

Kompozit Rüzgâr Türbin Kanatlarının Yorulma Ömrüne ve Dayanımına Bağlı Olarak Malzeme Seçimi ve Gelecek Projeksiyonu

Mine Yağlıkcı ¹

Melih Soner Çeliktas ^{*2}

ÖZ

Enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar, tedarik konusundaki belirsizlikler ve çevresel kaygılar, tüm dünyayı temiz ve yenilenebilir enerji ile çeşitlendirme konusunda tekrar düşünmeye itmektedir. Yenilenebilir enerjiler içinde rüzgâr türbin kanatları, malzeme açısından en çok araştırmanın yapıldığı alanlardan biridir. Türbin kanatları maksimum oranda enerji üretimi için rüzgârı yakalayan elemanlardır. Bu açıdan kanatlar hem tasarım hem de malzeme yönüyle rüzgâr türbinin en önemli unsurlarından biri haline gelmektedir. Aynı zamanda türbin kanatları maruz kaldığı aerodinamik koşullar yüzünden en çok hasara uğrayan kısımlardır. Rüzgâr türbin kanatlarında zorlu doğa koşullarına uyum gösterecek şekilde yüksek dayanımlı ve aynı zamanda hafif malzemeler seçilmesi gerekmektedir. Kompozit malzemeler hem hafifliği hem de ürün mekanik özelliklerinden dolayı rüzgâr türbin kanatlarında tercih edilmektedirler. Bu çalışma, rüzgâr türbinlerinin kanatlarında kullanılan kompozit materyallerin mekanik anlamda iyileştirmesi adına yapılan çalışmaları içermektedir. Takviye ve ana malzemeler için kullanılmış olan güçlendiriciler incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, rüzgâr türbin kanat malzemeleri için gelecek projeksiyonları verilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbin kanatları, kompozit malzemeler, mukavemet, güçlendiriciler

Material Selection and Projection on the Composite Wind Turbine Blades' Fatigue Life and Strenght

ABSTRACT

Energy prices fluctuations, supply uncertainties and environmental concerns are driving the Globe to rethink its energy mix and develop diverse sources of clean, renewable energy. Wind turbine blade is on of the most research is carried out in terms of the material in the renewable energies. Turbine blades are elements that capture the maximum amount of wind to produce energy. In this respect, blades both design and material aspect of the wind turbine is becoming one of the most important elements. At the same time turbine blades due to exposure to aerodynamic conditions are the most in damaged parts. Wind turbine blades in high-strength materials to adapt to the harsh natural conditions must be selected. Composite materials are preferred for the wind turbine blades due to both mechanical properties and light weight the product. This study includes work done on behalf of improve the mechanical means used in the composite materials of the wind turbine blade. Reinforcement and matrix materials used for strengthenings were examined and the results were compared. Additionally, this study focused on future projections of wind blade materials.

Keywords: Wind turbine blades, composite materials, strength, strengthenings

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 03.04.2017

Kabul/Accepted : 14.09.2017

¹ Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir - mineyaglikci@gmail.com

² Yrd. Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir - soner.celiktas@ege.edu.tr



1. GİRİŞ

Fransız devrimi sonrası yeni arayışlar içerisine giren entellektüel sermaye, kendisine Britanya’da yeni bir yaşam alanı bulmuş ve buhar makinalarının icadıyla başlayan endüstriyel süreç, tarım toplumunu sanayi toplumuna dönüştürürken bu gücü özellikle demir-çelik sanayinden almıştır. Özellikle buhar makinalarının icadı sonrası madenler daha verimli işletilebilmiş ve elde edilen cevherler demir yollarının kullanımı gibi lojistik stratejilerle farklı değerlere dönüştürülebilmiştir. Endüstriyel üretim farklı sektörlerin doğmasına neden olurken büyük bir medeniyet hamlesinin de mihenk taşı olmuştur. 20. yüzyılın ortalarında ağır sanayi stratejileri yerlerini yeni ekonomi anlayışı olarak bilinen bilgi toplumu veya bilgi teknolojisine bıraktı. Bu yeni anlayış, fiber-optik, çip, atom enerjisi kullanım teknolojisi ve bilgisayar gibi mikro elektronik teknolojiler üzerine kurulmuştur. Teknoloji, bilgi toplumuna geçişteki en büyük etmen olarak karşımıza çıkarken, teknolojinin rekabet unsurları ise enerji, bilgi ve hıza dayanmaktadır [1,2].

Yirmi birinci yüzyılda teknoloji, sermaye ve işgücü birbirini tamamlayan olgular gibi algılanırken, işgücü yavaş yavaş yerini fikir işçiliğine bırakmaktadır. Nesnelere internetini konuştuğumuz günümüz dünyasında teknoloji, bilgi içeriği ve etkileri bakımından sosyo-ekonomik bir süreç olarak tanımlanmaktadır [3]. Bilim ve teknolojiye odaklanan, planlı araştırma-geliştirmeye dayalı sürdürülebilir ekonomi ve sanayileşme politikaları, ülkelerin rekabette ön sıralarda yer almasını sağlamaktadır. Öte taraftan kendi ulusal AR-GE planı olmayan ülkelerin iktisadi olarak sürdürülebilir bir kalkınma hamlesi içerisinde olması pek olası görülmemektedir. Toplumların dönüşümünde teknolojik yeniliklerin önemli etkileri olmaktadır [4]. Teknolojik yenilikler, toplumların ekonomik ve sosyal yapılarını belirli bir süreç içerisinde değiştirmekte ve dönüştürmektedir [5].

Bu çalışmada ile enerji sektörü içerisinde büyük yer tutan ve önümüzdeki yıllarda tüm hayat biçimimizi belirleyecek kompozit malzemelerin rüzgâr türbini kanat uygulamaları üzerine odaklanılmıştır. Araştırmada kompozit rüzgâr türbin kanatlarının yorulma ömrüne ve dayanımına bağlı olarak malzeme seçimi araştırılmış ve farklı bir bakış açısı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Özellikle malzeme bilimi içerisinde kompozit malzemelerin bilim camiasında öncelikli araştırma konusu haline gelmesi ve geleceği şekillendirecek olması açısından bu çalışmanın yapılacak diğer araştırmalar için bir kılavuz olması hedeflenmiştir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİNE GENEL BİR BAKIŞ

Enerji, toplumların ilerlemesinde ve birbirleri ile olan rekabetlerinde en belirleyici unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Artık günümüz dünyasında ülkelerin birbirleriyle karşılaştırılmasında elektrik üretim yöntemleri, kaynaklara göre dağılımları, kişi başına elektrik tüketimleri, enerji yoğunluğu, enerji verimliliği ve sektörler göre enerji kullanımları gibi istatistiksel bilgilerden faydalanılmaktadır.



Küresel enerji politikalarının önümüzdeki 20 yıllık gelecekte önemli değişimler göstermesi beklenmektedir. Özellikle uluslararası enerji politikalarını etkileyecek unsurlar arasında gelişmekte olan ülkelerin enerji talepleri, yenilenebilir enerji politikaları, iklim değişikliği sorunu başta gelmektedir. Mevcut enerji tüketim modelinde bir değişim yaşanmaması halinde 2030 yılına kadar küresel enerji talebinin %87'sinden OECD üyesi olmayan ülkeler sorumlu olacaktır. 2025 yılına kadar yıllık ortalama enerji talep artışı %2 seviyelerindeyken 2025 sonrasında bu değer %1 civarında gerçekleşmesi beklenmektedir. 2025 sonrası enerji talebindeki yavaşlamanın en önemli nedenlerinden bir tanesi küresel ekonominin ağır sanayiden hafif sanayi ve hizmet sektörlerine kayması olacak; ayrıca enerji verimliliği alanında yapılan çalışmalarda küresel enerji talebine aşağı yönlü etki edecektir [6].

