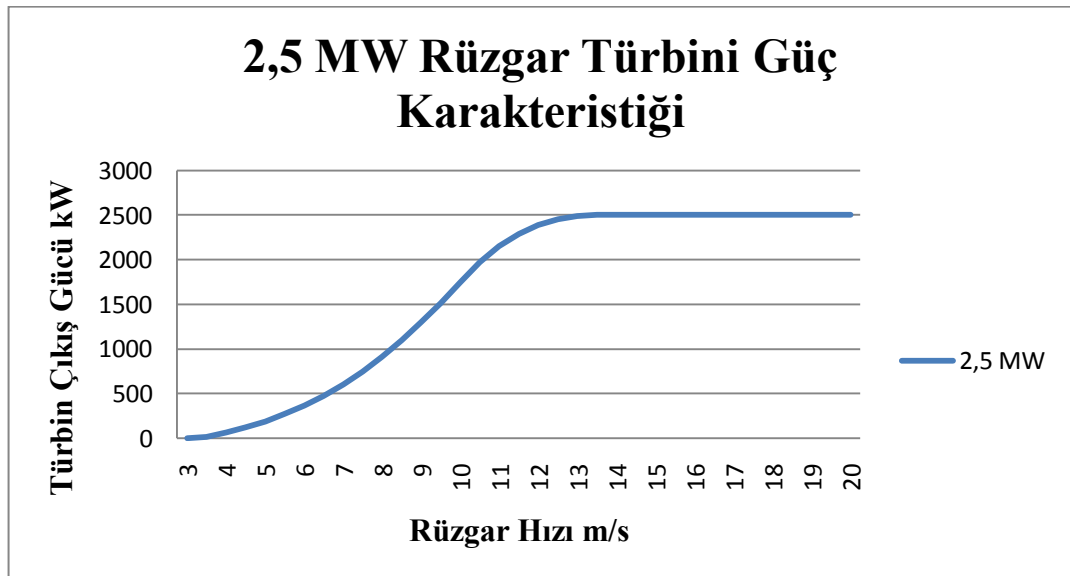
Şekil 3.5: Savonius tipi rüzgar türbini [24]

## 4. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ (YERT)

### 4.1. Tanım ve Çalışma Prensibi:

Yatay Eksenli bir rüzgar türbini genel olarak kule, jeneratör, dişli kutusu (hız dönüştürücüleri), elektrik-elektronik elemanlar ve rotordan oluşur. Rüzgarın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır [2].

Firmalar ürettikleri türbinlere ait güç karakteristiği eğrilerini hazırlayarak türbinin hangi koşullar için uygun olduğunun daha iyi anlaşılmasını sağlarlar. Şekil 4.1'de 2,5 MW'lık bir rüzgar türbini için güç eğrisi örnek olarak gösterilmiştir.

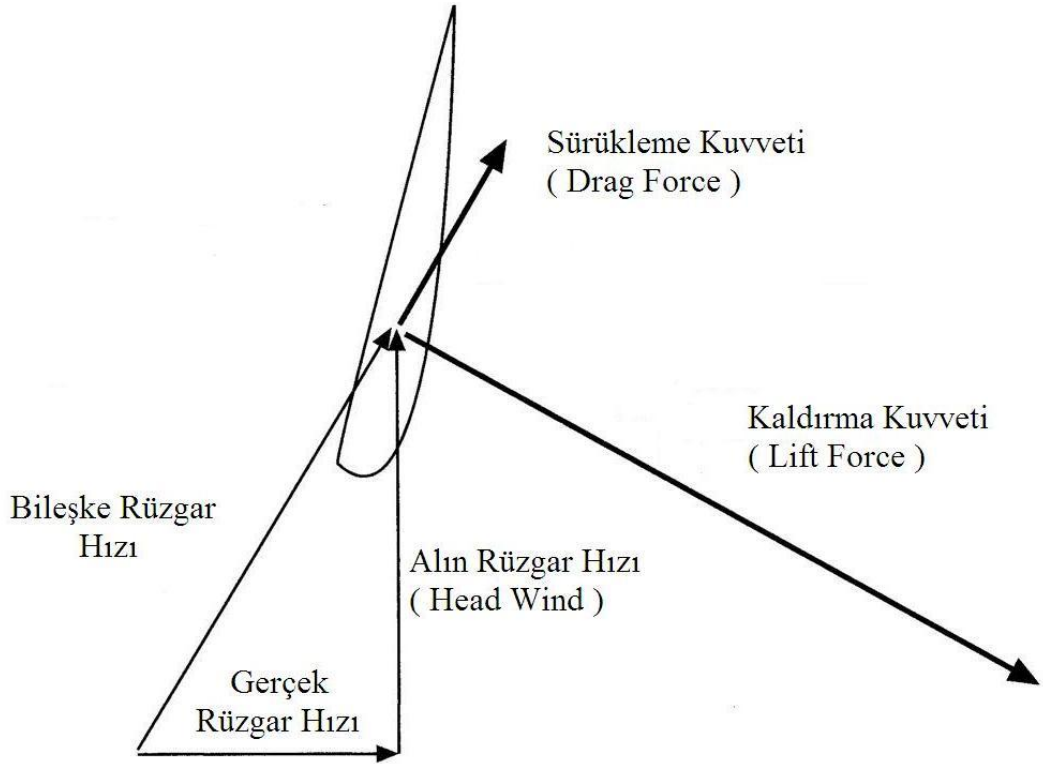


Şekil 4.1: 2,5 MW'lık bir rüzgar türbinine ait güç grafiği [25]

Yatay eksenli türbinlerin rotorları tek kanatlı olabileceği gibi iki ve daha fazla kanattan da oluşabilir. Günümüzde en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır. Bu türbinler elektrik üretmek için kullanılır. Geçmişte çok kanatlı türbinler tahıl öğütmek, su pompalamak ve ağaç kesmek için kullanılmıştır [2].

#### 4.2. Kanada Etkiyen Aerodinamik Kuvvetler:

Bu türbinler güç üretimini kanatlarına rüzgar tarafından uygulanan kaldırma kuvveti sayesinde gerçekleştirirler (Şekil 4.2). Bu kuvvetin dönme düzlemindeki bileşeni dönme eksenini etrafında tork oluşturarak güç üretimini sağlar [20].



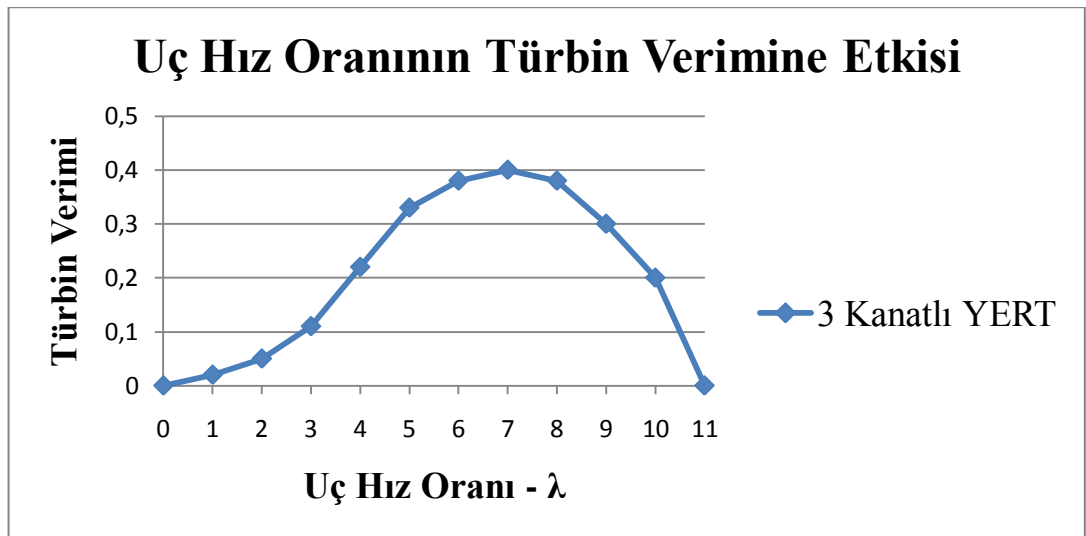
Şekil 4.2: Kanada etkiyen kuvvetler [20]

### 4.3. Hız Kontrolü

Bu türbinlerin yüksek rüzgar hızlarında zarar görmemesi için kanat açısının değiştirildiği aktif pitch veya türbülans nedeniyle gücün kesildiği pasif stall yöntemlerinden biri kullanılır [2].

### 4.4. Uç Hız Oranı

Bu türbinlerde kanatlar rüzgara dik düzlemde döndükleri için karşılaştıkları rüzgar hızı normal rüzgar hızıyla kanadın çizgisel hızının vektörel birleşimiyle belirlenir. Çizgisel hız da dönme eksenine olan uzaklıkla orantılı olduğundan kanat eksenini boyunca merkezden kanat ucuna doğru bileşke rüzgar hızı artar. Bu nedenle bu türbinlerde en fazla güç, kanadın uca yakın kısmından elde edilir. Kanat uç hızının normal rüzgar hızına oranına Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio) denir. Bu oran türbine ait karakteristik bir oran olup türbinin güç katsayısını ve oluşan ses şiddetini belirlemesi nedeniyle önemlidir. Şekil 4.3'te 3 kanatlı YERT için uç hız oranının türbin verimine etkisi gösterilmiştir [1,20].

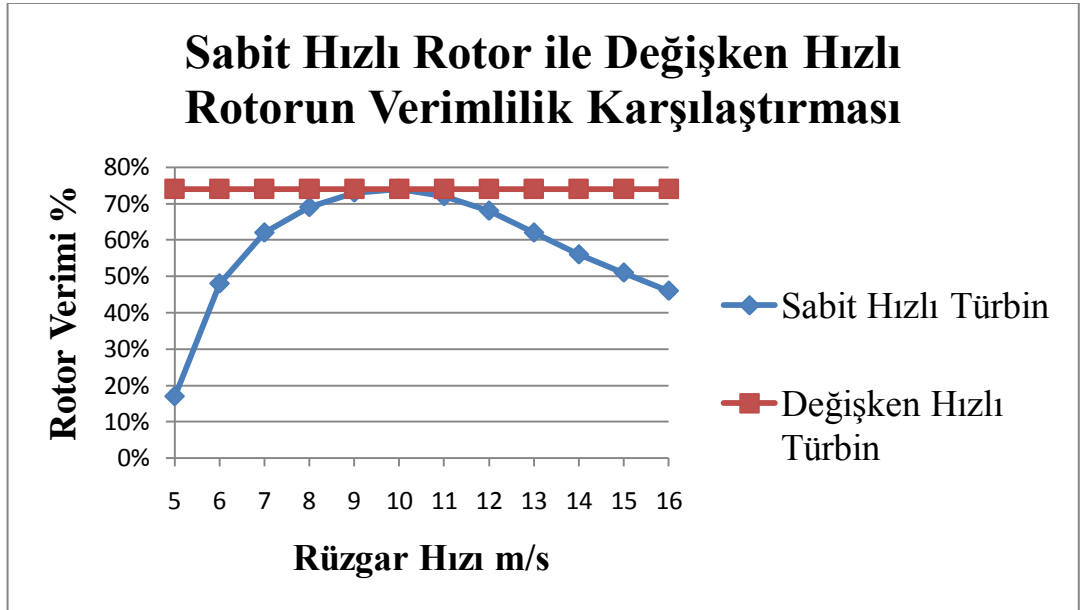


Şekil 4.3: 3 Kanatlı YERT için uç hız oranının türbin verimine etkisi [20]



#### 4.5. Çalışma Devir Karakteri

Bu türbinlerin çalışma devirleri de önemlidir. Bazı türbinler sabit devirde çalışırken diğerleri değişik devirlerde çalışır. Sabit devirde çalışanlar daha ucuzdurlar ve belli bir rüzgar hızında maksimum verimlerini elde ederler. Rüzgar hızındaki değişiklik güçte ciddi bir düşüşe neden olduğundan bu türbinler rüzgar hızının genellikle aynı değerlerde olduğu durumlarda tercih edilirler. Değişken devirli olanlar daha pahalı olmakla birlikte rüzgar hızındaki değişiklikten etkilenmeden hep aynı verimliliği gösterirler. Şekil 4.4'te sabit hızlı rotor ile değişken hızlı rotorun verimlilik karşılaştırması gösterilmiştir [1,9,26].

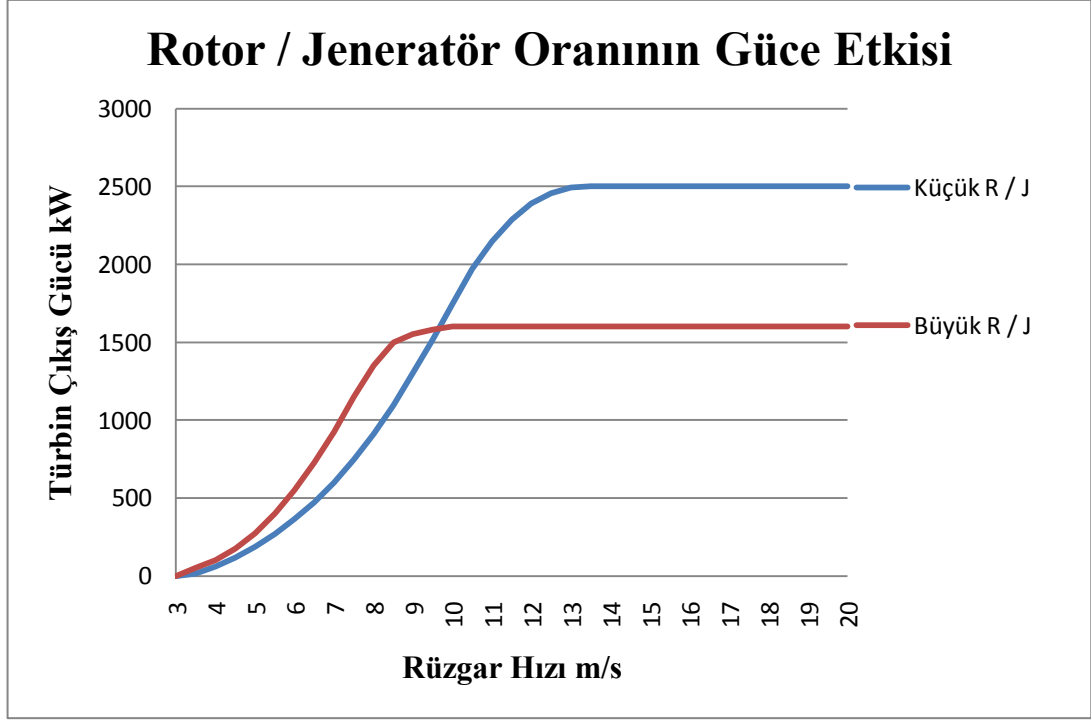


Şekil 4.4: Sabit hızlı rotor ile değişken hızlı rotorun verimlilik karşılaştırması [26]

#### 4.6. Rotor / Jeneratör Oranı

Başka bir faktör de rotor / jeneratör oranıdır. Bu oranın büyük olması durumunda türbin düşük rüzgar hızlarında verimli çalışırken oranın küçük olması durumunda

yüksek rüzgar hızlarında verimli çalışır. Şekil 4.5'te rotor / jeneratör oranının güce etkisi gösterilmiştir [9,26].



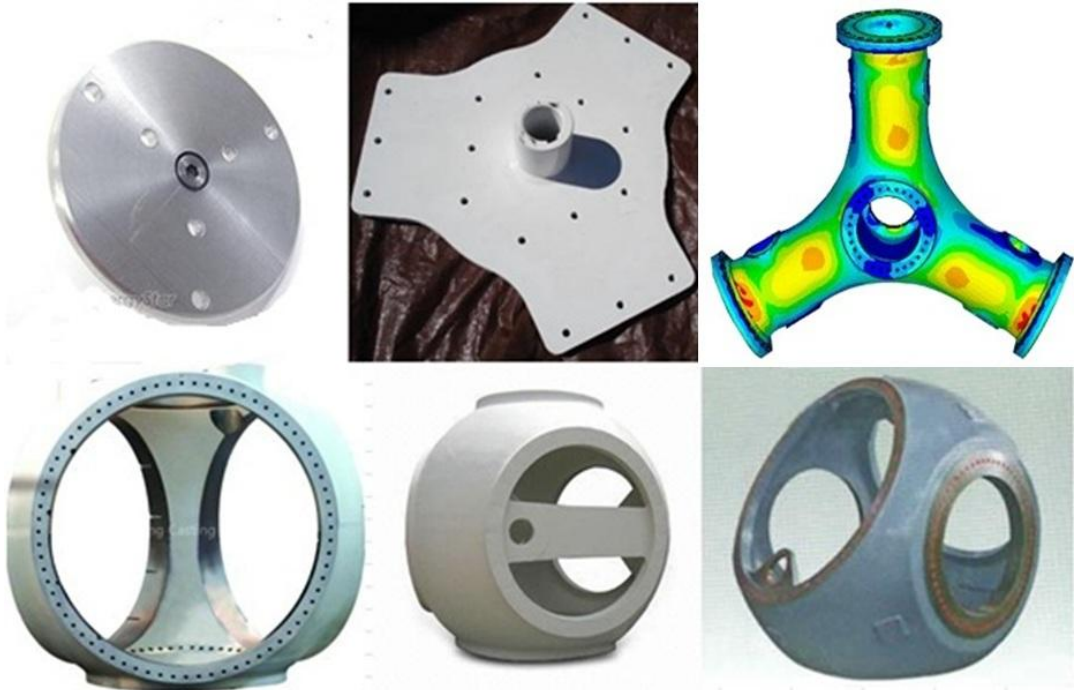
Şekil 4.5 : Rotor / Jeneratör oranının güce etkisi [26]

#### 4.7. İlave Bilgiler

Dünyada ortalama türbin büyüklüğü ve kapasite faktörleri artmaktadır. Türbinlerin bakım ve işletme maliyetleri azalmaktadır. Ortalama olarak 1 MW lık bir türbin için toplam 1000000 \$ lık bir maliyet ortaya çıkmaktadır. 20 – 30 yıllık ömürleri vardır. Eski türbinlerin yerine daha modern olanlar kurulmaktadır. Bu işleme repowering (güçlendirme) denilmektedir. Önümüzdeki dönemde güçlendirme pazarının yeni kurulum pazarından daha önemli olması beklenmektedir. Bu türbinler metal sanayisi için de çok önemlidir. Ortalama olarak MW başına 114 ton çelik, 8,4 ton fiberglass, 1,4 ton bakır ve 0,8 ton mıknatıs kullanılmaktadır. Ayrıca MW başına 4,3 kişiye iş imkanı sağlanmaktadır [27,28].

## 5. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN GÖBEĞİ

Rüzgar türbininde kanatların bağlandığı parçaya göbek (hub) denir. Türbin göbeği kanatlardan aldığı gücü transmisyon mili aracılığıyla jeneratöre iletilir. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi plaka, boru ve küre gibi farklı geometrik şekillerde olabilmektedir. Küçük güçlü (1 – 10 kW) ev tipi türbinlerde plakadan imal edilirken büyük güçteki (>100 kW) sanayi tipi türbinlerde boru ve küre ve geometrileri ile bunların uygun birleşimlerinden imal edilmektedir. Türbin kanatları küçük güçlerde göbeğe vidalanırken daha büyük güçlerde flanşlı bağlantı veya yuvarlanmalı yatak kullanılmaktadır. Yuvarlanmalı yatak bağlantısı kanadın döndürülebilmesine izin verdiği için büyük türbinlerde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.



Şekil 5.1 : Rüzgar Türbin Göbeği örnekleri [29-34]

Türbin göbeği çalışması süresince pekçok değişken kuvvetin etkisinde kaldığından tasarım ve üretimine çok önem vermek gerekmektedir. Türbin göbeğinin tasarımının yorulmaya göre yapılması gerekmektedir. Bu nedenle kaynaklı tasarımlar genellikle uygulanamamaktadır. Özellikle küresel geometrili göbeklerin karmaşık geometrileri ve kaynaklı tasarımların uygunsuzluğundan dolayı bu tür göbeklerde döküm işlemi tercih edilmektedir. Normal dökme demirlerde, artan karbon oranına bağlı olarak ergime sıcaklığının düşmesinin döküm işlemini kolaylaştırması ve ekonomikləştirmesi nedeniyle döküme katılmış olan karbon atomları, katılma sırasında demir içersinde yayılı grafit taneleri şeklinde kümelenmektedirler. Bu taneler demir içersinde süreksizliğe neden olmaktadır. Grafitin basma dayanımı çok iyi olduğundan dökme demirin de basma dayanımı çok iyi olmaktadır. Ancak grafit tanelerinin, özellikle tabaka şeklinde olanların, neden olduğu süreksizlik nedeniyle çekme kuvvetleri altında malzemede gerilme yığılmaları oluştuğundan dökme demirin çekme dayanımı çeliğe kıyasla çok düşük kalmaktadır. Bunu giderebilmek için gerilme yığılmalarını azaltmak gerektiğinden ve bunun için de büyük kısmı tabaka şeklinde olan grafit tanelerinin olabildiğince küreselleştirilmesi gerektiğinden dolayı döküm işlemine ağırlıklı olarak silisyum olmak üzere çeşitli alaşım elementleri eklendikten sonra katılmayı takiben yaklaşık 24 saatlik bir ısıtma işlemi grafit tanelerinin küreselleşmesi sağlanmaktadır. Bu malzemeye de Küresel Grafitli Dökme Demir denmektedir. İyileştirilmiş çekme dayanımı ve yüksek yorulma dayanımı nedeniyle otomotiv endüstrisinde yaygın bir biçimde kullanılan malzeme son zamanlarda rüzgar türbinlerindeki gelişmelere bağlı olarak bu alanda da kendine ciddi yer bulmaktadır [35].

## 6. GÖBEK YORULMA ANALİZİ

Göbeğin sonlu elemanlar yöntemiyle yorulma analizinin yapılabilmesi için öncelikle göbeğe ait tüm bilgilerin bulunabilmesi için piyasada varolan türbinler üzerinden bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada önce 1 – 5000 kW güç aralığındaki yatay eksenli rüzgar türbinlerinin teknik değerleri toplanmış daha sonra da bu değerlere uygun formüller Denklem 6.1 - 4'te yaklaşık olarak ifade edilmiştir [36,37].

$$D = (P/5000)^{0,457} * 126000 \quad (6.1)$$

$$n = (5000/P)^{0,544} * 10 \quad (6.2)$$

$$m_k = P * 2 \quad (6.3)$$

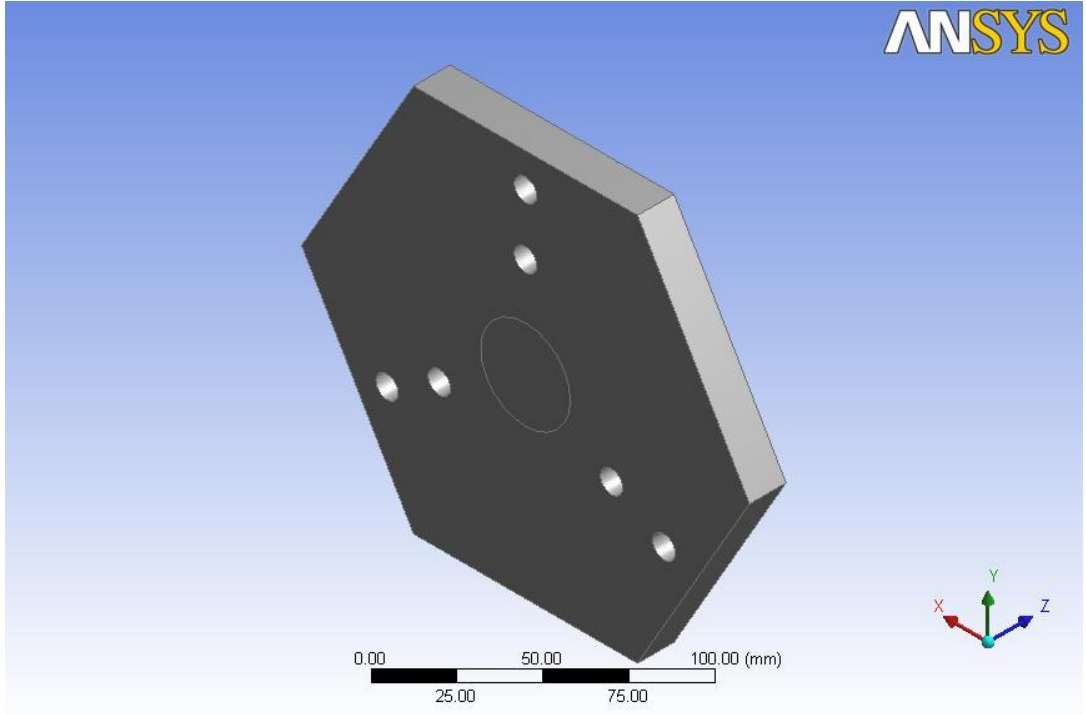
$$d = D/40 = (P/5000)^{0,457} * 3150 \quad (6.4)$$

Sonra bu ifadeler yardımıyla 10 – 500 kW güç aralığındaki yatay eksenli rüzgar türbinleri için teknik özellikler tablosu hazırlanmıştır (Tablo 6.1).

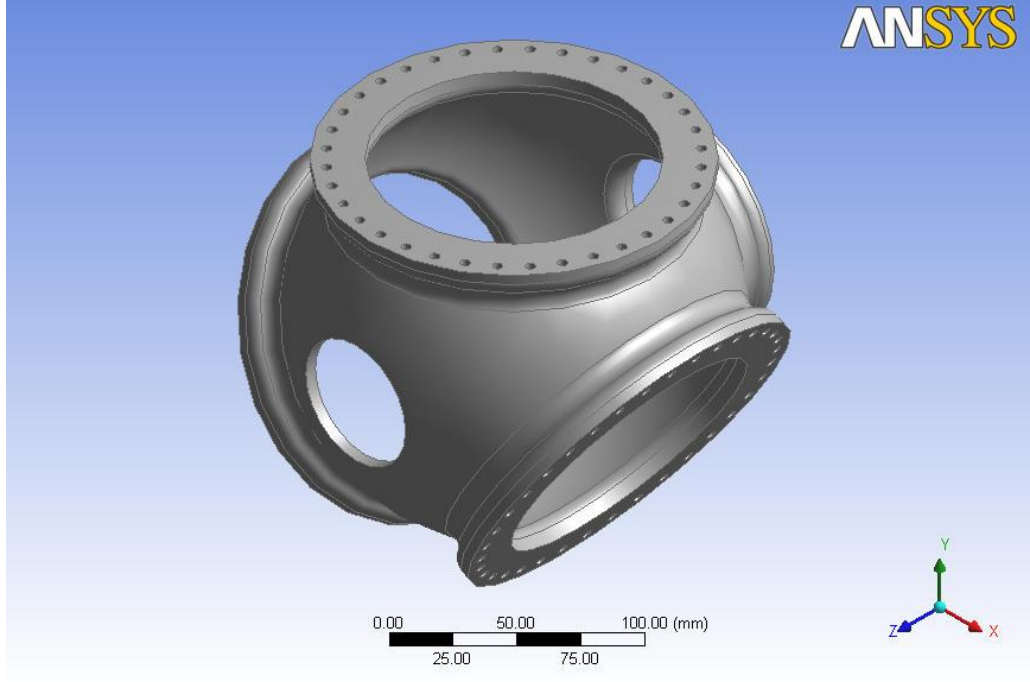
Tablo 6.1: 10 – 500 kW güç aralığındaki YERT teknik değerleri

Ölçü Adı	Simge	Birim	Değerler					
Türbin Gücü	P	kW	10	20	50	100	200	500
Rotor Çapı	D	mm	7361	10104	15359	21083	28941	43992
Rotor Devri	n	d/d	294	202	122	84,0	57,6	35,0
Rotor Açısal Hızı	$\omega$	rad/s	30,8	21,1	12,8	8,8	6,0	3,7
Kanat Kütle	$m_k$	kg	20	40	100	200	400	1000
Kanat Kütle Merkezi Uzaklığı	l	mm	1227	1684	2560	3514	4823	7332
Göbek Çapı	d	mm	184	253	384	527	724	1100

Tablo 6.1'den alınan göbek çapı değeri yardımıyla bilgisayar ortamında bir adet plaka göbek (Şekil 6.1), bir adet de küresel göbek (Şekil 6.2) katı modeli oluşturulmuştur. Model geometrilerinin belirlenebilmesi için piyasada var olan rüzgar türbin göbekleri örnek alınmıştır. Modelleme ANSYS Workbench Design Modeler ile yapılmıştır.



