

Effects of liquefied soil properties on soil-monopile-wind turbine structure interaction

Mehran Tirandazian¹, Gholamreza. Nouri^{2*}

1- PhD student, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.
2 -Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

The main goal of the 2030 sustainable development plan is to develop access to renewable, sustainable, reliable and cost-effective energy. One of the renewable energy sources is wind energy, which is produced using wind turbines. These turbines are mainly used in coastal or offshore areas that are seismic and liquefied. The development of these turbines in areas with high seismic potential and liquefied soils has necessitated the use of piles and other deep foundations. In this paper, the effect of liquefied soil layer characteristics on the soil-mono pile interaction under the effects of far and near field earthquake records has been investigated. Dynamic nonlinear time history analyses were performed by considering four types of liquefied sand with a thickness of 5 m, under 2 kW turbine load and the effect of 14 earthquake records. Nonlinear analyses are performed in OpenSees software by considering the appropriate behavioral model for soil layers and the interaction between the pile and the soil. The results showed that in earthquakes with a PGA less than 0.4 g and in sandy soils with a density of more than 70% liquefaction does not occur. The highest displacement is related to the pile located in T1 soil, which has the lowest internal friction angle ($\phi = 30$) and the lowest soil compaction percentage. With the occurrence of liquefaction in the middle layer, the support level of the monopile is transferred from ground to the end of the liquefiable layer. Based on the results the values of maximum pore pressure, flexural moment and shear force of the soil under near and far-field records decrease with increasing soil density that is more evident for far-field earthquakes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 December 2020
Revise Date: 01 March 2021
Accept Date: 07 May 2021

Keywords:

Monopile wind turbine
Liquefied soil
Far field earthquake
Near field earthquake
Soil-monopile-wind turbine
Structure interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.264607.2320>

*Corresponding author: Gholamreza Nouri
Email address: r.nouri @khu.ac.ir

تأثیر مشخصات لایه خاک روانگرا در اندرکنش خاک-تک شمع - سازه توربین‌های بادی

مهران تیراندازیان^۱، غلامرضا نوری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

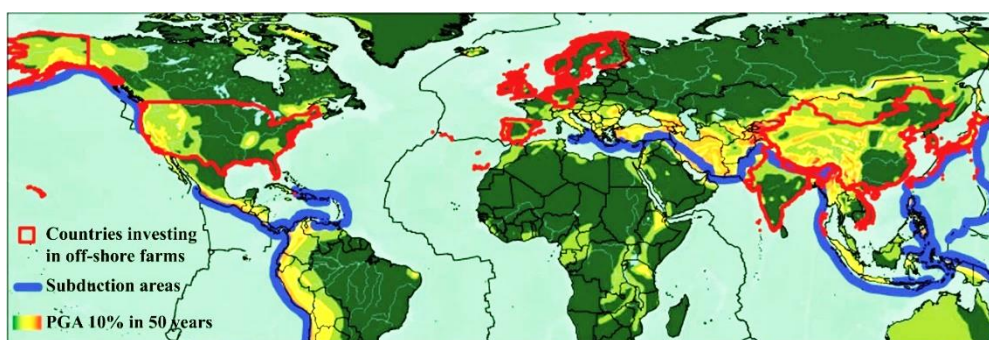
هدف اصلی برنامه توسعه پایدار سال ۲۰۳۰ توسعه دسترسی به انرژی‌های تجدیدپذیر، پایدار، قابل اطمینان و مقرون به صرفه است. از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به انرژی باد و استفاده از توربین‌های بادی اشاره کرد. این توربین‌های عمدتاً در مناطق ساحلی یا فراساحلی لرزه‌خیز و مستعد روانگرایی استفاده می‌شود. رشد اجرای این توربین‌ها در مناطق لرزه‌خیز توام با بستر روانگرا استفاده از شمع‌ها و سایر فونداسیون‌های عمیق را ضروری کرده است. در این مقاله تغییر مشخصات لایه خاک روانگرا در اندرکنش خاک-تک شمع - سازه توربین‌های بادی در چهار نوع ماسه روانگرا با ضخامت ۵ متر، تحت بار توربین ۲ کیلو وات و تأثیر ۱۴ رکورد زمین‌لرزه حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با در نظر گرفتن مدل رفتاری مناسب برای لایه‌های خاک، اندرکنش بین شمع و خاک به روش مستقیم در نرم افزار OpenSees انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در زمین‌لرزه‌های با بیشینه شتاب کمتر از $0.4g$ ، در خاک‌های ماسه‌ای با تراکم بیش از ۷۰٪ روانگرایی رخ نمی‌دهد. بیشترین جابجایی به شمع در خاکی که زاویه اصطکاک داخلی $(\phi=30^\circ)$ و کمترین درصد تراکم را دارد، اتفاق می‌افتد. با وقوع روانگرایی در لایه میانی تراز اتکالی گیرداری شمع از حوالی سطح زمین به انتهای لایه روانگر منتقل می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد، مقادیر حداکثر فشار منفذی، لنگر خمشی و نیروی برشی خاک تحت زمین لرزه‌های حوزه دور و نزدیک با افزایش تراکم خاک کاهش می‌یابد و این کاهش برای زلزله‌های حوزه دور مشهودتر است.

کلمات کلیدی: توربین بادی تک شمع، خاک روانگرا، زمین لرزه حوزه دور، زمین لرزه حوزه نزدیک، اندرکنش خاک-تک شمع-سازه توربین بادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.264607.2320	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.264607.2320	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۲/۱۷	۱۳۹۹/۱۲/۱۱	۱۳۹۹/۱۰/۱۰
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				غلامرضا نوری		
				r.nouri@khu.ac.ir		

۱- مقدمه

امروزه، تولید انرژی باد از طریق مزارع بادی دریایی در حال رشد است. باد، به عنوان منبعی برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و سبز است و به طور فزاینده‌ای مناطق فراساحلی گزینه‌های مناسبی برای این مهم در دنیا انتخاب می‌شوند. به دلیل تحمل بار و هزینه‌های اولیه، پی‌های متکی بر تک شمع یکی از تکیه‌گاه‌های متداول در این صنعت به شمار می‌آید [۱]. در شکل ۱، بنا بر گزارش "شورای جهانی انرژی باد"، کشورهای اصلی که در حال توسعه و سرمایه‌گذاری در استفاده از توربین‌های بادی ساحلی و فراساحلی هستند، نشان داده شده‌اند (خطوط قرمز شکل ۱) [۲]. این در حالی است که تعدادی از کشورهای فوق‌الذکر مانند ایالات متحده آمریکا، چین، هند و جنوب شرق آسیا در مناطق لرزه‌خیز و در مجاورت مناطق فرو رانش قرار دارند (خطوط آبی در شکل ۱)، جایی که احتمال اتفاق زمین‌لرزه‌های در رده بزرگای M9 وجود دارد [۲]. بنابراین برای این نوع سازه‌ها باید روش‌های ارزیابی و یک طراحی قابل اعتماد در نظر گرفته شود. علاوه بر این، از آنجا که نصب و بهره‌برداری از این سازه‌ها در کمربند لرزه‌خیزی در حال توسعه هستند، طراحی لرزه‌ای این سازه‌های ساحلی و فراساحلی ملزم به تحلیل‌های دقیق و کاربردی تحت تحریکات شدید زلزله در مناطق نزدیک گسل و دور از گسل می‌باشد. تاثیر مخاطرات محیطی مثل زلزله‌های شدید، باد، طوفان و سونامی بر توربین‌های بادی دریایی دقت بیش از پیش در جزئیات مدل‌سازی اثرات اندرکنش خاک-سازه و طراحی لرزه‌ای که نقش مهمی در عملکرد سازه دارند، را الزام می‌دارد. [۳][۴].



شکل ۱- نقشه کشورهای با سرمایه‌گذاری در مزارع بادی-دریایی (مرزهای قرمز)، مناطق فرو رانش (خطوط آبی) و نقشه جهانی خطر لرزه‌ای [۲]

کجورلاگ و کی‌نیا (۲۰۱۵) [۵] در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ دینامیکی یک توربین بادی تک شمع تحت تحریکات افقی و عمودی زمین‌لرزه با وجود یک لایه خاک غیرهمگن پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر نیاز به استفاده از ضریب ایمنی ۲ در طراحی این گونه از سازه‌ها است. به علاوه یافته‌های این محققین نشان داد که اثرات تحریکات قائم زلزله در مناطق لرزه‌ای با شدت زمین‌لرزه کم تا متوسط می‌بایست در طراحی لرزه‌ای این توربین‌ها و پی آن‌ها لحاظ شود. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۶] در مطالعه‌ای عددی به بررسی تاثیر تک شمع‌ها بر توزیع فشار منفذی، تنش‌های خاک و روانگرایی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تک‌شمع تعبیه شده سبب کاهش عمق روانگرایی در اطراف سازه می‌شود و این کاهش برای خاک با درجه اشباع و نفوذپذیری بیشتر واضح‌تر است. چوی و بادچاریا (۲۰۱۶) [۷] در مطالعه‌ای تاثیر تغییرات سختی خاک تحت بارگذاری چرخه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سختی خاک دانه‌ای تحت بار چرخه‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که سختی مونوپایل‌های مستقر در خاک‌های دانه‌ای با چرخه بارگذاری افزایش یابد و این افزایش ممکن است باعث تغییر فرکانس طبیعی سیستم توربین بادی شود. آستین و جراث (۲۰۱۷) [۸] به بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ لرزه‌ای توربین‌های بادی دارای پایه‌های فولادی مخروطی کوتاه پرداختند. آن‌ها چهار نوع پی: الف (گسترده، ب) تک شمع، ج) گروه شمع با کلاهک و د) پی گسترده به همراه انکراژ را بررسی کردند. همچنین توصیه‌هایی برای ساده سازی روند تحلیل اندرکنش خاک-سازه در توربین‌های بادی که تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار دارند، ارائه داده‌اند. پیچ و همکاران (۲۰۱۷) [۹] یک مدل متفاوت برای بررسی پاسخ پی ارائه دادند که قادر به محاسبه سختی پی در زمان بارگذاری چرخه‌ای و لرزه‌ای و همچنین مدلی برای میرایی پی ارائه کردند. این محققین همچنین با استفاده از مدلی پیشرفته، تاثیر روانگرایی در تحلیل پاسخ توربین‌های بادی دریایی تک شمع را مورد

