

1-B KİRİŞ-KANAT YAPISAL ANALİZ ARACININ GELİŞTİRİLMESİ VE KÜÇÜK RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARININ ÇOK BOYUTLU OPTİMİZASYON SÜREÇLERİNDE KULLANILMASI

Can Muyan¹, Onur Ali Batmaz², Abolfazl Pourrajabian³,
Demirkan Çöker⁴, Altan Kayran⁵, David Wood⁶

¹ ODTÜ, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)

² ODTÜ, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)

³ Materials and Energy Research Center (MERC), İran

⁴ ODTÜ, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)

⁵ ODTÜ, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)

⁶ University of Calgary, Kanada

¹ can.muyan@metu.edu.tr, ² obatmaz@metu.edu.tr, ³ a.pourrajabian@merc.ac.ir,

⁴ coker@metu.edu.tr, ⁵ akayran@metu.edu.tr, ⁶ dhwood@ucalgary.ca

ÖZET

Küçük rüzgar türbin kanatlarının çok amaçlı optimizasyonuna dahil edilecek verimli bir yapısal analiz yöntemi geliştirmek için bir çalışma yapılmıştır. 1,21 metre uzunluğundaki küçük rüzgar türbin kanadının aerodinamik optimizasyonu güç çıkışı ve türbin başlama zamanını içeren çok amaçlı bir fonksiyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aerodinamik olarak optimize edilmiş kanadın yapısal analizleri, giriş elemanları ile mertebesi indirgenmiş sonlu eleman modelinin kullanımını doğrulamak için farklı mertebelerdeki sonlu eleman modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Referans olarak kanadın yüksek mertebeli üç boyutlu (3-B) sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir ve bu analiz sonuçları kullanılarak alternatif tek boyutlu (1-B) giriş-kanat modelleri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, konik ve konik olmayan 1-B giriş-kanat modeli alternatifleri, küçük rüzgar türbin kanatlarının çok amaçlı optimizasyonunda verimli yapısal çözümler olarak istihdam edilebilecek indirgenmiş mertebeli potansiyel modeller olarak değerlendirilmiştir. Optimizasyon iterasyonları sırasında 1-B giriş-kanat modelini aerodinamik döngüleri ile sorunsuz bir şekilde birleştirmek için otomatik bir giriş-kanat modelleyicisi/çözücüsü geliştirilmiştir. Küçük rüzgar türbin kanadının çok kesitli konik olmayan giriş-kanat sonlu eleman modelinin, konik giriş-kanatı modelinden farklı olarak kanatların meta-sezgisel optimizasyonunda karşılaşılan düzgün olmayan kesit geçişlerini etkili bir şekilde ele alan tutarlı bir model olduğu gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Rüzgar türbinlerinin performansı yüksek oranda kanat şekline bağlıdır. Kanatlar rüzgar enerjisini yakalamada çok önemli bir rol oynadığından, rüzgar türbini kanatlarının tasarımı ve optimizasyonu literatürde detaylı bir şekilde ele alınmıştır [1-4]. Genel olarak kanat tasarımı, en az iki amacın aynı anda karşılanması gereken çok amaçlı bir prosedürdür ve genellikle daha fazla enerji üretmek ve kanat maliyetini azaltmak için takip edilir [5]. Bu birincil hedeflerin yanı sıra, kanat ağırlığının [6,7] ve yayılan aerodinamik gürültünün [8,9] en aza indirilmesi de dikkate alınır. Gürültünün azaltılması özellikle kentsel alanlara ve konut binalarının yakınına kurulan türbinler için çok önemlidir. Bir sonraki bölümde tartışılacağı gibi, küçük rüzgar türbini (KRT) kanatlarının optimizasyonunda yer alan başka bir parametre de dönmeye başladıkları süre zarfının (başlangıç süresinin) en aza indirilmesidir [10].

Kanat optimizasyonu probleminin üstesinden gelmek için bir dizi farklı metodoloji kullanılmıştır. Gradyan tabanlı yaklaşımlar [11,12] ve daha da yaygın olarak, evrimsel optimizasyon yöntemleri kullanılır. Genetik algoritmalar [13,14], diferansiyel evrim [10], parçacık sürüsü optimizasyonu [15] ve karınca kolonisi tekniği [16], kanat profili, giriş uzunluğu ve bükülme açısının dağılımlarını [17] tasarlama yeteneklerini gösteren iyi bilinen yöntemlerdir. KRT kanatları, dönmeye başladıkları süre zarfında çok düşük Reynolds sayısında (Re) çalışırlar ve bu çalışma aralığında kalın kesitler zayıf kaldırma ve sürüklenme özelliklerine sahiptirler [10]. Bu nedenle KRT kanatlarının, maliyeti de düşüren orta kalınlıkta (~%15) tek bir kanat profili içermesi yaygın bir durumdur. Büyük kanatlarda, yüksek yüklemeye dayanmak için kök bölgesinde daha kalın kanat profilleri kullanılırken, aerodinamik torkun çoğu kanat ucu bölgesinden geldiğinden bu bölgelerde daha ince ve daha aerodinamik olanlar kullanılmaktadır [10].

Yukarıda belirtilen amaçların yanı sıra kanatların yapısal özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Herhangi bir arıza sadece rotorun güvenliği için değil aynı zamanda insanlar için de tehlikeli olabilmektedir, çünkü kopan kanat parçalarının uzun mesafelere fırlatılabileceği bilinmektedir [18]. Bu durum, kanatların yapısal yönlerine tam olarak dikkat edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır ve bu da araştırmacıları optimizasyon problemlerine yapısal kısıtlar eklemeye yönlendirmektedir. Kanadın izin verilen en fazla gerilimi, gerinimi ve uç deplasmanı bu kısıtlara örnektir [14,19–23]. Kanadın yorulma davranışı da uygulanan modelin hızlı ve verimli olması koşuluyla optimizasyonda dikkate alınabilecek bir diğer önemli parametredir [24]. Optimizasyon sırasında binlerce kanat için amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi yapılmaktadır, bu nedenle, kabul edilebilir doğrulukta sağlam ve hızlı bir yapısal model geliştirmek çok önemlidir. KRT kanatlarının çok boyutlu optimizasyonu için kullanılacak verimli bir yapısal analiz modeli geliştirmeyi amaçlayan mevcut çalışma da buna paraleldir.

Büyük ölçekli rüzgâr türbinlerinin modellerinde, kanatların yüksek en-boy oranından dolayı, kanat yapısını temsil etmek için yoğunlukla giriş sonlu elemanları kullanılmaktadır. VABS [25] gibi enine kesit analiz yöntemleri, kesitlerde kütle ve rijitlik özelliklerini elde etmek için sıklıkla kullanılmaktadır ve bir optimizasyon çerçevesinde kanat hem aerodinamik hem de yapısal olarak kesit kesit optimize edilmektedir. Yapısal optimizasyon ve aeroelastik analiz çerçevesi (SONATA), ince yapıların bir 3-B SE modeline yakın bir mertebede temsili için birleştirilmiş 1-B giriş ve 2-B kesitsel SE modellerinin bir örneğidir [26].

Rüzgâr türbini optimizasyonunda giderek popülerleşen ikame (vekil) modeller kullanılarak optimizasyon maliyeti azaltılmaktadır [27,28]. Bununla birlikte, yüksek doğrulukta aerodinamik ve yapısal analiz yöntemlerini kullanan doğru bir ikame model geliştirmenin yüksek hesaplama maliyeti gerektirdiği belirtilmelidir. Bu nedenle, kabul edilebilir doğrulukta ancak fazlasıyla hızlı olan verimli çözümlerin kullanılması, vekil modellerin oluşturulmasında bir zorunluluk olarak öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmamızda bu konuyu ele almaktayız.