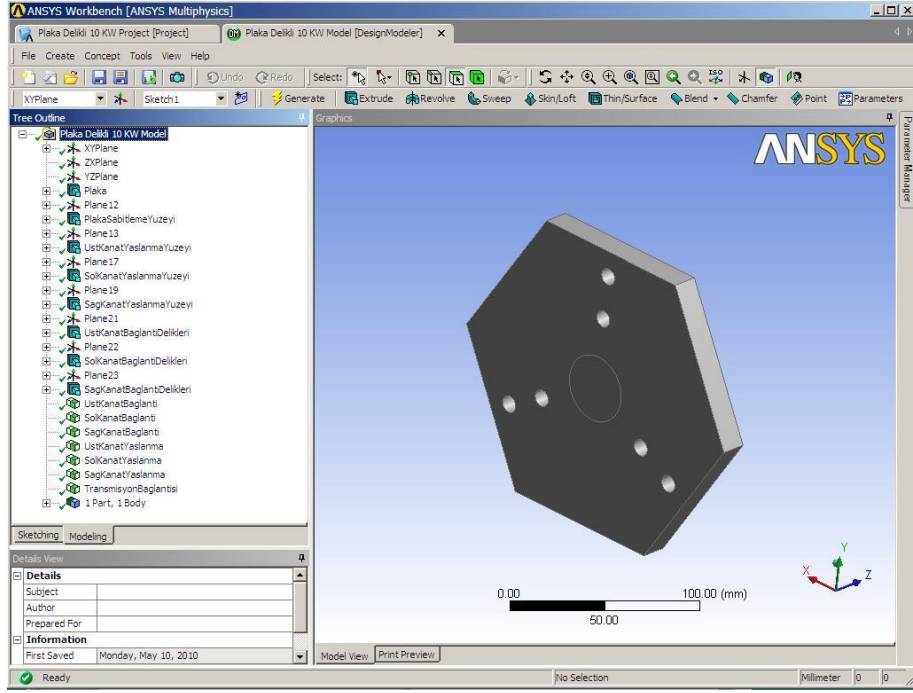
Şekil 6.1: Plaka göbek katı modeli



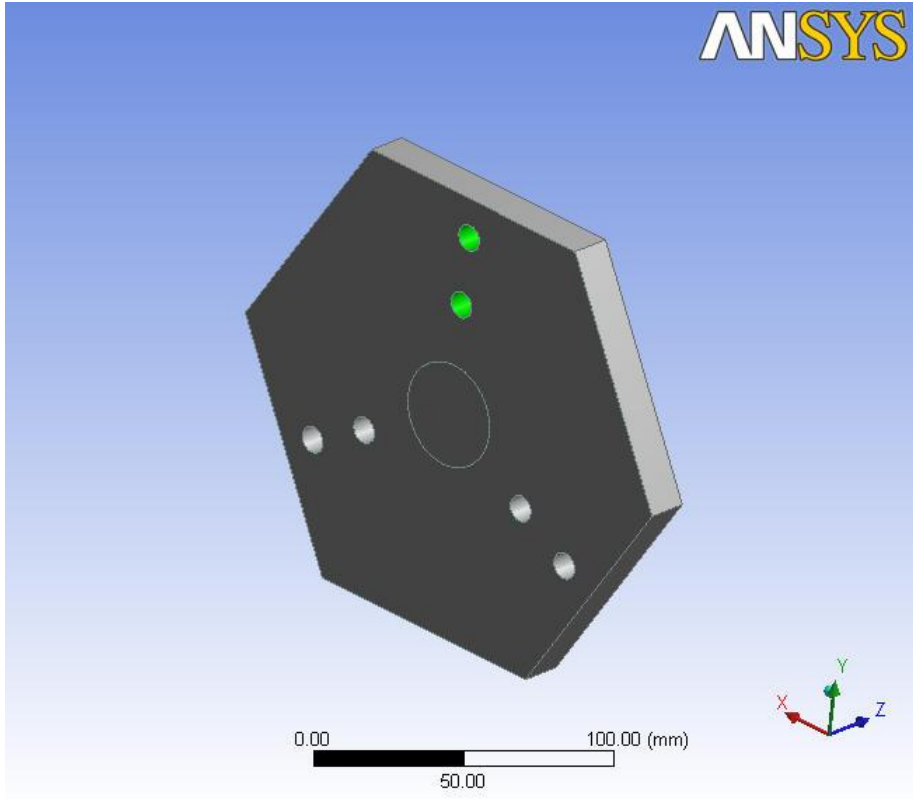
Şekil 6.2 : Küresel göbek katı modeli

Optimizasyon işleminde kullanılacak bağımsız değişkenler olarak göbek çapı (hub diameter) ve göbek kalınlığı (thickness) seçildiğinden diğer boyutlar bağımlı değişken olarak atanmışlardır. Bu sayede farklı güçlerdeki türbinlerin analizinde yapılabilecek herhangi bir uzunluk hatasının önüne geçilmiştir. Plaka göbekte en büyük köşegen uzunluğu göbek çapı olarak seçilirken küresel göbekte kanat bağlantı yerindeki geometri dikkate alınmadan kürenin çapı göbek çapı olarak belirlenmiştir.

Analiz işleminde işleri kolaylaştırmak için kuvvetlerin uygulanacağı yüzeyler Workbench'te named selections (Şekil 6.3-8) ile gruplandırılmıştır.

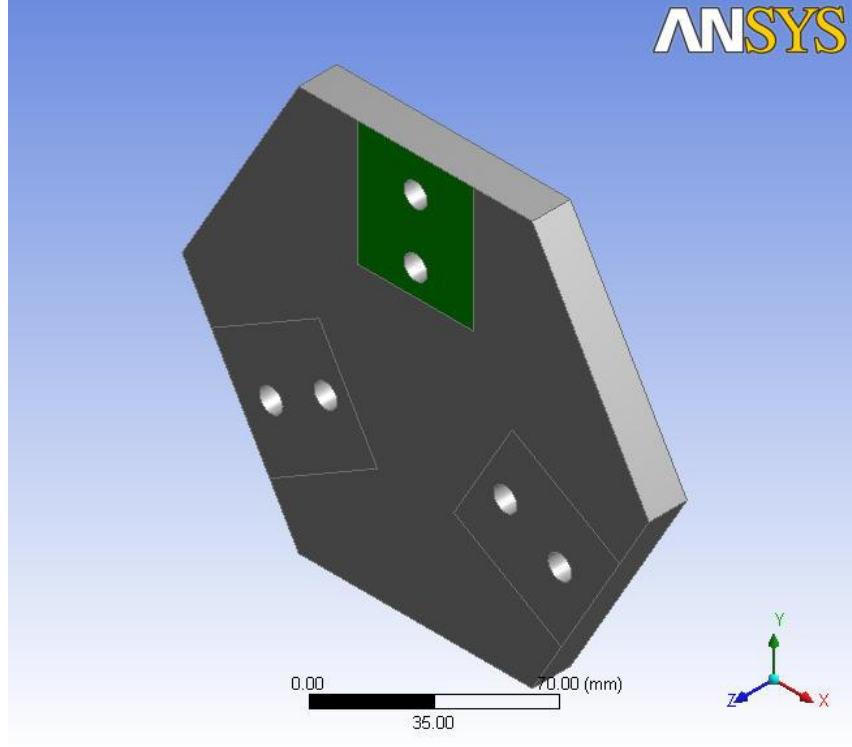


Şekil 6.3: Named selections seçimi

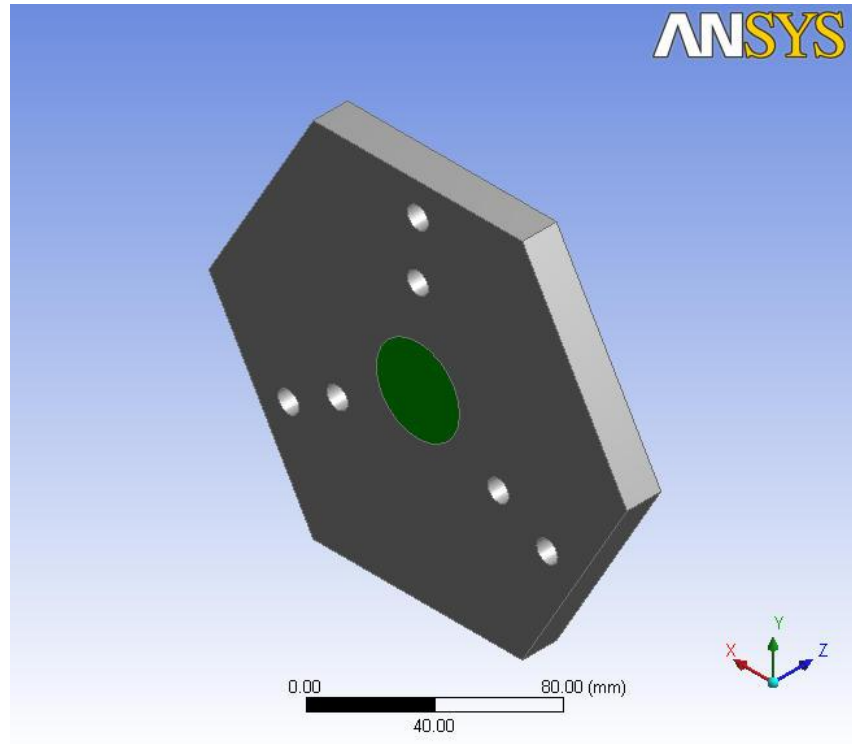


Şekil 6.4: Plaka göbük bağlantı yüzeyleri

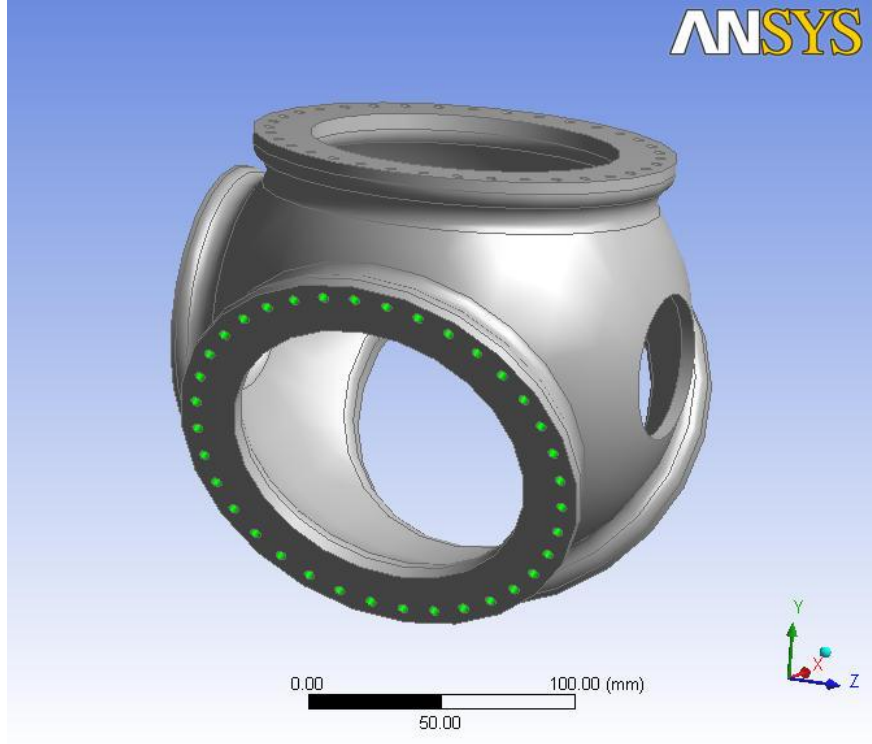




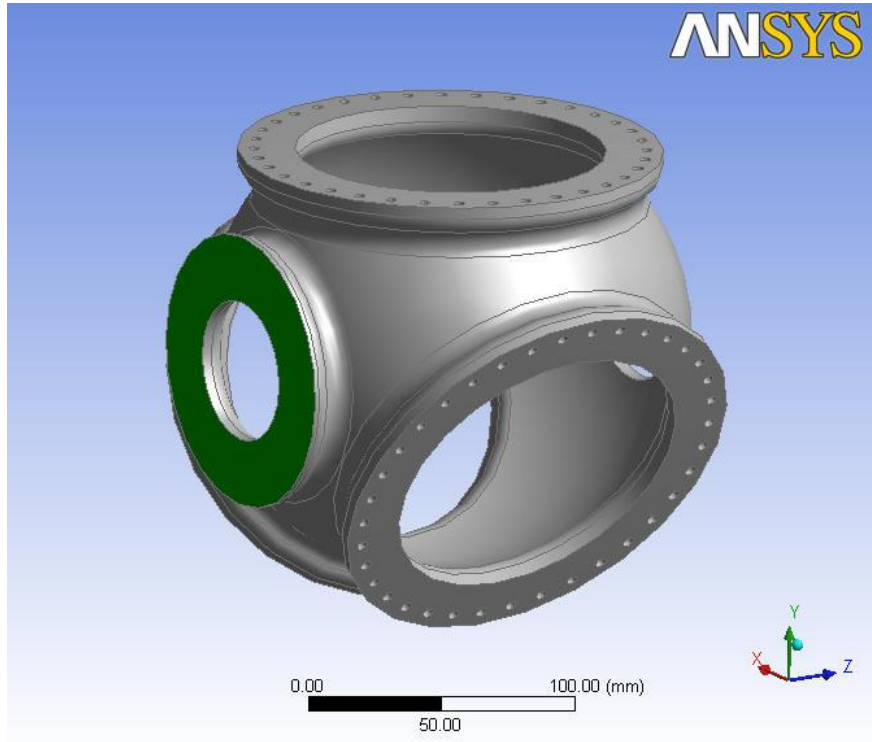
Şekil 6.5: Plaka göbek yaslanma yüzeyi



Şekil 6.6: Plaka göbek transmisyon bağlantı yüzeyi










Şekil 6.7: Küresel göbek bağlantı yüzeyi



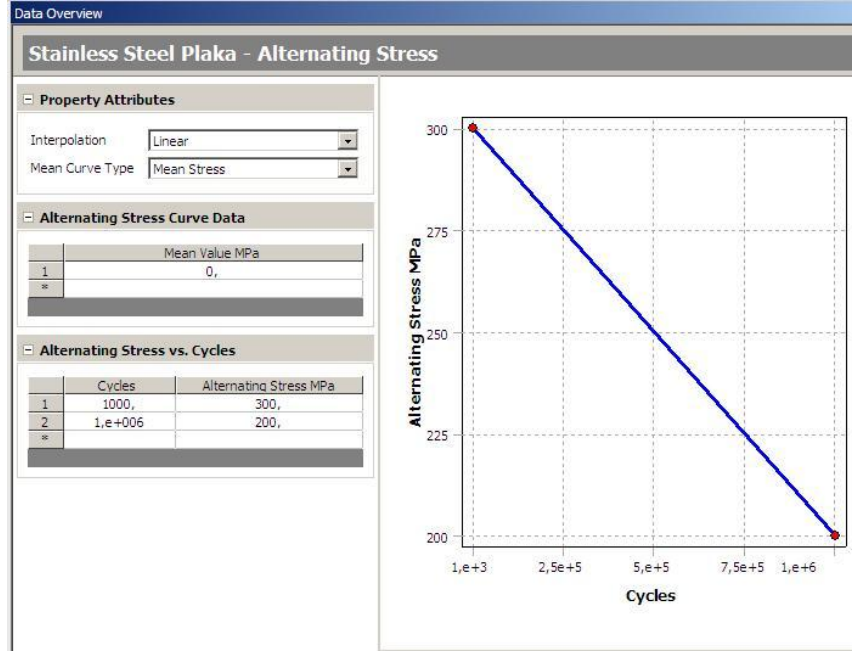
Şekil 6.8: Küresel göbek transmisyon yüzeyi

## 6.1. Yorulma Analizinin Yapılması

Önce araştırmayla bulunan malzeme özellikleri uygulanmıştır. Plaka göbek için paslanmaz çelik (Şekil 6.9, 6.10) kullanılırken küresel göbek için küresel grafitli dökme demir malzeme olan EN GJS 400 18-LT (Şekil 6.11, 6.12) kullanılmıştır [38,39].

Data Overview		
Stainless Steel Plaka		
<b>Structural</b> Add/Remove Properties		
<input type="checkbox"/> Young's Modulus	1,93e+005 MPa	
<input type="checkbox"/> Poisson's Ratio	0,31	
<input type="checkbox"/> Density	7,75e-006 kg/mm	
<input type="checkbox"/> Thermal Expansion	1,7e-005 1/°C	
<input type="checkbox"/> Alternating Stress		
<input type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	207, MPa	
<input type="checkbox"/> Compressive Yield Strength	207, MPa	
<input type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	586, MPa	
<input type="checkbox"/> Compressive Ultimate Strength	0, MPa	
<b>Thermal</b> Add/Remove Properties		
<input type="checkbox"/> Thermal Conductivity	1,51e-002 W/mm·°C	
<input type="checkbox"/> Specific Heat	480, J/kg·°C	
<b>Electromagnetics</b> Add/Remove Properties		
<input type="checkbox"/> Relative Permeability	10000	
<input type="checkbox"/> Resistivity	7,7e-004 Ohm·mm	

Şekil 6.9: Paslanmaz çelik malzeme özellikleri



Şekil 6.10: Paslanmaz çelik malzeme özellikleri 2

Data Overview

### EN GJS 400 18 LT

**Structural** Add/Remove Properties

<input type="checkbox"/> Young's Modulus	1,69e+005 MPa	
<input type="checkbox"/> Poisson's Ratio	0,275	
<input type="checkbox"/> Density	7,1e-006 kg/mm <sup>3</sup>	
<input type="checkbox"/> Thermal Expansion	1,1e-005 1/°C	
<input type="checkbox"/> Alternating Stress		
<input type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	0, MPa	
<input type="checkbox"/> Compressive Yield Strength	0, MPa	
<input type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	400, MPa	
<input type="checkbox"/> Compressive Ultimate Strength	820, MPa	

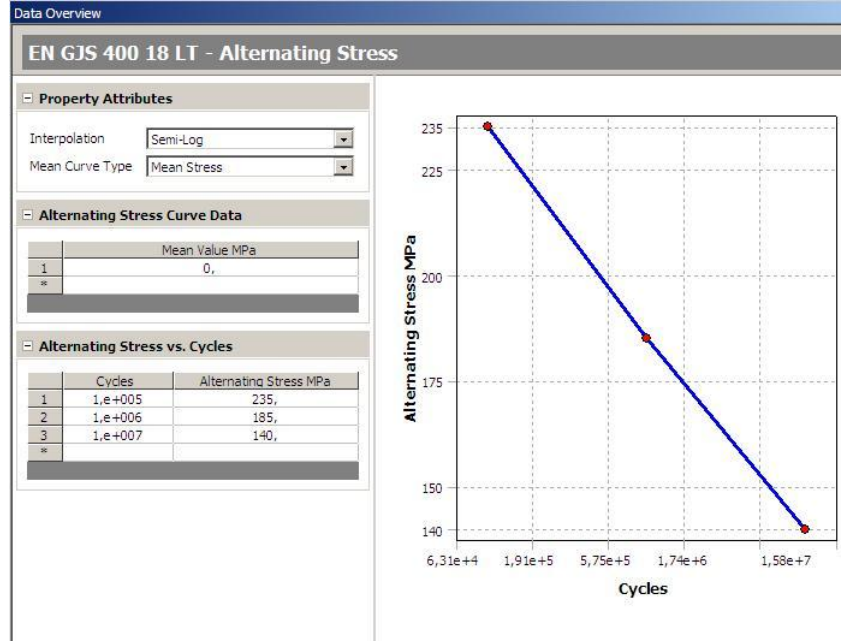
**Thermal** Add/Remove Properties

<input type="checkbox"/> Thermal Conductivity	5,2e-002 W/mm·°C	
<input type="checkbox"/> Specific Heat	447, J/kg·°C	

**Electromagnetics** Add/Remove Properties

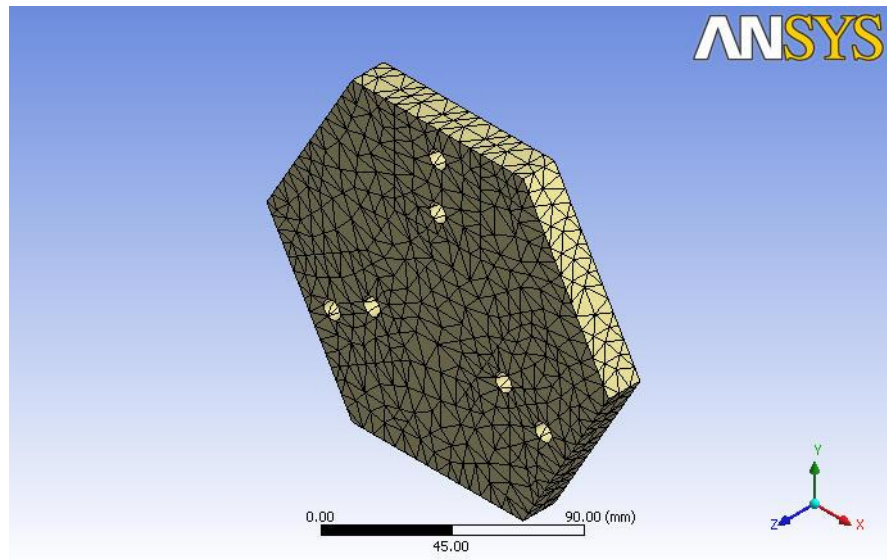
<input type="checkbox"/> Relative Permeability	10000
<input type="checkbox"/> Resistivity	9,6e-005 Ohm·mm

Şekil 6.11: EN GJS 400 18-LT Küresel grafitli dökme demir malzeme özellikleri



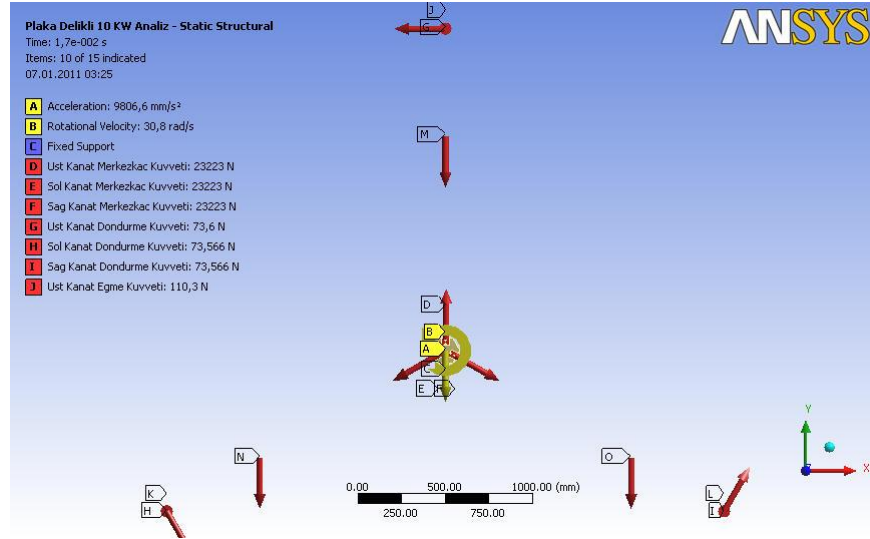
Şekil 6.12: EN GJS 400 18-LT Küresel grafitli dökme demir malzeme özellikleri 2

Mesh işlemi Workbench'te varsayılan ayarlarla yapılmıştır (Şekil 6.13). Plaka göbekler için düğüm sayısı yaklaşık 2000 iken eleman sayısı yaklaşık 900'dür. Küresel göbekler için ise düğüm sayısı yaklaşık 30000 iken eleman sayısı yaklaşık 14000'dir.

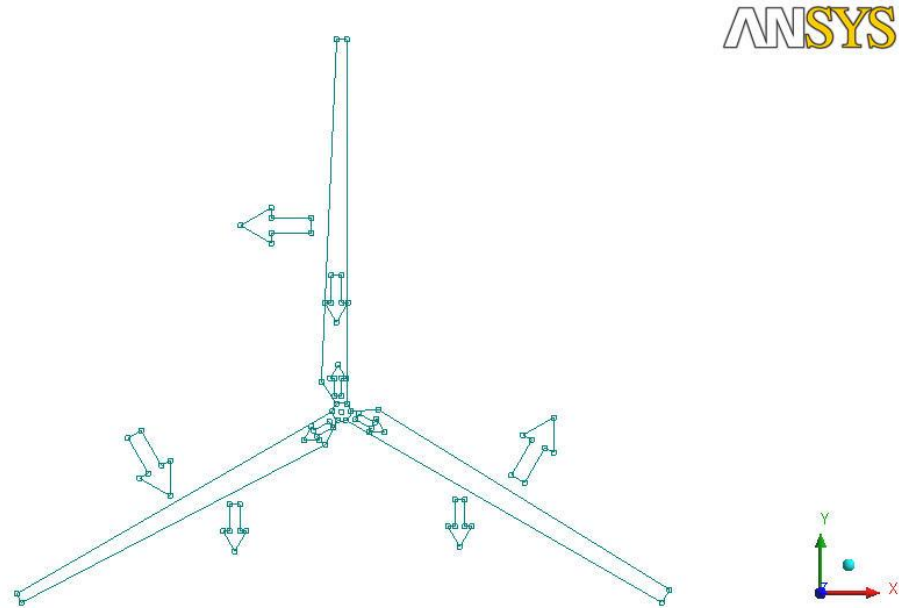


Şekil 6.13: Meshing

Analiz işlemi için ana koordinat sistemi olarak göbeğin koordinat sistemi (Şekil 6.14, 6.15) seçilmiştir. Bu sayede göbekte beraber dönen dinamik kuvvetlerin temsilinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Sadece ağırlık kuvvetleri rüzgar türbin koordinat sistemine göre statik iken göbek koordinat sistemine göre tam değişken olmuşlardır.



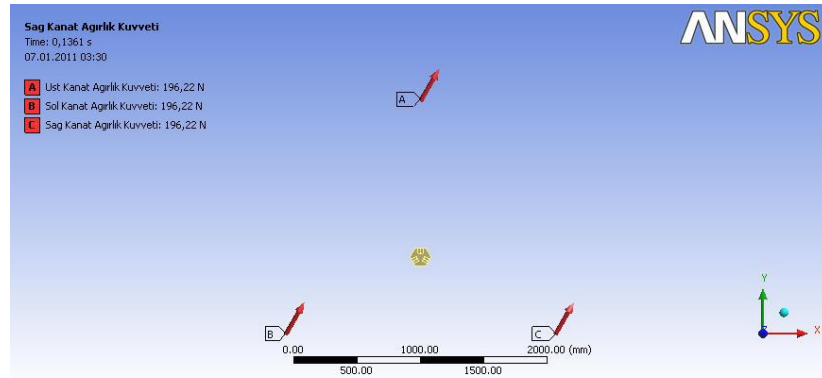
Şekil 6.14: Koordinat sistemi ve kuvvetler



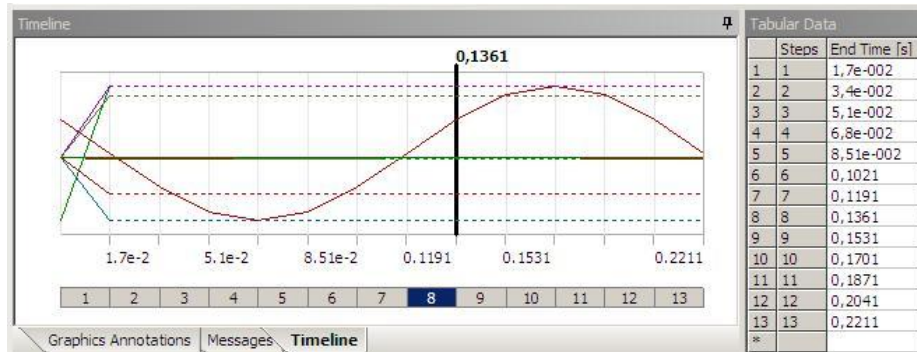
Şekil 6.15: Koordinat sistemi ve kuvvetler 2



Ağırlık kuvvetlerinin doğru ve yönlerinin göbeğin o andaki kendi eksenine etrafındaki dönme miktarına bağlı olması ve göbeğin dönme miktarının da dönme hızı ve zamana bağlı olması nedeniyle ağırlık kuvvetlerinin doğru ve yönleri Şekil 6.16'da görüldüğü gibi dönme hızı ve zamana bağlı olmaktadır. Analizde dönme hızı araştırmayla herbir türbin için ayrı olarak belirlenmiş bir sabit değer olarak alındığı için ağırlık kuvvetleri herhangi bir güç değeri için zamana bağlı bir fonksiyon olmaktadır. Workbench'te optimizasyon çalışmasında zamana bağlı fonksiyonların kullanımına izin verilmemesinden dolayı ağırlık kuvvetlerinin uygulanmasında tablolardan yararlanılmıştır. Bunun için de analiz işlemi 1 adet başlangıç adımı ve göbeğin 30° lik dönüşünü temsil eden 12 adet ilave adım olmak üzere toplam 13 adımlı (Şekil 6.17) yapılmıştır. Herbir adımın bitiş süreleri de ilgili türbinin dönme periyodu kullanılarak bulunup bir tablo olarak kaydedilmiştir (Tablo 6.2).



Şekil 6.16: Ağırlık kuvvetleri



Şekil 6.17: Analiz adımları

Tablo 6.2: Adım zamanları

Ölçü	Birim	Türbinler					
		10	20	50	100	200	500
Türbin Gücü	kW	10	20	50	100	200	500
Rotor Devri	d/d	294	202	122	84,0	57,6	35,0
Rotor Açısal Hızı	rad/s	30,8	21,1	12,8	8,8	6,0	3,7
Rotor Periyodu	s	0,2041	0,2976	0,4899	0,7144	1,0415	1,7146
1. Adım bitiş zamanı	s	0,0170	0,0248	0,0408	0,0595	0,0868	0,1429
2. Adım bitiş zamanı	s	0,0340	0,0496	0,0817	0,1191	0,1736	0,2858
3. Adım bitiş zamanı	s	0,0510	0,0744	0,1225	0,1786	0,2604	0,4286
4. Adım bitiş zamanı	s	0,0680	0,0992	0,1633	0,2381	0,3472	0,5715
5. Adım bitiş zamanı	s	0,0851	0,1240	0,2041	0,2976	0,4340	0,7144
6. Adım bitiş zamanı	s	0,1021	0,1488	0,2450	0,3572	0,5208	0,8573
7. Adım bitiş zamanı	s	0,1191	0,1736	0,2858	0,4167	0,6076	1,0002
8. Adım bitiş zamanı	s	0,1361	0,1984	0,3266	0,4762	0,6944	1,1430
9. Adım bitiş zamanı	s	0,1531	0,2232	0,3675	0,5358	0,7811	1,2859
10. Adım bitiş zamanı	s	0,1701	0,2480	0,4083	0,5953	0,8679	1,4288
11. Adım bitiş zamanı	s	0,1871	0,2728	0,4491	0,6548	0,9547	1,5717
12. Adım bitiş zamanı	s	0,2041	0,2976	0,4899	0,7144	1,0415	1,7146
13. Adım bitiş zamanı	s	0,2211	0,3224	0,5308	0,7739	1,1283	1,8574

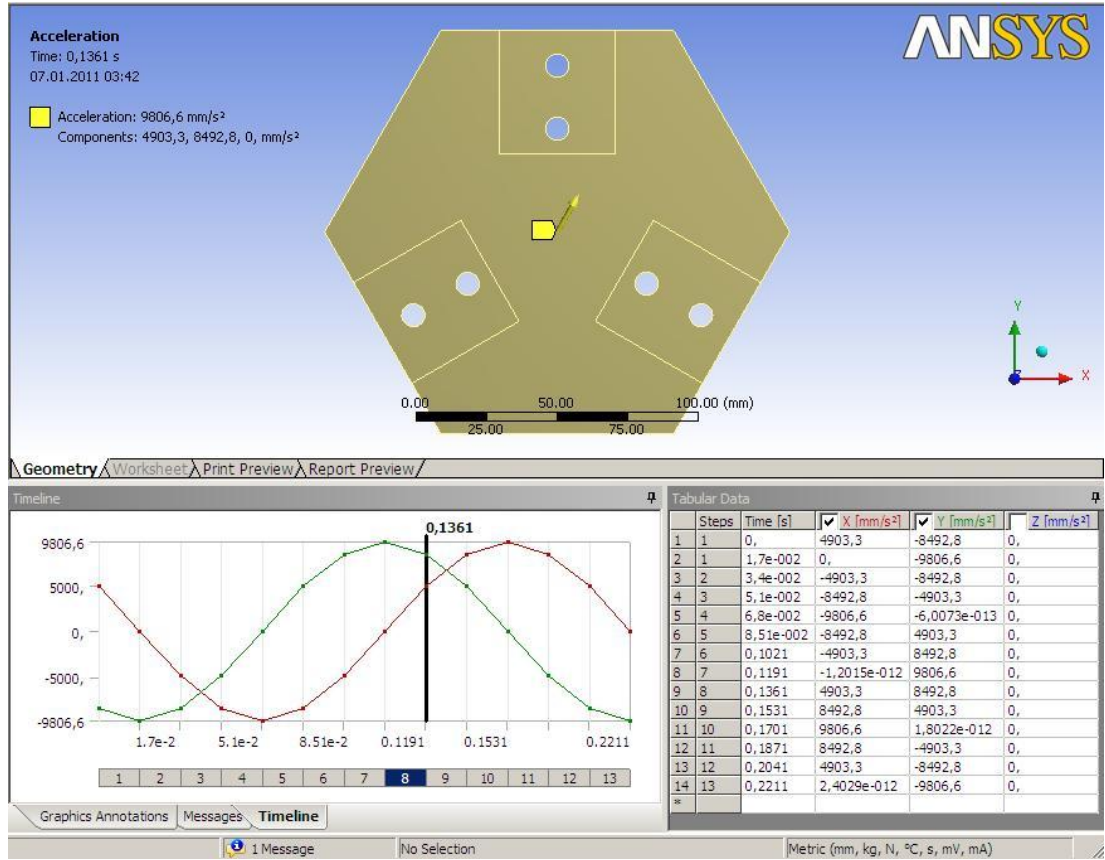
### 6.1.1. Uygulanan kuvvetler

Rüzgar türbinin çalışması süresince göbeğe çeşitli kuvvetler etkimektedir (Şekil 6.14, 6.15).

