

بررسی عددی پاسخ لرزه‌ای پی وزنی توربین های بادی فراساحلی در خاک ماسه‌ای اشباع

علیرضا سعیدی عزیز کندی^{۱*}، محمدحسن بازاریار^۲، علی تاجی^۳، شروین سعداللهی^۴

۱. دکتری تخصصی استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. دکتری تخصصی استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۴. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

Email: asaeeidia@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت ۹۹/۰۸/۲۵

چکیده

توربین‌های بادی فراساحلی یکی از روش‌هایی است که استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند باد را به منظور تولید انرژی میسر می‌کند و در سال‌های اخیر در حال توسعه است. فونداسیون آن‌ها به علت حضور این سازه در شرایط خاص آب و هوایی و مکانی یکی از مهم‌ترین بخش‌های این سیستم‌ها است به طوری که بخش قابل ملاحظه‌ای از هزینه ساخت و اجرای یک توربین بادی را دربرمی‌گیرد. فونداسیون این سازه‌ها بر اساس عمق آب، فاصله از ساحل و غیره انتخاب می‌شود که یکی از آن‌ها پی وزنی است. این پی بر اساس وزن بالای خود پایداری سازه را در شرایط مختلف بارگذاری فراهم می‌کند. یکی از معیارهای مهم در طراحی این فونداسیون‌ها بررسی آن‌ها در مناطق دریایی و لرزه‌خیز، تحت بارگذاری زلزله است. همچنین وقوع روانگرایی در خاک ماسه‌ای سست ناشی از بارگذاری سریع زلزله باید ارزیابی شود. در این پژوهش به مطالعه عددی پی‌های وزنی توربین بادی فراساحلی به همراه سازه آن در خاک ماسه‌ای به صورت سه‌بعدی با نرم‌افزار Opensees پرداخته شده است. مطالعات پارامتریک به منظور بررسی ابعاد و عمق مدفون‌شدگی پی روی پاسخ خاک در فاصله نزدیک و دور از پی وزنی و همچنین روی عملکرد پی وزنی و سازه (نشست و دوران پی، جابه‌جایی افقی سازه) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ابعاد پی باعث کاهش نشست و دوران پی شده اما بیشینه مقدار Γ_{II} (نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به تنش موثر اولیه) در خاک افزایش یافته است و شتاب تغییری نمی‌کند. افزایش عمق مدفون‌شدگی پی باعث کاهش نشست و دوران آن شد.

واژگان کلیدی: توربین بادی فراساحلی، پی وزنی، روانگرایی، بارگذاری زلزله، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل کیفیت بالای انرژی باد در دریا، عدم نیاز به دستیابی زمین، آثار مخرب کمتر روی محیط زیست، استفاده از مزارع بادی فراساحلی جذاب شده است. فونداسیون‌ها در توربین‌های بادی فراساحلی^۱ (OWTs) از مهم‌ترین بخش‌های این سازه دریایی هستند که قریب به ۳۴٪ هزینه ساخت و اجرای آن را در برمی‌گیرند [1]. با این حال، به دلیل شرایط بارگذاری و محیطی سخت دریایی، پیش نیاز برای طراحی فونداسیون لازم است. علاوه بر این، برخی از مزارع بادی فراساحلی در مناطق فعال لرزه‌ای مانند، نواحی ساحلی جنوب اروپا، آسیای شرقی، شمال امریکا ساخته خواهد شد که باعث ایجاد چالش‌های بیشتر برای طراحی این فونداسیون‌ها می‌شود [2].

زلزله می‌تواند بر اساس عملکرد ترکیبی سیستم پی-سازه-خاک روی فونداسیون و برج‌های توربین بادی خدمات زیادی را برجای بگذارد. در محیط دریایی، با افزایش فشار آب حفره‌ای تحت بارگذاری لرزه‌ای، خاک می‌تواند نرم شود. در بدترین حالت، زلزله باعث ایجاد روانگرایی در خاک و منجر به کاهش ناگهانی ظرفیت باربری و پایداری جانبی فونداسیون می‌شود که می‌تواند موجب ایجاد نشست یا دوران در پی یا سازه شود.

تجربیات میدانی بسیار کمی، در ارزیابی و طراحی فونداسیون برج‌های بادی فراساحلی وجود دارد و معمولاً معیارهای توسعه یافته برای توربین‌های بادی در خشکی مدنظر قرار می‌گیرد [2]. برای نمونه در آیین‌نامه DNV^۲ که برای طراحی فونداسیون‌های توربین‌های بادی فراساحلی است، برای شرایط خاص نواحی لرزه‌خیز به بررسی بیشتر پی و سازه توصیه شده است. همچنین در حالتی که خاک بستر نیز قابلیت روانگرایی را داشته باشد، باید مطالعات بیشتر صورت گرفته و در طراحی مدنظر قرار گیرد [3]. در نتیجه با توجه به عدم وجود مطالعات کافی و همچنین ملاحظات موارد مشخصی در آیین‌نامه‌های مربوطه، درک

مقاومت لرزه‌ای فونداسیون توربین بادی دریایی بسیار محدود است، که نیاز به بررسی‌های بیشتری در این زمینه وجود دارد.

اجزای توربین‌های بادی فراساحلی و مستقر در خشکی در بیشتر موارد یکسان است. یکی از تفاوت‌های اصلی طراحی این توربین‌ها، فونداسیون آن‌ها است. فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی در خاک اشباع و در داخل آب قرار دارند و بسته به عمق آبی که توربین در آن قرار می‌گیرد، انواع بارگذاری، جنس بستر دریا و روش‌های ساخت، انواع مختلفی داشته که رایج‌ترین آن‌ها؛ پی وزنی^۳، پی سطلی مکشی^۴، مونوپایل^۵، ترای‌پاد^۶ و جاکت^۷ است. پی وزنی و مونوپایل معمولاً در اعماق کم (حداکثر تا ۳۰m) استفاده می‌شوند، در حالی که ترای‌پاد و جاکت برای آب‌های با عمق متوسط بین ۳۰m تا ۹۰m مناسب است [4]. بررسی جامعی روی طراحی فونداسیون‌های فراساحلی در شرایط معمول بارگذاری توسط پژوهشگران انجام شده است به طوری که محاسبات و روند طراحی آن‌ها به صورت کلی بیان شده است [4, 5].

پی وزنی با وزن بالای خود در پایداری کلی سازه در برابر لغزش و واژگونی گزینه مناسبی برای فونداسیون این توربین‌ها در آب‌های کم‌عمق‌تر است و به راحتی بار را از سازه به خاک زیر و اطراف خود منتقل می‌کند.

اثر پی‌های منعطف با درنظرگرفتن اندرکنش سازه-پی بر روی تحلیل دینامیکی برج‌های OWT توسط ادھیکاری و باتاچاریا^۸ در سال ۲۰۱۲ صورت گرفت و فرکانس طبیعی سیستم به دست آمد. نتیجه‌ها نشان داد که فرکانس طبیعی برج توربین با کاهش سختی‌های دورانی و جانبی پی و افزایش نیروی محوری در برج کاهش می‌یابد [6]. اثر بارگذاری قائم، پی ترکیبی (صفحه‌ای فولادی به همراه شمع در زیر) و سخت‌کننده روی ظرفیت خمشی مونوپایل با ترکیب بارگذاری زلزله و محیطی توسط آناستاسوپولس و تئوفیلو^۹ در سال ۲۰۱۶ مطالعه شد. [7].

7 Jacket structure

8 Adhikari and Bhattacharya.

9 Anastasopoulos and Theofilou.

1 Offshore Wind Turbines

2

3 Gravity based foundation

4 Suction bucket

5 Monopile

6 Tripod

مطالعه‌ای دیگری که توسط ونگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۸ انجام شد، پاسخ دینامیکی توربین بادی فراساحلی به همراه مونوپایل در خاک رس تحت بارگذاری موج، باد و زلزله مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مدلسازی عددی و سه بعدی با در نظر گرفتن آثار اندرکنش شمع-خاک انجام شد. آثار پارامترهایی مانند سرعت باد، پریود موج، حداکثر شتاب زمین و پارامترهای خاک روی پاسخ دینامیکی سیستم (تغییر مکان و شتاب برج و لنگر خمشی مونوپایل) مورد مطالعه قرار گرفت [8]. در مطالعه‌ای که توسط عطاری و همکاران^۲ (۲۰۱۶) صورت گرفت، عملکرد پی وزنی جدید (پی وزنی نسل سوم) مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش انجام شده که هزینه کمتر اجرای پی وزنی توربین بادی فراساحلی در محل را نشان داد، ظرفیت باربری قائم و جانبی نیز تحت بار استاتیکی و سیکلیک مورد آزمایش قرار گرفت [9]. تغییر مکان‌های ناشی از بارگذاری سیکلیک در بلند مدت می‌تواند خطر آفرین باشد. در این راستا مطالعه عددی روی پی وزنی منعطف و صلب در بستر ماسه‌ای برای یک توربین بادی فراساحلی تحت بارگذاری جانبی با سیکل‌های کم تا خیلی زیاد توسط چوونگ در سال ۲۰۱۷ انجام شد. مقدار نشست سطحی و دوارن پی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که بیشتر جابه‌جایی بوجود آمده در سیکل‌های ابتدایی اتفاق می‌افتد [10].