Yatay eksenli rüzgâr türbini (HAWT) optimizasyonunun kapsamlı bir incelemesi Chehouri ve diğerleri tarafından yapılmıştır. [29]. Bu inceleme makalesinin vardığı sonuçlardan biri, yatay eksenli rüzgâr türbini sistemleri için optimizasyon çalışmalarının sayısının önemli ölçüde arttığı ve meta-sezgisel optimizasyon tekniklerinin son zamanlarda giderek daha fazla kullanıldığdır. Kanadın ağırlığının en aza indirilmesi, rüzgardan temiz, sürdürülebilir enerji hasadı elde etmek için rüzgâr türbini optimizasyonunun temel hedeflerinden biri olarak saptanmıştır [29]. Ağırlık minimizasyonu, bir optimizasyon çerçevesinde yapısal metriklerin doğru hesaplanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, rüzgâr türbini kanatlarının optimizasyonu için verimli bir yapısal analiz modeline sahip olmak zorunludur. Bu bağlamda, bu çalışmadaki ilk hedefimiz, KRT kanatlarının çok disiplinli optimizasyonunda kullanılmak amacıyla, KRT kanatları için verimli bir yapısal analiz modeli geliştirmektir. KRT kanat optimizasyonunda, önceki çalışmalar Euler-Bernoulli giriş teorisinin KRT kanadının yapısal davranışını modellemek için sıklıkla kullanıldığını göstermektedir [14,30]. Bu çalışmada, KRT kanatları için, Euler-Bernoulli giriş teorisine dayalı basit doğrusal analitik modellerinin veya doğrusal sonlu eleman modellerinin yapısal ölçütlerin yeterli doğrulukla hesaplayıp hesaplamadığı konusunu da ele almaktayız.

Mevcut çalışmada öncelikle kanat elemanı momentum teorisi ile hesaplanan rüzgar türbininin güç çıkışı ve başlama zamanını içeren çok amaçlı bir fonksiyon kullanılarak KRT kanadı için bir tasarım optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Maksimum güç çıkışı ve minimum başlangıç süresi için sınırlandırılmamış çok amaçlı bir optimizasyon kullanan kanadın optimum kanat genişliği ve bükülme dağılımlarını belirlemek için bir genetik algoritma çalıştırılmıştır. Konik ve konik olmayan 1-B kiriş-kanat modeli alternatifleri, KRT kanat optimizasyonu süreçlerinde verimli yapısal çözümler olarak istihdam edilecek potansiyel modeller olarak değerlendirilmiştir. Bu indirgenmiş 1-B kiriş-kanat modelleri, kanat optimizasyonunda meta-sezgisel yöntemler kullanıldığında sıklıkla ortaya çıkan düzensiz kesit geçişlerini ele almadaki tutarlılıkları açısından 3-B yüksek dereceli model sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Nominal güç durumunda KRT kanadının yapısal tepkisi üzerindeki geometrik doğrusallığın etkisi de değerlendirilmiş, ve geometrik olarak doğrusal olmama durumunun dahil edilmesi gerekliliği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, baz rüzgar türbini kanadı için otomatik bir kiriş-kanat modelleyicisi-çözücüsü geliştirilmiştir ve ilgili yapısal sonuçlar elde edilmiştir. Bu kiriş-kanat modelleyicisi-çözücüsü, aerodinamik optimizasyon süreçlerine sorunsuz şekilde entegre edilebilmektedir. Geliştirilen bu araç ile KRT kanatlarında yaygın olarak kullanılan kanat profilleri bu çalışmada incelenen baz kanat geometrisinin nominal güç yükü koşullarında meydana gelen maksimum gerilme ve kanat ucu deplasman değerleri açısından değerlendirilmiştir.

2. KÜÇÜK RÜZGAR TÜRBİN KANADININ ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU

Vaka çalışması olarak özellikleri Tablo 1'de özetlenen 1 kW'lık bir türbin seçilmiştir.

Tablo 1. 1 kw küçük rüzgar türbininin özellikleri

Kanat yoğunluğu (kgm ⁻³)	Kanat profili	Kanat uzunluğu (m)	Nominal dönme hızı (rpm)
550	SG6043	1,21	450

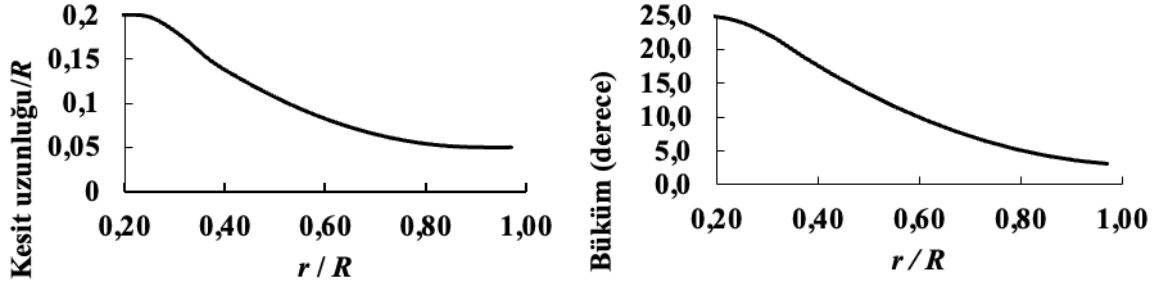
Kiriş ve burulma açısı dağılımları da dahil olmak üzere türbin kanadının geometrisi, genetik algoritma aracılığıyla çok amaçlı bir optimizasyon çalışması ile belirlenmektedir. Ağırlıklı toplam yöntemini [31] kullanarak, optimizasyon eş zamanlı olarak güç katsayısını (C_p) maksimuma çıkarmayı ve başlangıç zamanını (T_s) minimuma indirmeyi amaçlar. Düşük rüzgar hızı bölgesinde türbin performansını iyileştirmek için aşağıdaki amaç fonksiyonu dikkate alınmıştır [32]:

$$\text{Amaç fonksiyonu} = w \frac{C_p}{\max(C_p)} + (1 - w) \frac{\min(T_s)}{T_s} \quad (1)$$

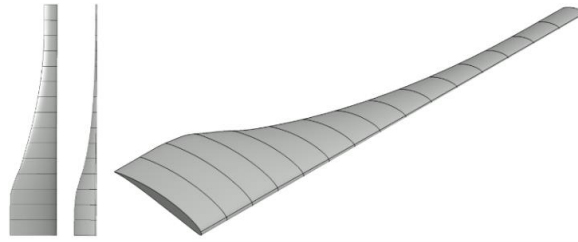
Burada w ($0 \leq w \leq 1$) ağırlıklandırıcıdır ve her hedefin katkısını, çıkış gücünü ve başlama zamanını kontrol eden katsayıdır. Her iki hedef de kanat elemanı momentumu (Blade Element Momentum) teorisi ile hesaplanmaktadır. Daha spesifik olarak, C_p 'nin hesaplanması için geleneksel KEM [33] kullanılırken, T_s 'nin hesaplanması için Wood [10] tarafından ayrıntılı olarak tanımlanmış değiştirilmiş versiyon kullanılmaktadır. Denklemden ilk kısım kanat optimizasyonunun ideal hedefidir, ancak ikincisi hatve ayarı olmayan küçük türbinler için önemlidir ve bu da yıllık enerji üretimini azaltan bir başlangıç süresi sağlamaktadır [34].

