

بررسی تاثیر شتاب و فرکانس تحریک بر رفتار لرزه‌ای توربین بادی فراساحلی متکی بر مونوپایل با استفاده از میز لرزه (۱g)

علیرضا باطنی^۱، مجید مرادی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

*mmoradi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی سبب شده است که استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر از جمله باد مورد توجه قرار گیرد. بکارگیری توربین‌های بادی فراساحلی از مهمترین روش‌های استفاده از انرژی باد است. این توربین‌ها بیشتر روی مونوپایل قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر گسترش استفاده از توربین‌های فراساحلی متکی بر مونوپایل در مناطق لرزه‌خیز سبب شده است که رفتار لرزه‌ای آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. طراحی لرزه‌ای این توربین‌ها مشابه دیگر سازه‌ها باید بر اساس تاریخچه لرزه‌ای منطقه و متناسب با شرایط اشیاع صورت گیرد. تاکنون به دلیل پژوهش‌های اندک انجام شده روی رفتار لرزه‌ای این توربین‌ها، تاثیر شتاب و فرکانس تحریک در طراحی آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته و همچنین در برخی موارد طراحی این توربین‌ها مشابه طراحی در شرایط خشک صورت می‌گیرد. در این پژوهش با انجام ۹ آزمایش روی نمونه‌های ساخته شده در دستگاه میز لرزه (۱g) و اعمال شتاب و فرکانس تحریک متفاوت در هر یک از شرایط خشک و اشیاع، به بررسی اثر شتاب و فرکانس تحریک بر رفتار لرزه‌ای توربین‌های بادی فراساحلی پرداخته شده و رفتار آن‌ها در حالت خشک و اشیاع نیز با یکدیگر مقایسه شده است. مطابق با نتایج حاصل از این پژوهش رفتار توربین‌ها در صورت وقوع پدیده تشدید در بحرانی‌ترین حالت قرار داشته و همواره رفتار لرزه‌ای این توربین‌ها در حالت اشیاع، بحرانی‌تر از حالت خشک است و هرچه فرکانس تحریک کمتر باشد، رفتار توربین در شرایط اشیاع و خشک متفاوت‌تر می‌شود. همچنین با افزایش شتاب تحریک و کاهش فرکانس تحریک، مقدار بیشترین شتاب روسازه و جابه‌جایی حداکثر و ماندگار توربین افزایش می‌یابد که نشان دهنده رفتار بحرانی‌تر این سازه‌ها است.

کلیدواژه‌ها: توربین بادی فراساحلی، رفتار لرزه‌ای، میز لرزه (۱g)، شتاب و فرکانس تحریک، شرایط اشیاع و خشک.

۱- مقدمه

هستند. این توربین‌ها معمولاً در محیط خشکی، ساحل و دریا نصب شده و با توجه به موقعیت قرارگیری و ابعاد، دارای ظرفیت تولید انرژی مختلفی هستند. معمولاً در محیط سواحل و دریاها به دلیل عدم محدودیت در حمل‌ونقل و نصب قطعات

در سال‌های اخیر با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و گرمایش جهانی^۱، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ گسترش یافته است. باد از مهمترین انرژی‌های تجدیدپذیر است. توربین‌های بادی از جمله مهم‌ترین موارد استفاده از انرژی باد

Fig. 1. Example of monopile used in Gode offshore wind farm in Germany

طراحی لرزه‌ای توربین‌ها نیز مانند دیگر سازه‌ها باید با توجه به شتاب مبنای زلزله‌های گذشته منطقه نصب توربین صورت گیرد. به دلیل وجود محدودیت‌های ثبت زلزله در بستر دریاها معمولاً برای بررسی رفتار لرزه‌ای توربین‌های بادی فراساحلی از زلزله‌های ثبت شده در خشکی استفاده می‌شود [10, 11]، در صورتی‌که وجود آب دریا سبب تضعیف امواج زلزله وارد بر سازه‌های دریایی از جمله امواج و حرکات قائم زلزله می‌شود [12]. هرچند بررسی رفتار لرزه‌ای این توربین‌ها به دلیل محدودیت‌های موجود، بر اساس زلزله‌های ثبت شده از بستر دریا بررسی نمی‌شود ولی باید تاثیر پارامترهای موثر بارگذاری بر آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین پارامترهای یک بارگذاری لرزه‌ای را می‌توان شتاب و فرکانس غالب آن بارگذاری دانست. بررسی اثر شتاب حداکثر و فرکانس غالب زلزله بر رفتار لرزه‌ای توربین که شامل شتاب و جابه‌جایی توربین می‌شود از جمله موارد تاثیرگذار در طراحی لرزه‌ای آن است.

در رابطه با رفتار لرزه‌ای توربین‌های بادی خشکی و توربین‌های بادی فراساحلی متکی بر مونوپایل تاکنون پژوهش‌های مختلفی انجام شده است [13, 14]. از مهمترین موارد تاثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای این توربین‌ها در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه^۷ است که در پژوهش‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [15-17]. ونگ^۸ و همکاران رفتار لرزه‌ای این توربین‌ها را به صورت تجربی و با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار دادند [18]. یو^{۱۰} و همکاران نیز در بررسی عملکرد لرزه‌ای این توربین‌ها از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی استفاده کرده و نتیجه گرفتند که تریپاد نسبت به مونوپایل نقش موثرتری در کاهش میزان دوران توربین دارد [19]. همچنین به تازگی مونوپایل ترکیبی^{۱۱} با فونداسیون سطحی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [20].

بزرگ توربین و سرعت بیشتر باد، امکان نصب توربین‌های بزرگ‌تر و تولید بیشتر انرژی از هر توربین وجود دارد [1]. توربین‌های بادی فراساحلی^۱ در محیط دریا اغلب تحت بارهای چرخه‌ای باد، موج و جریان‌های دریایی^۲ قرار دارند [2]. این توربین‌ها روی پی‌های متنوعی قرار می‌گیرند. برای توربین‌های بادی در محیط دریا معمولاً از انواع پی‌های وزنی^۳، جکت^۴، تریپاد^۵، مونوپایل^۶ و پی‌های شناور^۷ استفاده می‌شود [3, 4]. مونوپایل‌ها تک شمع‌های لوله‌ای شکل با قطر ۲ تا ۸ متر هستند. شکل ۱ نمونه‌ای از مونوپایل‌های استفاده شده در یک مزرعه توربین بادی فراساحلی در آلمان را نشان می‌دهد [5]. مونوپایل به عنوان پرستفاده‌ترین پی در میان توربین‌های نصب شده در دریا تا سال ۲۰۱۹ بوده است که حدود ۸۱ درصد از مجموع پی‌های نصب شده را به خود اختصاص داده است [6]. افزایش استفاده از توربین‌های بادی فراساحلی در چند سال اخیر به دلیل مزایای آن‌ها باعث شده است که این توربین‌ها در مناطق لرزه‌خیز مثل چین، ژاپن و آمریکا نیز نصب شوند [7]. نصب این توربین‌ها در مناطق لرزه‌خیز و همچنین افزایش ابعاد و ظرفیت آن‌ها سبب شده است تا رفتار لرزه‌ای آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. بررسی رفتار این توربین‌ها به منظور طراحی لرزه‌ای بهینه صورت می‌گیرد. آیین‌نامه‌های موجود به طور واضح بیان کرده‌اند که در صورت نصب توربین‌ها در مناطق لرزه‌خیز باید طراحی این توربین‌ها به گونه‌ای انجام شود که مقاومت کافی در برابر زلزله‌های منطقه را داشته باشند [8, 9].