دشتی و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۰ نشست ایجاد شده ناشی از زلزله در خاک روانگرا را برای ساختمان‌هایی که روی پی سطحی قرار دارند، مطالعه کردند [11]. در طراحی یک پی وزنی تحت بار سیکلیک، ضروری است که کاهش‌های بزرگ و غیرقابل قبول در ظرفیت باربری به دلیل افزایش تجمعی در فشار آب حفره‌ای (کاهش پایداری) از بین بروند و دوران پی به دلیل نشست‌های تفاضلی (کاهش سرویس‌پذیری) کاهش یابد. در سال ۲۰۱۱ روشی برای پیش‌بینی این پدیده‌ها در خاک‌های غیرچسبنده توسط سافینوس و همکاران^۴ شرح داده شد. [12]. در سال ۲۰۱۹

تجمع فشار آب منفذی در خاک ماسه‌ای و یکنواخت با حضور یک مونوپایل داخل خاک توسط لیا و همکاران^۵ مورد مطالعه قرار گرفت. مدلسازی سه‌بعدی برای یافتن پاسخ باقیمانده خاک تحت بارگذاری جانبی سیکلیک و موج انجام شد و اثرات اندکنشی موج-شمع-خاک نیز مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحت بارگذاری، وجود دوران مونوپایل در خاک، تأثیر بزرگی روی پاسخ فشار آب منفذی باقی‌مانده بستر دارد و دلیل آن هم اندرکنش شمع-خاک است. نرخ بالا رفتن فشار منفذی باقیمانده نزدیک به سطح شمع به دلیل سطح تماس نفوذناپذیر، تفاوت سختی شمع و خاک به طور قابل ملاحظه‌ای سریع بود [13]. یو و همکاران^۶ (۲۰۱۵) چند آزمایش ساترئیفیوژ لرزه‌ای را روی مدل‌های توربین بادی در شرایط خاک خشک و اشباع انجام دادند. در این آزمایش، فونداسیون‌ها از نوع وزنی و مونوپایل بود و هر کدام به صورت جداگانه تحت بار لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عملکرد مدل‌ها در شرایط اشباع، کاملاً متفاوت با حالت خشک است و هر دو نوع فونداسیون رفتار متفاوتی دارند [2].

قاسمی فر و همکاران^۷ (۲۰۱۱)، لی و همکاران^۸ (۲۰۱۸) بر روی نشست‌های پیش‌بینی شده توسط مدل رفتاری PDMY با نرم‌افزار Opensees مطالعاتی انجام دادند [14, 15].

برگی و همکاران^۹ (۲۰۱۶) با مطالعه‌ای پارامتریک روی کمک‌میراگرهای ستون مایع تنظیم‌شده گازی نصب شده روی ناسل، عملکرد و کاهش شتاب توربین‌های بادی دریایی تحت تحریکات باد، موج و زلزله را بررسی کردند [16]. همچنین دزواره^{۱۰} (۲۰۱۹) با استفاده از محاسبات نرم طراحی و بهینه‌سازی این میراگرها را در توربین‌های بادی فراساحلی مورد بررسی قرارداد و در مطالعه‌ای دیگر تأثیر تلاطم باد بر رفتار هیدرودینامیکی توربین‌های بادی دریایی با فونداسیون مونوپایل بررسی شد [17, 18].

6 Yu et al.

7

8

9

10

1 Wang et al.

2 Attari et al.

3 Dashti et al.

4 Safinus et al.

5 Liao et al.

ترسیم شده‌اند. در این مطالعه که نیمی از مدل آزمایشگاهی مدلسازی شد در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۲-۱- هندسه، ابعاد و مصالح مدل

در سال ۲۰۱۵ یک مدل فیزیکی از پی وزنی مربوط به توربین بادی فراساحلی توسط یو و همکاران در جعبه سانتریفیوژ ساخته و آزمایش شد. ابعاد نمونه آزمایشگاهی به ترتیب با طول، عرض و ارتفاع، $53/3\text{cm}$ ، $24/1\text{cm}$ و $17/7\text{cm}$ و در مقیاس نمونه اصلی^۲ (با در نظر گرفتن شتاب دوران 50g در سانتریفیوژ) به ترتیب با طول، عرض و ارتفاع $26/5\text{m}$ ، 12m و $8/8\text{m}$ بود. پی وزنی از جنس آلومینیوم با سختی 70Gpa با ابعاد $3/75\text{m} \times 3/75\text{m}$ و ارتفاع 2m بود. عمق مدفون شدن پی در خاک به اندازه $1/5\text{m}$ بود. سازه به صورت ساده، از مجموع یک میله آلومینیومی و جرم متمرکز در بالای آن تشکیل شده بود، که قطر میله $0/5\text{m}$ و ارتفاع آن 13m بود. جرم متمرکز بالای آن $10/6\text{ton}$ بود. جرم متمرکز در این مدلسازی نماینده مجموعه ناسل^۳ و پره‌ها است. ارتفاع خاک درون جعبه $4/5\text{m}$ بوده است. به منظور درک بیشتر از ابعاد و هندسه مدل، شکل (۱) آورده شده است. مدل با شتاب سنج (ACC)^۴، مبدل فشار منفذی (PPT)^۵ و مبدل تفاضلی متغیر خطی (LVDT)^۶ نیز ابزارگذاری شده بود. محل این مبدل‌ها در شکل نشان داده شده است. مشخصات پی، برج و جرم متمرکز بالای برج توربین به صورت کامل تری در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل ۱. هندسه مدل در آزمایش سانتریفیوژ (مقطع عرضی) [2]

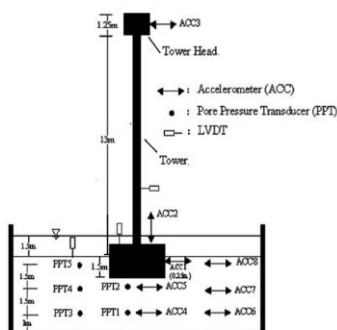


Fig. 1. Model geometry in centrifuge test (cross section) [2]

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در مطالعات مختلف روی فونداسیون‌های توربین‌های بادی فراساحلی، در شرایط روانگرا شدن خاک ماسه‌ای و برای حالتی که فونداسیون از نوع پی وزنی است، به منظور بررسی دقیق‌تر این پی‌ها در شرایط لرزه‌ای مطالعاتی صورت نگرفته است. در این پژوهش، برای بررسی رفتار خاک ماسه‌ای اشباع در فاصله نزدیک و دور از پی وزنی، تحت بارگذاری لرزه‌ای از مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Opensees استفاده شده است. در ابتدا نتایج مدلسازی با آزمایش سانتریفیوژ یو و همکاران (۲۰۱۵) درستی آزمایی شده است و سپس مطالعه پارامتریک به منظور بررسی اثر ابعاد و عمق مدفون شدن پی وزنی روی بیشینه مقادیر r_u (نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به تنش موثر اولیه)، بیشینه مقادیر شتاب در خاک اطراف و دور از فونداسیون، نشست و دوران پی وزنی انجام شده است.

۲-۲ مدلسازی عددی

با توجه به اینکه مطالعه روی خاک ماسه‌ای اشباع با قابلیت روانگرایی مورد نظر است و به دلیل توانایی نرم‌افزار Opensees در مدلسازی خاک اشباع، در نظر گرفتن اندرکنش پی-خاک در حالت روانگرایی خاک، از این نرم‌افزار منبع باز استفاده شد. به دلیل وجود تقارن در مدل، نصف مدل آزمایشگاهی یو و همکاران (۲۰۱۵) به صورت سه بعدی در نرم‌افزار Opensees مدلسازی شد. در گام اول، تحلیل استاتیکی و سپس دینامیکی انجام شد. مدلسازی خاک اشباع با فرمولاسیون همبسته $u-p$ برای دو قسمت جامد و سیال و با استفاده از مدل رفتاری چند سطحی PDMY^۱ صورت گرفت که توانایی شبیه سازی رفتار خاک‌های ماسه‌ای را تحت بارهای سیکلیک و لرزه‌ای و در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده، دارد. تصاویر شماتیکی ۲ تا ۴ از نماهای متفاوت جزئیات دقیق تری را از مدلسازی عددی نشان می‌دهد. تصاویر با نرم‌افزار Auto CAD

4 Accelerometer
5 Pore Pressure Transducer
6 Linear Variable Differential Transducer

1 Pressure Depend Multi Yield
2 Prototype
3 Nacelle

فرمولاسیون جامد-سیال، ایجاد فشار آب حفره‌ای، توزیع و زایل شدن آن را محاسبه کند

شکل ۱. هندسه مدل‌سازی عددی درستی‌آزمایی شده به صورت شماتیک در صفحه؛ (a) xz و (b) yz

