



## Yatay Eksenli Bir Rüzgâr Türbin Kanat Dizaynı

### Design of Horizontal Axis Wind Turbine Blade

Mehmet TEKELİ<sup>1,\*</sup>, Mehmet ÖZTÜRK<sup>2</sup>, Mehmet BAHADIR<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü 42250 KONYA, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 03/03/2017

Kabul/Accepted: 16/05/2017

Son Versiyon/Final Version: 15/06/2017

#### Öz

Rüzgâr türbinlerinin verimli olarak çalışmasında türbin kanatlarının optimum dizaynı önemli bir faktördür. Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu kullanılarak bir rüzgâr türbin kanadının gerilme analizi yapılmıştır. İlk olarak 13,02 m yarıçapında 150kw gücündeki bir rüzgâr türbin kanadının geometrisi belirlenmiş ve kanat profili olarak NACA-4418 profili seçilmiştir. Daha sonra maksimum güç ilkesinden hareketle rotor devir sayısı bulunarak, kanat kök-veteri ile uç-veteri arasındaki burulma açısı belirlenmiştir. Geometrisi belirlenmiş olan yapı dörtgen ve üçgen kabuk elemanlar ile sonlu elemanlara bölünmüştür. Sonlu elemanlar ile modellenen bir rüzgâr türbin kanat yüzeyindeki basınç katsayıları Vortex-Lattice metodu ile elde edilmiştir. Sonlu elemanlar ile yapı analizi için sınır şartları ve malzeme özellikleri belirlenerek veri dosyası hazırlanmıştır. Hazırlanan veri dosyası kullanılarak bilgisayar programı yardımıyla yapı üzerindeki elemanlarda gerilmeler bulunmuştur. Daha sonra ise elde edilen gerilmelere uygun olarak yapının gerilme renklendirmesi yapılmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

“Rüzgâr Türbin Kanadı, Sonlu Elemanlar Metodu, Gerilme Analizi”

#### Abstract

The optimum design of the wind turbine blade is a very important factor for the efficient performance of wind turbines. In this study, the stress analysis of a wind turbine blade is done with finite element method. First, the geometry of a wind turbine blade which has a 13.02 m diameter and a power of 150-200 KW is determined and NACA-4418 profile is chosen as the blade profile. Next, according to maximum power principle, number of revolution of the rotor is found then, the torsional angle between root chord of blade and tip chord of blade is determined. After that, the structure whose geometry has been established is divided into finite elements being rectangular and triangular shell elements. In order to determine pressure distribution on the structure, it is modeled as a thin wing at mean line direction by dividing proper Vortex-Lattices with consistency of surface structure analysis. By using data obtained here, aerodynamic pressure coefficients are calculated on every element with the help of computer program. After the analysis of a data file is prepared. The stresses on the elements of the structure are calculated by using computer program with this prepared data file. After that, the structure is colored with different colors according to different stress values.

#### Key Words

“Wind Turbine Blade, Finite Element Method, Stress Analysis”

