İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ PALASININ DİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serap BAYTOK

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ PALASININ DİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serap BAYTOK
(511091151)

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin Orhan KAYA

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511091151 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Serap BAYTOK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ PALASININ DİNAMİK ANALİZİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Metin O. KAYA** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Erol Uzal İstanbul Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2012**

Eşime,

ÖNSÖZ

Dünyada enerji savaşlarının yaşandığı günümüzde, temiz ve yenilenebilir enerjinin üstüne düşen görev hergeçen gün artmaktadır. Dünya kaynaklarını daha uzun süre kullanmak ve bize yadigar kalan bu dünyayı gelecek nesillere daha temiz ve yaşanabilir bir şekilde miras bırakmak adına yenilenebilir enerjiye inanıyorum. Rüzgar enerjisinin gelecekte daha aktif ve verimli kullanılması umuduyla, dilerimki benim için bitirme tezi olan bu çalışma birilerine ilham kaynağı olur.

Sıkıntılı ve uzun sayılabilecek bir süreç olan tez sürecini rahat ve başarılı şekilde geçirmem için ilgi, bilgi ve birikimini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Metin Orhan KAYA'ya, yüksek lisans hayatımda arkadaşlığını paylaşan başarımda büyük katkı ve emeği olan Seher DURMAZ'a çok teşekkür ediyorum. Ayrıca bana herzaman inanan ve destek veren eşime, yetiştiren aileme teşekkür ediyorum.

Aralık 2011

Serap Baytok
(Uzay Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ……..vii
İÇİNDEKİLER……..ix
KISALTMALAR……...xi
ŞEKİL LİSTESİ……..xiii
SEMBOL LİSTESİ……...xv
ÖZET…..……xvii
SUMMARY...……...xix
1 GİRİŞ 1
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
2 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE SINIFLANDIRILMASI..... 5
2.1 Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi 5
2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması 5
2.2.1 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri 5
2.2.1.1 Savonious rüzgar türbinleri 7
2.2.1.2 Darrieus rüzgar türbinleri 7
2.2.1.3 H-Darrieus rüzgar türbinleri..... 7
2.2.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri..... 8
2.2.3 Kanat sayısına bağlı olarak rüzgar türbinleri 9
2.2.4 Rüzgar alış yönüne göre rüzgar türbinleri..... 12
2.2.4.1 Önden rüzgarlı sistemler 12
2.2.4.2 Arkadan rüzgarlı sistemler 12
2.3 Türbin Performansını Etkileyen Parametreler..... 12
2.3.1 Katılık..... 12
2.3.2 Güç katsayısı – uç hızoranı 13
2.3.3 Betz limiti..... 15
3 RÜZGARDAN ENERJİ ELDE EDİMİ..... 17
3.1 Yıllar Arası Rüzgar Değişimi..... 17
3.2 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli..... 17
3.3 Düşey Rüzgar Profili 19
3.4 Rüzgar Türbinine Etki Eden Kuvvetler..... 19
3.5 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği 21
3.6 Rüzgar Gücünün Değişkenleri 21
4 RÜZGAR TÜRBİN PALASI HAREKET DENKLEMLERİ..... 25
4.1 Koordinatlar Ve Dinamik Model 25
4.2 Pala Flaplama Hareket Denklemi..... 27
4.3 Pala Lead-Lag Hareket Denklemi 29
4.4 Pala Burulma Hareket Denklemi..... 32
5 AERODİNAMİK KUVVETLER VE MOMENTLER..... 35
5.1 Taşıma Fonksiyonu 35

5.2 Çapraz Rüzgar Ve Yaw Oranının Katkısı 37
5.3 Rüzgar Gölgesinin Katkısı 38
5.4 Pala Elemanı Taşıma Fonksiyonu 39
5.5 Aerodinamik Kuvvetler Ve Momentler 40
6 PALA HAREKETLERİ 43
6.1 Flaplama ve Lead-lag Hareket Denklemleri 43
6.2 Harmonik Seri Çözümü 44
7 FLAPLAMA DAVRANIŞI 47
7.1 Flaplama Dinamiği 47
7.2 Yerçekiminin Flaplamaya Etkisi 49
7.3 Çapraz Rüzgarın Flaplamaya Etkisi 50
7.4 Yaw Oranının Flaplamaya Etkisi 51
7.5 Rüzgar Gölgesinin Flaplamaya Etkisi 52
8 TEMSİLİ BİR TÜRBİN PALASININ FLAPLAMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ 53
8.1 Problemin Çözümü 53
8.2 Sonuçlar 58
8.2.1 Açısal Hız Değişimiyle Değişim 58
8.2.2 Yunuslama Açısı Değişimiyle Değişim 58
8.2.3 Yaw Oranı Değişimiyle Değişim 59
8.2.4 Çapraz Rüzgar Hızı Değişimiyle Değişim 59
KAYNAKLAR……..70
EKLER……...…73
ÖZGEÇMİŞ……...…77

KISALTMALAR

DERT **:** Düşey Eksenli Rüzgar Türbini
YERT **:** Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi.[4]..... 6
Şekil 2.2: Yıllara göre rüzgar türbin çaplarının artışı..... 6
Şekil 2.3 :Savonious rüzgar türbini.....7
Şekil 2.4 : Darrieus rüzgar türbini.....8
Şekil 2.5 : H-Darrieus rüzgar türbini..... 8
Şekil 2.6 : Yatay eksenli rüzgar türbini. [12].....10
Şekil 2.7 : Rüzgar türbini bileşenleri.[12].....11
Şekil 2.8 : Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması.[5].....11
Şekil 2.9 : Rüzgarı alış yönüne göre türbin çeşitleri.[13]..... 13
Şekil 2.10 : Yüksek katılığa sahip bir türbin örneği. [7].....13
Şekil 2.11 : Değişik tipteki rüzgar türbinlerinin uçhız-güç katsayısı grafiği.[14]..... 14
Şekil 2.12 : Güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi.[7]..... 14
Şekil 2.13 : Cp, maksimum güç katsayısı grafiği.[10].....15
Şekil 2.14 : Kanat sayısına bağlı olarak güç katsayısı - uç hız oranı değişimi. [11].. 16
Şekil 3.1 : Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası. [16].....18
Şekil 3.2 : Düşey rüzgar profile.[12]..... 19
Şekil 3.3 : Rüzgâr türbinine etkiyen kuvvetler.[15].....20
Şekil 3.4 : Akım tüpünde hız ve basınç değişimi.[17].....21
Şekil 4.1 : Rotor koordinat sistemi. [18].....25
Şekil 4.2 : Rüzgar türbini koordinat sistemleri.[18]..... 26
Şekil 4.3 : Birinci eğilme modu.[18]..... 26
Şekil 4.4 : Pala flaplama modeli.[18].....27
Şekil 4.5 : Pala lead-lag modeli.[18].....29
Şekil 4.6 : Pala ve merkezkaç kuvveti arasındaki açı.[18]..... 29
Şekil 4.7 : Pala lead-lag modeli (merkezkaç kuvveti).[18].....31
Şekil 4.8 : Pala burulma modeli.[18]..... 32
Şekil 5.1 : Pala elemanı modeli.[18].....35
Şekil 5.2 : Pala elemanında oluşan kuvvetler.[18].....36
Şekil 5.3 : Çapraz rüzgar etkisi.[18]..... 37
Şekil 6.1 : Birinci derece pala hareketleri.[18]..... 45
Şekil 8.1 : Ω=1 için eğilme momenti değerleri.....60
Şekil 8.2 : Ω=6.02 için eğilme momenti değerleri.....60
Şekil 8.3 : Ω=12 için eğilme momenti değerleri.....61
Şekil 8.4 : Qp=0 için eğilme momenti değerleri.....61
Şekil 8.5 : Qp=1 için eğilme momenti değerleri.....62
Şekil 8.6 : Qp=2 için eğilme momenti değerleri.....62
Şekil 8.7 : Qp=4 için eğilme momenti değerleri.....63
Şekil 8.8 : q=0 için eğilme momenti değerleri.....63
Şekil 8.9 : q=4 için eğilme momenti değerleri.....64
Şekil 8.10 : q=8 için eğilme momenti değerleri.....64
Şekil 8.11 : q=16 için eğilme momenti değerleri.....65

Şekil 8.12 : U=0 için eğilme momenti değerleri.....65
Şekil 8.13 : U=0.5 için eğilme momenti değerleri.....66
Şekil 8.14 : U=1 için eğilme momenti değerleri.....66
Şekil 8.15 : U=2 için eğilme momenti değerleri.....67
Şekil 8.16 : U=4 için eğilme momenti değerleri.....67
Şekil 8.17 : U=8 için eğilme momenti değerleri.....68
Şekil 8.18 : Ω=12 ve U=8 için eğilme momenti değerleri.....68
Şekil 8.19 : Ω=18 ve U=8 için eğilme momenti değerleri.....69

SEMBOL LİSTESİ

C_P : Güç katsayısı
$V_{rüzgar}$: Rüzgarın hızı [m/s]
$P_{rüzgar}$: Rüzgardan elde edilen enerji [W]
K_β : Flaplama yay sabiti [Nm]
β : Flap açısı [derece]
q : Açısal yaw [derece]
Ω : Açısal hız [rad/s]
R : Pala boyu [m]
I_b : Palanın atalet momenti [kg/m^2]
r : Radyal yöndeki uzaklık [m]
M_b : Pala ağırlığı [kg]
ψ : Azimuth açısı [derece]
X_g : Palanın ağırlık merkezi oranı [boyutsuz]
$\in$: Flaplama mafsal derinliği [boyutsuz]
G : Yerçekimi terimi [boyutsuz]
ζ : Lead-lag açısı[derece]
K_ζ :Lead-lag yay sabiti [Nm]
F_c : Coriolis kuvveti [N]
θ : Pala burulma açısı [derece]
K_θ : Burulma yay sabiti [Nm]
I_f : Burulma atalet momenti [kg/m^2]
ρ : Havanın yoğunluğu [kg/m^3]
$C_{l\alpha}$: Taşıma eğrisinin eğimi
c : Kord uzunluğu [m]
V_R : Bileşke akım hızı [m/s]
α : Hücum açısı [derece]
L :Taşıma kuvveti [N]
V_0 : Pala elemanına gelen serbest akım hızı [m/s]
v_i : Eksenel indüklenmiş hız [m/s]
λ_i : İndüklenmiş hız katsayısı
U_0 : Pala elemanına gelen çapraz rüzgar hızı[m/s]
U :Rotor göbeğine gelen çapraz akım hızı[m/s]
V :Rotor göbeğine gelen serbest akım hızı[m/s]
λ : Boyutsuz akış hızı
λ_i : Boyutsuz indüklenmiş hız
$\overline{U_0}$: Boyutsuz çapraz akış
$\overline{V_0}$: Boyutsuz serbest akış
$\overline{U}$: Boyutsuz toplam çapraz akış
η : Boyutsuz açıklık istasyonu
$\overline{q}$: Boyutsuz yaw oranı

γ : Lock değeri [boyutsuz]
$\acute{\beta}$: Flap açısının azimuta göre türevi
K : Boyutsuz flaplama frekansı
A : Aerodinamik terim
A_3 : Aksisimetrik akış terimi
B : Yerçekimi terimi(G kapsanır)
l : Boyutsuz sapma moment kolu
K_1 : Dikey kesme rüzgar gradyanı
ω_R : Dönme frekansı [devir/s]
ω_{NR} : Durgun hal frekansı [devir/s]
K_{01} : Southwell katsayısı
K_{11} : Ofset düzeltme faktörü
$\bar{e}$: Farzedilen etkin mafsal kaydırması
a_n : Eğilme frekansı katsayısı
p : Boyutsuz flaplama frekansı
a : Eksenel interferans katsayısı
θ_p : Pala elemanı yunuslama açısı [derece]

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ PALASININ DİNAMİK ANALİZİ

ÖZET

Günümüzün en hayati önem taşıyan meselelerinden bir tanesi : ihtiyaç duyulan ve vazgeçilmez olan enerjinin sürekli, kaliteli ve güvenli olarak sağlanabilmesidir. Malesef fosil yakıtlar dünya genelinde, gerek ısınmada gerekse yakıt olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Rüzgar enerjisinin kullanılabilmesi, rüzgar rejimine, rüzgar milinin yerleştirildiği yüksekliğe ve enerji üretim sisteminin boyutlarıyla ilişkilidir. Rüzgar enerjisi gibi alternatif enerjiler sayesinde, kömür ve petrol gibi ithal enerji kaynaklarına bağlı olarak üretim yapan ülkelerde kendilerine yeter hale gelebilirler. Rüzgar enerjisinin kullanımının faydaları aşağıdakiler gibi özetlenebilir. Öncelikle rüzgâr enerjisi temizdir. Gürültü kirliliği haricinde herhangi bir çevre kirliliği yaratmaz. Rüzgar enerjisi göreceli olarak iş gücünün yoğun olduğu ve yeni iş olanakları yaratan bir alandır. Rüzgar enerjisi uzak veya şebekenin yaygın olmadığı bölgelerde depolamak üzere veya dizel motorla birlikte kullanılarak yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi özellikle son yıllarda ilgi görmekte ve gelişmektedir. Günümüze gelene kadar rüzgar enerjisi, kırsal alanda elektrik enerjisi elde etme ve su pompalama amaçları ile kullanım alanı bulmuştur.

Son yıllarda ise alternatif bir enerji üretim kaynağı olarak enerji sektöründe yerini almıştır. Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu teknoloji, aerodinamik, meteoroloji, mekanik, elektrik gibi birçok konuyu içinde barındırır.

Bu çalışmada yatay eksenli bir rüzgar türbini palasının dinamik analizi yapılmıştır. Rüzgar türbinlerinin tarihi gelişimleri incelenmiş, geçmişten günümüze katettikleri yolla birlikte gelişen teknoloji gözlenmiş, türbinlerin günümüzde sahip oldukları özellikler ve enerji üretimindeki önemleri belirtilmiştir. Rüzgardan enerji elde ediminin önemli parametreleri gözden geçirilmiş, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeline değinilmiştir.

Yatay eksenli bir rüzgar türbininin hareket denklemlerini çıkarabilmek adına türbine etki eden kuvvetlere değinilmiş ve kuvvetlerin denklemleri türetilmiştir. Türbin palasının flaplama (aşağı-yukarı), lead-lag (ileri-geri) ve feathering (yunuslama) hareketleri incelenmiş, bu hareketleri oluşturan kuvvetler belirlenmiş ve hareket denklemleri türetilmiştir.

Temsili olarak 8.4 metrelik bir rüzgar türbini palası üzerinde kuvvetler örneklendirilmiştir. Türbin değişik hızlarda operasyon yaptığında, değişik açılarla yaw(türbinin başını rüzgar yönüne dönmesi) hareketi sergilediğinde ve çapraz yönden esen değişik hızlardaki rüzgara maruz kaldığında palanın davranışı eğilme momentleri gözlemlenerek incelenmiş ve sonuçlar çıkarılmıştır.

DYNAMIC ANALYSIS OF A HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE BLADE

SUMMARY

One of the most important issues of our time is the secure, sustainable and quality supply of the world's energy requirements. Fossil resources have a considerable role in the global demand of fuel and energy. Also fossil fuel resources are unevenly distributed with certain countries enjoying ample reserves while other consuming nations have very limited supply of these resources. The finite nature of this supply source, the environmental constraints and the significant financial requirements of developing fossil resources are forcing most nations to review their energy strategies and to take urgent measures to reduce their dependency on this energy source. These measures can be classified as follows: reducing the share of petroleum in the energy mix; energy preservation and more efficient use available energy resources; development of renewable energy sources and implementation of attractive new technologies. The development of wind power engines among alternative renewable energy sources has been phenomenal in recent years. Traditionally, wind power was harnessed for energy supply to remote rural areas and especially for driving water pumps. More recently, however, the more widespread use of wind power as an alternative energy source has emerged in most countries taking its place as a more predominant contributor in the energy sector.

Wind turbines are systems designed to convert the kinetic energy found in the wind into first mechanical energy and then into electricity. The technologies involved mainly include aerodynamics, meteorology, mechanics, and electricity. The viability of wind energy is related to various factors including the wind regime, the wind tower height and the nature of the energy productions systems. These variables also depend on each other; for example wind speeds increase with altitute, so the higher the tower, the higher the speeds that can be harnessed from the wind. Countries that have favorable wind resources are particularly interested in these technologies since wind energy solutions can contribute to a country's desire to reduce dependence on imported resources such as coal and petroleum in quest for self-sufficiency. The advantages provided by wind energy can be summarized as follows.

Wind energy is classified as a relatively clean energy. Aside for its noise characteristics, wind energy does not generate any environmental pollution. A modern 600kW wind turbine can be a substitute for a coal fired power plant that would otherwise generate about 1200 tons of carbondioxide yearly. Furthermore, wind energy is an aboundant and renewable energy source in countries which are favorably located for it. Turkey is well endowed with wind energy resources and can develop this energy source to reduce its dependence on imported energy sources. Wind power facilities typically occupy 1% of the spaces where they are located. The energy required to erect a wind turbine facility can be recouped in a period as short as 3 months. For countries like Turkey that present such immediate and growing demand for energy, this is also an attractive feature of the resource. The

development of new wind energy technologies and the implementation of wind farms can also create opportunities for a qualified workforce. In the areas where ample wind resources are available, wind energy production can be very competitive on a price per kwh produced with other conventional energy sources. In areas where the electricity networks are remote, wind energy can be used to complement diesel engines for improving fuel efficiencies. In certain coastal regions which do not have sanitary drinking water, wind turbines can be used to desalinate sea water.

One of the objectives of the energy sector is to increase the competitiveness of the wind turbines and wind projects. In order to increase efficiencies, turbine designers and manufacturers have focused on reducing production as well as other costs involved in the implementation and operation of wind projects. Efficiencies are measured in the ultimate cost of the electricity produced which mainly depends on factors such as the characteristics of the wind resource, the cost of the land on which the turbines are based, and other financial factors. Feasibility studies for each wind project are based on projections. The design characteristics of the wind turbines are used in combination with the wind speed, direction, and regime profiles gathered through surveys conducted for each target area. Based on these projections, engineers can assess the quantity, nature and profile of the electricity to be produced by each designed turbine.

Most of the costs associated with wind energy are the initial investment costs in the equipment and the installation of wind turbines. Coal or oil powered production plants rely on expensive feedstock to produce electricity. Hydroelectric plants rely on water, which is a renewable resource as well but also can be sold on its own for irrigation or other uses. Since wind is mostly free, once the projects are implemented no additional fuel expenses are necessary for generating electricity. But unlike water, coal or oil, wind cannot be stored. Wind energy projects depend on a constant and reliable flow of wind to be feasible. Weather forecast are an integral part of wind projects. As the cost of wind turbines are the most important aspects of the investments and on-going operations of wind projects, turbine design that optimizes the use of available wind resources becomes the most critical aspect of the development of wind energy.

Wind turbines when in operation produce noise. In densely populated areas, these noise levels can be troublesome. In modern wind turbines, noises generated by mechanical equipment have been mostly reduced. Meanwhile, work on reducing the aerodynamic noises related to the blades continues. Furthermore, as technologies improve, the production capacities of modern turbines are constantly increasing with higher capacity larger turbines replacing those with smaller capacities. Certain wind mills and their turbines are thought to change the landscape and disturb the appeal of picturesque regions. Therefore, if a wind project is to be implemented, it is necessary to receive the approval of local populations affected by the new developments. Offshore wind turbine technologies are also being developed rapidly and these can be positioned in remote areas. In these cases, developers can be less concerned with disturbances to regional populations living in the vicinity of the wind facilities.

In other words, wind turbines will produce electricity as long as the wind blows at the required speeds with the desirable characteristics. When wind speeds and characteristics are no longer ideal, the turbines will stop and the energy cannot be generated. This is why wind energy cannot on its own meet the requirements of the

energy sector as a reliable continuous supply of ample energy. Instead, wind energy is one of the alternative supply sources in the overall energy mix. Nevertheless, wind energy remains one the most attractive source of clean energy due to its other characteristics. Turbine designers' objective is to can maximize electricity production for the given wind characteristics which often push them to create turbines with higher towers, greater capacities, better overall efficiencies and with lower manufacturing and operating costs.

Countries that possess diversified and well balanced energy supply sources can most effectively utilize their electricity generation capacity. Typically, energy efficient countries benefit from highly developed electricity grids where alternative energy sources can be commissioned and added back and forth effectively. Although efficient designs shall maximize the output of electricity from a given installed capacity and wind energy resource, the electricity transmission and distribution system, the grid, should also be planned and developed to match the supply with the demand profile for electricity.

In this study, the dynamic analysis of a horizontal wind turbine blade is investigated. After an introduction to the history of wind turbine development, its technological progress is reviewed, and the characteristics of current wind turbines and their role in energy production is presented. The parameters involved in wind energy are considered and the wind energy potential of Turkey is put in perspective.

In order to derive the equations of motion of a horizontal axis wind turbine blade, the forces acting on the blade is explained. After analysing blade motion behaviors like flapping, lead-lag and feathering, the forces causing these motions are determined.

In the study, the forces acting on a 8.4 meter long wind turbine blade are considered as an example. Forces acting on the blade due to flapping, lead-lag and feathering are observed. Different operating situtations like, slow-fast rotating, yaw ratio, crosswind speed and pitch angle are studied by observing moments of bendings.

1 GİRİŞ

Günümüzün en hayati önem taşıyan meselelerinden bir tanesi : ihtiyaç duyulan ve vazgeçilmez olan enerjinin sürekli, kaliteli ve güvenli olarak sağlanabilmesidir. Malesef fosil yakıtlar dünya genelinde, gerek ısınmada gerekse yakıt olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu fosil kaynakların rezervlerinin gelecek için yeterli görülmemesi, büyük ölçüde ileri teknoloji ve finans kaynağı gerektirmesi, tüm dünya ülkelerinin mevcut enerji programlarını tekrar gözden geçirmesine ve acilen gerekli önlemleri almasına sebep olmuştur. Bu önlemleri; toplam enerji talebinde petrolün payının giderek düşürülmesi, enerji tasarrufunun sıkı bir şekilde yapılması ve kaynakların verimli kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarından mümkün olduğu kadar yararlanmaya yönelik teknolojilerin hızla geliştirilip uygulamaya konulması olarak sıralayabiliriz. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi özellikle son yıllarda ilgi görmekte ve gelişmektedir. Günümüze gelene kadar rüzgar enerjisi, kırsal alanda elektrik enerjisi elde etme ve su pompalama amaçları ile kullanım alanı bulmuştur. Son yıllarda ise alternatif bir enerji üretim kaynağı olarak enerji sektöründe yerini almıştır. Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu teknoloji, aerodinamik, meteoroloji, mekanik, elektrik gibi birçok konuyu içinde barındırır.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı, rüzgar türbinlerini genel olarak incelemek, tarihsel gelişimlerini, çeşitlerini, enerji elde etmedeki önemli görevlerini litaratür araştırması olarak incelemek ve elde edilen genel bilgiler ışığında, türbinlere operasyon sırasında yapısal olarak binen değişik sebepli rüzgar yüklerinin bulunmasında bize yardımcı denklemlerin çıkarılması ve bu denklemler yardımıyla bir örnek türbin palası üzerine değişik yönlerde esen rüzgarın pala üzerindeki dinamik değişiminin sembolik gösterimi olarak belirlenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Rüzgar enerjisinin kullanılabilmesi, rüzgar rejimine, rüzgar milinin yerleştirildiği yüksekliğe ve enerji üretim sisteminin boyutlarıyla ilişkilidir. Rüzgar enerjisi gibi alternatif enerjiler sayesinde, kömür ve petrol gibi ithal enerji kaynaklarına bağlı olarak üretim yapan ülkelerde kendilerine yeter hale gelebilirler. Rüzgar enerjisinin kullanımının faydaları aşağıdakiler gibi özetlenebilir. Öncelikle rüzgâr enerjisi temizdir. Gürültü kirliliği haricinde herhangi bir çevre kirliliği yaratmaz. Modern bir 600kW gücündeki bir rüzgâr türbini ortalama bir yerde, bir yılda genellikle kömürle çalışan diğer elektrik santrallerinin 1200 ton karbondioksitinin yerine geçecektir.[1]
Rüzgar enerjisinin diğer faydaları ise şunlardır; rüzgar enerjisi boldur ve tükenmez bir enerji kaynağıdır. Enerjide dışa bağımlılığımızı azaltacak şekilde yerli bir kaynaktır. Rüzgar enerjisi tesisleri kuruldukları alanın %1'lik bölümünü kullanırlar. Rüzgar türbinleri kuruluşu sırasında harcanan enerjinin 3 ay gibi kısa bir sürede üretilebilmesi, özellikle Türkiye gibi kısa dönemde enerji talebi olan ülkeler için önemli bir faktördür. Rüzgar enerjisi göreceli olarak iş gücünün yoğun olduğu ve yeni iş olanakları yaratan bir alandır. Rüzgar enerjisi uzak veya şebekenin yaygın olmadığı bölgelerde depolamak üzere veya dizel motorla birlikte kullanılarak yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Rüzgar türbinleri içme suyu olmayan kıyı bölgelerinde suyun tuzdan arındırılması işleminde kullanılabilir. Rüzgarın bol olduğu bölgelerde üretilen elektriğin birim fiyatı açısından diğer konvansiyonel yöntemlere göre oldukça rekabet edilebilir seviyelerdedir. Rüzgar enerjisini daha rekabetçi kılmak gerekir, bunun için de türbin üreticileri üretim maliyetlerini düşürme konusuna odaklanmışlardır. Üretilen elektrik enerjisinin maliyeti; faiz oranları, arsa maliyeti ve bölgede esen rüzgar gibi faktörlerle orantılıdır. Özellikleri bilinen bir türbinin yıllık rüzgar hızı dağılımı bilinen bir bölgede ne kadar enerji üreteceği tahmin edilebilir.
Rüzgar türbinleri çalıştıkları zaman zarfında bir miktar gürültü ortaya çıkarırlar. Nüfusun yoğun olduğu bölgelerde gürültü oldukça önemli bir etkendir. Modern rüzgar türbinlerinde çalışırken çıkan mekanik gürültünün çoğunluğu düşürülmüştür ve kanatlardan çıkan aerodinamik gürültünün azaltılması için çalışılmaktadır. Teknolojinin de gelişmesi ile gittikçe büyüyen rüzgar türbinleri düşük kapasiteli birçok rüzgar türbininin yerini alacak ve mevcut kapasitenin de üzerine çıkacaktır. Bazıları rüzgar türbinlerinin manzarayı bozduğunu düşünmektedir.Ancak ileriki yıllarda deniz üstü türbinlerin artması ile gürültü ve görüntü kirliliği ortadan

kalkacaktır. Eğer bir bölgeye birçok türbin dikilecekse orada yaşayanların izinlerinin alınması önemlidir. Bunu sağlamak için orada yaşayan insanları da projelere dâhil etmek hatta kardan pay almalarını sağlamak çok akıllıca bir yol olabilir.

