



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Determining the Equivalent Elastic Modulus Relationship for Multi-layered Soils in Immediate Settlement Calculations of Shallow Foundations Using Combined FEM and EPR Numerical Modeling

Masoud Motalebian^{*1}, Farhad Pirmohammadi Alishah²

1*- Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Shab.C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Received: 23 October 2025; Revised: 26 November 2025; Accepted: 29 November 2025; Published: 21 March 2026

Abstract

Determining foundation settlement, alongside calculating ultimate bearing capacity, is a prerequisite for geotechnical studies. In this regard, the immediate settlement of foundations is one of the most dominant conditions related to shallow foundation settlement. Given that in many cases, the soil beneath the foundation has layering with varying conditions, insufficient attention to these variations and incorrect parameter estimation can be detrimental. With advancements in computer hardware and software, the speed and accuracy of calculations have increased in recent years. Furthermore, the proven capabilities of finite element modeling methods and data mining techniques based on computational intelligence provide the possibility to simulate complex conditions and analyze relationships between variables using large datasets derived from simulation results. The main objective of this research is to present a relationship for the equivalent elastic modulus of foundation soil layers to improve the accuracy of immediate settlement calculations without the need for complex modeling. To this end, the equivalent elastic modulus of the complex layered soil beneath the foundation is first calculated using three-dimensional finite element modeling and the well-known PLAXIS 3D software. To increase the accuracy and speed of modeling, a plate element was used for the foundation, and the thickness of the layers was considered as a fraction of the foundation width. By performing numerous three-dimensional modelings for varying layer thicknesses and elastic moduli of the layers, a database for the equivalent elastic modulus of the soil beneath the foundation is generated. Then, data analysis and investigation of the relationships between variables are performed using the Evolutionary Polynomial Regression (EPR) algorithm. The derived relationship shows good accuracy in estimating the equivalent elastic modulus of multi-layered soils calculated from finite element modeling.

Keywords: Elastic foundation settlement, Equivalent soil elastic modulus, Finite element modeling, Evolutionary regression

Cite this article as pirmohammadi alishah,F and Motalebian,M . (2026). Determining the Equivalent Elastic Modulus Relationship for Multi-layered Soils in Immediate Settlement Calculations of Shallow Foundations Using Combined FEM and EPR Numerical Modeling. (e235029). Civil and Project, 8(1), e235029 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.561493.1413>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: Petrofarhad@iaui.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

تعیین رابطه مدول الاستیسیته معادل خاک‌های چند لایه در محاسبات نشست آنی پی‌های سطحی توسط مدلسازی عددی ترکیبی FEM و EPR

مسعود مطلبیان^{۱*}، فرهاد پیرمحمدی علیشاه^۲

^{۱*} - گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران
^۲ - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران

تاریخ دریافت: ۰۱ آبان ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۵ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۸ آذر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ فروردین ۱۴۰۵

چکیده:

تعیین نشست پی در کنار محاسبه ظرفیت باربری گسیختگی از ملزومات مطالعات ژئوتکنیک می‌باشد. در این مورد، نشست آنی پی، یکی از غالب ترین شرایط مربوط به نشست پی‌های سطحی می‌باشد. با توجه به اینکه در موارد بسیاری، خاک زیر پی دارای لایه بندی با شرایط متغیر می‌باشد، عدم توجه کافی به این تغییرات و برآورد ناصحیح پارامترها میتواند زیانبار باشد. با توجه به پیشرفت سخت افزاری و نرم افزاری رایانه ها، سرعت و دقت محاسبات در سال‌های اخیر افزایش یافته است. همچنین توانمندی اثبات شده روشهای مدلسازی اجزای محدود و روش‌های داده کاوی متکی بر هوش محاسباتی رایانه‌ای، امکان شبیه سازی شرایط پیچیده و بررسی ارتباط بین متغیرها به کمک تعداد داده بزرگ مبتنی بر نتایج شبیه سازی را فراهم نموده است. هدف اصلی این پژوهش ارائه رابطه‌ای برای معادل سازی مدول الاستیسیته لایه‌های خاک پی از نوع سیلت متراکم به منظور افزایش دقت محاسبات نشست آنی پی بدون نیاز به مدلسازی های پیچیده می‌باشد. بدین منظور در ابتدا توسط مدلسازی سه بعدی اجزای محدود و نرم افزار شناخته شده PLAXIS 3D مدول الاستیسیته معادل لایه‌بندی پیچیده خاک زیر پی محاسبه می‌شود. در جهت افزایش دقت و سرعت مدل سازی، از الزام صفحه برای پی استفاده شد و ضخامت لایه‌ها به صورت کسری از عرض پی منظور شد. با انجام مدل سازی‌های سه بعدی متعدد برای شرایط متغیر ضخامت لایه ها، و مدول الاستیسیته لایه‌ها، پایگاه داده‌ای برای مدول الاستیسه معادل خاک زیر پی تولید می‌گردد. سپس تحلیل پایگاه داده و واکاوی ارتباط بین متغیرها، توسط الگوریتم رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی EPR انجام می‌شود. رابطه بدست آمده دقت مناسبی در تخمین مدول الاستیسه معادل خاک‌های چند لایه محاسبه شده از نوع سیلت متراکم، از مدلسازی اجزای محدود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی:

نشست الاستیک پی، مدول الاستیسیته معادل خاک، مدلسازی اجزای محدود، رگرسیون تکاملی.

۱- مقدمه

خاک و سنگ که مصالح تشکیل دهنده لایه های زمین هستند، به علت ویژگی های خاص آنها و فرآیندهای طبیعی و فیزیکی نامنظم مربوط به شکل گیری آنها، رفتار متغیر و پیچیده ای از خود نشان می دهند. لذا مباحث حوزه ژئوتکنیک همواره با چالشهایی در زمینه پیش بینی پاسخ لایه های زمین در مقابل بارگذاری همراه بوده است. مهندسی ژئوتکنیک در دهه های اخیر به طور قابل توجهی پیشرفت نموده است و این پیشرفت ها مرهون تحولات درک نظری و تجربی رفتار خاک و توسعه توانایی های فناورانه می باشد. در شیوه های مرسوم محاسبات ظرفیت باربری پی ها، ساده سازی هایی برای شرایط پیچیده لایه بندی زمین انجام می شود. این روش ها، در عین مفید بودنشان، ممکن است در به تصویر کشیدن تعاملات پیچیده بین خاک و پی تحت بارگذاری در شرایط مختلف زمین ناکام باشند (Bahrami and Mohammadi, 2019). در پروژه های بزرگ معمولاً به علت حساسیت محاسبات، جهت تخمین نشست پی ها از آزمایشات برجا از قبیل بارگذاری صفحه ای، پرسیومتری و ... همراه با مدلسازی های رایانه ای لایه بندی پیچیده زمین بهره گرفته می شود. با اینحال انجام این فرآیند برای تمامی پروژه ها مقدور نبوده و در کارهای روزمره از داده های محدود به همراه قضاوت مهندسی و روش های ساده سازی توصیه شده برای شرایط پیچیده استفاده می شود.

با رشد و توسعه فن آوریهای نوین، حوزه علم مهندسی ژئوتکنیک نیز از این پیشرفت ها بی بهره نبوده و در زمینه محاسبات پیچیده اندرکنش خاک و سازه از این پیشرفتهای به نحو مطلوبی بهره مند گردیده است. در این زمینه، روش مدل سازی المان محدود^۱ یا اجزای محدود به عنوان ابزاری تحول آفرین ظاهر شد که امکان شبیه سازی دقیق تر و جزئی تر این تعاملات را تحت محیط مجازی محاسباتی رایانه ای فراهم کرد. مطالعات و تحقیقات انجام یافته در این زمینه و مقایسه نتایج آنها با شرایط واقعی، دقت این روش مدلسازی را به اثبات رسانده است. الگوریتم FEM مسئله را به عناصر مجزا تقسیم می کند و امکان نمایش دقیق تغییرات خواص خاک و اندرکنش آن با پی و اعمال شرایط مرزی واقعی را فراهم می آورد (Yaghoubi et al., 2023). این روش توانایی ما را برای مطالعه دقیقتر اندرکنش خاک و سازه در شرایط پیچیده زمین و پیش بینی رفتار نشست با دقت بیشتر به طور چشمگیری بهبود بخشیده است. علیرغم کارایی مناسب روش FEM، دستیابی به نتایج مناسب توسط این روش، منوط به مدلسازی دقیق شرایط زمین و درستی انتخاب مدل رفتاری خاک و تنظیم درست پارامترهای مربوط به آن می باشد. لذا پیش نیازهای مربوط به این روش در زمینه نیاز به دانش مربوط به مدلسازی و حساسیت به ایجاد تنظیمات صحیح، دشواریهایی را در بکارگیری از این روشها به دنبال دارد. به منظور جبران محدودیت های مربوط به روش FEM میتوان از روشهای نوین داده کاوی مبتنی بر هوش محاسباتی رایانه ای بهره برد. این روش ها به علت قابلیت های بالا در زمینه تشخیص الگوهای پیچیده و به ویژه رفتار پیچیده مصالح ژئوتکنیکی و اندرکنش خاک-سازه و برتری اثبات شده قابلیت پیش بینی آنها در مقایسه با روشهای مرسوم، به مرور زمان و مخصوصاً در سالهای اخیر به کاربرد و محبوبیت آنها افزوده شده است (Karimie et al., 2021). الگوریتم عمومی روش های مبتنی بر هوش مصنوعی محاسباتی که به روشهای محاسبات نرم نیز معروف هستند، در حوزه تحلیل مسائل مهندسی، شامل آموزش کد نرم افزاری توسط داده های ورودی و خروجی معرفی شده به آنها است که در نتیجه فرآیند جستجوی الگوی بین ورودی ها و خروجی ها، ارتباط بین داده ها بدست می آید؛ به عبارت دیگر روشهای مذکور به روشهای داده کاوی موسوم هستند که برای تعیین ساختار حاکم بر یک پدیده یا سیستم صرفاً بر پایگاه داده متکی بوده و از هرگونه فرضیات اولیه در مورد رفتار فیزیکی سیستم بی نیاز می باشند. این روش در تضاد با اکثر روشهای سنتی تشریح مدلهای رفتاری است که مبتنی بر قوانین فیزیکی بوده و اصول اولیه ای را برای استنتاج روابط مربوط به سیستم بکار می گیرند. این مورد، یکی از مزایای اصلی این روشها در مقایسه با سایر روشهای سنتی مدلسازی می باشد.

