

## YÜKSEK KARA RÜZGAR TÜRBİN KULELERİ İÇİN TRİPOD DESTEK YAPISI

Charis J. Gantes<sup>1\*</sup>, Maria Villi Billi<sup>2</sup>, Mahmut Güldogan<sup>3</sup> and Semih Gül<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

<sup>2</sup> Ergon Analysis Consulting Engineers, Marousi, Greece

<sup>3</sup> Ateş Wind Power, Izmir, Turkey

\*[chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

### ÖZET

Ayarlanabilir bir alt "tripod bölümü" ve bir üst boru şeklindeki çelik bölümden oluşan ve rüzgar potansiyelinden optimum şekilde yararlanmak için çok yüksek rotor göbek yüksekliklerini sağlamayı amaçlayan bir rüzgar türbini kulesi tertibatı sunulmaktadır. Alt yapının temel sistemi, her bir tripod ayağının altında ortak bir kazık başlığı ile tepelerinde birbirine bağlanan kazık setlerinden oluşur. Konsept, mevcut rüzgar türbini kulelerinin yükseltilmesinin yanı sıra yenilerinin gerçekleştirilmesi için iki tip uygulamaya göre ayarlanabilir. Ayrıca hem karada hem de açık deniz kulelerinde ayarlanabilir, ancak öncelikle karadaki rüzgar çiftliklerinin daha katı taşınabilirlik kısıtlamalarının üstesinden gelmeye yöneliktir. Ön yapısal araştırma, tripod alt yapısının, tüm ayrı parçalar ve bunların bağlantılarının, yapısal performans kriterlerini karşılarken aynı zamanda imalat, nakliye, montaj, bakım ve sökme ile ilgili kısıtlamalara uyacak şekilde yapılandırılabilirliğini göstermiştir. Ana yapısal özellikler, gerçekçi kesitlerin belirlendiği ve maliyet tahminlerinin yapıldığı 180 m yüksekliğinde bir kuleden oluşan tipik bir vaka çalışması aracılığıyla sunulmaktadır ve konseptin rekabet gücünü ortaya koymaktadır.

### 1. GİRİŞ

Geleneksel enerji kaynakları tükendikçe ve çevresel etkilerin farkındalığının artmasıyla, alternatif enerji kaynakları sürekli olarak ilerleme kaydetmektedir. Örnek olarak, Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar enerji üretiminin en az %32'sini yenilenebilir kaynaklarından elde etme hedefi belirlemiştir [1]. Bu kaynaklar arasında rüzgar enerjisi, potansiyel olarak verimli ve uygun maliyetli bir enerji kaynağı olarak giderek daha popüler hale gelmektedir. Rotorun aerodinamik elemanları, güç çıktısı ile alakalı elektriksel mekanizmalar ve rüzgar çiftliklerinin kurulduğu sahalar gibi kimi unsurlar, mümkün olan en yüksek enerji eldesini sağlamak amacıyla sürekli olarak optimize edilmektedir. Rüzgar türbininin olağan parçası olan kuleler de haklı olarak benzer ilgiyi görmektedir.

Günümüzde rüzgar türbin kulelerinin en yaygın türü, silindirik ve/veya konik halkalardan oluşan çelik kulelerdir [2,3]. Türbin kule yapısı, (i) çelik levhaların istenilen silindirik ve/veya konik şekle uygun olarak soğuk-bükümü, (ii) genellikle 2.5 m ila 3.0 m uzunlukta kapalı halka oluşturacak şekilde çelik levhaların iki kenarının birbirine kaynaklanması, (iii) üretilen bu halkaların 20 m ile 30 m arasında uzunlukta kule parçaları oluşturacak şekilde kaynakla birleştirilmesi, (iv) bu parçaların türbin sahasına taşınması, vinçler vasıtasıyla kaldırılarak flanşlardan öngörülen cıvatalarla birbirine bağlanması ile elde edilir.

Bu tür kulelerin yapısal tasarımı birçok araştırmacının ilgi odağındadır. Tasarımı ve gerekli kesitleri belirleyen baskın göçme modları; silindir şeklindeki yapısal elemanların lokal burkulması, birleşim yerlerindeki metal yorulması ve kulenin temel frekansları olan rotor (1P) ile kanat geçiş (3P) frekansları arasındaki rezonans oluşumunun önlenmesidir. Yapısal tasarım kontrolleri ana hatlarıyla, yönetmelik [4-7] ve standartlarda [8,9] belirtilmiştir. Özellikle dikkat çeken konular arasında, burkulma direncini artırmak için eklenen güçlendirme plakaları, kule

tabanına yakın kapı açıklığı nedeniyle kaybedilen dayanımı ve rijitliği geri kazanma tedbirleri, ardışık segmentler arasındaki flanş bağlantılarının tasarımı yer almaktadır. Kapsamlı araştırma çalışmaları, yapısal analiz ve tasarım yöntemlerinin yanı sıra türbinin kule ağırlığını ve maliyetini azaltacak tasarım optimizasyonlarına yönelmiştir.

Bununla birlikte, tüm optimizasyon girişimlerine rağmen, geleneksel silindirik çelik kuleler, rüzgar enerjisi sektörünün daha da ilerlemesini sağlama potansiyellerini neredeyse tüketmiş görünmektedir. Daha yüksek enerji verimine, rotor süpürme alanının daha uzun kanatlar kullanılarak büyütülmesi, veya rüzgar türbinlerini rüzgarın daha yüksek ortalama hız değerine sahip ve daha istikrarlı olduğu daha yüksek yerlere yerleştirilmesiyle elde edilebilmektedir. Her iki koşul da daha yüksek destek yapıları gerektirmektedir. Bunun bir sonucu olarak, kule ve temel üzerindeki yapısal etkiler de artmaktadır. Daha büyük süpürme alanı ve daha yüksek ortalama rüzgar hız değerleri, daha büyük yatay kuvvetlere neden olur. Bu etkiler, daha uzun kule yüksekliği ile çarpıldığında, özellikle kulenin alt kısımlarında ve türbin temeli üzerinde çok büyük eğilme momentlerine sebep olur.