Sorunlardan biri de doğanın bize rüzgar sağladığı sürece enerji üretebileceğimizdir. Birçok ülke için rüzgar olmadığında elektriği alabileceği büyük şebekeler olduğundan bu bir sorun değildir. Yakın gelecekte hangi kaynakların uygun olduğunu bilmek bir avantajdır, böylelikle konvansiyonel güç santrallerinin üretimlerini ayarlamaları sağlanmış olur. Bir termik santralin üretimini ayarlaması biraz zaman gerektirdiğinden güvenilir hava tahminlerinin yapılması çok gereklidir. Rüzgar türbinleri ile hidroelektrik santrallerinin birlikte çalıştırılması çok uygun gözünmektedir. Zira hidroelektrik santrallerin devreye alma süreleri çok kısadır ve gerekli olan su rezervuarlarda biriktirilebilir. Rüzgar türbinlerinin güçleri birkaç kW'tan birkaç MW'a kadar değişebilir. Örneğin 1-3 MW'lık kapasiteye sahip olan 25 türbin ile yılda yaklaşık 20GWh'lık enerji üretilebilmektedir. Bu da orta büyüklükte ki bir hidroelektrik santralinin ürettiği enerjiye eşittir. [2]

2 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE SINIFLANDIRILMASI

2.1 Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Tarihte yel değirmenlerine ait ilk bilgiler M.Ö. 644 tarihlerine dayanır. Tahıl öğütmek amacıyla kullanılan bu değirmenlere 945 yılında dikey dönüş eksenli bir yel değirmeni çizimide içeren bulgulara rastlanmaktadır. [3] Dane Poul LaCour, elektrik üretme amaçlı ilk rüzgar türbinini 1891' de üretmiştir. Sanayinin gelişmesiyle elektrik kullanımı artmış, fosil yakıt kullanımını arttırarak yakıt fiyatlarının yükselmesine sebep olmuştur. Fiyat artışlarının yükselişi elektriği rüzgar enerjisinden elde etmeye yöneltmiştir. 1970 lerin başlarında elektrik üretiminde rüzgar enerjisi kullanımı gündeme gelmiştir. 1990'ların sonu itibariylede rüzgar enerjisi kullanımı ve türbin üretimi en hızlı gelişen sektörlerden biri omuştur. Teknolojik gelişmeler ve araştırmalar, türbinlerin gelişmesini sağlamıştır. Günümüzde daha düşük maliyetli, yüksek verimli ve güvenilir rüzgar türbinlerinin popularitesini arttırmıştır.1 MW'lık büyük türbinler orta ölçekli olanların yerini almıştır. Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimini şekil 2.1'de gösterilmektedir. Şekil 2.2'de ise rüzgar türbinlerinin gelişimi ve zaman içinde kanat çaplarının artışı görülmektedir.

2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

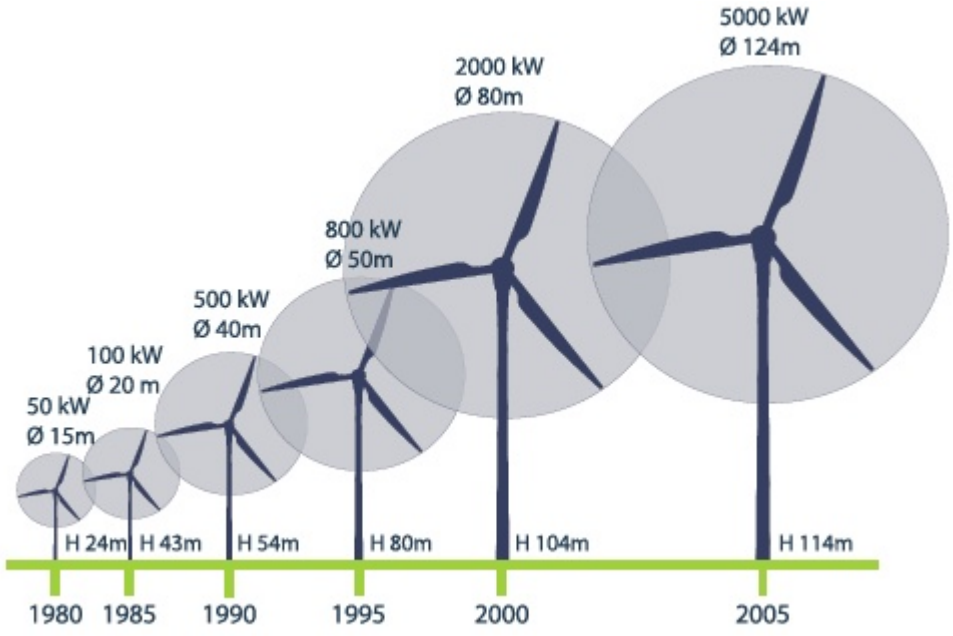
Tarih boyunca çeşitli evrimler geçiren rüzgar makinelerinde kullanılan türbinler farklı türlerdedir. Şimdiye kadar değişik nitelikte ve tipte geliştiren bu rüzgar türbinlerinden bazıları günümüzde ticari hale gelmiştir. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre iki gruba ayrılırlar: yatay eksenli rüzgar türbinleri ve düşey eksenli rüzgar türbinleri.

2.2.1 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. DERT lerin üstünlüğü rüzgarı her yönden kabul edebilmesidir. Bu türbinler

Türbin Tipi ve Ülkesi	Çap (m)	Süpürdüğü Alan (m²)	Güç (kW)	Spesifik Güç (kW/m²)	Kanat Sayısı	Kule Yüksekliği	Hizmete Giriş Yılı
Poul LaCour Danimarka	23	408	18	0.04	4	-	1891
Smith-Putnam ABD	53	2231	1250	0.56	2	34	1941
FL Smidth Danimarka	17	237	50	0.21	3	24	1941
FL Smidth Danimarka	24	456	70	0.15	3	24	1942
Gedser Danimarka	24	452	200	0.44	3	25	1957
Hutter Almanya	34	908	100	0.11	2	22	1958

Şekil 2.1: Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi.[4]



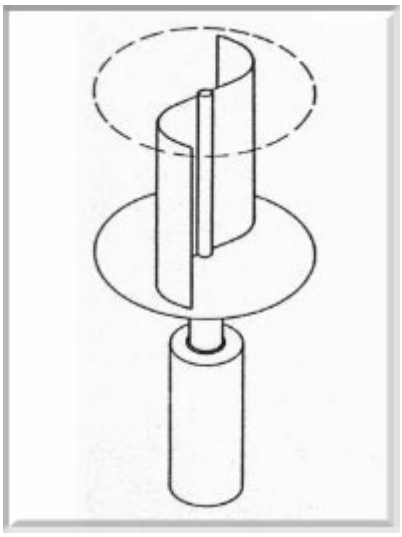
Şekil 2.2: Yıllara göre rüzgar türbin çaplarının artışı

rüzgarı sürükler veya kaldırır. İlk harekete geçişleri güvenilir değildir. DERTler yaklaşık %35 verimle çalışırlar.Türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabilmesi kule ihtiyacını ortadan kaldırır.DERTler kule olmadığı için yere yakın olmanın verdiği düşük rüzgar hızlarında çalışırlar. Türbinin kafasını rüzgar yönüne dönmesini sağlayan "Yaw" mekanizması bulunmamaktadır. Düşük rüzgar hızları için

tasarlanmışlardır ve az miktarda enerji üretirler. Kanat sayısının artması malzeme ağırlığını da beraberinde getirdiğinden, yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışır. Rotor çapı 5m olan türbinden yaklaşık 0,5kW güç elde edilir. [5] Bu türbinleri yer yüzeyine bağlayabilmek için çelik halatlar kullanılır.
Genel olarak üç çeşit DERT bulunmaktadır.

2.2.1.1 Savonious rüzgar türbinleri

Diğer DERT'lere göre; düşük rüzgar hızlarında iyi başlangıç karakteristiklerine sahip, yapımı kolay, ucuz, rüzgarın yönünden bağımsız, kendi kendine ilk harekete başlaması, özelliklerine sahiptir. Uygulama alanları; havalandırma ve su pompalama gibi düşük enerji gerektiren mecralardır. Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



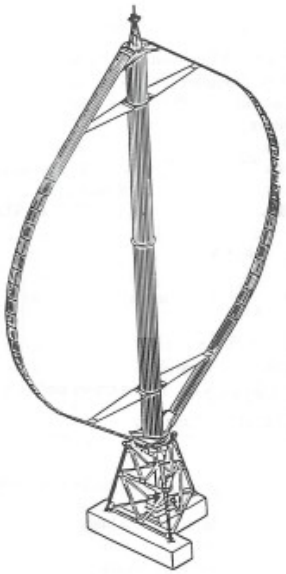
Şekil 2.3 : Savonious rüzgar türbini.

2.2.1.2 Darrieus rüzgar türbinleri

Düşey eksenli rüzgar türbinlerine diğer bir örnek ise darrieus tipi rotordur. Darrieus tipi rotorlar kaldırma kuvvetiyle zorlanan rüzgar türbinlerindendir. Darrieus tipi rotorda kanatlar yüzey çizgisinin şablonun üzerine yerleştirilmiştir. Darrieus tipi rotorların kanat yapısı karmaşık olduğundan imalatı da zordur. Darrieus rotorları daha çok iki veya üç kanatlı olarak tercih edilerek üretilirler. Şekil 2.4'de gösterilir.

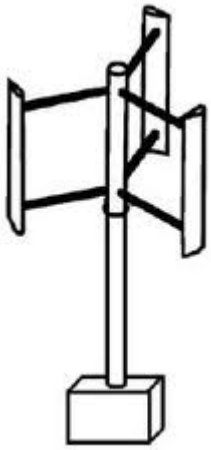
2.2.1.3 H-Darrieus rüzgar türbinleri

Dikey eksenli en önemli rüzgar türbinleriden biridir. Darrirus tipinin geliştirilmesiyle meydana gelen daha karmaşık tipte bir türbinidir. Darriruslerden iki önemli farkla



Şekil 2.4 : Darrieus rüzgar türbini.

ayrılır. Aerodinamik profili düzdür ve kanatlara yunuslama kontrolü uygulanır. Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri; düşük güç katsayıları, kontrol sistemlerinin kullanılamaması, yere yakın olması, ekonomik olarak maliyetli, geri dönüş sürelerinin uzun olması sebepleriyle fazla tercih edilemez. [6]



Şekil 2.5 : H-Darrieus rüzgar türbini.

2.2.2 Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinleri düşük başlangıç hız değerlerine sahiptirler. Düşey eksenli rüzgar türbinlerine göre daha yüksek güç katsayıları vardır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin bir dezavantajı jeneratörlerinin ve dişli kutularının kulenin

üstüne yerleştirilmek zorunda olunmasıdır. Bu yüzden kule tasarımının daha karmaşık ve daha maliyetli olması gerekmektedir. Diğer bir dezavantajı ise rüzgara göre türbinin ayarlanabilmesi için kuyruk kısmına veya sapma mekanizmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu türbinlerde; dönme ekseni rüzgar yönüne paralel, kanatlar rüzgar yönüne diktir. Bu türbinlerde rotor kanatların sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45'dir. Yatay eksenli rüzgar türbini tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar bulunur. Pala tasarımlarında güç ve rotor hızı boyuna eksenleri etrafında kontrol edilebilmelidir. Bu kontrol mekanizmasına kanat yunuslama kontrol mekanizması adı verilir. Kanat yunuslama (kanat hücum açısını değiştirerek) kontrol mekanizması aşırı rüzgar hızlarına karşı özellikle büyük rüzgar türbinlerinde en verimli yöntemdir. Rotor kanat şekli aerodinamik olarak optimize edilebilir. Böylece kanadın en yüksek verimleri yakalayabilmesi sağlanır. Bu hususların tasarımda geliştirilmesi sayesinde elektrik üretmek için yatay eksenli rüzgar türbinlerinin daha uygun hale getiren etkenler olarak düşünülebilir. Bu avantajlar büyük ölçekli bir rüzgar türbini için sağlanmış tipik faktörlerdir. Büyük ve küçük türbinler arasında tasarım konsepti farklılık gösterir. Küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinde yapı daha basit olarak ele alınır. Küçük türbinlerde yunuslama kontrol sistemi bulunmamaktadır. Şekil 2.6' yatay eksenli bir rüzgar türbini gösterilmiştir. Şekil 2.7'de ise türbin bileşenleri gösterilmiştir.

2.2.3 Kanat sayısına bağlı olarak rüzgar türbinleri

Kanat sayısına bağlı olarak rüzgar türbinleri tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir. Sınıflandırmada kanat uç hız oranı (λ) etkilidir. Rüzgar hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı (λ) denir. Eğer;

λ= 1–5 Çok kanatlı rotor,

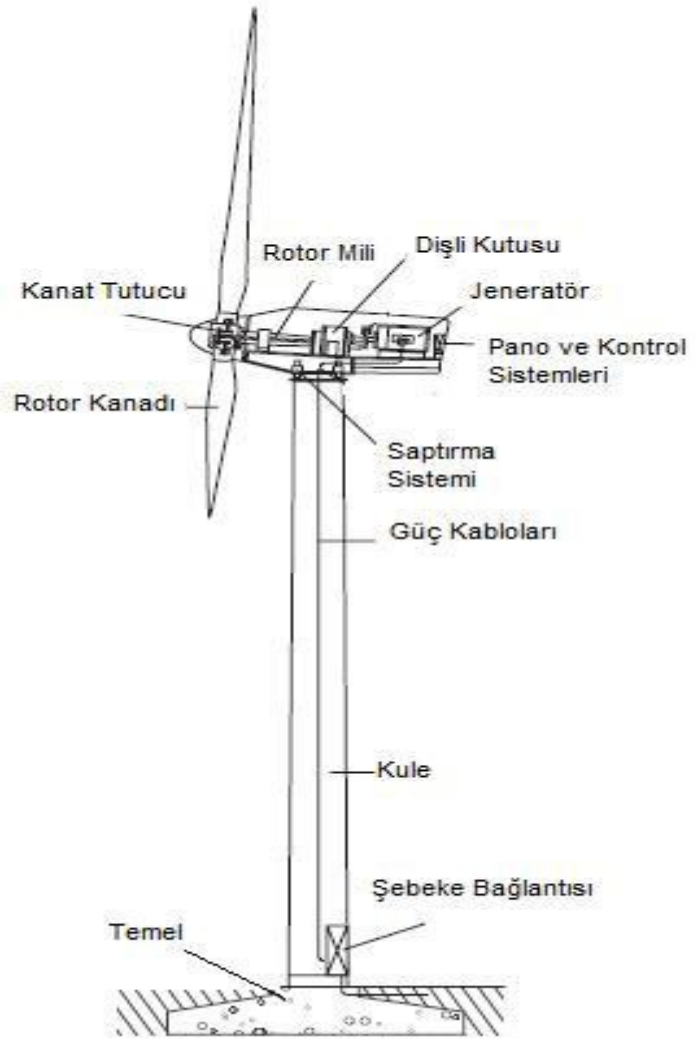
λ= 6–8 Üç kanatlı rotor,

λ= 9–15 İki kanatlı rotor,

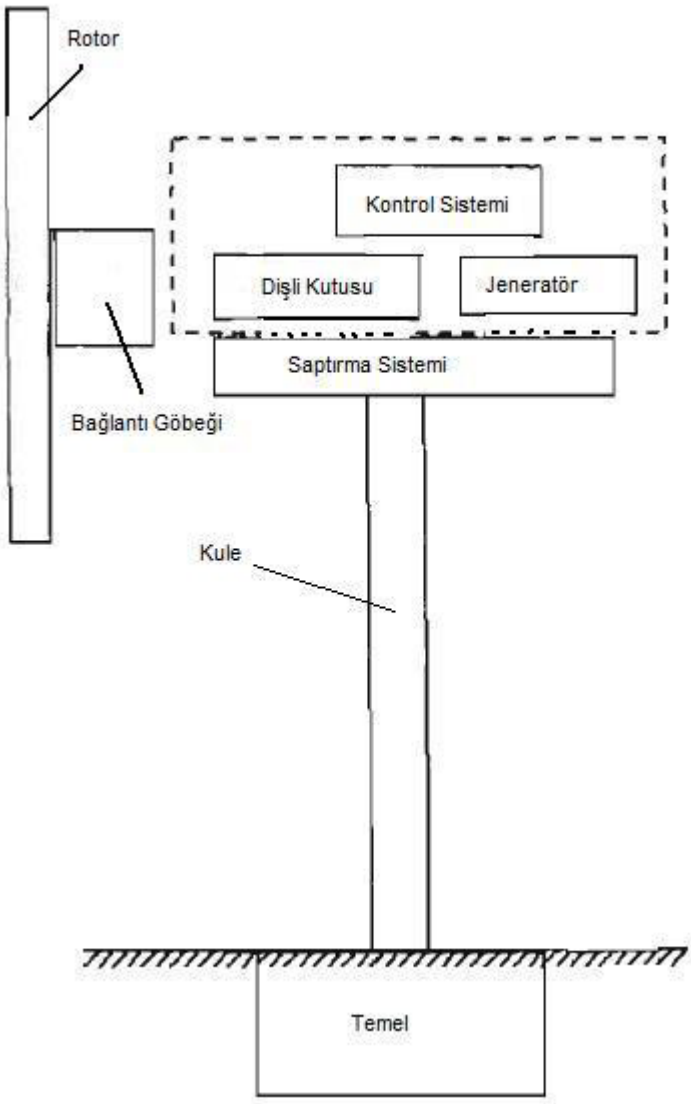
λ>15 Tek kanatlı rotor kullanılır. [5]

Tek kanatlı rüzgar türbinleri malzeme maliyetinin az olması nedeniyle daha ucuzdur. Direnç kayıpları bu tip rüzgar türbinlerinde en azdır. Bununla birlikte kanadın dengesini sağlayabilmek için göbekte zıt tarafa bir denge kütlesi yerleştirilmek zorundadır. Tek kanatlı rüzgar türbinleri denge problemi ve görünüm açısından iyi olmadığı için fazla kullanılmazlar. İki kanatlı rüzgar türbinleri de tek kanatlı rüzgar

türbinlerinin dezavantajlarına daha az da olsa sahiptirler. Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Dönme momentinin daha düzgün olması üç kanat kullanımının asıl sebebidir . Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, gövde içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı düşük olduğundan, gürültüsüz, sarsıntısız döndükleri için ve göz estetiğini de bozmamaları önemli bir unsur olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin bir başka sınıflandırma şekli rüzgarı alış yönüne göredir. Rüzgarı alış yönüne göre rüzgar türbinleri rüzgarı önden alan ve rüzgarı arkadan alan olarak ikiye ayrılır.[7] Şekil 2.8'de kanat çeşitlerine göre türbin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 2.6 : Yatay eksenli rüzgar türbini. [12]



Şekil 2.7 : Rüzgar türbini bileşenleri.[12]

	YERT				DERT	
	Tek Kanatlı	***2 Kanatlı***	***3 Kanatlı***	***Çok Kanatlı***	***Savonius***	***Darrierus***
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule ihtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az Elektrik & Su pompalama	Az Elektrik & Su pompalama	Az Elektrik & Su pompalama
Günümüzde Kullanımı	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
Rotorun Dönmesi İçin Rüzgarı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır & Sürükler	Kaldırır & Sürükler	Kaldırır & Sürükler

Şekil 2.8 : Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması.[5]

2.2.4 Rüzgar alış yönüne göre rüzgar türbinleri

2.2.4.1 Önden rüzgarlı sistemler

Yıllardır yaygın olarak kullanılan bu makinelerde rotor yüzü rüzgara dönüktür. En önemli avantajıysa kulenin arkasında olacak rüzgar gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır, yani rüzgar kuleye eğilerek varır. Kule yuvarlak ve düz olsa bile kanadın kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. Bu nedenle rüzgar çekilmesinden dolayı kanatların sert yapılması gerekir ve kanatların kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekir. Ayrıca, önden rüzgarlı makineler, rotoru rüzgara karşı döndürmek için "Yaw" mekanizmasından yararlanırlar. Yaw mekanizması ayçiçeklerinin başını güneşe dönmesi gibi, türbinin başını rüzgarın estiği yöne çevirmede etkilidir.

2.2.4.2 Arkadan rüzgarlı sistemler

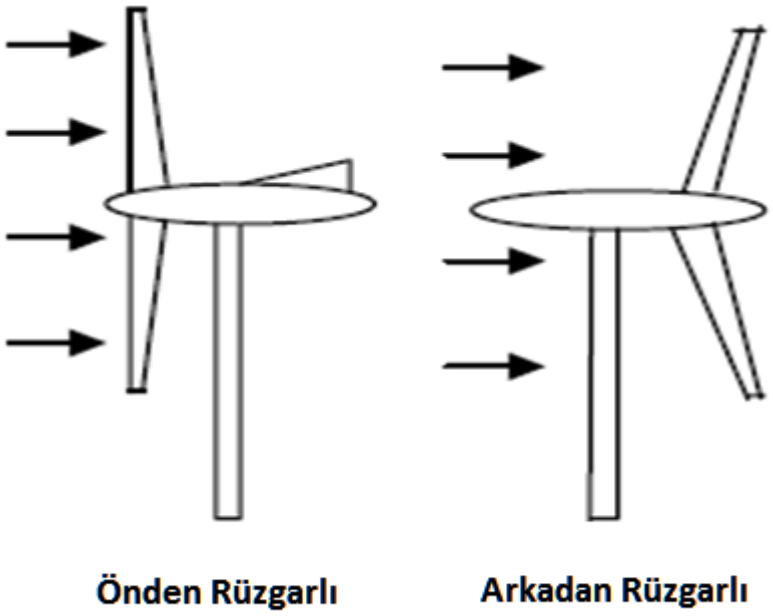
Bu makinelerin rotorları kule arkasına konur. Bunların önemli avantajı rüzgara dönmek için "Yaw" mekanizmasına gerek duymayışlarıdır. Eğer kanatların takılı olduğu gövde ve rotor uygun tasarlanırsa, gövde rüzgarı pasif olarak izler. Kanatlar esnek özelliğe sahiptir. Esneklik, hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir avantajdır. Böylece bu sistemlerin üstünlüğü; önden rüzgarlı makinelere göre daha hafif yapılması sonucu kule yükünün az olmasıdır. Ancak, kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine önden rüzgarlı sistemlere nazaran daha çok zarar verir. Şekil 2.9'da önden ve arkadan rüzgarlı sistemler gösterilmiştir.

2.3 Türbin Performansını Etkileyen Parametreler

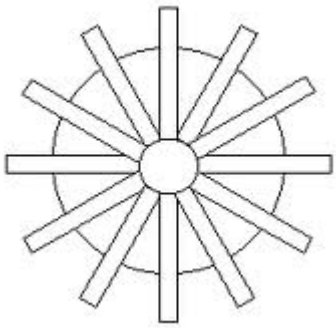
2.3.1 Katılık

Kanat alanının kanatların süpürdüğü alana olan oranı katılık denir. Çok kanatlı rüzgar türbinleri daha az kanatlı olanlara oranla daha katıdır. Bu tip çok kanatlı rotorlar daha kolay bir şekilde harekete geçebilirler. Rüzgarla etkileşen kanat alanının fazlalığı rüzgara tepkiyi kolaylaştırır.Bazı düşük katılığa sahip rotorlara dışarıdan ilk hareket verilmek durumundadır. Katılık arttıkça aerodinamik kayıplar artar. Bu sebeple yüksek katılığa sahip türbinler daha az enerji üretirler. Üç kanatlı ve dokuz kanatlı aynı çapa sahip iki rotor düşünülürse; aynı rüzgar hızında

süpürdükleri alan aynı olduğu için eşit miktarda güç üretmeleri beklenir. Ancak, üç kanatlı rüzgar türbininde daha fazla güç üretilebilir. Bunun sebebi üç kanatlı rüzgar türbinin aerodinamik kayıplarının daha az olmasıdır. Fazla kanatlı rotorlarda daha fazla kayıplar oluşmaktadır.[7] Bazı durumlarda başlangıç torkunun yüksek olması daha önemli olmaktadır. Bu durumlarda çok kanatlı türbinler tercih edilmelidir. Başlangıç torku kanat sayısıyla orantılı olarak artar. Şekil 2.10'da yüksek katılığa sahip bir türbin gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Rüzgarı alış yönüne göre türbin çeşitleri.[13]

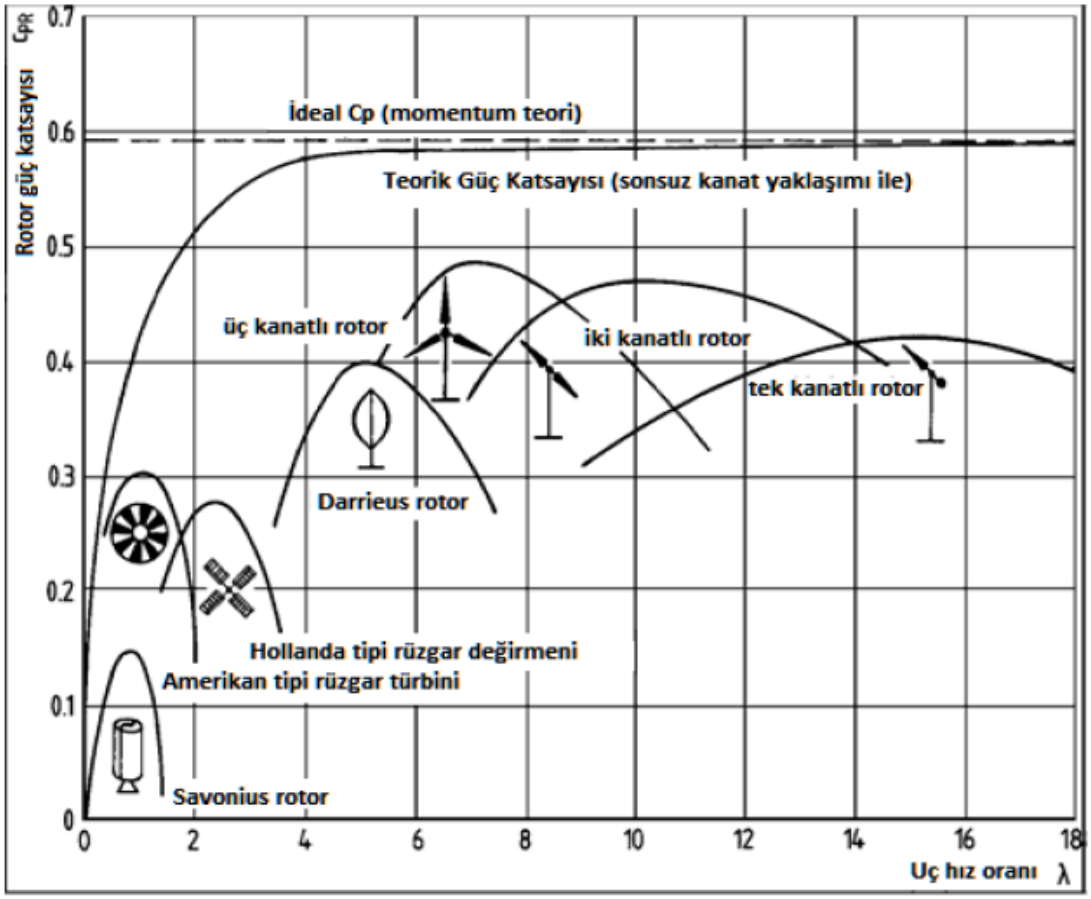


Şekil 2.10 : Yüksek katılığa sahip bir türbin örneği. [7]

