



بررسی تأثیر تغییر راستای بارگذاری باد بر پاسخ شمع‌های نیروگاه‌های بادی فراساحلی

مسعود زارعان، احمد شانه‌ساز زاده*، محمود هاشمی

دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

کلمات کلیدی:

توربین بادی فراساحل
فونداسیون شمع
تغییر راستای بارگذاری
مدل سطح مرزی
نرم‌افزار FLAC

خلاصه: اغلب توربین‌های بادی فراساحلی دارای فونداسیون‌های شمع‌ای از نوع مونوپایل قطور هستند. نیروی اصلی اعمالی بر این توربین‌ها باد است که با توجه به ماهیتی که دارد، می‌تواند در راستاهای مختلف بر سازه اعمال شود. در این مقاله، تأثیر تغییر متناوب راستای بارگذاری باد بر پاسخ شمع‌های توربین‌های بادی فراساحل با انجام شبیه‌سازی عملکردی سیستم خاک-شمع در نرم‌افزار فلک سه بعدی (3D FLAC)، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، با استفاده از مدل سطح مرزی ارائه شده توسط دافالیاس و منطری برای شبیه‌سازی رفتار خاک و با در نظر گرفتن حالت بحرانی و پلاستیسیته مدل سطح مرزی، اثرات سخت‌شدگی و نرم‌شدگی ماسه بر بارگذاری تناوبی ناشی از باد در نظر گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در شمع‌های قطور تغییر راستای بارگذاری، باعث کاهش ۱۶ درصدی حداکثر تغییر مکان افقی و چرخش سرشمع نسبت به حالت بارگذاری تک‌جهته می‌گردد. این اختلاف در خصوص تغییر مکان قائم حدود ۲ برابر است. تغییر مکان ماندگار در راستای افقی و چرخش ماندگار نیز به ترتیب حداکثر ۱۳ و ۱۸ درصد کاهش داشته‌اند. در مدل‌های چند جهته، اعمال بارگذاری متناوب سبب حرکت رو به بالای شمع شده تا جایی که پس از اتمام بارگذاری، شمع نسبت به تراز اولیه خود بالاتر قرار می‌گیرد. به طور کلی، تغییر راستای بارگذاری باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ شمع می‌شود، هر چند مقادیر این اختلاف در پارامترهای مختلف و حالت‌های مختلف بارگذاری متفاوت است.

۱- مقدمه

خاک است و شناخت اندرکنش خاک و شمع نقش عمده‌ای در انتخاب نوع فونداسیون ایفا می‌کند. متداول‌ترین نوع فونداسیون برای یک توربین بادی، استفاده از یک شمع لوله‌ای (مونوپایل) است. شمع‌های پایه توربین‌های بادی از نظر عملکردی به دو دسته کوتاه صلب (قطور) و بلند منعطف (لاغر) تقسیم‌بندی می‌شوند. به طور ساده می‌توان نسبت طول به قطر ۱۲ را معیاری جهت تقسیم‌بندی این دو حالت در نظر گرفت، به طوری که شمع‌ای با نسبت طول به قطری بیش از ۱۲، جزء شمع‌های لاغر به حساب می‌آید [۳]. عموماً توربین‌های بادی نصب شده در دریا با استفاده از شمع‌هایی قطور در بستر خاکی مهار می‌شوند. قطر معمول این شمع‌ها ۴ تا ۷ متر و طول آن‌ها ۲۴ تا ۴۰ متر است. قطر زیاد و رفتار صلب این سازه‌ها، باعث عملکرد متفاوتشان نسبت به شمع‌های منفرد معمول می‌شود.

توربین‌های بادی در طول عمر مفید خود متناوباً در معرض انواع بارگذاری‌های جانبی قرار دارند. از طرفی با توجه به ماهیت نیروهای اعمالی (در مناطق خشکی نیروی باد و در مناطق فراساحلی نیروهای باد و موج)، بارگذاری تنها در یک راستا اعمال نخواهد شد. این در حالی است که اکثر

انرژی حاصل از نیروگاه‌های بادی را می‌توان از دسته انرژی‌های پاک، پایدار و تجدیدپذیر دانست. به طوری که انتظار می‌رود در قرن پیش رو سهم قابل توجهی از درصد برق تولید شده از منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از نیروی باد تأمین شود. نصب توربین‌های بادی محدود به مناطق خشکی نمی‌شود و بسیاری از کشورها به منظور کاهش آلودگی‌های صوتی و بصری، سهولت انتقال و نصب قطعات و افزایش بازدهی توربین، اقدام به نصب توربین‌ها در مناطقی دور از ساحل (فراساحلی) نموده‌اند. این رویکرد، باعث افزایش ابعاد و پیچیدگی عملکرد سازه و فونداسیون نگهدارنده توربین گردیده است [۱].

با توجه به اینکه سهم قابل توجهی از هزینه‌ها (۲۵ الی ۳۴ درصد از هزینه کل پروژه) صرف ساخت و نصب فونداسیون این قبیل سازه‌ها می‌شود، انتخاب نوع مناسب و بهینه فونداسیون یکی از موضوعات اساسی در طرح کلی یک توربین بادی است [۳ و ۲]. عملکرد سازه‌ها، متأثر از رفتار آن‌ها در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ahmad.shanehsaz@yahoo.co.uk



نمودارها در پیش‌بینی رفتار مونوپایل‌های قطور، حاکی از این است که مقادیر جابجایی دست‌پایین در نظر گرفته می‌شود، که دلیل آن می‌تواند در نظرگیری بیش از حد سختی خاک در اعماق پایین‌تر باشد [۹]. بررسی رفتار دراز مدت مونوپایل‌ها تحت بارهای جانبی، بیانگر این است که صلبیت شمع نیز بر الگوی تنش‌ها و جابجایی‌های افقی تأثیرگذار است و حالتی که در آن جابجایی‌ها پایدار می‌شوند زمانبست که خاک اطراف شمع به حالت پلاستیک در می‌آید [۱۰].

با توجه به رفتار غیرخطی سیستم خاک و شمع در اثر بار جانبی، برای شبیه‌سازی عددی رفتار فونداسیون توربین‌های بادی به نرم‌افزارهایی با قابلیت تحلیل غیرخطی نیاز است. نرم‌افزارهایی نظیر FLAC3D با استفاده از روش محیط پیوسته قادر به شبیه‌سازی هر چه بهتر رفتار خاک می‌باشند. از آنجایی که مدل‌های رفتاری کلاسیک خاک مانند موه‌ر-کولومب، عموماً قادر به در نظرگیری اثرات سخت‌شوندگی ناشی از کرنش‌های پلاستیک رفت و برگشتی ناشی از بارگذاری‌های متناوب نیستند، لذا از مدلی بر پایه پلاستیسیته سطح مرزی به نام دافالیاس-منظری استفاده می‌شود که قادر به در نظر گرفتن این رفتار خاک می‌باشد و لذا عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های کلاسیک دارد [۱۲ و ۱۱].

در این تحقیق، با استفاده از مدل رفتاری دافالیاس-منظری، رفتار شمع‌های توربین‌های بادی فراساحلی در نرم‌افزار فلک شبیه‌سازی می‌شود و پاسخ شمع‌های توربین‌های قطور، تحت بارگذاری متناوب استاتیکی باد به صورت تک‌جهته و چندجهته بررسی و مقایسه می‌شود. هدف از این مقاله به طور مشخص، مقایسه اختلاف پاسخ‌های شمع در حالات مختلف بارگذاری چندجهته نسبت به بارگذاری تک‌جهته می‌باشد.

ساختار این مقاله شامل معرفی مختصر مدل دافالیاس-منظری در بخش دوم، ارائه نحوه‌ی شبیه‌سازی فونداسیون‌های مونوپایل در نرم‌افزار فلک و صحت‌سنجی مدل در بخش سوم، بیان خصوصیات هندسی و مصالح شمع‌های مورد مطالعه در بخش چهارم و تشریح نحوه بارگذاری‌های تک‌جهته و چندجهته در بخش پنجم است. سپس نتایج حاصل شده از مقایسه حالات بارگذاری تک‌جهته و چندجهته در بخش ششم ارائه و بحث می‌شود و در انتها نیز نتایج جمع‌بندی می‌شود.

۲- مدل رفتاری دافالیاس-منظری

مدل‌های رفتاری مبتنی بر پلاستیسیته کلاسیک مانند مدل موه‌ر-کولومب و کم-کلی، همگی بر پایه تعریف یک سطح تسلیم بنا شده‌اند که

تحقیقات انجام گرفته برای این سازه‌ها تنها بارگذاری یک‌جهته را مدنظر قرار داده‌اند. از طرف دیگر، بررسی رفتار خاک در اثر بارهای متناوب و تعیین مسیر تنش‌های چندجهته، تنها معطوف به ساخت نمونه‌های محدود خاک و بارگذاری آن‌ها در آزمایشگاه بوده است و عملکرد آن برای شمع‌ها روشن نیست. برای نمونه، ایشیهارا و یامادا^۱ (۱۹۸۰) به بررسی رفتار خاک با اعمال بارگذاری یک‌طرفه چرخه‌ای، ولی هر بار در جهات مختلف پرداخته‌اند. طبق مشاهدات، در تنش برشی‌های کم به دلیل ناهمسانی ذاتی نمونه، تغییر شکل‌ها نیز ناهمسان است و در صورت اعمال نیرو در راستایی غیر از راستای رسوب‌گذاری نمونه، کرنش‌های جانبی نابرابری ایجاد می‌شود [۴]. ایشیهارا و یامازاکی^۲ (۱۹۸۰) با تعریف معیار گسیختگی معادل با ۵ درصد، به این نتیجه رسیده‌اند که، نسبت تنش چرخه‌ای (نسبت تنش برشی اعمالی به تنش مؤثر ذاتی قائم محدود شده) در حالت بارگذاری چندجهته معادل ۷۰ درصد نسبت تنش چرخه‌ای در حالت بارگذاری تک‌جهته است [۵]. ماتسودا^۳ و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی اثرات تغییر جهت بارگذاری ناشی از زلزله بر ماسه اشباع پرداخته‌اند. طبق نتایج، با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری، تنش مؤثر قائم کاهش می‌یابد و مقدار تنزل آن از حالت بارگذاری تک‌جهته بیشتر است. میزان نشست قائم با افزایش کرنش‌های برشی افزایش می‌یابد ولی نرخ این افزایش با تکرار چرخه‌ها کاهش پیدا می‌کند [۶]. لذا اینطور به نظر می‌رسد که ضروری است تا رفتار شمع‌های فونداسیون نیروگاه‌های بادی در اثر بارهای تناوبی که در راستاهای مختلف اعمال می‌شوند بررسی گردد و با حالت بارگذاری تناوبی تک‌جهته مقایسه شود.