Geleneksel silindirik kara rüzgar türbinlerinde kule tabanına yakın bölgelerde artan eğilme momentleri, mekanik bilimin dikte ettiği kesit çapı artırarak karşılanamamaktadır zira, kulelerin taşıtlarla karada taşınabilirliği, köprü ve üst geçitlerin altından geçiş izinleri ve kuleyi araç genişliğine sığdırabilmek için kule çapları yaklaşık 4,5 m ile sınırlanmaktadır. Bu çap limitleri içerisindeki kuleler için, silindirik kesitli kuleler tarafından şimdiye kadar erişilen 150 m veya biraz yukarısındaki yüksekliklerin aşılması zor olacaktır. Daha yüksek mertebelere ulaşmak amacıyla diğer yapısal sistemlerin araştırılması anlamlıdır ve yeni konseptler üzerine araştırmalar devam etmektedir.

Deniz taşımacılığı önceden kaynaklanmış daha büyük boyutta elemanların gemilerle taşınabilmesine olanak sağladığı için, üretimi deniz kıyısına yakın fabrikalarda yapılabilen açık deniz rüzgar türbinleri için ilgi çekici kule konseptleri kullanılabilmiştir [10-12]. Bu çözümler arasında, orta derinlikli denizler için ön imalatlı tripodlar, monopile (tekil kazıklı) ve ceket tipi zemine sabit kuleler karşımıza çıkmaktadır [13-16]. Tripod konsepti, yapıya daha fazla stabilite ve rijitlik sağlamak için, iyi bilinen ve çok eski bir çözümdür. Bu çözüm, diğer taraftan kara taşımacılığı için zorluklar içermektedir.

Tripod rüzgar türbinlerine yönelik bir uygulamada, karada kurulmuş Multibrid M5000 kulesi mevcuttur [17]. Geniş çaplı bacaklar gerektirdiği için yaygın kullanım alanı bulamamıştır. Zira bu çözümde tripod bacakların kaynakla bir araya getirilmesi için ya rüzgar türbini kulelerinde yorulma kriterleri açısından şüpheler içeren sahada kaynak işlemi yapılması gerekmekte ya da fabrikada kaynaklanmış olarak nakledilebilir olması tripod boyutunu dolayısıyla açık deniz (offshore) uygulamalarda kullanımını sınırlayıcı olmaktadır.

Sahada birbirine cıvatalanmış eğimli bacaklardan oluşan çok bacaklı taban kesit konseptleri önerilmiş ve patenti alınmıştır [18-20]. Fakat, önemli yüksekliklerdeki herhangi bir rüzgar türbin kulesi için rijitlik, dayanıklılık, stabilite, rezonans ve yorulma kriterlerini gerçekçi bir şekilde karşılamaktan uzak, mevcut silindirik kule yapılarında ise mümkün olan yükseklikler için bile soyut bir seviyede kalmaktadır. Ek olarak, türbin içine erişim ve şebeke bağlantısı için kablolama yolu gibi temel konular öngörülmemiştir.

Bu nedenle, burada önerilen alternatif tripod alt yapısının amacı, çok büyük yükseklikteki rüzgar türbin kuleleri için gerçekçi, modüler ve ölçeklenebilir, ayrıca eleman kesitleri ve bağlantı detayları, güvenlik ve uygulama ile ilgili gerekli tüm kriterleri karşılayan aynı zamanda üretim, montaj, bakım, demontaj, kara ve açık deniz taşıması kısıtlamalarına uygun bir çözüm oluşturmaktadır. İlgili bir patent başvurusu yapılmış ve değerlendirme aşamasındadır [21].

## 2. ÖNERİLEN TRİPOD KONSEPTİ

### 2.1. Önerilen Tripod Konseptinin Genel Özellikleri

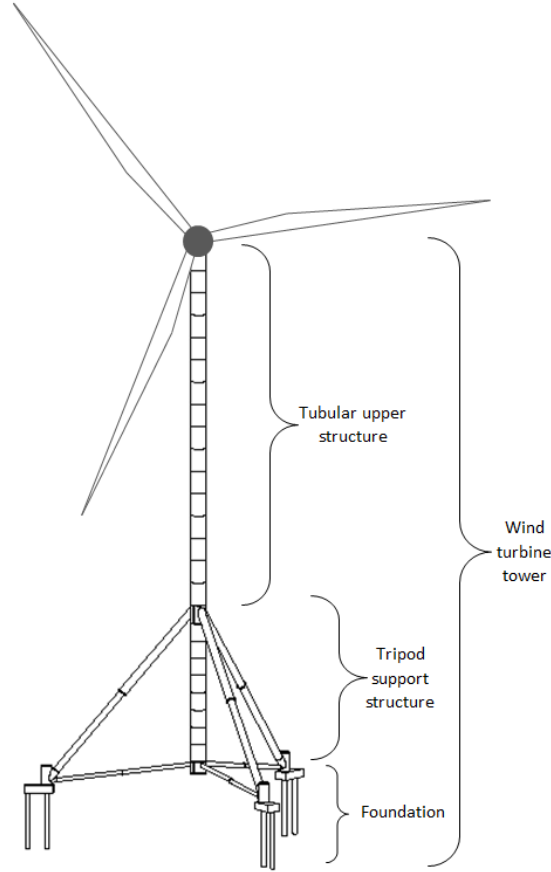
Önerilen rüzgar türbin kulesi tertibatı, yatay eksenli bir rüzgar türbinini taşıyan geleneksel silindirik şekilli çelik bir üst yapı, uyarlanabilir bir alt destek yapısı olan tripod ve temelinden oluşmaktadır (Şekil 1). Tripod destek yapısı, desteklenecek üst yapı ile eş eksenli bir dikey bacadan ve dikey bacağın etrafında çiftler halinde düzenlenmiş üç set boru şeklinde üst ve alt eğimli bacadan oluşur. Her eğimli bacak çifti, zemin seviyesinden yükselen ve temel kazıkları üst kısmından birbirine bağlayan temel başlığına sabitlenen köşe bağlantı elemanında kesişir. Düz arazilerde tüm üst ve alt eğimli bacak çiftleri için temel seviyesi aynı olabileceği gibi, eğimli veya engebeli arazilerde farklı zemin seviyesine de uyum sağlayabilir.

Tripod destek yapısı ve onu oluşturan parçalar Şekil 2'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Üst ve alt bacak çiftlerinin sayısının üçten farklı olabileceği gibi yeni düzenlemelerle çok bacaklı da yapılabileceği belirtilmelidir. Tripod konsepti veya çoklu bacak yaklaşımı, kulenin yerdeki destek noktalarının çevresini önemli ölçüde genişleterek devrilmeye karşı stabiliteyi artırır. Ayrıca, destek yapısı, esas olarak eksenel hareketle gelişen büyük devrilme momentlerine direnir, bu nedenle malzemedan çok daha iyi yararlanır ve bacaklar için, dirsekli üst yapıya ve eğilmeye çalışan tripodun dikey bacağına göre önemli ölçüde daha küçük kesitler gerektirir.