Ağırlık katsayısının farklı değerleri için çok amaçlı optimizasyon yapılır ve optimizasyonun Pareto cephesi oluşturulur. Maksimum güç katsayısı için ağırlık katsayısının $w = 1$ olması gerekmektedir. Ancak düşüşler yapıldığında amaç fonksiyonunda başlangıç zamanının katkısı artmakta ve bu da başlangıç torkunun artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, güç katsayısı ile küçük rüzgar türbininin başlama zamanı arasında uzlaşma sağlamak için ağırlık katsayısı 0.7 olarak alınmıştır. $w = 0.7$ olan ağırlık katsayısı için rüzgar türbininin güç katsayısı 0.49 ve başlama süresi 2.76 s olarak hesaplanmıştır. Şekil 1, yekpare kanadın optimal geometrisinin

kesit uzunluğu ve bükülme açısı dağılımını göstermektedir ve Şekil 2 kanadın katı modelinin farklı görünüşlerini göstermektedir.



Şekil 1. Optimal kanadın kesit uzunluğu ve büküm açısı dağılımı



Şekil 2. Optimal kanadın sayısal modeli

3. KANADIN FARKLI MERTEBELERDEKİ SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

Optimum kanat geometrisi, herhangi bir yapısal kısıtlama getirmeden maksimum güç katsayısını ve minimum başlatma süresini içeren çok amaçlı optimizasyona dayanmaktadır. Bu bölümde, kanadın yapısal kısıtlı optimizasyonunda kullanılacak verimli bir kiriş-kanat sonlu eleman modeli belirlemek amacıyla, çeşitli mertebelerdeki modelleri kullanılarak kanadın yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, KRT kanadının yüksek mertebeli 3-B sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu model tarafından elde edilen yapısal sonuçlar referans olarak kabul edilmiştir. 3-B SE modelleri ile analizler hesaplama süresi açısından maliyetli olduğundan çok disiplinli optimizasyon gibi kanadın tekrarlayan yapısal analizini gerektiren çalışmalarda daha düşük doğrulukta indirgenmiş mertebeli modeller tercih edilmektedir. Mevcut çalışmada, KRT kanadının iki farklı 1-B kiriş SE modeli çok tekrar gerektiren optimizasyon analiz süreçleri için değerlendirilmiştir. Bu bölümde, KRT kanadının daha düşük doğrulukta indirgenmiş mertebeli SE modellerinden elde edilen sonuçların birbirleriyle ve kanadın daha yüksek mertebeli 3-B SE analizinden elde edilen karşılık gelen sonuçlarla karşılaştırmalı bir çalışmasını yapılmıştır.

3.1. KANADIN YÜKSEK MERTEBELİ 3-B ANALİZİ

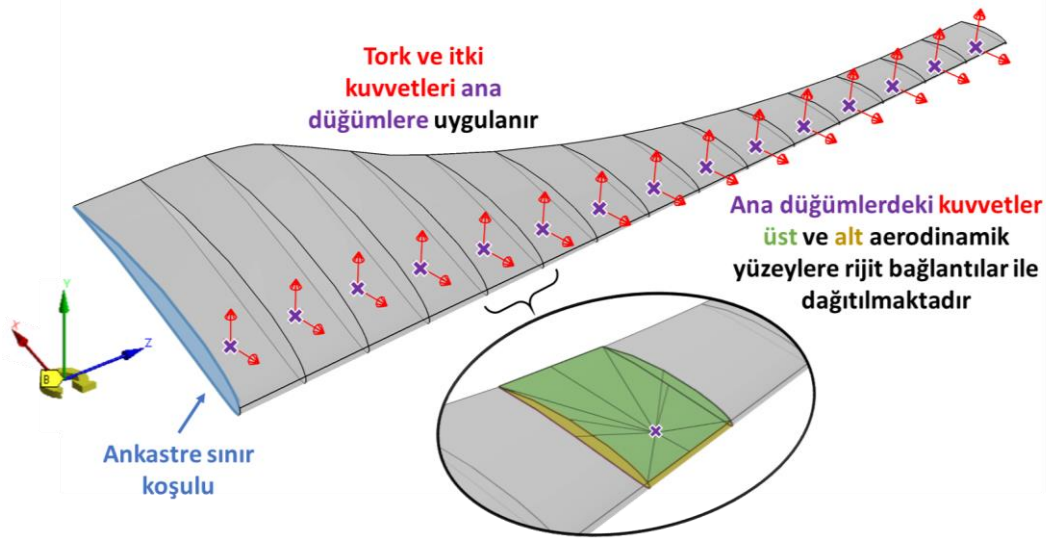
KRT kanadının daha yüksek mertebeli üç boyutlu (3-B) sonlu eleman analizi, verimli bir tek boyutlu kiriş-kanat sonlu eleman modelinin seçimine ilişkin karara yardımcı olacak bir referans çözüm sağlamak için gerçekleştirilmiştir. Küçük rüzgâr türbini kanadının 3-B sonlu eleman analizi, ANSYS 2021 R1 [35] kullanılarak yapılmıştır.

Küçük rüzgâr türbini kanadı için malzeme seçimi, düşük üretim maliyeti, yorulma dayanıklılığı, geri dönüştürülebilirlik ve üretim kolaylığı gibi gereksinimlere göre yapılmaktadır. Bu gereksinimleri karşılamak için en uygun kanat malzemesi kereste olarak belirlenmiş ve kanat malzemesi olarak Sitka ladini seçilmiştir [36]. Bu çalışmada kullanılan kanadın tipik malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sitka ladininin malzeme özellikleri

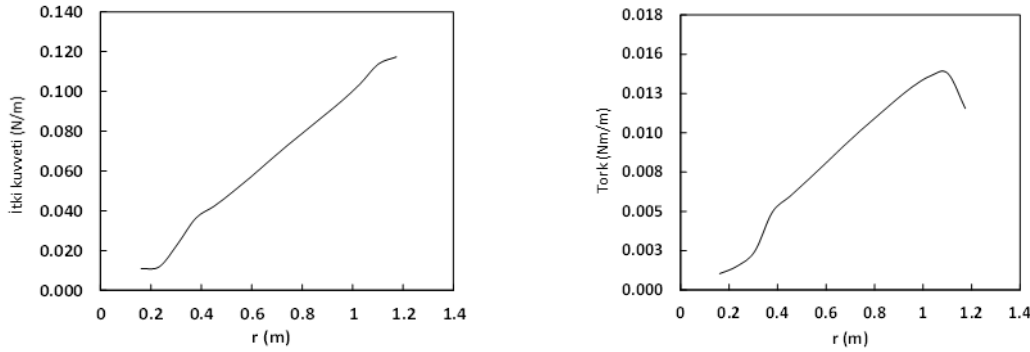
Esneklik modülü (GPa)	Poisson oranı	İzin verilen gerilme (MPa)
10,3	0,35	60

KRT kanadına etki eden yükler üç ana gruba ayrılmaktadır: aerodinamik (itme ve tork), atalet (merkezkaç) ve yerçekimi yükleri [37]. Bu çalışmada rüzgar türbininin yalpalamasından kaynaklanan jiroskopik yükler dikkate alınmamıştır ve jiroskopik yüklerin mevcut çerçeveye dahil edilmesi bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Şekil 3'te, kanat elemanlarına etki eden aerodinamik tork ve itme kuvvetleri gösterilmektedir. Tork ve itme yükleri, belirli 15 kanat istasyonunda KEM teorisi ile hesaplanmıştır ve kanadın açıklığı ile birim uzunluk başına itme ve tork değişimi Şekil 4'te verilmiştir. SE modeline yerçekimi ivmesi ve 450 (dev/dak) açışal hız dahil edilerek yerçekimi ve merkezkaç yükleri hesaplamalara dahil edilmiştir.

