



### **3. İzmir Rüzgar Sempozyumu** **8-9-10 Ekim 2015, İzmir**

## **Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Mekanik Tasarım Esasları- Teorik Model**

**Prof. Dr. Erdem KOÇ**

**Arş. Gör. Kadir KAYA**

**Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Bölümü**

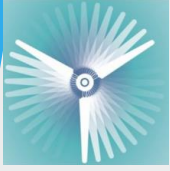
**SAMSUN**

**2015**



## SUNUŞ PLANI

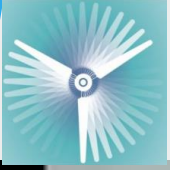
<b>1- GİRİŞ</b> .....	3
<b>2- YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI</b> .....	6
2.1- KANAT YAPISI.....	6
2.2- KANADIN MEKANİK TASARIM ESASLARI.....	8
2.2.1- KANADA ETKİ EDEN YÜKLER.....	8
2.2.2- KANADIN ZORLANMA HALLERİ VE GERİLMELER...	18
<b>3- KANADIN MEKANİK DAVRANIŞISININ BELİRLENMESİ</b> ....	22
<b>4- BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	24
4.1- KANADIN AERODİNAMİK DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	24
4.2- KANADIN MEKANİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ.....	27
4.2.1- GERİLMELER.....	27
3.4- KANATTA OLUŞAN GERİLMELER.....	29
3.5- KANADIN HASAR KONTROLÜ.....	33
<b>4- SONUÇLAR</b> .....	35

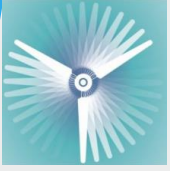


## 1- GİRİŞ

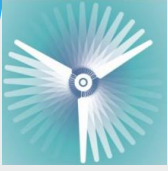
Rüzgar türbinleri son yıllarda yaygınlaşarak fosil yakıtlı enerji santralleri ile rekabet edebilir düzeye ulaşmıştır. Bu gelişmenin bir sonucu olarak, rüzgar enerjisi Ar-Ge faaliyetlerine verilen önem artmıştır. Yapılan çalışmalarla rüzgar türbinlerinde kalite, güvenilirlik ve verimliliği artırmak amaçlanmaktadır.

Rüzgar türbini ile ilgili yapılan Ar-Ge çalışmalarının bir kısmı, rüzgar türbin boyutlarının artırılarak rüzgar santrallerinden daha fazla enerji elde edilmesini sağlamayı amaçlamaktadır. Günümüzde rüzgar türbin kanat boyutları hızlı bir şekilde artarak kanatlar çok büyük boyutlara ulaşmıştır. Bu nedenle rüzgar türbin kanadı tasarımı sürecinde kanadın mekanik tasarımının değerlendirilmesi amacıyla, kanadın kullanımı esnasında maruz kalabileceği yüklerin belirlenerek, bu yükler altındaki mekanik davranışının (gerilme ve şekil değiştirmeler) incelenmesi bir zorunluluk haline gelmiştir





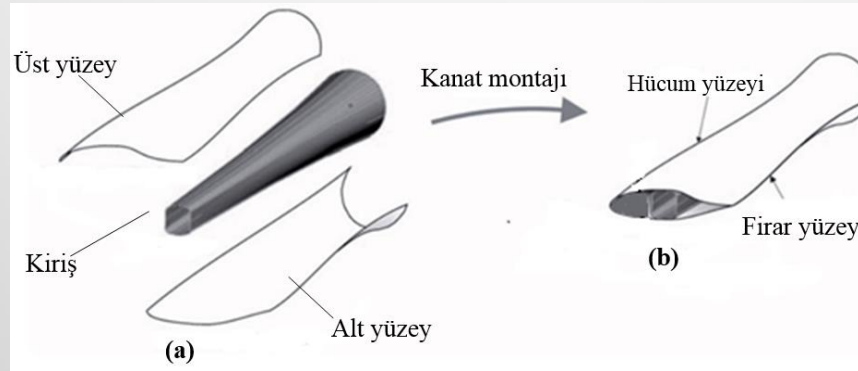
Bu çalışmada, günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinlerinde; kanada etki eden yükler, kanadın zorlanma halleri gibi mekanik tasarım parametreleri değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı rüzgar hızlarında 2 MW'lık bir kanadın mekanik davranışı incelenmiştir.



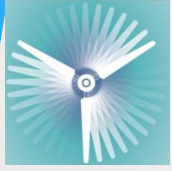
## 2. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI

### 2.1. Kanat Yapısı

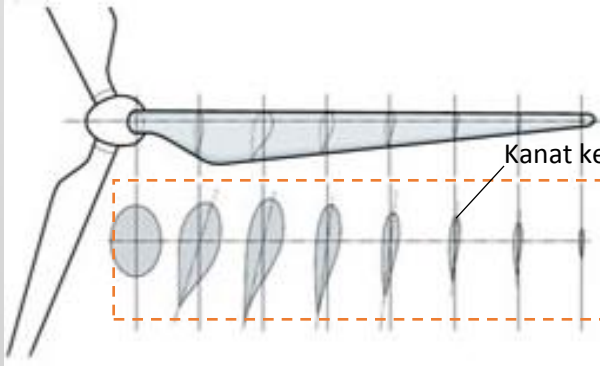
Günümüzde yaygın olarak kullanılan modern yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinlerinde kanat, dış yapı (kabuk yapı) ve iç destek elemanından (kiriş) meydana gelmektedir. Bu bileşenlerden dış yapı, kanadın aerodinamik formunu oluşturmaktadır olup tasarımında aerodinamik tasarım parametreleri dikkate alınmaktadır. İç yapı ise kanada etki eden yüklere karşı kanadın dayanımını sağlamaktadır.



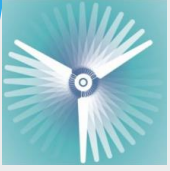
Şekil 2. Rüzgâr türbin kanat bileşenleri ve montajı



Modern rüzgar türbinlerinde kanat farklı büyüklüklerde dairesel ve aerofoil (farklı eğrilik yarıçaplarına sahip eğriler kullanılarak oluşturulan kanat profili) kesitli kısımlardan oluşmakta olup dairesel kesitli kısım bağlantı noktasına yakın bölgelerde; aerofil kesitli kısım ise kanadın diğer bölgelerinde bulunmaktadır. Kanatta kullanılan aerofoil kesitler, kanat yüzeyleri arasında basınç farkı oluşturarak türbinden güç üretimi sağlayan aerodinamik kaldırma kuvvetini elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 3’de kanadı oluşturan kesit profilleri ile aerofoilde kaldırma kuvveti oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 3. Kanadı oluşturan kesit profilleri ve kaldırma kuvvetinin oluşumu



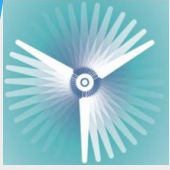
## 2.2 Kanadın Mekanik Tasarım Esasları

Kanat, türbinde en fazla zorlanmaya maruz kalan bileşenlerden birisidir. Bu nedenle kanat tasarımında kanada etki eden yükler ve kanadın zorlanma halleri gibi kanadın mekanik tasarım parametrelerinin değerlendirilmesi gerekmektedir olup bu kısımda bu parametreler incelenmiştir.

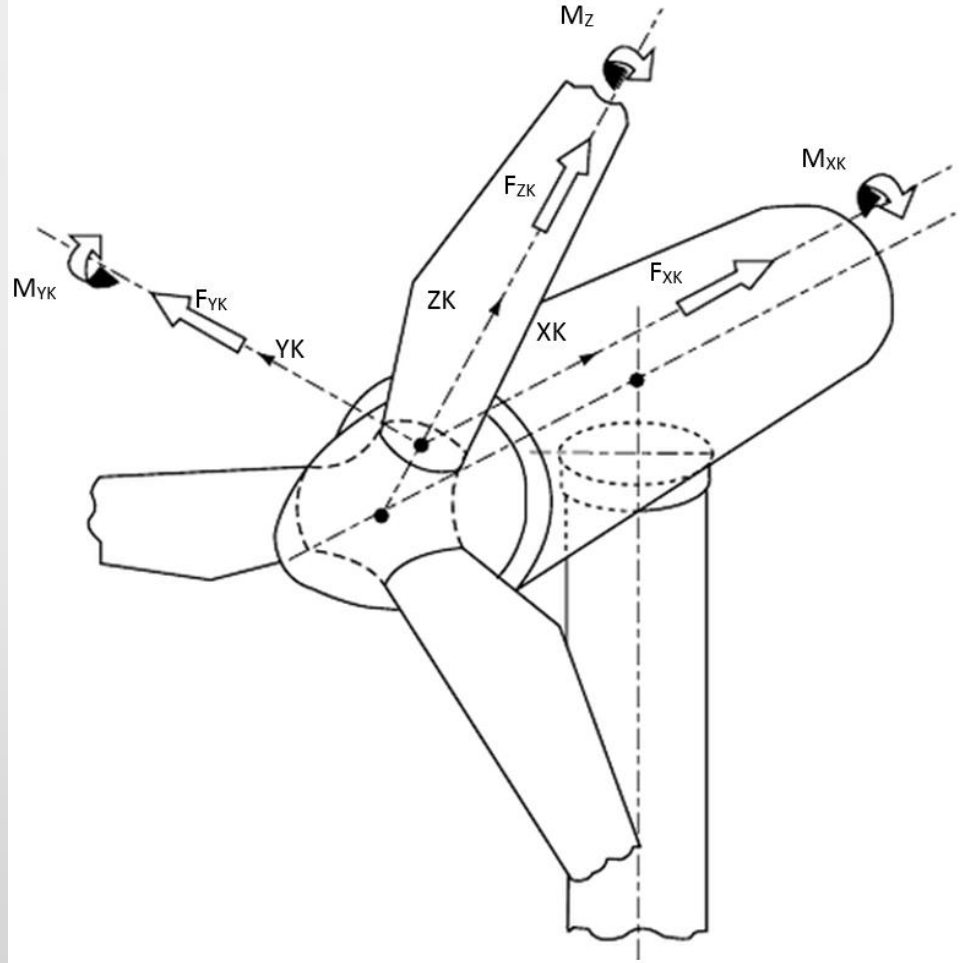
### 2.2.1 Kanada Etki Eden Yükler

Rüzgâr türbin kanatları, rüzgârın neden olduğu **aerodinamik yükler**, kanadın ağırlığından kaynaklanan **yerçekimi yükleri**, kanadın hareketinden kaynaklanan **santrifüj kuvvetleri**, kanadın ve türbinin yön değiştirmesinden kaynaklanan **jiroskop kuvvetleri** ve **işletme koşullarından kaynaklanan çeşitli yükler** olarak sınıflandırılmaktadır. Rüzgâr türbinleri bu yükler altında öngörülen kullanım ömründe sağlıklı bir şekilde çalışabilmelidir.

