

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ MEKANİK TASARIM ESASLARI – TEORİK MODEL

Erdem Koç¹, Kadir Kaya²

^{1,2} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun

¹erdemkoc@omu.edu.tr, ²kadir.kaya@omu.edu.tr

ÖZET

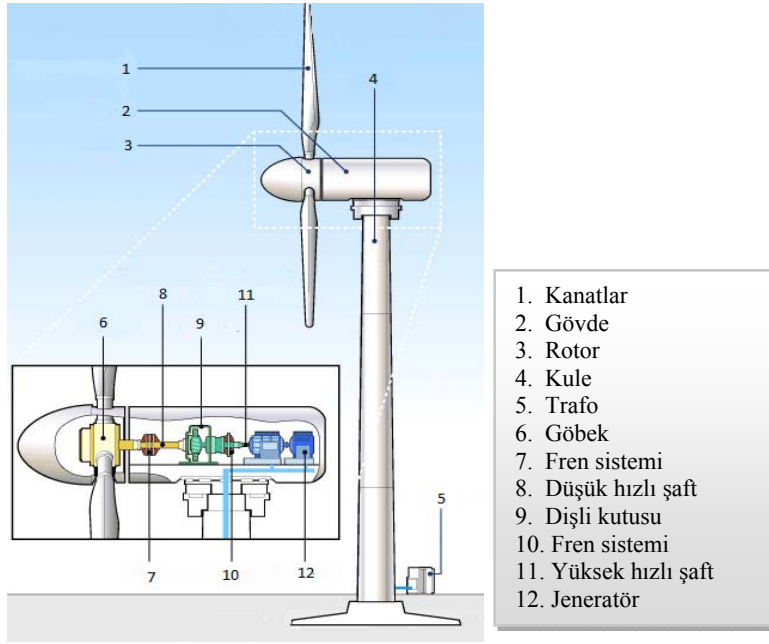
En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Günümüzde rüzgar türbinleri ile ilgili yapılan çalışmalarla türbin boyutları artırılarak rüzgar enerjisinden daha fazla yararlanılması amaçlanmaktadır. Türbin boyutları arttıkça türbin elemanlarında çeşitli mukavemet problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, rüzgar türbininin en fazla zorlanan elemanlarından biri olan kanat tasarımında, kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışının (gerilme ve şekil değişimleri) tespiti önem arz etmektedir. Bu çalışmada günümüzde yaygın olarak kullanılan yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinlerinde; kanatların temel mekanik tasarım parametreleri (kanada etki eden yükler, kanadın zorlanma halleri ve kanatta oluşan gerilmeler) değerlendirilmiştir. Bu amaçla, kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışını belirleyen bir model oluşturulmuş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

1. GİRİŞ

Enerji, günümüzde tüm sektörlerde kullanılan en önemli girdi durumundadır. Dünyada birçok ülke sonlu fosil yakıtlarda dış alımlara olan bağımlılık, çevre kirliliği, küresel ısınma, artan enerji maliyetleri ve varolan enerjinin verimsiz kullanılması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgar enerjisi doğal ve temiz bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisinden yararlanmak amacıyla kullanılan rüzgar türbinleri dönme eksenine göre; yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılmakta olup günümüzde yaygın olarak yatay eksenli üç kanatlı rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

Kule, jeneratör, dişli kutusu, göbek, elektrik-elektronik elemanlar ve kanattan meydana gelen rüzgar türbinleri (Şekil 1) kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisi döngüsüyle elektrik üretmektedir. Rüzgar türbinlerinde, kanatlarda alınan mekanik enerji düşük hızlı shaft, dişli kutusu ve yüksek hızlı shaft üzerinden jeneratöre aktarılmaktadır. Jeneratörde ise bu enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek sisteme iletilmektedir.

Rüzgar türbinlerinde en fazla zorlanan bileşenlerden birisi kanattır. Kanat rüzgar kaynaklı yükler, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yükler, kanadın hareketinden kaynaklanan yükler ve işletme koşullarından kaynaklanan çeşitli yüklere maruz kalmaktadır. Bu yükler kanatta çeşitli gerilmeler oluşturmakta, bu gerilmelerin kullanılan malzemeye özgü mukavemet sınırını aşması durumunda ise yapıda hasar oluşmaktadır. Bu nedenle kanat tasarımında kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Rüzgar türbini genel yapısı

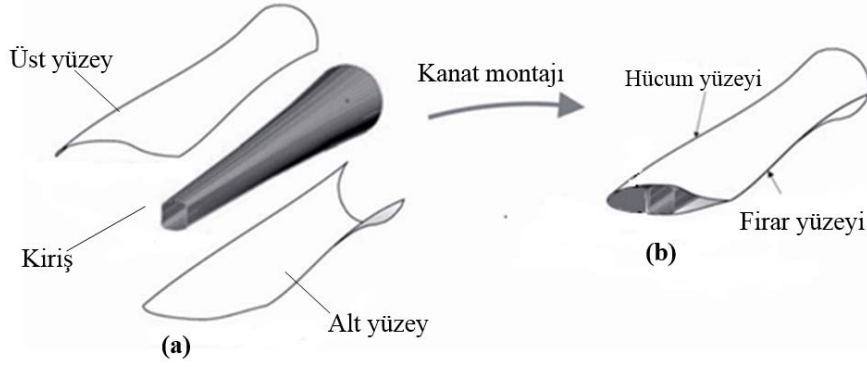
Kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Kim ve Kong (2000) yürüttükleri çalışmada 750 kW'lık bir kanat tasarım ve imalatını yaparak bu kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışını teorik ve deneysel olarak incelemiştir [2]. Bhatt ve Satankar (2013) çalışmalarında kanadın mekanik davranışını sonlu elemanlar metodu yazılımlarından yararlanarak değerlendirmiş olup kanada etki eden aerodinamik yüklerin belirlenmesinde kanat elemanı momentum (KEM) teorisini kullanmışlardır. Cai ve ark. (2013) kanada etki eden yüklerin belirlenmesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden (HAD) yararlanarak kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışını değerlendirmişlerdir. Kaya (2014) çalışmasında ise kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile kanadın statik analizinin birleştirildiği akışkan-yapı etkileşim modeli oluşturulmuş, bu modelden yararlanarak 2 MW'lık bir kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

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

2. YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARI

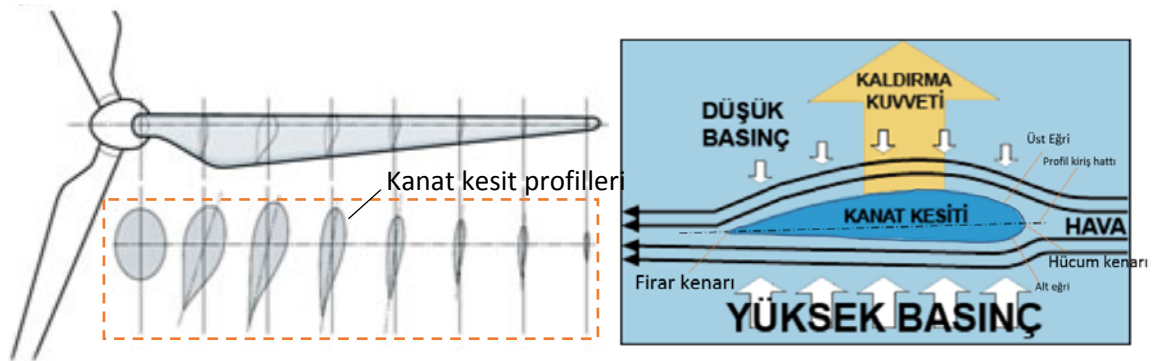
2.1. Kanat Yapısı

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 [6]. Şekil 2'de kanadı oluşturan bileşenler ile bu bileşenlerin montajı gösterilmiştir.