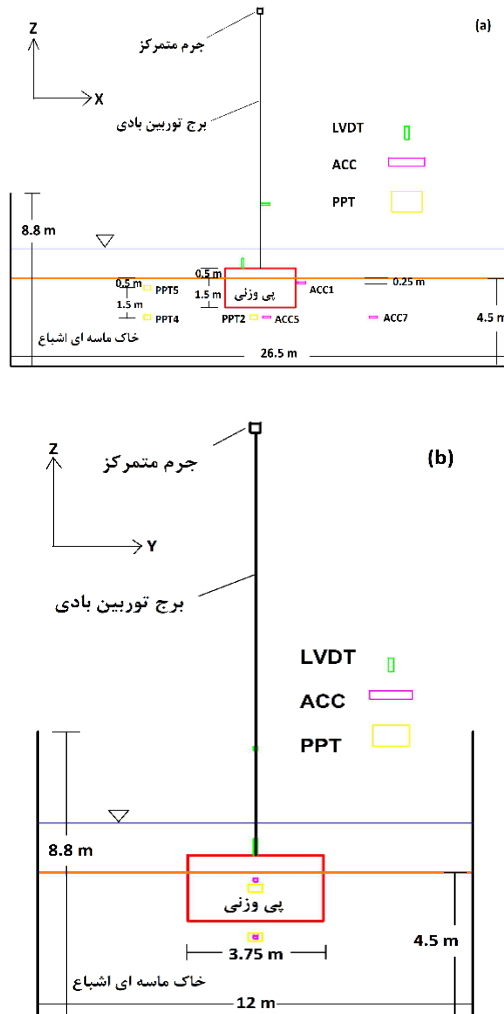


Fig. 2. Geometry of validated numerical model schematically on the; a) xz and b) yz plane

مدل رفتاری چند تسلیمی وابسته به فشار (PDMY)، به منظور مدل‌سازی خاک‌های دانه‌ای و بدون چسبندگی است. این مدل رفتاری، به دلیل توانایی در شبیه‌سازی رفتار پهن شدگی خاک و تجمع دائمی کرنش برشی سیکلیک دارای

جدول ۱. مدل توربین بادی فراساحلی در آزمایش سانتریفیوژ یو و همکاران (۲۰۱۵) [2]

	Weight (ton)	Dimension (m)
Concentrated mass at the top of the tower	10.6	1.75*1.75*1.25
Turbine Tower	6.25	D= 0.5 ؛ L= 13
Gravity Foundation	75.9	3.75*3.75*2

In the prototype scale; L= Length, D= Diameter

Table 1. Offshore wind turbine model in Yu et al. (2015) Centrifuge test.[2]

مصالص مورد استفاده در این آزمایش و در مدل‌سازی عددی، ماسه توپورا با تراکم نسبی حدود ۶۵٪ در حالت اشباع بوده و برای پی وزنی از یک جعبه آلومینیومی استفاده شده بود. مشخصات کامل‌تر در جداول (۲ و ۳) آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات خاک (ماسه توپورا)

Properties	Value
Saturated Density	1.9 (ton/m ³)
Relative Density	65%
Maximum Shear Moudule	65 MPa
Friction Angel	31°

Table 2. Soil characteristics (Toyoura sand)

جدول ۳. مشخصات مصالح پی وزنی

Properties	Value
Density	2.6 (ton/m ³)
Elastic Moudule	70 GPa
Yield Stress	20 MPa
Poisson's Ratio	0.33

Table 3. Specifications of Gravity Foundation

۲-۲- چگونگی مدل‌سازی در نرم‌افزار

به منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار Opensees استفاده شده، که در آن المان‌هایی برای مدل‌سازی جامد-سیال به صورت همبسته وجود دارد تا بتوان بر اساس تئوری بایوت^۱ برای محیط‌های متخلخل مثل خاک، آن را شبیه‌سازی کرد تا بر اساس

1 Biot's theory

به منظور تعیین شرایط مرزی مدلسازی عددی موافق با آزمایش سانتریفیوژ از شرایط زیر استفاده شد:

الف) به دلیل استفاده از موج زلزله و انتشار آن در یک جهت در فضای سه بعدی، تغییر مکان تمام گره‌ها در چهار طرف جعبه سانتریفیوژ در دو جهت X و Y بسته شده‌اند. همچنین تمام گره‌ها در کف مدل فقط در راستای Z بسته شده‌اند.

ب) تمام گره‌ها در داخل مدل (خاک اشباع) و در مرزهای پایین و اطراف مدل، در راستای درجه آزادی چهارم (مربوط به اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای) باز گذاشته شده‌اند و فقط گره‌های موجود در سطح خاک نیز به منظور اجازه خروج فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده، برای زهکشی بسته شده‌اند.

ج) همچنین به منظور سادگی و کاهش زمان تحلیل از تقارن محوری استفاده شده است و نیمی از مدل سه بعدی آنالیز شد. به همین دلیل شرایط مرزی برای گره‌ها در صفحه تقارن نیز اعمال شد.

طبق مطالعات انجام شده در پایان‌نامه رامیرز³ در سال ۲۰۱۰ در دانشگاه سن دیگو کالیفرنیا، تعیین اندرکنش پی و خاک با ایجاد وابستگی حرکتی equalDOF بین گره‌های پی و خاک اطراف آن در مدلسازی سه بعدی، یک روش بسیار عالی برای مدلسازی اندرکنش در خاک با قابلیت روانگرایی است [22].

شکل ۲. هندسه مدلسازی عددی درستی آزمایی شده به صورت شماتیک در صفحه XY به همراه محل خروجی‌های شتاب، تغییر مکان و فشار آب حفره‌ای

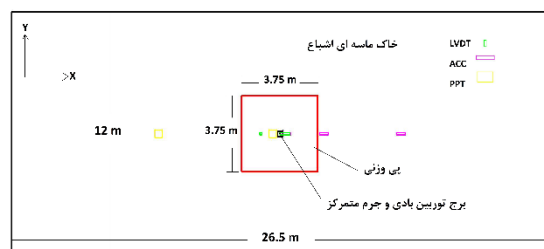


Fig. 3. Geometry of validated numerical model schematically on the xy plane with accelerometers, LVDTs and pore water pressure gauges

پاسخ‌های قابل قبولی در مسائل مربوط به روانگرایی در مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای است. بنابراین در این پژوهش برای مدل سازی مناسب از مدل رفتاری PDMY استفاده شده است [19]. برای مطالعات بیشتر در مورد معادلات حاکم بر مدل رفتاری PDMY می‌توان به پیروست^۱ (۱۹۸۵) و الگمل و همکاران^۲ (۲۰۰۳) مراجعه کرد [20, 21].

جدول ۴. پارامترهای خاک ماسه‌ای در مدل رفتاری PDMY.

Parameters	Units	Toyoura sand with Relative Density 60%
Mass Density	ton/m ³	1.9
The initial shear modulus (reference) (G_r) in $p' = 80\text{kPa}$	kPa	75000
The initial shear modulus (reference) (B_r) in $p' = 80\text{kPa}$	kPa	200000
Friction Angel	Degree	29
Maximum shear modulus in $p' = 80\text{kPa}$	Percent	10
Comprehensive reference pressure	kPa	80
Fixed coefficient d	-	0.5

Table 4. Sandy soil parameters in PDMY behavioral model

به دلیل وجود تقارن در هندسه، نصف مدلسازی به صورت سه بعدی انجام شد. بعد از انجام حساسیت سنجی تعداد المان‌های خاک ماسه‌ای اشباع ۱۲۰۹۶ انتخاب شد. تعداد ۱۰۲ المان و ۱۱۴ گره برای مدل کردن پی وزنی و میله استفاده شده است. برای المان‌های خاک از دستور BrickUP استفاده شده است. المان‌های مربوط به پی وزنی و برج با کمک elasticBeamColumn در نرم افزار مدل شده‌اند که رفتار الاستیک خطی دارد و برای پی وزنی رفتار صلب (استفاده از مدول الاستیسیته بسیار بالا در صفحه افقی و مدول الاستیسیته آلومینیوم ۷۰Gpa در راستای z) در نظر گرفته شده است.

3 Ramirez

4 University of California, San Diego

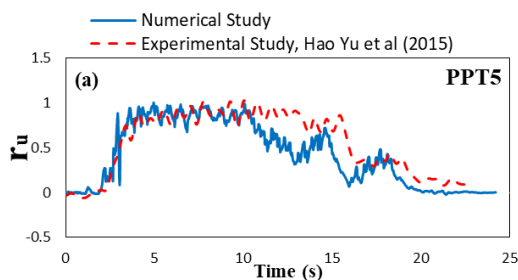
۳- درستی آزمایشی

بعد از مدل‌سازی و تحلیل مدل ساخته شده، نتایج ارائه شده در پژوهش یو و همکاران (۲۰۱۵) با نتایج مدل عددی برای درستی آزمایشی مقایسه شد. در نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی پیدا شد. مقادیر شتاب، نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی، نشست پی وزنی و جابه‌جایی افقی برج در ارتفاع ۳/۲۵m درستی آزمایشی شدند.

۳-۱- فشار آب حفره‌ای اضافی

با توجه به شکل (۱) و محل قرارگیری مبدل‌های فشار آب حفره‌ای در آزمایش و باتوجه به گزارش مقادیر PPT4، PPT2 و PPT5 به ترتیب در موقعیت‌های ۱m، ۶m و ۶m از مرکز مدل در راستای x و در اعماق ۲m، ۲m و ۰/۵m در راستای z، در پژوهش یو و همکاران، در این پژوهش هم مقادیر r_{II} (نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به تنش مؤثر اولیه) در این مکان‌ها درستی آزمایشی شدند و در شکل (۶) قابل مشاهده هستند. درستی آزمایشی نشان می‌دهد که مدل‌سازی انجام شده به خوبی قادر به تعیین فشار آب حفره‌ای در خاک در نقاط مختلف است. مقدار r_{II} در مدل توربین بادی فراساحلی به همراه پی وزنی در خاک ماسه‌ای، در لایه‌های نزدیک به سطح خاک، نزدیک به یک است و در لایه‌های پایین‌تر این مقدار کمتر از ۱ بوده است. همچنین مقدار r_{II} در زیر پی وزنی به دلیل وجود سربار زیاد ناشی از وزن پی، بسیار کمتر از ۱ بوده است.