#### 6.1.1.1. Göbek ağırlığı

Göbeğin kendi kütesinden dolayı etkisi altında kaldığı kuvvettir. Normalde Workbench'te bu kuvveti uygulayabilmek için Standard Earth Gravity (Yerçekimi) eklenir. Ancak yapılan çalışmada göbek koordinat sistemi referans seçildiği için Standard Earth Gravity'nin dönmesinin de hesaba katılması gerekmiştir. Bu nedenle Standard Earth Gravity yerine probleme uygun bir ivme (Şekil 6.18) kullanılmıştır. Bu ivme, şiddeti sinüsoidal olarak değişen ve periyodu rüzgar türbininin periyoduyla aynı olan X ve Y eksenlerindeki iki bileşenle gösterilmiştir.

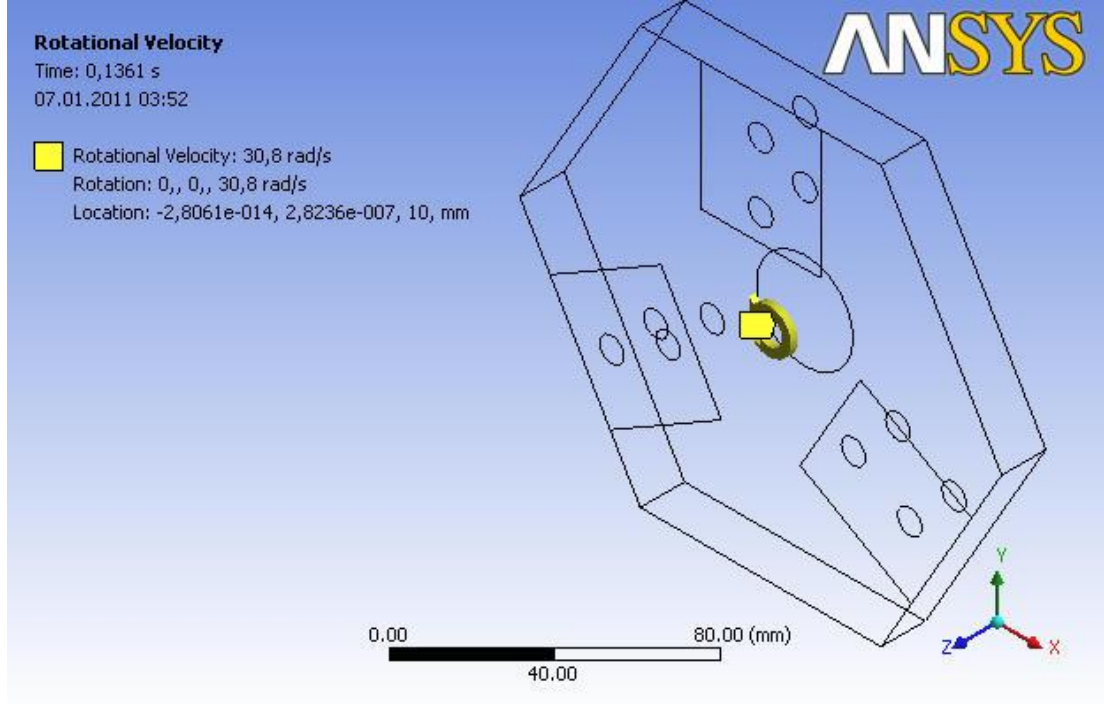




Şekil 6.18: Yerçekim ivmesi

### 6.1.1.2. Göbek merkezkaç kuvveti

Göbeğin sahip olduğu kütle ve eksenini etrafındaki dönüşünden dolayı etkisi altında kaldığı kuvvettir. Bu kuvvetin Workbench'te uygulanabilmesi için Inertial Loads'dan Rotational Velocity (Şekil 6.19) seçilmiştir. Türbin teknik özellikleri için hazırlanan tablodan (Tablo 6.1) ilgili türbine ait açısal hız değeri Workbench' te uygulanmıştır. Göbek dönme eksenini rüzgar türbin koordinat sisteminde sabit kaldığı için bu kuvvetle ilgili herhangi bir düzeltmeye gerek olmamıştır.

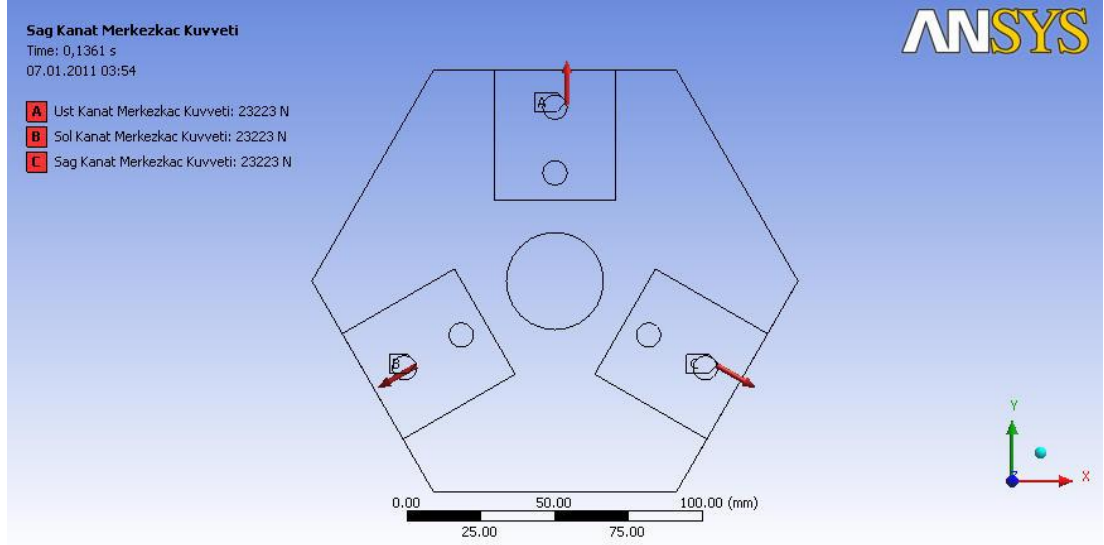


Şekil 6.19: Göbeğe uygulanan açısal hız.

### 6.1.1.3. Kanat merkezkaç kuvvetleri

Rüzgar türbininin çalışması süresince dönmeden dolayı kanatlarda oluşan kuvvetlerdir. Kanatlar göbek tarafından tutulduğu için bu kuvvetler göbeğe iletilir (Şekil 6.20). Kanat bağlantı yüzeylerinde etkiyen bu kuvvetler normalde dinamik olmalarına karşın dönüş hızının sabit olması ve analiz işlemi için seçilen koordinat sisteminin de kanatlarla beraber dönmesi dolayısıyla seçilen koordinat sisteminde statik olmuşlardır. Şiddetleri kanat kütlesi ve dönme hızına bağlı olan bu kuvvetler için Denklem 6.5 yardımıyla hazırlanan tablo (Tablo 6.3) kullanılarak ilgili türbine ait değerler uygulanmıştır.

$$(6.5)$$



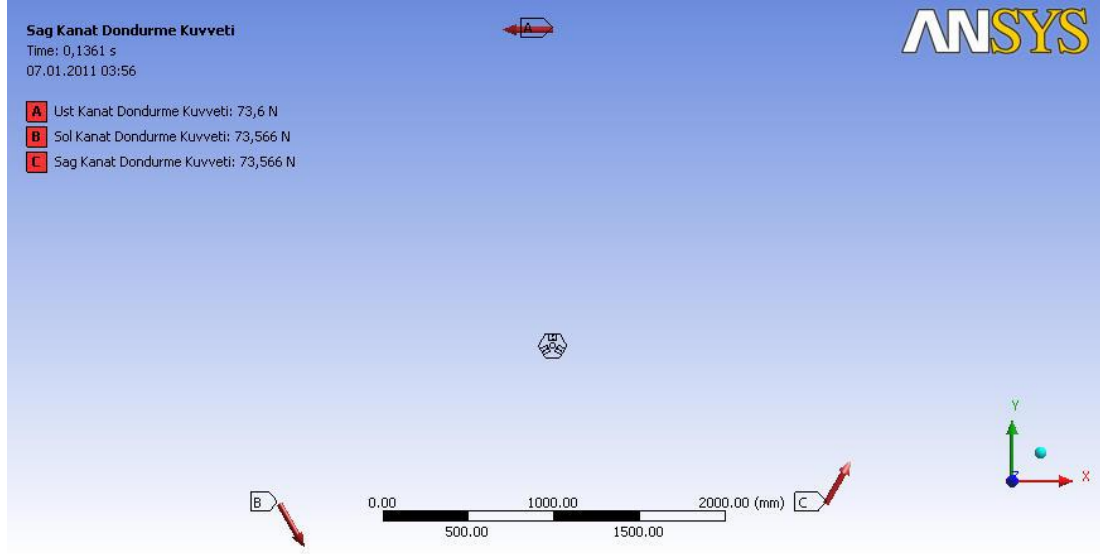
Şekil 6.20: Kanat merkezkaç kuvvetleri

Tablo 6.3: Kanat Merkezkaç Kuvvetlerine ait değerler

Ölçü	Simge	Birim	Türbinler					
			10	20	50	100	200	500
Türbin Gücü	P	kW	10	20	50	100	200	500
Rotor Çapı	D	mm	7361	10104	15359	21083	28941	43992
Rotor Devri	n	d/d	294	202	122	84,0	57,6	35,0
Rotor Açısal Hızı	$\omega$	rad/s	30,8	21,1	12,8	8,8	6,0	3,7
Kanat Kütle	m	kg	20	40	100	200	400	1000
Kanat Kütle Merkezi Uzaklığı	r	mm	1227	1684	2560	3514	4823	7332
Göbek Çapı	d	mm	184	253	384	527	724	1100
Fn Merkezkaç	N		23223	29991	42057	54315	70145	98364
Üst Kanat Merkezkaç Kuvveti X Bileşeni	N		0	0	0	0	0	0
Üst Kanat Merkezkaç Kuvveti Y Bileşeni	N		23223	29991	42057	54315	70145	98364
Sol Kanat Merkezkaç Kuvveti X Bileşeni	N		-20112	-25973	-36422	-47038	-60747	-85186
Sol Kanat Merkezkaç Kuvveti Y Bileşeni	N		-11611	-14996	-21028	-27157	-35072	-49182
Sağ Kanat Merkezkaç Kuvveti X Bileşeni	N		20112	25973	36422	47038	60747	85186
Sağ Kanat Merkezkaç Kuvveti Y Bileşeni	N		-11611	-14996	-21028	-27157	-35072	-49182

#### 6.1.1.4. Kanat döndürme kuvvetleri

Rüzgar türbininin çalışması süresince rüzgarın türbin kanatlarına uyguladığı kuvvetin rotor düzleminde ve kanada dik olan ve güç üretimini sağlayan bileşenidir (Şekil 6.21).



Şekil 6.21: Kanat döndürme kuvvetleri

Bu kuvvetler WB’de Remote Force olarak girilmiştir. Bu sayede ayrıca bir moment ilavesine gerek kalmamıştır. Kuvvetlerin uygulama doğrultularını oluşturabilmek için her bir kuvvet iki bileşene ayrılmıştır. Bileşenler için Denklem 6.6 yardımıyla oluşturulan Tablo 6.4 kullanılarak ilgili türbine ait değerler analizde kullanılmıştır. Döndürme kuvvetleri normalde kanada dik olarak kanatla beraber döndüklerinden doğrultuları sürekli değişen dinamik kuvvetlerdir. Ancak, analizde göbeğin koordinat sisteminin referans alınmasıyla kanat döndürme kuvvetleri statik bir hal almışlardır.

Tablo 6.4: Kanat döndürme kuvvetleri

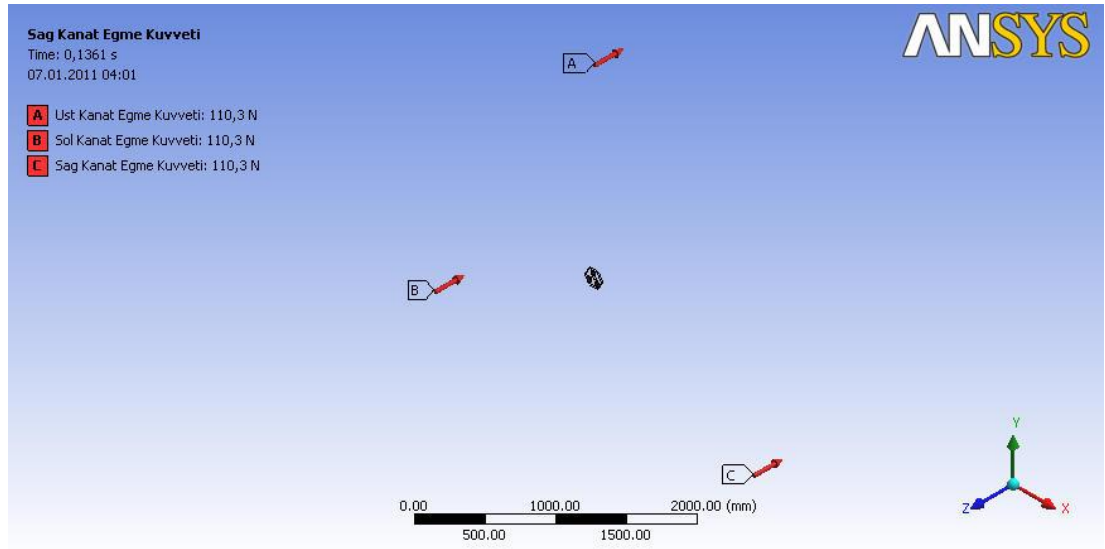
Ölçü	Simge	Birim	Türbinler					
			10	20	50	100	200	500
Türbin Gücü	P	kW	10	20	50	100	200	500
Rotor Çapı	D	mm	7361	10104	15359	21083	28941	43992
Rotor Devri	n	d/d	294	202	122	84,0	57,6	35,0
Rotor Açısal Hızı	$\omega$	rad/s	30,8	21,1	12,8	8,8	6,0	3,7
Kanat Kütlesi	m	kg	20	40	100	200	400	1000
Kanat Kütle Merkezi Uzaklığı	l	mm	1227	1684	2560	3514	4823	7332
Göbek Çapı	d	mm	184	253	384	527	724	1100
<b>Ft torkdan</b>		N	73,6	156	423	899	1909	5170
Döndürme Kuvveti Üst Kanat X Bileşeni	Ft <sub>üx</sub>	N	-73,6	-156	-423	-899	-1909	-5170
Döndürme Kuvveti Üst Kanat Y Bileşeni	Ft <sub>üy</sub>	N	0,0	0	0	0	0	0
Döndürme Kuvveti Sol Kanat X Bileşeni	Ft <sub>sox</sub>	N	36,8	78	212	449	955	2585
Döndürme Kuvveti Sol Kanat Y Bileşeni	Ft <sub>soy</sub>	N	-63,7	-135	-366	-778	-1654	-4477
Döndürme Kuvveti Sağ Kanat X Bileşeni	Ft <sub>sax</sub>	N	36,8	78	212	449	955	2585
Döndürme Kuvveti Sağ Kanat Y Bileşeni	Ft <sub>say</sub>	N	63,7	135	366	778	1654	4477
<b>Fz</b>		N	110,3	234	635	1348	2864	7754
<b>L kuvvet merkezi</b>		mm	1840	2526	3840	5271	7235	10998
Üst Kanat Kuvvet Noktası Uzaklığı X Bileşeni		mm	0	0	0	0	0	0
Üst Kanat Kuvvet Noktası Uzaklığı Y Bileşeni		mm	1840	2526	3840	5271	7235	10998
Sol Kanat Kuvvet Noktası Uzaklığı X Bileşeni		mm	-1594	-2188	-3325	-4565	-6266	-9524
Sol Kanat Kuvvet Noktası Uzaklığı Y Bileşeni		mm	-920	-1263	-1920	-2635	-3618	-5499
Sağ Kanat Kuvvet Noktası Uzaklığı X Bileşeni		mm	1594	2188	3325	4565	6266	9524
Sağ Kanat Kuvvet Noktası Uzaklığı Y Bileşeni		mm	-920	-1263	-1920	-2635	-3618	-5499

$$F_t = 9550 * (P/n) * (1,25/3) * (4000/D) \quad (6.6)$$

### 6.1.1.5. Kanat eğme kuvvetleri

Rüzgar türbininin çalışması süresince kanatlara rüzgar akış doğrultusunda etkiyen ve kanatları eğmeye çalışan kuvvettir (Şekil 6.22). Uygulama noktaları kanat döndürme kuvvetleri ile aynıdır. Kanat döndürme kuvvetleri gibi remote force olarak uygulanmışlardır. Statik karakterlidirler. Kanat döndürme kuvvetlerinin 1,5 katı olarak alınmışlardır (Denklem 6.7). Hazırlanan tablodan (Tablo 6.4) ilgili türbine ait değerler alınıp analizde kullanılmışlardır.

(6.7)



Şekil 6.22: Kanat eğme kuvvetleri

### 6.1.1.6. Kanat ağırlık kuvvetleri

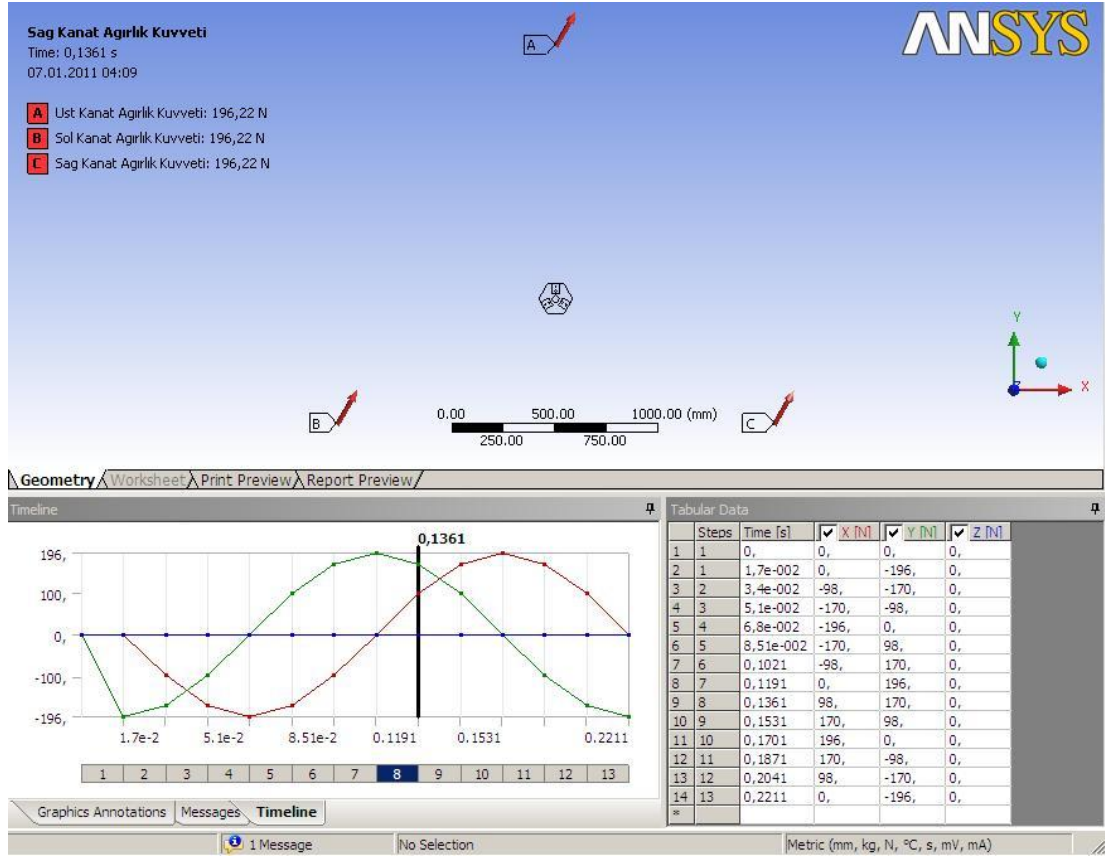
Kanat kütleleri nedeniyle göbeğe etkileyen ve normalde statik olan bu kuvvetler (Denklem 6.8) göbek koordinat sisteminin referans olarak alınmasından dolayı tam değişken olmaktadır. Kuvvetlerin doğrultu ve yönlerindeki bu değişkenliği (Şekil 6.16) WB'te temsil edebilmek için kanat ağırlık kuvvetleri X ve Y eksenlerindeki iki kuvvetle temsil edilmiştir. Daha önceden bahsedilen nedenlerden dolayı kanat ağırlık kuvvetleri bütün türbinler için bir tablo olarak (Tablo 6.5) hazırlanmış ve analizde ilgili türbine ait değerler tabular (Şekil 6.23) olarak kullanılmıştır.

(6.8)

Tablo 6.5: Kanat ağırlık kuvvetleri

Ölçü	Simge	Birim	Türbinler					
Türbin Gücü	P	kW	10	20	50	100	200	500
Ağırlık Kuvveti	Fg	N	196	392	981	1962	3924	9810
	Açı	Adım						
Fg Kanat X bileşeni	-30	1	98	196	491	981	1962	4905
	0	2	0	0	0	0	0	0
	30	3	-98	-196	-491	-981	-1962	-4905
	60	4	-170	-340	-850	-1699	-3398	-8496
	90	5	-196	-392	-981	-1962	-3924	-9810
	120	6	-170	-340	-850	-1699	-3398	-8496
	150	7	-98	-196	-491	-981	-1962	-4905
	180	8	0	0	0	0	0	0
	210	9	98	196	491	981	1962	4905
	240	10	170	340	850	1699	3398	8496
	270	11	196	392	981	1962	3924	9810
	300	12	170	340	850	1699	3398	8496
	330	13	98	196	491	981	1962	4905
	360	14	0	0	0	0	0	0
Fg Kanat Y bileşeni	-30	1	-170	-340	-850	-1699	-3398	-8496
	0	2	-196	-392	-981	-1962	-3924	-9810
	30	3	-170	-340	-850	-1699	-3398	-8496
	60	4	-98	-196	-491	-981	-1962	-4905
	90	5	0	0	0	0	0	0
	120	6	98	196	491	981	1962	4905
	150	7	170	340	850	1699	3398	8496
	180	8	196	392	981	1962	3924	9810
	210	9	170	340	850	1699	3398	8496
	240	10	98	196	491	981	1962	4905
	270	11	0	0	0	0	0	0
	300	12	-98	-196	-491	-981	-1962	-4905
	330	13	-170	-340	-850	-1699	-3398	-8496
	360	14	-196	-392	-981	-1962	-3924	-9810

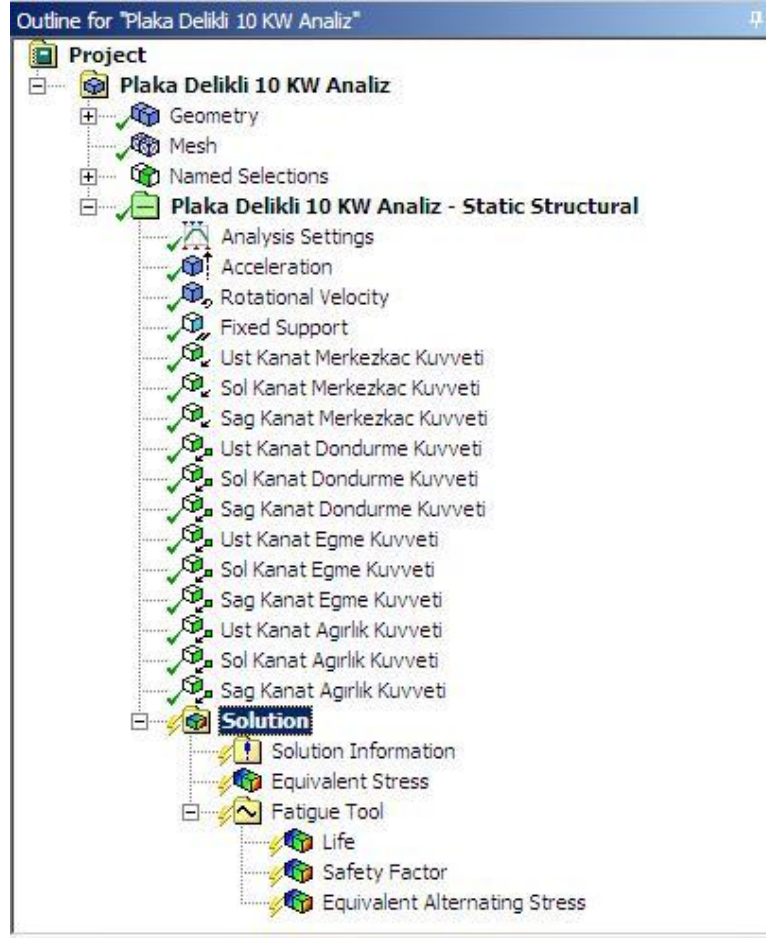




Şekil 6.23: Kanat ağırlık kuvvetleri

## 6.2. İstenenler:

Herbir rüzgar türbini ve göbek türü için yapılacak gerilme analizleri sonucunda plaka göbek için Von Mises Kriteri'ne göre ve küresel göbek için Tresca Kriteri'ne göre eşdeğer gerilmenin ve eşdeğer gerilme genliğinin bulunması, her iki göbek türü için yorulma emniyet katsayıları ve yorulma ömürlerinin bulunmasıdır (Şekil 6.24). Yorulma analizi için kullanılan ayarlar Şekil 6.25'de gösterilmiştir.



Şekil 6.24: İstenenler

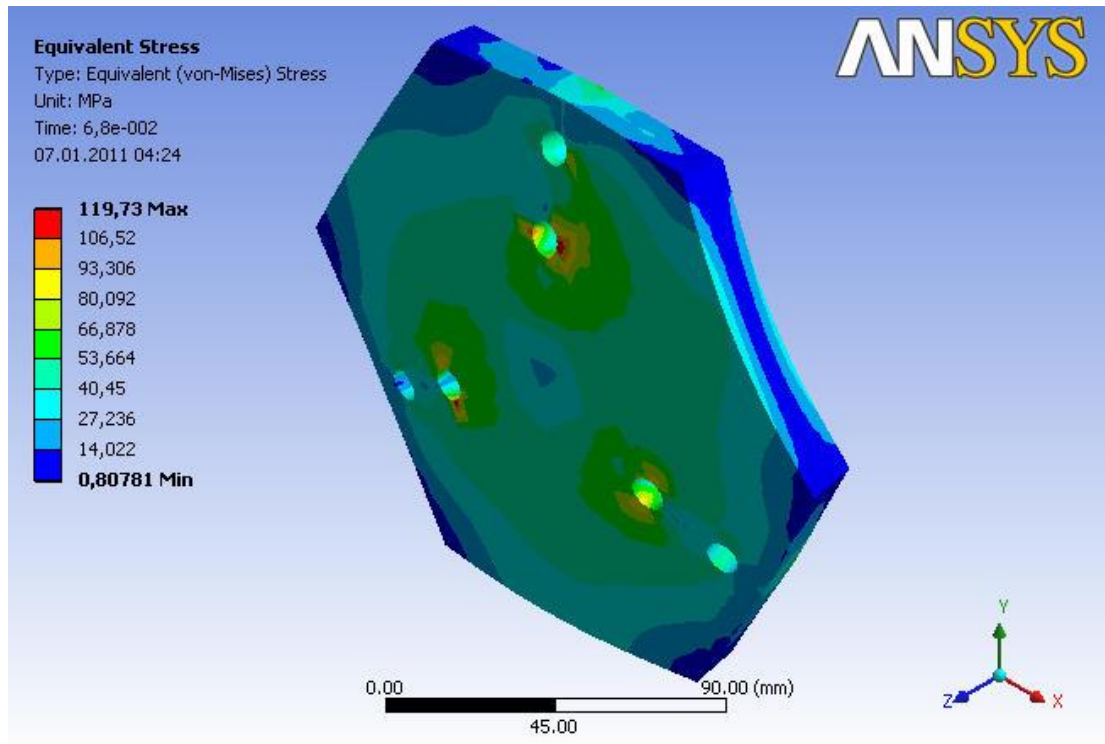
Details of "Fatigue Tool"	
<b>Materials</b>	
Fatigue Strength Factor (Kf)	1,
<b>Loading</b>	
Type	Fully Reversed
<input type="checkbox"/> Scale Factor	1,
<b>Definition</b>	
Display Time	End Time
<b>Options</b>	
Analysis Type	Stress Life
Mean Stress Theory	None
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
<b>Life Units</b>	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

Şekil 6.25: Yorulma analizi ayarları

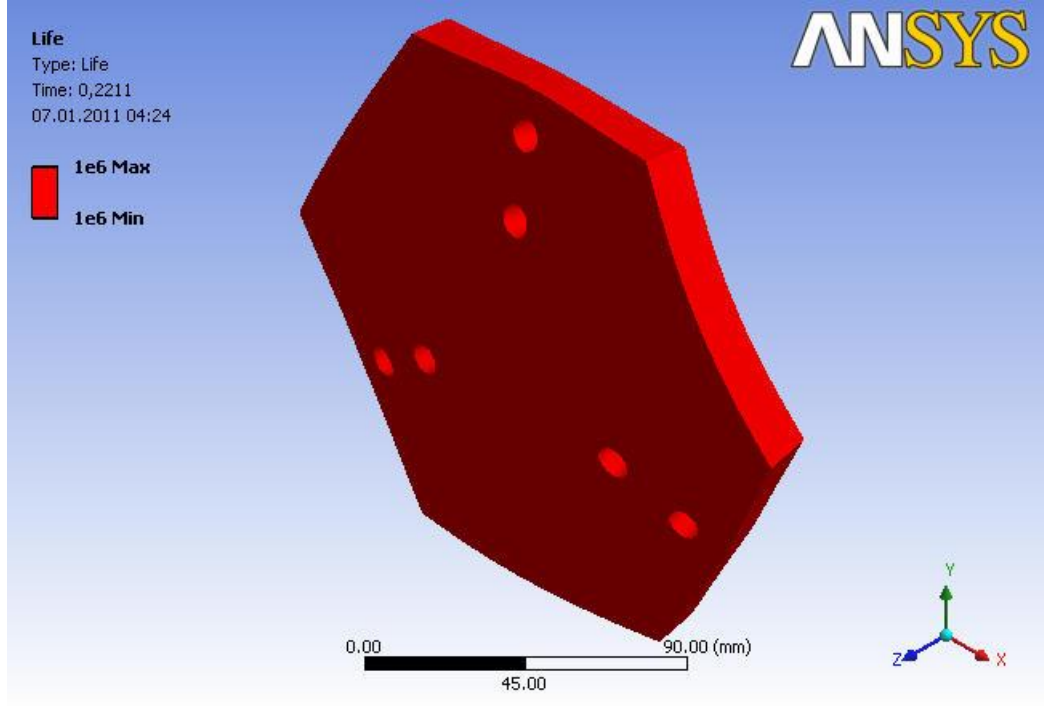


### 6.3. Sonuçlar

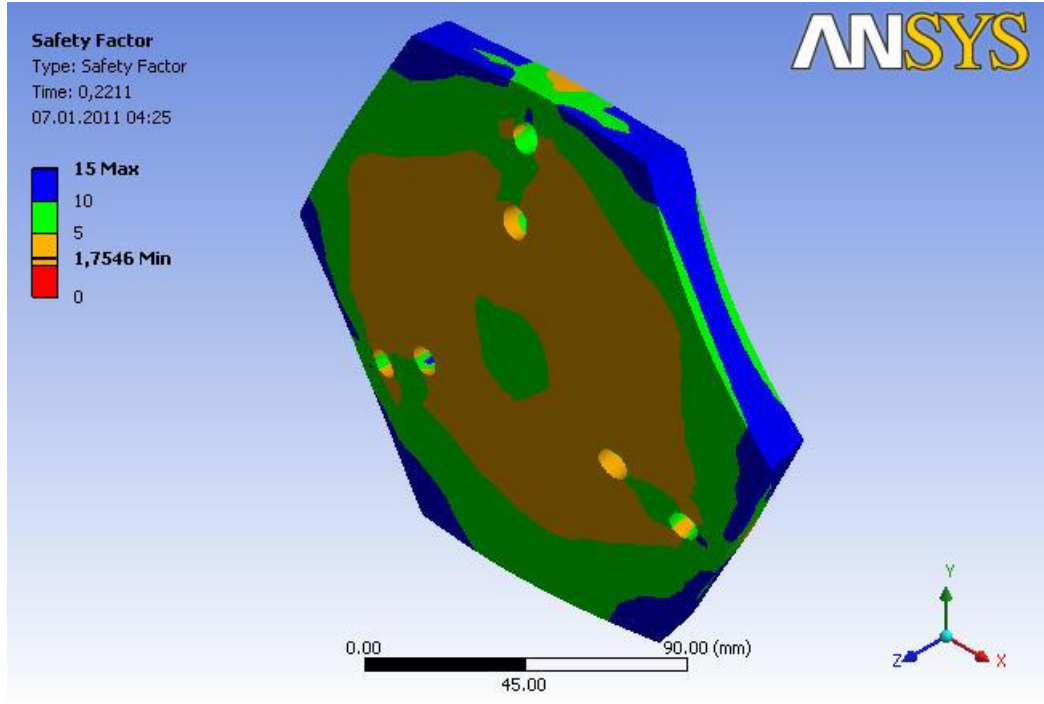
Herbir rüzgar türbini ve göbek türü için yapılan gerilme analizleri sonucunda plaka göbek için Von Mises Kriterine göre ve küresel göbek için Tresca Kriteri' ne göre eşdeğer gerilme ve eşdeğer gerilme genliği, her iki göbek türü için yorulma emniyet katsayıları ve yorulma ömürleri bulunmuştur (Şekil 6.26 - 33). Bulunan bu değerler optimizasyonda incelenmeleri için Workbench' de publish komutuyla dışarı verilmişlerdir (Şekil 6.34).



