DENİZÜSTÜ TEKİL KAZIKLI RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE SIVILAŞMANIN REZONANSA ETKİSİ

Impact of Liquefaction on the Resonance of Offshore Wind Turbines

Hatice Kübra GEYİK[1], Berna UNUTMAZ[2]

ÖZET

Enerji talebindeki artış, iklim değişikliğiyle mücadele ve ülkelerin enerji bağımsızlığına olan yönelimi temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi her geçen gün artırmaktadır. Tüm bu süreçte rüzgâr enerjisi, yüksek verime sahip olması ve gelişmiş endüstriyel altyapıları ile yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Sosyal ve çevresel etkiler ile karasal alanlardaki yer kısıtlamaları nedeniyle rüzgâr enerjisi yatırımları; rüzgârın daha sürekli olması ve yüksek verim sağlaması sebebiyle karasaldan açık denize doğru kaymaktadır. Bu sebeple açık deniz rüzgâr teknolojisine yönelik çalışmalar da her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada, denizüstü tekil kazıklı rüzgâr türbini yapılarının sismik performanslarının, zemin sıvılaşması sırasında ve sıvılaşma sonrası konsolidasyon evrelerinde bütüncül bir yaklaşımla incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında 5 MW NREL referans rüzgâr türbini kullanılarak OpenFAST yazılımıyla dalga ve rüzgâr verileri üretilmiştir. Elde edilen bu dinamik veriler, PLAXIS 3D ortamına aktarılarak sismik etki altında kapsamlı bir yapı-zemin etkileşimi modeli kurularak sıvılaşma sırasında meydana gelen rijitlik kaybının ve sıvılaşma sonrasında meydana gelen konsolidasyon sürecinin yapının doğal frekansında meydana getirdiği değişim incelenmiştir. Çalışmadaki temel hedef, sıvılaşma ile meydana gelen doğal frekans değişiminin türbinin operasyonel aralıklarının (1P/3P) sınırlarıyla çakıştığı noktaları inceleyerek türbinin rezonans riskini değerlendirmektir. Elde edilen bulgular; bu yapıların sismik tasarımı yapılırken statik kabullerin önüne geçilmesi gerektiğini ve zeminin sıvılaşma etkisi altında yapı zemin etkileşiminin de dikkate alınarak rezonans riskinin detaylıca değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Tekil Kazıklı Rüzgâr Türbini, Doğal Frekans, Zemin Sıvılaşması*

ABSTRACT

Growing global energy needs, efforts to mitigate climate change, and government policies for energy independence are increasing the tendency to adopt clean and renewable energy sources. Wind energy is one of the most common renewables worldwide due to its high efficiency and well-developed industrial infrastructure. Land-use constraints and environmental concerns are pushing wind energy investments away from the shore. Recently, wind investments are moving towards offshore locations to benefit from the advantage of stronger and more consistent wind speeds, which allows for higher wind energy efficiency. As a result, research on offshore wind technology increases with each passing date. In this study, it is aimed to investigate the seismic performance of offshore monopile wind turbines during liquefaction and post-liquefaction stages in detail. Within the scope of this study, firstly, a 5 MW NREL reference wind turbine model is utilized to obtain hydrodynamic and aerodynamic loading output data using OpenFAST software. Then this output data is integrated into PLAXIS 3D to analyze soil structure interaction (SSI), whereby the changes in the natural frequency of the structure induced by the reduction of soil stiffness during liquefaction and the subsequent consolidation process are analyzed comprehensively. The primary objective of this study is to evaluate resonance by considering the points where the liquefaction-induced changes in natural frequency overlap with the operational frequency ranges (1P/3P) of the turbine. The findings highlight the need to move beyond static

[1] Doktora Öğrencisi, Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kubrageyik@hacettepe.edu.tr; Mühendis, İller Bankası A.Ş., kubray@ilbank.gov.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, berna.unutmaz@hacettepe.edu.tr

assumptions when designing these structures seismically and to thoroughly evaluate the resonance risk by considering the soil-structure interaction under the influence of soil liquefaction.
Keywords: *Monopile Wind Turbine, Natural Period, Soil Liquefaction*

1. GİRİŞ

Ülkelerin enerji bağımsızlıklarını sağlama yönündeki ulusal hedefleri, küresel ısınma ile mücadele politikaları ve enerji talebindeki hızlı artış, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimi önemli ölçüde artırmaktadır. Tüm bu süreçte rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Karasal anlamda yıllar içinde gelişmiş endüstriyel altyapısı ile rüzgâr enerjisi oldukça önemli bir yere sahip olmasına rağmen karasal alanlardaki yer kısıtlamaları ile çevresel ve sosyal etkiler, rüzgâr enerjisi yatırımlarının yönünü açık denizlere çevirmesine sebep olmuştur. Açık deniz sahaları, karalara göre daha yüksek, sürekli rüzgâr hızına sahip olduğundan daha yüksek verimle enerji üretilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu sebeple de açık deniz rüzgâr enerjisi üzerine akademik ve endüstriyel çalışmalar da her geçen gün artmaktadır. Açık deniz rüzgâr türbini projelerinin ekonomik fizibilitesi ve uygulanabilirliği büyük oranda temel sistemlerinin tasarımıyla ilgilidir. Bu yapıların temel tasarımı, zemin tipine, dalga mekaniğine ve su derinliğine bağlı olarak değişmekte, bu da proje maliyetini ve projenin fizibilitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Günümüzde 50 metre su derinliğine kadar yaygın olarak tekil kazıklı rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Tekil kazıklı temeller imalat, taşıma ve deniz tabanına çakılma kolaylığı gibi sebepler bakımından en çok tercih edilen açık deniz rüzgâr türbini temel taşıyıcısı olarak yer almaktadır (Basu,2020).