**Şekil 3.** Kanat elemanlarına etkiyen aerodinamik tork ve itme kuvvetleri

KEM tarafından hesaplanan aerodinamik kuvvetler, ön kenardan ölçülen çeyrek kesit uzunluğunda yer alan aerodinamik merkezdeki ana düğüme uygulanmıştır. Kanat elemanlarına etki eden itme kuvvetinin ve aerodinamik torkun kaynağının, kanadın alt ve üst yüzeylerine etki eden basınç olan yüzey kuvvetlerine dayandığına dikkat edilmelidir. Böylece kanat katı bile olsa kanat elemanlarının aerodinamik merkezlerinde hesaplanan KEM tabanlı yükler kanat elemanlarının tüm hacmi yerine kanat elemanlarının yüzeylerine dağıtılmıştır. Aerodinamik yükler, her istasyondaki üst ve alt aerodinamik yüzeylere ana düğümden RBE3 tipi rijit bağlantılar aracılığıyla bağlanmıştır. RBE3 tipi bağlantılar kullanılarak, ana düğümdeki ötelemeler ve dönüşler aralarındaki mesafeyle orantılı olarak alt ve üst aerodinamik yüzeyler üzerindeki sonlu eleman düğümlerine dağıtılmıştır. Bu bağlantı yöntemi ile enine kesitin bükülmesini kısıtlamadan kanada kuvvet aktarımı mümkündür [35].

Şekil 3'te kanadın kök bölgesi türbin göbeğine bağlıdır ve sayısal modelde sınır koşulu olarak belirtilmiştir. Düğümlerin tüm serbestlik dereceleri, kanadın türbin göbeğine rijit bir şekilde bağlandığı varsayılarak bu sınır koşulunda sabitlenmiştir. Yerçekimi ivmesi -x yönünde tanımlanmıştır ve kanat göbek merkezinde bulunan -y eksenini etrafında dönmektedir.



Şekil 4. Kanat yarıçapı boyunca itki kuvvetinin ve torkun değişimi

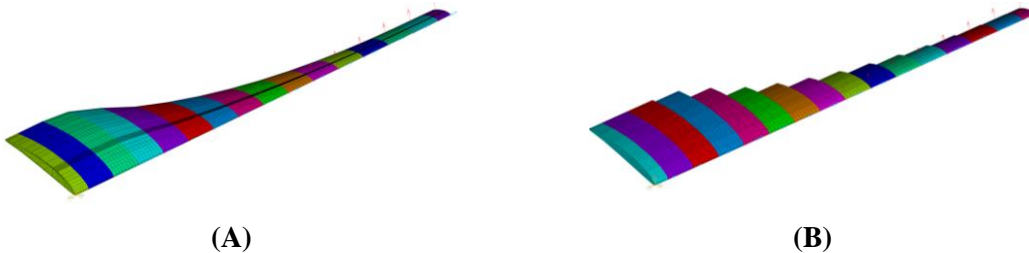
Kanat geometrisi, ANSYS kitaplığında SOLID186 olarak belirtilen 20 düğümlü, azaltılmış entegrasyon, kum saati kontrollü, ikinci dereceden elemanlarla ayrıklaştırılmıştır. Kanat modelindeki maksimum gerilmeye dayalı olarak çözüm açısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır ve 5.5 mm'lik eleman kenar uzunluğu uygun bulunmuştur. 3-B kanar SE modeli toplamda yaklaşık 235,000 düğümden oluşmaktadır.

Tablo 2'de Sitka ladininin nihai dayanımı 60 MPa olarak verilmiştir. IEC 61400-2 [38], kanat malzemesi özelliklerine ve yük spesifikasyon yöntemlerine bağlı olarak iki farklı güvenlik faktörü önerir. Sitka ladininin mekanik özelliklerinin iyi bilindiği varsayıldığından, malzeme özelliklerine ilişkin belirsizlik için 1,1'lik bir güvenlik faktörü uygulanmıştır. Ayrıca, 1,35'lik bir güvenlik faktörü, yük hesaplamalarındaki belirsizlikleri dikkate almaktadır. Böylece kanat için izin verilen gerilme değeri 40,4 MPa olarak belirlenmiştir.

3.2. KANADIN İNDİRGENMİŞ MERTEBELİ 1-B ANALİZİ

Bir optimizasyon sürecine entegre edilecek verimli bir yapısal analiz modeli sağlamak için kanadın indirgenmiş mertebeli 1-B sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. 1-B kanat SE modellerinin detayları, en verimli kiriş-kanat modeline karar vermek için bu alt bölümde verilmiştir. Sonlu eleman modelleri, ANSYS BEAM188 doğrusal kiriş elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. Doğrusal kiriş elemanları, Timoshenko kiriş teorisi ile formüle edilmiştir; dolayısıyla kayma deformasyon etkileri dahil edilmiştir. BEAM188 elemanlarını kullanarak, rüzgâr türbini kanatları gibi karmaşık geometrilerin modellenmesini kolaylaştıran kullanıcı tanımlı kesitler oluşturmak mümkündür.

Şekil 5'te, iki farklı modelleme stratejisi kullanılan 1-B kanat SE modelleri gösterilmektedir. Konik kiriş elemanlarına sahip SE modeli Şekil 5(a)'da sunulmaktadır. Konik kiriş elemanlarına sahip SE modeli, kanat boyunca 15 kesit kullanılarak optimize edilmiş aerodinamik tasarımı sağladığı kesit bilgisine göre oluşturulmuştur. Şekil 5(b), merdiven formuyla sonuçlanan, her kanat istasyonunda sabit kesitli ve kanat boyunca azalan kesite sahip kiriş elemanlarına sahip kanadın SE modelini göstermektedir. Her kanat bölümü, Şekil 5'te farklı bir renkte görüntülenmiştir.



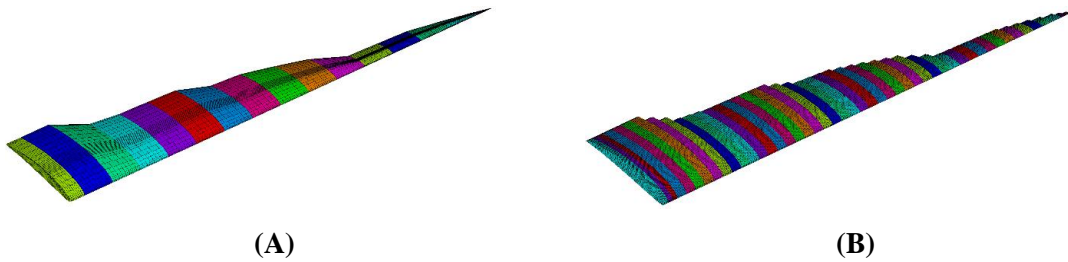
Şekil 5. (a) Konik kiriş elemanlı SE modeli ve (b) konik olmayan çok kesitli kiriş elemanlara sahip SE modeli

ANSYS'de konik kiriş elemanlarının kullanılabilmesi için kiriş elemanlarının uçlarındaki kesitlerin topolojik olarak aynı olması gerekmektedir. Bu nedenle, kanat boyunca kesitleri ayırklaştırmak için eşlenmiş ağ tekniği (mapped mesh) kullanılabilir; ancak kanat boyunca kesitler düzensiz olarak azalmaktadır ve bu durum eşlenmiş ağ uygulamasını zorlaştırmaktadır. Düzensiz kesit geometrilerini ayırklaştırmak için, konik olmayan kiriş elemanları için mevcut olan serbest ağ tekniği daha uygun olduğu saptanmıştır.

KRT kanadının çok disiplinli tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmek için bir optimize ediciye entegre edilebilecek verimli bir 1-B kiriş kanadı sonlu eleman analiz modeli geliştirilmiştir. Kanat geometrisinin aerodinamik optimizasyonu sırasında, özellikle meta-sezgisel optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı durumlarda, düzgün olmayan kesit geçişlerine sahip kanat geometrileri ile karşılaşılabilir. Bu çalışmada, KRT kanadının ilk genetik algoritma tabanlı aerodinamik optimizasyonunda elde edilen rastgele kiriş ve burulma dağılımlarından elde edilen kanat geometrileri için konik ve konik olmayan kiriş elemanları ile çözüm ağı oluşturma denemeleri yapılmıştır. Bazı durumlarda, kiriş elemanının her iki ucundaki yüksek kesit uzunluğu ve burulma açısı farklılıklarından dolayı kesit geçişleri düzgün olmayabilir. Çözüm ağı oluşturma denemeleri, düzensiz kanat kesit geometrisinin yanı sıra, kesit geçişlerinin düzgün olmadığı durumlarda, kanadın konik elemanlarla ağ oluşturmada problemlerin ortaya çıkabileceğini ve çözüm alınamayacağını göstermiştir.

