



Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Türbinleri Grup Kazıklı Jacket Temel Sistemi Nihai Yük Taşıma Kapasitesi

Ultimate Load Capacity of Group-Pile Supported Jacket Foundations for Offshore Wind Energy Converters

Cihan Taylan Akdağ^{1*}

¹ Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34820, İstanbul, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: akdag@tau.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 20.07.2018

Kabul Tarihi / Accepted: 28.12.2018

Atıf şekli/How to cite: AKDAĞ, C. T. (2019). Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Türbinleri Grup Kazıklı Jacket Temel Sistemi Nihai Yük Taşıma Kapasitesi. DEUFMD, 21(62), 345-355.

DOI:10.21205/deufmd.2019216203

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada derin sularda (~35-40m) uygulanabilecek yüksek güç kapasiteli (~5-7 MW) rüzgar enerjisi türbinleri için önerilen yenilikçi jacket temel sisteminin davranışı nihai yatay taşıma kapasitesi açısından incelenmiştir. Tek kazıklı standart jacket ile yakın mesafeli çift kazıklı yenilikçi jacket temel sistemleri için yatay yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Yatay yük kapasitesi tahmini için hiperbolik yöntem kullanılmıştır. İnceleme suya doygun çok sıkı kum zemin ortamında ve statik kombine yükleme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Araştırma üç boyutlu sayısal analiz yöntemine dayanmaktadır. Sonlu elemanlar modelinin doğrulaması literatürde yer alan arazi deney sonuçları ile gerçekleştirilmiştir. Parametrik analiz yöntemi ile kazık uzunluğu ve kazıklar arası mesafenin yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar toplamda aynı kazık uzunluğuna sahip temel sistemi durumunda dahi çift kazık kullanımının jacket temel sisteminin deplasman birikimini önemli ölçüde azalttığını ve yatay yük taşıma kapasitesini önemli derecede arttırdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Nihai yük kapasitesi, Yatay yük, Açık deniz rüzgar enerjisi, Jacket temel, Sonlu elemanlar yöntemi, Hiperbolik metot

Abstract

This study was performed to investigate the ultimate horizontal load capacity of an innovative foundation system for large offshore wind power farms (i.e. ~5-7 MW) to be constructed in deep waters, ~35-40 m. The ultimate capacity of the standart jacket foundation system with single piles and double-pile supported novel jacket foundation system were estimated using hyperbolic method. Numerical method was used to evaluate the response of the foundations under combined loading in saturated very dense sand. The validation of the developed finite element model for two cases was made using the results of field tests in the literature. The effect of pile length and pile spacing on the ultimate capacity were determined by parametric analysis. The results indicate that the jacket foundation with closely spaced piles provides higher ultimate load capacity and shows a significantly better response than the response of a single-pile configuration with embedded length L, although the total length of the piles is same.

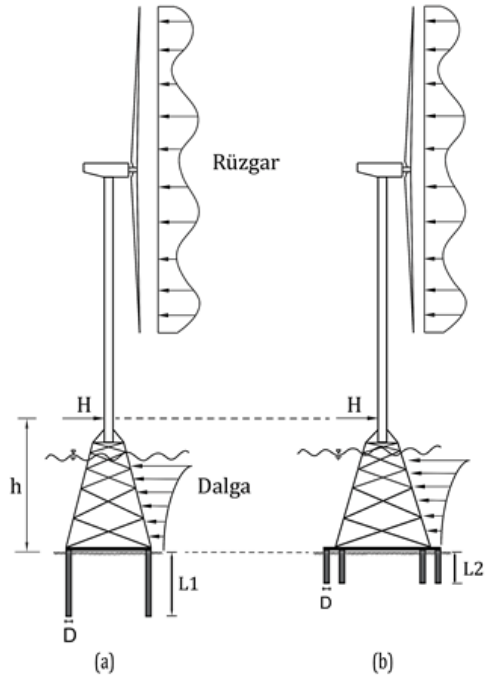
Keywords: Ultimate bearing capacity, Lateral load, Offshore wind energy converters, Jacket foundation, Numerical method, Hyperbolic method