Yüksek kule yapılarına, devasa bileşenlere ve denizaltı taşıma sistemlerine sahip bu türbinler, aerodinamik ve hidrodinamik bakımdan oldukça yüksek çevresel yük etkilerine maruz kaldığından hem geoteknik hem de yapı mühendisliği yönünden kapsamlı olarak değerlendirilmelidir. Günümüzde açık deniz rüzgâr yatırımlarının yoğunlaştığı bölgeler genel olarak düşük sismik aktiviteye sahip olduklarından sismik yükler bu yapıların tasarımında genel olarak ihmal edilmektedir. Ancak ülkemiz gibi sismik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde rüzgâr ve dalga yüklerine sismik etkiler de eşzamanlı olarak eklenmeli ve çoklu tehlike analizleri de tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır. Sismik sarsıntı etkisi ile deniz tabanının suya doygun ve granüler zeminlerinde meydana gelebilecek ani boşluk suyu basıncı artışı ile zeminin efektif gerilmesi ve kesme mukavemetinin hızla düşmesi sonucunda sıvılaşma meydana gelebilmektedir. Sıvılaşma sonucunda geleneksel ve rijit yapılarda taşıma gücü kaybı ve aşırı oturma problemleri görülürken denizüstü rüzgâr türbinlerinde sıvılaşma etkisi doğrudan bir rezonans ve yorulma problemine dönüşebilmektedir (Patra ve Haldar, 2022).

Deniz üstü rüzgâr türbinlerinde yapının tüm bileşenleri ile oluşturduğu doğal frekans, türbin kanatlarının dönme frekansı olan 1P ve kanat geçiş frekansı olan 3P frekansları ile çakışmamalı ve bu frekans tekil kazıklı türbinler için yarı rijit (soft-stiff), yüzer yapılı türbinler içinse çok esnek (soft-soft) tasarım bölgesinde yer almalıdır. Bunun yanı sıra zemin-yapı etkileşimi mekanizması gereği sistemin gösterdiği frekans ve rijitlik doğrudan zemin parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Sismik aktivite sırasında meydana gelen zemin sıvılaşması sonucunda yanal rijitliğin azalması ya da kaybolması sonucunda türbinin doğal frekansının ani bir şekilde düşmesi beklenmektedir. Bu frekans düşüşü sonucunda yapının doğal frekansının 1P-3P frekans bantlarıyla çakışması, yapıyı rezonans tehlikesi altına sokabilmektedir (Demirci ve ark.,2022). Meydana gelebilecek rezonans durumu sonucunda sistem türbin kanatları ve çevresel yüklerin oluşturduğu dinamik etkiyi sönümlemekte yetersiz kalabilmektedir. Bu durum sonucunda da türbin yapısında kontrolsüz

deplasmanlar, yorulma hasarları ve operasyonel göçme gibi riskli durumlar ortaya çıkabilmektedir.

Mevcut literatür çalışmaları arasında sıvılaşma ve yapı zemin etkileşimi üzerine çalışmalar bulunsa da türbinlerin sismik etki altında hidrodinamik-aerodinamik çevresel yüklerin ve sıvılaşma sonucunda meydana gelen konsolidasyon evresinin bir arada ele alındığı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma ile açık deniz tekil kazıklı rüzgâr türbinlerinin sismik performansları çevresel yükler altında sıvılaşma öncesi, sıvılaşma sonrası ve konsolidasyon evresi kapsamlı bir şekilde ayrı ayrı incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle 5 MW kapasiteli NREL rüzgâr türbini model olarak ele alınmış ve yapının OpenFAST yazılımı kullanılarak analizi yapılmıştır. Analiz yapılırken hidrodinamik ve dalga analizleri düzensiz dalga teorisi takip edilerek JONSWAP spektrumu kullanılarak yapılmıştır. Dalga kinematiği ve yapı üzerindeki atalet kuvvetleri de Morison denklemleri aracılığıyla hesaplanmıştır. Sistemin üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler de NREL TurbSim modülü aracılığıyla 3 boyutlu bir rüzgâr alanı baz alarak oluşturulmuştur. Tüm bu analizlerin sonucunda ise elde edilen dinamik veriler zaman serisi haline getirilmiş ve zaman serisi boyunca türbinin deniz tabanı seviyesinde tekil kazığa etkiyen yük ve momentler hesaplanmıştır. Elde edilen dinamik veri serileri ise PLAXIS 3D ortamına aktarılmış ve ileri düzey bir yapı zemin etkileşim modeli kurulması amaçlanmıştır. Geliştirilen bu 3 boyutlu model ile sıvılaşma sırasındaki rijitlik kaybı, frekans değişimi ile sarsıntı sonrasındaki konsolidasyon süreci ile frekans değişimi analiz edilmiştir. PLAXIS 3D kullanılarak yapılan analizde, 17 Ağustos 1999 Gölcük depremi (Pacific Earthquake Engineering Research Center [PEER], 2013) ana şokuna ait Yarımca Petkim İstasyonu'ndan elde edilen ivme kaydı kullanılmıştır.

2.SAYISAL MODELLEME VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde çalışmaya esas sayısal modelleme ve kullanılan yöntemlere değinilmektedir.

2.1. NREL 5 MW Rüzgâr Türbini OpenFAST Analizi

Bu çalışmanın kapsamında üç kanatlı, rüzgârı önden alan 5 MW NREL referans rüzgâr türbini (Bkz. Tablo 1-2) kullanılmıştır. Türbin sisteminin açık deniz ortamında maruz kalabileceği çevresel yüklerin gerçeğe en yakın şekilde analiz edilebilmesi amacıyla hem yapısal dinamikleri hem çevresel etkileri bağlaşımlı olarak çözen aero-hidro-servo-elastik etkileri de göz önünde bulunduran OpenFAST yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda yapılan analizler sonucunda sisteme etki eden iki temel çevresel kuvvet zaman tanım aralığında üretilmiştir. Bu iki temel yük aerodinamik yükler ve hidrodinamik yüklerdir.