ANSYS'de konik kiriş elemanları, kesit analizi için kiriş kesitlerinde eşlenmiş ağ tekniğini kullanılmaktadır. Eşlenmiş ağ tekniği kullanılırken kiriş kesitlerinde özdeş ağ topolojisi oluşturulmalı ve kiriş kesitlerindeki düğüm konumları orantılı olmalıdır. Özellikle ani kesit geçişlerine sahip kanat geometrileri için bu gereklilikleri karşılamak zorlaşır ve bu nedenle de konik kiriş elemanları her zaman oluşturulamaz. Sonuç olarak, kiriş kesitleri arasındaki geçiş düzgün olmasa bile, her zaman konik olmayan kiriş elemanları oluşturulabilir. SE çözücü, çok disiplinli bir optimizasyon çerçevesinde optimize edici ile entegre edildiğinde ağ oluşturma sorunları ortaya çıkarmamalıdır. Bu nedenle bu çalışmada, konik kiriş elemanlarına alternatif bir yaklaşım olarak, kanat istasyonları arasındaki her kanat elemanında sabit kiriş kesitlerine sahip, konik olmayan kiriş elemanlarına dayalı bir modelleme tekniği önerilmiştir.

Aykırı kanat geometrilerinin tipik bir örneği Şekil 6'da gösterilmektedir; burada kanadın konik (Şekil 6(a)) ve çok kesitli konik olmayan (Şekil 6(b)) kiriş elemanları modellenmiştir. Şekil 7 ise bir kesitte konik ve konik olmayan kiriş elemanlarında oluşturulan sonlu eleman ağlarını göstermektedir. Konik kiriş elemanlarında ANSYS, kesitlerde aynı ağ topolojileri ile eşlenmiş ağ tekniğini kullanmaktadır. Kanat kesitleri, haritalanmış ağ tekniğini uygulamak için karmaşık kesitlerdir, çünkü haritalanmış ağ tekniği kenarları ve tepe noktaları kolayca tanımlanan enine kesitler için daha uygundur. Dolayısıyla, Şekil 7(a)'da gösterildiği gibi, yüksek en-boy oranına sahip oldukça orantısız sonlu elemanlar üretilir ve bu gibi durumlarda kanadın kiriş sonlu eleman modeli her zaman oluşturulamaz. Öte yandan, konik olmayan kiriş elemanların kesitlerinde aynı ağ topolojisi gerekli olmadığından, her zaman kanadın kiriş sonlu eleman modeli oluşturulabilir.



Şekil 6. (a) Konik kiriş elemanlar kullanılarak oluşturulan ve **(b)** konik olmayan kiriş elemanları kullanılarak oluşturulan kanat geometrisi

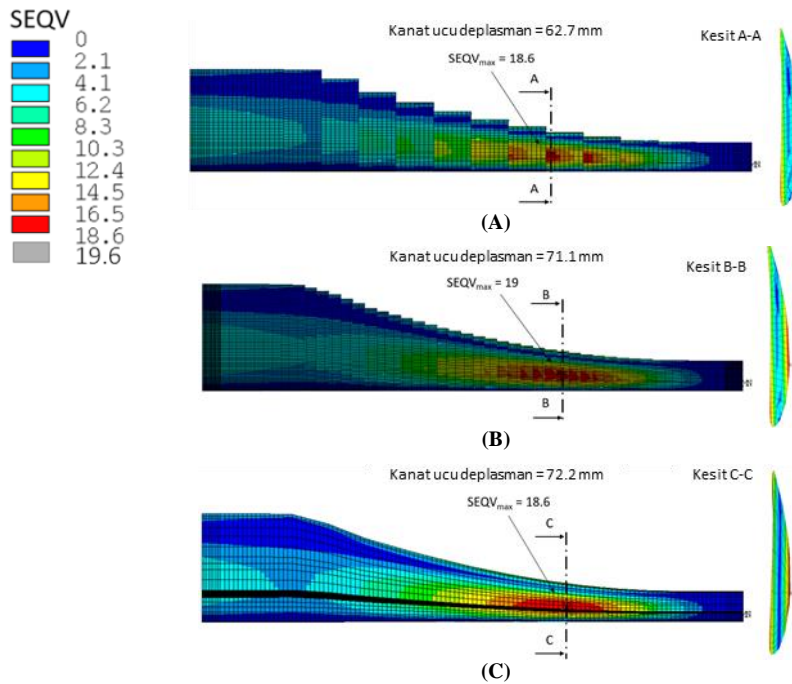


Şekil 7. (a) Konik kiriş elemanın kesitinde üretilen eşlenmiş çözüm ağı ve (b) konik olmayan kiriş elemanın kesitinde oluşturulan serbest çözüm ağı

KRT kanadının hem konik hem de konik olmayan kiriş elemanları ile analizinde kanat, 3-B sonlu eleman modelinde olduğu gibi kökünde sabitlenmiştir. Yerçekimi ivmesi ve kanat dönüşü ile ilişkili atalet yükleri, kanadın ön kenarı boyunca sonlu eleman düğümlerinin yerleşimi dikkate alınarak uygun şekilde uygulanmıştır. Farklı kanat-kiriş modelleme yaklaşımlarını kullanan sonlu eleman analizi sonuçları ilerleyen bölümde tartışılmaktadır.

4. 1-B KANAT SE MODELLERİNİN DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

Küçük ölçekli rüzgâr türbini kanatlarının dayanım analizinde eşdeğer gerilme değerlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir [10,38]. Aerodinamik olarak optimize edilmiş KRT kanadı için, Şekil 8'de von Mises eşdeğer gerilme grafikleri ve geometrik olarak lineer konik olmayan kiriş modellerinin maksimum uç yer değiştirmeleri konik kiriş modeliyle karşılaştırılmıştır. 16 kesitli, 48 kesitli konik olmayan kiriş modeli ile konik kiriş modeli arasındaki maksimum gerilme seviyelerindeki sapma %2'den azdır. Maksimum deplasman değerleri karşılaştırıldığında, konik olmayan ve konik kiriş modelleri arasındaki sapma sırasıyla 16 ve 48 kesitli kiriş SE modelleri için %13 ve %1'dir. Dolayısıyla 48 kesitli konik olmayan kiriş modelinin konik kiriş modeline göre daha başarılı sonuçlar gösterdiği saptanmıştır. Konik geçiş, çok kesitli kiriş SE modelinde sabit kesitli merdiven formuna kıyasla gerçek kanat geometrisini daha iyi temsil etse de geçiş geometrisinin karmaşıklığı önceden açıklandığı üzere SE modeli oluşturma sırasında sorunlara neden olmaktadır. Sonuç olarak, sabit kesitli modelleme stratejisinin, yani 48 kesitli konik olmayan kiriş modelinin, maksimum eşdeğer gerilim ve deplasman gibi yapısal ölçümleri içeren KRT kanadının çok disiplinli optimizasyonu için uygun olduğu saptanmıştır.