1. Giriş

Açık deniz rüzgar enerjisi üretiminde gelinen aşamada özellikle deniz taban derinliği 25m nin üzerinde olan derin sularda yüksek güç kapasiteli (~5-7 MW) rüzgar enerjisi çiftliklerinin kurulmasına yönelik plan, tasarım ve çalışmaların yoğunluk kazandığı görülmektedir. Kıyıdan uzaklaşıp derin sulara doğru ilerledikçe rüzgar ve dalga yüklerini belirleyen çevre koşulları ağırlaşmaktadır. Örneğin Kuzey Denizi'nde 30 m lik derinliğe konumlandırılmış FINO 1 ölçüm direğinden elde edilen veriler hakim dalga yüksekliğinin 1,5-2,5m arasında değiştiğini gösterse de Kasım 2006, Kasım 2007 ve Ekim 2009'da yapılan ölçümlerde 6,40-10,5m boyutunda yüksek dalga genlikleri ölçülmüştür. Platformun kendisi dahi 9 Kasım 2007 de gerçekleşen 10,5 m lik dalga yüksekliğinde hasara uğramıştır [1,2]. Toplam kapasite ile dünyada açık deniz rüzgar enerjisi kapsamında en yüksek üretimin yapıldığı Avrupa denizlerinde 2016 yılında 12,5 GW olan kapasitenin 2020 yılında 44 GW kapasiteye çıkarılması hedeflenmektedir [1]. Türkiye denizlerinde sürmekte olan alan çalışmalarında ise sabit temel sistemleri ile inşaa edilebilecek açık deniz rüzgar enerjisi türbinleri için uygun olabilecek alanlara ait deniz seviyesi derinlikleri 35-60m aralığında değişmektedir. Bugüne kadar bir çok projede 25m derinliğe kadar olan deniz taban seviyesi derinlikleri için genel olarak ağırlık, tekil kazık ve tekil kova temel sistemleri uygulanmıştır. Daha derin sularda (25-50m) özellikle üçayak (tripod) ve dört ayaklı jacket temel sistemleri uygun bulunmaktadır [3,4]. Elbette su derinliğinin artışı ile türbin temelini etkileyen rüzgar ve dalga yükü önemli ölçüde artmaktadır. Söz konusu ağır yüklere karşı dayanımı yüksek yenilikçi temel sistemi tasarımına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu anlamda özellikle son on yıldır derin sularda inşaa edilecek yüksek kapasiteli türbin temelleri için çok ayaklı kazıklı veya kova temelli jacket temel sistemlerin davranışı ve taşıma kapasitesinin incelendiği araştırmalar yapılmıştır [5,6]. Hung vd. [5] tarafından yapılan çalışmada üçayak kova temel sisteminin statik yükleme altında ve killi zemin ortamındaki davranışı grup etkisi dikkate alınarak sayısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Kova temeller arasındaki mesafenin ve temel derinliğinin nihai taşıma kapasitesi üzerinde oldukça etkili olduğu araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Tran vd. [6] tarafından gerçekleştirilen sayısal analiz

temelli çalışmada kum zemine sabitlenecek üçayak kova temel sisteminin monotonik yükleme altında nihai moment ve yatay yük taşıma kapasitesi üzerine odaklanılmıştır. Araştırma neticesinde grup kova temel aralığı, temel derinliği ve çapı, eksenel yükleme ve zemin birim hacim ağırlığına bağlı taşıma kapasitesi formülleri önerilmiştir.

Mevcut çalışma kapsamında çok ayaklı temel sistemi tasarımına dayanan yakın mesafeli grup kazıklı tasarım dikkate alınarak derin sularda inşaa edilecek yüksek güç kapasiteli (~5-7 MW) açık deniz rüzgar enerjisi türbinleri için yenilikçi temel sistemi önerisi geliştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Jacket temel sistemi ile tasarlanmış açık deniz rüzgar enerjisi türbini (a) Standart temel sistemi ($L=12.5D$) (b) Çift kazıklı temel sistemi ($L=6.25D$, $S=3D$)

Tekil kazıktan oluşan standart jacket temel sistemi ve çift grup kazıklı yenilikçi sistemin davranışı kombine yükler altında ve çok sıkı suya doymuş kum zemin koşullarında üç boyutlu sayısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonuçları elde edilen kazık başı yük-deplasman eğrileri kullanılarak hiperbolik yöntemin uygulanması ile temel sistemlerinin nihai taşıma kapasitesi tahmini gerçekleştirilmiştir. Hiperbolik yöntem kazık

başı dönme ve kazık başı deplasman limiti veya kazık çapının belli bir katsayı ile çarpılması gibi limit değerlere dayanmayan aksine kazık başı yük-deplasman ilişkisine dayanan bir yöntemdir. Sıkı kum zeminler bilindiği üzere yüksek deplasman değerlerinde pekleşme davranışı göstermektedir. Bu anlamda sıkı kum zemin koşullarında uygulanan kazıklı temel sistemin nihai taşıma kapasitesinin tahmini için yük-deplasman eğrisini bütünüyle ele alan bir yöntem olması açısından uygun bir yöntem olduğu düşünülmüştür. Çalışmada kazık uzunluğunun ve kazıklar arası mesafenin nihai yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Tekil kazıktan oluşan standart jacket temel sistemi ve çift kazıklı tasarımla geliştirilen yenilikçi temel sisteminin yatay yük taşıma kapasitesi kombine yükler altında ve çok sıkı suya doygun kum zemin koşullarında üç boyutlu sayısal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Kazıklı jacket temel-zemin sistemi Plaxis 3D [7] üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanan yazılım ile modellenmiştir.

