

2 MW'LIK RÜZGAR TÜRBİN KANADININ FARKLI RÜZGAR HIZLARINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Kadir KAYA⁺ ve Erdem KOÇ*

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun

ÖZET

Fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenecek olması ve dünyada enerjiye olan talebin giderek artması nedeniyle ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş, yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanmak amacıyla araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerine ağırlık vermişlerdir. Bu amaçla yapılan çalışmalardan birisi de rüzgar türbinlerinden daha fazla güç üretmek amacıyla türbin ve kanat boyutlarının artırılması ile ilgilidir. Kanat boyutları arttıkça, kanatta çeşitli mukavemet problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, tasarım sürecinde kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışının (gerilme ve şekil değiştirmeler) tespiti önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, rüzgar türbin kanatlarının tasarım parametreleri belirlenmiş, 2 MW'lık bir kanadın tasarımı yapılarak bu kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

Rüzgar türbinleri son yıllarda giderek yaygınlaşmış ve fosil yakıtlı enerji santralleri ile rekabet edebilir bir düzeye ulaşmıştır. Bu gelişmenin bir sonucu olarak, rüzgar türbini 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 davranışının belirlenmesi amacıyla, kanadın kullanımı esnasında maruz kalabileceği yüklerin belirlenerek, bu yükler altındaki yapısal davranışının incelenmesi bir zorunluluk haline gelmiştir

Rüzgar türbini tasarımında, enerji dönüşüm zincirinin ilk halkası olan kanat, rüzgar türbin performansını doğrudan etkilemektedir. Kanat tasarımında kanadın mekanik davranışının tespiti dikkate alınması gereken bir konu olup literatürde bu konu hakkında birçok çalışma mevcuttur. Kanadın mekanik davranışını incelemek amacıyla yaygın olarak sonlu elemanlar metodundan (SEM) yararlanılmaktadır. Jensen yürüttüğü çalışmada 34 m'lik bir yatay eksenli rüzgar türbin kanadının içindeki kompozit destek elemanının çeşitli yükler altındaki davranışını incelemiştir. Hermann ve Raiadurai yaptıkları çalışmalarda ANSYS programında rüzgar türbin kanadının burkulma ve serbest titreşim analizini yapmışlardır. Grujic yaptığı çalışmada 70 m/s'lik rüzgar hızında bir fırtınada yatay eksenli rüzgar türbin kanadının şekil değişimi ve Von Mises eşdeğer gerilme dağılımını incelemiştir. Wu ve Young yaptıkları çalışmada kanada etki eden aerodinamik

*Prof. Dr., Makina Müh. Böl., erdemkoc@omu.edu.tr

⁺Araştırma Görevlisi, Makina Müh. Böl., kadir.kaya@omu.edu.tr

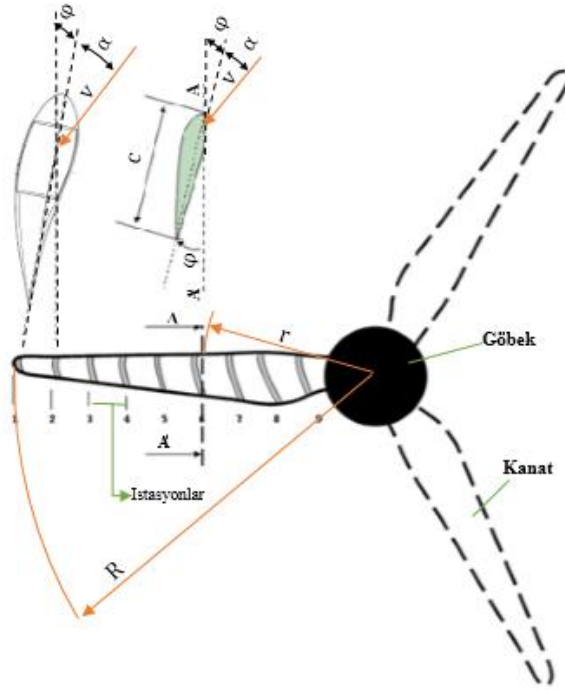
yükleri belirlemede kullanılan farklı yaklaşımları karşılaştırarak kanat elemanı momentum teorisine göre aerodinamik yükleri belirlemiştir. Belirlenen aerodinamik yükler dikkate alınarak olağanüstü rüzgar hızlarında 3,5 m’lik bir E-Cam/Epoksi kompozit kanadın mekanik davranışını incelemiştir.

Bu çalışmada ise ilk olarak, 2 MW’lık bir rüzgar türbin kanadının tasarımı yapılmıştır. İkinci olarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden yararlanılarak kanadın farklı rüzgar hızlarındaki (5,15, 25 m/s) aerodinamik performansının belirlenmesi amacıyla akış analizi yapılmıştır. Üçüncü olarak, tasarlanan kanadın akış analizi sonucu belirlenen aerodinamik yükler ve yerçekimi yükü etkisi altındaki mekanik davranışı değerlendirilmiştir. Bu amaçla, yatay eksenli rüzgar türbini elemanlarından tek bir kanat dikkate alınmış olup tek bir kanat ve etrafındaki akış ortamı değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

Rüzgâr türbin kanadı tasarımı

Rüzgar türbin kanadının tasarımı için, nominal güç (N_n), nominal açısal hız (ω_n) kanat uzunluğu (L), koniklik açısı (β), uç hız oranı (λ), kanadı çeşitli dilimlere ayıran istasyon sayısı ile bu istasyonlardaki kanat profillerinin (aerofoil) profil uzunluğu (c) ve bağlama açıları (φ) gibi kanadın tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 1’de kanat tasarımında kullanılan temel boyutlar ve açılar gösterilmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesi için firmaların katalog bilgileri ve çeşitli bağıntılardan yararlanılmaktadır.



Şekil 1: Kanat tasarımında kullanılan temel açılar ve boyutlar

Burada;

α : Hücum açısı

φ : Kanat bağlama açısı

c : Profil uzunluğu

v : Rüzgâr hızıdır

λ : Uç-hız oranı

r : Kanadın üzerinden alınan herhangi bir aerofoilin kanat bağlantı noktasına uzaklığı

R : Kanadın rotor yarıçapı

2 MW'lık bir kanadın teknik özellikleri ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Blade Dynamics firmasının bazı katalog bilgilerinden yararlanılmış olup bu büyüklükler Çizelge 1'de verilmiştir.

Genel Özellikler	
Nominal Güç (N_n)	2000 kW
Nominal Açısal Hız (ω_n)	1,6441 rad/s
Dönme Yönü	Saat Yönü
Geometrik Özellikler	
Kanat Uzunluğu (L)	48,63 m
Maksimum Profil Uzunluğu (c_{max})	3,608 m
Koniklik Açısı (β)	1°
Aerodinamik Özellikler	
Uç Hız Oranı (λ)	9,4
Maksimum Güç Faktörü (C_{pmax})	0,49
Mekanik Özellikler	
Kütle (Kg)	6150 kg
Malzeme	E-Cam/Epoksi

Çizelge 1: D49 kanadının teknik özellikleri (URL-1)

Bu çalışmada kanadın katı modelinin oluşturulmasında L, c_{max} , β gibi büyüklükler kullanılmaktadır. N_n , ω_n ve C_{pmax} ise ek bilgi olarak verilmiştir.

