

# Yatay Eksenli Yelkapan Palasında Tasarım Parametrelerinin Gerilme Dağılımına Etkisi

Ercüment ALYANAK

ENA Mühendislik Danışmanlık Enerji Makina ve Yelkapan San. Tic. Ltd. Şti.  
ODTÜ – KOSGEB Teknoloji Geliştirme Merkezi  
Oda No:206 ODTÜ Yerleşkesi 06531 ANKARA  
Tlf: (312) 210 13 00 / 206  
E-posta: [ena@ena.com.tr](mailto:ena@ena.com.tr)

## ÖZET

1998 yılında yapılan bu çalışmanın amacı yatay eksenli yelkapan palasında aerodinamik ve yapısal tasarım parametrelerinin gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaçla, aerodinamik tasarım parametreleri olarak pala sayısı, tasarım uç hız oranı, tasarım kaldırma katsayısı ve geometri tipi; yapısal tasarım parametreleri olarak da koniklik açısı, palanın et kalınlığı ve malzeme tipi incelenmiştir. Sonuçların birbiriyle karşılaştırılabilir olması için her rotor tasarımı, belli bir tasarım rüzgar hızında eşit miktarda güç üretecek biçimde boyutlandırılmıştır. Pala modellenirken, içi boş ve homojen et kalınlığına sahip bir yapı olarak kabul edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** *yelkapan, pala, gerilme analizi*

## ABSTRACT

The main purpose of the study is to investigate effects of both aerodynamic and structural design parameters on the stress distribution of horizontal axis wind turbine rotor blade. Blade number, design tip speed ratio, design lift coefficient, design wind speed and geometry type are considered as aerodynamic design parameters. Cone angle, shell thickness and material type are considered as structural design parameters. To compare each rotor configuration, all of them were dimensioned for same rated power at the design wind speed. All blades have NACA 23012 series airfoil section. The blades are considered as a hollow structure with uniform shell thickness.

**Key Words :** *wind turbine, blade, stress analysis*

## 1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemlerinin en önemli parçalarından biri olan pervane palası için aerodinamik tasarımın yanısıra mekanik tasarım da önemlidir. Sistemin düşük rüzgar hızlarında atalet etkisini yenerek kalkışını sağlayabilmek için olabildiğince hafif bir pala konstrüksiyonu kullanmak gerekir. Aynı zamanda bu pala yapısı, oluşabilecek aşırı rüzgar yüklerini de taşıyabilmelidir. Bu yüzden kullanılacak malzeme özelliklerinin yanısıra, pala üzerine etkiyecek kuvvetlerin ve buna bağlı olarak da gerilmelerin hesaplanması mekanik tasarım açısından belirleyici olacaktır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1 Problemin Tanımı

Yelkapan pervanesi aerodinamik kuvvetlerin etkisi altında dönerken palalar değişik gerilmelere maruz kalır. Bu çalışmada aerodinamik kuvvetler ile dönme hareketinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin etkisi altında, pervane palasında oluşan gerilmelerin aerodinamik ve yapısal tasarım parametreleri ile değişimi incelenmiştir.

### 2.2 Aerodinamik Tasarım

Bu çalışmada, G.Beşerik ve A.Yükselen tarafından ortaya konulan aerodinamik tasarım tekniği kullanılmıştır (Beşerik, 1992). Sonuçların birbiriyle karşılaştırılabilmesi için belli bir rotor konfigürasyonu referans olarak kabul edilmiş ve her analizde referans tasarıma ait tek bir tasarım parametresi değiştirilmiştir. Ayrıca rotordan elde edilecek güç değeri 5 kW olarak alınmış ve her analiz için sabit kalan bir tasarım parametresi olarak kabul edilmiştir. Her pala için NACA 23012 serisi kanat profili kullanılmıştır. Pala üzerinde faydalı aerodinamik kuvvetlerin, R pervane yarıçapı olmak üzere, 0.19R ile pala ucu arasında oluştuğu kabul edilmiştir.