2.1. Sonlu elemanlar modeli

Zemin düşük birim deformasyonlarda gerçekleşen rijitlik değişiminin de dikkate alındığı pekleşmiş zemin malzeme modeli (The Hardening Soil model with small-strain stiffness: HSSMALL) kullanılarak modellenmiştir [8]. Bu model pekleşmiş zemin modeli olan HS zemin modelinin geliştirilmesi ile oluşturulmuştur. Model zeminin sayısal modelleme yöntemi ile tanımlanmasında gelişkin bir özelliğe sahiptir. HS modelinde yük-birim deformasyon arasındaki ilişki doğrusal değil hiperbolik olarak tanımlanmıştır. HSSMALL modelinde ise küçük birim deformasyonlardaki rijitlik azalması da dikkate alınarak modelin özellikleri artırılmıştır. HSSMALL modelinin küçük birim deformasyon rijitliği ve doğrusal olmayan davranışın birim deformasyon üzerindeki etkisini dikkate alması nedeniyle mevcut araştırmanın amacına uygun olduğuna karar verilmiştir.

Sonlu elemanlar modeli doğrulaması için Mustang Adası'nda gerçekleştirilen arazi deneyleri ve belirlenen zemin özellikleri dikkate alınmıştır [9]. Zemin özelliklerini tanımlayan aynı değerler modelde kullanılmıştır. Bu anlamda modelde suya doygun çok sıkı kum zeminin efektif birim

hacim ağırlığı ve efektif içsel sürtünme açısı sırasıyla $\gamma' = 10,37 \text{ kN/m}^3$, $\phi' = 39^\circ$ olarak uygulanmıştır.

Boru tipi çelik kazık temel elastisite modülü $E = 2,1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ve Poisson oranı $\nu = 0,2$ malzeme özelliklerinde modellenmiştir. Kazık çapı ve kazık et kalınlığı sırasıyla $D=2\text{m}$, $t_{kazık} = 0,05\text{m}$ olarak tasarlanmıştır. Temel-zemin yüzeyi "surface-to-surface" kontak elemanları ile tanımlanmıştır. Kontak arayüz faktörü (R_{inter}) modelde kontak elemanları sürtünme açısı (δ) ile tanımlanmış olup içsel sürtünme açısının (ϕ') $2/3$ 'ü şeklinde kabul edilmiştir. Dolayısıyla modelde arayüz faktörü $R_{inter} = 0,67$ olarak tanımlanmıştır (Tablo 1). Türbin kulesi ile kazıklar arasında yer alan jacket yapının temel ile birleşimi rijit birleşim olarak kabul edilmiş olup bir yaklaşım olarak rijit bir plaka ile modellenmiştir.

Tekil kazıklı standart jacket ve çift kazıklı yenilikçi jacket temel sistemleri için parametrik analizler, D kazık çapı, L kazık uzunluğu olmak üzere $L= 6.25D, 8D, 10D, 12.5D$ ve $D=2 \text{ m}$ sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Çift kazıklı jacket temel sistemi için parametrik analiz, S merkezden merkeze kazık mesafesini ifade etmek üzere $S: 3D, 4D, 5D, 6D$ durumları için gerçekleştirilmiştir. Çift kazıklı sistemde kazıklar x ve y yönünde temel simetrisini korumak amacı ile diyagonal olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3). Ön analizler gerçekleştirilerek model ağ incelik duyarlılığı en düşük seviyeye çekilmiş ve model boyutları yüklem esnasında model sınırlarında herhangi bir etkinin oluşmayacağı yeterli genişlikte tasarlanmıştır (Şekil 4). Şekil 4'den görülebileceği üzere özellikle kazık yakın çevresinde daha sıkı ağ oluşturabilmek ve ağ eleman boyutlarını kontrol edebilmek amacı ile model mekanik olarak etki oluşturmayacak hacimlere bölünmüştür. Bu amaçla her iki sistemde kazık dış yüzeyinden 2D mesafesinde kenarları yüzey elemanlarla tanımlanan prizmatik geometriler oluşturulmuştur.

Parametrik analiz öncesi her iki durum için nümerik model doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla literatürde yer alan arazi deneyleri sonuçları kullanılmıştır. Tekil kazıklı standart jacket temel sistemi için Mustang Adası arazi tekil kazık deneyinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur [9]. Çalışmanın parametrik analizler bölümünde oluşturulan zemin modelinde Mustang Adası arazi deneyinin gerçekleştirildiği suya doygun

çok sıkı kum zemin özellikleri ve elde edilen geri analiz parametreleri kullanılmıştır (Tablo 1.). Yakın mesafeli grup kazıklı durum için Hollingside Lane'de gerçekleştirilen geniş ölçekli kazıklar arası mesafenin S: 3D olduğu arazi deneyinin modeli kurulmuştur [10]. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen kazık başı yük-deplasman eğrilerinin arazi deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu saptanmıştır [11]. Böylelikle parametrik analizde kullanılan sonlu elemanlar modelinin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin doğrulaması ile ilgili ayrıntılı bilgilere yazarın grup kazıklı jacket temel sisteminin davranışını ele aldığı makalesinden ulaşılabilir [11].