Kanadın katı modelinin oluşturulması için kanadın belirli noktalarındaki (istasyon noktaları) bağlama açıları (φ) ve profil uzunluklarının (c) belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, 2 MW'lık kanadın 10 istasyon noktasından oluştuğu kabul edilerek gerekli olan büyüklükler denklem 1 ve 2'den yararlanılarak belirlenmiş (Manwell, 2002) ve Çizelge 2'de verilmiştir.

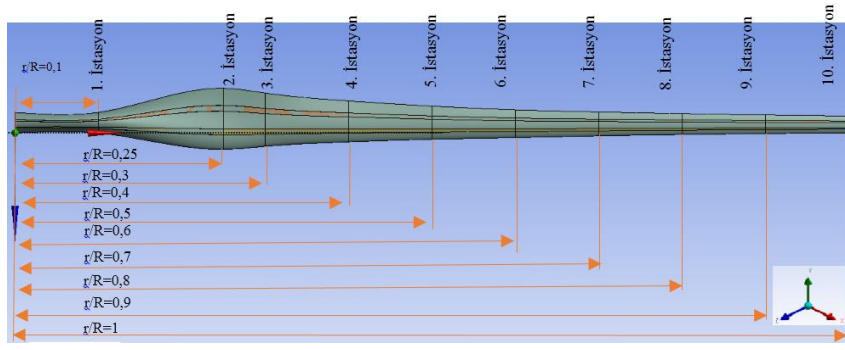
$$\varphi = \arctan\left(\frac{2}{3*\lambda*r}\right) - \alpha \quad (1)$$

$$c = \frac{8*\pi*R*\sin\varphi}{3*B*C_L*\lambda} \quad (2)$$

Profil İstasyonu	r/R	r (m)	Bağlama Açısı φ (°)	Profil Uzunluğu c (m)
2	0,25	12,1575	15,84	3,7284
3	0,3	14,589	9,24	3,1556
4	0,4	19,452	6,00	2,4057
5	0,5	24,315	4,02	1,9383
6	0,6	29,178	2,68	1,6230
7	0,7	34,041	1,73	1,3943
8	0,8	38,904	1,01	1,2225
9	0,9	43,767	0,45	1,0873
10	1	48,63	0,00	0,9786

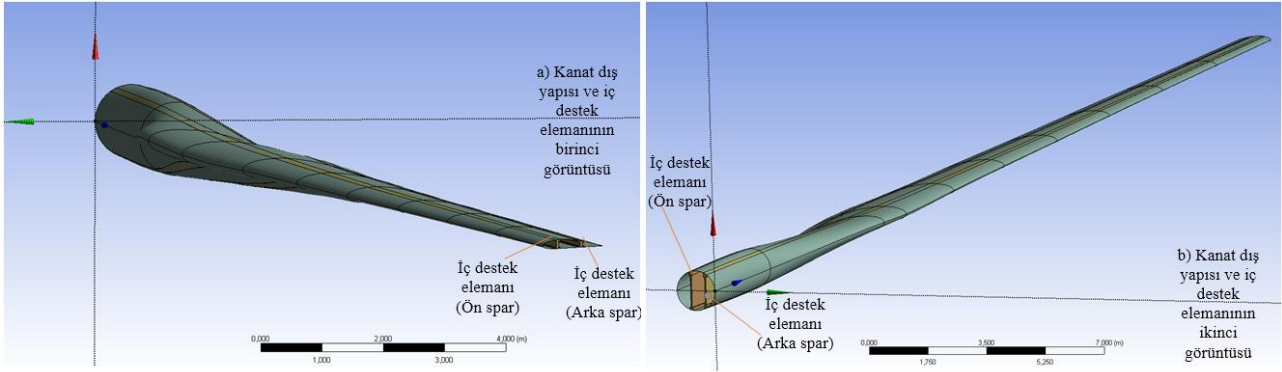
Çizelge 2: Katı modeli oluşturulan kanadın tasarım parametreleri

Kanat tasarımı için belirlenen istasyon noktaları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Kanat tasarımı için belirlenen istasyon noktaları

2 MW'lık bir kanadın katı modeli belirlenen tasarım parametrelerinden yararlanılarak **ANSYS Design Modeler** yazılımında oluşturulmuş olup Şekil 3'de verilmiştir.

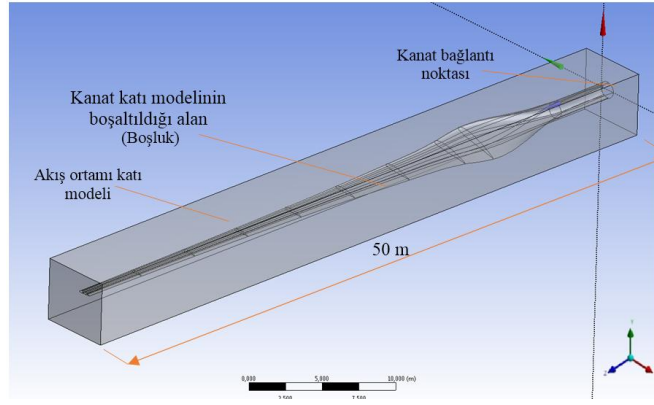


Şekil 3: Kanat katı modeli

Şekildeki kanat katı modeli, 48,63 m uzunluğunda olup dış yapı ve iç destek elemanlarından oluşmaktadır. Bu kanat, kök kısmından başlayarak 4,863 m ($r/R=0,1$) uzunluğa kadar **dairesel kesite**, 4,863 m uzunluktan 12,1575 m uzunluğa kadar **geçiş kesitine** (dairesel kesitten aerofoil kesite geçiş), 12,1575 m'den kanat ucuna (48,63 m) kadar **aerofoil kesite** sahiptir. Kanat katı modeli, aerofoil kesitin başladığı noktada (12,1575 m) 15,84 °'lik bağlama açısı olarak bilinen bir açığa sahiptir. Bu açı kanat ucuna doğru giderek azalmakta ve en uçtaki istasyonda 0°'dir. Ayrıca, kanat katı modeli, kanadın şekil değişimini azaltmak amacıyla uç kısmından -1°'lik koniklik açısına (ön eğilme) sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (kanada saat yönünün tersi yönde 1°'lik ön eğilme verilmiştir).

Burada oluşturulan kanat katı modeli, kabuk şeklindeki dış yapı ve iki iç destek elemanından meydana gelmektedir. Burada kanat dış yapısının et kalınlığı ile ilgili herhangi bir tanımlama yapılmamaktadır. Kanat dış yapısının et kalınlığı kanadın statik analiz kısmında programa tanıtılacaktır.

Akış analizi için kanadın etrafındaki akış ortamının katı modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada akış ortamı Şekil 4'te geometri olarak belirlenmiş olup bu geometri kanadın etrafındaki kare kesitli geometriden kanat geometrisinin çıkarılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4: Akış ortamının katı modeli

Kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi

Kanadın aerodinamik performansının belirlenmesi amacıyla çeşitli aerodinamik teorilerden, Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiğinden (**HAD**) ve özel geliştirilen yazılımlardan yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, kanadın aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiğinden (**HAD**) yararlanılarak **ANSYS FLUENT** yazılımında akış analizi yapılmıştır. Akış analizi sonucu kanat yüzeyindeki rüzgar hızları ile kanada etki eden basınçlar belirlenerek kanadın aerodinamik performansı değerlendirilmiştir.