*Tablo.1 Aerodinamik Tasarım Parametreleri*

	Referans Tasarım	Alternatif Değerler
Geometri Tipi	Lineer	Optimum
Pala Sayısı	3	2
Tasarım Rüzgar Hızı	10.5 m/s	9,10,11,12 m/s
Tasarım Uç Hız Oranı	8	6,7,9,10
Tasarım Kaldırma Kuvveti Katsayısı	0.9	0.8,0.95

Palanın gerçek ölçüleri, aerodinamik tasarım neticesinde elde edilen boyutsuz pala geometrisi kullanılarak, rotorun yarıçap ölçüsüne göre belirlenir. Rotorun yarıçapı ise sistemin rüzgardan elde edeceği güç değeri ve tasarım rüzgar hızına göre, güç denkleminde elde edilir.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho (\pi R^2) C_P V^3 \quad (1)$$

### 2.3 Yapısal Model

Yelkapan palası homojen et kalınlığına sahip ve içi boş bir yapı olarak düşünülmüştür. Pala, dönme ekseninden 0.19R mesafeden ankastre olarak mesnetlenmiş bir yapı olarak kabul edilmiştir. Pala, her kesitin hücum kenarından geçen radyal bir eksen etrafında burulduğu düşünülmüş ve modellenmiştir.

*Tablo.2 Yapısal Tasarım Parametreleri*

	Referans Tasarım	Alternatif Değerler
Et Kalınlığı	2 mm	1 mm
Malzeme	Alüminyum	Çelik

Palaya ait geometrik model, gerilme analizinde kullanılmak üzere, AutoCAD ortamında MDT (Mechanical DeskTop) ile yüzey elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Bu amaçla, palaya ait geometrik modeli otomatik olarak oluşturan ve AutoCAD ortamında çalışan bir AutoLISP programı bu çalışma sırasında geliştirilmiştir.

## 2.4 Sonlu Eleman Modeli

AutoCAD ile oluşturulan geometrik model ve basınç dağılımına göre hesaplanan aerodinamik kuvvetler, bir sonlu eleman analiz programı olan ANSYS'de gerilme analizi için kullanılmıştır. Benzer bir çalışmada rüzgar türbin palasının statik ve dinamik analizinde hem membran eleman hem de eğilmeye karşı çalışan kabuk eleman etkisini birlikte verebilen altı serbestlik dereceli üç boyutlu kabuk eleman kullanılmıştır (El Chazly, 1993). Bu çalışmada da sonlu eleman modeli oluşturulurken, simetriden dolayı rüzgar türbin rotorundaki tek bir pala göz önüne alınmış ve eleman tipi olarak dörtgen biçimli, altı serbestlik dereceli Shell63 tipinde kabuk eleman kullanılmıştır.

## 2.5 Aerodinamik Kuvvetler

Bir akım içinde yer alan kanat profiline akım doğrultusunda bir sürüklenme kuvveti ve buna dik yönde de bir kaldırma kuvveti etki eder. Söz konusu aerodinamik kuvvetler belli bir radyal kalınlıktaki pala elemanı etrafındaki basınç dağılımının homojen olmaması sonucunda ortaya çıkarlar. Eğer belli bir hücum açısında kanat profili etrafında oluşan basınç dağılımı elde edilebilirse buna bağlı olarak belli bir radyal kalınlıktaki pala elemanının yüzeyinde oluşan aerodinamik kuvvet dağılımı da bulunabilir. Kavsaoğlu'na göre (1996, 25 Aralık) söz konusu basınç dağılımı (2) bağıntısı ile ifade edilebilen bir basınç katsayısı ile tanımlanabilir.

$$K_{Pr} = \frac{P_{static} - P_{inf}}{0.5\rho W^2} \quad (2)$$

Belli bir hücum açısında bir kanat profili etrafında oluşan basınç dağılımını Smith&Hess Panel Metodu'nu kullanarak hesaplayan bir program 1994 yılında ODTÜ Havacılık Mühendisliği Bölümü'nde Doç.Dr.M.Ş. Kavsaoğlu tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada pervane palasına etkiyen aerodinamik kuvvetler söz konusu programdan elde edilen basınç katsayıları kullanılarak aşağıdaki yöntemle hesaplanmıştır.