روشهای محاسباتی نرم، در حال رشد و توسعه می باشد. در حال حاضر به عنوان مثالهایی از این روشها می توان از شبکه های عصبی مصنوعی^۲ (ANN)، الگوریتم و برنامه ریزی ژنتیک^۳ (GA, GP)، ماشین های بردار پشتیبانی^۴ (SVM)، جنگل تصادفی

^۱ Finite Element Method (FEM)

^۲ Artificial Neural Networks

^۳ Genetic Algorithms , Genetic Programming

^۴ Support Vector Machines

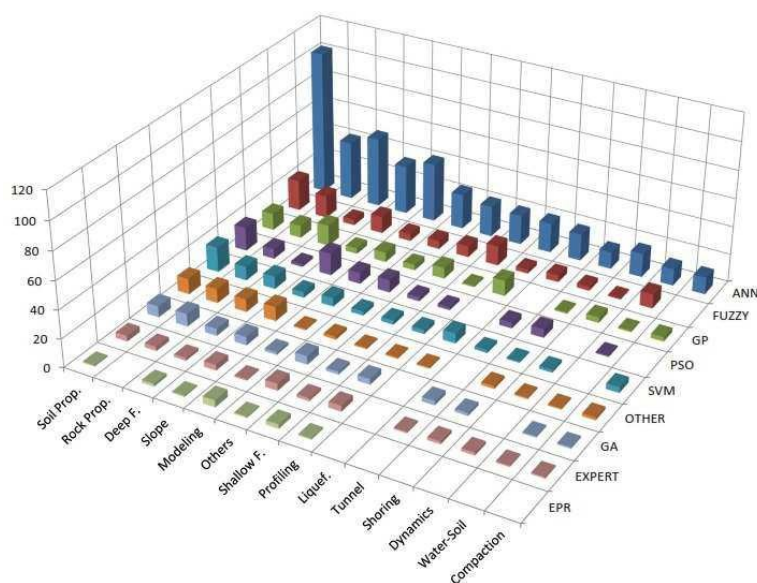
(RM)، درختان تصمیم (DT) و زیر مجموعه های آنها نام برد. در بین این روشها ANN تا کنون پرکاربردترین روش AI در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. در سالهای اخیر، GP، GA و روشهای مبتنی بر الگوریتم آنها به کرات در حوزه مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته و موفقیت آن اثبات شده است (Shahin, 2015). علیرغم موفقیت بسیاری از این روشها، محدودیت های در بکارگیری آنها وجود دارد. نتایجی که طیف گسترده ای از این روشها تولید می کند قابلیت کاربرد بسیار محدودی داشته و فاقد شفافیت نحوه تاثیر متغیرها بر یکدیگر می باشد. روشهای مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و برنامه ریزی ژنتیک و به ویژه روش EPR^5 که ترکیبی از رگرسیون چند جمله ای و الگوریتم ژنتیک می باشد با ارائه مدلهای با ساختار ریاضی و سمبلیک بر این مسئله فائق آمده است. الگوریتم EPR به جهت امکان تولید روابط ساده و کاربردی بین متغیرها و همچنین سرعت بالای آن در همگرایی مدلسازی و رسیدن به جواب، یکی از روشهای داده کاوی مناسب و ممتاز در زمینه محاسبات نرم می باشد.

۲- پیشینه تحقیق

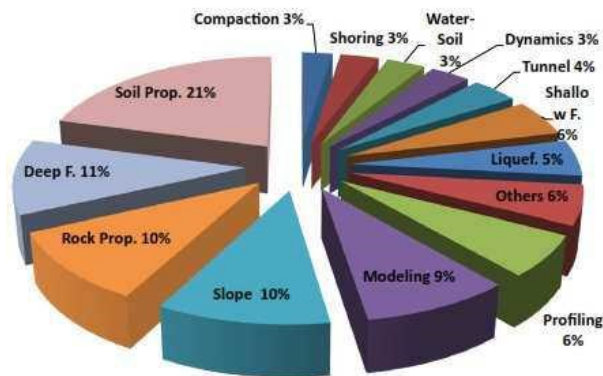
به عنوان یکی از کارهای اولیه مربوط به تجزیه و تحلیل پی های کم عمق روی خاک لایه ای میتوان به تحقیقات Burmister (۱۹۴۵) اشاره نمود. تئوری کلی تنش ها و جابجایی ها در یک سیستم خاکی دو لایه توسعه داده شد و ارزیابی عددی معادله نشست سطحی در قالب منحنی های تاثیر ارائه شد که می تواند مستقیماً برای تحلیل مسائل عملی مورد استفاده قرار گیرد. فرض بر این بود که دو لایه خاک به طور کامل در تماس بوده و مقاومت برشی بین آنها کاملاً فعال می باشد که موجب اطمینان از تداوم کامل تنش و جابجایی در سطح مشترک بین لایه ها خواهد بود. توسط این محقق، این تحقیق در رابطه با سطح لایه های خاک بدون اصطکاک گسترش یافت و متعاقباً، این نظریه برای مورد سیستم خاک سه لایه با تداوم کامل در سطح مشترک بین لایه های خاک گسترش یافت. معادله نشست در سطح زمین استخراج شد که کاربرد مستقیمی برای مسائل مهندسی فونداسیون و فرودگاه پیدا می کند. Davis و Poulos (۱۹۷۲) با استفاده از تئوری انتشار ساده تحکیم، مجموعه ای از راه حل ها را برای مقدار نشست پی های دایره ای و نواری بر روی یک لایه خاک ارائه کردند. بررسی تئوری برای مطالعه تاثیر ناهمسانگردی خاک و یک لایه شنی روی لایه رس انجام شد. بر این اساس، راه حل ها با توجه به این عوامل تصحیح شد و می تواند در مورد سیستم خاک لایه ای اعمال شود. Davies و Banerjee (۱۹۷۸) با ادغام راه حل های سری نامتناهی به دست آمده با تکنیک تبدیل انتگرال، جابجایی ها را در هر دو لایه یک نیمه فضای الاستیک دو لایه به دست آوردند. بارهای افقی و عمودی در سطح مشترک لایه ها اعمال شد. راه حل با اطمینان از ارزیابی دقیق و کارآمد جابجایی ها به سرعت همگرا شد. Gazetas (۱۹۸۰) یک روش تحلیلی- عددی برای تجزیه و تحلیل استاتیکی و دینامیکی پی های نواری بر روی محیط همسانگرد الاستیک متشکل از لایه های ناهمگن ارائه کرد. پروفیل خاک شامل لایه های افقی با تغییر دلخواه سرعت موج S با عمق است. نتیجه گیری شد که برای عوامل فرکانس پایین، جابجایی ها یا چرخش های محیطی همگن و ناهمگن تقریباً در سطح متوسط یکسان است. Rowe و Booker (۱۹۸۴) تکنیکی را برای تحلیل خاک لایه ای ایجاد کردند. این رویکرد تحلیلی شامل وارونگی عددی تبدیل فوریه بود. تاثیر ضخامت لایه و خواص الاستیک بر تغییر شکل های عمودی و جانبی در زیر بارگذاری دایره ای مورد بررسی قرار گرفت. Booker و Small (۱۹۸۴) یک ماده الاستیک با لایه بندی افقی را با استفاده از یک ماتریس انعطاف پذیری لایه محدود دقیق تجزیه و تحلیل کردند. این روش برای غلبه بر مشکلی که می تواند به دلیل رفتار تراکم ناپذیر در شرایط زهکشی نشده ایجاد شود مفید است. Chow (۱۹۸۷) یک روش عددی را برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل عمودی پی های صاف و صلب با شکل دلخواه بر روی محیط خاک همگن و لایه ای توصیف کرد. برای یک محیط خاک لایه ای، ضرایب انعطاف پذیری از تحلیل المان محدود متقارن محوری که اساساً دو بعدی است تعیین شد. راه حل های پارامتری برای پاسخ شالوده های مستطیلی بر روی برخی از پروفیل های خاک معمولی ارائه شد. استفاده از یک روش ساده برای تخمین نشست پی های مستطیلی بر روی یک محیط خاک لایه ای با راه حل های همگن و الاستیک نیز مورد بحث قرار گرفت.