از بین روش‌های موجود جهت تحلیل و طراحی فونداسیون توربین‌های بادی تحت بار جانبی، روش منحنی‌های $p - y$ به دلیل سادگی و دقت نسبتاً بالا توسط آیین‌نامه API پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از تئوری تیر بر بستر ارتجاعی وینکلر، فرض اساسی بر این استوار است که، عکس‌العمل خاک (p) در عمقی مشخص، متناسب است با تغییر شکل نسبی خاک-شمع (y). در این روش، اندرکنش خاک-شمع با فنرهایی در محل گره‌های المان‌های تیر فرضی که به عنوان شمع عمل می‌کند، در نظر گرفته می‌شود [۸ و ۷]. البته یکی از محدودیت‌های اصلی در کارایی این روش نیز به همین عامل بر می‌گردد، چرا که فنرهای مذکور از یکدیگر کاملاً مستقل عمل می‌کنند و رفتار هر یک بر دیگری اثری ندارد. کارایی این روش در شمع‌های قطور با مشکلاتی همراه است. بررسی دقت این

- 1 Ishihara and Yamada
- 2 Yamazaki
- 3 Matsuda

نامیده که بیانگر نسبت تخلخل بحرانی می‌باشد. در این حالت، تغییر حجم نمونه صفر است و e_c تابعی از تنش متوسط مؤثر می‌باشد [۲۰ و ۱۹]. در مقایسه با مدل‌های رفتاری مانند مدل موهر-کولمب (با مقادیر ثابت پارامترهای مقاومتی بعد از تسلیم شدگی) و یا مدل‌هایی مبتنی بر پایه مدل موهر-کولمب مانند HSS که با گرفتن توابعی از کاربر بر حسب مقادیر کرنش‌های پلاستیک، امکان کاهش پارامترهای مقاومتی را در شرایط پس از ایجاد تسلیم پلاستیک ایجاد می‌کند، مدل رفتاری دافالیاس با تعریف سطوح گسیختگی مختلف با توجه به مکانیک حالت بحرانی و تغییرات حجمی نمونه، در حالات مختلف زهکشی شده و نشده ماسه، به شرط انتخاب صحیح پارامترهای ورودی، می‌تواند رفتار ماسه در شرایط مختلف تراکمی و تحت فشارهای محصور شدگی مختلف را به درستی شبیه‌سازی کند. همانطور که بیان شد، جهت کسب بهترین نتایج، انجام آزمایش‌های سه محوری جهت محاسبه اطلاعات ورودی به مدل الزامیست. این در حالیست که مدل‌هایی نظیر HSS با گرفتن توابعی جهت بروز رسانی پارامترهای مقاومتی به صورت دستی از کاربر سعی در نزدیک کردن نتایج به واقعیت دارند و لذا برای هر خاک تحت شرایط مختلف آن اعداد بایستی مجدد از آزمایش استخراج شده و در مدل اعمال شوند. لذا می‌توان مدل دافالیاس را جایگزینی مناسبی برای مدل‌های قدیمی‌تر دانست.

۳- شبیه‌سازی فونداسیون شمع نیروگاه‌های بادی

۳-۱- معرفی نرم‌افزار فِک و نحوه انجام شبیه‌سازی

در این تحقیق به منظور تحلیل رفتار سیستم خاک-شمع از نرم‌افزار فِک سه بعدی نسخه ۵ و ۶ استفاده شده است. این نرم‌افزار بر اساس روش تفاضل محدود، به حل معادلات حاکم می‌پردازد و به کمک آن می‌توان رفتار سه بعدی مصالحی از قبیل خاک، سنگ و یا سایر مواد را در حالات الاستیک و پلاستیک مدل‌سازی نمود. مصالح با المان‌های چند وجهی در یک شبکه‌بندی سه بعدی نمایش داده می‌شوند. این نرم‌افزار قادر به در نظرگیری تئوری کرنش‌های بزرگ نیز می‌باشد که در حل مسائل خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا این نرم‌افزار یک برنامه ایده‌آل و مناسب جهت تحلیل‌های سه بعدی در مسائل ژئوتکنیک به حساب می‌آید [۱۱]. نرم‌افزار فِک در حل مسائل ژئوتکنیکی محیط پیوسته تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی تحت شرایط مختلف وجود و یا عدم وجود جریانات سیال و تغییرات حرارتی کاربرد دارد. در روش تفاضل محدود، جهت محاسبه مشتقات جزئی، محیط پیوسته به یک محیط گسسته تبدیل می‌شود، که فواصل نقاط مختلف گسسته شده (Δx)، می‌تواند یکسان و یا متغیر در

درون آن رفتار ماده کاملاً الاستیک فرض می‌شود [۱۳]. در سال ۱۹۷۵ ایده استفاده از دو سطح برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک فلزات توسط پوپوف و دافالیاس^۱ پیشنهاد گردید [۱۴]. سپس امروز^۲ در سال ۱۹۷۸ به توسعه این روش در محیط‌های رسی پرداخت، به طوری که، سطح بیرونی در برگزیده تاریخچه تحکیم خاک و سطح درونی به عنوان جدا کننده یا فصل مشترک رفتار الاستیک و غیرالاستیک خاک عمل می‌کرد [۱۵]. بعد از آن، دافالیاس و هرمان^۳ مدل سطح مرزی خود را برای خاک‌های چسبنده، به وسیله‌ی یک سطح مرزی سه قطعه‌ای و یک قانون شعاعی ساده در سال ۱۹۸۰ ارائه دادند [۱۶]. در سال ۱۹۹۷، دافالیاس و منظری^۴ اولین مدل خود را در رابطه با رفتار تناوبی خاک‌ها در چهارچوب مکانیک حالت بحرانی ارائه کردند [۱۷]. البته مدل ارائه شده در کاربرد با خاک‌های چسبنده به خصوص در وضعیت عادی تحکیم یافته نتایج بهتری نسبت به خاک ماسه‌ای ارائه می‌داد، که دلیل آن این است که، نمونه‌های ماسه از یک جنس، در شرایط تراکم متفاوت یا نسبت تخلخل‌های متفاوت دارای رفتارهای متفاوتی هستند. این ویژگی اجازه‌ی استفاده از یک سری پارامتر ثابت برای شبیه‌سازی هر نوع ماسه را نمی‌دهد و در کالیبراسیون مدل مشکلاتی به وجود می‌آورد. لذا در سال ۲۰۰۴ دافالیاس و منظری با استفاده از پارامتر وضعیت به عنوان یک متغیر اساسی در چهارچوب سطح مرزی و همچنین استفاده از نظریه حالت بحرانی در مکانیک خاک، مدل نسبتاً ساده‌ای را ارائه کردند که می‌تواند در نسبت‌های تخلخل متفاوت و تحت بارگذاری‌های یک جهته و تناوبی، رفتار تنش-کرنشی ماسه را در حد قابل قبولی به درستی شبیه‌سازی کند [۱۸].

این مدل دارای ۱۵ پارامتر می‌باشد که جهت محاسبه پارامترهای ورودی، به انجام سری آزمایشات سه محوری کششی و فشاری به دو صورت زهکشی شده و نشده تحت فشارهای محصور کننده مختلف نیاز است. این کار برای ماسه تویورا توسط ایشیهارا انجام شده و ثابت‌های مدل نیز برای همین نوع ماسه توسط افرادی مانند دافالیاس و منظری و طبیات ارائه شده است [۱۸]. مفاهیم اساسی این مدل به وسیله تنش‌های مؤثر در فضای سه محوره $p'-q$ بیان می‌شود. در تغییر شکل‌های برشی پیوسته در شرایطی که نرخ تغییر حجم صفر است، با رسیدن نسبت تنش q/p' به مقدار مشخص M_{cs} که نشان دهنده شیب خط بحرانی در صفحه $p'-q$ است، وضعیت حالت بحرانی تعریف خواهد شد. در این حالت، نسبت تخلخل نمونه را e_c

- 1 Popov and Dafalias
- 2 Mroz
- 3 Hermann
- 4 Manzari

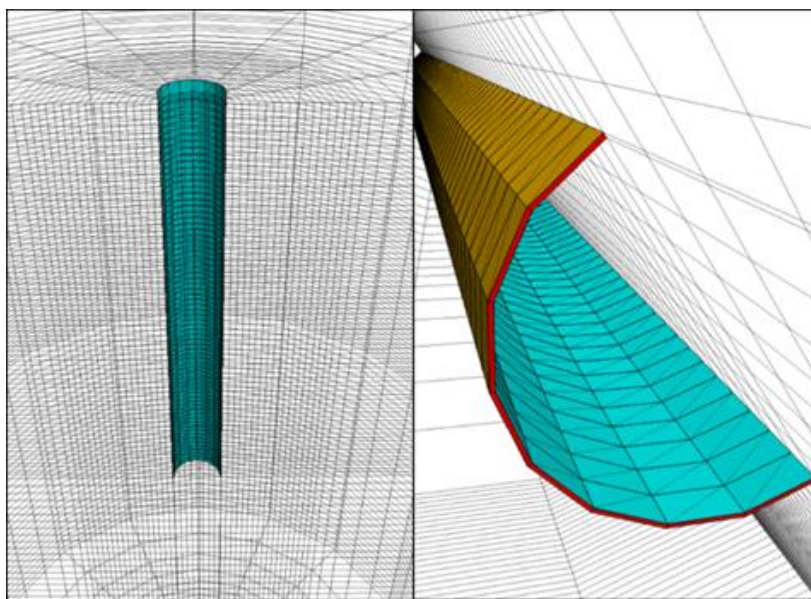
نظر گرفته شود. در تمامی مدل‌های رفتاری موجود در نرم‌افزار، حالت تنش در زمان t و نمو کرنش کل برای گام زمانی Δt ، به مدل داده می‌شود و پس از تحلیل، مقدار نمو تنش متناظر و تنش جدید در زمان $t + \Delta t$ به دست می‌آید. لازم به ذکر است در این نرم‌افزار، تنش‌های ورودی در معادلات رفتاری، همگی تنش‌های مؤثر می‌باشد. به این گونه که، قبل از فراخوانی معادلات، تنش مؤثر با استفاده از تنش کل و مقادیر فشار آب حفره‌ای محاسبه می‌گردد و این مقدار تنش وارد معادلات می‌شود و در پایان محاسبات، روندی معکوس اجرا می‌شود که در اثر آن مقادیر تنش کل مجدداً محاسبه می‌گردد.

مدل‌های رفتاری در این نرم‌افزار به زبان فیش توسعه می‌یابند که بایستی به وسیله زبان برنامه‌نویسی C++ با رعایت قواعد و ملاحظات ارائه شده توسط نرم‌افزار نوشته شود و سپس جهت به کارگیری، فایل DLL ایجاد شده، در نرم‌افزار فراخوانی شود [۹]. با فراخوانی کد دافالیاس-منظری، افزونه مورد نظر در نرم‌افزار اضافه می‌شود و امکان استفاده از آن، مشابه با مدل‌های رفتاری دیگر فراهم می‌گردد. ورودی‌های مورد نیاز این مدل دو دسته خواهد بود. دسته اول شامل ۱۵ پارامتر ثابت و دسته دوم نیز عبارت است از مقادیر تنش‌های اولیه هر المان در هر ۹ جهت تانسور تنش. با اختصاص مقادیر نسبت تخلخل‌های پیشینه و کمینه و تراکم نسبی خاک، وزن مخصوص و مقدار نسبت تخلخل اولیه نمونه به عنوان ورودی‌های مدل محاسبه می‌شود. مقادیر تنش‌های داخلی هر المان به کمک دستورهای فیش کنترل می‌گردد. به طوری که با ایجاد دستورات شرطی و حلقه‌های تکرار روی المان‌هایی که مدل رفتاری آن‌ها دافالیاس تعریف شده است، شش مؤلفه مستقل ماتریس تنش در متغیرهای از پیش تعریف شده، قرار می‌گیرد.