Eğer X ekseninin doğrultusunun, kanat profili veter çizgisine paralel olduğu kabul edilirse bir panele etkiyen basınç kuvvetinin X ve Y bileşenleri (3) denklemleri ile ifade edilebilir;

$$F_X = \frac{1}{2} \rho C_{FX} (ch) W^2 \quad (3.a)$$

$$F_Y = \frac{1}{2} \rho C_{FY} (ch) W^2 \quad (3.b)$$

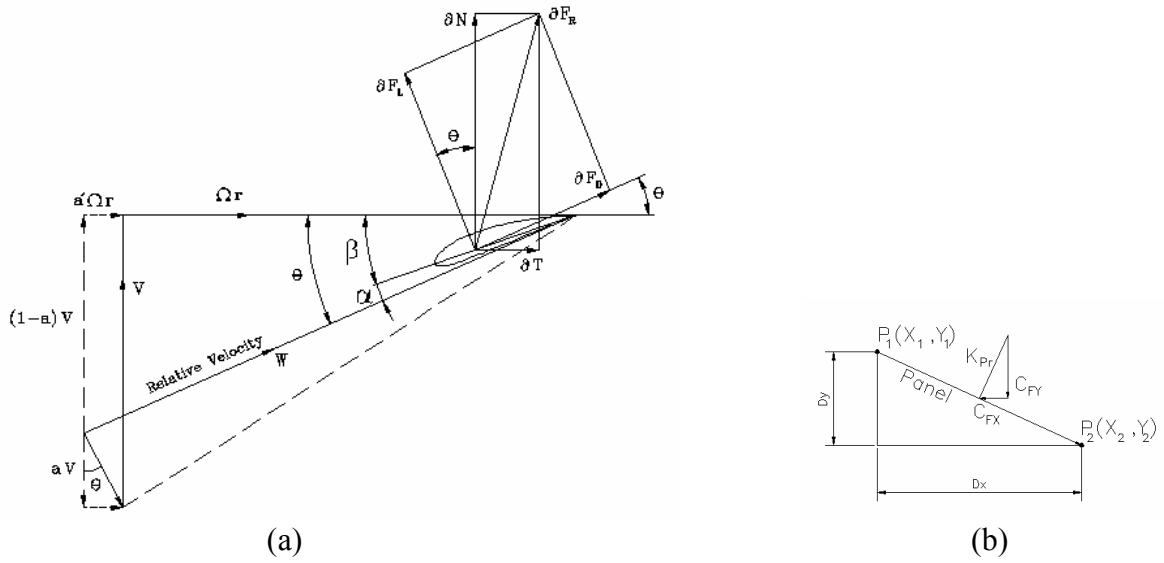
$C_{FX}$  ve  $C_{FY}$  kuvvet katsayıları, söz konusu panele ait basınç katsayısı kullanılarak (4) denklemleri ile hesaplanabilir (bkz.Şekil.1-b).

$$C_{FX} = (Y_2 - Y_1) K_{Pr} \quad (4.a)$$

$$C_{FY} = (X_2 - X_1) K_{Pr} \quad (4.b)$$

Bağıl akım hızı ise Şekil.1-a'deki akım hızlarının geometrisine göre (5) denklemi ile ifade edilebilir.

$$W = V \sin\theta + r\Omega \cos\theta \quad (5)$$



Şekil.1 (a) Pala Elemanı Etrafında oluşan Akım Hızları ve Aerodinamik Kuvvetler  
(b) Pala Kesiti Üzerinde ve Birim Uzunluktaki Panele Ait Basınç ve Kuvvet Katsayıları

