استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در تخمین ظرفیت باربری دینامیکی شمع فولادی و بتنی پیش‌ساخته

سعید غفارپور جهرمی[۱*]، روح‌اله ایزانلو [۲]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی؛ Saeed_ghf@sru.ac.ir
[۲] دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، موسسه آموزش عالی پویندگان دانش، چالوس؛ izanloo.r@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:
شمع
ظرفیت باربری
الگوریتم ژنتیک
هوش مصنوعی
کوبش شمع

چکیده

شالوده عمیق یا شمع، المان‌های سازه‌ای هستند که به منظور انتقال بار سازۀ فوقانی به اعماق زمین و لایه های سخت از آنها استفاده می‌گردد. به دلیل بالا بودن هزینه اجرای شالوده‌های عمیق، طراحی بهینه شمع و تخمین ظرفیت باربری آنها بسیار اهمیت دارد که استفاده از روش هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک می‌تواند در این راستا راهگشا باشد. در این پژوهش با انتخاب دو نوع شمع پُرکاربرد شامل شمع فلزی لوله‌ای و شمع بتنی پیش‌ساخته، ظرفیت باربری محوری شمع با مدلسازی در نرم‌افزار المان محدود Plaxis 2D و تحت بار هارمونیک در یک خاک لایه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج با داده‌های آزمایش دینامیکی شمع (PDA[۱]) در یک مطالعه موردی مقایسه گردید. در این پژوهش نتایج حاصل از ۱۰۰ تحلیل عددی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است که منجر به معرفی یک رابطه تخمینی با دقت مناسب در ظرفیت باربری محوری شمع به تفکیک برای شمع بتنی و فلزی گردید. همچنین در این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی ظرفیت باربری شمع نشان دهنده این واقعیت است که اغلب روش‌های تجربی ظرفیت باربری بسیار بزرگتری را در مقایسه مقادیر واقعی ارائه می‌دهند.

Use of Genetics Algorithm in Estimating Bearing Capacity of Pile under Dynamic Load

Saeed Ghaffarpour Jahromi[1*], Roohollah Izanloo[2]

[1] Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Saeed_ghf@sru.ac.ir
[2] M.Sc. Graduated Student, Pouyandegan Danesh Institute of Education, Chalus, izanloo.r@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 Jan. 2018
Accepted: 5 Aug. 2018

Keywords:
Pile
Bearing Capacity
Genetic Algorithm
Artificial Intelligence
Driven Pile

ABSTRACT

Pile foundations provide support for structures, transferring their load to layers of soil or rock that have sufficient bearing capacity and suitable settlement characteristics. There are a very wide range of foundation types available, suitable for different applications, depending on considerations. There are various methods to estimate the axial bearing capacity of the pile such as experimental, analytical and in-situ experiments. Accurate estimation of bearing capacity is essential in geotechnical engineering due to the high cost of implementing deep foundations, that use of artificial intelligence and genetic algorithms can be helpful in this regard. In this study compressive bearing capacity for two prefabricated concrete and steel pipe evaluated under harmonic load using modeling in finite element software (Plaxis 2D), and the results were compared with the Dynamic Load Testing (PDA) data in a case study. In this research, the results of 100 numerical analyzes have been optimized using a genetic algorithm that resulted in the introduction of an estimated relationship with the accuracy of the pile bearing axial bearing capacity for concrete and metal piles. In this study, comparing different methods of assessing the bearing capacity of piles indicates the fact that most empirical methods provide a much larger load capacity compared to actual values.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به استفاده زیاد از سازه‌های بلند مرتبه و خاص از قبیل برجهای مخابراتی و تجاری و مسکونی، سازه های دریایی، پلها و افزایش نیروهای وارده و همچنین جهت انتقال بار از روسازه به لایه های سخت استفاده از شالوده‌های عمیق شمعی در پروژه‌های مختلف عمرانی بخصوص سازه‌های ساحلی و فراساحلی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و در اغلب اوقات جزء لاینفک پروژه می‌باشد. داشتن اطلاعات کافی در خصوص رفتار و عملکرد شمع از جمله ظرفیت باربری شمع بسیار مهم می‌باشد بخصوص اینکه بارهای وارده اغلب از نوع بارهای دینامیکی شامل زلزله، باد و امواج دریا می باشند. روشهای مختلفی اعم از تجربی، تحلیلی و آزمایشهای درجا جهت برآورد ظرفیت باربری محوری شمع وجود دارد. برآورد صحیح ظرفیت باربری پی‌های عمیق در ساخت پروژهای عمرانی و بخصوص طراحی سکوهای دریایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و سهم قابل توجهی از تأمین و درجه ایمنی اینگونه سازه‌ها متوجه پی آنها می‌باشد. تشخیص و درک رفتار شمع تحت بارهای دینامیکی سهم قابل توجهی در تأمین پایداری و اطمینان دارد که عدم اطلاعات دقیق و استفاده از روابط تجربی منجر به استفاده از ضرایب اطمینان بزرگ موجب اعمال هزینه‌های بسیار زیادی می‌شود که استفاده از یک روش آماری و بهینه‌سازی داده‌ها با استفاده از روش هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک[1] می‌تواند نقش موثری در پیش‌بینی و برآورد ظرفیت باربری شمع تحت بار دینامیکی داشته باشد.

پیشرفت‌های اخیر در طراحی شالوده‌های عمیق، بیانگر این موضوع است که شمع ملزم به حفظ پایداری کلی شالوده نبوده و به عنوان عنصر کاهش دهنده نشست نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. طراحی و اجرای شالوده‌های عمیق اغلب به صورت گروهی از شمع با طول و قطر مساوی و بصورت متقارن انجام می‌شود که علت آن تسهیل در نصب و اجرای شمع و همچنین سادگی روش‌های تحلیل و طراحی شمع‌های با طول و قطر یکسان است[۱].