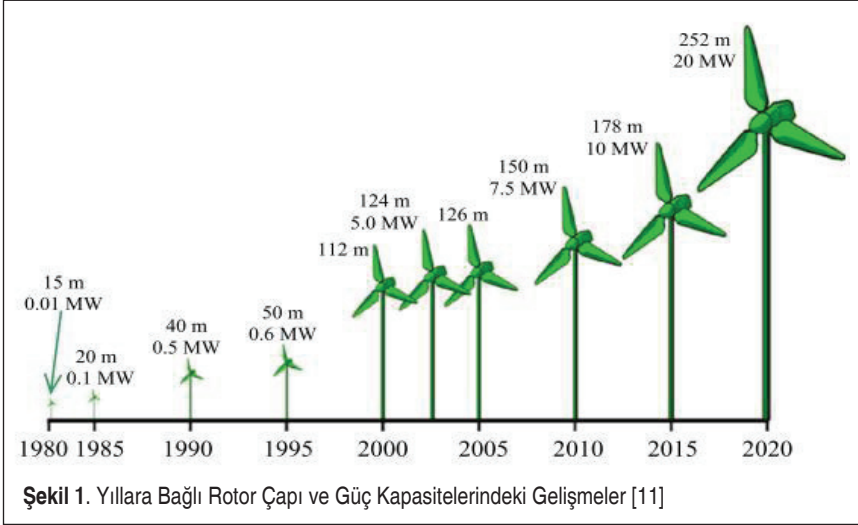
Son yıllardaki verilere göre küresel rüzgâr enerjisi sektörü %95'lik deneyim eğrisine sahip ve yıllık ortalama 40.000 MW'lık enerji santralinin devreye alındığı bir sektör haline gelmiştir. Kurulu rüzgâr gücünün dağılımında Çin (%33,6), Amerika (%17,2), Almanya (%10,4) Hindistan (%5,8) ve İspanya (%5,3) gibi ülkelerin pazarı domine ettikleri görülmektedir.

2015 yılındaki kurulumlara bakıldığında, ekonomisindeki yavaşlamanın aksine özellikle Çin'in agresif bir büyüme modeli ile karşımıza çıktığını ve tüm dünyada yapılan yatırımın yarısını çekmeyi başardığı görülmektedir. Türkiye'de dünya genelinde %1,5'lik bir kurulumla 2015 yılı içerisinde ilk 10 ülke arasındaki yerini almıştır [7]. Bununla birlikte Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC), 2020 yılına kadar rüzgâr enerji potansiyelinin 2600 TWh'a ulaşacağını ve dünya genelindeki elektrik talebinin yaklaşık %12'sini karşılayabileceğini öngörmektedir [8].

3. RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI

Rüzgâr enerjisi uygulamalarının hızla büyümesiyle, rüzgâr türbin kanatlarının daha fazla rüzgâr yakalayıp, daha çok enerji üretmesi için kanatlar giderek daha uzun ve esnek yapılardan üretilmektedir. Ayrıca bu eğilimin gelecekte de devam edeceği düşünülmektedir. Kaçınılmaz olarak, büyük ölçekli rüzgâr türbin kanatları daha fazla yüke maruz kalmaktadır [9,10]. Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği gibi, teorik ve mühendislik uygulamaları rüzgâr türbinlerinin alanı genişledikçe daha fazla rüzgâr yakalayabileceği ve enerjiye dönüştürebileceği kanıtlanmıştır [11].

Rüzgâr türbin kanatlarına etki eden yükler, rüzgârın neden olduğu aerodinamik yükler, yerçekimi yüklerinden kaynaklanan kanadın ağırlığı, kanadın hareketi sonucu oluşan merkezkaç (atalet) kuvvetleri, türbin ve kanatların sapmasından kaynaklanan jiroskop kuvvetler olarak sınıflandırılabilir [12]. Kanatlar üzerine etkiyen yükler tamamen statik olmadığından rüzgâr türbin kanatları öngörülen ömür (20-25 yıl)



Şekil 1. Yıllara Bağlı Rotor Çapı ve Güç Kapasitelerindeki Gelişmeler [11]

boyunca tekrarlayan sürekli yükler (10^8 'den fazla) kanadın yorulma ömrünü etkiler. Yorulma yüklerinin nedeni yerçekimi ve aerodinamik yükleridir [13]. Rüzgâr türbinlerinin tasarımını, türbinin maruz kaldığı statik ve dinamik yükler etkilemektedir ve bu yüzden etkisi altında kaldığı yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Aerodinamik yükler, zaman içerisinde türbin bileşenlerinden kule ve kanatlarda yorulmaya sebep olurken [14], rüzgâr türbin kanadında meydana gelen bu yorulmalar hasarın en önemli sebebi olarak gösterilmektedir [15]. Rüzgâr türbin kanadının hasara uğraması ya da ekonomik ömür olarak beklenenden daha kısa süre çalışması yatırımcıların zarara uğramasına sebep olmaktadır.

Yorulma genellikle büyük ölçekli hasarlara yol açmakta ve bu hasarlar başlangıçta meydana gelen tek çatlak boyunca oluşmaktadır. Kompozit laminatlardaki yorulma hasarı, matris çatlağı, su ve nemin neden olduğu aşınma, arayüzey ayrılması ve fiber kırılması gibi hasar modlarını içeren değişik kombinasyonları kapsar [16]. Her tip hasarın şekli, malzeme özelliğine, tabaka sıklığına ve yüklemeye şekline bağlı olarak değişik şekillerde meydana gelebilir [17]. Yorulma sonucu oluşan bu hasarlar dinamik yüklerin şiddeti arttıkça hasarlar daha kısa sürelerde meydana gelebilmektedir [18].

Aerodinamik açıdan enerji verimliliğine katkı olarak kanatların dayanıklılığın korunmasında, malzemenin tüm dış etkilere karşı yüzey kalitesini ve bütünlüğünü kaybetmeden hafif ve düşük maliyetli olma beklentileri bulunmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarından yüksek verim elde edilebilmesi, kanadın her bir kısmı için doğru malzeme seçimi ile mümkün olmaktadır [19, 20].

Seçilen malzemelerin çalışma süresi boyunca ortamın korozyon etkilerine, zorlu hava



şartlarına ve bu hava şartlarındaki değişimler gibi olumsuz etkilere karşı dayanıklı malzemeler olması gerekmektedir [15]. Bu sebeple, geniş yapılarda iyi bir tercih olarak görülen polimer esaslı kompozit malzemeler rüzgâr türbin kanatlarında da kullanılmaktadır. Geniş yapılı uygulamalarda kompozit malzemelerin seçilmesinin nedeni, yüksek güç-yoğunluk ve yoğunluk-sertlik oranları ile tokluk ve yorulma performanslarının iyi olması olarak ifade edilmektedir [21].