Açısal hızın,  $\Omega$ , değeri ise tasarım uç hız oranı ve tasarım rüzgar hızına bağlı olarak (6) denklemi ile elde edilmektedir.

$$\lambda = \frac{r\Omega}{V_T} \quad (6)$$

Bu şekilde pala yüzeyindeki aerodinamik kuvvet dağılımı hassas olarak hesaplanıp sonlu eleman modelindeki her düğüm noktası için aerodinamik kuvvetlerin X ve Y bileşenleri elde edilebilmektedir. Bu amaçla, palaya ait sonlu eleman modeli için aerodinamik kuvvet dağılımını basınç katsayıları ile hesaplayan bir program bu çalışma sırasında geliştirilmiştir.

## 2.6 Atalet Kuvvetleri

Sistemde oluşacak atalet kuvvetleri rotorun açısal hızına, pala geometrisine ve kullanılan malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Rotorun açısal hızı, rüzgar hızı ve uç hız oranına göre (6) denklemi ile belirlenir. Bu çalışmada yapılan analizlerde rüzgar hızı ve uç hız oranı olarak aerodinamik tasarım değerleri alınmıştır. Pala geometrisi aerodinamik tasarım neticesinde elde edilmektedir. Dolayısıyla aerodinamik tasarım parametreleri atalet kuvvetlerini de etkilemektedir. Aynı zamanda yapısal tasarım parametrelerinden et kalınlığı ve malzeme tipi de atalet kuvvetleri için belirleyici olmaktadır.

## 2.7 Pala Geometrisi

Gerilme dağılımı incelenirken pala geometrisi açısından göz önüne alınması gereken, öncelikle pala boyunca veter uzunluğu dağılımıdır. Veter uzunluğu dağılımı iki açıdan önemlidir. Birincisi, pala kütlesi, dolayısıyla atalet kuvvetlerinden kaynaklanan gerilmeler için belirleyicidir. İkinci olarak palanın kesit alan değerini belirler ve bu da oluşacak gerilmeleri etkiler. Veter uzunluğu dağılımından dolayı pala kütlesi -dolayısıyla atalet kuvvetleri- artarken kesit alan değeri de artar. Bu durumda artan atalet kuvvetleri oluşacak gerilmeleri artırırken, büyüyen kesit alanı tam tersine gerilme değerlerini azaltıcı bir etki yapacaktır.

Tablo.3 Analizi Yapılan Palalara Ait Veter Dağılımlarının Boyutsuz Yarıçapa Bağlı İfadeleri

<b>Pala Sayısı</b>	2 Palalı Rotor	-0.1530(r/R) + 0.1790
	3 Palalı Rotor	-0.0945(r/R) + 0.1150
<b>Tasarım Uç Hız Oranı</b>	$\lambda = 6$	-0.1650(r/R) + 0.1973
	$\lambda = 7$	-0.1240(r/R) + 0.1485
	$\lambda = 8$	-0.0945(r/R) + 0.1150
	$\lambda = 9$	-0.0780(r/R) + 0.0928
	$\lambda = 10$	-0.0613(r/R) + 0.0747
<b>Tasarım Kaldırma Katsayısı</b>	Design $C_L = 0.8$	-0.1070(r/R) + 0.1300
	Design $C_L = 0.9$	-0.0945(r/R) + 0.1150
	Design $C_L = 0.95$	-0.0894(r/R) + 0.1090

## 2.8 Aerodinamik Tasarım Parametrelerinin Pala Kütlesine Etkisi

Rotor kütlesi atalet kuvvetleri için belirleyici bir parametredir. Diğer yandan pala konstrüksiyonunda daha az malzeme kullanılması özellikle büyük boyutlu tasarımlarda sistem maliyetini düşürmede önemlidir.