Sonlu elemanlar analizleri eksenel, yatay ve moment yükleri (V, H, M) olmak üzere kombine

yükler altında gerçekleştirilmiştir. Tipik bir türbin ağırlığı dikkate alınarak kazıklara toplamda $V=10$ MN büyüklüğünde eksenel yük aktarılmıştır. Dalga ve rüzgar yükünü oluşturan yatay yük $H=8$ MN büyüklüğünde ve etki seviyesi deniz taban derinliğinden $h=50$ m yükseklikte uygulanmıştır. Yatay yük etki derinliğinden meydana gelen $M=Hxh$ moment yükü modelde üst plakanın her iki kenarından kuvvet çifti (V_1, V_2) uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). V_1 ve V_2 yükleri temel sistemine etkiyen moment yükünü uygulamak amacı ile ters yönde etki ettirilmiştir. Üst yapının ağırlığını ifade eden eksenel yük (V), dalga ve rüzgar yükünü ifade eden yatay yük (H) modelde plaka orta noktasından uygulanmıştır (Şekil 4).

Tablo 1. Sonlu elemanlar modeli zemin parametreleri

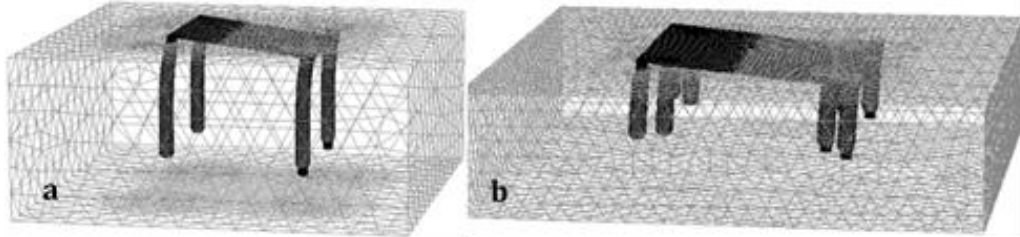
Parametre	Kum
Poisson oranı, ν	0,20 [-]
Rijitlik faktörü, m	0,50
Genleşme açısı, ψ	9,0°
Kohezyon, c'	0,1 kN/m ²
Başlangıç boşluk oranı, e_{init}	0,4[-]
Standart drenajlı üç eksenli deneyi etkin (sekant) rijitliği E_{50}^{ref}	8,0x10 ⁴ kN/m ²
Konsolidasyon ön yükleme tanjant rijitliği, E_{oed}^{ref}	5,3x10 ⁴ kN/m ²
Geri/tekrar yükleme rijitliği, E_{ur}^{ref}	2,4x10 ⁵ kN/m ²
Çok düşük birim deformasyonlardaki referans kayma modülü, G_o^{ref}	1,55x10 ⁵ kN/m ²
Kayma birim deformasyonu, $G_s=0.722G_o, Y_{0.7}$	0,1x10 ⁻³ [-]
Göçme oranı, R_f	0,90 [-]
Arayüz faktörü, R_{inter}	0,67[-]

3.1. Referans Sistem Analiz Sonuçları ve Nihai Yatay Yük Taşıma Kapasitesi

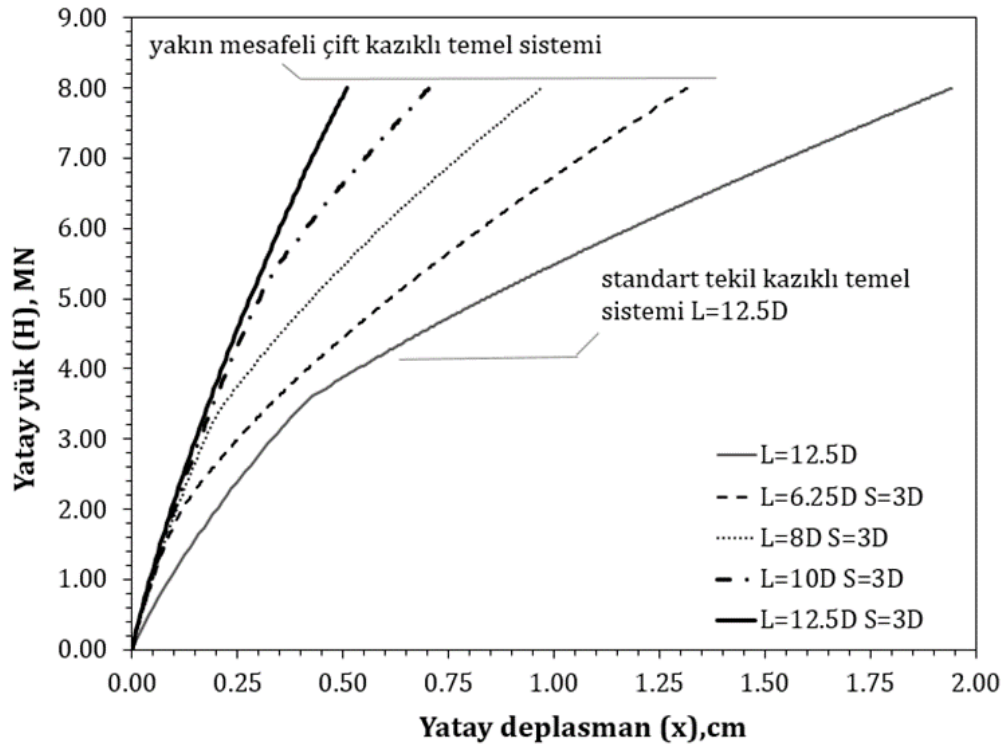
Bu bölümde temel sistemi nihai yatay yük taşıma kapasitesi belirleme yöntemi ve parametrik analiz sonuçları referans sistemler üzerinde irdelenmiştir. Tek kazıklı standart jacket için $L=12.5D$ uzunluğundaki temel sistemi, çift kazıklı sistem için ise $L=6.25D, 8D, 10D, 12.5D$ kazık uzunluğu ve $S=3D$ kazık aralığındaki temel sistemleri referans olarak seçilmişlerdir. Analizler sonucu elde edilen deforme olmuş sistem görüntüsü büyük ölçekli olarak Şekil 5'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere sistemde yatay deplasman oluşurken kombine yük nedeniyle dönme de meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında sadece yatay deplasman kapasitesine odaklanılmıştır. Bu anlamda analiz sonucu elde edilen temel sistemlerinin yatay yük-deplasman eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur. Yatay deplasman değerleri Şekil 4'de A noktası olarak belirtilmiş olan model üst plakası orta noktasından edinilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere çift kazıklı yenilikçi temel sisteminde gelişen deplasman değerleri tüm yatay yük değerlerinde standart tekil kazıklı

