

بررسی نشست محیط پیرامون گود زیرگذر شهید باقدردت شهر کرمان تحت اثر تغییرات مشخصات مکانیکی خاک و دبی پمپاژ آب و پیش‌بینی آن در شبکه عصبی مصنوعی

محمدباقر سلطانی مقدم^۱، مهدی مومنی رق آبادی^{۲*}، امیدطیاری^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

چکیده

در هنگام ساخت و ساز زیرگذرهایی که پایین‌تر از سطح آب زیرسطحی واقع شده‌اند و نیاز به گودبرداری عمیق یا نیمه عمیق دارند، بزرگ‌ترین مشکل وجود آب زیرزمینی است که در روند اجرایی پروژه اختلال ایجاد می‌کند. به دلیل این مشکل در پروژه زیرگذر شهید باقدردت شهر کرمان برای کاهش آب زیرسطحی روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت در نهایت با توجه به شواهد و مستندات علمی معتبر، استفاده از چاه پمپاژ و هدایت به محل پیش‌بینی شده جهت تخلیه و پایداری سازی گود با نیلینگ مورد تأیید قرار گرفت. در این پژوهش ابتدا مدل‌سازی عددی زیرگذر شهید باقدردت شهر کرمان با کمک روش اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis2D صورت گرفته و با تغییر پارامترهای مشخصات مکانیکی خاک شامل زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و ضریب نفوذپذیری خاک و همچنین دبی پمپاژ خروجی در نرم‌افزار، میزان نشست قائم حداکثر پیرامون لبه گود محاسبه گردید و تحلیل لازم در این خصوص انجام پذیرفت. سپس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی از نوع پروسپترون چندلایه در نرم‌افزار MATLAB و داده‌های نرم‌افزار پلکسیس به‌عنوان ورودی شبکه به پیش‌بینی مقادیر نشست محیط پیرامون گود در سایر حالات پرداخته شده است. نتایج نشان داد که افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی و ضریب نفوذپذیری خاک باعث کاهش نشست و افزایش دبی پمپاژ باعث افزایش نشست خاک شد اما افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک تأثیر بیشتری نسبت به افزایش چسبندگی خاک بر کاهش نشست دارد. در نهایت شبکه عصبی مصنوعی با مقدار ضریب همبستگی خروجی شبکه عصبی و خروجی مدل‌سازی ۰/۹۸۲ به دست آمده است که نشان دهنده دقت و قدرت پیش‌بینی دقیق مقادیر واقعی می‌باشد؛ بنابراین تطابق دو روش مدل‌سازی عددی و پیش‌بینی توسط شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده نشان می‌دهد که می‌توان در پروژه‌های مهندسی می‌توان به پیش‌بینی‌های شبکه‌های عصبی اعتماد کرد.

واژگان کلیدی: پمپاژ آب؛ نیلینگ؛ نشست؛ مدل‌سازی عددی، شبکه عصبی

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان

^۲ عضو هیأت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان zimaraz.pars1387@gmail.com

^۳ عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان

*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

ایستایی با پیژومتريک در اطراف چاه شروع به پایین رفتن می‌کند مقدار افت سطح ایستایی با پیژومتريک در هر نقطه نسبت به حالت اولیه افت سطح آب می‌گویند. هرچه مدت و مقدار پمپاژ بیشتر باشد مقدار افت آن نیز بیشتر خواهد شد.

باتوجه به مشخصات هیدرودینامیکی لایه آبدار و مقدار آبی که از چاه پمپاژ می‌شود، بعد از مدتی سطح آب داخل چاه ثابت می‌ماند و به عبارتی افت به حالت تعادل می‌رسد که در این حالت سطح آب داخل چاه را سطح دینامیک می‌گویند. سطح اولیه چاه قبل از پمپاژ را اگر خارج از حوضه تأثیر چاه‌های مجاور باشد سطح استاتیک می‌گویند. هر چه از محور چاهی که در حال پمپاژ است دور شویم مقدار افت سطح ایستایی با پیژومتريک کمتر می‌شود و به عبارتی شکل تغییرات سطح آب به صورت یک فرورفتگی مخروطی شکل است که به آن مخروط افت می‌گویند که رأس آن در چاه و قاعده آن در سطح ایستایی با پیژومتريک اولیه واقع است.

با گذشت زمان از شروع پمپاژ گسترش و عمیق‌تر شدن مخروط افت کاهش پیدا می‌کند و رشد آن آنقدر ادامه می‌یابد تا به حال تعادل برسد که در آن صورت معادله تخلیه طبیعی لایه آبدار به اندازه پمپاژ می‌رسد. حد این سطح مخروط افت را منطقه تأثیر یا سطح تأثیر و شعاع آن را شعاع تأثیر آن چاه می‌گویند.

۲. تعریف مسئله

برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین پس از خشک اندازی روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به روش‌های کلاف و اورورک، پک، بولز، او و هیس اشاره کرد. در این میان روش بولز و پک روشی جامع‌تر می‌باشد که در شکل ۱ روش بولز آورده شده و روابط ۱، ۲ و ۳ روابط حاکم بر روش بولز بر میزان نشست سطح زمین پس از خشک اندازی آورده شده است. [۲۰۲۲]

$$D = (H_e + H_d) \tan 45^\circ - \phi/2 \quad (۱) \text{ رابطه}$$

$$H_d = 0.5B \tan(45^\circ + \phi/2) \quad (۲) \text{ رابطه}$$

$$\delta v_m = 4ad/D \quad (۳) \text{ رابطه}$$

یکی از مهم‌ترین مسائل در احداث سازه‌ها، حفاظت از گودبرداری و ساختمان‌های موجود در مجاورت آن می‌باشد که در صورت عدم رعایت روش‌های مناسب حفاظت از گودها منجر به خسارات مالی و جانی جبران‌ناپذیری خواهد گردید و مخاطرات به وجود آمده ناشی از نشست‌های احتمالی و تقلیل ظرفیت باربری و تغییر مکان جانبی موجب ایجاد ترک در سازه‌های مجاور گود خواهد شد. باتوجه به اینکه در دهه‌های اخیر در شهرهای بزرگ نیاز به حل مشکلات ترافیکی افزایش یافته است باتوجه به عمق زیاد و مواجهه با آب‌های زیرزمینی که باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و تضعیف پارامترهای مقاومت برشی گود می‌گردد ضریب اطمینان را با چالش مواجهه می‌کند. یکی از پروژه‌های عمرانی شهر کرمان که تحت‌الشعاع این مسئله قرار گرفته است پروژه زیرگذر شهید باقدردت می‌باشد که باتوجه به شرایط پروژه به بررسی وضعیت موجود لایه‌بندی خاک، نفوذپذیری و سطح آب زیرسطحی پرداخته و جهت رفع این مشکل روش‌های مختلف زهکشی با هدف پایین آوردن سطح آب و جمع‌آوری آن‌ها در پروژه بیان شده و در نهایت بهترین گزینه جهت اجرا پیشنهاد شده است.