Tablo.4 Pala Geometrilerine Ait Boyutsuz Alan ve Hacim Değerleri

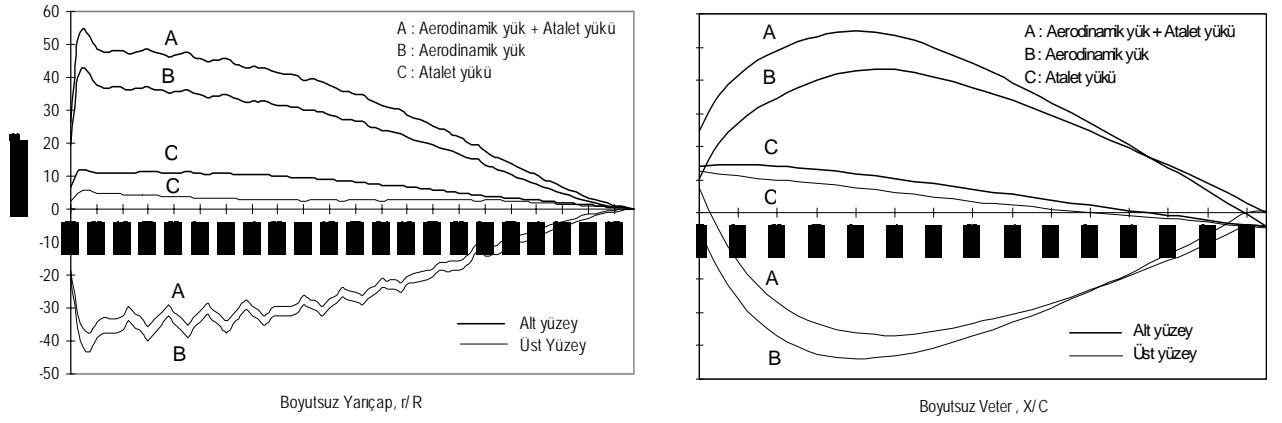
		$A / R^2$	$V / R^3$
<b>Pala Sayısı</b>	2 Palalı Rotor	0.0966	0.000259
	3 Palalı Rotor	0.1434	0.000584
<b>Geometri Tipi</b>	Optimum	0.0971	0.000279
	Lineer	0.0966	0.000259
<b>Tasarım Uç Hız Oranı</b>	$\lambda = 6$	0.1625	0.000738
	$\lambda = 7$	0.1234	0.000424
	$\lambda = 8$	0.0966	0.000259
	$\lambda = 9$	0.0775	0.000166
	$\lambda = 10$	0.0634	0.000111
<b>Tasarım Kaldırma Katsayısı</b>	Design $C_L = 0.8$	0.1087	0.000328
	Design $C_L = 0.9$	0.0966	0.000259
	Design $C_L = 0.95$	0.0914	0.000232

## 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 3.1 Atalet Kuvvetleri Ve Aerodinamik Kuvvetlerin Etkisi

Atalet kuvvetleri ile aerodinamik kuvvetlerin gerilme dağılımı üzerindeki etkisini ayrı ayrı inceleyebilmek için referans model üç ayrı yükleme durumunda analiz edilmiştir; a)Hem aerodinamik hem de atalet kuvvetleri, b)Aerodinamik kuvvetler, c)Atalet kuvvetleri.

Elde edilen sonuçlara göre aerodinamik kuvvetlerden kaynaklanan eğilme gerilmeleri baskın durumdadır. Atalet kuvvetleri sadece çekme gerilmesi değil aynı zamanda eğilme gerilmesi de oluşturmaktadır. Bu durum alt ve üst yüzeyde oluşan gerilme dağılımlarının birbirinden farklı olmasıyla gözlenebilmektedir. Atalet kuvvetleri, mesnetlemenin yapıldığı kesidin ağırlık merkezi ile palanın ağırlık merkezinin söz konusu kesit düzlemindeki izdüşüm noktası arasındaki mesafeden kaynaklanan bir eğilme momenti oluşturmaktadır. Fakat bu eğilme gerilmesi çeki gerilmesine göre daha küçüktür. Böylece atalet kuvvetleri alt ve üst yüzeylerde farklı büyüklükte çeki gerilmeleri oluşturur. Bu çeki gerilmeleri aerodinamik kuvvetlerden kaynaklanan eğilme gerilmesiyle birleştiğinde alt yüzeyde şiddeti daha büyük olan çeki gerilmeleri, üst yüzeyde ise şiddeti daha az olan bası gerilmeleri oluşur.



