

## TÜRBİN KANATLARINDA EĞİLME-BURULMA ETKİLEŞİMİ KULLANARAK RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE YÜK AZALIMI SAĞLANMASI

Özgün Şener<sup>1</sup>, Touraj Farsadi<sup>2</sup>, ve Altan Kayran<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM), ODTÜ  
Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya Ankara/Türkiye  
<sup>1</sup>osener@metu.edu.tr, <sup>2</sup>touraj.farsadi@metu.edu.tr, <sup>3</sup>akayran@metu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışma kapsamında, 5MW'lık bir rüzgar türbini için türbin kanat kirişlerinin arasındaki flaş bölgelelerinde kullanılan karbon ve cam-elyaf kompozit katmanların tek yönlü ve kanat eksenine göre açılı yerleştirilmeleri ile yaratılmış olan eğilme-burulma etkileşiminin, rüzgar türbin sisteminde yüklerin azalmasına yönelik etkileri incelenmiştir. Bütün bir rüzgar türbin sisteminin esnek çoklu kütleli modelinin zamana bağlı aeroelastik analizleri, rüzgar türbin tasarım standartlarında yer alan çalışma senaryoları ve rüzgar koşulları yaratılarak farklı kanat konfigürasyonları için gerçekleştirilmiştir. Farklı malzemeler ve farklı elyaf açılına sahip kompozit katmanların yerleştirilmesiyle oluşturulan kanatlar, SWT ve PHATAS programlarında kurulan çoklu-kütleli türbin modellerine entegre edilmiş ve rüzgar türbin modellerinin IEC-61400-1 türbin tasarım standardına göre tanımlanmış gerçek rüzgar koşullarında zamana bağlı aeroelastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı aeroelastik analiz sonuçları işlenerek yorulma hasarına eşdeğer yükler türbin sisteminde seçilecek olan izleme noktalarında hesaplanmıştır. Eğilme-burulma etkileşimli kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde eğilme-burulma etkileşiminin bütün bir türbin sistemi üzerindeki iç yüklerin azalmasına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kanatlarda eğilme-burulma etkileşimi uygulamanın herhangi bir dezavantajı gözlemlenmemiştir.

### 1. GİRİŞ

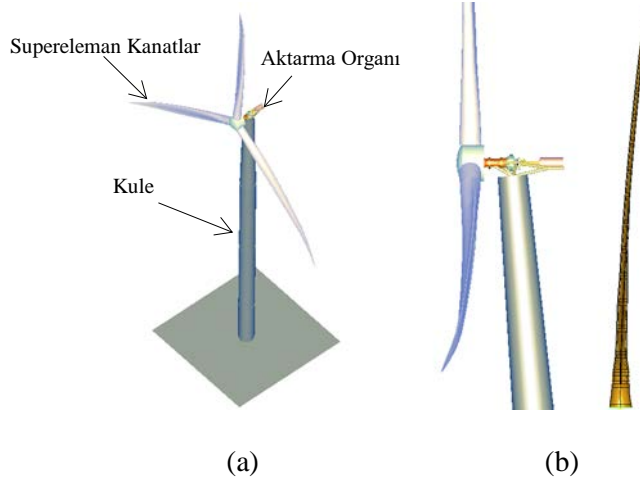
Rüzgar enerjisi teknolojileri, bir çok disiplinle ilişkisinin olması itibarı ile alt sistemler bazında araştırma geliştirmeye açık birçok konuyu içermektedir. Rüzgar türbin kanatları, türbin sisteminin en önemli alt yapı elemanlarından biridir. Türbin kanat yapıları, güç üretimini sağladıkları ve üzerlerinde oluşan yükler bütün türbin sistemine iletiildiği için, aerodinamik ve yapısal açıdan eniyileştirilmeleri elzem olan yapılardır. Rüzgar türbin sistemlerinden daha fazla güç elde edebilmek için daha yüksek kule ve daha uzun kanatlar gerekmektedir. Rüzgar türbin kanatlarında uzunluklar 100 m sınırına yaklaşmıştır. Bu nedenle, kanatların mümkün olduğunca hafif üretilmeleri ve kanatların esnemesi nedeni ile meydana gelen yüklerin azaltılması gerekmektedir. Aktif olarak kanatların hatve açısının değiştirilmesi ile yük kontrolü sağlanabileceği gibi, pasif olarak da kanatlarda kullanılan kompozit malzemenin anizotropik davranışından faydalanılarak, kanatlar üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin yarattığı kanat esnekliğinden kaynaklanan yükler azaltılabilir. Kanatların aerodinamik kuvvetler nedeni ile burulması, kanat kirişlerinin arasındaki flaş bölgelelerinde kullanılan kompozit malzemenin anizotropik davranışından faydalanılarak, eğilme nedeni ile yaratılacak olan olan ters burulma ile giderilebilir. Bu etki eğilme-burulma etkileşimi olarak bilinmektedir. Böylece kanatların üzerinde aeroelastik etkiler nedeni ile meydana gelen burulmaya bağlı ilave yüklerin, kompozit malzemenin eğilme-burulma etkileşim kapasitesinden faydalanılarak azaltılması mümkündür. Kanat üzerinde yüklerin azaltılması ile bütün türbin sisteminin üzerindeki yüklerin azaltılması söz konusu olduğundan, dinamik yükler altında çalışan rüzgar türbin sisteminin yorulma ömrü arttırılabilir ve dolayısı ile önemli bir ekonomik değer elde edilebilir. Özellikle uzun kanatlara

sahip, yüksek güç üreten rüzgar türbin sistemlerinde pasif yük kontrolü çok önem arz etmektedir. Rüzgar türbin kanatlarında pasif yük kontrolüne yönelik ilk öneri Karaolis tarafından yapılmıştır [1]. ECN'in akıllı rotor projesi kapsamında hazırlanmış olan raporda, eğilme-burulma etkileşiminden rüzgar türbin sistemlerinde nasıl faydalanılabileceğine dair değerlendirmeler yapılmıştır [3]. Sandia araştırma laboratuvarının bir araştırma çalışmasında, TPI Composites firması tarafından geliştirilen 9.2 m'lik kanatlar sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve kanat kirişlerinde kanat eksenine göre açılı karbon fiber kompozit malzemenin kullanılması yolu ile eğilme-burulma etkileşimi sağlanmış olan kanatlar ile baz cam-elyaf kanatlar eğilme, burkulma yükleri ve gerinim dağılımı açısından kıyaslanmıştır. Bu çalışma, kanat kirişlerinde karbon fiber kullanılması ile baz cam-elyaf kanatlar ile benzer yapısal davranış sağlanabileceği, ancak kanatların daha hafif tasarlanabileceğini göstermiştir [4]. Luczak ve çalışma arkadaşları eğilme –burulma etkileşimini deneysel olarak incelemişlerdir [5]. Bu çalışmada, Vestas firması tarafından verilmiş olan bir türbin kanadı değişikliğe uğratılmış, eğilme-burulma etkileşimi yaratacak şekilde kanadın belli bir bölgesinde üst ve alt kabuklarda tek yönlü kompozit katlar kanat eksenine göre açılı yerleştirilmişlerdir. Çalışmanın ana amacı, kanadın statik ve dinamik özelliklerinde eğilme-burulma etkileşiminden kaynaklanan değişmelerin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması ve deneysel olarak doğrulanmasıdır. Fedorov tarafından “Sayısal Görüntü Bağını (SGB)” sistemi ile de incelenmiş ve değişikliğe uğratılmış olan kanadın çeşitli yükler altında SGB sistemi ölçülen ile eğilme-burulma etkileşimi, sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmış ve yakın sonuçlar elde edilmiştir [6]. Capellaro, çalışmasında kanat kirişlerinde karbon kompozit malzemenin kanat eksenine göre açılı kullanılması ile yaratılan eğilme-burulma etkileşimi sayesinde, kanat kökündeki burulma ve her iki eksendeki eğilme momentleri için hesaplanan yorulma hasarına eşdeğer yüklerde azalma olduğunu tespit etmiştir [7].