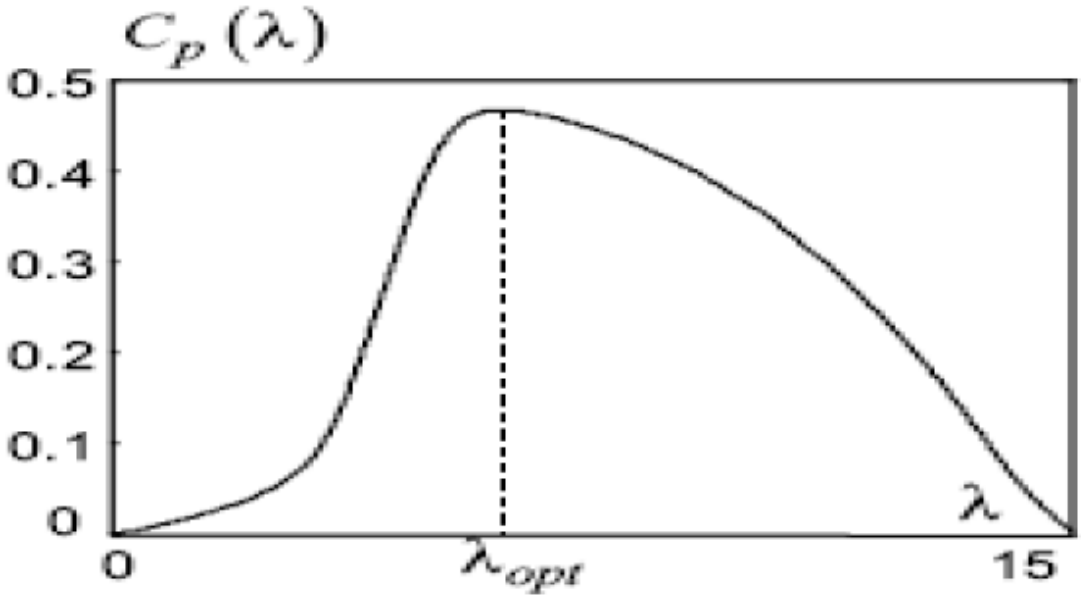
2.3.2 Güç katsayısı – uç hızoranı

Güç katsayısı rüzgar türbininin güç ortaya çıkarma verimliliğidir. Uç hız oranı kanatların çizgisel hızının rüzgar hızına oranıdır. Rüzgar türbinlerinin aerodinamik

performansları genel olarak güç katsayısı–uç hız oranı diyagramlarına göre belirlenir. Şekil 2.11 ve 2.12' de bu iki boyutsuz sayı arasındaki ilişki görülmektedir. [8]



Şekil 2.11 : Değişik tipteki rüzgar türbinlerinin uç hız oranı-güç katsayısı grafiği.[14]



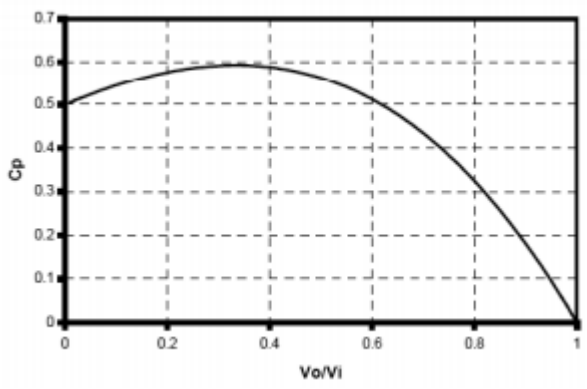
Şekil 2.12 : Güç katsayısının uç hız oranı ile değişimi.[7]

2.3.3 Betz limiti

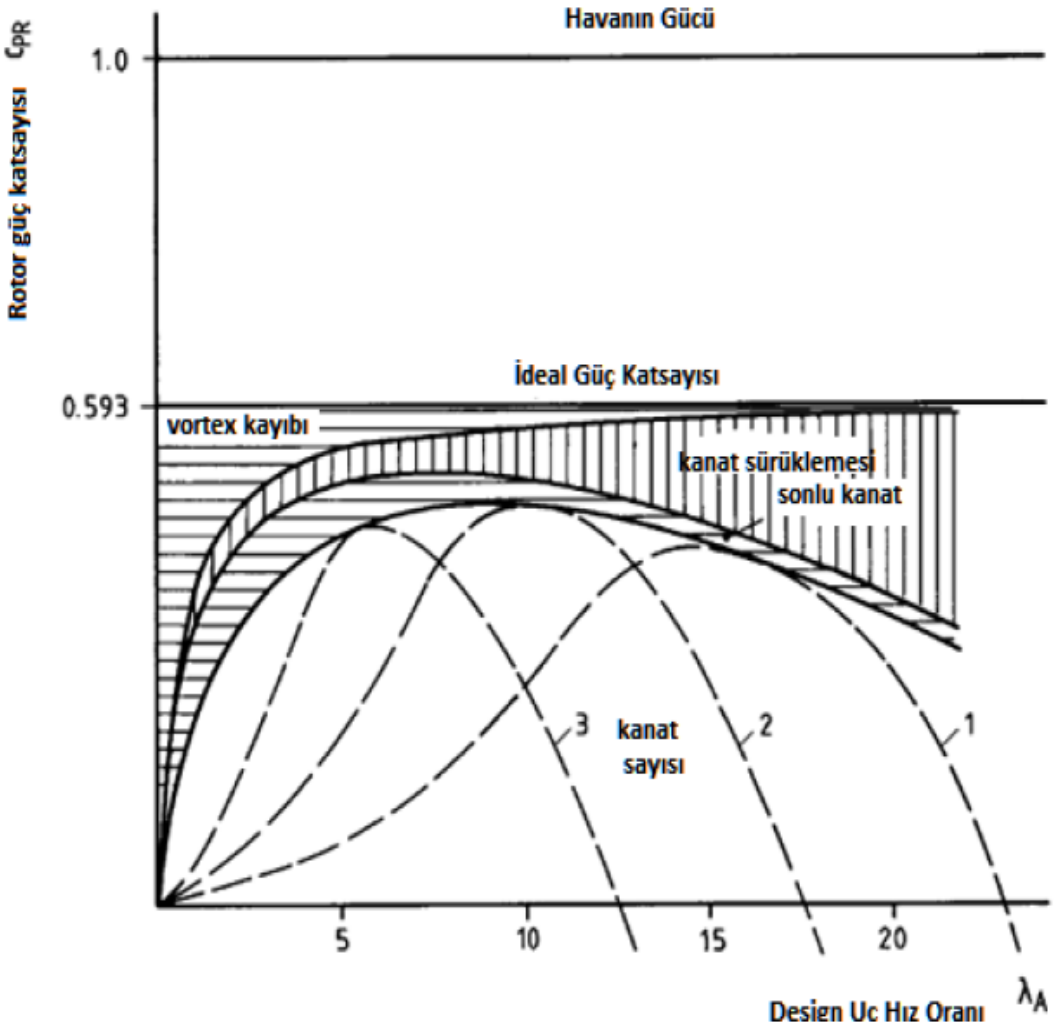
Rüzgarlar, atmosferde potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümünün sonucu; esas olarak basınç kuvvetlerinin bir ürünüdür. Bilindiği gibi, hareket halindeki her cisim bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgar da hareket halinde olan bir hava akımı olduğundan kinetik enerjiye sahiptir. Birim zamanda birim alandaki rüzgar enerjisi (2.1) denlemiyle hesaplanmaktadır. Denkleme göre rüzgardan elde edilen enerji rüzgarın yoğunluğunun, hızının küpüyle çarpımının yarısına eşittir.

$$E = \frac{1}{2}\rho v^3 \qquad \textbf{(2.1)}$$

Bir akışkan akışından elde edilebilecek maksimum kullanılabilir gücü konu alan makale ilk kez 1920 yılında A. Betz tarafından yayımlanmış olup, teori genellikle Betz limiti olarak bilinmektedir. Buna göre bir rüzgar türbini teorik olarak, şekil 2.13'de gösterildiği gibi rüzgarda var olan gücün en fazla 16/27'sini (0,59) kullanılabilir güce dönüştürebilir.[9] Güç katsayısını etkileyen en önemli faktör seçilen kanat profilinin aerodinamik performansıdır. Bu performansı belirlemek amacıyla bazı teoriler geliştirilmiştir. "Pala Elemanı Momentum Metodu" en sık başvurulan yöntemdir. Şekil 2.14'de kanat profili ve kanat sayılarının uç hız oranlarına göre rotor güç katsayılarına etkisi görülmektedir.



Şekil 2.13 : Cp, maksimum güç katsayısı grafiği.[10]



Şekil 2.14 : Kanat sayısına bağlı olarak güç katsayısı - uç hız oranı değişimi.[11]

3 RÜZGARDAN ENERJİ ELDE EDİMİ

Rüzgardan enerji sağlamanın en önemli etkeni rüzgarın hızıdır. Elde edilen enerji rüzgar hızının küpüyle orantılıdır. Bu sebeple rüzgar hızının arttığı bölgelere ulaşmak ve türbinleri bu bölgelere kurmak, rüzgar türbin projelerinin en hayati unsurudur. Rüzgar tarlasının kurulacağı alan projenin ekonomik açıdan uygunluğunu belirler. Rüzgarların dünya üzerindeki dağılımı değişik coğrafyalara ve zamana bağlı olarak değişir. Bu açıdan tarlanın kurulacağı alanın bizzat ölçümlerinin yapılması çok önemlidir. Gerçekleşebilir bir kurulum için çok sayıda gözlem inceleme ve hesaplamalar yapılmalıdır. Yıllık ortalama rüzgar şiddeti 10 metrede 1-2 m/s gibi küçük bir değer olabildiği gibi yüksek bir değer de olabilir. Rüzgar enerjisi açısından 5m/s lik bir değer bir türbin için kabul edilebilir bir değerdir. Ancak en elverişli bölgeler 6m/s nin üzerindeki bölgelerdir. Yıllık rüzgar şiddet değişimi analiz için önemli bir faktördür. Rüzgar şiddeti mevsimsel veya aylık olarak da analiz edilebilir.

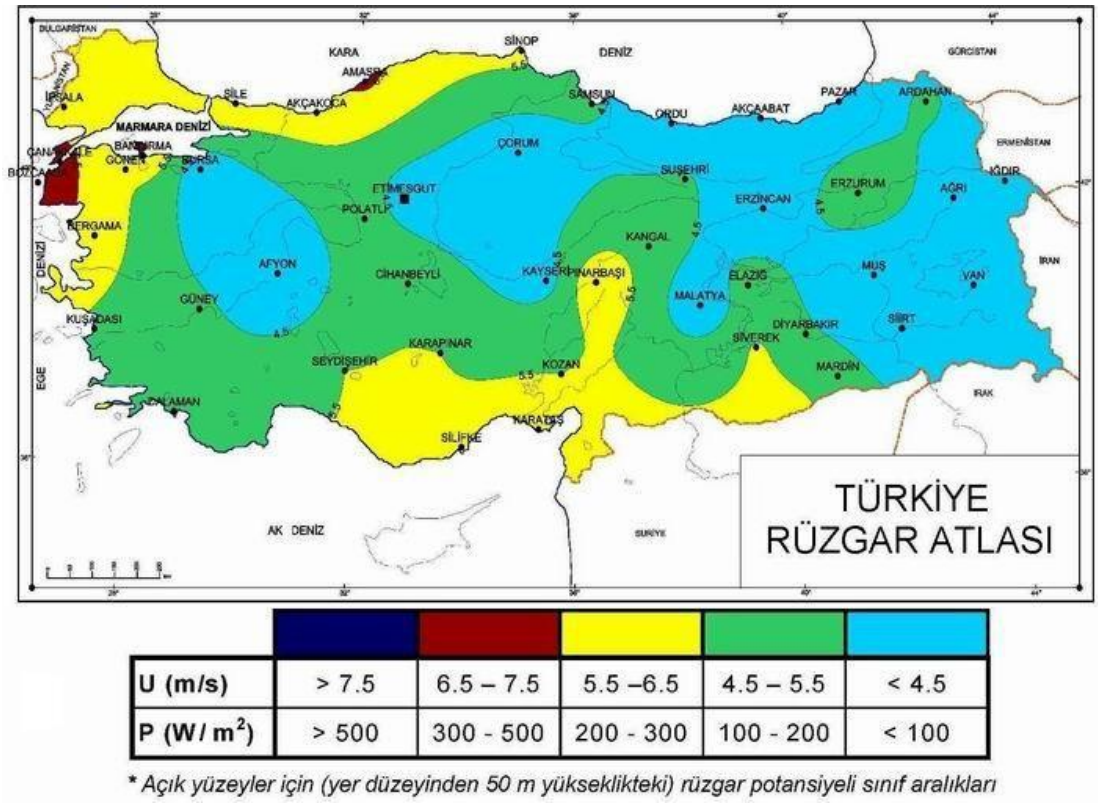
3.1 Yıllar Arası Rüzgar Değişimi

Hava veya iklim parametrelerinin uzun dönem tespiti için yaklaşık 30 yıllık bir data kabul edilmektedir. Bir noktadaki yıllık ortalama rüzgar hızını belirlemek için 5 yıllık bir veri gerekmektedir. Bir bölgede ölçülen değerler kadar o bölgede kaç noktada veri alındığıda önemlidir. Bazen birbirine yakın noktalarda bile büyük rüzgar hızı farkları görülebilir. Bir türbinden üretilen güç, rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğundan yıllık ortalama güç çıktısı veya yıllık enerji çıktısı (kWs/yıl) rüzgar hızına göre yıldan yıla daha büyük bir değişim gösterir. Örneğin rüzgar şiddetindeki % 15 lik bir değişim durumunda, 100.000 kWs/yıl üretmesi beklenen bir türbin 61.000 ile 150.000 kWs/yıl arasında üretebilir. [12]

3.2 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgar tarlası yatırımına başlamadan önce alanın rüzgar hızı verileri iyi incelenmelidir. Bu sebeple rüzgar enerjisi potansiyel atlasları bu ve benzeri soruların

cevaplandırılması için başvurulması gereken en önemli kaynaklardan biridir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Türkiye rüzgar kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla üretilmiştir. REPA da detaylı rüzgar kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgar enerjisinden elektrik üretimine aday bölgelerin belirlenmesinde önemli rol oynar. Şekil 3.1'de Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası görülmektedir.

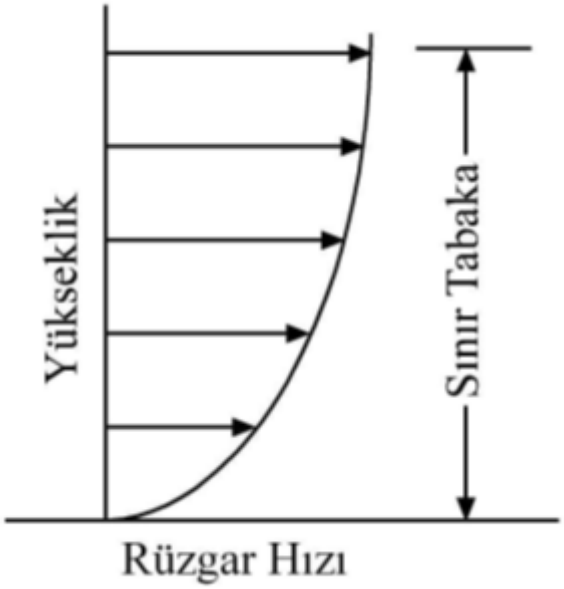


Şekil 3.1 : Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel atlası. [16]

Yıllık ortalama değerler göz önüne alınırsa, Türkiye'de en hızlı rüzgarlar kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınlarında esmektedir. Türkiye'nin batı kıyıları boyunca, Marmara Denizi çevresinde ve Antakya yakınlarındaki küçük bir bölgede en hızlı rüzgarlarımız esmektedir. Orta şiddetteki rüzgar hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgar gücü yoğunluğu Türkiye'nin orta kesimleri boyunca mevcuttur. Birçok yerde, özellikle sahil boyunca ve doğudaki dağlarda kışları daha güçlü rüzgar hızları görülmektedir. Aylık ortalama değerlere göre ise Türkiye'nin batı sahil bölgesi yanında Marmara Denizi'ni çevreleyen bölgede kış mevsimi süresince en şiddetli rüzgar hızına sahiptir.

3.3 Düşey Rüzgar Profili

Yeryüzüne yaklaştıkça yüzey sürtünmesi nedeniyle rüzgar yavaşlamaya başlar, yeryüzünden uzaklaştıkça rüzgar hızlanır. Rüzgarın yükseklikle bu değişimi düşey rüzgar profili olarak adlandırılır. Bu aynı zamanda rüzgarın düşey kaymasının ifadesidir. Bir türbinin gövdebaşı(hub) yüksekliğinin bu nedenle küçük çaplı bir rotor için bile 10 m'nin üzerinde olması gerekir. Rüzgardaki bu düşey kayma nedeni ile dönen bir kanat üzerinde salınımlı bir yük oluşturacaktır. Şekil 3.2'de düşey rüzgar profili görülmektedir.



Şekil 3.2 : Düşey rüzgar profile.[12]

3.4 Rüzgar Türbinine Etki Eden Kuvvetler

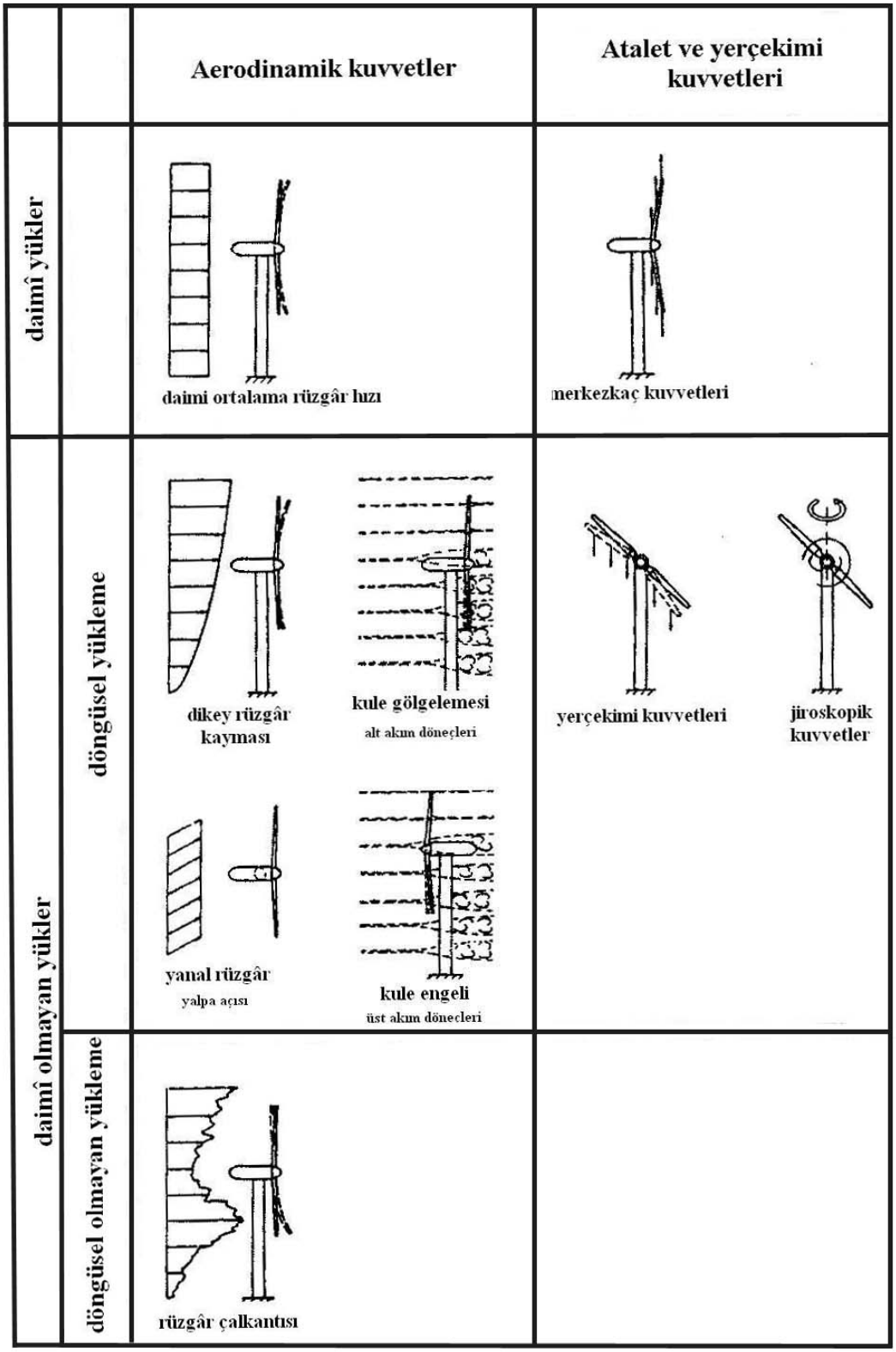
Rüzgar türbinleri, havayla etkileşim halindedirler ve aynı anda dönerler bu durum çeşitli yüklere maruz kalmalarını sağlar. Aynı zamanda büyük bir yapıya sahip olduklarından yerçekimi ve atalet kaynaklı yükler de türbinleri etkiler.

Türbinlere etkiyen yükler şunlardır:

• Aerodinamik pala yükleri
• Rotor palalarındaki yerçekimi yükleri
• Merkezkaç kuvvetleri ve dönmeden kaynaklanan Coriolis kuvvetleri
• Yaw oranından (yalpalama) kaynaklanan jiroskobik yükler
• Kule ve gövde üzerindeki aerodinamik sürükleme kuvvetleri
• Kule ve gövde üzerindeki yerçekimi yükleri

• Çalkantı ve sağanaklardan kaynaklanan yükler

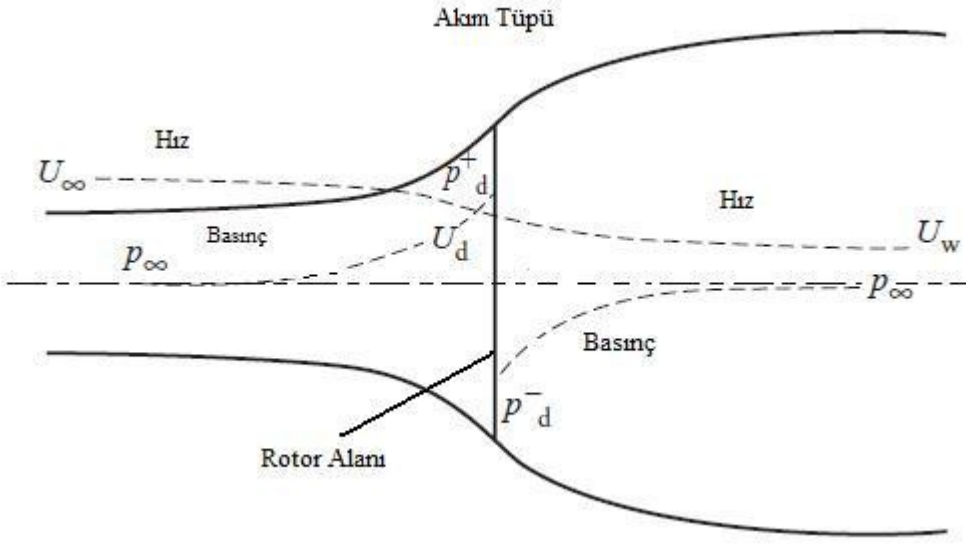
Bu yükleri şekil 3.3 üzerinde sınıflandırırsak daha net anlatılabilir.



Şekil 3.3 : Rüzgâr türbinine etkiyen kuvvetler.[15]

3.5 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamiği

Rüzgar türbini rüzgardan kinetik enerjiyi çekip çıkaran bir makinedir. Türbinin varlığı rotora doğru gelen havanın yavaşlamasına neden olur böylece hava rotora ulaştığında hızı serbest akan rüzgara göre çoktan yavaşlamıştır. Yavaşlamanın etkisiyle akım-tüpü genişler ve havanın statik basıncı kinetik enerjideki azalmayı karşılayabilmek için artar. Şekil 3.4'de akım tüpü görülmektedir.



Şekil 3.4 : Akım tüpünde hız ve basınç değişimi.[17]

Hava rotor süpürme alanından geçerken, teorik olarak, statik basınçta bir düşme olur, ayrıldığında ise hava atmosfer basıncının altındadır. Daha sonra hava, azalmış hızı ve basıncı ile rüzgar altı konuma geçmiş olur. Akışın bu bölgesine iz bölgesi denir. Sonunda, rüzgar altının uzak bölgelerinde girdaptaki statik basınç atmosfer basıncına geri dönmelidir. Statik basınçtaki bu artış rüzgarın yavaşlamasına neden olur. Böylelikle rüzgar üstü ve girdap bölgelerinin uzak kısımlarında basınç korunmuş ancak kinetik enerjide azalma olmuş olur.

3.6 Rüzgar Gücünün Değişkenleri

Rüzgar sahip olduğu hız nedeniyle bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgarın içinde bulunan güç; rüzgarın hızı, yoğunluğu, içinden geçtiği kesit alanın genişliğiyle doğru orantılıdır. Bu gücün formülü denklem (3.1) de görülmektedir.