## 1. GİRİŞ

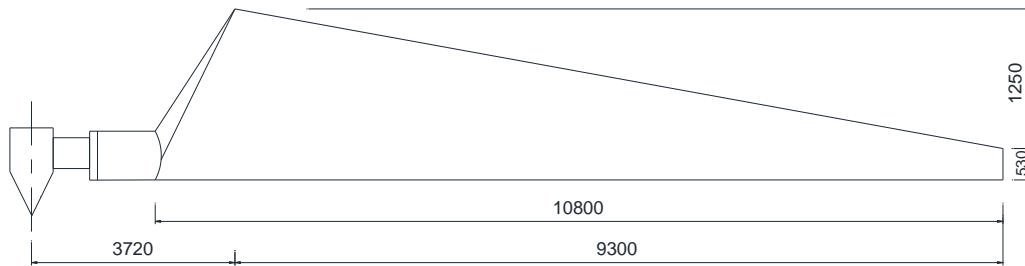
Teknoloji ve sanayi çağını yaşamakta olduğumuz asrımızda enerji oldukça önemli bir yere sahiptir. Enerjinin yeterli, zamanında, kaliteli, ekonomik, güvenilir ve temiz olarak sunumu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen önemli göstergelerdir. Karbonlu yakıtların ömürlerinin sınırlı olması ve bu yakıtlara dayalı enerji krizleri sebebiyle alternatif enerji kaynaklarının teminine yönelik çalışmalar hızla artmaktadır. Bu çalışmaların bir sonucu olarak güneş, rüzgar, nükleer ve hidrolik enerji kaynaklarının kullanılabilirliği yaygınlık arz etmektedir. Sanayileşme ve teknolojinin getirdiği faydaların yanında çevre kirliliğine sebebiyet verilmesi de günümüzde oldukça önemli bir problem arz etmektedir. 1970'li yıllardaki petrol krizi rüzgar türbinlerinin gelişimine önemli oranda katkı sağlamış ve rüzgar enerjisi dünyada birçok ülkenin yararlandığı enerji kaynağı haline gelmiştir (Bayrakçı, 2007). Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisi temiz bir enerji kaynağı olması dolayısıyla da ayrı bir öneme sahiptir. Rüzgardan enerji elde edilmesi oldukça eski bir düşünce olup, yelkenli gemilerde ve yel değirmenlerinde yaklaşık 2500 yıldır bu enerjiden faydalandığı bilinmektedir.

Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Türbin kanatlarının optimum dizaynı, rüzgar türbinlerinin verimine önemli oranda etki etmektedir. Rüzgar türbininin maksimum verimle çalışması çeşitli faktörlere bağlıdır. Türbinin yüksekliği, türbin kanadının süpürme alanı, aerodinamik yapısı, kanat geometrisinin açıları, havanın yoğunluğu ve rüzgar hızı bu faktörlerden bazılarıdır (Onat, 2004).

Rüzgar türbinlerine rüzgar kuvveti ve atalet kuvveti etki etmektedir. Rüzgar kuvveti nedeniyle kanat üzerinde oluşan basınç kanat yapısında yer değiştirme ve gerilmelere neden olmaktadır. Bu durum rüzgar türbin kanatlarının ömürlerini belirlemektedir (Cox, Echtermeyer, 2012). Bu kuvvetler nedeniyle ortaya çıkan gerilmeler malzeme emniyetli gerilme sınırını aşması durumunda kırılma meydana gelmektedir. Türbin kanatlarının dizaynında çevre şartları ve kanat elemanı özellikleri ele alınarak analiz edilmesi gerekmektedir (Bechly, Clausen, 1997). Bir rüzgar türbin kanadının sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturularak, kanat teorisi ve tasarım verilerinin kullanılması ile hazırlanan bilgisayar yazılımı yardımıyla rüzgar türbin kanadının statik ve dinamik yüklemeler için optimize edilmesi sağlandı (El-Chazly, 1993), (Younsi, vd., 2001), (Hameed, Afag, 2013).

## 2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada rüzgar türbin kanadı analizinin yapılabilmesi amacıyla yüzeysel boyutları belirlenen (13.02) m çapında, (150) kw gücündeki bir rüzgar türbin kanat geometrisi esas alındı (Şekil 1). Kanat profili olarak, taşıma ve moment katsayıları dikkate alınarak, rüzgar türbinleriyle ilgili çalışmalarda kullanılmış olan NACA-4418 profili seçildi (Abboot, Doenhoff, 1949). 3003 Alüminyum malzeme özellikleri Tablo 1. de verilmiştir.