sisteme göre daha düşük elde edilmiştir. Dikkat edilmelidir ki toplam kazık uzunluğu eşit olmasına rağmen $L=6.25D$; $S=3D$ çift kazıklı temel sisteminin deplasmanı $L=12.5D$ kazık uzunluğuna sahip tek kazıklı sistemin deplasmanından tüm yatay yük seviyelerinde daha düşük gerçekleşmiştir.

Nihai yatay yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi ile ilgili literatürde kazık çapına, kazık başı dönme değerine, kazık başı deplasmanına bağlı çok çeşitli yaklaşımlar mevcuttur (12-15). Ayrıca doğrudan kazık başı yük-deplasman eğrilerine dayanan yaklaşımlar da geliştirilmiştir (16,17,18). Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen ve Şekil 6'da sunulan yük-deplasman eğrileri göstermektedir ki belli bir yatay yük seviyesinden sonra kum zeminde pekleşme davranışı gerçekleşmiş ve analiz sonucu elde edilen grafik aracılığı ile zeminde yenilme durumu doğrudan saptanamamıştır. Bu anlamda nihai yatay yük taşıma kapasitesini saptamak için yük-deplasman eğrisine dayanan x : deplasmanı ve H : yatay yükü fade etmek üzere $x/H-x$ ilişkisi ile tanımlanan hiperbolik yaklaşım metodu kullanılmıştır (18).



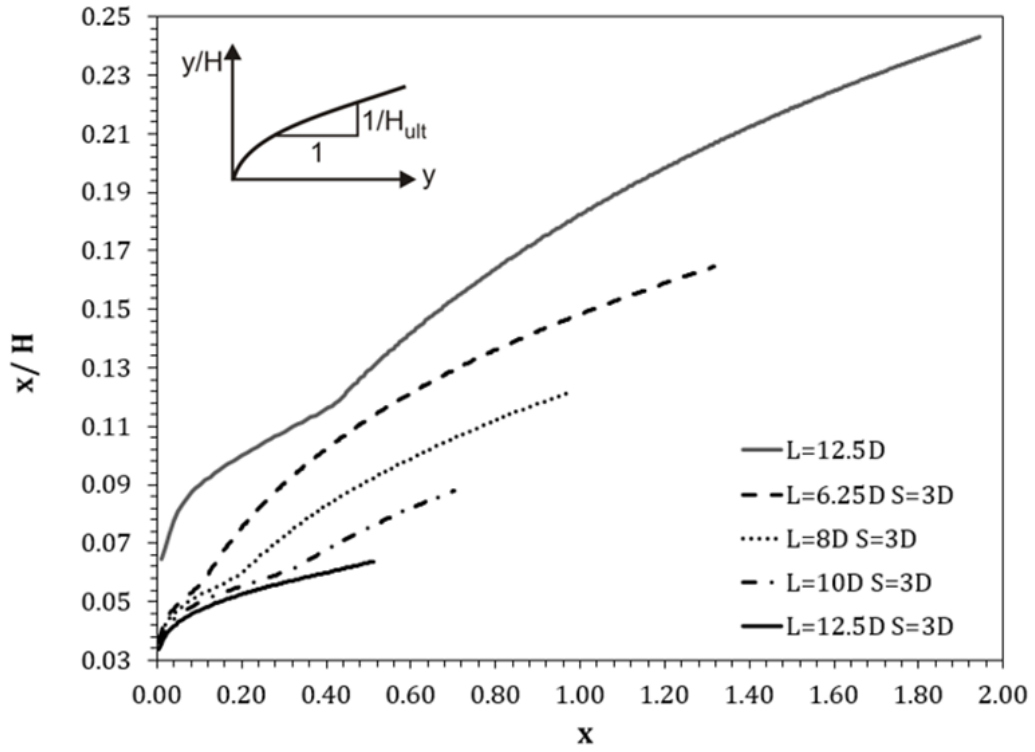
Şekil 5. Analiz sonucu örnek deforme olmuş sistem görüntüsü (a) $L=12.5D$ (b) $L=6.25D$; $S=3D$