Tripod tertibatının dikey bacak elemanı, üst yapıya benzer şekilde silindirik olup, yapısal koşullar gereği, yukarıdan aşağıya doğru giderek küçülen değişken kalınlıkta kesitlerden oluşur. Nakliye kısıtlamalarına uygun şekilde daha uzun dikey bacak bölümleri oluşturmak için fabrikada halkalar ardışık olarak birbirine kaynaklanır. Tripodun ortasında yer alan dikey bacak elemanı parçalarının birbirine bağlantısı da, eğimli üst ve alt bacakların kesiştiği bağlantı elemanlarına bağlantıları da halka flanşlarla gerçekleştirilebilir. Dikey bacak elemanları sahada vinçlerle kaldırılabilir ve öngerilmeli cıvatalarla montajlanabilir.

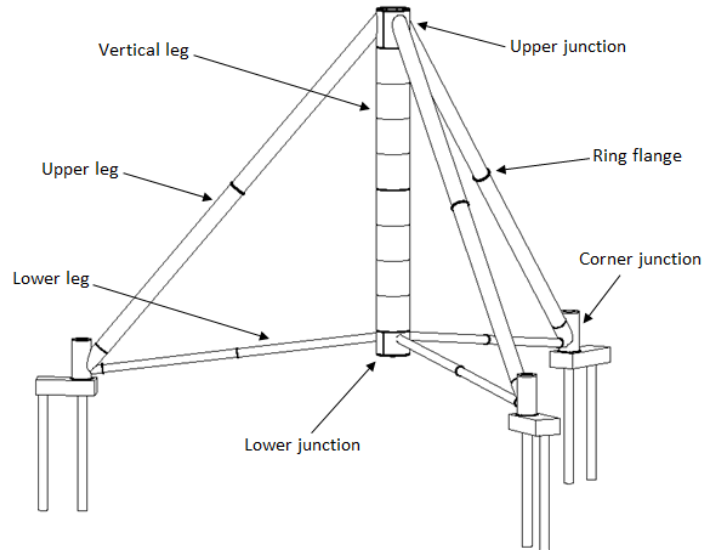
Dikey bacak; platformlar, asansör, merdiven, kablolama ve rüzgar türbininin çalışması için gereken diğer ekipmanlarla donatılmıştır. Dikey bacağın altında bir temelin bulunması, yapısal olarak gerekli değildir; bu nedenle tabanı yerden birkaç metre yukarıda bulunabilir. Bu, personelin ve ekipmanın giriş ve çıkışını sağlamak için dikey ayağın alt kısmında bir kapı açıklığını mümkün kılar. Bu sayede, silindirik kulelerde yaygın olarak kullanılan yan kapı açıklığı için gerekli karmaşık şekilli, ağır ve maliyetli bir güçlendirme çerçevesi gerekleri önlenir.

Eğimli üst ve alt bacaklar, dikey bacadaki gibi düz plakaların soğuk bükümüyle imal edilebilir veya alternatif olarak daha kolay tedarik için ticari olarak mevcut boru şeklindeki elemanlar da kullanılabilir. Eğimli bacakların yapısal davranışı esas olarak eksenel yükler olduğu ve önemli eğilme hareketinin sadece kesit birleşim noktalarına yakın yerlerde geliştiği göz önüne alındığında, uzunluklarının çoğunda sabit bir boru kalınlığı, uçlara yakın olası kalınlık artışıyla birlikte maliyet etkin olacaktır. Kademeli değişen kesit kalınlığından kaçınmak, esas olarak eksenel yükler nedeniyle nispeten küçük çap gereksinimleri ile birleştiğinde, uzun boru parçalarının kullanılmasına izin verir. Böylece kaynak ve cıvatalama ihtiyaçlarını en aza indirir ve potansiyel olarak önemli bir imalat süresi ve maliyet azalması sağlar. Yapısal eleman uzunlukları, nakliye kısıtlamaları tarafından belirlenir ve bu elemanlar flanşlarla ön gemmeli cıvatalar aracılığıyla sahada birbirine montajlanır.



Şekil 1. Önerilen rüzgâr türbini kule tertibatının ana elemanları

Çapa ve konuma bağlı olarak flanşlar, montaj sırasında cıvatalama ve sonrasındaki bakım koşulları için erişilebilirlik göz önünde bulundurularak kesitin dışında veya iç kısmında olabilir. Kesitin dışında bulunan flanşlar ve beraberindeki cıvatalar, korozyona ve çevresel faktörlere karşı ek koruma gerektirebilir. Flanşların iç kısmında bulunması durumunda bacakların eğimine bağlı olarak, cıvatalama ve bakım koşullarında personelin erişimini sağlamak için iç merdivenler gerekli olabilir. Dış halka flanşlarda ise cıvatalama ve bakım, teleskopik veya makaslı kaldırma platformları kullanılarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 2. Tripod destek yapısının ana elemanları

## 2.2. Temel Konsepti

Her bir köşe birleşim parçasının kazık temeli, üst kısmında betonarme kazık başlığı ile birbirine bağlanan betonarme kazıklardan oluşacak şekilde öngörülmüştür. Kazıkların sayısı, çapı, derinliği ve donatı özellikleri zemin koşullarına ve üstyapı tarafından temele aktarılan yüklere bağlıdır. Şekil 2'deki örnekte, reaksiyon kuvvetlerini daha etkin karşılayabilmek için radyal yönde iki adet kazık düzenlenmiştir. Yatay reaksiyon kuvvetlerinden oluşan çekme gerilmelerini dengeleyebilmek amacıyla iç kazık köşe elemanın altına konumlandırılmıştır. Ayrıca bu konfigürasyonda, düşey yükler kazık başlığında eğilmeye neden olmadan doğrudan kazığa aktarılır.