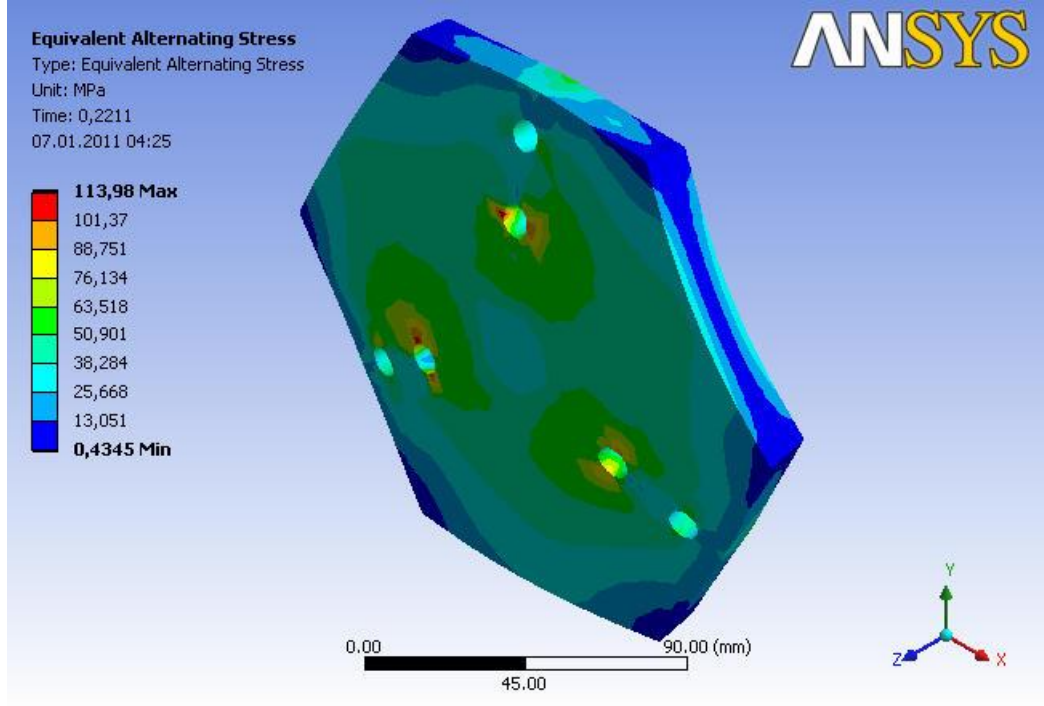
Şekil 6.26: Plaka Göbek Eşdeğer Gerilme sonucu



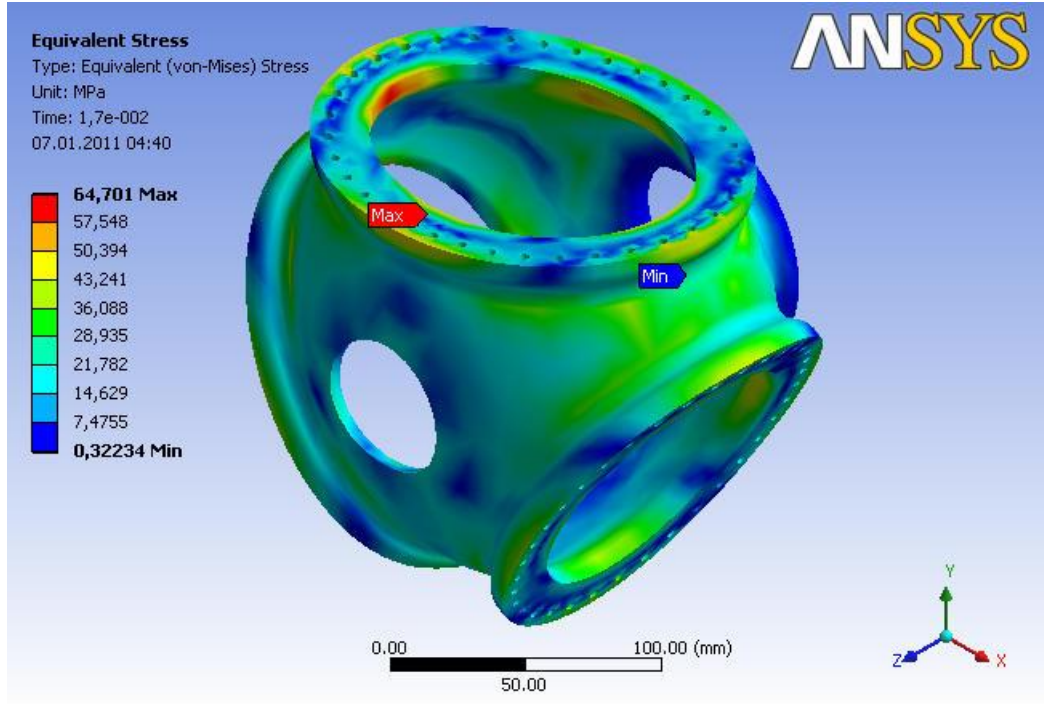
Şekil 6.27: Plaka Göbek Yorulma Ömrü sonucu



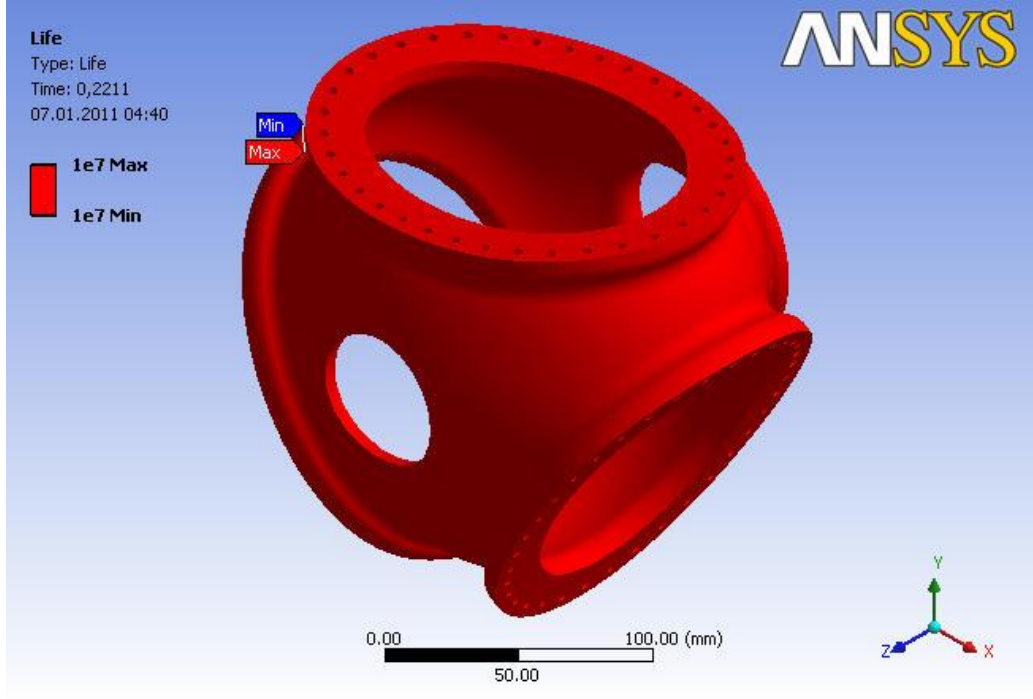
Şekil 6.28: Plaka Göbek Yorulma Emniyet Katsayısı sonucu



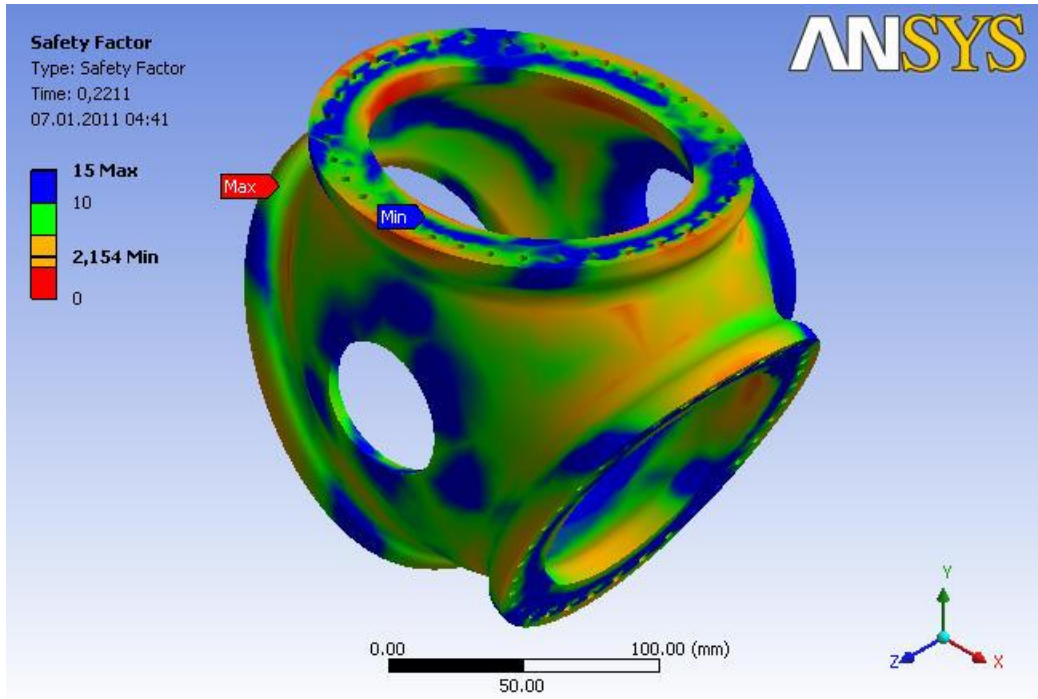
Şekil 6.29: Plaka Göbek Eşdeğer Gerilme Genlemesi sonucu



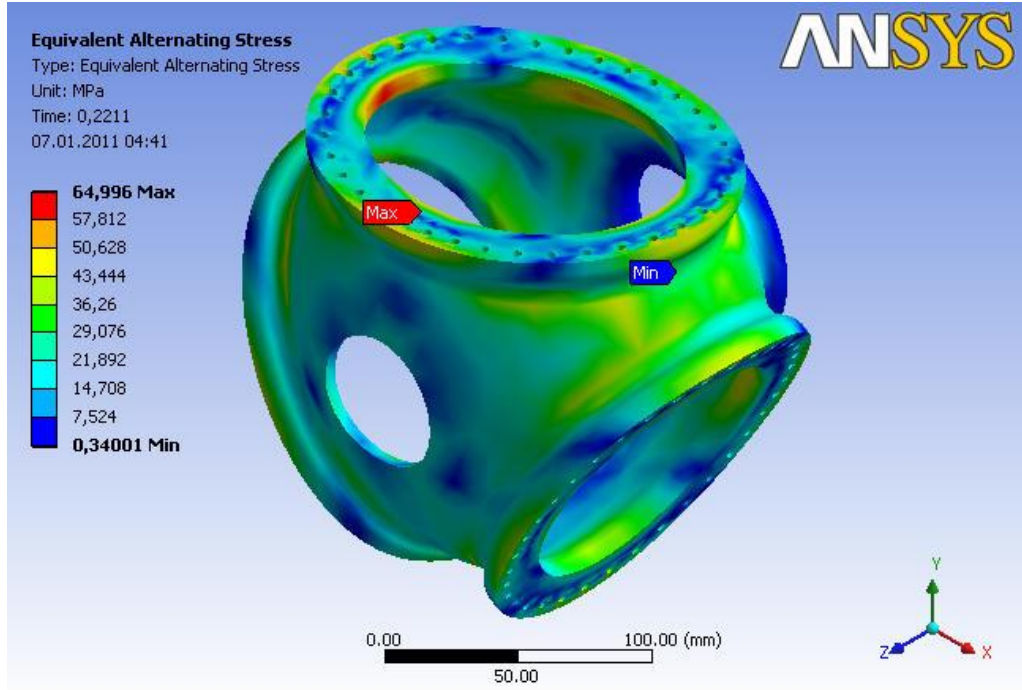
Şekil 6.30 : Küresel Göbek Eşdeğer Gerilme sonucu



Şekil 6.31 : Küresel Göbek Yorulma Ömrü sonucu



Şekil 6.32 : Küresel Göbek Emniyet Katsayısı sonucu



Şekil 6.33: Küresel Göbek Eşdeğer Gerilme Genlemesi sonucu

Parameter Manager

	Source	ID	Name	Current value	Expression
<input checked="" type="checkbox"/>	CAD	P1	HubDiameter	184,	
<input checked="" type="checkbox"/>	CAD	P2	Thickness	5,	
<input type="checkbox"/>	CAD	P7	RingThicknessMultiplier	3,	
<input type="checkbox"/>	CAD	P8	BlendRadiusPercentage	8,	
<input type="checkbox"/>	CAD	P9	RingHeightPercentage	5,	
<input type="checkbox"/>	CAD	P10	NumberOfHoles	36,	
<input checked="" type="checkbox"/>	Analysis	P19	Geometry Mass	4,4947 kg	
<input checked="" type="checkbox"/>	Analysis	P20	Equivalent Stress Maximum	64,701 MPa	
<input checked="" type="checkbox"/>	Analysis	P23	Life Minimum	1,e+007	
<input checked="" type="checkbox"/>	Analysis	P159	Safety Factor Minimum	2,154	

Ready

Şekil 6.34: Parametre yayınlama



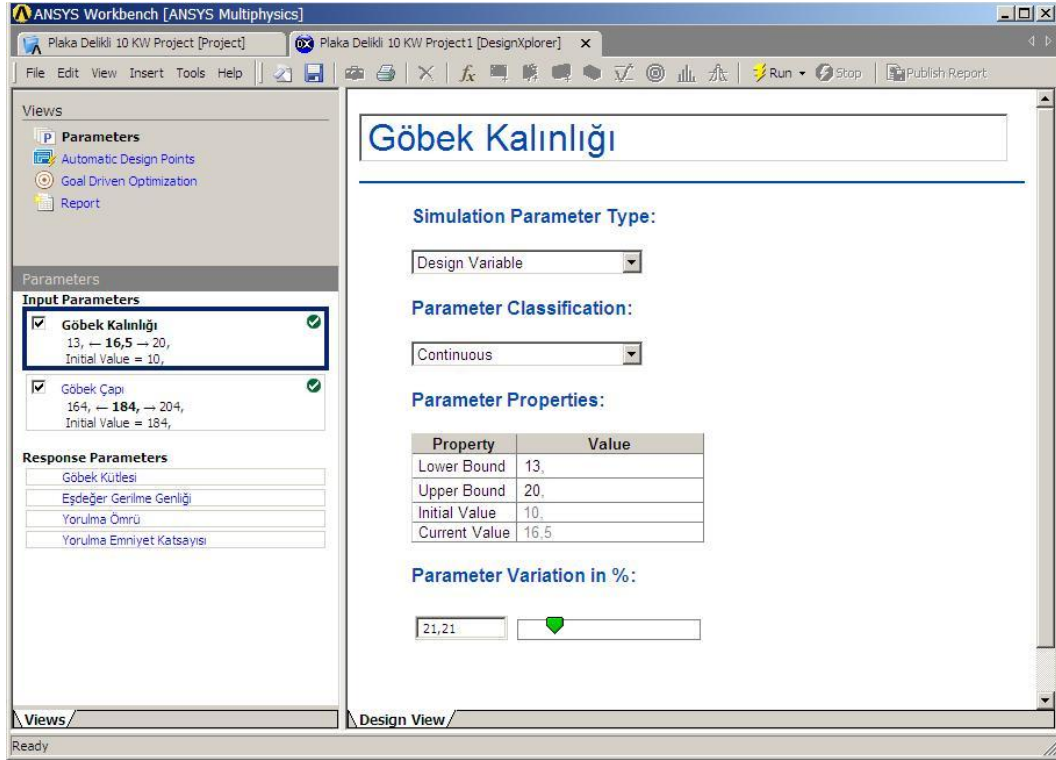
## **7. 10 – 500 KW GÜÇ ARALIĞINDAKİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN FARKLI EMNİYET KATSAYILARINA KARŞILIK GELEN PLAKA VE KÜRESEL GÖBEK KÜTLELERİNİN BULUNMASI**

### **7.1. Optimizasyon**

Herbir farklı güç ve türdeki rüzgar türbin göbeği için farklı emniyet katsayılarında göbek kütlelerinin ne olacağına belirlenebilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma için WB'in içindeki Design Explorer Environment (DXE) (Şekil 7.1) kullanılmıştır. DXE parçaların ve montaj sistemlerinin analiz sonuçlarını anlamaya ve tasarım yapmaya yarayan bir araçtır. Deterministik yöntem Design Of Experiments (DOE) ve çeşitli optimizasyon yöntemlerine dayanmaktadır ve anadil olarak parametreleri kullanır. Bu parametreler Simülasyondan, DesignModeler'dan ve CAD sistemlerinden gelebilir. Yapısal ve Isısal sonuçlar grafik halinde gösterilip kolayca incelenebilir. Goal Driven Optimization (GDO) yöntemi kullanılarak pekçok tasarım noktası elde edilebilir. Herbir tasarım noktası değişkenlere birer değer atadığından ortaya bir tasarım çıkar [40].

Optimizasyon yöntemi olarak DOE kullanılmıştır. DOE, örnekleme noktalarının yerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Mühendislik literatüründe DOE 'nin çeşitli versiyonları kullanılabilir. Bu versiyonların ortak noktaları giriş değişkenlerinin en iyi şekilde araştırılacağı şekilde örnekleme noktalarını bulmak veya istenilen bilgiyi minimum örnekleme noktası sayısı ile elde etmektir. Verimli yerlerdeki örnekleme noktaları sadece gereken nokta sayısını azaltmakla kalmayıp ayrıca örnekleme noktalarındaki sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan Responce Surface'in de daha tutarlı olmasını sağlamaktadırlar [40]. Yorulma analizi sonuçları

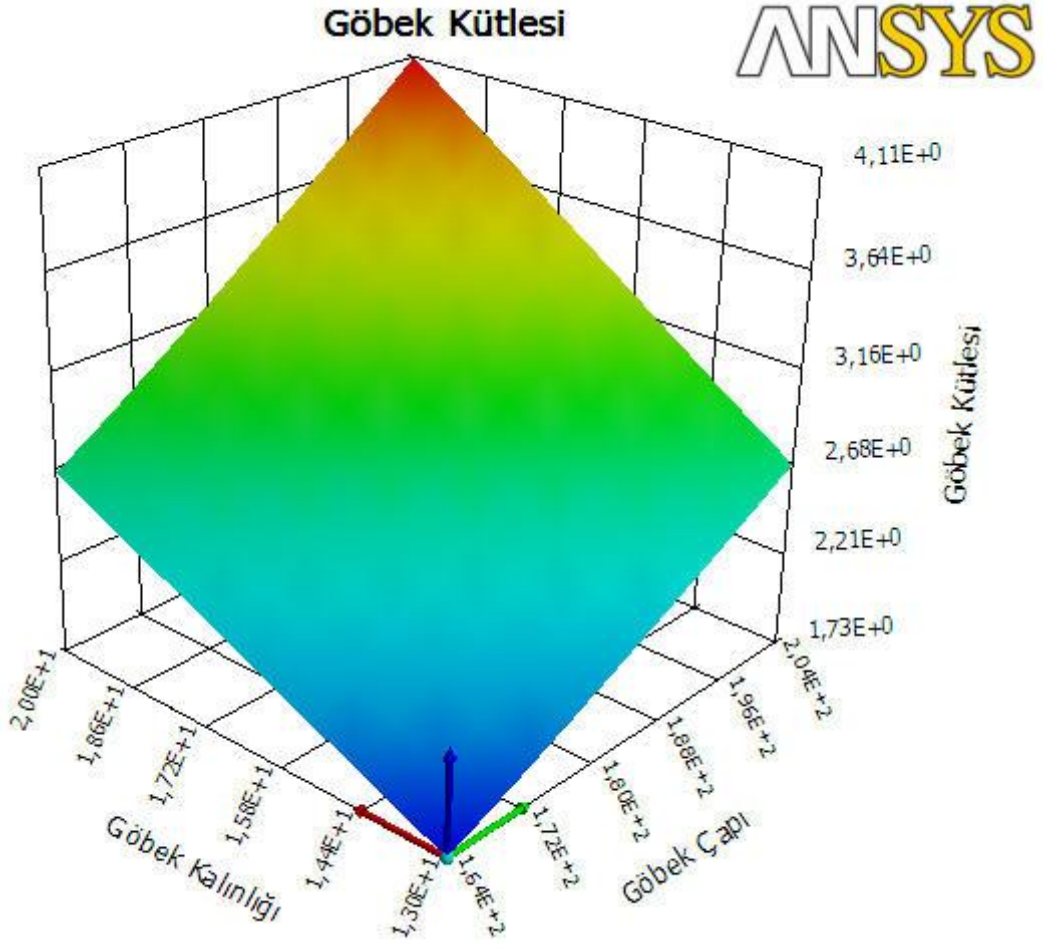
üzerinden gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında Göbek Çapı ve Göbek Kalınlığı kullanılan bağımsız değişkenlerdir. Yorulma analiziyle bulunan Eşdeğer Gerilme Genliği, Göbek Kütlesi, Yorulma Emniyet Katsayısı ve Yorulma Ömrü ise gösterilen sonuçlardır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1: Design Xplorer

Bağımsız değişkenler ait ayarlar burada yapılmıştır. Değişkenin alabileceği değerlerde bir süreksizlik yoksa continuous (sürekli) seçilir. Bazı uygulamalarda delik sayısı gibi bazı değişkenler tamsayı bir değer almak zorunda olabilirler. Bunların burada discrete (ayrık) olarak belirtilmesi gerekmektedir. Ayrıca üretimden kaynaklanan malzeme kalınlığı ve delik çapı gibi bazı sınırlamalar da usability (kullanılabilirlik) olarak belirtilmektedir. Bu çalışmada üretim için bir tasarım araştırılmadığı için değişkenler sürekli olarak belirlenmiştir (Şekil 7.1).

Bulunan sonuçlar grafik yardımıyla gösterilmiştir (Şekil 7.2, 7.3, 7.4 ve 7.5).

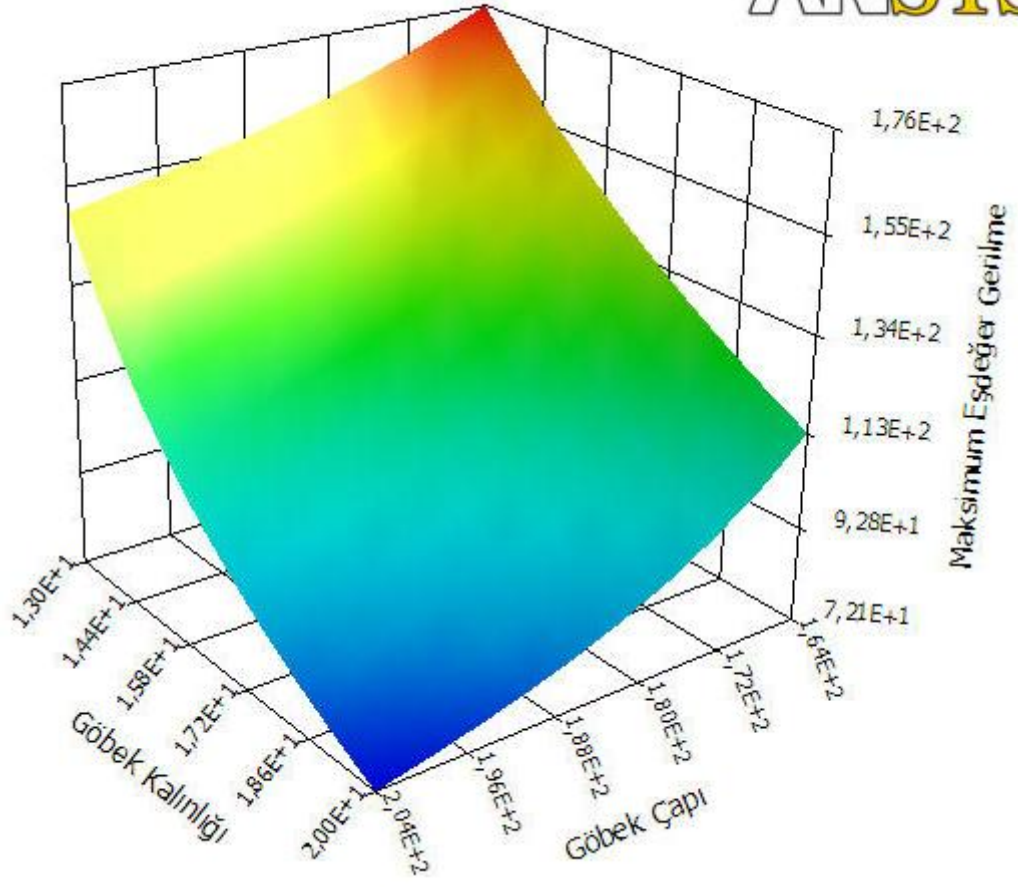


Şekil 7.2: Göbek Kütlesi'nin Göbek Kalınlığı ve Göbek Çapı'na göre değişimi



## Maksimum Eşdeğer Gerilme

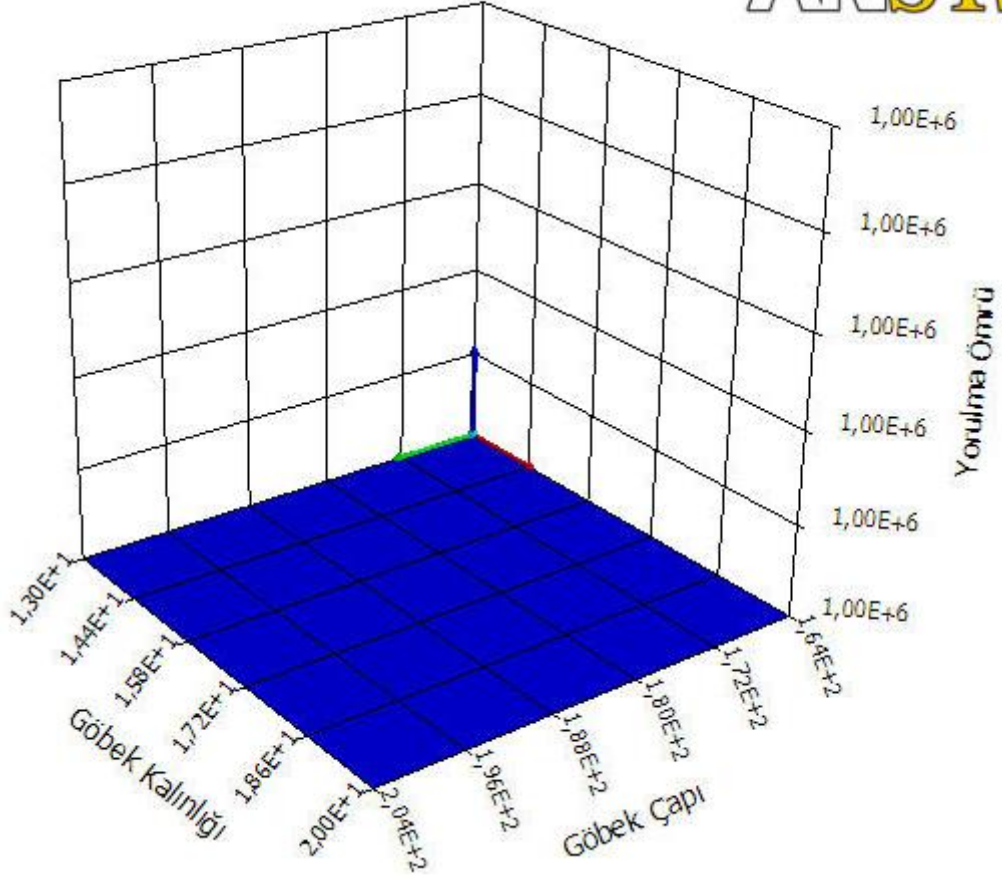
ANSYS



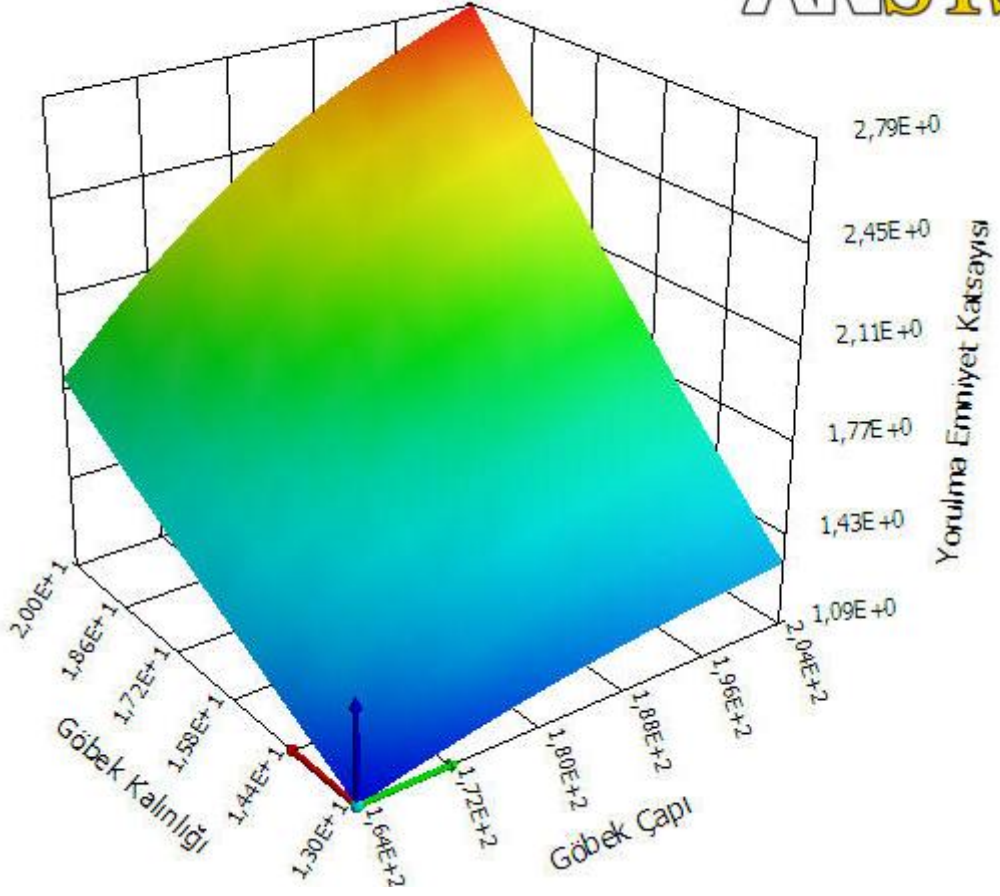
Şekil 7.3: Maksimum Eşdeğer Gerilme'nin Göbek Kalınlığı ve Göbek Çapı'na göre değişimi