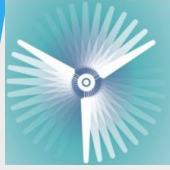




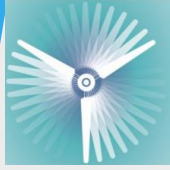
Bu nedenle kanat tasarımında kanada etki yüklerin değerlendirilmesi gerekmekte olup kanada etki eden kuvvetleri ve kanadın zorlanma hallerini değerlendirebilmek için kanat koordinat sistemi tanımlanmıştır.



Şekil 4. Kanat koordinat sistemi



Kanat koordinat sisteminde; XK, YK ve ZK koordinat düzlemlerini,  $F_{XK}$ ,  $F_{YK}$  ve  $F_{ZK}$  sırasıyla XK, YK ve ZK yönlerindeki kuvvetleri,  $M_{XK}$ ,  $M_{YK}$  ve  $M_{ZK}$  ise XK, YK ve ZK yönlerindeki momentleri temsil etmektedir. Kanada etki eden yüklerden; **aerodinamik yükler a**, **yerçekimi yükleri y**, **santrifüj (atalet) yükleri ise s** sembolüyle gösterilmektedir.

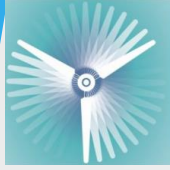


Rüzgâr türbin kanadına etki eden aerodinamik yükler rüzgâr kaynaklı olup **kaldırma kuvveti** ( $F_L$ ) ve **sürükleme kuvveti** ( $F_D$ ) olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu kuvvetlerden kaldırma kuvveti rüzgara dik yönde, sürükleme kuvveti ise rüzgar yönünde oluşmakta olup bu kuvvetlerin büyüklüğü aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir.

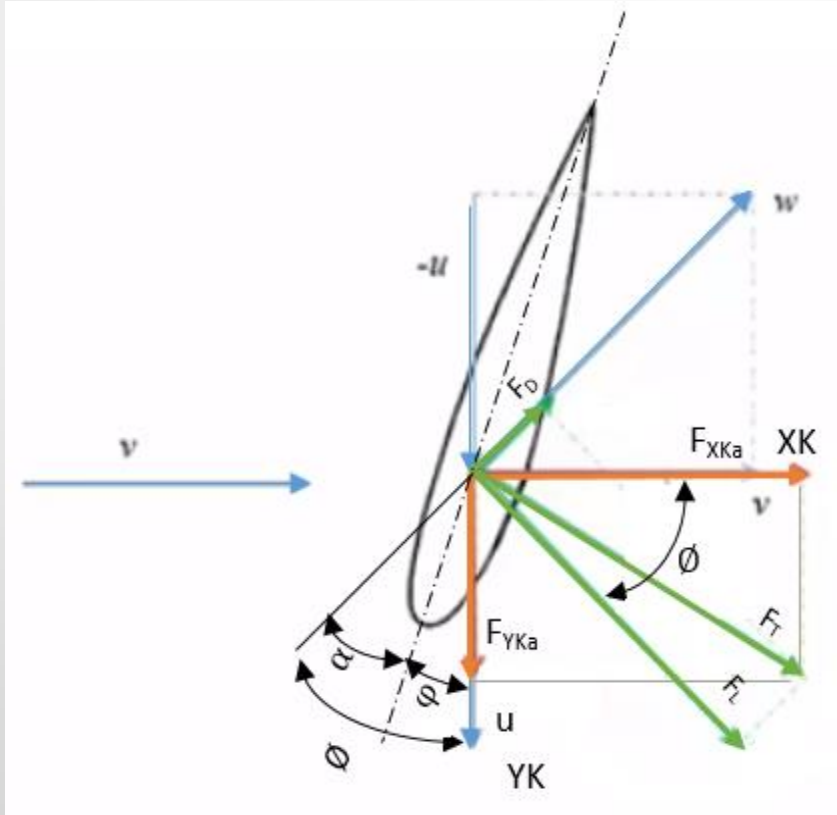
$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho c W^2 \quad (1)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho c W^2 \quad (2)$$

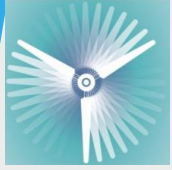
Burada  $C_L$  kaldırma kuvveti katsayısı,  $C_D$  sürükleme kuvveti katsayısı,  $\rho$  havanın yoğunluğu,  $c$  aerofoil profil hattı uzunluğu,  $W$  ise izafi rüzgâr hızıdır.  $C_L$  ve  $C_D$  katsayıları farklı Reynolds sayılarında, farklı hücum açıları için yapılan deneyler sonucu belirlenmektedir.



Kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin bileşkesinden oluşan toplam aerodinamik kuvvet, kanat koordinat sisteminde normal kuvvet ( $F_{XKa}$ ) ve teğetsel kuvvet ( $F_{YKa}$ ) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Şekil 5). Şekilde kanada etki eden izafi hızın ( $W$ ) kanat koordinatı  $YK$  ile yaptığı açı,  $\alpha$  hücum açısı ve  $\phi$  bağlama açısıdır.



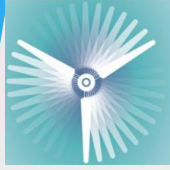
Şekil 5. Kanat koordinat sisteminde kanada etki eden normal ve teğetsel kuvvetler



Şekildeki normal kuvvet ( $F_{xKa}$ ) ve teğetsel kuvvet ( $F_{yKa}$ ) aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak bulunmaktadır.

$$F_{xKa} = \frac{1}{2} \rho c W^2 (C_L \cos \varnothing + C_D \sin \varnothing) \quad (3)$$

$$F_{yKa} = \frac{1}{2} \rho c W^2 (C_L \sin \varnothing - C_D \cos \varnothing) \quad (4)$$



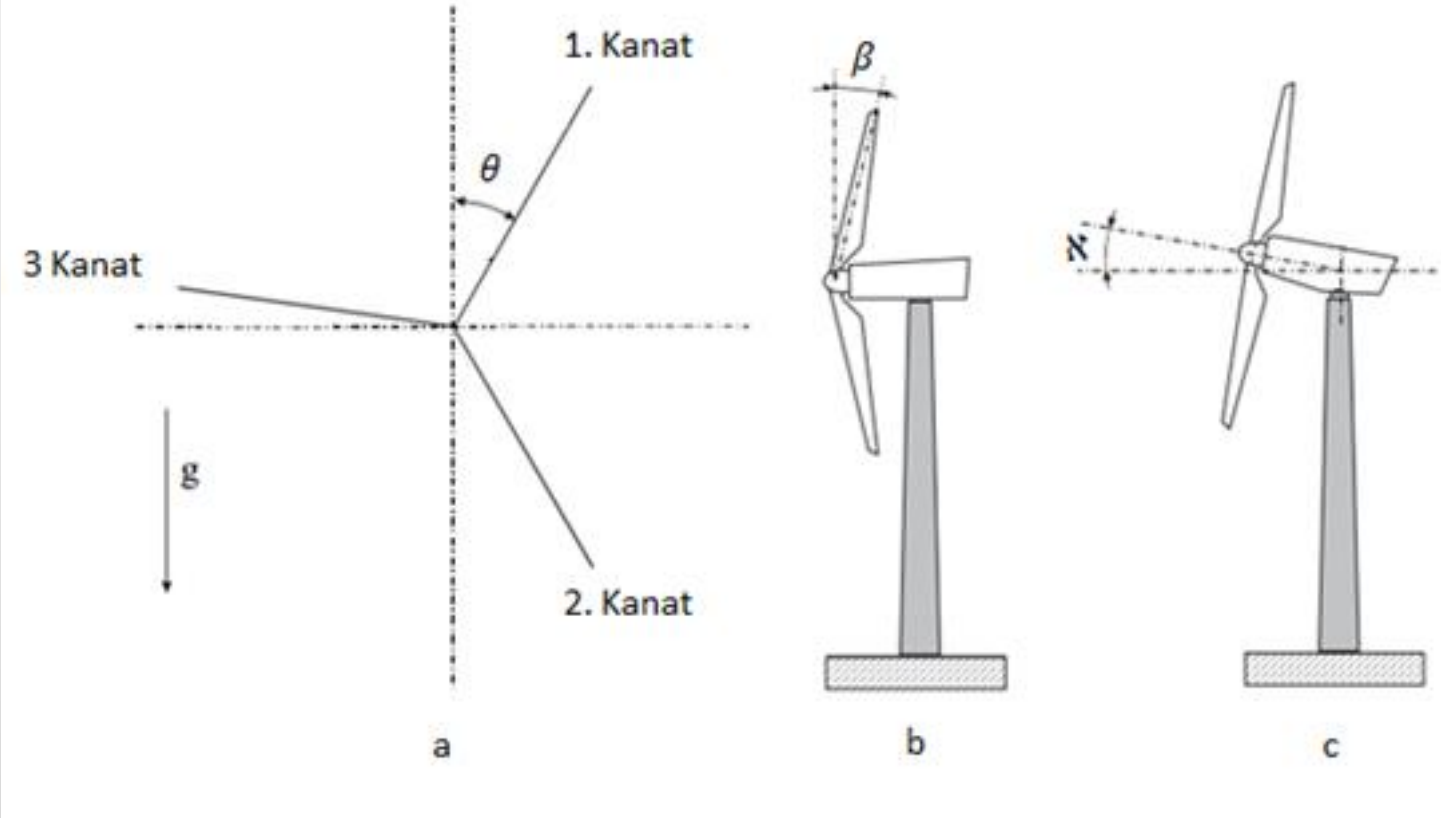
**Yerçekimi yükleri ( $F_y$ )**, kanadın ağırlığından kaynaklanan yükler olup kanat koordinat sistemindeki bileşenleri aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_{xKy} = \bar{m}g \cos \theta \sin \beta \cos \chi \quad (5)$$

