

تحلیل عددی رفتار شمع‌های باله‌دار منفرد تحت بار جانبی در خاک‌های ماسه‌ای

میلاد شمسافر^۱، محمد علیایی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی عمران (ژئوتکنیک)، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

m.olyaei@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۸/۰۷/۳۰

تاریخ دریافت ۹۷/۱۰/۱۵

چکیده

زمانی که ظرفیت باربری خاک برای استفاده از پی‌های سطحی مناسب نباشد، معمولاً از شمع‌ها استفاده می‌شود. شمع‌ها در بیشتر موارد علاوه بر بارهای قائم، تحت بارهای جانبی نیز قرار می‌گیرند. شمع‌های استفاده شده در پایه پل‌ها، توربین‌های بادی، سکوها و دریایی و ... تحت بارهای جانبی بزرگی قرار می‌گیرند و در طراحی شمع‌های این سازه‌ها، بار جانبی غالب است. استفاده از باله‌ها پیرامون شمع، برای افزایش ظرفیت باربری جانبی روش نسبتاً جدیدی می‌باشد، بنابراین در این پژوهش، رفتار شمع‌های باله‌دار منفرد در خاک ماسه‌ای به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود (ABAQUS) بررسی شده است. همچنین عملکرد شمع‌های باله‌دار با شمع‌های بدون باله مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای شمع‌های باله‌دار نشان می‌دهد که استفاده از باله‌ها منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها نسبت به شمع‌های معمولی بدون باله می‌شود.

واژگان کلیدی: شمع باله‌دار، بار جانبی، اجزای محدود، مدل‌سازی عددی، آباکوس

۱- مقدمه

شود. بارهای جانبی می‌توانند ناشی از فشار زمین، نیروی امواج دریا، پهلو گرفتن کشتی‌ها در اسکله، نیروی ناشی از باد، نیروی زلزله، نیروهای ناشی از ترافیک و ... باشند. دونالد [1] نشان داد برای افزایش ظرفیت باربری جانبی تک شمع می‌توان طول شمع، قطر شمع و ممان اینرسی مقطع شمع را افزایش داد، همچنین برای گروه شمع می‌توان با کاهش فاصله شمع‌ها، افزایش تعداد شمع‌ها در گروه و ... ظرفیت باربری جانبی را افزایش داد.

برای افزایش ظرفیت باربری تک شمع می‌توان باله‌هایی به شمع‌ها اضافه نمود که توسط لی و گیلبرت [2] و ایروین [3] توصیه شده است. شمع‌های باله‌دار شمع‌هایی دارای چهار عدد باله هستند که با زاویه ۹۰ درجه به آن‌ها جوش داده شده‌اند. نمایی از شمع

یکی از روش‌هایی که برای پی‌سازی روی خاک‌های سست و همچنین انتقال بارهای سازه‌ای به اعماق زمین استفاده می‌شود، استفاده از شمع یا شالوده عمیق است. شمع‌ها عناصر لاغر و ستونی هستند که به صورت قائم یا مایل در زمین قرار گرفته و بارها را از سطح زمین به اعماق زمین که سخت‌تر و محکم‌تر هستند انتقال می‌دهند. شمع‌ها در حالت کلی تحت بارهای قائم، جانبی و لنگر-های خمشی قرار می‌گیرند. کاربرد اصلی شمع‌ها در تحمل بارهای قائم هست ولی اگر مقدار بارهای جانبی قابل‌توجه باشد باید اثر بارهای جانبی بر روش شمع‌ها به‌صورت جداگانه بررسی شده و همچنین تأثیر این بارها روی ظرفیت باربری قائم شمع‌ها نیز لحاظ

در حالت کلی روش‌های موجود و پرکاربرد برای آنالیز تک شمع

تحت بار جانبی به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند [12]:

۱. روش محاسبه مقاومت جانبی نهایی

۲. روش عکس‌العمل بستر

۳. روش منحنی $p-y$

۴. روش الاستیک

۵. روش المان محدود

روش‌های تجربی محاسبه مقاومت جانبی نهایی و همچنین روش

های ساده‌ای مانند عکس‌العمل بستر و منحنی $p-y$ روش‌های تحلیلی

پرکاربردی برای پیش‌بینی پاسخ کمی شمع تحت بارگذاری جانبی

در کارهای مهندسی هستند، با این وجود در این روش‌ها، تأثیر

ویژگی‌های اساسی خاک مانند مقاومت و سختی، روی پاسخ خاک

و شمع تحت بارگذاری جانبی به خوبی قابل مشاهده نیست. روش

الاستیک با در نظر گرفتن خاک به صورت پیوسته، روشی ساده برای

محاسبه تغییر شکل است. در نظر گرفتن مدول خاک به شکل الاستیک

و لزوم تغییر آن با تغییر سطح تنش، از معایب این روش است.

همچنین این روش، تغییر شکل‌های بزرگ و شکست شمع در خاک-

های غیرخطی را جوابگو نیست [13]. روش المان محدود یک روش

پر کاربرد برای مدل کردن خاک به صورت پیوسته، در نظر گرفتن

خاک به صورت غیر خطی، رفتار فصل مشترک شمع و خاک و

شرایط مرزی به صورت سه بعدی است که در نتیجه روش تحلیلی

دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌ها است [14]. بیشتر بررسی‌های انجام

گرفته برای شمع‌های باله‌دار تحت بار جانبی مانند پژوهش‌های

پنگ [6]، به صورت آزمایشگاهی یا میدانی و یا به صورت عددی در

مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است، که در اکثر موارد دارای

محدودیت‌ها و ساده‌سازیهایی بوده و در برخی موارد نیز توأم با

خطاهایی بوده‌اند و تمام پارامترهای موثر در رفتار این شمع‌ها ارزیابی

نشده است. همچنین پژوهش مبسوط و جامع روی شمع‌های باله‌دار

که بتواند نمونه‌ای واقعی را با تمام مراحل متعارف شبیه‌سازی کند،

انجام نشده است. بنابراین مدلسازی و تحلیل عددی شمع باله‌دار با

در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر در رفتار این شمع‌ها به صورت