Şekil 8. Geometrik olarak doğrusal (a) 16 kesitli konik olmayan (b) 48 kesitli konik olmayan (c) konik kiriş SE modellerinin von Mises gerilme konturları ve kanat ucu deplasman değerleri

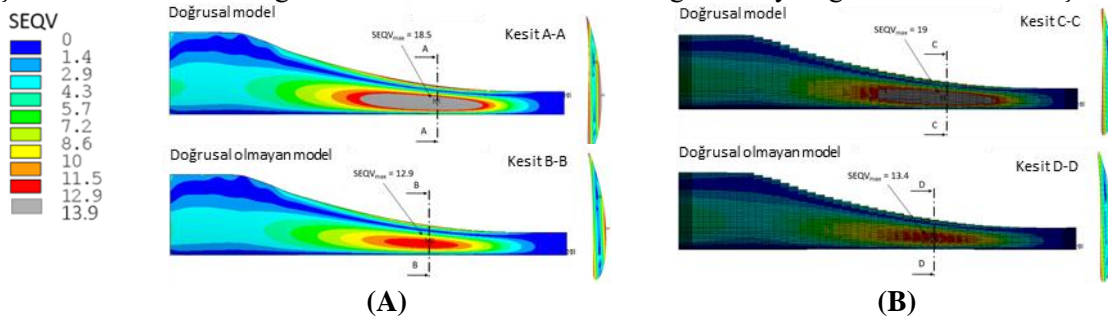
Uzunluğu 60 m veya daha fazla olan çok MW'lık büyük rüzgar türbini kanatlarının kuvvet analizinde geometrik doğrusal olmama etkilerinin önemi üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır [39–41]. Aksine, geometrik doğrusal olmamanın KRT kanatlarının yapısal davranışı üzerindeki etkisine ilişkin çalışmalar sınırlıdır [42]. Bu çalışma kapsamında, KRT kanadının indirgenmiş mertebeli 1-B ve yüksek mertebe 3-B SE modellemesi ve analizinin karşılaştırılmasının yanı sıra, geometrik doğrusal olmama durumunun dolayısıyla merkezkaç rijitliğinin yapısal davranış üzerindeki etkisi de incelenmiştir. KRT kanadı, çok boyutlu bir optimizasyon çerçevesinde KRT kanadının sonlu eleman analizine geometrik doğrusal olmama etkisinin dahil edilip edilmeyeceğine karar vermek için de incelenmiştir.

48 kesitli konik olmayan kiriş kanat modellerinin deforme olmuş şekilleri Şekil 9'da sunulmaktadır. Her iki model için de geometrik olarak doğrusal ve doğrusal olmayan sonuçlar üst üste çizdirilmiştir. Geometrik olarak doğrusal veya doğrusal olmayan 3-B ve 1-B modellerin hemen hemen aynı uç yer değiştirmelerinin, 1-B kiriş-kanat modelinin doğru deformasyon sonuçları elde edebildiğine dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, geometrik doğrusal 3-B ve 1-B modellerin doğrusal olmayan model sonuçlarına göre sapmaları %33,3 ve %31,4 olarak hesaplanmıştır, bu da geometrik doğrusal olmamayı ihmal etmenin deformasyon sonuçlarının aşırı yüksek tahmin edilmesine neden olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle, geometrik doğrusal olmamanın böyle bir KRT kanadının deformasyonu üzerindeki etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 9. Yüksek mertebeli 3-B ve indirgenmiş mertebeli 1-B SE modellerinin geometrik olarak doğrusal ve doğrusal olmayan deforme olmuş şekilleri (ölçek faktörü = 2.5)

3-B ve 1-B SE modellerini kullanan geometrik olarak doğrusal olan ve olmayan çözümlerle elde edilen kanadın von Mises gerilme konturları Şekil 10'de sunulmuştur; bu gerilme sonuçlarının geometrik olarak doğrusal analizde fazla tahmin edildiğini açıkça göstermektedir. Geometrik olarak doğrusal analizlerden elde edilen maksimum von Mises gerilmeleri ve doğrusal olmayan analiz sonuçları arasındaki sapma, 3-B ve 1-B kanat modelleri için sırasıyla %43,4 ve %41,8'dir. Burada sunulan sonuçlara dayanarak, nominal güç koşullarında KRT kanadının SE analizindeki geometrik doğrusal olmama etkilerinin dahil edilmesinin, geometrik olarak doğrusal ve doğrusal olmayan SE sonuçları arasındaki yer değiştirmeler ve gerilim seviyelerindeki sapmalar açısından önemli olduğu gösterilmiştir. Euler-Bernoulli kiriş teorisine veya doğrusal sonlu eleman modellerine dayalı basit doğrusal analitik kiriş modellerinin yapısal ölçütler üzerinde doğru sonuçlar vermediği; bu nedenle, çok disiplinli bir optimizasyon çerçevesinde yapısal çözücü olarak bu tür doğrusal modellerin kullanılması doğru olmayacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 10. (a) Yüksek mertebeli 3-B ve (b) indirgenmiş mertebeli 1-B modeli için geometrik olarak doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin von Mises gerilme konturları

Bu bölümde, KRT kanadının sonlu eleman analizinde 1-B kiriş-kanat SE modellerinin hem geçerliliği hem de uygulanabilirliği incelenmiştir. Konik kiriş kanat modeli ile sabit kesitli konik olmayan kiriş kanat modeli arasında, sabit kesit alanlı konik olmayan kiriş kanat modelinin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. 3-B SE analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, doğruluk düzeyi ve sunduğu simülasyon çalışma süresi avantajı açılardan, 48 kesitli konik olmayan 1-B kiriş-kanat sonlu eleman modelinin optimizasyon süreçlerinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

5. OTOMATİK KİRİŞ-KANAT MODELLEYİCİSİ-ÇÖZÜCÜSÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışmada, çok boyutlu optimizasyon çerçevesinde KRT kanadının SE analizi için en verimli 1-B kiriş kanadı modelinin belirlenmesinin ardından, SE tabanlı çözücü koduna sahip tam otomatik, optimizasyon yinelenmeleri sırasında müdahale gerektirmeyen bir kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsü geliştirilmiştir. Bu tür bir kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsü, bir optimizasyon çerçevesinde, yapısal modeli ve sonlu eleman ağını oluşturmak, sınır koşullarını ve aerodinamik ve atalet yüklerini nominal güç durumunda uygulamak, SE analizini gerçekleştirmek ve optimizasyonun her yinelenmesinde yapısal metrikleri içeren kısıtlamaların değerlendirilmesinde kullanılmak üzere gereklidir.

Mevcut haliyle kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsü ANSYS SE yazılımı ile çalışmak üzere geliştirilmiştir. Bu modelleyici/çözücü bir aerodinamik optimize ediciye entegre edilebilir ve yapısal bir çözücü olarak kullanılabilir. Çok disiplinli bir optimizasyon çerçevesindeki potansiyel kullanımı akış şeması Şekil 11’de sunulmuştur. Aerodinamik optimize edici kanat kesiti uzunlukları, burulma açıları ve KEM teorisiyle hesaplanan aerodinamik yükleri kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsüne girdi olarak sağlanmaktadır. Modelleyici/çözücü daha sonra kanat geometrisini oluşturmakta ve bu geometriyi çok kesitli konik olmayan kiriş sonlu elemanlarla ayırklaştırmaktadır. İstasyon yükleri ile birlikte kesit bilgisi, kiriş modelinin düğüm noktalarında tanımlanmıştır. Kiriş-kanat modelinin sınır koşulu, asıl kanadın yapısal tasarımına uygun olarak kökünden sabitlenmiştir. Mevzubahis bilgiler ANSYS APDL komutlarında yazılan bir girdi dosyası biçiminde otomatik olarak yazılır ve SE çözücüsü tarafından yine otomatik olarak birkaç saniye içinde okunarak çözümlenir. Kanattaki yapısal ölçümler, bu çalışma özelinde kanat ucu deplasman ve maksimum gerilim değerleridir, aerodinamik optimize ediciye aktarılır ve ilgili kısıtlama ihlallerinin değerlendirilmesinde kullanılır.