جهت شبیه‌سازی سیستم خاک-شمع در نرم‌افزار فلک، دو روش وجود دارد. روش اول استفاده از المان سازه‌ای شمع (pile) می‌باشد که در نرم‌افزار به طور پیش‌فرض وجود دارد. در این روش شمع به صورت یک بعدی و خطی مدل می‌شود. روش دوم، مدل‌سازی شمع به وسیله شبکه تفاضل محدود و اختصاص پارامترها به صورت دستی به آن است. در واقع در این روش، عملکرد سازه‌ای شمع به المان‌ها تفهیم می‌شود و به کمک المان فصل مشترک، اندرکنش آن با خاک اطراف در نظر گرفته می‌شود. با این که استفاده از روش اول منجر به مدلی ساده‌تر شده و زمان تحلیل در این حالت بسیار کوتاه‌تر از روش دوم می‌باشد، ولی این روش برای مدل‌سازی شمع‌هایی با مقطع لوله‌ای مناسب نمی‌باشد و نمی‌تواند اثر خاک درون شمع را بر رفتار سیستم لحاظ کند. شروط مرزی شامل مقید کردن جابجایی‌ها در

مرزهای اطراف و کف مدل الزامیست. به طوری که مقدار سرعت در گره‌های خارجی مرزها در هر دو راستای افقی برابر صفر و ثابت در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است، برای نرم‌افزار فلک، اختصاص و اعمال یک شرط خاص، بر روی مقادیر و بردارهای جابجایی قابل تعریف نیست و اقداماتی نظیر بستن مرزها و یا اعمال جابجایی به سرشمع، به وسیله پارامتر سرعت‌های گره‌ای کنترل می‌شود. به همین روال، جهت ایجاد شرط مرزی در کف مدل، مقادیر بردار سرعت در راستای قائم نیز ثابت می‌شود. در شکل ۱ نمونه شبکه حل، شامل المان فصل مشترک اختصاص یافته اطراف شمع نشان داده شده است، به گونه‌ای که وجوه داخلی، خارجی و کف شمع لوله‌ای به ترتیب با رنگ‌های آبی، قهوه‌ای و قرمز متمایز شده‌اند. المان فصل مشترک ابتدا به دیواره‌ی خاکی چسبیده (قبل از ورود شمع) تا اتصال نقاط انجام گیرد، سپس شمع در جای خود قرار داده می‌شود. مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی المان فصل مشترک به ترتیب برابر با صفر و حدود دو سوم زاویه اصطکاک داخلی خاک قرار داده می‌شود. پارامترهای اندرکنشی این المان نیز که شامل سختی فنرهای برشی و نرمال می‌شود، با توجه به مدول‌های برشی و حجمی خاک محاسبه و اختصاص می‌یابد. نحوه‌ی مش‌بندی المان‌های خاک و شمع باید به گونه‌ای باشد تا گره‌های متناظر برهم منطبق شوند. جهت کسب نتایجی دقیق‌تر و در عین حال کاهش حجم محاسباتی مدل، در محدوده‌ای به اندازه دو برابر قطر شمع از مرکز مدل به سمت خارج، مش‌بندی به طور یکنواخت و ریزتر انجام شده است. با انجام حساسیت‌سنجی در خصوص تأثیر ابعاد دامنه خاک مدل شده اطراف شمع، این دامنه به صورت یک استوانه با قطری معادل با ۱۲ برابر قطر شمع و ارتفاعی معادل با ۱/۵ برابر طول مدفون شمع لحاظ شده است. تا مرزهای خارجی به اندازه کافی از مرکز شمع فاصله داشته باشند [۲۰].

در نرم‌افزار فلک دو روش جهت اختصاص مرزهای جاذب انرژی در تحلیل‌های دینامیکی وجود دارد. یکی استفاده از مرزهای Quiet و دیگری استفاده از روش free field. در روش اول گره‌های خارجی دامنه خاکی نقش جاذب را ایفا می‌کنند و مانع از بازتاب شدن امواج به داخل مدل می‌شوند. روش دوم در حالتی که موج ورودی به صورت یک عامل خارجی شبیه امواج زلزله به دامنه خاک وارد می‌شود کاربرد دارد. در این روش ۴ شبکه میدان آزاد در اطراف مدل و ۴ ستون شبکه در گوشه‌ها تشکیل می‌گردد به طوری که یک تناظر یک به یک بین نقاط درون هر صفحه با گره‌های شبکه اصلی مدل وجود دارد. در این تحقیق از روش اول یعنی اختصاص مرزهای جاذب استفاده شده است.



شکل ۱. نحوه شبکه‌بندی خاک و شمع و هندسه المان فصل‌مشترک

Fig. 1. Pile and soil meshing and interface geometry

می‌باشد که پارامترهای مقاومتی آن در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۲، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزارهای تجاری آباکوس [۲۱] و فِلَک (تحقیق حاضر) ارائه شده است. همچنین منحنی به دست آمده از تئوری تیر بر بستر ارتجاعی (مدل $p-y$) نیز قابل مشاهده است. لازم به توضیح است، نمودار حاصل شده از فِلَک در نواحی ابتدایی حل به دلیل ایجاد شک در مدل و روش حل بر پایه تفاضل محدود دچار نوساناتی است که با آرام شدن شرایط و پیشرفت جابجایی‌ها از شدت آن کاسته می‌شود.

با توجه به این نمودار، نتایج حاصل شده از نرم‌افزار و آزمایش در ابتدای محدوده بارگذاری (تا حدود جابجایی ۱۵ میلی‌متر) از تطابق خوبی برخوردار است، البته در همین ناحیه، منحنی $p-y$ میزان جابجایی‌ها را دست‌پایین پیش‌بینی می‌کند. در بیرون از این ناحیه هر دو نرم‌افزار مقادیر جابجایی را کم‌تر و مقاومت نهایی را بیشتر در نظر می‌گیرند. نتایج مدل‌سازی‌های سه بعدی به نسبت روش $p-y$ دارای تطابق رفتاری بهتری با نتایج آزمایشگاهی است. دلایل اختلاف نتایج مدل‌های سه بعدی و نتایج آزمایشگاهی، علاوه بر محدودیت‌های شبیه‌سازی می‌تواند ناشی از همگن نبودن نمونه در آزمایشگاه باشد و یا مربوط به خطاهایی در ارتباط با نحوه اعمال بارگذاری باشد، در شرایط آزمایشگاهی خواه ناخواه بار با یک خروج از مرکزیت اندکی

اندرکنش مابین گره‌های المان شمع و خاک، حداقل با ۴ پارامتر سختی فنرهای برشی (k_s)، سختی فنرهای نرمال (k_n)، زاویه اصطکاک سطح تماس و چسبندگی کنترل می‌گردد. طبق تجربیات مدل‌سازی، افزایش این مقادیر باعث ایجاد یک رفتار صلب بین شمع و خاک اطرافش می‌شود به نحوی که اگر این اعداد خیلی زیاد باشد، گره شمع و خاک منطبق روی یکدیگر با هم حرکت می‌کنند. از نتایج دیگر افزایش این مقادیر، افزایش بسیار زیاد زمان آنالیزهای نرم‌افزاری می‌باشد.

۳-۲- صحت‌سنجی مدل

جهت صحت‌سنجی نتایج، یک شمع آزمایشگاهی قطور و یک شمع بزرگ مقیاس لاغر متأثر از بار جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. در نمونه آزمایشگاهی که توسط مولر انجام شده، شمع تحت هر دو بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای قرار گرفته است [۲۱]. هدف از انجام آزمایشات استاتیکی مشخص کردن نمودار نیرو-جابجایی و مقایسه آن با منحنی‌های $p-y$ و نتایج حاصل شده از مدل‌های عددی توسعه داده شده در تحقیق مذکور بوده است. شمع مورد آزمایش، لوله‌ای فولادی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. ماسه مورد استفاده در آزمایش، ماسه اسپیرگ

جدول ۱. ابعاد نمونه آزمایشگاهی [۲۱]

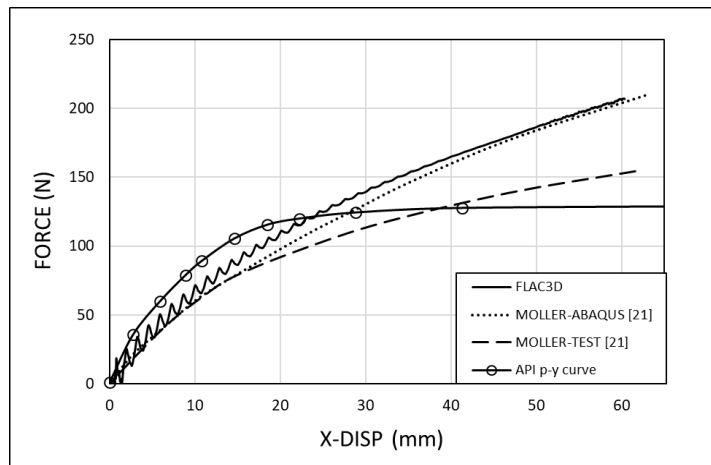
Table 1. Laboratory sample dimensions [21]

ارتفاع بالای بستر دریا (m)	عمق مدفون (m)	قطر خارجی (m)	شمع آزمایشگاه
۱/۳	۰/۴	۰/۰۵۲	

جدول ۲. نتایج آزمایشات سه محوری ماسه اسپبرگ [۲۱]

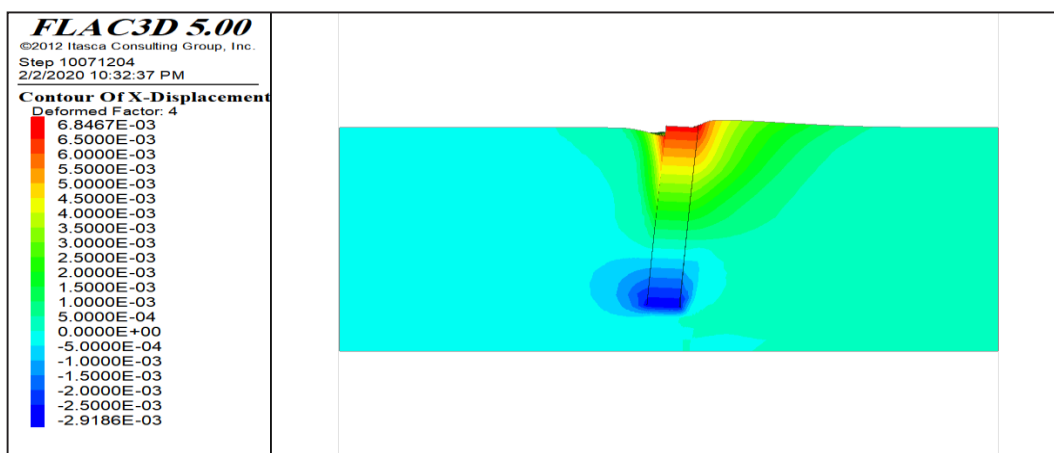
Table 2. Triaxial test results for Esbjerg sand [21]

تنش همه جانبه σ_3 (KPa)	تراکم نسبی (D_r)	زاویه اصطکاک پیک (φ_{peak}°)	زاویه اصطکاک اصلاح شده (φ_{mod}°)	زاویه اتساع (ψ°)
۱/۵	۰/۸۴	۵۳/۳	۴۷	۲۳
۵/۳	۰/۸۴	۴۸/۶	۴۳	۱۸
۲۰	۰/۸۴	۴۶/۱	۴۰	۱۵/۵
۵۰	۰/۸۴	۴۲/۴	۳۸/۷	۱۴/۸
۱۰۰	۰/۸۴	۴۱/۳	۳۷/۶	۱۳/۷



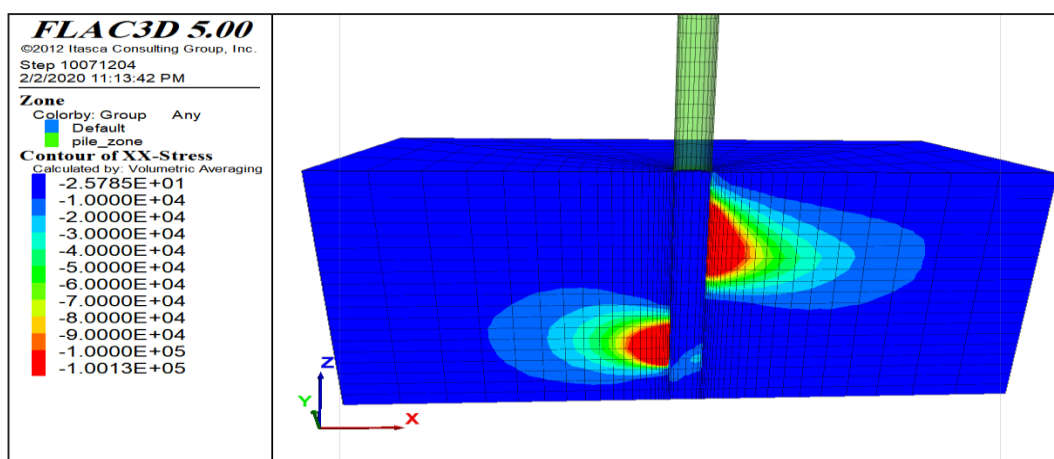
شکل ۲. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی آزمایشگاهی