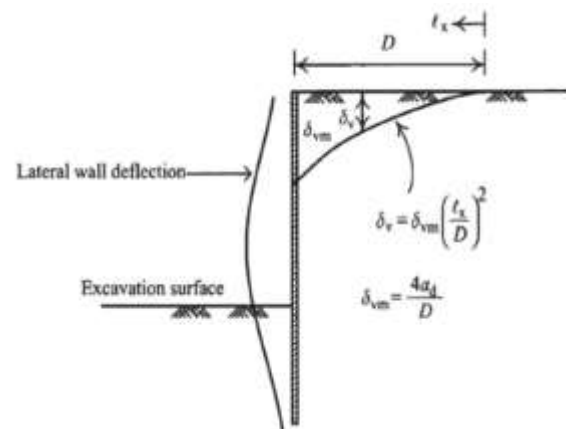
امروزه در مناطقی که سطح آب زیرسطحی بالا می‌باشد لازم است سطح آب را به صورت موقت یا دائم پائین بیاوریم که این روش را خشک اندازی گویند که این عمل با روش‌های پمپاژ - زهکشی یا ترکیبی از روش‌های فوق انجام می‌شود این اقدام می‌تواند با پائین نگه‌داشتن سطح آب زیرسطحی تا زمانی که اقداماتی مانند کارهای بتنی و اجرای فونداسیون و دیوار حائل یا حفاظت از فونداسیون ساختمان‌های مجاور به پایان برسد ادامه پیدا کند، این نوع از خشک اندازی در صورتی قابل قبول است که قبل از آن یک بررسی کامل از امکان نسبی این روش از نظر آسیب به عوارض هم‌جوار پروژه انجام شود؛ زیرا این روش ممکن است موجب نشست در سازه‌های مجاور شود. وقتی از یک چاه، پمپاژ صورت می‌گیرد آب از لایه آبدار به داخل چاه حرکت می‌کند و سطح آب درون چاه و سطح

مصنوعی در تلاش برای به دست آوردن پیش‌بینی دقیق‌تر نشست استفاده می‌شوند.

شاهین و همکاران (Shahin et al., 2002) با کمک یک پایگاه داده بزرگ از نشست های اندازه‌گیری شده واقعی برای توسعه و تأیید مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. نشست های پیش‌بینی‌شده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط سه مورد از رایج‌ترین روش‌های سنتی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که شبکه‌های عصبی مصنوعی یک تکنیک مفید برای پیش‌بینی نشست پی‌های کم عمق در خاک‌های بدون چسبندگی هستند، زیرا از روش‌های سنتی بهتر عمل می‌کنند.

خشک اندازی در حفاری‌های ژئوتکنیکی ممکن است باعث تحکیم و نشست خاک شود که اصطکاک جدار منفی روی شمع‌های مجاور ایجاد می‌کند و باعث نشست شمع‌های اضافی می‌شود. چن و ژانگ (Chen and Xiang, 2006) با ترکیب چهار مرحله که شامل یک مدل پمپاژ، یک ارزیابی تحکیم ساده، یک مدل برهمکنش شمع-خاک و یک پیش‌بینی نشست شمع نیمه نظری است، روشی را برای تخمین افت، نشست تحکیم خاک، اصطکاک منفی روی جدار شمع و نشست اضافه شمع ناشی از آبیگری در نواحی خط فریاتیکی را ارائه کردند. روی و همکاران (Roy and Robinson, 2009) در یک مطالعه انجام شده بر روی ساخت یک سازه زیرزمینی و با بررسی زیرسطحی و داده‌های پایش به‌دست‌آمده در طی یک دوره ۵/۷۵ ساله پس از ساخت سازه دریافتند که نشست حاصل از تحکیم خاک‌های نرم به دلیل کاهش فشار سفزه زیرزمینی در بستر سنگی زیرین ناشی از خشک اندازی مداوم است که برای بهره‌برداری از سازه مورد نیاز می‌باشد.

زو و همکاران (Zhou et al., 2010) با استفاده از روش المان‌های محدود و در مدل‌سازی عددی با بهینه‌کردن عمق دیواره دیافراگمی حاشیه گود عمق ایستگاه متروی خط ۱۰ شانگهای که برای جلوگیری از هجوم آب زیرزمینی به داخل آن احداث شده بود، توانستند میزان نشست زمین‌های مجاور را به حداقل برسانند.



شکل ۱. روش باولز برای تخمین نشست سطح زمین

پیش‌بینی می‌شود که نشست سطح زمین به صورت سهموی باشد و از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$\delta v = \delta v_m (I_x/D)^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که D میزان تأثیر نشست سطح زمین، H_e عمق حفاری، $H_d=B$ اگر $\phi = 0$ و $\phi \geq 0$ به دست می‌آید اگر B عرض حفاری و δv_m بیشینه نشست سطح زمین می‌باشد. وقتی که خاک اشباع تحت بارگذاری قرار گیرد در آغاز تمام بارگذاری توسط آب حفره‌ای تحمل می‌شود که افزایش فشار آب حفره‌ای را در پی دارد. در صورتی که زهکشی انجام شود، به‌مرور زمان حجم خاک کاهش می‌یابد که به این پدیده تحکیم گفته می‌شود و باعث نشست می‌گردد. از طرفی ممکن است خاک در اثر جذب آب حفره‌ای یا فشار آب حفره‌ای منفی افزایش حجم دهد که به آن تورم می‌گویند که نرخ تغییر حجم نمونه تحت بارگذاری به نفوذپذیری نمونه بستگی دارد، از این رو آزمایش تحکیم معمولاً در خاک‌های با نفوذپذیری کم (مانند رس) انجام می‌گیرد.

۳. ادبیات فنی و مطالعات پیشین

در طول سال‌ها، روش‌های زیادی برای پیش‌بینی نشست پی‌های کم‌عمق در خاک‌های بدون چسبندگی ایجاد شده است. باین‌حال، روش‌هایی برای انجام چنین پیش‌بینی‌هایی با درجه دقت و سازگاری لازم هنوز توسعه نیافته‌اند. پیش‌بینی دقیق نشست ضروری است زیرا نشست، به جای ظرفیت باربری، به‌طور کلی طراحی پی را کنترل می‌کند. شبکه‌های عصبی

خشک اندازی باید برای سفره‌های آب زمینی کم عمق محدود در زیر حفاری‌های عمیق انجام شود. با این حال، به دلیل تراوش پیچیده و شرایط تنش لایه‌ها اثرات آن بر نشست زمین نامشخص است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) در یک مطالعه، یک روش عددی کوپل شده برای بررسی اثرات خشک اندازی در یک سفره آب زیرزمینی محدود بر نشست زمین در حین حفاری به کار گرفتند.

وو و همکاران (Wu et al., 2019) در یک مطالعه موردی تحقیقی را در مورد نشست ساختمان ناشی از خشک اندازی برای حفاری عمیق ساخته شده در یک نهشته در تیان جین، چین ارائه کردند. شرایط زمین‌شناسی در سایت شامل یک سیستم با چند سفره آب زیرزمینی که یک سفره فریاتیکی بر روی سه سفره زیرزمینی محدود است. برای حفظ پایداری کف حفاری، از یک دیوار پرده آب‌بند برای جلوگیری از نشت آب زیرزمینی با چاه‌هایی با قطر زیاد برای پایین آوردن سطح آب زیرزمینی استفاده شد.

در فرایند توسعه فضای زیرزمینی شهری، پیش‌بینی نشست زمین در اطراف گودال پی عمیق برای حفاظت از محیط اطراف ضروری است. در حال حاضر مطالعات کمی در مورد فرونشست طبقات ماسه و سنگریزه انجام شده است. علاوه بر این، در برخی از سایت‌های مهندسی با اثرات کوپلینگ چندعاملی، محاسبات نظری بزرگ و دقت پایین است.