Şekil 2. Rüzgâr türbin kanat bileşenleri ve montajı [6]

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; aerofoil 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 [17, 18]

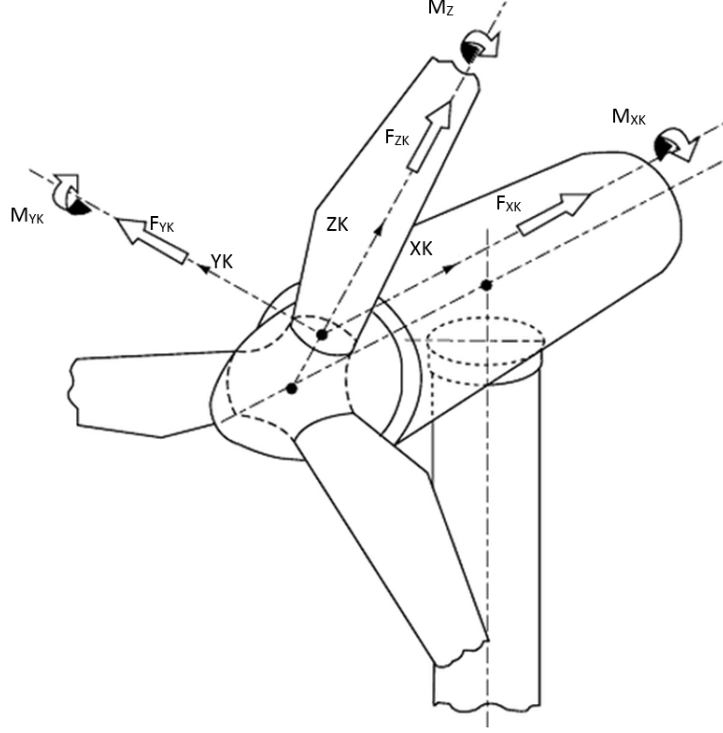
2.2 Kanadın Mekanik Tasarım Esasları

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 [8]. Rüzgâr türbinleri bu yükler altında öngörülen kullanım ömründe sağlıklı bir şekilde çalışabilmelidir. Bu nedenle kanat tasarımında kanada etki eden yüklerin değerlendirilmesi gerekmektedir olup kanada etki eden kuvvetleri ve kanadın zorlanma hallerini değerlendirebilmek için kanat koordinat sistemi tanımlanmıştır (Şekil 4).

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.



Şekil 4. Kanat koordinat sistemi [16]

Aerodinamik yükler

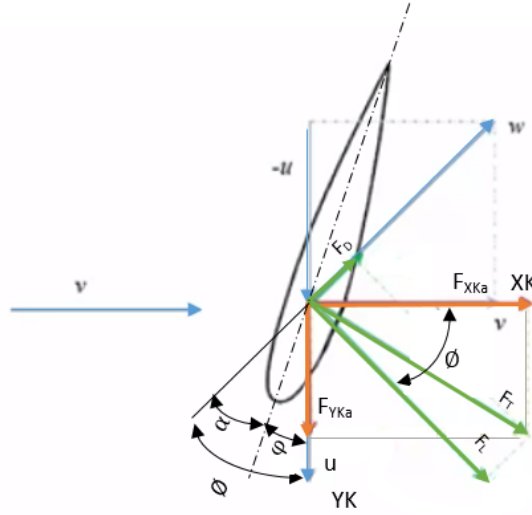
Rüzgâr türbin kanadına etki eden aerodinamik yükler rüzgâr kaynaklı olup **kaldırma kuvveti (F_L)** ve **sürükleme kuvveti (F_D)** olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu kuvvetlerden kaldırma kuvveti rüzgara dik yönde, sürükleme kuvveti ise rüzgar yönünde oluşmakta olup bu kuvvetlerin büyüklüğü aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmektedir [10]

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

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

Burada C_L kaldırma kuvveti katsayısı, C_D sürükleme kuvveti katsayısı, ρ 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 [10].

Kaldırma kuvveti ve sürükleme 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 \varnothing kanada etki eden izafi hızın (W) kanat koordinatı YK ile yaptığı açı, α hücum açısı ve φ bağlama açısıdır.



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

Şekildeki normal kuvvet (F_{XKa}) ve teğetsel kuvvet (F_{YKa}) aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak bulunmaktadır.

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

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

şeklindedir.

Yerçekimi Yükleri

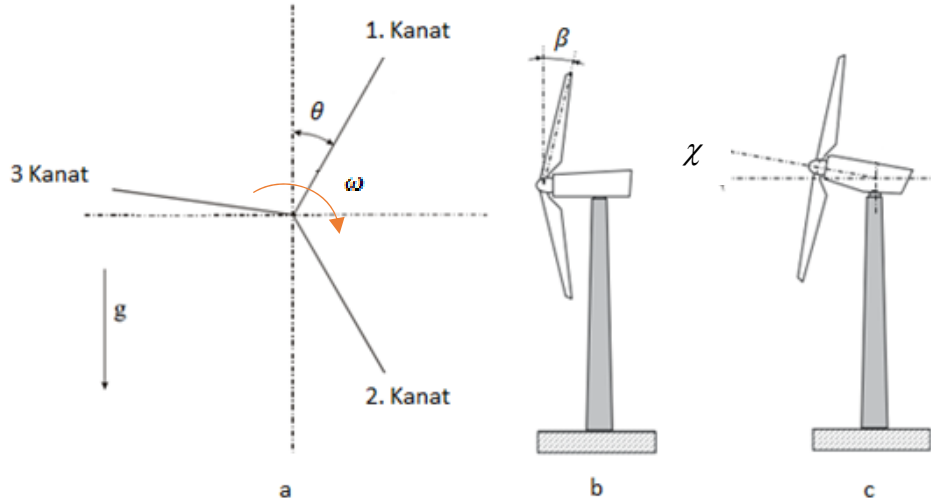
Yerçekimi yükleri (F_y), kanadın ağırlığından kaynaklanan yükler olup kanat koordinat sistemindeki bileşenleri aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak belirlenmektedir.

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

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

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

Burada \bar{m} birim kanat kesit kütlesi, g yerçekimi ivmesi, θ kanat azimuth açısı, β rotor koniklik açısı, χ 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) [11].



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 [16].