Bu analizde, akış ortamının $-x$ yönündeki yüzeyi giriş yüzeyi (akışkanın akış ortamına girdiği yüzey), $+x$ yönündeki yüzeyi çıkış yüzeyi (akışkanın akış ortamından çıktığı yüzey), $-z$ yönündeki yüzeyi kanat bağlantı yüzeyi (kanadın mesnetlendiği yüzey), $+y$, $+z$ ve $-y$ yönlerindeki yüzeyleri ise simetrik yüzeyler (hava akımına açık yüzeyler) olarak belirlenmiştir.

Kanadın aerodinamik performansı üç farklı rüzgar hızı için (5, 15, 25 m/s) değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar uygulamalar bölümünde verilmiştir.

Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi

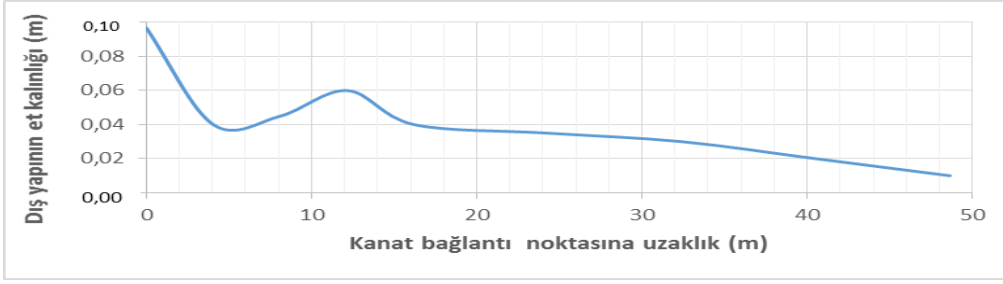
Rüzgâr türbin kanatlarının farklı rüzgâr hızlarındaki dayanımı belirlenmesi, kanadın kullanımı sırasında maruz kalacağı yükler karşısında hasara uğramadan durabilmesi açısından önemlidir. Kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışını (dayanım ve şekil değişimleri) belirlemek amacıyla kanadın **statik analizi** ya da **dinamik analizi** yapılmalıdır. Bu çalışmada analiz kolaylığı açısından kanadın dönmediği, sabit olduğu kabul edilmiş olup bu nedenle kanadın savrulma ve titreşim gibi etkileri değerlendirilmemiş, kanadın dinamik analizi yapılmamıştır. Bu çalışmada kanat sabit olarak kabul edildiğinden kanada etki eden yüklerin yönünün sabit olduğu (kanada etki eden yükler statik) kabul edilerek **ANSYS Workbench** yazılımında kanadın **statik analizi** yapılmıştır.

Rüzgar türbinlerinde, kanada rüzgâr kaynaklı yükler (**aerodinamik yükler**), kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan yükler (**yerçekimi yükü**), kanadın dönme hareketinden kaynaklanan yükler (**santrifüj yükü**) ve işletme koşulları nedeniyle çeşitli yükler etki etmektedir. Bu çalışmada, kanadın yerçekimi yüküne maruz kaldığı durum ve yerçekimi yükü ile aerodinamik yüke maruz kaldığı durumlardaki mekanik davranış değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada 0 m/s'lik rüzgar hızı olarak tanımlanan durumda kanadın yerçekimi yükü etkisi altındaki davranışı, 5, 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarında ise kanadın aerodinamik yükler ve yerçekimi yükü etkisi altındaki davranışı değerlendirilmiştir.

Rüzgar türbin kanatları kök kısmından uç kısmına farklı et kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır (Sun ve ark. 2009; Lanting, 2011; Chen ve ark. 2013). Bu çalışmada kanat,

kanat bağlantı noktasında en yüksek et kalınlığına (0,098 m), uç kısmında ise en düşük (0,01 m) et kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Kanat dış yapısının et kalınlığının kanat boyunca değişimi

Kanadın statik analizi için malzeme özelliklerinin ($\sigma_{em}, \tau_{em}, E, \nu, G, \rho$) yazılıma tanımlanması gerekmektedir. Rüzgar türbin kanatlarında yaygın olarak E-Cam Epoksi malzeme kullanıldığından bu çalışmada E-Cam/Epoksi kompozit malzeme tercih edilmiş olup ortotropik E-Cam/Epoksi malzeme özellikleri programın malzeme kütüphanesinden alınmıştır.

Kanadın statik analizi için problemin sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada kanada etki eden yerçekimi yükünü değerlendirmek için kanada – y yönünde yerçekimi ivmesi (standart earth gravity) ile kanat dış yüzeyine etki eden akışkan-yapı etkileşim yükü (fluid structure interface) tanımlanmıştır. Akışkan-yapı etkileşim yükü, akış analizi sonucu belirlenen aerodinamik yüklerin (kanada etki eden basınçlar) statik analize aktarımı için kullanılmaktadır. Sınır koşulları olarak ayrıca kanadın bağlantı noktasından mesnetlendiği kabul edilmiştir.

Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi program tarafından belirlenmesi için bu çalışmada bulunması istenilen büyüklüklerin solution kısmına eklenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kanadın mekanik davranışının değerlendirilmesi için, kanadın belirlenen yükler altındaki şekil değişimi ile kanatta oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilmeler bulunmuştur. Ayrıca **Tsai-Wu** kırılma kriterine göre kanadın hasar kontrolü yapılmıştır.

Akış analizi sonucu belirlenen basınç dağılımlarının kanadın statik analizine aktarılması için **ANSYS Workbench** yazılımında sistem birleştirme (**System Coupling**) işleminden yararlanılmaktadır. Sistem birleştirme işleminden sonra **ANSYS Workbench** yazılımında çözüm yaptırılarak kanadın istenilen rüzgar hızındaki mekanik davranışı (şekil değişimi ve gerilmeler) belirlenmektedir. Aynı işlemler akış ortamına girişindeki rüzgar hızı değiştirilerek tekrarlandığında kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışı tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada kanadın yerçekimi yükü altındaki mekanik davranışı (0 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analiz) ile yerçekimi yükü ve 5, 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan aerodinamik yükler altındaki mekanik davranışı değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar uygulamalar kısmında verilmiştir.