برای اولین بار در سال ۱۹۴۶ شرکت نفتی مگنولیا (با نام امروزی موبیل اویل) سکویی ساخت که در آن از شمع‌های فلزی در فاصله هشت کیلومتری ساحل در عمق ۷ متری و بالاتر از بیشترین تراز جزر و مدی استفاده و برای اولین بار تجهیزات و خطوط لوله مورد استفاده قرار گرفت. از سال ۱۹۵۶ به بعد با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و مهندسی ابعاد عرشه سکوها شروع به کاهش نمود و نسل جدیدی از سکوها که به نمونه‌های امروزی شبیه‌تر بودند شروع به ساخت و توسعه شدند. همچنین استفاده از پایه های مایل در سکوها و تمهیداتی برای احداث سکو در اعماق و فواصل بیشتر در این سال‌ها آغاز گردید. مطالعات انجام شده بر روی سازه‌های بتنی ساحلی مربوط به دهه ۴۰ میلادی نشان می‌دهد که سازه‌های بتنی تأثیری کمتری از آب دریا در مقایسه با سازه‌های فولادی دارند بطوریکه فولاد دچار خوردگی شده و نیازمند محافظت، تعمیر و تعویض خواهند بود.

یکی از مهمترین مسائل در طراحی سازه، دوام و پایایی آنها در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد که اهمیت این موضوع در سازه‌های دریایی به دلیل عوامل مخرب دریا و هزینه ساخت و نگهداری بالا اهمیت بیشتری دارد. استفاده از شمع‌های بتنی پیش‌تنیده بصورت پیش‌ساخته از جمله روش‌های افزایش طول عمر بتن در سازه‌های دریایی است. شمع‌های پیش‌تنیده بیش از ۵۰ سال است که در پروژه‌های مختلف در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. حمل و نقل اینگونه شمع‌ها از مرحله ساخت تا استقرار و هنگام کوبش، تنشهای زیادی را شمع ایجاد می‌کند که به دلیل ضعف بتن در کشش، وقوع ترک‌های عرضی در شمع‌ها پیش ساخته بسیار محتمل است. پیدایش ترک در شمع بتنی در شرایط خورنده ایران به معنای از بین رفتن بتن و آرماتور در اثر نفوذ یون کلر، حمله سولفات و واکنش قلیائی می‌باشد که پیش‌تنیدگی می تواند وقوع چنین ترک‌هایی را حین نصب کاهش دهد.

معروفترین روش تحلیل این گروه از شمع، روش ضریب اندرکنش معرفی شده توسط پائولوس در سال ۱۹۶۸ و روش تحلیلی معرفی شده توسط رندلف و وُرث در سال ۱۹۷۹ می‌باشد[۲]. همچنین به طور مشابه در روش انتقال‌بار نیز که توسط محققین مختلف مطرح شده است، برهم‌کنش مقاومت اصطکاکی جدار و باربری نوک شمع به طور جداگانه در نظر گرفته می شود که برای کاربرد آن نیز فرض شمع‌های با طول مساوی و یکنواخت لازم می‌باشد[۳ و ۴]. در این شرایط حتی با تغییر هندسه و موقعیت قرارگیری شمع‌ها، یک گروه شمع با طول و قطر مساوی از لحاظ میزان سختی گروه (نسبت بار به نشست گروه شمع) و نشست تفاضلی کلاهک (اختلاف نشست حداکثر و حداقل کلاهک)، دارای بهترین عملکرد و کارآیی ممکن نخواهند بود. پیشرفت‌های زیادی در بهینه‌سازی عددی در سال‌های اخیر صورت گرفته و به طور وسیع در علوم مختلف مهندسی عمران مانند حمل و نقل، طراحی پل‌ها و طراحی سازه‌های مختلف و بهینه‌سازی شالوده‌های عمیق نیز کاربرد دارند. نمونه اخیر کاربرد بهینه‌سازی در شالوده‌های عمیق، توسط کیم و همکارانش در سال ۲۰۰۲ می‌باشد که تلاش شد ظرفیت باربری یک کلاهک متکی بر شمع با تغییر در مشخصات هندسی گروه چون ضخامت کلاهک، سطح مقطع و موقعیت شمع‌ها، بهینه سازی شود[۵]. بلویکیوس و همکارانش در سال ۲۰۱۱ سعی کردند یک گروه شمع متصل توسط تیرهای رابط را از نظر محل استقرار شمع‌ها بهینه کنند. در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی با جستجوی محلی و تصادفی مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که در موضوع بهینه سازی محل استقرار شمع‌ها هم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

دارای نقاط بهینه محلی و هم بهینه غیر محلی بود، با هدف بدست آوردن حالت بهینه کلی در گروه شمع، الگوریتم ژنتیک بهترین عملکرد ممکن را در بین الگوریتم‌های ذکر شده از خود نشان داد[۶]. مومنی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ سعی کردند که الگوریتم ژنتیک را با شبکه عصبی مصنوعی ترکیب کرده و ظرفیت باربری شمع‌های بتنی پیش ساخته را پیش بینی کنند. در این پژوهش از داده های اطلاعاتی حاصل از آزمایش *PDA* روی ۵۰ نمونه شمع استفاده شد. متغیرهای ورودی شامل مشخصات هندسی شمع (مقطع و طول)، وزن چکش و ارتفاع سقوط بوده و تابع هدف ظرفیت باربری فشاری شمع می‌باشد. پس از بهینه سازی معلوم شد که وزن چکش و مشخصات هندسی شمع‌ها بیشترین تأثیر را بر نتایج حاصل از حساسیت سنجی دارا می‌باشند[۷]. مظاهر و همکارانش در سال ۱۳۹۳ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی چند لایه (*MLP*) تلاش کردند ظرفیت باربری شمع‌های کوبشی مستقر در خاک ماسه را پیش بینی کنند. در پژوهش انجام گرفته از شمع‌های لوله‌ای فلزی با انتهای باز استفاده شد. طول و قطر شمع، مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک به عنوان ورودی و ظرفیت باربری شمع به عنوان خروجی تعریف شدند. در این پژوهش مشخص شد که شبکه عصبی در پیش بینی نتایج، کارایی بالایی دارند و همچنین با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده مشخص شد که متغیر زاویه اصطکاک داخلی خاک، مدول الاستیسیته خاک، قطر شمع و طول شمع به ترتیب بیشترین اثر افزایشی را روی ظرفیت باربری شمع‌ها دارا می‌باشند[۸].