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho A V_{rüzgar}^3 \quad \textbf{(3.1)}$$

$V_{rüzgar} =$ rüzgarın hızı

$A =$ rüzgarın içinden geçtiği rotor alanı

Yukarıdaki denklemden görüldüğü üzere güç yoğunluğun birinci kuvvetiyle, rotor alanının birinci kuvvetiyle ve rüzgar hızının üçüncü kuvvetiyle doğru orantılıdır. Aslında rüzgar enerjisi, belli bir sürede A rotor alanından geçen hava kütlesinin kinetik enerjisi olarak açıklanabilir.

$$E = \frac{1}{2} m V_{rüzgar}^2 \quad \textbf{(3.2)}$$

Kütle debisi:

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A V_{rüzgar} \quad \textbf{(3.3)}$$

Düzenlersek;

$$P_{rüzgar} = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} = \frac{1}{2} \rho A V_{rüzgar}^3 \quad \textbf{(3.4)}$$

Hava kütlesinin hızının azalmasıyla, rüzgar gücü türbinin mekanik enerjisine dönüşür. Türbine çarpan akımın hızının azalması kinetik enerjisinin azalmasına bağlıdır buda rüzgardan güç elde edildiğini gösterir. Burada türbine çarpan akımdaki tüm enerji alınırsa akımın son hızı sıfır olur ve hava türbini terkedemez. Bir diğer sınır durum ise türbine çarpan akımın hiç enerji kaybetmeden türbini terketmesidir. İki durumda da enerji üretilemez. Daha öncede bahsedildiği gibi Betz sınırı C_p güç katsayısını şekillendirir. Güç katsayısı türbinin, mekanik, elektrik ve aerodinamik verimliliklerini gösterir. C_p aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$C_p = \frac{2 P_{kullanılabilir}}{\rho A V_{rüzgar}^3} = \frac{2 P_{kullanılabilir}}{\rho \pi R^2 V_{rüzgar}^3} \quad \textbf{(3.5)}$$

Betz limiti

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \cong 0.59 \quad \textbf{(3.6)}$$

Denklem (3.5) ve (3.6)'yı da kullanarak, rüzgar türbini tarafından üretilen enerjiyi genel olarak (3.7) denklemiyle özetliyebiliriz.

$$P = \frac{1}{2}\,\rho\,A\,V_{rüzgar}^{3}C_p \qquad \textbf{(3.7)}$$

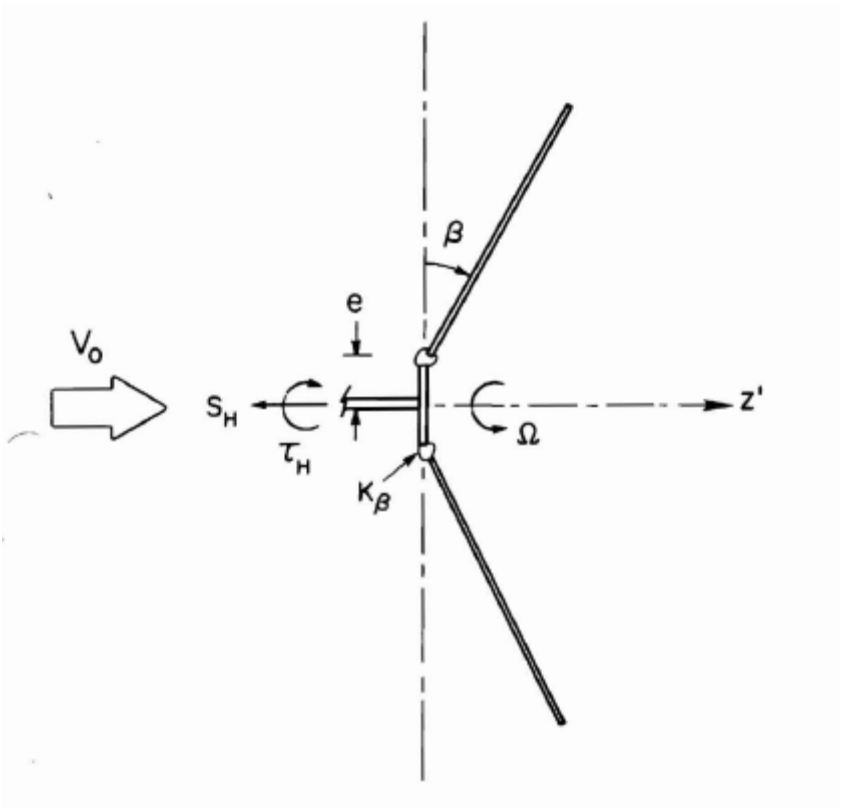
Rüzgar performansını etkileyen ve tasarımda dikkat edilen bir diğer değişken ise uç hız oranıdır. Uç hız oranı, türbin ucu çizgisel hızının, rüzgar hızına oranını ifade eder, sembolü λ dır.

$$\lambda = \frac{V_{uç}}{V_{rüzgar}} \qquad \textbf{(3.8)}$$

4 RÜZGAR TÜRBİN PALASI HAREKET DENKLEMLERİ

4.1 Koordinatlar Ve Dinamik Model

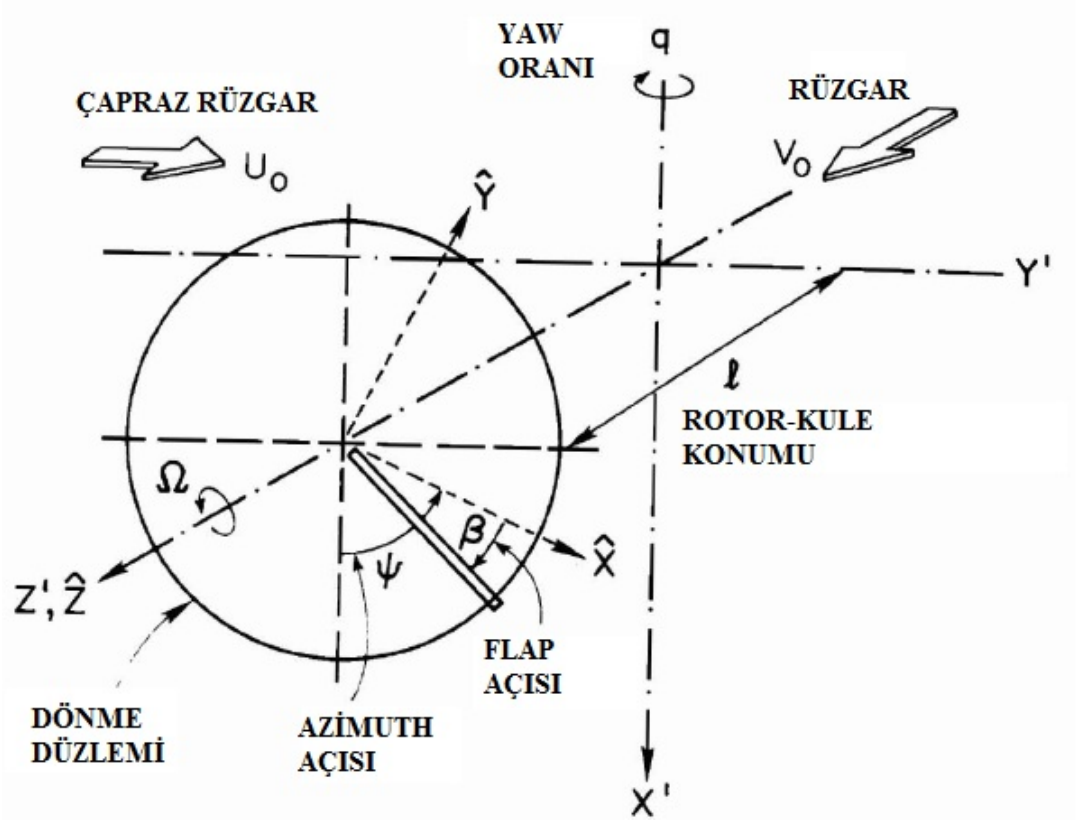
Bu bölümdeki modellemelerde, yönler ve açılarda Eggleston ve Stoddart' ın 'Wind Turbine Engineering Design' kitabı referans alınmış, ve kitaptaki şekilde seçilmiştir. [18] Rotor sistemi rijit hub ve dönen mafsallı palaların oluşturduğu şaft olarak basitçe modellenir. Palalar rijittir ve K_β yay sabitiyle, dönme ekseninden e mafsal derinliğinde uzaklaştırılmıştır. β flap açısı olarak şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Rotor koordinat sistemi. [18]

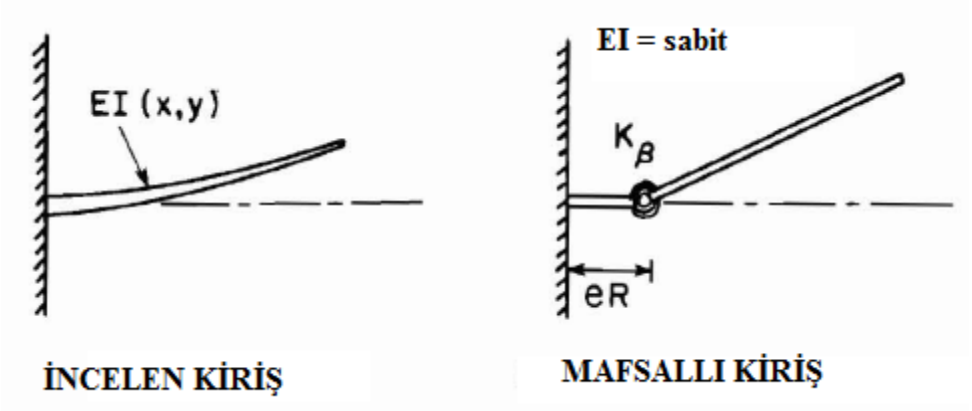
Rotor palası üzerindeki kuvvetler ve momentler önce dönme koordinat sisteminde (xyz sistemi) hesaplanır, daha sonra sabit olan hub ve kule koordinat sistemine aktarılır. X'Y'Z' koordinat sistemi, rüzgar türbininin genel koordinat sistemidir. Yaw açısal hızı q sabit kule ekseni olan X' ekseni etrafında döner. $\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ rotor ve bağlı olduğu hub koordinat sistemidir. $\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ sistemi Z' ekseni etrafında Ω hızında döner,

xyz sistemi palanın koordinat sistemidir ve $\hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$' e β kadar eğimlidir. Bahsedilen sistemler şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Rüzgar türbini koordinat sistemleri.[18]

Şekil 4.3'de gerçeğe yakın uçlara doğru incelen kirişin kütle atalet momenti kiriş boyunca değişkendir ve bizim hesaplamalarımızda eşit kütle dağılımına sahip, kökten eR uzaklıkta K_β yayıyla bağlanmış pala kullanılacaktır.



Şekil 4.3 : Birinci eğilme modu.[18]

Ucundan mafsallı, eşit ağırlık dağılımına sahip bir kirişin atalet momenti (4.1) denklemiyle hesaplanır.

$$I_b = \int_0^R r^2 \, dm = \frac{M_b \, R^2}{3} \tag{4.1}$$

Denklemdeki,

I_b=atalet momenti

r=radyal yöndeki uzaklık

R= yarıçap

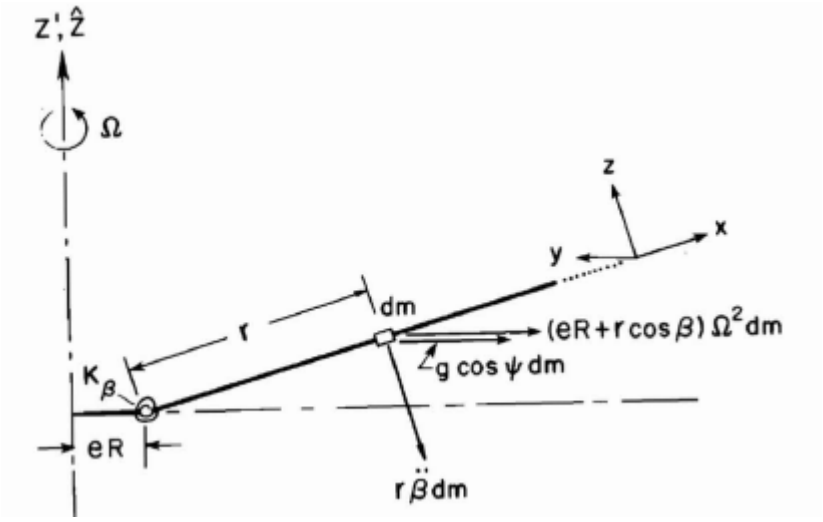
M_b=pala ağırlığıdır.

Aynı pala için mafsal kaydırma noktası e hesaba katılırsa denklem (4.2) halini alır.

$$I_b = \int_0^{R(1-e)} r^2 \, dm = \frac{M_b \, R^2}{3} (1-e)^3 \tag{4.2}$$

4.2 Pala Flaplama Hareket Denklemi

Pala üzerindeki mafsal noktasına r uzaklıkta dm küçük kütleye etkiyen aerodinamik olmayan yükler; merkezkaç kuvvetinden dolayı yerçekimi ve mafsal yayının karşı kuvvetidir. ψ açısı azimuth açısıdır sıfır olması palanın yere dik olduğunu gösterir. Kuvvetler şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Pala flaplama modeli.[18]

Flap mafsalından itibaren moment alınırsa;

$$\sum M = \int_0^{R(1-e)} r^2 \ddot{\beta}\, dm + \int_0^{R(1-e)} r\,(eR + r\cos\beta)\Omega^2 dm \sin\beta + \int_0^{R(1-e)} r\,(g\cos\psi\sin\beta)dm + K_\beta \beta = 0 \quad \textbf{(4.3)}$$

Atalet momenti terimi (4.2) yerine koyulursa,

$$\sum M = \ddot{\beta} I_b + e R \Omega^2 \sin\beta \int_0^{R(1-e)} r\, dm + I_b \Omega^2 \cos\beta \sin\beta + g\cos\psi\sin\beta \int_0^{R(1-e)} r\, dm + K_\beta \beta \quad \textbf{(4.4)}$$

Ve

$$\int_0^{R(1-e)} r\, dm = M_b X_g \quad \textbf{(4.5)}$$

Denklem (4.5)'i denklem (4.4)'de yerine konulursa denklem (4.6) şeklini alır.

$$\sum M = \ddot{\beta} I_b + e R \Omega^2 M_b X_g \sin\beta + I_b \Omega^2 \cos\beta \sin\beta + g\cos\psi\sin\beta M_b X_g R + K_\beta \beta \quad \textbf{(4.6)}$$

Burada;

M_b= pala kütlesi

X_g= palanın ağırlık merkezi (boyutsuz)

R= ağırlık merkezine olan uzaklık

β için küçük açı yaklaşımı yapılırsa

$$\sin\beta \cong \beta$$

$$\cos\beta \cong 1$$

Denklemin son hali (4.7) olur.

$$I_b \ddot{\beta} + \left[e R^2 \Omega^2 M_b X_g + g\cos\psi M_b X_g R + I_b \Omega^2\right]\beta + K_\beta \beta = 0 \quad \textbf{(4.7)}$$

Pala eşit kütle dağılımına sahip olduğundan $\in$ flaplama mafsal derinliği olarak tanımlanır (4.8) denklemiyle ifade edilir.

$$\in = \frac{e M_b X_g R^2}{I_b} = \frac{3e}{2(1-e)} \quad \textbf{(4.8)}$$

Yerçekimi terimi olan G ise denklem (4.9) şeklindedir,

$$G = \frac{g M_b X_g R}{I_b} \quad \textbf{(4.9)}$$

$\in$ ve G terimlerini moment denkleminde (4.7) yerlerine koyarsak, pala flaplama hareket denklemi ortaya çıkar.

$$\ddot{\beta} + \Omega^2 \left[1 + \in + \frac{G}{\Omega^2}\cos\psi\right]\beta + \frac{K_\beta}{I_b}\,\beta = 0 \qquad \textbf{(4.10)}$$

4.3 Pala Lead-Lag Hareket Denklemi

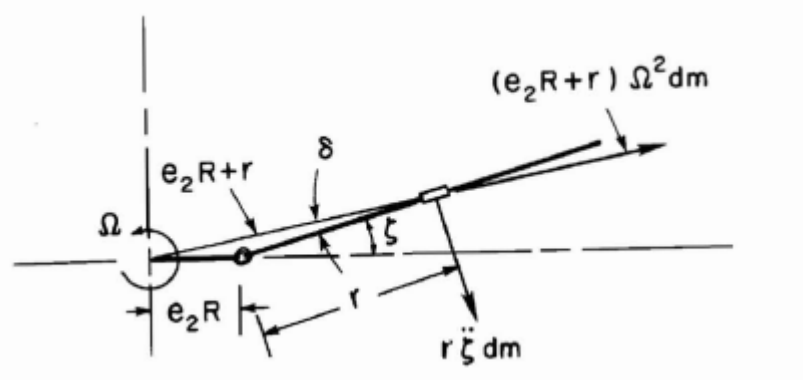
Lead-lag hareketinde öne çıkan kuvvetler, merkezkaç kuvveti ağırlıklıdır. ζ lead-lag açısını temsil eder. Çok küçük ζ açıları için dm kütlesine uzanan rotasyon kolu $(e_2R + r)$ ise, dm de oluşan merkezkaç kuvveti

$$dF = (e_2R + r)\Omega^2 dm \qquad \textbf{(4.11)}$$

(4.11) denklemiyle ifade edilir ve mafsal etrafında moment oluşturan kuvvet bileşeni

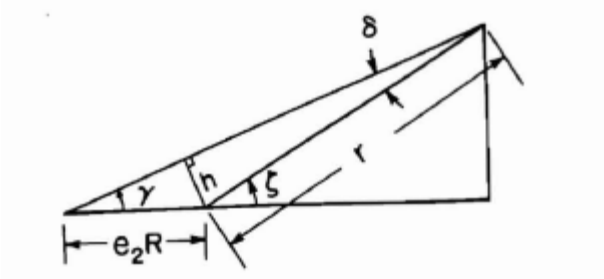
$$dF_\zeta = (e_2R + r)\Omega^2 \sin\delta\, dm \qquad \textbf{(4.12)}$$

olarak ifade edilir. Şekil 4.5'de rotasyon düzleminde pala ve ζ lead-lag açısı görülmektedir.



Şekil 4.5 : Pala lead-lag modeli.[18]

ζ açısını şekil 4.6'da geometrik olarak detaylı çizersek,



Şekil 4.6 : Pala ve merkezkaç kuvveti arasındaki açı.[18]

$$\zeta = \gamma + \delta \qquad \textbf{(4.13)}$$

$$h = e_2 R \sin\gamma = r \sin\delta \tag{4.14}$$

$$\sin\delta = \frac{e_2 R \sin\gamma}{r} \tag{4.15}$$

Küçük açı yaklaşımı yapılırsa,

$$\sin\delta \cong \delta$$

$$\sin\gamma \cong \gamma$$

$$\delta = \frac{e_2 R}{r}\gamma = \frac{e_2 R}{r}(\zeta - \delta) \tag{4.16}$$

$$\delta r = e_2 R\,\zeta - e_2 R\,\delta \tag{4.17}$$

$$\delta r + e_2 R\,\delta = e_2 R\,\zeta \tag{4.18}$$

$$\delta(r + e_2 R) = e_2 R\,\zeta \quad \overset{ise}{\Rightarrow} \quad \delta = \frac{e_2 R}{r + e_2 R}\zeta \tag{4.19}$$

$$\delta = \frac{e_2 R}{r + e_2 R}\zeta \quad \overset{ise}{\Rightarrow} \quad \sin\delta = \frac{e_2 R}{r + e_2 R}\sin\zeta \tag{4.20}$$

$\sin\delta$ değeri dF_ζ denkleminde yerine koyulduğunda,

$$dF_\zeta = (e_2 R + r)\Omega^2 \frac{e_2 R}{r + e_2 R}\sin\zeta\, dm \tag{4.21}$$

Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra,

$$dF_\zeta = \Omega^2 e_2 R \sin\zeta\, dm \tag{4.22}$$

Moment denklemi,

$$\sum dM_\zeta = r^2 \ddot{\zeta} dm + r\,\Omega^2 e_2 R \sin\zeta\, dm \tag{4.23}$$

dF_ζ (4.23) moment denkleminde yerine koyulduğunda,

$$\ddot{\zeta}\int_0^{R(1-e)} r^2\, dm + \Omega^2 e_2 R \sin\zeta \int_0^{R(1-e)} r\, dm = M_\zeta = 0 \tag{4.24}$$

$$I_b \ddot{\zeta} + \Omega^2 e_2 R^2 \sin\zeta\, M_b X_g = 0 \tag{4.25}$$

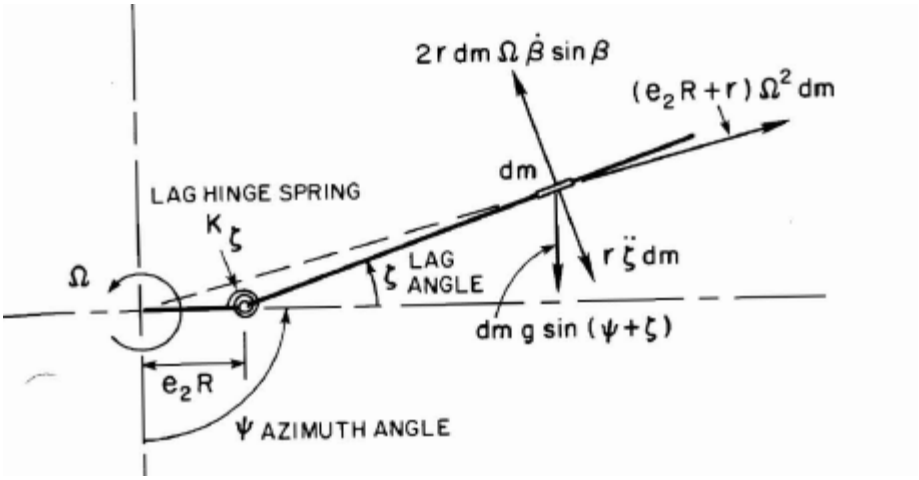
Denkleminde lead-lag mafsal derinliği terimi $\in_2$ aşağıdaki gibi gösterilirse,

$$\epsilon_2 = \frac{e_2 M_b X_g R^2}{I_b} = \frac{3e_2}{2(1-e_2)} \tag{4.26}$$

Hareket denkleminin denklem (4.27)'deki versiyonuna ulaşılır.

$$I_b \ddot{\zeta} + \epsilon_2 \, I_b \, \Omega^2 \sin\zeta = 0 \tag{4.27}$$

Şekil 4.7'de lead-lag derinliği e_2R, lead yayı ise K_ζ ile gösterilmiştir. Flaplama hareketinden oluşan coriolis ivmesi ise $\dot{\beta}$ ile gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Pala lead-lag modeli (merkezkaç kuvveti).[18]

Coriolis kuvvetini F_c ile gösterirsek

$$F_c = -2 \, m \, \Omega \times v = -2 \, m \, \Omega \, v \, \sin\beta \tag{4.28}$$

Küçük dm kütlesine düşen kuvvet

$$dF_c = -2 \, r dm \, \Omega \, \dot{\beta} \, \sin\beta \tag{4.29}$$

Kuvvetlerin lag yayına göre momenti alınırsa,

$$\sum dM_\zeta = \underbrace{\overset{\text{mom.kolu}}{\vec{r}} \quad (r \ddot{\zeta} dm)}_{\text{atalet}} + \underbrace{\overset{\text{mom.kolu}}{\vec{r}} \quad \underbrace{(e_2R + r)\Omega^2 dm}_{F} \underbrace{\frac{e_2R}{r + e_2R} \sin\zeta}_{\sin\delta}}_{\text{merkezkaç}}$$

$$- \underbrace{\overset{\text{mom.kolu}}{\vec{r}} \quad \left(2 \, r dm \, \Omega \, \dot{\beta} \, \sin\beta\right)}_{\text{coriolis}} \tag{4.30}$$

$$+ \underbrace{\overset{\text{mom.kolu}}{\vec{r}} \left(\quad dm \, g \, \sin(\psi + \zeta)\right)}_{\text{yerçekimi}} + \underbrace{K_\zeta \quad \overset{\text{mom.açısı}}{\vec{\zeta}}}_{\text{mafsal yayı}}$$

İntegre edilirse,

$$M_\zeta =$$

$$\ddot{\zeta}\underbrace{\int_0^{R(1-e)} r^2\ dm}_{I_b} + \Omega^2 e_2 R \sin\zeta \underbrace{\int_0^{R(1-e)} r\ dm}_{M_b X_g R} - \tag{4.31}$$

$$2\,\Omega\,\dot{\beta}\,\sin\beta\underbrace{\int_0^{R(1-e)} r^2\ dm}_{I_b} + g\,\sin(\psi+\zeta)\underbrace{\int_0^{R(1-e)} r\ dm}_{M_b X_g R} + K_\zeta\zeta = 0$$

Atalet momentleri ve bilinen parametreler çıkarılırsa

$$\ddot{\zeta} + \underbrace{\frac{e_2 M_b X_g R^2}{I_b}}_{\epsilon_2}\Omega^2\sin\zeta - 2\,\Omega\,\dot{\beta}\,\sin\beta + \underbrace{\frac{gM_b X_g R}{I_b}}_{G}\sin(\psi+\zeta) + \frac{K_\zeta\zeta}{I_b} = 0 \tag{4.32}$$

ϵ_2 ve G sadeleştirmelerinde sonra (4.32) denklemi

$$\ddot{\zeta} + \epsilon_2\,\Omega^2\sin\zeta - 2\,\Omega\,\dot{\beta}\,\sin\beta + G\sin(\psi+\zeta) + \frac{K_\zeta}{I_b}\zeta = 0 \tag{4.33}$$

Sin değeri trigonometrik olarak açılırsa

$$\sin(\psi+\zeta) = \sin\psi + \zeta\cos\psi \tag{4.34}$$

(4.33) denkleminde yerine koyarak

$$\ddot{\zeta} + \epsilon_2\,\Omega^2\sin\zeta - 2\,\Omega\,\dot{\beta}\,\sin\beta + G\sin\psi + G\cos\psi\,\zeta + \frac{K_\zeta}{I_b}\zeta = 0 \tag{4.35}$$

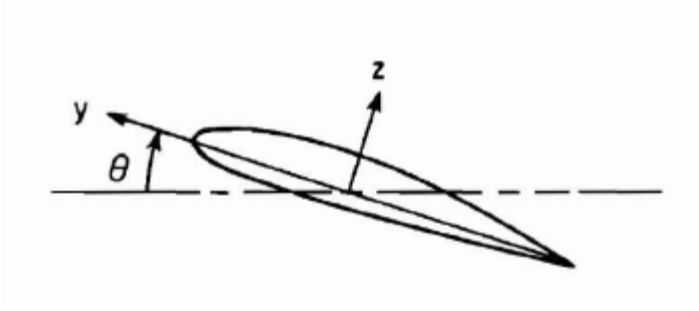
ζ ve β küçük açılardır $\sin\zeta \cong \zeta$ $\sin\beta \cong \beta$

Pala lead-lag hareket denklemine ulaşılır.

$$\ddot{\zeta} + \left[\epsilon_2\,\Omega^2 + G\cos\psi + \frac{K_\zeta}{I_b}\right]\zeta - 2\,\Omega\,\dot{\beta}\,\beta + G\sin\psi = 0 \tag{4.36}$$

4.4 Pala Burulma Hareket Denklemi

Şekil 4.8'de pala burulma açısı θ ile gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Pala burulma modeli.[18]

K_θ burulma yayı, I_f ise burulma atalet momentidir.

xyz sistemi Ω açısal hızıyla döndüğü için, Euler açısal hızları denklem (4.37) ve (4.38)'deki gibidir.

$$\omega_y = \Omega \sin\theta \tag{4.37}$$

$$\omega_z = \Omega \cos\theta \tag{4.38}$$

Bağlaşımlı etkileri ihmal edersek,

$$I_f \ddot{\theta} + I_f \Omega^2 \sin\theta \cos\theta + K_\theta \theta = 0 \tag{4.39}$$

Küçük θ açıları için $\sin\theta \cong \theta$ $\cos\theta \cong 1$

Denklem (4.39)'da yerine koyarsak

$$I_f \ddot{\theta} + I_f \Omega^2 \theta + K_\theta \theta = 0 \tag{4.40}$$

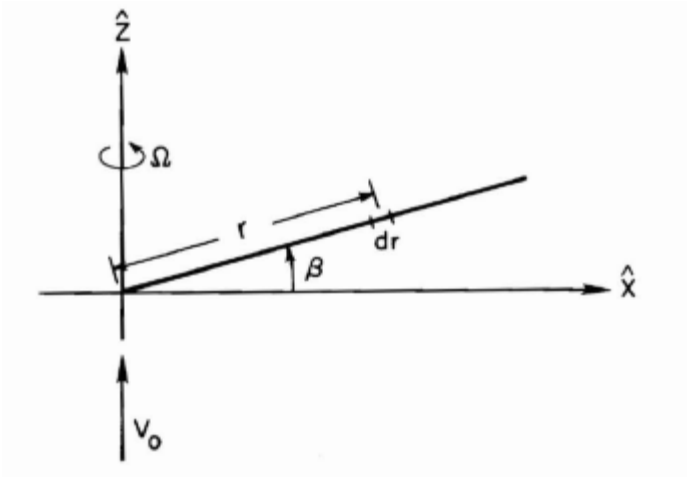
Pala burulma denklemini elde ederiz.

$$\ddot{\theta} + \left[\Omega^2 + \frac{K_\theta}{I_f}\right] \theta = 0 \tag{4.41}$$

5 AERODİNAMİK KUVVETLER VE MOMENTLER

5.1 Taşıma Fonksiyonu

Aerodinamik kuvvetlerin hesabında pala elemanı teorisi yaklaşımı kullanılır. Şekil 5.1'de pala elemanı dr , yarıçap r, ve rüzgar hızı V_0 görülmektedir.



Şekil 5.1 : Pala elemanı modeli.[18]

Pala elemanında oluşan taşımayı ifade eden denklem (5.1)'dir.

$$L = \frac{1}{2}\,\rho\, C_{l\alpha}\, c\, V_R^2\, \alpha \qquad \textbf{(5.1)}$$

ρ = havanın özkütlesi

$C_{l\alpha}$ =taşıma eğrisinin eğimi

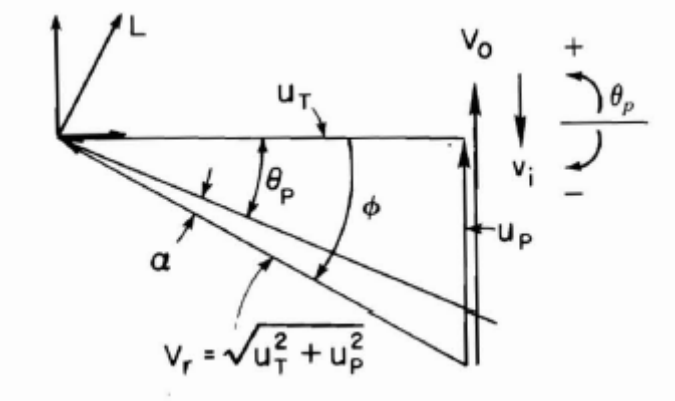
c= kord uzunluğu

V_R =bileşke akım hızı=$\sqrt{U_T^2 + U_P^2}$

α =hücum açısı

L= taşıma kuvveti

Şekil 5.2'de x ekseni üzerinde pala elemanında oluşan kuvvetler gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi θ_P açısının arttırılması α açısını ve taşımayı arttırır.