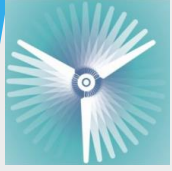
$$F_{yKy} = \bar{m}g \sin \theta \cos \chi \quad (6)$$

$$F_{zKy} = \bar{m}g \cos \theta \cos \beta \cos \chi \quad (7)$$

Burada  $\bar{m}$  birim kanat kesit kütlesi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\theta$  kanat azimuth açısı,  $\beta$  rotor koniklik açısı,  $\chi$  ise kanat eğim açısıdır [16]. Kanat azimuth açısı, kanadın saat yönünde dönüşü sırasında kanat ile kanadın düşey konumu arasında kalan açıdır (Şekil 6a). Koniklik açısı, kanat ile düşey düzlem arasındaki açıdır (Şekil 6b). Eğim açısı ise rüzgâr türbininin kanat ve gövde kısımlarının yatay düzlemle yaptığı açıdır (Şekil 6c).



Şekil 6. Kanat azimuth, koniklik ve eğim açıları [11]



## Santrifüj (Atalet) Yükleri

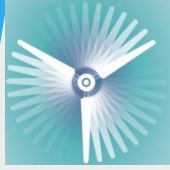
Kanadın kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi nedeniyle oluşan **santrifüj yükleri** ( $F_s$ ), kanat koordinat sisteminde ZK ve XK eksenlerinde  $F_{ZKs}$  ve  $F_{XKs}$  bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden  $F_{ZKs}$  santrifüj çekme kuvveti,  $F_{XKs}$  ise santrifüj kesme kuvveti olup bu bileşenler aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir.

$$F_{ZKs} = \bar{m}\omega^2 r \cos \beta \quad (8)$$

$$F_{XKs} = \bar{m}\omega^2 r \sin \beta \quad (9)$$

Burada  $\bar{m}$  birim kanat kesit kütlesi,  $\omega$  kanadın açısal hızı,  $r$  kanat kesitinin kanat kök bölgesine olan uzaklığı,  $\beta$  ise koniklik açısıdır.





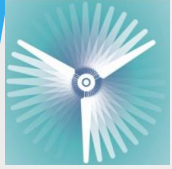
Kanat ayrıca dönme açısındaki değişim (pitch mekanizmasının hareketi) ve yönelme açısındaki değişim (yaw mekanizmasının hareketi) nedeniyle **jiroskop kuvvetleri** ve işletme döneminde meydana gelen hatalar nedeniyle oluşabilecek çeşitli kuvvetlere de maruz kalmaktadır. Ancak bu kuvvetlerin büyüklüğü diğerlerinin yanında çok küçük değerlerde olduğundan genellikle ihmal edilmektedir.

Kanat koordinat sisteminde kanada, XK yönünde aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj yükler; YK yönünde aerodinamik ve yerçekimi yükleri; ZK yönünde ise yerçekimi ve santrifüj yükler etki etmektedir.

$$F_{XK} = F_{XKa} + F_{XKy} + F_{XKs} \quad (10)$$

$$F_{YK} = F_{YKa} + F_{YKy} \quad (11)$$

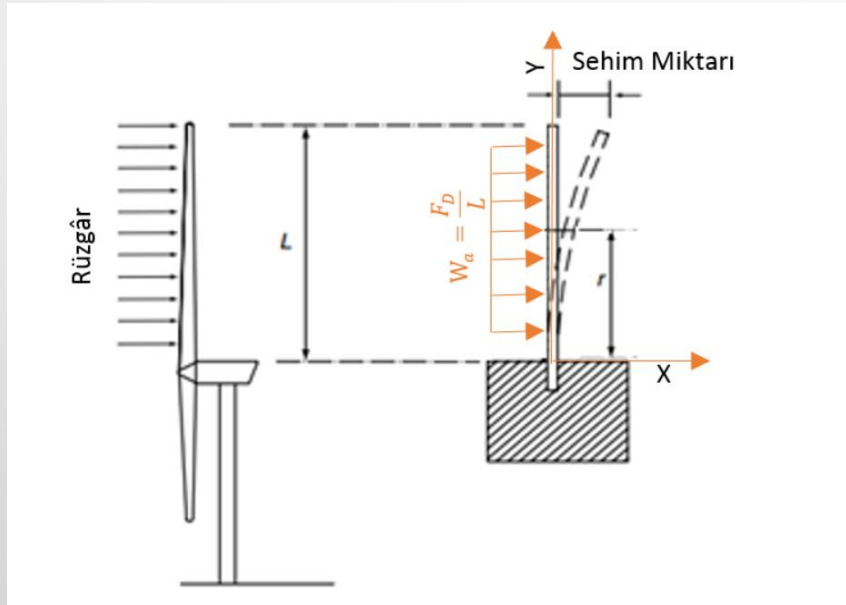
$$F_{ZK} = F_{ZKy} + F_{ZKs} \quad (12)$$



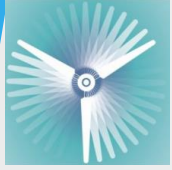
## 2.2.2 Kanadın Zorlanma Halleri ve Oluşan Gerilmeler

### Aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme (flapwise bending)

Rüzgar türbin kanatları, kanadın hücum tarafına etki eden aerodinamik yükler nedeniyle eğilme momentine maruz kalmaktadır. Bu durumda kanadın eğilme halinin değerlendirilmesi için kanat bir ankastre kiriş olarak kabul edilmektedir. Kanadın aerodinamik yükler nedeniyle eğilmesi ve bu durum için kullanılan yapısal model Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Aerodinamik yükler nedeniyle kanadın eğilmesi



Kanat, aerodinamik sürüklenme kuvveti ( $F_D$ ) etkisiyle eğilmeye zorlanmaktadır. Bu kuvvet kanadın bütün yüzeyine aynı oranda etki ettiğinden kanadı eğmeye zorlayan kuvvet, sürüklenme kuvvetinin birim uzunluğuna tekabül eden yayılı yük olarak değerlendirilmektedir ( $F_D/L$ ).

Kanadın herhangi bir noktasındaki ( $r$ ) eğilme momenti değişimi;

$$M_{eğ} = -\frac{1}{2} W_a (L-r)^2 \quad (13)$$

Seçilen kanat kesitinde eğilme gerilmesinin değerlendirilmesinde temel kiriş eğilme bağıntısından yararlanılmakta olup, bu bağıntı;

$$\sigma_{eğ} = \frac{M_{eğ} y}{I_{xx}} = \frac{E y}{\rho} \quad (14)$$

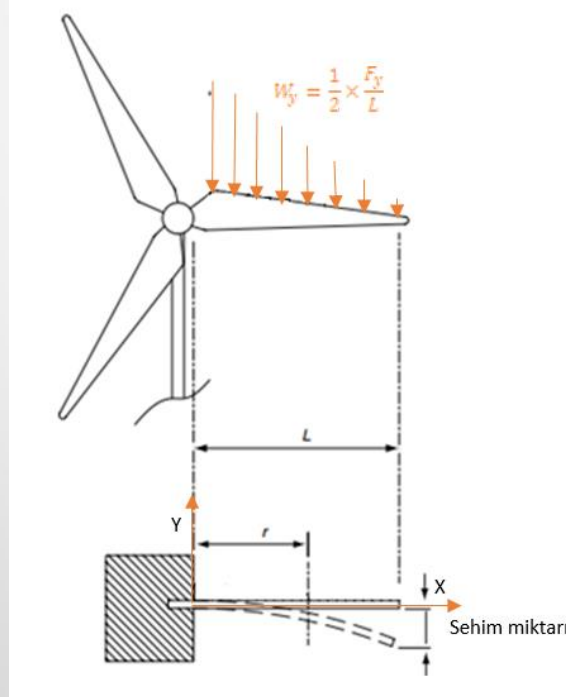
Burada  $y$  tarafsız eksene olan mesafe,  $E$  elastisite modülü,  $\rho$  eğrilik yarıçapı,  $I_{xx}$  ise kesit atalet momenti olup kesit atalet momenti;

$$I_{xx} = \iint (y - y_1)^2 dx dy \quad (15)$$

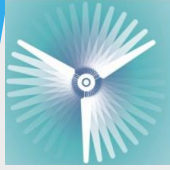


## Yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme (Edgewise Bending)

Rüzgar türbin kanatları, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri nedeniyle de eğilmeye zorlanmaktadır. Burada eğilme halinin değerlendirilebilmesi amacıyla kanat bir ankastre kiriş olarak kabul edilmekte olup eğilme halinin değerlendirilmesinde kullanılan yapısal model Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Yerçekimi yükleri nedeniyle kanadın eğilmesi