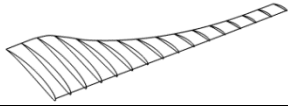
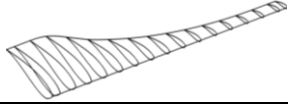
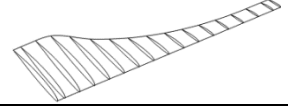


Şekil 11. Kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsünün akış şeması

Otomatik kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsünün yeteneklerini göstermek için üç farklı kanat seti oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. SG6043, S823 ve SG6041 kanat profillerine sahip otomatik olarak oluşturulan KRT kanatları için maksimum kanat ucu deplasmanı ve von Mises gerilimi sonuçları Tablo 3'te özetlenmiştir. Analizler 8 GB RAM'e sahip standart bir Intel Core i5 Dizüstü Bilgisayarda yürütülmüş ve ortalama olarak tek bir kanadın oluşturulması ve analiz

edilmesi için geçen toplam süre yaklaşık 20 saniye olarak saptanmıştır. Bahsi geçen analiz sürelerinin aerodinamik optimizasyon için gereken süreyi içermediği ve Tablo 3'te yer alan sonuçların da optimizasyon sonucu olmadığı, çözümün verilen girdiye karşılık oluşturduğu sonuçlar olduğu dikkate alınmalıdır.

Tablo 3. Otomatik kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsüyle elde edilen üç farklı kanat için yapısal sonuçlar

Kanat profili	Kanat ucu deplasmanları (mm)	von Mises gerilmeleri (MPa)
SG6043 	54.1	13.4
S823 	11.3	5.6
SG6041 	59.8	13.2

Geliştirilen kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsünün, bir optimizasyon çerçevesinde KRT kanadının 1-B kiriş sonlu eleman modelinin ikame (vekil) modeller aracılığıyla yerini alması için etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Yüksek doğrulukta aerodinamik ve yapısal analiz araçlarını kullanarak oluşturulabilen vekil modellerin yüksek hesaplama maliyeti gerektirdiği unutulmamalıdır. Bu bağlamda, öncelikle, çok kesitli konik olmayan 1-B kiriş SE modelinin 3-B SE modeline yakın seviyede KRT kanat yapısını temsil ettiği gösterilmiştir. Bir KRT kanat optimizasyonu süresince fazla sayıda gerçekleştirilecek yinelemelerde yapısal ölçütlerin çok hızlı değerlendirilmesinde ve güvenilir vekil modeller oluşturulmasında otomatik kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsünün kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇ

Rüzgâr türbini kanatlarının çok boyutlu optimizasyonunda yapısal ölçütler genellikle amaç fonksiyonunda amacın kendisine veya kısıtlanmasına yönelik kullanılır. Yapısal davranışın doğru ve hızlı değerlendirilmesi çok boyutlu optimizasyonda yapısal çözücü için temel bir gerekliliktir. Bu bağlamda sonlu elemanlar analizleri rüzgâr türbin kanatlarının yapısal analizleri için kullanılan vazgeçilmez bir yöntemdir. Yüksek doğruluklu 3-B sonlu eleman modelleri, kanatların deplasman ve kanattaki gerilme dağılımı gibi yapısal metrikler için isabetli çözümler sunsa da, bir optimizasyon çerçevesinde fazlaca tekrarlanması gereken analizler nedeniyle hesaplama süreleri açısından yetersiz kalmaktadırlar.

Bu çalışmada, KRT kanatlarının çok boyutlu optimizasyonuna hızlı ve yeterli doğrulukta bir yapısal analiz yönteminin dahil edilmesi için çalışma yapılmıştır. Yapısal çözümlerin daha hızlı elde edilmesi için, ANSYS'de bulunan konik ve konik olmayan kiriş eleman alternatifleri ile daha düşük doğrulukta indirgenmiş mertebeli sonlu elemanlar modeli incelenmiştir. Rüzgâr türbini kanadının aerodinamik optimizasyonu sırasında, özellikle meta-sezgisel optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı durumlarda, düzgün olmayan kesit geçişleriyle karşılaşılabildiğinden

kanadın SE modelinde konik kiriş elemanlarıyla ayrıklaştırılmasının zorluklara neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Bunun ana nedeni, konik kiriş elemanların kesit birleşimlerinde eşlenmiş çözüm ağı gereksiniminden kaynaklandığı saptanmıştır. Aerodinamik olarak optimize edilmiş KRT kanat geometrisinin konik ve konik olmayan kiriş SE modelleriyle elde edilen sonlu eleman sonuçlarının karşılaştırılması, 48 kesitli konik olmayan kiriş modelinin sonuçlarının 3-B SE modeliyle çok iyi uyum gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, kanadın indirgenmiş mertebeli konik olmayan kiriş modelinin tutarlı bir yaklaşım olduğu, ortaya çıkabilecek ağ oluşturma zorluklarının ortadan kaldırılmış olmasıyla gösterilmiştir.

Bu çalışmada, KRT kanadının düşük doğrulukta veya yüksek doğrulukta SE analizlerinde geometrik doğrusal olmama durumunun da dahil edilmesinin gerekli olduğu gösterilmiştir. 48 kesitli konik olmayan kiriş elemanlı modelin ve 3-B modelin geometrik olarak doğrusal ve doğrusal olmayan modeller arasındaki yer değiştirmeler ve gerilme seviyelerindeki sapmaların önemli olduğunu göstermiştir. Euler-Bernoulli kiriş teorisine veya doğrusal sonlu eleman modellerine dayalı basit doğrusal analitik kiriş modellerin yapısal ölçütler üzerinde doğru sonuçlar veremeyeceği, bu nedenle, çok disiplinli bir optimizasyon çerçevesinde yapısal çözücü olarak bu tür doğrusal modellerin kullanılmasının doğru olmayacağı sonucuna varılmıştır.

KRT kanadının çok boyutlu optimizasyonuna dahil edilecek verimli bir yapısal analiz yöntemi, ve yapısal çözücü ile optimize edicinin sorunsuz entegrasyonu için otomatik bir kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsü geliştirilmiştir. Kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsü 48 kesitli konik olmayan kiriş elemanları kullanmaktadır ve optimizasyon yinelemeleri sırasında aerodinamik optimize ediciye sorunsuz bir şekilde entegre edilebileceği gösterilmiştir.

Takip eden çalışma olarak, KRT kanadının çok boyutlu optimizasyonu için, geliştirilen otomatik kiriş-kanat modelleyicisi/çözücüsüsü yapısal ölçütlerin çok hızlı değerlendirilmesinde ve vekil modellerin oluşturulmasında kullanılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] P.F.S. Trentin, P.H.B. de B. Martinez, G.B. dos Santos, E.E. Gasparin, L.O. Salviano, Screening analysis and unconstrained optimization of a small-scale vertical axis wind turbine, *Energy*. 240 (2022) 122782. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122782>.
- [2] S.Ghoneam, A. Hamada, T. Sherif, Modeling and Optimization for the Dynamic Performance of Vertical-Axis Wind Turbine Composite Blades, *Journal of Solar Energy Engineering*. 143 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4048159>.
- [3] A.M. Abdelsalam, W.A. El-Askary, M.A. Kotb, I.M. Sakr, Computational Analysis of an Optimized Curved-Bladed Small-Scale Horizontal Axis Wind Turbine, *Journal of Energy Resources Technology*. 143 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4048531>.
- [4] M.N. Kaya, F. Köse, O. Uzol, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Aerodynamic Optimization of a Swept Horizontal Axis Wind Turbine Blade, *Journal of Energy Resources Technology*. 143 (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4051469>.
- [5] S. A. Ning, R. Damiani, P.J. Moriarty, Objectives and Constraints for Wind Turbine Optimization, *Journal of Solar Energy Engineering*. 136 (2014). <https://doi.org/10.1115/1.4027693>.
- [6] Pavese, Christian, Carlo Tibaldi, Frederik Zahle, and Taeseong Kim. "Aeroelastic multidisciplinary design optimization of a swept wind turbine blade." *Wind Energy* 20, no. 12 (2017): 1941-1953.
- [7] A. Rashedi, I. Sridhar, K.J. Tseng, Multi-objective material selection for wind turbine blade and tower: Ashby's approach, *Materials & Design*. 37 (2012) 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.048>.
- [8] M.J. Clifton-Smith, Aerodynamic Noise Reduction for Small Wind Turbine Rotors, *Wind Engineering*. 34 (2010) 403-420. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.3.4.403>.