Şekil 5.2 : Pala elemanında oluşan kuvvetler.[18]

U_P =rotor düzlemine dik hız (z yönü)

U_T =rotasyondan kaynaklanan pala elemanına teğet hız (-y yönü)

ϕ =pala elemanı bağıl rüzgar açısı =$\tan^{-1}(U_P/U_T)$

θ =pala elemanı burulma açısı

θ_P =pala elemanı yunuslama açısı

V_R yönünde oluşacak olan sürükleme kuvveti, taşımaya oranla küçük olacağından ihmal edilmiştir.

$U_P \ll U_T$ Kabul edilirse $V_r^2 \cong U_T^2$

Taşıma (5.1) denkleminde

$$\alpha = \tan^{-1}(\phi - \theta) \cong \phi - \theta = \frac{U_P}{U_T} - \theta \qquad \textbf{(5.2)}$$

$$\theta \equiv -\theta_P$$

değerleri yerine konulduğunda, denklem (5.3) halini alır.

$$L = \frac{1}{2}\,\rho\, C_l\, c\, [U_T^2 \theta_P + U_P U_T] \qquad \textbf{(5.3)}$$

Şekil (5.2)'deki hızları alırsak

$$U_T = \Omega\, r \qquad \textbf{(5.4)}$$

$$U_P = [V_0 - v_i]\, \cos\beta - r\,\dot{\beta} \qquad \textbf{(5.5)}$$

V_0 =sabit serbest akım hızı (eksenel rüzgar)

v_i =paladaki taşımadan dolayı oluşan eksenel indüklenmiş hız

$r\,\dot{\beta}$ =flaplama hızının $U_P$ye katkısı

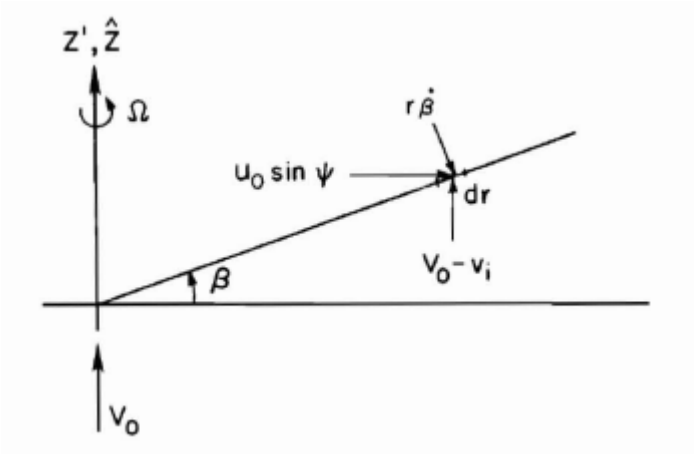
λ_i boyutsuz indüklenmiş hız katsayısını denklem (5.6)'daki gibi alırsak

$$\lambda_i = \frac{v_i}{\Omega R} \tag{5.6}$$

İndüklenmiş hızlar denklemleri (5.4) ve (5.5) e ulaşılır.

5.2 Çapraz Rüzgar Ve Yaw Oranının Katkısı

Rotora gelen rüzgarın çapraz rüzgar U_0gibi rotor düzlemine paralel bileşeni varsa, pala elemanı üzerinde kuvvetler şekil 5.3'deki gibi oluşur. Çapraz rüzgar Y' ekseni yönündedir ve serbest akım V_0'a diktir. Şekilde ayrıca flaplama hızından dolayı pala elemanında oluşan $r\dot{\beta}$ kuvvetide görülmektedir.



Şekil 5.3 : Çapraz rüzgar etkisi.[18]

Çapraz rüzgar etkisiyle U_P'de oluşan fark $-U_0 \sin\beta \sin\psi$ kadardır. Bununla birlikte palaya dik hız denklem (5.7)'deki şekli alır.

$$U_P = [V_0 - v_i]\ \cos\beta - r\,\dot{\beta} - U_0 \sin\beta \sin\psi \tag{5.7}$$

Azimuth açısı $\psi = 0$ olduğunda teğetsel hız

$$\Delta U_T = -U_0 \cos\psi \tag{5.8}$$

Kule (x') ekseni boyunca l yaw moment kolu ile oluşan yaw (q rad/sn) pala elemanı üzerinde harmonic hız farkları oluşturur. Bu farklar denklem (5.9) ve (5.10) şeklinde oluşur.

$$\Delta U_P = -rq \sin\psi \cos\beta - ql \sin\psi \sin\beta \tag{5.9}$$

$$\Delta U_T = -rq \cos\psi \sin\beta - ql \cos\psi \cos\beta \tag{5.10}$$

Bu farklarıda toplayarak dik ve teğet hızlar için denklemlerin son halini yazarsak

$$U_P = [V_0 - v_i]\ \cos\beta - r\,\dot{\beta} - [U_0 \sin\beta + q(l \sin\beta + r \cos\beta)] \sin\psi \tag{5.11}$$

$$U_T = \Omega r - \cos\psi\,[U_0 + q(r\sin\beta + l\cos\beta)] \quad \textbf{(5.12)}$$

Küçük β açısı ve ψ 'nin harmonik olduğu düşünülürse pala elemanı hızları denklem (5.13) ve (5.14) şeklindedir.

$$U_P = [V_0 - v_i] - r\,\dot{\beta} - [U_0\beta + q(l\beta + r)]\sin\psi \quad \textbf{(5.13)}$$

$$U_T = \Omega r - [U_0 + q(r\beta + l)]\cos\psi \quad \textbf{(5.14)}$$

5.3 Rüzgar Gölgesinin Katkısı

Küçük rüzgar türbinleri için rüzgar gölgesinin katkısı ihmal edilebilecek kadar azdır fakat büyük palalara sahip ve yüksek hızlara maruz kalan türbinlerde hesaba katılmalıdır. Rotor diski boyunca U_0ve V_0 hızlarının yükseklikle lineer değişim gösterdiğini düşünürsek,

$$V_0 = V[1 - \eta K_1 \cos\beta\cos\psi] \quad \textbf{(5.15)}$$

$$U_0 = U[1 - \eta K_2 \cos\beta\cos\psi] \quad \textbf{(5.16)}$$

(5.15) ve (5.16) Denklemlerinde

V_0 =pala elemanına gelen serbest akım

U_0 =pala elemanına gelen çapraz akım

U=rotor göbeğine gelen çapraz akım

V=rotor göbeğine gelen serbest akım

K_1 ve K_2 , V_0 ve U_0'ın rotor diski boyunca gradyanlarıdır.

Bileşke farkları denklem (5.17) şeklinde oluşur.

$$\Delta U_P = -\eta K_1 V_0 \cos\beta\cos\psi \quad \textbf{(5.17)}$$

$\Delta U_T = (\text{birinci derece için}) = 0$

η=r/R için.

5.4 Pala Elemanı Taşıma Fonksiyonu

Taşıma fonksiyonunu daha once bulmuştuk ve denklem (5.18) şeklindeydi.

$$L = \frac{1}{2}\,\rho\, C_l\, c\, [U_T^2\theta_P + U_P U_T] \tag{5.18}$$

İlk varsayımda U_T hızının, lokal pala elemanı toplam hızı V_R' ye her istasyonda yaklaşımı bulunur. Bu varsayım sayesinde hücum açısındaki azimutsal çeşitliliği, aşağıdaki ifadenin hem U_P hem U_T terimlerini tutmamıza izin verir.

$\theta \equiv -\theta_P$ şartıyla

$$\text{hücum açısı} = \alpha = \left[\frac{U_P}{U_T} - \theta\right] = \frac{1}{U_T^2}\,[U_T^2\theta_P + U_P U_T] \tag{5.19}$$

U_P ve U_T sabit ve harmonik perturbasyon değerlerinden oluşur. Genel olarak pala elemanı hız değerleri denklem (5.20) ve (5.21) şeklindedir.

$$\begin{aligned} U_P = {} & [(V_0 - v_i) - \eta K_1 V_0 \cos\psi]\cos\beta - r\,\dot{\beta} \\ & - [U_0 \sin\beta + q(l\sin\beta + r\cos\beta)]\sin\psi \end{aligned} \tag{5.20}$$

$$U_T = \Omega\, r - \cos\psi\,[U_0 + q(r\sin\beta + l\cos\beta)] \tag{5.21}$$

Küçük açı yaklaşımıyla $\sin\beta \cong \beta$ ve $\cos\beta \cong 1$ alınırsa denklemler

$$U_P = \lambda - r\,\dot{\beta} - [U_0\beta + q(l\beta + r)]\sin\psi - \eta K_1 V_0 \cos\psi \tag{5.22}$$

$$\begin{aligned} U_P &= \lambda - r\,\dot{\beta} - [U_0\beta + q(l\beta + r)]\sin\psi - \eta K_1 V_0 \cos\psi \\ U_T &= \Omega\, r - [U_0 + q(r\beta + l)]\cos\psi \end{aligned} \tag{5.23}$$

(5.22) ve (5.23) şeklini alır, moment kolları sadeleştirilirse

$$l\,\beta + r \cong r \tag{5.24}$$

$$r\,\beta + l \cong l \tag{5.25}$$

Denklemler (5.22) ve (5.23) boyutsuz ifade edilirse,

$$U_P = \lambda - r\,\dot{\beta} - [U_0\beta + qr]\sin\psi - \eta K_1 V_0 \cos\psi \tag{5.26}$$

$$U_T = \Omega\, r - [U_0 + ql]\cos\psi \tag{5.27}$$

Değerleri ve formüllerini çıkarırsak, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\lambda = \text{boyutsuz akış} = \left(\frac{1}{\Omega R}\right)(V_0 - v_i) \quad \textbf{(5.28)}$$

$$\lambda_i = \text{boyutsuz indüklenmiş hız} = \frac{v_i}{\Omega R} \quad \textbf{(5.29)}$$

$$\overline{U_0} = \text{boyutsuz çapraz akış} = \frac{U_0}{\Omega R} \quad \textbf{(5.30)}$$

$$\overline{V_0} = \text{boyutsuz serbest akış} = \frac{V_0}{\Omega R} \quad \textbf{(5.31)}$$

$$\overline{U} = \text{boyutsuz toplam çapraz akış} = \frac{1}{\Omega R} + (U_0 + gl) \quad \textbf{(5.32)}$$

$$\eta = \text{boyutsuz açıklık istasyonu} = \frac{r}{R} \quad \textbf{(5.33)}$$

$$\overline{q} = \text{boyutsuz sapma oranı} = \frac{q}{\Omega} \quad \textbf{(5.34)}$$

$$\gamma = \text{lock değeri} = \frac{\rho C_l \, c \, R^4}{I_b} \quad \textbf{(5.35)}$$

$$\acute{\beta} = \text{flap açısının azimuta göre türevi} = \left(\frac{1}{\Omega}\right)\dot{\beta} \quad \textbf{(5.36)}$$

5.5 Aerodinamik Kuvvetler Ve Momentler

Taşıma kuvvetini hesaplarken, eksenel (flaplama) ve düzlemsel (lead-lag) yönündeki aerodinamik kuvvetler integrasyonla bulunur. Aynı şekilde mafsal noktalarındaki momentler ve paladaki gerilmelerde integrasyonla bulunur.

Flaplama ($\hat{z}$) yönündeki kuvvet bileşeni $L \cos\phi \cos\beta$ şeklindedir.

Göbekte flaplama yönünde aerodinamik kesme kuvveti,

$$S_\beta = \int_0^R L \cos\phi \cos\beta \, dr \cong \int_0^1 L \, R \, d\eta \quad \textbf{(5.37)}$$

Göbekte lead-lag yönünde aerodinamik kesme kuvveti,

$$S_\zeta = \int_0^R L \sin\phi \; dr \cong \int_0^1 L\,R \left(\frac{U_p}{U_T}\right) d\eta \tag{5.38}$$

Aerodinamik kuvvetlerden dolayı oluşan flaplama momenti,

$$M_\beta = \int_0^R L \cos\phi \cos\beta \, r \; dr \cong \int_0^1 L\,R^2\,\eta \, d\eta \tag{5.39}$$

Aerodinamik kuvvetlerden dolayı oluşan lead-lag momenti,

$$M_\zeta = \int_0^R L \sin\phi \; dr \cong \int_0^1 L\,R^2 \left(\frac{U_p}{U_T}\right) \eta \, d\eta \tag{5.40}$$

Taşıma kuvveti,

$$L = \frac{1}{2}\,\rho\, C_l\, c\, [U_T^2\theta_P + U_P U_T] \tag{5.41}$$

$$L\frac{U_p}{U_T} = \frac{1}{2}\,\rho\, C_l\, c\, \left[U_P U_T \theta_P + {U_P}^2\right] \tag{5.42}$$

Aerodinamik momentler ve mafsallarda oluşturduğu kuvvetleri toplayarak, göbekteki dikey kesme kuvvetini elde ederiz.

$$\begin{aligned} S_\beta = \frac{1}{2}\,\gamma\, I_b \Omega^2 \; \Bigg\{ & \frac{\lambda}{2} + \frac{\theta_P}{3} - \frac{\acute{\beta}}{3} - \cos\psi \left[\overline{U}\left(\lambda - \frac{\acute{\beta}}{2} - \theta_P\right) + \frac{K_1\overline{V_0}}{3}\right] \\ & - \sin\psi \left[\frac{\overline{U_0}\beta}{2} + \frac{\overline{q}}{3}\right]\Bigg\} \end{aligned} \tag{5.43}$$

Aerodinamik flaplama momenti,

$$\begin{aligned} M_\beta = \frac{1}{2}\,\gamma\, I_b \Omega^2 \; \Bigg\{ & \frac{\lambda}{3} + \frac{\theta_P}{4} - \frac{\acute{\beta}}{4} - \cos\psi \left[\overline{U}\left(\frac{\lambda}{2} + \frac{\acute{\beta}}{3} + \frac{2\theta_P}{3}\right) + \frac{K_1\overline{V_0}}{4}\right] \\ & - \sin\psi \left[\frac{\overline{U_0}\beta}{3} + \frac{\overline{q}}{4}\right]\Bigg\} \end{aligned} \tag{5.44}$$

Aerodinamik kuvvetler tarafından oluşan göbek düzlemindeki kesme kuvveti,

$$\begin{aligned} S_\zeta = \frac{1}{2}\,\gamma\, I_b \frac{\Omega^2}{R} \; \Bigg\{ & \lambda\left[\lambda + \frac{\theta_P}{2}\right] - \acute{\beta}\left[\lambda + \frac{\theta_P}{3}\right] \\ & - \cos\psi \left[K_1\overline{V_0}\left(\lambda + \frac{\theta_P}{3}\right) + \overline{U}\theta_P\lambda - \acute{\beta}\left(\frac{2}{3}K_1\overline{V_0} + \frac{\overline{U_0}}{2}\right)\right] \\ & - \sin\psi \left[\overline{q}\left(\lambda + \frac{\theta_P}{3}\right) - \acute{\beta}\left(\frac{2}{3}\overline{q}\right) + \beta\overline{U_0}\left(2\lambda + \frac{\theta_P}{2} - \acute{\beta}\right)\right]\Bigg\} \end{aligned} \tag{5.45}$$

Aerodinamik lead-lag momenti,

$$M_\zeta = \frac{1}{2}\,\gamma\, I_b \frac{\Omega^2}{R}\left\{\lambda\left[\frac{\lambda}{2}+\frac{\theta_P}{3}\right]-\acute{\beta}\left[\frac{2}{3}\lambda+\frac{\theta_P}{4}\right]\right.$$
$$-\cos\psi\left[K_1\overline{V_0}\left(\frac{2}{3}\lambda+\frac{\theta_P}{4}\right)+\frac{\overline{U}\theta_P\lambda}{2}-\acute{\beta}\left(\frac{K_1\overline{V_0}}{2}+\frac{\overline{U_0}\theta_P}{3}\right)\right] \qquad \textbf{(5.46)}$$
$$\left.-\sin\psi\left[\overline{q}\left(\frac{2}{3}\lambda+\frac{\theta_P}{4}\right)-\acute{\beta}\left(\frac{\overline{q}}{2}\right)+\beta\overline{U_0}\left(\lambda+\frac{\theta_P}{3}-\frac{2}{3}\acute{\beta}\right)\right]\right\}$$

6 PALA HAREKETLERİ

6.1 Flaplama ve Lead-lag Hareket Denklemleri

Flaplamanın tam denklemini çıkarmak için bulunan aerodinamik flaplama momenti (5.44) hareket denklemine eklenir. Sonuçta flaplama denkleminin son hali denkelem (6.1) halini alır.

$$\frac{\ddot{\beta}}{\Omega^2} + \left[1 + \epsilon + \frac{G}{\Omega^2}\cos\psi + \frac{K_\beta}{I_b\,\Omega^2}\right]\beta = \frac{M_{\beta aero}}{I_b\,\Omega^2} - 2\overline{q}\cos\psi \qquad \textbf{(6.1)}$$

Lead-lag hareket denklemine, aerodinamik lead-lag momenti (5.46) eklenirse, lead-lag hareket denkleminin son hali denklem (6.2) şeklindedir.

$$\frac{\ddot{\zeta}}{\Omega^2} + \left[\epsilon_2 + \frac{G}{\Omega^2}\cos\psi + \frac{K_\zeta}{I_b\,\Omega^2}\right]\zeta = \frac{M_{\zeta aero}}{I_b\,\Omega^2} + \frac{2\beta\dot{\beta}}{\Omega} - \frac{G}{\Omega^2}\sin\psi \qquad \textbf{(6.2)}$$

Pala dinamiğini incelerken, zaman değişkeninide hesaplamalara katmak adına, zincir kuralını kullanırsak,

$$\frac{d}{dt} = \left(\frac{d}{d\psi}\right)\left(\frac{d\psi}{dt}\right) = \Omega\left(\frac{d}{d\psi}\right) \qquad \textbf{(6.3)}$$

β nın zamana göre türevleri alınırsa,

$$\ddot{\beta} = \Omega^2\left(\frac{d^2\beta}{d\psi^2}\right) = \Omega^2\acute{\beta} \qquad \textbf{(6.4)}$$

$$\dot{\beta} = \Omega\left(\frac{d\beta}{d\psi}\right) = \Omega\acute{\beta} \qquad \textbf{(6.5)}$$

(6.4) ve (6.5) türevlerini flaplama (6.1) denkleminde yerlerine koyarsak, flaplama denkleminin yeni hali, (6.6) şeklindedir.

$$\acute{\beta} + \left[1 + \epsilon + \left(\frac{G}{\Omega^2}\right)\cos\psi + \left(\frac{K_\beta}{I_b\,\Omega^2}\right)\right]\beta = \left(\frac{M_{\beta aero}}{I_b\,\Omega^2}\right) - 2\overline{q}\cos\psi \qquad \textbf{(6.6)}$$

Bütün terimleri toplayarak bulduğumuz pala flaplama hareketinin tam denklemi (6.7) şeklindedir.

$$\begin{aligned}
&\acute{\beta} + \left[\frac{\gamma}{8}\left(1 - \frac{4}{3}\overline{U_0}\cos\psi\right)\right]\dot{\beta} \\
&\qquad + \left[1 + \epsilon + \left(\frac{G}{\Omega^2}\right)\cos\psi + \left(\frac{\gamma\overline{U_0}}{6}\right)\sin\psi + \left(\frac{K_\beta}{I_b\,\Omega^2}\right)\right]\beta \\
&\qquad = -2\overline{q}\cos\psi + \frac{\gamma}{2}\left[\frac{\lambda}{3} + \frac{\theta_P}{4}\right] \\
&\qquad - \frac{\gamma}{8}\overline{q}\sin\psi - \cos\psi\left[\frac{\gamma}{2}\left(\overline{U_0}\left[\frac{\lambda}{2} + \frac{2\theta_P}{3}\right] + \frac{K_1\overline{V_0}}{4}\right)\right]
\end{aligned} \tag{6.7}$$

Aynı şekilde lead-lag denklemlerinede zaman türevleri eklendiğinde, lead-lad denklemi (6.8) halini alır.

$$\ddot{\zeta} + \left[\epsilon_2 + \left(\frac{G}{\Omega^2}\right)\cos\psi + \left(\frac{K_\zeta}{I_b\,\Omega^2}\right)\right]\zeta = 2\beta\dot{\beta} - \left(\frac{G}{\Omega^2}\right)\sin\psi + \frac{M_{\zeta aero}}{I_b\,\Omega^2} \tag{6.8}$$

Bütün terimleri toplayarak bulduğumuz pala lead-lag hareketinin tam denklemi (6.9) şeklindedir.

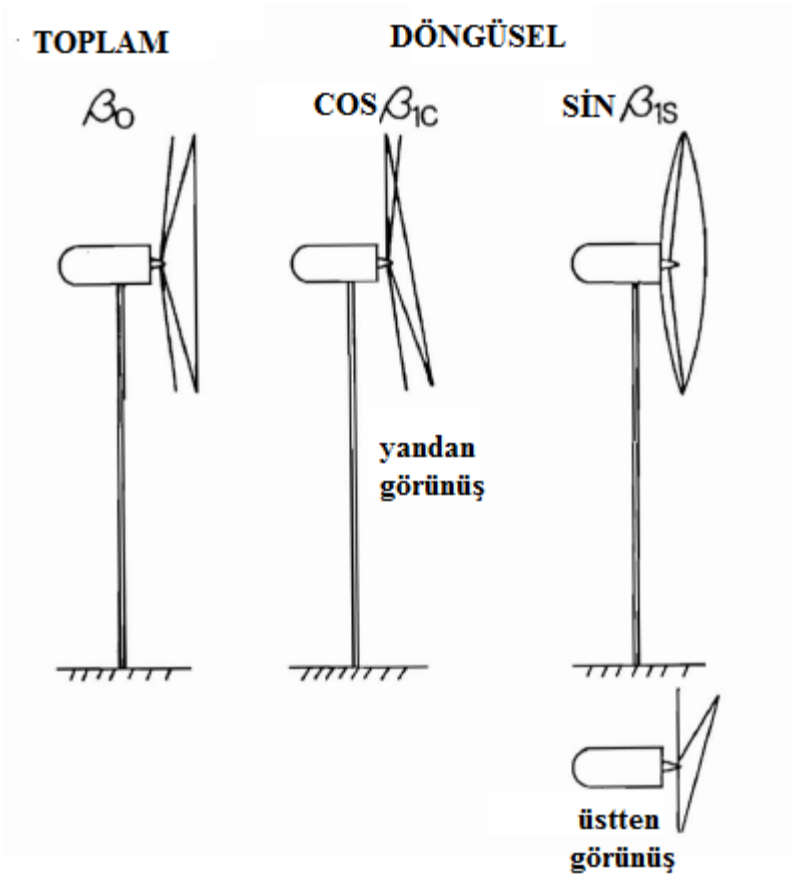
$$\begin{aligned}
&\ddot{\zeta} + \left[\epsilon_2 + \left(\frac{G}{\Omega^2}\right)\cos\psi + \left(\frac{K_\zeta}{I_b\,\Omega^2}\right)\right]\zeta \\
&\qquad - \dot{\beta}\left[2\beta - \gamma\left(\frac{\lambda}{3} + \frac{\theta_P}{8}\right)\right. \\
&\qquad \left. + \frac{\gamma}{2}\left(\frac{K_1\overline{V_0}}{2} + \frac{\overline{U_0}\theta_P}{2}\right)\cos\psi + \frac{\gamma}{2}\left(\frac{\overline{q}}{2} + \frac{2}{3}\beta\overline{U_0}\right)\sin\psi\right] \\
&\qquad = \frac{G\sin\psi}{\Omega^2} + \frac{\gamma}{2}\left[\lambda\left(\frac{\lambda}{2} + \frac{\theta_P}{3}\right)\right] \\
&\qquad - \frac{\gamma}{2}\sin\psi\left[\overline{q}\left(\frac{2}{3}\lambda + \frac{\theta_P}{4}\right) + \beta\overline{U_0}\left(\lambda + \frac{\theta_P}{3}\right)\right] \\
&\qquad - \frac{\gamma}{2}\cos\psi\left[\overline{U}\theta_P\frac{\lambda}{2} + K_1\overline{V_0}\left(\frac{2}{3}\lambda + \frac{\theta_P}{4}\right)\right]
\end{aligned} \tag{6.9}$$

6.2 Harmonik Seri Çözümü

Fourier serisi çözümü dinamik denklemleri gelişiminde kabul görmüş bir uygulamadır. β açısının fourier serisine açılımı aşağıdaki gibidir.

$$\beta = \beta_0 + \beta_{1c}\cos\psi + \beta_{1s}\sin\psi + \beta_{2c}\cos 2\psi + \beta_{2s}\sin 2\psi + \cdots \tag{6.10}$$

Bu dinamik model türetiminde pala esnekliği flaplama ve lead-lag hareketinde birinci eğilme moduna indirgenmiştir. Şekil 6.1'de birinci derece pala hareketleri görülmektedir.