## Yorulma Ömrü

ANSYS



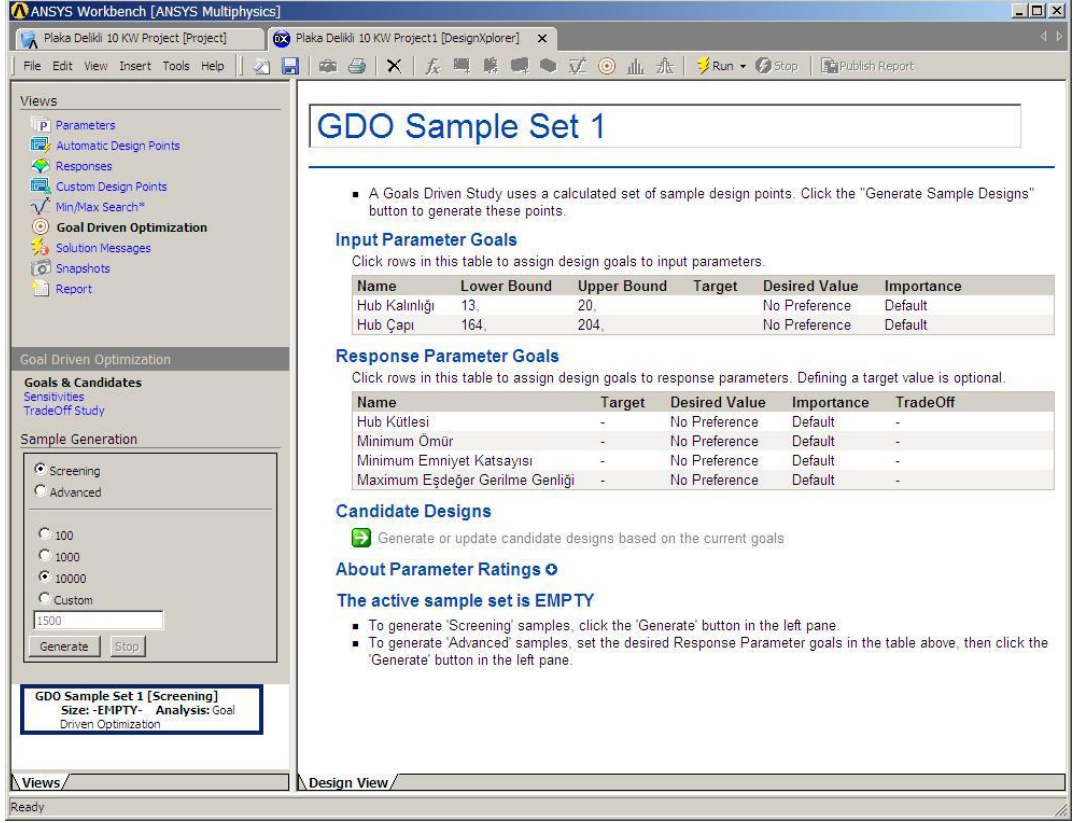
Şekil 7.4: Yorulma Ömrünün Göbek Kalınlığı ve Göbek Çapı'na göre değişimi



Şekil 7.5: Yorulma Emniyet Katsayısı'nın Göbek Kalınlığı ve Göbek Çapı'na göre değişimi

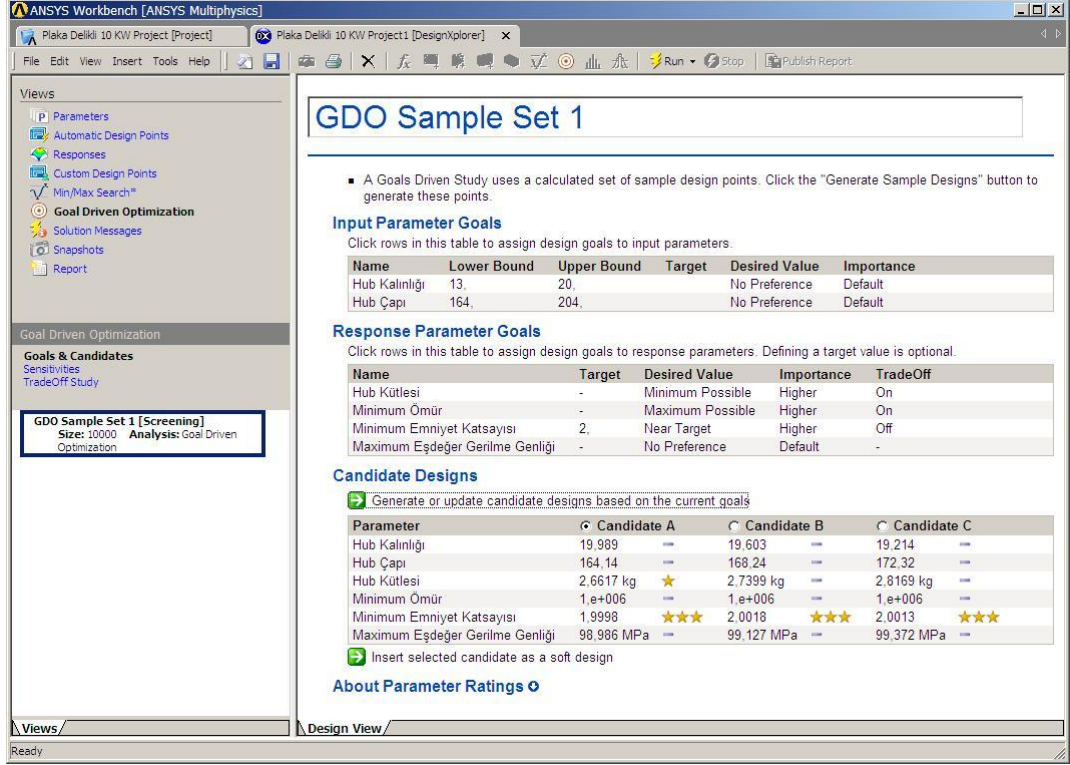
## 7.2. GDO Çalışması

Çalışmada amaçladığımız tablonun oluşturabilmesi için ömür şartını sağlama koşuluyla üç farklı emniyet katsayısı için ( 1,3 – 1,5 – 2 ) minimum göbek kütlelerinin elde edileceği tasarımlara ait değişken değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerlerin belirlenebilmesi için DXE içerisindeki GDO (Şekil 7.6) kullanılmıştır. GDO, mümkün olan en iyi tasarımların değişkenler için belirlenen sınırlamalar doğrultusunda oluşturulan örnek kümelerden alındığı sınırlandırılmış çok amaçlı bir optimizasyon tekniğidir. GDO çıkış değişkenlerine sınırlamalar uygulanırken giriş değişkenlerinin önemini belirlemeye imkan vermektedir.



Şekil 7.6: GDO

Giriş ve çıkış değerleriyle ilgili kısıtlamalar ve önem dereceleri Şekil 7.7'deki gibi uygulanarak çözüm gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.7: GDO Çözüm

Üç farklı emniyet katsayısı için bulunan noktalar tablo 7.1 de gösterilmektedir..

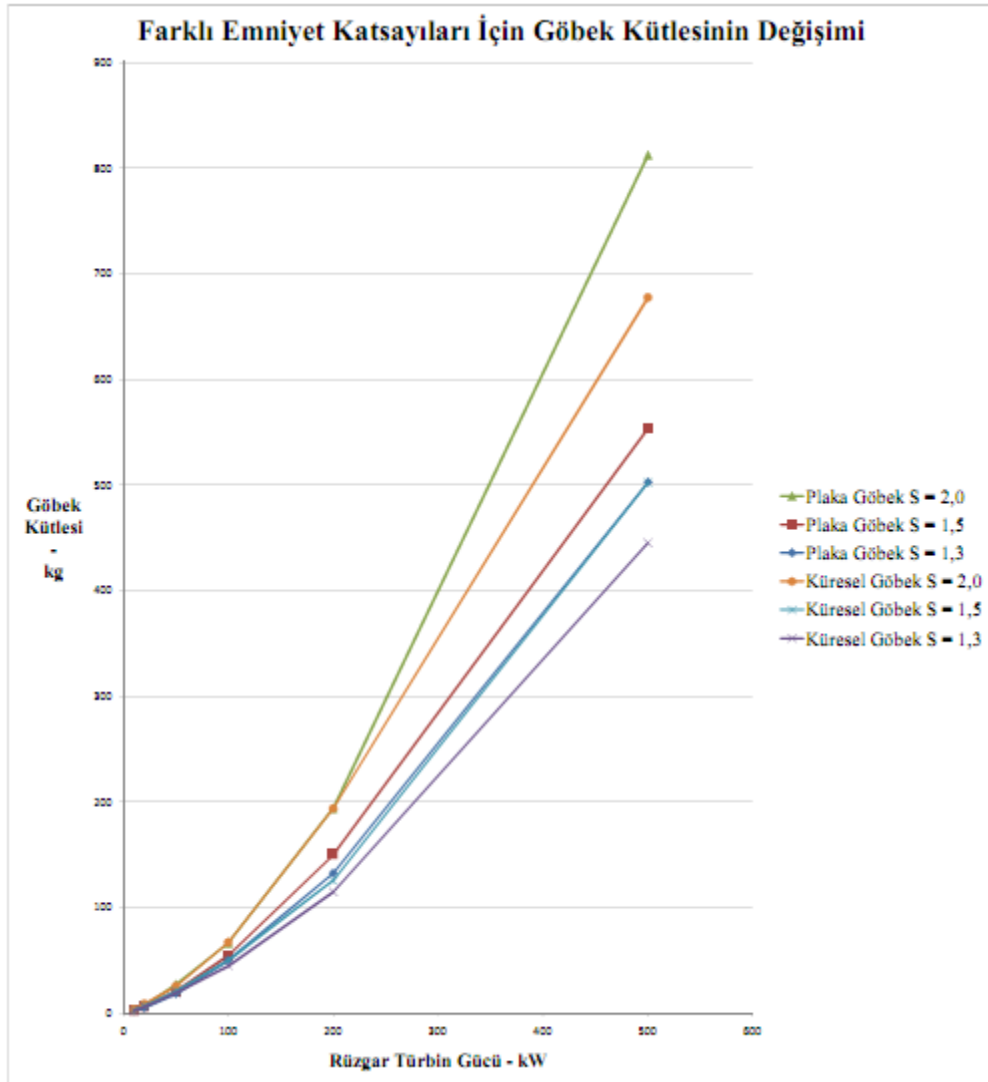
Tablo 7.1: Tasarım Noktaları

Değişkenler	Birim	Tasarım Noktaları		
		1	2	3
Göbek Kalınlığı	mm	14,703	16,226	19,989
Göbek Çapı	mm	164,25	164,05	164,14
Göbek Kütlesi	kg	1,9563	2,1576	2,6617
Yorulma Ömrü	çevrim	1,00E+06	1,00E+06	1,00E+06
Yorulma Emniyet Katsayısı		1,2946	1,4948	1,9998
Maksimum Eşdeğer Gerilme	Mpa	156,75	135,16	98,99

Çalışma bütün türbinler için yapılarak hepsi için aranan sonuçlar bulunmuştur. Sonuçların biraraya getirilmesiyle tablo 7.2 ve Şekil 7.8,7.9 ve 7.10 elde edilmiştir.

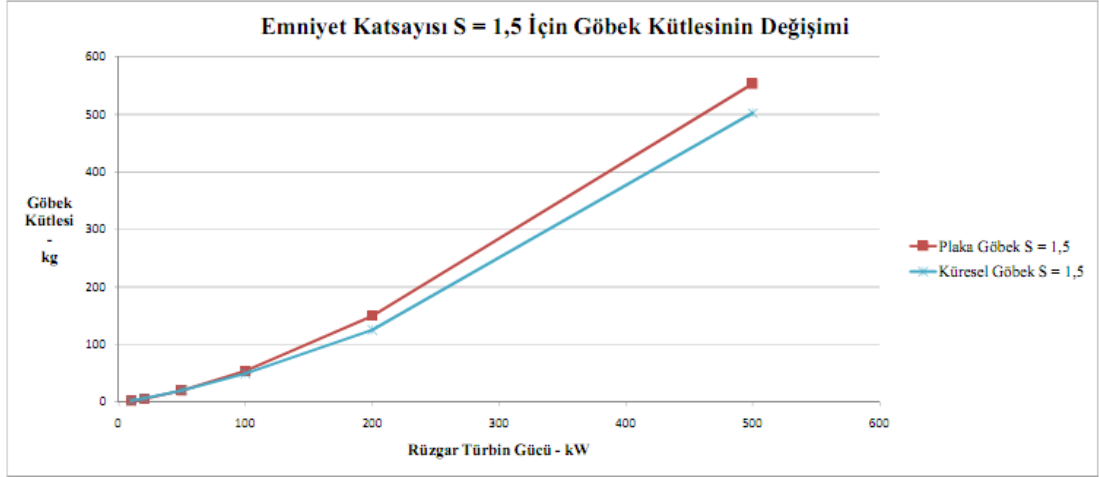
Tablo 7.2: Bütün Sonuçlar

Rüzgar Türbin Gücü - kW	Göbek Kütlesi - kg					
	Plaka Göbek S = 1,3	Plaka Göbek S = 1,5	Plaka Göbek S = 2,0	Küresel Göbek S = 1,3	Küresel Göbek S = 1,5	Küresel Göbek S = 2,0
10	1,9563	2,1576	2,6617	2,0912	2,6974	3,7014
20	5,0115	5,5967	6,7829	6,0769	6,8480	8,6928
50	18,2460	20,7230	27,4150	19,1020	20,8320	25,4130
100	49,8140	54,7490	66,3570	44,7870	49,8580	66,9060
200	132,3500	149,9100	193,8100	114,5800	125,4600	193,7600
500	502,6900	553,2700	812,4900	445,2900	502,2800	677,6000

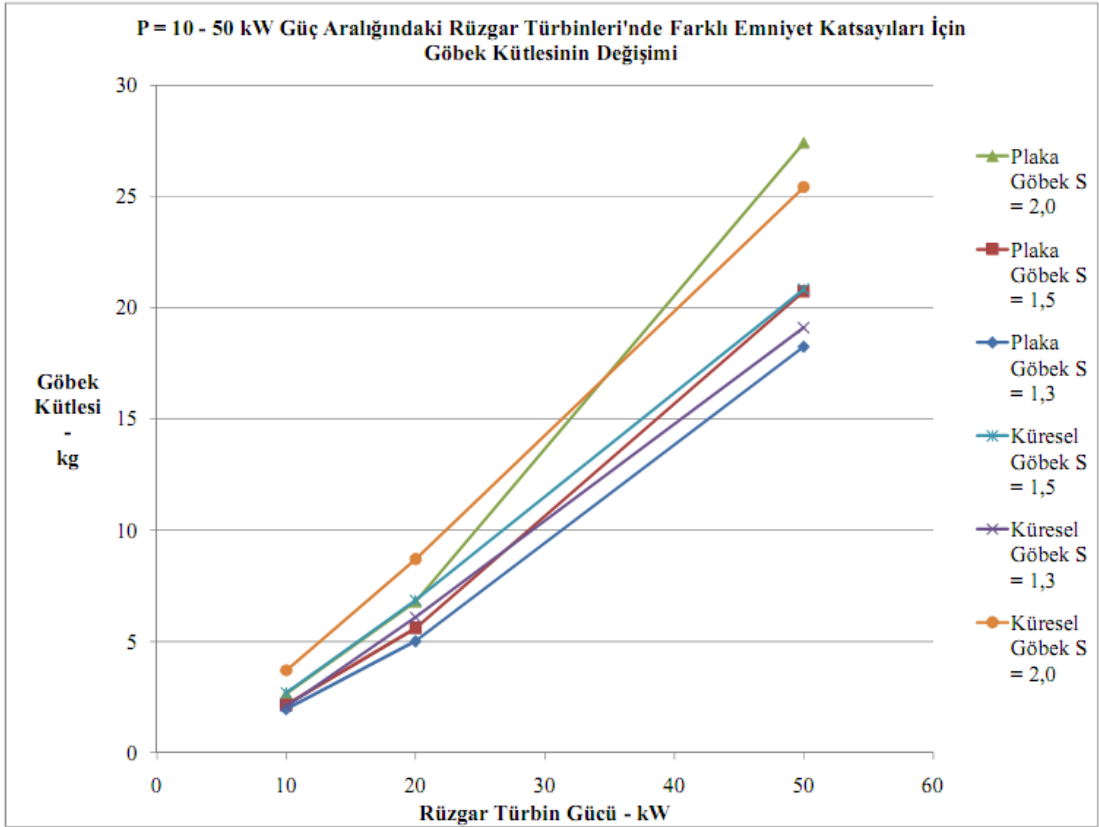


Şekil 7.8: Farklı emniyet katsayıları için Göbek Kütlesi değişimi





Şekil 7.9:  $S = 1,5$  için Göbek Kütlesi değişimi



Şekil 7.10: 10 – 50 kW Güç aralığında Göbek Kütlesi değişimi

### 7.3. Değerlendirme

10 – 500 kW güç aralığındaki Rüzgar Türbin Gbekleri ile ilgili olarak yapılan yorulma analizi ve optimizasyon sonucunda 10 – 500 kW güç aralığındaki rüzgar türbinleri için kullanılabilir plaka ve küresel iki adet göbek geometrisine ait Rüzgar Türbin Gücü – Göbek Kütlesi grafiği (Şekil 7.8) elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde türbin gücünün 100 kW olduğu noktaya kadar birbirlerine yakın seyreden geometrilerin bu değerden itibaren küresel geometrinin lehine olacak Şekilde farklılaŐtıęı görülmektedir. Buradan hareketle 100 kW ve üzeri güçteki rüzgar türbinlerinde küresel geometrinin tercih edilmesinin çok doğru olacağı söylenbilir. Buna karşılık kk güçlü rüzgar türbinlerinde kütlelerin son derece yakın olması, kk rüzgar türbinlerinde maliyeti fazla artırmadan yüksek emniyet katsayılarının kullanılabilmesi ve yüksek emniyet katsayıları için plaka geometrisindeki kütle artıŐının daha az olması nedeniyle kk güçteki rüzgar türbinlerinde plaka geometrisini tercih etmek daha doğru olacaktır. Plaka geometrisinin imalat kolaylığı da artı bir faktördür.



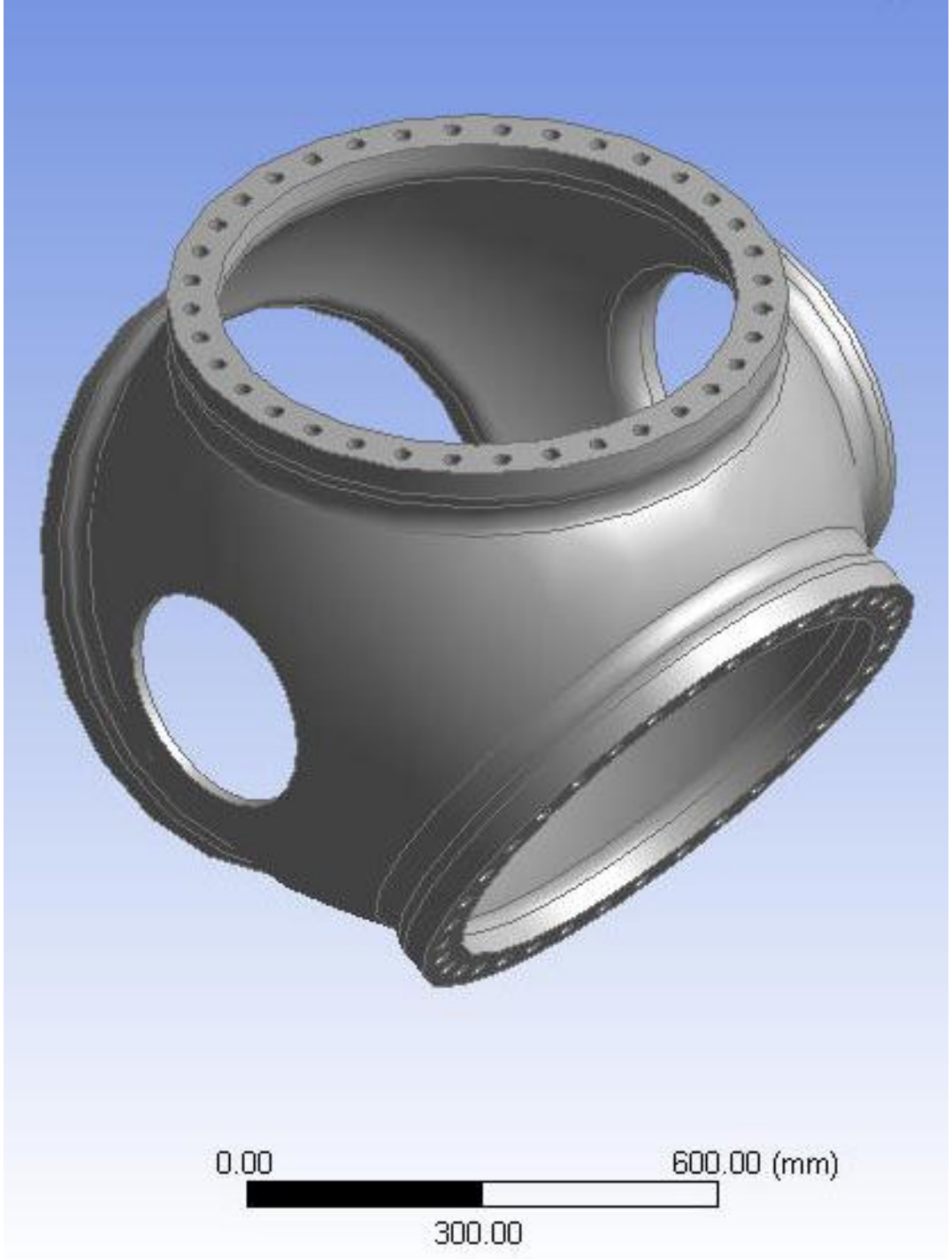
## 8. 500 KW'LIK YERT GÖBEĞİ OPTİMİZASYONU

İncelenecek olan 500 kw'lık rüzgar türbini için piyasada var olan örneklere ve yapılan plaka ve küresel göbek karşılaştırma çalışmasına dayanarak göbek geometrisi olarak küresel geometri belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma için varolan model kullanılmıştır. Önceki analiz çalışmasının sonuçlarına dayanarak göbek çapı (d) ve göbek kalınlığı (t) için aşağıdaki değerler seçilmiştir.

$$d = 992 \text{ mm}$$

$$t = 19,5 \text{ mm}$$

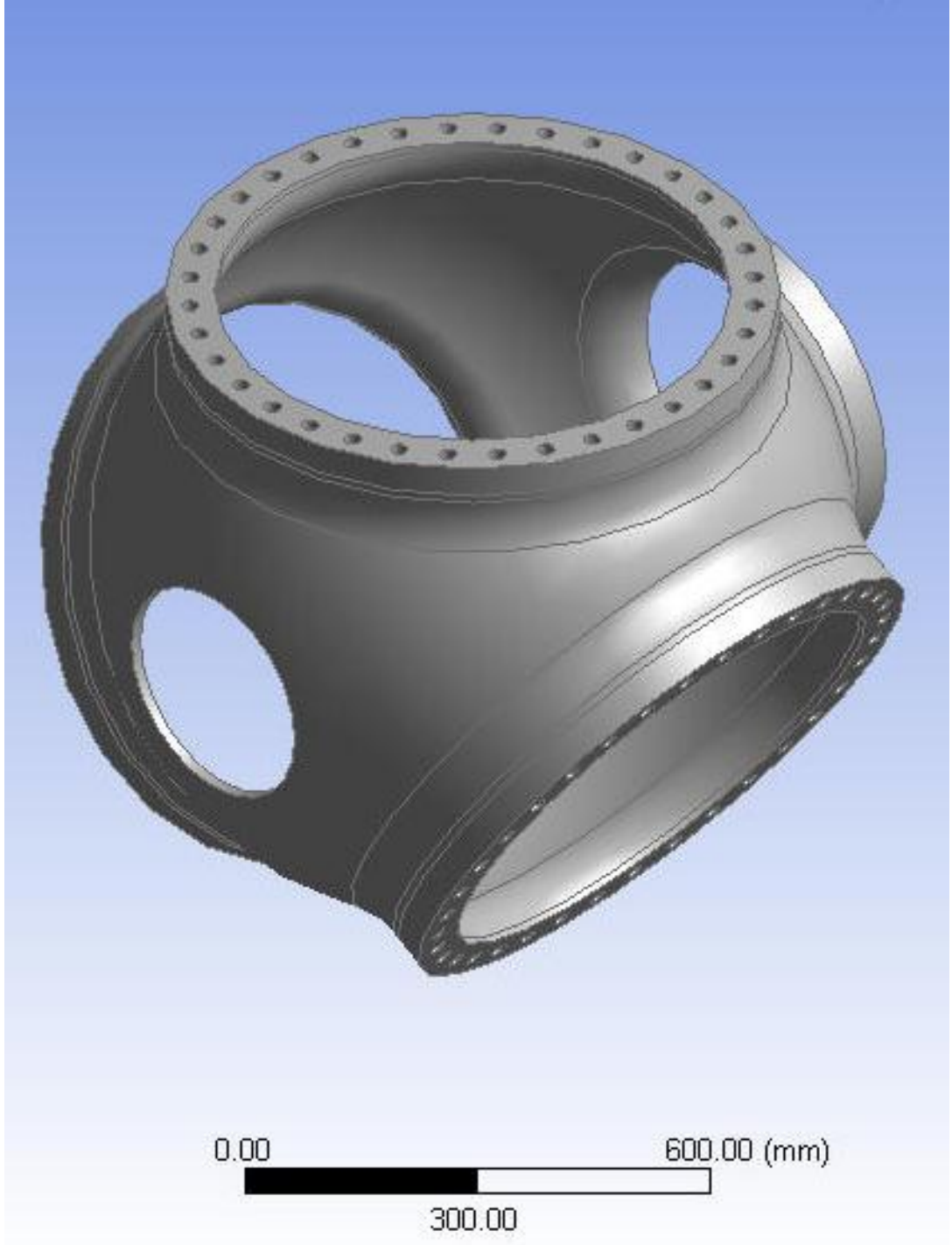
Önceki analizde optimizasyon işlemine katılmayan diğer 3 değişken ise bu çalışmada değişimlerinin Göbek Kütlesi'ne etkisinin inceleneceği bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Bu sayede göbek geometrisinde iyileştirme yapılarak göbek kütlesinin azaltılması amaçlanmıştır. Kullanılan değişkenlerdeki değişimin göbek geometrisine etkileri Şekil 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 ve 8.5'te görülebilmektedir.