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bütün bir türbin sisteminin esnek çok kütleli dinamik modeli yaratılmış ve rüzgar türbin kanat kirişlerinin arasındaki flaş bölgelerinde kullanılan kompozit katmanların tek yönlü ve kanat eksenine göre açılı yerleştirilmeleri ile yaratılacak olan eğilme-burulma etkileşiminin, bütün türbin sistemi üzerindeki yüklere olan etkileri gerçek rüzgar türbin çalışma senaryoları yaratılarak incelenmiştir. Kanatlarda yaratılan olan eğilme-burulma etkileşiminden faydalanarak, bütün bir rüzgar türbin sisteminin kritik izleme noktalarındaki (kanat kökü ve aktarma organları) iç yüklerde belli oranlarda azalma sağlanmasıdır. Yorulma hasarına eşdeğer yükler, rüzgar türbin sistemindeki alt yapı elemanlarının dinamik döngüsel yükler altında maruz kalacağı malzeme yorulması kaynaklı hasarının bir göstergesi olup, hasara eşdeğer yüklerde azalma sağlanması yapısal elemanların yorulma ömrünün artması anlamına gelmektedir. Rüzgar türbin tasarım standartlarında yer alan gerçek çalışma senaryoları ve rüzgar koşulları altında, farklı malzeme ve elyaf açı konfigürasyonları kullanarak kanatlarda yaratılan eğilme-burulma etkileşiminden faydalanarak sadece türbin kanatlarında değil, bütün rüzgar türbin sistemi üzerindeki izleme noktalarında oluşan yüklerde azalma sağlanması hedeflenmiştir. Tasarım yük durumları ise, IEC 61400-1'de [8] belirtilmiş olan rüzgar türbin sisteminin çalışmaya başlaması, güç üretimi, normal durdurulması yük durumları olarak alınmıştır. Bu çalışma için Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen 5MW'lık rüzgar türbin kanadı [9] modellenmiştir. Samcef Wind Turbine (SWT) [10] ve PHATAS [11] esnek çok-kütleli simülasyon kodları kullanılmıştır. Rüzgar türbinlerinin 600 saniyelik esnek çoklu kütleli modelinin zamana bağlı aeroelastik analizleri, 15 m/s ortalama hıza sahip 6 farklı türbülanslı rüzgar profiline göre gerçekleştirilip, bu analizlerden elde edilen ortalama değerler ile, monitör noktalarındaki yüz azaltımları, güç üretimi ve kanatlardaki enson gerilim değerleri incelenmiştir.

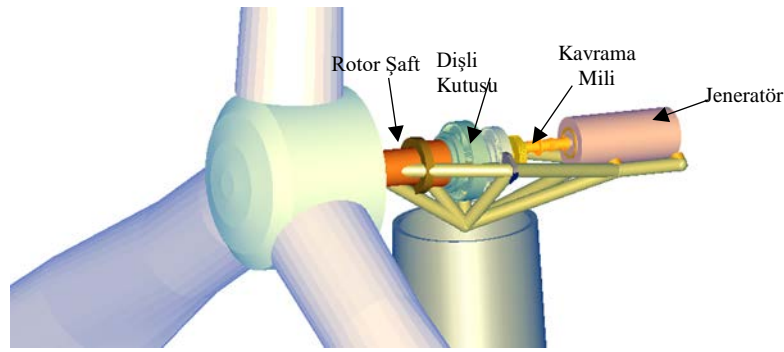
## 2. REFERANS RÜZGAR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ

Kanatlarda kullanılan fiber açısının etkisi, 5 MW'lık rüzgar türbininin SWT ve PHATAS kodları ile çok-kütle modellenmesi ile incelenmiştir. SWT ve PHATAS kodlarında, türbinleri birebir aynı şekilde modellemek mümkün değildir, fakat benzer modeller üretebilmek için gerekli parametreler ayarlanmıştır. SWT ile yaratılan türbinde basit kule modeli, makine temeli (bedplate), kavrama mili (coupling shaft), jeneratör, 5 MW kontrolcü ve eğimli süpereleman kanatlar bulunmaktadır. Şekil 1'de rüzgar türbinin SWT'de yaratılan modeli ve uçta 4 metre eğimli kanat ile 5°'lik eğim açısı görülebilir.



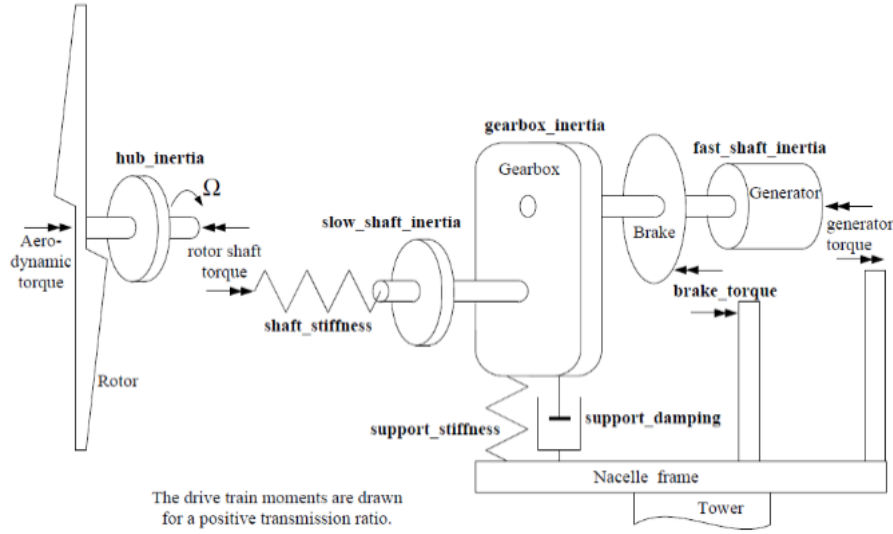
Şekil 1. (a) Rüzgar türbini SWT modeli ve (b) rotor eğim açısı ile ön eğimli kanat

Şekil 2, SWT'de modellenen rüzgar türbini aktarma organlarının ana parçalarını göstermektedir. Şekil 2'de aksenal ve yanal yükleri taşıyan iki adet mil yatağı, dişli kutusu ve dişli kutusu ile jeneratör arasında bağlantı vazifesi göre kavrama mili görülebilir.



Şekil 2. SWT'de yaratılan türbin modelinin aktar organ elemanları

Şekil 3'te ise PHATAS programında oluşturulan aktarma organları modeli görülebilir. Aktarma organı parametrelerinden değiştirilebilir olanları kalın karakterlerle belirtilmiştir.



Şekil 3. PHATAS aktar organı modeli

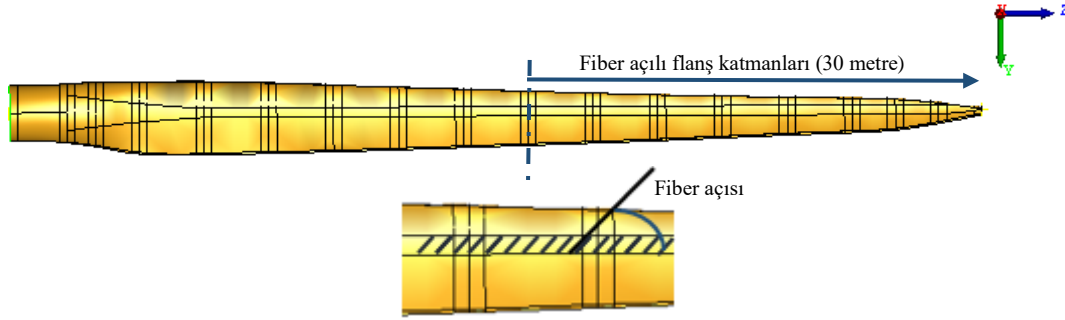
SWT ve PHATAS'ta yaratılan rüzgar türbin simülasyon modellerinde bir takım farklılıklar bulunmaktadır. SWT modelinde, üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak süpereleman kanat modelleri uygulanmıştır. Rotor hızı, PI kontrolcüsüyle sağlanmıştır. Rüzgar türbinine etkiyen türbülanslı rüzgar TurbSim [12] kodu ile yaratılmıştır. PHATAS'ta ise hatve açısı PD kontrolcüsüyle kontrol edilmiştir. Geometrik lineer olmayan kanat modelinin kesit özellikleri *Variational Asymptotic Beam Section (VABS)* [13] kodu ile elde edilmiştir. PHATAS modelinde, dişli kutusu yalnızca dişli tahvil oranıyla tanımlanabilmektedir. PHATAS programında, türbülanslı rüzgar SWIFT [14] kodu ile yaratılmaktadır. Bütün simülasyonlarda talep edilen tork değeri 37880 Nm olarak belirlenmiştir. Eğilme-burulma etkileşimi kullanılarak oluşturulan türbin kanatları kullanılarak yaratılan bütün rüzgar türbin modellerinde, etki eden rüzgar profilinde 5MW'lık enerji üretilebilmektedir. Çizelge 1'de referans rüzgar türbin modelinin öne çıkan özellikleri görülebilmektedir.