Fig. 2. Test results and numerical simulations comparison



شکل ۳. کانتورهای جابجایی با بزرگ‌نمایی ۴ برابری

Fig. 3. Displacement contours with 4x magnification



شکل ۴. کانتورهای تنش در راستای xx (حرکت شمع در راستای X است)

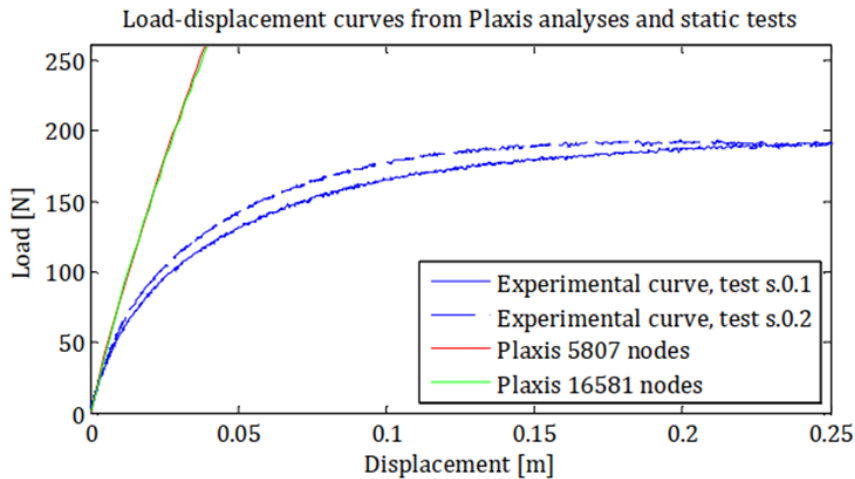
Fig. 4. Stress contours in xx direction (pile moves in x direction)

دهنده عملکرد صلب شمع است.

در ادامه مقایسه‌ای بر نتایج استخراج شده به وسیله نرم‌افزار PLAXIS در مورد همین شمع آزمایشگاهی ارائه می‌شود. در شکل ۵، نتایج مدل‌سازی سه بعدی به وسیله این نرم‌افزار به صورت منحنی نیرو-جابجایی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد است. مدل‌سازی‌ها در دو تعداد مش درشت و ریز انجام گرفته تا میزان حساسیت مدل به ابعاد مش‌بندی نیز بررسی گردد. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق مطلوبی بین نتایج آزمایشگاهی و

اعمال خواهد شد که می‌تواند در نتایج تاثیرگذار باشد.

کانتورهای جابجایی، با بزرگ‌نمایی ۴ برابری، و تنش‌های راستای XX ایجاد شده در خاک، وقتی سرشمع ۵۰ میلی‌متر به جلو حرکت کرده است به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در جلو و حدوداً ۱۷/۵ سانتی‌متر پایین‌تر از سطح خاک که معادل ۴۳ درصد از طول شمع می‌شود، تنش به مقدار حداکثر خود می‌رسد و سپس کاهش یافته و دوباره در انتها و پشت شمع افزایش می‌یابد. بروز چنین رفتاری نشان



شکل ۵. مقایسه منحنی نیرو-جابجایی سرشمع، حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار پلکسیس [۲۱]

Fig. 5. Comparison of head pile force-displacement curve obtained from laboratory results and Plaxis software [21]

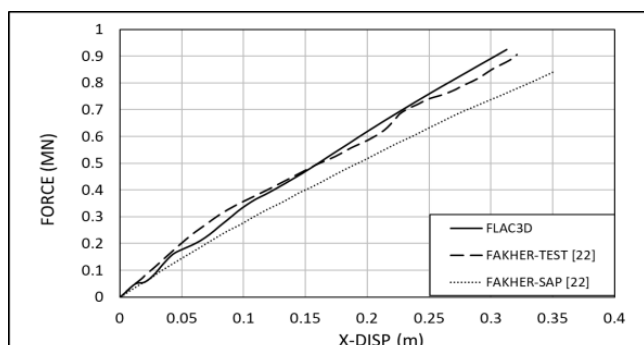
۱۵ درصدی مابین نتایج آزمایش و مدل SAP مشاهده می‌شود. این اتفاق می‌تواند ناشی از روش اتخاذ شده در مدل‌سازی شمع در این نرم‌افزار یعنی استفاده از المان تیر (Beam) باشد.

برای نمونه کانتورهای مربوط به مقادیر جابجایی افقی و تنش در راستای XX برای شمع ۱ در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه گردیده است. همانطور که از کانتورهای جابجایی مشخص است، برخلاف آنچه در شکل ۳ مربوط به شمع‌های قطور دیده شد، در این قسمت حالت چرخش صلب شمع دیده نمی‌شود، چرا که شمع‌های مورد مطالعه از دسته شمع‌های لاغر به حساب می‌آیند و نسبت طول به قطری در حدود ۱۹ دارند. به همین ترتیب در خصوص نحوه پراکندگی تنش‌ها نیز برخلاف رفتار مشاهده شده توزیع تنش‌ها در یک شمع قطور (شکل ۴)، در این مدل، تنش در پشت شمع، به طور کلی از بالا به پایین در طول مدفون شمع افزایش می‌یابد و در جلو شمع در ناحیه‌ای حدود ۲ تا ۳ متری زیر سطح خاک، که معادل ۱۵ درصد از طول شمع است، افزایش ناگهانی دارد. این عدد را می‌توان با مقدار عمق گیرداری (Z_f) ارائه شده در آیین‌نامه ACI نیز مقایسه کرد، به طوری که برای خاک ماسه متراکم با فرض مدول عکس‌العمل بستر معادل $n_h = 48 \frac{MN}{m^3}$ مقدار $Z_f = 2.3m$ نتیجه می‌دهد که با مقدار به دست آمده از نرم‌افزار همخوانی دارد.

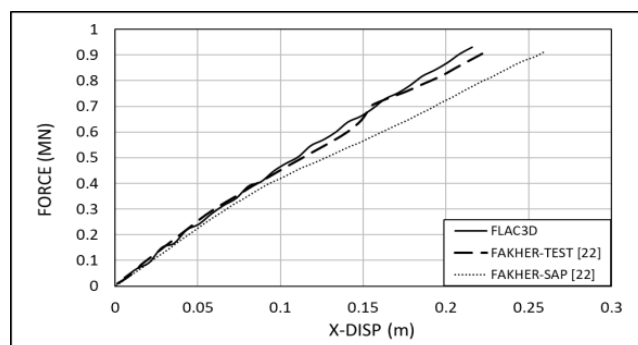
نرم‌افزاری وجود ندارد، به طوری که نتایج نرم‌افزاری بر خلاف رفتار غیرخطی و انحنای دار آزمایشگاهی، حاکی از یک رفتار خطی می‌باشد. لذا جهت بررسی رفتار شمع‌های بزرگ مقیاس و بارگذاری‌های چرخه‌ای مدنظر این مقاله، از نرم‌افزار FLAC استفاده شد است تا نتایج دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت مسئله حاصل شود.

در آزمایش بزرگ مقیاس صورت گرفته توسط فاخر و همکاران در منطقه ویژه اقتصادی پارس (عسلویه)، در نواحی جنوبی کشور ایران [۲۲]، در مجموع چهار شمع فولادی ($E = 200GPa$) در مقیاس واقعی با طول‌هایی برابر با ۴۳، ۳۰ و ۲۰ متر و قطرهای خارجی ۱/۷۷ و ۱/۹ متر، تحت آزمایش بارگذاری استاتیکی جانبی قرار گرفته است. شمع‌های مذکور از دسته شمع‌های لاغر به حساب می‌آیند. نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شده از آزمایش‌های میدانی و نرم‌افزار فلک، برای هر چهار شمع مذکور در نمودارهای (الف) تا (ت) شکل ۶ قابل مشاهده است. در این نمودارها، منحنی حاصل شده از مدل‌سازی خود محقق به وسیله نرم‌افزار SAP نیز ارائه شده، که در آن خاک به صورت فنرهای غیرخطی در نظر گرفته شده است.

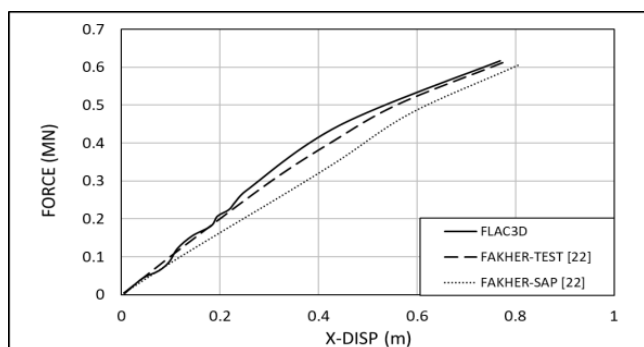
همانطور که در نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود، مدل‌سازی به وسیله نرم‌افزار فلک، که خاک را به صورت یک محیط پیوسته شبیه‌سازی می‌کند، نسبت به مدل فنرهای غیرخطی SAP از دقت بیشتری برخوردار است، به طوری که هر چه میزان تغییر شکل‌ها بیشتر شده است، از دقت منحنی‌های مربوط به فنرهای غیرخطی کاسته می‌شود، تا آنجا که تفاوت



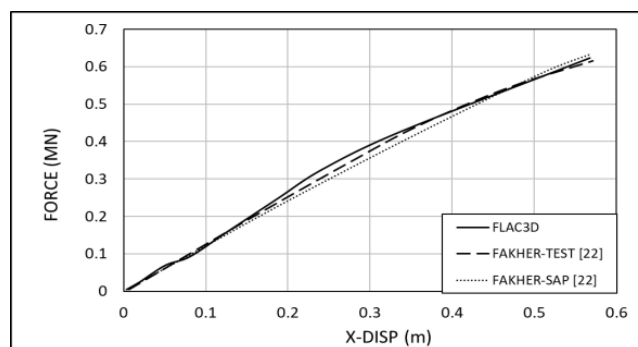
الف) منحنی‌های نیرو-جابجایی شمع شماره ۱ (با قطر خارجی ۱/۷۷ متر و میانگین ضخامت جداره برابر با ۲۹/۲۱ میلی‌متر)
Figure 6.a. Force-displacement curves for pile No.1 (with an outer diameter of 1.77 m and an average wall thickness of 29.21 mm)



ب) منحنی‌های نیرو-جابجایی شمع شماره ۲ (با قطر خارجی ۱/۹ متر و میانگین ضخامت جداره برابر با ۴۰/۶۴ میلی‌متر)
Figure 6.b. Force-displacement curves for pile No.2 (with an outer diameter of 1.9 m and an average wall thickness of 40.64 mm)