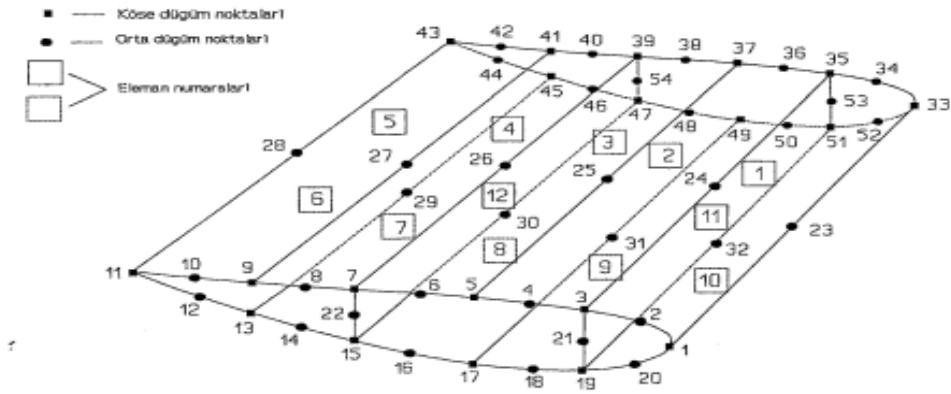
Şekil 1. 150 kw gücünde bir rüzgar türbin kanadı.

Tablo 1. 3003 Alüminyum malzemenin mekanik özellikleri

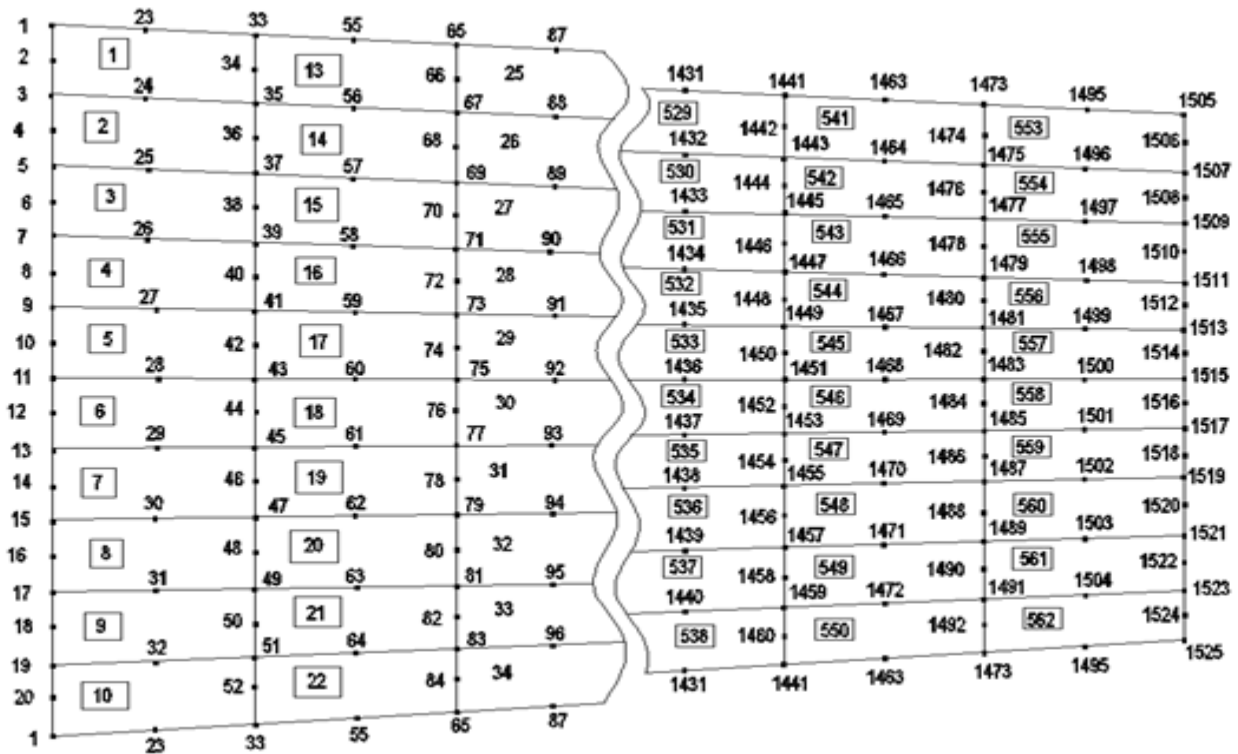
Malzeme	E (GPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (MPa)
3003 Al	70	0,33	2730	110