- [9] M.L. Shaltout, Z. Yan, D. Palejiya, D. Chen, Tradeoff analysis of energy harvesting and noise emission for distributed wind turbines, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 10 (2015) 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.01.005>.
- [10] Wood DH. *Small wind turbines: analysis, design, and application, green energy and technology*. London: Springer-Verlag; 2011.
- [11] M.H.Aa. Madsen, F. Zahle, N.N. Sørensen, J.R.R.A. Martins, Multipoint high-fidelity CFD-based aerodynamic shape optimization of a 10 MW wind turbine, *Wind Energy Science*. 4 (2019) 163–192. <https://doi.org/10.5194/wes-4-163-2019>.
- [12] L. Vorspel, B. Stoevesandt, J. Peinke, Optimize Rotating Wind Energy Rotor Blades Using the Adjoint Approach, *Applied Sciences*. 8 (2018) 1112. <https://doi.org/10.3390/app8071112>.
- [13] A. Pourrajabian, M. Dehghan, S. Rahgozar, Genetic algorithms for the design and optimization of horizontal axis wind turbine (HAWT) blades: A continuous approach or a binary one?, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 44 (2021) 101022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101022>.
- [14] M. Sessarego, D. Wood, Multi-dimensional optimization of small wind turbine blades, *Renewables: Wind, Water, and Solar*. 2 (2015) 9. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0009-x>.
- [15] C.C. Liao, X.L. Zhao, J.Z. Xu, Blade layers optimization of wind turbines using FAST and improved PSO Algorithm, *Renewable Energy*. 42 (2012) 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.011>.
- [16] M. Tahani, N. Babayan, S. Mehrnia, M. Shadmehri, A novel heuristic method for optimization of straight blade vertical axis wind turbine, *Energy Conversion and Management*. 127 (2016) 461–476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.094>.
- [17] Manwell, James F., Jon G. McGowan, and Anthony L. Rogers. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [18] H.S. Chivae, J.N. Sørensen, Analysis of throw distances of detached objects from horizontal-axis wind turbines, *Wind Energy*. 19 (2016) 151–166. <https://doi.org/10.1002/we.1828>.
- [19] A. Maheri, Multi-objective optimisation and integrated design of wind turbine blades using WTBM-ANSYS for high fidelity structural analysis, *Renewable Energy*. 145 (2020) 814–834. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.013>.
- [20] A. Pourrajabian, P.A.N. Afshar, M. Mirzaei, R. Ebrahimi, D.H. Wood, Hollow Blades for Small Wind Turbines Operating at High Altitudes, *Journal of Solar Energy Engineering*. 138 (2016). <https://doi.org/10.1115/1.4034333>.
- [21] Z. Wang, A.S.J. Suiker, H. Hofmeyer, T. van Hooff, B. Blocken, Coupled aerostructural shape and topology optimization of horizontal-axis wind turbine rotor blades, *Energy Conversion and Management*. 212 (2020) 112621. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112621>.
- [22] X. Chen, Z. Qin, K. Yang, X. Zhao & J. Xu, Numerical analysis and experimental investigation of wind turbine blades with innovative features: Structural response and characteristics. *Science China Technological Sciences*, (2015) 58(1), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5741-8>.
- [23] P. Noever-Castelos, B. Haller, C. Balzani, Validation of a modeling methodology for wind turbine rotor blades based on a full-scale blade test. *Wind Energy Science*, (2022) 7(1), 105-127. <https://doi.org/10.5194/wes-7-105-2022>.
- [24] S. Evans, S. Dana, P. Clausen, D. Wood, A simple method for modelling fatigue spectra of small wind turbine blades, *Wind Energy*. 24 (2021) 549–557. <https://doi.org/10.1002/we.2588>.
- [25] W. Yu, J.C. Ho D.H. Hodges, Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis - An updated version. *International Journal of Engineering Science*, (2012) 59:40-64.
- [26] R. Feil, T. Pflumm, P. Bortolotti, M. Morandini, A cross-sectional aeroelastic analysis and structural optimization tool for slender composite structures, *Composite Structure*, (2020) 253:112755.

- [27] M. Thapa, S. Missoum, Surrogate-based stochastic optimization of horizontal-axis wind turbine composite blades, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2022) 65:41.
- [28] L. Cozzi, J. Bellucci, M. Giovannini, F. Papi, A. Bianchini, Towards the development of an advanced wind turbine rotor design tool integrating full CFD and FEM, *Journal of Physics; Conference Series*, (2022) 2265:042050.
- [29] A. Chehouri, R. Younes, A. Ilinca, J.Perron, Review of performance optimization techniques applied to wind turbines, *Applied Energy*, (2015) 142:361-388.
- [30] A. Pourrajabian, P.A.N. Afshar, M. Ahmadizadeh, Aero-structural optimization of a small wind turbine blade, *Renewable Energy*, (2016) 87: 837-848.
- [31] Haupt, Randy L., and Sue Ellen Haupt. *Practical genetic algorithms*. John Wiley & Sons, 2004.
- [32] A. Pourrajabian, R. Ebrahimi, M. Mirzaei, Applying micro scales of horizontal axis wind turbines for operation in low wind speed regions, *Energy Conversion and Management*. 87 (2014) 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.003>.
- [33] Burton, Tony, Nick Jenkins, David Sharpe, and Ervin Bossanyi. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2011.
- [34] S. Worasinchai, G.L. Ingram, R.G. Dominy, Effects of Wind Turbine Starting Capability on Energy Yield, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 134 (2012). <https://doi.org/10.1115/1.4004741>.
- [35] ANSYS (2021). Release R1 (2021). Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS Inc.
- [36] C. Astle, I. Burge, M. Chen, T. Herrler, L. Kwan, N. Zibin, D. Wood, Timber for small wind turbine blades, *Energy for Sustainable Development*. 17 (2013) 671–676. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.03.001>.
- [37] Germanischer Lloyd rules and guidelines, DNV. (n.d.). <https://www.dnv.com/Default> (accessed April 6, 2022).
- [38] International Electrotechnical Commission. "Wind energy generation systems-Part 1: Design requirements." International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland (2019).
- [39] M. Rosemeier, P. Berring, K. Branner, Nonlinear ultimate strength and stability limit state analysis of a wind turbine blade, *Wind Energy*. 19 (2016) 825–846. <https://doi.org/10.1002/we.1868>.
- [40] P.N. Castelos, C. Balzani, The impact of geometric nonlinearities on the fatigue analysis of trailing edge bond lines in wind turbine rotor blades, *J. Phys.: Conf. Ser.* 749 (2016) 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/749/1/012009>.
- [41] M.M. Rezaei, M. Behzad, H. Moradi, H. Haddadpour, Modal-based damage identification for the nonlinear model of modern wind turbine blade, *Renewable Energy*. 94 (2016) 391–409. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.074>.
- [42] Kam, T. Y., Su, H. M., & Huang, C. Y.. Quasi-static buckling and first-ply failure loads of shear web reinforced glass-fabric composite wind blades. *Composite Structures*, 160, 1225-1235 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.087>.