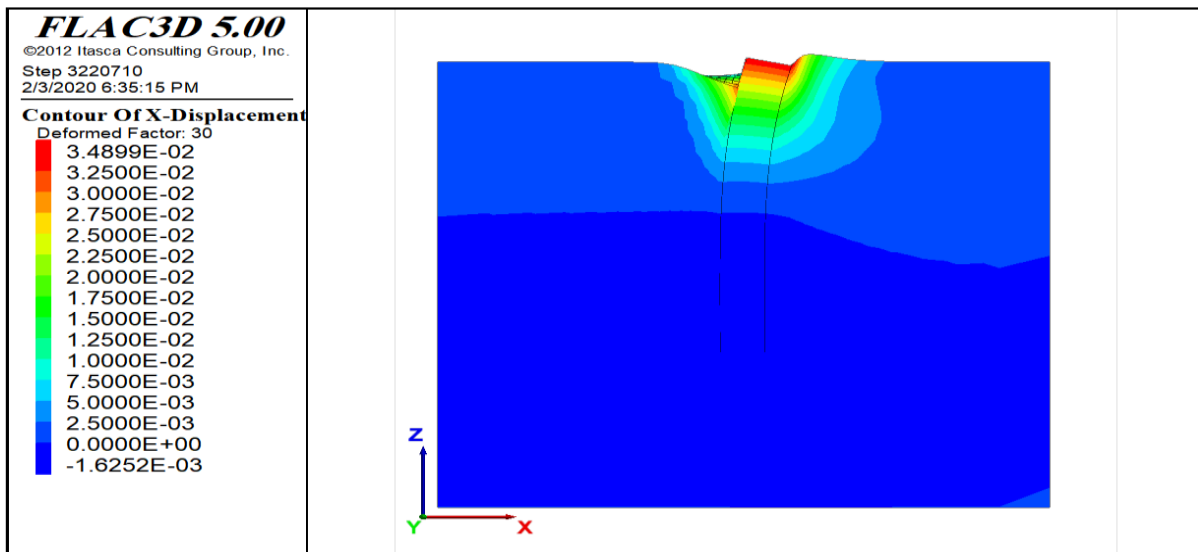
پ) منحنی‌های نیرو-جابجایی شمع شماره ۳ (با قطر خارجی ۱/۷۷ متر و میانگین ضخامت جداره برابر با ۲۹ میلی‌متر)
Figure 6.c. Force-displacement curves for pile No.3 (with an outer diameter of 1.77 m and an average wall thickness of 29 mm)



ت) منحنی‌های نیرو-جابجایی شمع شماره ۴ (با قطر خارجی ۱/۹ متر و میانگین ضخامت جداره برابر با ۴۰/۶۴ میلی‌متر)
Figure 6.d. Force-displacement curves for pile No.4 (with an outer diameter of 1.9 m and an average wall thickness of 40.64 mm)

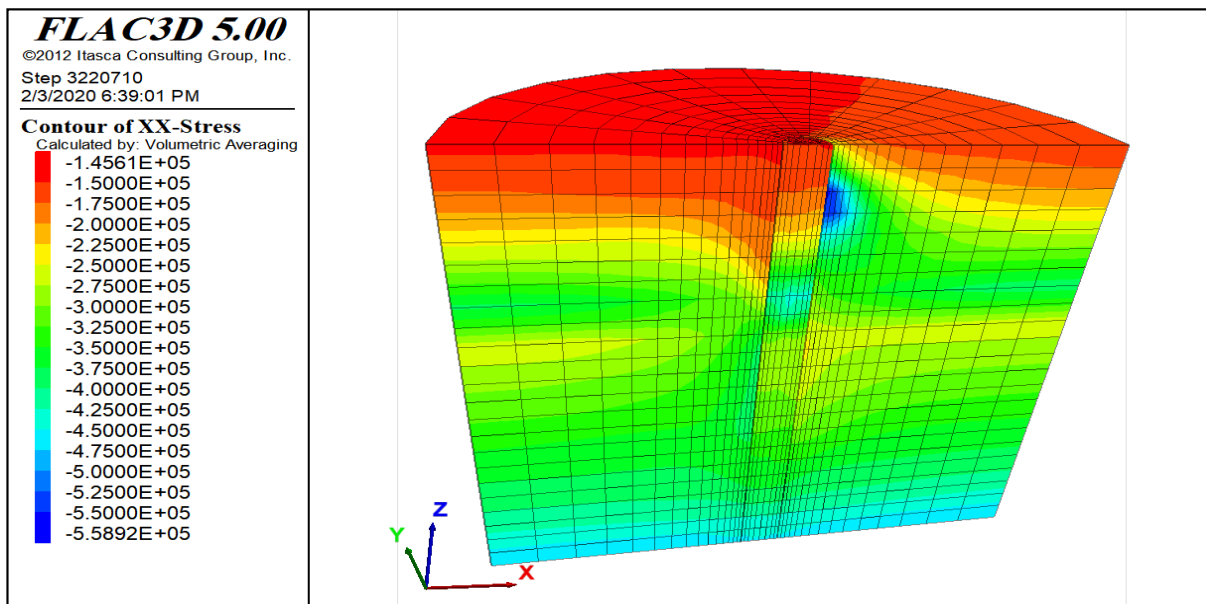
شکل ۶. منحنی‌های نیرو-جابجایی برای شمع‌های ۱ تا ۴ مورد آزمایش در بندر پتروشیمی پارس-عسلویه

Fig. 6. Force-displacement curves for piles 1 to 4 in PARS-ASSALUYE petrochemical port



شکل ۷. کانتورهای جابجایی در راستای X مربوط به شمع ۱ با بزرگ‌نمایی ۳۰ برابری

Fig. 7. X-direction displacement contours for pile No. 1 with 30x magnification



شکل ۸. کانتورهای مؤلفه xx تنش مربوط به شمع ۱

Fig. 8. Stress contours in xx direction for pile No. 1

جدول ۳. مشخصات هندسی توربین [۳]

Table 3. Geometric characteristics of turbine [3]

واحد	مقدار	متغیر	پارامتر
m	۸۷	Z_{hub}	ارتفاع هاب
m	۱۲۰	D	قطر روتور
m	۶۸	L_T	ارتفاع برج
m	۳	D_t	قطر مقطع بالایی برج
m	۵	D_b	قطر مقطع پایینی برج
m	۰/۰۲۷	t_T	ضخامت جداره برج
kg/m^3	۷۸۶۰	ρ_T, ρ_p	دانسیته مصالح برج و شمع
$tons$	۲۵۰	m_T	جرم کل برج
$tons$	۲۴۳	m_{RNA}	مجموع جرم سیستم روتور-نازل و اتصالات
GPa	۲۰۰	E_p	مدول الاستیسیته فولاد
m	۴۳	L_p	عمق مدفون شمع
m	۵/۲	D_p	قطر خارجی شمع
m	۰/۰۵۹	t_p	ضخامت جداره شمع
$tons$	۳۲۲	m_p	جرم شمع

۴- هندسه مدل و خواص خاک

جهت بررسی تأثیر تغییر جهت بارگذاری متناوب باد بر پاسخ شمع‌های پایه توربین‌های بادی، از مشخصات یک نمونه واقعی توربین که در مزرعه بادی خور تیم^۱ واقع در سواحل شرقی کشور انگلستان نصب شده، استفاده شده است. شمع مورد نظر دارای طول مدفون و قطری به ترتیب برابر با ۴۳ و ۵/۲ متر و ضخامت جداره ۵۹ میلی‌متر می‌باشد، که با توجه به نسبت طول به قطر برابر ۸/۲۶، از جمله مونوپایل‌های قطور به حساب می‌آید. مشخصات هندسی و اطلاعات محیطی محل توربین به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

خاک مورد استفاده ماسه توپورا می‌باشد که پارامترها و ثابت‌های مورد نیاز خاک مذکور برای مدل دافلیاس-منظری در جدول ۵ ارائه شده است [۱۸].

۵- اعمال بارگذاری باد

طبق آیین‌نامه IEC2005، به منظور بارگذاری توربین‌های بادی فراساحلی (OWT) با رویکرد طراحی، چهار سناریو بارگذاری برای باد وجود دارد [۲۳]، که عبارت‌اند از وزش باد متوسط به همراه تلاطم متوسط (U-1)، وزش باد با تلاطم حداکثر (U-2)، طوفان حداکثر در سرعت بادی معادل با حداکثر توان توربین (U-3) و حداکثر طوفان در سرعت نهایی کاربری توربین (U-4)، که طبق توصیه آیین‌نامه، گزینه بارگذاری U-2 حائز اهمیت است. با کاربرد این گزینه و با توجه به اطلاعات هندسی و محلی توربین، مقدار نیرو باد برابر با ۰/۴۱۳ مگانیوتن محاسبه می‌گردد [۲۳].

شمع مورد نظر با نیروی برابر با نیروی باد متوسط به صورت متناوب به تعداد N بار تحت بارگذاری استاتیکی قرار می‌گیرد. بدین صورت که در هر تناوب، نیروی مورد نظر به صورت تنش به سرشمع اعمال گردیده و پس از رسیدن به تعادل، باربرداری به صورت حذف ناگهانی نیرو انجام می‌گیرد.

1 Thame Estuary

جدول ۴. اطلاعات محلی [۳]

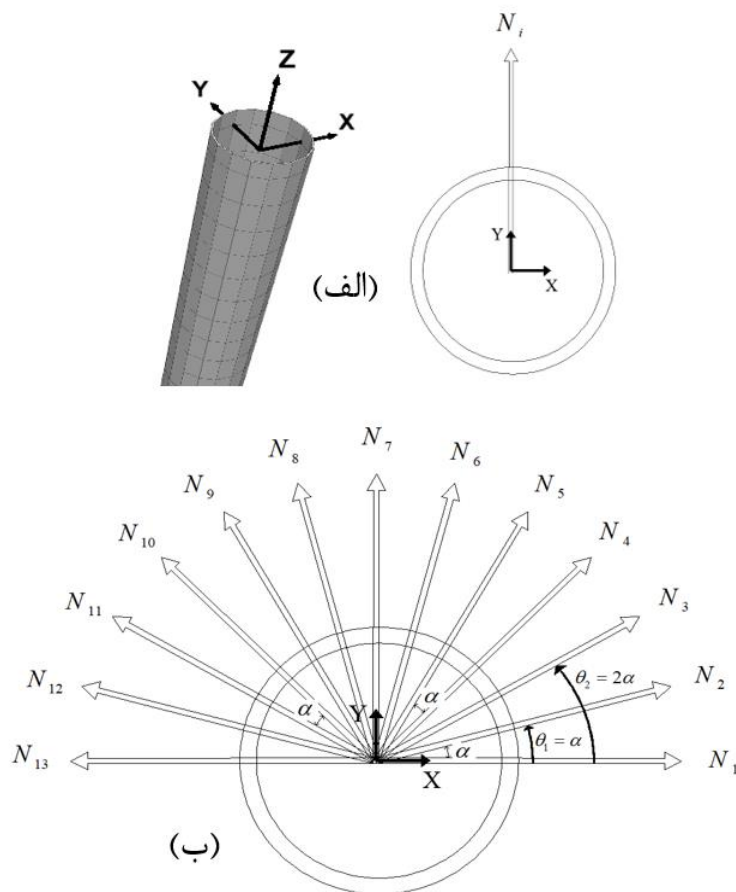
Table 4. Local information [3]

واحد	مقدار	متغیر	پارامتر
$[-]$	۱/۸	s	پارامتر شکل سرعت باد
m/s	۸	K	پارامتر مقیاس سرعت باد
%	۱۸	I	شدت تلاطم مبنا
m	۳۴۰/۲	L_K	مقیاس طول تلاطم
kg/m^3	۱/۲۲۵	ρ_a	دانسیته هوا
m	۲۵	S	عمق آب حداکثر
$^\circ$	۲۶-۲۸	ϕ'	زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای محل
KN/m^3	۹	γ'	وزن مخصوص غوطه‌وری خاک ماسه‌ای محل
$^\circ$	۲۰	ϕ'	زاویه اصطکاک داخلی خاک رسی محل
KN/m^3	۹	γ'	وزن مخصوص غوطه‌وری خاک رسی محل

جدول ۵. پارامترهای مورد نیاز در مدل رفتاری دافالیاس-منظری برای خاک ماسه توپورا [۱۸]

Table 5. Required Parameters in Dafalias-Manzari Behavioral Model for Toyoura Sand Soil [18]

۱۲۵	G_0	پارامترهای الاستیک
۰/۰۵	ν	
۱/۲۵	M_c	پارامترهای حالت بحرانی
۰/۷۱۲	c	
۰/۰۱۹	λ	
۰/۹۳۴	$(e_c)_{ref}$	
۰/۷	ξ	
۰/۰۱	m	سطح تسلیم
۷/۰۵	h_0	مدول پلاستیک
۱/۱	n^b	
۰/۹۶۸	c_h	
۰/۷۰۴	A_0	پارامترهای اتساع
۳/۵	n^d	
۴	z_{max}	پارامترهای تغییر بافت
۶۰۰	c_z	



شکل ۹. شماتیک نحوه بارگذاری به صورت تک جهته و چند جهته

Fig. 9. Schematic of unidirectionally and multidirectionally loading

تحقیق، بررسی‌های صورت گرفته در مقادیر α برابر با ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۱۵ درجه انجام گرفته است. شکل ۹ با فرض $\alpha = 15^\circ$ رسم شده، لذا دارای ۱۳ تغییر راستای بارگذاری می‌باشد.