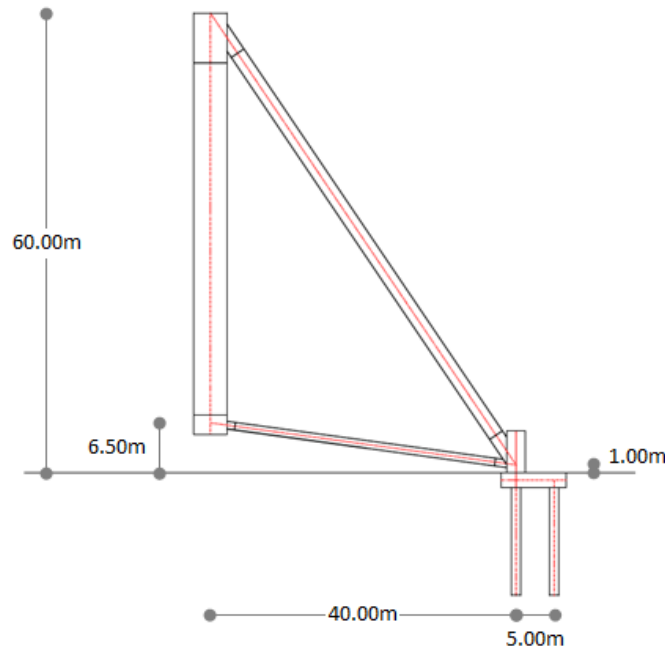
## 3. DURUM ÇALIŞMASI

Önerilen tripod altyapısının fizibilitesini ve maliyet etkinliğini doğrulamak için, ön yapısal tasarım aşamasında özel bir durum çalışması yapılmıştır. Varsayılan veriler, metodoloji ve ana bulgular bu bölümde özetlenmiştir.

### 3.1. Geometri, Kesit ve Malzeme Özellikleri

Çalışmada incelenen, 60 m yüksekliğe ve 40 m taban yarıçapına sahip tripod destek yapısının geometrisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Dikey bacak, sırasıyla üstte 60 mm ve altta 30 mm kalınlığındaki birleşim elemanlarından ve üstte 40 mm'den altta 18 mm'ye her 2 m'de 1 mm'lik kesit et kalınlığının azaldığı, 4300 mm sabit çapa sahip kesitlerden oluşmaktadır. Üst eğimli bacaklar 2000 mm'lik bir çapa ve 20 mm'lik bir kesit et kalınlığına sahiptir, iki uçta lokal olarak 40 mm'ye yükseltilirken, alt bacaklar 1000 mm'lik bir çapa ve 10 mm'lik bir et kalınlığına sahip olup, lokal olarak iki uçta 25 mm'ye yükseltilmiştir.

Yardımcı köşe boruları 2500 mm çapa ve 30 mm et kalınlığına sahiptir ve her biri 1 m çapında iki betonarme kazığı bağlayan 3 m genişliğinde, 8.5 m uzunluğunda ve 2 m kalınlığında betonarme kazık başlığına sabitlenir, kazıklar radyal yönde birbirinden 5 m mesafe ile düzenlenmiştir. Kazıkların derinliği zemin koşullarına bağlıdır ve bu çalışmada 15 m olduğu varsayılmıştır. Çelik üst yapı S355 kalite çelikten, beton temel ise C25/30 beton ve B500S takviye çeliğinden yapılmıştır.

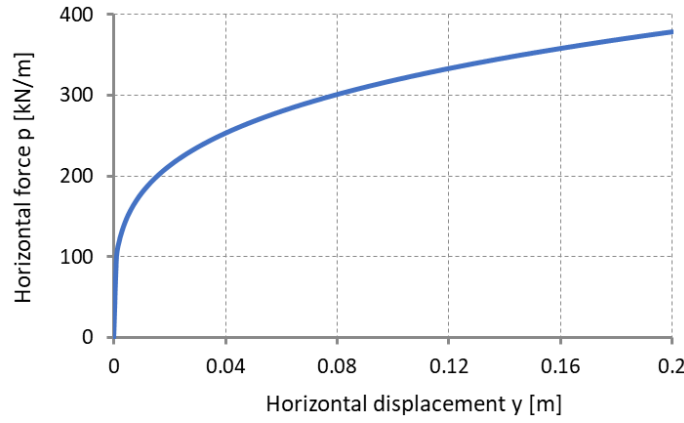


Şekil 3. Durum çalışması geometrisi

### 3.2. Zemin Yapısı

Analizlerin sadeleştirilmesi amacıyla zemin, drenajsız kayma direnci  $c_u=50 \text{ kN/m}^2$  olan orta derecede fazla konsolide kil varsayılmıştır. Tripodun genel yapısal davranışını daha iyi incelemek amacıyla rijit zemin kabulü yapılarak, temel-zemin etkileşimi minimum düzeye indirilmiştir.

Zemin-kazık etkileşimi, radyal ve teğetsel doğrultuda doğrusal olmayan 1 m aralıklarla yerleştirilmiş yatay yaylarla modellenmiştir, kazık yüksekliği boyunca sabit olan yatay kuvvet  $p$  - yatay yer değiştirme  $y$  eğrileri ile tanımlanmıştır (Şekil 4). Konservatif olarak, kazık üzerindeki sürtünme ihmal edilmiş ve dikey yüklere karşı tüm kazık direncinin, kayar mesnet ile tabanda yoğunlaştığı kabul edilmiştir.

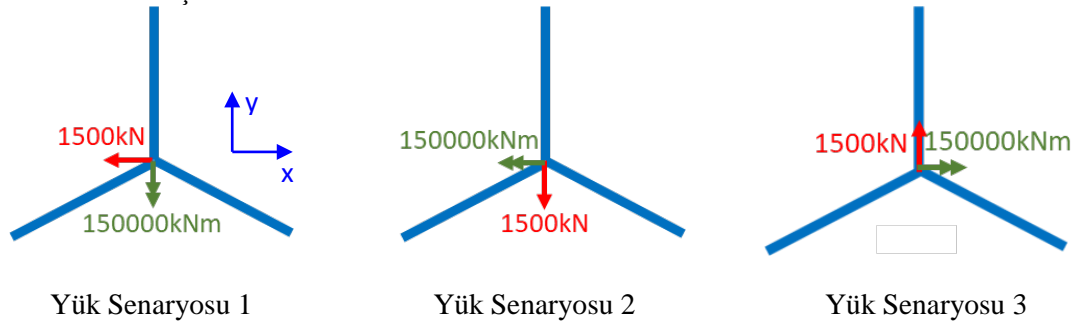


Şekil 4. Zemin-yapı etkileşimini tanımlayan p-y eğrisi

### 3.3. Yük Bilgisi

5-MW rüzgar türbini ile 120 m yüksekliğindeki geleneksel silindirik şekilli rüzgar türbini kulesinin, 10000 kN düşey kuvvet, 1500 kN yatay kuvvet, 150000 kNm eğilme momenti ve 5000 kNm burulma momentinden oluşan tipik destek reaksiyon yükleri tripodun üst kısmına uygulanmıştır. Bu değerlerin güvenlik faktörlerini (partial safety factor) dahil ederek tasarım yüklerini temsil ettiği varsayılmıştır.