لو و همکاران (Lv et al., 2020) در یک مطالعه روش تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده را معرفی کردند و بر تحلیل مقایسه‌ای مدل‌های پیش‌بینی نشست مبتنی بر نظریه خاکستری و نظریه شبکه عصبی پس انتشار (BP) تمرکز کردند. داده‌های فرونشست سطح اطراف گودال پایه عمیق در ایستگاه مترو در چنگدو، چین (که عمدتاً از لایه‌های ماسه و سنگریزه تشکیل شده است) برای فرمول‌بندی یک پیش‌بینی و پیشنهاد یک مدل بهینه پیش‌بینی خاکستری فرونشست زمین و یک مدل دوتایی لایه پنهان یک‌بعدی پیش‌بینی فرونشست شبکه عصبی BP استفاده شد. نتایج نشان داد که نتایج پیش‌بینی

وانگ و همکاران (Wang et al., 2013) در یک مطالعه بر اساس پروژه ایستگاه مترو Yishan مترو شانگهای، یک آزمایش سانتریفوژ برای بررسی رفتار نشست طبقه‌بندی‌شده و برگشت آن (SSR) بر روی خاک رس نرم شانگهای ناشی از خشک اندازی گودال عمیق ایستگاه مترو انجام دادند. محققین دریافتند که بار و نیروی چسبندگی خاک‌های مختلف منبع اصلی پاسخ‌های مختلف مربوط به هنگام خارج شدن از حالت فشرده است.

به‌منظور انجام حفاری‌های عمیق زیر سطح آب در محیط‌های شهری، ایمنی محل کار و ساختمان‌های مجاور یک علت عمده برای نگرانی است. یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌های انجام این حفاری‌ها شامل ترکیب روش برش و پوشش با یک سیستم خشک اندازی است. پوجادس و همکاران (Pujades et al., 2014) در یک مطالعه دریافتند موفقیت ساخت‌وساز بستگی به پایداری پایین حفاری دارد، اثرات ایجاد شده در خارج از حفاری با خشک اندازی (حرکات خاک) و / یا وضعیت محفظه (نقص در دیوارهای دیافراگم) بستگی دارد.

نشست زمین ناشی از خشک اندازی یک مسئله مهم است و اثر تجمعی در مشکلات طبقه‌بندی‌شده خاک وجود دارد. ژوو و همکاران (Zhu et al., 2015) در یک تحقیق با بررسی نشست طبقه‌بندی‌شده خاک به ارزیابی بهتر از نشست زمین اختصاص رسیدند. برای بررسی بهتر از ویژگی‌های نشست طبقه‌بندی‌شده ناشی از خشک اندازی خاک در شانگهای، یک برنامه مانیتورینگ بسیار دقیق میدانی برای حفاری ایستگاه مترو زیرزمینی انجام شد که شامل خشک اندازی سفره‌های زیرزمینی محدود در مناطق شهری بود.

چن و همکاران (Chen et al., 2018) در یک مطالعه نشست زمین ناشی از تأثیر ترکیبی حفاری و خشک اندازی در نواحی ماسه‌ای مورد بحث قرار دادند. سابقه موردی در شمال شرقی چین در این مطالعه در نظر گرفته شده است و نتایج نشان داد که تأثیر نشست زمین ناشی از حفاری و خشک اندازی حدود سه برابر عمق حفاری (H) است.

قیاسی و همکاران (۱۴۰۰) در یک پژوهش به بررسی عددی و پارامتریک نشست سطح زمین در محیط خاک اصطکاکی چسبنده و در حالتی که حفاری در محیط اشباع صورت می‌گیرد، با بهره‌گیری از روش تحلیل المان محدود پرداختند. محققین نتیجه گرفتند که با افزایش ضریب نفوذپذیری در خاک، نشست سطح زمین ناشی از تونل زنی کاهش داشته است و افزایش میزان چسبندگی در تمامی حالات و تحلیل‌های صورت گرفته، باعث کاهش میزان نشست سطح زمین شده است. همچنین افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، در بیشتر حالات باعث کاهش نشست سطح زمین شده است. البته هرچه میزان چسبندگی خاک به طور هم‌زمان افزایش یافته، این روند کاهش کمی مشاهده شده است.

۴. مدل‌سازی و مشخصات نمونه

PLAXIS نرم‌افزاری است که برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. در این روش که به عنوان مدل‌سازی عددی شناخته می‌شود، هندسه مسئله به تعدادی المان تقسیم می‌شود که در نقاط گرهی با هم ارتباط دارند و روابط تنش - کرنش به وسیله معادلات مناسب و روابط سازگاری حاکم بر مسئله مشخص کند.

هنگامی که PLAXIS بخواهد تغییر مکان‌ها (افقی و قائم) را در یک مدل محاسبه کند از نقاط گرهی واقع برای آن‌ها استفاده می‌کند اما زمانی که بخواهد تنش و کرنش‌ها را در مدل محاسبه کند به‌جای استفاده از نقاط گرهی از نقاط انتگرال‌گیری داخل المان (نقاط تنش) استفاده می‌کند. شرایط مرزی بایستی به نحوه‌ای اعمال شود که شرایطی مشابه زمین در شرایط واقعی و میدانی مدل‌سازی شود. برای اعمال این شرایط مرزی در مرزهای سمت راست و چپ مدل هیچ‌گونه جابجایی در راستای افقی نخواهیم داشت اما ممکن است بر اثر نشست زمین در راستای قائم جابجایی داشته باشیم؛ مشابه اینکه مرزهای چپ و راست به‌صورت مفصل عمل می‌کند. از طرف دیگر در مرز پائین علاوه بر راستای افق در راستای قائم نیز هیچ‌گونه حرکتی نخواهیم داشت و برای مرز پائین حرکت

دو مدل دقیق بوده و نتایج پیش‌بینی نهایی دارای ارزش مرجع مهندسی معینی هستند.

اگرچه توجه تحقیقات زیادی به پاسخ زمین و سازه به دلیل حفاری زیرزمین شده است، اثرات خشک‌اندازی در حین حفاری زیرزمین بر ویژگی‌های تغییر شکل به طور کامل بررسی نشده است. نی و همکاران (Ni et al., 2022) یک زیرزمین طولانی و باریک با عمق حفاری نهایی ۱۴/۵-۱۷/۰ متر که بسیار دقیق ابزار بندی شده و در خاک رس نرم ساخته شده بود را مورد مطالعه قرار دادند. حفاری زیرزمین و خشک‌اندازی باعث ایجاد حرکت قابل ملاحظه دیواره جانبی در نوک شمع سازه نگهدارنده می‌شود. حداکثر حرکت جانبی در نوک شمع تا ۶۴/۹ درصد حداکثر حرکت دیواره جانبی است.

خشک‌اندازی با چاه‌های پمپاژ قرار داده شده در داخل یک گودبرداری معمولاً به عنوان سیستم کنترل آب زیرزمینی برای اطمینان از ایمنی ساخت‌وساز در لایه‌های غنی از آب استفاده می‌شود. با این حال، خشک‌اندازی هم باعث کاهش آب زیرزمینی و هم حرکت دیوار حائل می‌شود که ممکن است منجر به نشست جلدی زمین شود. اخیراً، یک سیستم جدید نگهدارنده خاک، دیوار حائل تکیه‌گاه، برای محدود کردن حرکت دیوار و نشست زمین مرتبط ناشی از حفاری زمین پیشنهاد شده است، در حالی که اثربخشی آن در کاهش تغییر شکل‌های ناشی از خشک‌اندازی بررسی نشده است.

چاوونگ و همکاران (Chao-Feng et al., 2021) مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی بر اساس یک ایستگاه مترو برای جستجوی اثرات دیوار حائل بر روی نشست زمین در طول خشک‌اندازی و ساخت‌وساز انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار تکیه‌گاه به طور قابل‌توجهی نشست سطح زمین را به دلیل خشک‌اندازی گودال فونداسیون کاهش داد و کاهش بیشتر در مورد دیوار پایه بلندتر ظاهر شد. با این حال، در شرایط با افت کوچک ناشی از خشک‌اندازی، راندمان مهار تغییر شکل دیوار تکیه‌گاه با افزایش طول آن کاهش یافت.