بررسی قرار دادند. دی ریزی و همکاران (۲۰۱۸) [۲] عملکرد سازه‌های یک توربین بادی معمولی را که تحت اثر زمین‌لرزه ارزیابی کردند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که توربین‌های بادی متکی بر تک شمع به طور قابل ملاحظه‌ای در برابر زلزله‌های شدید آسیب‌پذیر و حساس بوده و این حساسیت با نرم شدن خاک، بیشتر می‌شود. علاوه بر این، برای جلوگیری از برآورد بیش از حد ظرفیت لرزه‌ای توربین‌های بادی، مدل‌سازی دقیق سازه توسط این پژوهش توصیه شده است. وانگ و همکاران (۲۰۱۸) [۱۰] پاسخ دینامیکی توربین‌های بادی تک شمع قرار گرفته در خاک رس را تحت تأثیر تحریکات باد، موج و زلزله بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از ضرورت در نظر گرفتن ترکیبی از بارهای باد، موج و زلزله در طراحی توربین‌های بادی دریایی است. وانگ و ژانگ (۲۰۱۸) [۱۱] فرمولی ساده برای تحلیل فرکانس اصلی سیستم توربین بادی دریایی تک شمع در طراحی اولیه ارائه کردند. بررسی پارامتریک آن‌ها نشان داد که طول و قطر دیوار برج و شمع و همچنین ضخامت دیواره برج پارامترهای موثر بر فرکانس اصلی سیستم توربین بادی دریایی هستند. پاترا و هالدرا (۲۰۱۸) [۱۱] در یک مطالعه پارامتریک به بررسی اثرات طول و قطر شمع و همچنین شدت زلزله بر پاسخ لرزه‌ای توربین‌های بادی تک شمع پرداختند. این محققین نشان دادند که با افزایش طول شمع عمق روانگرایی کاهش می‌یابد، اما افزایش قطر شمع موجب افزایش ناچیزی در عمق روانگرایی می‌شود. همچنین با افزایش طول شمع سختی کلی سیستم شمع - خاک و مقاومت در برابر روانگرایی افزایش پیدا می‌کند. و همکاران (۲۰۱۹) [۱۲] با توجه به تأثیر عدم قطعیت‌های ایجاد شده در مدل اندرکنش خاک - شمع، پاسخ دینامیکی توربین‌های بادی دریایی متکی بر تک شمع را مورد بررسی قرار دادند. رویکرد پیشنهادی مطالعه آن‌ها این است که طول نفوذ شمع براساس مشخصات خاک تعریف شود. بعلاوه، آن‌ها پارامترهای طراحی را برای فولاد و بتن مصرفی بهینه کردند. این عدم قطعیت‌ها سپس در یک تحلیل ارتعاش آزاد تصادفی، به همراه هر یک از متغیرهای تصادفی در پراکندگی پاسخ که با تحلیل حساسیت برآورد شده، وارد می‌شوند. یافته‌ها نشان می‌دهد که عدم قطعیت در مدل‌سازی مشخصات خاک بر فرکانس طبیعی تأثیر قابل توجهی می‌گذارد. این یک عامل کلیدی است که باید در ارزیابی عمر مفید سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی دریایی استفاده شود. بالکر و همکاران (۲۰۱۹) [۱۳] مدل عددی براساس روش المان مرزی را برای بررسی عملکرد تک شمع تحت بار پیچشی لرزه‌ای ارائه کردند. نتایج نشان داد که مدل این محققین توانایی برآورد آسیب و تعیین ظرفیت شمع تحت بارگذاری پیچشی چرخه‌ای با دقت کافی را دارد. بعلاوه بررسی پارامتریک آن‌ها نشان داد که فرکانس، دامنه و تعداد چرخه‌ها نقش قابل توجهی در پاسخ پیچشی شمع دارد. کم‌نترزد و همکاران (۲۰۱۹) [۱۴] مدل پیشرفته اجزای محدود سه بعدی را برای تحلیل دینامیکی سیستم توربین بادی دریایی تک شمع و خاک ارائه دادند. این محققین یک مدل پیشرفته برای بررسی اثرات اندرکنش دینامیکی توربین ۸ مگاواتی تک شمع و خاک را با در نظرگیری اثرات فشار منفذی ارائه کردند. لی و همکاران (۲۰۲۰) [۱۵] با استفاده از یک روش اجرایی جدید توانستند به ظرفیت بالاتری از تحمل بار محوری تک شمع‌های استفاده شده در توربین‌ها دست یابند. در این مطالعه با در نظرگیری چهار مدل مختلف و اضافه کردن صفحات سوراخ‌دار به مقاطع توخالی شمع به بررسی اثر این صفحات سوراخ‌دار در بحث تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که این شمع دارای قدرت تحمل بالاتری در مقایسه با شمع لوله‌ای توخالی است. کاظمی و کی‌نیا (۲۰۲۰) [۱۶] در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ لرزه‌ای تک شمع‌ها و پی‌های صندوقه‌ای توربین‌های بادی قرار گرفته در خاک روانگرا پرداختند. از نرم افزار FLAC3D و مدل SANISAND برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی برای توربین بادی استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد چرخش تک شمع‌ها هنگام اعمال زلزله با افزایش طول شمع کاهش می‌یابد و هنگامی که انتهای شمع مورد نظر در یک خاک غیر روانگرا قرار بگیرد (مانند یک لایه ماسه‌ای متراکم) دوران در قسمت پایین شمع به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به طور کلی، جابجایی‌های عمودی تک شمع‌ها به دلیل وزن بیشتر، در مقایسه با پی صندوقه‌ای هنگام اعمال زلزله بیشتر بوده است. جابجایی دائمی چرخشی و افقی تک شمع به دلیل جایگزینی ماسه روانگرا در اطراف شمع با ماسه غیرروانگرا کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش قطر شمع دوران کاهش می‌یابد.

تأثیر مشخصات زلزله حوزه نزدیک روی فونداسیون پل‌ها، ساختمان‌ها و سدها در بسیاری از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. بسیاری از این مطالعات به وضوح نشان می‌دهد که زلزله حوزه نزدیک باعث آسیب جدی‌تر به فونداسیون سازه‌ها شده است [۱۷] و حرکات لرزه‌ای که در مناطق حوزه نزدیک و در جهت گسیختگی گسل ثبت می‌شوند با حرکات مشاهده شده در مناطق دور از گسل بسیار متفاوت هستند [۱۸]. و براساس تاریخچه بیان شده بیشتر مطالعات بر روی مشخصات شمع و خاک متمرکز بوده و اثر زلزله و نوع تحریکات وارده که یک عامل تأثیرگذار در بحث اندرکنش شمع - خاک و بحث روانگرایی به شمار می‌آید کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در

این مقاله علاوه بر در نظرگیری رنج وسیعی از مشخصات خاک لایه روانگرا، دو گروه رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک نیز برای بررسی پاسخ لرزه‌ای توربین‌های بادی تک‌شمع استفاده شده است. برای خاک ماسه‌ای روانگرا (لایه میانی) چهار گروه مختلف در نظر گرفته شده است که دارای ضرایب اصطکاک داخلی، سرعت موج برشی، درصد تراکم و تخلخل متفاوت می‌باشند و با استفاده از ۱۴ رکورد زمین‌لرزه حوزه دور و نزدیک در نرم افزار OpenSees تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی انجام شده است. در واقع هدف این مقاله ارزیابی تاثیر مشخصات خاک روانگرا، تاثیر شدت زمین‌لرزه، تاثیر حوزه دور و یا نزدیک بودن زلزله بر روی نحوه وقوع روانگرایی خاک و پاسخ لرزه‌ای تک شمع توربین‌های بادی است.

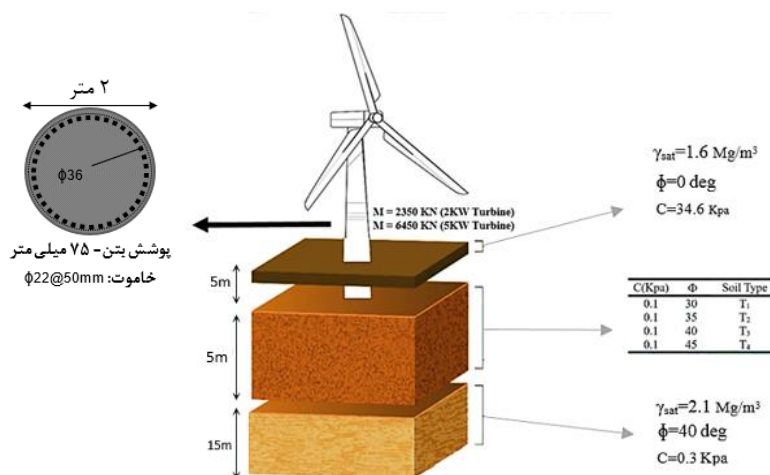
۲- مشخصات مدل

۲-۱- لایه خاک و شرایط مرزی

مشخصات کلی مدل خاک، توربین و شمع در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده است. ساختگاه مدل شده دارای ابعاد ۱۲۰ متر × ۱۲۰ متر با عمق ۲۵ متر است. مشخصات لایه‌های خاک به شرح زیر است: لایه فوقانی از خاک رس به ضخامت ۵ متر و لایه میانی، ماسه روانگرا با ضخامت ۵ متر و لایه زیرین، از شن و ماسه متراکم با ضخامت ۱۵ متر تشکیل شده است. تغییر نوع خاک در لایه میانی شامل چهار حالت با مشخصات مکانیکی مختلف است که به ترتیب T₁ تا T₄ نامگذاری شده است. ابعاد مش خاک و شرایط مرزی به گونه‌ای تعیین می‌شود که خاک در مرزهای انتهایی مانند میدان آزاد رفتار کند. لازم به ذکر است در مطالعه لئو و همکاران (۲۰۱۹) [۱۹] حداقل ابعاد توصیه شده نصف ابعاد در نظر گرفته شده در این مطالعه می‌باشد و در این مطالعه برای جلوگیری از برگشت امواج لرزه‌ای از مرزهای جانبی، ابعاد دو برابر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که صحت ابعاد انتخاب شده خاک با استفاده از آنالیز حساسیت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. المان‌های خاک در مرز تحتانی ستون خاک در هر دو جهت بسته شده است. گره‌های المان خاک در دو مرز جانبی در درجات آزادی خود در سطح برابر هستند. این فرض باعث می‌شود که فقط امواج برشی از ستون خاک عبور کنند. ضخامت قسمت‌های بیرونی المان خاک بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود. بنابراین وزن المان خاک آنقدر زیاد است که اثرات حرکتی شمع بر مش خاک تأثیر نمی‌گذارد، زیرا فقط رفتار خاک اطراف پی مدل می‌شود. قابل ذکر است که افزایش ضخامت المان خاک خارج از نواحی کناری تأثیری در انتشار امواج برشی در محیط خاک ندارد و فقط برای حفظ کرنش سطح خاک در میدان دور دست استفاده می‌شود [۲۰-۲۳]. مشخصات لایه‌های خاک که شامل وزن مخصوص، ضریب اصطکاک و چسبندگی می‌باشد به علاوه جزییات میلگردگذاری ستون شمع به تفکیک در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. ابعاد مش بر اساس آنالیز حساسیت و تطابق پاسخ‌ها با نتایج سایر محققین براساس صحت سنجی بدست آمده است. همچنین در انتخاب ابعاد مش محدودیت ارتفاع حداکثر المان‌های خاک براساس رابطه پیشنهادی (رابطه ۱) لحاظ شده است.

