

بررسی اثر عمق مدفون و قطر تک‌شمع بر عملکرد لرزه‌ای توربین بادی فراساحلی با انجام مدل‌سازی فیزیکی

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

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- alireza.bateni@ut.ac.ir

۲- mmoradi@ut.ac.ir

چکیده:

در دهه‌های اخیر استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد به وسیله توربین‌های بادی فراساحلی مورد توجه قرار گرفته است. گسترش استفاده از این توربین‌ها سبب نصب آن‌ها در مناطق لرزه‌خیز نیز گردیده است. اغلب برای پی این توربین‌ها که در محیط دریا در معرض بارهای سیکلیک مانند باد، موج و جریان‌های دریایی قرار دارند از مونوپایل استفاده می‌شود. در این پژوهش با انجام ۶ آزمایش در محیط 1g به بررسی اثر عمق مدفون، قطر و خشک و اشباع بودن خاک بر عملکرد لرزه‌ای مونوپایل پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری مونوپایل در محیط اشباع نسبت به خشکی سبب تضعیف عملکرد لرزه‌ای می‌شود و افزایش عمق مدفون نیز در ابتدا تا طولی مشخص سبب بهبود و در طول‌های بیشتر از آن سبب تضعیف عملکرد لرزه‌ای می‌شود. همچنین افزایش ۵۷ درصدی قطر مونوپایل سبب افزایش ۲۴ درصدی شتاب روسازه، و افزایش ۴۰ درصدی جابه‌جایی ماندگار می‌شود که نشان‌دهنده تضعیف عملکرد لرزه‌ای است.

واژگان کلیدی:

مونوپایل، توربین‌های بادی فراساحلی، مدل‌سازی فیزیکی، عملکرد لرزه‌ای.

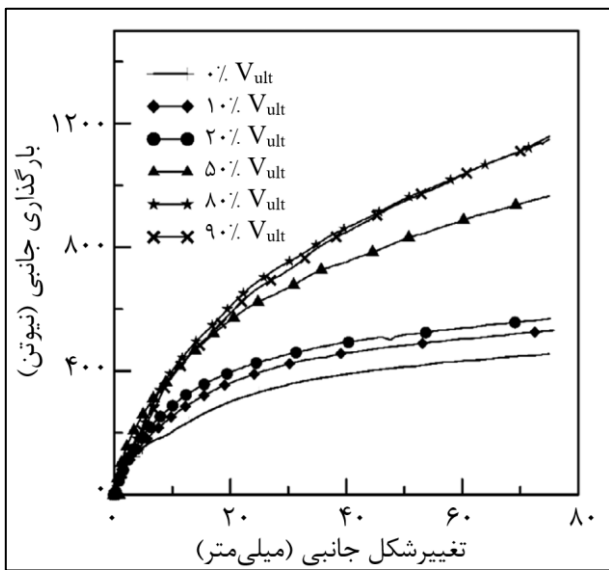
* مجید مرادی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
ایمیل: mmoradi@ut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Investigating the effect of driven length and diameter of monopile on seismic performance of offshore wind turbines through Physical Modeling

Abstract:

Global warming and its following environmental problems have led to increased attention to the use of renewable energy sources in most countries around the world, and wind energy has emerged as a significant contributor. The use of wind energy, through offshore wind turbines, is one of the clean energy harvesting methods that initially began in Europe. Offshore wind turbines, due to their larger size and higher wind speeds, have gained popularity worldwide, including seismic areas such as the United States and Southeast Asia, especially China. These turbines are located in marine environments and are subject to cyclic loads caused by wind, waves, and ocean currents. Monopiles, cylindrical hollow piles with diameters ranging from 3 to 8 meters and lengths of approximately 70 meters, are widely used for the installation of offshore wind turbines. The design regulations for these turbines often overlook influential factors such as soil-structure interaction and refer to seismic design guidelines for onshore turbines. In this research, the seismic performance of monopiles has been investigated by conducting six experiments using a shaking table in a 1g condition. The effects of driven length and monopile diameter were analyzed, along with the impact of the installation medium being either saturated or dry. Various parameters, including ground motion acceleration, displacement, and induced excess pore water pressure, were scrutinized in this study. The results indicate that the saturated environment weakens their seismic performance, therefore, the seismic design considerations for monopiles, based on the existing guidelines for dry structures, are inadequate. Furthermore, increasing the monopile diameter by 57% causes a 24% increase in the acceleration of the superstructure, a 40% increase in the cumulative displacement and a 30% decrease in the average maximum displacement of the cycles during loading. It was also observed that by increasing or decreasing the driven length about 15% compared to the driven length of the base monopile, the acceleration value of the superstructure increases by more than 20% and the cumulative displacement value decreases by about 60%. And the average maximum displacement of the cycles decreases by 30% with an increase of 33% in the driven length.

Keywords: Monopile, Offshore wind turbine, Physical Modeling, Seismic performance.



شکل ۳. باربری جانبی مونوپایل بر حسب جابه‌جایی بالای آن تحت بارهای قائم متغیر، (مو و همکاران، ۲۰۱۸)

سئونگ^۴ و همکاران (۲۰۱۷)، پژوهشی را برای تخمین فرکانس طبیعی توربین‌های بادی فراساحلی انجام دادند. در این پژوهش تفاوت فرکانس طبیعی ۹ مدل توربین بادی در حالتی که تکیه‌گاه صلب^۵ دارند و حالتی که اندرکنش خاک و زیرسازه وجود دارد با هم مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد فرکانس طبیعی سیستم در شرایط وجود اندرکنش خاک و سازه به میزان قابل توجهی (حدود ۲۵ درصد) کاهش می‌یابد. این تغییر در شکل ۴ نمایش داده شده است. همچنین سئونگ و کیم (۲۰۱۹)، رفتار توربین بادی فراساحلی متکی بر مونوپایل، مونوپاد و تریپاد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد روش‌های متداول طراحی لرزه‌ای در تخمین شتاب حداکثر روسازه نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده (در هر سه نوع زیرسازه) تخمینی دست پایین ارائه می‌کند. این مساله نشان می‌دهد روش‌های متداول کنونی ممکن است منجر به طراحی‌های غیر ایمن در طراحی لرزه‌ای سازه توربین‌های بادی فراساحلی گردند.

فنی، نتایج دقیقی برای توربین‌های امروزی ارائه نمی‌دهند (پادرون^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

به‌دلیل هزینه بالای آزمایش‌های بزرگ مقیاس، در این پژوهش رفتار لرزه‌ای مونوپایل‌هایی که به عنوان فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند تحت اثر تغییرات قطر و طول آن‌ها در خاک ماسه‌ای به کمک مدل‌سازی فیزیکی میز لرزه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نتایج مربوط به ۶ آزمایش ارائه شده و در رابطه با رفتار لرزه‌ای مونوپایل‌ها بحث شده است.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در رابطه با پی توربین‌های بادی فراساحلی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از این موارد که مرتبط با موضوع این مقاله است اشاره می‌شود. مو^۲ و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی به رفتار مونوپایل‌ها در خاک ماسه‌ای تحت اثر همزمان بار قائم و جانبی پرداختند. آن‌ها رفتار یک مدل از مونوپایلی به قطر ۶ متر را تحت اثر بار قائم به مقدار ۰ تا ۹۰٪ ظرفیت باربری نهایی قائم (V_{ult}) آن مورد مطالعه قرار دادند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است نتایج این پژوهش، افزایش ظرفیت باربری جانبی تحت اثر بار قائم را تایید می‌کند. یو^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، تعدادی آزمایش برای مدل‌سازی شرایط لرزه‌ای توربین‌های بادی به همراه زیرسازه آن در دستگاه سانتریفیوژ و در شتاب ۵۰g انجام دادند. در این مطالعه دو زیرسازه پی وزنی و مونوپایل متکی بر بستر مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد زیرسازه وزنی به علت وزن زیاد متمرکز در پایین سازه و سطح تماس بزرگ‌تر با خاک، مقاومت لرزه‌ای بهتری دارد ولی نشست سازه متکی بر پی وزنی در اثر بار لرزه‌ای بیشتر بوده است. مشکل اصلی این پژوهش آن است که در اکثر مدل‌سازی‌ها، مونوپایل از نوع اتکایی در نظر گرفته شده است. در شرایط فراساحلی به‌ندرت این شرایط پیش می‌آید و معمولاً مونوپایل‌ها اتکایی نیستند.