Tablo 1: NREL 5 MW Rüzgar Türbini Operasyonel Özellikler (Jonkman ve ark., 2009)

Sınıflandırma	5 MW, Rüzgar Yönü (Upwind), 3 Kanatlı
Devreye Girme (Cut-In) Rüzgar Hızı	3 m/s
Nominal (Rated) Rüzgar Hızı	11.4 m/s
Devreden Çıkma (Cut-Out) Rüzgar Hızı	25 m/s
Rotor Hızı (Devreye Girme / Nominal)	6.9 rpm / 12.1 rpm
Kontrol Sistemi	Değişken hızlı , Ortak Eğim Kontrolü

Tablo 2: NREL 5 MW Rüzgar Türbini Geometrik Özellikler (Jonkman ve ark., 2009)

Rotor Çapı	126 m
Gövde (Hub) Çapı	3 m
Gövde Yüksekliği (Hub Height)	90 m
Şaft Eğimi (Shaft Tilt)	5°
Ön Koni Açısı (Precone)	2.5°
Çıkıntı (Overhang)	5 m
Rotor Kütlesi	110.000 kg
Nasel (Nacelle) Kütlesi	240.000 kg
Kule Kütlesi	347.460 kg

2.1.1. Aerodinamik Yükler

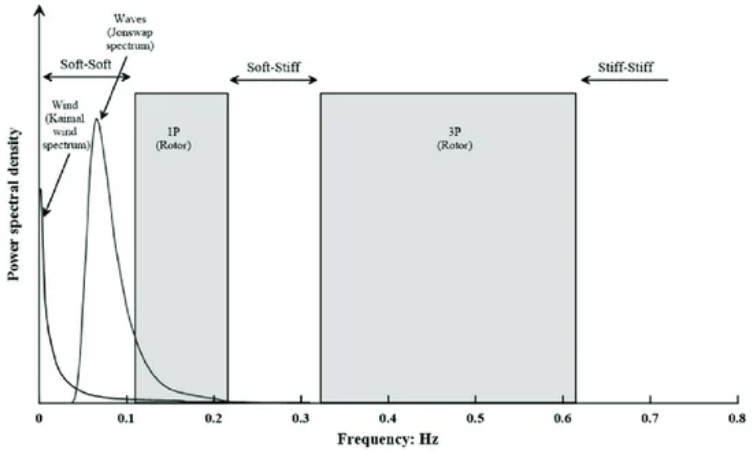
Aerodinamik yüklerin hesaplanmasında TurbSim kullanılarak stokastik olarak üretilmiş 3 boyutlu türbülanslı AeroDyn modülü tanımlanmasıyla birlikte bağlaşımlı analiz yoluyla hesaplamalar yapılmıştır. TurbSim verilerinin tetiklediği kararsız rüzgâr akışı dinamiklerini yüksek hassasiyetle çözebilmek amacıyla Beddoes-Leishman dinamik akım kopması ve Prandtl uç kayıpları da sisteme entegre edilerek tüm sistem 3 boyutlu bir rüzgâr ortamında analiz edilmiştir. Türbin rotoru da dahil olmak üzere kanatlar ve kule gövdesi üzerinde oluşan aerodinamik itki kuvvetleri, türbülanslı rüzgâr durumu modellenerek analiz edilmiştir.

2.1.2. Hidrodinamik Yükler

Çalışma kapsamında türbinin hidrodinamik yüklemeler altında analiz edilmesinde HydroDyn modülü kapsamında Morison Denklemi ve düzensiz dalga teorisi esas alınmıştır. Analiz yapılırken deniz tabanı ve ortalama su seviyesi arasında kalan yapı silindirik elemanlara bölünmüş ve her eleman kendi kütlesi altında viskoz sürükleme, doğrusal ya da kuadratik sönümleme gibi hidrodinamik faktörler etkisinde analiz edilmiştir. Düzensiz dalga teorisi (JONSWAP spektrumu) kullanılarak akışkan hızları ve ivmeleri hesaplanmış ve tüm bu etkiler yapı üzerine etkiyen dalga yüklerine dönüştürülmüştür.

Dalga-rüzgâr frekanslarıyla birlikte yapının doğal frekansları arasındaki rezonans etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla da hem atalet hem de akışkan sürükleme kuvvetlerine göre altyapı (SubDyn) dinamiği ve elastik yapısal dinamik (ElastoDyn) modülleriyle bağlaşımlı analiz yapılmıştır.

Daha önce de bahsedildiği üzere açık deniz rüzgâr türbinlerinde en kritik aşamalardan birisi tüm sistemin operasyonel frekans aralığının, çevresel yüklerin etkilediği frekanslarla örtüşmemesidir. Tablo 1'de görüleceği üzere 5 MW NREL rüzgâr türbininin devir hızı 6.9-12.1 rpm arasında değişmektedir. Bu durumda 1P rotor dönme frekansı yaklaşık 0.115 Hz-0.20 Hz aralığına denk gelmektedir. Aynı türbin yapısı için 3P kanat geçiş frekansı ise 0.345 Hz-0.60 Hz aralığına denk gelmektedir. Bu aralıklar 5 MW NREL rüzgâr türbininin frekans bant aralığını göstermektedir.



Şekil 1: Tipik Bir Açık Deniz Türbini 1P-3P Geçiş Aralıkları (Tao ve ark.,2022)