Şekil 6.1 : Birinci derece pala hareketleri.[18]

Birinci derece pala flaplama hareketini tanımlayan (6.11) denklemi,

$$\beta = \beta_0 + \beta_{1c}\cos\psi + \beta_{1s}\sin\psi \quad \textbf{(6.11)}$$

Birinci derece pala lead-lag hareketini tanımlayan (6.12) denklemi,

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_{1c}\cos\psi + \zeta_{1s}\sin\psi \quad \textbf{(6.12)}$$

Hareket denkleminde yerine koymak amaçlı β, $\acute{\beta}$, $\acute{\acute{\beta}}$ terimleri bulunur ve denklemlere yerleştirilir.

$$\beta = \beta_0 + \beta_{1c}\cos\psi + \beta_{1s}\sin\psi \quad \textbf{(6.13)}$$

$$\acute{\beta} = -\beta_{1c}\sin\psi + \beta_{1s}\cos\psi \quad \textbf{(6.14)}$$

$$\acute{\acute{\beta}} = -\beta_{1c}\cos\psi - \beta_{1s}\sin\psi \quad \textbf{(6.15)}$$

7 FLAPLAMA DAVRANIŞI

7.1 Flaplama Dinamiği

Flaplama denklemindeki işlemleri düzenlemek adına, kalıpları farklı parametrelerle adlandırırsak,

$$\mathrm{K} = \text{boyutsuz flapping frekansı} = \left[1 + \epsilon + \left(\frac{\mathrm{K}_\beta}{\mathrm{I}_b \Omega^2}\right)\right] = \left(\frac{\omega_\beta}{\Omega}\right)^2 \tag{7.1}$$

$$\mathrm{A} = \text{aerodinamik terim} = \frac{\lambda}{3} + \frac{\theta_P}{4} \tag{7.2}$$

$$\mathrm{B} = \text{yerçekimi terimi} = \frac{\mathrm{G}}{2\Omega^2} \tag{7.3}$$

$$\gamma = \text{Lock numarası} = \frac{\rho\, \mathrm{C_l}\, \mathrm{c}\, \mathrm{R}^4}{\mathrm{I_b}} \tag{7.4}$$

Bu değerleri flaplama (6.7) denkleminde yerine koyarsak, flaplama denklemi (7.5) halini alır.

$$\begin{aligned} \acute{\beta} + \frac{\gamma}{8}\left[1 - \frac{4}{3}\cos\psi\left(\overline{\mathrm{U_0}} + \overline{\mathrm{ql}}\right)\right]\acute{\beta} + \left[\mathrm{K} + 2\mathrm{B}\cos\psi + \frac{\gamma}{6}\overline{\mathrm{U_0}}\sin\psi\right]\beta \\ = \frac{\gamma}{2}\left[\mathrm{A} - \frac{\overline{\mathrm{q}}}{4}\sin\psi\right] - 2\overline{\mathrm{q}}\cos\psi \\ - \frac{\gamma}{2}\left[\left(\overline{\mathrm{U_0}} + \overline{\mathrm{ql}}\right)\left(\frac{\lambda}{2} + \frac{2\theta}{3}\right) + \frac{\mathrm{K_1}\overline{\mathrm{V_0}}}{4}\right]\cos\psi \end{aligned} \tag{7.5}$$

(7.5) denklemi için (7.6),(7.7) ve (7.8) trigonometrik açılımları kullanırsak, gerekli sadeleştirmeleri yaparsak,

$$\sin^2 \mathrm{x} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2\mathrm{x} \tag{7.6}$$

$$\cos^2 \mathrm{x} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos 2\mathrm{x} \tag{7.7}$$

$$\sin x \cos x = \frac{1}{2}\sin 2x \tag{7.8}$$

Denklem içindeki parametreleri aşağıdaki tanımlamalara göre gruplarsak,

$$G = \text{yerçekimi terimi} = \frac{G}{2\Omega^2} \tag{7.9}$$

$$A_3 = \text{asimetric akış} = \frac{\lambda}{2} + \frac{2}{3}\theta_p \tag{7.10}$$

$$l = \text{boyutsuz sapma moment kolu} = \frac{l}{R} \tag{7.11}$$

$$G = \frac{gM_bX_gR}{I_b} = \left(\frac{\in}{e}\right)\frac{g}{R} = \frac{3g}{2R(1-e)} \tag{7.12}$$

$K_1 =$ dikey rüzgar kesme gradyanı

Flaplama denklemlerinin en son hali (7.13),(7.14) ve (7.15) şeklindedir.

$$K\beta_0 + B\beta_{1c} - \frac{\gamma}{12}\overline{ql}\beta_{1s} = \frac{\gamma}{2}A \tag{7.13}$$

$$\beta_{1c}(K-1) + 2B\beta_0 + \frac{\gamma}{8}\beta_{1s} = -2\bar{q} - \frac{\gamma}{2}\left[\left(\overline{U_0} + \overline{ql}\right)\left(\frac{\lambda}{2} + \frac{2}{3}\theta_p\right) + \left(\frac{K_1\overline{V_0}}{4}\right)\right] \tag{7.14}$$

$$\beta_{1s}(K-1) + \frac{\gamma}{6}\overline{U_0}\beta_0 - \frac{\gamma}{8}\beta_{1c} = -\frac{\gamma}{8}\bar{q} \tag{7.15}$$

Denklemleri matris formatında yazarsak (7.16) denklemine ulaşırız.

$$\begin{bmatrix} K & B & -\frac{\gamma}{12}\overline{ql} \\ 2B & (K-1) & \frac{\gamma}{8} \\ \frac{\gamma}{6}\overline{U_0} & -\frac{\gamma}{8} & (K-1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1c} \\ \beta_{1s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ -2\bar{q} - \frac{\gamma}{2}\left[\left(\overline{U_0} + \overline{ql}\right)A_3 + \left(\frac{K_1\overline{V_0}}{4}\right)\right] \\ -\frac{\gamma}{8}\bar{q} \end{Bmatrix} \tag{7.16}$$

7.2 Yerçekiminin Flaplamaya Etkisi

Yerçekiminin flaplama hareketine etkisini hesaplarken, yerçekimi terimleride denklemlere eklenir ve denklemler sistemi (7.17) haline gelir.

$$\begin{bmatrix} K & B & 0 \\ 2B & (K-1) & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & (K-1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1c} \\ \beta_{1s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{7.17}$$

Katsayılar determinantının hesabı

$$\Delta = |\text{katsayılar}| = K\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right] - 2B^2(K-1) \tag{7.18}$$

β_0, β_{1c}, β_{1s} değerlerinin hesaplanması

$$\beta_0 = \frac{1}{\Delta}\begin{vmatrix} \frac{\gamma}{2}A & B & 0 \\ 0 & (K-1) & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & (K-1) \end{vmatrix} = \frac{1}{\Delta}\left[\frac{\gamma}{2}A(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right] \tag{7.19}$$

$$\beta_{1c} = \frac{1}{\Delta}\begin{vmatrix} K & \frac{\gamma}{2}A & 0 \\ 2B & 0 & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{1}{\Delta}[\gamma B(K-1)A] \tag{7.20}$$

$$\beta_{1s} = \frac{1}{\Delta}\begin{vmatrix} K & B & \frac{\gamma}{2}A \\ 2B & (K-1) & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & 0 \end{vmatrix} = -\frac{1}{\Delta}\left[\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2\frac{B}{2}a\right] \tag{7.21}$$

Yerçekimi ve aksisimetrik akış kaynaklı flaplama denklemleri (7.22), (7.23) ve (7.24)'de gösterilmektedir.

$$\beta_0 = \frac{\gamma}{2}A\left\{\frac{\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right]}{K\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right] - 2B^2(K-1)}\right\} \tag{7.22}$$

$$\beta_{1c} = -\left\{\frac{\gamma B(K-1)A}{K\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right] - 2B^2(K-1)}\right\} \tag{7.23}$$

$$\beta_{1s} = -\left\{\frac{\left(\frac{\gamma^2}{8}\right)BA}{K\left[(K-1)^2+\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right]-2B^2(K-1)}\right\} \tag{7.24}$$

7.3 Çapraz Rüzgarın Flaplamaya Etkisi

Çapraz rüzgarın flaplama hareketine etkisini hesaplarken, çapraz rüzgar terimleride denklemlere eklenir ve denklemler (7.25) haline gelir.

$$\begin{bmatrix} K & B & 0 \\ 2B & (K-1) & \frac{\gamma}{8} \\ \frac{\gamma}{6}\overline{U_0} & -\frac{\gamma}{8} & (K-1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1c} \\ \beta_{1s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ -\frac{\gamma}{2}\overline{U_0}\left(\frac{\lambda}{2}+\frac{2}{3}\theta_p\right) \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{7.25}$$

Katsayılar determinantının hesabı,

$$\Delta = \underbrace{K\left[(K-1)^2+\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right]}_{\text{doğal frekans}} - \underbrace{2B^2(K-1)}_{\text{yerçekimi}} + \underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\frac{4}{3}\overline{U_0}\,B}_{\text{çaprazrüzgar-yerçekimi}} \tag{7.26}$$

Yeni değerleri aşağıdaki gibi gruplandırır ve (7.25) denkleminde yerlerine koyarsak

$$A_3 = \frac{\gamma}{2}+\frac{2}{3}\theta_p \tag{7.27}$$

$$A = \frac{\lambda}{3}+\frac{\theta_p}{4} \tag{7.28}$$

$$A_2 = \frac{\lambda}{2}+\frac{\theta_p}{3} \tag{7.29}$$

$$A_3 = \frac{\lambda}{2}+\frac{2\theta_p}{3} = \frac{3}{2}\left[\frac{\lambda}{3}+\frac{4\theta_p}{9}\right] \tag{7.30}$$

Yerçekimi ve çapraz rüzgar kaynaklı flaplama denklemleri (7.31), (7.32) ve (7.33)'deki gibidir.

$$\beta_0 = \frac{\gamma A}{2\Delta}\left[(K-1)^2+\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right]+\frac{\gamma A_3}{2\Delta}\left[B\overline{U_0}(K-1)\right] \tag{7.31}$$

$$\beta_{1c} = -\frac{1}{\Delta}\left\{\frac{\gamma A}{2}[2B(K-1)]+\frac{\gamma\overline{U_0}}{2}\left[A_3K(K-1)-\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\frac{4}{3}A\right]\right\} \tag{7.32}$$

$$\beta_{1s} = -\frac{1}{\Delta}\left\{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 8AB + 4\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \overline{U_0}\left[\frac{4}{3}A(K-1) + A_3K\right] + \frac{16}{3}\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \overline{U_0^2}A_3B\right\} \quad \textbf{(7.33)}$$

7.4 Yaw Oranının Flaplamaya Etkisi

Yaw oranının flaplama hareketine etkisini hesaplarken, yaw oranı pertürbasyon terimi $\bar{q}$ denklemlere eklenir ve denklemler sistemi denklem (7.34) haline gelir.

$$\begin{bmatrix} K & 0 & -\frac{\gamma}{12}\bar{l} \\ 0 & (K-1) & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & (K-1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1c} \\ \beta_{1s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ -2\bar{q} - \frac{\gamma}{2}(\bar{q}\bar{l}A_3) \\ -\frac{\gamma}{8}\bar{q} \end{Bmatrix} \quad \textbf{(7.34)}$$

Katsayılar determinantı hesabı,

$$\Delta = K\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right] \quad \textbf{(7.35)}$$

Yerçekimi ve çapraz rüzgar terimleride eklenirse toplam katsayılar matrisi oluşur,

$$\Delta = \underbrace{K\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right]}_{\text{doğal frekans}} - \underbrace{2B^2(K-1)}_{\text{yerçekimi}} - \underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \frac{4}{3} B\left(\overline{U_0} + \bar{q}\bar{l}\right)}_{\text{yerçekimi}} + \underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \frac{9}{8}\overline{U_0}\,(K-1)}_{\text{çapraz rüzgar}} \quad \textbf{(7.36)}$$

A_3 değeride (7.34) denkleminde yerine konulduğunda, yaw hareketi kaynaklı flaplama denklemleri (7.37), (7.38) ve (7.39) şeklindedir.

$$\beta_0 = \frac{1}{\Delta}\left\{\frac{\gamma A}{2}\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right] - \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 \frac{2}{3}\bar{q}^2\bar{l}\left[-2 - \frac{\gamma}{2}\bar{l}A_3 + (K-1)\right]\right\} \quad \textbf{(7.37)}$$

$$\beta_{1c} = -\frac{K\bar{q}}{\Delta}\left\{(K-1)\left[2 + \frac{\gamma}{2}\bar{l}A_3\right] - \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right\} \quad \textbf{(7.38)}$$

$$\beta_{1s} = -\frac{K\bar{q}}{\Delta}\left(\frac{\gamma}{8}\right)\left\{(K-1) + \left[2 + \frac{\gamma}{2}\bar{l}A_3\right]\right\} \quad \textbf{(7.39)}$$

7.5 Rüzgar Gölgesinin Flaplamaya Etkisi

Rüzgar Gölgesinin flaplama hareketine etkisini hesaplarken, Rüzgar Gölgesi gradyanı K_1denklemler sistemine eklenir ve denklemler sistemi denklem (7.40) halini alır.

$$\begin{bmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & (K-1) & \frac{\gamma}{8} \\ 0 & -\frac{\gamma}{8} & (K-1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_{1c} \\ \beta_{1s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{2}A \\ -\frac{\gamma}{8}K_1\overline{V_0} \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{7.40}$$

Rüzgar Gölgesi kaynaklı flaplama denklemleri (7.41), (7.42) ve (7.43) şeklindedir.

$$\beta_0 = \frac{\gamma A}{2K} \tag{7.41}$$

$$\beta_{1c} = -\frac{1}{\Delta}\left\{\left(\frac{\gamma}{8}\right)K_1\overline{V_0}K(K-1)\right\} \tag{7.42}$$

$$\beta_{1s} = -\frac{1}{\Delta}\left\{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 K_1\overline{V_0}K\right\} \tag{7.43}$$

8 TEMSİLİ BİR TÜRBİN PALASININ FLAPLAMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

8.1 Problemin Çözümü

Bu bölümde temsili bir rüzgar türbin palasında oluşan flaplama davranışı incelenecektir. Hesaplamalar için palanın geometrik ve yapısal özellikleri, Lee, D., Hodges, D.H. ve Patil, M.J.' in, 'Multi-flexible-body Dynamic Analysis Of Horizontal Axis Wind Turbines'(2002), adlı makalesinde kullandıkları 8.4 metrelik pala ile aynıdır.[19] Geometrik parametreler sadeleştirilmiş ve palanın katılığı sabit kabul edilmiştir ve seçilmesi gereken değerler ise palanın karekterine uygun optimum değerler olarak seçilmiştir.

İlk adım palanın dönen ve durgun haldeki frekansını bulmaktır.

Dönme frekansı denklemi,

$$\omega_R^2 = \omega_{NR}^2 + K_1\Omega^2 \qquad \textbf{(8.1)}$$

ω_R =dönme frekansı

ω_{NR} =durgun hal frekansı

$K_1 = [K_{01} + \overline{K_{11}}\bar{e}]$, ve K_{01}=Southwell katsayısı K_{11}=ofset düzeltme faktörü

$\bar{e}$=farzedilen etkin mafsal kaydırması

Ω=açısal hız

Dönme frekans denklemi,

$$\omega_R^2 = a_1^2\left[\frac{EI_0}{m_0L^4}\right] + [K_{01} + \overline{K_{11}}\bar{e}]\Omega^2 \qquad \textbf{(8.2)}$$

Dönme frekansını hesaplayabilmek için $\frac{EI_t}{EI_0}$ ve $\frac{M_t}{M_0}$değerlerinin seçilmesi gerekmektedir.

$$\frac{EI_t}{EI_0} = \text{Uç noktanın eğilme katılığının kök noktaya oranı} \cong 1\ (\text{seçilen})$$

$$\frac{M_t}{M_0} = \text{Uç noktanın kütlesinin kök noktaya oranı} \cong 1\ (\text{seçilen})$$

a_n eğilme frekansı katsayısıdır ve Robert Yntema tarafından hazırlanan 'Rapid Estimation Of Bending Frequencies Of Rotating Beams (1954)' adlı eserde verilen grafikler baz alınarak seçilmiştir. [20]

a_1 seçimi için Ek A.1 deki grafik kullanılır ve

$\frac{EI_t}{EI_0} \cong 0$ ve $\frac{M_t}{M_0} \cong 1$ için a_1=11 seçilir.

K_{01} seçimi için Ek A.2 deki grafik kullanılır ve

$\frac{EI_t}{EI_0} \cong 0$ ve $\frac{M_t}{M_0} \cong 1$ için K_{01}=6.1 seçilir.

$\overline{K_{11}}$ seçimi için Ek A.3 deki grafik kullanılır ve

$\frac{EI_t}{EI_0} \cong 0$ ve $\frac{M_t}{M_0} \cong 1$ için $\overline{K_{11}}$=8.2 seçilir.

Dönme frekansını bulmak için gerekli veriler aşagıdaki gibidir;

$EI_0 = 1.0\times10^5 Nm^2$

$M_0 = 17.070$ kg

$L = 8.42$ m

$a_1 =$ Birinci mod eğilme katsayısı $= 11$

$K_{01} =$ Southwell katsayısı $= 6.1$

$\overline{K_{11}} =$ ofset düzeltme faktörü $= 8.2$

$\bar{e} =$ farzedilen etkin mafsal kaydırması $= 0.25$

$\Omega = 6.02$ rad/sn

$$\omega_R^2 = a_1^2\left[\frac{EI_0}{m_0L^4}\right] + [K_{01} + \overline{K_{11}}\bar{e}]\Omega^2 \qquad \textbf{(8.2)}$$

$\omega_R = 2.7771 \frac{devir}{sn}$ bulunur.

Palanın durgun haldeki frekansı ise

$$\omega_{NR}^2 = a_1^2\left[\frac{EI_0}{m_0L^4}\right] \qquad \textbf{(8.3)}$$

(8.3) denklemi ile bulunur ve dönme frekans denkleminin ilk terimidir.

Buradan,

$\omega_{NR} = 0.4727 \frac{devir}{sn}$ bulunur.

Boyutsuz flaplama frekansı olan p terimi tam mafsallı palalarda 1 değerini, çok ağır ve katı palalarda ise 3 üstü değerler alır.

$$p = \frac{\omega_R}{\Omega} = 2.89 \qquad \textbf{(8.4)}$$

Pala üzerinde oluşan dinamik yüklerin bir kısmı aerodinamik kuvvetlerin oluşturduğu yüklerden oluşur.Palaları karşılaştırma ve sınıflandırmada Lock numarasına dikkat edilir. Lock numarası aerodinamik kuvvetlerin atalet kuvvetlerine oranıdır.

$$\gamma = \text{Lock numarası} = \frac{\rho C_{l\alpha} c R^4}{I_b} \tag{8.5}$$

Palanın değerleri aşağıdaki gibidir.

$C_{l\alpha} = 2\pi$

$c = 0.2526\ \text{m}$

$\rho = 1.275\ \text{kg/m}^3$

$R = L = 8.42\ \text{m}$

$\gamma = \text{Lock numarası} = 13.62$ olarak bulunur.

Dönme koşullarının seçilmesi için öncelikli olarak bazı bilgilerin seçilmesi gerekmektedir ve 8.42 pala boyu baz alınarak yüksek katılıklı bir pala için uç hız oranı 7 olarak seçilmiş buna göre diğer bilgiler ise şu şekilde seçilmiştir.

$\text{UHO} = \text{uç hız oranı} = 7.0$

$\Omega = 6.02 \frac{\text{rad}}{\text{sn}}$

$V_0 = \text{serbest akım hızı} = \frac{\Omega R}{\text{UHO}} = 7.24 \frac{\text{m}}{\text{sn}}$

İndüklenmiş hızı v_i bulmak için

$$a = \frac{V_0 - v_i}{V_0} \tag{8.6}$$

(8.6) denklemi kullanılır ve denklemdeki indüklenmiş hız değeri için a eksenel interferans katsayısı optimum bir pala olarak düşünülerek 0,33 alınmıştır. Buna göre indükleme hızı

$$a = 0{,}33 \tag{8.7}$$

$$0{,}33 = \frac{V_0 - v_i}{V_0} \tag{8.8}$$

$v_i = 4{,}8516 \frac{\text{m}}{\text{sn}}$ bulunur.

A, aksisimetrik akış terimini bulmak için

$$A = \frac{1}{3}[\overline{V_0} - \lambda_i] + \frac{\theta_p}{4} \tag{8.9}$$

(8.9) denklemini kullanırız, bunun için aşağıdaki değişkenlere ihtiyacımız vardır ve bunların açılımı şu şekildedir.

$\lambda = \text{boyutsuz akış katsayısı} = \frac{1}{\Omega R}(V_0 - v_i)$

$\overline{V_0} = \text{boyutsuz serbest akım} = \frac{V_0}{\Omega R}$

$\lambda_i = \text{boyutsuz indükleme hızı} = \frac{v_i}{\Omega R}$

$\theta_p = \text{pala elemanı yunuslama açısı} = 0°$

Yunuslama açısı değiştirilerek sonuçların değişimi ileride gözlemlenecektir.

A=0.01557 bulunur.

A_3 ise diğer bir aksisimetrik akış terimidir.

$$A_3 = \frac{\lambda}{2} + \frac{2}{3}\theta_p \qquad \textbf{(8.10)}$$

A_3=1.6711 bulunur.

Pala dinamiği denklemlerinde kullanacağımız kısaltmalar ve hesaplanan değerleri şunlardır.

$K = p^2$ =8.3932

$B = \text{yerçekimi terimi} = \frac{gM_b x_g R}{2I_b \Omega^2}$ =0.02411

U_0=çapraz rüzgar hızı=0 m/sn

Çapraz rüzgar hızı değiştirilerek sonuçların değişimi ileride gözlemlenecektir.

$\overline{U_0} = \frac{U_0}{\Omega R} = 0$ bu durum için.

q=yaw oranı=0 rad/sn

Yaw oranı değiştirilerek sonuçların değişimi ileride gözlemlenecektir

$\bar{q} = \frac{q}{\Omega}$ =0 bu durum için.

$\Delta = K\left[(K-1)^2 + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\right]$=483.1014

Dinamik çözüm için verilen harmonik seri

$$\beta = \beta_0 + \beta_{1c}\cos\psi + \beta_{1s}\sin\psi \qquad \textbf{(8.11)}$$

β_0 değeri hariç β_{1c}ve β_{1s} değerleri rüzgarın yönünden etkilenen terimler barındırmaktadırlar, o terimlerin denkleme etki edeceği durumlar ileride gözlemlenecektir.

$$\beta_0 = \frac{\gamma A}{2} \qquad \textbf{(8.12)}$$

$\beta_0 = 3.0368^{\circ}$bulunur.

$$\beta_{1c} = -\frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\gamma BA(K-1)}_{\text{yerçekimi}}\right\} + \frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)\frac{4}{3}A\overline{U_0} - \frac{\gamma A_3}{2}K(K-1)\overline{U_0}}_{\text{çapraz rüzgar}}\right\}$$

$$-\frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{2\bar{q}K(K-1) + \frac{\gamma A_3}{2}K(K-1)\bar{q}\bar{l} - K\bar{q}\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2}_{\text{yaw oranı}}\right\} \qquad \textbf{(8.13)}$$

$$-\frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\frac{\gamma}{2}\left(\frac{K_1\overline{V_0}}{4}\right)K(K-1)}_{\text{rüzgar gölgesi}}\right\}$$

$\beta_{1c} = -0.2261^{\circ}$ bulunur.

$$\beta_{1s} = -\frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\frac{\gamma^2}{8}BA}_{yerçekimi}\right\} - \frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2\frac{16}{3}A(K-1)\overline{U_0} + \left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 4A_3K\overline{U_0}}_{çapraz\ rüzgar}\right\}$$

$$-\frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 4A_3K\bar{q}\bar{l} + \frac{\gamma}{8}\bar{q}K(K-1) + 2\bar{q}K\left(\frac{\gamma}{8}\right)}_{yaw\ oranı}\right\} \qquad \textbf{(8.14)}$$

$$-\frac{1}{\Delta}\left\{\underbrace{\left(\frac{\gamma}{8}\right)^2 K_1\overline{V_0}K}_{rüzgar\ gölgesi}\right\}$$

$\beta_{1s} = -0.0520^{\circ}$ bulunur.

Flaplama momentini bulmak için $\frac{d\beta}{d\psi}$ flaplama hızına ve A_4 ihtiyacımız vardır.

$$\frac{d\beta}{d\psi} = -\beta_{1c}\sin\psi + \beta_{1s}\cos\psi \qquad \textbf{(8.15)}$$

$$A_4 = \frac{2}{3}\lambda + \frac{\theta_p}{4} \qquad \textbf{(8.16)}$$

A_4=2.2281 bulunur.

Flaplamaya bağlı eğilme momenti denklemi (8.17)'dir. ψ azimut açısıdır.

$$M_{\acute{\beta}} = I_b\Omega^2\frac{d\beta}{d\psi}\left\{\underbrace{2\beta}_{1} - \underbrace{\frac{\gamma}{2}A_4}_{2}\right.$$

$$\left. + \underbrace{\frac{\gamma}{2}\cos\psi\left[\frac{K_1\overline{V_0}}{2} + \frac{\theta_p}{3}\left(\overline{U_0} + \bar{q}\bar{l}\right)\right] + \frac{\gamma}{2}\sin\left[\frac{\bar{q}}{2} + \frac{2}{3}\beta\overline{U_0}\right]}_{3}\right\} \qquad \textbf{(8.17)}$$

Denklem (8.17)'de 1 ile gösterilen kısım flaplama kaynaklı lead-lag atalet momentini, 2 ile gösterilen kısım aerodinamik sönümlemeyi gösterir. Nezaman bir flaplama titreşimi oluşsa 1 ve 2 terimlerinin etkisiyle lead-lad titreşimide oluşur. Denklemde 3 ile gösterilen kısım ise asimetrik birbirini dengeleyen yaw oranı ve çapraz rüzgar etkisidir.

Palanın bir tam dönüşü için moment denklemi 0-360 derece arası her seferinde birer derece arttırılarak hesaplanmış ve oluşan eğilme momentleri bölüm 8.2'deki sonuçlarda grafiklerle gösterilmiştir.

8.2 Sonuçlar

Grafiklerde 4 farklı değişken,

Ω= açısal hız

Qp=yunuslama açısı

q=yaw oranı

U=çapraz rüzgar hızını temsil etmektedir.

Oluşan grafiklerde,

1=flaplama kaynaklı lead-lag atalet momentini

2=aerodinamik sömümleme

3=yaw oranı ve çapraz rüzgarın etkisini belirtmektedir.

8.2.1 Açısal Hız Değişimiyle Değişim

Açısal hız arttıkça oluşan eğilme momentinin şiddeti artmaktadır. Şekil 8.1'de Ω hızı 1 rad/ sn neredeyse durmaya yakınken eğilme momentleri 0-1.5 kN değerleri arasında seyretmekte, şekil 8.2'de açısal hız 6.02 rad/sn'ye çıkınca değerler 0-100 kN arasında olmuştur. Şekil 8.3'de ise eğilme momentlerinin dahada artmakta olduğunu gözlemlemekteyiz.

8.2.2 Yunuslama Açısı Değişimiyle Değişim

Yunuslama açısı arttırıldıkça, aerodinamik sönümleme azalmakta, eğilme momenti artmakta, flaplamaya bağlı lead-lag momenti artmakta ve toplam momente yaklaşmaktadır. Şekil 8.4'de yunuslama açısı sıfır derecedir ve eğilme momentleri 0-100 kN arasında değişmektedir. Şekil 8.5'de yunuslama açısı bir derece olduğunda flaplamaya bağlı lead-lag momentlerinin artmasıyla beraber toplam momentlerde

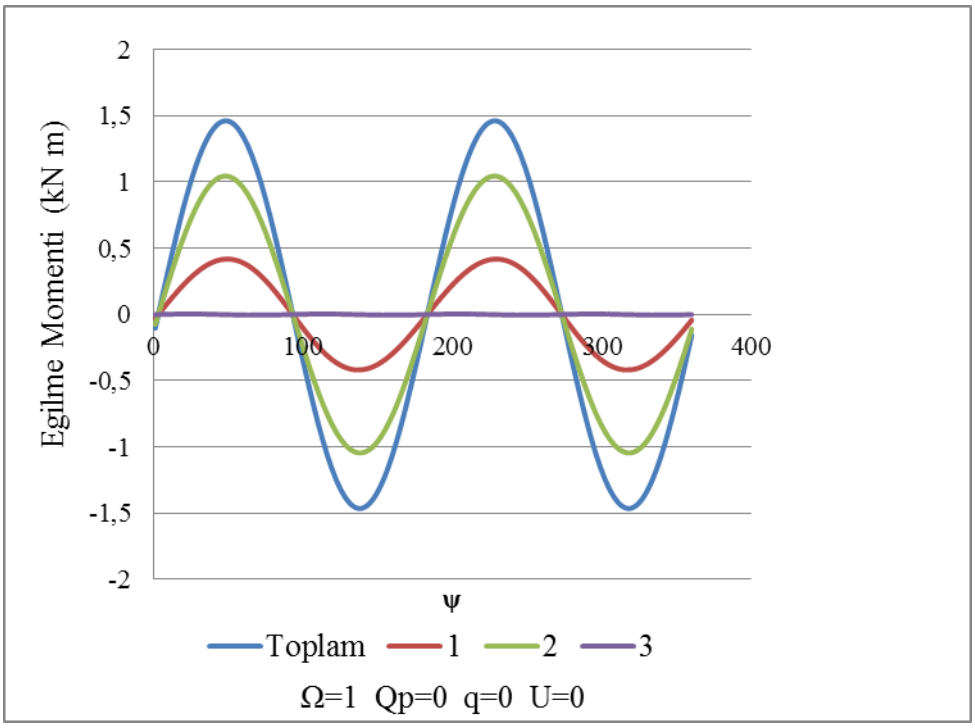
artmakta fakat aerodinamik sönümleme momentleri aynı kalmaktadır. Şekil 8.6 ve 8.7'de açı daha da arttırılarak şekil 8.5'deki durum daha geniş maksatlı gösterilmiştir.