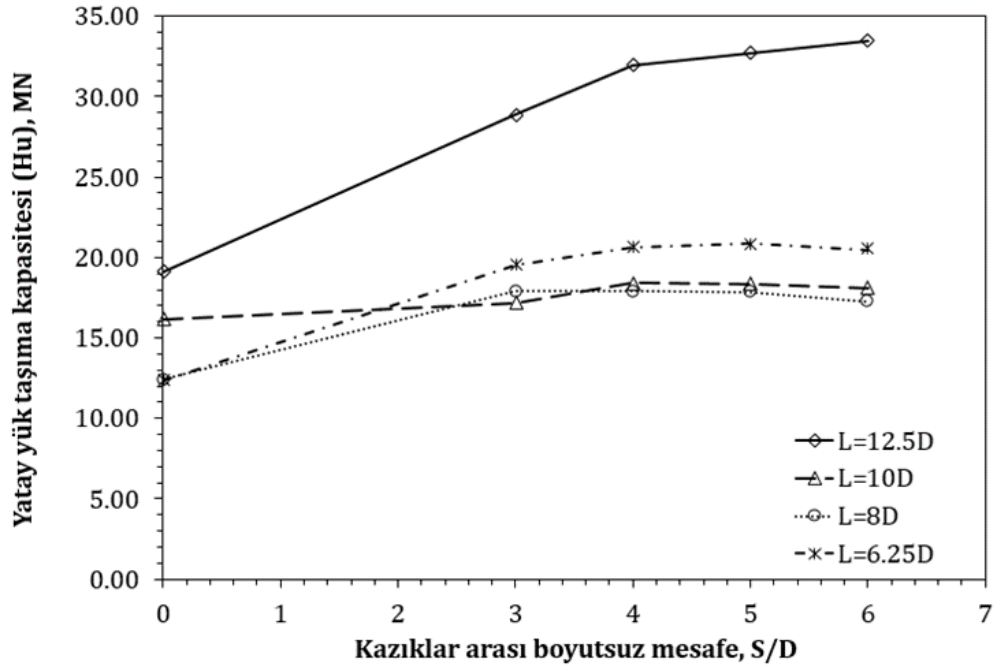
Şekil 6. Referans jacket temel sistemleri yatay yük-deplasman grafiği

Söz konusu yöntem Achmus vd. [19] tarafından gerçekleştirilen çalışmada tekil kazıklı açık deniz rüzgar enerjisi türbinlerinin nihai yatay yük taşıma kapasitesini elde etmek için de kullanılmıştır. Bunun yanı sıra yöntem Achmus vd. [20] tarafından revize edilerek statik kombine yüke maruz kalan açık deniz rüzgar enerjisi için görece yeni bir temel sistemi olan kova temellerin yatay yük taşıma kapasitesinin tahmininde de kullanılmıştır. Hiperbolik metot ile nihai yatay yük taşıma kapasitesinin (H_u) elde edilme yöntemi Şekil 7'de üst sol köşede sunulan grafik ile gösterilmiştir.

Grafikte gösterildiği üzere $y-y/H$ eğrisinin veya bu çalışmada tanımlanan $x-x/H$ eğrisinin doğrusal olan kısmının eğiminden yararlanılarak nihai yatay yük kapasitesi (H_u) tahmin edilebilmektedir. Hiperbolik yöntemin kullanılması ile elde edilen eğriler Şekil 7'de sunulmuştur. Yöntem ile elde edilen eğrilerin doğrusal olan bölümleri kullanılarak temel sistemlerinin nihai yatay yük taşıma kapasiteleri saptanmıştır (Şekil 8).