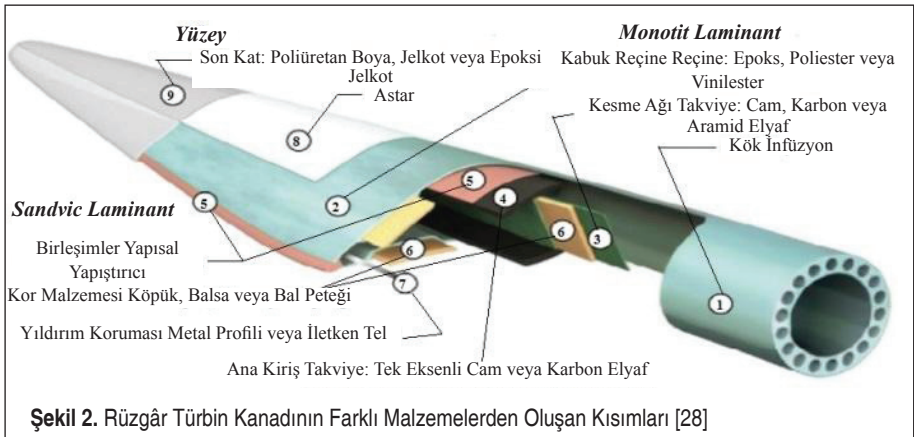
3.1 Kompozit Rüzgâr Türbini Kanat Malzemeleri

Rüzgâr türbin kanatları, rüzgâr türbin sistemlerinin anahtar elemanıdır ve çalıştıkları süre boyunca statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Kanatlarda oluşacak bir problem sistemde genel bir arızaya yol açabilmekte, bu nedenle malzemelerin yüksek eğilme dayanımına sahip olmaları gerekmektedir [22, 23]. Kanatların üretiminde mukavemet ve sertlik özelliklerinden dolayı fiber takviyeli plastik (Fiber Reinforced Plastics - FRP) kompozitler kullanılmaktadır [24, 25].

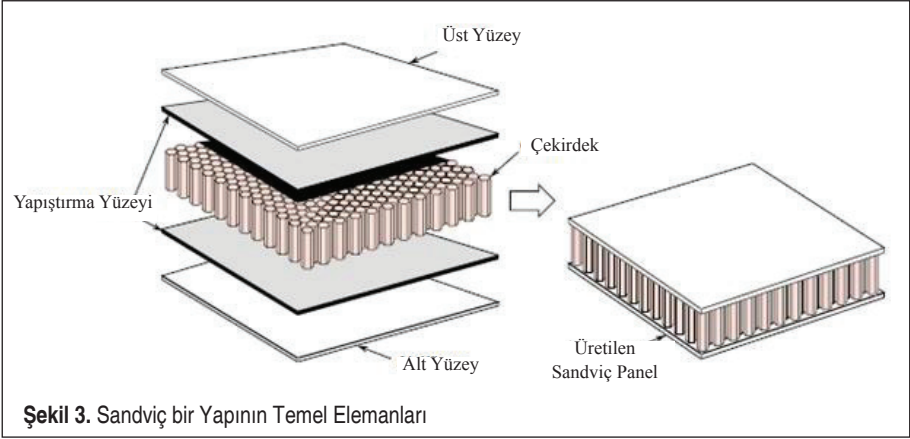
Dünyada kompozit malzeme üretiminde artış gözlemlenmektedir. Kompozit malzeme üretimindeki bu artışın en hızlı olduğu sektör, enerji sektörü olmuştur. Bu sektördeki kompozit malzeme kullanım oranı, 2002 yılına göre günümüzde 5 kat artmıştır. 320 bin ton ile enerji sektöründeki kompozit kullanım oranı dünyada ağırlıkça %7'e ulaşmış ve 3,6 milyar evroluk bir piyasa hacmine karşılık gelmektedir.

Ülkemizde enerji dar boğazının aşılmasında önemli katkılar sağlayacağına inanılan ve teşvik edilen rüzgâr enerjisinin önümüzdeki kalkınma planı döneminde yıllık %18-20 civarında bir büyüme göstermesi beklenmektedir. Bu konuda en hızlı gelişimin rüzgâr enerjisine paralel olarak türbin kanatları konusunda olacağı düşünülmektedir [26, 27].

Rüzgâr türbin kanat kesitlerine bakıldığında (Şekil 2) oldukça farklı malzemelerden



Şekil 2. Rüzgâr Türbin Kanadının Farklı Malzemelerden Oluşan Kısımları [28]



meydan geldiği görülmektedir. Bunun ana sebebi, kanadın her kesiti için maruz kaldığı kuvvetlere göre malzeme seçimi yapılmasıdır; yani sadece o kuvvete karşı koyabilecek (yön, açı ve vektörel büyüklük) mukavemet değerlerine sahip malzemeden tasarlanmaktadır. Böylelikle kanat ağırlığı mümkün oldukça en aza çekilmiş olur [28].

Laminant sandviç yapı ayrıntılı olarak incelendiğinde (Şekil 3), temel olarak üç elemana sahip olduğu görülmektedir. Bu yapının en dış kısmında alt ve üst yüzeyler, ortasında koru olarak da adlandırılan çekirdek ve bağlantıyı sağlamak amacıyla kullanılan yapıştırma yüzeyinden oluşmaktadır. Sandviç yapının orta kısmında yer alan çekirdek malzemenin ana görevi alt ve üst yüzeyler arasındaki mesafeyi koruyabilmektir. Yüzeyler arası mesafe, sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve bükülme rijitliğinin yüksek olmasını sağladığı için önemlidir. Alt ve üst yüzeyler ince olmasına rağmen dayanımı yüksek bir malzemeden olması beklenirken, çekirdek malzeme için düşük mukavemetli ve hafif olan malzemeler tercih edilir. Böylelikle rijit ve yüksek dayanımlı bir yapı oluşturulmasının yanı sıra, konstrüktif açıdan da minimum ağırlıklarda bir eleman elde edilmiş olur [29].

Alt ve üst yüzeyler fiber takviyeli plastik kompozitlerden oluşmaktadır. Rüzgâr türbin kanatları için kullanılacak olan kompozit malzemelerin matris (ana) malzemesinde, profil kiriş uzunluğu 3 m'ye kadar olan türbin kanatlarında polyester reçineler seçilirken, 3 m'den sonra vinilester veya epoksi reçineler matris malzemesi olarak seçilmektedir [10]. Takviye elemanı olarak daha düşük yoğunluklu ve daha yüksek gerilme mukavemetine sahip olmaları nedeniyle cam fiber, karbon fiber [30] ya da aramid fiber seçilmektedir [31, 32].

Tablo 1'de, kompozit rüzgâr türbin kanat malzemelerinde en çok kullanılan takviye elemanları; ve Tablo 2'de, en çok kullanılan matris elemanlarının mekanik özellikleri görülmektedir [33].