شکل ۱. نمونه مونوپایل استفاده شده در مزرعه بادی فراساحلی گودی

آلمان [5]



7. Floating Foundation
8. Soil-Structure Interaction (SSI)
9. Wang
10. Yu
11. Hybrid Monopile

1. Offshore Wind Turbines (OWT)
2. Ocean Currents
3. Gravity Based
4. Jacket
5. Tripod
6. Monopile

Monopile under monotonic lateral loads (Carbonate soil) [31] Rezanejad 8

Table 1. The research done by Moradi et. al.

در این پژوهش اثر شتاب و فرکانس تحریک، بر رفتار لرزه‌ای توربین بادی فراساحلی مورد بررسی قرار می‌گیرد، همچنین به دلیل آن‌که در برخی موارد، طراحی لرزه‌ای این توربین‌ها به مبانی طراحی توربین‌های خشکی ارجاع داده شده است، پس رفتار توربین متکی بر مونوپایل در محیط خشک نیز مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج مربوط به محیط اشباع مقایسه می‌شود.

۲- مدل‌سازی فیزیکی

موضوعات مختلف ژئوتکنیکی که پیچیدگی‌های زیادی دارند را می‌توان با مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار داد. مدل‌سازی در ابعاد واقعی به دلیل هزینه‌های زیاد و دشواری‌های موجود معمولاً مورد استقبال قرار نمی‌گیرد و رغبت پژوهشگران بیشتر بر استفاده از مدل‌سازی‌های کوچک مقیاس می‌باشد. در محیط آزمایشگاه مدل‌سازی‌های کوچک مقیاس با استفاده از سانتریفیوژ (Ng) و میز لرزه (۱g) انجام می‌شود. در این پژوهش از میز لرزه (۱g) استفاده شده است. طراحی مدل‌های کوچک مقیاس با استفاده از آنالیز روابط بدون بعد صورت می‌گیرد [33].

میز لرزه مورد استفاده در این پژوهش، میز لرزه آزمایشگاه دینامیک خاک دانشگاه تهران با یک درجه آزادی در جهت طولی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. این میز لرزه قادر به اعمال بار لرزه‌ای به مدل‌هایی با بیشترین وزن ۵۰ ton، شتاب افقی حداکثر ۱g و محدوده فرکانسی ۰/۰۱ تا ۵۰ هرتز است. محفظه خاکی مورد استفاده در این تحقیق از ورق‌های پلکسی‌گلس با ضخامت ۲۰mm ساخته شده که روی یک فریم فولادی قرار گرفته اند. ابعاد داخلی این محفظه دارای طول ۱۸۰۰mm، عرض ۴۵۰mm و ارتفاع ۷۰۰mm است. در شکل ۳ محفظه خاکی آزمایش در مدل‌سازی انجام شده برای این پژوهش نشان داده شده است. برای جلوگیری از بازگشت امواج از جداره محفظه خاکی از دولایه فوم جاذب موج به ضخامت ۵cm در دو جداره عمود بر راستای بارگذاری استفاده شده است. این فوم‌ها در محفظه‌های خاکی صلب با وجود اینکه سبب

در برخی پژوهش‌های گذشته به دلیل سازه خاص این توربین‌ها که سازه‌هایی لاغر هستند، تاثیر مواردی روی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که در سازه‌های دیگر اهمیت چندانی نداشته یا به دلیل محدودیت‌های موجود امکان بررسی آن‌ها وجود نداشته است. بررسی مواردی چون اثر فاصله محل نصب توربین از محل وقوع زلزله [21]، اثر اعمال همزمان بار طوفان و زلزله بر توربین [22]، اثر جهت وارد شدن بار افقی زلزله بر توربین [23] و اثر زلزله بر توربین در شرایط مختلف حرکت پره‌ها [24] از جمله این موارد است.

در ایران نیز به دلیل وجود محیط دریا در شمال و جنوب کشور امکان بهره‌گیری از توربین‌های بادی فراساحلی وجود دارد. تاکنون به دلیل وجود منابع سرشار نفت و گاز در کشور استفاده از توربین‌های فراساحلی در دستورکار قرار نگرفته است، هرچند با وجود آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، در آینده نه چندان دور احتمال بکارگرفتن این توربین‌ها در محیط دریا وجود دارد. پژوهش‌هایی نیز در داخل کشور بر روی این توربین‌ها صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهش‌های یک دهه اخیر مرادی و همکاران روی این توربین‌ها مطابق با جدول ۱ اشاره کرد.

جدول ۱. پژوهش‌های انجام شده توسط مرادی و همکاران

No.	Researcher	Title
1	Shirzadeh	Monopile under monotonic lateral loads [25]
2	Khodai	Monopile under monotonic lateral loads [26]
3	Jomehri	Monopile under cyclic lateral loads [26]
4	Shahidikhah	Monopile under cyclic lateral loads [27]
5	Darvishi	Monopile under cyclic lateral loads[28]
6	Khamseh	Monopile under cyclic lateral loads [29]
7	Memari	Monopile under monotonic lateral loads (Carbonate soil) [30]

منحنی، آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM D422-63 انجام شده است. تراکم نسبی ماسه در این آزمایش ۶۰ درصد در نظر گرفته شده است. معمولاً تراکم نسبی به عنوان معیاری برای شل یا سفت بودن خاک‌ها در نظر گرفته می‌شود و خاک با تراکم نسبی ۶۰ درصد جزو خاک‌های با تراکم متوسط به حساب می‌آید.