Dış yüklerin etkisi altında kanattaki burulmayı önlemek amacıyla kök-veterden uç-vetere kadar profilin kayma merkezi (S.C.) ve bu merkeze göre burulması (dönmesi) hesaplandı. Profilin apsis ve ordinat değerleri bulunan kayma merkezine taşınarak, profilin yeni apsis ve ordinat değerleri elde edildi. Maksimum güç ilkesine göre kanat devir sayısı belirlendi. Dış geometrisi belirlenmiş

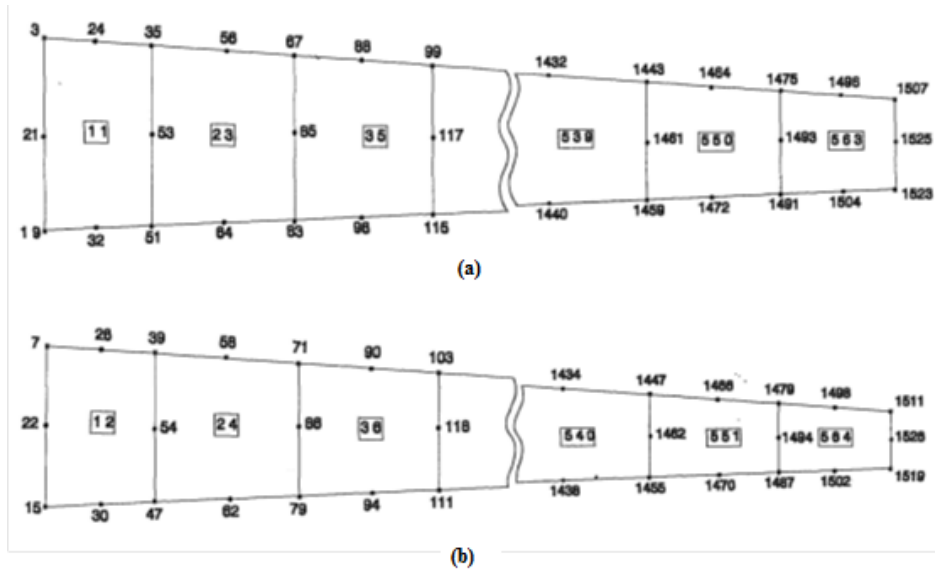
olan yapı sonlu elemanlar modellemesi için, iki istasyon arasında 12 eleman olmak üzere 47 istasyonda toplam 569 elemana ayrıldı. Bu modellemede dörtgen ve üçgen kabuk elemanlar kullanıldı (Şekil 2-6).



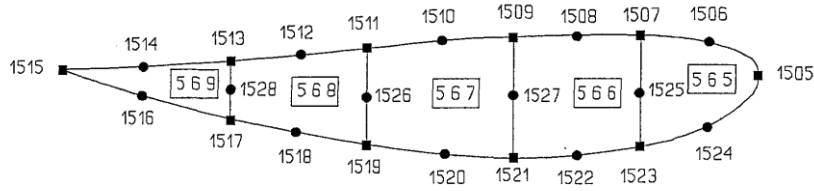
Şekil 2. Yapının bir aerofil bölgesinin sonlu eleman modellemesi



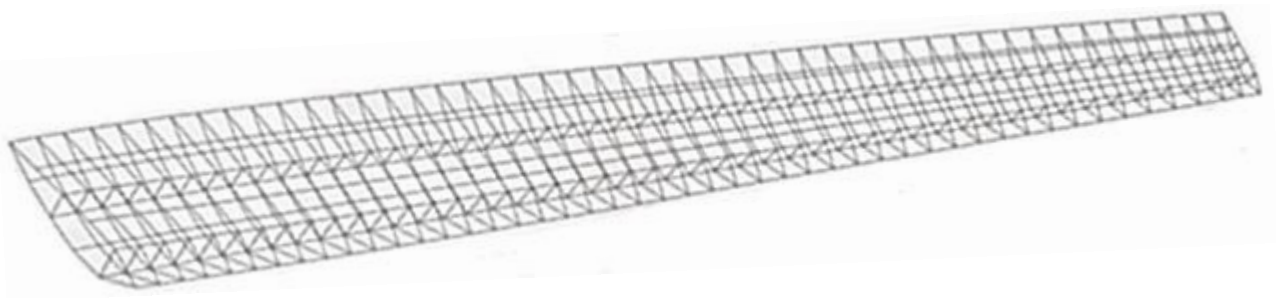
Şekil 3. Yapının sonlu eleman modellemesi (Alt ve üst yüzey elemanları)