سه بعدی می‌تواند قابل توجه و مفید باشد. پس در پژوهش پیشرو،

با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی عددی ABAQUS، رفتار شمع‌های

باله‌دار در شکل (۱) نشان داده شده است. بیشترین جابه‌جایی جانبی

در شمع‌های تحت بار جانبی عموماً در قسمت بالای شمع‌ها اتفاق

می‌افتد به همین دلیل این باله‌ها در قسمت فوقانی شمع استفاده

می‌شوند. یکی از دلایلی که این باله‌ها موجب افزایش ظرفیت

باربری جانبی شمع‌ها می‌شود این است که این باله‌ها موجب

افزایش ممان اینرسی مقطع شمع‌ها می‌شود. لوتنجر [4] با انجام

آزمایش‌های میدانی روی شمع‌های پنل‌های خورشیدی، تأثیر محل

باله‌ها را در افزایش ظرفیت باربری جانبی مورد بررسی قرار داد.

رینرت و نیومن [5] با انجام آزمایش‌های میدانی روی شمع‌های

باله‌دار، تأثیر باله‌ها را در افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع‌های

تیرهای خطوط انتقال برق ارزیابی کردند. پنگ [6] با انجام

آزمایش‌های آزمایشگاهی روی شمع‌های باله‌دار با نسبت ابعاد باله-

های متفاوت، تأثیر باله‌ها را در افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع-

ها مطالعه کردند. پنگ و همکاران [7] و بین و همکاران [8] تأثیر

باله‌ها در افزایش ظرفیت باربری تک شمع‌ها تحت بارهای جانبی

سیکلی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده و به این نتیجه

رسیدند که استفاده از باله‌ها تأثیر به سزایی در کاهش جابه‌جایی سر

شمع تحت بار جانبی سیکلی دارند. نصر [9] در سال ۲۰۱۳ تأثیر به

کارگیری دو عدد باله را در افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها

مورد بحث و بررسی قرار داد. بابو و ویسماندهام [10] و همچنین

یعقوبی و همکاران [11] با بررسی عددی شمع‌های باله‌دار در

مقیاس آزمایشگاهی، تأثیر استفاده از ۴ عدد باله را در شمع‌ها بررسی

نمودند.

شکل ۱. نمایی از شمع باله دار

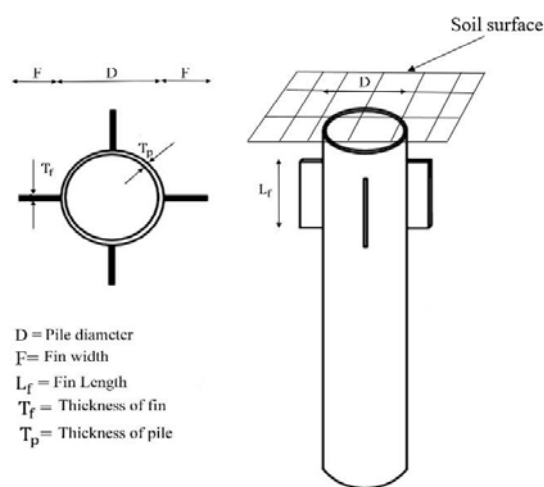


Fig. 1. A schematic diagram of a fin pile

Y مقید شده است و در مرز فوقانی مدل، تغییر شکل‌ها در هر سه جهت بدون قید تعریف شده‌اند. اندرکنش بین خاک و شمع، نوع تماس از نوع Penalty در نظر گرفته شده است که در مرحله ابتدای تحلیل فرض می‌شود که خاک و شمع در تماس کامل با یکدیگر قرار داشته و در مرحله بارگذاری خاک و شمع، تماس از نوع اصطکاکی فرض می‌شود.

شکل ۲. نمایی از مش بندی سه بعدی محیط خاک و شمع

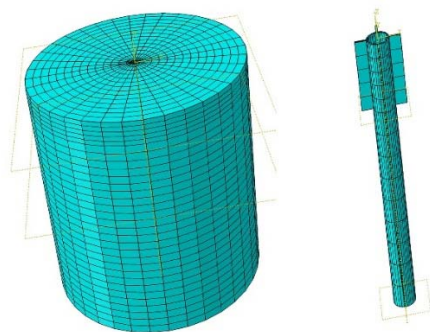


Fig. 2. Three-dimensional meshes for the soil-pile system

برای تعریف اندرکنش بین مقطع شمع و محیط خاک، از تماس نوع Contact استفاده شده است. نوع تماس انتخاب شده بین شمع و خاک از نوع اصطکاکی فرض شده که با استفاده از سطح اصطکاکی نوع Penalty در نرم افزار آباکوس تعریف شده است. ضریب اصطکاک (Friction coeff) در نرم افزار طبق توصیه وود [16] و مطابق با شکل (۳)، برابر 0.3 فرض شده است که برابر ضریب اصطکاک بین شمع فولادی و خاک ماسه‌ای است.

شکل ۳ ضرایب اصطکاک توصیه شده توسط وود [16]

Interface material	Friction factor $\tan(\delta)$	Friction angle δ [°]
➤ Mass concrete on the following foundation materials		
Clean sound rock	0.7	35
Clean gravel, gravel-sand mixtures, coarse sand	0.55 - 0.6	29 - 31
Clean fine to medium sand, silty medium to coarse sand, silty clayey gravel	0.45 - 0.55	
Clean fine sand, silty or clayey fine to medium sand	0.35 - 0.45	15 - 24
Fine sandy silt, Non-Plastic silt	0.30 - 0.38	17 - 19
Very stiff and hard residual or pre-consolidated clay	0.40 - 0.50	22 - 26
Medium stiff and stiff clay and silty clay	0.30 - 0.35	17 - 19
➤ Steel piles against the following soils		
Clean gravel, gravel-sand mixtures, well-graded rock fill with spalls	0.4	22
Clean sand, silty sand-gravel mixture, single size hard rock fill	0.3	17
Silty sand, gravel or sand mixed with silt or clay	0.25	14
Fine sandy silt, Non-Plastic silt	0.2	11
➤ Formed concrete or concrete sheet piling against the following soils		
Clean gravel, gravel-sand mixture, well-graded rock fill with spalls	0.40 - 0.50	22 - 26
Clean sand, silty sand-gravel mixture, single size hard rock fill	0.30 - 0.40	17 - 22
Silty sand, gravel or sand mixed with silt or clay	0.3	17
Fine sandy silt, Non-Plastic silt	0.25	14
➤ Various structural materials		
Dressed soft rock on dressed soft rock	0.7	35
Dressed hard rock on dressed soft rock	0.65	33
Dressed hard rock on dressed hard rock	0.55	29
Masonry on wood (Gross grain)	0.5	26
Steel on steel at sheet pile interlocks	0.3	17