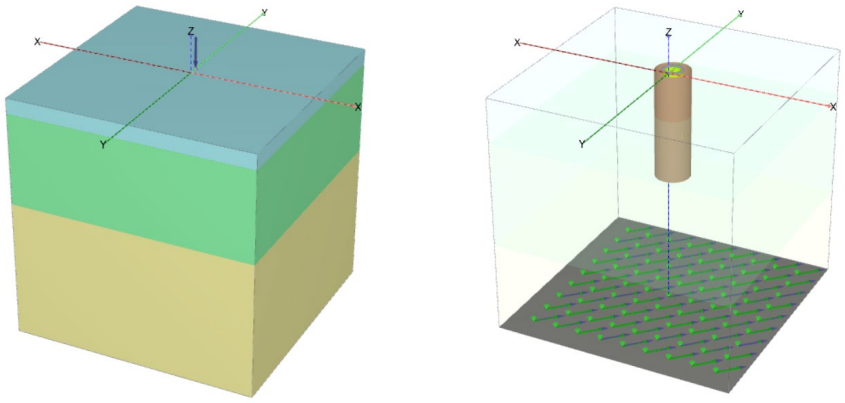
DNV (Det Norske Veritas) (DNV, 2021), API (Amerikan Petrol Enstitüsü) (API, 2014) gibi uluslararası standartlara göre açık deniz türbinlerinin doğal frekansı yapının operasyonel frekansı olan 1P-3P aralığıyla örtüşmemelidir. Tekil kazıklı türbinler için tasarım doğal frekansı Şekil-1'de görülen esnek-rijit aralığa denk gelmeliyken yüzer tip türbinler içinse çok esnek (soft-soft) aralığına denk gelmelidir. Çalışmanın bu kısmında OpenFAST kullanılarak elde edilen çıktılar (F_x,F_y,F_z,M_x,M_y,M_z) zaman serisi halinde PLAXIS 3D ortamına alınmıştır. Bu doğrultuda; rüzgâr ve dalga bileşke yüklerinin baskın yönü olan X ekseni, PLAXIS modelindeki global X ekseni ile çakıştırılmış; enine yön bileşenleri ise global Y eksenine atanmış ve veri aktarımı tek yönlü bir yaklaşım doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca OpenFAST analizlerinde zemin esnekliği dikkate alınmamış olup türbin altyapısı deniz tabanı seviyesinde (0,0,0) sabit kabul edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen reaksiyonlar seriler olarak uygun yön dönüşümleri de sağlanarak PLAXIS 3D ortamına aktarılmış; modellenen tekil kazığın deniz tabanı seviyesindeki tepe merkez noktasına dinamik noktasal yük ve moment olarak doğrudan uygulanmıştır.

Bu program üzerinden türbinin birçok noktasına etki eden yükler elde edilebilmesine rağmen analizde esas noktanın tekil kazıklı türbin olması sebebiyle deniz tabanı seviyesinde çevresel koşullara göre Arany ve ark. (2017) metoduna dayanarak ön dizaynı yapılmıştır. Türbinin verileri PLAXIS 3D ortamında belirli koşullarda statik belirli koşullarda ise dinamik zaman serisi olarak kullanılmıştır.

2.2. Geometri, Zemin Profili ve Yapı-Zemin Etkileşimi (SSI) Modeli

Çalışmada açık deniz türbininin yapı zemin etkileşimini ve sismik sarsıntı etkisiyle üç boyutlu zaman tanım aralığında analizini yapabilmek amacıyla PLAXIS 3D yazılımı kullanılmıştır. 25 m su derinliği ve tanımlanan çevre koşulları için 6 m dış çapa, 10 cm et kalınlığına ve 40 m gömme derinliğine sahip çelik tekil bir silindirik kabuk/plak eleman olarak modellenmiştir. Çelik kazık malzemenin elastisite modülü 210 GPa, Poisson oranı 0.30 ve birim hacim ağırlığı 78.5 kN/m³ olarak tanımlanmıştır. Dinamik yükler altında yapı-zemin etkileşimini ve gerilme yığılmalarını hassas bir şekilde çözebilmek amacıyla kazık çeperi ve ucu etrafındaki sonlu eleman ağ yapısı lokal olarak sıkılaştırılmıştır. Kazık ile zemin arasındaki kayma ve ayrılma mekanizmalarını gerçekçi bir şekilde simüle edebilmek için kazık dış yüzeyi boyunca arayüz tanımlanmış olup; çelik kazık ile sıvılaşabilir ve taşıyıcı

kum tabakaları arasındaki sürtünme direncini yansıtmak üzere arayüz dayanım azaltma faktörü 0.67 olarak atanmıştır.



Şekil 2: Genel Zemin profili ve modellenen tekil kazık görünümü

Çalışmada modellenen zemin profilinde (Bkz. Şekil 2) ilk 5 m'lik üst tabaka sıvılaşabilir gevşek/orta sıkı kum olarak tanımlanmıştır. Bu zeminin sismik etki sonucunda meydana gelen tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı artışını ve sıvılaşma etkilerini daha gerçeğe uygun analiz edebilmek amacıyla UBC3D-PLM modeli kullanılmıştır. Taşıyıcı nitelik taşıyan orta tabakada ise Hardening Soil (HS) analiz modeli kullanılmış ve zemindeki rijitlik artışının derinlik ve efektif gerilmenin de artmasıyla birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu model sayesinde rüzgâr ve dalga yükleri gibi çevrimli yükler altında meydana gelebilecek plastik deformasyonların ve rijitlik durumunun gerçekçi olarak modellenmiştir. Bu tabakanın HS olarak modellenmesinin sebebi ise kazık-yapı etkileşiminin maruz kaldığı devasa yükler, rijitlik değişimi ve kalıcı deformasyonların kararlı bir şekilde temsil edilmesidir. HS modeli, HSsmall modeli gibi küçük deformasyonlarda meydana gelen rijitlik değişimini ve histeretik sönüm davranışını doğrudan temsil etmese de açık deniz türbinleri gibi devasa yapılar, yüklemeler sonucunda meydana gelen büyük ölçekli deplasmanlar ile sıvılaşma kaynaklı şiddetli zemin deformasyonları karşısında standart HS modeli yeterli olmakta ve sayısal açıdan kararlı bir altyapı sunmaktadır. Ayrıca çalışmada sistemin dinamik davranışındaki enerji sönümlemesi analizlere entegre edilen Rayleigh sönümleme yaklaşımıyla dengelenmiş olup, çok küçük deformasyon rijitliği değişimlerinin makro ölçekli küresel davranış üzerindeki etkisinin bu ölçekte sınırlı düzeyde kalacağı öngörülmüştür. Modelde en alt tabaka, mühendislik kayası görevi görecek şekilde Mohr-Coulomb yaklaşımı ile modellenmiştir (Bkz. Tablo 3).