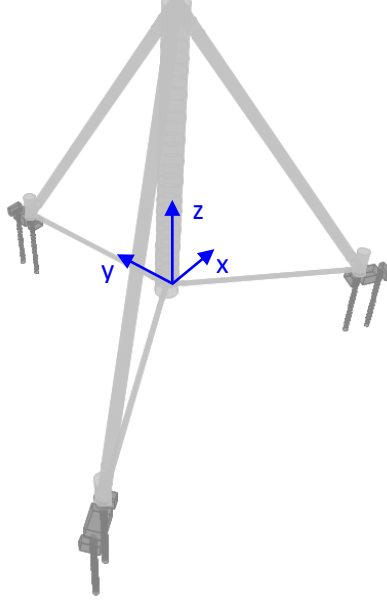
Dikey yük her zaman aşağı yönlü iken, yatay yük için üç farklı senaryo düşünülmüş ve eğilme momentinin her zaman yatay yükün neden olduğu eğilme ile aynı yönde etki ettiği kabul edilmiştir (Şekil 5). Kuvvetlerin ve momentlerin yönlerini sonraki analiz sonuçlarıyla ilişkilendirmek amacıyla yatay düzlemdeki iki eksen de gösterilmiştir. Tripodun kendi ağırlığı da dikkate alınmıştır.



Şekil 5. Tripodun plan görünümünde gösterilen yük senaryoları

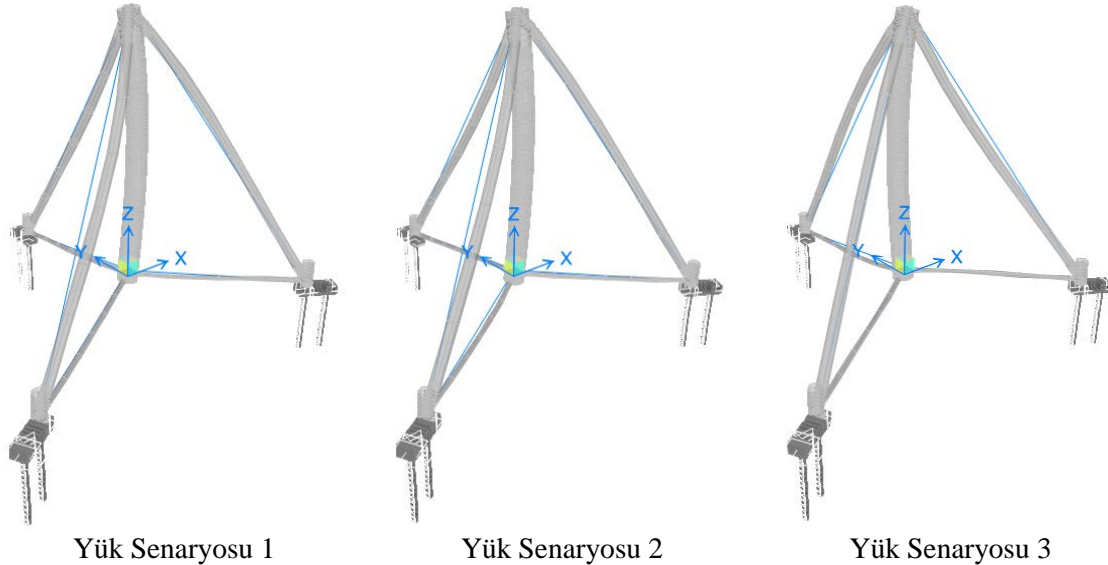
### 3.4. Yapısal Performans

Tripod yapısının genel performansını incelemek için, çelik üst yapının ve betonarme temelin tüm elemanları için doğrusal kiriş elemanları ve zemin yayları için doğrusal olmayan yay elemanlarını içeren SAP2000 sayısal bir model geliştirilmiştir (Şekil 6). Modelde, dikey tripod ayağının üst kesitinin tüm düğümlerinin birleştiği bir düğüm noktasına Bölüm 3.3'te açıklanan yükler uygulanmıştır. Böylelikle ön tasarım seviyesinde yeterli olduğu düşünülen lineer statik analizler yapılmıştır.



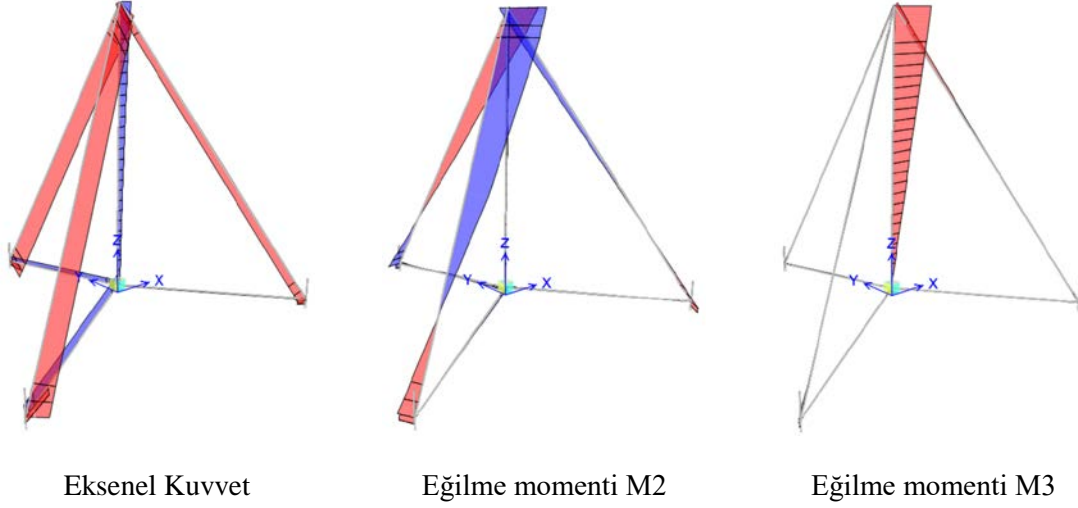
Şekil 6. Destek yapısının SAP2000 de oluşturulan modeli

Bölüm 3.3'te açıklanan üç yük kombinasyonu için elde edilen deformasyon şekilleri, Şekil 7'de gösterilmiştir. Yük kombinasyonu 1 için yapılan analizler sonucunda tripod tepe noktasındaki eğilme ve burulma açısı  $0.01 \text{ rad}$  ( $=0.56^\circ$ ) and  $0.0042 \text{ rad}$  ( $=0.24^\circ$ ) iken, 1 ve 3 numaralı yük koşulları altında maksimum yanal ve düşey yer değiştirmeler  $30.8 \text{ mm}$  ve  $29.8 \text{ mm}$  olarak gözlenmiştir. Bu değerler, kısmen üst yapının deformasyonundan ve kısmen de temelin deformasyonundan kaynaklanmaktadır. Zemin koşulları rijit varsayılarak kazık başlığının, radyal doğrultuda maksimum yer değiştirmesinin  $29.5 \text{ mm}$  olduğu, çevresel yöndeki yer değiştirmelerinin ise ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir.