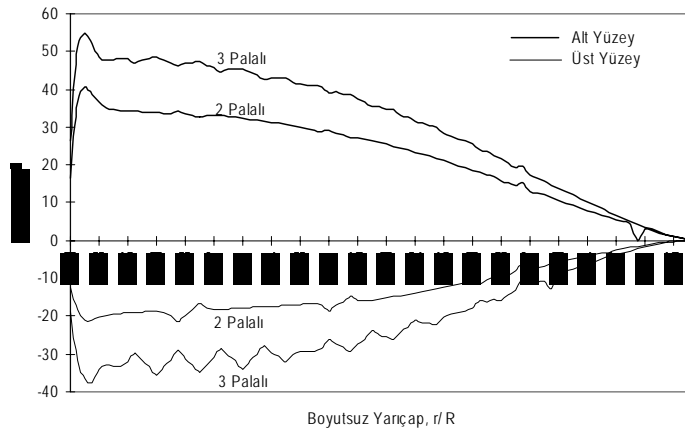
Şekil.2 Aerodinamik ve Atalet Kuvvetlerinin Normal Gerilme Dağılımına Etkisi  
(a)Pala Boyunca (b)Pala Kesidi Etrafındaki Gerilme Dağılımları

Tablo.5 Analizi Yapılan Palaların Çalışma Şartları

	Referans Model	2 Palalı	Optimum Geometri
Açısal Hız	35 rad/s	35 rad/s	37.67 rad/s
Uç Hız Oranı	8	8	8
Tasarım Rüzgar Hızı	10.5 m/s	10.5 m/s	10.5 m/s
Rotor Yarıçapı	2.4 m	2.4 m	2.23 m
Eksenel Kuvvet ( $F_Y$ )	256.55 N	370 N	276.46 N
Teğetsel Kuvvet ( $F_X$ )	-41.15 N	-60.36 N	-39.82 N

### 3.2 Pala Sayısının Etkisi

Aynı gücü üreten 2 ve 3 palalı rotarlara eşit miktarda eksenel kuvvet gelir. Bununla beraber ikili rotorda bu kuvvet ikiye, üçlü rotorda ise üçe bölüldüğünden ikili rotor palasına 1.5 kat daha büyük bir aerodinamik kuvvet etkir. İkili rotora ait palanın kütlesi 1.5 kat daha fazla olduğundan oluşacak atalet kuvvetleri de aynı oranda artacaktır. Buna karşın ikili rotor palasındaki gerilme değerleri yaklaşık 1.5 kat daha azdır.