Şekil 4. Yapının sonlu eleman modellemesi (1. ara takviye (a) ve 2. ara takviye (b) elemanları)



Şekil 5. Yapının sonlu eleman modellemesi (Uç veter kapağı)



Şekil 6. Sonlu elemanlar ile modellenen rüzgar türbin kanadı

İstasyon sayısı, bir profil üzerindeki nod sayısı ve bu nodların x,y,z - koordinatları, kanat devir sayısı, ara eleman sayısı, ara elemanların bağlı olduğu nod numaraları v.s. gibi öz değerlerin data dosyası olarak girilmesiyle, sonlu elemanlara bölünen yapının Autocad ile çizimi ve yapı analizi programı için data dosyası üreten bir bilgisayar programı hazırlandı.

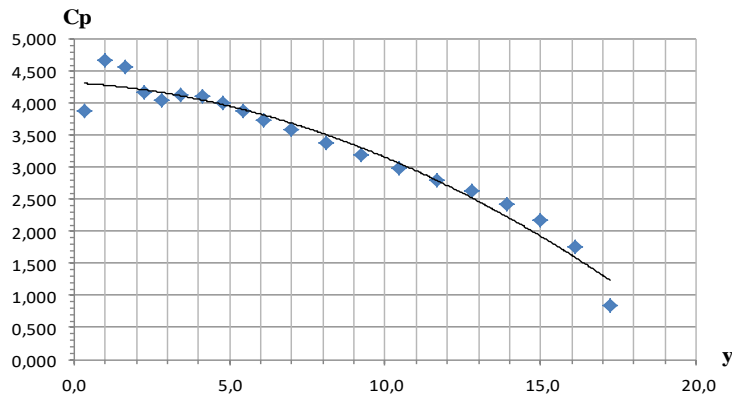
Yapı analizinde rüzgar etkisinden dolayısıyla oluşan basınç yükleri dış yük olarak girildi. Her bir eleman üzerindeki basınç yüklerinin bulunması amacıyla aerodinamik basınç katsayılarının elde edileceği program için, yapının sonlu eleman modellemesi bu kez panel eleman olarak; yalnızca orta eksenden geçen yüzey elemanlar olarak modellendi. Bu modellemede de sonlu eleman modellemesinde kullanılan data dosyası hazırlanan başka bir program da çalıştırılarak datalar üretildi. Üretilen datalar gerekli

aerodinamik özelliklerde girilerek (kanat devir sayısı, kanat burulma açısı v.s.) Vortex-Lattice metodu ile bilgisayarda çözülerek panel elemanlardaki basınç katsayıları elde edildi. Burada yapı orta eksenden geçen elemanlar gibi düşünüldüğünden hesaplanan bu basınç katsayıları yalnızca üst yüzey elemanlarına etki ettirildi. Böylece yapı analizi için modellenen yapının sonlu elemanlarına uygun olarak aerodinamik basınç katsayıları elde edildi (Tekeli, 2016).

Basınç katsayıları daha sonra yapı analizi için hazırlanan data dosyasında yazıldı. Eleman özelliklerinin de data dosyasına yazılması ile oluşturulan yapı analizi data dosyası hazır hale getirildi (Tekeli, 1993). Sonlu elemanlar metodu kullanılarak hazırlanan bilgisayar programı çalıştırıldı (Mecitoğlu, 1988). Kanat modellenmesine uygun elemanlar için gerilme değerleri ve elemanların bağlı olduğu nodların deplasman değerleri elde edildi. Gauss noktası için elde edilen gerilme değerleri sonlu elemanların köşe noktalarına interpolate edildi. Yapının gerilme dağılımının kolayca incelenebilmesi amacıyla hesaplanan gerilmelerin yapıya uygun renklendirilmesi yapıldı. Türbin kanadında rüzgar yükleri nedeniyle meydana gelen deplasmanlı yapı Autocad programı kullanılarak çizildi (Tekeli, 2015).