Çizelge 1. Referans türbin modelinin ana özellikleri

Türbinin ana gücü	5 MW
Kanat sayısı	3
SWT ve PHATAS'ta kullanılan kanat eleman sayısı	17
Kanadın ucunda verilen ön eğilme	4m
Nominal rotor dönme hızı	12 RPM
Talep edilen jeneratör torku	37880 Nm
Wind speed at hub height	15 m/s
SWT'de türbülanslı rüzgar yaratan kod	TURBSIM [12]
PHATAS'ta türbülanslı rüzgar yaratan kod	SWIFT [14]
Dişli oranı	105
Rotor/Rotor göbek çapı	126 m/4 m
Rotor göbek uzunluğu	4 m
Kanat uzunluğu	61.5 m
Rotor konikliği	0°
Rotor eğim açısı	5°
Kule yüksekliği	98.2 m
Rotor göbek yüksekliği	100 m
Rotor göbek kütlesi	50000 kg
Rotor göbek ataleti	100000 kgm <sup>2</sup>
Kontrolcü (SWT)	PI yunuslama pozisyon kontrolü
Kontrolcü (PHATAS)	PD yunuslama hız kontrolü

### 3. RÜZGAR TÜRBİN MODELLERİNİN SWT ve PHATAS SİMÜLASYONLARI

Rüzgar türbin simülasyonları, Kaimal türbülans modeli ve güç üretimi durumlarına göre gerçekleştirilmiştir. IEC 61400-1 standartlarına uygun şekilde, her rüzgar türbin konfigürasyonu için 6 farklı türbülanslı rüzgar tanımı altında analizler gerçekleştirilmiştir. TurbSim ve SWIFT kodlarıyla seçkisiz şekilde yaratılan rüzgar profilleri, rüzgar türbinlerinin SWT ve PHATAS analizlerinde kullanılmıştır. Analizler, 15 m/s ortalama rüzgar hızı ve 0.2 rüzgar kesme faktörüne göre yapılmıştır. Altı farklı türbülanslı rüzgar tanımı altında gerçekleştirilen esnek çoklu kütleli türbin modelinin zamana bağlı aeroelastik analizleri sonuçlarının ortalaması alınmıştır.



**Şekil 4.** Kirişler arası flaş bölgesinde uygulanan kanat eksenine göre fiber açılı flaş katmanları

Rüzgar türbin kanatlarındaki kirişlerin arasında kalan flaş bölgeleri karbon ve cam-elyaf kompozit malzemeleri kullanmak suretiyle modifiye edilerek 5 adet farklı kanat dizayn edilmiştir. Referans türbin kanadının flaş bölgelerinde  $0^\circ$  fiber açılı cam-elyaf kompozit malzeme kullanılmıştır. Eğilme-burulma etkileşimini sağlamak amacıyla, karbon ve cam-elyaf kompozit malzemeler kirişler arasında kalan flaş bölgelerinde, kanat eksenine göre  $5^\circ$  ila  $15^\circ$  arasında değişen açılarda yerleştirilmiştir. Bütün kanat konfigürasyonlarında, kanatların kökten itibaren 31.5 metrelik kısmında  $0^\circ$  fiber açılı cam-elyaf kompozit malzeme uygulanmıştır. Kanatların son 30 metrelik kısımlarında  $5^\circ$  ila  $15^\circ$  arasında değişen fiber açı konfigürasyonlarında uygulanan karbon ve cam-elyaf malzemeleri ile eğilme-burulma etkileşimleri sağlanmıştır. Modifikasyona uğrayan kanat kısımları Şekil 4'te görülebilir.

Rüzgar türbin kanat kirişlerinin arasındaki flaş bölgelerinde kullanılan kompozit (karbon ve cam-elyaf fiber takviyeli epoksi) katmanların tek yönlü ve kanat eksenine göre açılı yerleştirilmeleri ile yaratılmış olan değişik malzeme konfigürasyonuna sahip kanatlar, rüzgar türbin sisteminin çoklu kütleli modeline aktarılmış ve her değişik kanat malzeme konfigürasyonu için farklı bir türbin modeli yaratılmıştır. Daha sonra, türbin modellerinin IEC 61400-1 rüzgar türbin tasarım standardında tanımlanmış olan gerçek çalışma senaryoları ve rüzgar koşullarında zamana bağlı aeroelastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı aeroelastik analiz sonuçları işlenerek her tasarım yük durumu için yorulma hasarına eşdeğer iç yükler türbin sisteminde seçilecek olan izleme noktalarında hesaplanmıştır. Yorulma hasarına eşdeğer iç yükler kıyaslanmış ve rüzgar türbin kanatlarında yaratılmış olan eğilme-burulma etkileşiminin bütün bir türbin sistemi üzerindeki yorulma hasarına eşdeğer iç yüklerin azalmasına olan etkileri incelenmiştir.

Yorulma hasarına eşdeğer yük, Denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Hesaplama, yorulmaya esas iç yüklerin çevrim sayısı  $N$  ile,  $F^m N = \text{sabit}$  ilişkisi içinde değiştiği varsayılmakta ve Miner kuralında hasar terimi  $D=1$  alınarak 1 numaralı denklemdeki ilişki çıkarılmaktadır. Denklem 1'de  $m$  yorulma üssü,  $n_i$  ise;  $F_i$  iç yükündeki Rainflow analizi sonucunda hesaplanan çevrim sayısını göstermektedir.  $N_{ref}$  ise referans bir çevrim sayısı olup, Denklem 1, iki farklı yük durumu için hesaplanıp orantılandırıldığında, yorulma hasarına eşdeğer yükler arasındaki oran referans çevrim sayısından bağımsız hale gelmektedir.

$$F_{ref} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (F_i^m n_i) / N_{ref}}{N_{ref}} \right)^{1/m} \quad (1)$$

Erişilmek istenen sonuç, kanatlarda yaratılacak olan eğilme-burulma etkileşiminden faydalanarak, bütün bir rüzgar türbin sisteminin kritik izleme noktalarındaki yorulma hasarına eşdeğer iç yükler belli oranlarda azalma sağlanmasıdır. Yorulma hasarına eşdeğer yükler, rüzgar türbin sistemindeki alt yapı elemanlarının dinamik çevrimsel yükler altında maruz kalacağı malzeme yorulması kaynaklı bozulmasının bir göstergesi olup, yorulma hasarına eşdeğer yüklerde azalma sağlanması yapısal elemanların yorulma ömrünün artması anlamına gelmektedir. Yapısal elemanların yorulma ömrünün artışı ekonomik bir fayda sağlanması anlamında gelmektedir.