Tablo 1. Cam, Karbon ve Aramid Fiberlerinin Mekanik Özellikleri (HM, HM1,2 yüksek modül; LM düşük modül; HT yüksek gerilme mukavemeti; HST yüksek gerinim; IM orta seviye) [33]

Fiber Türü	Yoğunluk (Mgm ⁻³)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)		Kırılma Deformasyonu (%)	Termal İşlem Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	
			Boyuna	Enine		Boyuna	Enine
Cam							
E	2,60	2,4	73	73	3,8	5	5
R	2,53	3,5	86	86	4,1	4	4
Aramid							
HM	1,45	3	130	5,4	2,1	-2	17
LM	1,44	2,8	65		4,3		
Karbon							
HM1	1,96	1,75	500	5,7	0,35	-1,5	30
HM2	1,8	3	300		1	-0,2	
HT	1,78	3,6	240	15	1,5	-0,5	10
HST	1,75	5	240		2,1	-0,1	
IM	1,77	4,7	290		1,6		

Tablo 2. Polyester, Vinilester ve Epoksi Reçinelerinin Mekanik Özellikleri [33]

Özellikler	Polyester	Vinilester	Epoksi
Yoğunluk (mg m ⁻³)	1,1-1,46	1,15	1,11-1,4
Sertlik (Rockwell M)	70-115		80-110
Çekme Mukavemeti (MPa)	42-91	73	28-91
Çekme Modülü (GPa)	2-4,5	3,5	2,4
Eğilme Mukavemeti (MPa)	103		80
Eğilme Modülü (GPa)	4,2		3,5
Kırılma Deformasyonu (%)	1,25		4- 7
Termal İşlem Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	9,9-18	53	8,1-11,7
Isıl Çarpılma Sıcaklığı (°C)	100-125		110-150

4. KOMPOZİT MALZEMEDE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Rüzgâr türbinlerinde malzeme seçimini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Malzeme seçiminde performans gereklilikleri, malzemenin güvenilirliği, emniyeti, çevre üzerine fiziksel etkisi, kolay bulunabilir ve erişilebilir olması, geri dönüşümü ve ekonomik faktörler önemlidir. Bu özellikler içinde en önemli faktör mühendislik tasarı-



mının yapılabilmesi için malzemenin mekanik, termal ve kimyasal gibi özellikleridir [34].

Rüzgâr türbin kanatlarında gerek performansı arttırmak için gerekse maliyetleri aşağı çekmek için malzeme iyileştirme adına hem takviye elemanları hem de matris elemanları üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

4.1 Takviye Malzemeleri

Endüstriyel yüksek performanslı elyafa duyulan talep her geçen yıl artmaktadır [35]. Özellikle E-cam düşük maliyetli ve kabul edilebilir mekanik özellikleri nedeniyle takviye elemanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [36]. Geleneksel cam elyaf polimer kompozitler rüzgâr türbin kanatlarında yaygın olarak kullanılırken alternatif, daha güçlü, daha sert ve daha hafif kompozit elyafların en önde geleni karbon elyafıdır [37]. Günümüzde hibrid kanatların üretimi için, karbon ve cam elyafı temel malzeme olarak kullanılmaktadır [36].

Karbon fiberler hemen hemen saf karbondan oluşan, grafit olarak adlandırılan hekzagonal şekliyle kristalografik bar kafes yapısındadır. Son yıllarda özellikle rotor kanatlarının boylarının uzamasıyla birlikte artan mukavemet değerlerini karşılama ve daha ekonomik hale gelmesinden dolayı karbon fiber kompozitlere olan ilgi artmıştır. Karbon fiber kompozitler, çok yüksek sertlik, yüksek mukavemet, hafiflik ve düşük yoğunluğun mükemmel bir karışımını sergilemektedir [34].

Shan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda [38, 39], cam-karbon hibrit kompozitler statik ve dinamik yorulma yükleri altında cam kompozitlerle karşılaştırılmış ve hem suda hem de havada daha uzun kullanım ömrüne sahip oldukları kanıtlanmıştır. Bunun yanı sıra, Park ve arkadaşları, epoksi matris içerisinde bazalt ve elyaf takviyesini birlikte kullanarak farklı denemeler gerçekleştirmişlerdir [40]. Wu ve arkadaşları, cam-bazalt hibrit kompozit kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında ise hibrit etkinin yorulma ömrü değişkenliğini azaltabileceğini farketmişlerdir [41]. Bir başka çalışmada ise Chikhradze ve arkadaşları, rüzgâr türbini kanat malzemelerinde pahalı, yüksek mukavemet ve modüllü karbon fiberlerin yerine %20-30 bazalt elyaf kullanımının önerilebileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, karbon elyafının bir kısmının daha ekonomik olan bazalt elyafıyla değiştirildiğinde, malzemenin burulma momenti altında çalışma kapasitesini muhafaza edebileceğini ifade etmektedirler [42].

Yaygın olarak kullanılan bir diğer önemli elyaf çeşidi ise aramid'dir. Aramid elyaf kristal yapısından kaynaklı yüksek spesifik tokluk oranı ve gücün yanında yüksek termal stabilite sunmaktadır. Bu sebeple diğer malzemelere göre daha yüksek performans gösterebilmekte olduklarından ticari ve akademik olarak ilgiyi üzerlerine çekebilme-



tedirler [43, 44]. Aramid elyaflar, polimer matrisin etkin gruplarına kimyasal direnç gösterdiklerinden kompozit malzeme üzerinde zayıf arayüzey yapışmasına sebep olmaktadır [45, 46]. Fakat, hibrit kullanımıyla daha iyi sonuçlar alındığı bilinmektedir. Aramid/karbon ve cam/karbon hibrit malzemeler için yapılan bir araştırmada [47], aramid/karbon hibritte delaminasyon (katmanlarda ayrılma) gözlemlenmezken, cam/karbon hibritte ciddi ölçüde delaminasyon olduğu görülmüştür. Ayrıca karbon ve aramid fiberlerin hibrid kompozitleri, karbon fiber kompozit malzemelerin darbe direncini artırmak için üretilmektedir [34].

4.2 Ana Malzemeler

Ana malzemeler üzerine yapılan iyileştirme çalışmaları Tablo 3'te özetlendiği gibi, genellikle epoksinin farklı malzelerle hibrid bir karışım meydana getirerek gerilim direnci, uzama yüzdesi ve Young modülü değerlerinin iyileştirilmesi üzerine odaklanmıştır.

Liu ve arkadaşları, epoksi soya yağı/montmorillonit nano kompozitlerinde gerçekleştirdikleri bir çalışmada malzeme karakterizasyonu yaparak gerilim direnci, uzama yüzdesi ve Young modülü değerlerini incelemiştir. Epoksi matrise katılan kil oranları sırayla %0,5, 8 ve 10'dur [48]. Yapılan deneyler sonucunda T_g sıcaklık değerlerinin saf epoksi reçineye göre yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek T_g sıcaklık değerleri ise %5 kil oranında elde edilmiştir. Bu bilgiye ek olarak kompozitlerde ana malzemeyle beraber kil kullanımı, epoksi reçinenin Young modülü, uzama yüzdesi ve gerilim direnci değerlerinin de artmasını sağlamıştır. Bu değerler için ise en iyi sonuç, kil oranının %8 olduğu malzemedeki elde edilmiştir.

Chatterjee ve Islam ise epoksi reçinede takviye elemanı olarak Titanyum dioksit (TiO_2) tercih etmişler ve 5-40 nm boyutlarında ve %0,5-2 oranlarında parametre değerlerinde çalışmışlardır. Sonuçlar TGA, DMA, TEM yöntemleriyle incelemiştir. Oluşturulan kompozit malzemelerden gerilim modülü, esneklik modülü, T_g sıcaklık değeri ve termal dayanıklılık değerleri açısından incelendiğinde en iyi sonuç, 5 nm boyutunda ve %1 TiO_2 oranında kullanılan kompozit malzeme için elde etmişlerdir [49].