آب‌های نفوذی به زمین را در خود جای می‌دهد و سطح آب به تدریج در حال بالا آمدن در نقاط مختلف شهر می‌باشد. این بالا آمدن تدریجی آب مشکلات عدیده‌ای را برای شهروندان به‌خصوص در زمینه گودبرداری عمیق ایجاد نموده است.

۲-۴. حفاری و نمونه‌برداری

در زیرگذر پروژه شهید باقدرت (شکل شماره ۲)، باتوجه‌به بررسی‌های صورت گرفته ۴ گمانه (شکل ۳) به عمق حداکثر ۲۰ متر جهت شناسایی لایه‌بندی و بافت خاک در محل حفر گردید که گمانه‌ها به‌صورت ماشینی (دورانی) حفر شده که بر اساس روابط و مبانی طرح به‌منظور کاهش سطح آب نقاطی مشخص شده و در نهایت باتوجه‌به سطح ایستایی آب و فضای کافی جهت استقرار ماشین‌آلات بهترین محل‌ها برای حفر چاه انتخاب گردید.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های ژئوتکنیک در محل احداث پروژه و قضاوت‌های مهندسی صورت گرفته جدول (۱) مشخصات ژئوتکنیکی در طراحی و مدل‌سازی پروژه مدنظر قرار گرفته است. جدول (۲) و (۳) مشخصات دیواره دیافراگمی و نیلینگ را نشان می‌دهد.

در هر دو راستای قائم و افق محدود می‌شود درست مانند اینکه مرز پائین به‌صورت گیردار عمل می‌کند. پس از حصول نتیجه از مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار PLAXIS، نتایج حاصل شده را با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی تولید شده در نرم‌افزار MATLAB به منظور پیش‌بینی نتایج سایر موارد مشابه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت و یک مدل شبکه عصبی مصنوعی تولید گردید.

۱-۴. مشخصات نمونه

بخش‌هایی از شهر کرمان بر روی یک لایه ماسه‌ای قرار دارد و در زیر این لایه ماسه‌ای رسوباتی با بافت ریزدانه رسی-سیلتی و نفوذپذیری کم که ضخامت آن‌ها به چند متر می‌رسد واقع شده است. در قسمت‌های زیادی از شهر کرمان همین رسوبات نمود سطحی دارند که تاکنون به دلیل عدم اجرای کامل شبکه جمع‌آوری آب فاضلاب شهری این سهم به‌صورت نسبی و از طریق چاه‌های جذبی به سفره آب زیرزمینی منتقل شده است و به‌مرور زمان و باتوجه‌به افزایش روزافزون جمعیت این روش باعث بالا آمدن سطح آب زیرسطحی شده است. یکی از عوامل تشدید این پدیده، سنگی بودن پوسته زیرین شهر کرمان است. این پوسته همانند یک کاسه سنگی



شکل ۲. موقعیت پروژه (زیرگذر شهید باقدرت)



شکل ۳. محل جانمایی گمانه‌ها

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیک پروژه و پارامترهای

استفاده شده

Poisson's ratio	0.5
Friction angle	12-20-30-35-40
Cohesion coefficient	20-30-40-60
Young module(E)	13000
Dry specific gravity(γ_{dry})	16
Wet specific gravity(γ_{sat})	19
Soil type	cl-MI
Depth (m)	1-30
Resistance reduction factor (R_{int})	0.67

جدول ۲. مشخصات دیوار دیافراگمی

Factor name	Symbol	Unit	Value
Axial stiffness	EA	$\frac{KN}{m}$	$7 \cdot 10^6$
Flexural stiffness	EI	$\frac{KN \cdot m^2}{m}$	71458/3
Medium thickness	D	m	0.35
Weight	W	$\frac{KN}{m}$	8.4
Poisson's ratio	ν		0.15

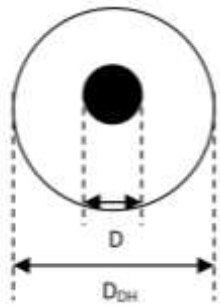
جدول ۳. مشخصات نیلینگ

Factor name	Symbol	Unit	Value
Axial stiffness	EA	$\frac{KN}{m}$	254811
Flexural stiffness	EI	$\frac{KN \cdot m^2}{m}$	159.21
Poisson's ratio	ν		0.2

لازم به ذکر است که باتوجه به بررسی به عمل آمده و حفاری انجام شده سطح آب در عمق ۷/۵ متری از سطح زمین قرار دارد که جهت انجام عملیات عمرانی بایستی به ۹/۵ متر کاهش پیدا کند.

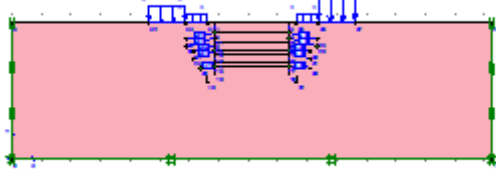
رابطه ۱۰

$$\text{Bending stiffness } EI \left(\text{KNm}^2/\text{m} \right) = \frac{E_{eq}}{S_h} \left(\frac{\pi D_{DH}^2}{64} \right)$$



شکل ۴. مقطع یک میخ

جهت مدل‌سازی دیوار از المان plate و نیلینگ‌ها نیز از المان plate استفاده می‌شود که شکل شماره ۵ نمای کلی پروژه را نمایش می‌دهد.



شکل ۵. نمای کلی پروژه

در شکل (۶) مش‌بندی پروژه نمایش داده شده است.

برای تعریف فازهای طراحی چون فاصله زمانی کوتاهی بین برداشتن خاک، نصب نیلینگ و اجرای دیوار دیافراگمی می‌باشد، هر سه مرحله در یک فاز انجام می‌شود. فاز تحلیلی شامل ۱۱ فاز متفاوت می‌باشد که در فاز ۱ بار سطحی ساختمان حاشیه گود فعال می‌گردد و در فاز ۲ الی ۵ گودبرداری و دیواره دیافراگمی و نیلینگ در هر مرحله مدل می‌شوند و از فاز ۶ به بعد پمپاژ جهت پایین آوردن سطح آب با دبی‌های ۱، ۲ و ۴ مترمکعب بر روز به مدت ۱۵ روز جهت آبکشی از داخل گود تا عمق ۹/۵ متر انجام می‌شود (شکل شماره ۷ و ۸ و ۹). سپس در فاز ۷ گودبرداری مدل‌سازی می‌شود. در فاز ۸ اجرای دیواره و نیلینگ انجام می‌شود (شکل شماره ۷). در نهایت گودبرداری و اجرای دیواره و نیلینگ

۳-۴. مدل‌سازی و نتایج

طراحی به صورت دوبعدی با فرض شرایط کرنش مسطح با نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS-2D انجام شده است در زیرگذر شهید با قدرت عرض گودبرداری ۲۰ متر و عمق گودبرداری ۹/۵ متر می‌باشد. سطح آب زیرسطحی ۲ متر بالاتر از کف گودبرداری قرار دارد که جهت پائین آوردن آب زیرسطحی ۲ حلقه چاه در عمق ۱۳ متر از سطح زمین اجرا گردیده است، لازم به ذکر می‌باشد پروژه از طرف ضلع شمال به خیابان با تردد متوسط و یک ساختمان سه طبقه که طبق آیین‌نامه FHWA بارهای سطحی آن $10 \frac{KN}{m^2}$ و $30 \frac{KN}{m^2}$ از طرف ضلع جنوب یک خیابان با تردد متوسط و ساختمان دو طبقه که بارهای سطحی آن $10 \frac{KN}{m^2}$ و $20 \frac{KN}{m^2}$ قرار دارد. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود مدول الاستیسیته نیلینگ و گروت به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. برای تعریف سختی خمشی و سختی محوری نیلینگ ابتدا بایستی از رابطه (۵) مدول الاستیسیته معادل را محاسبه نماییم.