Fig. 3. Friction coefficients recommended by Wood [16]

باله‌دار با مدل‌سازی سه‌بعدی ارزیابی شده و تأثیر ابعاد و اندازه باله‌ها در افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها بررسی شده است.

۲-مدلسازی عددی

۲-۱- مشخصات هندسی

در این پژوهش، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود (ABAQUS) صورت گرفته است. ABAQUS نرم‌افزاری برای تحلیل‌های المان محدود هست که برای بررسی رفتارهای فیزیکی غیرخطی طراحی شده است و دارای گستره وسیعی از مدل‌های مواد است. این نرم‌افزار به‌طور گسترده‌ای در صنایع مهندسی، پزشکی و ساخت کالاهای صنعتی استفاده می‌شود. همچنین این بسته نرم‌افزاری به خاطر قابلیت گسترده در مدل‌سازی مواد مختلف و نیز توانایی سفارشی کردن آن به وسیله برنامه‌نویسی، در محیط‌های پژوهشی دانشگاهی بسیار محبوبیت دارد.

در مقاله حاضر با توجه به اینکه قطر شمع‌ها ۴ متر در نظر گرفته شده، قطر محیط استوانه طبق توصیه پنگ [6]، $22/5$ برابر قطر شمع خواهد بود که برابر ۹۰ متر خواهد بود که برای سهولت در مش زنی و پارتیشن بندی کمی بیشتر از ۹۰ متر یعنی ۱۰۰ متر (شمع ۵۰ متر) انتخاب شده است. برای ارتفاع استوانه نیز طبق توصیه پنگ [6] که $2/5$ برابر طول شمع را توصیه کرده است و طول شمع‌ها در این مقاله ۴۰ متر هست بنابراین $2/5$ برابر طول شمع که برابر ۱۰۰ متر می‌شود به عنوان ارتفاع مقطع استوانه در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی انجام شده است. نمایی از شبکه المان محیط خاک و شمع در شکل (۲) نشان داده شده است. هندسه محیط خاک در مازول Part نرم‌افزار برای بالا بردن سهولت و دقت مش‌بندی به‌صورت استوانه‌ای در نظر گرفته شده است. برای مش‌بندی محیط خاک از المان C3D8R (المان ۶ وجهی ۸ گرهی در فضای سه‌بعدی) و برای مش‌بندی شمع از المان Shell استفاده شده است. شرایط مرزی به‌گونه‌ای تعریف شده است که محیط خاک در مرز انتهایی خود در هر سه جهت X و Y و Z مقید باشد، به عبارت دیگر فرض بر این بوده است که محیط خاک در مرز انتهایی خود روی بستر سنگی بسیار محکم قرار گرفته است. در مرزهای جانبی مدل، به منظور کاهش آثار ناشی از شرایط مرزی طبق توصیه آنچوگلو [15]، تغییر شکل در راستای عمود بر سطح یعنی در جهات X و

۲-۲- درستی آزمایشی مدل‌سازی عددی

برای ارزیابی درستی مدل‌سازی عددی و برای اطمینان از درستی نتایج خروجی توسط نرم‌افزار ABAQUS، نتایج خروجی از نرم‌افزار با نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی پنگ [6] مقایسه شده است. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای خاک و شمع به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. برای خاک رفتار الاستیک خطی-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری برای مصالح خاک موهر-کولمب و برای مصالح شمع و باله‌ها که از نوع فولاد است الاستیک خطی لحاظ شده است.

در این مقاله با مکاتبات انجام شده با شرکت PND Engineers کشور کانادا که مجری و طراح شمع‌های باله‌دار است پارامترهای خاک و مصالح شمع انتخاب شده‌اند. مشخصات خاک موجود در این مقاله از گزارش ژئوتکنیکی یکی از پروژه‌های اجرا شده توسط این شرکت در کشور کانادا استخراج شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح خاک

Parameters	Value
Dry unit weight	16.5 KN/m ³
Friction angle	35°
Young's Modulus	10 MPa
Cohesive strength	1 kPa
Poisson's ratio	0.3

Table 1. Properties of Soil

جدول ۲. مشخصات مصالح شمع

Parameters	Value
Density	78 kN/m ³
Young's Modulus	200000 MPa
Poisson's ratio	0.33

Table 2. Properties of Pile material

مشخصات شمع باله‌دار مورد آزمایش توسط پنگ [6]

مطابق جدول (۳) است.

جدول ۳. مشخصات شمع باله‌دار FPS210 مورد آزمایش پنگ [6]

Geometry of pile	value
Pile diameter	40 mm
Pile length	400 mm
Pile thickness	2.1 mm
Fin width	20 mm
Fin thickness	2.9 mm
Fin length	100 mm
Flexural rigidity	210658 mm ⁴

Table 3. Geometry of FPS210 used in Peng's [6] tests

به منظور درستی‌آزمایی و تطبیق نتایج به دست آمده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS و نتایج آزمایش پنگ [6]، لازم است از مفاهیم آنالیز ابعادی استفاده شود. بدین منظور نتایج آزمایشگاهی پنگ [6] با استفاده از توصیه‌های وود [16, 17]، آی [18] و فرانک [19] با ضریب مقیاس ۱۰۰ برای طول، به ابعاد مورد نظر مقیاس شده است. همچنین پارامترهای تغییر یافته با مفاهیم آنالیز ابعادی برای شمع در نرم‌افزار وارد شده و خروجی نرم‌افزار با نتایج مقیاس شده پنگ [6] مقایسه شده است.