هرچند استفاده از شمع‌های با طول متفاوت در کارهای رایج معمول نیست اما استفاده از این نظریه در طراحی شالوده‌های عمیق پروژه‌های بزرگ دارای سابقه می‌باشد که هدف آنها ارتقاء عملکرد گروه شمع با تغییر در هندسه شمع‌ها می‌باشد[۹]. چاو و همکارانش تلاش کردند از بهینه‌سازی در کمینه‌کردن نشست تفاضلی گروه شمع با کلاهک انعطاف‌پذیر و همچنین کمینه‌کردن تفاضل نیروی در گروه شمع با کلاهک صلب، استفاده نمایند. نتایج آنها نشان داد در گروه شمع با طول یکسان و کلاهک انعطاف‌پذیر، شمع‌های مرکزی نشست بیشتری نسبت به شمع‌های پیرامونی گروه دارند درحالیکه با کلاهک صلب، نیروی کمتری از طریق شمع‌ها میانی به دلیل اندرکنش شمع و خاک قابل انتقال می‌باشد. نشست تفاضلی و تفاضل سهم بار شمع در گروه با بکارگیری در شمع‌های طویل‌تر در مرکز می‌تواند کاهش پیدا کند[۱۰]. رئول و همکارانش نیز در بهینه‌سازی گروه شمع با هدف کاهش نشست و افزایش باربری به این نتیجه رسیدند که شمع‌های گروه باید طول نامساوی داشته باشند [۱۱].

تخمین ظرفیت باربری نوک شمعهای لوله‌ای با انتهای باز بسیار پیچیده و دارای عدم قطعیت بسیاری می‌باش که علت آن پیچیدگی رفتار پلاگ شدن خاک می‌باشد. ستونی از خاک از طریق نوک در زمان کوبش شمع لوله‌ای با نفوذ از طریق نوک شکل می‌گیرد. بسیاری از روشهای طراحی، تفاوتی در ظرفیت باربری شمع های لوله‌ای با انتهای باز و شمع لوله‌ای با انتهای بسته قائل نمی‌شوند چرا که با تقویت نوک شمع احتمال پلاگ شدن نوک و اتصال خاک در محدوده نوک شمع فراهم می‌شود. با توجه به افزایش کاربرد شمعهای قطور لوله‌ای در سازه‌های فراساحلی، تحقیقات زیادی در خصوص تخمین صحیح ظرفیت باربری این دسته از شمع‌ها در سال‌های اخیر انجام شده است [۱۲].

بسیاری از تحقیقات بهینه‌سازی در شالوده‌های عمیق مبتنی بر روش‌های موسوم به کاهش شیب می‌باشند که متغیرهای محدودی داشته و در روابط ریاضی باید مشتق‌پذیر باشند. در این روش‌ها متغییرهای ناپیوسته و مشتق‌ناپذیر کاربرد ندارند. در این مقاله از یک روش بهینه‌سازی خودکار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی ظرفیت باربری شالوده‌های عمیق معرفی می‌شود. از آنجا که متغییرهای مطرح در این دسته از مسائل مهندسی متنوع و ناپیوسته هستند، استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی می‌تواند مفید باشد.

یکی دیگر از روش‌های میدانی در تخمین ظرفیت باربری شمع، ارزیابی روند کوبش با استفاده از چکش مناسب می‌باشد. در اغلب روش‌های تحلیلی و تجربی، پیش‌بینی ظرفیت باربری محوری بر مبنای تجربه با استفاده از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع صحت سنجی می‌گردند [۱۳]. اگرچه آزمایش بارگذاری استاتیکی توانایی‌های زیادی دارد ولی دارای معایب متعدد از جمله غیر اقتصادی و زمانبر بودن می‌باشد. رویکرد دیگری که در چند دهه اخیر به منظور ارزیابی روش‌های تحلیلی و تجربی در ظرفیت باربری محوری شمع وجود دارد می‌توان به روابط آزمایش دینامیکی شمع یا *PDA* اشاره کرد. این روابط دارای معایب زیادی از قبیل عدم شبیه‌سازی ضربه می‌باشند. در این بین آزمایش تحت کرنش بالا (*HSDPT*[۳]) با ترکیب روش مبتنی بر معادلهٔ موج کارایی خوبی در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع نشان داده است[۱۴ و ۱۵]. اگرچه تحقیقات زیادی در خصوص مطالعهٔ ظرفیت باربری شمع ها صورت گرفته لیکن فقدان بزرگی در تعیین ظرفیت باربری شمع دیده می‌شود. در این پژوهش با انتخاب دو نوع شمع پُرکاربرد در ساخت سکوهای دریایی ساحلی و فراساحلی شامل شمع فلزی لوله‌ای و شمع بتنی پیش‌ساخته، ظرفیت باربری محوری شمع با مدلسازی در نرم‌افزار المان محدود *Plaxis 2D* و تحت بار هارمونیک در یک خاک لایه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت و با داده‌های آزمایش دینامیکی شمع (*PDA*) حاصل از مطالعه موردی یک پروژه مقایسه گردید. نتایج حاصل بیش از ۱۰۰ تحلیل عددی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد که منجر به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

یک معرفی رابطه تخمینی اما با دقت بالا در ظرفیت باربری محوری شمع به تفکیک شمع بتنی و فلزی شده است. این رابطه کمترین مقدار میانگین مربعات خطا (MSE) را نسبت به داده‌های ورودی دارد. همچنین در این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی ظرفیت باربری شمع نشان دهنده این واقعیت است که اغلب روش‌های تجربی ظرفیت باربری بسیار بزرگتری را در مقایسه با دیگر روش‌ها ارائه می‌دهد.

۲- ظرفیت باربری محوری شمع

جهت تخمین باربری محوری شمع روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل روش‌های تحلیلی، روشهای مبتنی بر کوبش شمع، روش‌های مبتنی بر آزمایش‌های درجا، روش‌های دینامیکی مبتنی بر انتشار موج (PDA) و همچنین بارگذاری استاتیکی شمع می‌باشد. هر یک از این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی بوده و گاها دقت لازم را ندارد. روشهای تحلیلی بعنوان ساده‌ترین روش، مبتنی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و هندسه شمع یعنی طول، قطر و مقطع شمع در باربری محوری شمع (فشاری و کششی)، توسط محققان مختلفی چون وسیک [۱۶]، مایرهوف [۱۷] و کاستلو [۱۸] توسعه یافته‌اند. کاستلو و همکارانش با بررسی تعداد ۲۴ مورد شمع‌کوبی ظرفیت باربری شمع در خاک ماسه‌ای را مطابق رابطه ۱ پیشنهاد دادند:

$$q' N_q^* A_p + \sum p\, \Delta l (k \sigma_{v'} tan\delta) \qquad (۱)$$

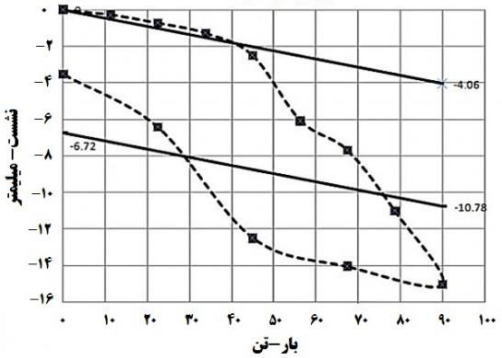
که در این رابطه q' تنش موثر قائم در نوک شمع، N_q^* فاکتور ظرفیت باربری، k ضریب فشار جانبی زمین، $\sigma_{v'}$ متوسط تنش موثر سربار، δ زاویه اصطکاک میان شمع و خاک، Δl طول شمع و A_p سطح مقطع شمع می‌باشد. در این رابطه مشخصات هندسی شمع یعنی مقطع، قطر و طول شمع و همچنین مشخصات مکانیکی خاک یعنی چسبندگی، اصطکاک داخلی خاک و وزن مخصوص در تخمین ظرفیت باربری تاثیرگذار هستند. این رابطه به شدت تحت تاثیر مشخصات مکانیکی خاک می‌باشد و عدم دقت کافی در تعیین مشخصات خاک می‌تواند تخمین ظرفیت باربری را تحت تاثیر قرار دهد[۱۸].

۳- معرفی اطلاعات مورد استفاده بعنوان مطالعه موردی تحقیق

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، از داده‌ها و نتایج انجام بارگذاری استاتیکی شمع که در مقاله مومنی و همکارانش گزارش شده استفاده می‌شود [۲۰]. در این تحقیق آزمایش بارگذاری استاتیکی روی شمع بتنی پیش‌ساخته با قطر ۳۵۰ میلیمتر و طول ۱۰ متر انجام شده است. همچنین برای شمع فولادی از نتایج بارگذاری استاتیکی گزارش شده در تحقیق خوشخو و همکارانش استفاده می‌شود که در منطقه عسلویه انجام شده است[۲۱]. در این تحقیق بارگذاری استاتیک روی شمع‌های به قطر ۳۲ اینچ انجام شده است. نتایج حاصل از تخمین باربری شمع به روش تحلیلی و همچنین روابط تجربی مستخرج از نتایج SPT در جدول ۱ برای شمع بتنی آمده است. همانگونه که این مقایسه نشان می‌دهند، معمولاً نتایج بدست آمده از روش تجربی مبتنی برSPT بیش از روش تحلیلی می‌باشد. نتیجه آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی یکی از شمع‌های بتنی به روش $Davisson$ در شکل ۱ نشان داده شده است. در این آزمایش بارگذاری معادل دو برابر بار طراحی تخمین زده شده بصورت پله‌ای بر شمع وارد می‌شود که نتیجه آن ظرفیت باربری نهایی ۷۸۰ کیلونیوتن را نتیجه می‌دهد.

جدول (۱) ظرفیت محوری شمع

روش مورد استفاده	ظرفیت باربری محوری شمع (kN)		
	مقاومت جداری	مقاومت نوک	کل ظرفیت
روش تحلیل	۱۴۰	۴۱۸	۵۵۸
روابط تجربی	۳۶۰	۹۲۳	۱۲۸۲/۵۹



شکل ۱- منحنی بار-جابجایی در آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع

همچنین در این مطالعه موردی، نتایج حاصل از بارگذاری دینامیکی PDA روی شمع بتنی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج آزمایشهای مختلف PDA انجام یافته روی شمع که در جدول ۲ آمده نشان می‌دهند که ضربات شمع‌کوب در برخی آزمایشها نتوانسته است تمام مقاومت خاک را بسیج کند و در گاهی اوقات ظرفیت برآورده شده کمتر از مقدار واقعی است. به عنوان مثال اگر میزان نفوذ شمع در خاک متراکم کم باشد، تمام ظرفیت شمع بسیج نشده و برآورد ظرفیت باربری غیرقابل پیش‌بینی خواهد بود در اینصورت لازم است با افزایش انرژی ضربات (افزایش وزنه یا ارتفاع سقوط)، بسیج خاک اتفاق افتد [۲۲]. مقایسه نتایج جدول ۲ با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی نشان می‌دهد که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

برای شمع شمارهٔ ۶ نتایج به یکدیگر نزدیک هستند لذا مشخصات این شمع به عنوان مرجع در تحلیل‌های بعدی مورد استناد قرار گرفته است. لازم به ذکر است محدودیت این انتخاب در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است.

جدول (۲) ظرفیت باربری شمع بتنی براساس آزمایش بارگذاری دینامیکی انتشار موج PDA

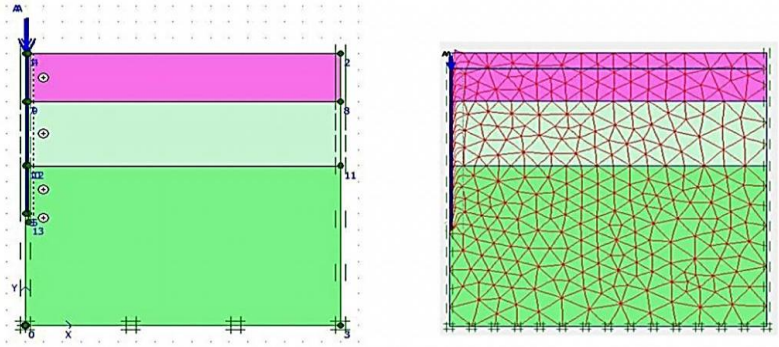
شماره شمع	طول (m)	ظرفیت باربری محوری شمع کوبی(kN)		
		کل ظرفیت	مقاومت نوک	مقاومت جداری
۱	۱۰/۳	۵۰۰	۱۵	۴۸۵
۲	۸/۸	۴۵۲	۱۴	۴۳۸
۳	۱۰	۵۸۵	۲۹	۵۵۶
۴	۱۰	۶۰۳	۲۷	۵۷۶
۵	۱۰/۳	۸۱۱	۴۴	۷۶۸
۶	۱۰	۷۷۰	۳۶	۷۳۳
۷	۱۰	۷۴۸	۴۸	۷۰۰