Etika ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ana malzeme olarak D.E.R. 354 ticari epoksi reçineye kil ve karbon siyahı (carbon black - CB) ekleyerek modifiye etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu çalışma ile reçinenin elektriksel ve mekanik özellikler üzerine takviye elemanlarının etkisini araştırmışlardır. Kompozit malzemelerde karbon siyahı ve kil oranları kütlece, sırasıyla %2,5 ve %0-5 olarak eklenmiştir. Oluşturulan yeni malzemelerin SEM analizinden çıkan sonuca göre, karbon siyahı agregatlarının ana malzemenin içerisinde düzenli bir dağılıma sahip olduğu ve kendi aralarında uyum sağlandığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık karbon siyahının ve kilin eşit oranlarda kul-



lanıldığı malzemelerde bu uyum görülememiştir. Elektriksel özelliklere bakıldığında ise %2,5 oranında karbon siyahı ve %0,05 oranında kil içeren malzemelerin daha yüksek elektrik geçirgenliğe sahip olduğu ortaya konulmuştur. Kil oranının %0,05'ten artması halinde ise kompozit malzemelerin elektriksel geçirgenliği kötü yönde etkilenecek ve düşüş yaşanmıştır. Saf epoksi reçine ile karbon siyahı reçinenin mekanik özellikleri incelendiğinde ise karbon siyahı reçinenin mekanik özelliklerinin daha yüksek olduğu görülmüştür [50].

Li ve arkadaşları, epoksi harcını öğütülmüş kalsiyum karbonat ilave ederek özelliklerini geliştirmek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, epoksi harcının içine öğütülmüş kalsiyum karbürün eklenmesiyle basınç dayanımının eğilme mukavemetine oranı büyük bir artış göstermiştir. Buna ek darbe, tokluk direncinde büyük ölçüde öğütülmüş kalsiyum karbür eklenmesiyle gelişme sağlamıştır [51].

Tablo 3. Kompozit Malzemelerin Ana ve Takviye Malzemelerinde Yapılan İyileştirme Çalışmaları

Malzeme	Yapılan İşlem	Çalışmanın Amacı	Araştırmacılar
Aramid Elyaf	Karbon ile hibrit kullanımı	Darbe direncini artırmak	Edwards [33]
Karbon Elyaf	Cam ile hibrit kullanımı	Su ve karada kullanım ömrünü artırmak	Shan ve Liao [38]
Karbon Elyaf	Cam ile hibrit kullanımı	Su ve karada kullanım ömrünü artırmak	Shan ve ark. [39]
Cam Elyaf	Bazalt ile hibrit kullanımı	Yorulma ömründe iyileşme	Wu ve ark. [41]
Karbon Elyaf	Bazalt ile hibrit kullanımı	Daha ekonomik bir malzemeye burulma moment altında çalışma kapasitesini korumak	Chikhradze ve ark. [42]
Aramid Elyaf	Karbon ile hibrit kullanımı	Delaminasyon etkisini azaltmak	Song [47]
Epoksi Reçine	Soya yağı/kil karışımı	Gerilim direnci, Young modülü ve % uzama miktarı	Liu ve ark. [48]
Epoksi Reçine	Titanyum dioksit	Gerilim modülü, esneklik modülü, T_g ve termal dayanıklılığı	Chatterjee ve Islam [49]
Epoksi Reçine	Karbon siyahı ve kil	Elektriksel geçirgenlik ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlamak	Etika ve ark. [50]
Epoksi Reçine	Kalsiyum karbonat	Basınç dayanımının eğilme mukavemetine oranında artış sağlamak	Li ve ark. [51]
Epoksi Reçine	Bazalt ve silisyum karbür	Dayanıklılığı arttırmak	Chikhradze ve ark. [42]



Chikhradze ve arkadaşları, karbon elyafta yaptıkları çalışmanın bir benzerini epoksi reçine içinde tekrarlamışlardır. Deneylerinde silisyum karbür ve bazalt kullanmışlardır. Deney sonuçlarında silisyum karbür ilaveli epoksi reçinenin dayanıklılık katsayısı 0,21 iken bazalt ilaveli epoksi reçinenin dayanıklılık katsayısı 0,24'e çıkmıştır. Sonuç olarak, rüzgâr türbin kanat malzemesinde kullanılacak olan epoksi reçineye katkı olarak silisyum karbürün kullanılmasının mukavemetine daha fazla katkı sağlayacağını belirtmişlerdir [42].

Ana malzemeler üzerine yapılan iyileştirme çalışmaları Tablo 3'te özetlendiği gibi, genellikle epoksinin farklı malzelerle hibrid bir karışım meydana getirerek gerilim direnci, uzama yüzdesi ve Young modülü değerlerinin iyileştirilmesi üzerine odaklanmıştır.

5. RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARINDA OLASI GELECEK BEKLENTİLERİ

Avrupa Birliği'nin 2050 yılı için sera gazı emisyonlarının bugüne oranla %80-95 oranında azaltılması yönündeki hedefinin tek gerçekleşme ihtimali bu tarihe kadar (yarısı rüzgârdan sağlanmak şartı ile) %100 yenilenebilir enerjiye geçişin sağlanması ile olacaktır. Rüzgâr enerjisi AB'nin enerji politikası hedeflerine katkı sağlayacak, rekabet gücünü artıracak, enerji güvenliğini sağlayacak ve iklim değişikliğine karşı büyük bir mücadele azmi katacaktır [52]. Bu kapsamda, önümüzdeki yıllar yenilenebilir enerjilere olan yatırımların artacağı ve özellikle güneş ve rüzgâr araştırmalarının ön plana çıktığı yıllar olarak karşımıza çıkacaktır.

Rüzgâr Türbinlerinin bilinen tarihi milattan sonraki ilk yüzyıla dayanmaktadır. İlk kez Yunan mühendis Heron'un rüzgâr enerjisinin kullanımını tanımlamış, daha sonra bu sistem İran'da geliştirilerek yel değirmenlerinin ortaya çıkması sağlanmıştır [53]. Sonrasında Charles F. Brush ilk rüzgâr güç makinesini kullanarak elektrik üretimini gerçekleştirmiştir. Dane Poul la Cour'un bulduğu hızlı dönen rüzgâr türbin kanatlarıyla başlayan gelişmeler günümüzde halen devam etmektedir [34].