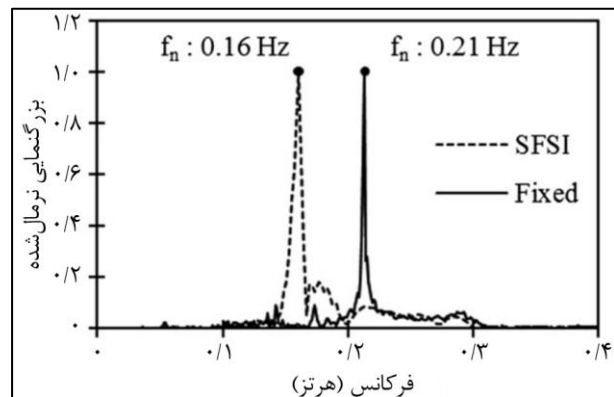
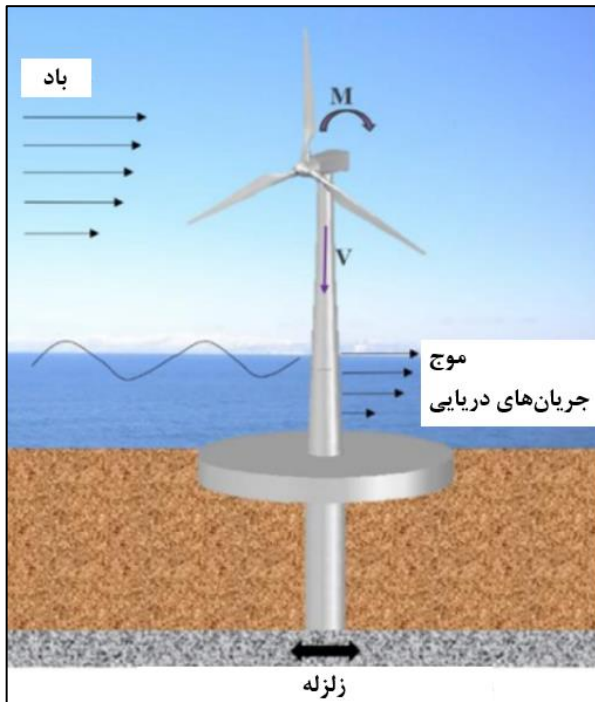
^۴ Seong

^۵ . Fixed-based

^۱ Padron

^۲ . Mu

^۳ Yu



شکل ۴. پاسخ فرکانسی نرمال شده سیستم‌های با تکیه‌گاه صلب و با اندرکنش خاک و زیرسازه، (سئونگ و همکاران، ۲۰۱۷)

لبلانک^۱ و همکاران (۲۰۱۰)، با انجام آزمایش‌هایی که بر روی شمع‌های با نسبت لاغری ۴/۵ در خاک‌های ماسه‌ای شل و دارای تراکم متوسط و غیراشباع انجام داد در هر آزمایش این شمع‌ها را در معرض ۸۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار داد. در بارگذاری‌های سیکلیک در هنگام آزمایش با افزایش سیکل‌های بارگذاری افزایش قابل توجهی در چرخش تجمعی^۲ شمع‌ها مشاهده گردید که افزایش سختی خاک را نیز به همراه داشت. نتایج پژوهش لبلانک با روش‌های لانگ^۳ و ونست^۴ (۱۹۹۴)، و اکموس^۵ و همکاران (۲۰۰۹)، در تناقض بود زیرا در پژوهش‌های آن‌ها نمودارهای بار-جاب‌جایی در حالت سیکلیک کاهش پیدا می‌کنند. در سال‌های اخیر وانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۹)، با ترکیب پی سطحی و پی عمیق، یک پی جدید برای توربین‌های بادی فراساحلی پیشنهاد کرده‌اند و در مقالات مختلف به بررسی عملکرد آن پرداخته‌اند. آن‌ها پی پیشنهادی خود را تحت عنوان مونوپایل ترکیبی^۷ ارائه داده‌اند. شکل ۵ نمایی از این پی را نشان می‌دهد. در این پژوهش مدل‌سازی فیزیکی مونوپایل ترکیبی تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای در دستگاه سانتریفیوژ نیز انجام شد. اهم نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- تغییر مکان جانبی و دوران مونوپایل ترکیبی تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای نسبت به مونوپایل معمولی به میزان قابل توجهی کمتر است.

شکل ۵. تصویر شماتیک توربین بادی فراساحلی متکی بر مونوپایل ترکیبی تحت تاثیر بارهای محیطی، (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹)

- نشست سطح زمین در مونوپایل ترکیبی بسیار بیشتر از آزمایش‌های زمین آزاد می‌باشد. دلیل این مسئله ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافی و تأثیر وزن مونوپایل ترکیبی است.

- ماسه خشک نسبت به ماسه اشباع مقاومت بیشتری در شرایط لرزه‌ای دارد.

- تغییر مکان جانبی و نشست سطح زمین در آزمایش‌های خاک اشباع بیشتر از آزمایش‌های خاک خشک است. دلیل این موضوع ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای می‌باشد. خاک اطراف مونوپایل در شرایط لرزه‌ای روانگرا شده ولی خاک اطراف مونوپایل ترکیبی به علت افزایش تنش همه‌جانبه روانگرا نشده است.

همچنین وانگ و همکاران (۲۰۲۰)، رفتار چند نوع پی مربوط به توربین‌های بادی فراساحلی را بررسی کردند. این پی‌ها شامل