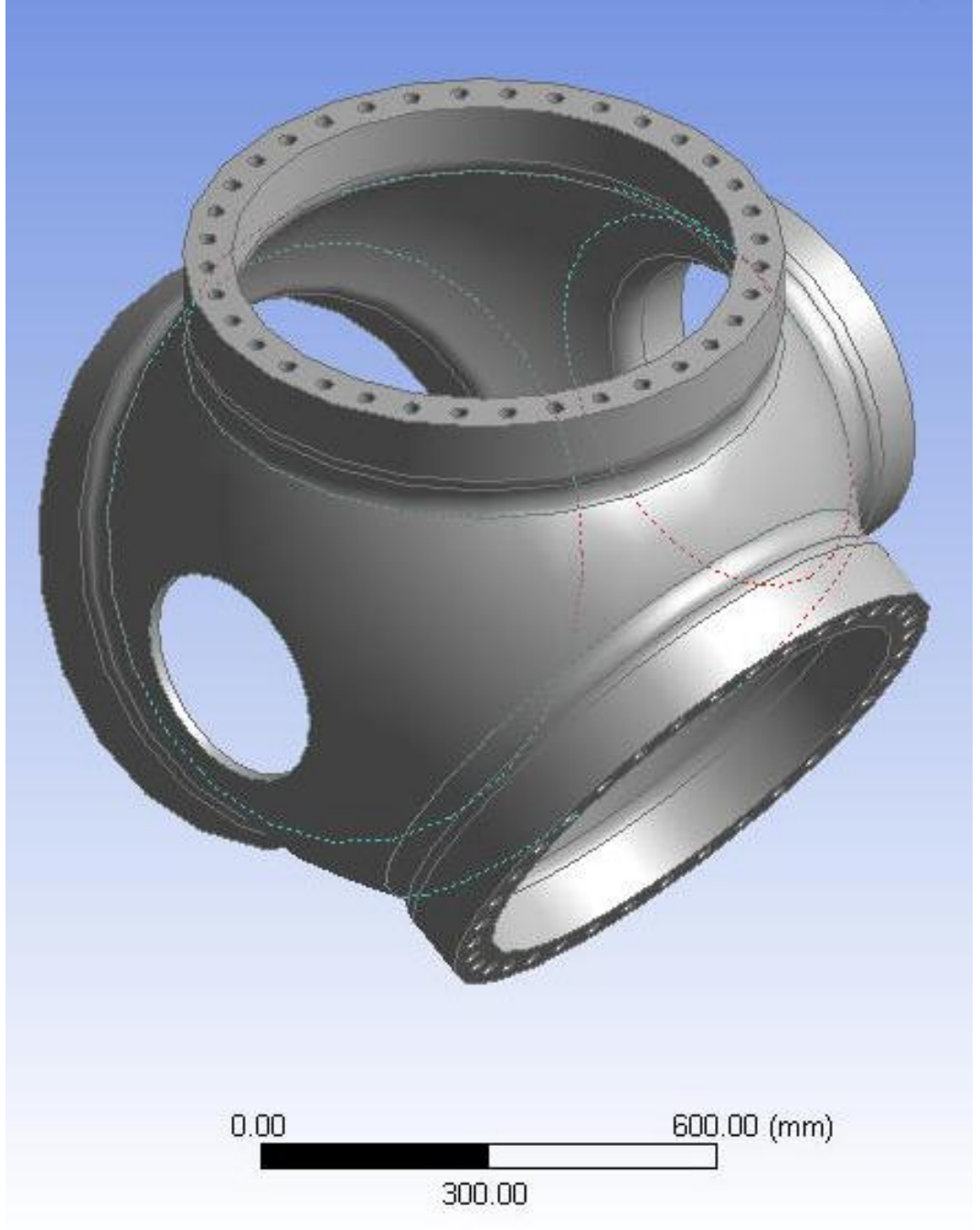
Şekil 8.1 : Göbek geometrisinin başlangıç durumu.



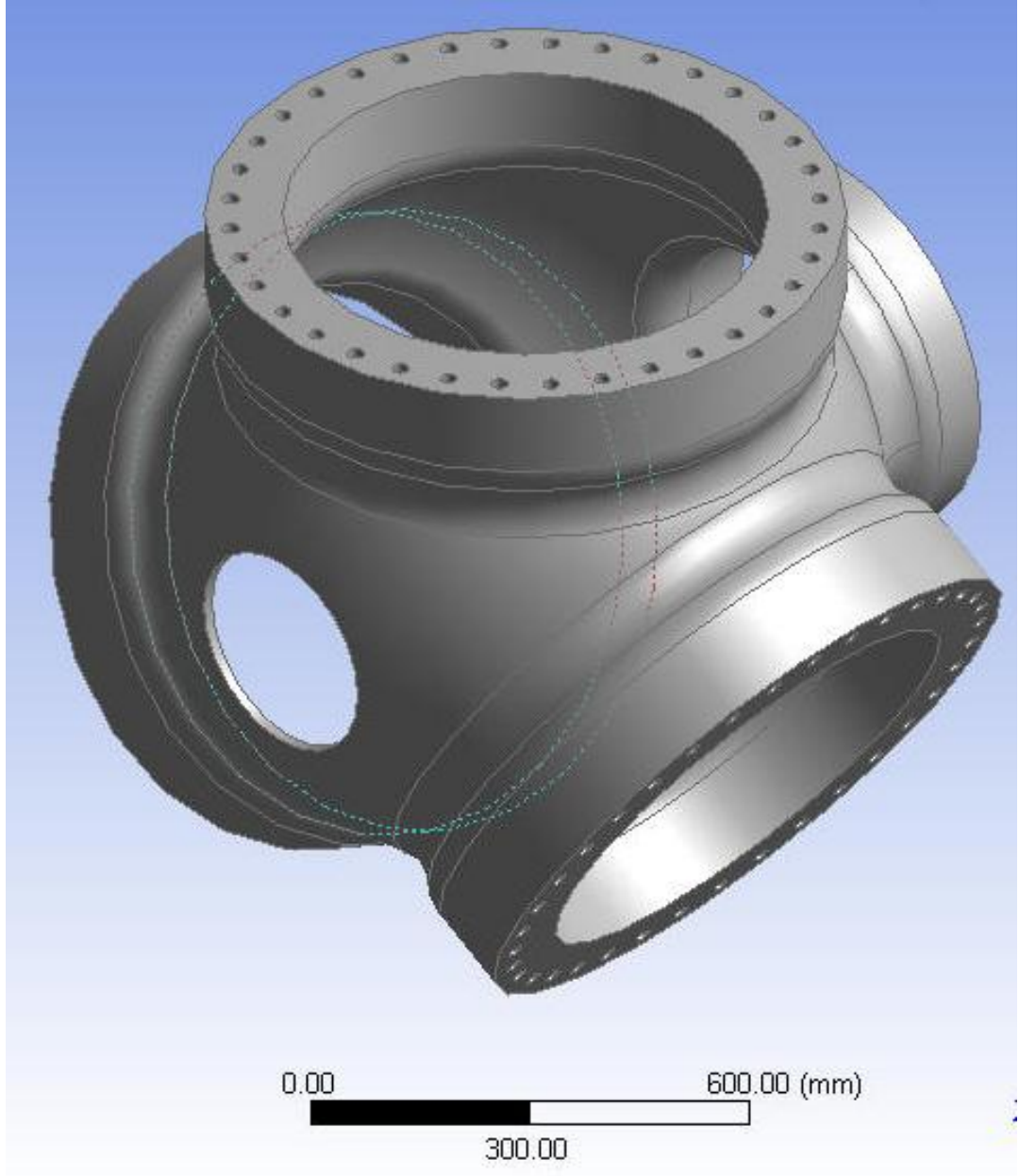
Şekil 8.2 : Halka Kalınlık Çarpanı 3'ten 5'e çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu.



Şekil 8.3 : Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi 8'den 20'ye çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu.



Şekil 8.4 : Halka Yükseklik Oran Yüzdesi 5'ten 10'a çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu

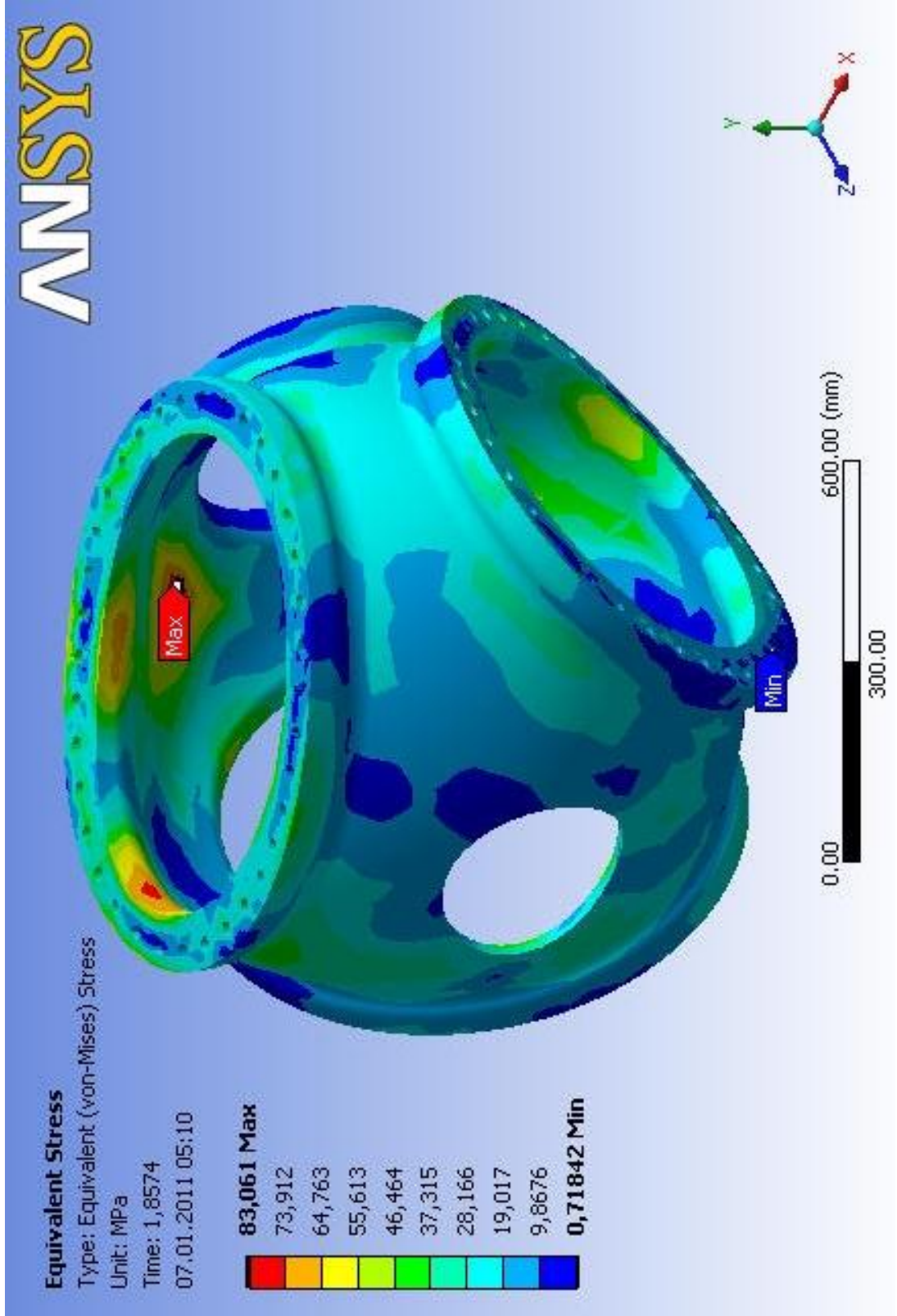


Şekil 8.5 : Halka Kalınlık Çarpanı 3'ten 5'e, Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi 8'den 15'e ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi 5'ten 15'e çıkarıldığında göbek geometrisi yeni durumu.

## 8.1. Yorulma Analizinin Yapılması

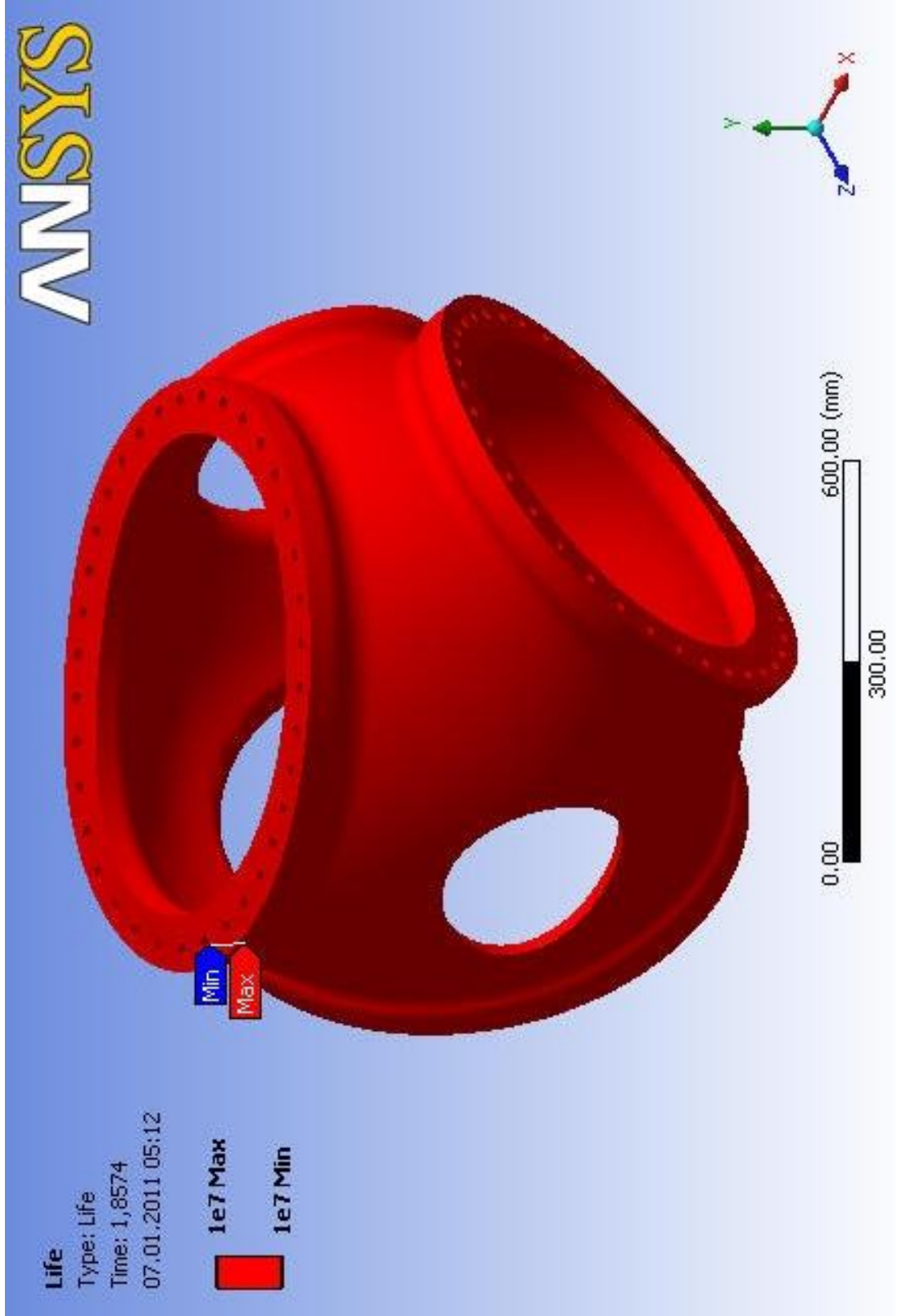
Önceki analizde yapılanlar tekrar uygulanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Tresca Kriteri'ne göre Eşdeğer Gerilme Genliği, Yorulma Emniyet Katsayısı ve Yorulma Ömrü bulunmuştur (Şekil 8.6, 8.7 ve 8.8). Bulunan bu değerler optimizasyonda incelenmeleri için WB'de publish komutuyla dışarı verilmişlerdir.



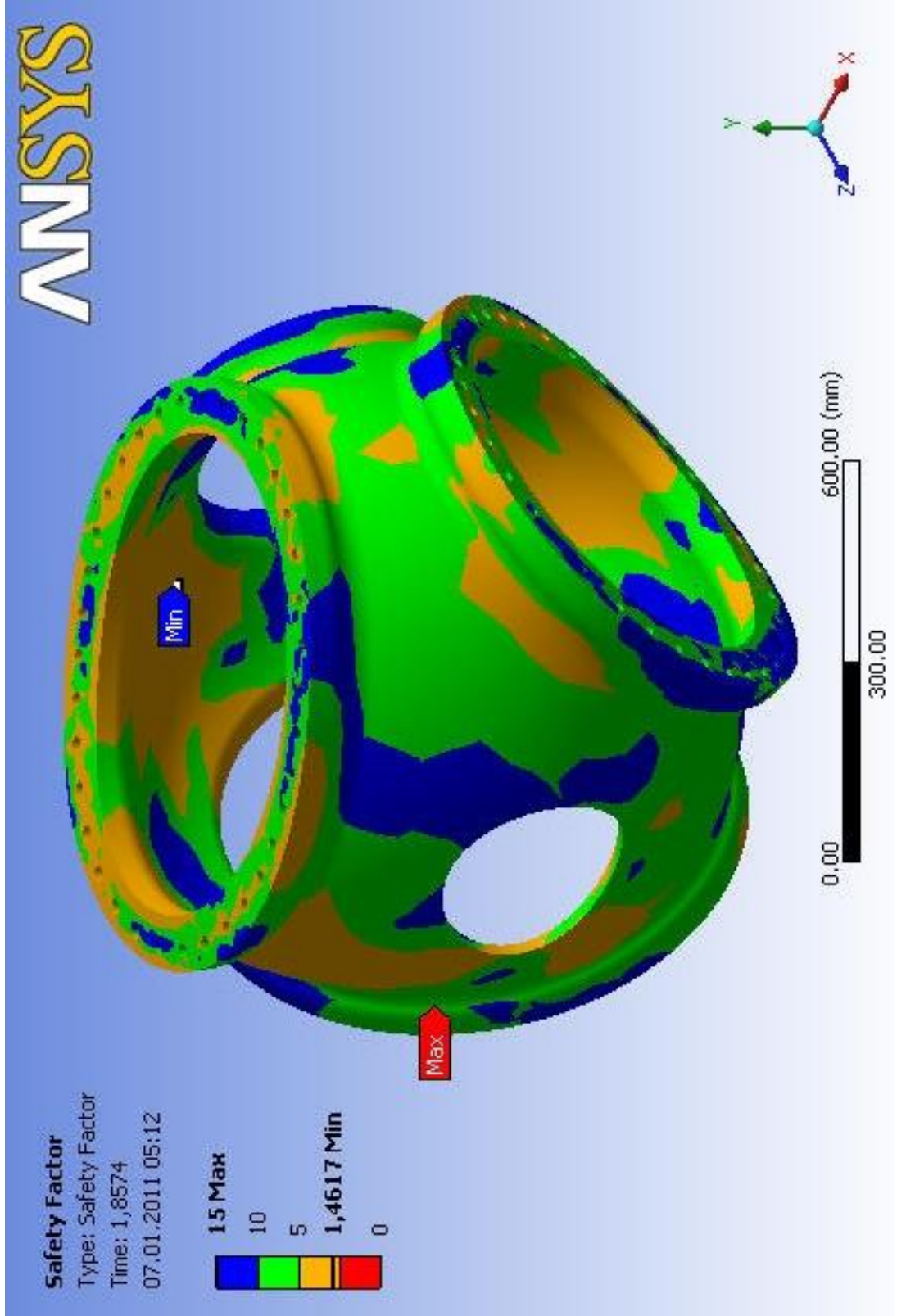


Şekil 8.6 : 500 kW' lık YERT küresel göbeği Eşdeğer Gerilme sonucu

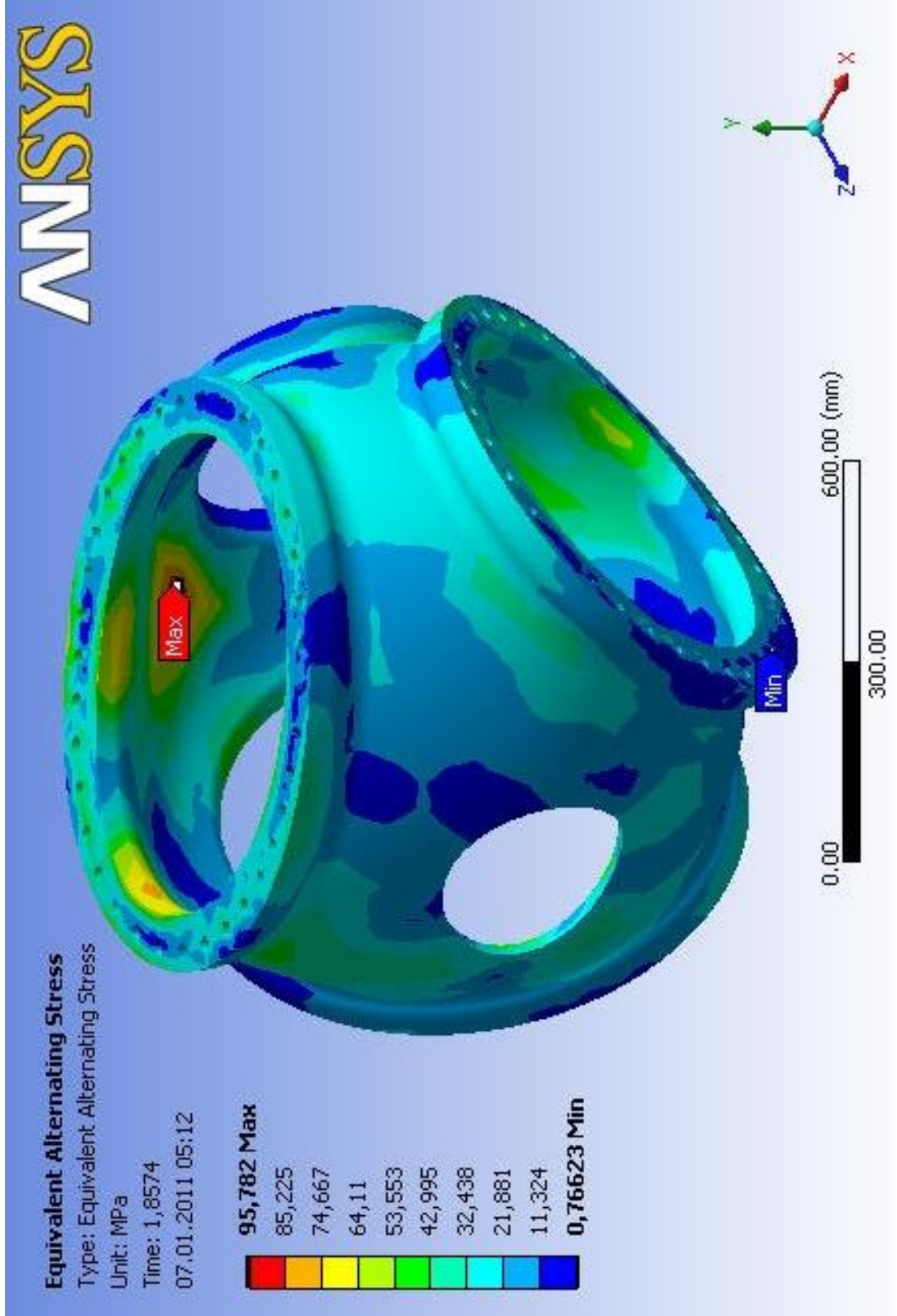




Şekil 8.7 : 500 kW' lık YERT küresel göbeği Yorulma Ömrü sonucu



Şekil 8.8 : 500 kW'lık YERT küresel göbeği Yorulma Emniyet Katsayısı sonucu



Şekil 8.9: 500 kW' lık YERT küresel göbeği Eşdeğer Gerilme Genlemesi sonucu

## 8.2. Optimizasyon

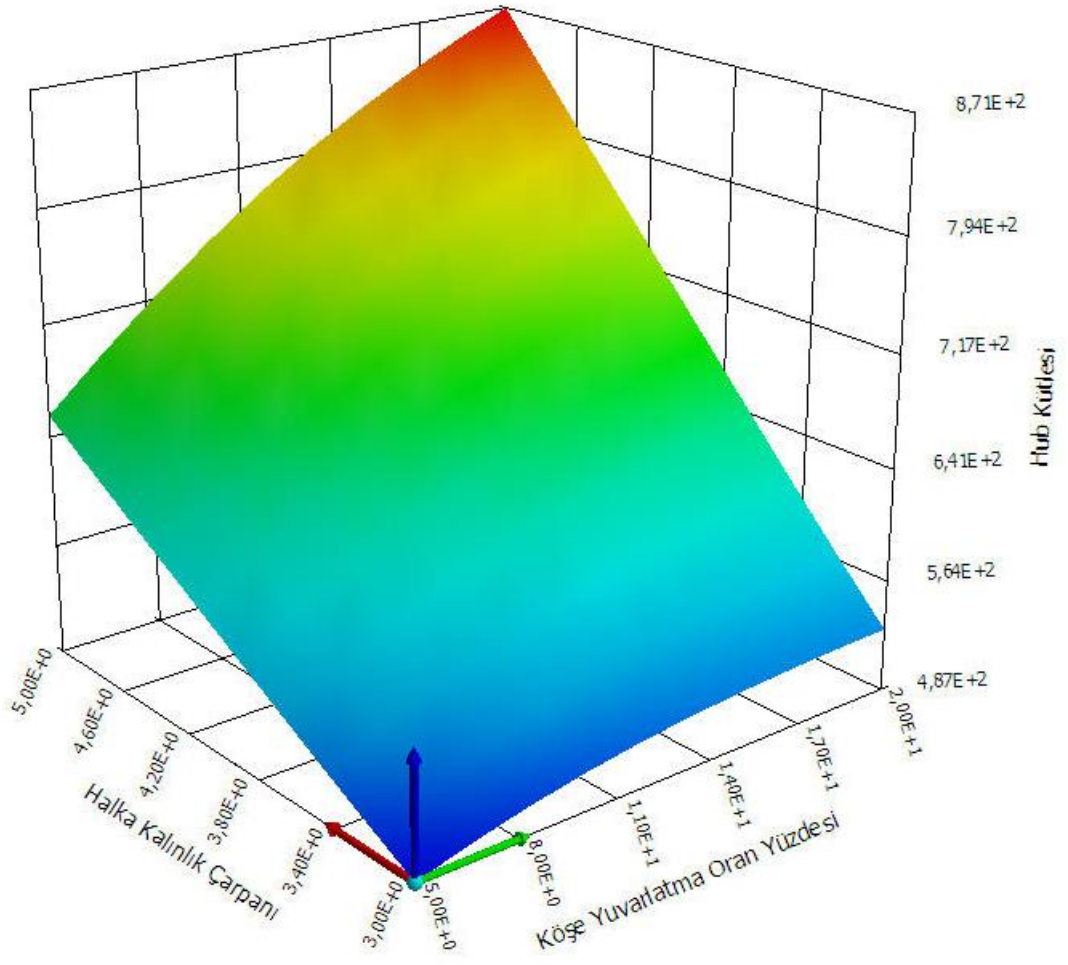
Yorulma analizi sonuçları üzerinden gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında Halka Kalınlık Çarpanı, Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi kullanılan bağımsız değişkenlerdir. Yorulma analiziyle bulunan Eşdeğer Gerilme Genliği, Göbek Kütlesi, Yorulma Emniyet Katsayısı ve Yorulma Ömrü ise gösterilen sonuçlardır. Bağımsız değişkenler ait ayarlar Tablo 8.1’de gösterilmiştir. Bulunan sonuçlar Şekil 8.10-19’da gösterilmiştir.