یک رویکرد مبتنی بر معادله انتگرال مرزی توسط Jommi و Novati (۱۹۸۹) برای پی زبر و صلب که بر روی خاک لایه‌ای قرار دارد با در نظر گرفتن فرض کرنش صفحه دو بعدی توصیف شد. دامنه نامتناهی مرز جانبی با معرفی یک عنصر مرزی نامحدود مدل‌سازی شد. روش حل سختی متوالی برای ارزیابی پاسخ اتخاذ شد. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی با تجزیه و تحلیل المان محدود استاندارد و المان مرزی با مرز محدود مقایسه شد. صرفه جویی قابل توجهی در تلاش‌های محاسباتی بدون کاهش دقت با معرفی عناصر بی‌نهایت در مقایسه با مرزهای جانبی مشاهده شد. پاسخ واقعی تر و دقیق تر ممکن است با ادغام عناصر مرزی بی‌نهایت در حوزه‌های خاکی تک لایه و چند لایه به دست آید. اعظم و همکاران (۱۹۹۱) از آنالیز المان محدود ۲ بعدی کرنش صفحه برای بررسی رفتار پی‌های نواری روی یک خاک همگن و خاک دو لایه استفاده کرد. اثر فضای خالی پیوسته با در نظر گرفتن هر دو حوزه خاک، با و بدون فضای خالی مورد بررسی قرار گرفت. هنگامی که عمق سنگ بستر برابر یا بیشتر از شش برابر عرض پی بود، تأثیر سنگ بستر بر پاسخ پی ناچیز بود. در یک خاک دو لایه، ضخامت لایه رویی و نسبت مقاومت دو لایه به عنوان پارامترهای مهم کنترل‌کننده پاسخ پی معرفی شد. درجه تأثیر فضای خالی بر پاسخ پایه به محل فضای خالی، عمق به سنگ بستر، نسبت ضخامت لایه و نسبت استحکام لایه بستگی دارد. Conte و Dente (۱۹۹۳) یک روش عددی را برای پیش‌بینی رفتار خاکهای لایه‌ای برای شرایط کرنش صفحه با استفاده از روش سختی پیشنهاد کردند. برای بررسی اثر گنجاندن یک لایه نرم / سفت در لایه‌های همگن خاک بر رفتار پی‌های نواری استفاده شد. نتایج با نتایج به دست آمده از ادبیات قبلی که از روش‌های عددی دیگر برای دامنه خاک چندلایه تحت شدت یکنواخت استفاده می‌کردند، مقایسه شد و مشخص شد که مطابقت نزدیکی دارند. این روش نتایج دقیقی را با تلاش محاسباتی کمتر ارائه می‌دهد، از این رو می‌توان به جای روش‌های عددی دیگر مانند روش اجزای محدود (FEM) و BEM استفاده کرد. مطالعه پارامتریک نشان داد که گنجاندن یک لایه نرم / سفت در لایه‌های همگن خاک، تغییر شکل‌های پی را تغییر می‌دهد که وقتی لایه نرم و نزدیک به سطح بود، تغییر شکل بیشتر بود. مطالعه‌ای با استفاده از FEM قطعی همراه با شبیه‌سازی مونت کارلو توسط نور و همکاران انجام شد (۲۰۰۲). برای پیش‌بینی نشست و نشست دیفرانسیل یک جفت پی در خاک ناهمگن، که مدول الاستیک و نسبت پواسون به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند. با افزایش تغییرات مدول الاستیک، نشست و نشست غیریکنواخت افزایش یافت. با این حال، مشخص شد که نشست با افزایش متغیر نسبت پواسون کاهش می‌یابد و نشست غیریکنواخت تحت تأثیر متغیر بودن این پارامتر قرار نگرفت. تأثیر معنی‌دار نسبت طول لایه‌ها هم بر روی آمار نشست و هم بر آمار نشست غیریکنواخت مشاهده شد. Shvets و همکاران (۲۰۰۳) راه حلی را برای تعیین تنش‌ها در یک بستر پی ارائه کرد که با یک نیم فضای تغییر شکل خطی نشان داده شد و برای پی‌هایی با سطوح پایین دایره‌ای یا مربعی که فراتر از محدوده‌های ناحیه بارگذاری شده گسترش می‌یابد، در نظر گرفته شده است. برای بررسی تشکیل قیف نشست، آزمایش‌ها بر روی خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده بسترهای همگن و لایه‌ای انجام شد. قیف‌های نشست محاسبه شده مطابق با روش پیشنهادی به اندازه کافی نزدیک به مقادیر تجربی برای انواع بسترهای چند لایه آزمایش شده بودند. Kuo (۲۰۰۴) با استفاده از ترکیب مدل‌سازی المان محدود سه بعدی و روش احتمالی شبیه‌سازی مونت کارلو تأثیر لایه بندی خاک زیر پی را بر روی نشست آنی بررسی نمود. خاک مورد بررسی به صورت دو لایه با ضخامت و مدول الاستیسته متغیر و ضریب پواسون ثابت بوده است. عمق کلی مجموع لایه‌ها برابر با ۳۰ متر و عرض پی برابر با ۲ و ۴ متر انتخاب شده است. نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد لایه‌های سطحی تأثیر بیشتری بر روی تغییرات نشست پی داشته است. Thome و همکاران (۲۰۰۵) روشی را برای ارزیابی پاسخ پی کم عمق بر روی خاک لایه‌ای که از خاک سمانته بر روی خاک سست تشکیل شده بود، پیشنهاد کرد. مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری صفحه صحرایی و شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شد. نتایج بدست آمده منجر به یک روش طراحی نیمه تجربی برای پی‌های کم عمق بر روی بسترهای خاکی دو لایه شد. Maheshvari و Madhav (۲۰۰۶) روشی را برای تجزیه و تحلیل پی‌های نواری روی محیط‌های سه لایه خاک با استفاده از تئوری کشسانی پیشنهاد کردند. پاسخ پایه با حل معادلات دیفرانسیل حاکم به همراه شرایط مرزی و پیوستگی مناسب با استفاده از روش تفاضل محدود به دست آمد. مطالعه پارامتریک نشان داد که یک لایه نازک و بسیار سفت در بین دو لایه نرم تر به عنوان یک صفحه عمل می‌کند و به توزیع مجدد تنش‌ها در لایه پایینی خاک کمک می‌کند. علاوه بر این، نشست پی با حضور چنین لایه‌ای که بین دو لایه نرم‌تر خاک قرار گرفته است به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. Maheshvari و Viladkar (۲۰۰۷) مطالعه پارامتری بیشتری را برای مشاهده تأثیر ضخامت‌های نسبی و مدول‌های

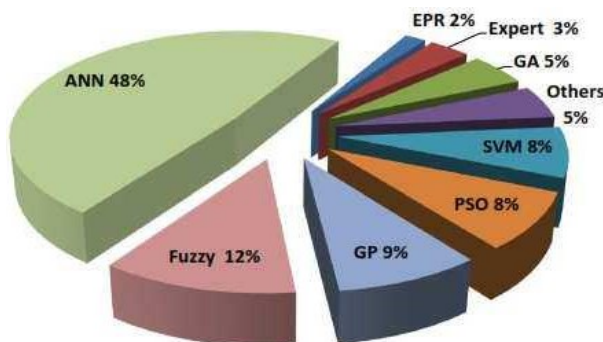
الاستیک نسبی لایه‌های خاک بر پاسخ سیستم خاک - پی گسترش دادند. تأثیرات مشاهده شده برای تمام محدوده ممکن از پارامترهای فیزیکی مربوط به مطالعه، کمی سازی شد. Dhar و Tarefder (۲۰۱۱) یک روش ساده شده جدید را برای پیش بینی توزیع مجدد تنش در سیستم های دو لایه با مدول خاک کاهشی در عمق توسعه دادند. مفهوم "عمق معادل" و راه حل بوسینسک برای محاسبه تنش ها برای یک محیط دو لایه با استفاده از یک محاسبه صفحه گسترده تحت بارهای نوار ترکیب شد. در این روش، کرنش‌های عمودی در لایه‌های میانی با استفاده از روابط تشکیل‌دهنده الاستیک خاک، که در اعماق لایه برای تعیین نشست لایه‌ها ادغام شدند، تعیین شدند. مشاهده شد که تحلیل بوسینسک سنتی با استفاده از خواص کشسانی لایه های خاک، نشست پی را بیش از حد برآورد می کند که با افزایش سختی لایه و ضخامت لایه بالایی افزایش می‌یابد. Jeong و Lee (۲۰۱۸) مدلسازی عددی المان محدود را برای پی رینگی برای تغییرات پارامترهای خاک و پی انجام دادند. متغیرهای خاک، شامل مدول الاستیسته، ضریب پواسون و عمق خاک تا رسیدن به لایه سنگی یا صلب بوده و متغیر پی شامل قطر داخلی و خارجی آن بوده است. فرض شده که مدول الاستیسته به صورت خطی در عمق افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده از مدلسازی تطابق مناسبی با روابط موجود نشست پی نشان داده‌اند. این نتایج در قالب نمودارهایی برای استفاده های بعدی ارائه شده است. در دهه گذشته، هوش مصنوعی (AI) در مسائل مختلفی در حوزه مهندسی ژئوتکنیک با موفقیت به کار گرفته شده است. نمونه‌هایی از تکنیک‌های AI موجود عبارتند از: شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP)، رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی (EPR)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، درخت‌های مدل M5، k-nearest neighbors و ... از میان این روشها، شبکه‌های عصبی مصنوعی متداول‌ترین تکنیک AI در مهندسی ژئوتکنیک بوده است (Shahin, 2016). Ebid (۲۰۲۱)، تحقیقات انجام یافته در حوزه مهندسی ژئوتکنیک توسط تکنیک‌های مختلف AI طی ۳۵ سال گذشته را جمع بندی نمود. در شکل ۱ تعداد روشهای مورد کاربرد در این حوزه ارائه شده است. طبق بررسی وی، در زمینه پی های سطحی که شامل مباحث تعیین ظرفیت باربری، محاسبه نشست برو روی خاکهای چند لایه و بهینه سازی طراحی پی می‌باشد، ۵۲ مورد تحقیقات توسط ابزارهای مختلف AI در مباحث مذکور پی های سطحی در نشریات فنی دیده می‌شود. این میزان، ۶ درصد از کل مجموعه تحقیقات انجام شده توسط روشهای AI در کلیه مباحث حوزه مهندسی ژئوتکنیک را تشکیل می‌دهد (شکل ۲). ۲۲ مورد از این تحقیقات توسط شبکه عصبی مصنوعی ANN انجام یافته است. تنها ۳ مورد از این تحقیقات توسط روش EPR انجام شده که در زمینه محاسبه نشست آبی پی سطحی (Shahnazari, 2014) و محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی سطحی (Pan, 2013 و Tsai, 2013) می‌باشد. همچنین سهم روش EPR از کل تحقیقات انجام شده توسط تکنیک‌های مختلف AI در زمینه های متفاوت حوزه مهندسی ژئوتکنیک ۲ درصد بوده است (شکل ۳).