^۵ . Achmus

^۶ . Wang

^۷ . Hybrid Monopile

^۱ . LeBlanc

^۲ . Cumulative Rotation

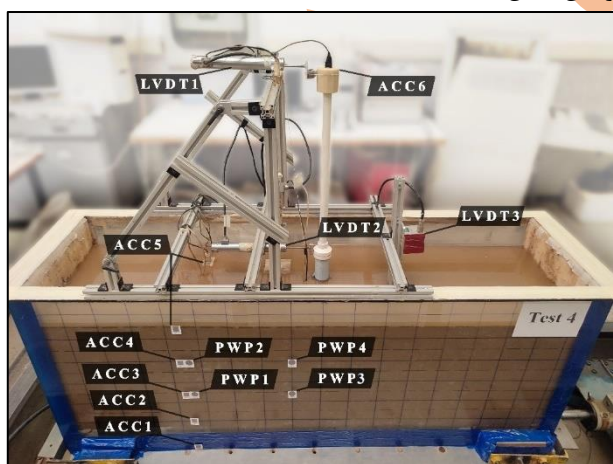
^۳ . Long

^۴ . Vanneste

۳ - مدل سازی

۳-۱ - طراحی مدل

در این پژوهش با توجه به بررسی اثر طول و قطر مونوپایل بر رفتار لرزه‌ای آن، یک مدل مونوپایل مبنا با نسبت عمق مدفون به قطر $7/5$ (انتخاب گردیده و مشخصات ۴ مدل مونوپایل دیگر نیز در جدول آمده است. در هر یک از آزمایش‌ها ۱۱ لایه خاک در لایه‌های ۵ سانتی‌متری ریخته شده و تا رسیدن به تراکم ۶۰ درصد متراکم گردیده اند. پس از اتمام ساخت نمونه خاک، مونوپایل مدل به صورت قائم تا عمق مدفون موردنظر در خاک کوبیده شده است. پس از کوبش مونوپایل، به نمونه، گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) تزریق می‌شود تا جایگزین هوا در خلل و فرج خاک شود. به دلیل اینکه این گاز نسبت به هوا قدرت انحلال بیشتری در آب دارد، در هنگام اشباع شدن نمونه با آب اگر در قسمتی از نمونه این گاز باقی بماند به راحتی در آب حل شده و نمونه به حالت اشباع کامل نزدیک‌تر می‌شود. سپس نمونه به تدریج و از پایین به بالا با آب اشباع می‌شود و ورود آب به نمونه تا زمانی که ۱۰ سانتی‌متر آب روی سطح خاک قرار گیرد ادامه می‌یابد. در این مرحله بارگذاری‌های مورد نظر به نمونه اعمال می‌گردند. در شکل ۶ مدل‌سازی انجام شده در آزمایش‌های این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۶. مدل‌سازی انجام شده در آزمایش‌ها

۱. مونوپایل، ۲. ترکیب مونوپایل و حلقه فولادی، ۳. ترکیب مونوپایل و حلقه شنی، ۴. حلقه فولادی و ۵. حلقه شنی بوده‌اند. با توجه به نتایج این پژوهش عملکرد پی ترکیبی با حلقه فولادی نسبت به سایر پی‌ها بسیار بهتر است.

تحقیقات لو^۱ (۲۰۱۵)، بر روی مونوپایل‌های با قطرهای متفاوت در خاک رسی در دستگاه سانتریفیوژ نتایج زیر را به همراه داشته است:

- با توجه به منحنی‌های لنگر بر حسب عمق مونوپایل، دوران مونوپایل حول نقطه‌ای در عمق حدود ۷۳ درصد طول فرورفت آن اتفاق می‌افتد. این عمق در مونوپایل‌های با قطر بزرگتر، بیشتر از مونوپایل‌های با قطر کوچک‌تر است.

- در اثر بارگذاری سیکلیک دو رژیم در مورد سختی مونوپایل‌ها مشاهده شد. با توجه به پارامترهای خاک رسی و شرایط بارگذاری در بیشتر حالات با افزایش تعداد سیکل، سختی افزایش می‌یابد. اما در برخی حالات نرخ کاهش سختی نیز مشاهده شده است.

با جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه که در این بخش معرفی شد می‌توان نتیجه گرفت که اکثر تحقیقات صورت گرفته در مورد رفتار لرزه‌ای توربین‌های بادی فراساحلی تا به امروز بر روی بخش فوقانی این سازه‌ها انجام شده است در صورتی که اندرکنش خاک و سازه نقش مهمی را در رفتار لرزه‌ای آن‌ها ایفا می‌کند (باتاچاریا^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). در رابطه با این توربین‌ها شایان ذکر است که طراحی آن‌ها بر اساس توربین‌های خشکی صورت می‌گیرد در صورتی که با توجه به شرایط اشباع و احتمال ایجاد روانگرایی، تفاوت زیادی در این دو مورد وجود دارد. مشخصات زیرسازه از جمله شکل، اندازه و وزن آن تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار لرزه‌ای کل سازه دارد (دشتی^۳ و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین در توربین‌های نسل جدید از یک طرف به دلیل افزایش اندازه توربین و وزن آن و از طرف دیگر به دلیل طراحی اقتصادی و کاهش وزن سازه، لاغری سازه و در نتیجه حساسیت آن به مسائل لرزه‌ای افزایش خواهد یافت (وندرتمپل^۴ و مولنار^۵، ۲۰۰۲).

^۴ Van der Tample

^۵ Molenaar

^۱ Lau

^۲ Bhattacharya

^۳ Dashti

۳-۲- تجهیزات

۳-۲-۱- میز لرزه دانشگاه تهران

میز لرزه آزمایشگاه دینامک خاک دانشکده فنی دانشگاه تهران که با استفاده از توان داخلی و همکاری شرکت پویس اندیش غرب ساخته شده است شامل قسمت‌های مختلفی از جمله عرشه، عملگر هیدرولیکی، واحد قدرت و سامانه کنترل و اندازه‌گیری است. تحریک ایجاد شده شامل یک واحد قدرت هیدرولیکی است. مجموعه به صورت دیجیتال کنترل و تمامی اطلاعات شامل تاریخچه زمانی موقعیت میز و نیروی وارد بر آن ذخیره می‌شود. میز لرزه موجود دارای یک درجه آزادی در راستای طولی نمونه آزمایش بوده که قابلیت مدل‌سازی بارگذاری طولی لرزه‌ای را فراهم می‌کند. این دستگاه قادر به اعمال لرزش بر روی مدل‌هایی با وزن حداکثر ۵ تن، شتاب حداکثر 1g و محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۱۵ هرتز است. حرکت‌های ورودی نیز شامل گستره وسیعی از انواع حرکات موج سینوسی، مثلثی، مربعی و تاریخچه زمانی دلخواه زلزله است. در شکل ۷ نمای کلی این میز لرزه نشان داده شده است.



شکل ۷. نمای کلی میز لرزه دانشگاه تهران

۳-۲-۲- محفظه خاکی

محفظه خاک این پژوهش دارای طول ۱۸۰، عرض ۴۵ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر است. وجوه این محفظه از صفحات پلکسی‌گلس به ضخامت ۲ سانتی‌متر ساخته شده است. در دو انتهای کف جعبه دو شیر تعبیه شده که می‌توان دی‌اکسیدکربن (CO_2) و آب را به نمونه وارد کرد. کف جعبه که ۲ سانتی‌متر بالاتر از سطح پلکسی‌گلس کف است با

در مدل‌های میز لرزه برای بررسی رفتار یک پدیده، مدل را از لحاظ هندسی کوچک‌تر از سازه‌های واقعی می‌سازند. اگر ضریب تشابه هندسی را λ بنامیم در این صورت برای کلیه ابعاد موجود بین مدل آزمایشگاهی و واقعی رابطه زیر برقرار است.

$$x_p = \lambda x_m \quad (5)$$

x_p ابعاد واقعی پروتوتایپ^۱ و x_m ابعاد مدل هستند. در حالت کلی با فرض مستقل بودن ضرایب تشابه λ ، با استفاده از ضرایب تشابه وزن مخصوص اشباع خاک λ_p و تشابه کرنش خاک اشباع λ_e بین مدل آزمایشگاهی و مدل واقعی روابطی برقرار می‌شود. در حالت خاص می‌توان فرض نمود که $\lambda_p = 1$ و $\lambda_e = 1$ باشد. در این شرایط روابط به صورت ارائه شده در جدول ۱ خواهد بود (یای^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). لازم به ذکر است که در این پژوهش نسبت تشابه برابر با ۱۰۰ می‌باشد.