شکل ۳. تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی (r_{II}) برحسب زمان مربوط به مبدل؛ (a) PPT5 و (b) PPT4 به ترتیب در عمق ۲m و ۰/۵m خاک بافاصله دور از پی وزنی و (c) PPT2 در عمق ۲m خاک قرارگرفته در زیر پی وزنی



بنابراین در این مطالعه نیز تمام اندرکنش بین خاک و پی به صورت ایجاد وابستگی حرکتی equalDOF بین گره‌های پی و خاک تعریف شده است. همچنین با توجه به آزمایش یو و همکاران، گره اتصال سازه به پی در مدل‌سازی هم به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شد.

شکل ۴. نمای شماتیک از مدل عددی درستی آزمایشی شده در این پژوهش (صفحه xy) که به دلیل وجود تقارن در راستای x نیمی از آن مدل‌سازی شده است.

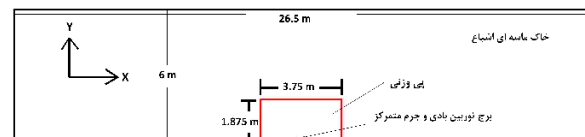


Fig. 4. Schematic view of the validated numerical model in this study (xy plane) which is modeled due to the symmetry in the x direction.

درصد میرایی رایلی درنظرگرفته شده که فقط روی مقادیر پاسخ سازه اثرگذار است به مقدار ۵٪ درنظر گرفته شد. جدول (۴) پارامترهای مورد استفاده از خاک ماسه‌ای سست را برای مدل‌سازی با مدل رفتاری PDMY در این پژوهش نشان می‌دهد.

۳-۲- مشخصات زلزله ورودی

موج زلزله ورودی در آزمایش سانتریفیوژ یو و همکاران، به صورت شکل (۵) بوده و دارای شتاب حداکثر ۰/۶۴۹g بود. فرکانس غالب موج ورودی تقریباً حدود ۱ Hz بوده است که بنا به گزارش آن‌ها از فرکانس طبیعی مدل توربین بادی کمتر بوده است. این موج پیشتر در پروژه VELACS استفاده شده است [2].

. شتاب ورودی به کف جعبه سانتریفیوژ و کف مدل عددی [2]

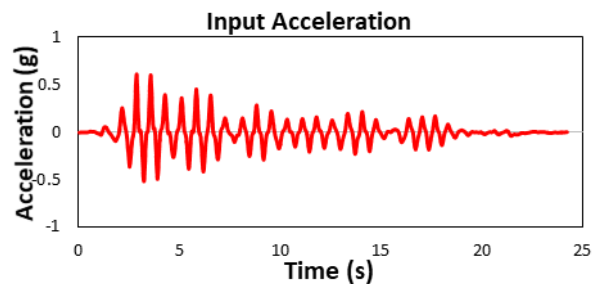


Fig. 5. Acceleration to the bottom of the centrifuge box and numerical model [2]

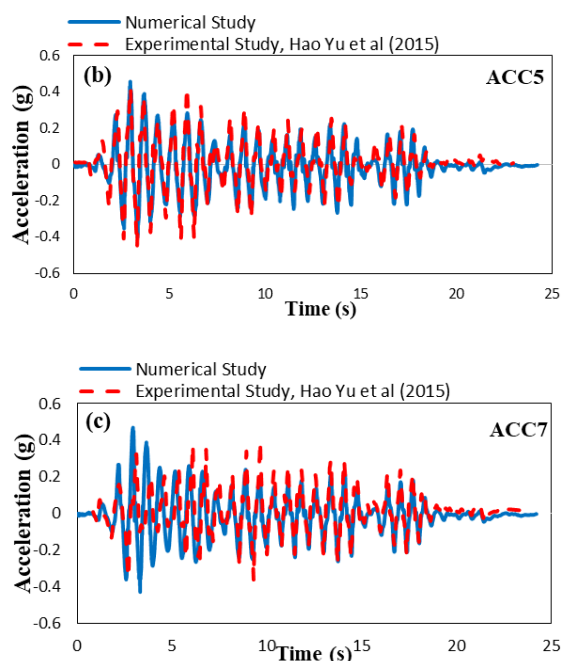


Fig. 7. Horizontal acceleration changes with time, related to; a) ACC1 at 0.25m of soil depth next to the foundation, b) ACC5 at 2m of soil depth under foundation and c) ACC7 at 2m of soil depth far from foundation

جدول ۵. مقادیر **PGA** برحسب **g** در شتاب‌سنج‌های گزارش شده در مطالعه آزمایشگاهی یو و همکاران (۲۰۱۵) و مطالعه عددی

Accelerometer	PGA values (g)		
	Experimental study of Yu et al. (2015)	Numerical Study	Variation (%)
ACC1	0.31	0.39	26
ACC5	0.45	0.46	2
ACC7	0.39	0.46	18

Table 5. PGA values according to g in accelerometers reported in the experimental study of Yu et al. (2015) and numerical study

۳-۳- نشست پی وزنی و جابه‌جایی افقی سازه

نتایج تغییر مکان افقی ماندگار سازه توربین بادی در ارتفاع ۳/۲۵m از سطح خاک و نشست پی وزنی با توجه به گزارش داده شده در پژوهش یو و همکاران در سال ۲۰۱۵، درستی آزمایشی شدند و نتایج به صورت جدول (۶) ارائه شده است. مقدار نشست نهایی در حالت عددی تقریباً ۰/۲۸ مقدار به دست آمده در حالت آزمایشگاهی است. با توجه به مطالعات پیشین مشخص شد که در واقعیت و در هنگام روانگرایی خاک و بالا رفتن فشار آب حفره‌ای اضافی، به دلیل تغییر در ساختار اسکلت خاک،

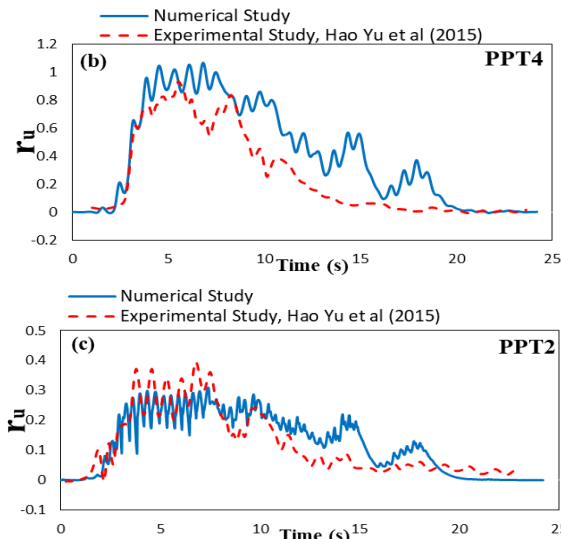
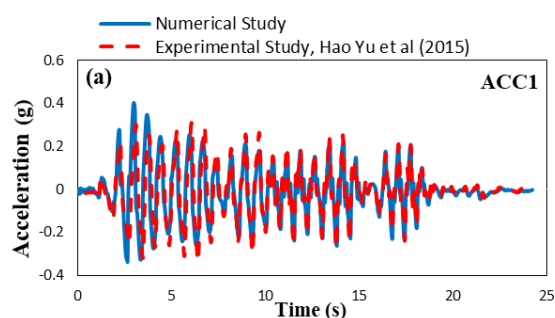


Fig. 6. Changes in the excess pore water pressure ratio (r_u) over time, related to; a) PPT5 and b) PPT4 transducer at 0.5m and 2m depth of soil far from the foundation, respectively, and c) PPT2 transducer at 2m depth of soil under foundation

۲-۳- شتاب

مقادیر شتاب با توجه به قرارگیری شتاب‌سنج‌ها (ACC) در خاک مشابه با پژوهش یو و همکاران (۲۰۱۵)، برای درستی آزمایشی در مدل‌سازی اندازه‌گیری شد. شکل (۷) مقادیر گزارش شده شتاب در مدل آزمایشگاهی و عددی است که مشاهده می‌شود در تمام نمودارها بیشینه مقدار شتاب در حالت آزمایشگاهی و عددی بسیار به هم نزدیک هستند. مقدار PGA در شتاب‌سنج‌های زیر در جدول جدول ۵ گزارش شده است.

شکل ۴. تغییرات شتاب افقی برحسب زمان مربوط به؛ a) ACC1 در عمق ۰/۲۵m خاک در کنار پی وزنی، b) ACC5 در عمق ۲m خاک زیر پی وزنی و c) ACC7 در عمق ۲m خاک بافاصله دور از پی وزنی



در پژوهش آن‌ها نیز مقدار نشست در حالت عددی با مدل رفتاری PDMY حدوداً ۰/۳۵ مقدار واقعی بود [15]. در مطالعه حاضر هم مقدار نشست خاک ماسه‌ای اشباع در نرم‌افزار Opensees با مدل رفتاری PDMY مانند مطالعات ذکر شده، کمتر از مقدار واقعی و آزمایشگاهی بوده است و این نسبت خطا تقریباً برابر با مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین بوده است.