SWT rüzgar türbin sisteminin modelinde kullanılan süper eleman kanatlar Samcef Field [15] programında yaratılmışlardır. SWT rüzgar türbin sistemindeki dinamik süper eleman kanatlar kanadın üç boyutlu sonlu elemanlar modelinden Craig-Bampton bileşen mod metodunu kullanarak yaratılmıştır. Önce kanadın üç boyutlu sonlu elemanlar modeli Samcef Field sonlu elemanlar programında yaratılmış ve aynı programda kanadın dinamik süper eleman modeli oluşturulmuştur. Dinamik süper eleman doğrusal olmayan süper elemandır. Doğrusal olmayan davranış süper eleman kanadın uzayda büyük deplasman ve dönme hareketi yapmasından kaynaklanmakta, ancak kanada bağlı sabit bir koordinat sistemine göre kanat geometrik olarak doğrusal davranış göstermektedir. Samcef Field programında yaratılan süper eleman daha sonra rüzgar türbin sisteminin çoklu kütleli dinamik kodu olan SWT programına aktarılıp rüzgar türbin sisteminin analizleri gerçekleştirilmektedir. Süper eleman kanat modeli kullanmanın en önemli avantajı süper eleman kanadın detaylı sonlu elemanlar modeli ile direkt bağlantısının olmasının yanında çok az sayıda serbestlik derecesine sahip olmasıdır. Az sayıda serbestlik derecesi rüzgar türbin sisteminin zamana bağlı analizlerinin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Ayrıca, süper eleman kanat, kanadın üç boyutlu sonlu elemanlar modelinden yaratıldığı için, üç boyutlu kanadın sahip olduğu bütün deformasyon etkileşimlerini hesaba katmaktadır. Rüzgar türbinlerinin PHATAS modellemesinde ise kesit özellikleri Variational Asymptotic Beam Section (VABS) kodunda hesaplanmış doğrusal olmayan kiriş modelleri kullanılmaktadır. Tasarlanan kanat modelleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

**Çizelge 2.** Eğilme-burulma etkileşiminin rüzgar türbin sistemindeki yorulma hasarına eşdeğer yükler üzerinde etkisinin incelenme çalışması için tasarlanan türbin kanatları

Kanat İsmi	Tanım
GFRP_1	Kanadın son 30 metresinde ana kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesindeki kompozit katmanlardaki elyaflar kanat eksenine boyunca (0°) yerleştirilmiştir.
GFRP_2	Kanadın son 30 metresinde ana kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesindeki kompozit katmanlardaki elyaflar kanat eksenine açılı (θ derece) yerleştirilmiştir. <b>Not:</b> Cam elyaf epoksi referans kanadın (GFRP_1) 0° katmanları θ derece yapılmıştır.
HGCFRP_2	karbon epoksi katmanlar kullanılmış ve karbon elyaflar kanat eksenine ile açılı (θ °) yerleştirilmiştir. <b>Not:</b> Referans hibrit cam-karbon elyaf epoksi kanadın (HGCFRP_1) 0° katmanları θ derece yapılmıştır.
HGCFRP_3	Kanadın son 30 metresinde ana kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesinde sadece karbon epoksi katmanlar kullanılmış ve karbon elyaflar kanat eksenine ile açılı (θ°) yerleştirilmiştir. <b>Not:</b> Kanadın son 30 metresinde kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesindeki kompozit katman sayıları ayarlanarak, bu kesitlerin kelebekleme eğilme katılıklarının cam elyaf epoksi eğilme-burulma etkileşimli kanadın (GFRP_2) aynı kesitlerinin kelebekleme eğilme katılıkları ile çok yakın olması sağlanmıştır.
HGCFRP_5	Kanadın son 30 metresinde ana kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesinde cam elyaf epoksi ve karbon epoksi katmanlar kullanılmış ve katmanlar kanat eksenine ile açılı (θ °) yerleştirilmiştir. <b>Not:</b> Cam elyaf epoksi referans kanadın (GFRP_1) 0° katmanlarının 2/3’ünün elyaf açılı θ derece yapılmıştır. Cam elyaf epoksi referans kanadın (GFRP_1) 0° katmanlarının 1/3’ü ise karbon epoksi katmanlar ile değiştirilmiş ve katmanların elyaf açılı θ derece yapılmıştır.

#### 4. EĞİLME-BURULMA ETKİLEŞİMİNİN YORULMA HASARINA EŞDEĞER YÜKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

SWT ve PHATAS programlarında 5°, 10°, 15°, ve 20° elyaf açısı durumları için 6 farklı türbülanslı rüzgar profili altında rüzgar türbin sisteminin zamana bağlı aeroelastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir rüzgar profili için rüzgar türbin sisteminin kritik noktalarında yorulma hasar eşdeğer yük oranları (Denklem 1) hesaplanmış ve sonra 6 farklı türbülanslı rüzgar profili için hesaplanmış olan yorulma hasarına eşdeğer yük oranlarının ortalaması alınmıştır. SWT programında kurulan rüzgar türbin sisteminde yorulma hasarına eşdeğer yük oranları (YHEYO) kanat kökünde ve aktarma organları içindeki ana rulmanda hesaplanmıştır. PHATAS programında ise yorulma hasarına eşdeğer yük oranları kanat kökü ve rotor şaft monitör noktalarında hesaplanmıştır.

##### 4.1. SWT ANALİZLERİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

##### 4.1.1. Eğilme-Burulma Etkileşimli Kanatlara Sahip Rüzgar Türbin Sistemlerinde Kanat Kökündeki Yorulma Hasarına Eşdeğer Yükler

Çizelge 3-6, cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükleri sırasıyla 5°, 10°, 15°, 20° elyaf açısı durumları için vermektedir. Çizelge 3-6'daki sonuçlar, altı farklı türbülanslı rüzgar profili altında gerçekleştirilen rüzgar türbin analizleri sonucunda elde edilen yorulma hasarına eşdeğer yük oranlarının ortalamalarıdır. Çizelge 3-6'da görüldüğü gibi eğilme burulma etkileşimli kanatlardaki elyaf açısı arttıkça kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer kelebekleme eğilme momenti ve kesme kuvvet oranlarının azalma eğiliminde oldukları görülmektedir. Kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesinde kanat eksenine göre açılı elyaf kullanılması ana olarak kelebekleme eğilme ve burulma etkileşimine neden olmaktadır. Kelebekleme eğilme ve burulma etkileşimi ise kanat profilini gördüğü etkili hücum açısının azalmasına neden olmakta ve akabinde kanat kesitinde kaldırma kuvveti azalmaktadır. Bu nedenle, kanat kirişleri arasındaki flanş bölgesinde kanat eksenine göre açılı elyaf kullanılması, kelebekleme eğilme momenti ve kesme kuvvetinde önemli boyutta azalmaların meydana gelmesine neden olmaktadır.

**Çizelge 3.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )= 5°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
(Denklem 1)	YHEYO Kelebekleme eğilme momenti	0.95	0.91	0.92	0.98
	Kılıçlama eğilme momenti	1.00	0.82	0.82	0.98
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.97	0.94	0.95	0.99
	Kılıçlama kesme kuvveti	1.00	0.91	0.92	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 4.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )= 10°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
(Denklem 1)	YHEYO Kelebekleme eğilme momenti	0.92	0.86	0.85	0.93
	Kılıçlama eğilme momenti	0.99	0.84	0.81	0.97
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.95	0.91	0.90	0.96
	Kılıçlama kesme kuvveti	1.00	0.92	0.91	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 5.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı  $(\theta) = 15^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO (Denklemler 1)	Kelebekleme eğilme momenti	0.88	0.79	0.84	0.90
	Kılıçlama eğilme momenti	0.99	0.81	0.84	0.97
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.93	0.85	0.89	0.94
	Kılıçlama kesme kuvveti	1.00	0.91	0.92	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 6.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı  $(\theta) = 20^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO (Denklemler 1)	Kelebekleme eğilme momenti	0.87	0.76	0.82	0.87
	Kılıçlama eğilme momenti	1.00	0.81	0.84	0.97
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.91	0.83	0.88	0.92
	Kılıçlama kesme kuvveti	1.00	0.91	0.92	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