جدول ۲. مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Value	Sign	Parameter	No.
0.874	e_{max}	Maximum void ratio	1
0.574	e_{min}	Minimum void ratio	2
2.65	G_s	Specific gravity	3
0.27	D_{50}	Mean particle size (mm)	4
1.569	ρ_d	Dry density (gr/cm ³)	5
33	f	Friction angle (deg)	6
0	c	Cohesion (kPa)	7

Table 2. Properties of Firoozkooch sand No. 161

شکل ۴. منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

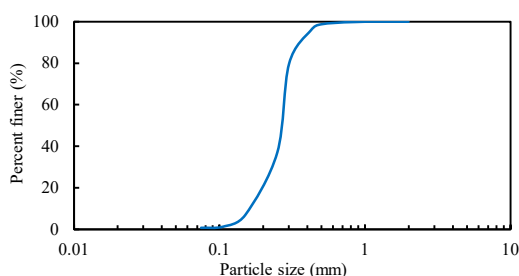


Fig. 4. Particle distribution of Firoozkooch sand No. 161

ابعاد مونوپایل و توربین مدل با توجه به قوانین مقیاس ارائه شده توسط Iai برای میزلرزه (۱g) به دست آمده و این قوانین در جدول ۳ قابل مشاهده است [35].

جدول ۳. قوانین مقیاس ارائه شده توسط Iai

Scale Factor	Sign	Parameter	No.
λ	x	Length	1
λ^3	m	Mass	2
$\lambda^{0.5}$	t	Time	3
$\lambda^{-0.5}$	ν	Frequency	4
1	$\ddot{u}$	Acceleration	5
λ	u	Displacement	6

Table 3. Scaling laws reported by Iai

جلوگیری از بازگشت امواج می‌شوند ولی تغییری در شتاب و فرکانس تحریک و اثر آن بر نمونه ایجاد نمی‌کنند [34]. همچنین در دو جداره هم‌راستا با جهت اعمال بار از دو لایه طلق استفاده شده است تا با کاهش نیروی برشی در این جداره‌ها، آثار مرزی کاهش یابد. در مدل‌های ساخته شده در این پژوهش، فاصله مونوپایل از دو جداره عمود بر جهت اعمال بار حدود ۸۷۰mm بوده است که تقریباً ۲۲ برابر قطر مونوپایل است و این موضوع تاثیر شرایط مرزی را به کمترین می‌رساند.

شکل ۲. میز لرزه دانشگاه تهران



Fig. 2. Shaking table of Tehran university

شکل ۳. محفظه خاکی آزمایش در مدل‌سازی انجام شده

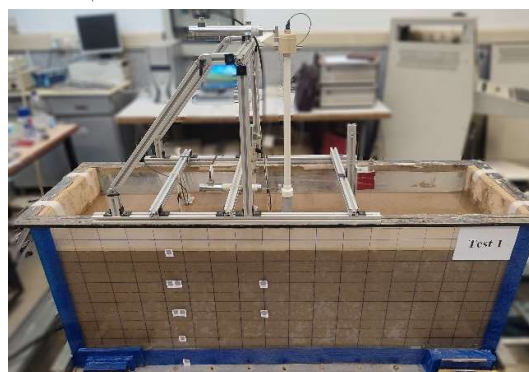


Fig. 3. Soil box of modeling

۱-۲- مشخصات مصالح

در این پژوهش از ماسه فیروزکوه ۱۶۱ استفاده شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته در آزمایشگاه، این ماسه در طبقه‌بندی متحد جزو ماسه‌های بد دانه‌بندی شده (SP) بوده و مشخصات آن در جدول ۲ آمده است. نمودار مربوط به منحنی دانه‌بندی آن نیز در شکل ۴ آمده است. برای دست‌یابی به این

مدل به گونه‌ای انجام شود که فرکانس طبیعی مدل و پروتوتایپ مطابق با قوانین مقیاس باشد.

جدول ۵. مشخصات روسازه در پروتوتایپ و مدل

Parameter	Prototype	Model
Material	Steel	Propylene
Modulus of elasticity (GPa)	210	1.5
Length (m)	60	0.6
Diameter (m)	3	0.025
Thickness (mm)	30	4.6
Lumped mass (kg)	200000	0.2
Natural frequency (Hz)	0.37	5.5

Table 5. Properties of superstructure in prototype and model

۲-۲- مراحل ساخت نمونه

در این پژوهش، آزمایش‌ها در خاک همگن انجام می‌شود. تراکم نسبی خاک در مدل‌های ساخته شده ۶۰٪ در نظر گرفته شده است. با توجه به مشخصات خاک در جدول ۲ وزن هر لایه به ضخامت ۵cm از خاک، محاسبه شده و با روش بارش خشک^۳ و سپس تراکم با کوبه استاندارد، به تراکم ۶۰٪ رسیده است. در این پژوهش عمق لایه خاک ۵۵cm بوده که در ۱۱ لایه به ضخامت ۵cm اجرا شده است. از معایب اصلی تراکم با کوبه، این است که در این روش لایه‌های زیرین به علت کوبیدن لایه‌های فوقانی متراکم‌تر می‌شوند ولی سعی شد تا با کاهش تعداد ضربات اعمالی به لایه‌های زیرین، تراکم لایه‌های خاک در عمق، اختلاف قابل توجهی نداشته باشند. همچنین در اجرای هر لایه ابتدا سطح صاف لایه زیرین دندانه‌دار شد تا یکپارچگی بین دولایه حفظ شود. در لایه‌های خاک مطابق با ابزارگذاری در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها که در شکل ۵ نشان داده شده است، حسگرهای شتاب^۴ و فشار آب حفره‌ای^۵ قرار داده شده است. پس از تکمیل لایه‌های خاک، شمع به کمک تراز دیجیتالی و به صورت قائم در مرکز محفظه خاکی تا عمق مدفون موردنظر (۳۰cm) کوبید شده و روسازه روی آن نصب شد. پس از آن، برای ثبت میزان شتاب و جابه‌جایی بالای روسازه یک شتاب‌سنج و یک جابه‌جایی‌سنج^۶ در محل بالای روسازه قرار گرفت.