۴- حساسیت سنجی

تعدادی آنالیز به منظور حساسیت سنجی مقادیر پاسخ نسبت به ابعاد و تعداد المان‌ها انجام گرفت. با توجه تحلیل‌های صورت گرفته، مشخص شد که تغییر در شبکه‌بندی مدل، روی پاسخ جابه‌جایی افقی سازه اثرگذار است. با توجه به شکل ۱۳، با تعداد المان بیشتر از ۱۲۰۰۰ عدد (۱۲۰۹۶ عدد) جابه‌جایی افقی سازه تقریباً مقدار کمی تغییر می‌کند. با افزایش تعداد المان‌ها زمان تحلیل به شدت افزایش می‌یابد.

شکل ۵. تغییرات حساسیت تعداد المان‌ها (mesh study) نسبت به تغییر مکان افقی باقیمانده در سازه توربین بادی و زمان تحلیل

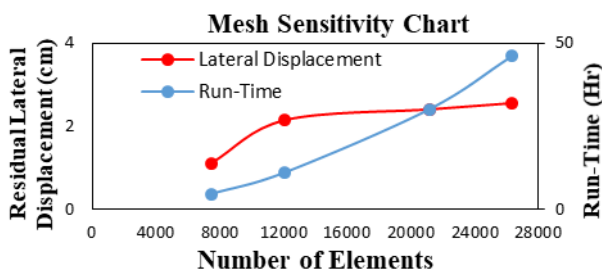


Figure. 8. Sensitivity Changes of the element number (mesh study) to the remaining horizontal displacement in the wind turbine structure and analysis time

۵- نتایج و بحث

مطالعات پارامتریک جدول (۷) به منظور بررسی اثر ابعاد و عمق مدفون‌شدگی پی وزنی روی حداکثر مقادیر U و حداکثر مقادیر شتاب در اعماق زیر پی، کنار و دور از پی وزنی انجام

ضریب نفوذپذیری نیز افزایش خواهد یافت (قاسمی فر و همکاران^۱، ۲۰۱۱). این مورد در مطالعات جعفرزاده و یاناگیساوا^۲ در سال ۱۹۹۵ نیز نشان داده شده است. در هنگام روانگرایی، ذرات خاک تماس کامل خود را با یکدیگر از دست داده و مسیری جدید را برای عبور آب مهیا می‌کند که باعث افزایش در ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود. بر این اساس توضیح داده شده است که با استفاده از مقدار ضریب نفوذپذیری اولیه و ثابت در مدل‌سازی عددی در حین روانگرایی با نرم‌افزار Opensees، مقدار نشست کمتر از مدل آزمایشگاهی و واقعی به دست می‌آید و در پژوهش قاسمی فر و همکاران مقدار نشست در حالت عددی حدود ۰/۴ در حالت آزمایشگاهی بود، اما مقدار فشار آب حفره ای اضافی و U به درستی و با دقت مناسب مدل شد. آن‌ها پیشنهاد دادند که برای رفع این مشکل می‌توان مقدار نفوذپذیری را در هنگام مدل‌سازی و در سه مرحله افزایش فشار آب حفره‌ای، در حین روانگرایی خاک و در هنگام زایل شدن فشار آب حفره‌ای اضافی، تغییر داد و در پژوهش خود مقدار ۰/۴ به ۰/۷۵ رسید [14]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر که لی و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۸ انجام دادند نیز نتیجه مشابهی حاصل شد که مقدار نشست نشان داده شده در نرم‌افزار Opensees برای خاک ماسه‌ای اشباع به دلیل فرض اولیه و ثابت برای مقدار ضریب نفوذپذیری در هنگام تحلیل کمتر از مقدار واقعی شده بود.

جدول ۶. مقادیر جابه‌جایی سازه توربین بادی و مقدار نهایی نشست پی وزنی در مطالعه آزمایشگاهی و عددی

	Residual horizontal displacement at a height of 3.25 m (cm)	Settlement of Foundation (cm)
Numerical Study	2.15	8.94
Experimental study of Yu et al. (2015)	2.23	31.95

Table. 6. The displacement values of the wind turbine structure and the final amount of gravity foundation in experimental and numerical study

پی و خروج کمتر فشار آب حفره‌ای اضافی، بیشینه مقدار r_u به‌طور میانگین ۱۶٪ بیشتر شده است.

در فاصله دور از پی شکل (۱۱) از عمق ۰ تا ۴/۵m - بیشینه مقدار r_u به‌طور پیوسته کاهش شده است چراکه از آثار پی وزنی دور بوده و تنش مؤثر در اعماق نزدیک به سطح خاک کمتر است. بنابراین بیشینه مقدار r_u در خاک ماسه‌ای دور از پی وزنی سریع‌تر از خاک اطراف و زیر پی به سمت روانگرایی حرکت می‌کند. علاوه بر آن واضح است که با فاصله گرفتن از پی در راستای x اثرگذاری ابعاد پی روی بیشینه مقدار r_u کم شده و این اثر در اعماق بیشتر خاک تقریباً از بین رفته است. با مشاهده شکل (۱۱) می‌توان دریافت که با افزایش ابعاد پی از ۲/۷۵m به ۴/۷۵m، در اعماق کمتر از ۱/۵m حداکثر مقدار r_u به‌طور میانگین ۵٪ افزایش داشته است.

شکل ۶. تغییرات حداکثر مقدار r_u برحسب عمق خاک در زیر پی وزنی برای ابعاد مختلف پی

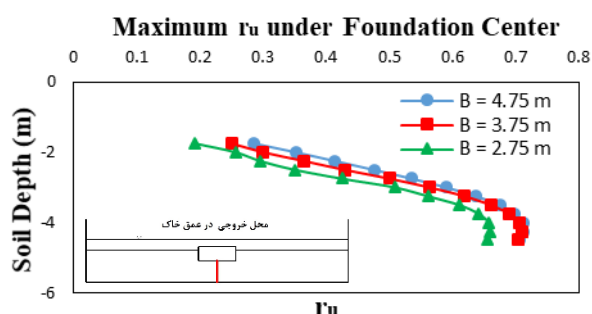


Fig. 9. Changes in the maximum amount of r_u in terms of soil depth under foundation for different dimensions of the foundation

شکل ۷. تغییرات حداکثر مقدار r_u برحسب عمق خاک نزدیک به پی وزنی برای ابعاد مختلف پی

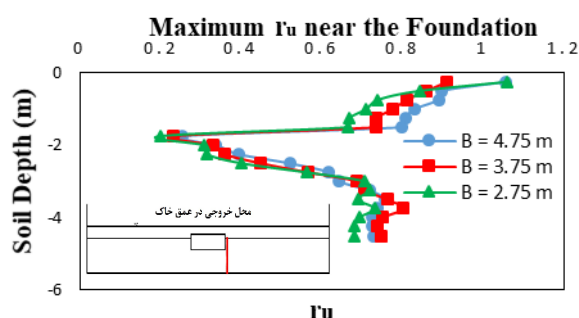


Fig. 10. Changes in the maximum amount of r_u in terms of soil depth near the foundation for different dimensions of the foundation

شد. همچنین اثر پارامترهای فوق روی نشست پی وزنی و دوران آن بررسی شد.

جدول ۷. مشخصات پی وزنی در مطالعات پارامتریک

Parametric Study	Type of Analysis
Dimensions of the foundation	2.75 m*2.75 m
	3.75 m*3.75 m
	4.75 m*4.75 m
Burial depth of foundation	0.5 m
	1 m
	1.5 m

Table 7. Specifications of gravity foundation in parametric studies

۵-۱- اثر ابعاد پی وزنی

مطابق با جدول (۷) به منظور بررسی اثر ابعاد پی وزنی، سه حالت برای پی وزنی در نظر گرفته شد. در شکل (۹) که حداکثر مقدار r_u را برحسب عمق خاک در زیر پی وزنی (در $x = 0$) نشان می‌دهد، مقدار حداکثر فشار آب حفره‌ای اضافی با حرکت از کف مدل تا زیر پی وزنی کاهش یافته است. دلیل آن می‌تواند مربوط به شرایط مرزی فشار آب در کف مدل (عدم زهکشی) و اعمال شتاب به کف مدل و وجود انرژی زیاد در آن‌جا باشد. همچنین وجود سربار (پی وزنی) روی خاک می‌تواند اثرگذار باشد به شکلی که اثر سربار روی تنش مؤثر قائم خاک با افزایش عمق به‌صورت کاهشی است. به بیانی دیگر با کاهش عمق و نزدیک شدن به سمت پی وزنی و وجود اثر سربار، مقدار نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش یافته و به این معناست که خاک دیرتر به سمت روانگرایی حرکت می‌کند. از طرفی کاهش ابعاد پی (با ثابت بودن وزن مخصوص پی)، ازدیاد فشار سربار به خاک را به دنبال داشته که نتیجه آن به ترتیب در کف مدل و زیر پی وزنی کاهش ۷٪ و ۲۵٪ حداکثر مقدار r_u است.