برخی از ضرایب مقیاس برای آنالیز ابعادی طبق توصیه وود [16, 17] برای آزمایش‌های کوچک مقیاس برای خاک ماسه-ای مطابق جدول (۴) است.

جدول ۴. ضرایب مقیاس برای آزمایش‌های کوچک مقیاس

Parameters	lg(laboratory)	ng(centrifuge)
Length	1/n	1/n
Density	1	1
Acceleration	1	n
Stress	1/n	1
Force	1 / n ³	1 / n ²
Displacement	1/n	1/n
Time	1	1
Flexural rigidity	1 / n ^{4.5}	1 / n ^{3.5}

Table 4. Scaling factors for small scale tests

با استفاده از مفاهیم آنالیز ابعادی و با توجه به نوع آزمایش که مدل‌سازی آزمایشگاهی lg است، پارامترهای طول و سختی خمشی (EI) شمع باله دار باید مقیاس شوند.

$$\frac{Length_{model}}{Length_{prototype}} = n \quad (1)$$

برای طول شمع آزمایشگاهی پنگ [6] و با توجه به ضریب مقیاس ۱۰۰، طول شمع برای مدل‌سازی برابر ۴۰ متر خواهد شد. برای ضریب مقیاس سختی خمشی (EI) نیز طبق معادله (۲)

$$\frac{Flexural_rigidity_{model}}{Flexural_rigidity_{prototype}} = n^{4.5} \quad (2)$$

۳- تحلیل‌ها و نتایج

برای بررسی تأثیر ابعاد و اندازه باله‌ها در افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع، پارامترهای طول و عرض باله‌ها بررسی شدند. جدول (۶) مدل‌های در نظر گرفته شده برای بررسی‌های عددی را نشان می‌دهد. همچنین سایر پارامتر-های مؤثر در تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌های باله‌دار مانند جهت اعمال نیروی وارد شده به شمع در مطالعات پارامتریک بررسی شده است.

برای بررسی تأثیر ابعاد و اندازه باله‌ها با ثابت نگه داشتن یکی از پارامترهای طول یا عرض باله، تأثیر پارامتر دیگر در افزایش ظرفیت باربری جانبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر طول باله‌ها سه عدد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ برای نسبت طول باله‌ها به طول خود شمع و برای بررسی تأثیر عرض باله‌ها سه عدد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ برای نسبت عرض باله‌ها به قطر شمع در نظر گرفته شده است.

جدول ۶. ابعاد باله‌ها و اندازه شمع‌های مدل‌سازی شده

Pile name	Fin width (m)	Fin length (m)	Pile length (m)	Pile diameter (m)
MPF	0	0	40	4
FPF210	2	10	40	4
FPF220	2	20	40	4
FPF240	2	40	40	4
FPF110	1	10	40	4
FPF410	4	10	40	4
FPF220-L/D20	2	10	80	4
MPF-L/D20	0	0	80	4

Table 5. Geometry of modeled fin piles

MPF (Mono Pile Full scale)

FPF (Fin Pile Full scale)

لازم به ذکر است که پارامترهای مصالح شمع مدل شده در نرم‌افزار با پارامترهای مصالح شمع مدل شده به صورت آزمایشگاهی توسط پنگ [6] یکسان است. نیروی وارد شده به شمع با دو زاویه صفر و ۴۵ درجه نسبت به باله‌ها اعمال شده تا تأثیر جهت نیرو در تغییرات ظرفیت باربری جانبی مشخص شود. خروجی‌های به دست آمده از نرم‌افزار (نمودارهای نیرو-جابجایی) برای دو مقدار جابجایی جانبی سرشمع به اندازه ۱۰ درصد قطر شمع که معمولاً برای

برای سختی خمشی و با توجه به ضریب مقیاس ۱۰۰، سختی خمشی شمع برابر مقدار $210/658 \text{ m}^4$ به دست می‌آید. لازم به گفتن است که برای حفظ پارامتر مصالح شمع (E)، آنالیز ابعادی روی ممان اینرسی (I) اعمال شده است، بدین صورت که ضخامت شمع و باله به شکلی تغییر داده شده که سختی خمشی مورد نظر به دست آید.

مشخصات شمع مدل‌سازی شده در نرم افزار برای درستی‌آزمای مطابق جدول (۵) است:

جدول ۵. مشخصات شمع مدل‌سازی شده

Parameters	value
Diameter	4m
Length	40m
Pile thickness	0.37m
Fin width	2m
Fin thickness	0.14m
Fin length	10m
Flexural rigidity	210.658 m^4

Table 5. Properties of modeled pile

به منظور درستی‌آزمایی نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایش پنگ [6]، نتایج مربوط به نمودار نیرو-جابجایی شمع FPF210 با ضرایب مقیاس مربوط برای نیرو و جابجایی مقیاس شده ($1/n$ برای جابجایی و $1/n^3$ برای نیرو) و با نتایج خروجی از نرم‌افزار مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از هماهنگی خوبی برخوردار است.

شکل ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقیاس شده پنگ [6] برای شمع FPF210

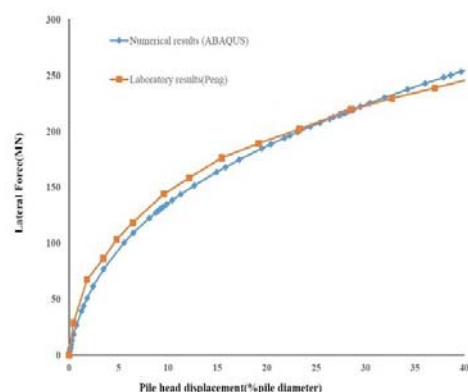


Fig. 4. Comparison of the results of numerical analysis with the penguin [6] scaled laboratory results for FPF210 pile