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

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

Burada \bar{m} birim kanat kesit kütlesi, ω kanadın açısal hızı, r kanat kesitinin kanat kök bölgesine olan uzaklığı, β 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 [10].

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

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

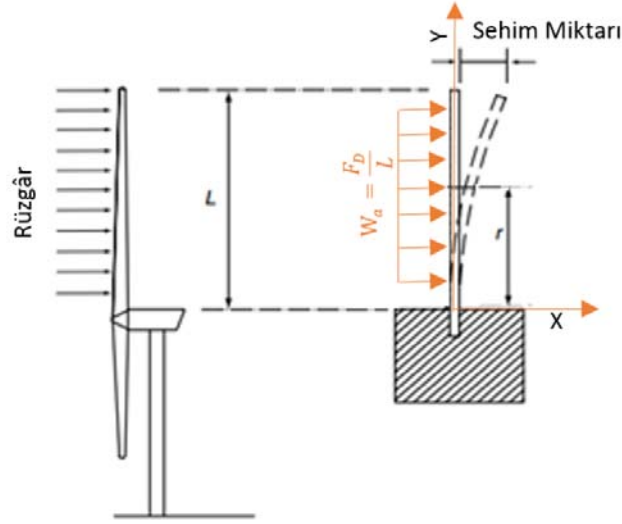
$$F_{YK} = F_{YKa} + F_{YKy} \quad (11)$$

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

2.2.2 Kanadın Zorlanma Halleri ve Oluşan Gerilmeler

Aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme (flapwise bending)

Rüzgâr türbin kanatları, kanadın hücum tarafına etki eden aerodinamik yükler nedeniyle eğilme momentine maruz kalmaktadır. Bu durumda kanadın eğilme halinin değerlendirilmesi için kanat bir ankastre giriş 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 [12]

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;

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

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir [12].

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

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

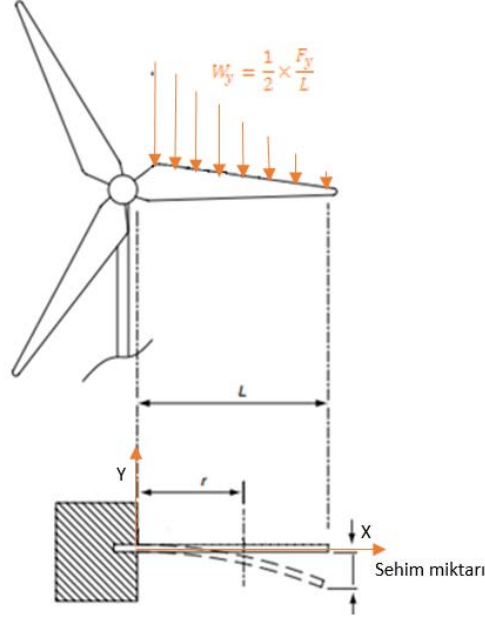
şeklinde. Burada y tarafsız eksene olan mesafe, E elastisite modülü, ρ eğrilik yarıçapı, I_{xx} ise kesit atalet momentidir. Kesit atalet momenti,

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

denkleminde yararlanılarak belirlenmektedir. Burada y_1 kanadın iç destek elemanının (spar cap) tarafsız eksene olan uzaklığıdır [12].

Yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme (Edgewise Bending)

Rüzgâr türbin kanatları, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yerçekimi yükleri nedeniyle 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 [12]

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 momentinin değişimi;

$$M_{eğ} = -\frac{1}{2} W_y (L - r)^2 \quad (16)$$

şeklindedir [12].

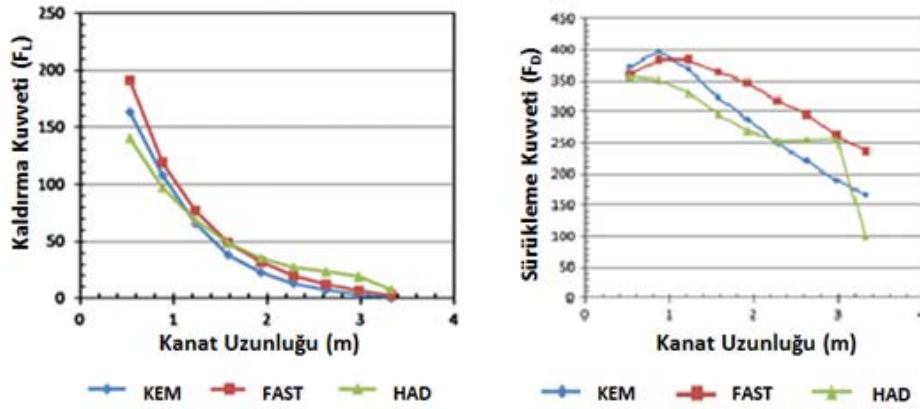
Kanatta yerçekimi yükleri nedeniyle oluşan eğilme gerilmesini belirlemek için aerodinamik yükler nedeniyle oluşan eğilme gerilmesinin belirlenmesinde kullanılan denklemlerden (Denklem 13 ve 14) yararlanılmaktadır.

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. Kanatta yorulmaya neden olan yükler yerçekimi yükleridir. Günümüzde büyük boyutlarda kanatlar kullanıldığından kanada etki eden yerçekimi yükleri de artmaktadır. Bu nedenle kanadın mekanik tasarımında yorulma analizinin de yapılması gerekmektedir [12, 13].

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) yararlanılmakta olup 3.5 m'lik bir kanada etki eden aerodinamik yükler Şekil 9'da verilmiştir. Şekildeki farklı metotlarla belirlenen aerodinamik yükler (kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti) 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 [13]. 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 [14]

Akışkan-yapı etkileşim analizinde, HAD ile kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinden sonra kanadın mekanik davranışının belirlenmesi için akış analizi ile kanadın mekanik analizinin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu birleştirmeye akışkan kaynaklı yüklerin kanada etkisinin sağlıklı olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada ANSYS Workbench yazılımında akış analizi ve statik analiz birleştirilerek akışkan-yapı etkileşim analizi yapılmıştır.

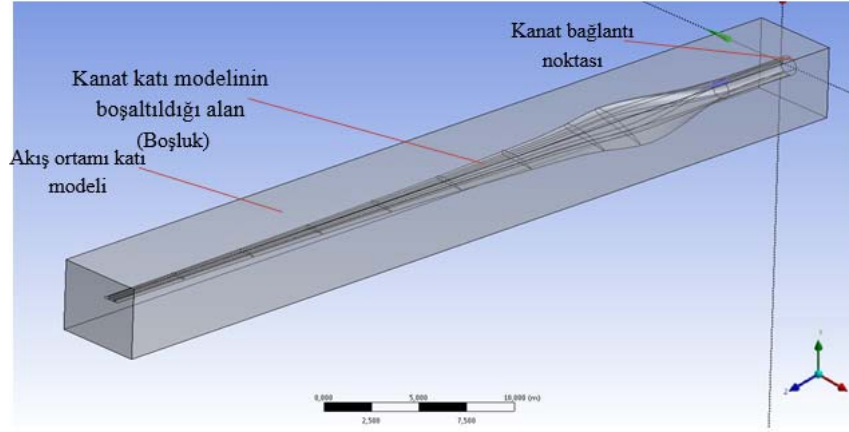
Kanadın statik analizinde analizin kolayca yapılabilmesi amacıyla kanadın dönmediği, sabit olduğu ve kanada etki eden yüklerin yönlerinin değişmediği kabul edilerek kanadın mekanik davranışı değerlendirilmiş olup farklı rüzgâr hızlarında yapılan akışkan-yapı etkileşim analizi sonucu elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kanadın Aerodinamik Davranışının Değerlendirilmesi