پروتوتایپ^۱ انتخاب شده در این پژوهش مشابه توربین‌های مزرعه هورنز ریو^۲ به ظرفیت ۲ مگاوات است [36]. به دلیل ابعاد بزرگ توربین‌های فراساحلی و پروتوتایپ و محدودیت‌های ابعاد محفظه خاکی، ضریب مقیاس در این پژوهش برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. مونوپایل مورد استفاده در این پژوهش از جنس پلی وینیل کلراید (PVC) بوده و مشخصات آن‌ها در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. مشخصات مونوپایل در پروتوتایپ و مدل

Model	Prototype	Parameter	No.
PVC	Steel	Material	1
1.5	210	Modulus of elasticity (GPa)	2
0.3	30	Driven length (m)	3
0.04	4	Diameter (m)	4
1.8	40	Thickness (mm)	5

Table 4. Properties of monopile in prototype and model

روسازه مدل از دو قسمت ستون و جرم متمرکز فوقانی تشکیل شده است. جنس ستون از پلی پروپیلن بوده و مشخصات آن در جدول ۵ آمده است. در پروتوتایپ میزان وزن پره‌ها و روتور توربین ۲۰۰ تن می‌باشد و چون وزن در قوانین مقیاس با توان سوم ضریب مقیاس تبدیل می‌شود پس در مدل از یک وزنه ۲۰۰ گرمی در بالای ستون توربین به عنوان وزن پره‌ها و روتور توربین استفاده شده است. به دلیل اینکه در واقعیت انتهای مونوپایل استفاده شده به عنوان فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی به لایه سخت برخورد نمی‌کند، بنابراین در مدل‌سازی صورت گرفته نیز شمع به صورت اتکایی نبوده و اثر عملکرد اصطکاکی آن غالب است. از جمله مشخصات دارای اهمیت در پژوهش‌های لرزه‌ای، فرکانس طبیعی روسازه است. هرچند مقیاس کردن تمامی موارد به طور دقیق مقدور نیست ولی در این پژوهش سعی شده است تا انتخاب مصالح و تبدیل ابعاد

4. Accelerometer (ACC)

5. Pore Water Pressure Transducer (PWP)

6. Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

1. Prototype

2. Horns Rev1

3. Dry Deposition Method

Table 5. Tests program in saturated and dry conditions

۳- بحث و بررسی نتایج

در رابطه با طراحی لرزه‌ای توربین‌های بادی متکی بر مونوپایل و بررسی رفتار لرزه‌ای آن‌ها، میزان کج‌شدگی ماندگار و بیشترین شتاب وارد بر روسازه توربین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده پرداخته می‌شود و تاثیر شتاب و فرکانس تحریک و همچنین شرایط اشباع و خشک بر موارد مذکور بررسی می‌شود.

۳-۱- شتاب لایه‌های خاک و روسازه

با توجه به بارگذاری‌های انجام شده در آزمایش‌ها با شتاب و فرکانس تحریک متفاوت، در شکل ۷ میزان بزرگنمایی شتاب در لایه‌های خاک و قسمت بالای روسازه نشان داده شده است. در شکل ۷ الف) که مربوط به شرایط اشباع می‌باشد مشاهده می‌شود که میزان شتاب در لایه‌های خاک از پایین به سمت بالا افزایش یافته است. به طور کلی هرچه فرکانس بار اعمالی بر نمونه کمتر بوده، میزان بزرگنمایی شتاب در لایه‌های سطحی خاک بیشتر است. همچنین عمق لایه‌ای که در آن بزرگنمایی شتاب قابل توجه است، با کاهش فرکانس بارگذاری افزایش یافته است. تاثیر میزان شتاب تحریک بر میزان بزرگنمایی شتاب در لایه‌های خاک به طور واضح مشخص نیست و به نظر می‌رسد شتاب بار ورودی تاثیری بر میزان بزرگنمایی شتاب در لایه‌های خاک در حالت اشباع ندارد. در رابطه با میزان بزرگنمایی شتاب روسازه در شرایط اشباع نیز تاثیر فرکانس بار ورودی به وضوح مشخص بوده و کاهش فرکانس بار ورودی سبب افزایش بزرگنمایی شتاب روسازه شده است. بزرگنمایی شتاب روسازه در فرکانس‌های ۱۰Hz، ۵Hz و ۳Hz به طور میانگین و به ترتیب برابر با ۱/۴۳، ۳/۶۹ و ۵/۲۴ است. تاثیر شتاب تحریک بر بزرگنمایی شتاب روسازه نیز به این صورت بوده است که با افزایش شتاب بار ورودی میزان بزرگنمایی شتاب روسازه نیز افزایش یافته است.

شکل ۶. بارگذاری‌های هارمونیک سینوسی اعمالی بر نمونه‌های اشباع و خشک

همچنین سه جابه‌جایی سنج دیگر نیز برای ثبت جابه‌جایی افقی سرشمع، جابه‌جایی افقی شمع در سطح خاک و نشست سطح خاک در نزدیکی شمع نصب شد. پس از جانمایی تمام سنسورها در محل، همگی سنسورها به دیتالاگر متصل شده و بار هارمونیک سینوسی مربوط به هر آزمایش به نمونه‌ها اعمال شد.

شکل ۵. ابزارگذاری آزمایش

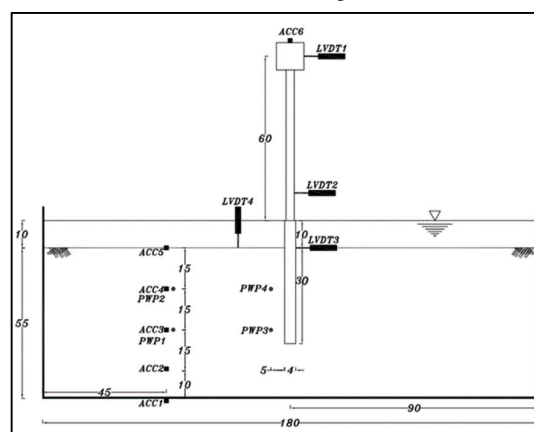


Fig. 5. Test instrumentation

۳-۲- برنامه آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مطابق با جدول ۶ می‌باشد. این آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر شتاب و فرکانس تحریک بر عملکرد لرزه‌ای توربین بادی متکی بر مونوپایل در محیط اشباع و خشک انجام شده‌اند. در واقع در این پژوهش ۹ بارگذاری هارمونیک سینوسی با فرکانس و بیشترین شتاب متفاوت یک بار در شرایط اشباع و یک بار در شرایط خشک به نمونه‌های مشابه ساخته شده اعمال شده‌اند. در شکل ۶ بارگذاری‌های هارمونیک سینوسی وارد بر نمونه‌های اشباع و خشک نشان داده شده است.