شکل ۵. تأثیر افزایش طول باله‌ها با ثابت بودن عرض

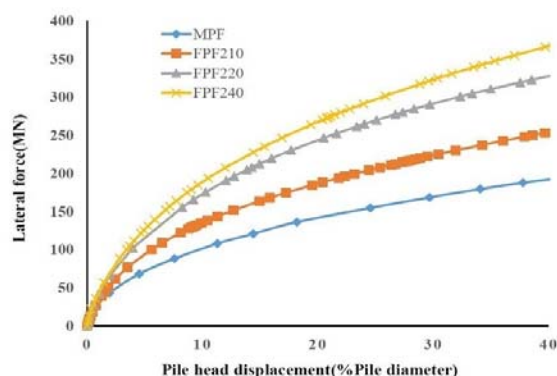


Fig. 5. The effect of increasing the length of the fins with constant width

۳-۲- بررسی تأثیر عرض باله‌ها (با ثابت بودن طول باله‌ها)

در این قسمت با ثابت نگه داشتن طول باله‌ها به اندازه ۱۰ متر که معادل یک چهارم طول شمع می‌شود تأثیر عرض باله‌ها با سه مقدار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ برابر قطر شمع بررسی شده است. با توجه به شکل (۵) مشخص می‌شود که ظرفیت باربری جانبی سرویس و نهایی شمع‌ها با افزایش طول باله‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش نیز به دلیل افزایش ممان اینرسی مقطع شمع در قسمت فوقانی شمع و همچنین افزایش نیروی بسیج خاک به دلیل استفاده از باله‌ها است.

با توجه به شکل (۶) ملاحظه می‌شود که هرچه قدر عرض باله‌ها افزایش می‌یابد ظرفیت باربری جانبی شمع نیز افزایش پیدا می‌کند ولی مقدار این افزایش در مقایسه با افزایش طول باله‌ها کمتر است، به عبارت دیگر تأثیر افزایش طول باله‌ها بیشتر از تأثیر افزایش عرض باله‌ها است. با مقایسه شمع بدون باله MPF با شمع FPF410 مشخص می‌شود که استفاده از عرض باله به اندازه قطر شمع می‌تواند ظرفیت باربری جانبی سرویس شمع را تا حدود ۸۰ درصد و ظرفیت باربری نهایی شمع را تا حدود ۷۸ درصد افزایش دهد. ضمناً مشاهده می‌شود زمانی که عرض باله از نصف قطر شمع بیشتر شده و برابر قطر شمع می‌شود، اثر عرض باله قابل مشاهده است.

تعیین ظرفیت باربری جانبی سرویس شمع‌ها در نظر گرفته می‌شود و جابه‌جایی جانبی سرشمع به اندازه ۴۰ درصد قطر شمع که بیشتر برای تعیین ظرفیت باربری جانبی نهایی شمع‌ها در نظر گرفته می‌شود [6]، بررسی شده است. همچنین با مقایسه نسبت طول به قطر متفاوت، تأثیر باله‌ها در شمع‌های کوتاه و بلند مقایسه شده است.

۳-۱- بررسی تأثیر طول باله‌ها (با ثابت بودن عرض باله‌ها)

در این قسمت با ثابت نگه داشتن عرض باله‌ها به اندازه ۲ متر که معادل نصف قطر شمع است تأثیر طول باله‌ها با سه مقدار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ برابر طول شمع بررسی شده است. با توجه به شکل (۵) مشخص می‌شود که ظرفیت باربری جانبی سرویس و نهایی شمع‌ها با افزایش طول باله‌ها افزایش می‌یابد. افزایش ظرفیت باربری شمع‌های باله‌دار نسبت به شمع معمولی به دلیل افزایش ممان اینرسی مقطع شمع در قسمت فوقانی شمع و همچنین افزایش نیروی بسیج خاک به دلیل استفاده از باله‌ها است.

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری جانبی سرویس شمع FPF240 در مقایسه با شمع بدون باله MPF تا حدود ۱۰۰ درصد و همچنین ظرفیت باربری نهایی تا ۸۹ درصد افزایش پیدا کرده است که رقم قابل توجهی می‌شود. در ضمن، با توجه به شکل و با مقایسه نتایج دو شمع FPF240 و FPF220 مشاهده می‌شود که با افزایش طول باله‌ها از ۲۰ متر در FPF220 به ۴۰ متر در FPF240 ظرفیت باربری جانبی سرویس و نهایی به مقدار بسیار کمی افزایش پیدا کرده، پس این افزایش طول غیراقتصادی بوده و از شکل نتیجه می‌شود که مقدار بهینه طول باله‌ها ۰/۵ برابر طول شمع است.

به امتداد باله‌های شمع FPF210 وارد شده است. چگونگی تأثیر نیروها به مقطع شمع در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل ۸. جهت نیروی وارد شده به شمع (a) با زاویه ۹۰ درجه (b) با زاویه ۴۵ درجه (c) با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به باله‌ها

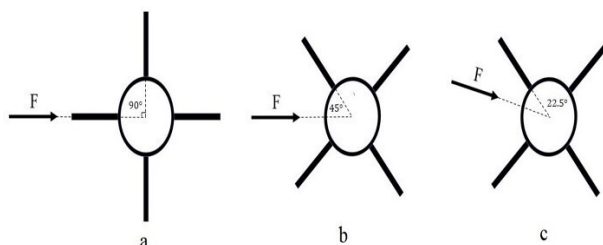


Fig. 8. The angle of the force applied to the pile, a) with a 90 degree b) with a 45 degree c) with a 22.5 degree relative to the fins

با توجه به شکل (۹) ملاحظه می‌شود هنگامی که نیروی جانبی وارد شده به شمع باله‌دار با زاویه ۴۵ درجه نسبت به باله‌ها وارد می‌شود ظرفیت باربری جانبی سرویس و نهایی شمع نسبت به حالتی که نیرو با زاویه ۲۲/۵ و صفر (یا ۹۰) درجه نسبت به باله وارد می‌شود، اندکی بیشتر می‌شود، در نتیجه با توجه به تقارن مقطع شمع، حالت بهینه برای زاویه نیروی وارد شده به شمع، ۴۵ درجه نسبت به باله است.