Tablo 3: Zemin katmanlarının Özellikleri

Parametre	1. Katman:	2. Katman	3. Katman:
Malzeme Modeli	UBC3D-PLM	Hardening Soil (HS)	Mohr-Coulomb (MC)
Drenaj Tipi	Drenajsız	Drenajlı	Drenajsız / Gözeneksiz
Doygun Birim Hacim Ağırlığı, γ_{sat} (kN/m³)	20	21	22
Efektif Kohezyon, c_{ref}' (kPa)	1	1	50
Efektif İçsel Sürtünme Açısı, ϕ' (°)	31	36	40
SPT Direnci, $N_{1,60}$	12	-	-
Elastik Kayma Modülü Çarpanı, K_{Ge}	994	-	-
Elastik Hacim Modülü Çarpanı, K_{Be}	696	-	-
Plastik Kayma Modülü Çarpanı, K_{Gp}	429	-	-
Sabit Hacim Sürtünme Açısı, ϕ_{cv} (°)	~30	-	-

Deprem etkisi altında sismik dalgaların yansımasını sönümlemek ve zemin katmanlarının dalga büyütmelerini gerçekçi bir şekilde test edebilmek amacıyla uygun sınır koşulları tanımlanmıştır.

Sonuç olarak analizlerden elde edilen doğal frekanslar sistemin ön dizaynı aşamasında hesaplanan doğal frekans ile karşılaştırılmıştır. Ön dizayn aşamasında sistemin doğal frekansı (Arany ve ark., 2017)

$f_0 = C_L C_R C_S f_{FB}$; türbin sistemi doğal frekansı

$f_{FB} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_o}{m_0}} = \frac{1}{2\pi} C_{MP} \sqrt{\frac{3E_T I_T}{L_T^3\left(m_{RNA}+\frac{33}{140}m_T\right)}}$; sabit tabanlı yapı doğal frekansı

$C_{MP} = (1/(1 + (1 + \rho^3)\lambda - \lambda))^{0.5}$; modifikasyon katsayısı

$t_T = \frac{m_T}{\rho_T L_T D_T \pi}$ ortalama kule et kalınlığı

$D_T = \frac{D_b + D_t}{2}$ ortalama kule çapı

$\eta_L = \frac{K_L L_T^3}{EI_\eta}$; $\eta_R = \frac{K_R L_T}{EI_\eta}$; $\eta_{LR} = \frac{K_{LR} L_T^2}{EI_\eta}$; boyutsuz temel esnekliği

$C_R(\eta_L, \eta_R, \eta_{LR}) = 1 - \frac{1}{1+0{,}6\left(\eta_R - \frac{\eta_{LR}^2}{\eta_L}\right)}$; ampirik parametre

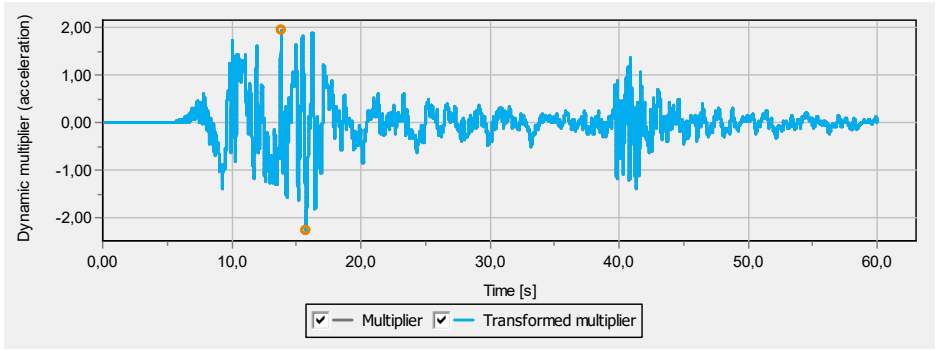
$C_L(\eta_L, \eta_R, \eta_{LR}) = 1 - \frac{1}{1+0{,}5\left(\eta_L - \frac{\eta_{LR}^2}{\eta_R}\right)}$; ampirik parametre

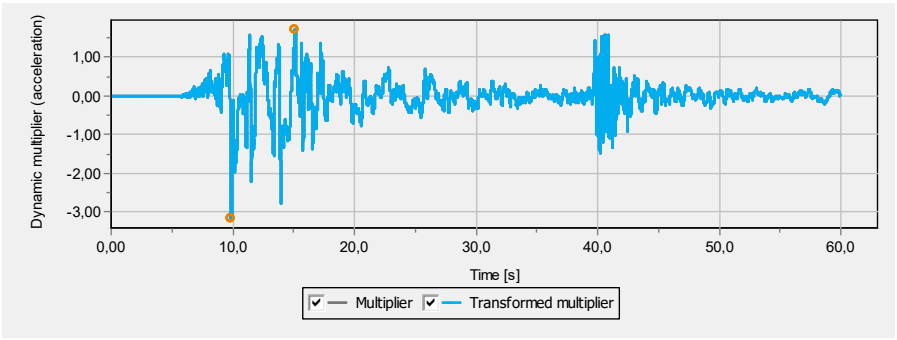
$\rho = \frac{L_S}{L_T}$; uzunluk oranı

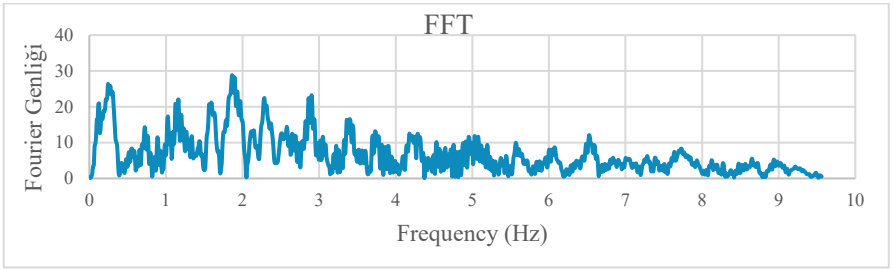
formülleri kullanılarak hesaplanmış ve ön dizayn aşaması için 0.291 Hz olarak bulunmuştur.