جدول ۶. برنامه آزمایش‌های انجام شده در شرایط اشباع و خشک

Maximum Acceleration (g)	Frequency (Hz)	Test No.
0.2, 0.3, 0.4	10Hz	1, 2, 3
	5Hz	4, 5, 6
	3Hz	7, 8, 9

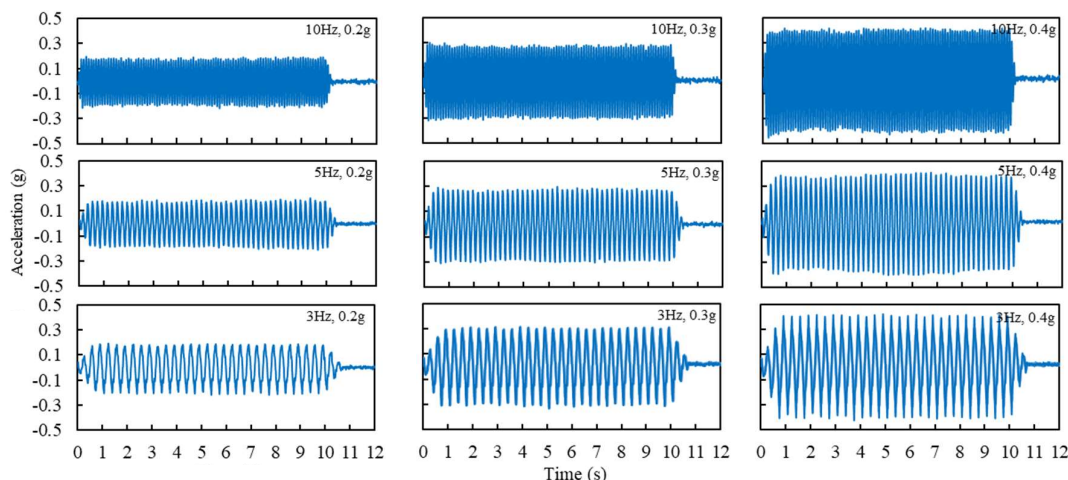


Fig. 6. Sinusoidal harmonic loadings applied to saturated and dry samples

شکل ۷. بزرگنمایی شتاب در لایه‌های خاک و روسازه الف) شرایط اشباع

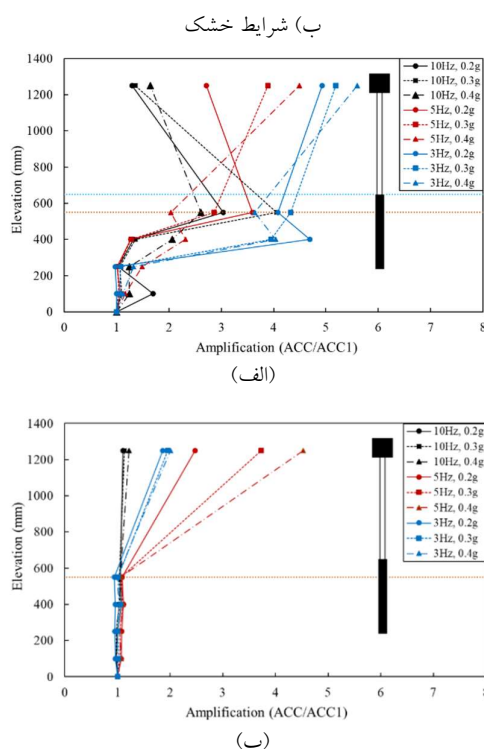


Fig. 7. Amplification of soil layers and superstructure a) saturated condition, b) dry condition

همانطور که در حالت اشباع نیز به آن اشاره شده این موضوع می‌تواند به علت نزدیک بودن فرکانس روسازه به فرکانس تحریک ۵Hz و وقوع پدیده تشدید باشد. با توجه به اینکه مونوپایل قرار گرفته در خاک در شرایط خشک نسبت شرایط اشباع به اتصال گیردار در پایین برج نزدیک تر است، پس فرکانس طبیعی روسازه در حالت خشک به مقدار ۵Hz نزدیک تر

اختلاف بین میزان بزرگنمایی‌ها تحت شتاب‌های تحریک متفاوت در فرکانس ۵Hz از دو فرکانس دیگر بیشتر است. این موضوع می‌تواند به علت نزدیک بودن فرکانس طبیعی روسازه به مقدار ۵Hz باشد. زیرا بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش، فرکانس طبیعی روسازه در مدل، در حالتی که در قسمت پایین برج به صورت کامل گیردار باشد نزدیک به ۵Hz است. عدم استدلال قاطع در این باره به این علت است که به دلیل قرارگیری مونوپایل در خاک و وابسته بودن سختی سازه به شرایط گیرداری در خاک، میزان فرکانس طبیعی روسازه با توجه به شرایط خاک متفاوت است. به عنوان نمونه پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی سازه‌های متکی بر مونوپایل در شرایط اشباع کمتر از شرایط خشک است، همچنین با افزایش شتاب بار اعمالی بر نمونه، میزان فرکانس طبیعی روسازه کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل کاهش مقاومت خاک و کاهش مقاومت برشی در خاک است [37, 38].

در شکل ۷ ب) نتایج مربوط به نمونه‌های خشک آمده است. میزان بزرگنمایی شتاب در لایه‌های خاک در نمونه‌های خشک بسیار کم بوده و حتی در لایه‌های سطحی نیز بیش از ۲۰ درصد افزایش وجود ندارد، در حالیکه در نمونه‌های اشباع این مقدار به حدود ۵ برابر هم می‌رسد. در رابطه با بزرگنمایی شتاب روسازه در حالت خشک به صورت واضح مشاهده می‌شود که بزرگنمایی شتاب و میزان اختلاف آن برای شتاب‌های تحریک متفاوت برای فرکانس ۵Hz بیشتر از دو فرکانس ۱۰Hz و ۳Hz می‌باشد.

یکدیگر نزدیک می‌شوند. به طور میانگین در فرکانس ۳Hz میزان بزرگنمایی شتاب روسازه در حالت اشباع ۳/۵ برابر حالت خشک است در حالی که این عدد برای فرکانس ۱۰Hz برابر با ۱/۲۵ می‌باشد.

۳-۲- جابه‌جایی روسازه

از دیگر موارد دارای اهمیت در طراحی توربین‌های بادی فراساحلی می‌توان به بیشترین جابه‌جایی و ماندگاری جانبی توربین اشاره کرد. در شکل ۹ نمودارهای جابه‌جایی-زمان مربوط به بارگذاری‌های مختلف نشان داده شده است. در هر نمودار دو منحنی مربوط به حالت اشباع و خشک در کنار هم آمده اند. برای نمایش و مقایسه میزان جابه‌جایی حداکثر و جابه‌جایی ماندگار به صورت واضح‌تر، نمودار این دو پارامتر برای شرایط خشک و اشباع در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ الف) در دو فرکانس تحریک ۱۰Hz و ۳Hz همواره میزان بیشترین جابه‌جایی بالای توربین در حالت اشباع بیشتر بوده است ولی در فرکانس تحریک ۵Hz بیشترین جابه‌جایی مربوط به حالت خشک می‌باشد. به همان علت که در حالت قسمت قبل به آن اشاره شد در فرکانس تحریک ۵Hz در حالت خشک پدیده تشدید رخ داده است.