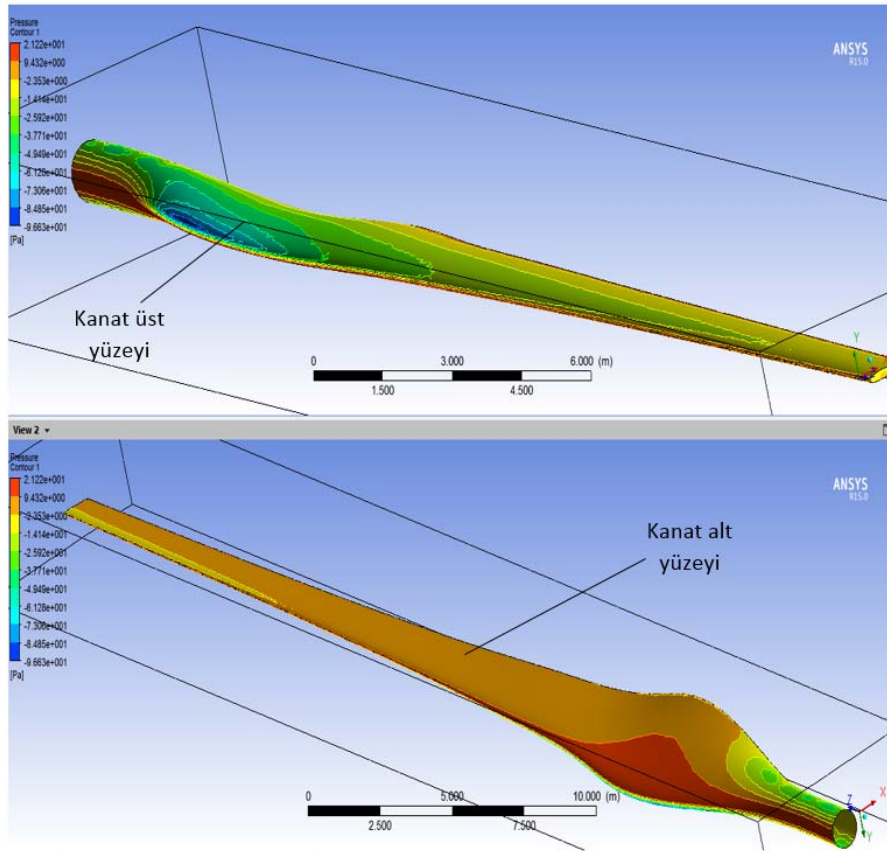
HAD ile kanadın aerodinamik performansını belirlemek için akış ortamının katı modeli oluşturulmalı ve kanat etrafındaki akışın simülasyonu yapılarak kanat yüzeyine etki eden basınç dağılımları belirlenmelidir. Şekil 10'da kanat etrafındaki belli bir geometriden kanat katı modelinin çıkarılmasıyla elde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

HAD ile akış analizinde, akış ortamına giriş yüzeyindeki akışkan hızı, akış analizi yapılmak istenilen rüzgâr hızı olarak tanımlanır. Akış ortamının içindeki kanadın geometrik şeklini oluşturulan geometri ve kanat bağlantı noktası duvar olarak seçilir. Akış ortamının üst alt ve sol yüzeyi ise paralel yüzey olarak seçilerek kanadın akış analizi sınır koşulları tanımlanır. Akışkan tipi, akış tipi ve iterasyon sayısının belirlenmesinden sonra akış analizi yapılarak kanadın aerodinamik davranışı analizi değerlendirilir.



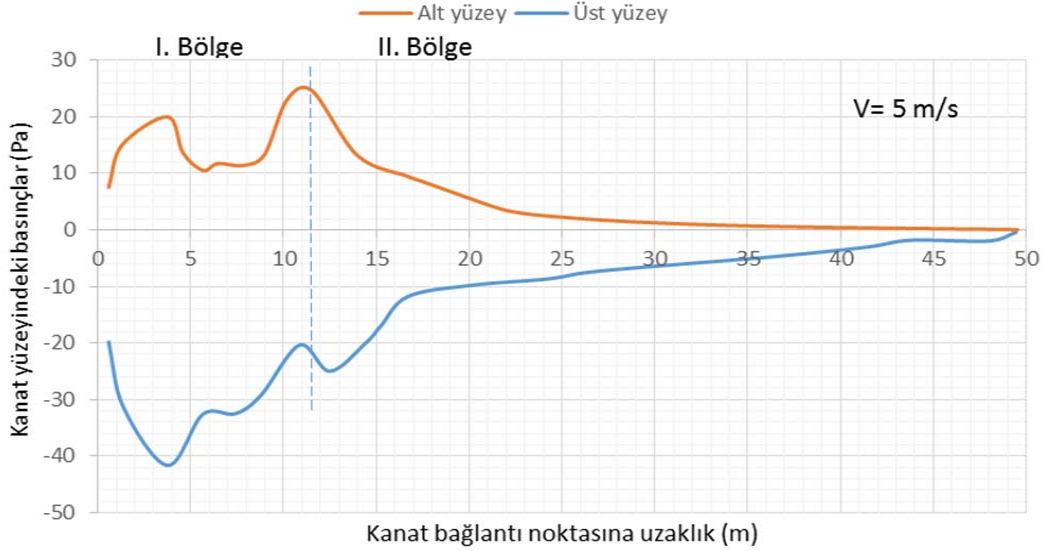
Şekil 10. Akış ortamı katı modeli [5]

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. Şekilde kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar görülmesine rağmen kanadın hangi bölgesinde ne kadarlık bir basınç oluştuğu hassas bir şekilde belirlenememektedir. Bu nedenle kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimini gösteren eğriler elde edilerek Şekil 12'de verilmiştir.