8.2.3 Yaw Oranı Değişimiyle Değişim

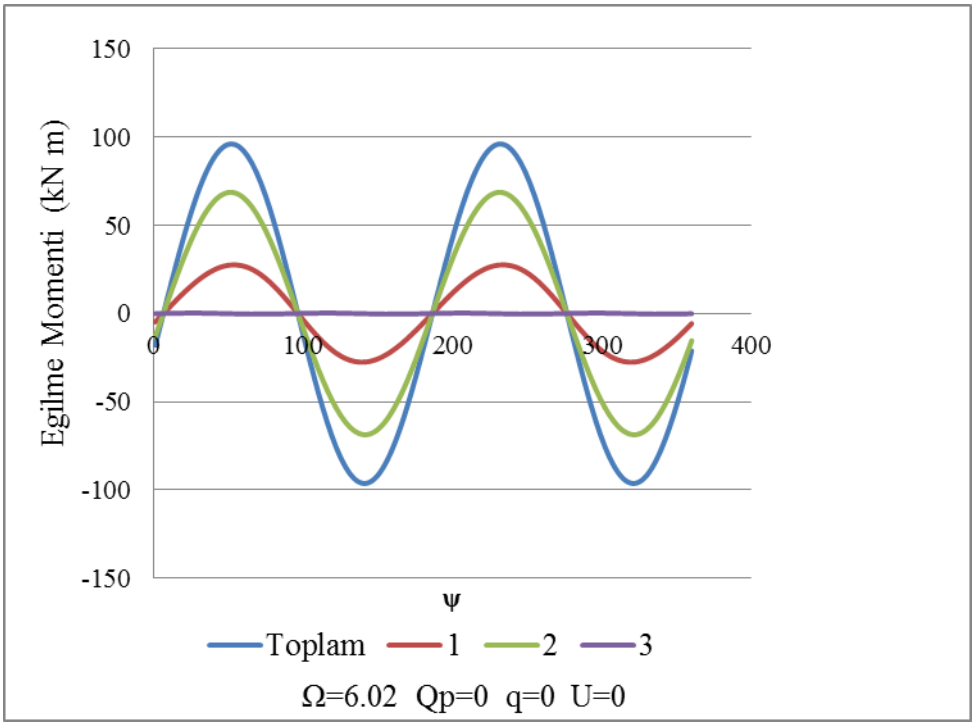
Yaw oranı arttıkça, yaw ve çapraz rüzgara bağlı oluşan moment artmakta ve flaplamaya bağlı lead-lag momentine yaklaşmaktadır. Toplam momentlerde de artış görülmektedir. Şekil 8.8'de yaw oranı sıfır derece iken normal eğilme momenti değerleri gözlenmektedir. Şekil 8.9'da yaw oranı 4 dereceye getirildiğinde 3 numaralı yaw oranı ve çapraz rüzgara bağlı eğilme momenti değerleri yükselmiş ve şekil 8.10 ve 8.11'de yaw oranının dahada arttırılmasıyla bu değerler toplam momentlerle beraber artış göstermiştir.

8.2.4 Çapraz Rüzgar Hızı Değişimiyle Değişim

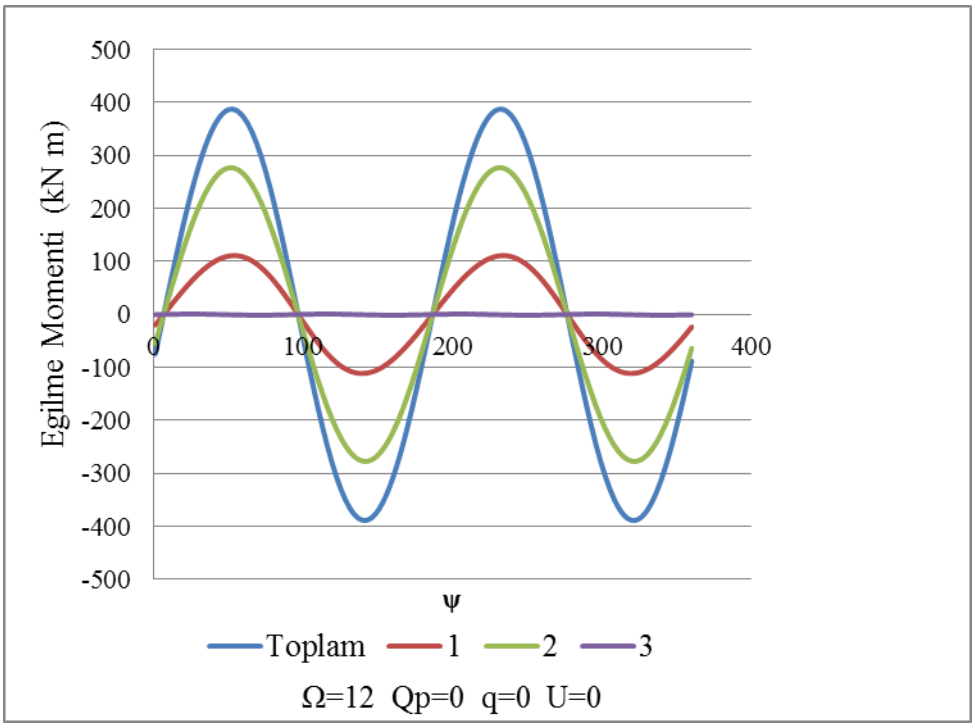
Çapraz rüzgar hızının artması öncelikle, 3 numaralı çizgiyle gösterilen yaw ve çapraz rüzgara bağlı momenti arttırır ve flaplamaya bağlı lead-lag momenti eğrisine yaklaştırır bu süreçte şekil 8.12, 8.13 ve 8.14'de görüldüğü gibi toplam momentlerde artış göstermiştir. Çapraz rüzgar hızı arttırılmaya devam ederse şekil 8.15'de görüldüğü gibi sistemde titreşimler oluşmaya başlar. Şekil 8.16 ve 8.17'de çapraz rüzgar hızının iyice arttırılmasıyla sistem tamamiyle titreşmeye başlamıştır. Fakat şekil 8.18'de görüldüğü gibi aynı çapraz rüzgar hızında dönüş hızı arttırılırsa sistem rahatlamakta ve şekil 8.19'daki gibi dönüş hızı çok hızlı hale getirildiğinde çapraz rüzgardan etkileşim tekrar normale dönmüştür tabiki bu durumda moment değerleri normalin çok üzerinde seyretmektedir.



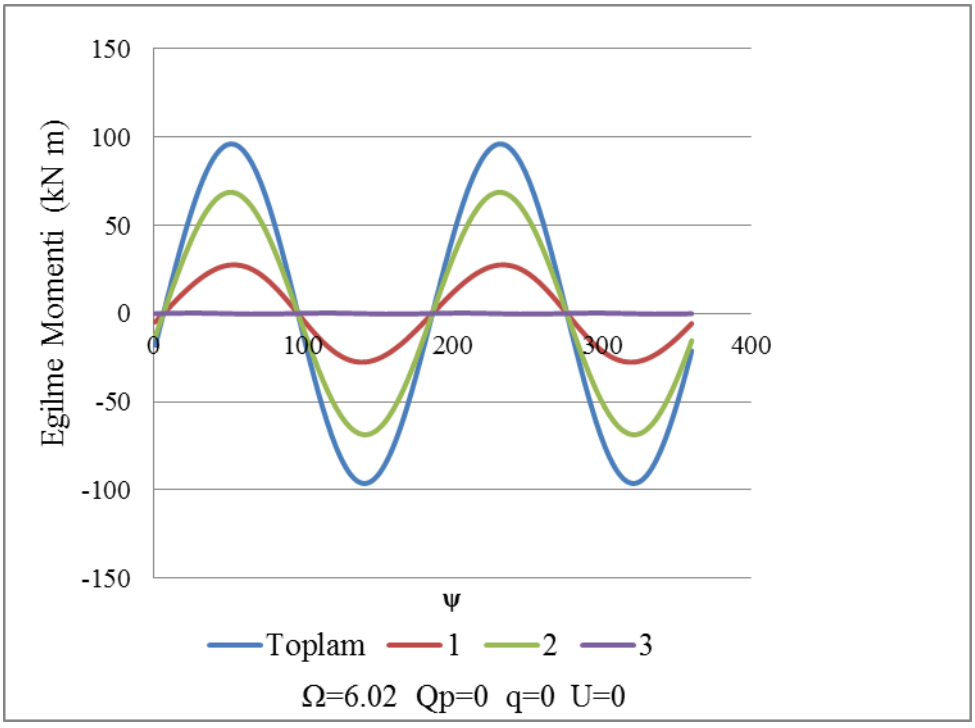
Şekil 8.1 : Ω=1 için eğilme momenti değerleri.



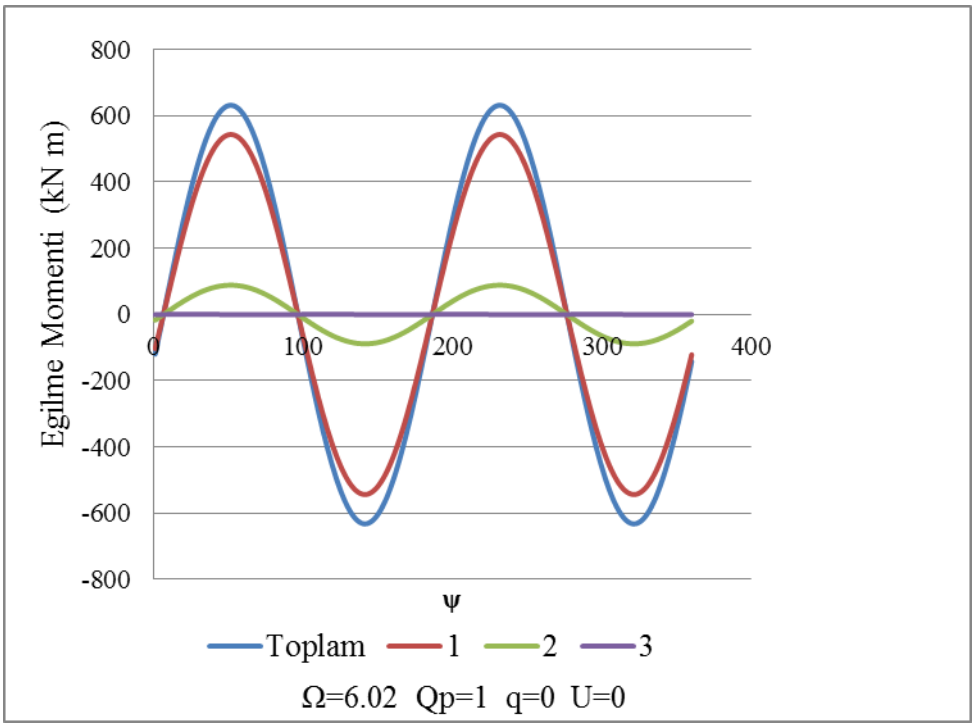
Şekil 8.2 : Ω=6.02 için eğilme momenti değerleri.



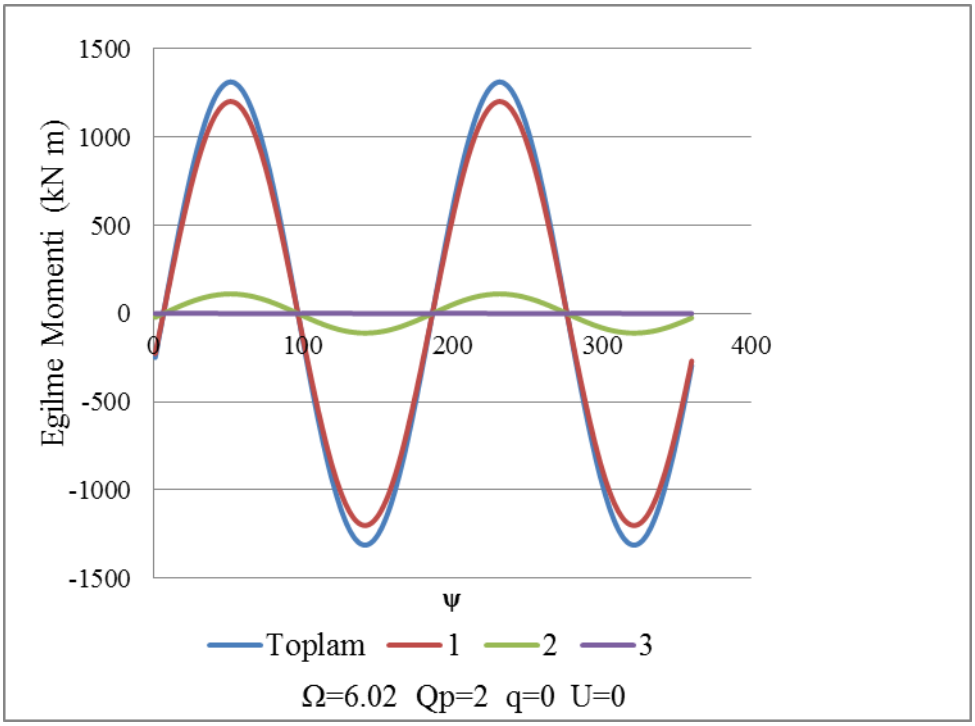
Şekil 8.3 : Ω=12 için eğilme momenti değerleri.



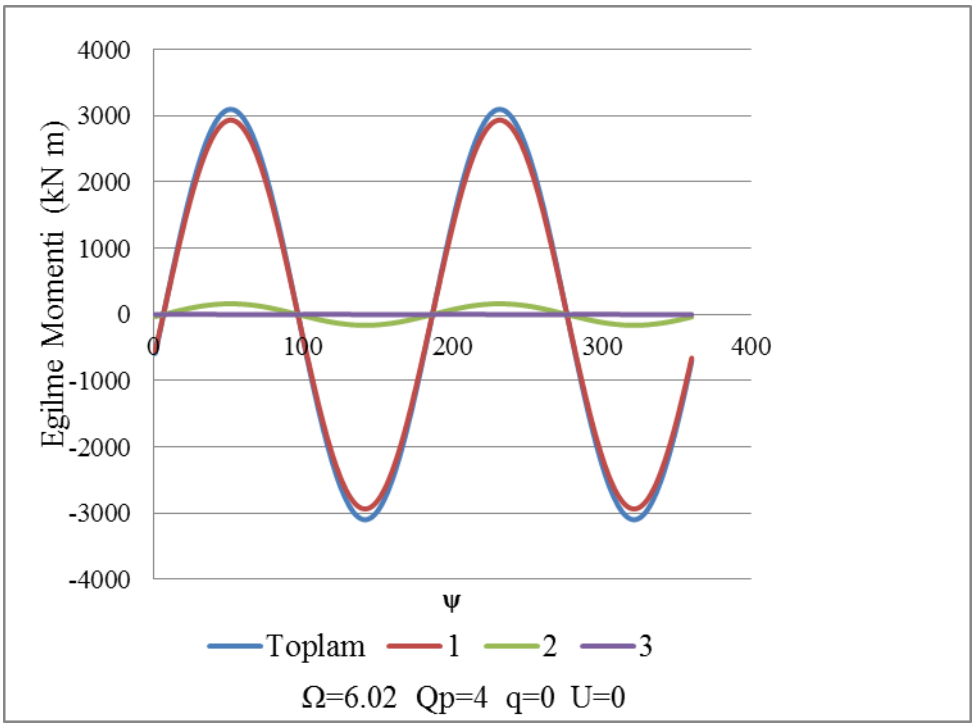
Şekil 8.4 : Qp=0 için eğilme momenti değerleri.



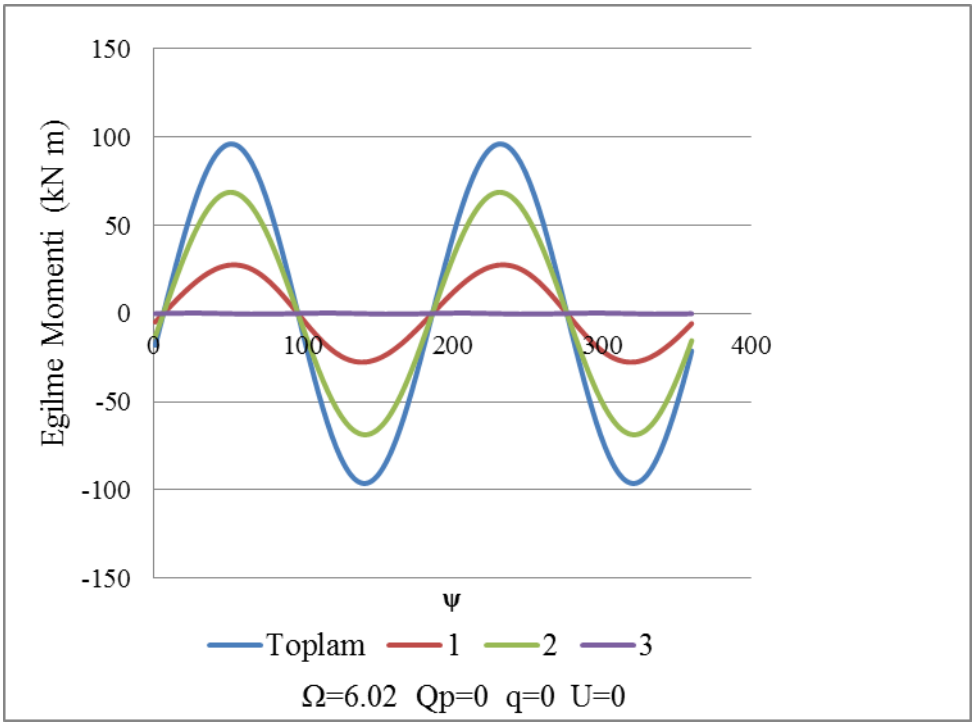
Şekil 8.5 : Qp=1 için eğilme momenti değerleri.



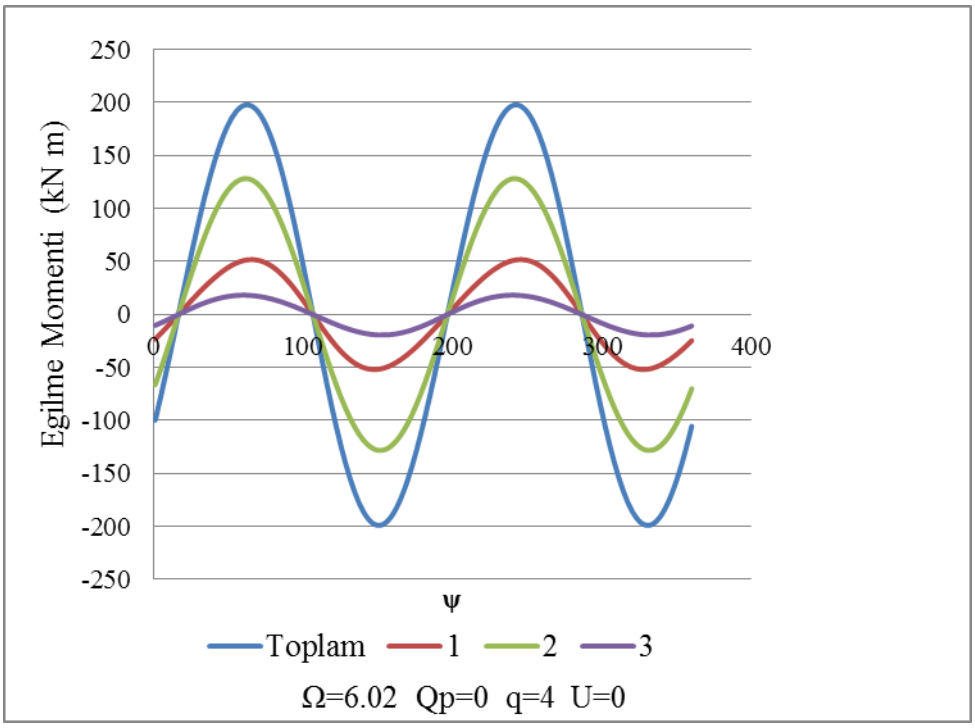
Şekil 8.6 : Qp=2 için eğilme momenti değerleri.



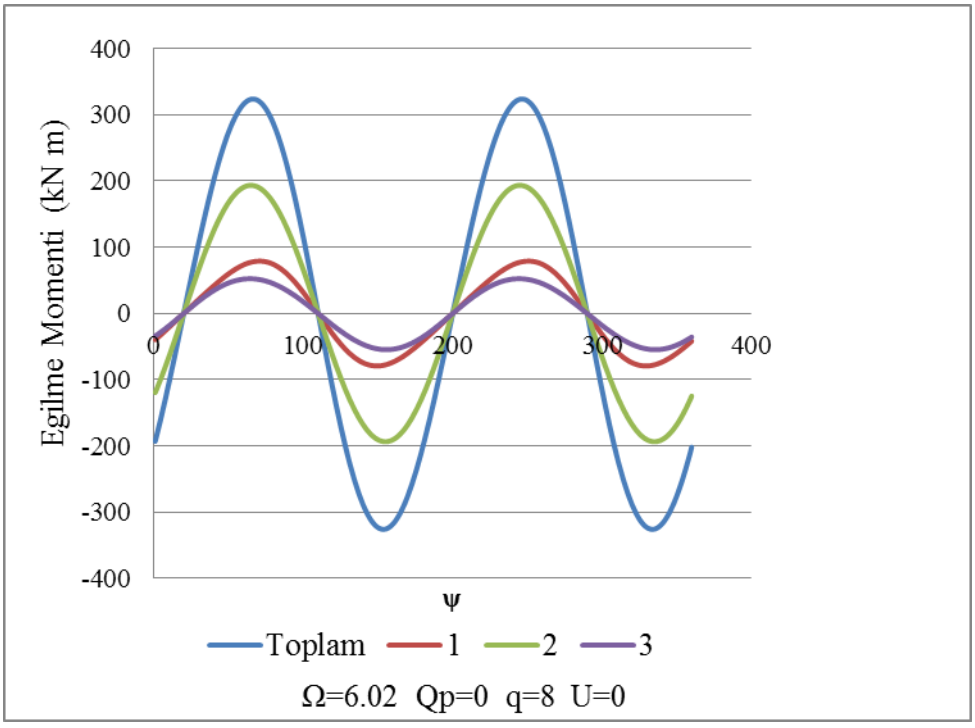
Şekil 8.7 : Qp=4 için eğilme momenti değerleri.



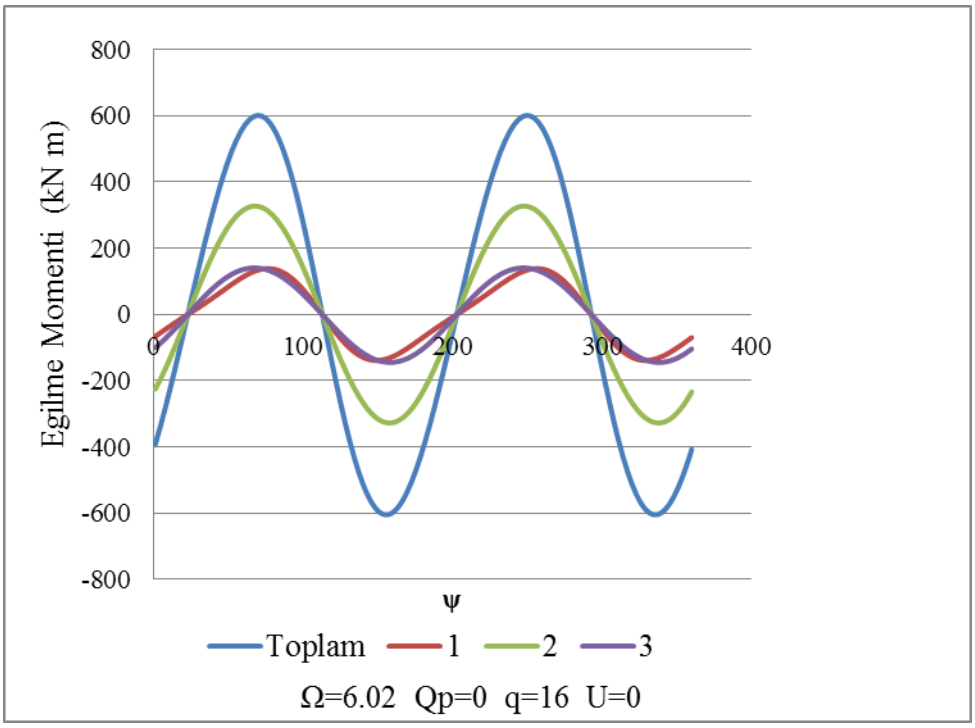
Şekil 8.8 : q=0 için eğilme momenti değerleri.



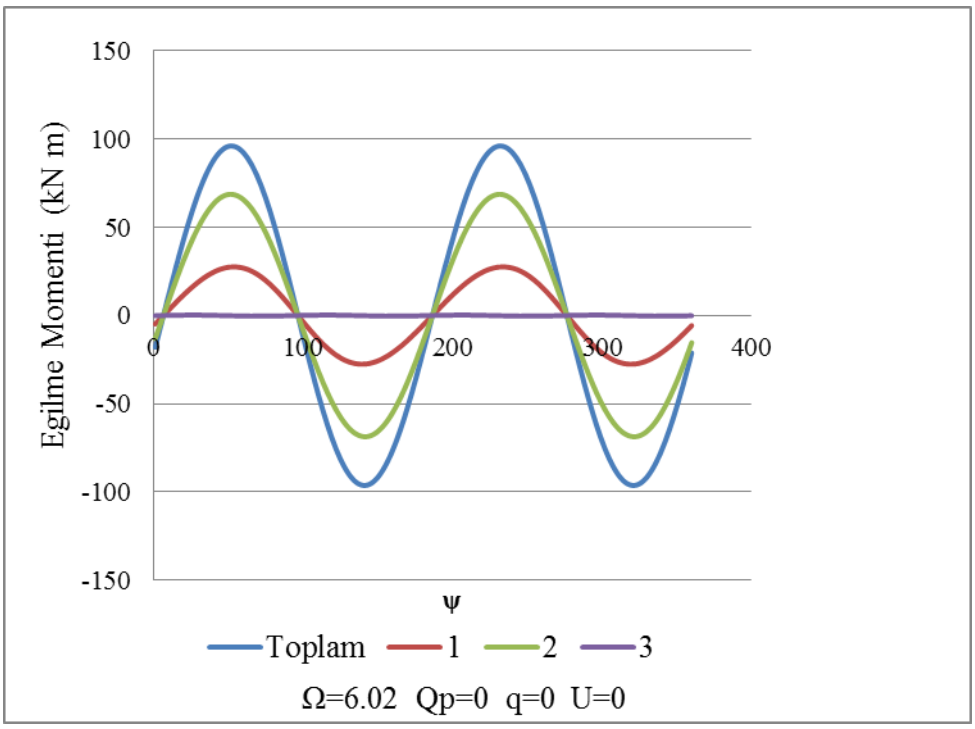
Şekil 8.9 : q=4 için eğilme momenti değerleri.



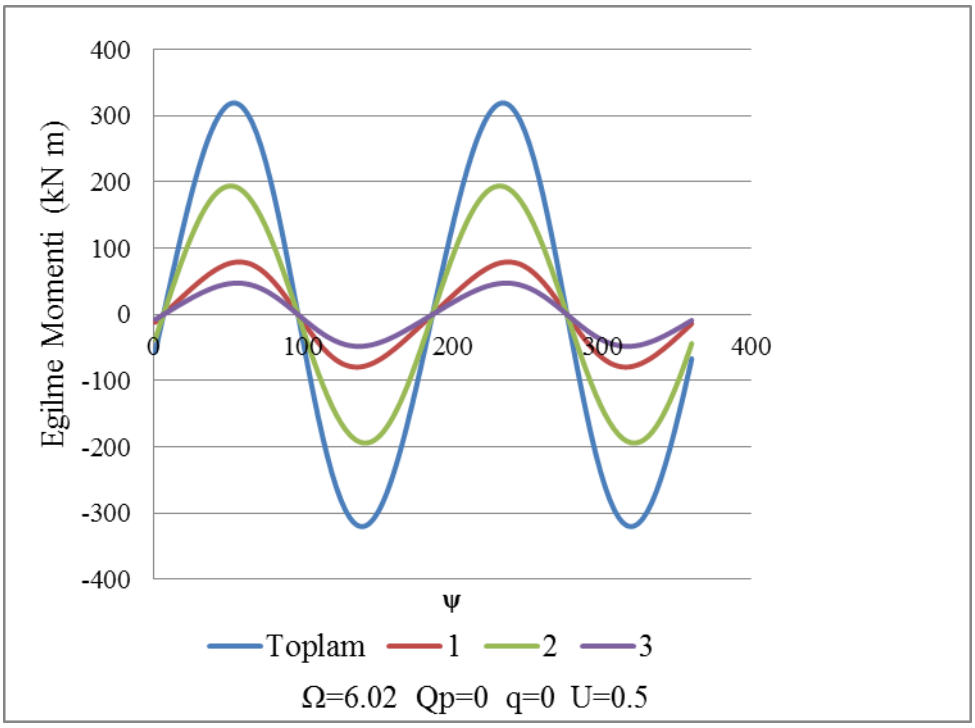
Şekil 8.10 : q=8 için eğilme momenti değerleri.