$$E_{eq} = E_n \left(\frac{A_n}{A} \right) + E_g \left(\frac{A_g}{A} \right)$$

که در رابطه فوق A سطح مقطع حفاری، A_n سطح مقطع نیلینگ، A_g سطح مقطع گروت می‌باشد که در شکل شماره ۴ مقطع نیل نمایش داده شده است که باتوجه به شکل سطح مقطع حفاری، نیل و گروت از روابط (۶ و ۷ و ۸) به دست می‌آید که پس از محاسبه سطح مقطع‌ها باتوجه به رابطه ۵ مدول الاستیسیته معادل نیل به دست می‌آوریم و سپس سختی محوری و خمشی نیل را با استفاده از (۹ و ۱۰) محاسبه و در برنامه وارد می‌شود.

$$A = 0.25\pi D_{DH}^2 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$A_n = 0.25\pi D^2 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$A_g = A - A_n \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\text{رابطه ۹}$$

$$\text{Axial stiffness } EA \left(\text{KN}/\text{m} \right) = \frac{E_{eq}}{S_h} \left(\frac{\pi D_{DH}^2}{4} \right)$$

صورت افزایش هم‌زمان زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک میزان نشست نیز بیشتر کاهش می‌باید اما سرعت این کاهش کمتر می‌باشد. کاهش نشست خاک در اثر افزایش اصطکاک داخلی در تمامی حالات قابل مشاهده است و یک عامل مؤثر و مهم در تعیین میزان نشست خاک می‌باشد چرا که تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و همین‌طور تغییرات چسبندگی باعث کاهش نشست به میزان قابل ملاحظه تری می‌شود.

۴-۳-۳. تأثیر تغییرات چسبندگی خاک

پس از بررسی مدل‌سازی‌های صورت گرفته و تحلیل نتایج جدول شماره ۴ مشاهده گردید که افزایش چسبندگی خاک باعث کاهش نشست خاک می‌شود. همان‌طور که از اطلاعات به دست آمده مشاهده می‌شود تأثیر هم‌زمان افزایش چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر کاهش نشست سرعت بیشتری دارد و با افزایش هم‌زمان میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست خاک سریع‌تر کاهش پیدا می‌کند.

۴-۳-۴. تأثیر دبی پمپاژ آب از خاک

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که می‌توان با تغییر آن در یک پروژه واقعی میزان نشست را کمتر کرد دبی پمپاژ آب خروجی از سیستم می‌باشد. از نتایج حاصل شده می‌توان دریافت که هرچه دبی پمپاژ بیشتر باشد نشست خاک نیز بیشتر می‌شود که این امر به دلیل خروج سریع‌تر آب و تحکیم سریع‌تر خاک می‌باشد. در بررسی این نتایج تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک اهمیت زیادی دارد به گونه‌ای که هرچه زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر شود در یک میزان دبی پمپاژ خاص، نشست خاک کاهش می‌یابد. این امر برای چسبندگی خاک نیز صادق می‌باشد اما با سرعت کمتر؛ یعنی با افزایش چسبندگی خاک در یک دبی پمپاژ خاص نشست خاک کاهش پیدا می‌کند اما میزان کاهش آن کمتر از میزان کاهش نشست در اثر افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد.

انجام می‌شود. ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که تأثیر مرزهای تحتانی و جانبی به حداقل میزان برسد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی نشست لبه گود با تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک و پارامتر نفوذپذیری خاک و دبی پمپاژ آب بوده است. برای این منظور خاک‌هایی با میزان چسبندگی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۱۲، ۲۰، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفتند. برای هر یک از این خاک‌ها دو حالت با ضریب نفوذپذیری ۰/۵ و ۱ متربروز در نظر گرفته شده است. دبی پمپاژ مورد ارزیابی در این پژوهش ۱، ۲ و ۴ مترمکعب بر روز می‌باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش در جدول شماره ۴ قابل مشاهده است. برای بررسی و تفسیر نتایج تأثیر تغییر هر پارامتر می‌بایست پارامتر موردنظر متغیر و سایر پارامترها ثابت باشند. در این پژوهش ۴ پارامتر متغیر بوده است.

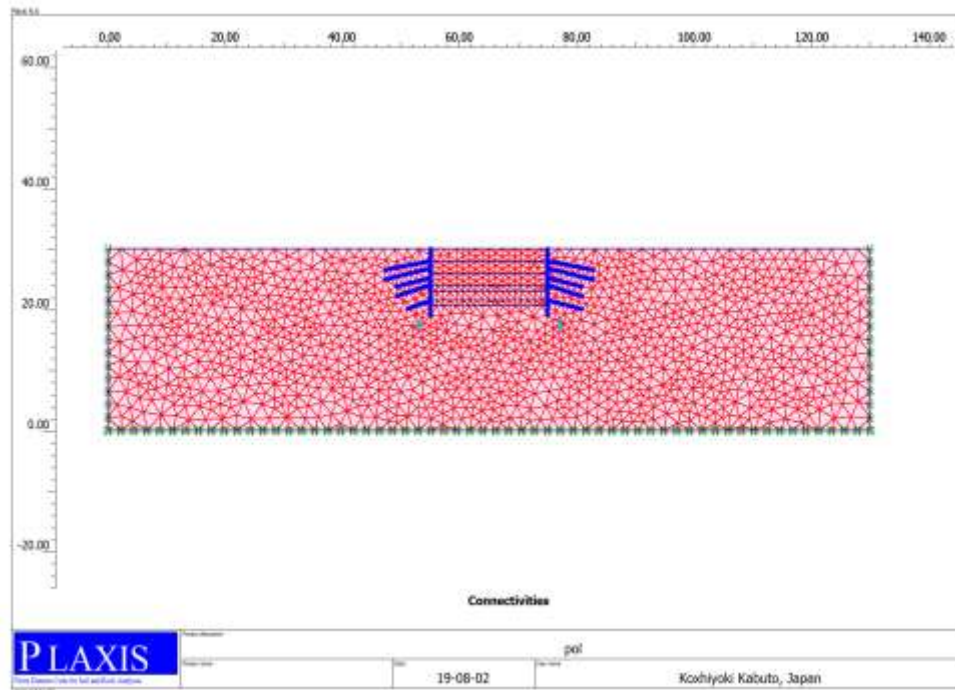
۴-۳-۱. تأثیر ضریب نفوذپذیری

یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده رفتار خاک در مناطق با سطح آب زیرزمینی بالا، ضریب نفوذپذیری خاک می‌باشد. ضریب نفوذپذیری خاک می‌تواند بر فشار آب حفره‌ای و نشست خاک و رفتار خاک چه در حالت استاتیکی و چه در حالت دینامیکی تأثیر گذار باشد. پس از بررسی تغییرات نشست برای ضریب نفوذپذیری مختلف خاک مشاهده می‌شود که به‌طورکلی با افزایش ضریب نفوذپذیری، نشست خاک کاهش می‌یابد.