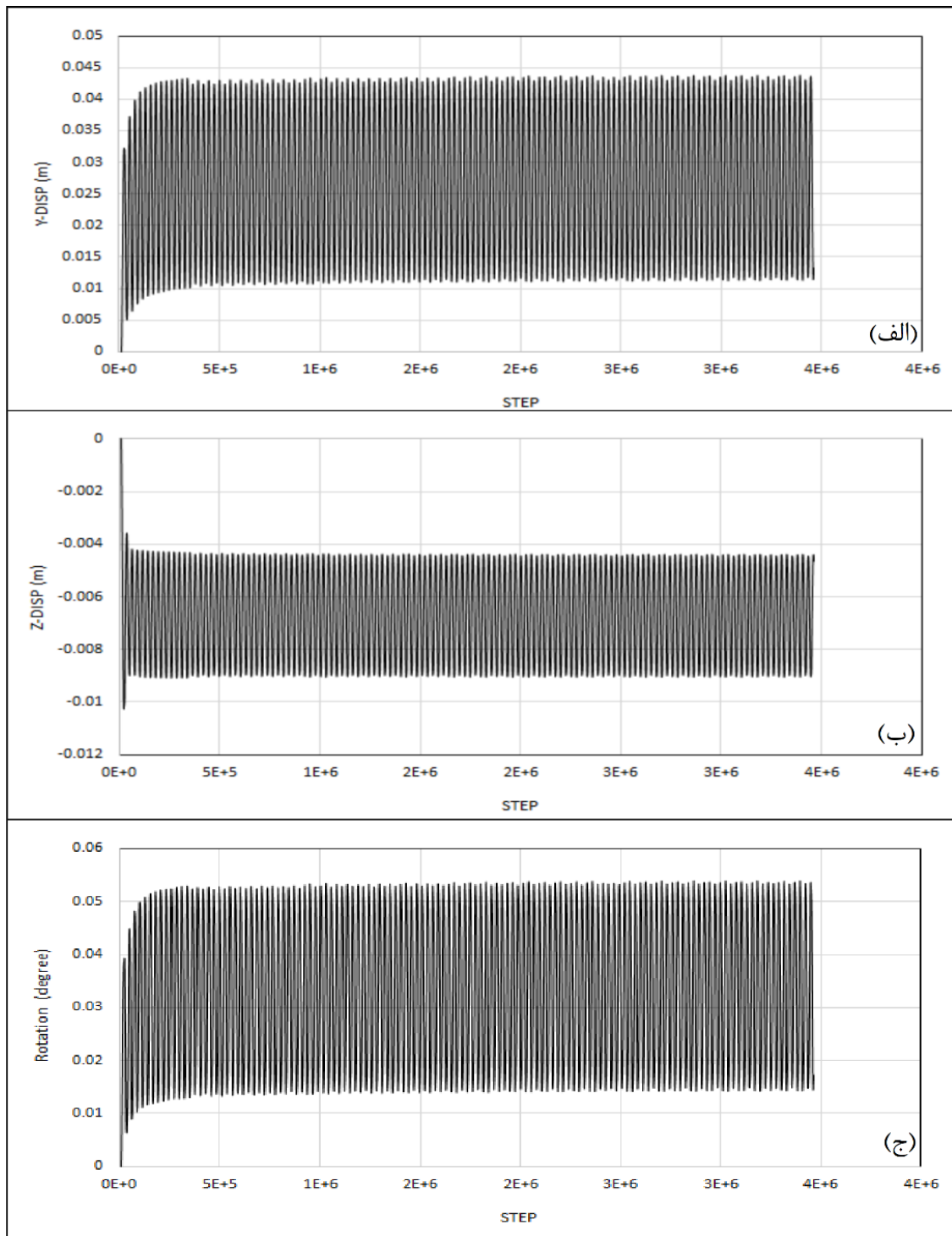
۶- نتایج و بحث

۶-۱- تعیین تعداد تناوب بارگذاری برای ایجاد شرایط پایدار

ابتدا باید تعداد تناوب (تکرار بارگذاری) معرّف شرایط پایداری در حالت تک جهته تعیین گردد. بدین منظور مدل به صورت تک جهته مورد بارگذاری تناوبی استاتیکی قرار می‌گیرد. شکل ۱۰ قسمت‌های الف، ب و ج به ترتیب نشان دهنده‌ی نمودارهای جابجایی در راستای Y ، Z و میزان چرخش سرشمع در راستای Y ، حاصل شده از ۱۳۰ تناوب بارگذاری در این حالت می‌باشند (جهت محورهای مذکور در شکل ۹-الف ارائه شده است). همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از حدوداً ۱۰ تناوب، تغییر محسوس در روند گسترش پاسخ‌های شمع مشاهده نمی‌شود. به این صورت که مقدار

ابتدا در حالت تک جهته، مطابق با شکل ۹-الف تمام دفعات بارگذاری (N بار) در راستای محور Y اعمال می‌شود. بارگذاری و باربرداری تا دستیابی به یک حالت پایدار ادامه می‌یابد. منظور از دستیابی به یک حالت پایدار، همگرا شدن مقادیر جابجایی به یک مقدار خاص می‌باشد، در واقع پس از برقراری این حالت، با افزایش تعداد تناوب بارگذاری، دیگر افزایش محسوس در مقادیر جابجایی مشاهده نمی‌شود.

در حالت چند جهته مطابق با آنچه در قسمت ب از شکل ۹ ارائه شده است، بارگذاری-باربرداری متناوب در هر راستا، آن قدر تکرار می‌شود تا یک حالت پایدار در روند گسترش مقادیر جابجایی سرشمع مشاهده شود و سپس راستای بارگذاری θ درجه تغییر می‌کند و دوباره بارگذاری تا رسیدن به حالت پایدار در آن جهات نیز ادامه می‌یابد. همین روند تا پوشش نیمی از محیط شمع تکرار می‌شود. ایجاد حالت پایداری در تمامی جهات اعمال بار بایستی کنترل گردد. بدیهی است تعداد تغییر راستای بارگذاری، به مقدار زاویه بین راستاهای بارگذاری (α) بستگی دارد. لازم به ذکر است در این



شکل ۱۰. نمودارهای پاسخ سرشمع ناشی از ۱۳۰ تناوب بارگذاری به طوری که، (الف) جابجایی در راستای Y، (ب) جابجایی محوری شمع و (ج) چرخش سرشمع در راستای Y

Fig. 10. Diagrams of the head-pile response to 130 loading cycles (a) displacement in the Y direction, (b) axial displacement of the pile and (c) head-pile rotation in the Y direction

جدول ۶. نتایج بارگذاری تک جهته و چند جهته در بارگذاری تناوبی استاتیکی

Table 6. Results of uni-directional and multi-directional loading in static alternative loading

نحوه بارگذاری	Y-DISP (m)		Z-DISP (m)		ROTATION (°)	
	max	residual	max	residual	max	residual
تک جهته	۰/۰۴۳۵	۰/۰۱۱۴	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۴۴	۰/۰۵۳۶	۰/۰۱۴۶
$\alpha = 15^\circ$	۰/۰۳۷	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۱۶	-۰/۰۰۲۸۴	۰/۰۴۵۷	۰/۰۱۲۹
$\alpha = 30^\circ$	۰/۰۳۶۶	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۱۶۶	-۰/۰۰۲۹۲	۰/۰۴۵۵	۰/۰۱۲۵
$\alpha = 45^\circ$	۰/۰۳۶۴	۰/۰۰۹۸۷	۰/۰۰۱۵۹	-۰/۰۰۲۹۶	۰/۰۴۴۶	۰/۰۱۱۲
$\alpha = 60^\circ$ (در هر راستا ۱۰ تناوب)	۰/۰۳۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۳۰	۰/۰۴	۰/۰۱۰۳
$\alpha = 60^\circ$ (در هر راستا ۲۰ تناوب)	۰/۰۳۲۲	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۱۶	-۰/۰۰۲۹	۰/۰۴	۰/۰۱

لازم به ذکر است در حالت $\alpha = 15^\circ$ ، در اثر ۱۲ تغییر جهت، ۱۳ راستای بارگذاری وجود دارد و در هر راستا نیز جهت رسیدن به حالت پایدار به ۱۰ تناوب نیاز است، لذا نتایج حاصل از ۱۳۰ تناوب بارگذاری مدل تک جهته (شکل ۱۰) با نتایج حاصل شده از ۱۳۰ تناوب بارگذاری در مدل چند جهته (۱۳ × ۱۰) مقایسه می‌شود. نمودار مقادیر جابجایی در راستاهای Y و Z و منحنی مربوط به مقادیر چرخش سرشمع در حالت $\alpha = 15^\circ$ ، در شکل ۱۱ ارائه شده است. باید توجه داشت که مقایسه پاسخ شمع به جابجایی‌های راستای Y در دو حالت تک جهته و چند جهته اهمیت پیدا می‌کند. تغییر مقادیر جابجایی و چرخش سرشمع در راستای X در اثر تغییر جهت بارگذاری امری بدیهی به شمار می‌آید.