$$h_{\max} = \frac{v_s}{\lambda f_{\max}}$$

که در آن h_{\max} ، ماکزیمم ارتفاع برحسب متر و f_{\max} ، ماکزیمم محتوی فرکانسی حرکات ورودی زمین و v_s ، سرعت موج برشی برحسب متر بر ثانیه در نرم‌ترین لایه خاک می‌باشد. با فرض اینکه ماکزیمم محتوی فرکانسی حرکت زمین به‌طور محافظه‌کارانه ۴۰ هرتز و سرعت موج برشی در لایه ماسه با درصد تراکم ۳۵ درصد، برابر ۱۶۰ متر بر ثانیه باشد، با استفاده از رابطه (۱)، ماکزیمم ارتفاع المان‌های خاک ۰/۵ متر به دست می‌آید.



شکل ۲- شماتیکی از مدل مورد نظر و جزئیات خاک و شمع و توربین

جدول ۱- مشخصات مدل‌های بررسی شده در مطالعه حاضر

رکوردهای زلزله	تیپ ماسه							قطر شمع	ضخامت لایه روانگرا	طول شمع	ساختمانگه و شمع
	C (kpa)	ϕ	Vs (m/s)	e	Dr %	ماسه	نامگذاری مدل				
FAR7 تا FAR1 NER7 تا NER1 بر اساس جدول ۳	۰/۱	۳۰	۱۴۱	۰/۷۶	۳۳	T1	مدل H05-1	۲متر	۵متر	۳۰متر	
	۰/۱	۳۵	۱۷۴	۰/۶۷	۵۷	T2	مدل H05-2				
	۰/۱	۴۰	۱۹۵	۰/۶	۷۴	T3	مدل H05-3				
	۰/۱	۴۵	۲۱۰	۰/۵۵	۸۷	T4	مدل H05-4				

۲-۲- مدل سازی ستون-شمع

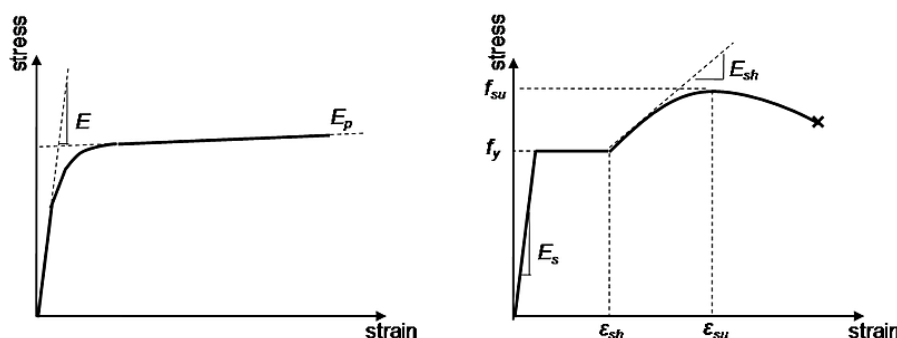
ستون شمع انتخاب شده برای مدل، با قطر دو متر طراحی شده است. میلگردهای طولی با قطر ۳۶ میلی متر (پوشش ۷۵ میلی متر) و میلگردهای عرضی با قطر ۲۲ میلی متر (با فاصله ۵۰ میلی متر) در نظر گرفته شده است. ارتفاع ستون شمع طراحی شده ۳۰ متر است. ۲۰ متر از آن در زمین و ۱۰ متر دیگر در خارج از زمین قرار دارد. ستون-شمع ذکر شده برای یک توربین ۲ کیلوواتی و ۵ کیلوواتی طراحی شده است.

۲-۳- مشخصات مصالح

در این تحقیق جهت مدل سازی از نرم افزار OpenSees استفاده شده است. در این بخش، مدل های رفتاری مواد مورد استفاده در تحقیق معرفی خواهند شد. برای تعریف مدل رفتاری خاک رس از مدل چند تسلیمی مستقل از فشار استفاده شده است. این مدل برای شبیه سازی پاسخ یک جهت و چرخه های موادی که رفتار برشی آن ها به تغییر محصور شونده حساس نیست، بکار می رود. در زمان اعمال بار ثقلی رفتار این ماده ارتجاعی-خطی و در طول تحلیل دینامیکی، با به روز کردن رفتار ماده پاسخ تنش- کرنش ماده ارتجاعی-خمیری می گردد. در این مصالح، خمیری بودن بر مبنای مفهوم چند سطحی یا سطوح تو در تو است. برای استفاده از این مدل نیاز به تعریف درست پارامترهای وزن مخصوص، مدل برشی، نسبت پواسون و مدول حجمی است و نیاز به کالیبراسیون خاصی ندارد.

مدل مناسب برای خاک ماسه ای نیز از اهمیت زیادی برخوردار است و مدلهایی که مشخصه بیشتری از ماسه را در بر دارند، معمولاً قادر به پیش بینی نتایج دقیق تر در مدل سازی هستند. مدل رفتاری مورد استفاده بایستی قادر به مدل سازی خصوصیات اصلی ماسه اشباع تحت بارگذاری لرزه ای در شرایط وجود تنش برشی اولیه و فشارهای همه جانبه در محدوده وسیعی از دانسیته نسبی باشد. در این تحقیق

مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای ماسه بر پایه مطالعات انجام شده توسط پروست (۱۹۸۵) [۲۴] است که در آن از رویکرد چند صفحه‌ای برای شبیه‌سازی رفتار سیکلی خاک استفاده شده است. این مدل رفتاری توسط ال‌جمال و همکاران (۲۰۰۳) [۲۵] برای در نظر گرفتن اثرات روانگرایی اصلاح شده است. این مدل رفتاری در کتابخانه نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق با نام ماده چند تسلیمی وابسته به فشار^۱ نوع ۲ شناخته می‌شود. این ماده یک ماده ارتجاعی-خمیری برای شبیه سازی خصوصیات مواد حساس به فشار تحت حالت‌های بارگذاری عمومی است. پدیده اتساع در اثر برش و وقوع پدیده روانگرایی که در ماسه‌ها در طول بارگذاری یک جهت اتفاق می‌افتد از خصوصیات این مدل هست. این مدل رفتاری برای ۴ نوع خاک ماسه‌ای با تعداد مختلف ضربات آزمایش نفوذ استاندارد^۲ کالیبره شده است. مصالح استفاده شده برای اعضای سازه‌ای و شمع‌ها فولاد می‌باشد. برای تعریف مصالح فولاد، از مصالح Steel 02، استفاده شده است که منحنی تنش کرنش آن مطابق با شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش برای مدلسازی رفتار مصالح فولادی [۱]

جدول ۲- مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای لایه رسی، ماسه ای و مصالح بتنی و فولادی مدل

Clay with low or medium plasticity (CL, CI), stiff consistency, $S_r < 0.8$				Sand with trace of fines (S-F), dense			
Unit weight:	γ	21.00	kN/m ³	Unit weight:	γ	17.50	kN/m ³
Poisson's ratio:	ν	0.40		Poisson's ratio:	ν	0.30	
Oedometric modulus:	E_{oed}	21.50	MPa	Oedometric modulus:	E_{oed}	28.50	MPa
Saturated unit weight:	γ_{sat}	21.00	kN/m ³	Saturated unit weight:	γ_{sat}	17.50	kN/m ³
Elastic modulus:	E	20.00	MPa	Elastic modulus:	E	15.00	MPa
Cohesion of soil:	c_u	85.00	kPa	Pile skin friction:	δ	20.00	°
Adhesion factor:	α	1.00		Angle of internal friction:	ϕ_{ef}	30-45	°
Coefficient of lateral stress :	K	1.00		Well graded sand (SW), dense			
Concrete: C 25/30				Unit weight:	γ	20.00	kN/m ³
Cylinder compressive strength	f_{ck}	25.00	MPa	Poisson's ratio:	ν	0.28	
Tensile strength	f_{ctm}	2.60	MPa	Oedometric modulus:	E_{oed}	96.00	MPa
Elasticity modulus	E_{cm}	31000.00	MPa	Saturated unit weight:	γ_{sat}	20.00	kN/m ³
Shear modulus	G	12917.00	MPa	Elastic modulus:	E	58.00	MPa
Transverse and Longitudinal steel: B420				Pile skin friction:	δ	30.00	°
Yield strength	f_{yk}	420.00	MPa	Angle of internal friction:	ϕ_{ef}	40.00	°

۴-۲- مشخصات رکوردهای زمین لرزه

با توجه به تحقیقات انجام گرفته بر روی رکوردهای ثبت شده، جنبش قوی زمین در نزدیکی گسل و تاثیر این نوع رکوردها بر روی سازه‌های مختلف نیاز توجه به این رکوردها و آثار آن بر روی سازه‌ها، در دو دهه اخیر اهمیت تحقیق بیشتری را به خود جلب نموده است

¹ PDMY02

² N160

[۲۶]. در این پژوهش نیز با در نظرگیری هر دو نوع رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک اثرات هر دو دسته رکوردبررسی و نتایج آنها مقایسه شده است. در جدول ۳ لیست رکوردهای زمین لرزه در نظر گرفته شده و مشخصات آنها ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک در نظر گرفته برای تحلیل