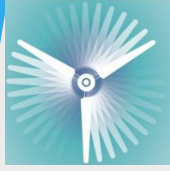


Kanadın ağırlığı, kanat bağlantı noktasından kanat ucuna doğru azaldığından kanat ağırlığı üçgen yayılı yük ( $W_y$ ) olarak değerlendirilmiş olup kanadın kendi ağırlığı nedeniyle kanatta oluşan eğilme momenti;

$$M_{eğ} = -\frac{1}{2}W_y(L-r)^2$$

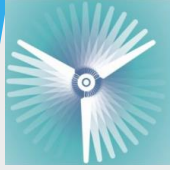
Kanatta yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme gerilmesini belirlemek için aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan denklemlerden (Denklem 13 ve 14) yararlanılmaktadır.

Kanada etki eden yükler statik yükler değildir. Bu nedenle kanatlar öngörülen kullanım ömrü (20-25 yıl) içerisinde  $10^8$  den fazla tekrarlanan sürekli yüklere maruz kalmakta, kanatta yorulma olayı meydana gelebilmektedir. Günümüzde büyük boyutlarda kanatlar kullanıldığından kanada etki eden yerçekimi yükleri de artmaktadır. Bu nedenle kanadın mekanik tasarımında yorulma analizinin de yapılması gerekmektedir.

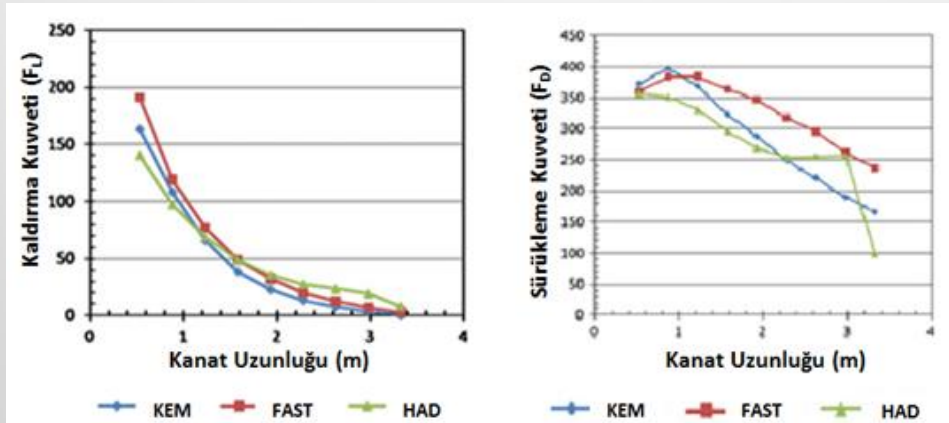


### 3. KANADIN MEKANİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Rüzgâr türbinleri gibi akışkan kaynaklı yüklere maruz kalan sistemlerin mekanik davranışının değerlendirilmesi için **Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI)** analizi yapılmalıdır. Akışkan-yapı etkileşimi analizi, sistemin aerodinamik davranışın belirlenmesi ve bu davranış dikkate alınarak sistemin mekanik davranışının değerlendirilmesi işlemidir.

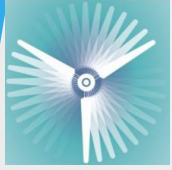


Rüzgâr türbinlerinde, kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesi amacıyla çeşitli aerodinamik teorilerden (Kanat Elemanı Momentum Teorisi(KEM)), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nden (HAD) ve geliştirilen özel yazılımlardan (FAST) yararlanılmaktadır. 3.5 m'lik bir kanada etki eden aerodinamik yükler Şekil 9'da verilmiştir. Şekil değerlendirildiğinde KEM, FAST ve HAD ile belirlenen kuvvet dağılımlarının birbirine benzer olduğu görülmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda FAST ve HAD ile belirlenen rüzgâr yüklerinin gerçek rüzgâr yüklerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nden (HAD) yararlanılmıştır.



Şekil 9. Farklı yaklaşımlarla belirlenen 3.5 m'lik kanada etki eden aerodinamik yükler

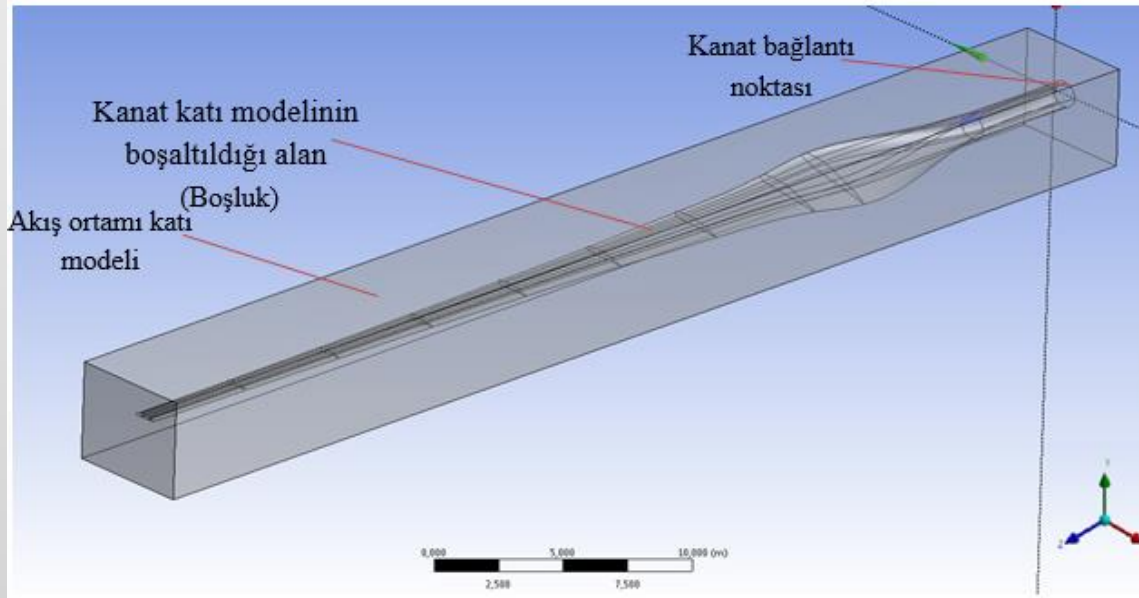




## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

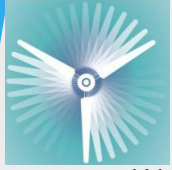
### 4.1 Kanadın Aerodinamik Davranışının Değerlendirilmesi

HAD ile kanadın aerodinamik performansını belirlemek için akış ortamının katı modeli oluşturulmalı ve kanat etrafındaki akışın simülasyonu yapılarak kanat yüzeyine etki eden basınç dağılımları belirlenmelidir. Şekil 10’da kanat etrafındaki belli bir geometriden kanat katı modelinin çıkarılmasıyla elde edilen akış ortamı katı modeli gösterilmiştir [5].

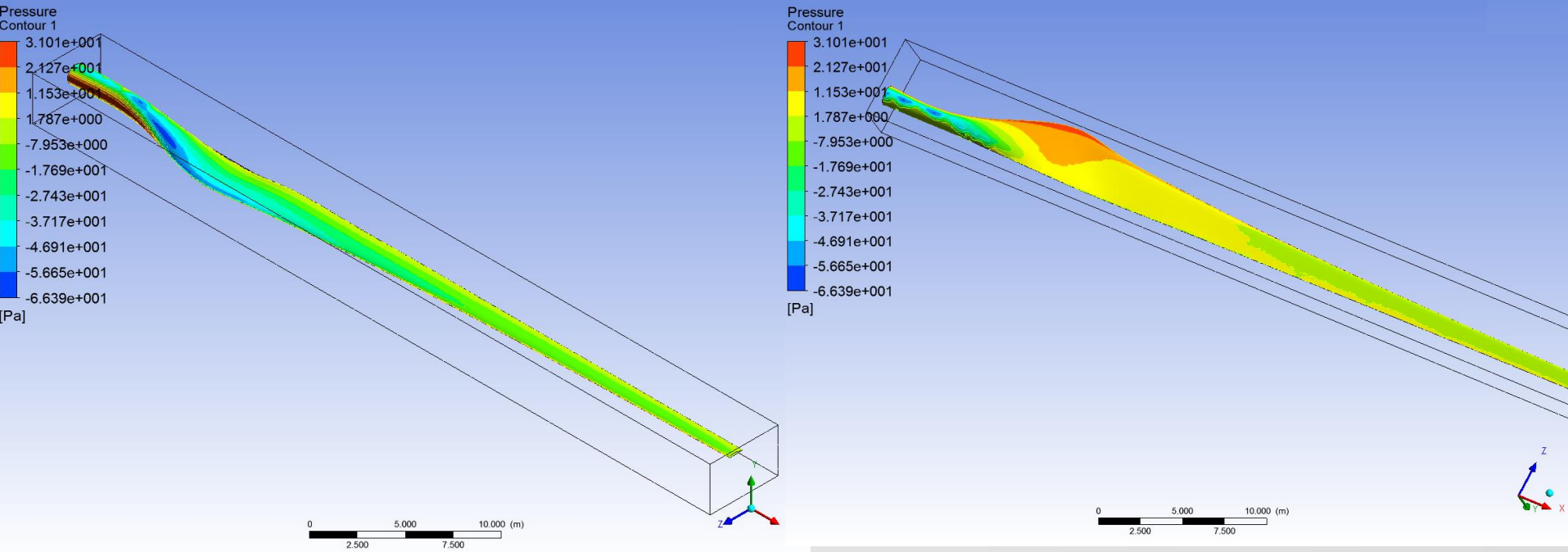


Şekil 10. Akış ortamı katı modeli [5]