#### 4.1.2. Eğilme-Burulma Etkileşimli Kanatlara Sahip Rüzgar Türbin Sistemlerinde Ana Rulman 1'deki Yorulma Hasarına Eşdeğer Yükler

Şekil 2'de gösterilmiş olan SWT rüzgar türbin modelinde aksenal kuvvetin ana taşıyıcısı olan ana rulman 1'de yorulma hasarına eşdeğer yük oranları  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  elyaf açısı durumları için 6 farklı türbülanslı rüzgar profili için hesaplanmış ve yorulma hasarına eşdeğer yük oranlarının ortalamaları Çizelge 7-10'da verilmiştir. Çizelge 7-10 incelendiğinde, eğilme-burulma etkileşimli kanatlarda elyaf açısı arttıkça yorulma hasarına eşdeğer ana rulman 1 aksenal kuvvet ve kesme kuvvetlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Rüzgar türbinini üzerine etki eden aksenal kuvvet kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin bileşkesidir. Bu nedenle, kanat girişleri arasındaki flanş bölgesinde kanat eksenine göre açılı elyaf kullanılması, rüzgar türbin sistemi üzerine etki eden aksenal kuvvetin azalmasına neden olmaktadır. SWT programında aksenal kuvvet ana rulman 1 (Şekil 2) tarafından karşılanmaktadır. Yorulma hasarına eşdeğer aksenal kuvvetin azalması rüzgar türbin sisteminin aktarma organının önemli bileşenlerinden olan ana rulmandaki yorulma hasarlarının önlenmesi veya gecikmesi açısından son derece önemlidir.

**Çizelge 7.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde ana rulman 1'de yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı  $(\theta) = 5^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Eksenal kuvvet Fx	0.93	0.88	0.88	0.92
	Kesme kuvveti Fy	0.99	0.99	1.00	1.02
	Kesme kuvveti Fz	0.99	0.98	0.98	1.01

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000



**Çizelge 8.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde ana rulman 1’de yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri <sup>a</sup>/ Elyaf açısı  $(\theta) = 10^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Eksenel kuvvet Fx	0.89	0.82	0.82	0.88
	Kesme kuvveti Fy	0.98	0.95	0.95	0.99
	Kesme kuvveti Fz	0.96	0.94	0.93	0.99

<sup>a</sup>Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 9.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde ana rulman 1’de yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri <sup>a</sup>/ nElyaf açısı  $(\theta) = 15^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Eksenel kuvvet Fx	0.86	0.78	0.81	0.86
	Kesme kuvveti Fy	0.96	0.91	0.95	0.98
	Kesme kuvveti Fz	0.94	0.88	0.92	0.96

<sup>a</sup>Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 10.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde ana rulman 1’de yorulma hasarına eşdeğer yükler / SWT Analizleri <sup>a</sup>/ Elyaf açısı  $(\theta) = 20^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Eksenel kuvvet Fx	0.86	0.73	0.80	0.85
	Kesme kuvveti Fy	0.95	0.75	0.93	0.96
	Kesme kuvveti Fz	0.93	0.73	0.90	0.94

<sup>a</sup>Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 15-615 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

## 4.2. PHATAS ANALİZLERİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

### 4.2.1. Eğilme-Burulma Etkileşimli Kanatlara Sahip Rüzgar Türbin Sistemlerinde Kanat Kökündeki Yorulma Hasarına Eşdeğer Yükler

Çizelge 11-14 cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükleri sırasıyla  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  elyaf açısı durumları için vermektedir. Çizelge 11-14’te görüldüğü gibi eğilme burulma etkileşimli kanatlardaki elyaf açısı arttıkça kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer kelebekleme eğilme momenti ve kesme kuvvet oranlarının azalma eğiliminde oldukları görülmektedir. Eğilme-burulma etkileşimli kanatlarda elyaf açısı arttıkça yorulma hasarına eşdeğer kelebekleme eğilme moment oranında genel olarak azalma meydana gelmektedir. PHATAS ve SWT programları ile elde edilmiş olan yorulma hasarına eşdeğer kelebekleme moment oranının elyaf açısı ile olan değişimlerinin benzerlik arz etmesidir. Bu benzerlik iki farklı rüzgar türbin analiz programı ile gerçekleştirilen analizlerin güvenilir olduğunun göstergesidir.

**Çizelge 11.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )= 5°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Kelebekleme eğilme momenti	0.92	0.85	0.85	0.93
	Kılıçlama eğilme momenti	0.99	0.98	0.98	0.98
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.95	0.90	0.90	0.96
	Kılıçlama kesme kuvveti	0.99	0.99	0.99	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 12.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )= 10°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Kelebekleme eğilme momenti	0.86	0.77	0.77	0.86
	Kılıçlama eğilme momenti	0.98	0.96	0.97	0.98
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.90	0.84	0.84	0.90
	Kılıçlama kesme kuvveti	0.99	0.99	0.99	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 13.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )= 15°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Kelebekleme eğilme momenti	0.84	0.73	0.77	0.83
	Kılıçlama eğilme momenti	0.98	0.96	0.97	0.97
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.89	0.81	0.84	0.88
	Kılıçlama kesme kuvveti	0.99	0.99	0.99	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 14.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde kanat kökündeki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )= 20°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Kelebekleme eğilme momenti	0.81	0.71	0.77	0.81
	Kılıçlama eğilme momenti	0.97	0.96	0.97	0.97
	Kelebekleme kesme kuvveti	0.87	0.79	0.84	0.86
	Kılıçlama kesme kuvveti	0.99	0.99	0.99	0.99

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

#### 4.2.1. Eğilme-Burulma Etkileşimli Kanatlara Sahip Rüzgar Türbin Sistemlerinde Aktarma Organları ve Rotor Şafttaki Yorulma Hasarına Eşdeğer Yükler

PHATAS programında kurulmuş olan rüzgar türbininde aktarma organları ve rotor şafttaki yorulma hasarına eşdeğer yük oranları  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  elyaf açısı durumları için 6 farklı türbülanslı rüzgar profili için hesaplanmış ve yorulma hasarına eşdeğer yük oranlarının ortalamaları Çizelge 15-18'de verilmiştir.

**Çizelge 15.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde aktarma organları ve rotor şafttaki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )=  $5^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Rotor şaft – Tork	0.97	1.08	1.05	0.98
	Rotor şaft – Sapma Momenti	0.92	0.84	0.85	0.94
	Rotor – Devirme Momenti	0.92	0.84	0.85	0.93
	Rotor şaft – Bileşke Eğilme Momenti	0.94	0.88	0.89	0.96
	Aktarma organı – Devirme Momenti	0.95	0.90	0.90	0.97
	Aktarma organı – Sapma Momenti	0.95	0.90	0.90	0.97
	Rotor – Eksenel aerodinamik kuvvet	0.95	0.97	0.97	0.95
	Rotor şaft eksenel baskı kuvveti	0.95	0.91	0.91	0.95
	Aktarma organı – Yanal kuvvet	0.98	0.98	0.98	0.99
	Aktarma organı – Dikey kuvvet	0.98	0.96	0.96	0.98

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 16.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde aktarma organları ve rotor şafttaki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )=  $10^\circ$

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Rotor şaft – Tork	0.94	1.01	1.01	0.93
	Rotor şaft – Sapma Momenti	0.86	0.76	0.76	0.86
	Rotor – Devirme Momenti	0.86	0.76	0.77	0.86
	Rotor şaft – Bileşke Eğilme Momenti	0.89	0.81	0.81	0.90
	Aktarma organı – Devirme Momenti	0.90	0.82	0.82	0.91
	Aktarma organı – Sapma Momenti	0.90	0.82	0.82	0.91
	Rotor – Eksenel aerodinamik kuvvet	0.91	0.93	0.93	0.91
	Rotor şaft eksenel baskı kuvveti	0.90	0.84	0.84	0.89
	Aktarma organı – Yanal kuvvet	0.94	0.92	0.93	0.95
	Aktarma organı – Dikey kuvvet	0.94	0.91	0.91	0.94