### 3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Kanat profili üzerinde basınç katsayısı değerlerinin hücum kenarından firar kenarına doğru azaldığı tespit edilmiştir. Hücum kenarı tarafından veter uzunluğunun %20 si olan bölümde basınç katsayılarının 1/3 oranında azaldığı görülmüştür. Kök kesitten uç kesite doğru basınç katsayısı değerlerinin belirgin olarak bir azalma gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Kök kesitten uç kesite doğru basınç katsayısı değişimi

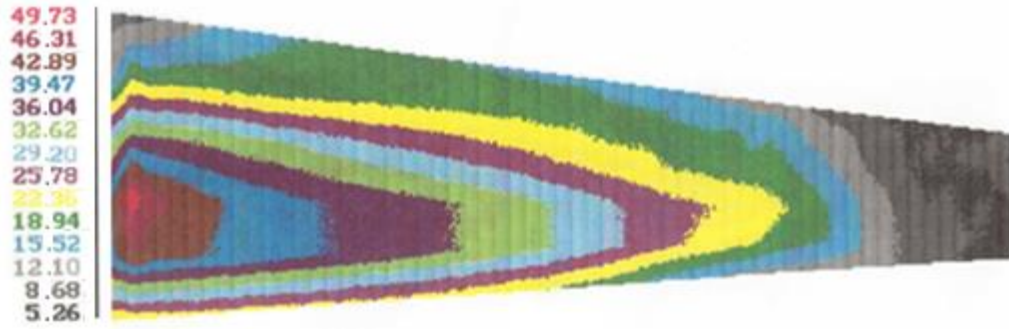
Bu çalışmada amaç statik durum analizi olduğundan yalnızca statik yükler yapı üzerine etki ettirilmiştir. Burada gerilme hesabına etki eden temel yükler, rüzgar yükleri, ağırlık kuvvetleri, atalet kuvvetleri ve termal yüklerdir. Bu çalışmada statik kuvvetler olarak; rüzgar yüklerinden dolayı hasıl olan basınç kuvvetleri, yapının kendi elemanlarının ağırlığından dolayı ağırlık kuvvetleri ve dönme hareketinden dolayı da merkezkaç kuvvetler modellenen yapıdaki her bir eleman için dikkate alınmıştır. Kanat kök kesitindeki profil üzerindeki nodlardan ankastre olarak bağlanmıştır. Kanat kabuk kalınlıkları ilk aşamada;

Gövde sacı kalınlığı	1,2 mm
1.Ara takviye elemanları	4,0 mm
2.Ara takviye elemanları	3,0 mm
Uç veter kapak sacı	1,2 mm

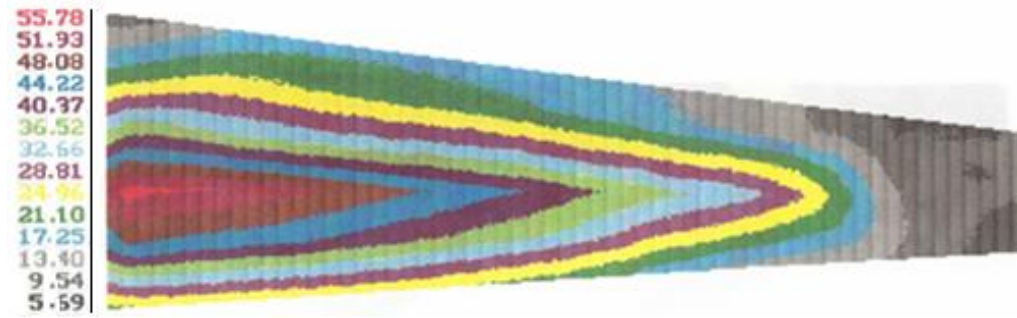
alınarak program çalıştırılmıştır. Yapı üzerinde hesaplanan gerilmelerde, maksimum gerilmenin malzemenin emniyetli gerilme değerine göre çok küçük bir değerde olduğu tespit edilmiştir. ( $\sigma_{max} = 15,12$  MPa halbuki  $\sigma_{em} = 73,30$  MPa idi.) Böylece yapının temel eleman kalınlıkları değiştirilerek optimum kalınlıklar tespit edilmiştir. Gövde sacı ve uç veter kapak sacı kalınlıkları 0,4 mm, diğer elemanların kalınlıkları ise değiştirilmemiştir.