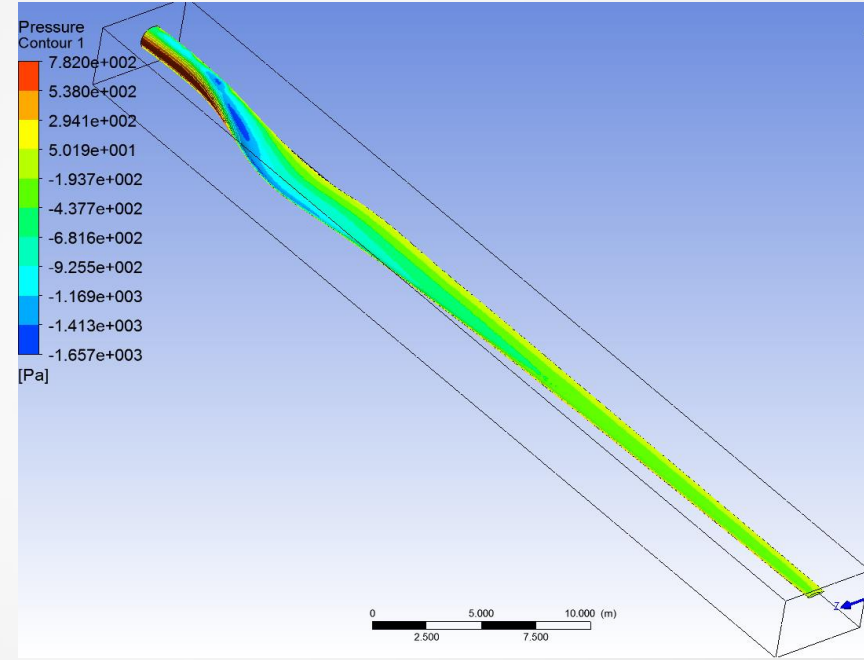
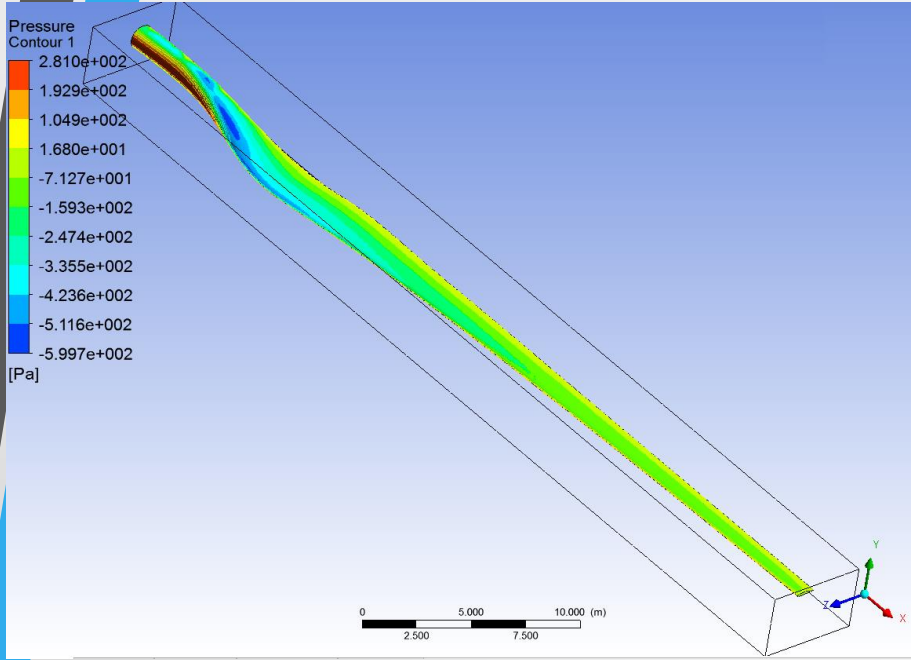




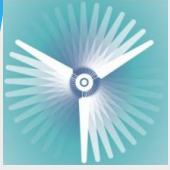
5 m/s'lik rüzgar hızında kanada etki eden basınçlar Şekil 11'de verilmiş olup şekildeki farklı renkli bölgeler, kanat yüzeylerine farklı büyüklüklerde basınçların etki ettiğini göstermektedir. Şekilden kanadın üst yüzeyinde negatif; alt yüzeyinde ise pozitif basınçların oluştuğu, gözlemlenmiş olup bu durum kanatta aerodinamik kaldırma kuvvetinin oluşumunu sağlamaktadır.



Şekil 11. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanadın üst ve alt yüzeyine etki eden basınçlar



**Şekil 12.** Farklı rüzgar hızlarında kanadın üst ve alt yüzeyine etki eden basınçlar



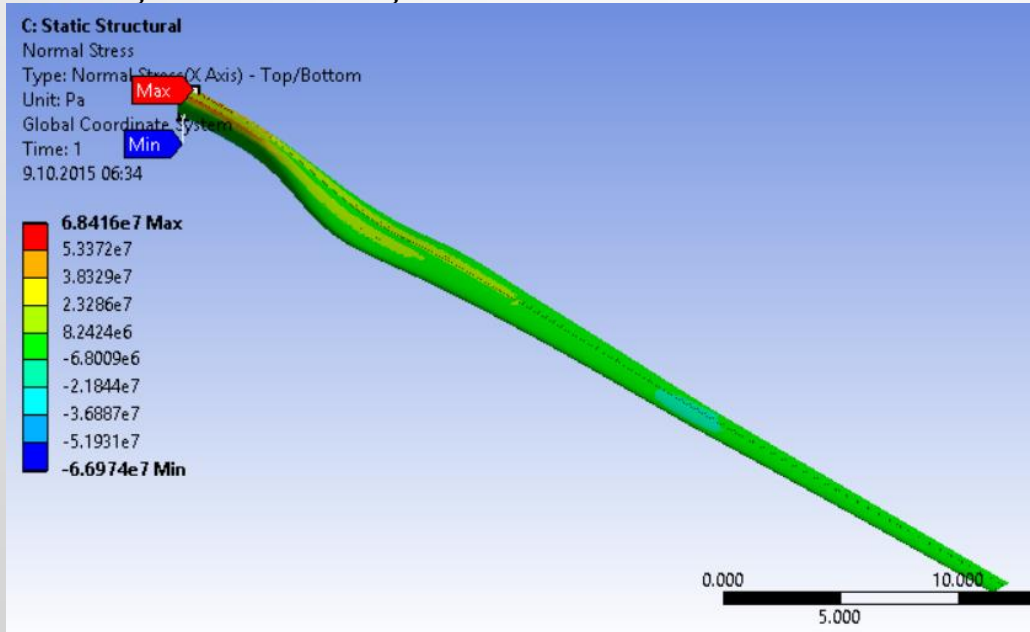
## 4.2 Kanadın Mekanik Davranışının Belirlenmesi

Kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi için kanadın farklı rüzgar hızlarındaki kanatta oluşan gerilmeler ile kanadın şekil değişimi belirlenmelidir.