شکل ۱- تعداد تحقیقات انجام شده در حوزه مهندسی ژئوتکنیک به کمک تکنیکهای AI (Ebid, 2021)



شکل ۲- درصد تحقیقات انجام شده در حوزه های مختلف مهندسی ژئوتکنیک به کمک تکنیکهای AI (Ebid, 2021)



شکل ۳- درصد هر یک از تکنیکهای AI از کل تحقیقات انجام شده در حوزه مهندسی ژئوتکنیک (Ebid, 2021)

به عنوان یکی از اولین فعالیتها در زمینه تخمین نشست آبی سطحی توسط تکنیکهای هوش مصنوعی، میتوان به پژوهش Sivakugan و همکاران (۱۹۹۸) اشاره نمود. داده های مربوط به ۷۹ مورد نشست اندازه گیری شده سطحی به همراه خصوصیات خاک و پی در هر یک از آنها جمع آوری شد و نشست پی توسط روش شبکه عصبی مصنوعی ANN مدل سازی گردید. پارامترهای ورودی مدلسازی شامل ۵ متغیر، بار وارده، عدد میانگین SPT، عرض پی، شکل پی و عمق مدفون پی بوده است. نتایج پیش بینی مدل بدست آمده از ANN با نتایج روشهای مرسوم شامل روش ترزاقی و پک و روش اشمرتمن مقایسه شد و نتیجه شد که روشهای مذکور، نشست بیشتری در حدود ۲ تا ۳ برابر مقدار واقعی بدست میدهند. Arnold (۱۹۹۹) تحقیق Sivakugan را توسعه داد و با جمع آوری داده های بیشتری مدلسازی به روش ANN را تکرار نمود و به نتایج با دقت مناسبی دست یافت.

پس از آن Shahin و همکاران (۲۰۰۲) در پژوهشی، تعداد ۱۸۹ مورد داده مربوط به نشست اندازه گیری شده سطحی و نتایج آزمایش نفوذ استاندارد SPT جمع آوری نمودند. روش ANN برای مدلسازی نشست پی سطحی با استفاده از داده های واقعی نشست آبی سطحی بکار گرفته شد. متغیرهای ورودی مدلسازی شامل ۵ پارامتر عرض پی (متر)، نسبت طول به عرض پی، نسبت عمق مدفون پی به عرض پی، میانگین عدد SPT در عمق تاثیر تنش زیر پی و بار وارده از پی (kPa) بوده است. پارامتر خروجی مدلسازی نیز نشست پی (میلیمتر) و مطابق رابطه (۱) می باشد. مدل تولید شده دقت مناسبی در تخمین نشست پی نسبت به داده های واقعی نشان داده است.

$$S_p = 0.6 + \left[\frac{120.4}{1 + e^{(0.312 - 0.725 \tanh x_1 + 2.984 \tanh x_2)}} \right] \quad (1)$$

$$x_1 = 0.1 + 10^{-3} [3.8B + 0.7q + 4.1N - 1.8(L/B) + 19(D_f/B)]$$

$$x_2 = 10^{-3} [0.7 - 41B - 1.6q + 75N - 52(L/B) + 740(D_f/B)]$$

در پژوهش دیگری Shahin و همکاران (۲۰۰۳)، این بار از روش عصبی فازی (neurofuzzy) برای مدلسازی نشست آنی پی با داده های قبلی و با متغیرهای مشابه بهره گرفتند که نتایج بدست آمده موفقیت آمیز بوده است.

در امتداد تحقیق Shahin، پژوهش دیگری به روش مدلسازی با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک GP جهت تخمین نشست آنی پی سطحی توسط Rezania (۲۰۰۷) انجام شد. داده های مدلسازی شامل ۱۷۳ مورد نتایج جمع آوری شده از نشست پی و نتایج آزمایش SPT بوده است. پارامترهای متغیر ورودی در این تحقیق شامل ۵ پارامتر عرض پی، طول پی، عمق مدفون پی، میانگین عدد SPT و بار وارده از پی (kPa) بوده است. متغیر خروجی مدلسازی نیز مطابق رابطه زیر، نشست آنی پی سطحی می باشد. مدل تولید شده به این روش نیز دقت مناسبی در تخمین نشست آنی پی در مقایسه با داده های واقعی نشان داده است. مدل GP با تعدادی از روشهای مرسوم محاسبه نشست پی و مدل Shahin مقایسه شد که دقت بالاتری نسبت به این روشها داشته است. در رابطه (۲) ابعاد و عمق پی بر حسب متر و نشست بر حسب میلیمتر می باشد.

$$S_c = \frac{q(1.80B + 4.62) - 346.15D_f}{N^2} + L^* \quad (2)$$
$$L^* = \frac{11.22L - 11.11}{L}$$

در پژوهش دیگری، Samui (۲۰۰۸) با استفاده از داده های فوق الذکر و روش مدلسازی ماشین بردار پشتیبان SVM، نشست آنی پی سطحی را مدلسازی نمود که روش بکار رفته در پیش بینی نتایج واقعی نشست پی، موفقیت آمیز بوده است. Erzin و Gul (۲۰۱۴) روشهای محاسبه نشست آنی پی با آزمایش نفوذ استاندارد را توسط روش شبکه عصبی مصنوعی مدلسازی نمودند. ۵ روش متداول محاسبه نشست آنی پی، مدلسازی گردید که مدلهای تولید شده دقت بالایی در مقایسه با روشهای اصلی داشته اند. Mohanty و Das (۲۰۱۸) از داده های Shahin (۲۰۰۲) استفاده نموده و مدلسازی نشست آنی پی را به یک روش ترکیبی شامل ترکیب روش الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب (NSGA II) و روش شبکه عصبی مصنوعی انجام دادند. متغیرهای ورودی مدلسازی شامل ۶ مورد عدد SPT، عمق مدفون پی، نسبت طول به عرض پی، نسبت عرض پی به عدد SPT، نسبت عمق مدفون پی به عرض پی و بار وارده از پی بوده است. مدل تولید شده، دقت بالایی نسبت به روش Shahin و سایر روشهای توسعه یافته بر مبنای داده های روش Shahin نشان داده است. Sasmal (۲۰۲۱) نشست آنی پی نواری تحت بارگذاری ترکیبی استاتیک و سیکلیک را توسط روش ANN مدلسازی نمود. پایگاه داده توسط مدلسازی در نرم افزار اجزای محدود Opensees تولید شد. متغیرهای منظور شده شامل عرض و عمق مدفون پی و مشخصات بارهای وارده بوده است. نتایج بدست آمده از مدلسازی روش ANN با نتایج مدلسازی اجزای محدود با PLAXIS 3D در حالت استاتیک مقایسه شد که دقت مناسبی نشان داده است.

۳- روش تحقیق

در این تحقیق در ابتدا توسط نرم افزار اجزای محدود PLAXIS 3D مدلسازی نشست پی سطحی تحت شرایط لایه بندی پیچیده خاک انجام می شود. همینطور مدلسازی های دیگری نیز توسط این روش برای شرایط لایه بندی یکنواخت خاک زیر پی انجام شده و نتایج دو حالت مذکور مقایسه می گردد. لذا برای یک نشست معلوم پی، توسط یک درونیابی ساده، مدول الاستیسته معادل لایه بندی پیچیده بدست می آید. این کار برای شرایط مختلف تغییرات ضخامت لایه ها و مدول الاستیسته هر لایه انجام می شود. به منظور کاهش زمان مدلسازی، عرض پی به عنوان یک متغیر مستتر در ضخامت لایه ها منظور می گردد؛ به عبارت دیگر ضخامت هر لایه به صورت ضریبی از عرض پی در مدلسازی ها لحاظ می شود. درستی فرض مستتر نمودن عرض پی در ضخامت لایه ها، توسط مدلسازی اجزای محدود نیز بررسی و به اثبات رسید؛ یعنی در صورتی که نسبتها برای ضخامت لایه ها و عرض پی یکسان باشد، مدول الاستیسته معادل پی به عرض یک متر و ۱۰ متر یکسان خواهد بود. به منظور برقرار نمودن فرض نشست آنی و الاستیک پی، از مدل رفتاری الاستیک برای خاک زیر پی در مدلسازی اجزای محدود بهره گرفته شد. شرح و بحث در مورد جزئیات و فرضیات در قسمت مربوطه ارائه می گردد. بر اساس مدلسازی های اجزای محدود متعدد انجام

شده، پایگاه داده مناسبی برای شرایط مختلف لایه بندی و معادل سازی مدول الاستیسیته خاک تولید شد. در مرحله بعد به منظور یافتن رابطه بین تغییرات ضخامت و مدول الاستیسیته لایه ها با مدول الاستیسیته معادل خاک، از ابزار داده کاوی رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی بهره گرفته می‌شود. به منظور بررسی قابلیت تعمیم پذیری رابطه بدست آمده برای شرایط جدید، بخشی از داده ها در فرآیند مدلسازی وارد نشده و صرفاً برای آزمودن دقت مدل تولید شده بکار میرود. این روش در کارهای داده کاوی مرسوم بوده و به این بخش از داده ها، داده های صحت سنجی یا اعتبارسنجی نیز گفته می‌شود.