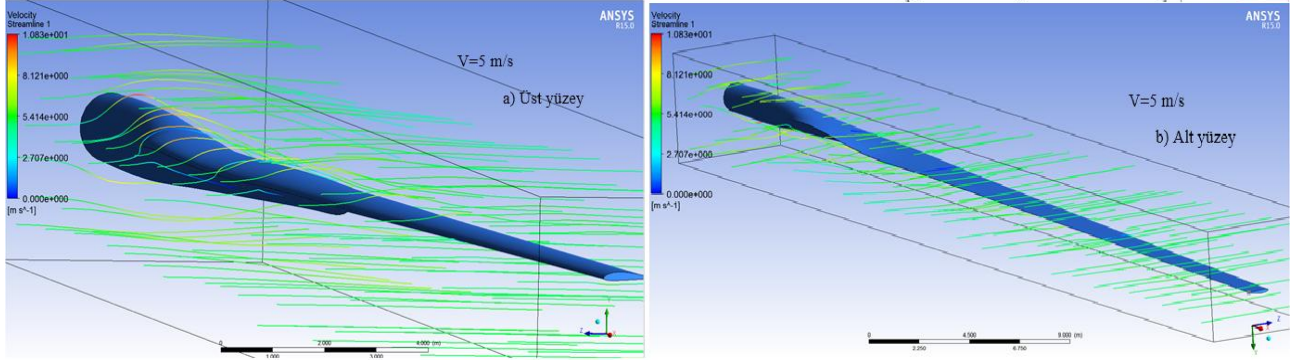
UYGULAMALAR

Bu çalışmada, kanadın aerodinamik davranışının belirlenmesinde kanadın etrafında oluşan rüzgar hız dağılımları ile kanat yüzeyine etki eden basınçlar, kanadın mekanik davranışının belirlenmesinde ise kanadın şekil değişimi (deformasyon) (toplam şekil değişimi (X, Y ve Z yönlerinde oluşan şekil değişiminin bileşkesi)), normal gerilme (σ_x), kayma gerilmesi (τ_{xy}) ve **Von-mises** eşdeğer gerilmesi (σ_{es}) değerlendirilmiştir. Ayrıca **Tsai-Wu** kırılma kriterine göre kanadın hasar kontrolü yapılmış olup bu amaçla kanatta oluşan **Kırılma İndeksi (Kİ)** dağılımları belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Rüzgar hız dağılımı

5 m/s'lik rüzgar hızında kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Şekildeki akış ortamında oluşan rüzgar hızları 0 ile 10,83 m/s arasında değişmekte olup

kanadın üst ve alt yüzeylerinde genellikle yeşil renkli akım ipliciklerinin, kanadın dairesel kesitli kısmı ve geçiş bölgesinde ise kırmızı ve sarı renkli akım ipliciklerinin bulunduğu görülmektedir. Ayrıca kanadın dairesel kesitli kısmı ve geçiş bölgesindeki ipliciklerde dalgalanmalar olduğu, diğer bölgelerde ise akım ipliciklerinin yüzeyi yalayarak geçtiği (düzgün bir dağılım olduğu) gözlemlenmiştir.

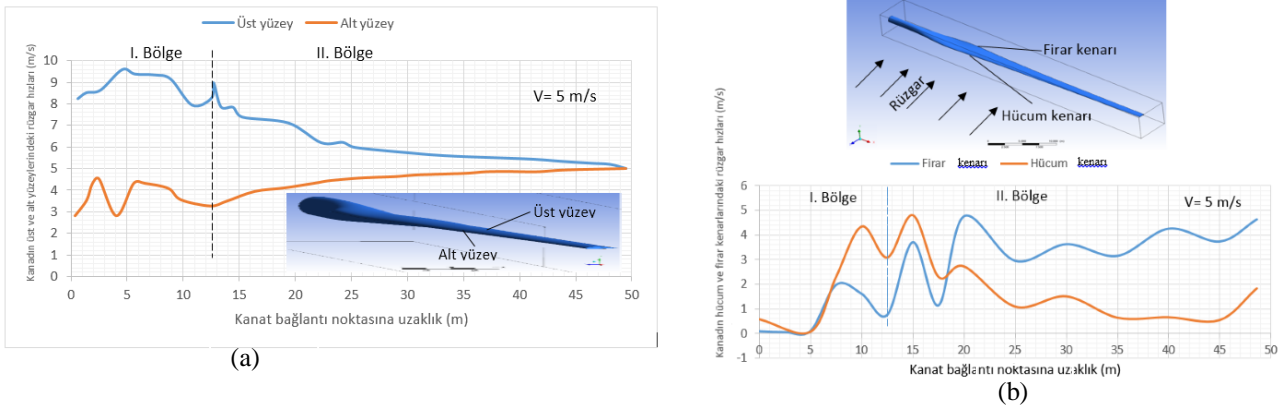


Şekil 6: Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızlarının genel dağılımı

Şekilden kanat yüzeyinde oluşan rüzgar hızları hassas bir şekilde belirlenemediğinden akış analizine dönülerek kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en büyük hız değerleri (Şekil 7a) ile kanadın hücum ve firar kenarlarındaki rüzgar hızlarının kanat boyunca değişimi (Şekil 7b) belirlenmiştir.

Şekil 7a'dan kanadın üst ve alt yüzeyinde oluşan rüzgar hızlarının, üst yüzeyde 5 ile 10 m/s, alt yüzeyde ise 3 ile 5 m/s aralığında değiştiği görülmektedir. Kanadın üst ve alt yüzeylerindeki rüzgar hızları incelendiğinde, dairesel kesitli bölge ile geçiş bölgesi arasında rüzgar hızında belirgin bir değişiklik olmadığı, kanadın uç kısmında kanat üst ve alt yüzeylerinde oluşan rüzgar hızlarının analize konu olan rüzgar hızına eşit olduğu görülmektedir. Kanadın uç kısmındaki rüzgar hızının analize konu olan rüzgar hızına eşit olması modelin doğru olduğunu, bu modelden alınan sonuçların gerçeğe yakın olduğunu göstermektedir.

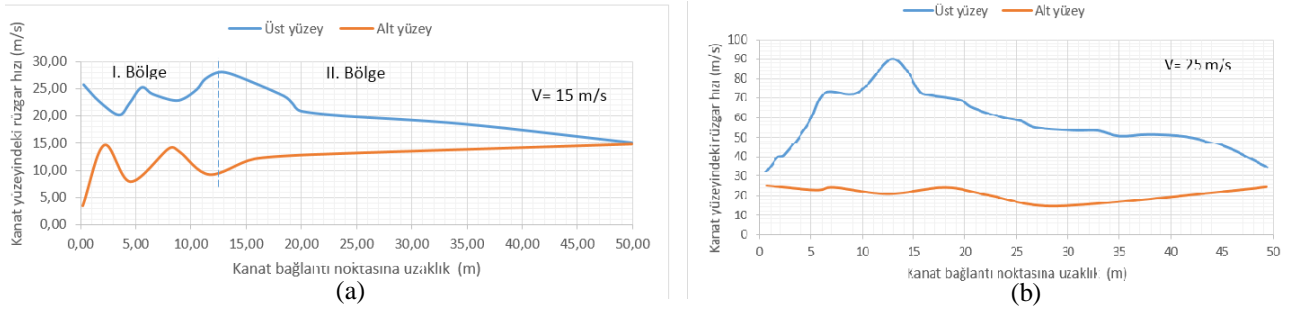
Şekil 7b'den kanadın hücum ve firar kenarındaki rüzgar hızlarının 0 ile 5 m/s aralığında değiştiği görülmektedir. İncelenen hücum bölgesinde, rüzgar hızının nominal hızdan (5 m/s) daha düşük değerler alması rüzgarın yüzeye çarpması ve hızının kesilmesinden kaynaklanmaktadır. Oluşturulan modelin bu hassasiyetle sonuçlar vermesi modelin güvenilirliğine işaret etmektedir.