در نظر گرفتن نسبت تشابه ۱۰۰ در این پژوهش به دلیل محدودیت‌های موجود و ابعاد محفظه آزمایش بوده، به گونه‌ای که تاثیر شرایط مرزی اطراف و کف محفظه بر عملکرد مونوپایل به حداقل برسد. تحقیقات لیو^۳ و همکاران (۲۰۱۱)، نشان می‌دهد که حداکثر محدوده تاثیر شمع بر خاک اطراف حدود ۶ تا ۹ برابر قطر شمع در جهت بارگذاری جانبی است. در این پژوهش علاوه بر اینکه فاصله تا مرزهای محفظه خاک رعایت شده است، در دیواره‌های محفظه در جهت بارگذاری لرزه‌ای از دو عدد فوم به ضخامت ۵cm برای جذب انرژی امواج و ممانعت از بازگرداندن امواج استفاده شد و همچنین در دیواره‌های موازی با جهت بارگذاری نیز از دو لایه طلق جهت کاهش مقاومت برشی بین خاک و دیواره محفظه استفاده شد.

جدول ۱. روابط مقیاس پارامترهای بین مدل و پروتوتایپ

ردیف	پارامتر	نماد	نسبت تشابه
۱	طول	x	λ
۲	جرم	m	λ^3
۳	زمان	t	$\lambda^{0.5}$
۴	فرکانس	ν	$\lambda^{-0.5}$
۵	شتاب	u	1
۶	جابه‌جایی	u	λ

^۳ . Liu

^۱ Prototype

^۲ Iai

ورق توری نمره ۱۰۰ پوشانده شده تا آب به صورت یکنواخت و به تدریج وارد نمونه شده و نمونه را به صورت یکنواخت اشباع کند.

۳-۲-۳ - عملگر (جک هیدرولیکی)

جهت ایجاد حرکت افقی از یک جک هیدرولیکی به عنوان عملگر استفاده می‌شود. این جک وظیفه اعمال بارگذاری افقی و سپس انتقال آن به عرشه را بر عهده دارد. این سامانه از اجزایی چون مخزن ذخیره روغن، پمپ هیدرولیکی با دبی ۹۰ لیتر بر دقیقه و فشار ۲۸۰ بار، شیرهای کنترل‌دار و موتور الکتریکی تشکیل یافته است. محدوده جابه‌جایی این جک ۲۵ سانتی‌متر است بنابراین امکان اعمال بارگذاری‌هایی با دامنه حداکثر $\pm 12/5$ سانتی‌متر توسط این عملگر فراهم است.

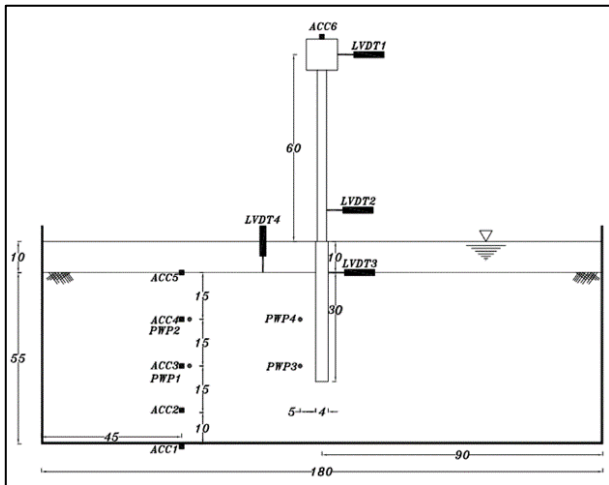
۳-۲-۴ - ابزارهای رفتارنگاری

به منظور رفتارنگاری اندرکنش خاک و مونوپایل در حین آزمایش از مبدل‌ها^۱ یا حسگرهایی^۲ به شرح زیر استفاده شده است:

- جابه‌جایی سنج خطی^۳: ۴ جابه‌جایی سنج برای اندازه‌گیری تغییر مکان بالای برج، سرشمع، شمع در سطح خاک و میزان نشست سطح خاک نصب شدند.

- شتاب‌سنج^۴: از ۶ شتاب‌سنج برای ثبت شتاب بالای برج، سطح خاک، عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک، عمق ۳۰ سانتی متری خاک، عمق ۴۵ سانتی‌متری خاک و سطح میز لرزه استفاده شد.

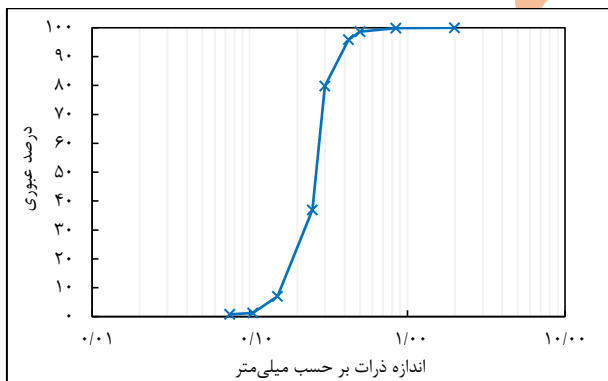
- حسگر فشار آب حفره‌ای^۵: ۴ حسگر فشار آب که دو عدد در نزدیکی مونوپایل و دو عدد با فاصله ۴۵ سانتی‌متر از آن قرار دارند در اعماق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری خاک جهت ثبت اضافه فشار آب حفره‌ای قرار گرفتند. نمای کلی ابزارگذاری نمونه آزمایش با موقعیت جابه‌جایی‌سنج‌ها، شتاب‌سنج‌ها و حسگرهای فشار آب حفره‌ای در شکل ارائه شده است (ابعاد به سانتی‌متر هستند).



شکل ۸. شکل شماتیک ابزارگذاری در مدل

۳-۳ - مشخصات مصالح خاکی

خاک مورد استفاده در ساخت مدل‌های فیزیکی، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۶۰ درصد می‌باشد. منحنی دانه‌بندی این ماسه در شکل ۹ و مشخصات آن در جدول ۲ بر اساس مقادیر محاسبه شده در آزمایشگاه ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود این ماسه یک ماسه بد دانه‌بندی شده و یکنواخت است.



شکل ۹. منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

جدول ۲. مشخصات کامل ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار
۱	نسبت تخلخل حداکثر	e_{max}	۰/۸۷۴
۲	نسبت تخلخل حداقل	e_{min}	۰/۵۷۴

^۱ . Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

^۴ . Accelerometer (ACC)

^۵ . Pore Water Pressure Transducer (PWP)

^۱ . Transducer

^۲ . Sensor

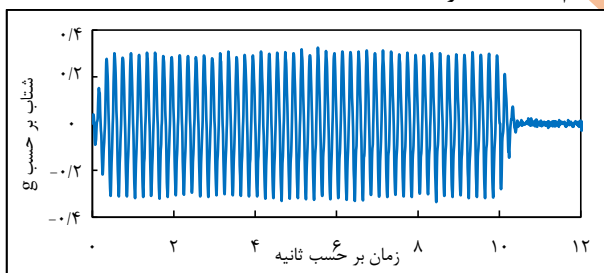
اشباع	۵۰	۳۰۰	۴	۵
اشباع	۶۳	۳۰۰	۵	۶

۴ - نتایج

در این بخش نتایج مربوط به مدل‌سازی‌های فیزیکی انجام شده ارائه می‌گردد. در ادامه به ترتیب به ارائه و بررسی نتایج مربوط به شتاب، جابه‌جایی و فشار آب حفره‌ای پرداخته می‌شود.