۴- مدلسازی اجزای محدود ۳ بعدی و محاسبه نشست آنی پی

پژوهش عددی پیش رو با استفاده از انجام مدلسازی های متعدد اجزای محدود سه بعدی جهت محاسبه نشست آن پی سطحی بر روی خاک چند لایه و یافتن شرایط متناظر آن برای خاک یک لایه معادل انجام می‌شود. نتایج این مدلسازی ها به صورت یک پایگاه داده جهت تعیین الگوی معادل سازی شرایط لایه بندی پیچیده خاک زیر پی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فصل روند ایجاد پایگاه داده توسط ابزار تحلیلی اجزای محدود و نحوه بکارگیری داده ها در مدلسازی با رگرسیون تکاملی به تفصیل شرح داده می‌شود. بطور کلی، روند مدلسازی نشست آنی پی در نرم افزار PLAXIS 3D مطابق گام‌های جدول ۱ می‌باشد:

جدول ۱- مدلسازی نشست آنی پی در نرم افزار PLAXIS 3D

ردیف	مدلسازی نشست آنی پی در نرم افزار PLAXIS 3D
۱	تعیین خصوصیات مواد و انتخاب مدل‌های رفتاری مربوطه
۲	تعیین هندسه و ضخامت لایه های خاک ساختگاه
۳	ترسیم پی سطحی به صورت صفحه یا المان حجمی
۴	انجام مش بندی برای تمامی المانها و اعمال شرایط مرزی
۵	تعیین وضعیت آب زیرزمینی.
۶	تعیین مراحل اجرای پی سطحی و اعمال بار یا نشست.
۷	شروع تحلیل و استخراج نتایج مربوط به تنش و تغییر شکل.

به منظور ایجاد پایگاه داده توسط روش مدلسازی اجزای محدود، لازم است پارامترهای متغیر مدلسازی در ابتدا تعیین گردد. با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی رابطه مدول الاستیسیته معادل خاک چند لایه می‌باشد، لذا پارامترهایی از قبیل عرض پی، ضخامت لایه های زیر پی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون لایه ها میتواند به عنوان فرض اولیه داده های متغیر ورودی مدلسازی مدنظر قرار گیرد.

۴-۱- تعیین خصوصیات مواد و مدل رفتاری خاک

مدل رفتاری خاک، تعیین کننده نحوه تغییرات کرنش نسبت به تغییرات تنش در خاک می‌باشد. این مدل رفتاری میتواند به صورت ساده یا پیچیده با دقت متفاوت در مدلسازی منظور گردد. به عنوان مثال مدل رفتاری هوک که خطی و الاستیسیته ایزوتروپیک است میتواند به عنوان ساده ترین مدل رفتاری فرض شود که صرفاً مدول یانگ E و نسبت پواسون ν به عنوان پارامترهای ورودی در آن تعریف می‌شود. در حالتی که رفتار خاک در کرنشهای کوچک مورد توجه باشد میتوان از این مدل رفتاری بهره برد. در پژوهش پیش رو با توجه اینکه مطالعات در زمینه محاسبات نشست الاستیک مطلوب است، مدل رفتاری مناسب برای این نوع تحلیل، مدل رفتاری الاستیک می‌باشد. مدول یانگ لایه های خاک، بسته به میزان تراکم و پیش

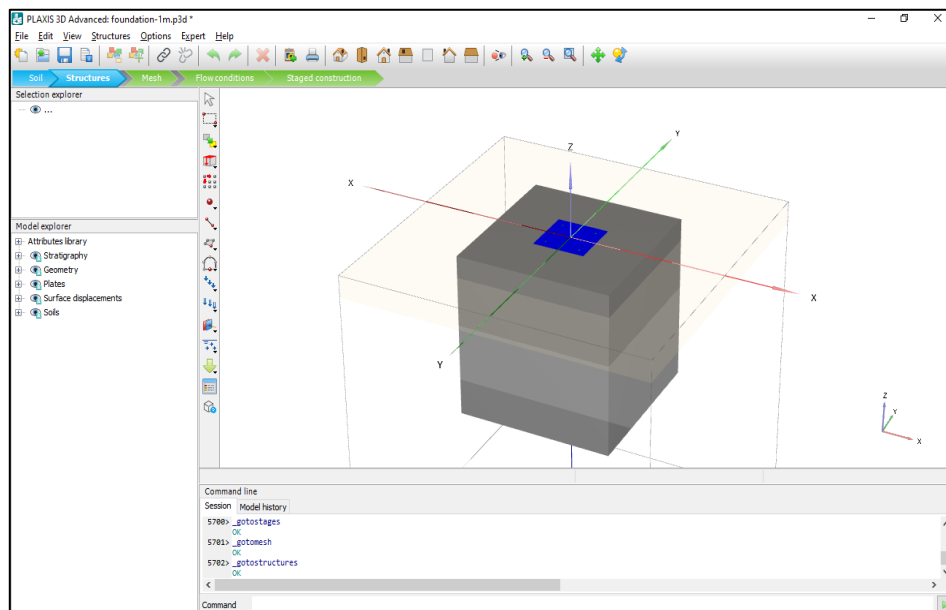
تحکیم یافتگی و سمانتاسیون لایه ها میتواند تغییرات زیادی داشته باشد. معمولاً در کارهای عملی، از انتخاب مقادیر بالا برای مدول یانگ خاک در جهت اطمینان اجتناب می‌گردد. در این پژوهش، تغییرات مدول یانگ در محدوده ۱۰ تا ۶۰ مگاپاسکال انتخاب شده است که تامین کننده عمده نیاز معادلسازی لایه های خاک معمول را دارا می‌باشد. از بین متغیرهای اولیه، نسبت پواسون خاک معمولاً دارای تغییرات کوچکی بوده و در محاسبات نشست پی، به صورت ثابت با دامنه تغییرات بسیار کم لحاظ میگردد. از طرفی، محاسبات نشست پی نشان میدهد که تغییرات این پارامتر تاثیر قابل توجهی بر روی میزان نشست الاستیک پی نخواهد داشت. لذا به منظور اجتناب از پیچیدگی مدلسازی، این پارامتر به صورت ثابت و برابر با 0.3 در مدلسازی اجزای محدود فرض شده است.

۴-۲- تعیین هندسه و ضخامت لایه های خاک ساختگاه

پرسش اساسی دیگری که مطرح است این است که لحاظ نمودن تغییرات مدول الاستیسیته خاک تا چه عمقی بایستی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به منابع فنی، توزیع حباب تنش در زیر پی حداکثر تا عمق ۵ برابر عرض پی (5B) میتواند در نتایج تاثیر گذار باشد. به منظور اطمینان از صحت محاسبات، مدلسازی و مش بندی لایه های خاک تا عمق 6B در برنامه پلکسیس انجام شد. ابعاد پی، متغیر مهم دیگری است که لازم است مورد بررسی قرار گیرد. همانطور که میدانیم، در پروژه های عمرانی، پی های سطحی به اشکال مختلف و طول و عرض متفاوت اجرا می‌گردد. در پژوهش حاضر با توجه به اینکه هدف یافتن رابطه کاربردی برای مدول الاستیسته خاک است، لحاظ نمودن تمامی اشکال پی ها عملاً امکان پذیر نمی‌باشد. لذا به منظور ساده سازی، از پی مربعی در مدلسازی اجزای محدود بهره گرفته می‌شود. با توجه به توزیع حباب تنش در زیر پی، لایه های نزدیک تر به زیر پی، بیشترین تاثیر را در نشست پی خواهند داشت. در مدلسازی لایه های زیر پی، ۳ لایه خاک منظور شده است. برای اولین لایه زیر پی، ضخامت بین 0.2 تا ۲ برابر عرض پی، برای دومین لایه زیر پی، ضخامت بین 0.3 تا ۲ برابر عرض پی و برای سومین لایه زیر پی، ضخامت بین $2/5$ تا $5/4$ برابر عرض پی انتخاب شده است. همچنین ابعاد کلی مدل یا محدوده کلی طول و عرض مدلسازی برابر با 6B به منظور لحاظ نمودن همزمان تاثیر کامل نشست لایه ها و کاهش زمان مدلسازی در نظر گرفته شده است.