Şekil 7: Kanadın farklı bölgelerindeki rüzgar hız dağılımları

Kanada gelen rüzgar hızı sırasıyla 15 ve 25 m/s olarak değiştirilerek akış analizi yapıldığında belirlenen kanadın üst ve alt yüzeylerinde oluşan en büyük rüzgar hızlarının kanat boyunca değişim eğrileri Şekil 8a ve Şekil 8b'de verilmiştir. Rüzgar türbin kanatları yüksek rüzgar hızlarında sistemi korumak için kapatılmaktadır. Bu amaçla, burada kanatta oluşan aerodinamik kaldırma kuvvetini minimum seviyeye indirmek için 25 m/s'lik rüzgar hızında yapılan akış analizinde kanat 90° döndürülerek düşey konuma getirilmiştir. Şekildeki kanat yüzeylerinde oluşan rüzgar hızları

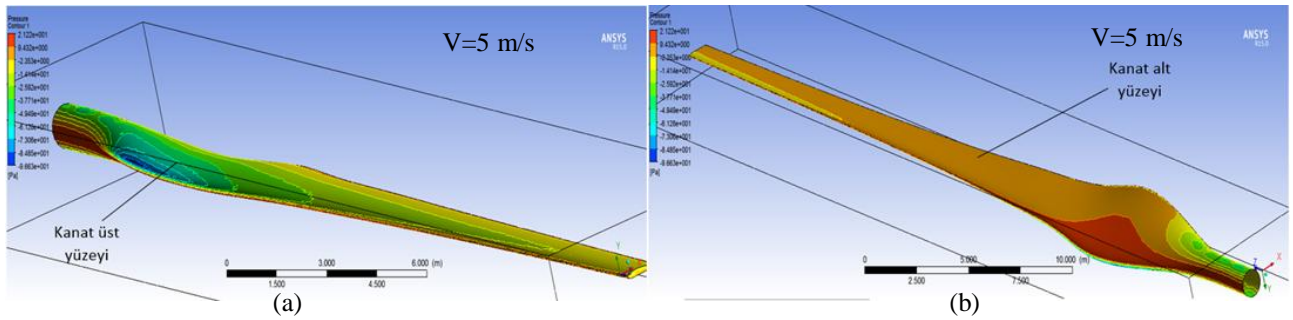
değerlendirildiğinde; 15 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analiz sonucu beklendiği gibi 5 m/s'lik rüzgar hızında davranışa benzer bir davranış gözlemlenmiştir. 25 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analizde ise özellikle kanadın geçiş bölgesinde yüksek rüzgar hızlarının olduğu, kanadın uç kısmına doğru rüzgar hızlarının giderek azaldığı ve analize konu olan rüzgar hızına yaklaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 8: 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarında kanat üst ve alt yüzeyinde oluşan rüzgar hızları

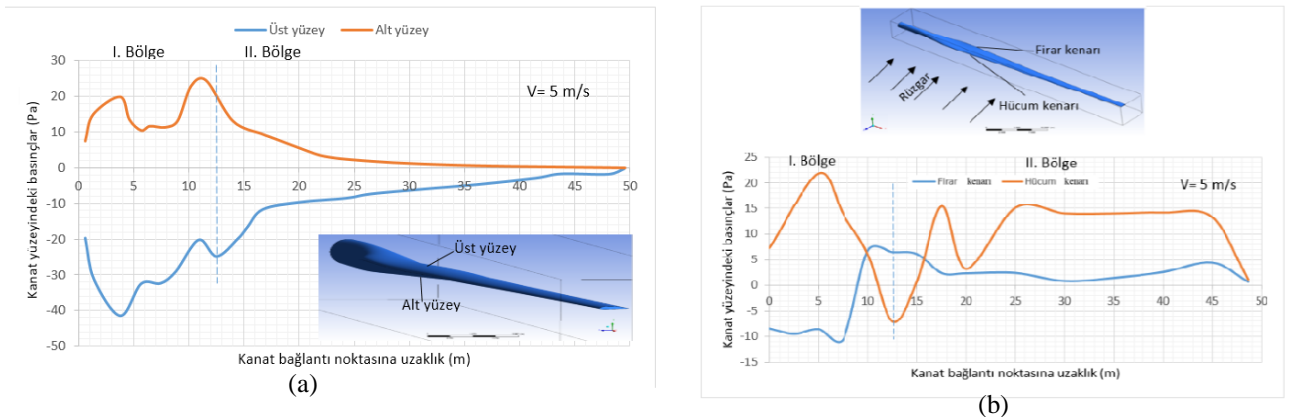
Basınç dağılımı

Seçilen 5 m/s'lik rüzgar akışında, kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçlar sırasıyla Şekil 9a ve 9b'de verilmiş olup şekildeki farklı renkli bölgeler kanat yüzeyine farklı büyüklüklerde basınçların etki ettiğini göstermektedir. Şekilde, kanadın üst yüzeyinde genellikle yeşil ve sarı, alt yüzeyinde ise genellikle turuncu ve kırmızı renkli bölgelerin olduğu yani beklendiği gibi kanadın üst yüzeyinde negatif, alt yüzeyinde ise pozitif basınçların etki ettiği görülmektedir. Bu durum kanadın aerofoil kesitli olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 9: Kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların genel dağılımı

Kanadın üst ve alt yüzeylerine etki eden basınçların genel dağılımından kanada etki eden basınçlar net bir şekilde belirlenemediğinden, akış analizine dönülerek kanadın üst ve alt yüzeylerindeki en büyük basınç değerlerinin kanat uzunluğu boyunca değişimini veren eğri ile kanadın hücum ve firar kenarlarına etki eden basınçların kanat boyunca değişimini veren eğri elde edilerek sırasıyla Şekil 10a ve Şekil 10b'de verilmiştir.

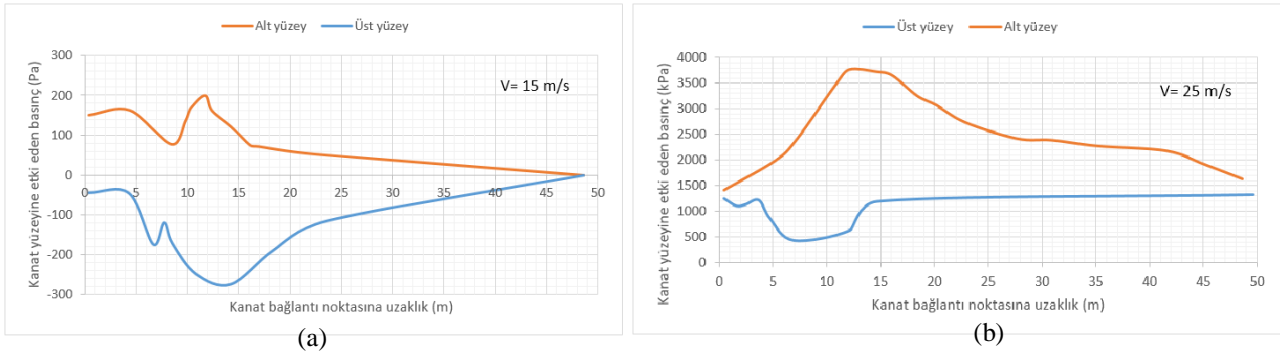


Şekil 10: Kanadın farklı bölgelerine etki eden basınçlar

Şekil 10a'dan kanadın alt yüzeyine etki eden basıncın I. bölgede 8 ile 25 Pa arasında değiştiği, II. bölgede ise düzenli bir şekilde azalarak kanat ucunda sıfır olduğu görülmektedir. Kanadın I. bölgesindeki dalgalanmalar kanadın geometrik şeklinin bu kısımda düzgün olmamasından kaynaklanmaktadır. II. bölgedeki düzgün değişim ise kanat geometrisinin uç kısma doğru küçülerek düzleşmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 10b'den kanadın hücum kenarındaki basınçların genellikle pozitif değerde olduğu, firar kenarındaki basınçların ise kanadın 9 m'lik uzunluğuna kadar negatif daha sonra pozitif değerde olduğu görülmektedir.