۴-۱ - شتاب اعمالی و عکس‌العمل روسازه

در این پژوهش در جهت بررسی اثر طول و قطر مونوپایل، همواره میز لرزه بار لرزه‌ای سیکلیک با شتاب $0.3g$ ، فرکانس $5 Hz$ و تعداد سیکل ۵۰ عدد را به نمونه وارد کرده است. شتاب اعمالی میز لرزه به نمونه‌ها در شکل نشان داده شده است. در تمامی آزمایش‌ها بارهای لرزه‌ای اعمالی مشابه یکدیگر بوده و می‌توان نتایج حاصل از آزمایش‌ها را با هم مقایسه نمود.



شکل ۱۰. نمودار شتاب اعمالی به نمونه‌ها توسط میز لرزه

با ثابت بودن شرایط بارگذاری در آزمایش‌ها، مقادیر شتاب بالای روسازه توسط شتاب‌سنج در تمامی آزمایش‌ها ثبت شده است و جهت مقایسه این مقادیر با یکدیگر، مقادیر مربوط به آزمایش خشک و اشباع، تغییر عمق مدفون و تغییر قطر در ادامه آمده است.

با توجه به شکل ۳ مشخص است که شتاب روسازه در هنگام بارگذاری در حالت اشباع نسبت به حالت خشک بیشتر بوده و شرایط بحرانی‌تر است. در شکل ۴-الف) میزان شتاب روسازه بر حسب عمق مدفون‌های مختلف نشان داده شده است. جهت مشخص شدن شفاف‌تر تاثیر عمق مدفون مونوپایل بر شتاب روسازه، برای هر آزمایش متوسط مقادیر حداکثر تمام سیکل‌ها به عنوان داده معرف آن آزمایش محاسبه گردیده و نمودار شکل ۴-ب) ترسیم گردید. در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش عمق مدفون نسبت به مونوپایل مینا، ابتدا شتاب روسازه کاهش یافته و سپس افزایش

۳	وزن مخصوص ویژه	G_s	۲/۶۵
۴	متوسط اندازه ذرات (میلی‌متر)	D_{50}	۰/۲۷
۵	وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ρ_d	۱/۵۶۹
۶	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ϕ	۳۳
۷	چسبندگی (کیلو پاسکال)	c	۰

۳-۴ - مونوپایل

در این پژوهش از ۵ مونوپایل لوله‌ای شکل از جنس پلی‌وینیل کلراید^۱ مطابق با مشخصات مندرج در جدول استفاده شده است. مونوپایل مینا (تیپ ۱) با توجه به قوانین مقیاس میز لرزه یک مونوپایل واقعی با قطر ۴ متر، ضخامت ۴ سانتی‌متر و عمق مدفون ۳۰ متر را مدل‌سازی می‌نماید. این مونوپایل مشابه مونوپایل‌های واقعی استفاده شده برای توربین‌های بادی فراساحلی با ظرفیت ۲ مگاوات است.

۳-۵ - روسازه

روسازه توربین‌های بادی شامل دو بخش جرم متمرکز فوقانی و ستون است. جرم متمرکز قسمت فوقانی و پره‌های توربین ۲ مگاواتی حدود ۲۰۰ تن بوده و با توجه به اینکه در مدل‌سازی فیزیکی جرم با توان ۳ ضریب مقیاس ارتباط دارد، وزنه‌ای به جرم ۲۰۰ گرم در مدل در نظر گرفته شده است. ستون نیز از یک لوله پلی‌پروپیلن^۲ به طول ۶۰ سانتی‌متر تشکیل شده است.

۳-۶ - برنامه آزمایش‌ها

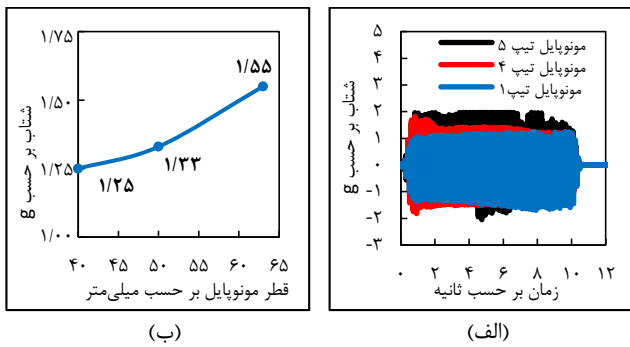
در این پژوهش مجموعاً ۶ آزمایش به وسیله میز لرزه و در محیط 1g انجام شده است. دو آزمایش با مونوپایل مینا در محیط خشک و اشباع، دو آزمایش با تغییر طول در محیط اشباع و دو آزمایش با تغییر قطر در محیط اشباع مطابق با جدول انجام شده است.

جدول ۳. برنامه آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	تیپ مونوپایل	طول مونوپایل (میلی‌متر)	قطر مونوپایل (میلی‌متر)	شرایط خاک
۱	۱	۳۰۰	۴۰	خشک
۲	۱	۳۰۰	۴۰	اشباع
۳	۲	۳۵۰	۴۰	اشباع
۴	۳	۴۰۰	۴۰	اشباع

^۲ . Polypropylene (PP)

^۱ . Polyvinyl Chloride (PVC)