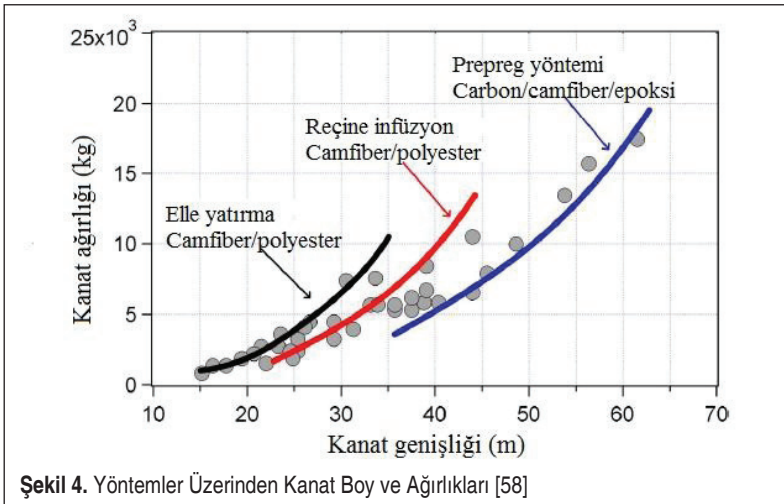
Rüzgâr türbin kanadı üretimindeki teknolojik gelişmeler son yirmi yılda büyük aşama kaydetmiştir. Kanat yapımında özellikle çevrim zamanının minimize edilmesi ve maliyetlerin düşürülmesinin yanında, ortaya çıkan dayanım hatalarının giderilmesine odaklanılmıştır. Türbin kanat yapım tekniği endüstriyel olarak bot imalatından esinlenerek geliştirilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi ise üretim teknolojisinde en üst yöntem olarak karşımızda durmaktadır. Prepreg ve reçine kombinasyonu kanat performansını yukarı çeken diğer özelliklerdir. Üretim teknolojisindeki ilerlemeler günümüzde çokça konuşulan ve kısmen hayata geçirilmiş olan ATL (Automated Tape Layup) veya AFP (Automated Fiber Placement) olarak anılan otomatik fiber yerleştir-

me üretim tekniği hem hataları minimize etmekte hemde işçilik maliyetlerini optimize etmektedir [54].

Avrupa Birliği tarafından düşük karbon enerji teknolojilerinin geliştirilmesi yönünde malzeme araştırmalarına yönelik yapılan yol haritası çalışmasında [55], akıllı malzemeler kullanılarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve spesifik ağırlığın azaltılması, rotor performansının iyileştirilmesi, dayanma süresinin uzatılması, üretim çevrim süresinin ve kanat maliyetlerin azaltılması yönündeki iyileştirmeler üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmalarda özellikle fiberle kuvvetlendirme, bükme ve birleştirme teknolojilerinin yanında, aşınmalara karşı kaplama, kendi kendini temizleme ve UV koruma teknolojilerinin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur.

Mandell tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kanatlar üzerinde reçine etkisi araştırılmış ve polyesterlerin, düşük maliyetli, düşük performanslı fakat hızlı proses edildiği; Vinilesterlerin orta düzeyde olduğu; Epoksi reçinelerin, yüksek maliyetli, yüksek performanslı fakat yavaş proses edildiği; Polydicyclopentadiene malzemenin ise yeni, potansiyel, düşük viskozite ve yüksek tokluk içerdiği ifade edilmektedir [56].

Fa ve Ting tarafından gerçekleştirilen 2000-2013 yıllarını kapsayan bibliometrik çalışmada, uzmanların önerileri doğrultusunda, türbin kanat imalatında epoksi reçine, cam fiber, karbon fiber, biyonik tasarım, açık kalıp döküm prosesi gibi 18 anahtar teknolojiye ulaşılmıştır. Kanat uzunluğu, kurulu güç ve yıllara göre kategorize ettikleri kanat üretim teknolojisinde, 2030-2050 yıllarını kapsayan kısımda 40-60 metre kanat uzunluğuna ulaşacağını ve 1000 TW kurulu güç için yaptıkları yaklaşımda epoksi reçinelerden MW düzeyindeki kanatlar için vinilester reçinelerin daha ekonomik olarak tercih edileceğini; fakat daha geniş türbin kanatlarında karbon fiber kullanılacağını ifade etmişlerdir [57].





Lekou tarafından üretim yöntemlerine göre kanat boy ve uzunluklarının karşılaştırıldığı bir çalışmada, 45 m'nin üzerindeki kanat genişliklerinde ancak prepreg yöntemi kullanılarak yapılan üretimin optimum olabileceği ifade edilmekteyken [58], daha küçük kanat boy ve ağırlıklarında ise elle yatırma ve infüzyon tekniğinin uygun olacağı bildirilmiştir [59].

Termoset ve termoplastik malzemeler karşılaştırıldıklarında polyester, vinilester ve epoksi gibi termoset malzemelerin kolay proses edildiği; fakat uzun kürlenme süresi ve kalın malzemelerin kürlenmesi sırasında dışarı ısı veriyor olmasının dezavantaj olduğu ifade edilmiştir. Termoplastik malzemelerde ise yüksek tokluğa sahip olmasının yanında geri dönüşebilir olmasının büyük bir avantaj olduğu; fakat yüksek proses sıcaklığı ve basıncı gerektirdiğinden oldukça maliyetli olduğu ifade edilmektedir [56].

6. SONUÇ

Rüzgâr türbin kanadı, rüzgârı toplamada önemli bir role sahip kritik bir bileşendir. Daha fazla rüzgâr yakalayıp, daha çok enerji üretmek için rüzgâr türbinlerinin boyutları artırılmaktadır ve bu eğilim gelecekte de devam edecektir [10]. Bununla birlikte, sürekli aerodinamik kuvvetlere maruz kaldığı için hasara en açık türbin parçasıdır. Rüzgâr türbinlerinin kanat kısımlarında meydana gelen hasarların en önemli sebebi kanatlarda meydana gelen yorulmadır. Bu hasarlar genelde pervanelerin kök bölgesine bağlandığı yerlerde meydana gelir. Yorulma sebebiyle meydana gelen bu hasarlar yüksek yorulma yüklerinde daha kısa sürelerde meydana gelir [60]. Rüzgâr türbin kanatlarında oluşabilecek hasarları önlemek için kullanılan malzemeler büyük önem taşımaktadır. Seçilen malzemenin zor hava şartlarına, bu hava şartlarındaki değişimlere ve korozyon gibi olumsuz etkilere dayanıklı malzemeler olması gerekmektedir [15]. Bu yüzden geniş yapılarda iyi bir tercih olarak görülen polimer esaslı kompozit malzemeler rüzgâr türbin kanadında kullanılmaktadır. Geniş yapıli uygulamalarda kompozit malzemelerin seçilmesinin nedeni, yüksek güç-yoğunluk ve yoğunluk-sertlik oranları ile tokluk, yorgunluk performanslarının iyi olmasıdır [21].

Yapılan araştırmada görülmüştür ki teknolojinin gelişmesiyle birlikte kompozit malzemeler, yapıların verimliliğine katkı sağlayarak artırması ve ürüne ilişkin sorunlara çözüm olabilmesi gibi faydaları sayesinde oldukça dinamik bir yapı elde etmiştir. Bu da çok ve farklı sayıda sektöre girebilmesini ve buna bağlı olarak artan bir kullanıma sahip olmasını sağlamıştır. Bunlardan bir tanesi olan rüzgâr enerjisi sektörü, temiz enerji kullanımının öneminin artması ve elektrik enerjisi üretimi güvenilirliği ve maliyetinin ürettiği enerjiye kıyasla uygun olmalarından dolayı her geçen gün kurulan rüzgâr türbinlerinin sayısının ve kapasitesinin artmasına sebep olmaktadır. Son yıllarda rüzgâr enerjisi sektöründeki tüm firmaların istatistiki olarak ürettikleri güç miktarı yükselmiş ve rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretiminde önemli bir unsur olarak



türbin kanadı, malzemesi, tasarımı ve üretim şekli ile daha çok çalışılan bir AR-GE konusu haline gelmiştir. Artık günümüzde türbin verimliliğinde ciddi oranda etkisi olduğu kabul edilen rüzgâr türbini kanatları üzerine daha çok araştırma çalışmaları yürütülmekte ve bunun üzerine AR-GE yatırımları yapılmaktadır.