Bu tür yapıların montajındaki güçlükler ve atalet yükleri için ağırlık önemli bir faktördür. Malzeme tasarrufu sağlaması açısından da kalınlığın optimum olması önem kazanmaktadır. Yapının gerilme renklendirme grafiklerinden (Şekil 8-12) de görüldüğü gibi en büyük gerilmeler kök kesite yakın bölgelerde meydana gelmektedir. Kök kesitten uç kesite doğru gerilmeler azalan bir durum arz etmektedir. Kanat kök kesitten ankastre bağlı bir giriş gibi düşünülür ise, maksimum momentler ve dolayısıyla da max. gerilmeler kök kesitte meydana gelmektedir. Yapılan analizde max. gerilme kanat alt yüzeyinin kök kesitin de ;  $\sigma_{max} = 55,78$  MPa olarak elde edilmiş ve  $\sigma_{em} = 73,30$  MPa olduğu için yapıyı meydana getiren bütün elemanların emniyet sınırı içinde kaldığı görülmüştür. Maksimum gerilmeler kök kesite yakın elemanlarda meydana geldiğinden bu kesitteki elemanların kalınlıkları

arttırılarak, gerilmelerin az olduğu bölgelerdeki elemanların kalınlıkları daha da azaltılırsa atalet yüklerinin gerilmelere etkisi azaltılabilir (Tekeli, 1993). Yükleme sonucunda kanat yapısındaki yer değiştirmeler Şekil 13’de görülmektedir.



Şekil 8. Rüzgar türbin kanadının üst yüzeyindeki gerilmeler (MPa)



Şekil 9. Rüzgar türbin kanadının alt yüzeyindeki gerilmeler (MPa)



Şekil 10. Rüzgar türbin kanadının birinci ara destek elemanındaki gerilmeler (MPa)

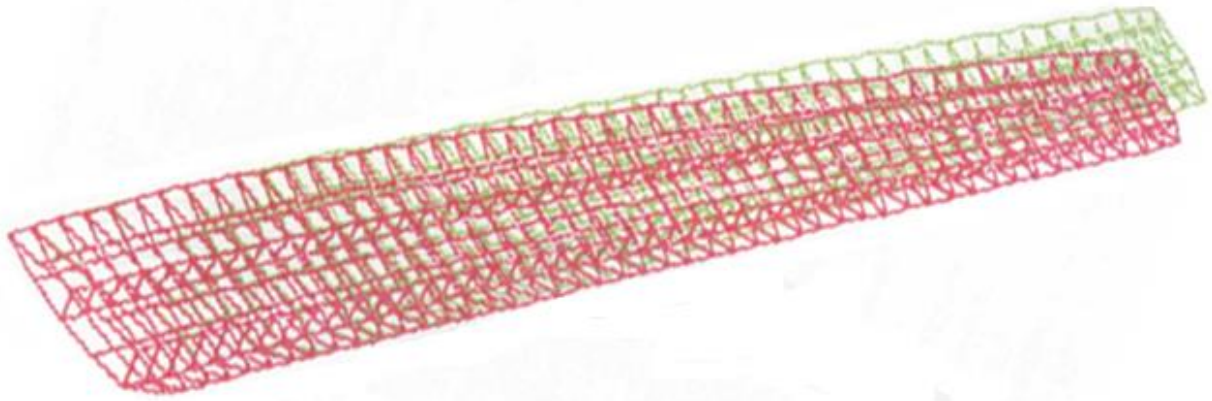




Şekil 11. Rüzgar türbin kanadının ikinci ara destek elemanındaki gerilmeler (MPa)