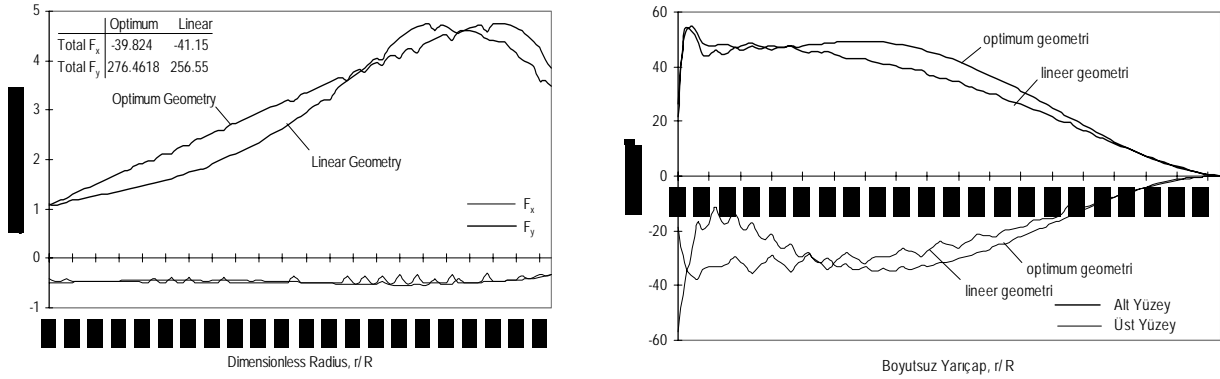


Şekil.3 Pala Sayısının Pala Boyunca Normal Gerilme Dağılımına Etkisi

### 3.3 Geometri Tipinin Etkisi

Optimum geometriye sahip palanın kütlesi lineer geometriye sahip palanın kütlesiyle aynıdır. Dolayısıyla oluşan atalet kuvvetleri de eşittir. Pala boyunca kuvvet dağılımındaki farklılığın eğilme momentine dolayısıyla eğilme gerilmelerine de yansıdığı gözlenmektedir. Optimum

geometriye sahip palanın kök kesidinin alanı lineer geometriye sahip palanınkinden daha büyük olmasına rağmen oluşan maksimum normal gerilme değerleri eşittir.



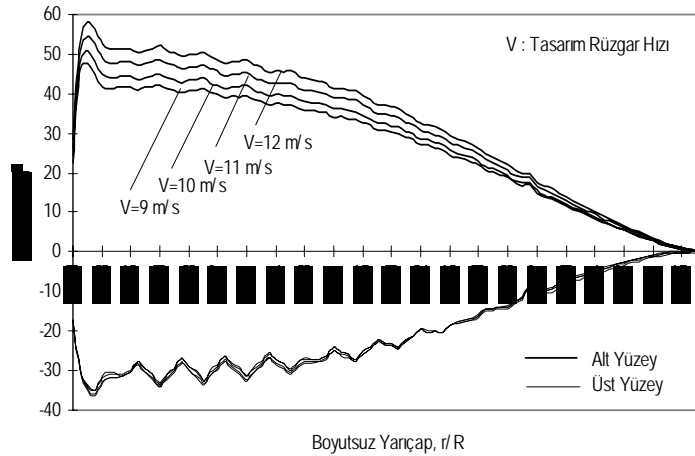
Şekil.4 (a)Geometri Tipinin Pala Boyunca Normal Gerilme Dağılımına Etkisi  
(b)Aerodinamik Kuvvetlerin Pala Boyunca Dağılımı

### 3.4 Tasarım Rüzgar Hızının Etkisi

Boyutsuz pala geometrisinin belirlendiği aerodinamik tasarım aşamasında rüzgar hızı bir tasarım parametresi olarak kullanılmamaktadır. Ancak boyutsuz pala geometrisi belli olan bir rotorun belli bir gücü üretebilmesi için sahip olması gereken yarıçap değerinin belirlenmesinde tasarım rüzgar hızı göz önüne alınmaktadır. Referans pala geometrisine sahip rotorun farklı tasarım rüzgar hızlarında aynı verimle çalışabilmesi için uç hız oranlarının eşit olması gerekir. Bu durum açısal hızların farklı olmasıyla sağlanır. Aynı zamanda eşit güç üretimini sağlayabilmek için rotor süpürme alanlarının farklı olması gerekir.

Atalet kuvvetlerinin oluşturduğu normal gerilmeler açısal hızla orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla tasarım rüzgar hızı arttıkça söz konusu gerilmeler de artmaktadır.

Tasarım rüzgar hızı azalırken hem palanın kesit alan büyüklüğü hem de eğilme momenti değeri artmaktadır. Fakat sonuçta aerodinamik yüklerden kaynaklanan eğilme gerilmesi tasarım rüzgar hızıyla birlikte artmaktadır.