Record	Name	Year	Station	PGA(m/s ²)	t(s)
FR1	Bishop (Rnd Val)	1984	McGee Creek - Surface	0.107g	7
FR2	Whittier Narrows-02	1987	LA - Hollywood Stor FF	0.162g	39
FR3	Lytle Creek	1970	Cedar Springs Pumphouse 126	0.203g	10
FR4	Borah Peak	1983	CEM	0.346g	37
FR5	Coyote Lake	1979	SJB Overpass_ Bent 3 g.l	0.539g	27
FR6	Chalfant Valley	1986	Bishop - LADWP South St	0.569g	40
FR7	Morgan Hill	1984	Corralitos	0.63g	28
NR1	Northridge	1994	Sylmar - SCS	0.45g	20
NR2	Manjil	1990	Abbar Station	0.51g	20
NR3	Erizacan	1992	ERZ	0.51g	20
NR4	Loma Prieta	1989	Los Gatos (LGP)	0.563g	20
NR5	Bam	2003	BAM	0.79g	30
NR6	Kobe	1995	KJM	0.821g	20
NR7	Tabas	1978	TAB	0.852g	30

۳- مدل سازی عددی

۳-۱- حل مساله

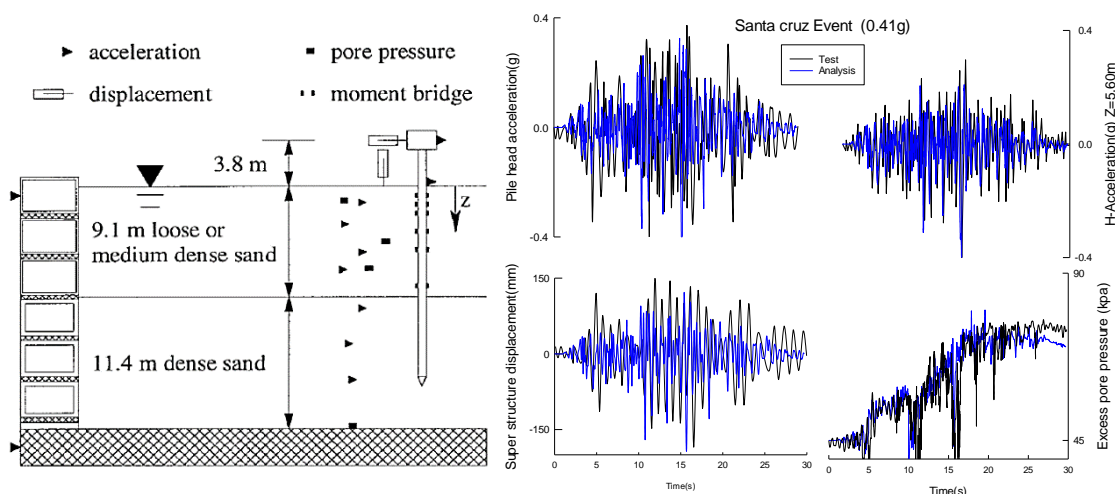
روش تحلیل به این صورت است که در ابتدا، هندسه مدل المان محدوده تعریف شده است. این مرحله شامل هندسه ستون، شمع و خاک است. در تعریف المان‌های تیرستون غیرخطی برای شمع، المان فایبر اختصاص داده می‌شود. در مرحله بعد، از آنالیز ارتجاعی ثقلی برای شبیه‌سازی شرایط زیر سطحی استفاده می‌گردد. این مرحله به صورت یک تحلیل انتقالی با بازه‌های زمانی بزرگ برای به دست آوردن حالت‌های فشار آب حفره‌های هیدرواستاتیک صحیح صورت می‌پذیرد. مدل خاک بر اساس مدل غیرخطی به روز می‌شود و تعدادی تحلیل دینامیکی انتقالی برای تطبیق مقادیر اولیه اعمال می‌شود. برای روند بهتر همگرایی این مراحل با بازه‌های زمانی کوچکتری انجام می‌شوند. سپس نقاط المان‌های شمع به خاک تغییر شکل داده شده متصل می‌گردد تا سیستم سازه‌ای در تحلیل بار ثقلی شبکه دو بعدی خاک شرکت نداشته باشد و تغییر مکان‌های ناشی از نشست خاک به طور غیر واقعی به فنرهای خاک و سازه اعمال نگردد. خصوصیات لایه خاک روانگرا به روز می‌شود. این مصالح تنش موثر متوسط دو المان خاک اختصاص داده شده به خود را به عنوان تنش تحکیم اولیه قبل از بارگذاری زهکشی نشده در نظر می‌گیرند. از این مرحله بعد در تمامی طول تحلیل تاریخچه زمانی رفتار این مواد به تنش‌های موثر محیط و فشارهای آب حفره‌ای وابسته خواهد بود. در مرحله آخر از آنالیز تاریخچه زمانی انتقالی با بازه زمانی متغیر برای تحلیل لرزه‌ای مدل المان محدود اندرکنش خاک-شمع-سازه استفاده شده است.

۳-۲- صحت سنجی

همانطور که عنوان شد در این مقاله بررسی عملکرد لرزه‌ای مونوپایل‌های قرار گرفته در خاک‌های روانگرا مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جهت صحت سنجی مدل‌های اصلی، نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش سانتریفیوژ انجام شده توسط ویلسون (۱۹۹۸) [۲۶] مورد مقایسه قرار گرفت. در کار این محققین از ماسه یکنواخت نوادا با دو لایه نشان داده شده در شکل ۴ استفاده شده است. ضخامت لایه پایین متراکم ($D_r = 80\%$) ۱/۴ متر و لایه فوقانی سست ۹/۱ متر ضخامت می‌باشد. پاسخ شمع تحت رکورد زلزله سانتاکروز مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ پاسخ‌های فشار آب منفذی اضافی، جابجایی و شتاب در بالای شمع و عمق ۵/۶ متر با آزمایش سانتریفیوژ مقایسه شد. مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب، جابجایی شمع، تغییرات فشار آب حفره‌ای و تغییرات شتاب در عمق لایه خاک نشان می‌دهد که نتایج مدل اجزای محدود با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد. بنابراین، مدل اجزای محدود ایجاد شده قابل اعتماد تلقی می‌شود. خلاصه‌ای از مقایسه حداکثر مقادیر پارامترها در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- مقادیر خطای پاسخ های بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و عددی

پارامتر	عمق (m)	نتایج آزمایش	تحلیل نتایج اجزاء محدود	درصد اختلاف تحلیل به آزمایش
بیشینه شتاب	1.4~1.5	0.42g	0.38g	-9.5
	5.5~5.6	0.28g	0.32g	+14.3



شکل ۴- مدل مورد بررسی و نتایج صحت سنجی انجام شده

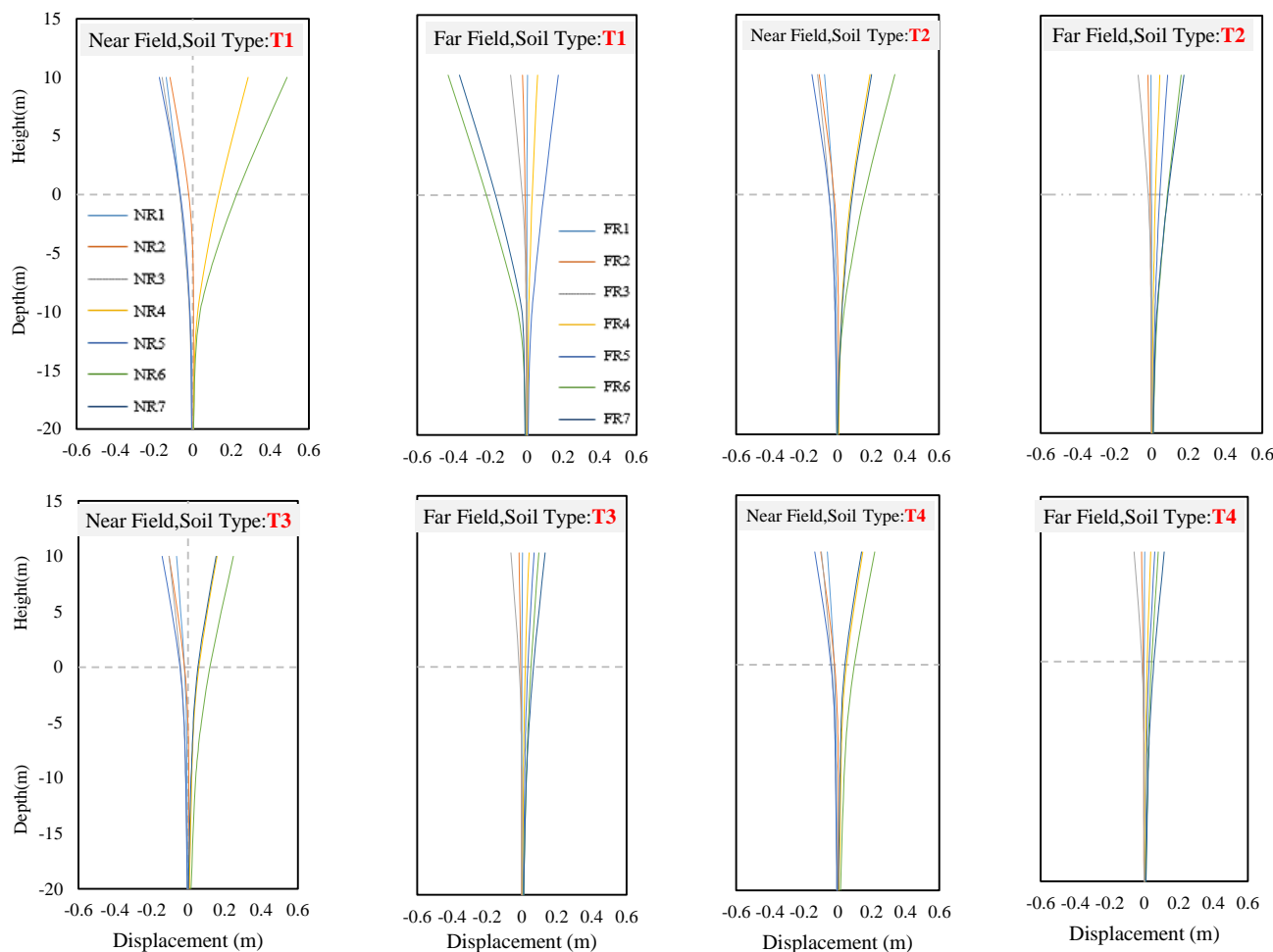
۳-۳- تجزیه و تحلیل نتایج

بر اساس مدل سه بعدی با نرم افزار OpenSees، با تغییر مشخصات خاک لایه روانگرا و رکورد زلزله، عملکرد لرزه‌ای توربین بادی با پی تک شمع با توان ۲KW در خاک‌های ماسه‌ای مستعد پدیده روانگرایی با ضخامت لایه روانگرای ۵ متر، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این ترتیب تعداد ۵۶ مدل با تغییر هر یک از پارامترهای یاد شده ساخته شده و با نرم افزار OpenSees تحلیل گردیده است. چهار گروه مختلف برای خاک ماسه‌ای روانگرا (لایه میانی) در نظر گرفته شده است که دارای ضرایب اصطکاک داخلی، سرعت موج برشی، درصد تراکم و تخلخل متفاوت می‌باشند و با استفاده از ۱۴ رکورد زمین‌لرزه حوزه دور و نزدیک در نرم افزار OpenSees شبیه‌سازی عددی انجام شده است.