Kanada gelen rüzgar hızı sırasıyla 15 ve 25 m/s olarak değiştirilerek yapılan akış analizi sonucu belirlenen kanadın üst ve alt yüzeylerinde oluşan en büyük basınçların kanat boyunca değişim eğrileri Şekil 11a ve Şekil 11b'de verilmiştir. 25 m/s'lik rüzgar hızında yapılan akış analizinde kanat 90° döndürülerek kanat düşey konuma getirildiği durum değerlendirilmiştir. Şekildeki kanat yüzeylerine etki eden basınçlar değerlendirildiğinde, 15 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analiz sonucu beklendiği gibi 5 m/s'lik rüzgar hızında kanat yüzeyinde oluşan basınç dağılımına benzer bir davranış gözlemlenmiştir. 25 m/s'lik rüzgar hızında yapılan analizde ise özellikle kanadın geçiş bölgesinde yüksek basınçların olduğu, kanadın uç kısmına doğru üst yüzeydeki basıncın giderek azaldığı, alt yüzeydeki basıncın ise neredeyse sabit olarak değiştiği görülmektedir.



Şekil 11: 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarında kanat üst ve alt yüzeyine etki eden basınçlar

Kanadın mekanik davranışının belirlenmesi

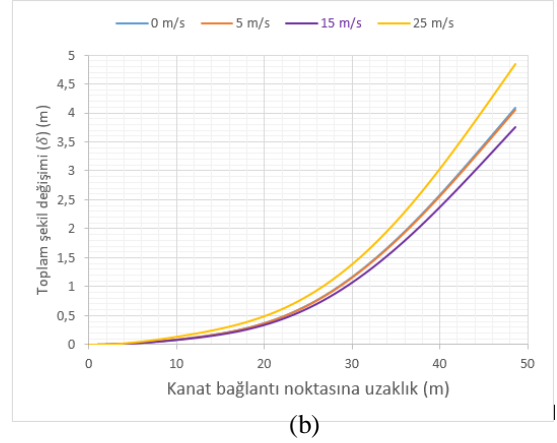
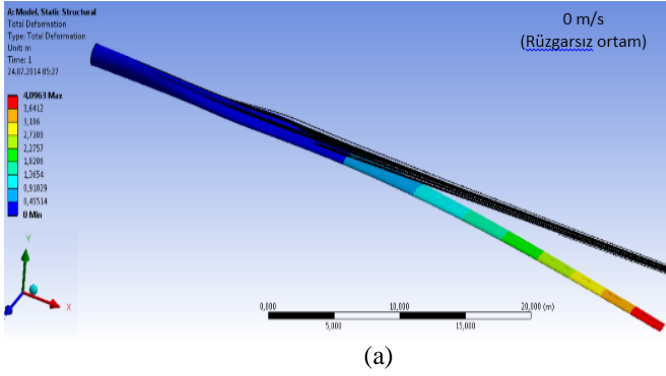
Bu kısımda, kanadın mekanik davranışının değerlendirmek amacıyla kanadın farklı rüzgar hızlarındaki şekil değişimi (δ) (deformasyon) ile kanatta oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilmeler belirlenmiştir. Şekil değişimi olarak kanadın toplam şekil değişimi (X, Y ve Z yönlerinde oluşan şekil değişiminin bileşkesi), normal gerilme olarak kanatta oluşan σ_x normal gerilmesi, kayma gerilmesi olarak kanatta oluşan τ_{xy} kayma gerilmesi ve eşdeğer gerilme (σ_{es}) olarak kanatta oluşan Von-mises eşdeğer gerilmeleri belirlenmiştir.

Kanadın şekil değişimi (deformasyon)

Kanadın şekil değişiminin belirlenmesi amacıyla kanadın 0 m/s'lik rüzgar hızındaki (sadece yerçekimi yükleri etkisi altındaki) şekil değişimi ile farklı rüzgar hızlarında (5, 15 ve 25 m/s) kanadın aerodinamik ve yerçekimi yükleri etkisi altındaki şekil değişimi değerlendirilmiştir. Kanadın 0 m/s'lik rüzgar hızındaki toplam şekil değişimi Şekil 12a'da, kanadın 0, 5, 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarındaki şekil değişiminin kanat uzunluğu boyunca değişimi ise Şekil 12b'de verilmiştir.

Şekilden kanat yatay pozisyondayken kanada gelen rüzgar hızı arttıkça kanadın şekil değişiminin azaldığı görülmektedir (0 m/s'de en büyük şekil değişimi 4,0963 m, 5 m/s'de 4,059 m 15 m/s'de 3,7593 m). Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan aerodinamik kaldırma kuvvetinin artarak kanadı yukarı doğru kaldırmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır. 25 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan şekil değişimi en büyük değere (4,647 m) ulaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda (Grujicic ve ark., 2010; Cai, ve ark., 2013) uçta oluşan şekil değişiminin kanat uzunluğunun %10'unu

geçmemesi önerilmektedir. Bu nedenle burada kanatta oluşan şekil değişimi kritik seviyeye (4,863 m) yaklaşmaktadır.



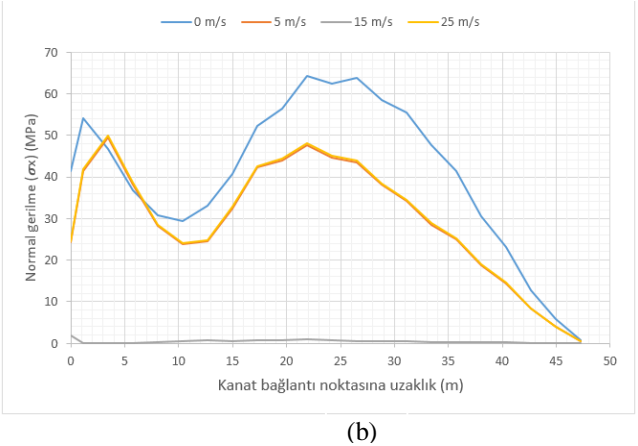
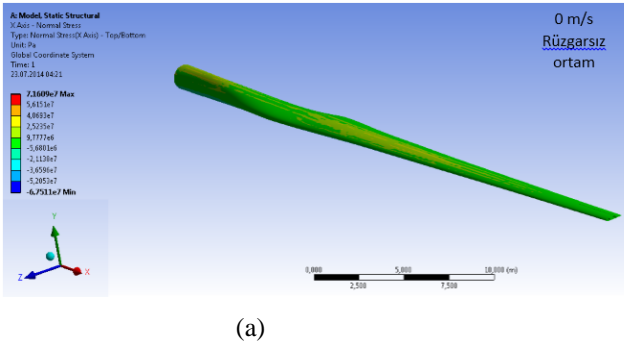
Şekil 12: Kanadın farklı durumlardaki şekil değişimleri