Kompozit teknolojisi ile rüzgâr türbin kanatlarındaki gelişmeler paralel olarak devam etmektedir. Rüzgâr türbin kanatlarının uzun yıllar hizmet verebilmesi için kanat yapısının dayanımının ve yüzey kalitesinin artırılması amacıyla hem hammaddelerin yapısal özelliklerinde hem de üretim yöntemlerinde gelişmeler/iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu yüzden, gerek takviye elemanında gerekse matris elemanlarında çeşitli maddeler ilave edilerek ya da elyafların hibrit kullanımlarıyla daha üstün özellikli kompozit malzemeler üzerinde çalışılmaktadır.

Takviye elemanlarının hibrit kullanımı (cam-karbon ve karbon-aramid) hakkında pek çok çalışma yapılmıştır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesini amaçlayan hibrit elyafların üretilmesi, aynı zamanda karbon elyafların maliyetlerinin de aşağı çekilmesini hedeflemektedir. Cam-karbon hibrit kompozit malzemenin cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak delamiasyon açısından incelendiğinde, karbon-aramid hibrit kompozit malzemesinin cam-karbon hibrit kompozit malzemelere kıyasla daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Bunların dışında, bazalt gibi hammaddelerin de ilave malzeme olarak kullanımı mevcuttur. Aynı zamanda bazalt, epoksi güçlendirilmesinde de kullanılan bir maddedir. Kompozit rüzgâr türbin kanat malzemelerinde yaygın olarak kullanılan epoksi reçine güçlendirilmesinde kalsiyum karbonat ve silisyum karbür kullanımıyla da araştırmalar yapılmaktadır. Epoksi reçineler için yapılan çalışmalarda genellikle malzemeler nano boyutta tozlar halinde kullanılmıştır. Ayrıca, genel olarak en fazla %25 oranında ilave malzeme kullanılmıştır.

KAYNAKÇA

1. **Yücel, F.** 2004. "Sürdürülebilir Kalkınmanın Sağlanmasında Çevre Korumanın ve Ekonomik Kalkınmanın Karşılığı ve Birlikteliği," Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, sayı 11, s. 100-120.
2. **Çeliktaş, M. S., Sonlu, G., Özgel, S., Atalay, Y.** 2015. "Endüstriyel Devrimin Son Sürümünde Mühendisliğin Yol Haritası," Mühendis ve Makina, sayı 662 (56), s. 24-34.
3. **Toffler, A.** 1984. The Third Wave, Bantam Books, New York.
4. **Basalla, G.** 2004. Teknolojinin Evrimi, Çev. Cem Soydemir, TÜBİTAK, Ankara.
5. **Aktan, C. C., Tunç, M.** 1998. "Bilgi Toplumu ve Türkiye," <http://www.canaktan.org/yeni-trendler/yeni-ekonomi/bilgi-toplum-dogusu.htm>, son erişim tarihi: 12.02.2015.
6. **Sevim, C.** 2014. Küresel Enerji Stratejileri ve Jeopolitik, 3. Baskı, Seçkin Yayınları, Ankara.



7. GWEC. 2016. "Global Wind Energy Council," http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR_corrected.pdf, son erişim tarihi: 07.04.2016.
8. **Towler, B. F.** 2014. "Wind Energy," In the Future of Energy, Towler, B. F (editor), Boston, Academic Press, p. 187-214.
9. **Holierhoek, J. G., de Vaal, J. B., van Zuijlen, A. H., Bijl, H.** 2013. "Comparing Different Dynamic Stall Models," *Wind Energy*, vol. 16, p. 139-158.
10. **Veers, P. S., Ashwill, T. D., Sutherland, H. J., Laird, D. L., Lobitz, D. W., Griffin, D. A., et al.** 2003. "Trends in The Design, Manufacture and Evaluation of Wind Turbine Blades," *Wind Energy*, vol. 6, p. 245-259.
11. **Ma, P., Zhang, Y.** 2014. "Perspectives of Carbon Nanotubes/Polymer Nanocomposites for Wind Blade Materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, p. 651-660.
12. **Hau, E.** 2006. *Wind Turbines Fundamentals, Technology. Application, Economics*. Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
13. **Kensche, C. W.** 2006. "Fatigue of Composites for Wind Turbines," *International Journal of Fatigue*, vol. 28, p. 1363-1374.
14. **Korukçu, M. Ö.** 2012. "Bir Rüzgâr Türbininin Değişik Koşullardaki Dinamik Davranışlarının İncelenmesi," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, sayı 17 (2), s. 121-138.
15. **Çivi, C., Köksal, N. S.** 2011. "Rüzgâr Türbinlerinde Oluşan Hasarların İncelenmesi," *C. B. Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, sayı 16 (2), s. 45-56.
16. **Turan, M.** 2007. "Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı," *Mühendis ve Makina*, sayı 575 (48), s. 3-8.
17. **Khashaba, U. A.** 2003. "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads," *Journal of Composites Materials*, vol. 4 (37), p. 317-331.
18. **Marin, J. C., Barroso, A., París, F., Cañas, J.** 2008. "Study of Damage and Repair of Blades of a 300 Kw Wind Turbine," *Energy*, vol. 7 (33), p. 1068-1083.
19. **Ronold, K. O., Christensen, C. J.** 2001. "Optimization of a Design Code for Wind Turbine Rotor Blades in Fatigue," *Engineering Structures*, vol. 23, p. 993-1004.
20. **Liao, C. C., Zhao, X. L., Xu, J. Z.** 2012. "Blade Layers Optimization of Wind Turbines Using FAST and Improved PSO Algorithm," *Renewable Energy*, vol. 42, p. 227-233.
21. **Kam, T., Tsai, S., Chu, K.** 1997. "Fatigue Reliability Analysis Composite Laminates Under Spectrum Stress," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 34, p. 1441-1461.
22. **Willett, H. G.** 2012. "Characterisation of Composites for Wind Turbine Blades," *Reinf Plast*, vol. 56, p. 34-36.
23. **Kong, C., Kim, T., Han, D., Sugiyama, Y.** 2006. "Investigation of Fatigue Life for a Medium Scale Composite Wind Turbine Blade," *Int. J. Fatigue*, vol. 28, p. 1382-1388.