۳-۳-۱- بررسی تغییرات تغییر مکان جانبی شمع و ستون

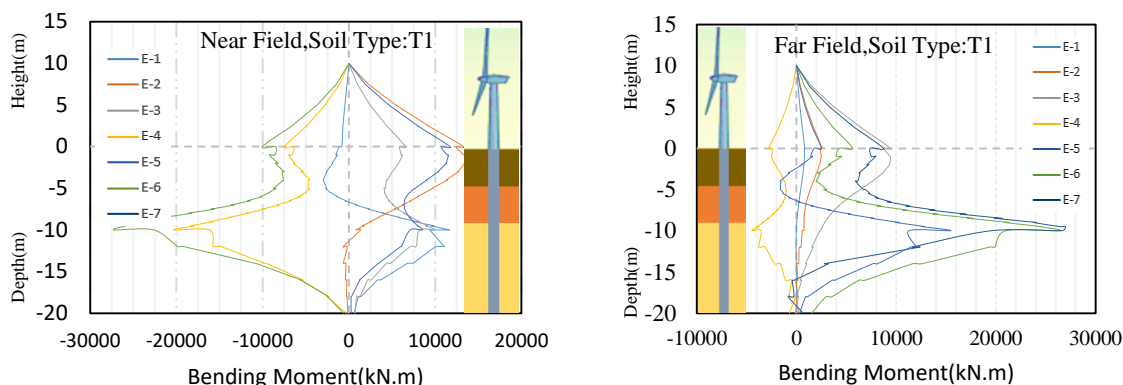
در شکل ۵ نمودارهای تغییر مکان شمع- ستون تحت اثر رکوردهای مختلف نشان داده شده است. نتایج تا عمق ۲۰ متری از سطح خاک نمایش داده شده است. براساس نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش شتاب زلزله و کاهش تراکم خاک لایه روانگرا، روانگرایی رخ می‌دهد و تغییر مکان جانبی شمع- ستون افزایش می‌یابد. همچنین نقطه گیرداری تک شمع از حوالی سطح زمین به سمت انتهای لایه روانگر منتقل می‌شود و شکل یا مود تغییر مکان جانبی از حالت دوران- تغییر مکان به حالت کج شدگی و سپس شناوری در خاک و انتقال، تغییر می‌کند. براساس نمودارها مشاهده می‌شود که بیشترین جابجایی مربوط به شمع قرار گرفته در خاک T₁ می‌باشد که کمترین زاویه اصطکاک داخلی ($\phi=30^\circ$) و کمترین درصد تراکم را دارد. جابجایی نوک شمع در این خاک حدود ۴۵ سانتی‌متر بدست آمد. نکته دیگری که در نتایج مشاهده شد اینست که زلزله‌های حوزه نزدیک جابجایی بیشتری نسبت به حوزه دور بر شمع اعمال می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که در همه خاک‌ها نمودارهای جابجایی شمع تحت زلزله حوزه نزدیک کوبه و لوماپریتا (NR6 و NR4) به صورت قابل توجهی بیشتر از سایر زلزله‌هاست. در خاک T₁ جابجایی حداکثر در اثر اعمال زلزله حوزه نزدیک حدود ۳۸ سانتی‌متر و این مقدار در اثر اعمال زلزله

حوزه دور کمتر از ۲۰ سانتی‌متر خواهد بود. در خاک T_3 جابجایی حداکثر در اثر اعمال زلزله حوزه نزدیک حدود ۲۵ سانتی‌متر و این مقدار در اثر اعمال زلزله حوزه دور کمتر از ۲۰ سانتی‌متر خواهد بود و در حالت کلی میزان جابجایی در خاک T_3 کمتر از خاک T_1 و T_2 است. در خاک T_4 نیز جابجایی حداکثر در اثر اعمال زلزله حوزه نزدیک حدود ۲۲ سانتی‌متر و این مقدار در اثر اعمال زلزله حوزه دور کمتر از ۱۵ سانتی‌متر خواهد بود. میزان جابجایی در خاک T_4 کمتر از سایر خاک‌هاست.

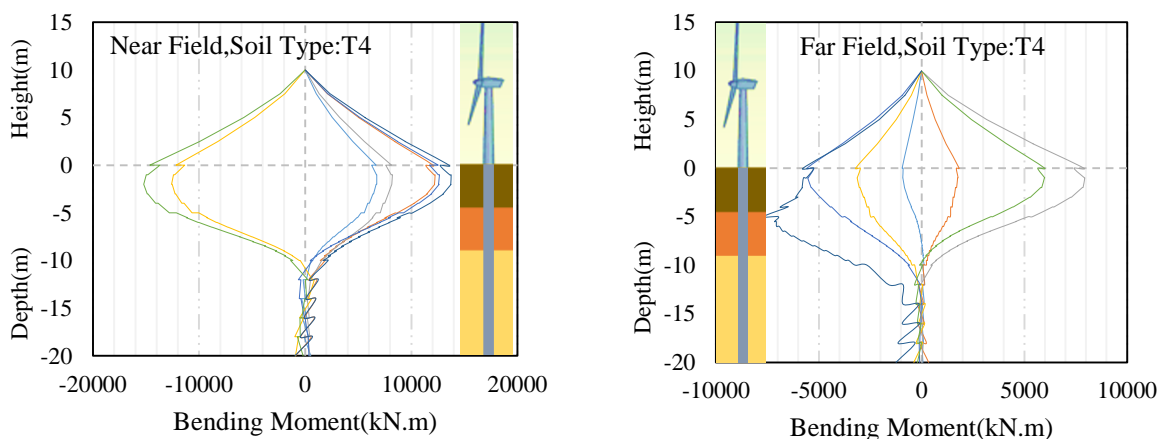


شکل ۵- حداکثر جابجایی شمع تحت رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک در خاک‌های مختلف

در شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه لنگر خمشی شمع- ستون در خاک T_1 و T_4 تحت زلزله حوزه دور و نزدیک نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان این را استنباط کرد که در خاک سست‌تر (T_1) بیشترین لنگر خمشی برای هر دو دسته رکورد زلزله در انتهای لایه روانگرا و در عمق تقریبی ۹ متر اتفاق افتاده است. این در حالیست که در خاک قوی‌تر (T_4) مقادیر حداکثری ممان خمشی در لایه روانگرا رخ نمی‌دهد و حداکثر آن در عمق ۰ تا ۵ متری از سطح زمین رخ می‌دهد. بعلاوه در خاک سست‌تر تفاوت چندانی بین مقادیر حداکثر ممان ایجاد شده برای زلزله دور و نزدیک مشاهده نشد اما برای خاک (T_4) تفاوت محسوس‌تر بوده و زلزله‌های حوزه نزدیک مقادیر حداکثری بیشتری را ایجاد نمودند.