۴-۳- ترسیم پی سطحی

اولین گام در ترسیم مدل در نرم افزار PLAXIS 3D، تعریف لایه بندی خاک توسط ابزار ساخت گمانه (Create borehole) می‌باشد. ضخامت لایه ها مطابق مقادیر انتخاب شده اولیه در این قسمت برنامه تعریف می‌شود. عمق سطح آب زیرزمینی نیز در این قسمت میتوان مشخص نمود. با توجه به اینکه در مدلسازی نشست الاستیک پی و فرض مدل رفتاری الاستیک برای خاک، سطح آب زیرزمینی تاثیری بر نتایج ندارد، این مورد در مدلسازی لحاظ نگردیده است. پس از مشخص شدن ابعاد کلی مدلسازی و وضعیت لایه ها و سطح آب زیرزمینی، نوبت به مدلسازی سازه پی میرسد. برای ترسیم پی سطحی در برنامه پلکسیس میتوان از المانهای دوبعدی و سه بعدی بهره گرفت. با منظور نمودن المانهای سه بعدی برای پی، متغیرهایی از قبیل ضخامت، عمق استقرار پی و خصوصیات بتن پی نیز به مجموعه پارامترهای تاثیرگذار بر نتایج مدلسازی اضافه خواهد شد. به منظور اجتناب از پیچیده کردن مدلسازی و تمرکز بر روی محاسبه مدول الاستیسیته معادل، از المان دو بعدی صلب برای پی سطحی استفاده شده است. در شکل ۴ نمایی از نحوه ترسیم پی سطحی در برنامه پلکسیس مشاهده می‌شود.



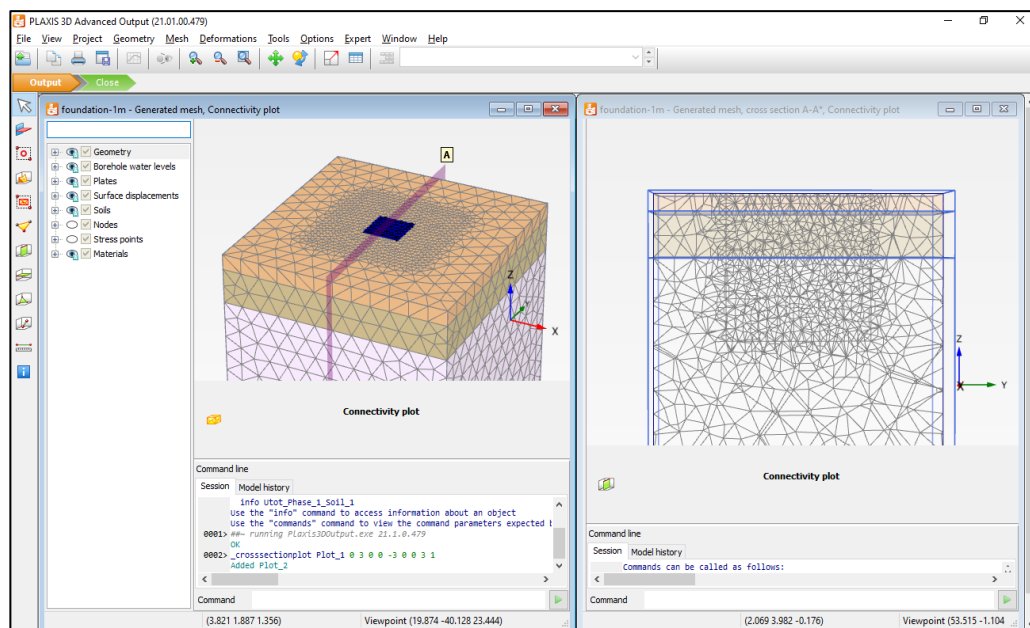
شکل ۴- نمایشی از نحوه ترسیم پی سطحی در برنامه PLAXIS 3D

۴-۴- تعریف بارگذاری و شرایط مرزی

امکان محاسبه نیروی متناظر با نشست از پیش تعریف شده در برنامه پلکسیس وجود دارد و از این قابلیت در این پژوهش بهره گرفته شده است. با توجه به اینکه در محاسبات نشست الاستیک، لازم است نشست ها تا حدودی در محدوده الاستیک باشد و حداقل نشست مجاز برای طراحی پی های سطحی معمولاً $2/5$ سانتیمتر در نظر گرفته می شود، لذا اندازه گیری نیروها در مدلسازی برای این مقدار از نشست پی انجام شده است. به این منظور، به جای تعریف بار در برنامه، نشست ثابت در محور قائم برای پی سطحی به اندازه $2/5$ سانتیمتر تعریف شده است. شرایط مرزی شامل گیرداری المانهای مرزی به شکل خودکار توسط برنامه اعمال می شود.

۴-۵- مش بندی المانها

قابلیت مش بندی خودکار المانها در سه سایز ریز، متوسط و درشت در برنامه وجود دارد. سایز مش بندی از عوامل تاثیرگذار بر نتیجه محاسبات اجزای محدود به شمار میرود. با ریزتر شدن مش بندی، نتایج دقیقتری مورد انتظار خواهد بود. با اینحال با توجه به اینکه انتخاب مش بندی خیلی ریز از لحاظ زمان محاسباتی بسیار طولانی بوده و مناسب ایجاد پایگاه داده و داده کاوی نمی باشد، لازم است مقدار معقولی برای سایز مش بندی به منظور اجتناب از طولانی شدن زمان تحلیل و همچنین اجتناب از کاهش دقت مدلهای در برنامه انتخاب شود. طبق بررسی بعمل آمده مقدار ضریب درشتی مش برابر با $0/3$ میتواند برای کار این تحقیق مناسب باشد. همچنین به منظور افزایش دقت محاسبات در محدوده اطراف پی سطحی، از مکعب کمکی به ابعاد سه برابر عرض پی سطحی، بهره گرفته شده است. در شکل ۵ نمایشی از نحوه مش بندی مدل ترسیم شده مشاهده می شود.



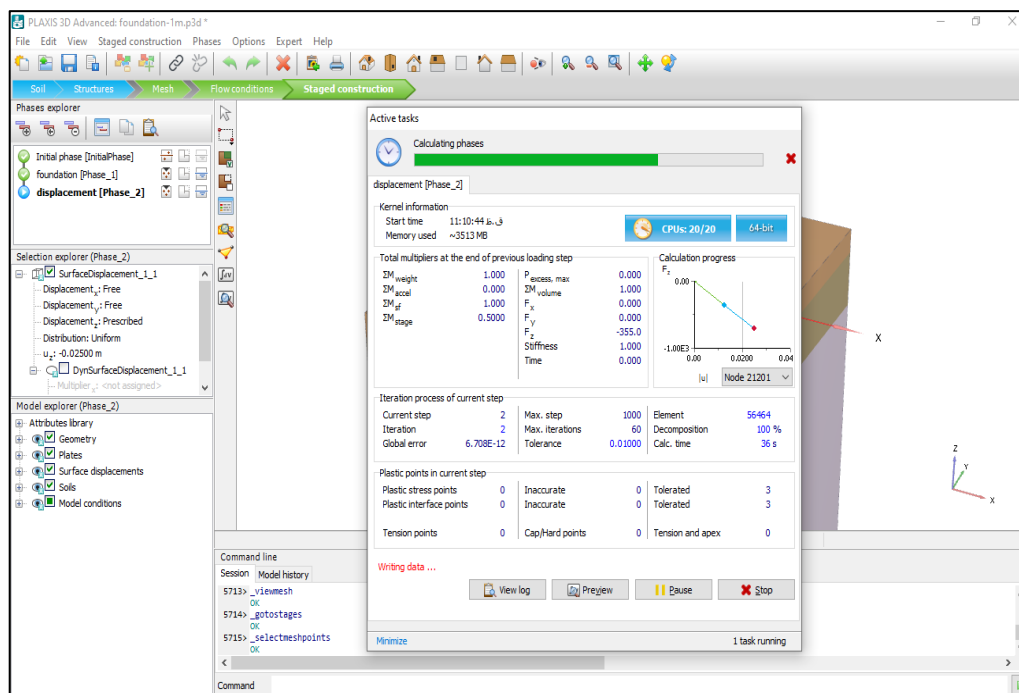
شکل ۵- نمایی از نحوه مش بندی مدل در برنامه PLAXIS 3D

۴-۶- تعیین مراحل اجرای پی

در آخرین مرحله قبل از شروع تحلیل مدل، مراحل اجرای پی در برنامه تعریف می‌شود. در مرحله آغازین، که قبل از ساخت پی می‌باشد، شرایط طبیعی زمین بدون پی و نیروها و تغییر شکلهای مربوطه برقرار است. در مرحله بعد، پی سطحی که در این مدلسازی به صورت صفحه صلب دوبعدی فرض شده اجرا شده است. در این تحقیق با توجه به اینکه، هدف اصلی تعیین نشست نهایی پی می‌باشد، لذا عملیات در سه مرحله، شامل مرحله قبل از پی، مرحله اجرای پی و مرحله بارگذاری یا اعمال نشست پی در برنامه تعریف می‌شود. تنظیمات محاسبات هر مرحله انجام شده و به جهت افزایش سرعت برنامه از گزینه Pardiso (پردازنده چند هسته‌ای مستقیم) برای نوع محاسبه گر در محاسبات بهره گرفته می‌شود. قبل از شروع محاسبات، نقطه مرکزی صفحه پی سطحی به منظور ثبت تغییرات بار- نشست در این نقطه، به برنامه معرفی می‌شود. پس از تعیین مراحل اجرای پی، تحلیل سه بعدی اجزای محدود آغاز می‌گردد.