شکل (۱۰) که مربوط به کنار پی وزنی است، مشابه با حالت پیش نشان می‌دهد که با کاهش عمق خاک ابتدا بیشینه مقدار r_u کاهش یافته و بعد از آن در کنار پی تا سطح خاک افزایش یافته است، چراکه دیگر اثر سربار پی وجود نداشته است. ملاحظه می‌شود، در اعماق زیر پی، تغییر ابعاد آن اثر بسیار اندکی روی بیشینه مقدار r_u دارد. همچنین به نظر می‌رسد تا عمق ۱/۵m، با افزایش ابعاد پی از ۲/۷۵m به ۴/۷۵m، به علت مقدار کمتر دوران

شود. در مجموع تمام عوامل مذکور، از مقدار شتاب حداکثر با شیب کمتری کاسته می شود [23]. نکته موردنظر درباره اثر ابعاد پی روی شتاب حداکثر در این محل مانند حالت قبل است.

همچنین در فاصله دور از پی وزنی ملاحظه می شود که با کاهش عمق خاک به دلیل افزایش r_u و نرم تر شدن خاک، مقدار شتاب حداکثر کاهش می یابد. بدین معنی که با فاصله گرفتن از پی وزنی و آثار سربار ناشی از وزن پی و سازه، کاهش میزان شتاب حداکثر فقط تحت تأثیر مقدار نرم شدگی خاک (تغییر r_u) است. علاوه بر آن می توان دریافت که تغییرات ابعاد پی روی حداکثر مقدار شتاب در این محل به مراتب اثر کمتری نسبت به مکان های نزدیک به پی وزنی داشته است.

شکل ۹. تغییرات حداکثر مقدار شتاب برحسب عمق خاک در زیر، نزدیک و دور از پی وزنی برای ابعاد مختلف پی

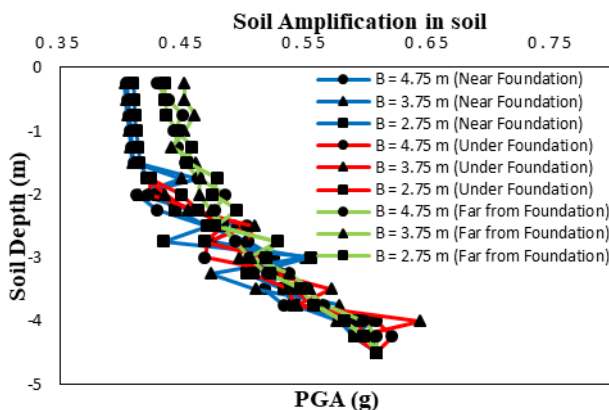


Fig. 12. Changes in the maximum amount of acceleration in terms of soil depth under, near and far from foundation for different dimensions of the foundation

با توجه به شکل (۱۳) می توان دریافت که با افزایش ابعاد پی وزنی، مقدار تغییر مکان افقی سازه در ارتفاع ۳/۲۵m به مقدار ناچیز کاهش می یابد. با تغییر ابعاد پی از ۲/۷۵m به ۴/۷۵m مقدار نشست پی به دلیل توزیع وزن پی در سطح بیشتر (کاهش فشار) حدود ۳۵٪ کمتر شده است. همچنین با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می شود که میزان دوران پی وزنی ناشی از نشست تفاضلی با افزایش ابعاد پی از ۲/۷۵m به ۴/۷۵m به مقدار ۶۰٪

شکل ۸. تغییرات حداکثر مقدار r_u برحسب عمق خاک با فاصله دور از پی وزنی برای ابعاد مختلف پی

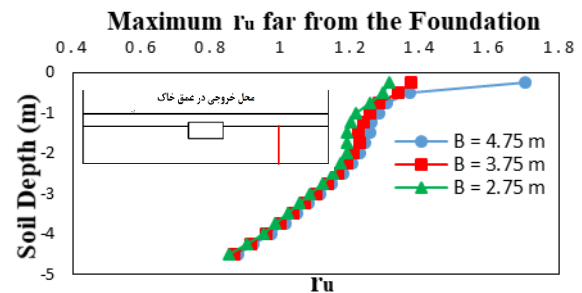


Fig. 11. Changes in the maximum amount of r_u in terms of soil depth far from the foundation for different dimensions of the foundation

در شکل (۱۲) حداکثر مقدار شتاب برحسب عمق خاک در زیر، نزدیک و دور از پی وزنی نشان داده شده است. همان طور که بیان شد، در مرکز مدل مقدار r_u از کف مدل تا زیر پی، کاهش یافته است، اما خاک همچنان اشباع کامل بوده و مقدار r_u همچنان بالاتر از صفر است که این به معنی رفتار نرم تر خاک اشباع و وجود تغییر مکان های بیشتر و میرایی زیاد در خاک است. به همین دلیل می توان انتظار داشت که بیشینه مقدار شتاب از کف مدل تا زیر پی روندی کاهشی^۱ داشته باشد. با نزدیک شدن به زیر پی وزنی، آثار سربار و تنش مؤثر در خاک زیاد و حداکثر مقدار r_u کم می شود بنابراین با کاهش عمق حداکثر مقدار شتاب باید با شیب ملایم تری کاهش پیدا کند (شکل ۱۲). این روند نیز در پژوهش جعفریان و همکاران^۲ (۲۰۱۷) نیز مشاهده شده است [23]. در این پژوهش ملاحظه می شود که مقدار شتاب حداکثر با تغییر در ابعاد پی وزنی به صورت قاعده مند رفتار مشخصی ندارد و آن چنان تحت تأثیر ابعاد پی وزنی نیست.

مقدار شتاب حداکثر در کنار پی وزنی با کاهش عمق کاهش می یابد. از روی شکل پیداست که مقدار شتاب حداکثر مانند حالت قبل به دلایل مشابه، با کاهش عمق خاک تا زیر پی، شیب کاهشی و گهگاه افزایشی دارد. در ادامه با کاهش عمق تا سطح خاک به دلیل افزایش حداکثر مقدار r_u مقدار شتاب حداکثر باید تقلیل یابد. از سوی دیگر ازدیاد جابه جایی پی و خاک و گهگاه منفی شدن r_u در زمان، باید باعث افزایش حداکثر مقدار شتاب

بیشتری (حدود ۳۰٪) کاهش یافته است. شکل (۱۵) نشان می‌دهد افزایش عمق مدفون‌شدگی پی در اعماق نزدیک به کف مدل، کاهش را در تنش مؤثر ناشی از ستون خاک به دنبال داشته و از طرفی باعث افزایش سربار ناشی از وزن پی بر خاک شده است. با در نظر گرفتن این دو اثر ناهمسو، نتیجه آن افزایش حداکثر مقدار r_u به اندازه ۲۴٪ شده است. این مقدار در موقعیت زیر پی وزنی حدود ۱۵٪ شد.

شکل (۱۱) که مربوط به محلی در کنار پی وزنی است، نشان می‌دهد با افزایش عمق مدفون‌شدگی پی از ۰/۵ m تا ۱/۵ m در کف مدل، حداکثر مقدار r_u به دلایل مشابه با بخش قبل، حدود ۳۰٪ زیاد شده و رفته رفته با کاهش عمق تا زیر پی وزنی، حداکثر مقدار r_u سریع‌تر کاهش می‌یابد. همچنین در ادامه با کاهش عمق تا سطح خاک مقدار r_u به صورت نامنظم افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۲) با تغییر عمق مدفون‌شدگی پی از ۰/۵ m تا ۱/۵ m، حداکثر مقدار r_u در اعماق پایین تحت تأثیر آثار پی وزنی نبوده و در اعماق کم‌تر و نزدیک به سطح خاک، دارای آثار کمتری نسبت به دو حالت قبل بوده است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که با افزایش عمق مدفون‌شدگی پی در خاک، میزان سطح تماس پی با خاک بیشتر بوده و جرم بیشتری از پی در خاک قرار می‌گیرد. انتقال انرژی ناشی از حرکات پی به خاک اطراف زیادتر می‌شود. نتیجه آن بر حداکثر مقدار r_u در فاصله دور از پی اثرگذار شده است.

شکل ۱۲. تغییرات حداکثر مقدار r_u برحسب عمق خاک در زیر پی وزنی برای پی با عمق مدفون‌شدگی مختلف

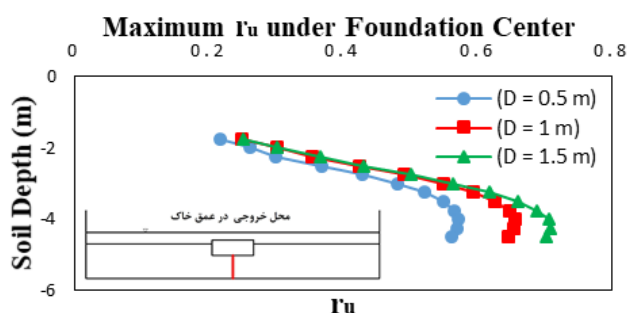


Fig. 15. Changes in the maximum amount of r_u in terms of soil depth under foundation for foundations with different burial depths

کمتر شده است و این می‌تواند به دلیل مقاومت بهتر پی با ابعاد بزرگ‌تر در مقابل لنگر واژگونی باشد.