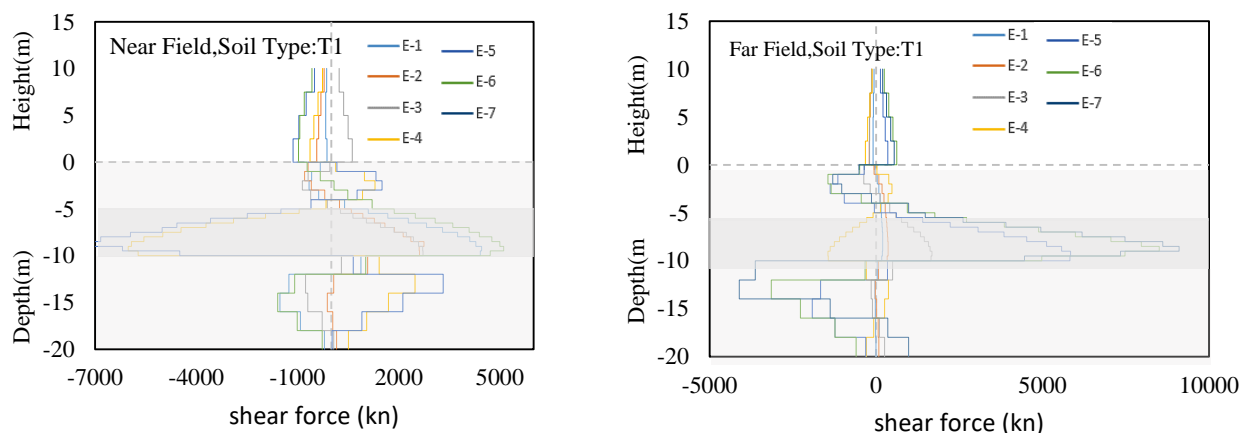


شکل ۶- مقایسه لنگر خمشی شمع - ستون در خاک T₁ تحت زلزله حوزه دور و نزدیک

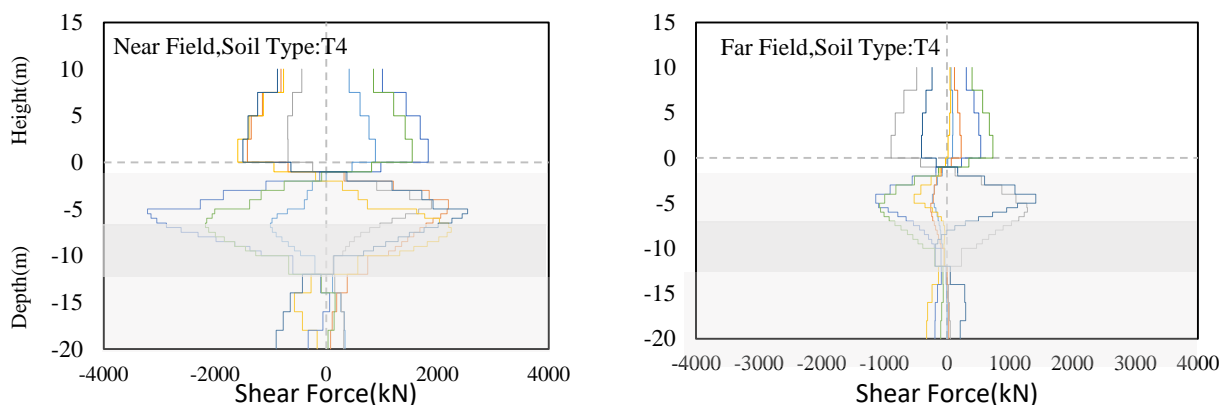


شکل ۷- مقایسه لنگر خمشی شمع - ستون در خاک T₄ تحت زلزله حوزه دور و نزدیک

در شکل های ۸ و ۹ نمودارهای نیروی برشی شمع- ستون ترسیم شده است. بررسی مجموعه نمودارها نتایج به شرح زیر را به دست می دهد. با وقوع روانگرایی در خاک ماسه ای و با افزایش شدت زمین لرزه حداکثر نیروی برشی از حوالی سطح زمین به سمت انتهای لایه روانگرا منتقل می شود. مادامیکه شکل یا مود تغییر شکل شمع- ستون، دوران- تغییر مکان است، در خاک های با تراکم کمتر، با افزایش شتاب زمین لرزه، میزان نیروی برشی در اثر روانگرایی و بدلیل افزایش طول طره شمع- ستون افزایش می یابد. بیشترین نیروی برشی در خاک نوع T₁ در انتهای لایه روانگرا (Z = 10 m) با مقدار حدود ۹۵۰۰ kN در رکورد زلزله FR7 رخ می دهد. حداکثر نیروی برشی در شمع- ستون در خاک نوع T₄ به حدود ۱۵۰۰ KN (کاهش ۸۴٪) می رسد.



شکل ۸- مقایسه تغییر نیروی برشی شمع - ستون در خاک T₁ تحت زلزله حوزه دور و نزدیک



شکل ۹- مقایسه تغییر نیروی برشی شمع - ستون در خاک T_۴ تحت زلزله حوزه دور و نزدیک

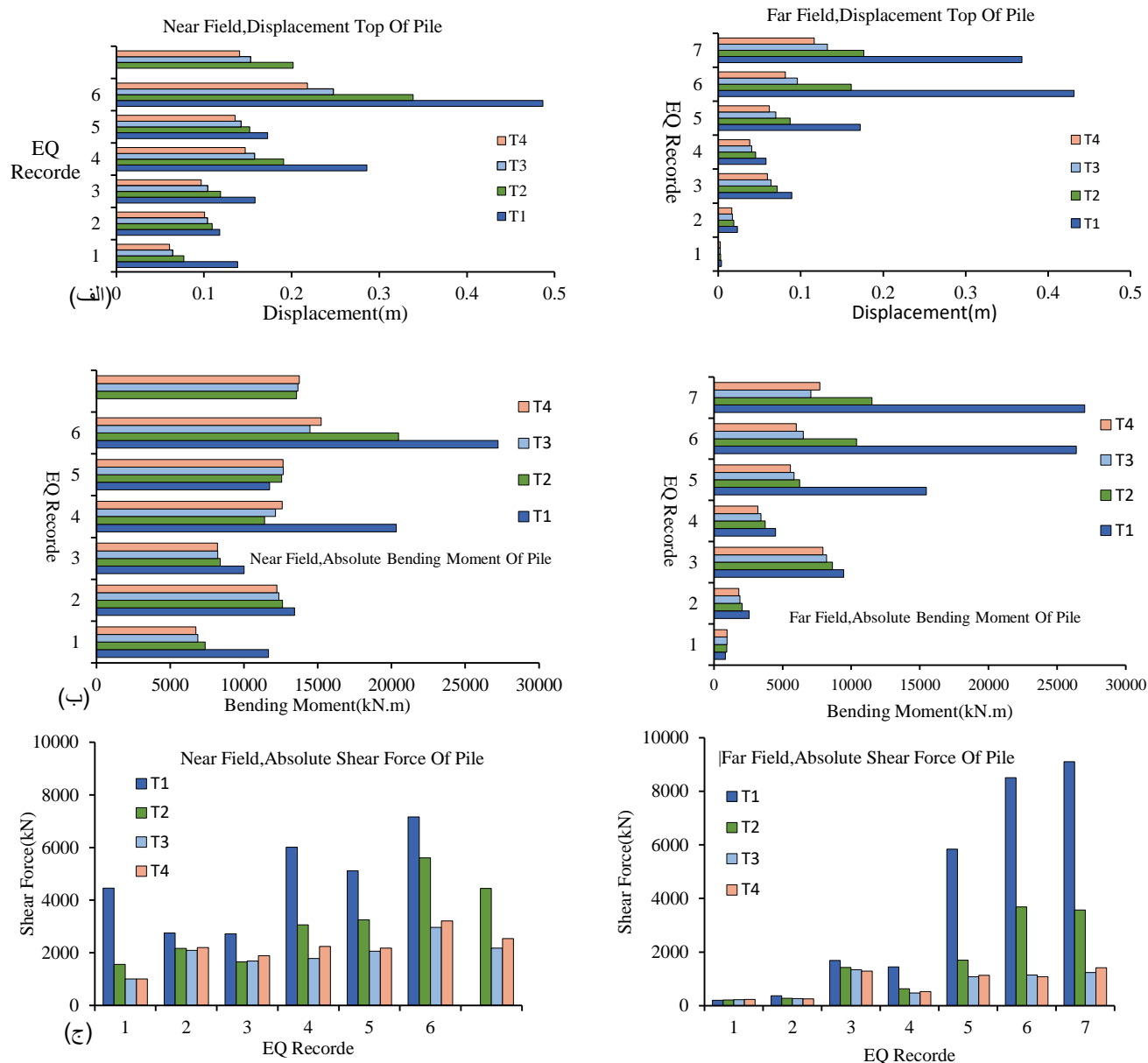
۲-۳-۳- توصیه‌های فنی برای مهندسین طراح

با مقایسه پاسخ‌های حوزه دور و نزدیک در شکل ۱۰ می‌توان گفت اثرات زلزله حوزه نزدیک به عنوان یک پارامتر مهم باید در طراحی شمع‌ها توسط مهندسین طراح لحاظ شود چرا که سبب تغییرات قابل توجهی در پاسخ‌ها خواهد شد. همچنین نتایج نشان داد که خاکی با مشخصات T_۳ و T_۴ می‌تواند حاشیه اطمینان مناسبی را برای جلوگیری از روانگرایی در تک شمع‌های قرار گرفته در مناطق مستعد روانگرایی ارائه نماید. در شکل ۱۰ نمودارهای حداکثر پاسخ مدل‌ها برای چهار تیپ خاک در نظر گرفته شده به صورت کاربردی‌تر نمایش داده شده است. پاسخ‌هایی نظیر حداکثر جابجایی (۱۰-الف)، حداکثر ممان خمشی (۱۰-ب)، و حداکثر نیروی برشی (۱۰-ج)، برای دو گروه زلزله حوزه دور و نزدیک برای مدل‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان این را استنباط کرد که در هنگام وقوع روانگرایی کامل اختلاف پاسخ‌ها برای حوزه دور و نزدیک کمتر خواهد شد. به عنوان مثال در خاک T_۱ تحت زلزله ۶ در حوزه دور و نزدیک جابجایی، ممان خمشی و برش تقریباً در یک رنج قرار دارند این در حالیست که در سایر حالت اختلاف قابل توجه می‌باشد.

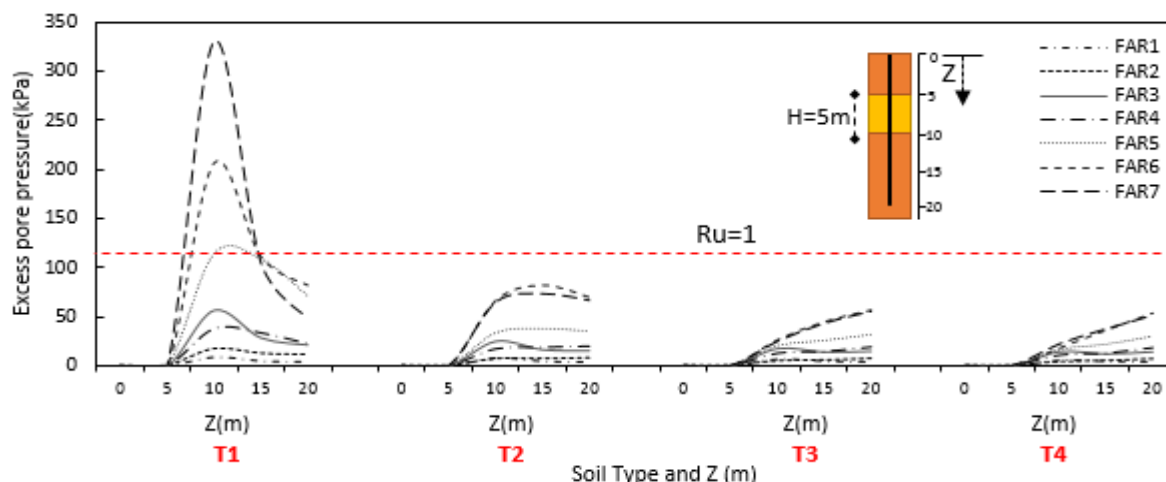
۳-۳-۳- بررسی فشار آب منفذی اضافی و روانگرایی