2.3. Sayısal Analiz Aşamaları

Çalışma kapsamında PLAXIS 3D analizinin bütüncül bir şekilde incelenebilmesi amacıyla analizler inşa evreleri çerçevesinde yapılmıştır. İlk olarak zemin gerilmelerinin oluşturulabilmesi amacıyla ön dizaynı yapılmış olan tekil kazık sisteminin zemine entegrasyonu sağlanmıştır. Sonrasında ise sistemin OpenFAST sonuç yüklemeleri altında doğal frekansı incelenmiş ve bu doğal frekansın ön dizayn aşamasındaki doğal frekans ile örtüşüp örtüşmediği belirlenerek mevcut değerlerin dizayn koşullarını sağlayıp sağlamadığını tespit etmek amaçlanmıştır. Yükleme aşaması ve sismik analiz serilerinin güvenilirliğini sağlamak amacıyla model kazıktan yeterli uzaklıkta dalgaların geri yansımasını engelleyecek şekilde modellenmiştir. 120 m x 120 m olarak x ve y doğrultusunda modellenen zeminin yan yüzeyleri serbest alan tabanında ise sönümleyici uyumlu sınır koşulları kullanılmıştır. Modelin taban sınırından 1999 Kocaeli depremi Petkim İstasyonuna ait ivme kayıtları dinamik çarpan olarak kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3).







Şekil 3: X ve Y Ekseni Boyunca Etki Eden Deprem İvme Kayıtları ve Fourier genlik spektrumu

Dinamik analizlerin de tamamlanması ardından PLAXIS 3D'de son bir aşama tanımlaması yapılarak 30 günlük bir konsolidasyon süreci başlatılıp nihai kalıcı eğilme ve deformasyon davranışları da incelenmiştir. 30 günlük süre sıvılaşabilir kum tabakasının geçirgenlik özellikleriyle birlikte drenaj mesafesi ve aşırı boşluk suyu basıncının sönümleme derecesi olan U>95% yaklaşımına göre belirlenmiştir. Deplasman zaman serilerinde sistemin bu süre zarfında asimptotik dengeye ulaştığı görülmüştür.

Kazığın tepe noktası (Z = 0 m) ile taban noktası (Z = -40 m) arasındaki X ve Y eksenlerindeki yatay deplasman farkları (u_x ve u_y) vektörel olarak birleştirilerek aşağıdaki bağıntı ile nihai eğilme elde edilmiştir:

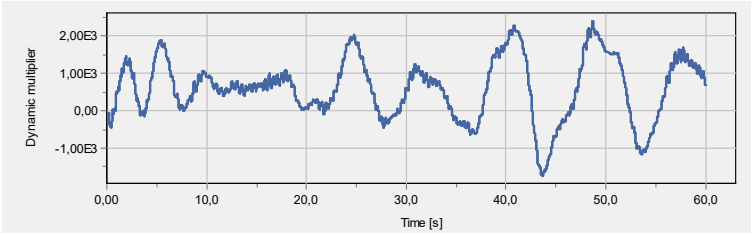
$$\Delta u_{xy} = \sqrt{\left(u_{x,\text{tepe}} - u_{x,\text{taban}}\right)^2 + \left(u_{y,\text{tepe}} - u_{y,\text{taban}}\right)^2}$$

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{\Delta u_{xy}}{L}\right) \times \frac{180}{\pi}$$

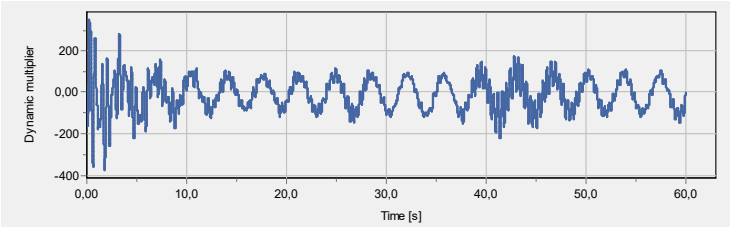
Bu eğilme miktarı, açık deniz tasarım yönetmeliklerinde kritik devrilme toleransı olan 0.5°'lik sınır ile kıyaslanmış ve temelin sıvılaşma sonrasında gösterdiği dayanımın raporlanması amaçlanmıştır.

3. SONUÇ

İlk analiz olan OpenFAST analizi sonucunda deniz tabanı seviyesinde yükler zaman serisi olarak elde edilmiştir (Bkz. Şekil 4). Eksenel yük olan ReactFz yükü yapının kendi ağırlığı çerçevesinde yaklaşık -8.45 MN seviyelerinde stabil olarak elde edilmiştir. Baskın yatay kesme kuvveti olan ReactFx en yüksek değer olarak 2.300 kN ve enine kesme kuvveti olan ReactFy ±400 kN aralığında en yüksek değere ulaşmaktadır. Sisteme baskın rüzgar ve dalga yönünde etkiyen maksimum devrilme moment değeri (ReactMy) 145.000 kNm seviyesindedir. Sisteme çapraz etki eden maksimum eksen momenti (ReactMx) ise 20.000 kNm olarak elde edilmiştir.