شکل ۱۰. تغییرات جابه‌جایی افقی سازه و نشست متوسط پی وزنی برحسب ابعاد پی

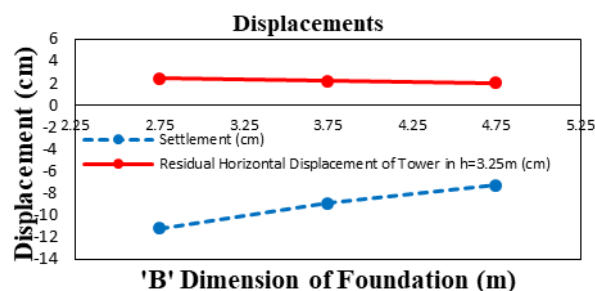


Fig. 13. Changes in horizontal displacement of the structure and average settlement of foundation in terms of foundation dimensions

شکل ۱۱. تغییرات دوران ناشی از نشست تفاضلی پی وزنی برحسب ابعاد پی

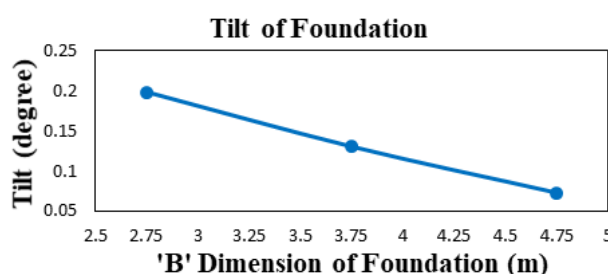


Fig. 14. Changes in rotation due to differential settlement in terms of foundation dimensions

۵-۲- اثر عمق مدفون‌شدگی پی وزنی

به منظور بررسی اثر عمق مدفون‌شدگی پی وزنی (D) بر پارامترهای شتاب و r_u در خاک و همچنین روی تغییر مکان، نشست پی و دوران آن، ۳ حالت برای پی با عمق مدفون‌شدگی ۰/۵ m، ۱ m و ۱/۵ m مورد تحلیل قرار گرفت (جدول ۷). نتیجه‌ها به صورت شکل ۱۲ تا شکل ۱۷ ارائه شده است. در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار r_u از کف مدل تا زیر پی وزنی کاهش می‌یابد. با تغییر عمق مدفون‌شدگی پی از ۰/۵ m تا ۱/۵ m و در نتیجه اثر افزایش سربار ناشی از وزن پی و تنش مؤثر در خاک، با حرکت از کف مدل تا زیر پی حداکثر مقدار r_u با شیب

۴۰٪ کاسته شده است و در شکل (۱۴) به وضوح دیده می‌شود. همچنین میزان تغییر مکان افقی سازه در ارتفاع ۳/۲۵m تقریباً ثابت بوده است.

شکل ۱۵. تغییرات حداکثر مقدار شتاب بر حسب عمق خاک در زیر، نزدیک و دور از پی وزنی برای پی با عمق مدفون‌شدگی مختلف

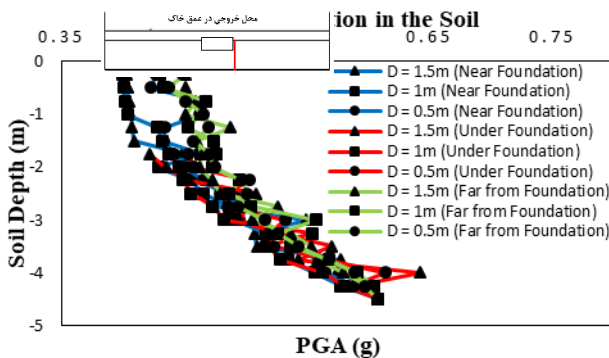


Fig. 18. Changes in the maximum amount of acceleration in terms of soil depth under, near and far from foundation for foundations with different burial depths

شکل ۱۶. تغییرات جابه‌جایی افقی سازه و نشست متوسط پی وزنی بر حسب عمق مدفون‌شدگی پی

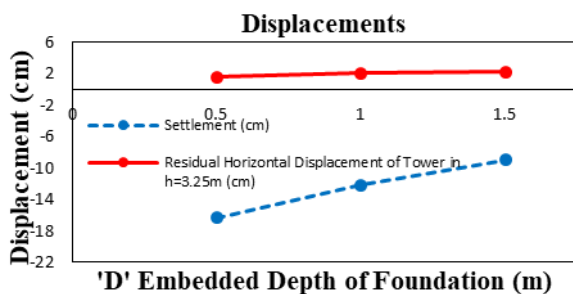


Fig. 19. Changes in horizontal displacement of the structure and average settlement of foundation in terms of foundation burial depth

شکل ۱۷. تغییرات دوران ناشی از نشست تفاضلی پی وزنی بر حسب عمق مدفون‌شدگی پی

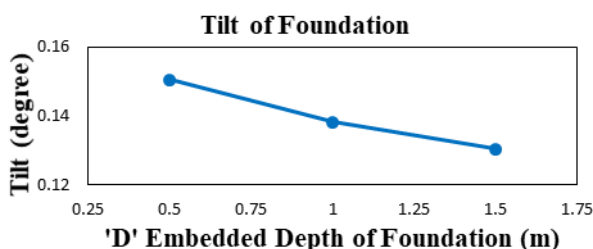


Fig. 20. Changes in rotation due to differential settlement in terms of foundation burial depth

شکل ۱۳. تغییرات حداکثر مقدار I_u بر حسب عمق خاک نزدیک به پی وزنی برای پی با عمق مدفون‌شدگی مختلف

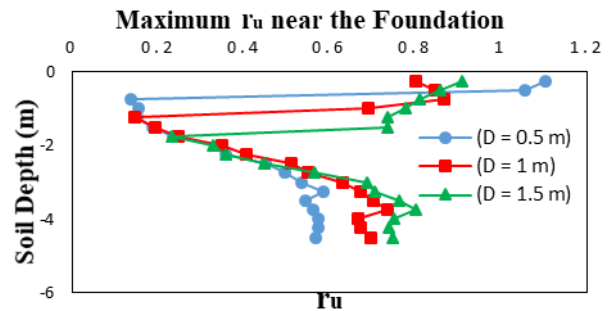


Fig. 16. Changes in the maximum amount of ru in terms of soil depth near the foundation for foundations with different burial depths

شکل ۱۴. تغییرات حداکثر مقدار I_u بر حسب عمق خاک بافاصله دور از پی وزنی برای پی با عمق مدفون‌شدگی مختلف

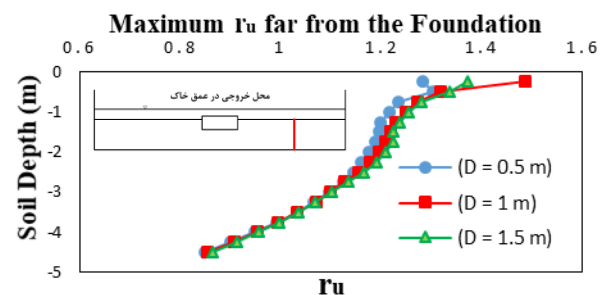


Fig. 17. Changes in the maximum amount of ru in terms of soil depth far from the foundation for foundations with different burial depths

با توجه به شکل (۱۳) می‌توان دریافت که با کاهش عمق از کف مدل تا زیر پی وزنی، حداکثر مقدار شتاب در خاک زیر آن کاهش یافته اما تغییرات در عمق مدفون‌شدگی پی تأثیر واضح و منظمی روی پاسخ شتاب خاک ندارد. همچنین میزان شتاب در خاک کنار پی و در خاک بافاصله دور از پی، با افزایش عمق مدفون‌شدگی پی تغییری نمی‌کند.

با افزایش عمق مدفون‌شدگی پی وزنی از ۰/۵m تا ۱/۵m، به نظر می‌رسد که به علت مقاومت پی در برابر واژگونی تحت بار زلزله، میزان دوران پی ناشی از نشست تفاضلی حدود ۱۳٪ کمتر شود که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است. از طرف دیگر هر چقدر یک پی به مقدار بیشتری در خاک مدفون باشد، مقدار نشست مورد انتظار نیز باید کمتر شود [24]، که در اینجا حدود

۶- نتیجه گیری

فونداسیون توربین های بادی فراساحلی یکی از مهم ترین بخش های یک توربین بادی است چراکه درصد بالایی از هزینه ساخت و اجرای کامل یک توربین بادی را شامل می شود. همچنین به دلیل شرایط خاص آب و هوایی و بستر دریا برای قرار گرفتن فونداسیون در آن، شرایط اشباع خاک و تحمل نیروهای بیشتر از سمت سازه، اهمیت آن دوچندان می شود. یکی از انواع این فونداسیون ها، پی وزنی است.

در این موضوع از مهم ترین مباحث در طراحی پی های وزنی، شرایط بارگذاری ناشی از زلزله و احتمال وقوع روانگرایی خاک ماسه ای در زیر این پی ها است. در چنین شرایطی که آیین نامه ها به طور ویژه به بررسی بیشتر برای طراحی درست توصیه دارند، یو و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی در یک آزمایش ساتریوفیوژ، مدلی از یک توربین بادی فراساحلی به همراه پی وزنی را در خاک ماسه ای با قابلیت روانگرایی تحت بارگذاری زلزله مورد آزمایش قرار دادند. در این پژوهش که از نرم افزار OpenSees به منظور مدل سازی سه بعدی استفاده شد، از مدل رفتاری PDMY و المان های برای مدلسازی خاک استفاده شد که فشار آب را نیز در نظر می گیرند. بعد از انجام درستی آزمایی و اطمینان از هماهنگی خوب بین نتایج آزمایشگاهی و عددی، مطالعه پارامتریک به منظور بررسی اثر ابعاد پی و عمق مدفون شدگی پی وزنی صورت گرفت. شایان ذکر است که مقادیر I_{II} و شتاب در خاک با درصد خطای قابل قبولی درستی آزمایی شدند و نتایج مطالعه پارامتریک به صورت زیر به دست آمد:

۱. با کاهش ابعاد پی وزنی از $4/75m$ به $2/75m$ و در نتیجه افزایش فشار ناشی از وزن پی به خاک زیر آن، در حداکثر مقدار I_{II} در کف مدل و زیر پی به ترتیب حدود 7% و 25% کاهش دیده می شود. همچنین در کنار پی وزنی با کاهش ابعاد پی، حداکثر مقدار I_{II} کاهش می یابد؛ اما این تغییرات روی I_{II} در فاصله دور از پی وزنی تأثیر آنچنانی ندارد. با تغییرات ابعاد پی وزنی، شتاب در نزدیک و دور از پی وزنی تغییر خاصی نکرده است. از طرفی با افزایش ابعاد پی وزنی از $2/75m$ به $4/75m$ ، مقاومت پی در برابر دوران به اندازه 60% بیشتر شده و همچنین

مقدار تغییر مکان افقی سازه در ارتفاع $3/25m$ کاهش یافته و نشست نهایی پی وزنی به مقدار 35% کاهش یافته است.