شکل ۹. تأثیر زاویه نیروی وارده به شمع باله‌دار بر باربری جانبی

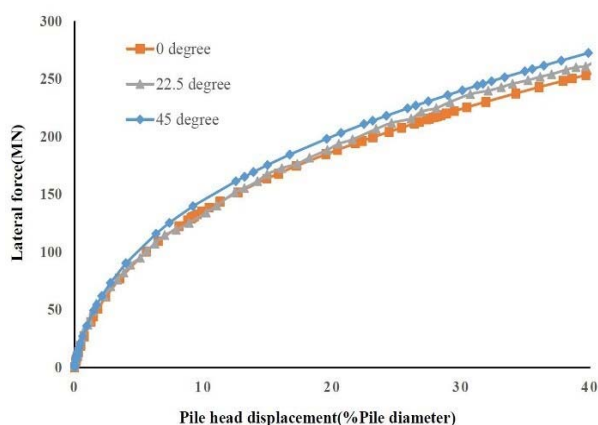


Fig. 9. Effect of the angle of the force on the lateral bearing capacity

۳-۵- بررسی تأثیر طول به قطر شمع‌های باله‌دار

در این بخش تأثیر به کارگیری باله‌ها در شمع‌هایی با نسبت طول به قطر متفاوت بررسی شده است. برای این منظور شمع‌های FPF220 با نسبت طول به قطر ۱۰ و شمع FPF220-

شکل ۶. تأثیر افزایش عرض باله‌ها با ثابت بودن طول

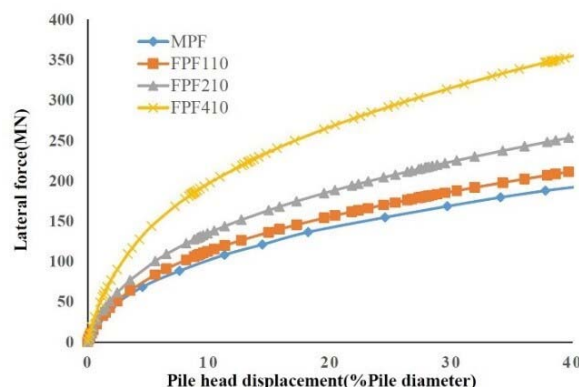


Fig. 6. Effect of increasing the width of the fins with constant length

۳-۳- مقایسه افزایش طول و عرض باله‌ها

در این قسمت تأثیر افزایش طول و عرض باله‌ها با مقایسه شمع‌هایی که مساحت باله یکسانی دارند بررسی شده است. برای این منظور دو شمع FPF220 و FPF410 که مساحت باله‌های یکسانی دارند باهم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۷) مشخص می‌شود در مساحت یکسان باله‌ها، شمعی که دارای طول باله بیشتر ولی دارای عرض کمتری هست ظرفیت باربری جانبی سرویس و نهایی بیشتری نسبت به شمعی که دارای عرض باله بیشتر ولی طول کمتری هست، دارد. به عبارت دیگر، برای سطح یکسان باله، اثر طول اندکی از اثر عرض بیشتر است.

شکل ۷. مقایسه اثر افزایش طول و عرض باله‌ها

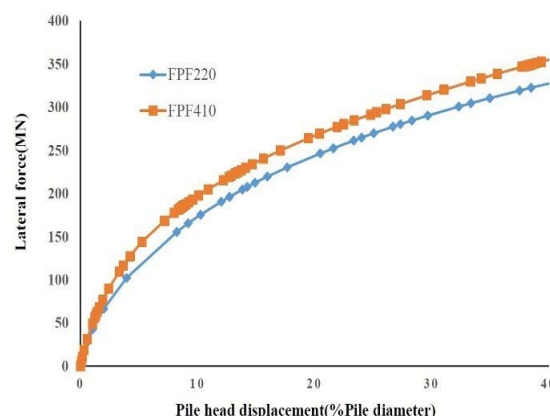


Fig. 7. Comparison of the effect of increasing the length and width of the fins

۳-۴- مقایسه اثر زاویه نیروی وارده به شمع‌های باله‌دار

در این قسمت تأثیر زاویه نیروی وارد شده به شمع‌ها بررسی شده است. برای بررسی تأثیر زاویه نیروی وارد شده بر شمع‌های باله‌دار، سه نیروی یکسان با زوایای صفر و ۲۲/۵ و ۴۵ درجه نسبت

یافته است. بنابراین تاثیر به کارگیری باله‌ها در شمع‌های کوتاه بیشتر از شمع‌های بلند است. در جدول (۷) درصد افزایش ظرفیت باربری جانبی با تغییرات مشخصات باله در دو حالت سرویس و نهایی ارائه شده است.

جدول ۷ درصد افزایش ظرفیت باربری جانبی با تغییرات مشخصات باله در

دو حالت سرویس و نهایی

Pile name	Fin width (m)	Fin length (m)	Lateral force increase (service load) (%)	Lateral force increase (Ultimate load) (%)
MP F	0	0	0	0
FPF 210	2	1	40	34
FPF 220	2	2	75	65
FPF 240	2	4	100	89
FPF 110	1	1	10	7
FPF 410	4	1	87	78
FPF220-L/D20	2	1	25	32
MP F-L/D20	0	0	0	0

Table 7 Percentage of lateral bearing capacity increase with fin changes in service and ultimate load

۳-۶- بررسی حساسیت شبکه المان‌ها

تعداد گره‌ها و المان‌ها می‌تواند بر نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی تاثیرگذار باشد. مش‌بندی با ابعاد بزرگتر موجب کاهش تعداد المان‌ها و دقت پایین‌تر نتایج شده و مش‌بندی با ابعاد کوچکتر و متراکم‌تر موجب افزایش زمان تحلیل‌های عددی خواهد شد، پس در این تحلیل حساسیت اثر شبکه المان‌ها، نتایج به دست آمده برای ظرفیت باربری سرویس و نهایی شمع FPF210 بررسی شده است. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری‌های به دست آمده برای شمع FPF210 با افزایش المان‌ها تا تعداد ۲۴۰۰۰، کاهش پیدا کرده و پس از آن نتایج ثابت باقی مانده است. بنابراین برای مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی تعداد المان ۲۴۰۰۰ به عنوان حداقل تعداد در نظر گرفته شده است.