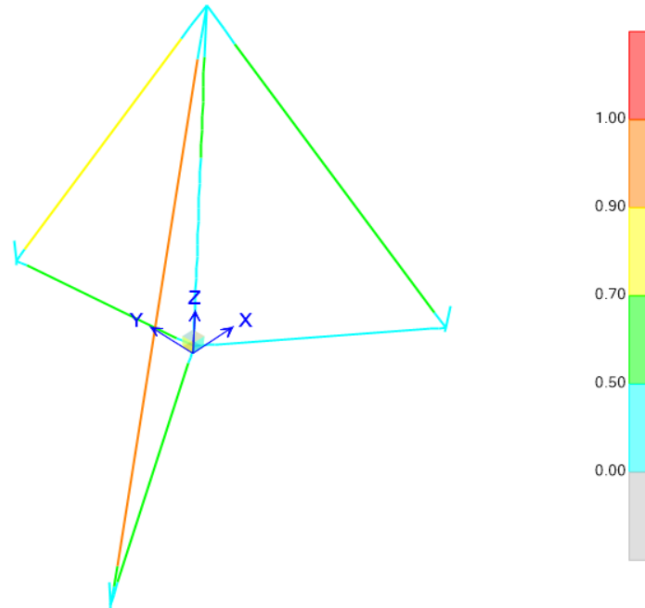
Şekil 7. Deformasyon şekilleri (abartılı deformasyon ölçeği)

Tripod yapısının yük senaryosu 1'e göre oluşan aksel kuvvet ve eğilme momenti diyagramları Şekil 8'de gösterilmektedir. Tüm yükleme durumları göz önüne alındığında, üst eğimli bacaklar yaklaşık 11.000 kN civarında bir maksimum aksel basınç kuvvetine, 9.300 kNm mertebesinde bir maksimum eğilme momentine ve daha kalın uç kısımlarda ise 12.000 kNm'ye yükselen moment değerine sahiptir. Alt eğimli bacakların ilgili yük değerleri 2.700 kN (çekme), 900 kNm (daha kalın uç kısımlarda 1250 kNm) eğilme momenti ve dikey bacak için 3.350 kN (çekme), üst kısmında ise 131.000 kNm eğilme momenti (alta doğru çok küçük değerlere doğru azalan) olmaktadır.



Şekil 8. Yük Senaryosu 1'de oluşan aksel kuvvet ve eğilme momenti diyagramı

Çelik üst yapının EN1993-1-1'e göre tasarımı, Şekil 9'da gösterilen kapasite kullanım oranları ile sonuçlanmaktadır. Standartta göre yapılan bu doğrulama, elastik kesit tasarımı varsayımı ile tüm bacak burkulmasını hesaba katarken, yerel burkulmaları ihmal eder. Bu nedenle, yüksek güvenlik katsayısı değerlerine izin verilmiştir. Bununla birlikte, silindirik elemanlar için yoğun kabuk eleman ağı kullanan ve malzeme, geometrik doğrusal olmayan ve kusurları dikkate alan ön sonlu eleman analizleri, aslında daha küçük bacak kalınlıklarının yerel burkulma doğrulamasını da kapsamak için yeterli olacağını gösterilmiştir.

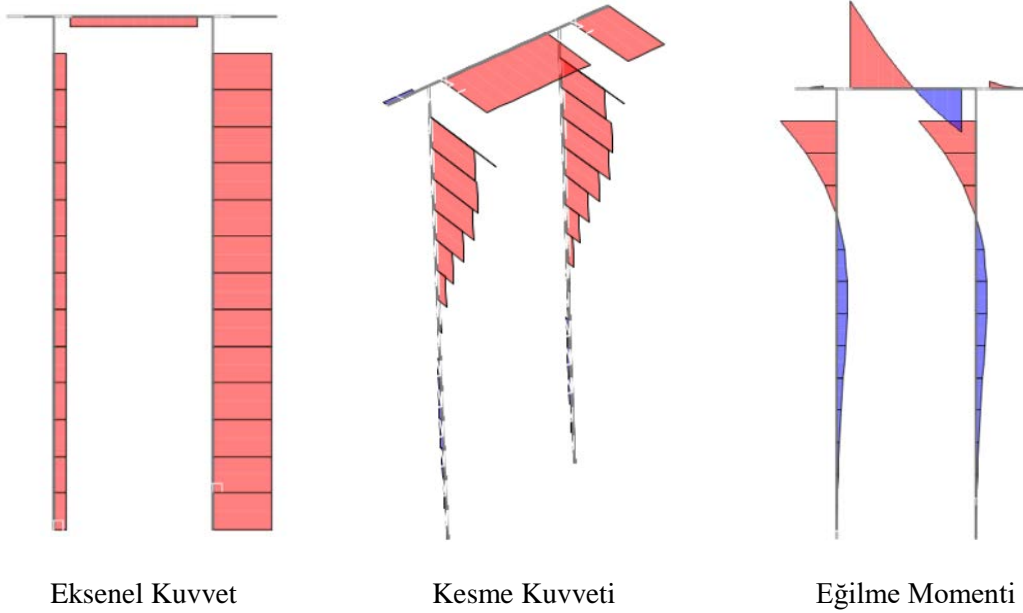


Şekil 9. Yükleme altındaki çelik üst yapı için kapasite kullanım oranları



Bir set (iki adet) kazık için eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları Şekil 10'da gösterilmektedir. Yardımcı köşe bacaları, iç kısımda bulunan kazık üzerine yerleştirilirken, dış kısımda bulunan kazıkta daha küçük bir basınç kuvveti gözlenir, böylece dikey yük bileşeni doğrudan iç kazığa iletilir. İç kazıklardaki yatay reaksiyon kuvvetlerinden kaynaklanan çekme kuvveti daha yüksek toplam gerilmelerine neden olacaktır. Köşe bacağına kazık temel başlığı üzerinde uygun yerleşimi sağlanarak daha da optimize edilebilir.