۲. با افزایش عمق مدفون شدگی پی وزنی از $0/5m$ تا $1/5m$ ، حداکثر مقدار I_{II} در موقعیت مرکز مدل، در دو عمق کف مدل و زیر پی وزنی به ترتیب حدود 24% و 15% با افزایش همراه شده است. این افزایش در کنار پی وزنی در اعماق نزدیک به کف مدل حدود 30% نیز مشاهده شده است اما با فاصله گرفتن از پی وزنی در راستای x اثرگذاری عمق مدفون شدگی پی بسیار کم می شود. همچنین حداکثر مقدار شتاب در خاک زیر پی وزنی، به صورت نامنظم تغییر می کند که قابل چشم پوشی است. در کنار پی وزنی و در فاصله دور از آن مقدار شتاب تحت تأثیر عمق مدفون شدگی نیست. با افزایش عمق مدفون شدگی پی وزنی تغییر مکان افقی سازه به مقدار کم افزایش یافته است. نشست و دوران پی هم با افزایش عمق مدفون شدگی از $0/5m$ تا $1/5m$ به ترتیب حدود 40% و 13% کاهش داشته است.

نتایج فوق در این مقاله می تواند شفافیت بیشتری در رابطه با عملکرد پی های وزنی توربین های بادی فراساحلی تحت اثر بار لرزه ای روی خاک مستعد روانگرایی ایجاد کرده و زمینه را برای پژوهش های آتی و بررسی آثار دیگر پارامترها برای تحلیل لرزه ای این فونداسیون ها آماده کند. همچنین نتایج این پژوهش می تواند کمک شایانی به اهمیت بررسی تحلیل لرزه ای و طراحی بهینه تر این پی ها با توجه به نشست، تغییرات I_{II} و تغییر مکان افقی سازه به منظور عملکرد بهتر توربین ها هنگام زلزله داشته باشد.

۷- مراجع

References

1. European Wind Energy Association (EWEA). (2009). "The economics of wind energy."
2. 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.
3. DNV. (2014). "DNV-OS-J101 Offshore Standard: Design of Offshore Wind Turbine Structures." DNV AS, Høvik, Norway.
4. Byrne, B. W., & Houlsby, G. T. (2003). "Foundations for offshore wind turbines." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1813), 2909-2930.
5. Malhotra, S. (2011). "Selection, design and construction of offshore wind turbine foundations." In *Wind turbines*. IntechOpen.

15. Li, P., Dashti, S., Badanagki, M., & Kirkwood, P. (2018). "Evaluating 2D numerical simulations of granular columns in level and gently sloping liquefiable sites using centrifuge experiments." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 232-243.
16. Bargi, K., Dezvareh, R., & Mousavi, S. A. (2016). Contribution of tuned liquid column gas dampers to the performance of offshore wind turbines under wind, wave, and seismic excitations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(3), 551-561.
17. Dezvareh, R. (2019). Application of Soft Computing in the Design and Optimization of Tuned Liquid Column-Gas Damper for Use in Offshore Wind Turbines. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 2(4), 47-57.
18. Dezvareh, R. (2019). Evaluation of turbulence on the dynamics of monopile offshore wind turbine under the wave and wind excitations. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5(4), 704-716.
19. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L., & Jeremic, B. (2005). "OpenSees Command Language Manual, 2006." Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.
20. Prevost, J. H. (1985). "A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils." *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(1), 9-17.
21. Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E., & Ragheb, A. (2003). "Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils." *International Journal of Plasticity*, 19(6), 883-905.
22. Ramirez, J. M. (2010). "Influence of soil permeability on liquefaction-induced lateral pile response (Doctoral dissertation, UC San Diego)."
23. Jafarian, Y., Mehrzad, B., Lee, C. J., & Haddad, A. H. (2017). "Centrifuge modeling of seismic foundation-soil-foundation interaction on liquefiable sand." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 184-204.
24. Das, B. M. (2015). "Principles of foundation engineering." Cengage learning.
6. Adhikari, S., & Bhattacharya, S. (2012). "Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations." *Shock and vibration*, 19(1), 37-56.
7. Anastasopoulos, I., & Theofilou, M. (2016). "Hybrid foundation for offshore wind turbines: Environmental and seismic loading." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, 192-209.
8. Wang, P., Zhao, M., Du, X., Liu, J., & Xu, C. (2018). "Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 47-57.
9. Attari, Y., Prendergast, L. J., & Gavin, K. (2016, August). "Performance Testing of a Novel Gravity Base Foundation for Offshore Wind." In *Civil Engineering Research in Ireland (CERI) 2016*, NUI Galway, Ireland, 29-30 August 2016. Civil Engineering Research Association of Ireland.
10. Chong, S. H. (2017). "Numerical simulation of offshore foundations subjected to repetitive loads." *Ocean Engineering*, 142, 470-477.
11. Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., & Wilson, D. (2009). "Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(1), 151-164.
12. Safinus, S., Sedlacek, G., & Hartwig, U. (2011, January). "Cyclic response of granular subsoil under a gravity base foundation for offshore wind turbines." In *ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (pp. 875-882). American Society of Mechanical Engineers.
13. Liao, C., Chen, J., & Zhang, Y. (2019). "Accumulation of pore water pressure in a homogeneous sandy seabed around a rocking mono-pile subjected to wave loads." *Ocean Engineering*, 173, 810-822.
14. Ghasemi Fare, O., Rahmani, A., & Pak, A. (2011). "Numerical simulation of soil settlement in liquefiable grounds." In *Proceedings of the Pan-American CGS geotechnical conference*, Toronto, Ontario, Canada.

Numerical study of seismic response of the gravity foundation for offshore wind turbines in saturated sandy soils

alireza saeedi azizkandi, Mohammad hassan Baziar, Ali Taji ,Shervin Sadollahi

- 1- PhD Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
- 2- PhD Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
- 3- MSc Master of Science Graduate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
- 4- MSc Master of Science Graduate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract

Offshore wind turbines (OWTs) are one of the approaches that make it easy to use renewable energy sources such as wind to generate energy. In recent years, the use of offshore wind farms has become attractive due to the high quality of offshore wind energy, no need of land extraction, less destructive effects on the environment. Foundation is one of the most important parts of these systems due to the presence of this structure in specific climatic conditions and location, so that include about 34 percent of constructing and execution cost of a wind turbine. These structures foundation is selected based on water depth, distance from the coast and etc. that the gravity based foundation is one of it. This foundation with its high weight in general stability of the structure against slipping and overturning is a good one for these turbines in shallow water and easily transfers the load from the structure to the soil below and around it. Investigation of foundations in marine and seismic zones under earthquake loading is one of the important design criteria. In the marine environment, soils can soften by increasing the pore water pressure under seismic loading. In the worst case, the earthquake causes liquefaction in the soil and leads to a sudden decrease in bearing capacity and lateral stability of the foundation, which can cause settlement or rotation in the foundation and structure. So the occurrence of liquefaction in relatively loose sand caused by rapid earthquake loading should be evaluated. In the present research, a 3D numerical study of gravity based foundation of OWTs with its structure are performed using Opensees software to investigate the behavior of saturated sandy soils at near and far from Foundation under seismic loading. In order to consider the soil saturation conditions, the mentioned software has been used, which has a good ability in simulating the process of changes in excess pore water pressure due to the existence of numerous and suitable soil behavioral models, including PDMY behavioral models and solid-fluid correlated elements. For this purpose, modeling was performed based on laboratory research of Yu et al. (2015) and Validation be done in good agreement and adaption with the laboratory model on soil response in acceleration and ru (ratio of additional pore water pressure Δu to the effective stress σ'), on the response of gravity foundation in settlement and rotation, and horizontal displacement of the structure. Parametric studies are conducted to investigate dimensions and embedded depth of foundation on soil response at near and far from the foundation, foundation and structures performance (settlement and tilt of foundation and structure horizontal displacement). The results show that increasing the foundation dimensions decreases the settlement and tilt of foundation, but the maximum amount of ru in the soil increases and the acceleration does not change. By increasing the embedded depth of foundation, in the maximum value of ru in the center position of the model and near to the foundation is increased. Also caused a decrease in settlement and tilt.

Keywords: Offshore Wind Turbines, Gravity Base Foundation, Liquefaction, Seismic Loading, Numerical Modeling