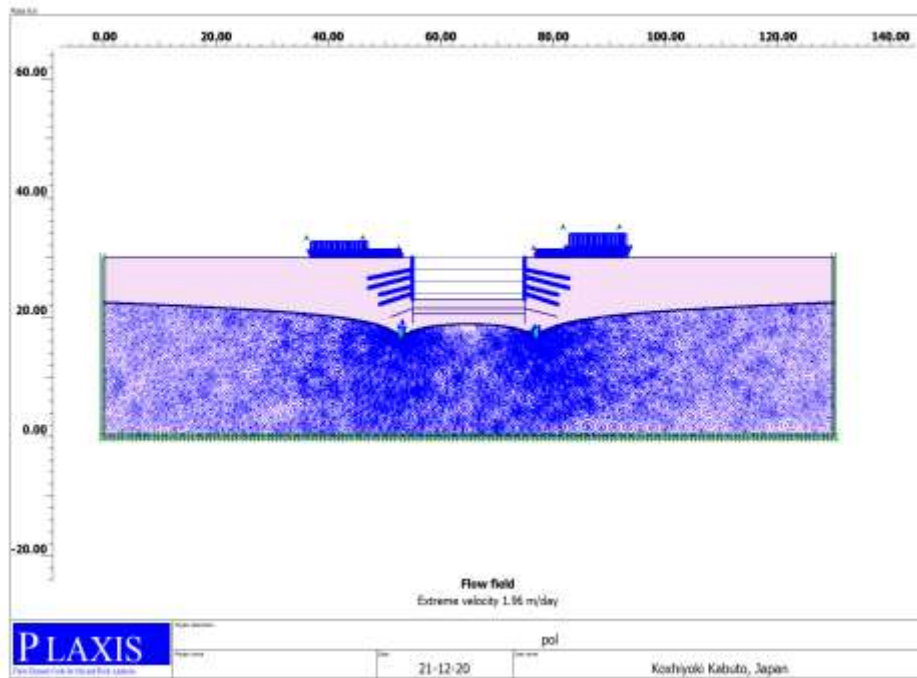
تأثیر ضریب نفوذپذیری در چسبندگی‌های بیشتر کمتر نمود پیدا می‌کند و تأثیر کمتری بر کاهش نشست دارد در حالی که در چسبندگی‌های کمتر، نشست‌های بیشتری را در پی دارد. همچنین تأثیر ضریب نفوذپذیری بر نشست خاک با افزایش زاویه اصطکاک داخلی کمتر می‌شود.

۴-۳-۲. تأثیر تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک

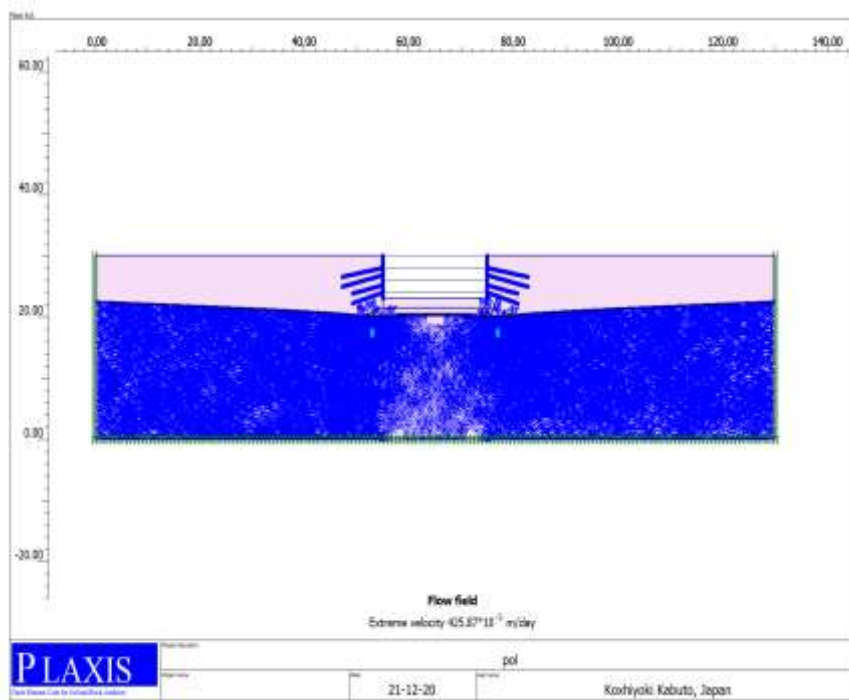
همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست خاک نیز کاهش می‌یابد که این امر به علت افزایش درگیری میان ذرات خاک با یکدیگر است. در



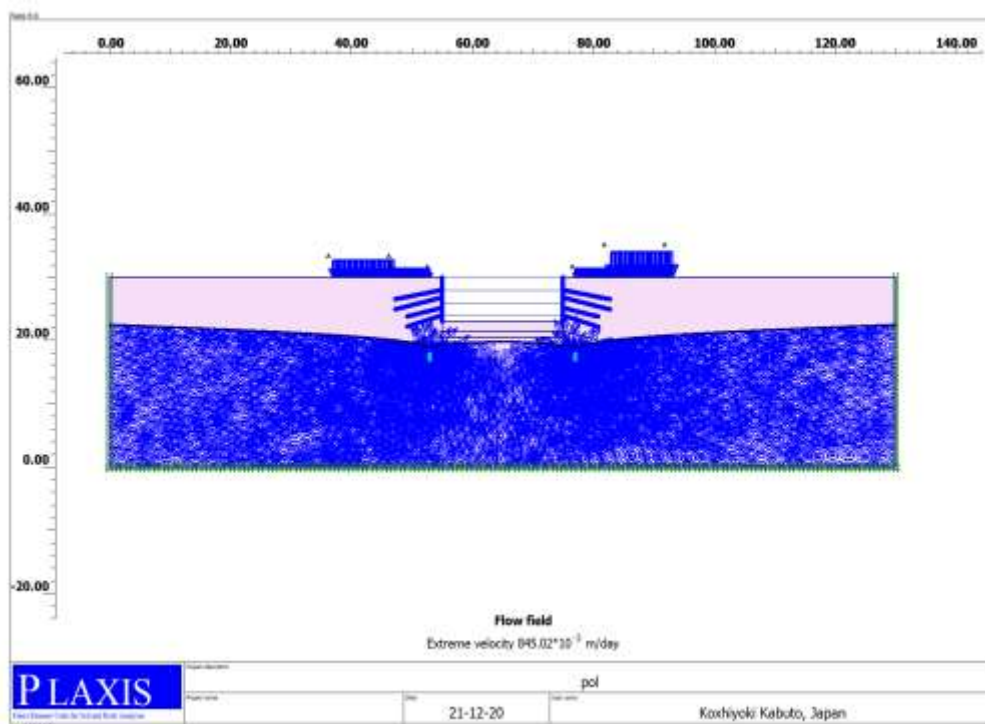
شکل ۶. مش بندی پروژه



شکل ۷. پمپاژ آب با دبی ۴ مترمکعب بر روز



شکل ۸. پمپاژ آب با دبی ۱ مترمکعب بر روز



شکل ۹. پمپاژ آب با دبی ۲ مترمکعب بر روز

جدول ۴. نشست سطح زمین بر اساس ورودی‌های مختلف

	$\frac{\phi}{C}$	Q=1 (m ³ /day)					Q=2 (m ³ /day)					Q=4 (m ³ /day)				
		12	20	30	35	40	12	20	30	35	40	12	20	30	35	40
K=1 (m/d)	20kpa	*	46.43	41.18	40.27	39.76	*	46.43	41.8	40.88	40.05	*	47.05	42.94	41.9	41.34
	30kpa	52.13	43.23	41.79	41.2	39.14	52.32	45.36	41.55	42.02	39.84	53.23	44.89	42.14	42.92	40.92
	40kpa	45.68	41.06	39.56	40.32	39.08	46.47	44.27	41.27	41	39.74	47.06	43.88	42.12	41.61	40.82
	60kpa	44.01	39.47	39.14	39.59	38.87	44.32	44.27	40.84	40.27	39.67	44.99	43.61	41.89	41.33	40.75
K=0.5 (m/d)	20kpa	*	46.95	41.97	41.1	40.2	*	41	42.98	42.4	41.12	*	48.65	44.57	43.74	43.11
	30kpa	52	45.21	41.33	40.87	39.99	52.37	45	42.55	41.89	40.85	52.67	47.01	44.14	43.35	42.81
	40kpa	46.8	43.05	41.32	41.45	39.88	47.35	44.27	42.11	41.5	40.8	48.77	45.74	44.06	43.22	42.7
	60kpa	44.31	41.05	40.84	40.33	39.8	44.99	43.36	43.36	41.28	40.75	46.77	45.28	43.67	43.1	42.52