Şekil 12. Rüzgar türbin kanadının uç kapak elemanındaki gerilmeler (MPa)



Şekil 13. Yüksüz (yeşil renkli) ve yüklenmiş (kırmızı renkli) yapının karşılaştırması

#### 4. ÖNERİLER

Enerji kaynaklarının sınırlı olduğu ve temiz enerji kaynağı olarak rüzgar enerjisinden yararlanma düşüncesi gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için büyük önem arz etmektedir. Rüzgar türbinleri ile enerji üretiminde en önemli elemanlardan birisi türbin kanatlarıdır. Kanatların optimum dizaynı ve kanat geometrilerinin belirlenmesi türbin verimini önemli oranda etkilemektedir. Yapılan bu çalışma ile hazırlanan ve de daha evvel mevcut olan bilgisayar programları kullanılarak, çok kısa bilgiler veri olarak girildiğinde, rüzgar türbinlerinin önemli bir elemanı olan kanatların dizaynı için, rotor devir sayısı, kanat konum açısı, uç veterin kök vetere göre burulma açısı ve yapıyı oluşturan elemanların optimum kalınlıkları belirlenebilmektedir. Bu çalışmada dinamik bir analiz yapılmamıştır. Yine de vurgulamak gerekir ki bu tür bir optimizasyon çalışmasında statik analiz ile birlikte aero-elastik analiz, yorulma analizi, serbest veya zorlanmış titreşim analizlerinin de yapılması gereklidir.

#### 5. REFERANSLAR

Abboot, H. I., and Doenhoff, A. E. (1949). Theory of Wing Sections, McGraw Hill, New York.

Bayrakçı H. C. (2007). Delikanlı K., Türkiye’de Rüzgar Enerjisi ve Potansiyel Belirleme Çalışmaları, Mühendis ve Makine Cilt 48, Sayı 569, 78-80 s.

Bechly M. E., Clausen P. D. (1997). Structural Design of a Composite Wind Turbine Blade Using Finite Element Analysis, Computer and Structure, 63, (3), 639-646.

Cox K., Echtermeyer A. (2012). Structural Design and Analysis of a 10 MW Wind Turbine Blade, Energy Procedia, 24, 194-201.  
Hameed M. S., Afag S. K. (2013). Design and Analysis of a Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine Blade using Analytical and numerical techniques, Ocean Engineering, 57, 248-255.

El-Chazly N. M. (1993). Static and Dynamic Analysis of Wind Turbine Blades Using The Finite Element Method, Computer and Structure, 1993, 48, (2) 273-290.

Goeij W. C., Tooren M. J. L., Beukers A. (1999). Implementation of Bending-Torsion Coupling in the Design of a Wind Turbine Rotor Blade, Applied Energy, 63, 191-207.

Mecitoğlu Z. (1988). Takviyeli Dairesel Silindirik Kabuk Yapıların Serbest Titreşimlerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Onat C., Kepçeler T., Orgül B. O. (2004). Rüzgar Türbini Kanatlarının Katı Modellemesi, Mühendis ve Makine Cilt 45, Sayı 533, 41-47 s.

Tekeli M. (1993). Bir Rüzgar Türbin Palasının Yapı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Tekeli M. (2015). Stress Analysis of a Wind Turbine Blade Loaded with Static Load, 1nd International Conference on Science, Ecology and Technology, Iconsete, Vienna, Austria, 205.

Tekeli M. (2016). Indicating Pressure Distribution on the Surface of a Wind Turbine Blade, 2nd International Conference on Science Ecology and Technology, Iconsete, Barcelona, Spain, 1024-1032.

Younsi R., El Batanony I., Tritsch B. J., Naji H., Landjerit B. (2001). Dynamic Study of Wind Turbine Blade with Horizontal Axis, European Journal of Mechanics A/Solids, 20, 241-252.