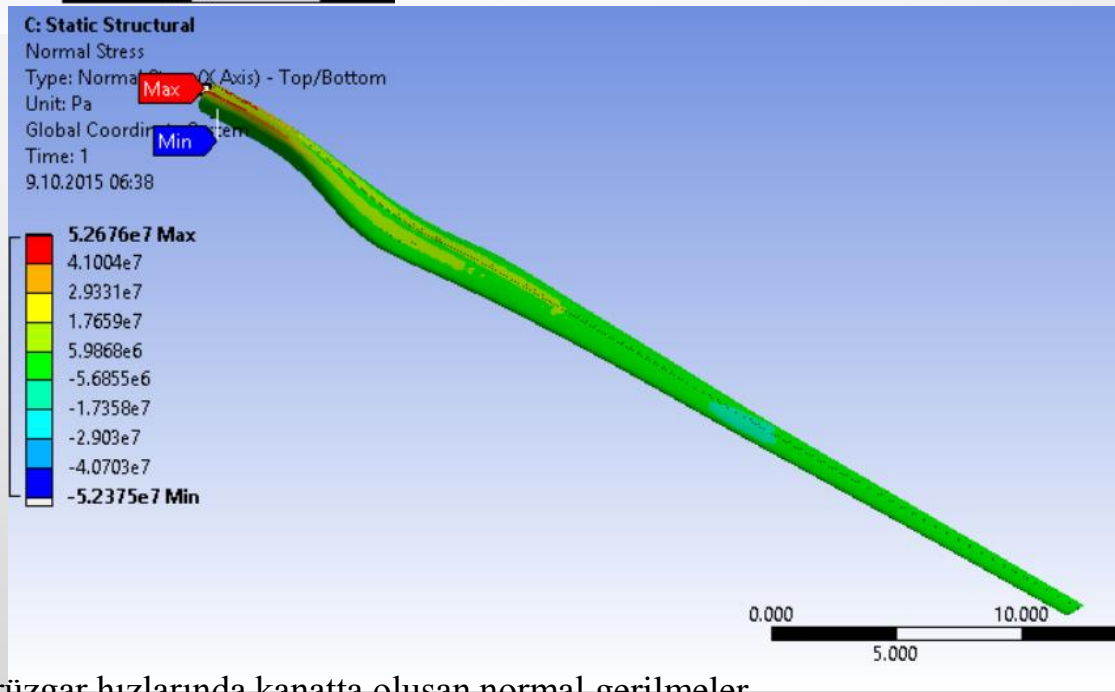
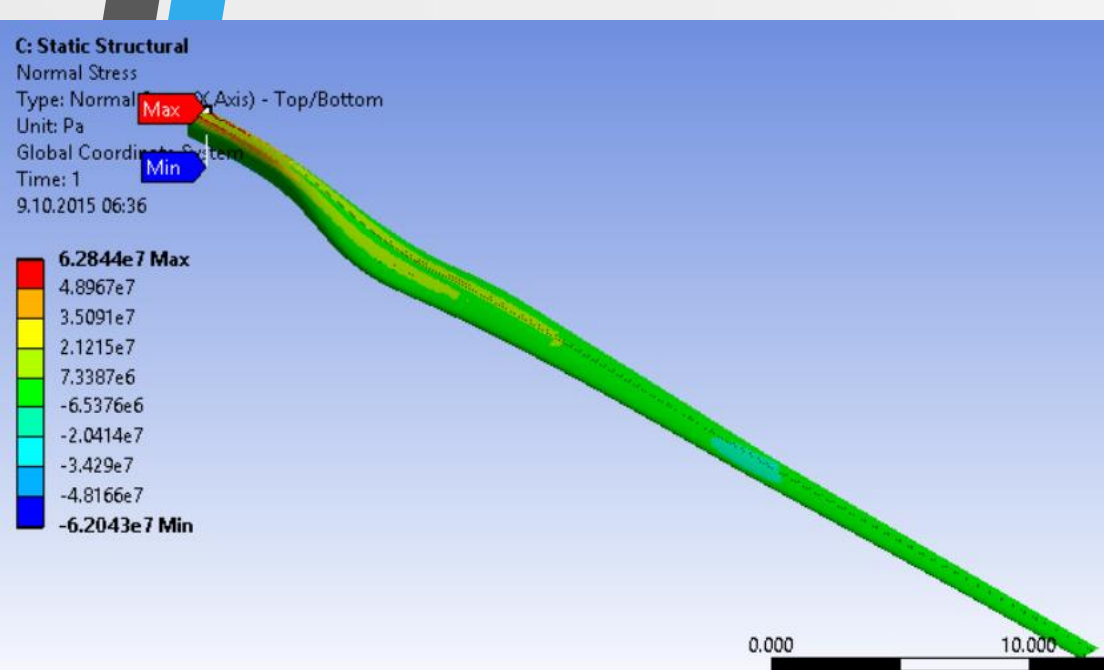
### 4.2.1 Gerilmeler

#### Normal Gerilme

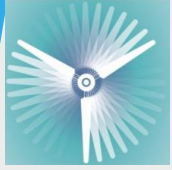
Rüzgar türbin kanatlarında maruz kalınan yükler nedeniyle normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri oluşmakta, bu gerilmelerin malzemeye özgü sınır değerini aşması durumunda ise yapıda hasar oluşmaktadır. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan normal gerilmeler şekilde verilmiştir.



Şekil 13. 5 ms'lik rüzgar hızında kanatta oluşan normal gerilmeler  
3. İZMİR RÜZGAR SEMPOZYUMU, 8-9-10 EKİM 2015, İZMİR

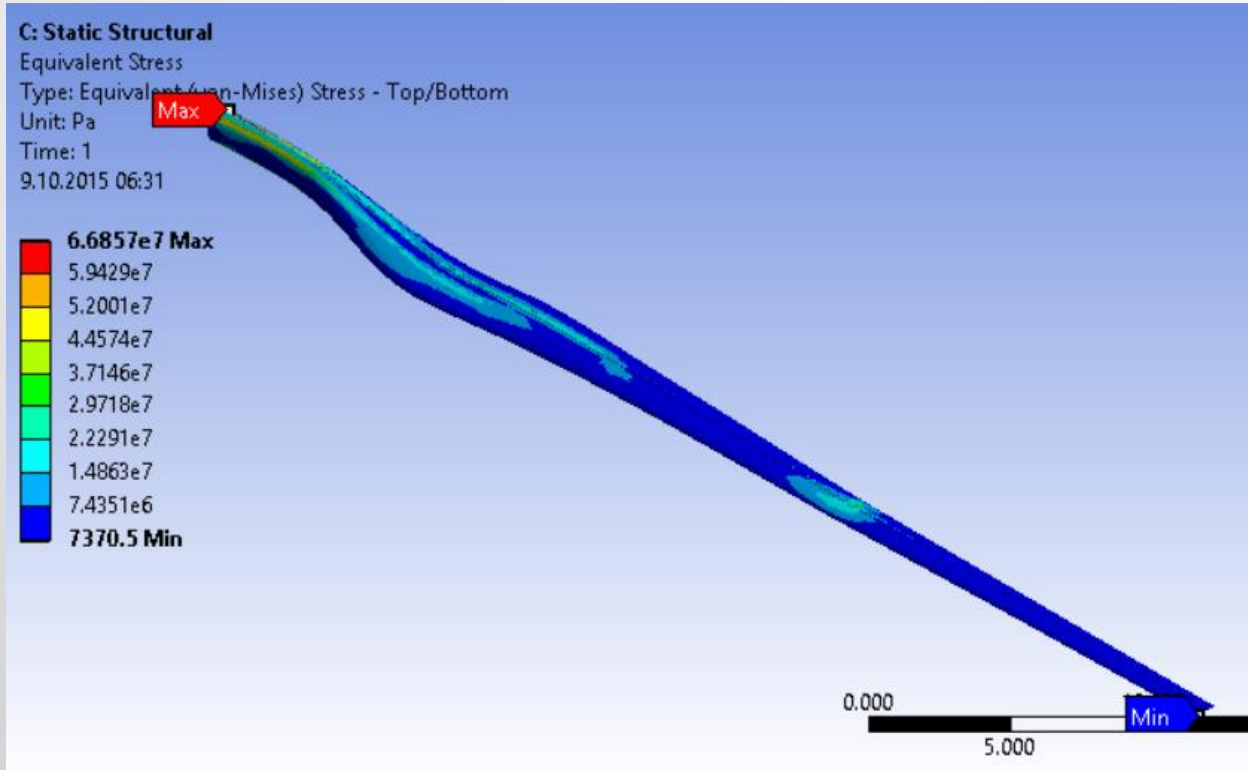


Şekil 14. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan normal gerilmeler

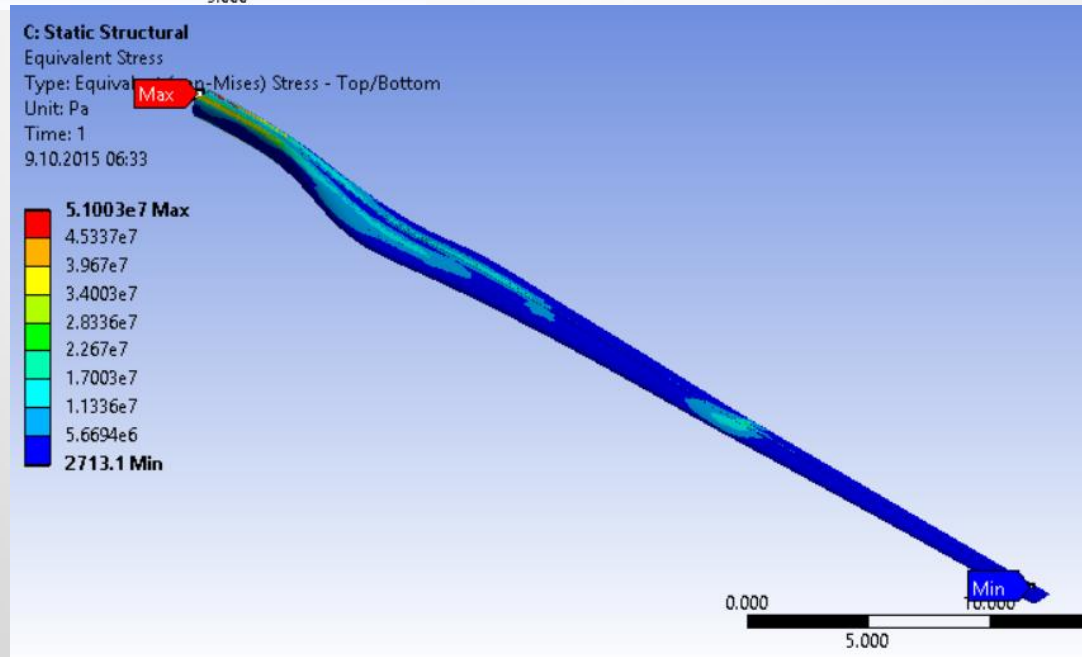
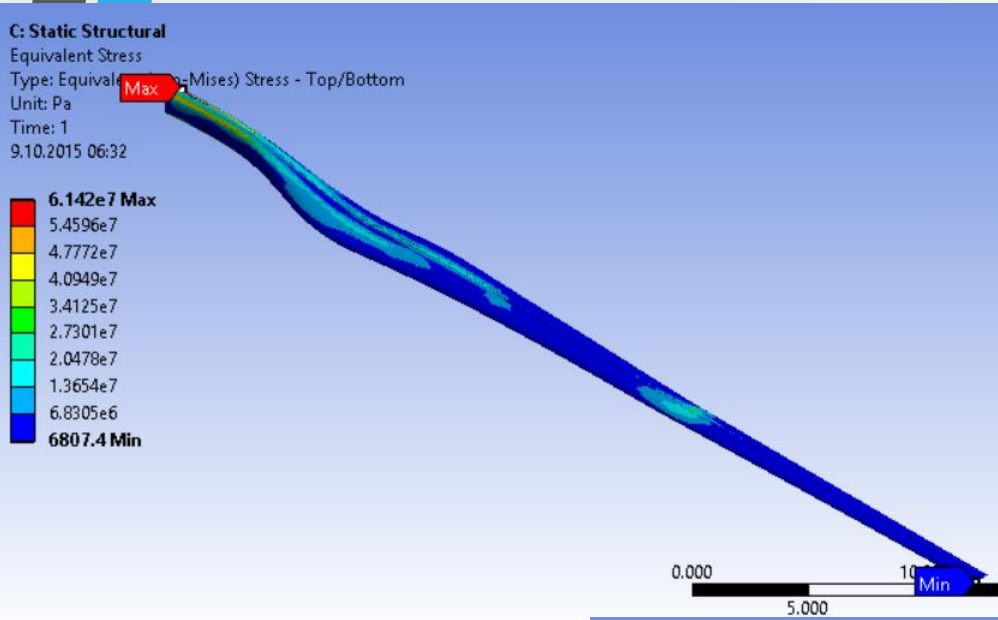