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 17.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde aktarma organları ve rotor şafttaki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )=15°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Rotor şaft – Tork	0.94	1.01	0.93	0.91
	Rotor şaft – Sapma Momenti	0.84	0.72	0.76	0.83
	Rotor – Devirme Momenti	0.83	0.72	0.76	0.83
	Rotor şaft – Bileşke Eğilme Momenti	0.87	0.77	0.81	0.87
	Aktarma organı – Devirme Momenti	0.89	0.79	0.83	0.89
	Aktarma organı – Sapma Momenti	0.89	0.79	0.84	0.89
	Rotor – Eksenel aerodinamik kuvvet	0.92	0.92	0.92	0.92
	Rotor şaft eksenel baskı kuvveti	0.90	0.83	0.86	0.89
	Aktarma organı – Yanal kuvvet	0.93	0.90	0.92	0.94
	Aktarma organı – Dikey kuvvet	0.94	0.91	0.92	0.94

<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

**Çizelge 18.** Cam elyaf epoksi ve hibrit cam/karbon elyaf epoksi kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde aktarma organları ve rotor şafttaki yorulma hasarına eşdeğer yükler / PHATAS Analizleri<sup>a</sup> / Elyaf açısı ( $\theta$ )=20°

Rüzgar türbin sistemi		GFRP_2	HGCFRP_2	HGCFRP_3	HGCFRP_5
YHEYO	Rotor şaft – Tork	0.93	1.03	0.91	0.90
	Rotor şaft – Sapma Momenti	0.81	0.69	0.76	0.80
	Rotor – Devirme Momenti	0.81	0.70	0.77	0.80
	Rotor şaft – Bileşke Eğilme Momenti	0.84	0.74	0.81	0.84
	Aktarma organı – Devirme Momenti	0.86	0.76	0.83	0.85
	Aktarma organı – Sapma Momenti	0.86	0.76	0.83	0.86
	Rotor – Eksenel aerodinamik kuvvet	0.90	0.89	0.89	0.89
	Rotor şaft eksenel baskı kuvveti	0.87	0.81	0.84	0.86
	Aktarma organı – Yanal kuvvet	0.91	0.86	0.90	0.91
	Aktarma organı – Dikey kuvvet	0.92	0.89	0.90	0.91

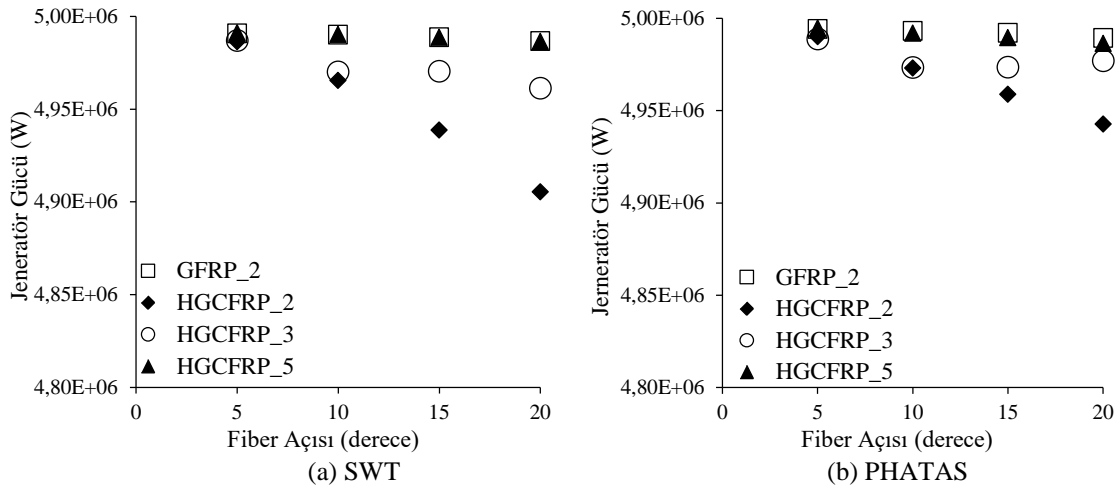
<sup>a</sup> Ortalama rüzgar hızı: 15 m/s, Yorulma hasarına eşdeğer yükün hesaplandığı zaman aralığı: 30-630 saniye, Yorulma üssü=4, Yükün bölündüğü aralık sayısı=1000

Çizelge 3-6 ve Çizelge 15-18 birlikte incelendiğinde, PHATAS programında kurulan rüzgar türbin modelinde hesaplanan rotor şaft eksenel baskı kuvvetinin, SWT programında kurulan rüzgar türbin modelinde ana rulman l'in taşıdığı eksenel kuvvet ile benzer olduğu değerlendirilmiştir. Bu yakınlık iki farklı rüzgar türbin analiz programı ile gerçekleştirilen analizlerin güvenilir olduğunun bir göstergesidir.

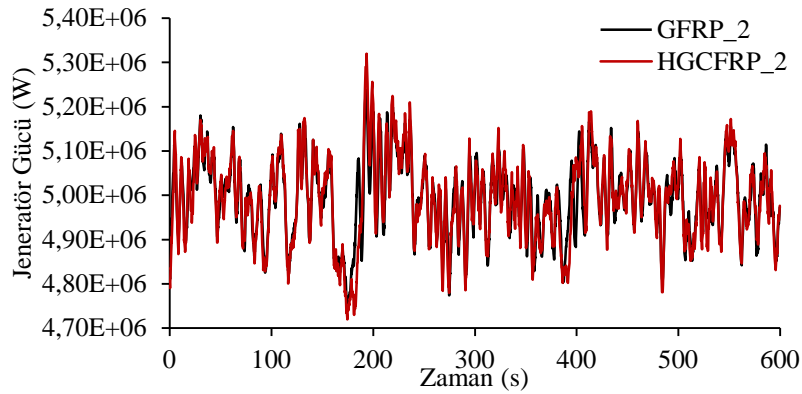
## 5. EĞİLME-BURULMA ETKİLEŞİMİNİN JENERATÖR GÜCÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Şekil 5'te SWT ve PHATAS programlarında 15 m/s ortalama hızda altı farklı 10 dakikalık türbülanslı rüzgar profili için gerçekleştirilen zamana bağlı aeroelastik analizler sonunda elde edilen ortalama jeneratör güçleri sunulmaktadır. Şekil 5'te verilmiş olan ortalama jeneratör güçleri hesaplanırken her bir rüzgar profili için jeneratör güçlerinin 10 dakikalık ortalaması alınmış ve daha sonra altı farklı rüzgar türbin analizi sonunda elde edilmiş olan 10 dakikalık ortalamaların ortalaması alınmıştır. Eğilme-burulma etkileşimli kanatların eğilme-burulma etkileşimli bölgelerindeki elyaf açısı arttıkça ortalama güçte azalma meydana gelmektedir.

Ancak 15 m/s ortalama hız durumundaki türbülanslı rüzgar yükleri altında bütün eğilme-burulma etkileşimli kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde üretilen ortalama jeneratör güçleri ile referans kanatlı rüzgar sisteminin ürettiği ortalama jeneratör gücü arasındaki farklar %1'den daha düşüktür. Kanat kiriş flanşlarının eğilme-burulma etkileşimli bölgelerinde bütünü ile GFRP (*GFRP\_2*) veya hibrit GFRP ve CFRP (*HGCFRP\_5*) kullanılan kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinin ürettiği ortalama jeneratör güçleri referans kanatlı rüzgar türbin sisteminin ürettiği ortalama güce çok yakındır. Özellikle 5-10-15 derece elyaf açısı durumları için güç farkları çok azdır. Ek olarak, 20° fiber açı konfigürasyonuna sahip *HGCFRP\_2* ve *HGCFRP\_3* kanatlı rüzgar türbinlerinin ürettiği güç, referans rüzgar türbinine kıyasla sırasıyla yalnızca %1.7 ve %0.6 daha azdır. Şekil 6, 20 derece elyaf açısı durumu için eğilme-burulma etkileşimli kanatlı rüzgar türbinini *GFRP\_2* ve *HGCFRP\_2* için jeneratör gücünün zamanla değişimlerini vermektedir. Hibrit GFRP ve CFRP malzemesinden yapılmış olan eğilme-burulma etkileşimli kanada sahip rüzgar türbin sistemi *HGCFRP\_2*'nin ürettiği jeneratör gücünde meydana gelen ani düşüşler, bütünü GFRP malzemesinden yapılmış olan eğilme-burulma etkileşimli kanada sahip rüzgar türbin sistemi *GFRP\_2*'de meydana gelen ani güç düşüşlerine göre biraz daha büyüktür. Meydana gelen bu ani düşüşler, ortalama jeneratör güç üretiminde çok az bir farka yol açmaktadır.