Tablo 8.1 : Tasarım Değişkenleri Ayarları

### Design Parameters

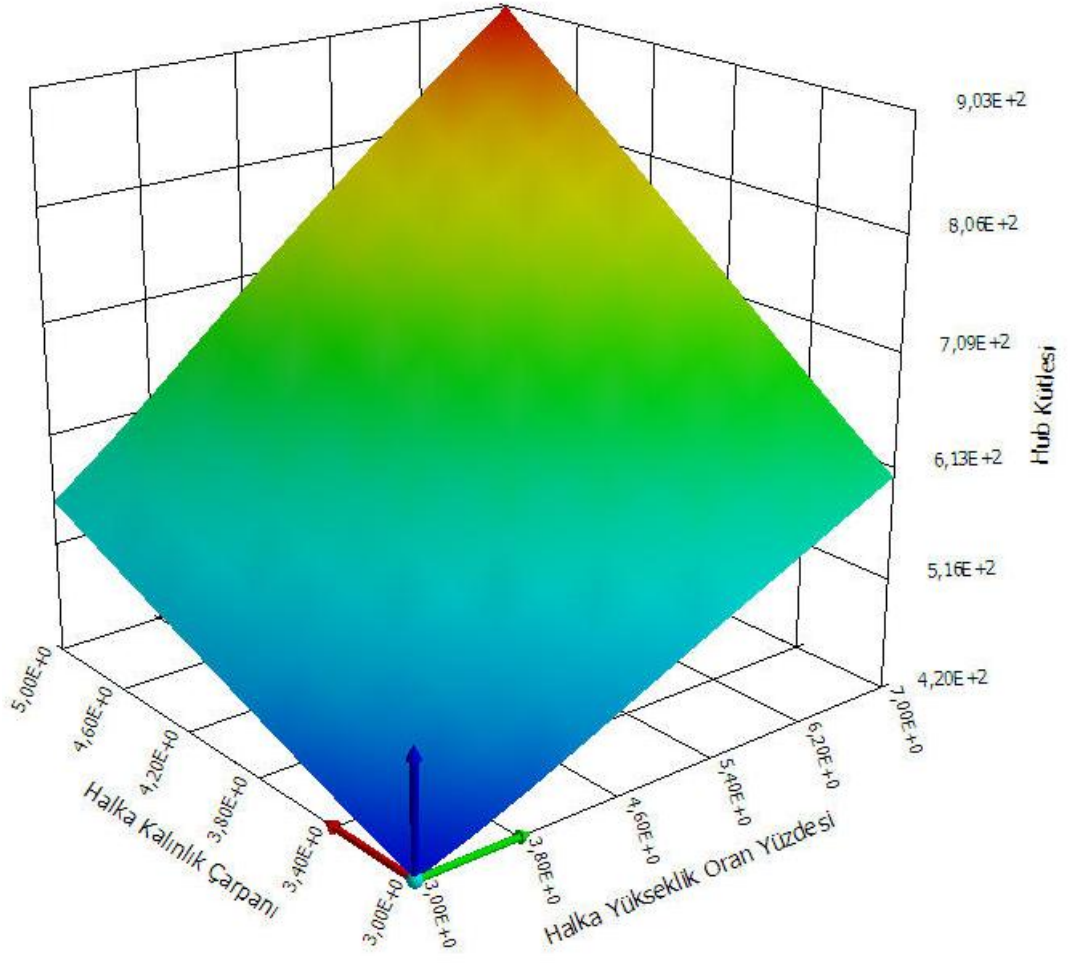
TABLE 1  
Continuous input parameter definitions

ID	Name	Lower Bound	Upper Bound	Usable Values	Initial Value
P20	Halka Kalınlık Çarpanı	3,	5,	Continuous	3,
P185	Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi	5,	20,	Continuous	8,
P186	Halka Yükseklik Oran Yüzdesi	3,	7,	Continuous	5,

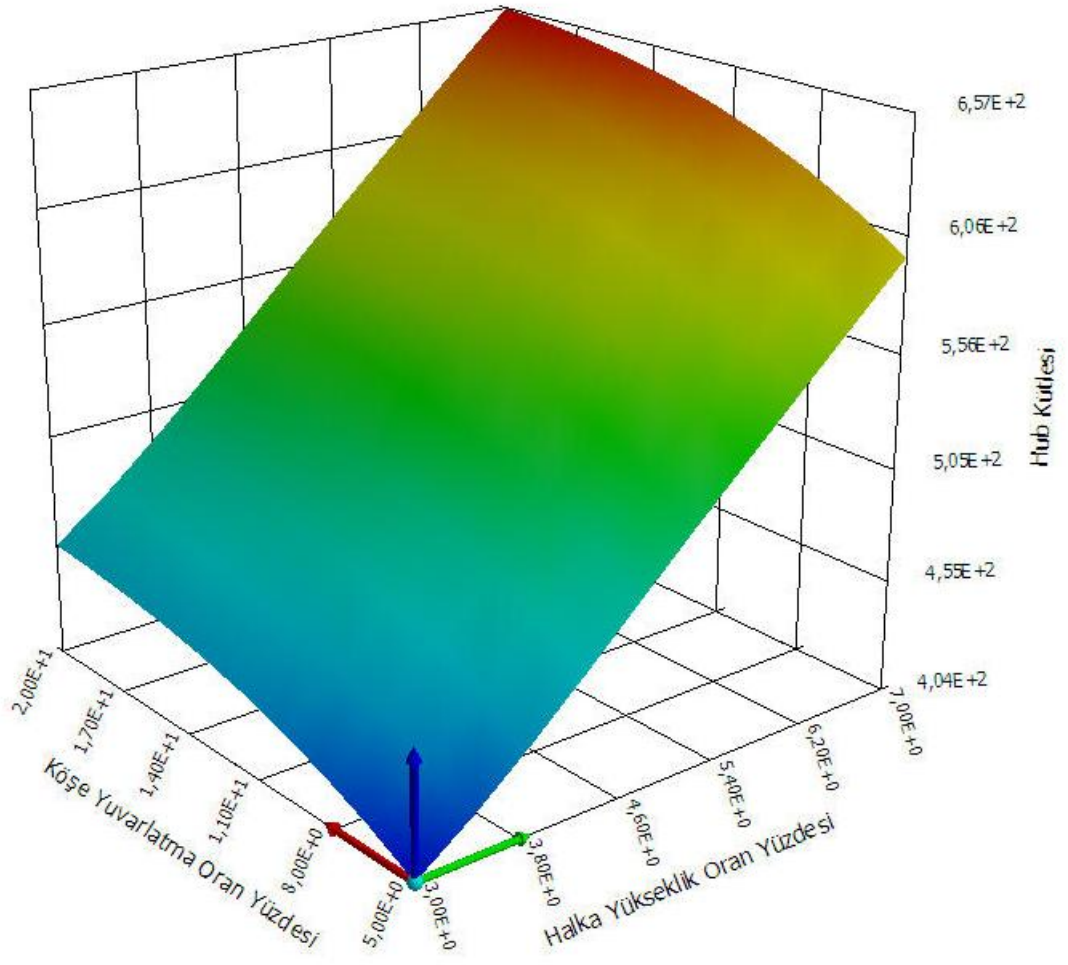


Şekil 8.10: Göbek Kütlesi'nin Halka Kalınlık Çarpanı ve Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi'ne göre değişimi

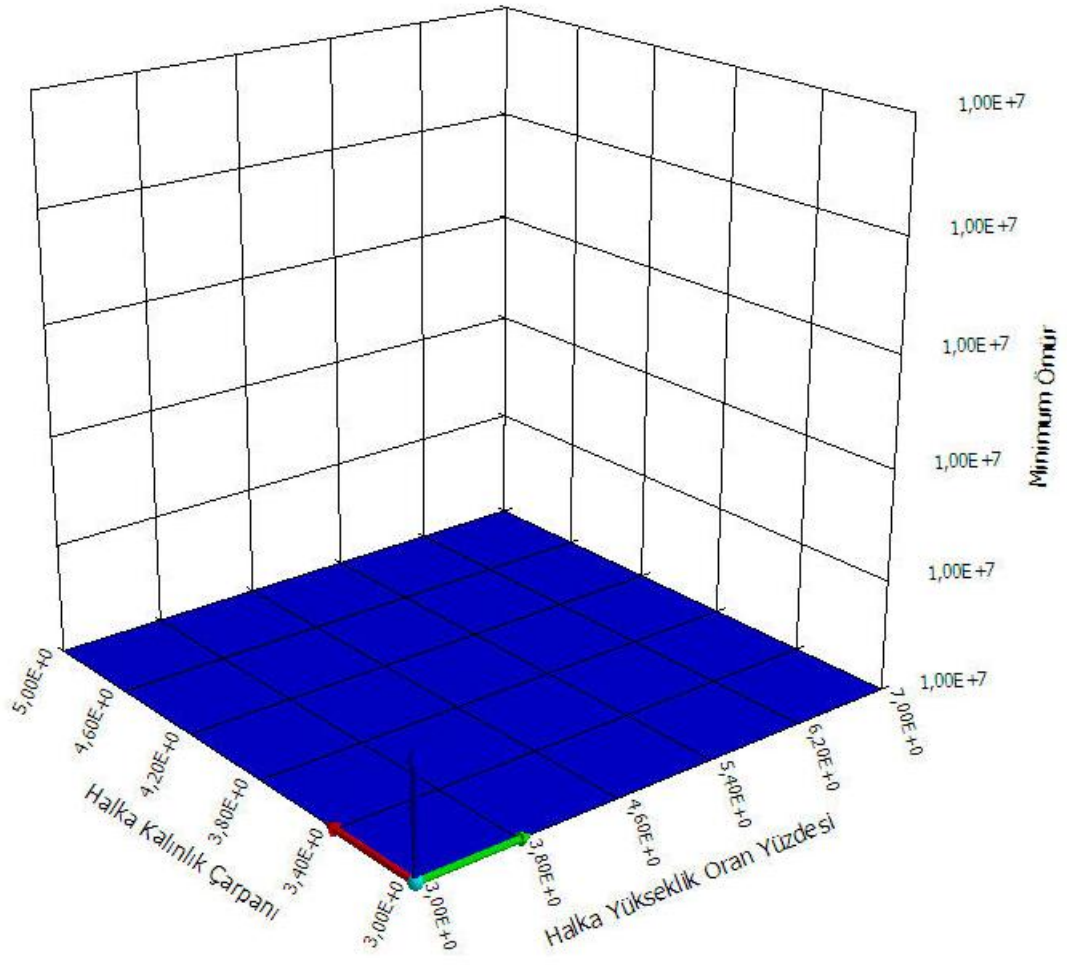




Şekil 8.11: Göbek Kütlesi'nin Halka Kalınlık Çarpanı ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi

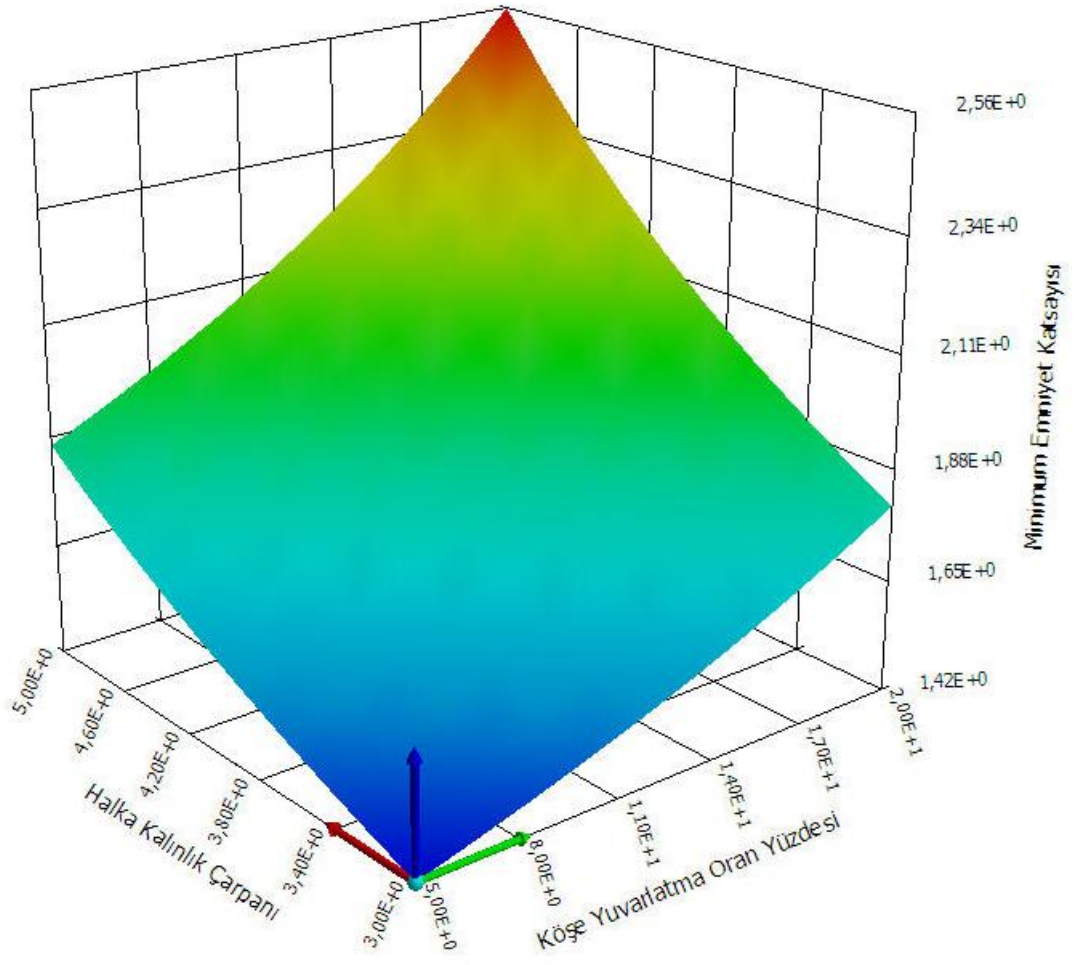


Şekil 8.12: Göbek Kütlesi'nin Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi

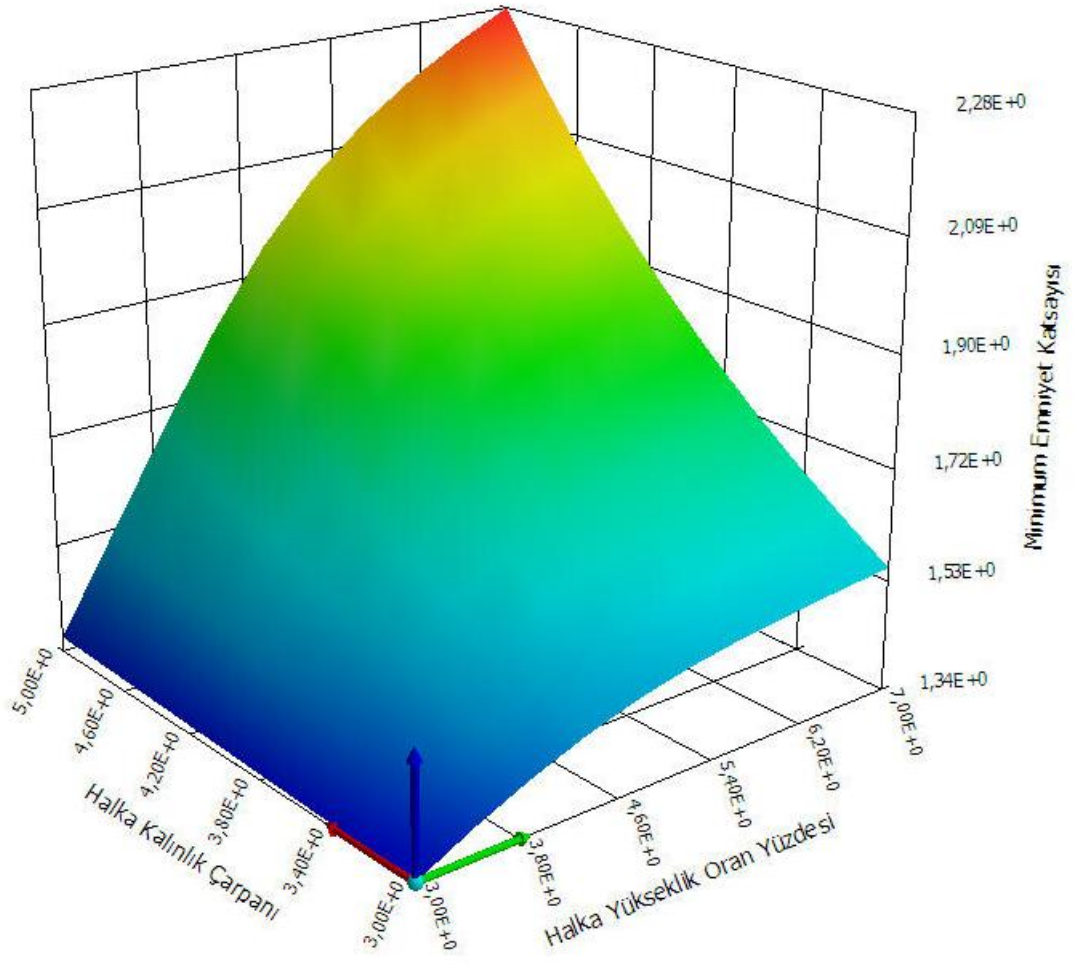


Şekil 8.13: Minimum Ömrün Halka Kalınlık Çarpanı ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi

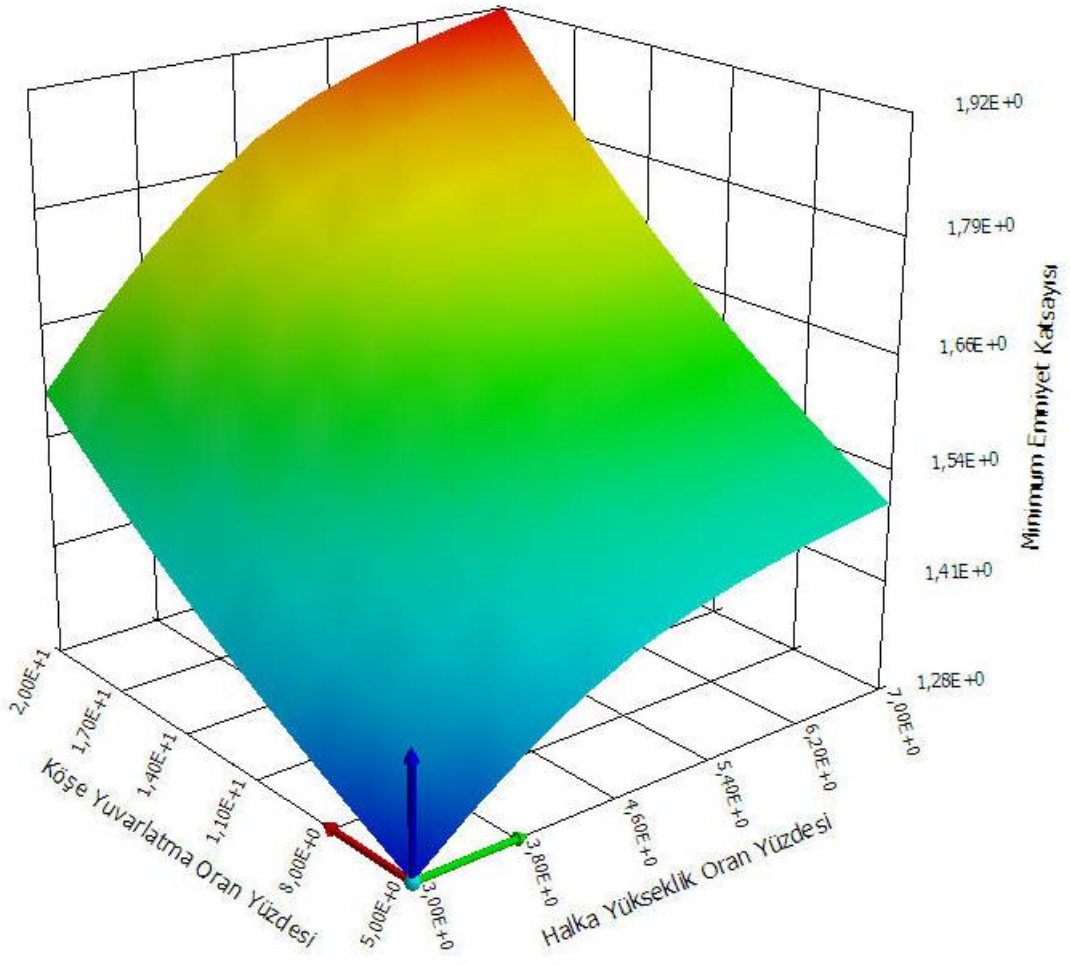




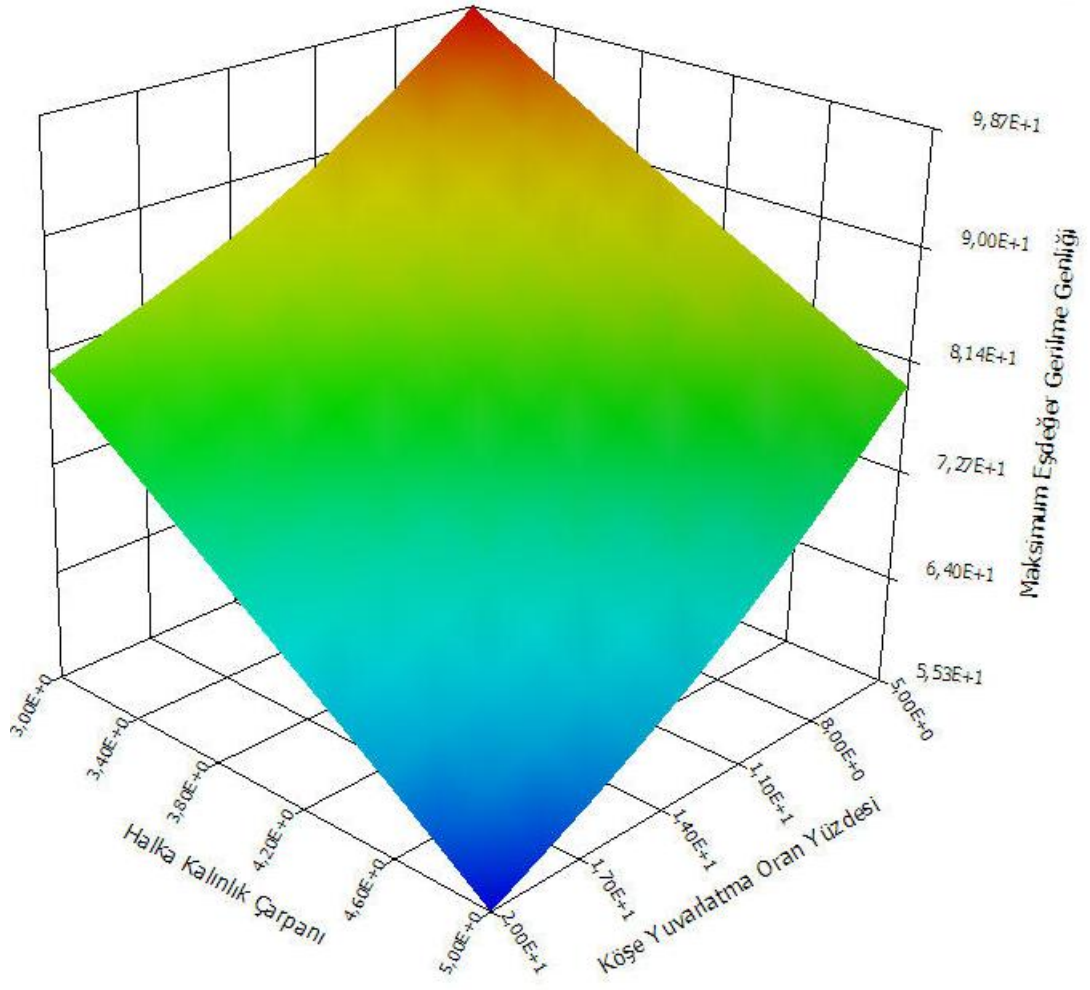
Şekil 8.14: Minimum Emniyet Katsayısı'nın Halka Kalınlık Çarpanı ve Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi'ne göre değişimi



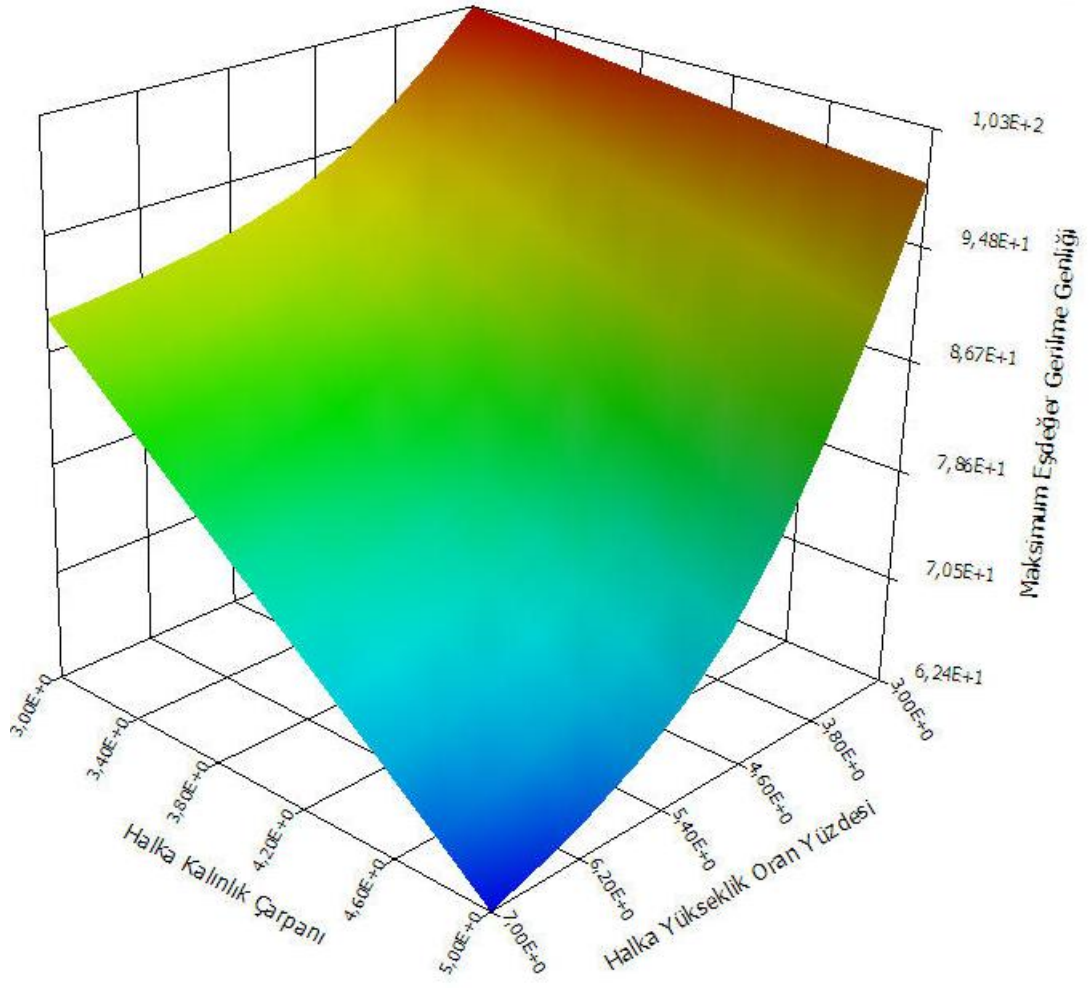
Şekil 8.15: Minimum Emniyet Katsayısı'nın Halka Kalınlık Çarpanı ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi



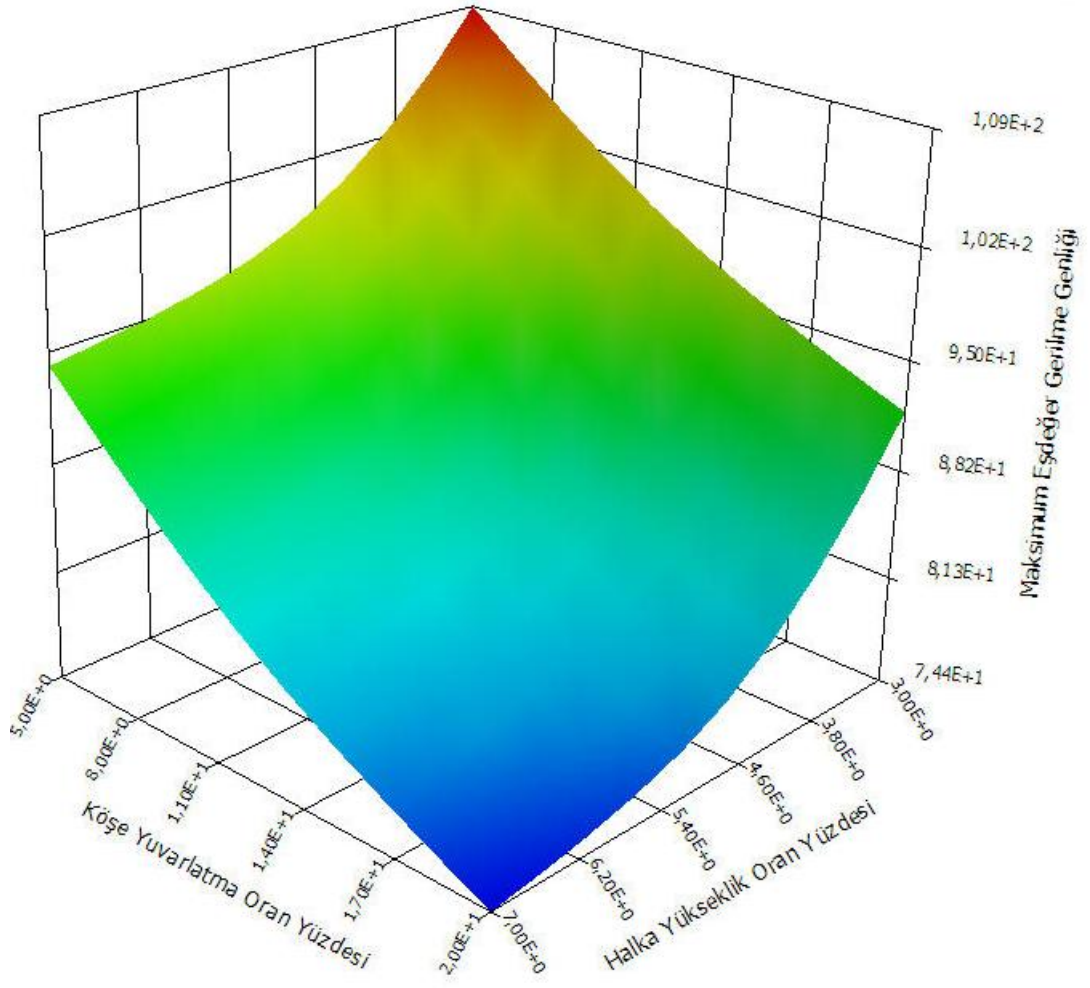
Şekil 8.16: Minimum Emniyet Katsayısı'nın Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi



Şekil 8.17: Maksimum Eşdeğer Gerilme Genliği'nin Halka Kalınlık Çarpanı ve Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi'ne göre değişimi



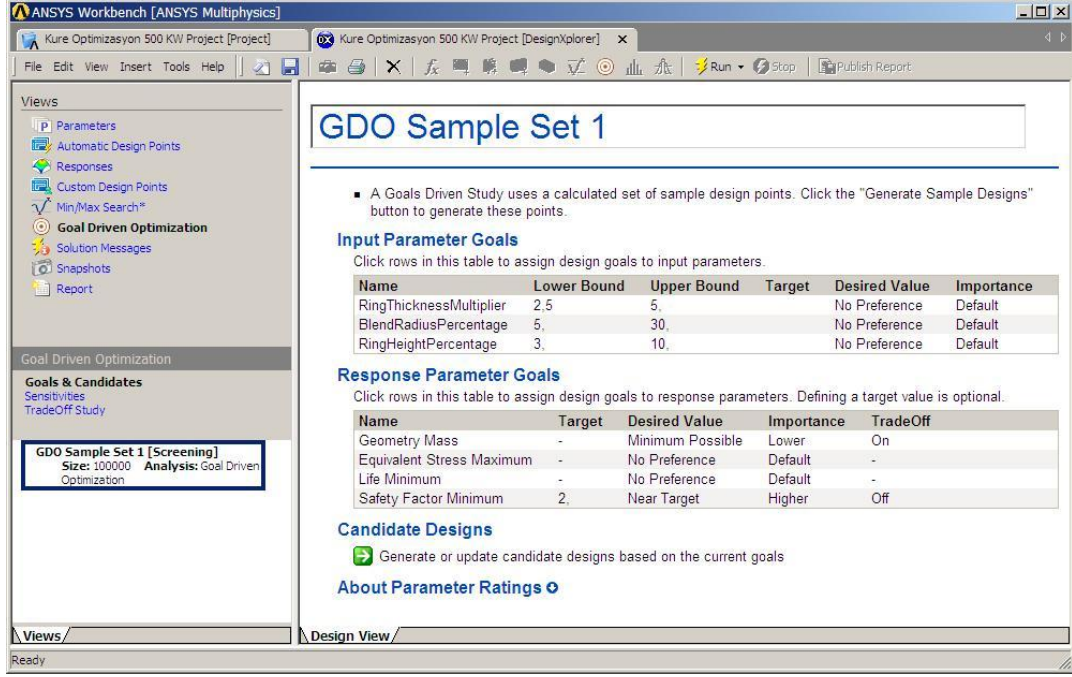
Şekil 8.18: Maksimum Eşdeğer Gerilme Genliği'nin Halka Kalınlık Çarpanı ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi



Şekil 8.19: Maksimum Eşdeğer Gerilme Genliği'nin Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi ve Halka Yükseklik Oran Yüzdesi'ne göre değişimi



Optimum göbek geometrisini veren bağımsız değişken değerlerini bulabilmek için yine GDO (Şekil 8.20) yapılmıştır.