از تکنیک یادگیری نظارت‌شده به نام انتشار معکوس برای آموزش استفاده می‌کند. لایه‌های متعدد آن و فعال‌سازی غیرخطی آن این قابلیت را به آن می‌دهد که داده‌هایی را متمایز کند که به صورت خطی قابل تفکیک نیستند.

نمایی از شبکه استفاده‌شده در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. دقت شود از نظر تئوری تفاوتی میان یک‌لایه نهان یا چندلایه نهان نیست و از نظر تئوری گفته می‌شود که هر تابعی با تعداد نوروں به حد کافی قابل پیش‌بینی با شبکه یک‌لایه است که حد کافی باید تخمین زده شود اما از لحاظ عملی وقتی تعداد لایه افزایش یابد قابلیت یادگیری شبکه بیشتر خواهد بود و با اینکه زمان آموزش افزایش می‌یابد ولی قابلیت انطباق بهتری با داده‌ها خواهد داشت.

شبکه عصبی با بیش از دو لایه به شبکه عمیق معروف است؛ لذا در پژوهش حاضر از شبکه عمیق استفاده شده است. باتوجه‌به اینکه متغیرهای مستقل مسئله، چهار متغیر است که شامل چسبندگی خاک (c)، زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، دبی (Q)، ضریب نفوذپذیری خاک (k) است لذا چهار لایه نهان در نظر گرفته شده است. خروجی شبکه یک مقدار بر می‌گرداند که همان حداکثر میزان نشست به ازای ورودی‌ها است. در شبکه‌های عصبی تعداد نوروں‌ها در هر لایه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چرا که اگر تعداد نوروں‌ها بیش از در نظر گرفته شود پارامترهای آزاد بیشتر از تعداد داده‌های اولیه می‌شود و شبکه قادر به پیش‌بینی صحیح ورودی جدید به علت آزادی زیاد نخواهد بود و از طرفی اگر تعداد نوروں‌ها کم در نظر گرفته شود تابع فیزیکی مسئله به‌درستی مدل نخواهد شد و قادر به آموزش صحیح داده‌ها نخواهد بود. یک سری

۵. شبکه عصبی

هدف از تولید شبکه عصبی مصنوعی، پیش‌بینی میزان نشست حاشیه گود با در نظر گرفتن تغییرات دبی و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و نفوذپذیری خاک‌های متفاوت می‌باشد که با به دست آوردن حداکثر نشست حاشیه گود و استفاده از نرم‌افزار MATLAB و ایجاد شبکه عصبی مصنوعی مدل پیش‌بینی نشست سطح زمین طراحی گردیده است.

باتوجه‌به حل مشکلات آموزش شبکه عصبی مصنوعی، آن‌ها در یک دهه اخیر به قدرتمندترین ابزار یادگیری ماشین تبدیل شدند. شبکه‌های عصبی از مغز انسان نشئت می‌گیرند و این ابزار در هر بخشی از یادگیری ماشینی اعم از یادگیری با نظارت، نیمه نظارت و یا بدون نظارت قابل استفاده هستند. هدف استفاده از یادگیری ماشین در این پژوهش پیش‌بینی حداکثر میزان نشست سطح خاک است. لذا در پژوهش حاضر از شبکه عصبی مصنوعی برای رگرسیون استفاده شده است. از آنجایی‌که هدف رگرسیون بود، از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) استفاده شد. این نوع شبکه یک شبکه مبتنی بر یادگیری تحت نظارت است، بنابراین برای آموزش به داده‌های اولیه و برچسب‌گذاری شده نیاز دارد که برای آن پایگاه داده شامل ۱۲۰ نمونه شبیه‌سازی تهیه شده است.

که جزییات شبیه‌سازی‌ها و پارامترها در جدول ۵ قابل مشاهده است. یک MLP شامل سه لایه کلی است: یک‌لایه ورودی، یک یا چندلایه پنهان و یک‌لایه خروجی است. به‌جز گره‌های ورودی، هر گره یک نوروں است که از یک تابع فعال‌سازی غیرخطی استفاده می‌کند. MLP

جدول ۵. پارامترهای ورودی به شبکه و مقادیر آنها

Variable	Discharge (Q)	Soil Internal friction angle (ϕ)	soil cohesion (c)	Soil permeability coefficient (k)
Magnitude	1-2-4	12-20-30-35-40	20-30-40-60	0.5-1

انتخاب می‌شود. در لایه خروجی از تابع فعال‌ساز خطی استفاده گردید و در لایه‌های پنهان از لایه فعال‌ساز سیگموئید استفاده گردید که فرمول این دو تابع فعال‌ساز به صورت زیر است:

$$F(n) = n \quad \text{رابطه (۱۲) فعال‌ساز خطی}$$

$$F(n) = \frac{1}{1 - e^{-n}} \quad \text{رابطه (۱۳) فعال‌ساز سیگموئید}$$

همچنین برای آموزش شبکه، از الگوریتم لونیگ-مارکواریت استفاده شده است. الگوریتم لونیگ-مارکواریت روشی برای یافتن مقدار کمینه یک تابع غیرخطی چندمتغیره است که به عنوان یک روش استاندارد برای حل و آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود. برای محاسبه خطای ایجاد شده در شبکه و ارزیابی کارکرد بهینه آن در پیش‌بینی، از معیار ارزیابی میانگین مربع خطاها استفاده شده است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

رابطه (۱۴)

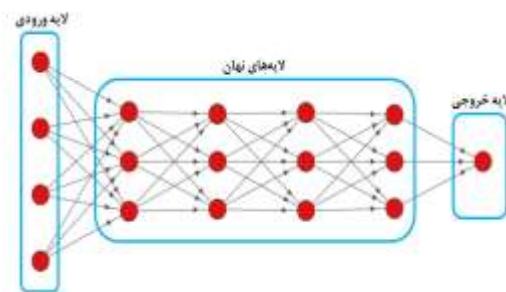
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2$$

که در آن N تعداد داده‌ها، y_i مقدار واقعی و y'_i مقدار پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی است. در حقیقت این معیار، معیار توقف آموزش شبکه است که دو شرط گذاشته شده یا اینکه به معیار همگرایی $e-15$ برسد یا اینکه در ۵ اپوک پشت سرهم نتواند بهبودی حاصل کند. از روی قصد این مقدار کوچک در نظر گرفته شد که تا حد ممکن که شبکه می‌تواند بهبود حاصل کند ادامه دهد به صورت پیش‌فرض این مقدار $1e-5$ است لذا عملاً شرط متوقف کننده عدم بهبود در ۵ اپوک پشت سرهم است. در شکل ۱۰ این معیار برای شبکه آموزش داده شده قابل مشاهده است که همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت شرط دوم متوقف شده است.