۴- تحلیل عددی با استفاده از روش اجزای محدود

در مهندسی ژئوتکنیک استفاده از نرم‌افزار *Plaxis* پرکاربرد بوده چرا که قادر به مدلسازی در دو حالت کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری با المان‌های مختلف مثلثی ۶ و ۱۵ گره‌ای می‌باشد. در این راستا و در این تحقیق نیز به منظور مدلسازی شمع از این نرم‌افزار استفاده شد بطوریکه ابعاد ناحیه تا دو برابر طول شمع با استفاده از هندسه تقارن محوری در امتداد محور شمع و با شرایط مرزی استاندارد برای این تحلیل استفاده شد. همچنین عمق سفره آب در سطح یک متری زمین و از مدل سخت شوندگی کرنش (*HS*) به عنوان مدل رفتاری خاک استفاده شده است. مزیت اصلی این مدل توانایی در نظر گرفتن مسیر تنش و اثر آن بر سختی خاک می‌باشد. خاک ماسه با رفتار زهکشی شده و برای شمع رفتار الاستیک درنظر گرفته شده است. لیبو و همکارانش مطالعه‌ای در خصوص همگرایی مش‌بندی مدلسازی عددی انجام دادند که نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که در خاک‌های ماسه‌ای، منحنی خروجی حاصل از تحلیل عددی با تغییر مش‌بندی از درشت به ریز حدوداً یکسان می‌باشد لذا در این تحقیق از یک مش‌بندی متوسط برای خاک و یک مش‌بندی ریز در اطراف شمع به دلیل وجود تنش بالا در این محدوده استفاده شده است[۲۳]. در امتداد طول شمع نیز از المان واسط (*Interface*) به منظور در نظر گرفتن اندرکنش شمع و خاک استفاده شد که طبق توصیه نرم‌افزار تا محدوده یک برابر قطر شمع در زیر نوک ادامه یافت. ضریب فشار جانبی با استفاده از رابطهٔ معروف جکی ($1\text{-}\sin\phi$) و ضریب پواسون باربرداری طبق توصیه نرم‌افزار در نظر گرفته شده است[۱۸]. جدول ۳ مقادیر متغیرها برای خاک، شمع بتنی و شمع فلزی را نشان می‌دهند. شمع فلزی جدار نازک و دارای ورق تقویتی نوک فرض می‌شود نفوذ ستون خاک از نوک در طول شمع انجام می‌شود و درگیری کامل (*Plugging*) در تعیین باربری نوک حاکم است. بخش محاسبات در سه فاز مختلف انجام شده است، در فاز اول، سطح آب اختصاص داده شده و فشار آب هیپراستاتیکی با توجه به آن تولید می‌شود. در فاز دوم، مصالح شمع به کلاستر مربوطه اختصاص داده شده است و در فاز سوم، با استفاده از آنالیز پلاستیک و بار توزیع شده در نظر گرفته شده است (شکل ۲).

در روش توزیع بار معمولاً باری که احتمالا باعث گسیختگی گردد بر شمع وارد و مقدار همگرایی نتایج بررسی می‌گردد. این کار با سعی و خطا انجام می‌شود بطوریکه برای شروع کار از بار $۱۲۸۳kN$ حاصل از روش تجربی استفاده می‌شود که در نهایت با تکرار عملیات، مقدار بار نهایی به عنوان ظرفیت باربری شمع بتنی به مقدار $۹۱۹kN$ تعیین می‌شود (شکل ۳).

به منظور صحت‌سنجی و دقت‌سنجی مدلسازی عددی، از نتایج تحقیقات آقای مومنی و همکارانش [۲۰] برای شمع بتنی استفاده شد که نتیجه این مقایسه در شکل ۴ نشان داده است. همچنین برای شمع فولادی از نتایج داده‌های آزمایش میدانی ارائه شده توسط خوشخو و همکارانش [۲۱] استفاده شده است که نتیجه آن در شکل ۵ نشان داده است. مقایسه این نتایج نشان می‌دهند که تطابق بسیار نزدیکی بین نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایش‌های انجام یافته در محل توسط این محقق وجود دارد.



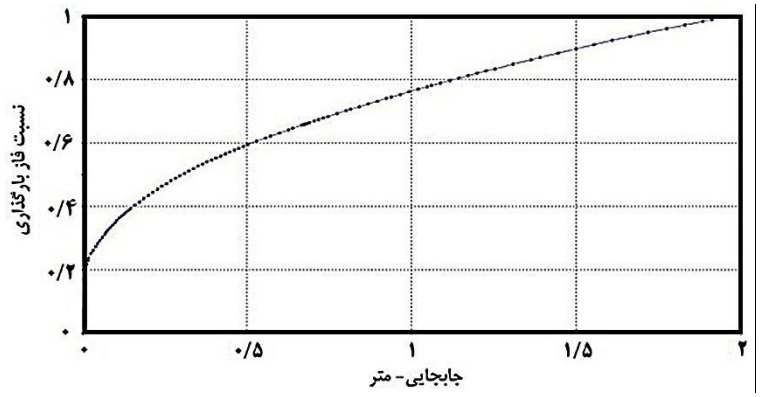
شکل ۲- مدلسازی اولیه در برنامه *Plaxis-2D* و تغییرات مش‌بندی با اعمال بار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

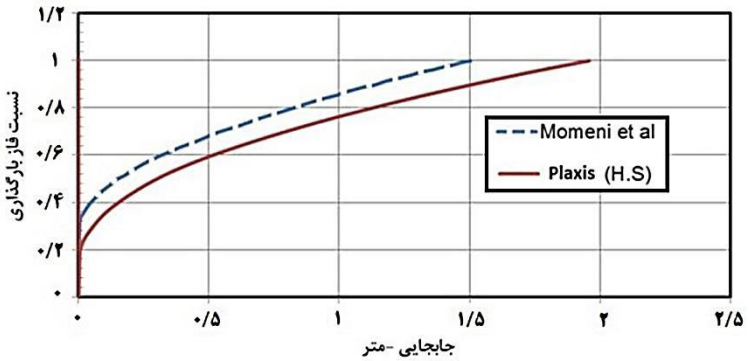
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