Şekil 5. Eğilme-burulma etkileşimli kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde üretilen ortalama jeneratör gücünün elyaf açısı ile değişimi

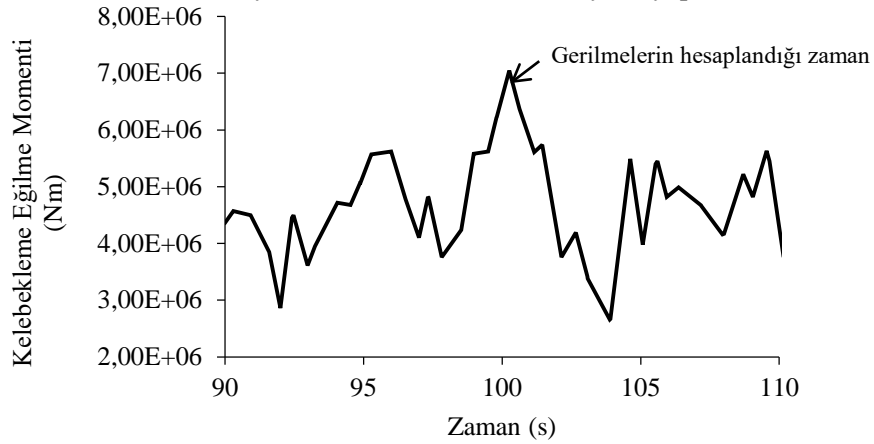


Şekil 6. Eğilme-burulma etkileşimli *GFRP\_2* ve *HGCFRP\_2* kanatlı rüzgar türbinlerinin jeneratör güç üretiminin zamana göre değişimi

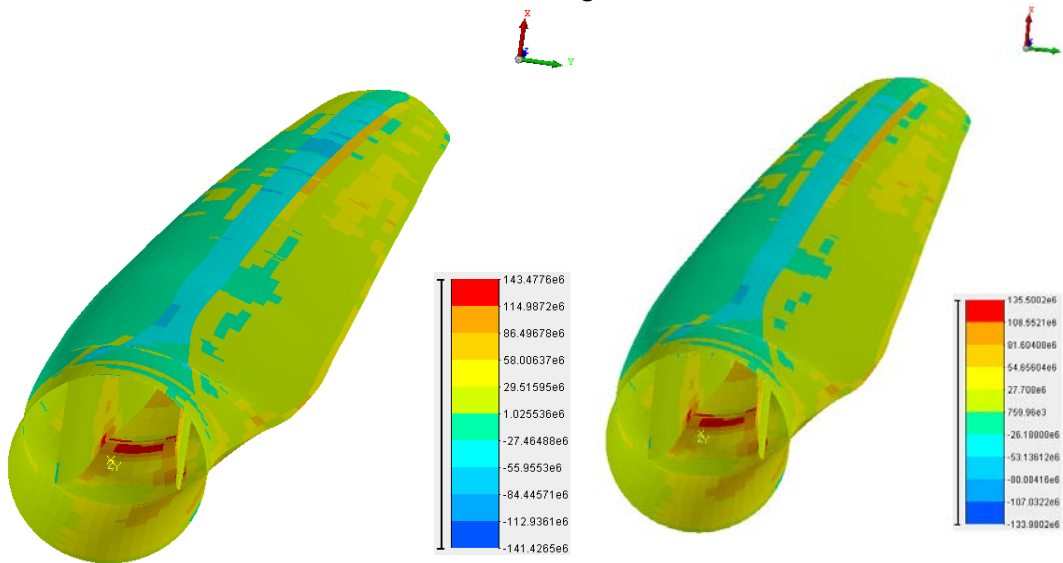
## 6. EĞİLME-BURULMA ETKİLEŞİMİNİN TÜRBİN SİSTEMLERİ KANATLARINDAKİ GERİLMELER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Eğilme-burulma etkileşimi nedeniyle rüzgar türbin sisteminde yorulma hasarına eşdeğer yüklerde önemli oranda azalmalar meydana gelmiştir. Yüklerde meydana gelen azalmalara paralel olarak bu kısımda referans kanat GFRP\_1 ve eğilme-burulma etkileşimli kanat GFRP\_2'nin kritik bölgesindeki gerilmeler kıyaslanmıştır. GFRP\_1 ve GFRP\_2 aynı ağırlıkta olduğu ve aynı malzemeden üretildikleri için eğilme-burulma etkileşiminin gerilmeler üzerindeki gerçek etkisi incelenebilmektedir. Her iki kanat içinde kritik kanat kesiti kanat kökünden yaklaşık olan 8.2 m uzaklıkta kanat geçiş kesiti ile DU40\_A17 kanat profilinin kesiti kesittir.

SWT programında zamana bağlı rüzgar türbin çözümü sona erdikten sonra katmanlardaki gerilmeler LMS Samcef programında yaratılmış olan üç boyutlu kanat sonlu elemanlar modelinde her zaman adımı için hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yöntemine “*Superelement Restitution*” denilmektedir. LMS Samcef programındaki çözüm SWT programında kanat modeli olarak bulunan süpereleman kanadın düğüm noktaları ile ilişkilidir. On dakikalık zamana bağlı rüzgar türbin analiz süresi içinde örnek bir gerilme hesaplaması referans kanat GFRP\_1 için Şekil 6'da kelebekleme eğilme momenti-zaman grafiğinde işaretlenmiş olan zamanda gerçekleştirilmiştir. Gerilme hesabı yaklaşık olarak 100.237 saniyede yapılmıştır.



Şekil 6. SWT programında gerilmelerin hesaplandığı zaman / Referans kanat GFRP\_1 / Kanat kökündeki kelebekleme eğilme momenti



(a) Referans kanat GFRP\_1

(b) Eğilme-burulma etkileşimli kanat GFRP\_2

Şekil 7. Birinci katmanın üst yüzeyindeki elyaf yönündeki gerilme dağılımı (Pa) / GFRP\_1 ve GFRP\_2 (Elyaf açısı=15°)

Referans kanat GFRP\_1 ve 15° elyaf açılı eğilme-burulma etkileşimli kanat GFRP\_2 için Şekil 7'de elyaf yönündeki gerilmeler kıyaslanmıştır. Her iki kanat içinde kritik kanat kesiti kanat kökünden yaklaşık olan 8.2 m uzaklıkta kanat geçiş kesiti ile DU40\_A17 kanat profilinin keşiştiği kesit olduğu Şekil 7'de verilmiş olan gerilme dağılımlarında görülmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi eğilme-burulma etkileşimli kanat GFRP\_2'nin kritik kesitinde elyaf yönündeki azami gerilmelerde referans kanat GFRP\_1'e göre azalmalar meydana gelmiştir. GFRP malzemesi için emniyet katsayısı hesaba katılmadan elyaf yönündeki dayanım 866 MPa, elyafa dik yöndeki dayanım 54 MPa ve düzlem içi kesme dayanımı 75 MPa'dır. Eğilme-burulma etkileşimi sayesinde rüzgar türbin kanat kesitlerinde kaldırma kuvvetinde meydana gelen azalma nedeniyle rüzgar türbin sisteminde yüklerde meydana gelen azalmaya paralel olarak kanadın kritik kesitinde gerilmelerde de azalmanın sağlanmış olması eğilme-burulma etkileşiminin kanat mukavemeti üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını göstergesidir. Eğilme-burulma etkileşimli kanat GFRP\_2'nin kritik kesitinde gerilmelerde referans kanada %5 civarında azalma meydana gelmiştir.