اعمال بارهای لرزه‌ای سبب ایجاد فشار آب منفذی اضافی در خاک‌های روانگرا خواهد شد و در صورتیکه شدت زمین‌لرزه و مدت زمان اعمال آن به حد کافی باشد این فشار منفذی اضافی با تنش موثر همه جانبه بین دانه‌های خاک ماسه‌ای برابر خواهد شد و این امر سبب از بین رفتن اندرکنش‌های بین دانه‌ها خواهد شد و عملاً روانگرایی اتفاق می‌افتد. گاهی به دلایل ذکر شده در فوق ممکن است روانگرایی کامل اتفاق بیفتد و نسبت فشار آب منفذی اضافه بیشتر از ۱ باشد ($Ru > 1$) شود و هم امکان دارد روانگرایی به صورت کامل اتفاق نیفتد اما در این حالت نیز فشار آب منفذی اضافه ایجاد می‌شود و میزان تنش‌ها و جابجایی‌ها تغییر می‌کند. البته ذکر این نکته ضروری است که برخی از محققین مانند بتی و باین [۲۷] محدوده ($Ru > 0.7$) را برای وقوع روانگرایی پیشنهاد داده‌اند. در شکل ۱۱ مقادیر حداکثر فشار آب منفذی با اعمال ۷ رکورد زلزله حوزه دور در مجاورت شمع نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است قسمت‌های فوقانی و تحتانی شمع در لایه‌های غیر روانگرا قرار دارند. مقادیر حداکثر فشار آب منفذی برای ۴ گروه خاک (T_۱ تا T_۴) و همچنین در عمق‌های مختلفی از خاک (۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ متر) نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان گفت که در خاک T_۱ که کمترین ضریب اصطکاک داخلی و تراکم را دارد مقادیر فشار آب منفذی اضافی از سایر خاک‌ها به طور قابل توجهی بیشتر است و مقدار آن به ۳۲۰ کیلوپاسکال در عمقی بین ۵ تا ۱۰ متر از سطح زمین خواهد رسید. این درحالیست که برای سایر خاک‌ها که ضریب اصطکاک و درصد تراکم بیشتری دارند برای هیچ کدام از زلزله‌ها روانگرایی به طور کامل اتفاق نیفتاده است و همه مقادیر فشار آب منفذی اضافی کمتر از مقدار لازم برای روانگرایی ($Ru = 1$) بدست آمد. همچنین می‌توان گفت که شدت زلزله هم بسیار تاثیرگذار بوده و رکوردهای زلزله‌های

با شدت بالاتر یعنی رکوردهای (FAR5، FAR6 و FAR7) که دارای $PGA > 0.4$ هستند نسبت به سایر رکوردها فشار منفذی اضافی بیشتری را ایجاد کرده‌اند و سبب روانگرایی کامل در لایه روانگرا شده‌اند.

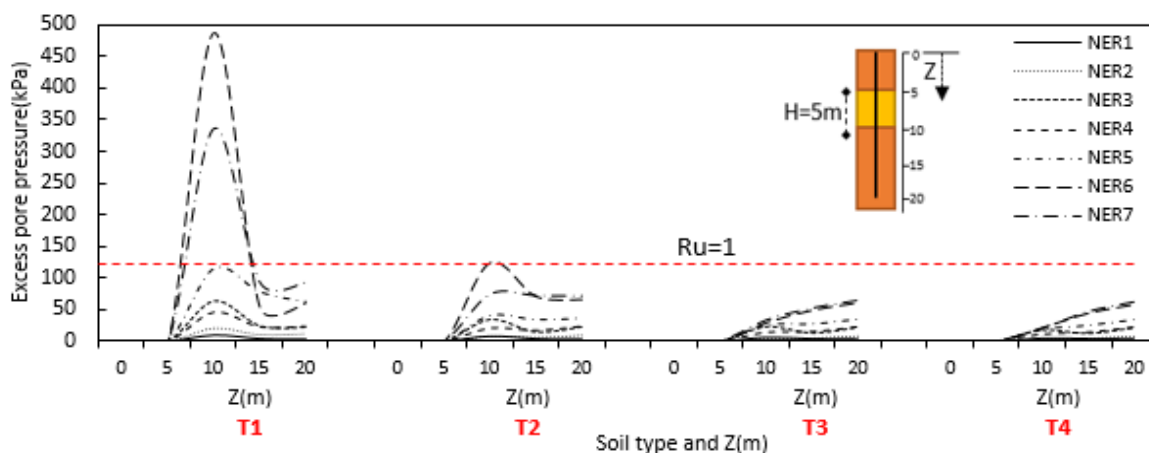


شکل ۱۰- مقایسه تغییر حداکثر جابجایی، حداکثر ممان خمشی و حداکثر نیروی برشی با تغییر نوع خاک و رکوردهای زمین‌لرزه



شکل ۱۱- مقادیر حداکثر فشار آب منفذی اضافی در اطراف شمع تحت زلزله‌های حوزه دور

در شکل ۱۲ حداکثر فشار آب منفذی برای زلزله‌های حوزه نزدیک در مجاورت شمع نشان داده شده است. مقادیر حداکثر فشار آب منفذی برای ۴ گروه خاک (T₁ تا T₄) و همچنین در عمق‌های مختلفی از خاک (۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر) برای این حالت هم نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در خاک T₁ که کمترین ضریب اصطکاک داخلی و تراکم را دارد مقادیر فشار آب منفذی اضافی از سایر خاک‌ها به طور قابل توجهی بیشتر است و مقدار آن به ۴۷۰ کیلوپاسکال در عمقی بین ۵ تا ۱۰ متر از سطح زمین خواهد رسید. ملاحظه می‌شود که در حالت حوزه نزدیک فشار آب منفذی ایجاد شده بیشتر از حوزه دور است. در سایر خاک‌ها که ضریب اصطکاک و درصد تراکم بیشتری دارند، برای خاک T₂ و برای زلزله NER7 نیز خاک به طور کامل روانگرا شده است. اما در خاک‌های T₂ و T₃ همچنان روانگرایی به طور کامل اتفاق نیفتاده است و مقادیر فشار آب منفذی اضافی کمتر از مقدار لازم برای روانگرایی ($R_u = 1$) بدست آمد. مانند حالت قبل نتایج نشان داد که شدت زلزله بسیار تاثیر گذار بوده و زلزله‌های با شدت بالاتر یعنی زلزله‌های (NER5، NER6 و NER7) که دارای PGA بیشتری هستند نسبت به سایر زلزله فشار منفذی اضافی بیشتری را ایجاد کرده‌اند و سبب روانگرایی کامل در لایه روانگرا شده‌اند.

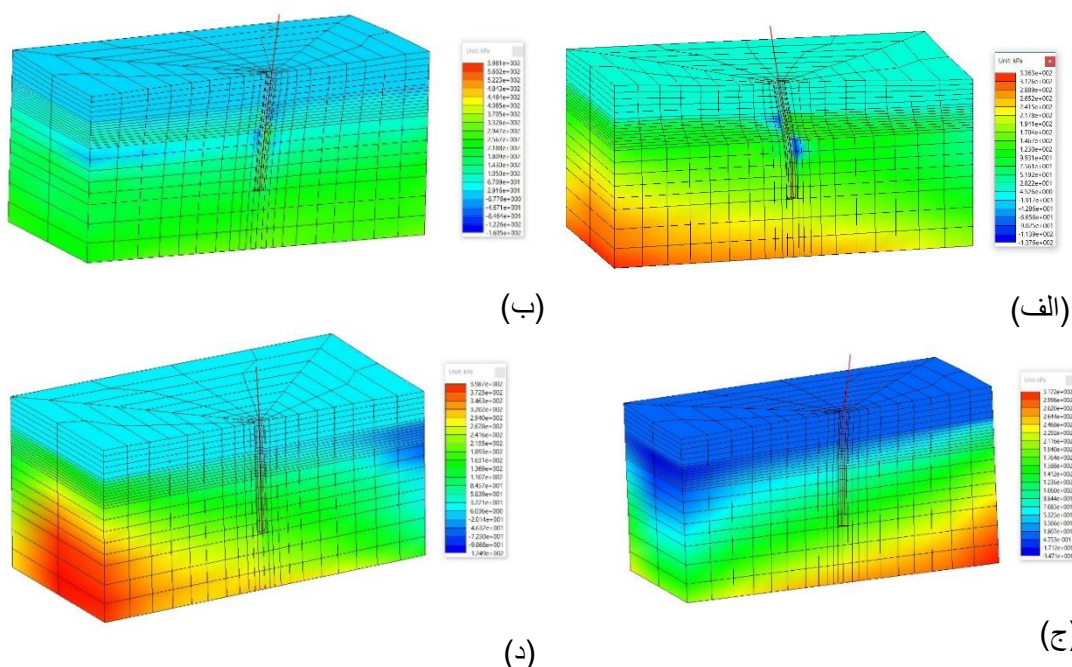


شکل ۱۲- مقادیر حداکثر فشار آب منفذی اضافی در اطراف شمع تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

۳-۳-۴- کانتورهای فشار منفذی اضافی و تنش برشی

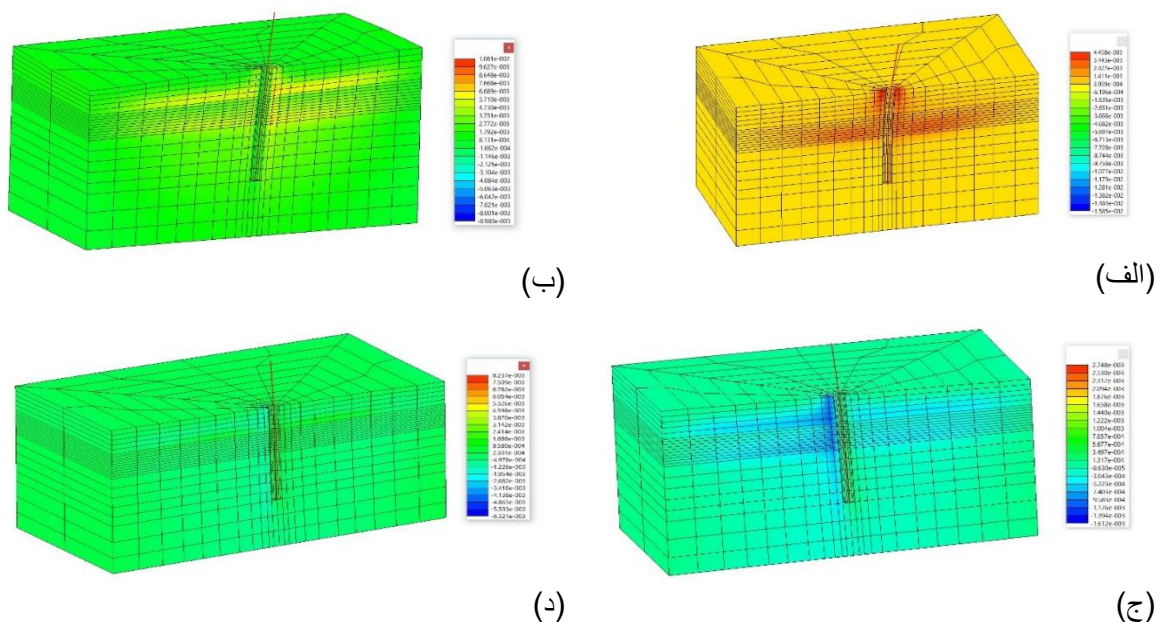
در شکل ۱۳ کانتورهای فشار منفذی خاک اطراف شمع- ستون توسط نرم افزار OpenGL نشان داده شده است. کانتورها نشان می‌دهند که هر چه تراکم لایه خاک روانگرا کمتر باشد، در اثر زمین‌لرزه، فشار منفذی در حوالی انتهای لایه روانگر بیشتر خواهد بود. با افزایش تراکم خاک لایه روانگر، فشار منفذی کاهش قابل توجهی می‌یابد. هرچند که این کاهش در رابطه با زلزله حوزه نزدیک قابل توجه نیست. در شکل ۱۳ حالت الف و ب به ترتیب مدل‌سازی با خاک T₁ تحت رکورد زلزله شماره ۶ حوزه نزدیک و مدل‌سازی با خاک T₃

تحت رکورد زلزله شماره ۷ حوزه نزدیک نشان داده شده است. در حالت ج و د به ترتیب مدل سازی با خاک روانگرا T_2 و T_4 تحت رکورد زلزله شماره ۷ و ۶ حوزه دور نشان داده شده است.