L/D20 با نسبت طول به قطر ۲۰، که دارای طول و عرض یکسان باله هستند (طول باله ۲۰ متر و عرض باله ۲ متر) با شمع‌های بدون باله متناظر مقایسه شده است.

در شکل (۱۰) مقایسه بین شمع باله‌دار FPF220-L/D20 و شمع بدون باله MPFL/D20 و در شکل (۱۱) مقایسه بین شمع FPF220 و MPF انجام شده است.

شکل ۱۰. مقایسه شمع باله دار با بدون باله (طول به قطر ۲۰)

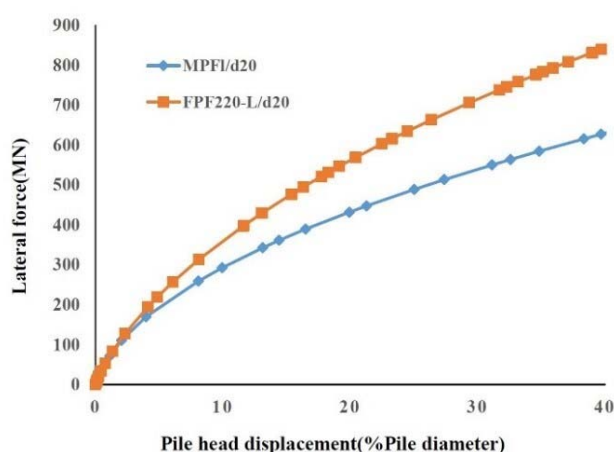


Fig. 10. Comparison of fin pile with regular pile (length to diameter = 20)

شکل ۱۱. مقایسه شمع باله دار با بدون باله (طول به قطر ۱۰)

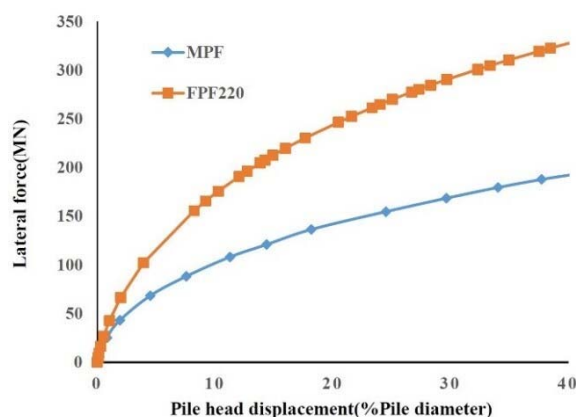


Fig. 11 Comparison of fin pile with regular pile (length to diameter = 10)

ملاحظه می‌شود که در شمع‌های با نسبت طول به قطر ۱۰، به کارگیری باله‌ها منجر به افزایش ظرفیت باربری سرویس و نهایی شمع به ترتیب به اندازه ۷۵ و ۶۵ درصد شده است در حالی که در شمع‌های با نسبت طول به قطر ۲۰، ظرفیت باربری سرویس و نهایی شمع به ترتیب به اندازه ۲۵ و ۳۲ درصد افزایش

به عرض اقتصادی تر خواهد بود. به طوری که با استفاده از باله‌هایی به ابعاد ۲ در ۲۰ متر و ۴ در ۱۰ متر که مساحت یکسانی دارند، بیشترین ظرفیت باربری مربوط به زمانی است که از باله‌ای با طول بیشتر و عرض کمتری استفاده می‌شود.

۴- حالت بهینه برای زاویه نیروی وارد شده به شمع زمانی است که نیروی موردنظر جانبی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد باله‌ها وارد شود.

۵- استفاده از باله‌ها در شمع‌های کوتاه تاثیرگذاری بیشتری نسبت به شمع‌های بلند دارد. به طوری که ظرفیت باربری شمعی با نسبت طول به قطر ۱۰ افزایش بیشتری در مقایسه با شمع دارای طول به قطر ۲۰ دارد. بر اساس نتایج این پژوهش، ظرفیت باربری جانبی برای شمع کوتاه حدود ۷۰ درصد و برای شمع بلند حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است.

منابع

- [1] Donald, P.C., 2001. Foundation design: principles and practices. Prentice Hall, New Jersey.
- [2] Lee, P.Y. and Gilbert, L.W., 1980. The behavior of steel rocket shaped pile. In Symposium on Deep Foundations (pp. 253-273). ASCE.
- [3] Irvine, J.H., Allan, P.G., Clarke, B.G. and Peng, J.R., 2013. Improving the lateral stability of monopile foundations. In Proceedings of the BGA International Conference on Foundations: Innovations, Observations, Design and Practice, Dundee, UK, September (pp. 371-80).
- [4] Lutenege, A.J., 2012. Tension tests on driven fin piles for support of solar panel arrays. In GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering (pp. 305-314).
- [5] Reinert, Sr, G.J. and Newman, F.B., 2002. Steel Finned-Pipe Foundations for Single Pole Structures. In Electrical Transmission in a New Age (pp. 292-299).
- [6] Peng, J.R., 2006. Behaviour of finned piles in sand under lateral loading.
- [7] Peng, J., Clarke, B.G. and Rouainia, M., 2011. Increasing the resistance of piles subject to cyclic lateral loading. Journal of Geotechnical

شکل ۱۲. حساسیت نتایج به شبکه المان‌ها

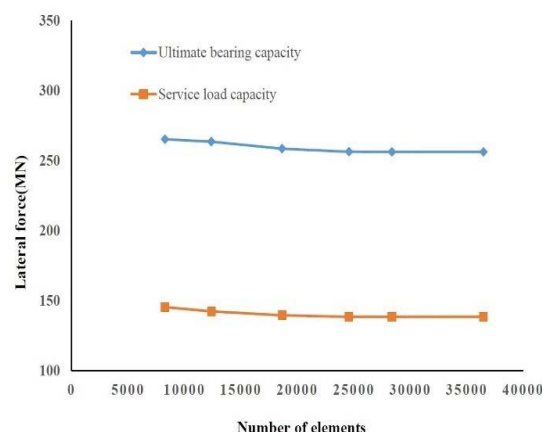


Fig. 12. Mesh sensitivity analysis

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شمع‌های استفاده شده در پایه پل‌ها، توربین‌های بادی، اسکله‌ها، سکوهای دریایی و ... تحت بارهای جانبی نسبتاً بزرگی قرار می‌گیرند و در طراحی شمع‌های این سازه‌ها اثر بار جانبی، غالب است. یکی از روش‌های جدید افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها استفاده از تکنیک شمع‌های باله دار می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس رفتار شمع‌های باله‌دار تحت بار جانبی بررسی شده و تأثیر ابعاد و اندازه‌ی باله‌ها، طول شمع‌ها و همچنین تأثیر زاویه نیروی وارد شده به شمع مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به صورت زیر است:

- ۱- با افزایش طول باله‌ها ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها نیز افزایش می‌یابد. با این وجود مقدار بهینه فنی-اقتصادی طول باله نصف طول شمع است. این مقدار افزایش با استفاده از باله‌هایی به اندازه‌ای برابر طول شمع، تا ۱۰۰ درصد منجر به افزایش ظرفیت باربری جانبی می‌شود.
- ۲- با افزایش عرض باله‌ها ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها نیز افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود زمانی که عرض باله برابر قطر شمع می‌شود، اثر عرض باله مشهود می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، در این حالت ظرفیت باربری جانبی می‌تواند تا حدود ۸۰ درصد افزایش یابد.
- ۳- برای باله‌ها با سطح یکسان، اثر طول در ظرفیت باربری جانبی از عرض بیشتر بوده و در نتیجه افزایش طول نسبت

- [14] Yang, Z. and Jeremić, B., 2002. Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in layered elastic-plastic soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26(14), pp.1385-1406.
- [15] Uncuoğlu, E. and Laman, M., 2011. Lateral resistance of a short rigid pile in a two-layer cohesionless soil. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2, pp.19-43.
- [16] Wood, D.M., 2004, *Geotechnical Modelling (Applied Geotechnics)*. Taylor & Francis.
- [17] Muir Wood, D, Crewe, AJ and Taylor, CA (2002) Shaking table testing of geotechnical models. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 2 (1) 1-13.
- [18] Iai, S., 1989. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, 29(1), pp.105-118.
- [19] Franke, E., and Muth, G. (1985). "Scale effect in 1g model tests on horizontally loaded piles." *Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 1011-1014.
- and *Geoenvironmental Engineering*, 137(10), pp.977-982.
- [8] Bienen, B., Dührkop, J., Grabe, J., Randolph, M.F. and White, D.J., 2011. Response of piles with wings to monotonic and cyclic lateral loading in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3), pp.364-375.
- [9] Nasr, A.M., 2013. Experimental and theoretical studies of laterally loaded finned piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), pp.381-393.
- [10] Babu, K.V. and Viswanadham, B.V.S., 2019. Numerical studies on lateral load response of fin piles. *Geomechanics and Geoengineering*, 14(2), pp.85-98.
- [11] Yaghobi, M.H., Hanaei, F., Mojtahedi, S.F.F. and Rezaee, M., 2019. Numerical finite element analysis of laterally loaded fin pile in sandy soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1), p.14.
- [12] Long. H., Cheng Fan. Chia. 2005. Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand", *Computers and Geotechnics*; 32(3): 274-289.
- [13] Banerjee PK, Davis TG. 1978. "The behavior of axially and laterally loaded single piles embedded in non-homogeneous soils". *Geotechnique*; 28(3):309-26

Numerical analysis of single finned pile under lateral loads in sandy soils

Milad Shamsafar¹, Mohammad Oliaei^{*2}

1. M.Sc. Student (Geotechnical Engineering), Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*2. Assistant Professor (Geotechnical Engineering), Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares

m.olyaei@modares.ac.ir

Abstract

Piles are a common type of foundation, and in the context of offshore energy supply, they are used widely as foundations for wind farms or as anchors for floating facilities for oil and gas production. In both these applications, the pile response under lateral loading is critical, although the latter application is more capacity sensitive whereas the former is deformation sensitive. All piles are under small or large lateral loads and the behavior of the piles under the lateral load must be controlled, but for most of the time. The lateral load can cause a spacing between the pile and the surrounding soil in the upper layers. If such a situation happens, it cannot be assured for the vertical load bearing capacity in the upper layers. Usually, the effect of lateral loads on the design and construction of the pile is ignored due to its small size versus vertical load, but in some cases, the analysis of the pile is necessary under lateral loads and should be considered using the appropriate methods. The piles used in the base of bridges, wind turbines, piers, etc. are subjected to relatively large lateral loads, and in the pile design of these structures, the lateral effect is dominated. One of the ways to increase the lateral load bearing capacity is to use the technique of fin piles, which is a relatively new method. Fin piles are one type of piles that have four or more metal sheets that are welded at different angles to the pile environment. The behavior of fin piles is difficult to explain using simple pile-soil theories or two dimensional numerical analyses because of the complicated geometry of the piles. Due to the progress of numerical methods and the use of three-dimensional software, numerical modeling of the pile and soil environment is possible more precisely. A fundamental study of soil response of piles subjected to static lateral loads in sand is conducted using the non-linear finite element approach. The effects of pile properties, i.e., length and diameter, and the effect of fins i.e., fin length and fin width on the pile response of a pile subjected to lateral loads are also investigated. In this research, the behavior of singular fin piles under lateral loading in sandy soil is modeled using 3D finite element software (ABAQUS) The ABAQUS program is a robust engineering simulation program that, based on finite element method. Abaqus is capable of solving various problems from simple to complex nonlinear problems. With a large library of materials and elements, the program is capable of modeling materials such as metals, rubber, polymer, composites, concrete, soil and rock. In addition to solving structural problems, the ABAQUS program is able to solve complex heat transfer problems, thermal-electrical analysis, and soil mechanics problems. In this research, the performance of finned piles with respect to ordinary piles has been compared. The results show that the use of fins causes an appreciable increase in the bearing capacity of the piles compared to ordinary piles without fins.

Keywords: Fin pile, Lateral load, Finite element, Numerical analysis, Abaqus