## 7. SONUÇ

Bu çalışmada eğilme-burulma etkileşiminin bütün rüzgar türbin sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kanatlarda uygulanan eğilme-burulma etkileşiminin, rüzgar türbini aktarma organlarında ve kanatlarda yük azaltımı sağlaması ile beraber kanatlardaki elyaf yönündeki gerilimde düşüşe yol açması öngörülmüştür. Bununla birlikte, eğilme-burulma etkileşimli kanatlara sahip türbinlerde üretilen elektrik gücünde kayda değer bir azalma öngörülmemiştir.

Eğilme-burulma etkileşimli kanatların rüzgar türbin sisteminde yorulma hasarına eşdeğer yüklerde sağladığı azalma açısından en uygun kanatların bütünü cam-elyaf epoksi olan GFRP\_2 ve hibrit cam-karbon elyaf epoksi kanat HGCFRP\_2 olduğu belirlenmiştir. Hibrit cam-karbon elyaf epoksi kanat HGCFRP\_5'in bütünü cam-elyaf epoksi olan GFRP\_2'den yorulma hasarına eşdeğer yüklerde sağladığı azalma açısından bir avantajı gözükmemektedir. Eğilme-burulma etkileşimli kanatlarda elyaf açısı arttıkça yorulma hasarına eşdeğer yüklerde sağlanan azalma artmaktadır. Eğilme-burulma etkileşimli kanatların dahil edildiği rüzgar türbin sistemlerinde, bazı yorulma yorulma hasarına eşdeğer yüklerde %20'yi aşan oranlarda azalmalar meydana gelmiştir. Gerçekleştirilen on dakikalık zamana bağlı rüzgar türbin analizlerinde eğilme-burulma etkileşimli kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinde azami yüklerin referans kanatlı rüzgar türbin sistemindeki azami yüklerden daha düşük olduğuda görülmüştür. Türbülanslı rüzgar yükü altında gerçekleştirilen zamana bağlı rüzgar türbin analizlerinde yükün zamanlar değişimi çok ani olmaktadır. Bu nedenle, azami yükler anlık olarak meydana geldiği için rüzgar türbin sisteminin yapısal sağlığının değerlendirilmesi için bu çalışma kapsamında ana olarak yorulma hasarına eşdeğer yükler üzerinde durulmuştur. Rüzgar türbin sisteminin kritik noktalarında hesaplanan yorulma hasarına eşdeğer yükler, altı farklı analiz sonucunda elde edilen yorulma hasarına eşdeğer yüklerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. IEC-61400-1 standartlarına göre en az altı farklı rüzgar türbin analizinin yapılması önerilmektedir. Çalışma kapsamında iki farklı rüzgar türbin analiz programı ve altı farklı rüzgar profili altında gerçekleştirilen rüzgar türbin sisteminin analizleri sonucunda hesaplanmış olan yorulma hasarına eşdeğer yüklerin güvenilir olduğu değerlendirilmiştir.

Eğilme-burulma etkileşimli kanatlara sahip rüzgar türbin sistemlerinin ürettikleri güç değerlendirildiğinde GFRP\_2 ve HGCFRP\_5 kanatlarına sahip rüzgar türbin sistemlerinde meydana gelen güç azalması HGCFRP\_2 ve HGCFRP\_3 kanatlarına sahip rüzgar türbin sistemlerine göre daha azdır. Güç üretimi açısından 15° ve daha düşük elyaf açılarında GFRP\_2, HGCFRP\_3 ve HGCFRP\_5 kanatlarına sahip olan rüzgar türbin sistemlerinde meydana gelen güç azalması hem SWT analizlerine hemde PHATAS analizlerinde referans kanatlı rüzgar türbin sisteminin ürettiği güce göre çok düşüktür. 15° elyaf açısından itibaren güç üretimindeki düşüş artmaktadır. GFRP\_2 ve HGCFRP\_5 kanatlarına sahip rüzgar türbin sistemlerinde 20 derece elyaf açısında bile güç üretimdeki azalma ihmal edilecek büyüklüktedir. Ancak, elyaf

açısının artması ile birlikte güç üretiminin azaldığı göz önüne alındığında, eğilme-burulma etkileşimli kanatlarda 15 derece elyaf açısının üst sınır olarak alınabileceği değerlendirilmiştir. Referans kanat GFRP\_1 ve eğilme-burulma etkileşimli cam-elyaf epoksi kanat GFRP\_2 için yapılan gerilme hesaplamaları sonunda kanadın en kritik bölgesinde meydana gelen gerilmelerde meydana gelen azalmaların arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, eğilme-burulma etkileşimi sayesinde türbin kanat ve aktarma organlarındaki yüklerde azalma ve kanatlarda elyaf açısı yönündeki gerilmelerde düşüş sağlanması ile birlikte jeneratör güç üretiminde çok az azalma meydana gelmiştir. Bu çalışmadan çıkartılabilecek sonuç eğilme-burulma etkileşimi uygulamasının önemli bir dezavantajı gözlemlenmemiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] **Karaolis, N.M., et al.**, 1988. Active and Passive Aerodynamic Power Control Using Asymmetric Fibre Reinforced Laminates for Wind Turbine Blades, Wind Energy Conversion, Proc. of 10th British Wind Energy Assn Conf., s. 163-172
- [2] **Lobitz, D., Veers, P.**, 2003. Load Mitigation with Bending/Twist-Coupled Blades on Rotors Using Modern Control Strategies, Wind Energy, Elsevier, 6, s. 105-117
- [3] **Kooijman, H.J.T.**, 1996. Bending-Torsion Coupling of a Wind Turbine Rotor Blade, ECN-I-96-060 Raporu
- [4] **Locke, J., Valencia, U.**, 2004. Design Studies for Twist-Coupled Wind Turbine Blades, Sandia National Laboratories, Report No. SAND2004-0522.
- [5] **Luczak, M., Manzato, S., Peeters, B., Branner, K., Berring, P., Kahsin, M.**, 2011. Dynamic Investigation of Twist-Bend Coupling in a Wind Turbine Blade, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 49(3), s. 765-789
- [6] **Federov V.**, 2012. Determination of Bend-Twist Coupling in Wind Turbine Blades, Deformation Measurement in Material Component Testing and 3D Motion Analysis, Optical Metrology GOM Conference, Braunschweig, Almanya
- [7] **Capellaro, M.**, 2012. Design Limits of Bend Twist Coupled Wind Turbine Blades, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA 2012-1501, Honolulu, Hawaii
- [8] International Standard, IEC 61400-1, 2005. Wind Turbines – Part 1: Design Requirements, Third edition 2005-08, International Electrotechnical Commission, Cenevre, İsviçre
- [9] **Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G.**, 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-38060
- [10] **Samcef Wind Turbines (SWT) User Help, V.3.3**, 2013. Siemens Inc., P.87, P. 154, s. 234-236.
- [11] **Lindenburg, C.**, 2012. PHATAS Release “JAN-2012a” User’s Manual, Program for Horizontal Axis wind Turbine Analysis and Simulation, ECN-I--05-005 r10.
- [12] **Jonkman, B.J., and Kilcher, L.**, 2012. TurbSim User's Guide: Version 1.06.00, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [13] **Yu, W.**, 2011. VABS Manual for Users, <http://analyswift.com/wp-content/uploads/2012/10/VABS-Manual.pdf>.
- [14] **Winkelaar, D.**, 1992. SWIFT Program for Three-Dimensional Wind Simulation Part 1: Model Description and Program Verification, ECN-R-92-013.
- [15] **Samcef Field**, <http://www.lmsintl.com/samcef-field>.