Şekil 7. Temel sistemi yatay yük taşıma kapasitesi tahmini: hiperbolik yöntem



Şekil 8. Temel yatay yük taşıma kapasitesi- kazıklar arası boyutsuz mesafe ilişkisi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında derin sularda inşaa edilecek açık deniz rüzgar enerjisi türbinleri için önerilen yenilikçi çift kazıklı jacket temel sistemin nihai yatay yük taşıma kapasitesi üzerine araştırma yapılmış olup kazık uzunluğu ve kazık mesafesinin yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Değerlendirme ve sonuçları aktarmadan önce çalışma açısından önemli birkaç vurgunun yapılmasına ihtiyaç vardır. Açık deniz rüzgar enerjisi türbin temel sistemleri dalga ve rüzgar yatay yükleri (H) ve bu yüklerin deniz seviyesinden belli bir yükseklikte etki etmesi ile meydana gelen moment yükleri (M) ve türbin toplam ağırlığından kaynaklanan eksenel yüklerin (V) birleşimi olan kombine yüklere maruz kalırlar. Jacket temel sistemi genel anlamda H, M, V kombine yüklerine maruz kalıyor olsa da sistemdeki her bir kazık başına aktarılan yükün karakteri farklıdır. Kazıklı jacket temel sistemlerinde belli bir yükseklikten türbine etki eden yatay yük nedeniyle oluşan moment yükü kazıklara çekme ve basınç eksenel yük olarak transfer edilir. Yatay yükün yönüne göre temel sisteminin bir tarafında basınç kazıkları, diğer tarafında çekme kazıkları oluşur. Sistemdeki her bir kazık, kazık başından net eksenel yük ve yatay yükten oluşan (V, H) kombine yüke maruz kalır. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında sadece yatay yüke maruz kalan değil, yapının özelliğinden kaynaklanan kombine yükleme (V,H) altındaki kazıkların yatay yük kapasitesi de incelenmiştir. Akdağ [11] ve Akdağ [20] tarafından sunulan çalışmalarda bu araştırmaya temel olan parametrik analiz sonuçlarının farklı boyutları ele alınmıştır. İlgili çalışmalarda elde edilen kazık boyunca zemin direnci verileri göstermektedir ki temel sisteminin L=12.5D uzunluğundaki kazıklar ile tasarlanması durumunda kazıklar uzun kazık davranışı göstermiştir [11, 21]. Bunun yanı sıra L= 6.25D, 8D, 10D uzunluğundaki kazıklar ile tasarlanan temellerde kazıklar kısa kazık davranışı göstermiştir. Bu ön bilgiden sonra çalışmanın temel sonuçları özellikle Şekil 8' de sunulan grafik temel alınarak aşağıdaki paragraflarda sıralanmıştır.

Sonuçlar göstermektedir ki kazık uzunluğunun tek kazıklı standart jacket temel yatay yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Kazık uzunluğunun L=6.25D ve L=8D olduğu tek kazıklı jacket temel sistemlerinin yük taşıma kapasiteleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Diğer durumlarda kazık uzunluğu arttıkça yatay yük taşıma kapasitesinde önemli derecede artış gerçekleşmiştir. L=12.5D kazık uzunluğuna sahip tek kazıklı sistemin yatay yük taşıma kapasitesi uzunluğu L=6.25D olan tek kazıklı sisteminkinden %50 oranında yüksek elde edilmiştir.

Jacket temel sisteminde çift kazık kullanımının yatay yük taşıma kapasitesini genel anlamda önemli derecede arttırdığı görülmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki kazık mesafesinin S=3D olduğu çift kazıklı sistemlerin yatay yük taşıma kapasitesi genel olarak aynı kazık uzunluğuna sahip tek kazıklı sisteminkinden önemli derecede yüksektir. İstisnai olarak L=10D kazık uzunluğuna sahip temel sisteminde S=3D çift kazıklı sistemin tek kazıklı sisteme göre yük taşıma kapasitesindeki artış oldukça düşük seviyededir.

Çift kazıklı sistemlerde S=4D kazıklar arası mesafeye sahip temel sistemlerinin taşıma kapasitesinin S=3D durumuna göre küçük bir artış gösterdiği ve ardından S=4D, 5D ve 6D durumlarının kısa kazıklı sistemlerde birbirine yakın değerlerde elde edildiği görülmektedir. Uzun kazıklı L=12.5D temel sisteminde ise S=4D, 5D, 6D durumlarında kazıklar arası mesafe arttıkça nihai yatay yük taşıma kapasitesinin düşük bir eğimle arttığı saptanmıştır. Sonuç olarak kazıklar arası mesafenin çift ve kısa kazıklı jacket temel sisteminin nihai yatay yük taşıma kapasitesi üzerinde gözardı edilecek kadar düşük bir etkisinin olduğu saptanmıştır.

Burada ilginç olan bir diğer bulgu ise çift kazıklı sistemlerde en kısa kazık uzunluğuna sahip (L=6.25D) temel sisteminin yatay yük taşıma kapasitesinin L=8D ve L=10D uzunluğuna sahip temel sistemlerinin taşıma kapasitesilerine göre %10-15 aralığında daha yüksek elde edilmiş olmasıdır.

Çalışmanın önemli sonuçlarından biri ise toplam kazık uzunluğunun eşit olduğu L=6.25 D; S=3D çift kazıklı temel sistemi ile

L=12.5D kazık uzunluğuna sahip tek kazıklı sistemin yatay yük taşıma kapasitesinin birbirine oldukça yakın elde edilmiş olmasıdır. S= 4D, 5D, 6D durumlarında ise kısa ve çift kazıklı sistemin (L=6.25D) yatay yük taşıma kapasitesinin tek kazıklı standart temel sisteminin (L=12.5D) yatay yük taşıma kapasitesinden ortalama olarak %8 oranında daha yüksek elde edilmiş olmasıdır.

Sonuçlar çift kazıklı temel tasarımı ile oluşturulan yenilikçi temel sisteminin deplasman birikimi anlamında davranışı oldukça iyileştirdiğini ve nihai yatay yük taşıma kapasitesini önemli derecede arttırdığını göstermektedir. Takip eden çalışmalarda geniş ölçekli laboratuvar deney çalışmaları ile grup kazıklı jacket temel sistemin yatay yük taşıma kapasitesinin saptanarak bu çalışmada kullanılan hiperbolik yöntemin uygunluğunun test edilmesine ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra ilerleyen çalışmalarda önerilen temel sisteminin tekrarlı yükler ve dinamik yükler altındaki davranışının geniş ölçekli deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca gerçekte yatay olarak etki eden rüzgar ve dalga yükünün türbine farklı zamanlarda farklı yönlerde etki etmesi nedeniyle yatay yük yönünün temel davranışı üzerindeki etkisinin inceleneceği çalışmalar planlanmaktadır.