## Eşdeğer Gerilme (Von-Mises Gerilmesi)

Kanadın mekanik davranışını değerlendirirken kanatta oluşan gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi tek başına yapacağı düşünülen eşdeğer gerilmeler de dikkate alınmalıdır. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmeleri Şekil 15'de verilmiştir.

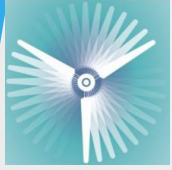


Şekil 15. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler



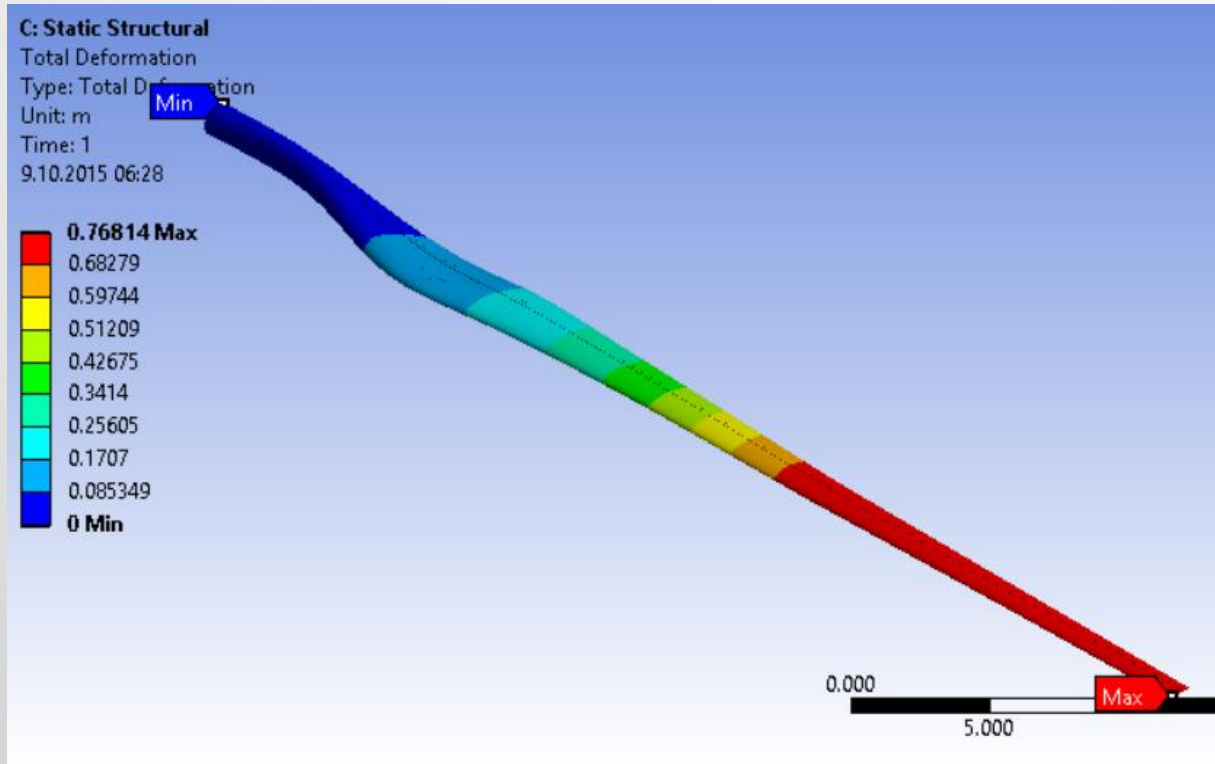
Şekil 16. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler



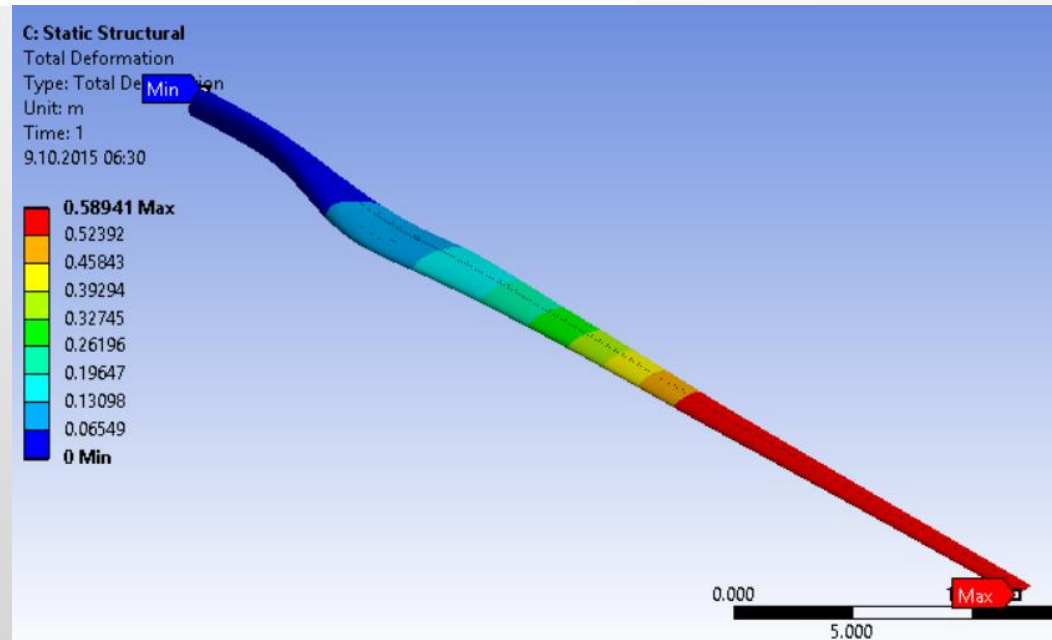
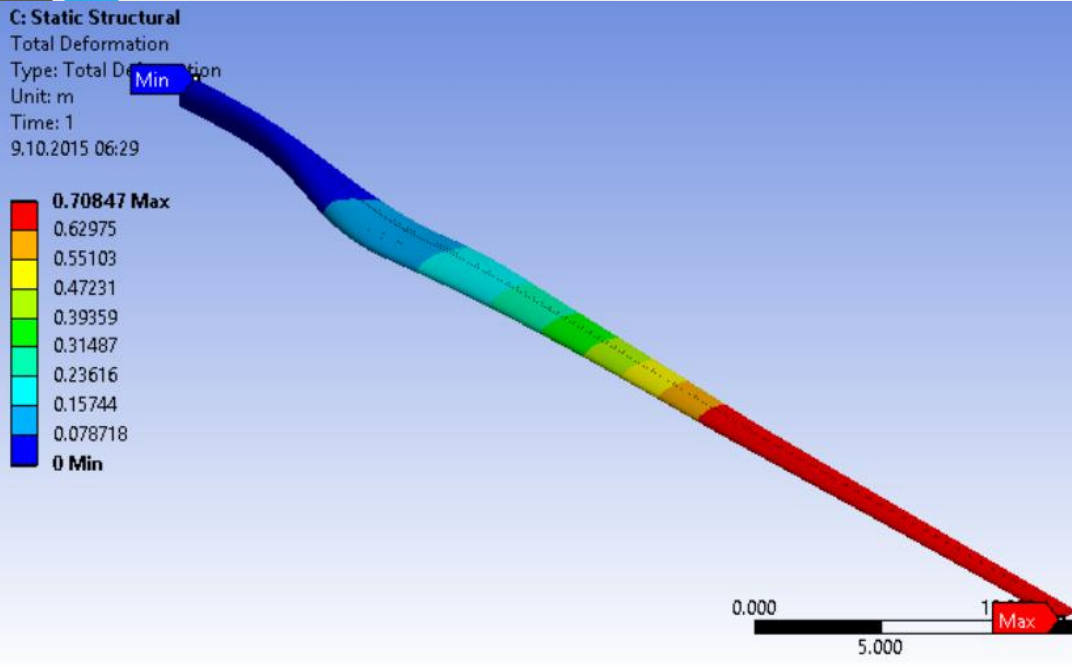


## Kanadın şekil değişimi (deformasyon)

Kanat, maruz kalınan yükler nedeniyle farklı yönlerde şekil değişimine uğramaktadır. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan toplam şekil değişimi (x, y ve z yönlerindeki şekil değişiminin bileşkesi) Şekil 17'de verilmiştir.