24. **Hua, Y., Kasavajhala, A. R. M., Gu, L.** 2013. "Elasticeplastic Analysis and Strength Evaluation of Adhesive Joints in Wind Turbine Blades," *Compos Part B Eng.*, vol. 44, p. 650-656.
25. **Hayman, B., Wedel-Heinen, J., Brøndsted, P.** 2008. "Materials Challenges in Present and Future Wind Energy," *MRS Bull*, vol. 33, p. 343-353.
26. **Karabağ, S.** 2015. "Rüzgâr Türbini Kanadı İmalatı," 3. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, 8-10 Ekim, İzmir.
27. **Hacıoğlu, İ. H.** 2013. "Türkiye 10. Kalkınma Planı Projeksiyonunda Kompozit Sektörü Genel Değerlendirmesi," *Türk Kompozit 2013-Kompozit Zirvesi*, 3-5 Ekim 2013, İstanbul, s. 2-14.
28. **Avcı, B., Yılmaz, T. B.** 2012. "Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi," Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
29. **Başdemir, C. Elibol, M.** 2012. "Sandviç Kompozit Plakalarda Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi," Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
30. **Uysal, A.** 2008. "Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
31. **Bassyouni, M., Iqbal, N., Iqbal, S. S., Abdel-Hamid, S. M. S., Abdel-Aziz, M. H., Javaid, U., et al.** 2014. "Ablation and Thermo-Mechanical Investigation of Short Carbon Fiber Impregnated Elastomeric Ablatives for Ultrahigh Temperature Applications," *Polym Degrad Stab.*, vol. 110, p. 195-202.
32. **Griffin, D. A., Ashwill, T. D.** 2003. "Alternative Composite Materials for Megawatt-Scale Wind Turbine Blades: Design Considerations and Recommended Testing," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, p. 515-521.
33. **Edward, K.** 1998. "An Overview of The Technology of Fibre-Reinforced Plastics for Design Purposes," *Materials & Design*, vol. 19, p. 1-10.
34. **Babu, K. S., Subba Raju, N. V., Srinivasa Reddy, M., Nageswara Rao, D.** 2006. "The Material Selection for Typical Wind Turbine Blades Using a Madm Approach & Analysis of Blades," *MCDM 2006*, 19-23 June 2006, Chania, Greece.
35. **Liu, B., Liu, Z., Wang, X., Zhang, G., Long, S., Yang, J.** 2013. "Interfacial Shear Strength of Carbonfiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Measured by The Microbond Test," *Polym Test*, vol. 32 (4), p. 724-730.
36. **Brondsted, P., Lilholt, H., Lystrup, A.** 2005. "Composite Materials for Wind Power Turbine Blades," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 35, p. 505-538.
37. **Mishnaevsky Jr, L., Brondsted, P., Nijssen, R., Lekou, D. J., Philippidis, T. P.** 2012. "Materials of Large Wind Turbine Blades: Recent Results in Testing and Modelling," *Wind Energy*, vol. 15, p. 83-97.
38. **Shan, Y., Lai, K. L., Wan, K. T., Liao, K.** 2002. "Static and Dynamic Fatigue of Glass-Carbon Hybrid Composites in Fluid Environment," *J Compos Mater*, vol. 36, p. 159-72.



39. **Shan, Y., Liao, K.** 2001. "Environmental Fatigue of Unidirectional Glass–Carbon Fiber Reinforced Hybrid Composite," *Compos Part B: Eng.*, vol. 32, p. 355–63.
40. **Park, J. M., Shin, W. G., Yoon, D. J.** 1999. "A Study of Interfacial Aspects of Epoxy-Based Composites Reinforced with Dual Basalt and SIC Fibres by Means of The Fragmentation," *Composites Science and Technology* , vol. 59 (3), p. 355-370.
41. **Wu, Z. S., Wang, X., Iwashita, K., Sasaki, T., Hamaguchi, Y.** 2010. "Tensile Fatigue Behaviour of Frp and Hybrid Frp Sheets," *Compos Part B*, vol. 41, p. 396–402.
42. **Chikhradze, N. M., Marquis, F. D. S., Abashidze, G. S.** 2015. "Hybrid Fiber and Nanopowder Reinforced Composites for Wind Turbine Blades," *J. Mater Res. Technol.*, vol. 4 (1), p. 60-67.
43. **Daniel, I. M., Ishai, O.** 2006 *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Oxford University Press, New York.
44. **Garcia, J. M., García, F. C., Serna, F., Peña, J. L. de la.** 2010. "High-Performance Aromatic Polyamides," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 35, p. 623–686.
45. **Ehlert, G. J., Sodano, H. A.** 2009. "Zinc Oxide Nanowire Interphase for Enhanced Interfacial Strength in Lightweight Polymer Fiber Composites," *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, vol. 1, p. 1827–1833.
46. **Wang, W., Li, R., Tian, M., Liu, L., Zou, H., Zhao, X., Zhang, L.** 2013. "Surface Silverized Meta- Aramid Fibers Prepared by Bio-Inspired Poly (Dopamine) Functionalization," *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, p. 2062–2069.
47. **Song, H. J.** 2015. "Pairing Effect and Tensile Properties of Laminated High-Performance Hybrid Composites Prepared Using Carbon/Glass and Carbon/Aramid Fibers," *Composites Part B*, vol. 79, p. 61-66.
48. **Liu, Z., Erhan, S. Z., Xu, J.** 2005. "Preparation, Characterization and Mechanical Properties of Epoxidized Soybean Oil/Clay Nanocomposites," *Polymer*, vol. 46, p. 10119–10127.
49. **Chatterjee, A., Islam, M. S.** 2008. "Fabrication and Characterization of TiO₂–Epoxy Nanocomposite," *Materials Science and Engineering A*, vol. 487, p. 574–585.
50. **Etika, K. C., Liu, L., Hess, L. A., Grunlan, J. C.** 2009. "The Influence of Synergistic Stabilization of Carbon Black and Clay on the Electrical and Mechanical Properties of Epoxy Composites," *Carbon*, vol. 47, p. 3128-3136.
51. **Li, Y., Liu, X., Yuan, J., Wu, M.** 2015. "Toughness Improvement of Epoxy Resin Mortar by Incorporation of Ground Calcium Carbonate," *Construction and Building Materials*, vol. 100, p. 122-128.
52. EWEA. 2011. *EU Energy Policy to 2050 Achieving 80-95% Emissions Reductions*, March 2011 A report by the European Wind Energy Association.
53. **Drachmann, A. G.** 1961. *Heron's Windmill, Centaurus*, vol. 7, p. 145–151.
54. **Watson, J. C., Serrano, J. C.** 2010. "Composite Materials for Wind Blades," www.ppg.com, son erişim tarihi: 10.07.2016.



55. European Commission Staff Working Paper. 2011. Materials Roadmap Enabling Low Carbon Energy Technologies, Brussels, 13.12.2011, SEC (2011) 1609 final.
56. **Mandell, J.** 2010. "Selection of Wind Turbine Blade Materials for Fatigue Resistance," The American Ceramics Society Materials Challenges in Alternative and Renewable Energy, Cocoa Beach, FL, 24 February 2010.
57. **Fa, L. C., Ting, S. T.** 2014. "Research on Technology Roadmaps of the Wind Power Industry Based on Bibliometrics and AHP Method - A Case Study of Wind Blade," Advanced Materials Research, p. 1044-1045, 397-400.
58. **Lekou, D. J.** 2010. "Scaling Limits & Costs Regarding WT Blades," WP3 Deliverable Report D3.4.3, https://www.researchgate.net/publication/263178958_Scaling_Limits_and_Costs_regarding_WT_blades, son erişim tarihi: 18.04.2016.
59. **Aymerich, F.** 2012. "Composite Materials for Wind Turbine Blades: Issues and Challenges," SYSWIND Summer School, July 2012, University of Patras.
60. **Marin, J., C., Barroso, A., Paris, F., Cañas, J.** 2008, "Study of Damage and Repair of Blades of a 300 kW Windn Turbine," Energy, vol. 33 (7), p. 1068-1083.