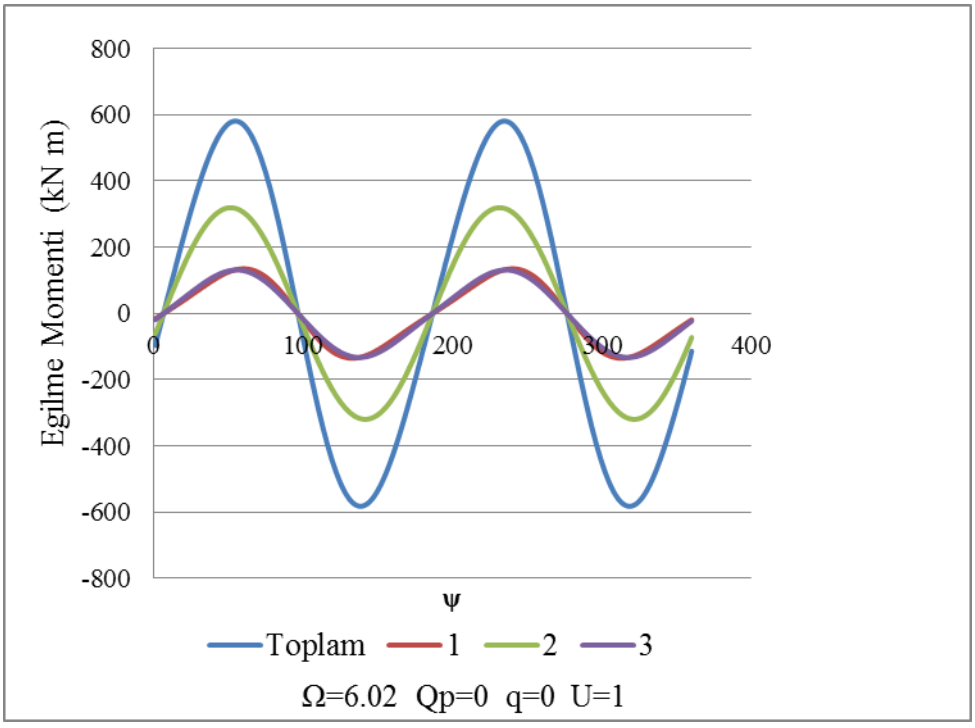
Şekil 8.11 : q=16 için eğilme momenti değerleri.



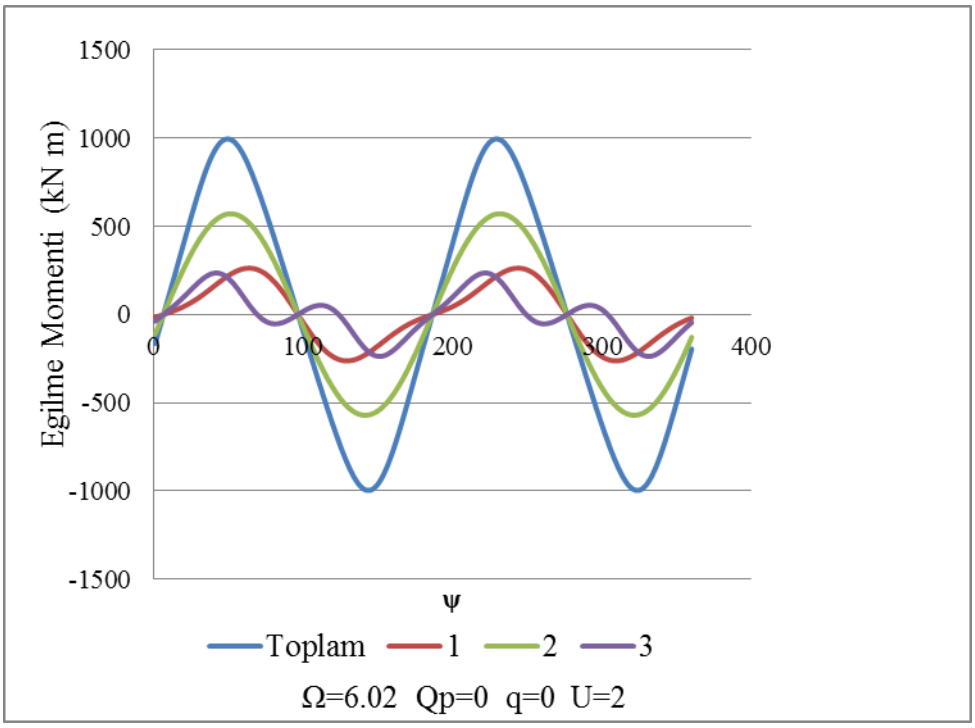
Şekil 8.12 : U=0 için eğilme momenti değerleri.



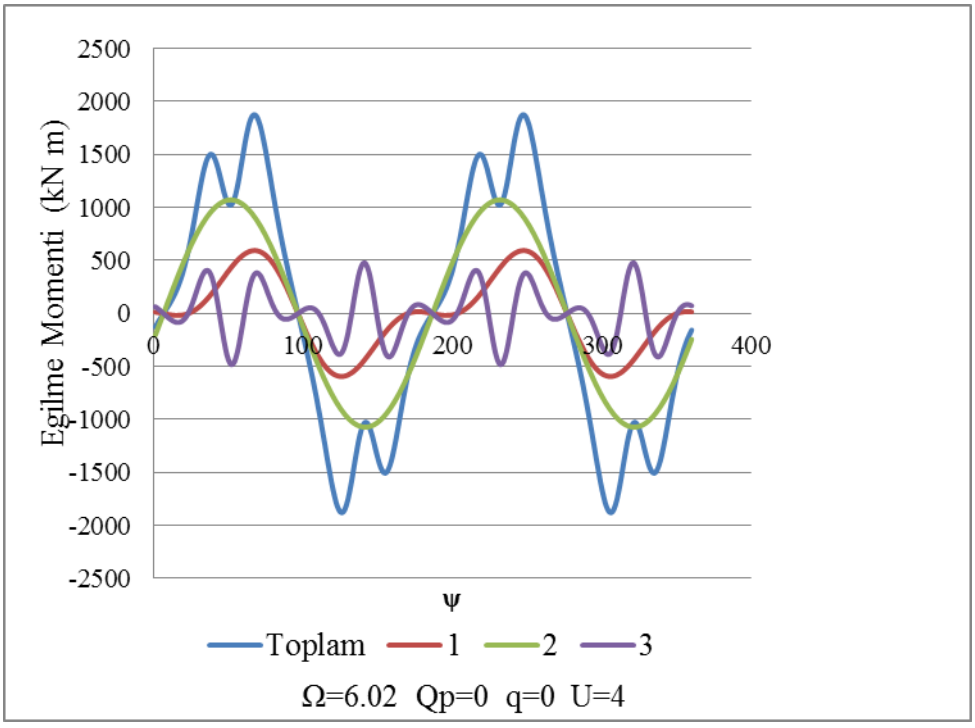
Şekil 8.13 : U=0.5 için eğilme momenti değerleri.



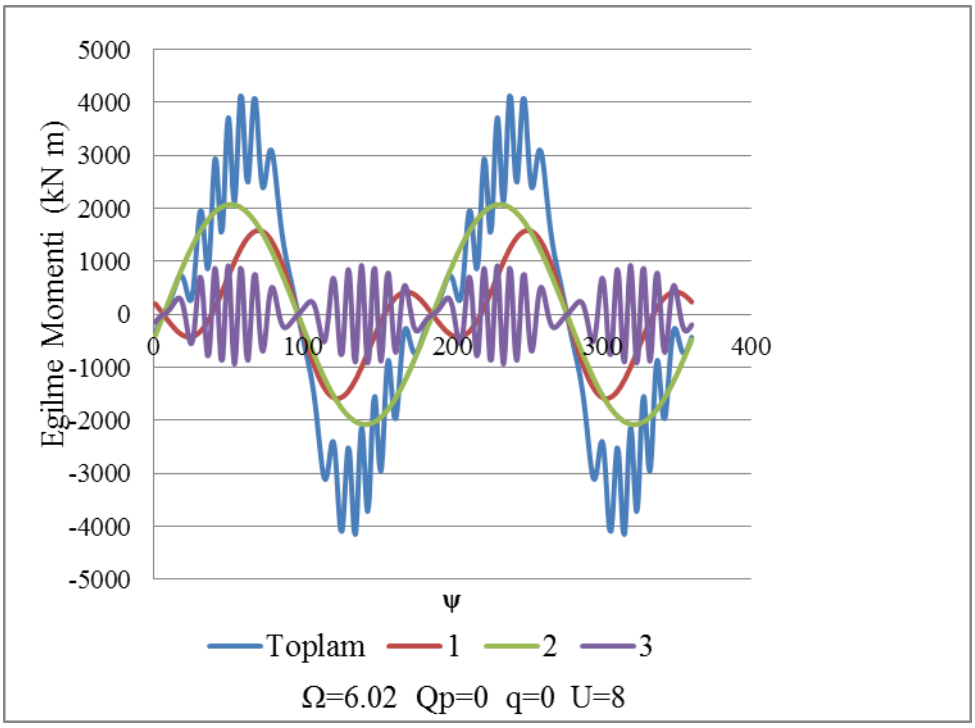
Şekil 8.14 : U=1 için eğilme momenti değerleri.



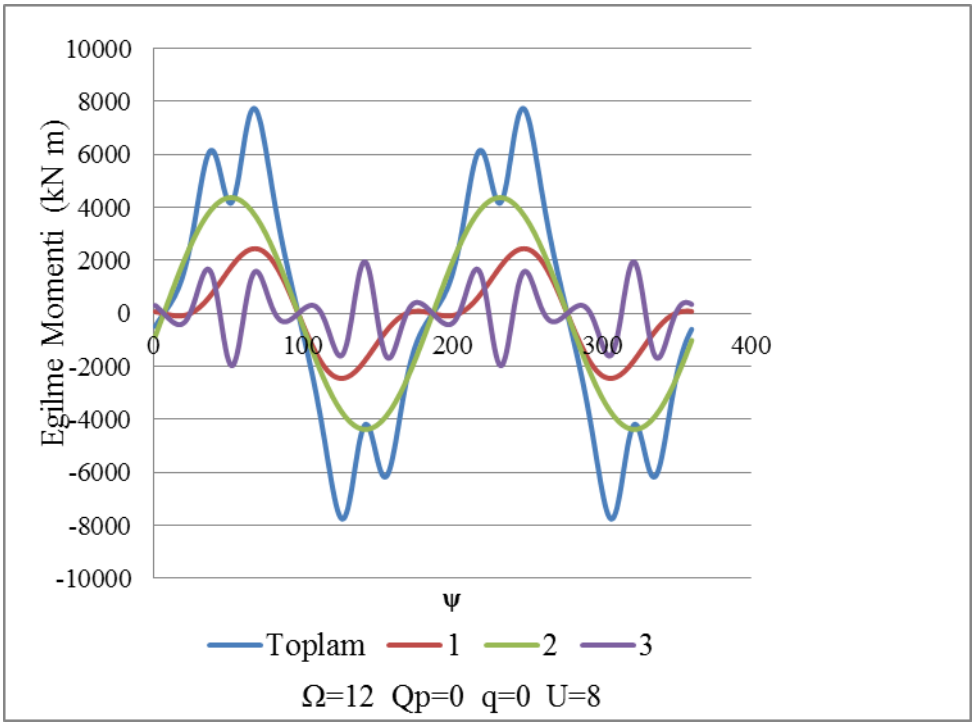
Şekil 8.15 : U=2 için eğilme momenti değerleri.



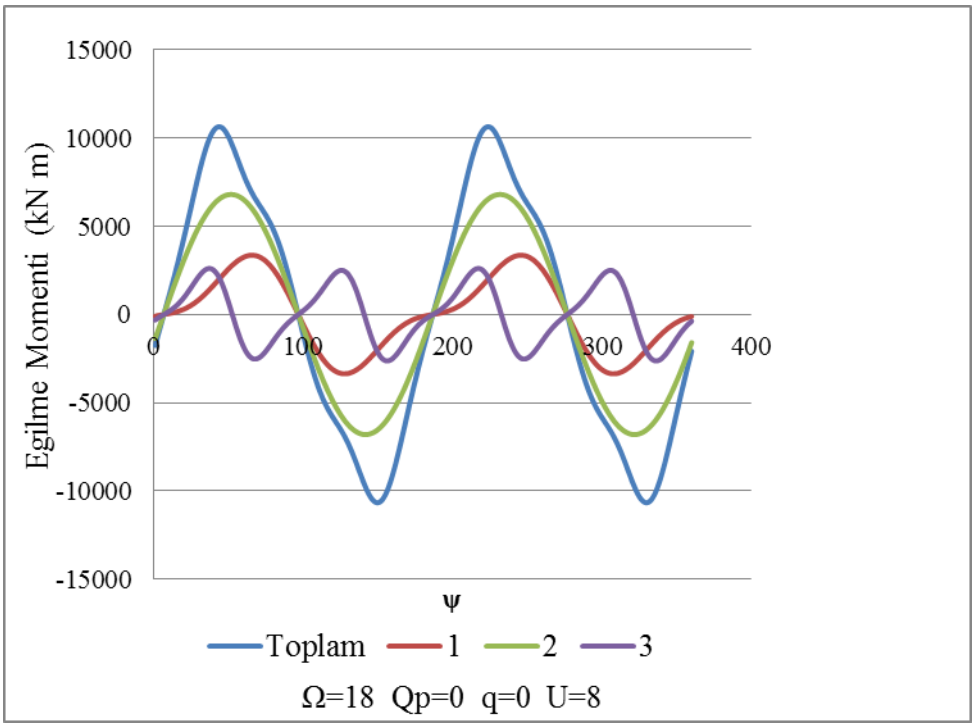
Şekil 8.16 : U=4 için eğilme momenti değerleri.



Şekil 8.17 : U=8 için eğilme momenti değerleri.



Şekil 8.18 : Ω=12 ve U=8 için eğilme momenti değerleri.



Şekil 8.19 : Ω=18 ve U=8 için eğilme momenti değerleri.

KAYNAKLAR

[1] **Çakır, E., Kırmacı, G., Zeren, Y.E., Karadavut, İ.** (2010). Küçük Rüzgâr Türbini Tasarımı Ve Uygulaması, Bitirme Tasarım Projesi, Mayıs 2010, İTÜ

[2] **P. Gipe**, (1995). Wind Energy Comes of Age, John Willey & Sons Inc, New York

[3] **Hau**, **E.,** (2006). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**,** Birkhäuser

[4] **Gelberi, H**.,ve diğerleri, (t.y.). Rüzgar Türbinlerinin Dağitim Şebekelerine Bağlanmasi Ve Dinamik Simülasyonu, Sakarya Üniversitesi, Sakarya

[5] **Nurbay, N., Çinar, A.**,(t.y.) Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

[6] **J.F. Manwell, J.G. McGowan , A.L. Rogers,** (2002). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**,** John Wiley & Sons Ltd, Indianapolis.

[7] **T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi**, (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd, Indianapolis.

[8] **H.Petersen**,1998.Comparison Of Wind Turbines Based On Power Curve Analysis, Helge Petersen Consult, Darup Associates Ltd. , Copenhagen.

[9] **Yilmaz, S., Şahin, A.D**.,(2008), Rüzgar Enerjisinde Ekserji Incelemesi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES'2008, İTÜ

[10] **Kaymak, M. K**.,(2007). Hibrit Sistemler, Lisans Tezi, Şubat 2007, İTÜ

[11] **B. Fleck, M. Huot**, (2009). Comparative Life-Cycle Assessment Of A Small Wind Turbine For Residential Off-Grid Use, The University of Alberta, Edmonton.

[12] **Açık, O.**, (2010). Rüzgar Türbini Kulelerinde Yapısal Titreşim Analizi, Yükseklisans Tezi, Mayıs 2010, İTÜ

[13] <http://turkey.windspot.es>, alındığı tarih: 08.12.2011

[14] <www.muhteva.com/ruzgar-enerjisi-t54674.html>, alındığı tarih: 08.12.2011

[15] **Yılmaz, S.,** (2008). Eğilme-Burulma Bağlaşımlı Rüzgar Türbini Pala Tasarımı, Yükseklisans Tezi, Haziran 2008, İTÜ

[16] < http://www.eie.gov.tr/>, alındığı tarih: 08.12.2011

[17] <http://sivilhavaci.blogspot.com>, alındığı tarih: 08.12.2011

[18] **Eggleston, D.M., Stoddart, F.S**., (1987). Wind Turbine Engineering Design, Van Nostrand Reinhold, New York

[19] **Lee, D., Hodges, D.H., Patil, M.J.,** (2002), Multi-flexible-body Dynamic Analysis Of Horizontal Axis Wind Turbines, Wind Energy Journal, 2002;5:281-300, August 2002

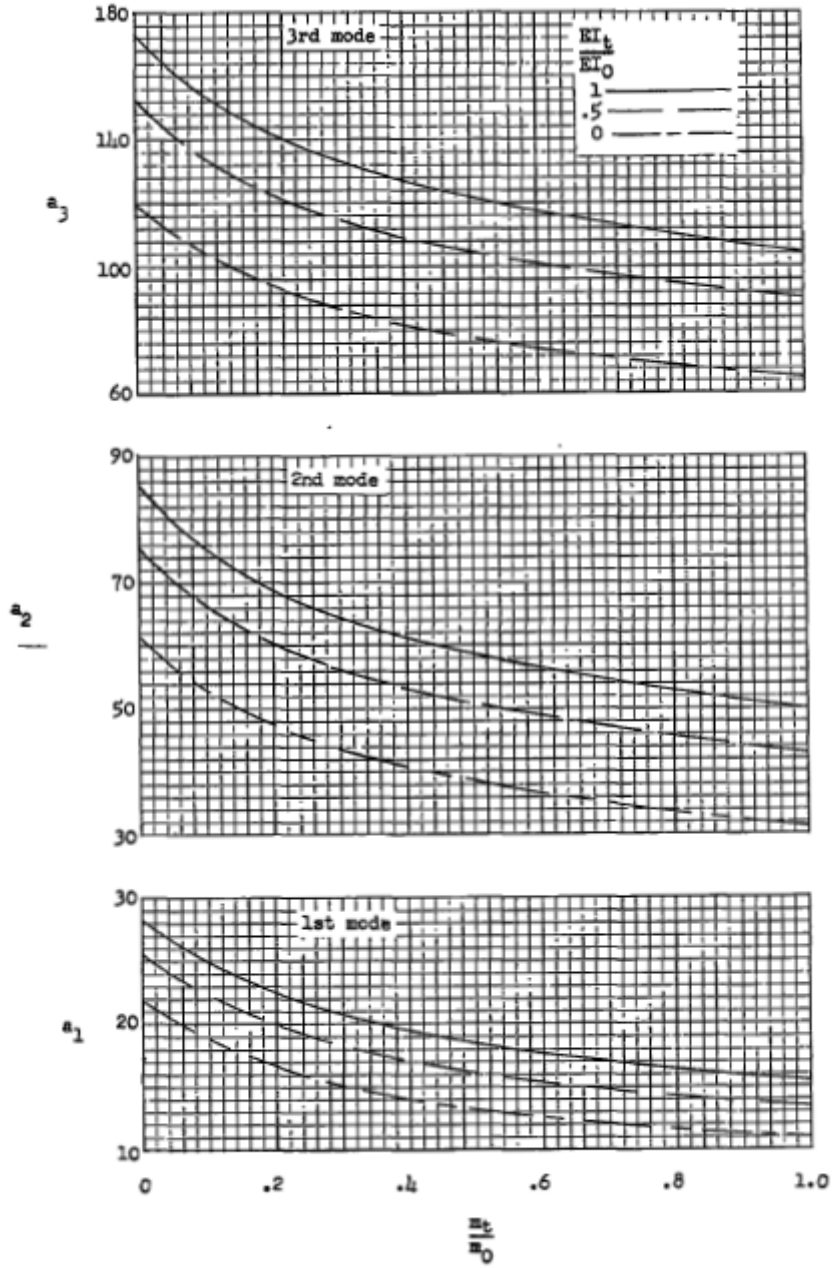
[20] **Yntema, R,.T.,** (1954). Rapid Estimation Of Bending Frequencies Of Rotating Beams, Research Momerandum, Washington

EKLER

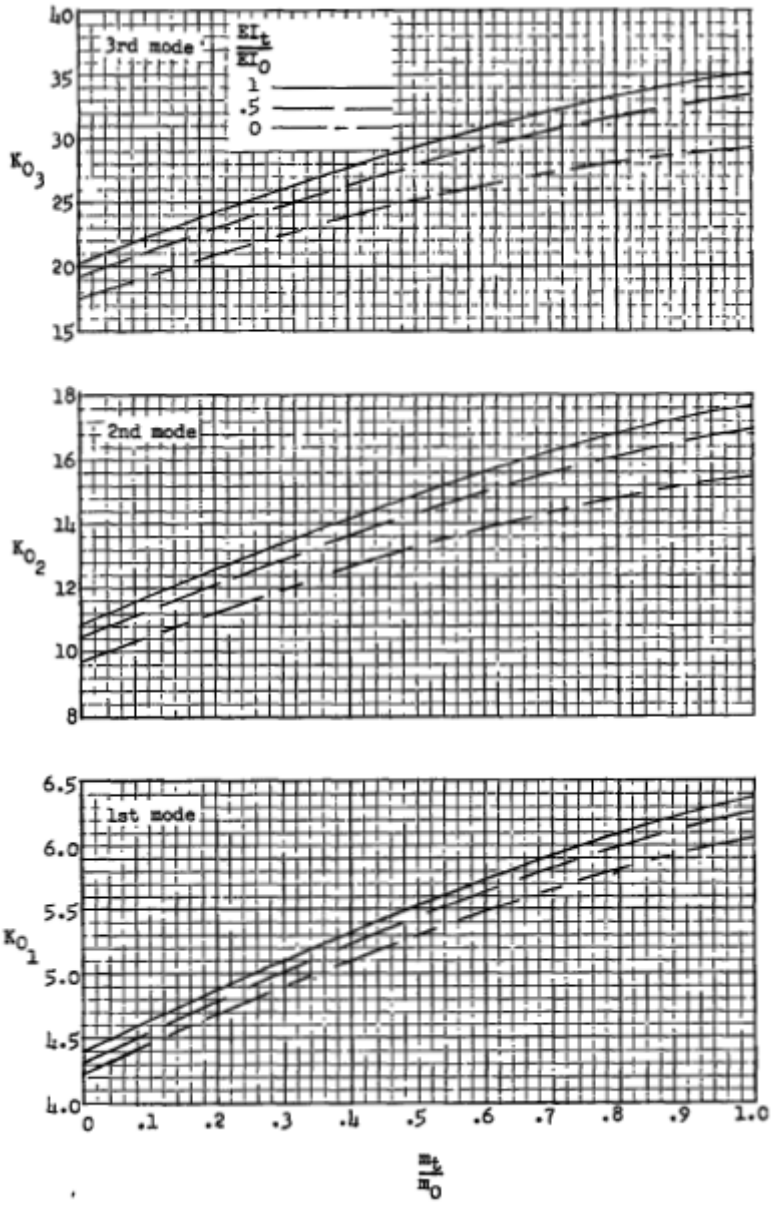
EKLER LİSTESİ

EK A.1 : Eğilme frekansı katsayıları a_n.[20]
EK A.2 : Zero-offset Southwell katsayıları K_{0n}.[20]
EK A.3 : K_{1n} Southwell katsayıları için offset düzeltme katsayıları.[20]

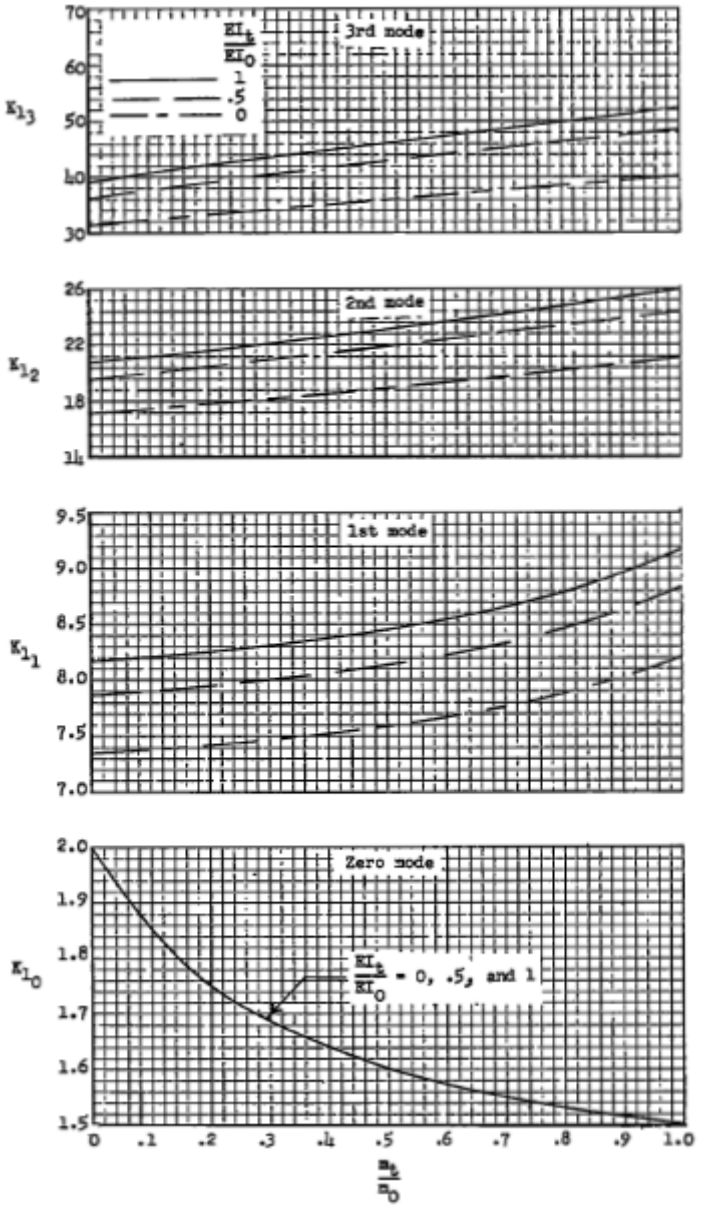
EK A.1 : Eğilme frekansı katsayıları a_n.[20]



EK A.2 : Zero-offset Southwell katsayıları K_{0n}.[20]



EK A.3 : K_{1n} Southwell katsayıları için offset düzeltme katsayıları.[20]



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Serap Baytok

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir 1983

Adres: Cihangir/İstanbul

E-Posta: serapbaytok@gmail.com

Lisans: İTÜ-Uzay Mühendisliği (2001-2007)

Yüksek Lisans : İTÜ-Uçak ve Uzay Mühendisliği (2009-2011)