شکل ۱۳- کانتور سه بعدی فشار منفذی خاک و شمع در خاک های مختلف

در شکل ۱۴ کانتور سه بعدی تنش برشی خاک و شمع توسط نرم افزار OpenGL نشان داده شده است. کانتورها نشان می دهند که هر چه تراکم لایه خاک روانگرا کمتر باشد، در اثر زمین لرزه، تنش برشی خاک در حوالی انتهای لایه روانگر بیشتر خواهد بود. در شکل ۱۴ حالت الف و ب به ترتیب مدل سازی با خاک T_1 تحت رکورد زلزله شماره ۶ حوزه نزدیک و مدل سازی با خاک T_3 تحت رکورد زلزله شماره ۷ حوزه نزدیک نشان داده شده است. در حالت ج و د به ترتیب مدل سازی با خاک روانگرا T_2 و T_4 تحت رکورد زلزله شماره ۷ و ۶ حوزه دور نشان داده شده است.



شکل ۱۴- کانتور سه بعدی تنش برشی خاک و شمع در خاک های مختلف

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر مشخصات خاک، زلزله و پدیده روانگرایی بر پاسخ لرزه‌ای توربین‌های بادی تک شمع بود که با استفاده از مدل المان محدود در نرم افزار OpenSees صورت گرفت. تمامی تحلیل‌ها برای دو تیپ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفت. چهار گروه مختلف برای خاک ماسه‌ای روانگرا (لایه میانی) در نظر گرفته شد که دارای مشخصات مکانیکی متفاوت بودند. نتایج نشان داد، بیشترین جابجایی مربوط به شمع قرار گرفته در خاک T_1 می‌باشد که کمترین زاویه اصطکاک داخلی ($\phi=30^\circ$) و کمترین درصد تراکم را دارد. جابجایی نوک شمع- ستون در این خاک حدود ۴۵ سانتی متر بدست آمد. در حالت کلی و برای مجموعه رکورد انتخابی زلزله‌های حوزه نزدیک جابجایی بیشتری نسبت به حوزه دور بر شمع اعمال کردند. نتایج نشان داد شدت زلزله عامل بسیار تاثیرگذاری در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای شمع‌های قرار گرفته در خاک روانگرا هستند به طوری که در این مطالعه تنها زلزله‌های دارای $PGA > 0.4$ بودند که روانگرایی کامل را در خاک ایجاد کردند. همچنین زلزله‌های حوزه نزدیک مقادیر فشار آب منفذی بیشتری را اضافه نمودند. سایر نتیجه‌گیری‌های بدست آمده به شرح زیر است:

- در خاک‌های با تراکم کمتر، با افزایش شتاب زمین لرزه، میزان لنگر خمشی در اثر روانگرایی و بدلیل افزایش طول طره شمع- ستون افزایش می‌یابد. این در حالیست که با افزایش تراکم خاک و عدم رخداد پدیده روانگرایی در زمین‌لرزه‌هایی با شتاب کمتر از $0.4g$ ، تغییر مکان جانبی شمع- ستون به شدت کاهش می‌یابد و به همین دلیل میزان لنگر خمشی نیز به شدت کاهش می‌یابد.
- در خاک T_1 که کمترین ضریب اصطکاک داخلی و تراکم را دارد مقادیر فشار آب منفذی اضافی از سایر خاک‌ها به طور قابل توجهی بیشتر است و مقدار آن به 470 کیلوپاسکال در عمقی بین 5 تا 10 متر از سطح زمین خواهد رسید. ملاحظه می‌شود که در حالت حوزه نزدیک فشار آب منفذی ایجاد شده بیشتر از حوزه دور است.
- در خاک سست‌تر (T_1) بیشترین لنگر خمشی برای هر دو دسته رکورد زلزله در انتهای لایه روانگرا و در عمق تقریبی 9 متر اتفاق افتاده است. این در حالیست که در خاک قوی‌تر (T_4) مقادیر حداکثری ممان خمشی در لایه روانگرا رخ نمی‌دهد و حداکثر آن در عمق 0 تا 5 متری از سطح زمین رخ می‌دهد.
- اثرات زلزله حوزه نزدیک باید به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی شمع‌ها لحاظ شود چرا که سبب تغییرات قابل توجهی در پاسخ‌ها خواهد شد.

مراجع

- [1] Li J, Wang X, Guo Y, Yu XB. The loading behavior of innovative monopile foundations for offshore wind turbine based on centrifuge experiments. *Renew Energy* 2020;152:1109–20. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.112>.
- [2] Risi D, Bhattacharya S, Goda K. Seismic performance assessment of monopile-supported offshore wind turbines using unscaled natural earthquake records 2018;109:154–72. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.015>.
- [3] Kausel E. Early history of soil-structure interaction. *Soil Dyn Earthq Eng* 2010;30:822–32. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.11.001>.
- [4] Bhattacharya S, Nikitas G, ... LA-IE and, 2017 U. Soil-Structure Interactions (SSI) for Offshore Wind Turbines. *Inst Eng Technol* 2017.
- [5] Kjølraug RA, Kaynia AM. Vertical earthquake response of megawatt-sized wind turbine with soil-structure interaction effects. *Earthq Eng Struct Dyn* 2015;44:2341–58.
- [6] Zhang C, Zhang Q, Wu Z, Zhang J, Sui T, Wen Y. Numerical Study on Effects of the Embedded Monopile Foundation on Local Wave-Induced Porous Seabed Response. *Math Probl Eng* 2015;2015. <https://doi.org/10.1155/2015/184621>.
- [7] Cui L, Bhattacharya S, Nikitas G, Bhat A. Macro - and micro - mechanics of granular soil in asymmetric cyclic loadings encountered by offshore wind turbine foundations. *Granul Matter* 2019. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0924-4>.
- [8] Austin S, Jerath S. Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. *Ain Shams Eng J* 2017;8:323–31.
- [9] Page AM, Skau KS, Jostad HP, Eiksund GR. A New Foundation Model for Integrated Analyses of Monopile-based Offshore Wind Turbines. *Energy Procedia* 2017;137:100–7. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.337>.
- [10] Wang P, Zhao M, Du X, Liu J, Xu C. Wind, wave and earthquake responses of offshore wind turbine on monopile foundation in clay. *Soil Dyn Earthq Eng* 2018;113:47–57. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.028>.
- [11] Patra SK, Haldar S. Response of monopile supported offshore wind turbine in liquefied soil Response of monopile supported offshore

- wind turbine in liquefied soil 2018.
- [12] Yeter B, Tekgoz M, Garbatov Y. Fragility analysis of an ageing monopile offshore wind turbine subjected to simultaneous wind and seismic load 2020.
- [13] Nimbalkar SS, Punetha P, Basack S, Mirzababaei M. Piles subjected to torsional cyclic load: Numerical analysis. *Front Built Environ* 2019;5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00024>.
- [14] Kementzetzidis E, Corciulo S, Versteijlen WG, Pisanò F. Geotechnical aspects of offshore wind turbine dynamics from 3D non-linear soil-structure simulations. *Soil Dyn Earthq Eng* 2019;120:181–99. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.037>.
- [15] Li X, Zeng X, Wang X. Feasibility study of monopile-friction wheel-bucket hybrid foundation for offshore wind turbine. *Ocean Eng* 2020;204. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107276>.
- [16] Kazemi P, Kaynia AM. Earthquake response of monopiles and caissons for Offshore Wind Turbines founded in liquefiable soil. *Soil Dyn Earthq Eng* 2020;136:106213. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106213>.
- [17] Shuqing H, Liang T, Xiaoyu Z, Youqing W, Xianzhang L, Bowen X. An investigation of the influence of near-fault ground motion parameters on the pile's response in liquefiable soil 2018;17:729–45.
- [18] Shafieezadeh A, DesRoches R, Rix GJ, Werner SD. Three-Dimensional Wharf Response to Far-Field and Impulsive Near-Field Ground Motions in Liquefiable Soils. *J Struct Eng* 2013;139:1395–407. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000642](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000642).
- [19] Luo Z, Wu Z, Fu L. Simplified procedure for laterally loaded drilled shafts in spatially random clays. *Mar Georesources Geotechnol* 2020;38:539–52. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1601797>.
- [20] Gholami R. Seismic performance evaluation of jacket type offshore platforms using nonlinear dynamic analysis and considering of the effects of liquefaction in sandy soil layers. *Tarbiat Modares Univ* 2015.
- [21] Khosravifar A, Boulanger RW, Kunnath SK. Effects of liquefaction on inelastic demands on extended pile shafts. *Earthq Spectra* 2014;30:1749–73.
- [22] Zarrin, Mohammad and behrouz asgarian. Reducing Error of Probabilistic Seismic Demand Analysis of Jacket Type Offshore Platforms Subjected to Pulse-Like Near Fault Ground Motions. *J Mar Eng* 8 33-49 2013.
- [23] Zhang J, Hutchinson TC, Ling X. Demand Evaluation of Pile Shafts Embedded in Liquefiable Soils. *Contemp. Top. Situ Testing, Anal. Reliab. Found., ASCE*; 2009, p. 222–9.
- [24] Prevost JH. A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils. *Int J Soil Dyn Earthq Eng* 1985;4:9–17.
- [25] Elgamal A, Yang Z, Parra E. Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response. *Soil Dyn Earthq Eng* 2002;22:259–71.
- [26] Wilson DW. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay 1998.
- [27] Beaty MH, Byrne PM. UBCSAND Constitutive Model, Version 904aR. Itasca UDM Web Site 2011:1–69.