جدول (۳) خصوصیات مصالح و متغییرهای ورودی تحلیل و مدلسازی

مشخصه		واحد	شمع فولادی	شمع بتنی	لایه ۳ ماسه	لایه ۲ ماسه	لایه ۱ رس سیلتی
مدل رفتاری	-	-	الاستیک خطی	الاستیک خطی	*Hs*	*Hs*	*Hs*
وزن مخصوص	γ	*kPa*	۶۷/۵	۲۴	۱۸/۱۷	۱۸	۲۰/۱۹
وزن مخصوص اشباع	γ_{sat}	*kPa*	۷۸/۵	۲۴	۱۹/۶۳	۱۹/۵	۲۱/۲
سختی خاک	E	*kPa*	۲۱×۱۰^{۷}	$۲/۶ \times ۱۰^{۷}$	۲۱۵۵۲	۱۴۳۹۲	۴۰۰۰
	E_{oed}^{ref}		–	–	۲۵۸۶۰	۱۵۹۹۰	۱۷۹۳
	E_{50}^{ref}		–	–	۲۵۸۶۰	۱۵۹۹۰	۱۲۰۶۰
	E_{ur}^{ref}		–	–	۷۷۵۸۰	۴۷۹۷۰	۳۶۱۹۰
نسبت پواسون	ν_{ur}, ν	-	۰/۳	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲
توان سطح تنش	M	-	–	–	۰/۵	۰/۵	۱
ضریب فشار جانبی خاک	k_0	-	–	–	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۷۹
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	درجه	–	–	۲۹	۳۰/۵	۱۲
چسبندگی	C	*kPa*	–	–	۰/۰۸	۰/۰۶	۱۰/۴۴



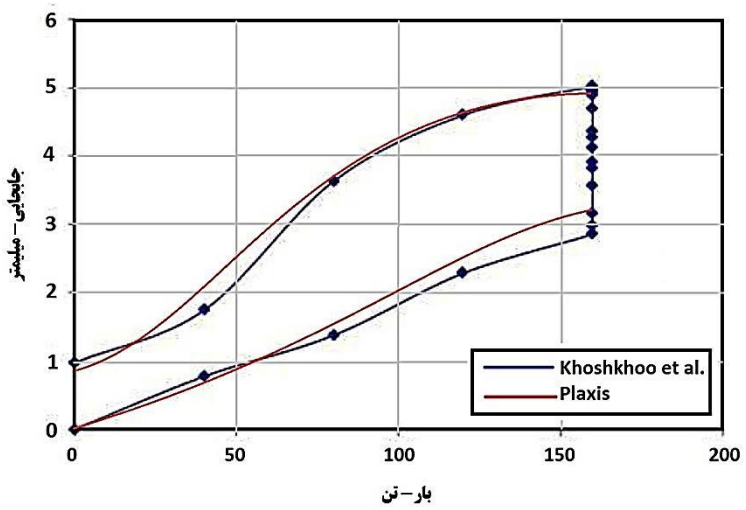
شکل ۳- نمودار بار- جابجایی بار نهایی حاصل از آخرین تحلیل



شکل ۴- مقایسه نتایج صحت‌سنجی تحلیل عددی شمع بتنی با داده‌های مطالعات مومنی و همکارانش [۲۰]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]



شکل ۵- مقایسه نتایج صحت‌سنجی تحلیل عددی شمع فلزی با داده‌های مطالعات خوشخو و همکارانش [۲۱]

۵- کاربرد هوش مصنوعی در تخمین ظرفیت باربری

الگوریتم ژنتیک یک فرایند جستجو است که بر اساس الگوی انتخاب طبیعی ژن‌ها طراحی شده است[۲۴]. این الگوریتم تصادفی است و بر اساس قانون تنازع بقا، افراد برتر را در یک جمعیت انتخاب می‌کند. با تولید مثل و انتخاب برترین‌ها، فرآیند جستجو با بکارگیری قوانین احتمالات به سمتی از بهبودی نسبی نتایج هدایت می‌شود. استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مزایای متعددی در قیاس با روش بهینه‌سازی مبتنی بر مشتق‌گیری (شیب) دارد که مهمترین آنها عدم نیاز به روابط و فرمول‌بندی دقیق ریاضی مبتنی بر متغیرهای پیوسته می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک دارای سه بخش شامل انتخاب، ادغام (تولید مثل) و جهش می‌باشد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی استفاده می‌شود که دارای سه عملکرد اساسی تولید مثل، ترکیب و جهش می‌باشد. در این روش ابتدا جمعیت ژنتیکی را دسته‌بندی کرده و هر کروموزوم مقدار برازندگی مشخصی را به خود می‌گیرد. در بدترین حالت رتبه برابر یک درنظر گرفته می‌شود و در بهترین رتبه برابر n خواهد بود که n تعداد کروموزوم‌ها در جمعیت است[۲۵]. در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، محدودیت‌های مسئله توسط یک تابع هزینه تعریف می‌شود. تابع هزینه نباید مقادیر بسیار بزرگ اعمال کند تا امکان جستجوی کافی در فضا جهت همگرایی وجود داشته باشد همچنین نباید بسیار کوچک باشد زیرا همگرایی خیلی آهسته خواهد بود[۲۶].

برای ایجاد بانک داده در پیش بینی ظرفیت باربری شمع از ۵۰ آزمون PDA که بر روی شمع بتنی پیش‌ساخته و همچنین ۵۰ تحلیل ظرفیت باربری روی شمع لوله‌ای فلزی استفاده می‌گردد[۱۵]. تعداد تکرار۲۰۰ مرتبه، جمعیت اولیه در هر تکرار ۵۰۰ و جهت تلفیق از حالت یکنواخت با درصد تلفیق ۸۰٪ و عملگر جهش با ۲۰٪ جهش استفاده شده است. در این الگوریتم با درنظر گرفتن تابع برازندگی میانگین مربعات خطا (MSE) الگوریتم به سمت کمینه کردن این مقدار نسبت به داده‌های ورودی و خروجی حرکت می‌کند. برنامه با یک انتخاب آزمایشی شروع به کار کرده و در هر تکرار مقدار بهترین "میانگین مربعات خطا" حاصل در آن نسل نمایش داده می‌شود. در نهایت روابط پیشنهادی ۲ و ۳ جهت تخمین ظرفیت باربری هر دو شمع مطابق زیر پیشنهاد می‌شود. در این روابط t ضخامت جداره شمع فلزی، D قطر شمع، L طول شمع، A سطح مقطع شمع، W وزن شمع، I ممان اینرسی و S نشست شمع می‌باشند. در شکل ۶ میانگین مقدار "میانگین مربعات خطا" MSE و کمینهٔ آن در هر تکرار نشان داده که که به سمت همگرایی حرکت می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهند با افزایش تکرار تولید نسل، مقدار خطا در پیش‌بینی باربری کاهش می‌یابد بطوریکه بعد از ۶۰ تکرار نتایج کاملا همگرا می‌شود. این نتایج برای هر دو نوع شمع فلزی و بتنی، نتایج مشابه را نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۷ مقایسه میان مقدار واقعی اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های میدانی با مقادیر پیش‌بینی شده روابط پیشنهادی برای هر یک از شمع‌های فلزی و بتنی آورده شده است که بیانگر از انطباق‌پذیری و همگرایی خوب نتایج دارد. شمع فولادی به دلیل جداره نازک و سطح مقطع اندک در مقایسه با شمع بتنی پیش ساخته که دارای سطح مقطع بزرگتری است، دارای رفتار متفاوتی می‌باشند که در شکل ۷ از مقایسه نتایج هر دو نوع شمع قابل مشاهده است. این نتایج نشان می‌دهند که که روش محاسبات نرم برتر از روش‌های گرادیانی است چرا که نیازمند پیوستگی متغیرها نیستند.