۴-۷- شروع تحلیل و استخراج نتایج

در این مرحله تمامی عملیات مربوط به تعریف مدل پی سطحی در برنامه انجام شده و برنامه آماده انجام تحلیل می‌باشد. دستور calculate تحلیل و محاسبات را در برنامه شروع می‌کند. در شکل ۶ نمایی از مرحله انجام محاسبات در برنامه پلکسیس مشاهده می‌شود. پس از اتمام محاسبات برای هر یک از فازهای اجرایی تعریف شده، با مراجعه به قسمت نتایج، امکان مشاهده تغییر مکانها و تنشها در قسمتهای مختلف مدل و نقاط از پیش تعریف شده به صورتهای مختلف از قبیل داده، نمودار و کانتور وجود دارد. در شکل ۶، نمونه‌ای از نتایج مدلسازی شامل کانتور و منحنی نشست قائم مرکز پی سطحی مشاهده می‌شود.

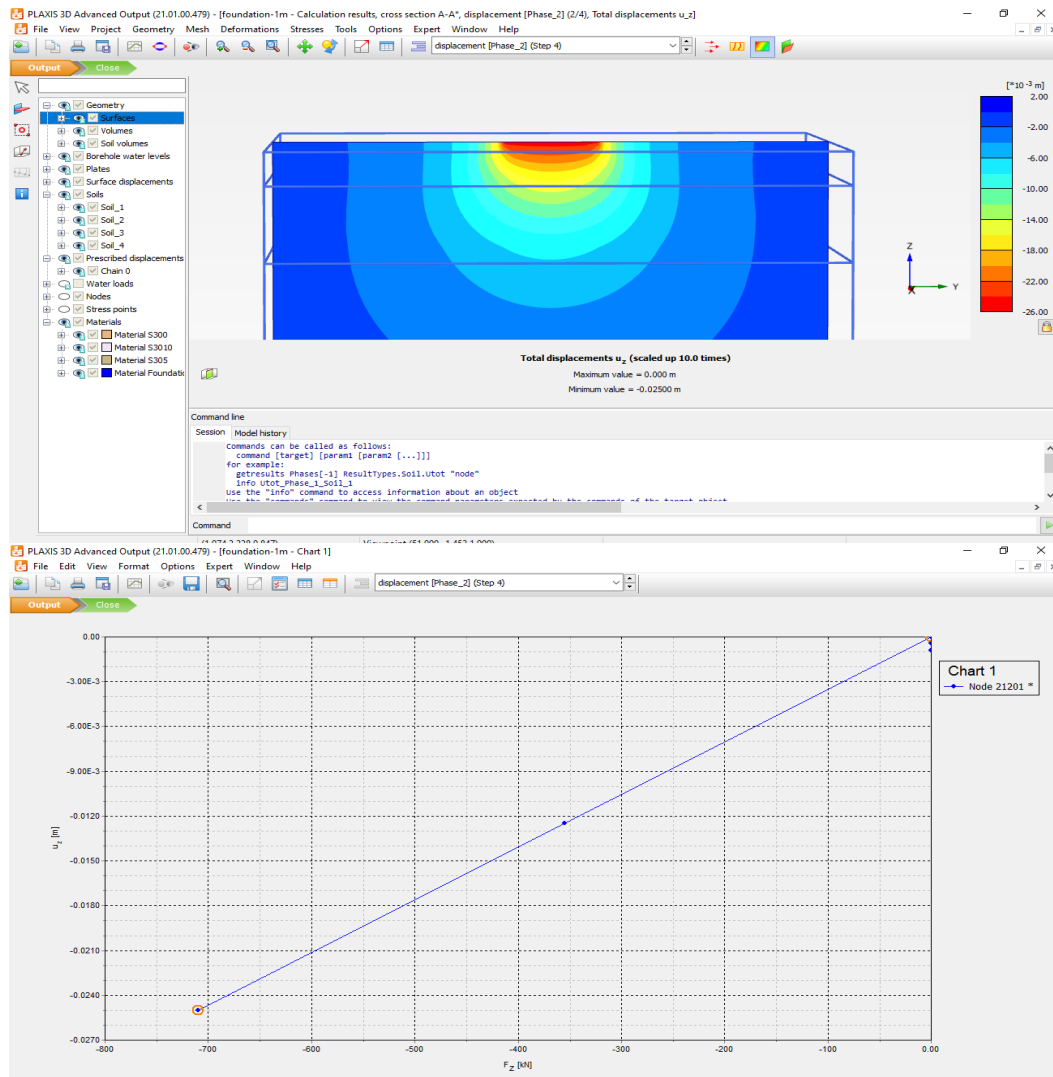


شکل ۶- نمایش از مرحله انجام محاسبات در برنامه PLAXIS 3D

۵- جمع بندی نتایج مدلسازی و تکمیل پایگاه داده

روش محاسبه مدول الاستیسیته معادل خاک چند لایه به این صورت بوده که در ابتدا مقدار نیروی لازم برای نشست پی بر روی خاک چند لایه محاسبه شده است. در مرحله بعد مقادیر نیروهای لازم برای نشست پی بر روی خاک یک لایه با خصوصیات متفاوت محاسبه و ثبت شده است. پس از آن توسط درونیابی، مقدار مدول الاستیسیته خاک یک لایه که نیروی ثبت شده آن برابر با نیروی ثبت شده برای خاک چند لایه بوده تعیین شده است.

یکی از پرسشهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت این بود که آیا میتوان به منظور کاهش متغیرهای پایگاه داده، متغیر عرض پی را در سایر متغیرها مستتر نمود. پاسخ این پرسش با توجه به نتایج مدلسازی ها مثبت بوده است. به این منظور سه نوع پی مربعی با ابعاد متفاوت، ۱، ۵ و ۱۰ متر مورد مدلسازی قرار گرفت. تمامی خصوصیات هندسی مدل شامل ضخامت لایه ها و نحوه مش بندی لایه ها در تناسب با عرض پی انتخاب گردید. در جدول ۱ نحوه انتخاب خصوصیات لایه های خاک برای ابعاد متفاوت پی ها و نتایج معادل سازی مدول یانگ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، با رعایت نمودن تناسبات هندسی بر اساس عرض پی، مدول الاستیسیته معادل محاسبه شده با خاک سیلت متراکم برای ابعاد متفاوت پی ها دقیقاً یکسان می باشد. همچنین در این شرایط، مقدار نیروی ثبت شده برای عرض متفاوت پی ها نسبت مستقیم با عرض پی داشته است.



شکل ۷- نمونه‌ای از از نتایج مدل‌سازی شامل کانتور و منحنی نشست قائم پی در برنامه PLAXIS 3D

با جمع بندی نتایج بدست آمده از مدل‌سازی های سه بعدی، متغیرهای ورودی پایگاه داده شامل پنج متغیر مدول الاستیسته لایه اول (E1)، مدول الاستیسیته لایه دوم (E2)، مدول الاستیسیته لایه سوم (E3)، ضخامت لایه اول نسبت به عرض پی (L1)، ضخامت لایه دوم نسبت به عرض پی (L2) و متغیر خروجی، مدول الاستیسیته معادل (E) می‌باشد. ضخامت لایه سوم، با توجه به اینکه همواره رابطه مستقیمی با جمع ضخامت دو لایه بالایی دارد ($L3 = 6B/B - L1 - L2$) میتواند در پارامترهای L1 و L2 مستتر بوده و حذف گردد.

جدول ۱- مقایسه مدول الاستیسیته معادل پی به ابعاد متفاوت با فرض خصوصیات یکسان لایه ها

ردیف	عرض پی B (m)	خصوصیات لایه های زیر پی L: ضخامت لایه، E: مدول الاستیسیته لایه	حاکثر نیروی وارد بر مرکز پی (KN)	مدول الاستیسیته معادل (Mpa)
۱	۱	L1 = 0.5B, L2 = B, L3 = 4.5B E1 = 20, E2 = 30, E3 = 40 (Mpa)	۹۴۷/۷	۲۵/۹
	۵		۴۷۴۹	۲۵/۹
	۱۰		۹۴۹۱	۲۵/۹
۲	۱	L1 = 0.5B, L2 = B, L3 = 4.5B E1 = 40, E2 = 20, E3 = 30 (Mpa)	۱۰۶۰/۹	۲۹/۲
	۵		۵۳۵۳/۴	۲۹/۲
	۱۰		۱۰۶۹۹/۸	۲۹/۲
۳	۱	L1 = 0.5B, L2 = B, L3 = 4.5B E1 = 20, E2 = 20, E3 = 40 (Mpa)	۸۳۱/۶	۲۲/۷
	۵		۴۱۶۶/۵	۲۲/۷
	۱۰		۸۳۲۶/۹	۲۲/۷

در بخش بعد نتایج بدست آمده از مدلسازی پی سطحی و محاسبه مدول الاستیسیته معادل خاک چند لایه در برنامه PLAXIS 3D ارائه شده و با مقادیر مدلسازی EPR مقایسه می گردد. با مدلسازی های انجام شده برای شرایط مختلف متغیرها، تعداد ۴۰۸ ردیف داده برای ایجاد پایگاه داده جهت ساخت مدل EPR ثبت گردید. در پیوست کل داده های مربوط به مدلسازی ها ارائه شده است. در مدلسازی EPR لازم است بخشی از داده ها جهت صحت سنجی یا اعتبارسنجی مدل تولید شده در نظر گرفته شود. هدف از آنها آزمودن مدل تولید شده برای شرایط متغیرهایی است که در روند مدلسازی EPR دیده نشده است. در این تحقیق، تعداد داده های آموزش برابر با ۳۱۲ مورد و تعداد داده های اعتبارسنجی، ۹۶ مورد بوده و بنابراین نسبت داده های اعتبارسنجی به داده های آموزش در حدود ۳۰ درصد بوده است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