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

Şekilden, kanadın alt yüzeyine etki eden basıncın I. bölgede 8 ile 25 Pa arasında değiştiği; II. Bölgede basıncın 20 Pa'dan başlayıp sürekli azalarak kanat ucunda sıfır olduğu görülmektedir. Üst yüzeydeki hava basıncı incelendiğinde ise I. bölgede -20 Pa'dan başlayıp önce -40 Pa'a düştüğü sonra -20 Pa değerine ulaştığı; II. bölgede beklenen davranış göstererek -25 Pa'dan 0 Pa doğru artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 12. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en yüksek basınçların kanat boyunca değişimi [5]

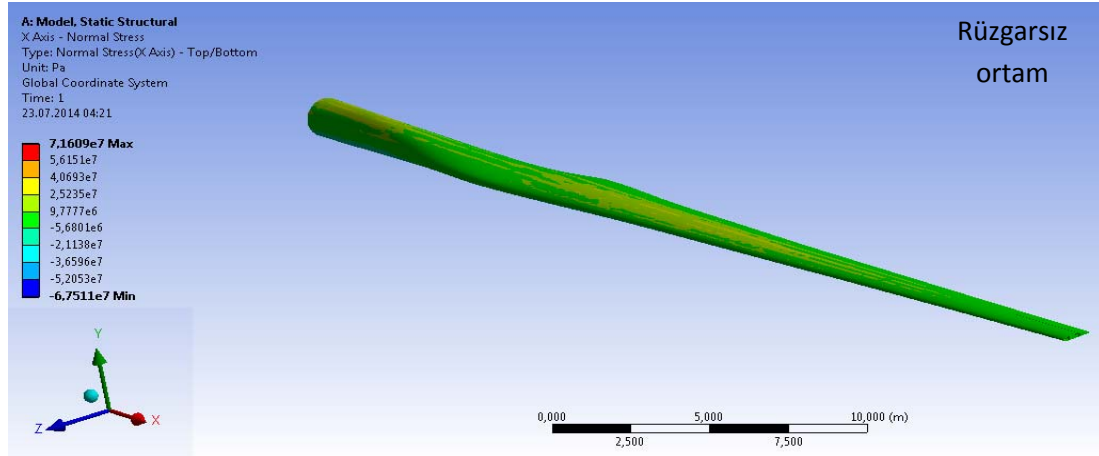
4.2 Kanadın Mekanik Davranışının Belirlenmesi

Kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi için kanadın farklı rüzgâr hızlarındaki kanatta oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilmeleri ile şekil değişimi belirlenmelidir.

4.2.1 Gerilmeler

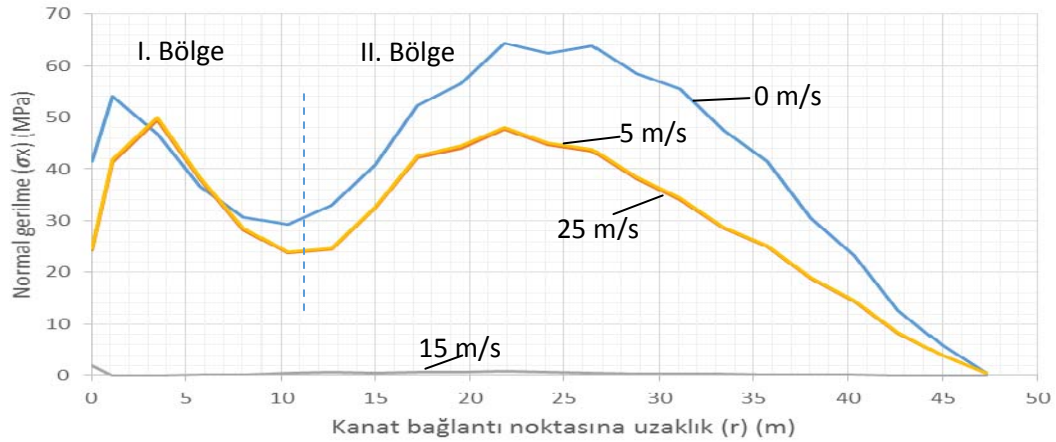
Normal Gerilme

Rüzgâr türbin kanatlarında maruz kalınan yükler nedeniyle normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri oluşmakta, bu gerilmelerin malzemeye özgü sınır değerini aşması durumunda ise yapıda hasar oluşmaktadır. Rüzgarsız ortamda (0 m/s rüzgâr hızı, kanada aerodinamik kuvvetlerin etki etmediği, kanadın sadece yerçekimi yüklerine maruz kaldığı durum) kanatta oluşan normal gerilmeler Şekil 13'de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan normal gerilmelerin 71.609 MPa ile -67.511 MPa aralığında değiştiği görülmektedir. Ancak şekildeki gerilme skalasından kanatta oluşan gerilmeler tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle farklı rüzgâr hızlarında kanatta oluşan normal gerilmelerin kanat uzunluğu boyunca değişimi belirlenerek Şekil 14'de verilmiştir.



Şekil 13. Rüzgarsız ortamda kanatta oluşan normal gerilmeler [5]

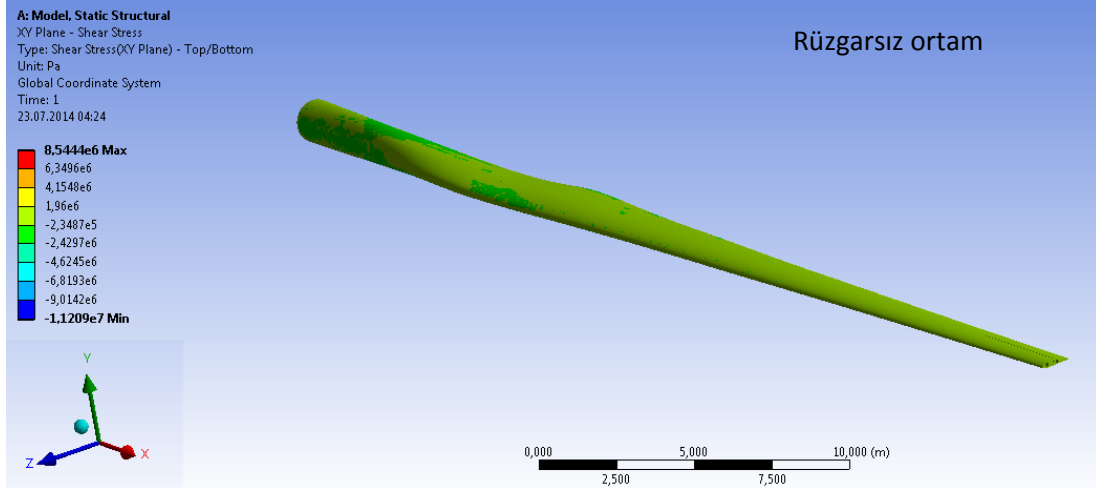
Şekilden rüzgarsız ortam (0 m/s lik rüzgar hızı) eğrisinin I. Bölgesinde normal gerilmenin kanat bağlantı noktasında 40 MPa seviyesinde olduğu, daha sonra önce 55 MPa seviyesine yükseldiği sonra ise azalarak I. Bölge sonunda 30 MPa değerini aldığı; II. Bölgede ise 30 MPa'dan önce 65 MPa'a yükseldiği, sonra ise azalarak kanat ucunda 0 Pa olduğu görülmektedir. Ayrıca diğer rüzgar hızlarında normal gerilme dağılımlarının benzer karakterde olduğu, 0-15 m/s arasındaki rüzgar hızlarında rüzgar hızı arttıkça normal gerilmelerin azaldığı; 15-25 m/s arasındaki rüzgar hızlarında ise rüzgar hızı arttıkça normal gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 14. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan en büyük normal gerilmelerin kanat boyunca değişimi [5]