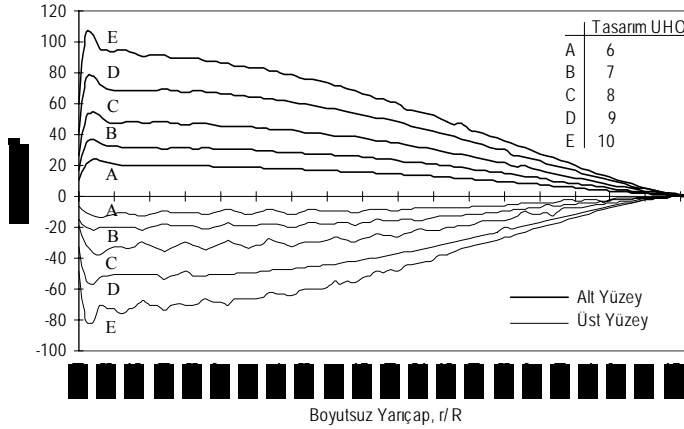
Şekil.5 Tasarım Rüzgar Hızının Pala Boyunca Normal Gerilme Dağılımına Etkisi

Tablo.6 Farklı Tasarım Rüzgar Hızlarına Sahip Palaların Çalışma Şartları

Tasarım Rüzgar Hızı	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
Açısal Hız	24.24 rad/s	31.50 rad/s	40 rad/s	49.70 rad/s
Uç Hız Oranı	8	8	8	8
Rüzgar Hızı	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
Rotor Yarıçapı	2.97 m	2.54 m	2.20 m	1.93 m
Eksenel Kuvvet ( $F_Y$ )	285.21 N	253.48 N	232.84 N	213.58 N
Teğetsel Kuvvet ( $F_X$ )	-45.25 N	-40.25 N	-37.22 N	-33.74 N

### 3.5 Tasarım Uç Hız Oranının Etkisi

Pala kütlesi ve kesit alan büyüklüğü tasarım uç hız oranı azaldıkça artmaktadır. Rüzgar pervanesi tasarım uç hız oranında çalıştığı taktirde maksimum verimle güç üretimi yapmaktadır. Tasarım rüzgar hızı hepsi için aynı kabul edilirse açılmal hız değeri tasarım uç hız oranı ile birlikte artacaktır. Bununla beraber pala kütlelerinin azalmasına rağmen atalet kuvvetlerinden kaynaklanan normal gerilme değeri de artmaktadır. Eğilme momentinin değeri tasarım uç hız oranı ile değişmemektedir. Buna karşın pala kesidinin büyüklüğü değiştiğinden aerodinamik kuvvetlerin oluşturduğu eğilme gerilmeleri tasarım uç hız oranı ile birlikte artmaktadır.



Şekil.6 Tasarım Uç Hız Oranının Pala Boyunca Normal Gerilme Dağılımına Etkisi

Tablo.7 Farklı Tasarım Uç Hız Oranlarına Sahip Palaların Çalışma Şartları

Tasarım Uç Hız Oranı	6	7	8	9	10
Açısal Hız	26.25 rad/s	30.63 rad/s	35 rad/s	39.34 rad/s	43.75 rad/s
Uç Hız Oranı	6	7	8	9	10
Tasarım Rüzgar Hızı	10.5 m/s	10.5 m/s	10.5 m/s	10.5 m/s	10.5 m/s
Rotor Yarıçapı	2.4 m	2.4 m	2.4 m	2.4 m	2.4 m
Eksenel Kuvvet ( $F_Y$ )	249.5 N	254.5 N	256.6 N	256.6 N	246.4 N
Teğetsel Kuvvet ( $F_X$ )	-51.6 N	-46 N	-41.2 N	-36.4 N	-32.9 N

## 4. KAYNAKLAR

1. Beşerik,G.,Yükselen, A., “Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Aerodinamik Dizaynı”, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 1992.
2. El Chazly,N.M.”Static and Dynamic Analysis of Wind Turbine Blades Using the Finite Element Method”, İngiltere. Computer&Structures, 48,273-290, 1993.
3. Kavsaoglu,M.Ş. (Kişisel Görüşme), (1996, Aralık 25).