لازم به ذکر است تاثیر مشخصات خاک در این تحلیل بسیار مهم هستند که در این بررسی اثرات آن تنها در نشست شمع دیده شده است. همچنین باید توجه داشت این روابط برای خاک ماسه‌ای-سیلتی پیشنهاد شده است و ممکن است برای دیگر خاک‌ها دقت کافی را نداشته باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

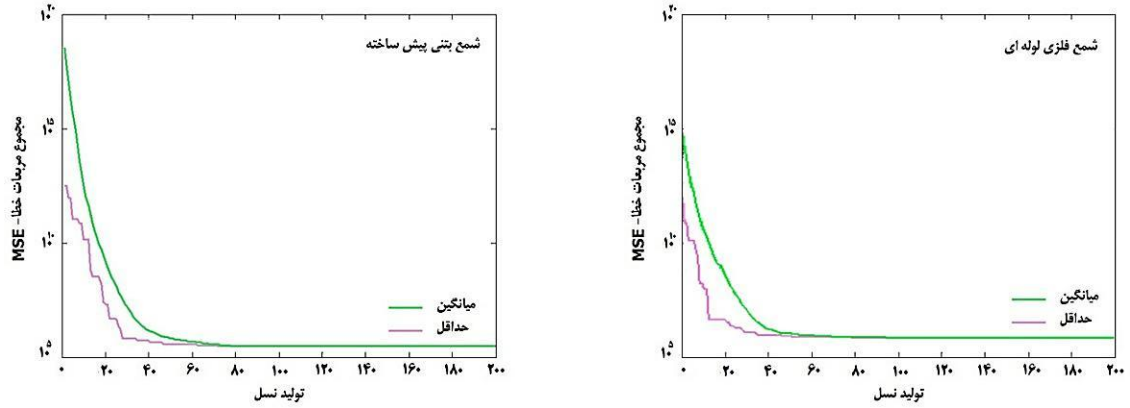
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

رابطه پیشنهادی برای شمع فولادی لوله‌ای

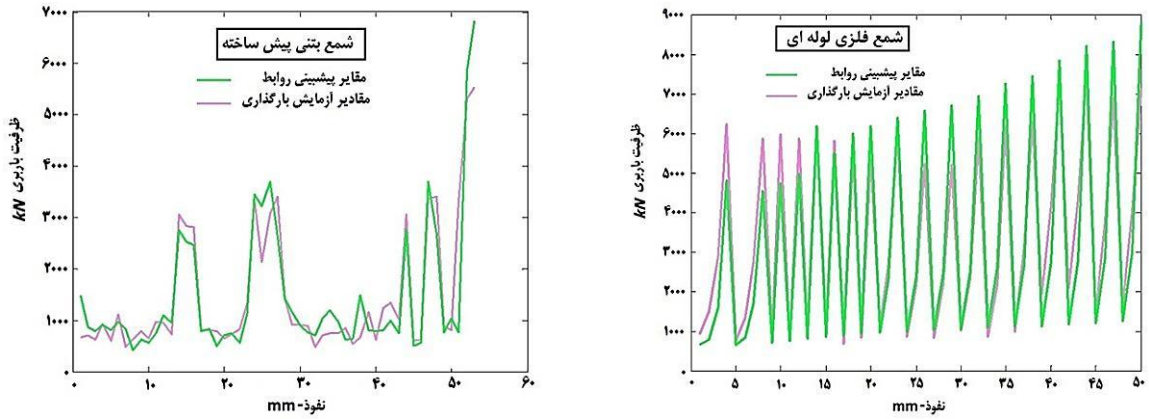
$$Q= -24.3677t - 2.1004D + 0.2187L + 0.0717A - 0.6883W + 0.0554I - 99.0581S \quad (۲)$$

رابطه پیشنهادی برای شمع بتنی پیش‌ساخته

$$Q= -7.8703D + 0.0718L - 0.008A + 1.372W - 1.1288e^{-0.05}I + 50.0832S \quad (۳)$$



شکل ۶- مقایسه میانگین مربعات خطا و کمینهٔ خطا در هر تکرار



شکل ۷- مقایسه ظرفیت باربری از روابط پیشنهاد شده با آزمایش بارگذاری

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ظرفیت باربری محوری شمع و مدلسازی عددی آن در نرم افزار *Plaxis* تحت بار هارمونیک برای دو نوع شمع بتنی پیش‌ساخته و شمع فلزی لوله‌ای مورد بررسی قرار گرفت تا در ادامه با استفاده از نتایج آن، بتوان با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، یک رابطه تخمینی اما با دقت مناسب برای ظرفیت باربری هر یک از شمع‌های مذکور بدست آورد. خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق را بصورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