بوده و پدیده تشدید با شدت بیشتری نسبت به شرایط اشباع رخ داده است.

برای بررسی دقیق‌تر میزان بزرگنمایی شتاب روسازه و مقایسه آن در دو حالت خشک و اشباع، در شکل ۸ نتایج مربوط به آن نشان داده شده است.

شکل ۸. بزرگنمایی شتاب روسازه در شرایط خشک و اشباع

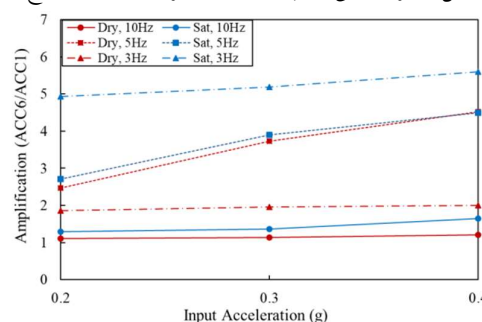


Fig. 8. Amplification of superstructure

با چشم‌پوشی از نتایج مربوط به فرکانس تحریک ۵Hz به دلیل وقوع پدیده تشدید در آن و بر اساس نتایج مربوط به دو فرکانس تحریک دیگر می‌توان گفت در فرکانس‌های پایین، میزان بزرگنمایی شتاب روسازه در حالت خشک بسیار کمتر از حالت اشباع می‌باشد و با افزایش فرکانس بار اعمالی، اختلاف میزان بزرگنمایی در شرایط خشک و اشباع کاهش می‌یابد و به

شکل ۹. نمودارهای جابه‌جایی-زمان روسازه تحت بارگذاری‌های مختلف

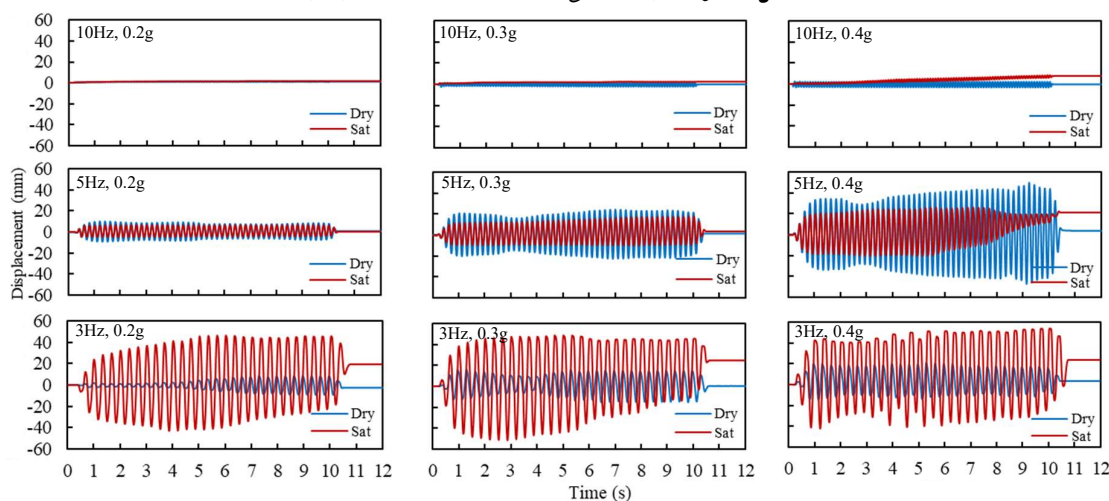


Fig. 9. Displacement-time diagrams of superstructure under different loadings

همچنین به طور کلی می توان گفت که افزایش شتاب و کاهش فرکانس بار اعمالی به نمونه سبب افزایش بیشترین جابه جایی قسمت بالای توربین بادی می شود. بر اساس شکل ۱۰ ب) می توان گفت که همواره جابه جایی ماندگار در حالت اشباع بیشتر از حالت خشک است. همچنین در حالت اشباع افزایش شتاب و کاهش فرکانس تحریک سبب افزایش جابه جایی ماندگار می شود. این افزایش در مقادیر بالای شتاب و مقادیر پایین فرکانس تحریک مشهودتر است. در حالت خشک، شتاب و فرکانس تحریک تاثیر قابل توجهی بر جابه جایی ماندگار ندارد.

همچنین به طور کلی می توان گفت که افزایش شتاب و کاهش فرکانس بار اعمالی به نمونه سبب افزایش بیشترین جابه جایی قسمت بالای توربین بادی می شود. بر اساس شکل ۱۰ ب) می توان گفت که همواره جابه جایی ماندگار در حالت اشباع بیشتر از حالت خشک است. همچنین در حالت اشباع افزایش شتاب و کاهش فرکانس تحریک سبب افزایش جابه جایی ماندگار می شود. این افزایش در مقادیر بالای شتاب و مقادیر پایین فرکانس تحریک مشهودتر است. در حالت خشک، شتاب و فرکانس تحریک تاثیر قابل توجهی بر جابه جایی ماندگار ندارد.

شکل ۱۱. میزان اضافه فشار آب حفره ای بر حسب شتاب تحریک از

حسگر PWP4

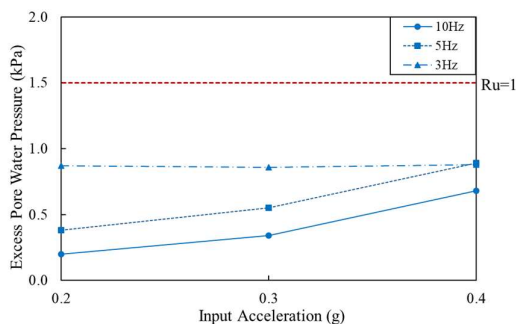


Fig. 11. Excess pore water pressure-input Acceleration diagrams of PWP4

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر شتاب و فرکانس تحریک بر عملکرد لرزه ای توربین بادی فراساحلی پرداخته شد و پس از بررسی نتایج، موارد زیر به عنوان مهم ترین نتایج این پژوهش ارائه می شود.

۱- مقدار بزرگنمایی شتاب روسازه در حالت اشباع نسبت به حالت خشک بیشتر است. همچنین با کاهش فرکانس تحریک، مقدار بزرگنمایی شتاب روسازه افزایش می یابد.