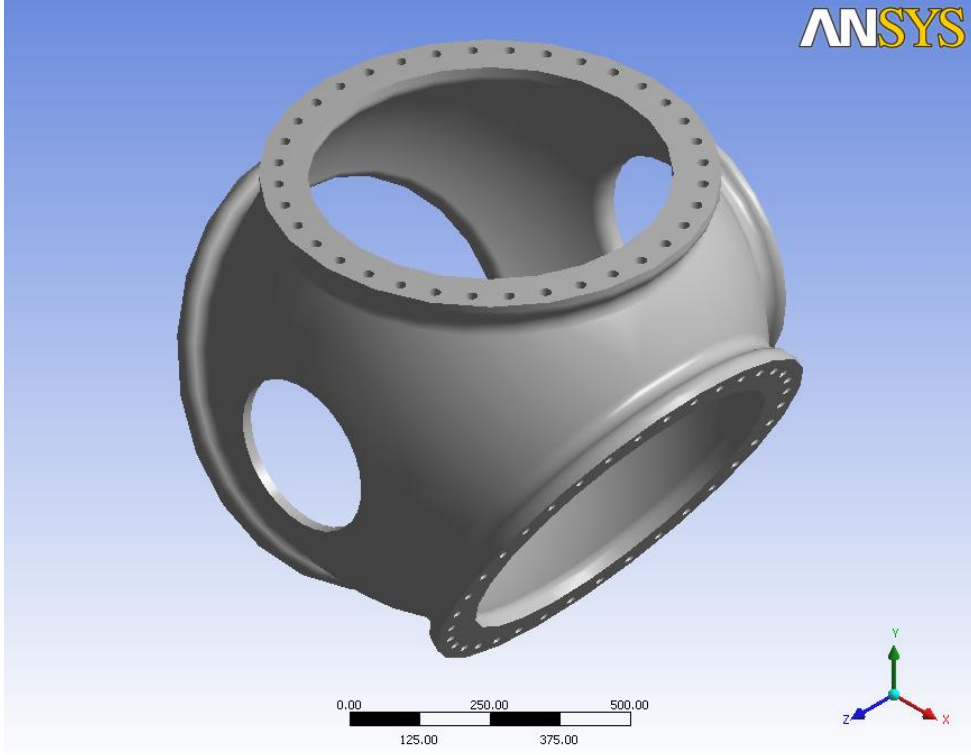


Şekil 8.20: GDO Sonucu

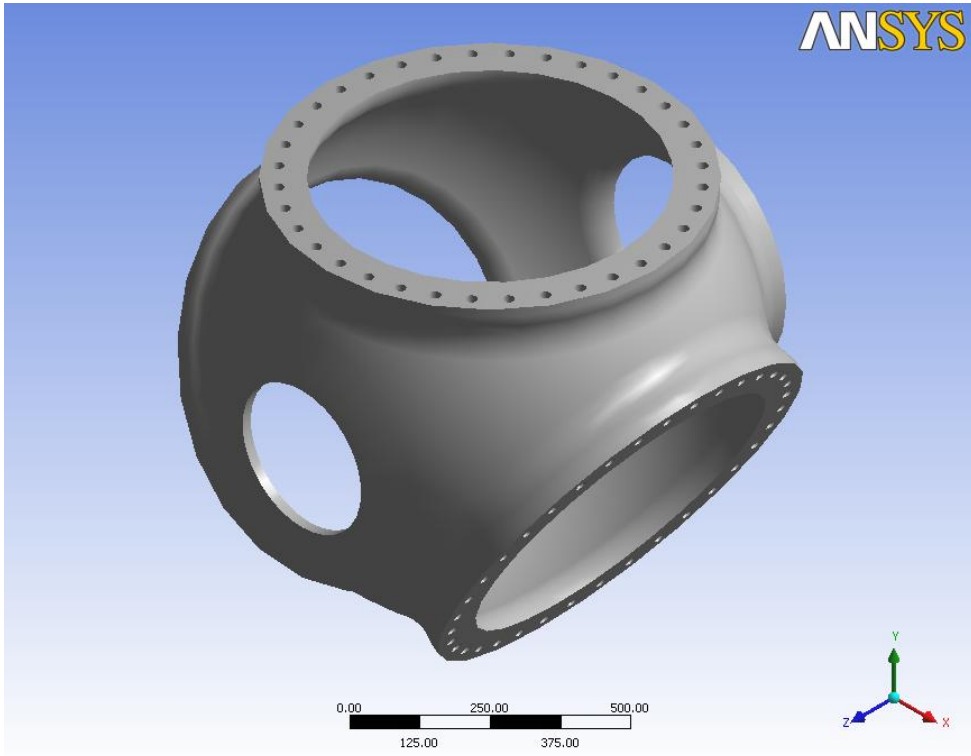
Bulunan sonuçlar Tablo 8.2, Şekil 8.21-23 de gösterilmektedir..

Tablo 8.2: Tasarım Noktaları

Değişkenler	Birim	Tasarım Noktaları		
		1	2	3
Halka Kalınlık Çarpanı	mm	3,0865	3,0379	3,5631
Köşe Yuvarlatma Oran Yüzdesi		5,7918	16,075	19,96
Halka Yükseklik Oran Yüzdesi		3,088	3,0825	5,3492
Hub Kütlesi	kg	410,38	442,42	644,81
Minimum Ömür	çevrim	1,00E+07	1,00E+07	1,00E+07
Minimum Emniyet Katsayısı		1,2978	1,4964	1,9906
Maksimum Eşdeğer Gerilme Genliği	Mpa	106,91	94,502	71,767

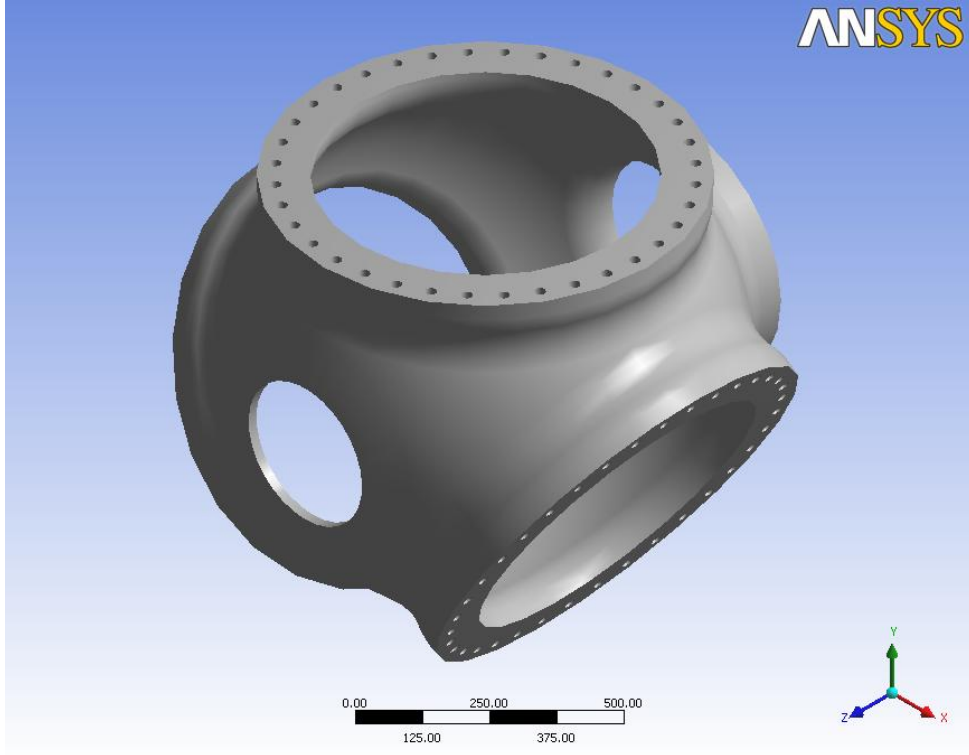


Şekil 8.21: Tasarım Noktası 1



Şekil 8.22: Tasarım Noktası 2





Şekil 8.23: Tasarım Noktası 3

Belirlenen noktalardaki göbek kütlelerinin optimize edilmemiş göbek kütleleriyle karşılaştırılması Tablo 8.3'de gösterilmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi emniyet katsayısının 1,3 olduğu durumda yaklaşık %8, 1,5 olduğu durumda yaklaşık %12 ve 2 olduğu durumda yaklaşık %5 kütle azalması gerçekleştirilmiştir. Emniyet katsayısının 1,5 olduğu durum için azalmanın en fazla olmasının nedeni değişken seçimlerinin bu noktaya göre alınmasıdır.

Tablo 8.3: Optimizasyon Kazancı

Değişkenler	Birim	Emniyet Katsayısı		
		1,3	1,5	2
<b>Optimizasyondan Önce</b>	kg	445,29	502,28	677,60
<b>Optimizasyondan Sonra</b>	kg	410,38	442,42	644,81
<b>Fark</b>	kg	34,91	59,86	32,79
	%	7,84	11,92	4,84

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1. Sonuçlar

İlk olarak piyasada varolan rüzgar türbinlerine ait göbek şekilleri incelenmiş ve göbek şekli olarak plaka ve küre formları seçilmiştir.

Göbek boyutları, yapılan araştırmayla bulunan değerlere uygun olarak Denklem 6.1-4'te ampirik biçimde ifade edilmiştir.

Modellemede göbek çapı ve göbek kalınlığı bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Diğer boyutlar ise göbek çapına bağlı olarak ifade edilmiştir. Plaka göbekte en büyük köşegen uzunluğu göbek çapı olarak seçilirken, küresel göbekte kanat bağlantı geometrisi dikkate alınmadan kürenin çapı göbek çapı olarak seçilmiştir.

Göbek malzemesinin belirlenmesi amacıyla yapılan araştırmada plaka şeklindeki göbeklerde pekçok farklı metal alaşımının kullanılabilirdiği görüldüğünden plakagöbek malzemesi olarak paslanmaz çelik (Şekil 6.9, 6.10) seçilmiştir. Küre şekilli göbek için ise döküm zorunluluğu ve tasarımın yorulmaya göre yapılacak olması nedeniyle bir küresel grafitli dökme demir türü olan EN GJS 400 18-LT (Şekil 6.11, 6.12) seçilmiştir.

Ağ yapılandırma (mesh) işlemi Ansys-Workbench yazılımında varsayılan ayarlarla yapılmıştır (Şekil 6.13). Plaka göbekler için yaklaşık 2000 düğüm noktasından (node) oluşan 900 adet üç boyutlu tetrahedron elemanlı yapısal (structural) analizler yapılmıştır. Küresel göbekler için ise analizlerde yaklaşık 30000 düğümlü 14000 adet 3 boyutlu tetrahedron eleman kullanılmıştır.

Analiz işlemi için ana koordinat sistemi olarak göbeğin koordinat sistemi (Şekil 6.14, 6.15) seçilmiştir. Bu sayede göbekte beraber dönen dinamik kuvvetlerin temsilinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Sadece ağırlık kuvvetleri rüzgar türbin koordinat sistemine göre statik iken göbek koordinat sistemine göre tam değişken olmuşlardır. Analiz işlemi 1 adet başlangıç adımı ve göbeğin 30°'lik dönüşünü temsil eden 12 adet ilave adım olmak üzere toplam 13 adımlı (Şekil 6.17) yapılmıştır.

Yapılan çalışmada göbek koordinat sistemi referans seçildiği için göbeğin kendi ağırlığının uygulanmasında Standard Earth Gravity'nin dönmesinin de hesaba katılması gerekmiştir. Bu nedenle Standard Earth Gravity yerine probleme uygun bir ivme (Şekil 6.18) kullanılmıştır. Bu ivme, şiddeti sinüsoidal olarak değişen, maksimum  $9806,6 \text{ mm/s}^2$  , minimum  $-9806,6 \text{ mm/s}^2$  olan ve periyodu rüzgar türbininin periyoduyla aynı olan X ve Y eksenlerindeki iki bileşenle gösterilmiştir.

Göbeğin sahip olduğu kütle ve ekseni etrafındaki dönüşünden dolayı etkisi altında kaldığı merkezkaç kuvvetin Workbench'te uygulanabilmesi için Inertial Loads'dan Rotational Velocity (Şekil 6.19) seçilmiştir. Türbin teknik özellikleri için hazırlanan tablodan (Tablo 6.1) ilgili türbine ait açılma hız değeri Workbench' te uygulanmıştır. Göbek dönme ekseni rüzgar türbin koordinat sisteminde sabit kaldığı için bu kuvvetle ilgili herhangi bir düzeltmeye gerek olmamıştır.

Rüzgar türbininin çalışması süresince dönmeden dolayı kanatlarda oluşan merkezkaç kuvvetleri (Şekil 6.20) normalde dinamik olmalarına karşın dönüş hızının sabit

olması ve analiz işlemi için seçilen koordinat sisteminin de kanatlarla beraber dönmesi dolayısıyla seçilen koordinat sisteminde statik olmuşlardır. Şiddetleri kanat kütlesi, kanat kütle merkezinin dönme eksenine olan uzaklığı ve dönme hızına bağlı olan bu kuvvetler için Denklem 6.5 yardımıyla hazırlanan tablo (Tablo 6.3) kullanılarak ilgili türbine ait değerler uygulanmıştır.

Rüzgar türbininin çalışması süresince rüzgarın türbin kanatlarına uyguladığı kuvvetin rotor düzleminde ve kanada dik olan ve güç üretimini sağlayan bileşeni (Şekil 6.21) olan kanat döndürme kuvvetleri WB' de Remote Force olarak girilmiştir. Bu sayede ayrıca bir moment ilavesine gerek kalmamıştır. Kuvvetlerin uygulama doğrultularını oluşturabilmek için her bir kuvvet iki bileşene ayrılmıştır. Bileşenler için Denklem 6.6 yardımıyla oluşturulan Tablo 6.4 kullanılarak ilgili türbine ait değerler analizde kullanılmıştır. Döndürme kuvvetleri normalde kanada dik olarak kanatla beraber döndüklerinden doğrultuları sürekli değişen dinamik kuvvetlerdir. Ancak analizde göbeğin koordinat sisteminin referans alınması sonucunda kanat döndürme kuvvetleri statik bir hal almışlardır.

Rüzgar türbininin çalışması süresince kanatlara rüzgar akış doğrultusunda etkiyen kanat eğme kuvvetlerinin (Şekil 6.22) uygulama noktaları kanat döndürme kuvvetleri ile aynıdır. Kanat döndürme kuvvetleri gibi remote force olarak uygulanmışlardır. Statik karakterlidirler. Denklem 6.7 ile gösterildiği gibi kanat döndürme kuvvetlerinin 1,5 katı olarak alınmışlardır. Hazırlanan tablodan (Tablo 6.4) ilgili türbine ait değerler alınıp analizde kullanılmışlardır.

Kanatların kütleleri nedeniyle göbeğe etkiyen kanat ağırlık kuvvetleri normalde statik olmalarına karşın göbek koordinat sisteminin referans olarak alınmasından dolayı tam değişken olmaktadır. Kuvvetlerin doğrultu ve yönlerindeki bu değişkenliği (Şekil 6.16) Workbench'te temsil edebilmek için kanat ağırlık kuvvetleri X ve Y eksenlerindeki iki kuvvetle temsil edilmiştir. Kanat ağırlık kuvvetleri bütün türbinler için Denklem 6.8 yardımıyla bir tablo olarak (Tablo 6.5)

hazırlanmış ve analizde ilgili türbine ait değerler tabular (Şekil 6.23) olarak kullanılmıştır.

Her bir rüzgar türbini ve göbek türü için yapılan gerilme analizleri sonucunda plaka göbek için Von Mises Kriteri'ne göre ve küresel göbek için Tresca Kriteri'ne göre eşdeğer gerilme genliği ile her iki göbek türü için yorulma emniyet katsayıları ve yorulma ömürleri bulunmuştur (Şekil 6.24). Yorulma analizinde yükler tam değişken olarak belirtilirken yorulma faktörü  $K_f$  analize katılmamıştır.

Yorulma analizi sonuçları üzerinden gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında Göbek Çapı ve Göbek Kalınlığı kullanılan bağımsız değişkenlerdir. Yorulma analiziyle bulunan Eşdeğer Gerilme Genliği, Göbek Kütlesi, Yorulma Emniyet Katsayısı ve Yorulma Ömrü ise gösterilen sonuçlardır (Şekil 7.1).

Çalışmada amaçladığımız tablonun oluşturabilmesi için ömür şartını sağlama koşuluyla üç farklı emniyet katsayısı için ( 1,3 – 1,5 – 2 ) minimum göbek kütesinin elde edileceği tasarımlara ait değişken değerlerini belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenebilmesi için DXE içersindeki GDO (Şekil 7.6) kullanılmıştır.

Yapılan ilk optimizasyon çalışmasında 500 kW'lık YERT küresel göbeği için 3 farklı emniyet katsayısı için bulunan göbek kütleleri şöyledir:

$$S = 1,3 \text{ için } m = 445 \text{ kg}$$

$$S = 1,5 \text{ için } m = 502 \text{ kg}$$

$$S = 2,0 \text{ için } m = 678 \text{ kg}$$

Analiz çalışmasının sonuçlarına dayanarak sonraki optimizasyon çalışmasında sabit olacak olan göbek çapı (d) ve göbek kalınlığı (t) için aşağıdaki değerler seçilmiştir.

$$d = 992 \text{ mm}$$

$$t = 19,5 \text{ mm}$$

Önceki analizde optimizasyon işlemine katılmayan diğer 3 değişken ise bu çalışmada değişimlerinin Göbek Kütlesi'ne etkisinin inceleneceği bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Yapılan ikinci optimizasyon çalışması sonucunda;

$$S = 1,3 \text{ için } m = 410 \text{ kg}$$

$$S = 1,5 \text{ için } m = 442 \text{ kg}$$

$$S = 2,0 \text{ için } m = 645 \text{ kg}$$

olarak bulunmuştur. İlk sonuçlar ile karşılaştırma yapılıncaya aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

$$S = 1,3 \text{ için } \text{Göbek kütlesindeki eksilme} = 35 \text{ kg } \text{veya } = \%8$$

$$S = 1,5 \text{ için } \text{Göbek kütlesindeki eksilme} = 60 \text{ kg } \text{veya } = \%12$$

$$S = 2,0 \text{ için } \text{Göbek kütlesindeki eksilme} = 33 \text{ kg } \text{veya } = \%5$$

Emniyet katsayısının  $S=1,5$  olduğu tasarım noktasında optimizasyon öncesi göbek kütlesine göre %12'lik azalmanın elde edilmesi önemli bir kazanç olarak kayıt edilebilir. Diğer noktadaki kütle azalmasının bu değerden daha az olmasının nedeni ise optimizasyona dahil edilmeyen göbek çapı ve kalınlık değerlerinin

emniyet katsayısının  $S=1,5$  olduğu noktaya göre seçilmesidir. İkinci yapılan analizler için  $S=1,5$  lik emniyet katsayısına sahip teknik özellikler referans alınmıştır. Dolayısıyla, diğ er emniyet faktörleri için kendi referans değerleri ile yapılacak olan analiz karşılaştırmaları sonucunda  $S=1,3$  ve  $S=2$  noktaları için daha fazla kütle azalması gerçekleştirilebilir.

## 9.2. Öneriler

Yapılan çalışmada sadece plaka ve küresel göbek geometrileri incelenmiştir. İncelemeye borsal göbek geometrisi ve ilave farklı geometrilerin de eklenmesi önerilebilir.

Göbeğin plaka ve küresel şekilli sonlu eleman katı modelleri, Ansys Workbench (WB) yazılımı ile yapılmıştır. WB ile modellemede yazılımdan kaynaklanan teknik zorluklar nedeniyle model parametrik olarak daha fazla geliştirilememiştir. Bu amaca uygun bir modelleme yazılımı kullanarak daha gelişmiş modellerin hazırlanması ve bu modellerin analizlerde kullanımıyla daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir. Özellikle, kalınlığın çok yüksek olduğu kanat bağlantı bölümlerinde iç boşluk oluşturma denenmelidir. Ancak bu boşlukların dökümde nasıl elde edilebileceği ve gerilme dağılımını nasıl etkileyecekleri de düşünölmelidir. Ayrıca göbeğin çeşitli yerlerinde gerilmenin fazla olduğu bölgelerde mukavemet artırma amaçlı yapısal değişiklikler de yapılabilir.

Ağ yapılandırma (mesh) işlemi Workbench'te varsayılan ayarlarla yapılmıştır. Ancak, sadece mesh oluşturma amaçlı profesyonel yazılımlardan biri kullanılarak hazırlanacak modelin sonlu elemanlar analizlerinde dahil edilmesi sonucunda ağırlığın daha da azaltılabilmesi mümkün olabilecektir. Ayrıca, gerilmenin yüksek olduğu bölgelerde mesh özelliklerinin hassaslaştırılması gerilme yığılmalarını

azaltarak analiz sonucunun daha da gerçekçi olmasına katkı sağlayacak ve bu sayede ağırlık daha da azaltılabilecektir.

Sonlu eleman analiz işlemlerinde kullanılan malzemelerle ilgili olarak daha geniş ve güncel bir araştırma yapılarak özellikle yorulma açısından daha gerçekçi malzeme katsayıları bulunabilir ve bunların analizde kullanılmasıyla daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi önerilir. Rüzgar türbin sektörünün nispeten yeni olması nedeniyle göbek malzemesi konusunda daha pekçok çalışmanın yapılacak olması bu konudaki çalışmaların takip edilmesini gerektirmektedir. Günümüzde, 100 kW üstü güçteki rüzgar türbinlerinde göbek üretimi döküm ile sağlandığından göbek malzemesi olarak döküme uygun malzemeler kullanılmaktadır. Ancak, özellikle 5 MW üstü güçteki rüzgar türbinlerinde dökme demirden yapılmış göbeğin çok ağır olması nedeniyle ileride bu türbinlerde göbek malzemesi olarak kompozit malzeme kullanılabilir.

Yapısal sonlu elemanlar analizinde uygulanan kuvvetlerin literatürdeki çalışmalardan elde edilen bilgilere dayanarak bulunması yerine, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Kinematik Hareket Yazılımları kullanılarak kanat akış ve dinamik hareket analizleri yapılarak bu kuvvetlerin belirlenmeleri elde edecek sonuçların güvenilirliğini artıracaktır.

Sonlu elemanlar analizleri, türbinin sürekli olarak nominal gücünde çalışacağını kabul eden ve göbeğe etkiyen kuvvetleri bu kabule göre belirleyen deterministik yöntemle göre yapılmıştır. Son zamanlarda türbinlere etkiyen kuvvetlerin bulunmasında, türbinin, ülke şartlarında ömrü boyunca işletileceği güç değerlerinin istatistiksel olarak tahmin edilmesine dayanan stokastik yöntem tercih edilmektedir. Bu nedenle göbeğe etkiyecek kuvvetlerin belirlenmesi için stokastik yöntemlerden yararlanılması göbek kütlesinin daha da azaltılarak optimize edilmesini sağlayacaktır.



Türbin tekrarlı değişken yük altında çalıştığı için göbeğin yapısal tasarımı yorulma analizine göre yapılmıştır. Zorlanma türü olarak tam değişken zorlanma seçilmiş, yorulma dayanım faktörü,  $K_f=1$  alınarak boyut ve yüzey faktörlerinin etkisi analize katılmamıştır. Bunlarla ilgili olarak yapılacak çalışmalar daha gerçekçi sonuç alınmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca sonuçların güvenilirliğini artırmak için IEC 61400-1 tasarım standardına göre aniden durma, yalpalama (yaw) vb. aşırı şartlar için önerilen ilave analizler yapılabilir.

Optimizasyon çalışmasında, artan değişken sayısının bilgisayar hesaplama süresini aşırı artırması nedeniyle modellemede değişken sayısı istenildiği kadar artırılamamıştır. Daha karmaşık şekilli ve parametrelili bir modelin daha gerçekçi sonuç verecek olmasından dolayı böyle bir modelle ilgili olarak optimizasyon çalışması yapabilmek için yüksek işlem gücüne sahip bir bilgisayar önerilir.

## KAYNAKLAR

1. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., “Wind Energy Handbook”, *John Wiley & Sons Ltd*, (2001).
2. Rüzgar Türbini [Online], [http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar\\_türbini](http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar_türbini), (**Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2011**).
3. Energy [Online], <http://en.wikipedia.org/wiki/Energy>, (**Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2011**).
4. Conservation Of Energy [Online], [http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation\\_of\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_of_energy), (**Ziyaret tarihi: 2 Ocak 2011**).
5. Schlager, N., Weisblatt, J., “Alternative Energy”, *Thomson Gale*, (2006).
6. Rüzgar Gücü [Online], [http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar\\_gücü](http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar_gücü), (**Ziyaret tarihi: 7 Mart 2011**).
7. [Online], [http://www.freefoto.com/images/39/12/39\\_12\\_54---Lowestoft-Wind-Turbine\\_web.jpg?&k=Lowestoft+Wind+Turbine](http://www.freefoto.com/images/39/12/39_12_54---Lowestoft-Wind-Turbine_web.jpg?&k=Lowestoft+Wind+Turbine), (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
8. [Online], <http://www.mywindpowersystem.com/wp-content/uploads/2009/05/dutch-wind-mills.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
9. [Online], <http://www.denizyelken.com/images/y-1.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
10. [Online], [http://www.mywindpowersystem.com/wp-content/uploads/2009/05/charles\\_brush-wind-turbine.jpg](http://www.mywindpowersystem.com/wp-content/uploads/2009/05/charles_brush-wind-turbine.jpg), (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
11. [Online], [http://blog.oregonlive.com/environment\\_impact/2009/08/large\\_wind\\_turbines\\_sherman\\_co.jp.JPG](http://blog.oregonlive.com/environment_impact/2009/08/large_wind_turbines_sherman_co.jp.JPG), (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
12. [Online], [http://www.wissen.de/wde/generator/substanzen/bilder/Ressorts/Natur/Windpark/offshore\\_windpark\\_middelgrunden\\_danemark\\_100702437,property=zoo](http://www.wissen.de/wde/generator/substanzen/bilder/Ressorts/Natur/Windpark/offshore_windpark_middelgrunden_danemark_100702437,property=zoo), (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
13. [Online], <http://www.consumerenergyreport.com/wp-content/uploads/2009/04/offshore-wind.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).
14. [Online], <http://cires.colorado.edu/news/images/pichugina480.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 10 Aralık 2010**).

15. [Online], [http://energetics-i.com/images/ei\\_wind5.jpg](http://energetics-i.com/images/ei_wind5.jpg), (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
16. [Online], [http://arts.brighton.ac.uk/\\_\\_data/assets/image/0020/22781/vel.jpeg](http://arts.brighton.ac.uk/__data/assets/image/0020/22781/vel.jpeg), (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
17. [Online], <http://www.meteodynwt.com/images/meteodyn-wt/kmz.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
18. [Online], [http://www.architectmagazine.com/Images/tmp10DA.tmp\\_tcm20-193663.jpg](http://www.architectmagazine.com/Images/tmp10DA.tmp_tcm20-193663.jpg), (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
19. [Online], [http://130.226.17.201/extra/web\\_docs/windmaps/Wind\\_atlas\\_Turkey.jpg](http://130.226.17.201/extra/web_docs/windmaps/Wind_atlas_Turkey.jpg), (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
20. Piggot, H., “Windpower Workshop Building Your Own Wind Turbine”, *British Wind Energy Association*, (1997).
21. Karadağ, H.İ., “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi Ve Rüzgar Türbini Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2009).
22. Nurbay N., Çımar, A., “Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması”, *Kocaeli Üniversitesi*, Kocaeli, (2005).
23. [Online], <http://www.reuk.co.uk/OtherImages/darrieus-rotor.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
24. [Online], [http://www.lares-et-penates.fr/wp-content/uploads/2010/06/eolienne\\_savonius1.jpg](http://www.lares-et-penates.fr/wp-content/uploads/2010/06/eolienne_savonius1.jpg), (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
25. [Online], <http://www.nordex-online.com/en/products-services/wind-turbines/n100-25-mw>, (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
26. Schmidt, M., Wind Turbine Design Optimization [Online], <http://smartech.gatech.edu/handle/1853/19740>, (**Ziyaret tarihi: 1 Kasım 2010**).
27. Wiser, R., Bolinger, M., “Annual Report on U.S. Wind Power Installation, Cost, and Performance Trends”, *US Department of Energy, DOE/GO-102007-2433*, (2007).
28. Laxson, A., Hand, M.M., and Blair, N., “High Wind Penetration Impact on U.S. Wind Manufacturing Capacity and Critical Resources”, *US Department of Energy, NREL/TP-500-40482*, (2006).
29. [Online], [http://raymonium.com/Business/eBay/Wind%20Turbine/10cm\\_wind\\_turbine\\_hub\\_compare\\_2b%5Bgs%5D.jpg](http://raymonium.com/Business/eBay/Wind%20Turbine/10cm_wind_turbine_hub_compare_2b%5Bgs%5D.jpg), (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).

30. [Online], [http://www.magnet4less.com/images/21ft\\_hub.JPG](http://www.magnet4less.com/images/21ft_hub.JPG), (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).
31. [Online], [http://www.calibertech.net/images/Analysis\\_projects/fatigue.png](http://www.calibertech.net/images/Analysis_projects/fatigue.png), (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).
32. [Online], <http://img.en.china.cn/0/0,0,328,19449,885,801,87d2733f.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).
33. [Online], <http://www.made-in-dongying.com/images-sandcasting/Wind-Turbine-with-Furan-Resin-Sand-Process-Molding.jpg>, (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).
34. [Online], [http://i01.i.aliimg.com/photo/v0/103850723/Hub\\_Of\\_Wind\\_Turbine.jpg](http://i01.i.aliimg.com/photo/v0/103850723/Hub_Of_Wind_Turbine.jpg), (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).
35. Stiesdal, H. "Wind Turbine Components and Operation", *Bonus Energy A/S, Bonus Info Special Issue*, (1999).
36. Malcolm, D.J., Hansen, A.C., "WindPACT Turbine Rotor Design Study", *US Department of Energy, NREL/SR-500-32495*, (2006).
37. Weaver, A.J., 2008, Fortis wind turbine load calculations per IEC 61400 Part 2: Design Requirements for Small Wind Turbines [Online], [http://www.fortiswindenergy.us/FA\\_load\\_calculations\\_2008.06.29.pdf](http://www.fortiswindenergy.us/FA_load_calculations_2008.06.29.pdf), (**Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2010**).
38. Technical Information No. 2: Spheroidal cast iron EN-GJS [Online], [http://www.claasguss.de/html\\_e/pdf/THB12\\_engl.pdf](http://www.claasguss.de/html_e/pdf/THB12_engl.pdf), (**Ziyaret tarihi: 12 Aralık 2010**).
39. Shirani, M., Harkegard, G., "Fatigue life distribution and size effect in ductile cast iron for wind turbine components", *Engineering Failure Analysis*, S1350-6307(10)00127-5, (2010).
40. ANSYS Workbench Product Release 11.0 Documentation (2007) [Online], <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/workbench/index.htm>, (**Ziyaret tarihi: 5 Mart 2011**).

## **ÖZGEÇMİŞ**

1978 yılında doğdu. İlk ve ortaokulu Edirne’de okuduktan sonra liseyi İstanbulda tamamladı. 2000 yılında İTÜ Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2002 yılında vatani görevini tamamladıktan sonra çeşitli kuruluşlarda makine mühendisi olarak çalıştı.