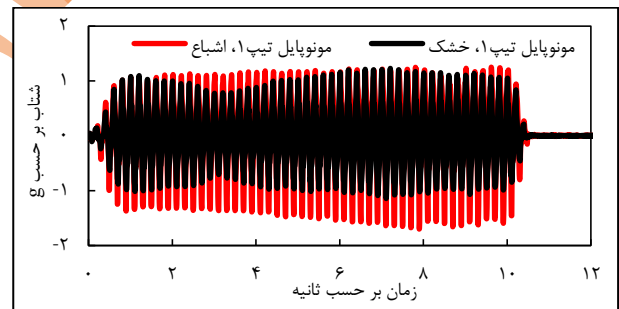


شکل ۵۳. تاثیر قطر مونوپایل بر شتاب روسازه

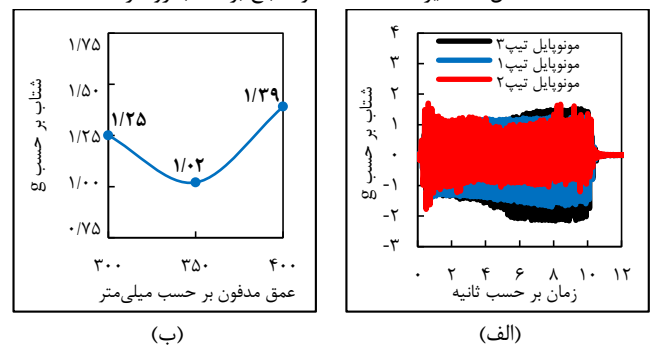
۴-۲- تغییر شکل ماندگار روسازه

در مورد توربین‌های بادی فراساحلی دو معیار پایداری و قابلیت بهره‌برداری در نظر گرفته شده است. معیار پایداری مربوط به عدم تخریب شدن سازه و فونداسیون توربین تحت بارهای وارده می‌باشد و معیار بهره‌برداری مربوط به عدم کج‌شدگی توربین به حدی است که عملکرد آن مختل نشود. برای اینکه توربین‌های بادی فراساحلی بتوانند بدون کاهش قابل توجه در بازدهی عمل کنند باید کج‌شدگی آن‌ها نسبت به راستای قائم حداکثر ۰/۵ درجه باشد. از این ۰/۵ درجه نیز ۰/۲۵ درجه مربوط به خطای نصب بوده و تنها در زمان بهره‌برداری ۰/۲۵ درجه امکان دوران وجود دارد (DNV, ۲۰۱۴). جهت بررسی میزان جابه‌جایی روسازه نمودارهایی بر حسب حالت خشک و اشباع و تغییرات عمق مدفون و قطر مونوپایل در ادامه ارائه گردیده است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی ماندگار حالت اشباع ۳/۷۸ میلی‌متر بوده که تقریباً ۲/۷۴ برابر حالت خشک که ۱/۰۴ میلی‌متر است می‌باشد؛ ولی میزان حداکثر جابه‌جایی سیکل‌ها در حالت خشک بیشتر است. آنچه در مورد مونوپایل‌ها اهمیت بیشتری دارد میزان جابه‌جایی ماندگار بوده که در حالت اشباع شرایط بحرانی‌تری دارد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که در حالت اشباع رفتار مونوپایل در طول آزمایش با روند ثابتی به صورت نرم‌شونده بوده است. در حالت خشک با وجود اینکه رفتار نرم‌شونده دیده می‌شود ولی در حدود ثانیه سوم آزمایش، رفتار سخت‌شوندگی موضعی در رفتار مونوپایل دیده می‌شود. این موضوع می‌تواند به علت ریزش خاک در شکاف ایجاد شده در اطراف مونوپایل باشد زیرا در حالت خشک این اتفاق در پژوهش‌های گذشته نیز مشهود بوده است.

می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از تاثیر دو پارامتر افزایش عمق گیرداری و افزایش اختلاف شتاب‌های وارده از خاک به مونوپایل باشد. شتاب اعمالی توسط میز لرزه در لایه‌های خاک از پایین به سمت بالا افزایش می‌یابد؛ با افزایش عمق مدفون مونوپایل، اختلاف شتاب‌های وارده از سمت خاک به مونوپایل افزایش می‌یابد و این موضوع می‌تواند سبب افزایش شتاب روسازه گردد علاوه بر این موضوع، سطح جاذب انرژی از خاک توسط مونوپایل نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش شتاب روسازه تحت بارهای لرزه‌ای باشد. از جهت دیگر افزایش عمق مدفون به دلیل افزایش گیرداری سبب کاهش شتاب روسازه می‌گردد. تاثیر همزمان این دو موضوع بر مونوپایل می‌تواند سبب ایجاد نقطه عطف و مقدار کمینه در نمودار شتاب روسازه و عمق مدفون گردد. در شکل ۵۳ نیز دو نمودار مشابه شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان گفت افزایش قطر مونوپایل سبب افزایش شتاب روسازه می‌شود که این موضوع می‌تواند به علت افزایش سطح جاذب انرژی از خاک توسط مونوپایل باشد.



شکل ۵۴. تاثیر حالت خشک و اشباع بر شتاب روسازه

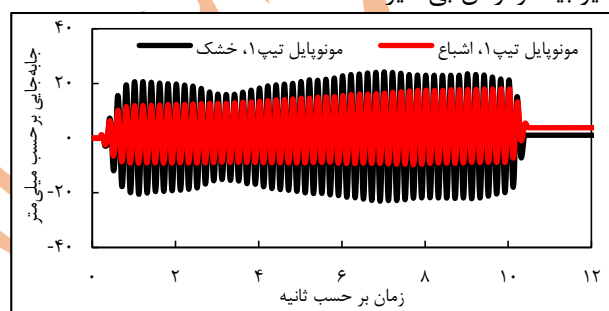


شکل ۵۵. تاثیر عمق مدفون مونوپایل بر شتاب روسازه

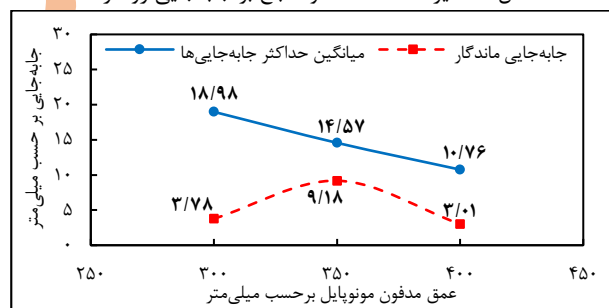
در رابطه با تاثیر عمق مدفون بر میزان جابه‌جایی روسازه در شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش عمق مدفون میانگین حداکثر جابه‌جایی روسازه کاهش می‌یابد ولی میزان جابه‌جایی ماندگار تا عمق مدفون ۳۵۰ میلی‌متر افزایش و سپس کاهش یافته است. دلیل این موضوع در میزان جابه‌جایی ماندگار می‌تواند همان دلایلی باشد که در رابطه با تاثیر عمق مدفون بر شتاب روسازه به آن‌ها اشاره گردید.

شکل ۸ نشان می‌دهد که افزایش ۵۷ درصدی قطر مونوپایل سبب کاهش میانگین حداکثر جابه‌جایی روسازه به میزان ۳۰ درصد می‌شود. همچنین افزایش قطر، از ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر، افزایش جابه‌جایی روسازه را به میزان ۵۶ درصد به همراه داشته است و در مقادیر بیشتر از آن بی‌تاثیر است.

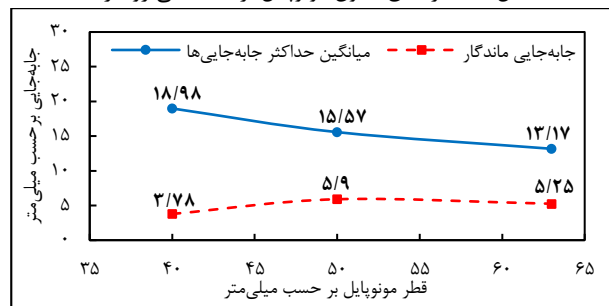
در رابطه با مونوپایل علاوه بر میزان جابه‌جایی افقی مونوپایل که به آن پرداخته شد، میزان کج‌شدگی مونوپایل نیز اهمیت دارد. جهت محاسبه میزان کج‌شدگی ماندگار مونوپایل با فرض رفتار صلب مونوپایل و روسازه و با توجه به مقادیر ثبت شده توسط جابه‌جایی‌سنج‌های ۱ و ۲ می‌توان زاویه انحراف و عمق مرکز چرخش را محاسبه کرد. در جدول ۴ میزان زاویه چرخش و عمق مرکز چرخش در انتهای آزمایش‌ها برای ۶ آزمایش انجام شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان کج‌شدگی مونوپایل در حالت خشک از تمامی حالات اشباع کمتر بوده و عمق مرکز چرخش آن نیز حدود ۶۸ درصد عمق مدفون مونوپایل است که مطابق با محدوده‌های ارائه شده در نتایج پژوهش‌های گذشته است (لو، ۲۰۱۵). در این پژوهش به دلیل مشاهده نتایج شفاف‌تر جهت مقایسه بین انواع مونوپایل‌ها، بارهای لرزه‌ای قوی‌تر و با تعداد سیکل بیشتری به نمونه وارد شد. با این وجود مشاهده می‌شود که غیر از یک مورد در دیگر موارد، زاویه چرخش از ۰/۵ درجه کمتر است ولی به دلیل تعداد کم آزمایش‌ها نمی‌توان نتیجه مشخص یا روند خاصی را برای میزان کج‌شدگی برحسب تغییر قطر و عمق مدفون مونوپایل در نظر گرفت. در رابطه با عمق مرکز چرخش نیز مشاهده می‌شود که در برخی موارد مقدار آن از ۱۰۰ درصد عمق مدفون نیز بیشتر بوده و در برخی موارد نزدیک به نصف مقدار عمق مدفون است. در این باره نیز با توجه به تعداد کم آزمایش‌ها روند مشخصی قابل نتیجه‌گیری نیست. با این وجود می‌توان گفت که بارگذاری لرزه‌ای بر مونوپایل در شرایط اشباع سبب افزایش بازه مقدار عمق مرکز چرخش به ۱۰۵-۵۵ درصد عمق مدفون شده است؛ این مقدار در پژوهش‌های پیشین مربوط به بارگذاری سیکلیک مونوپایل که اغلب در شرایط غیراشباع بوده است مقدار عمق مرکز چرخش حدود ۷۰-۸۰ درصد عمق مدفون گزارش گردیده است.