۲- مقادیر بیشترین جابه جایی و جابه جایی ماندگار روسازه در حالت اشباع همواره بیشتر از حالت خشک است. بیشترین جابه جایی در حالت خشک و اشباع و همچنین جابه جایی

شکل ۱۰. جابه جایی روسازه بر حسب شتاب تحریک (الف) جابه جایی

حداکثر و ب) جابه جایی ماندگار

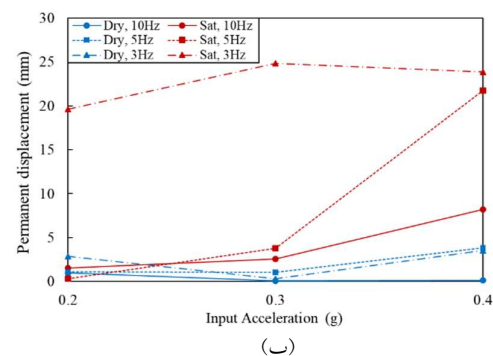
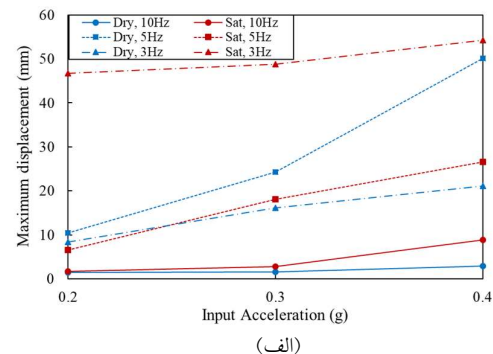


Fig. 10. Displacement-Input Acceleration diagrams of superstructure a) Maximum, b) permanent

هر چند در این مقاله بررسی مقادیر اضافه فشار آب حفره ای و روانگرایی مطرح نیست ولی به دلیل اینکه مشخص شود روانگرایی بر نتایج حاصل شده تاثیرگذار بوده است یا خیر، برای تمامی نمونه ها در حالت اشباع، میزان حداکثر اضافه فشار آب

- [7] Katsanos, E. I., Thöns, S., & Georgakis, C. T. (2016). Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review. *Wind Energy*, 19(11), 2113-2133.
- [8] DNV, Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV-OS-J101, Det Norske Veritas (DNV), Oslo, 2014.
- [9] IEC, Wind turbines-Part 3, Design Requirements for Offshore Wind Turbines, IEC 614000-3, International Electrotechnical Commission (IEC), 1211, Geneva, 2009, 20 Switzerland.
- [10] Zuo H, Bi K, Hao H. Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards. *Eng Struct* 2017;141:303-15.
- [11] Hacıfendioğlu K. Stochastic seismic response analysis of offshore wind turbine including fluid-structure-soil interaction. *Struct Des Tall Spec Build* 2012;21:867-78.
- [12] Li C, Hao H, Li H, Bi K. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at seafloor. *Soil Dyn Earthq Eng* 2015;77:220-5.
- [13] Mo, R., Kang, H., Li, M., & Zhao, X. (2017). Seismic fragility analysis of monopile offshore wind turbines under different operational conditions. *Energies*, 10(7), 1037.
- [14] Wang, X., Zeng, X., Yang, X., & Li, J. (2018). Feasibility study of offshore wind turbines with hybrid monopile foundation based on centrifuge modeling. *Applied energy*, 209, 127-139.
- [15] Austin, S., & Jerath, S. (2017). Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3), 323-331.
- [16] Zhao, X., & Maissner, P. (2006). Seismic response analysis of wind turbine towers including soil-structure interaction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 220(1), 53-61.
- [17] Sapountzakis, E. J., Dikaros, I. C., Kampitsis, A. E., & Koroneou, A. D. (2015). Nonlinear response of wind turbines under wind and seismic excitations with soil-structure interaction. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 10(4), 041007.
- [18] Wang, X., Zeng, X., Yang, X., & Li, J. (2019). Seismic response of offshore wind turbine with hybrid monopile foundation based on centrifuge modelling. *Applied energy*, 235, 1335-1350.
- [19] Yu, H., Zeng, X., Li, B., & Lian, J. (2015). Centrifuge modeling of offshore wind foundations under earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 402-415.
- [20] Anastasopoulos, I., & Theofilou, M. (2016). Hybrid foundation for offshore wind turbines: Environmental and seismic loading. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 80, 192-209.
- [21] Kim, D. H., Lee, S. G., & Lee, I. K. (2014). Seismic fragility analysis of 5 MW offshore wind turbine. *Renewable energy*, 65, 250-256.
- [22] Zheng, X. Y., Li, H., Rong, W., & Li, W. (2015). Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: An experimental study. *Marine Structures*, 44, 125-141.

ماندگار در حالت اشباع با افزایش شتاب تحریک و کاهش فرکانس تحریک افزایش می‌یابد، ولی این موارد تاثیر قابل توجهی بر جابه‌جایی ماندگار در حالت خشک ندارد.

۳- با افزایش فرکانس تحریک، اختلاف بین عملکرد لرزه‌ای توربین در حالت خشک و اشباع کاهش یافته به طوری‌که در فرکانس‌های تحریک زیاد، شرایط خشک و اشباع خاک تاثیر قابل توجهی بر عملکرد لرزه‌ای توربین بادی ندارد.

۴- از جمله عوامل تاثیر گذار بر رفتار لرزه‌ای توربین متکی بر مونوپایل می‌توان به پدیده تشدید اشاره کرد. در صورتی‌که فرکانس بار اعمالی به نمونه با فرکانس طبیعی روسازه در حالت متکی بر مونوپایل برابر باشد، پدیده تشدید رخ داده و حالت بحرانی رفتار لرزه‌ای روسازه رخ می‌دهد. باید به این موضوع توجه شود که فرکانس طبیعی روسازه به شرایط خاک وابسته است و در حالت خشک و اشباع متفاوت است.

۵- به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که رفتار لرزه‌ای توربین بادی متکی بر مونوپایل در حالت اشباع بحرانی‌تر از حالت خشک بوده و همچنین وقوع پدیده تشدید بحرانی‌ترین حالت را در شرایط لرزه‌ای ایجاد می‌کند.

۵- مراجع

- [1] Abdel-Rahman, K., & Achmus, M. (2005, October). Finite element modelling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany. In *Proceedings of the international symposium on frontiers in offshore geotechnics*. Taylor and Francis, Perth (pp. 391-396).
- [2] Yan, Y., Yang, Y., Bashir, M., Li, C., & Wang, J. (2022). Dynamic analysis of 10 MW offshore wind turbines with different support structures subjected to earthquake loadings. *Renewable Energy*, 193, 758-777.
- [3] Natarajan, K., & Madabhushi, G. S. (2022). Seismic response of an offshore wind turbine jacket structure with pile foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 162, 107427.
- [4] Li, X., Zeng, X., Yu, X., & Wang, X. (2021). Seismic response of a novel hybrid foundation for offshore wind turbine by geotechnical centrifuge modeling. *Renewable Energy*, 172, 1404-1416.
- [5] Kallehave, D., Byrne, B. W., LeBlanc Thilsted, C., & Mikkelsen, K. K. (2015). Optimization of monopiles for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2035), 20140100.
- [6] Ramirez, L., Fraile, D., & Brindley, G. (2020). Offshore wind in Europe: Key trends and statistics 2019.