Teşekkür

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne çalışmanın gerçekleştirildiği sonlu elemanlar programını sağlamış olması nedeniyle teşekkür ediyorum.

Kaynakça

- [1] Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) 2017. Windenergie Report Deutschland 2016. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 120s.
- [2] <https://www.fino1.de/en/location-sea-floor-waves-wind> (Erişim Tarihi: 19.11.2018)
- [3] Bhattacharya, S., Nikitas, N., Garnsey, J., Alexander, N.A., Cox, J., Lombardi, D. 2013. Observed Dynamic Soil-Structure Interaction in Scale Testing of Offshore Wind Turbine Foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Cilt. 54, s. 47-60. DOI: 10.1016/j.soildyn.2013.07.012
- [4] Frederiksen, H. 2008. Offshore Foundations for Windfarms. Project Report National University of Singapore, Singapore, 37s.
- [5] Hung, L.C., Kim, S-R. 2014. Evaluation of Combined Horizontal-Moment Bearing Capacities of Tripod Bucket Foundations in Undrained Clay, Ocean Engineering, Cilt. 85, s. 100-109. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.04.025
- [6] Tran, N.X., Hung L.C., Kim S-R. 2017. Evaluation of Horizontal and Moment Bearing Capacities of Tripod Bucket Foundations in Sand, Ocean Engineering, Cilt. 140, s. 209-221. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.05.012
- [7] Brinkgreve R.B.J., Engin E., Swolfs W.M. (Editörler) 2013. Plaxis 3D User's Manuel, Plaxis bv Delft, 46s.
- [8] Benz, T. 2007. Small Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences. Stuttgart Üniversitesi, Geoteknik Enstitüsü, Doktora Tezi, 179s, Stuttgart.
- [9] Reese, L.C., Cox, W.R., Koop F.D. 1974. Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. Proceedings of the Offshore Technology Conference, 6-8 Mayıs, Texas, 95-105.
- [10] Arta, M.R. 1992. The behavior of laterally loaded two-pile groups. Durham Üniversitesi, Fen Fakültesi, Doktora Tezi, 378s, Durham.
- [11] Akdag, C.T. 2016. Behavior of Closely Spaced Double-Pile-Supported Jacket Foundations for Offshore Wind Energy Converters under Monotonic Loading, Applied Ocean Research, Cilt. 58, s. 164-177. DOI: 10.1016/j.apor.2016.04.008
- [12] Lee, H. H., Sun, Y. L. 1994. Yielding Load and Effective Length of Laterally Loaded Vertical Pile, Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Cilt. 6, s. 161-167.
- [13] Briaud, J. L. 1997. SALLP: Simple Approach for Lateral Loads on Piles, Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE, Cilt. 123, s. 958-964. DOI:10.1061/(ASCE)10900241(1997)123:10(958)
- [14] Meyerhof, G. G., Sastry, V. V. R. N., Yalcin, A. S. 1988. Lateral Resistance and Deflection of Flexible Piles, Canadian Geotechnical Journal, Cilt. 25, s. 511-522. DOI: 10.1139/t88-056
- [15] Gleser, S. 1984. Generalized Behavior of Laterally Loaded Vertical Piles, ss 239-243. Langer, J.A., Mosley, E.T., Thompson, C.D., ed. 1984. Laterally Loaded Deep Foundations: Analysis and Performance, ASTM Special Publications, 251s.
- [16] Slack, D. C., Walker, J. N. 1970. Deflections of Shallow Pier Foundations, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Cilt. 96, s. 1143-1157.
- [17] Villalobos FA, Byrne BW, Houlby GT. 2005. Moment loading of caissons installed in saturated sand. In: Proceedings of international symposium on frontiers in Geotechnics, ISFOG. University of Western, 19-21 Eylül, Perth, 411-16.
- [18] Manoliu I, Dimitriu DV, Radulescu N, Dobrecu GH. 1985. Load-deformation Characteristics of Drilled Piers. Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12-16 Ağustos, San Francisco, 1553-1558.

- [19] Achmus M., Kuo Y-S., Abdel-Rahman K. 2009. Behavior of Monopile Foundations under Cyclic Lateral Load, *Computers and Geotechnics*, Cilt. 36, s. 725-735. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.12.003
- [20] Achmus M., Akdag C.T., Thieken K. 2013. Load-bearing Behavior of Suction Bucket Foundations in Sand, *Applied Ocean Research*, Cilt. 43, s. 157-165. DOI: 10.1016/j.apor.2013.09.001
- [21] Akdag, C.T. 2017. Response of a Novel Supporting System for Offshore Wind Energy Converters. 3. Uluslararası Zemin-Yapı Etkileşimi Sempozyumu, 18-20 Ekim, İzmir, 383-3