انتخاب و بکار گیری ترکیب روش مدلسازی اجزاء محدود سه بعدی با روش داده کاوی EPR و مجموعه پارامترهای ورودی و خروجی استفاده شده در این تحقیق، به نوبه خود منحصر به فرد بوده و قبلاً به این شکل برای مدل سازی و مطالعه مدول الاستیسیته معادل خاک زیر پی مورد استفاده قرار نگرفته است. با مدلسازی مدول الاستیسیته معادل خاک، توسط روش اجزاء محدود سه بعدی و ابزار مدلسازی رایانه ای الگوریتم ژنتیک، نتایج زیر بدست آمد: انتخاب سه لایه خاک زیر پی و نسبت ضخامت لایه های اول و دوم به عرض پی و مدول الاستیسیته این سه لایه تاثیرگذارترین مولفه ها بر مدول معادل بوده و تخمین مناسبی از این پارامتر با فرضیات متغیرهای مذکور بدست آمده است. با توجه به اینکه مدلسازی تا عمق ۶ برابر عرض پی انجام شده و ضخامت لایه سوم همواره با معلوم بودن ضخامت لایه های بالاتر قابل تعیین است، لذا این پارامتر از متغیرهای مدلسازی حذف شده است. در این تحقیق بررسی شد که آیا میتوان به منظور ساده سازی، متغیر عرض پی را در سایر پارامترها مستتر نمود. با مدلسازی های انجام شده نتیجه شد که در صورت منظور نمودن پارامتر نسبت ضخامت لایه به عرض پی به جای استفاده مستقیم از ضخامت لایه این امر امکانپذیر است. با توجه به اینکه در محاسبات نشست آبی پی از پارامترهای الاستیک خاک بهره گرفته می شود لذا مدل رفتاری الاستیک برای خاک در مدلسازی اجزای محدود بهره گرفته شد تا نتایج بدست آمده به فرضیات

محاسبات دستی نزدیکتر باشد. همچنین محاسبات انجام شده برای تعیین مدول معادل خاک سیلت متراکم برای نشست ۲/۵ سانتیمتر مرکز پی با توجه به بررسی منابع و آیین نامه ها بوده است. لایه های اولیه زیر پی با توجه به اینکه تحت تنشهای بیشتری قرار دارند نسبت به لایه های زیرین تاثیرگذاری بیشتری بر روی نشست پی دارند. لذا محدوده تغییرات ضخامت این لایه ها برای منظور نمودن بهتر تاثیر این لایه ها بر نشست تا حد امکان کوچک انتخاب گردید. مدلی که توسط روش EPR تولید شد، تخمین مناسبی از محاسبات تحلیلی سه بعدی اجزاء محدود برای مدول الاستیسیته معادل خاک چند لایه بدست داد و معلوم شد که این روش توانایی برقراری رابطه بین متغیرهای لایه های خاک جهت مدلسازی حالت معادل را دارا می باشد. برای داده های آموزشی که در ساخت مدل EPR بکار رفته اند، دقت مدل بدست آمده مناسب بوده است. با اینحال دقت بالا در تخمین داده های آموزشی شرط لازم ولی ناکافی برای سنجش اعتبار یک مدل می باشد. لذا توسط داده های اعتبار سنجی یا صحت سنجی که در فرآیند مدلسازی دخالتی نداشته اند، دقت مدل EPR مورد بررسی قرار گرفت. دقت بالای این مدل برای داده های اعتبار سنجی بیانگر قابلیت تعمیم پذیری مناسب مدل بدست آمده بوده است. مدل های تولید شده توسط روش EPR به شکل چند جمله ای های با متغیرهای تواندار ریاضی بوده و همانطور که قبلاً گفته شد دارای ساختار مشخص و از پیش تعیین شده ای هستند و امکان وارد کردن برخی توابع از قبیل توابع مثلثاتی، نمایی و لگاریتمی در این چندجمله ای ها وجود دارد. این مدلها را می توان به صورت روابط ساده ریاضی و یا به شکل ماتریسی نمایش داده و در برنامه هایی نظیر اکسل مورد استفاده قرار داد. روش EPR با وجود توانایی بالایی که در شبیه سازی مورد این تحقیق نشان داد، روندی تصادفی را تعیین ضرایب و توانهای چند جمله ای ها دنبال می کند. به عبارت دیگر در دو بار اجرای برنامه با تنظیمات یکسان و داده های بکار رفته مشابه، تضمینی برای رسیدن به جوابهای یکسان و یا مورد انتظار وجود ندارد و ممکن است پس از چندین بار اجرای برنامه و امتحان کردن تنظیمات مختلف، امکان رسیدن به جوابهای مناسب و مطلوب فراهم گردد. زیر مجموعه های برنامه ریزی ژنتیک به علت توانایی ارائه مدلهایی به شکل روابط ریاضی ملموس و قابل مشاهده ارتباط بین پارامترها، اهمیت ویژه ای در مدلسازی رفتار پیچیده لایه های خاک دارند. روشی که برای مدلسازی مدول الاستیسیته معادل در این پژوهش انجام شد منجر به تولید رابطه ای با دقت مناسب گردید که میتواند تا حدود زیادی نیاز به انجام محاسبات و مدلسازی های پیچیده را در کارهای روزمره و معمول عمرانی و ساختمانی مربوط به پی های سطحی کاهش دهد. با توجه به نارسایی نتایج آزمایشات بارگذاری صفحه ای در تخمین مناسب خصوصیات شرایط پیچیده خاک زیر پی، اهمیت روشهای تخمینی با دقت مناسب قابل توجه خواهد بود.

مراجع

- Abu-Farsakh, M. Y., & Chen, Q. (2012). *Evaluation of the base/subgrade soil under repeated loading: phase II, in-box and ALF cyclic plate load tests* [tech summary].
- Alizadeh, M., & Gholami, M. (2020). *Application of Evolutionary Polynomial Regression (EPR) for Estimating Dynamic Properties of Soil from Laboratory Tests*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138, 106345.
- Bahrami, S., & Mohammadi, A. (2019). *Numerical Analysis of Shallow Foundation Settlement on Stratified Soil Layers Using 3D Finite Element Method*. *International Journal of Civil Engineering (Iran University of Science and Technology)*, 17(4), 501–515.
- Brahma, P., & Mukherjee, S. (2010, December). *A realistic way to obtain equivalent Young's modulus of layered soil*. In Indian geotechnical conference. Bombay, India (pp. 305-308).
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2013). *PLAXIS 3D 2013 user manual*. Plaxis bv, Delft.
- Chandrupatla, T., & Belegundu, A. (2021). *Introduction to finite elements in engineering*. Cambridge University Press.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
- Dhar, A., & Tarefder, R. (2011). *An approximate spreadsheet integration method for foundation settlements in two-layered medium*. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(4), 437-446.

Ebid, A. M. (2021). *35 Years of (AI) in geotechnical engineering: state of the art*. Geotechnical and Geological Engineering, 39(2), 637-690.

Erzin, Y., & Gul, T. O. (2014). *The use of neural networks for the prediction of the settlement of one-way footings on cohesionless soils based on standard penetration test*. Neural computing and applications, 24, 891-900.

HariBharghav, M., Madhav, M. R., & Padmavathi, V. (2017). *Estimation of deformation moduli of reinforced foundation beds from load tests*. In Indian geotech conf.

Javadi, A. A., Ahangar-Asr, A., Johari, A., Faramarzi, A., & Toll, D. (2012). *Modelling stress-strain and volume change behaviour of unsaturated soils using an evolutionary based data mining technique, an incremental approach*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25(5), 926-933.

Karimi, B., Zare, M., & Hoseini, R. (2021). *Prediction of Seepage in Earth Dams using Evolutionary Polynomial Regression (EPR) Combined with Finite Element Method (FEM)*. Journal of Geoenvironmental Engineering,

Pantelidis, L. (2019). *The equivalent modulus of elasticity of layered soil mediums for designing shallow foundations with the Winkler spring hypothesis: A critical review*. Engineering Structures, 201, 109452.

Pantelidis, L. (2021). *The equivalent modulus of elasticity of soil mediums for designing shallow foundations*. Geotechnical and Geological Engineering, 39(5), 3863-3873.

Sasmal, S. K., & Behera, R. N. (2021). *Prediction of combined static and cyclic load-induced settlement of shallow strip footing on granular soil using artificial neural network*. International Journal of Geotechnical Engineering.

Shahin, M. (2014). *Artificial intelligence for modelling load-settlement response of axially loaded bored piles*. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, 491-495.

Shahin, M. A. (2015). *Use of evolutionary computing for modelling some complex problems in geotechnical engineering*. Geomechanics and Geoengineering, 10(2), 109-125.

[80] Shahin, M. A. (2015). "Genetic Programming for Modelling of Geotechnical Engineering Systems". In Handbook of Genetic Programming Applications (pp. 37-57). Springer International Publishing.

Yaghoubi, A., Ahmadi, S., & Karimi, B. (2023). *3D FEM Analysis of Soil-Pile-Structure Interaction considering Seismic Performance using Machine Learning Models (EPR)*. (Paper presented at the International Conference on Geotechnical Engineering,