- [31] Memary, F., "Centrifuge modeling of monopile under lateral loading in calcareous sand", M.Sc. Thesis, University of Tehran. (1398/2019). (In Persian).
- [32] Malakshah, R. R., "Centrifuge modeling of monopile under lateral loading in calcareous sand", PhD. Thesis, University of Tehran. (1401/2023). (In Persian).
- [33]. Park JJ. Estimation of the Ground Acceleration Amplification of Soil-Pile System in Weathered Soil. Seoul: Yonsei University; 2022. [Ph. D dissertation]
- [34]. Kim, H., Kim, D., Lee, Y., & Kim, H. (2020). Effect of soil box boundary conditions on dynamic behavior of model soil in 1 g shaking table test. *Applied Sciences*, 10(13), 4642.
- [35]. Iai, S., Tobita, T., & Nakahara, T. (2005). Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests. *Geotechnique*, 55(5), 355-362.
- [36]. Negro, V., López-Gutiérrez, J. S., Esteban, M. D., Alberdi, P., Imaz, M., & Serrallara, J. M. (2017). Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions. *Ocean Engineering*, 133, 253-261.
- [37] Yang, E. K., Choi, J. I., Kwon, S. Y., & Kim, M. M. (2011). Development of dynamic py backbone curves for a single pile in dense sand by 1g shaking table tests. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, 813-821.
- [38] Lim, H., & Jeong, S. (2018). Simplified py curves under dynamic loading in dry sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 101-111.
- [23] Asareh, M. A., Schonberg, W., & Volz, J. (2016). Effects of seismic and aerodynamic load interaction on structural dynamic response of multi-megawatt utility scale horizontal axis wind turbines. *Renewable energy*, 86, 49-58.
- [24] Witcher, D. (2005). Seismic analysis of wind turbines in the time domain. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 8(1), 81-91.
- [25] Shirzadeh, N., "Physical modeling of monopile under lateral load in geotechnical centrifuge", M.Sc. Thesis, University of Tehran. (1393/2014). (In Persian).
- [26] Khodaei, H., "Physical modeling of pile under lateral load in geotechnical centrifuge", M.Sc. Thesis, University of Tehran. (1393/2014). (In Persian).
- [27] Jomehri, F., "Centrifuge modeling of monopile under lateral cyclic load in sand", M.Sc. Thesis, University of Tehran. (1395/2016). (In Persian).
- [28] Shahidikhah, M., "Centrifuge modeling of monopile under cyclic lateral loads", M.Sc. Thesis, University of Tehran. (1396/2017). (In Persian).
- [29] Alamouti, S. D., "analysis and evaluation of dynamic characteristics of offshore monopile supported wind turbines considering experimental pile load tests in sand", PhD. Thesis, University of Tehran. (1397/2018). (In Persian).
- [30] Khamse, A., "Centrifuge modeling of monopile under cyclic lateral loads using load control system", M.Sc. Thesis, University of Tehran. (1397/2018). (In Persian).

Effects of acceleration and frequency of input motion on the seismic behavior of offshore wind turbine supported by monopile

A.Bateni¹, M.Moradi^{2*}

1- M.Sc., Geotechnical Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tehran

2- Associate Prof., Faculty of Civil Eng., University of Tehran

*mmoradi@ut.ac.ir

Abstract:

In recent years, the surge in pollutants from fossil fuels has prompted a heightened emphasis on transitioning to clean and renewable energies, with a particular focus on wind power. The deployment of offshore wind turbines stands out as a prominent approach to harnessing wind energy. However, these turbines consistently endure cyclic loading induced by wind, waves, and ocean currents, necessitating foundations that exhibit robust resistance to such repeated stress. Offshore wind turbines are commonly mounted on monopiles, singular tubular structures with diameters ranging from 2 to 8 meters. While these turbines were initially deployed in Europe, their utilization has expanded to seismically active regions such as USA, China and Japan in recent years, owing to their numerous advantages. As a result, their seismic behavior has become a subject of interest. The seismic design of these turbines, similar to other structures, should be based on past earthquakes in the region and adapted to saturated conditions. Until now, a multitude of studies has delved into these turbines, predominantly through numerical research. However, the scarcity of experimental investigations into their seismic behavior has left the impacts of acceleration and frequency of input motion on their design not thoroughly explored. Furthermore, in certain instances, the design of these turbines makes reference to regulations designed for dry conditions. This research investigates the impact of acceleration and frequency of input motion on the seismic response of offshore wind turbines through 9 experiments conducted on samples using a 1g shaking table. Various input motion with different acceleration and frequencies were applied under both dry and saturated conditions, allowing for a comprehensive comparison of turbine behavior. The modeling process included creating a soil environment with specific dimensions through dry deposition and compaction, followed by the embedding of sensors for measuring acceleration and pore water pressure. After these initial steps, the monopile was vertically drove into the soil, and the superstructure was assembled. Displacement sensors were installed to capture the superstructure's displacement at different heights and to measure the settlement of the soil surface on the samples. Then the sample started to be saturated from the bottom of the box and water was placed on the soil surface up to 10 cm to model sea water. Subsequently, harmonic sinusoidal loading was applied, with 9 loadings featuring frequencies of 10 Hz, 5 Hz, and 3 Hz, along with maximum accelerations of 0.2 g, 0.3 g, and 0.4 g, respectively. As indicated by the findings of this research, turbine seismic behavior becomes significantly more critical during resonance phenomena in the most critical state, with the impact of other factors on seismic performance proving negligible in such instances. Moreover, the seismic behavior of these turbines consistently exhibits more critical behavior in saturated conditions compared to dry conditions. In saturated conditions, acceleration amplification in surface soil layers is up to 5 times, profoundly influencing seismic performance, whereas in dry conditions, amplification is limited to 1.2 times. Additionally, as excitation acceleration rises and excitation frequency decreases, the superstructure's maximum acceleration and the turbine's maximum and permanent displacement all increase, signifying a more critical behavior of this structure.

Keywords: Offshore wind turbine, Seismic behavior, Shaking table, Input motion, Saturated and dry condition.