شکل ۶. تاثیر حالت خشک و اشباع بر جابه‌جایی روسازه



شکل ۷. تاثیر عمق مدفون مونوپایل بر جابه‌جایی روسازه



شکل ۸. تاثیر قطر مونوپایل بر جابه‌جایی روسازه

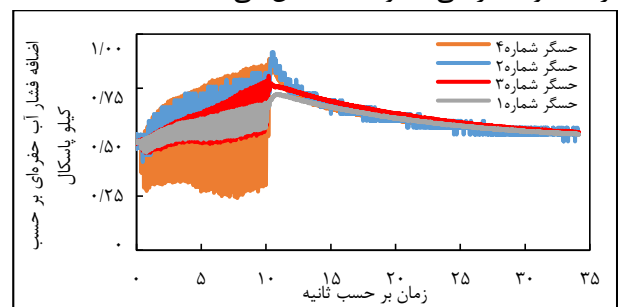
جدول ۴. عمق مرکز چرخش و میزان چرخش مونوپایل				
شماره آزمایش	تیپ مونوپایل	شرایط خاک	عمق مرکز چرخش به عمق مدفون (%)	زاویه چرخش (درجه)
۱	۱	خشک	۶۸	۰/۱
۲	۱	اشباع	۱۰۵	۰/۲۴
۳	۲	اشباع	۵۵	۰/۵۹
۴	۳	اشباع	۱۰۵	۰/۱۵

۵	۴	اشباع	۷۰	۰/۳۸
۶	۵	اشباع	۸۰	۰/۲۲

۴-۳- تغییرات فشار آب حفره‌ای

بر اثر اعمال بار لرزه‌ای به نمونه‌ها، این بارگذاری سبب افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. این افزایش فشار آب حفره‌ای در صورتی که برابر با تنش موثر در آن عمق گردد پدیده روانگرایی رخ خواهد داد. از عوامل ایجاد روانگرایی می‌توان به وجود خاک دانه‌ای، تراکم پایین و اشباع بودن خاک اشاره کرد. تراکم نمونه‌ها در این پژوهش برابر ۶۰ درصد بوده و خاک تراکم متوسط داشته است و با وجود بارگذاری با شدت و مدت زمان بیشتر نسبت به زلزله‌های متعارف در شرایط واقعی، روانگرایی در هیچ کدام از نمونه‌ها مشاهده نگردیده است. جهت ثبت مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق ۱۵ و ۳۵ سانتی متری از سطح خاک در دو موقعیت مجاور شمع و با فاصله ۴۵ سانتی متری از شمع در مجموع تعداد ۴ حسگر فشار آب حفره‌ای قرار داده شده است.

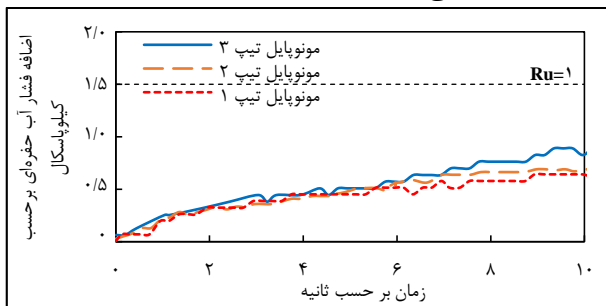
جهت بررسی میزان اضافه فشار آب حفره‌ای بر اساس فاصله از مونوپایل و عمق لایه خاک، نتایج برای ۴ حسگر که موقعیت آن‌ها در شکل نشان داده شد، در شکل ۹ آمده است. این نتایج مربوط به آزمایش ۲ یعنی مونوپایل مینا در حالت اشباع بوده و نتایج دیگر آزمایش‌ها نیز همین موضوع را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل میزان اضافه فشار آب حفره‌ای با نزدیک شدن به مونوپایل و سطح خاک افزایش می‌یابد. با این وجود محوشدن فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در محل هر چهار حسگر به صورت مشابه بوده و ۲-۳ ثانیه پس از پایان بارگذاری، فشار آب حفره‌ای در محل چهار حسگر با هم برابر شده و با سرعتی یکنواخت کاهش می‌یابد.



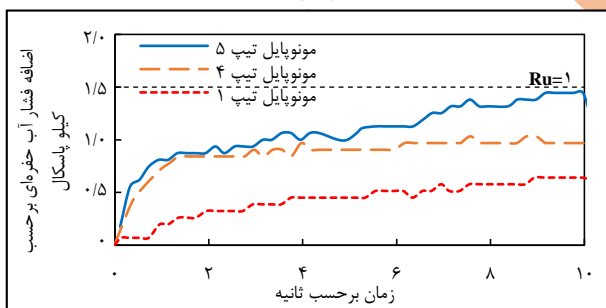
شکل ۹. نتایج میزان اضافه فشار آب حفره‌ای در آزمایش ۱

در جهت بررسی تاثیر قطر و عمق مدفون مونوپایل بر اضافه فشار آب حفره‌ای، برای حسگر شماره ۴ که به مونوپایل و سطح خاک نزدیک‌تر

است و تاثیرپذیری بیشتری از مونوپایل دارد نمودارهای اضافه فشار آب حفره‌ای تهیه شده است. در این نمودارها به دلیل نمایش واضح‌تر، نمودار مربوط به حداکثر اضافه فشار آب حفره‌ای حسگر شماره ۴ نشان داده شده است. همانطور که از شکل (الف) مشخص است؛ افزایش عمق مدفون سبب افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای گردیده است ولی مقدار این افزایش قابل توجه نیست، به طوری که می‌توان گفت در رابطه با مونوپایل تیپ ۱ و ۲ این اختلاف وجود ندارد. در رابطه با تاثیر قطر مونوپایل نیز در شکل (ب) قابل مشاهده است که افزایش قطر سبب افزایش میزان اضافه فشار آب حفره‌ای شده است به گونه‌ای که در مونوپایل با قطر ۶۳ میلی‌متر، خاک اطراف مونوپایل در آستانه روانگرایی قرار گرفته و مقدار ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای (R_u) اندکی از ۱ کمتر است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۸. تاثیر ابعاد فیزیکی مونوپایل بر اضافه فشار آب حفره‌ای (الف) تاثیر عمق مدفون و (ب) تاثیر قطر مونوپایل

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش در مجموع ۶ تست انجام شد که بر اساس آن نتایج زیر حاصل گردید:

- در حالت خشک نسبت به حالت اشباع، میزان شتاب روسازه در هنگام بارگذاری لرزه‌ای و میزان جابه‌جایی ماندگار کمتر است. این موضوع نشان می‌دهد که طراحی لرزه‌ای توربین‌های بادی فراساحلی

Bhattacharya, S., Nikitas, N., Garnsey, J., Alexander, N. A., Cox, J., Lombardi, D., ... and Nash, D. F., ۲۰۱۳. Observed dynamic soil-structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54, pp.۴۷-۶۰. doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.012.