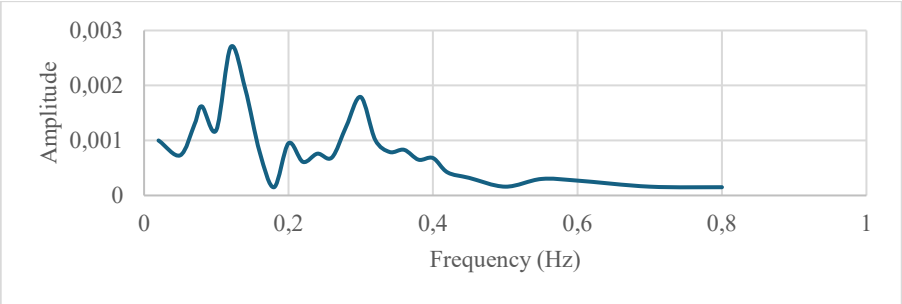
(a)



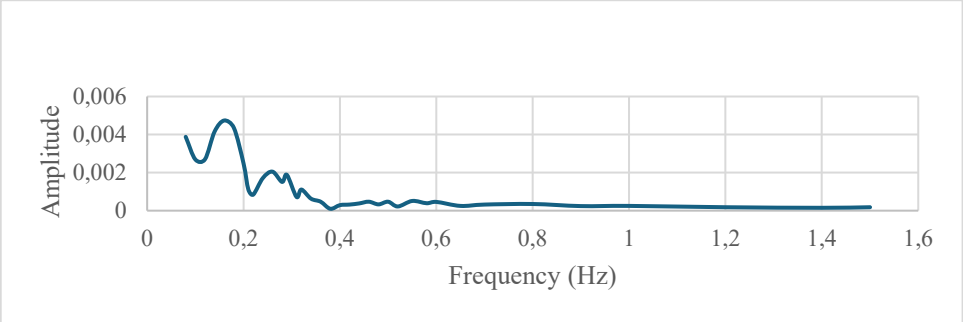
(b)

Şekil 4: X ve Y Eksenleri boyunca (a)X Yönünde Etkiyen Kuvvet; (b) Y Yönünde Etkiyen Kuvvet

Öncelikle sistemi etkileyen dinamik özellikler ve frekans içeriklerinin netleştirilmesi amacıyla uygulanan çevresel yüklerin spektral özellikleri belirlenmiştir. OpenFAST analizinden elde edilen veriler için Kaimal spectrumu ve JONSWAP spektrumu kullanılmış olup çevresel yüklerin 0.11-0.12 Hz bandında ve 1P frekansının altında yoğunlaştığı görülmüştür. PLAXIS 3D ortamında gerçekleştirilen dinamik analizlerin tepki spektrumunda ise iki belirgin tepe noktası gözlemlenmiştir. Bu tepe noktalarının ilki çevresel yüklerin etkisiyle tutarlı olacak şekilde yaklaşık 0.12-013 Hz değerlerine denk gelmektedir. Bu frekans değeri sisteme baskın yönde aniden etki eden kuvvetlerin etkisi ile oluşmaktadır. Şekil 5'te görülebileceği üzere 2. tepe noktası da 0.30 Hz'de oluşmuş olup bu sistemin çevresel yükler altında sahip olduğu doğal frekansı göstermektedir. Önceki bölümde ön dizayn aşamasında bu değer 0.291 Hz olarak hesaplanmış olup sonuçlar kendi aralarında tutarlılık göstermektedir. Bu değer ayrıca türbinin 1P-3P bantlarının dışındaki esnek-rijit alana denk gelmekte olup tasarım için de oldukça uyumlu veriler sunmaktadır.

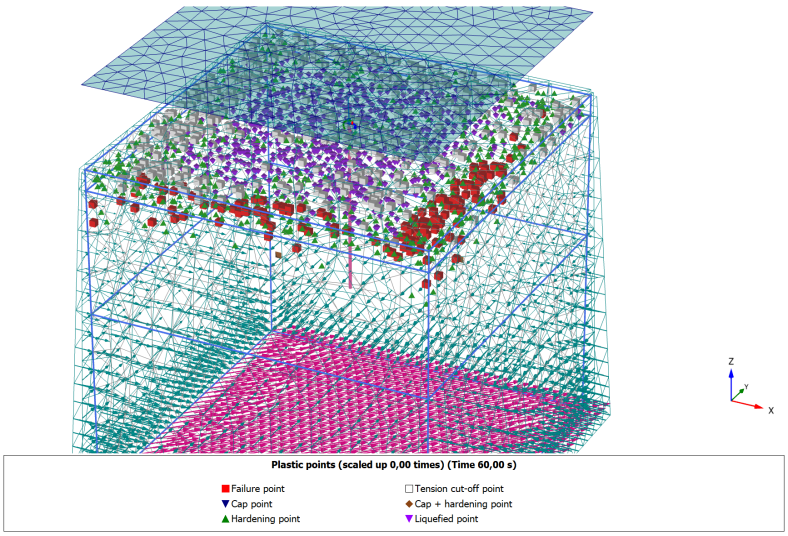


Şekil 5: Türbinin Çevresel Yükler Altındaki Doğal Frekansı



Şekil 6: Türbinin Çevresel Yüklerle Birlikte Deprem Etkisi Altındaki Doğal Frekansı

Bir sonraki aşamada ise yapıya sismik etkinin uygulanması ve zemin sıvılaşmasının başlaması ile birlikte spektrumda 0.30 Hz ve 0.16 Hz etrafında zirveler görülmektedir (Bkz. Şekil 6). 0.30 Hz ve çevresi sistemin doğal frekansı olup deprem etkiyene kadar geçen analiz sürecinde yapı tarafından sergilenmektedir. Sismik etki ve sıvılaşmanın başlamasıyla birlikte yapının doğal frekansının 0.16 Hz tarafında zirve yaptığı görülmektedir. Bu durum da yapının sadece kalıcı eğilmelere değil aynı zamanda dinamik rezonans etkisi altında yapısal göçme sınırına yaklaştığını göstermektedir.



Şekil 7: Zeminde Meydana Gelen Plastik Noktaların Dağılımı

Bu analizlere ek olarak 30 günlük bir konsolidasyon süresi tanımlandığında elde edilen deformasyon analizleri incelendiğinde 40 metre gömülü boya sahip tekil kazık için temel yüzeyi ve kazık ucu arasında yaklaşık 0.335°'lik kalıcı eğilme açısı oluştuğu görülmektedir.