Gerilmeler

Rüzgar türbin kanatlarının maruz kaldığı çeşitli yükler nedeniyle kanatta normal ve kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kısımda, yapılan analizler sonucunda belirlenen farklı rüzgar hızlarında (0, 5, 15, 25 m/s) kanatta oluşan normal ve kayma gerilmeleri ile bu gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi teorik olarak tek başına yapacağı düşünülen eşdeğer gerilmeler verilmiştir. Burada da 0 m/s'lik rüzgar hızındaki durumda kanadın sadece yerçekimi yükleri altındaki davranışı değerlendirilmiştir.

Normal gerilme dağılımları

Kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan analizler sonucunda kanatta oluşan normal gerilmeler belirlenmiş olup 0 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan normal gerilmeler ile 0, 5, 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarında kanatta oluşan normal gerilmelerin kanat boyunca değişimi sırasıyla Şekil 13a ve Şekil 13b'de verilmiştir.

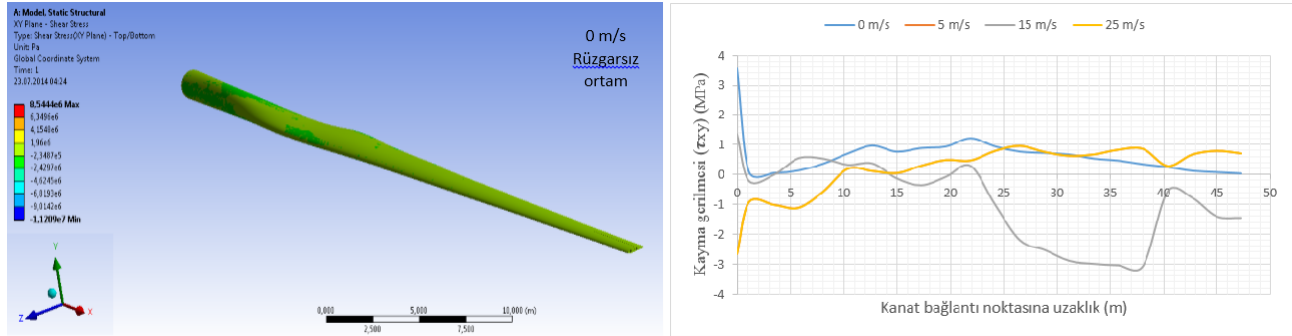


Şekil 13: Farklı durumlarda kanatta oluşan normal gerilmeler

Şekilden kanat yatay pozisyondayken kanada gelen rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan en büyük normal gerilmenin azaldığı görülmektedir (0 m/s'de en büyük normal gerilme 64,33 MPa, 5 m/s'de 49,48 MPa, 15 m/s'de 1,93 MPa). Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan kaldırma kuvvetinin artarak kanadı yukarı doğru kaldırmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kanatta oluşan normal gerilmelerin en yüksek değerini kanadın orta kısmında aldığı görülmektedir. Normal gerilmeler kanatta oluşan eğilme gerilmesinin bir göstergesidir. Bu nedenle kanatta en yüksek eğilme gerilmesi kanadın orta kısmında, en düşük eğilme gerilmesi ise kanadın uç kısmında oluşmaktadır. Bu durum kanat geometrisinin düzgünlüğünden kaynaklanmaktadır.

Kayma gerilmesi dağılımları

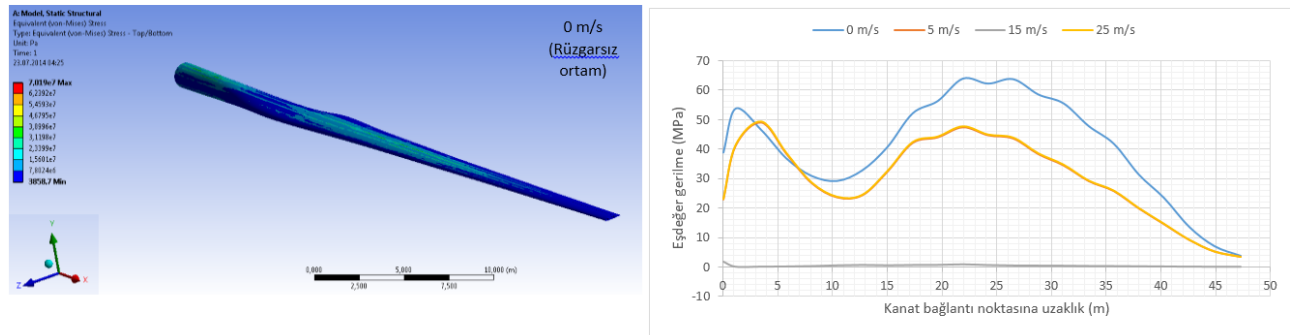
Kanadın mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılan analizlerde kanatta oluşan kayma gerilmeleri de belirlenmiştir. Bu gerilmelerden 0 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan kayma gerilmeleri Şekil 14a'da, 0, 5, 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarında kanatta oluşan kayma gerilmelerinin kanat boyunca değişimi ise Şekil 14b'de verilmiştir.



Şekil 14: Farklı durumlarda kanatta oluşan kayma gerilmeleri

Eşdeğer gerilme dağılımları

Kanadın statik analizinde, kanatta oluşan gerilmelerin ayrı ayrı yapacağı etkiyi tek başına yapacağı düşünülen eşdeğer gerilmeler de belirlenmiştir. Bu gerilmelerden 0 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan Von-mises eşdeğer gerilmesi Şekil 15a'da, 0, 5, 15 ve 25 m/s'lik rüzgar hızlarında kanatta oluşan Von-mises eşdeğer gerilmelerinin kanat boyunca değişimi Şekil 15b'de verilmiştir.