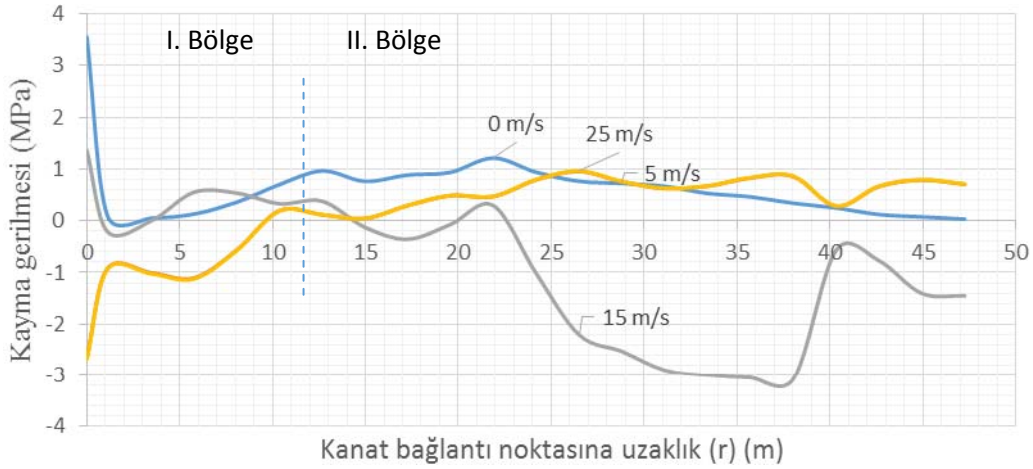
Kayma Gerilmeleri

Rüzgarsız ortamda kanatta oluşan kayma gerilmeleri Şekil 15'de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan kayma gerilmelerinin normal gerilmelere göre düşük seviyelerde olduğu (8.5 MPa ile -1.12 MPa aralığında) görülmesine rağmen kayma gerilmeleri de tam olarak belirlenmemektedir. Bu nedenle, farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan kayma gerilmeleri bulunarak Şekil 16'da verilmiştir



Şekil 15. Rüzgarsız ortamda kanatta oluşan kayma gerilmeleri [5]

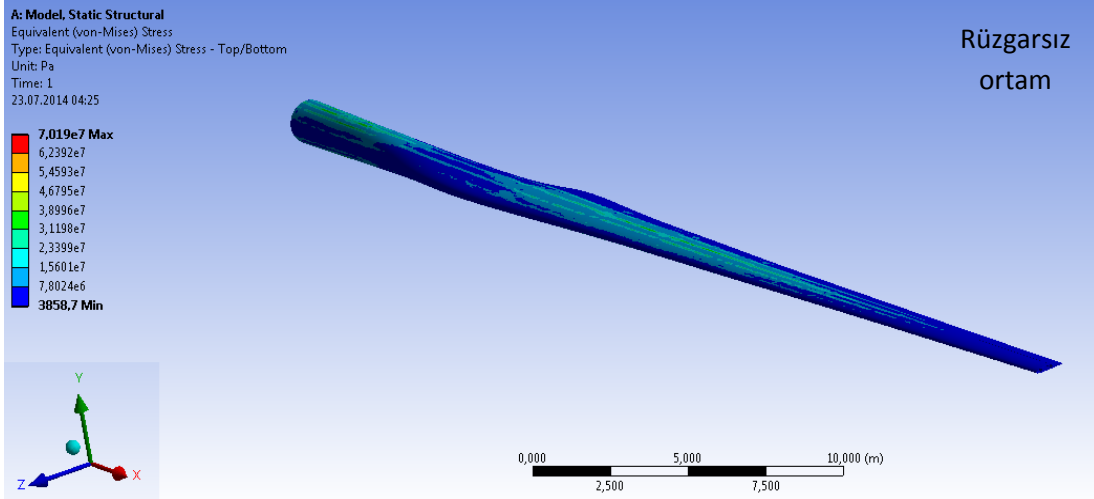
Şekilden rüzgarsız ortamda kanatta oluşan kayma gerilmelerinin I. Bölgede kanat bağlantı noktasında 3.5 MPa seviyesinden 0 Pa seviyesine düşüğü daha sonra ise artarak I. Bölgenin sonunda 0.5 MPa seviyesine yükseldiği; II. Bölgede ise 0.5 MPa seviyesinden önce 1.2 MPa seviyesine yükseldiği daha sonra ise azalarak kanat ucunda sıfır Pa seviyesine düştüğü görülmektedir.



Şekil 16. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan kayma gerilmesinin kanat boyunca değişimi [5]

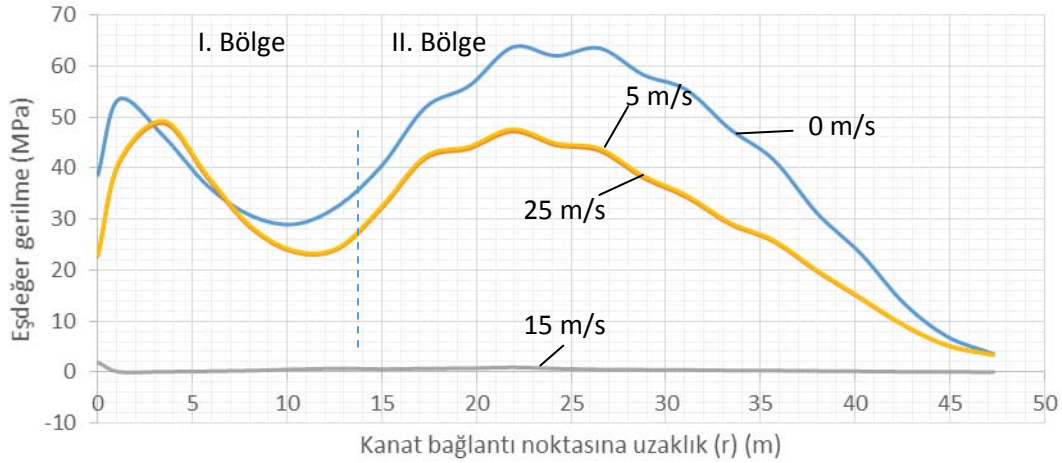
Eşdeğer Gerilme (Von-Mises Gerilmesi)

Kanadın mekanik davranışını değerlendirirken kanatta oluşan gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi tek başına yapacağı düşünülen eşdeğer gerilmeler de dikkate alınmalıdır. Rüzgarsız ortamda kanatta oluşan Von-Mises eşdeğer gerilmeleri Şekil 17’de verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin 78.19 MPa ile 3.05 kPa aralığında değiştiği görülmeye rağmen kanadın hangi bölgesinde ne kadarlık bir eşdeğer gerilmenin oluştuğu belirlenmemektedir. Bu nedenle farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin kanat uzunluğu boyunca değişimi bulunarak Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 17. Rüzgarsız ortamda kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler [5]