Ayrıca, dikkate alınan zemin özellikleri altında, kazık kesme kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin tabana doğru düzgün bir şekilde azaldığı ve dolayısıyla yeterli bir kazık derinliğinin varsayıldığı gözlemlenmiştir. Hesaplanan maksimum kesme kuvveti yaklaşık olarak 1400 kN olup, 40 cm<sup>2</sup>/m'lik gerekli kesme donatı alanına karşılık Ø16/10 spiral etriyeler ile karşılanır, buna mukabil eksenel kuvvet ve eğilme momentinin en kötü kombinasyonu sırasıyla 3750 kN ve 3100 kNm olup, 240 cm<sup>2</sup>'lik (%3) gerekli boyuna donatı 34 Ø30 ile karşılanır. Bu değerler, Dikkate alınan kazık kesitinin donatı seviyesi yeterliliği teyit edilmiştir.

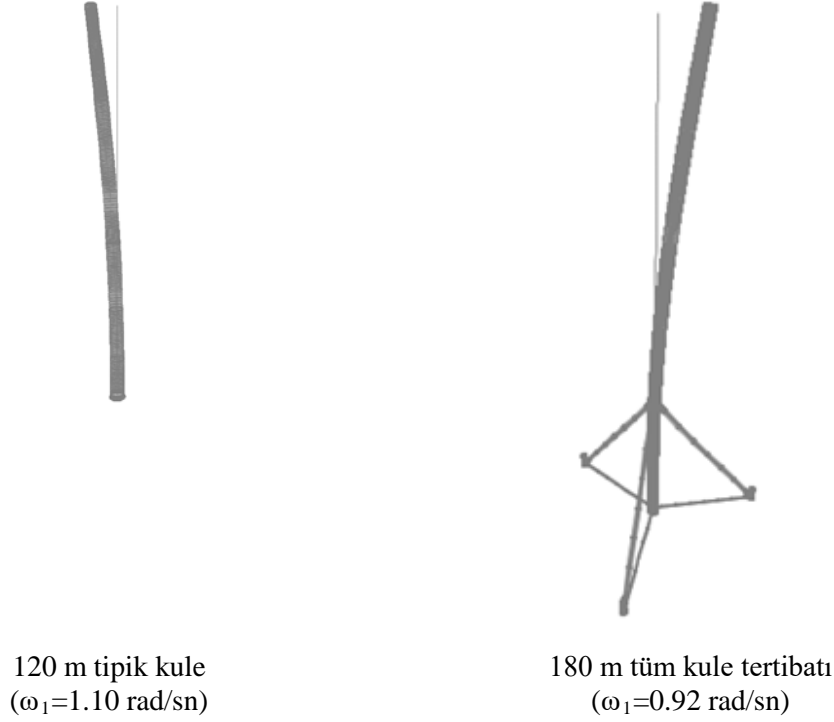


**Şekil 10.** Bir set kazık temel için eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları

Tripod rijitliğinin tüm yapının rijitliğine etkisinin incelenmesine yönelik ve rezonans doğrulaması için önemli ilk yaklaşım, tripodun üstündeki yapının alt seviyesinde tripodu temsil edebilecek yay tanımlaması olmuştur. Bu doğrultuda tripodun üst noktasına 100.000 kNm'ye eşit bir eğilme momenti uygulanmış ve bu noktadaki dönme hesaplanmıştır. Bu, Şekil 5'te tanımlanan üç yön için tekrarlanmış ve her durumda benzer şekilde, 0,0065 radyana değerinde dönmeye yol açmıştır. Karşılık gelen dönme yay rijitliği yaklaşık 15.300 MNm/rad olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan üst kule yapısının bir benzeri türbin kulesinin dönme yaylarının temel titreşim frekansı üzerindeki etkisini araştırdığı [3]'e atıfta bulunarak, yay kullanılarak tanımlanan temel modeli zeminin rijit tanımlanmasına göre doğal titreşim frekansı %15 daha az olduğunu hesap edilmiştir.

Temelin etkisini izole etmek için, zemin rijit (ankastre) şekilde modellenmiş olduğu durumda tepe noktasında 0,0064 rad'lık bir dönmeye neden olacak yük değerleri tekrar kullanıldığında, 0,0066 radyan'lık dönmeye neden olmuş ve böylece temel rijitliğinin, analizde kabul edilen zemin tipi için ihmal edilebilir bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Daha sonra, zemine rijit

şekilde sabitlendiğinde  $\omega_1=1.10$  rad/sn doğal frekansına sahip 120 m yüksekliğindeki silindirik şekilli üst yapı, tripodun üstünde modellenmiştir. Tripod mafsalları rijit varsayıldığında, tüm sistemin doğal frekansı 0.92 rad/sn'ye eşit olarak bulunur, bu da döner yay yaklaşımından çok uzak olmayan %16'lık bir azalmaya karşılık gelir. Belirli göbek (hub) yükseklikleri hedeflenen rüzgar türbinlerinde, tripod rijitliğini etkileyen iki ana parametre olan tripod yüksekliği ve yarıçapı uygun şekilde ayarlanarak istenen doğal yapı frekans değerleri elde edilebilir.



**Figure 11.** Temel titreşim periyotlarına karşılık gelen frekanslar

### 3.5. Ağırlık ve Maliyet Çalışması

Yukarıda tanımlanan kesit ve boyutlar için tripod parçalarının tahmini ağırlığı, üç üst bacak 210 t, üç alt bacak 35 t, dikey bacak 200 t ve üç köşe bağlantı parçası 35 t olarak hesaplanmış, flanşların da eklenmesi ile yaklaşık toplam ağırlığı 480 t değerine erişmiştir. Silindirik üst kule kısmı için yaklaşık 320 t ağırlık düşünüldüğünde, 180 m kule montajı için toplam çelik ağırlığı yaklaşık 800 t civarında olacaktır. Üst, alt ve köşe bacaklarının daha küçük çaplı elemanlarının, spiral kaynak gibi soğuk büküm dışında başka yöntemlerle üretilebileceği ve bunun birim fiyatta önemli tasarruflar sağlayacağı dikkate alınmalıdır.