Byrne, B. W., Burd, H. J., Zdravkovic, L., Abadie, C. N., Houlsby, G. T., Jardine, R. J., ... and Taborda, D. M., ۲۰۱۹. PISA design methods for offshore wind turbine monopiles. *Offshore Technology Conference. OTC*. doi.org/10.4043/29373-MS.

Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M. and Wilson, D., ۲۰۱۰. Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(۱), pp.۱۵۱-۱۶۴. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001799](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001799).

DNV, G., ۲۰۱۴. Design of offshore wind turbine structures. *Offshore Standard DNV-OS-J101*. DNV GL AS, Høvik (Norway).

EWEA, ۲۰۱۹. The European offshore wind industry. *Key Trends and Statistics*.

Hansen, J. B., ۱۹۶۱. The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. *Bulletin*, Danish Geotechnical Institute, ۱۲, ۱-۹.

Iai, S., Tobita, T. and Nakahara, T., ۲۰۰۵. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests. *Geotechnique*, 55(۵), pp.۳۵۵-۳۶۲. doi.org/10.1680/geot.2005.55.5.355.

Lau, B. H., ۲۰۱۵. Cyclic behaviour of monopile foundations for offshore wind turbines in clay. *Doctoral dissertation*, University of Cambridge. doi.org/10.17863/CAM.14093.

LeBlanc, C., Houlsby, G. T. and Byrne, B. W., ۲۰۱۰. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading. *Géotechnique*, 60(۲), pp.۷۹-۹۰. doi.org/10.1680/geot.2010.60.2.79.

Liu, J., Yuan, B. and Dimaano, R., ۲۰۱۱. Optical measurement of sand deformation around a laterally loaded pile. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(۵), pp.۷۵۴-۷۵۹. doi.org/10.1520/JTE103313.

Long, J. H. and Vanneste, G., ۱۹۹۴. Effects of cyclic lateral loads on piles in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(۱), pp.۲۲۵-۲۴۴. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:1\(225\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:1(225)).

Mu, L., Kang, X., Feng, K., Huang, M. and Cao, J., ۲۰۱۸. Influence of vertical loads on lateral behaviour of monopiles in sand. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, ۲۲(sup۱), pp.۲۸۶-۳۰۱. doi.org/10.1080/19648189.2017.1359112.

Padrón, L. A., Carbonari, S., Dezi, F., Morici, M., Bordón, J. D. and Leoni, G., ۲۰۲۲. Seismic response of large

بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی توربین‌های خشکی مناسب نیست و امکان ایجاد اختلال در عملکرد توربین‌های بادی فراساحلی زیاد است.

- در حالت اشباع شتاب روسازه با افزایش عمق مدفون مونوپایل تا مقداری مشخص (۳۵ سانتی‌متر) کاهش یافته و در مقادیر بیشتر از آن افزایش یافته است. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که میزان شتاب روسازه در عمق مدفون مشخصی از مونوپایل کمترین مقدار خود را دارد. در مقابل، بیشترین میزان جابه‌جایی ماندگار در همان عمق مدفون که کمترین شتاب روسازه را نتیجه می‌دهد، مشاهده می‌شود که باید بین این دو مقدار در طراحی لرزه‌ای توربین‌های بادی فراساحلی تناسب ایجاد شود.

- در حالت اشباع با افزایش قطر مونوپایل میزان شتاب وارده به روسازه در هنگام بارگذاری و میزان جابه‌جایی ماندگار مونوپایل افزایش می‌یابد. باتوجه به اهمیت این دو پارامتر در طراحی لرزه‌ای توربین‌های بادی فراساحلی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قطر مونوپایل سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای مونوپایل نمی‌شود.

- میزان کج‌شدگی توربین در همه آزمایش‌ها به جز یک آزمایش کمتر از ۰/۵ درجه است. با وجود اینکه در این پژوهش به جهت مشهودتر بودن نتایج، بارگذاری‌های قوی‌تری به نمونه‌ها وارد شده است می‌توان نتیجه گرفت که در حین زلزله‌های معمولی مقدار کج‌شدگی توربین به ۰/۵ درجه محدود می‌شود؛ هرچند باید اثر همزمان بارهای سیکلیک محیطی را نیز در طول مدت بهره‌برداری در نظر گرفت.

- میزان اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در خاک به این صورت است که با نزدیک شدن به مونوپایل و نزدیک شدن به سطح خاک، میزان اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در نزدیکی مونوپایل و در لایه‌های سطحی خاک ایجاد می‌شود.

- افزایش عمق مدفون و قطر مونوپایل سبب افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده به‌ویژه در نزدیکی مونوپایل می‌شود. تاثیر افزایش عمق مدفون زیاد نبوده ولی افزایش قطر تاثیر قابل توجهی دارد.

منابع

Achmus, M., Kuo, Y. S. and Abdel-Rahman, K., ۲۰۰۹. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load. *Computers and Geotechnics*, 36(۵), pp.۷۲۵-۷۳۵. doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.12.003.

offshore wind turbines on monopile foundations including dynamic soil–structure interaction. *Ocean Engineering*, 257, 111653. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111653.

Seong, J. T., Ha, J. G., Kim, J. H., Park, H. J. and Kim, D. S., 2017. Centrifuge modeling to evaluate natural frequency and seismic behavior of offshore wind turbine considering SFSI. *Wind Energy*, 20(10), pp.1787-1800. doi.org/10.1002/we.2127.

Seong, J. T. and Kim, D. S., 2019. Seismic evaluation of offshore wind turbine by geotechnical centrifuge test. *Wind Energy*, 22(8), pp.1034-1042. doi.org/10.1002/we.2338.

van der Tempel, J. and Molenaar, D. P., 2002. Wind turbine structural dynamics—a review of the principles for modern power generation, onshore and offshore. *Wind Engineering*, 26(4), pp.211-222. doi.org/10.1260/0309524023941039412.

Wang, X., Zeng, X., Yang, X. and Li, J., 2019. Seismic response of offshore wind turbine with hybrid monopile foundation based on centrifuge modelling. *Applied Energy*, 235, pp.1335-1350. doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.057.

Wang, X., Zeng, X., Li, X. and Li, J., 2020. Liquefaction characteristics of offshore wind turbine with hybrid monopile foundation via centrifuge modelling. *Renewable Energy*, 145, pp.2358-2372. doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.106.

Wind Europe, 2021. Wind Energy in Europe: Statistics and the Outlook for 2022-2026.

Yu, H., Zeng, X., Li, B. and Lian, J., 2015. Centrifuge modeling of offshore wind foundations under earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, pp. 402-415. doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.06.014.

نشد