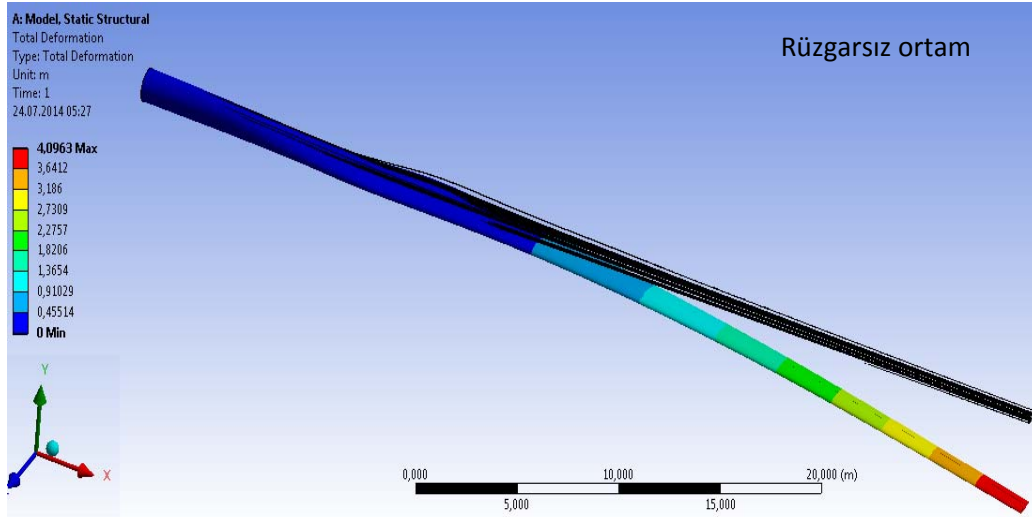
Şekilden rüzgarsız ortamda kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin, I. Bölgede 40 MPa seviyesinden önce 55 MPa seviyesine yükseldiği, sonra ise azalarak I. Bölgenin sonunda 30 MPa olduğu; II. Bölgede ise 30 MPa seviyesinden önce 65 MPa seviyesine yükseldiği, sonra ise azalarak kanat ucunda sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca diğer rüzgar hızlarında da eşdeğer gerilmelerin benzer karakterde göstermekte olup, 0-15 m/s rüzgar hız aralığında rüzgar hızı arttıkça eşdeğer gerilmelerin azaldığı; 15-25 m/s rüzgar hız aralığında ise rüzgar hızı arttıkça eşdeğer gerilmelerin de arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 18. Farklı rüzgar hızlarında kanatta oluşan eşdeğer gerilmeler [5]

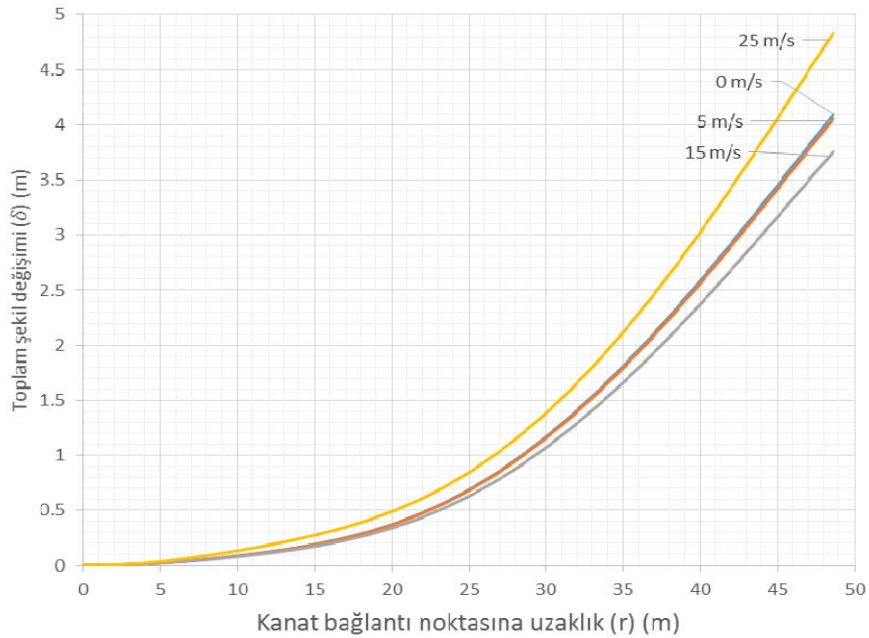
4.2.2 Kanadın şekil değişimi (deformasyon)

Kanat, maruz kalınan yükler nedeniyle farklı yönlerde şekil değişimine uğramaktadır. Rüzgarsız ortamda kanatta oluşan toplam şekil değişimi (x, y ve z yönlerindeki şekil değişiminin bileşkesi) Şekil 19'da verilmiştir. Şekilden kanatta oluşan şekil değişiminin 0 ile 4.0963 m aralığında değiştiği görülmektedir. Ancak şekilden kanatta oluşan şekil değişimi de tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle kanatta oluşan şekil değişiminin kanat uzunluğu boyunca değişimi belirlenerek Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 19. Rüzgarsız ortamda kanadın şekil değişimi [5]

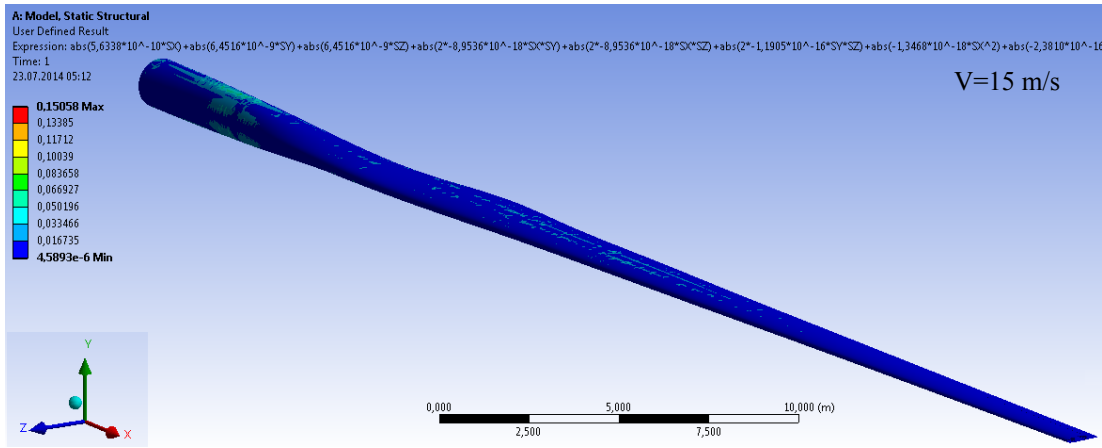
Şekilden kanadın deformasyonunun kanat bağlantı noktasından kanat ucuna doğru düzgün bir şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca 0-15 m/s rüzgar hız aralığında rüzgar hızı arttıkça kanadın deformasyon miktarının azaldığı, 15-25 m/s rüzgar hız aralığında ise rüzgar hızı arttıkça kanadın deformasyon miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda kanat ucundaki şekil değişiminin, kanat uzunluğunun %10'unu geçmemesi önerilmektedir [4,14]. Bu çalışmada kanadın şekil değişiminin 25 m/s'lik rüzgar hızında kanat ucunda oluştuğu görülmekte olup bu değer literatürdeki kritik seviyeye yakın bir büyüklüktür.