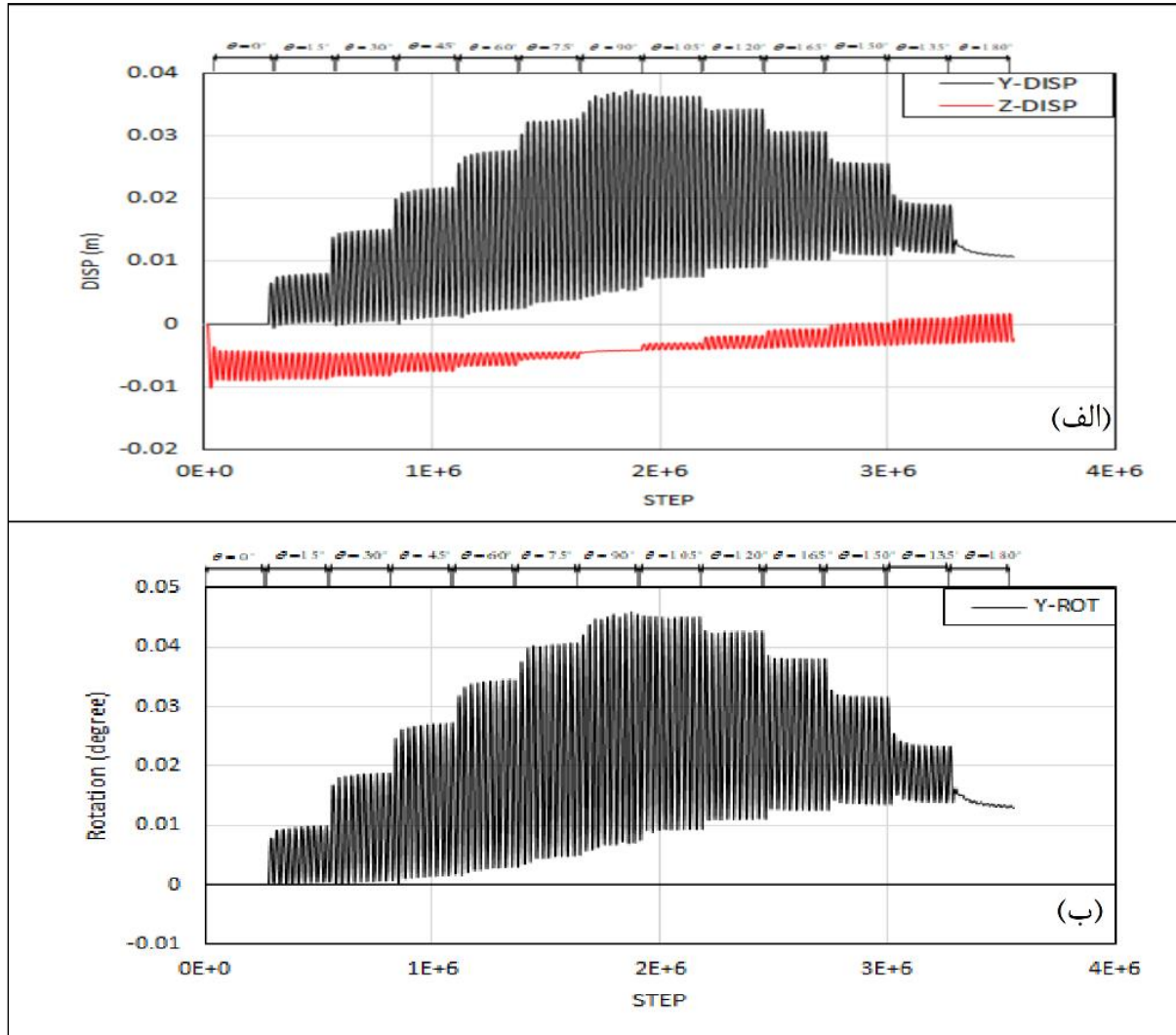
همانطور که در نمودار مربوط به مقادیر جابجایی در راستای محوری شمع (Z) در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نشست شمع در اولین تناوب بارگذاری رخ می‌دهد (اولین مرتبه از ۱۰ تناوب مربوط به بارگذاری در راستای X) و پس از آن با ادامه‌ی اعمال تناوب‌های دیگر به حالت پایدار می‌رسد. دستیابی به حالت پایدار در همه‌ی راستاها اتفاق افتاده است. بر خلاف رفتار مشاهده شده در بارگذاری تک جهته (شکل ۱۰-ب)، در تمامی حالات چند جهته، با تغییر راستای بارگذاری شمع به سمت بالا حرکت می‌کند. مکانیزم ایجاد تغییر شکل‌ها در راستای Y و چرخش سرشمع از یک الگوی تقریباً یکسان پیروی می‌کنند.

در جدول ۶ نتایج به دست آمده از پاسخ‌های مربوط به بارگذاری‌های تک جهته و چند جهته ارائه گردیده است. در این جدول مقادیر تغییر مکان

جابجایی در راستای Y در تناوب دهم برابر ۴/۳ سانتی‌متر و در تناوب صد و سی‌ام برابر ۴/۳۵ سانتی‌متر می‌باشد، که حاکی از اختلافی ۱/۱ درصدی دارد. این مقدار اختلاف برای مقادیر جابجایی در راستای Z و چرخش سرشمع نیز به ترتیب حدود ۰/۴ و ۱/۷ درصد می‌باشد. لذا چنین می‌توان نتیجه گرفت که حالت پایدار در حدود ۱۰ تناوب اول با مقدار جابجایی افقی حدوداً ۴/۳ سانتی‌متری سرشمع اتفاق می‌افتد و عدد ۱۰ تناوب را می‌توان به عنوان تعداد تناوب همگرایی مقادیر جابجایی (پایداری) برای همه شرایط در نظر گرفت.

۶-۲- مقایسه نتایج بارگذاری تک جهته و چند جهته

پس از تعیین تعداد تناوب بارگذاری به منظور دستیابی به یک حالت پایدار در هر راستا، بارگذاری چند جهته شمع به این صورت انجام می‌گیرد که، ابتدا در راستای X، تعداد ۱۰ تناوب بارگذاری به شیوه ذکر شده اعمال می‌شود (ایجاد پایداری در این راستا). سپس راستای بارگذاری به اندازه‌ی α درجه تغییر کرده و ۱۰ تناوب دیگر اعمال می‌شود و این روند تا پوششِ نیمی از محیط شمع ادامه پیدا می‌کند تا با توجه به مقدار α ، در همه‌ی جهات اعمال بار، پایداری ایجاد شود. با توجه به این که در این تحقیق، بارگذاری‌های چند جهته در مقادیر α برابر ۶۰، ۴۵، ۳۰ و ۱۵ درجه لحاظ شده است، با لحاظ نمودن ۱۰ تناوب برای رسیدن به شرایط پایدار در هر جهت، تعداد مجموع تناوب‌های بارگذاری برای حالات مذکور به ترتیب ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۳۰ خواهد بود. در ادامه نمودار جابجایی و چرخش برای حالت $\alpha = 15^\circ$ درجه ارائه می‌گردد و نتایج مابقی مدل‌ها در جداول مربوطه خلاصه می‌شود.



شکل ۱۱. نمودارهای بارگذاری-باربرداری‌های استاتیکی با تغییرات ۱۵ درجه‌ای راستای بارگذاری به طوری که، (الف) جابجایی در راستاهای Y و Z، (ب) نمودار چرخش سرشمع در راستای Y

Fig. 11. Diagrams of static loading-unloading with 15 degree change in load direction (a) displacement in the Y and Z directions, (b) head rotation in Y direction

جدول ۷. درصد اختلاف نتایج بارگذاری تک جهته و چند جهته در اثر اعمال بارگذاری-باربرداری های متناوب استاتیکی

Table 7. Difference between uni-directional and multi-directional static alternative loading and unloading

	Y-DISP (%)		Z-DISP (%)		ROTATION (%)	
	max	residual	max	residual	max	residual
$\alpha = 15^\circ$	-۱۴/۹۴	-۶/۱۴	۱۱۷/۷۸	-۳۵/۴۵	-۱۴/۸۳	-۱۱/۳۷
$\alpha = 30^\circ$	-۱۵/۸۶	-۹/۶۵	۱۱۸/۴۵	-۳۳/۶۳	-۱۵/۲۰	-۱۴/۳۲
$\alpha = 45^\circ$	-۱۶/۳۲	-۱۳/۴۲	۱۱۷/۶۹	-۳۲/۷۳	-۱۶/۸۸	-۱۸/۰۲
$\alpha = 60^\circ$	-۲۶/۴۳	-۲۵/۴	۱۱۶/۷	-۳۱/۸	-۲۵/۴۵	-۲۹/۴

با توجه به جدول فوق، مقدار حداکثر تغییر مکان در راستای Y، در اثر تغییر جهت بارگذاری نسبت به بارگذاری تک جهته تا ۲۶ درصد کاهش داشته است. با این وجود در بین حالات $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ، اختلاف چندانی در میزان تفاوت مشاهده نمی‌شود، در واقع تغییر راستای بارگذاری از ۱۵ درجه تا ۴۵ درجه، نهایتاً ۲ درصد در پارامتر مذکور تأثیرگذار بوده است. ولی از حالت $\alpha = 45^\circ$ به $\alpha = 60^\circ$ ، در میزان درصد تفاوت نتایج، ۱۰ درصد اختلاف مشاهده می‌شود. مقدار تغییر شکل باقی‌مانده شمع نیز به طور مشخص با افزایش زاویه α افزایش می‌یابد، به طوری که از حالت $\alpha = 15^\circ$ تا $\alpha = 60^\circ$ ، ۱۹/۳ درصد فاصله وجود دارد. این رویکرد در خصوص چرخش سرشمع نیز مشاهده می‌گردد. مقادیر ماندگار جابجایی ناشی از اعمال بارگذاری متناوب دارای حداکثر اختلاف ۷/۷۵ درصدی با یکدیگر می‌باشد، به طوری که بیشترین تغییر مکان ماندگار در حالت $\alpha = 15^\circ$ بوده و با افزایش زاویه α از این مقدار کاسته می‌شود.

در خصوص اختلاف فاحش نتایج بین حالات $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ و $\alpha = 60^\circ$ اینطور به نظر می‌رسد که، صرفاً در زاویه ۶۰ درجه با تغییر جهت بارگذاری، در هیچ کدام از تغییرات راستای نیرو، جهت بار دقیقاً در راستای Y قرار نمی‌گیرد و این واقعیت می‌تواند بر نتایج تأثیر داشته باشد. جهت بررسی صحت این فرضیه، در یک مطالعه مجزا، بارگذاری تناوبی یکبار در راستای Y و باری دیگر در راستایی با زاویه ۱۵ درجه نسبت به راستای Y اعمال گردید. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که جابجایی افقی بین این دو حالت حدود ۱۱٪ اختلاف دارند. جهت بررسی بیشتر این فرضیه همچنین، در حالت $\alpha = 45^\circ$ ، راستای بارگذاری در جهت محور Y حذف گردید و ۱۰ تناوب مربوط به آن راستا، در جهات قبلی و بعدی راستای Y تقسیم شد. به عبارتی دیگر در این حالت، پس از اعمال ۱۰ تناوب در راستای محور X، ۱۵ تناوب در راستای ۴۵ درجه، ۱۵ تناوب در راستای ۱۳۵ درجه و در آخر

راستای Y در نقطه‌ی حداکثر منحنی‌های چند جهته (max) و نقطه پایانی نمودار (residual) ارائه شده است، که مورد اخیر در واقع تغییر مکان ماندگار سیستم است. تغییر مکان‌های ماندگار در بررسی شرایط خستگی توربین تأثیرگذار می‌باشد. مقادیر حداکثر و ماندگار چرخش سرشمع نیز در نقاط مذکور ارائه شده است. همچنین تغییر مکان در راستای قائم (Z) نیز برای دو نقطه انتهایی و مقدار بیشینه تناوب آخر (آخرین مرتبه در راستای $\theta = 180^\circ$)، در بارگذاری تک جهته و هر کدام از حالات چند جهته ارائه شده است. دقت شود منظور از نقطه بیشینه، قله‌ی تناوب مذکور می‌باشد که در واقع، مثبت‌ترین مقدار تغییر مکان قائمی است که شمع تجربه کرده است. ردیف اول از جدول ۶ نتایج مربوط به مدل تک جهته و ردیف‌های بعدی مربوط به بارگذاری چند جهته است.

جهت کسب اطمینان از اینکه تعداد تناوب‌های بارگذاری تأثیری بر پارامترهای مورد بررسی ندارد، در حالت $\alpha = 60^\circ$ ، علاوه بر اعمال ۱۰ تناوب بارگذاری در هر راستا (جمعاً ۴۰ تناوب)، باری دیگر ۲۰ تناوب در هر راستا اعمال گردید (جمعاً ۸۰ تناوب)، که نتایج آن در سطر آخر جدول ۶ نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد اختلاف بین نتایج این دو حالت بسیار ناچیز می‌باشد که تأییدی بر پایداری سیستم در ۱۰ تناوب بارگذاری است.

درصد تفاوت نتایج مابین مدل تک جهته و حالات چند جهته، ناشی از اثر تغییر راستای بارگذاری در جدول ۷ ارائه گردیده است. لازم به توضیح است در این جدول و سایر جداول مشابه درصد منفی درج شده در واقع نشان دهنده کاهش مقدار پارامتر مورد نظر در اثر اعمال بارگذاری چند جهته نسبت به تک جهته می‌باشد، لذا وجود اعدادی با درصد اختلاف مثبت، نشان دهنده این است که مقادیر پارامتر مورد نظر در حالت چند جهته از تک جهته بیشتر بوده است.