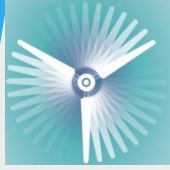


Şekil 17. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanadın şekil değişimi



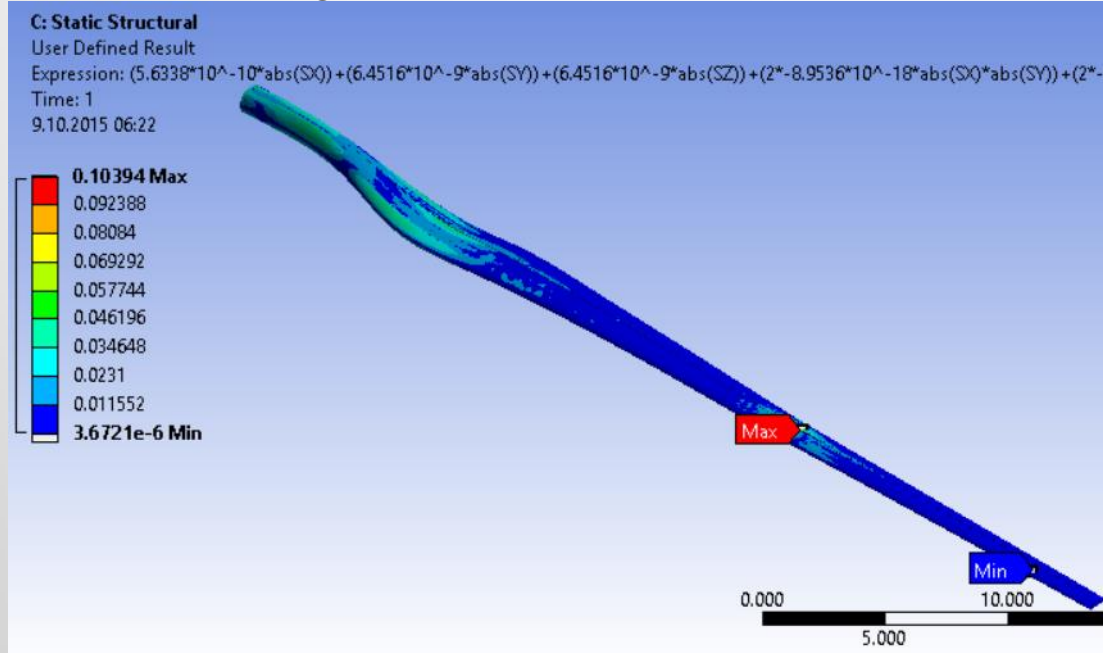
Şekil 18. Farklı rüzgar hızlarında kanadın şekil değişimi



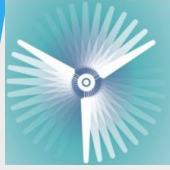


## 4.2.2 Kanadın hasar kontrolü

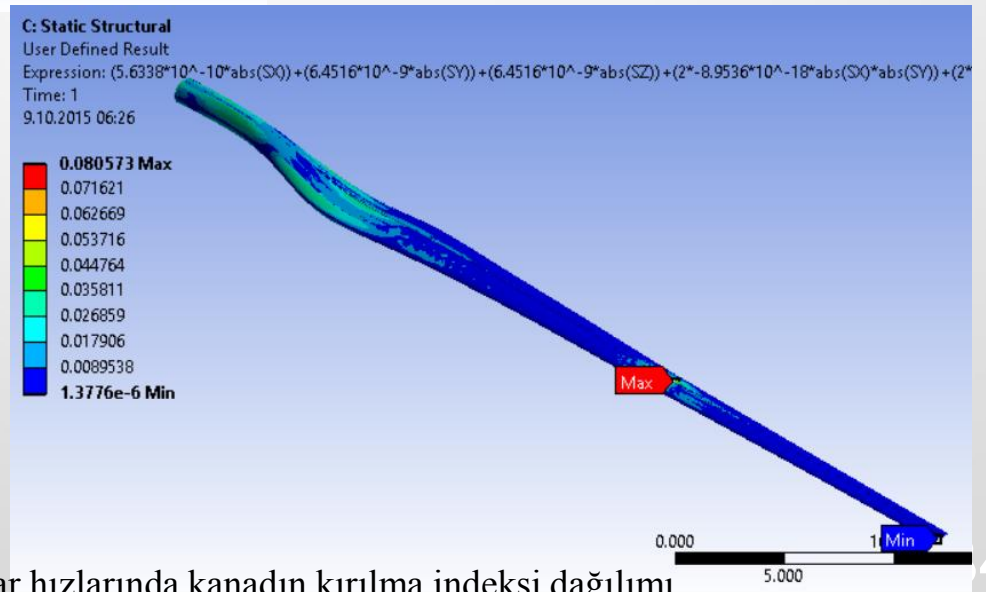
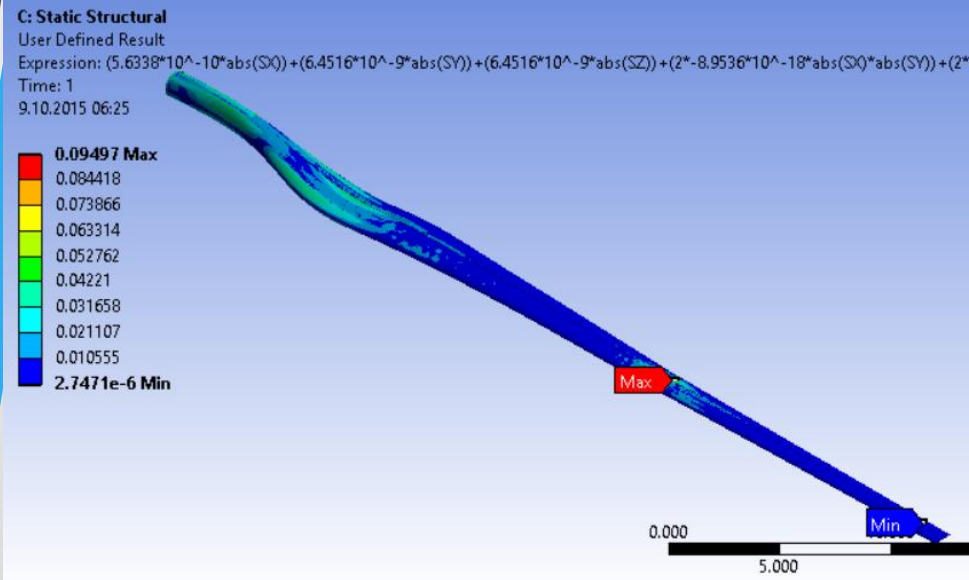
Rüzgâr türbin kanatları gibi kompozit malzemelerde yapıda oluşabilecek hasarın kontrolünde çeşitli hasar kontrol kriterleri kullanılmakta olup bu kriterlerden Tsai-Wu kriterine göre hasar kontrolünde kırılma indeksinden (KI) yararlanılmaktadır. Bu kritere göre yapıda hasar olmaması için kırılma indeksi değerinin 1'i geçmemesi gerekmektedir. 5 m/s'lik rüzgar hızında kanadın kırılma indeksi dağılımı Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 19. Rüzgarsız ortamda kanadın kırılma indeksi dağılımı

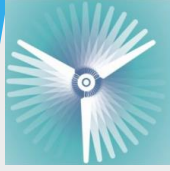


## Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Mekanik Tasarım Esasları- Teorik Model



Şekil 19. Farklı rüzgar hızlarında kanadın kırılma indeksi dağılımı

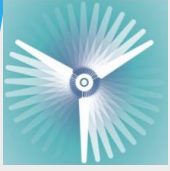
3. İZMİR RÜZGAR SEMPOZYUMU, 8-9-10 EKİM 2015, İZMİR



## 5. SONUÇ

Rüzgâr türbinlerinde kanadın işletme koşullarında sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kanat tasarımı yapılırken kanadın kullanım ömrü boyunca maruz kalabileceği yükler, kanadın zorlanma halleri gibi mekanik tasarım kriterlerinin dikkate alınması gerekmektedir olup bu çalışmada kanadın mekanik tasarımı genel olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Rüzgar türbinlerinde kanada rüzgardan kaynaklanan aerodinamik yükler, kanadın ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri, kanadın hareketinden kaynaklanan santrifüj yükleri, kanadın ve türbinin yön değiştirmesinden kaynaklanan jiroskop kuvvetleri ile işletme koşullarından kaynaklanan çeşitli yükler etki etmektedir.
2. Kanada, kanat koordinat sistemine göre XK yönünde aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj yükler, YK yönünde aerodinamik ve yerçekimi yükleri, ZK yönünde ise yerçekimi ile santrifüj yükler etki etmektedir.



3. Kanat aerodinamik yükler nedeniyle rüzgar yönünde, yerçekimi yükleri nedeniyle ise yer çekim ivmesi yönünde eğilmeye zorlanmaktadır.
4. Bu çalışmada anlatılan akışkan-yapı etkileşim analiz modeliyle kanadın farklı rüzgar hızlarındaki aerodinamik performansı ve mekanik davranışı belirlenebilmektedir.



**DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜRLER...**