Temel ile ilgili olarak, nispeten sert bir zeminde kabulüyle, toplam 6 adet, 1 m çapında ve 20 m uzunluğundaki kazık temeller ve temel başlığı için yaklaşık 160 m<sup>3</sup> beton kullanılacağı hesabıyla, yaklaşık temel maliyeti 50,000€ olacağı, geleneksel türbin temellerine göre bu uygulamanın temel maliyetini düşüreceği beklenmektedir.

180 m göbek yüksekliğine sahip rüzgar türbinlerinde üst yapı ile temelin kombine edilmiş modelin geleneksel silindirik çelik türbinler, betonarme veya hibrit kule çözümlerine göre 15%-40% maliyetlerde azalma beklenmektedir. Bu bulgular, önerilen konseptin, yüksek nominal güce sahip kara rüzgar türbinleri için daha yüksek hub yükseklikleri elde etmede rekabetçi bir çözüm sunabileceğini desteklemektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bir tripod destek yapısı çok büyük yüksekliğe sahip rüzgar türbin kuleleri için güvenlik ve işletme ile ilgili gerekli tüm kriterleri karşılayabilecek; uygun elemanlara ve birleşim detaylarına sahip, gerçekçi, modüler ve boyutlandırılabilir, aynı zamanda imalat, kara ve deniz taşımacılığı, montaj, bakım ve söküm kısıtlamalarına uygun bir çözüm olarak önerilmiştir. Ölçeklendirilebilirliği sayesinde bu konsept, mevcut rüzgar çiftliklerindeki mevcut kule ve türbin tasarımlarını değiştirmeden, daha yüksek mertebelerdeki rüzgar koşullarından yararlanarak, güç üretimini artırmak için de kullanılabilir.

Ayrıca, mevcut silindirik kuleler, çoğu durumda, uygulanan büyük eğilme momentlerini karşılamak için ağır bir betonarme radye temele sahiptir. Bunun aksine tripod destek yapısı, her bir tripod bacağının altında betonarme kazıklarla daha hafif ve daha uygun maliyetli bir temel çözümü sunmaktadır.

Yapılan ön yapısal çalışmalar, konseptin uygulanabilirliğini göstermiş ve gerekli kesit yeterliliklerini sağlamıştır. Önerilen konseptin tahmini maliyet analizleri, yüksek hub yüksekliklerine sahip türbin kule konfigürasyonlarıyla karşılaştırıldığında önerilen çözümün rekabetçi olduğunu göstermiştir.

#### REFERANSLAR

- [1] **European Commission**, (2020), *European Green Deal: 2030 Climate & Energy Framework*, [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en#tab-0-0](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en#tab-0-0) (accessed 26 June 2021).
- [2] **Veljkovic, M., Feldmann, M., Naumes, J., Pak, D., da Silva, L.S., Rebelo, C.**, (2011), *Wind Turbine Tower Design, Erection and Maintenance*, Editor(s): John D. Sørensen, Jens N. Sørensen, In Woodhead Publishing Series in Energy, Wind Energy Systems, Woodhead Publishing, p. 274-300.
- [3] **Koulatsou, K.G., Kazakis, G., Gantes, C.J., Lagaros, N.D.**, (2020), *Resonance Investigation and its Effects on Weight Optimization of Tubular Steel Wind Turbine Towers*, Procedia Manufacturing, Vol. 44, p. 4-11.
- [4] **European Committee of Standardization**, (2007), *EN1993-1-6:2007, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.6: Strength and Stability of Shell Structures*.
- [5] **European Committee of Standardization**, (2015), *EN1993-1-6:2007/A1:2015, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.6: Strength and Stability of Shell Structures – Corrigendum*.
- [6] **European Committee of Standardization**, (2005), *EN1993-1-9:2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.9: Fatigue*.
- [7] **International Electrotechnical Commission**, (2005), *IEC61400-1:2005, Wind Turbines – Part 1: Design Requirements*, 3<sup>rd</sup> edition.
- [8] **Germanischer Lloyd**, (2010), *Guideline for the Certification of Wind Turbines*.
- [9] **Det Norske Veritas (DNV)**, (2002), *Guidelines for Design of Wind Turbines*, Wind Energy Department, Risø National Laboratory.
- [10] **Wang, X., Zeng, X., Li, J., Yang, X., & Wang, H.**, (2018), *A Review on Recent Advancements of Substructures for Offshore Wind Turbines*, Energy Conversion and Management, Vol. 158, p. 103-119.
- [11] **Hu, Y., Yang, J., Baniotopoulos, C., Wang, X., & Deng, X.**, (2020), *Dynamic Analysis of Offshore Steel Wind Turbine Towers Subjected to Wind, Wave and Current Loading during Construction*, Ocean Engineering, Vol. 216, 108084.
- [12] **Jiang, Z.**, (2021), *Installation of Offshore Wind Turbines: A Technical Review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 139, 110576.

- [13] **Yeter, B., Garbatov, Y., & Soares, C. G.**, (2015), *Fatigue Damage Assessment of Fixed Offshore Wind Turbine Tripod Support Structures*, Engineering Structures, Vol. 101, p. 518-528.
- [14] **Hao, E., & Liu, C.**, (2017), *Evaluation and Comparison of Anti-impact Performance to Offshore Wind Turbine Foundations: Monopile, Tripod, and Jacket*, Ocean Engineering, Vol. 130, p. 218-227.
- [15] **Ma, H., Yang, J., & Chen, L.**, (2018), *Effect of Scour on the Structural Response of an Offshore Wind Turbine Supported on Tripod Foundation*, Applied Ocean Research, Vol. 73, p. 179-189.
- [16] **Arcigni, F., Abhinav, K. A., Collu, M., & Venturini, M.**, (2021), *Analysis of Tripod Supported Offshore Wind Turbines under Conditions of Marine Growth*, Ocean Engineering, Vol. 220, 108441.
- [17] **Wind-turbine-models.com - The Big Portal for Wind Energy**, (2021), *Multibrid M5000*, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/22-multibrid-m5000> (accessed 26 June 2021).
- [18] **Canadian Patent Application CA 2 759 979 A1**, (2012), *Wind Turbine Tower Assembly and Method for Assembling the Same*.
- [19] **European Patent Application EP 2 444 663 A2**, (2012), *Onshore Wind Turbine with Tower Support System*.
- [20] **International Patent Application WO 2011/147477 A1**, 2011, *A Support Structure for a Wind Turbine*.
- [21] **PCT Application No. PCT/TR2020/051117**, *A Multi-Pod Support Structure for a Wind Turbine Tower*, Unpublished.