جهته مورد بررسی قرار داده شود، اهمیت این موضوع که تاریخچه بارگذاری تا چقدر می‌تواند بر نتایج اثرگذار باشد، به خوبی قابل مشاهده است. در واقع با توجه به مدل رفتاری که استفاده شده است، اثر تغییرات در تانسورهای تنش و کرنش مراحل قبلی حل، بر نمو کرنش‌های انحرافی و حجمی جدید در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از مدول‌های سخت شونده‌گی و اتساع مورد استفاده در این مدل رفتاری، جزء کرنش‌های جدید محاسبه می‌گردد. اختلاف مشاهده شده بین حالات تک جهته و چند جهته حاکی از این حقیقت می‌باشد که، اعمال مسیر تنش‌های متنوع‌تر به خاک، بر نحوه‌ی گسترش و شکل‌گیری پارامترهای تانسوری تأثیرگذار می‌باشد و هر چه فرمولاسیون به کار گرفته شده جامع‌تر و شامل‌تر باشد، رفتار گزارش شده به نتایج حقیقی نزدیک‌تر خواهد بود. بدیهی است به کارگیری یک مدل جامع رفتاری، مستلزم صرف هزینه‌های محاسباتی و آزمایشگاهی زیادی است.

۷- جمع‌بندی

توربین‌های بادی در معرض بارگذاری‌های متناوب ناشی از باد قرار دارند و با توجه به چرخش راستای باد این بارگذاری، تنها در یک راستا اعمال نمی‌شود. در این مقاله، با انجام شبیه‌سازی عددی رفتار شمع در خاک در نرم‌افزار فِلاک و با در نظر گرفتن تئوری دافالیاس-منظری، پس از صحت‌سنجی نتایج، پاسخ فونداسیون توربین‌های بادی فراساحلی از نوع شمع‌های قطور، تحت بارگذاری متناوب استاتیکی باد در دو حالت بارگذاری تک جهته و چند جهته؛ یعنی تغییر راستای باد، مقایسه شده است. بدین منظور یک توربین بادی با ابعاد واقعی مورد توجه قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که پس از ۱۰ تناوب بارگذاری و باربرداری، تغییر شکل‌ها به حالت پایدار می‌رسند. لذا بارگذاری و باربرداری در هر راستا حداقل ۱۰ بار تکرار شده است. با در نظر گرفتن راستاهای مختلف بارگذاری (از ۱۵ تا ۶۰ درجه) و مقایسه نتایج آن با بارگذاری در یک راستا، چنین نتیجه می‌شود که حداکثر تغییر مکان افقی و چرخش شمع حدود ۱۶ درصد کاهش دارند. این اختلاف در خصوص تغییر مکان قائم حدود ۲ برابر است. تغییر مکان ماندگار در راستای افقی و چرخش ماندگار نیز به ترتیب حداکثر ۱۳ و ۱۸ درصد کاهش داشته‌اند.

اختلاف فاحش نتایج راستای ۶۰ درجه با سایر راستاها نشان می‌دهد که عدم اعمال نیرو در راستای مورد نظر برای محاسبه تغییر مکان، باعث کاهش عکس‌العمل شمع به مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌گردد و لذا نتایج به دست آمده علی‌رغم اهمیت ذاتی جهت مقایسه قابل استناد نیست.

نیز ۱۰ تناوب در راستای ۱۸۰ درجه اعمال گردید، تا بین این حالت و حالت قبلی مدل ۴۵ درجه (شامل بارگذاری در راستای Y) که هر دو دارای تعداد تناوب یکسانی می‌باشند، بتوان مقایسه انجام داد. طبق نتایج، اختلاف مابین حالت تک جهته و چند جهته برای پارامتر تغییر مکان جانبی حداکثر برابر ۳۷ درصد، جابجایی جانبی ماندگار ۳۳ درصد، تغییر مکان‌های محوری حداکثر و ماندگار به ترتیب ۱۱۶- و ۳۰ درصد و چرخش سرشمع حداکثر و ماندگار نیز به ترتیب ۳۶ و ۳۷ درصد مشاهده گردید، که همانند حالت ۶۰ درجه از افزایش قابل توجهی برخوردار است. این یافته‌ها فرضیه بالا مبنی بر تأثیر هم راستا بودن بارگذاری و راستای اندازه‌گیری تغییر مکان را تأیید می‌نماید. لذا نتایج حالت زاویه ۶۰ درجه که حالت خاص محسوب می‌شود، در این مطالعه مورد مقایسه و تحلیل قرار نمی‌گیرد.

با مشاهده نمودارهای ارائه شده در رابطه با مقادیر جابجایی محوری شمع چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشترین مقدار جابجایی در راستای Z در اولین تناوب بارگذاری (اولین مرتبه از ۱۰ تناوب مربوط به بارگذاری در راستای $\theta = 0^\circ$) رخ می‌دهد، که معادل ۱/۱- سانتی‌متر می‌باشد. لذا در هر دو حالت تک جهته و چند جهته بیشترین میزان تغییر مکان قائم، یکسان است. این عدد در جدول ۶ ارائه نشده است، چرا که اولین بارگذاری در همه‌ی مدل‌ها، چه تک جهته و چه چند جهته، منطبق بوده و رابطه‌ای هم با مقدار α ندارد. یادآور می‌شود اعداد مربوط به جابجایی‌های محوری حداکثر و ماندگار ارائه شده در جدول ۶ مربوط به تناوب آخر می‌باشد.

با افزایش تناوب‌های بارگذاری، مقادیر جابجایی قائم در مدل تک جهته به حدود بالایی و پایینی به ترتیب ۰/۰۴۴- و ۰/۰۰۹- متر محدود و همگرا می‌شود، در واقع شمع در تراز زیر محل قرارگیری اولیه خود حرکت می‌کند. ولی در مدل‌های چند جهته، اعمال بارگذاری تناوبی سبب حرکت رو به بالای شمع شده تا جایی که پس از اتمام بارگذاری، شمع نسبت به تراز اولیه خود بالاتر قرار می‌گیرد. وجود اعدادی با درصد مثبت در جدول ۷ نیز به همین دلیل می‌باشد. اگر به شکل کلی گسترش جابجایی‌های Z در نمودار شکل ۱۱-الف دقت شود، در همه‌ی حالات حرکت رو به بالا، از اولین تغییر راستای نیرو رخ داده است. با مشاهده درصد‌های اختلاف مقادیر تغییر مکان‌های قائم مابین نتایج تک جهته و چند جهته، تغییر راستای بارگذاری بر نتایج تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. این میزان تأثیر در پارامتر حداکثر تغییر مکان قائم حدود ۱ درصد و با یک روند کاهشی در پارامتر تغییر مکان‌های ماندگار شمع حدوداً ۴ درصد می‌باشد.

اگر از نقطه نظر رفتاری خاک، تفاوت نتایج حالات تک جهته و چند

Offshore Geotechnics, Institute of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Waterpower Engineering, University of Hannover, Germany, 2005.

- [10] S.-H. Chong, C. Pasten, Numerical study on long-term monopile foundation response, *Mar. Georesources Geotechnol*, 36(2) (Feb. 2018) 190-196.
- [11] M. Yang, G. Seidalinov, M. Taiebat, Multidirectional cyclic shearing of clays and sands: Evaluation of two bounding surface plasticity models, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (Jun. 2018) 1-29.
- [12] Z. Cheng, Y.F. Dafalias, M.T. Manzari, Application of SANISAND Dafalias-Manzari model in FLAC 3D, *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics*, (Nov 2013).
- [13] H. M.A, Numerical and constitutive modeling of monotonic and cyclic loading in variably saturated soils, School of civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia, (2006).
- [14] Y.F. Dafalias, E.P. Popov, A model of nonlinearly hardening materials for complex loading, *Acta Mechanica*, 21(3) (1975) 173–192.
- [15] Z. Mroz, V.A. Norris, O.C. Zienkiewicz, An anisotropic hardening model for soils and its application to cycle loading, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2 (1978) 203-222.
- [16] Y.F. Dafalias, L.R. Herrmann, Bounding Surface Formulation of Soil Plasticity, *Soil Mechanics—Transient and Cyclic Loads*, G. Pande and O. C. Zienkiewicz, Eds., John Wiley and Sons, Inc., London, U.K., (1982) 253-282.
- [17] M.T. Manzari, Y.F. Dafalias, A critical state two-surface plasticity model for sands, *Géotechnique*, 47(2) (1997) 255–272.
- [18] Y.F. Dafalias, M.T. Manzari, Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects, *J. Eng. Mech*, 130(6) (2004) 622–634.
- [19] M. Hamidreza, M. Hassanlourad, R.M. Salout, Investigation of Carbonate Sand Shear Behavior Based

به طور کلی، تغییر راستای بارگذاری باعث تغییر در پاسخ شمع می‌شود، هر چند مقادیر این اختلاف در پارامترهای مختلف و حالت‌های مختلف بارگذاری متفاوت است. اعمال این تفاوت در فرآیندهای طراحی شمع منجر به طراحی بهینه‌تر فونداسیون توربین‌های بادی فراساحل خواهد شد که شایسته است با توسعه تحقیق حاضر برای شرایط مختلف هندسی و محیطی مورد ارزیابی بیشتر قرار گیرد.

منابع

- [1] K. Sunday and F. Brennan, A review of offshore wind monopiles structural design achievements and challenges, *Ocean Engineering*, 235 (2021).
- [2] Yung-Yen Ko, A simplified structural model for monopile-supported offshore wind turbines with tapered towers, *Renewable Energy*, (2020), 777- 790.
- [3] S.Bhattacharya, Design of Foundations for Offshore Wind Turbines, Wiley, University of Surrey, UK, 2019.
- [4] Y. Yamada, K. Ishihara, Anisotropic deformation characteristics of sand under three dimensional stress conditions, *Soils Found*, 19(2) (Nov. 1980).
- [5] K. Ishihara, F. Yamazaki, Cyclic simple shear tests on saturated sand in multidirectional loading, *Soils Found*, 20(1) (apr. 1980) 45-59.
- [6] H. Matsuda, H. Shinozaki, N. Okada, Effects of multi-directional cyclic shear on the post-earthquake settlement of ground, in: 13 th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1- 6, 2004.
- [7] A.P. Institute, Recommended Practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API recommended practice 2A-WSD (RP2A-WSD), 21th ed, in, Dallas, 2000.
- [8] Q. Zhang, Y. Zhang, H. Lin, L. Feng, Numerical investigation on bearing capacity of OWT foundation with large diameter monopile under Seismic load, *Applied Ocean Research*, 108 (2021).
- [9] M. Achmus, K. Abdel-Rahman, Finite element modelling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany, in: *Frontiers in*

- Master Project, Aalborg University Esbjerg, 2011.
- [22] H. Seyfi, A. Fakher, a local study on lateral response of monopile located in PARS-ASSALUYE petrochemical port, in: 9th marin industries conference of mazandaran, 2007, (in persian).
- [23] I.E. Commission, International Standard IEC-61400-1 Wind Turbines - Part 1: Design requirement, Third Edition, in, 2005.
- on Manzari anid Dafalias Behavioral Model, Amirkabir J. Civil Eng, 51(4) (2019) 201-204, (in persian).
- [20] M. Zarean, Study on OWT's monopile foundation under multi-directional cyclic lateral load, University of Isfahan, 2020, (in persian).
- [21] I.F. Møller, T. Christiansen, T.H. Christiansen, Laterally Loaded Monopile in Dry and Saturated Sand - Static and Cyclic Loading Experimental and Numerical Studies,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Zarean, A. Shanehsazzadeh, M. Hashemi, The effects of wind load direction changes on offshore wind turbine monopile response, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2641-2660.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19070.7053](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19070.7053)