Şekil 20. Farklı rüzgar hızlarında kanadın şekil değişimi [5]

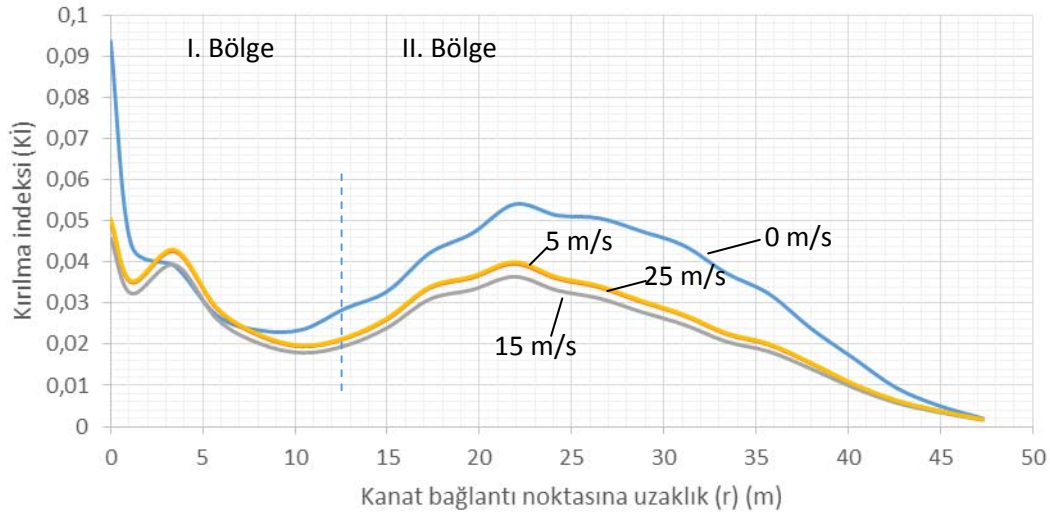
4.2.3 Kanadın hasar kontrolü

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 (Kİ) yararlanılmaktadır. Bu kriterle yapıda hasar olmaması için kırılma indeksi değerinin 1'i geçmemesi gerekmektedir [15]. 15 m/s'lik rüzgâr hızında kanadın kırılma indeksi dağılımı Şekil 21'de verilmiştir. Şekilden kanadın kırılma indeksinin en yüksek değerinin 0.150158 olduğu görülmüştür. Şekilden kanadın herhangi bir noktasındaki kırılma indeksi değeri net bir şekilde belirlenmemektedir. Bu nedenle farklı rüzgâr hızlarında kanadın kırılma indeksi dağılımının kanat uzunluğu boyunca değişimi bulunarak Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 21. 15 m/s'lik rüzgâr hızında kanadın kırılma indeksi dağılımı

Şekilden kanadın kırılma indeksi dağılımının I. Bölgede kanat ucunda 0.1 değerinde olduğu, daha sonra ise azalarak I. Bölgenin sonunda 0.025 değerini aldığı; II. Bölgede ise 0.025 değerinden önce 0.56 değerine yükseldiği daha sonra ise azalarak kanat ucunda sifıra yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca 0-15 m/s aralığındaki rüzgâr hızlarında kırılma indeksinin rüzgâr hızı arttıkça azaldığı; 15-25 m/s aralığındaki rüzgâr hızlarında ise rüzgâr hızı arttıkça, arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 22. Farklı rüzgâr hızlarında kırılma indeksi dağılımı [5]

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 gerekmekte 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.
5. Kanadın akışkan-yapı etkileşim analizinde belirli bir rüzgar hız aralığında (0-15 m/s) rüzgar hızları arttıkça kanat mekanik tasarım parametrelerinde (gerilmeler, şekil değişimleri ve kırılma indeksi) azalma, 15 m/s ve üzerindeki rüzgar hızlarında ise kanat mekanik tasarım parametrelerinde artış meydana gelmiştir.
6. Kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesinde akışkan-yapı etkileşim analizine ek olarak kanadın dinamik analizi, serbest titreşim analizi ve yorulma analizinin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Çanka Kılıç, F.**, Türkiye'deki Yenilenebilir Enerjilerde Mevcut Durum ve Teşviklerindeki Gelişmeler, Mühendis ve Makine Dergisi, 52(614), 103-115, 2012.
- [2] **Kong, C., Kim, J.**, 2000. Structural design of medium scale composite wind turbine blade, KSAS International Journal, 1, 92-102.
- [3] **Bhatt, P., Satankar, R.**, 2013. Comparing the stress on wind turbine blades using ANSYS, International Journal of Engineering Trends in Engineering and Development, 3, 311-327.
- [4] **Cai, X., Pan, P., Zhu, J., Gu, R.**, 2013. The analysis of the aerodynamic character and structural response of large-scale wind turbine blades, Energies, 6, 3131-3148.
- [5] **Kaya, K.**, 2014. Rüzgar türbin kanadının mekanik tasarım esasları, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 191 s.
- [6] **Höyland, J.**, 2010. Challenges for large wind turbine blades, Philosophiae Doctor Thesis, Norwegian University of Science and Technology .
- [7] windpowermonthly.com/article/1137943/service-maintain-wind-turbine-blade, ziyaret tarihi 06.05.2014.
- [8] **Hau, E.**, 2006. Wind turbines fundamentals, technology, application, economics. Second Edition, ISBN 10-3-540-24240-5, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany [9] Liu. ve ark, 2010
- [9] **DNV**, 2002. Guideliness for Design of Wind Turbines, Second Edition, ISBN 87-550-2870-5, Denmark.
- [10] www.ocw.tudelft.nl
- [11] **Schubel, P. J., ve Crossley, R. J.**, 2012. Wind turbine blade design, Energies, 5, 3245-3449.

- [12] **Kensche, C. W.**, 2006. Fatigue of composites for wind turbines, *International Journal of Fatigue*, 28, 1363-1374.
- [13] **Wu, W., Young, W.**, 2012. Structural analysis and design of the composite wind turbine blade, *Applied Composite Materials*, 19, 247-257.
- [14] **Grujicic, M., Arakere, G., Panduragan, B., Sellappan, V., Vallejeo, A., Ozen, M.**, 2010. Multidisciplinary design optimization for glass-fiber epoxy-matrix composite 5 mw horizontal-axis wind-turbine blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(8):1116-1127.
- [15] **Chen, X. Zhao, W. Zhao, X.L. Xu, J.Z.**, 2014. Failure Test and Finite Element Simulation of a Large Wind Turbine Composite Blade under Static Loading, *Energies*, 7, 2274-2297.
- [16] **Xiong, L. Xianmin, Z. Gangqiang, L. Yan, C. Zhiquan, Y.** 2010. Dynamic Response Analysis of Rotating Blade of Horizontal Axis Wind Turbine, *Wind Engineering*, 34, 5, 543-560.
- [17] <http://turbinatop.net/>
- [18] <http://www.cleanenergybrands.com/>