Bu durum ise DNV standartlarına göre kullanılabilirlik sınır durumu eşik değeri olan 0.5°'nin altında kalmaktadır. Bu sonuca göre ise sıvılaşma evresinde meydana gelen şiddetli geçici dinamik kararsızlıklara rağmen sistemin yeterli devrilme göçmesi taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir (Bkz Tablo 4).

Tablo 4: Düğüm noktalarındaki deplasman değerleri

Node	Local number	X [m]	Y [m]	Z [m]	u_x [m]	u_y [m]	u_z [m]	|u| [m]
...	...	...	...	...	...	...	...	...
8572	9	-12,101	-15,723	-2,5	-0,083	-0,212	-0,343	0,411
4495	10	-13,028	-20,739	-5	-0,051	-0,175	-0,359	0,403
4235	1	-1,414	-4,084	-5	-0,062	-0,222	-0,204	0,307
4237	2	-8,658	-0,099	-5	-0,066	-0,226	-0,246	0,341
22	**3**	**0**	**3**	**0**	**-0,08**	**-0,215**	**-0,256**	**0,343**
5171	2	-4,906	11,167	-45,693	0,194	-0,127	-0,07	0,242
5121	3	7,501	12,678	-46,592	0,205	-0,109	0,037	0,235
21	**4**	**0**	**3**	**-40**	**0,15**	**-0,17**	**-0,125**	**0,259**

Kalıcı eğilme değerleri kazığın uç noktalarının Tablo 4'te gösterilen sonuçlardan yola çıkarılarak aşağıdaki eşitlikler yoluyla hesaplanmıştır.

$$\Delta u_y = |-0.215 - (-0.170)| = |-0.215 + 0.170| = 0.045\ \text{m}$$

$$\Delta u_x = |-0.080 - 0.150| = 0.230\ \text{m}$$

$$\Delta u_{xy} = \sqrt{(\Delta u_x)^2 + \left(\Delta u_y\right)^2}$$

$$\Delta u_{xy} = \sqrt{(0.230)^2 + (0.045)^2} = \sqrt{0.0529 + 0.002025} = 0.234\ \text{m}$$

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{0.234}{40}\right) \times \frac{180}{\pi}$$

$$\theta_{\max} = 0.335^\circ$$

Tüm bunlara ek olarak 30 günlük konsolidasyon süresi sonunda sistemin doğal frekansı tekrar rüzgâr ve çevresel yüklere maruz bırakılarak analiz edildiğinde; doğal frekansın yaklaşık 0.26 Hz etrafında yeni bir kalıcı dengeye geldiği görülmüştür. Bu da sistemin ilk frekansına dönemediğini, kalıcı eğilme ve deformasyon kaynaklı yeni bir denge yakaladığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

D. Basu, "Offshore wind turbine monopile foundations: Design perspectives," *Ocean Engineering*, vol. 213, May 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107514.

S. K. Patra and S. Haldar, "Seismic Performance of Multimegawatt Offshore Wind Turbines in Liquefiable Soil under Horizontal and Vertical Motions," *International Journal of Geomechanics*, vol. 22, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002281.

H. E. Demirci, S. Jalbi, and S. Bhattacharya, "Liquefaction effects on the fundamental frequency of monopile supported offshore wind turbines (OWTs)," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 7, pp. 3359–3384, 2022, doi: 10.1007/s10518-022-01360-9.

PEER (2013). *Pacific Earthquake Engineering Research Center NGA-West2 Database*. University of California, Berkeley. Erişim adresi: https://ngawest2.berkeley.edu

J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," 2009. [Online]. Erişim adresi: http://www.osti.gov/bridge.

L. Tao, Y. Lai, B. He, and N. Lv, "Influence of Vertical Load on the Lateral Response of Piles in Normally Consolidated and Over-Consolidated Clay: Centrifuge and Numerical Modelling," *Front Phys*, vol. 10, p. 908181, May 2022, doi: 10.3389/fphy.2022.908181.

DNV, *Support structures for wind turbines*, DNV-ST-0126, Det Norske Veritas, Bærum, Norway, 2021.

API, *Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*, API RP 2A-WSD, 22nd ed., American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2014.

L. Arany, S. Bhattacharya, J. Macdonald, and S. J. Hogan, "Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 92, pp. 126–152, 2017, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.09.024.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
f_0	Doğal frekans	γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlığı
f_{FB}	Sabit tabanlı yapı doğal frekansı	c_{ref}'	Efektif kohezyon
C_{MP}	Modifikasyon katsayısı	φ'	Efektif içsel sürtünme açısı
C_L - C_R - C_S	Ampirik parametreler	$N_{1.60}$	SPT direnci
η_L - η_R - η_{LR}	Boyutsuz temel esnekliği	K_G^e	Elastik kayma modülü çarpanı
K_L - K_R-K_{LR}	Temel rijitlik katsayıları	K_B^e	Elastik hacim modülü çarpanı
ρ	Uzunluk oranı	K_G^p	Plastik kayma modülü çarpanı
E	Çelik elastisite modülü	φ_{cv}	Sabit hacim sürtünme açısı
I	Atalet momenti	U	Aşırı boşluk suyu basıncı sönümleme derecesi
L_T	Kule uzunluğu	F_x - F_y - F_z	X, Y ve Z yönlerinde etkiyen kuvvetler
t_T	Ortalama kule et kalınlığı	M_x - M_y - M_z	X, Y ve Z yönlerinde etkiyen momentler
D_T	Ortalama kule çapı	u_x - u_y - u_z	Düğüm noktalarında eksenel deplasmanlar
D_b	Kule taban çapı	|u|	Topam (bileşke) deplasman
D_t	Kule tepe çapı	Δu_x - Δu_y	Kazık tepe ve tabanı arası deplasman farkları
m_{RNA}	Rotor ve nasel kütlesi toplamı	Δu_{xy}	Nihai vektörel yatay deplasman farkı
m_T	Kule kütlesi	θ_{max}	Kalıcı eğilme açısı (maksimum devrilme)
L	Kazık gömme boyu	1P - 3P	Rotor dönme ve kanat geçiş frekansları