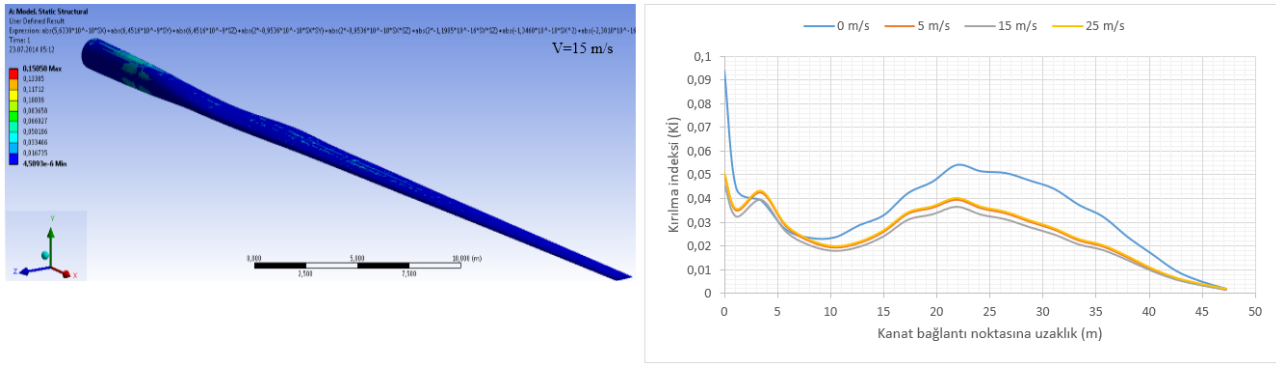


Şekil 15: Farklı durumlarda kanatta oluştuğu kabul edilen Von-mises eşdeğer gerilmeleri

Şekilden, kanada gelen rüzgar hızı arttıkça beklendiği gibi kanatta oluşan eşdeğer gerilmelerin de diğer gerilmeler gibi azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan kaldırma kuvvetinin de artması ve kanada etki eden yerçekimi yüklerinin tersi yönünde etki ederek bu kuvvetin etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

Kanadın hasar kontrolü

Rüzgâr türbinlerinde, kanada etki eden yüklerin kanatta hasar oluşumuna neden olup olmayacağı kontrol edilmelidir. Bu amaçla, bu kısımda farklı rüzgâr hızları için kanatta hasar kontrolü yapılmıştır. **Tsai-Wu** hasar kontrol kriterine göre yapılacak olan hasar kontrolünde **Kırılma indeksinden (Kİ)** yararlanılmaktadır. Bu kritere göre yapıda hasar olmaması için kırılma indeksi değerinin 1'i geçmemesi gerekmektedir (Chen ve ark., 2014). Bu çalışmada, her bir rüzgâr hızı için (0 m/s, 5 m/s, 15 m/s, 25 m/s) kanadın **Kırılma İndeksleri (Kİ)** değerlendirilmiştir. 15 m/s'lik rüzgar hızında kanatta oluşan kırılma indeksi dağılımı ile diğer rüzgar hızlarında kanatta oluşan kırılma indeksi dağılımları sırasıyla Şekil 16a ve Şekil 16b'de verilmiştir. Şekilden, kanat yatay pozisyondayken rüzgar hızı arttıkça kırılma indeksi değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yapıda oluşan en büyük kırılma indeksi değeri 0,1 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, bu tasarımın belirlenen koşullardaki belirlenen yüklemeler altında hasara uğramayacağı belirlenmiştir.



Şekil 16: Farklı durumlarda kanadın kırılma indeksi dağılımları

SONUÇ

Bu çalışmada, 2 MW'lık bir rüzgar türbin kanadının tasarım parametreleri belirlenerek kanat katı modeli oluşturulmuştur. Ayrıca farklı rüzgar hızlarındaki akış analizleri yapılarak kanadın aerodinamik performansı değerlendirilmiştir. Yapılan akış analizleri kanadın statik analiziyle birleştirilerek kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ANSYS Workbench yazılımında bu çalışmada kullanılan akışkan-yapı etkileşim analiz modelinden yararlanılarak kanadın farklı rüzgar hızlarındaki mekanik davranışının belirlenebileceği görülmüştür.
- Kanat üreticileri tarafından hazırlanan katalog bilgileri ile literatürde bulunan bilgilerden yararlanılarak rüzgar türbin kanadı tasarımının yapılabileceği görülmüştür.
- Kanat etrafındaki akış ortamında akış analizi yapılarak kanadın aerodinamik performansının (kanat yüzeyinde oluşan rüzgar hızları ve kanada etki eden basınçlar) belirlenebileceği gözlemlenmiştir.
- Akış analizi sonucu belirlenen basınç dağılımlarının kanadın statik analizine kanada etki eden aerodinamik yükler olarak aktarılabileceği belirlenmiş olup bu yöntem sadece rüzgar türbin kanatlarında değil bütün akışkan kaynaklı yüklemelere maruz sistemlerde kullanılabilir.
- Kanadın statik analizinde, rüzgar hızı arttıkça kanatta oluşan şekil değişimlerinin, kanatta oluşan gerilmelerin ve kanatta oluşan kırılma indeksi değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmada sadece statik analiz yapıldığından bu çalışmaya ek olarak kanadın dinamik analizinin, serbest titreşim analizinin ve yorulma analizinin yapılması önerilmektedir.

Kaynaklar

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.

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.

Griffin, D.A. and M.D. Zuteck, 2001. Scaling of composite wind turbine blades for rotors of 80 to 120 meter diameter, *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 123(4). 310-318.

Grujicic, M.; Arakere, G.; Pandurangan, B.; Sellappan, V.; Vallejo, A.; Ozen, M., 2010. Multidisciplinary optimization for fiber-glass reinforced epoxy-matrix composite 5 MW horizontal-axis wind-turbine blades. *J.Mater. Eng. Perform*, 19, 1116-1127.

- Grujicic, M.; Arakere, G.; Sellappan, V.; Vallejo, A.; Ozen, M., 2010. *Structural-response analysis, fatigue-life prediction and material selection for 1 MW horizontal-axis wind-turbine blades*. *J. Mater. Eng. Perform*, 19, 780–801.
- Hermann, T.M.; Mamarthupatti, D.; Locke, J.E., 2005. *Postbuckling analysis of a wind turbine blade substructure*. *J. Sol. Energy Eng*, 127, 262–280.
- Høyland, J., 2010. *Challenges for large wind turbine blades*, *Philosophiae Doctor Thesis*, Norwegian University of Science and Technology
- Jensen, F.M.; Falzon, B.G.; Ankersen, J.; Stang, H., 2006. *Structural testing and numerical simulation of a 34 m composite wind turbine blade*. *Compos. Struct*, 76, 52–61.
- Kaya, K., 2014 *Rüzgar türbin kanadının mekanik tasarım esasları*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun 191 s.
- Lanting, Z., 2012. *Research on structural lay-up optimum design of composite wind turbine blade*, *Energy Procedia*, 14, 637-642.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G, Rogers, A.L., 2002, *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons Ltd.
- Rajadurai, J.S.; Christopher, T.; Thanigaiyarasu, G.; Nageswara Rao, B., 2008. *Finite element analysis with an improved failure criterion for composite wind turbine blades*. *Forsch. Ing*, 72, 193–207.
- Schubel, P.J., Crossley, R.J., 2012, *Wind turbine blade design review*, *Wind Engineering*, Cilt. 36 No 4, 365-388.
- Sun, P., Liu, Z., Gao, Y., Wu, S., 2009, *Lay-up design and structural analysis of 1.2 MW composite wind turbine blade*, *Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, CAID & CD 2009. IEEE 10th International Conference on*, 581-585
- Şenel, M.C., 2012, *Rüzgar Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının tasarım Esasları – Dinamik Davranış*, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 183 s.
- Wu, W., Young, W., 2012, *Structural Analysis and Design of the Composite Wind Turbine Blade*, *Applied Composite Material*, 19:247-257.
- URL 1: www.bladedynamics.com/docs/Dynamic49_DataSheet.pdf , Erişim tarihi 01.02.2014.