- استفاده از نرم‌افزار المان محدود *Plaxis2D* در تحلیل دینامیکی شمع و تعیین ظرفیت باربری از دقت قابل قبولی برخوردار است.
- آنالیز المان محدود در برنامه *Plaxis* نشان می‌دهد نتایج ظرفیت باربری انطباق پذیری خوبی با نتایج روش‌های بارگذاری استاتیکی و کوبش شمع *PDA* و روابط تحلیلی تجربی دارد.
- در پروژه‌های ساحلی و فرا ساحلی، استفاده از روش‌های تحلیلی در طراحی شمع، همواره نیازمند اعتبارسنجی با انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی یا کوبش دینامیکی شمع *PDA* می‌باشد که این روش‌ها پرهزینه و زمانبر هستند. لذا استفاده از روابط مبتنی بر نتایج این آزمایشها می‌تواند بسیار راهگشا باشد.
- در معرفی این روابط از مدل رفتاری مناسب سخت شوندگی کرنش (*HS*) استفاده شده است که یک مدل رفتاری موثر و توانمند در بارگذاری و باربرداری‌های سریع نظیر کوبش شمع می‌باشد.
- در این تحقیق استفاده از هوش مصنوعی با الگوریتم ژنتیک به منظور جهت بهینه‌سازی مسائل خطی و غیر خطی در مهندسی ژئوتکنیک مورد تایید قرار گرفت که با انتخاب یک تابع برازندگی مناسب محقق خواهد شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

• با افزایش داده‌های ورودی در روش هوش مصنوعی با الگوریتم ژنتیک می‌توان بهینه سازی کاملتر و روابط بهتر با دقت بیشتری ارائه داد.

• تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهند طول و سطح مقطع شمع بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری محوری فشاری شمع دارند.

کلید واژگان

[1] Pile Driving Analyzer
[2] Genetic Algorithm
[3] High Strain Dynamic Pile Test

۷- مراجع و منابع

1- Mandolini A., Laora A. and Mascarucc Y. (2013), *Rational Design of Piled Raft*, 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius Gediminas Technical University, Procedia Engineering, Vol. 57, p. 45–52.

2- Alnuaim, A., Naggar, H., Naggar, M. (2014), *Performance of Micropiled Raft in Sand Subjected to Vertical Concentrated Load: Centrifuge Modeling*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 52, No. 1, p. 33-45.

3- Mohamed A. Shahin, (2014), *Load–settlement modeling of axially loaded steel driven piles using CPT-based recurrent neural networks*, Soils and Foundations, Vol. 54, No. 3, p. 515-522.

4- Lee, K. M. and Xiao, Z. R. (2013), *A Simplified Nonlinear Approach for Pile Group Settlement Analysis in Multilayered Soils*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, No. 5, p. 1063-1080.

5- Kim, H. T., Yoo, H. K., and Kang, I. K. (2001), *Genetic Algorithm-Based Optimum Design of Piled Raft Foundations with Model Tests*, Geotechnical Engineering, Vol. 33, p. 1-11.

6- Belevičius, B., Ivanikovas, S., Šešok, D., Valentinavičius, S., Žilinskas, J. (2011), *Optimal Placement of Piles in Real Grillages Experimental Comparison of Optimization Algorithms*, 124X Information Technology and Control, Vol. 40, No. 2, p. 22-36.

7- Momeni, E., Nazir, R., Jahed Armaghani, D., Maizir, H. (2014), *Prediction of pile bearing capacity using a hybrid genetic algorithm-based ANN*, Measurement, Vol. 57, No. 1, p. 122–131.

8- Beranti M., Golashani A. and Yasrebi Sh. (2014), *Determination of Bearing Capacity for Driven Piles in Sandy Soils by Using Artificial Neural Network Method*, Modares Civil Engineering Journal, Vol. 14, No. 20, p. 27-36. (In Persian)

9- Padfield, C. J., and Sharrock, M. J. (1983), *Settlement of Structures on Clay Soils*, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), U.K.

10- Hwang J., Chung M., Juang D., Lyu Y., and Juang C. (2011), *Practical optimization of group piles using discrete Lagrange multiplier method*, Optimization and Engineering, Vol. 12, No.1-2, p. 83-109.

11- Reul, O. and Randolph M. F. (2003), *Piled rafts in overconsolidated clay: Comparison of in situ measurements and numerical analyses*, Geotechnique, Vol. 53, No. 3, p. 301- 315.

12- Feng Yu and Jun Yang, (2012), *Base Capacity of Open-Ended Steel Pipe Piles in Sand*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 138, Issue 9.

13- Fellenius B. H., (1980), *The Analysis of Results from Routine Pile Load Test. Ground Engineering*, *Geotechnical News Magazine*

14- Smith E. A. (1986), *Pile Driving Analysis by the Wave Equation*, Journal of Soil Mechanics and Foundations, Division 86.

15- Goble G., Rausche F., and Moses F. (1970), *Dynamic Studies on the Bearing Capacity of Piles - Phase III*, Final Report to the Ohio Department of Highways, Case Western Reserve Univ, Cleveland, Ohio.

16- Vesic S. (1977), *Design of Pile Foundation*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice, Vol. 42, Washington, DC.

17- Meyerhof G. (1976), *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 110, No.1, p. 197-228.

18- Coyle M. and Castello R., (1981), *New Design Correlations for Piles in Sand, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, p. 967-986.

19- Beraja M Das, (2016), *Principles of Foundation Engineering*, 7th Edition, Published by Cengage.

20- Momeni H., Maizir, H., Gofar, N., Nazir, M., (2013), *Comparative Study on Prediction of Axial Bearing Capacity of Driven Piles in Granular Materials*, Journal Teknologi, Vol. 61, No.3, p. 25-37.

21- Khoshkho M, Keyhanina A. and Firooznia A. (2015), *Case Study Investigation of Bearing Capacity of Steel Piles in Coastal Projects of Assaluyeh Region and Comparison of Results of Dynamic and Static Bearing Capacity Experiments*, Second National Conference on Soil Mechanics and Engineering, Qom University of Technology. (In Persian)

22- FelleniusB., (1980), *The Analysis of Results from Routine Pile Load Test, Ground Engineering, Geotechnical News Magazine.*

23- Lebeau J. (2008), *FE-Analysis of Piled and Piled Raft Foundations*, Graz University of Technology.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]

24- Momeni, E. Nazir, R., Jahed Armaghani, D. and Maizir, H (2014), *Prediction of Pile Bearing Capacity Using a Hybrid Genetic -based ANN*, Vol. 57, No. 2, p. 122-131.

25- Goldberg, D. E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, New York.

26- Bavi O. and Salehi M. (2015), *Genetic Algorithms and Optimization of Composite Structures*, Abed Publication, Tehran. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.9.6]