تخمین اولیه و مناسب برای تعداد کل نورون‌های شبکه با نظارت با توجه به داده‌ها بیان شده است. از این تخمین‌ها استفاده گردید و مشخص گردید که تعداد مناسب نورون برای هر لایه ۳ است. این تخمین به صورت زیر است:

$$N_h = \frac{N_s}{\alpha \times (N_i + N_0)} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در این رابطه N_s نورون‌های لایه ورودی است که برای پژوهش حاضر ۴ در نظر گرفته می‌شود و N_0 نورون‌های لایه خروجی است که برای پژوهش حاضر یک در نظر گرفته می‌شود. N_s تعداد داده‌های آموزش است؛ و α ضریب ثابت بین ۱ تا ۱۰ است. البته این رابطه یک رابطه تخمینی است و فقط تعداد تقریبی و حدود تعداد نورونها را تعیین می‌کند لذا پس از آن به صورت سعی و خطا در حوالی آن چندین شبکه آموزش داده شد که بهترین جواب برای مقدار ۳ نورون در هر لایه به دست آمد.

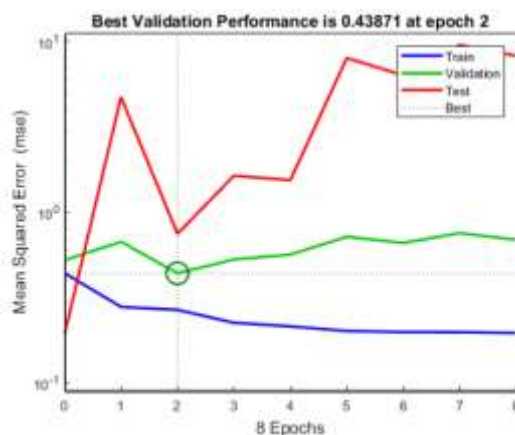


شکل ۱۰- معماری شبکه عصبی استفاده شده در پژوهش حاضر

در جدول ۶، پارامترهای شبکه جهت آموزش قابل مشاهده است. تقسیم داده‌ها جهت آموزش و تست و ارزیابی به صورت تصادفی انجام شده است و ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای تست و ۱۵ درصد برای ارزیابی به صورت تصادفی

جدول ۶. مشخصات شبکه آموزش داده شده

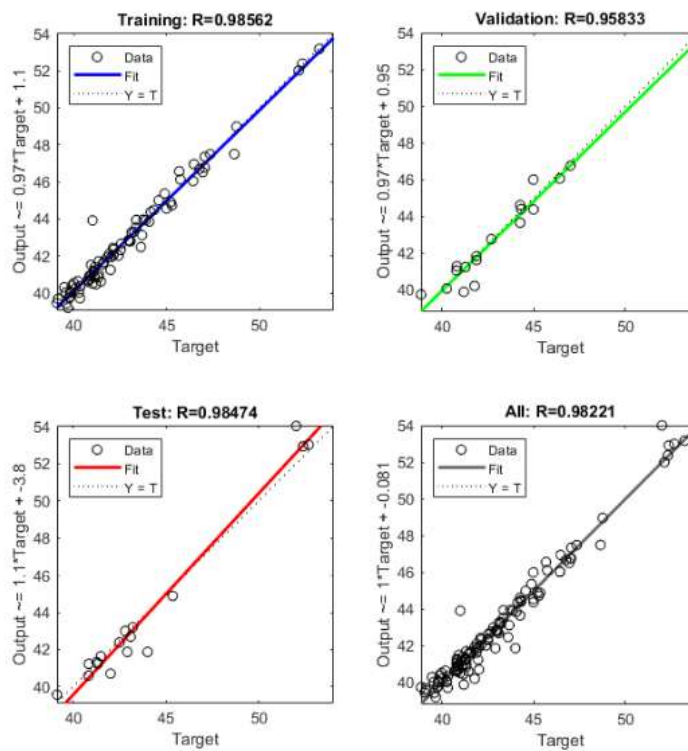
Function / Value	Criterion	Function / Value	Criterion
Feed-forward	transfer data to layers	Lonberg-Marquardt algorithm	Training algorithm
1e-15	Convergence criterion	Mean square errors	Performance evaluation
Randomly	Data segmentation	Linear function	Output function
Sigmoid	Hidden Layers Activation Function		



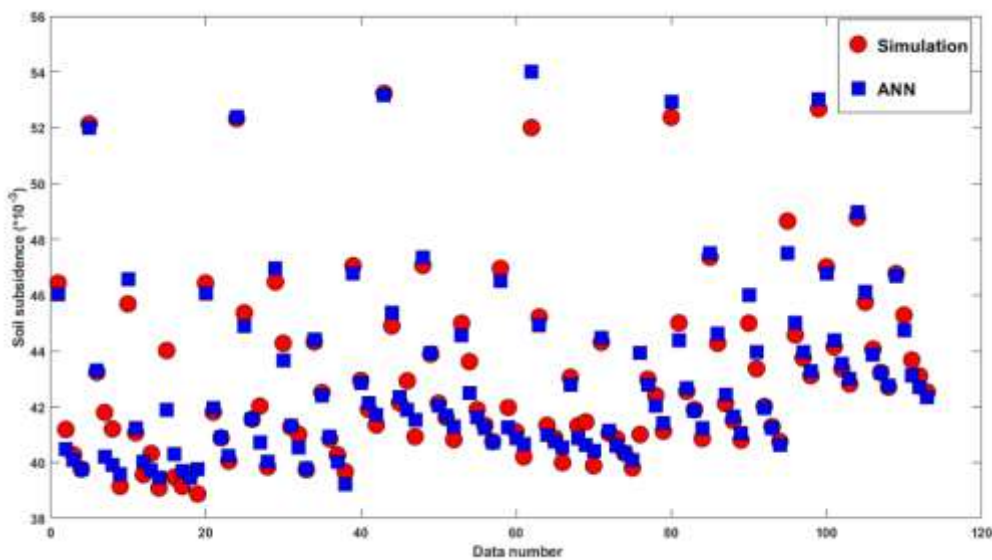
شکل ۱۱. نمودار همگرایی شبکه عصبی مصنوعی

باتوجه به شکل های شماره ۱۲ و ۱۳ و میزان ضریب همبستگی به دست آمده که برابر ۰/۹۸۲ می باشد می توان دریافت که شبکه عصبی آموزش داده شده جواب های مناسبی را به دست می دهد. مقایسه انجام گرفته شده میان شبکه عصبی آموزش داده شده در این پژوهش و مدل سازی عددی نشان می دهد که هر دو روش از اعتبار خوبی برخوردار هستند و می توان از شبکه های عصبی در پروژه های مهندسی استفاده بهینه کرد. در یک شبکه عصبی هرچه ضریب همبستگی به عدد ۱ نزدیک تر باشد حاکی از دقت بالای جواب های شبکه عصبی آموزش داده شده می باشد. تمرکز داده های رگرسیونی روی خط $x=y$ نشان دهنده دقت و قدرت بالای شبکه عصبی آموزش داده شده در پیش بینی مقادیر واقعی می باشد. باتوجه به نتایج به دست آمده می توان به این شبکه عصبی آموزش داده شده در پیش بینی نتایج مقادیر واقعی خاک اعتماد کرد.

در شکل ۱۲، رگرسیون برای بخش آموزش، تست و ارزیابی قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود رگرسیون داده آموزش و تست و ارزیابی هر سه بالا است و این نشان دهنده این است که شبکه به درستی آموزش دیده است. هرچه ضریب R به یک نزدیک تر باشد که معادل با این است که به خط $y=x$ نزدیک تر شدیم، قدرت و دقت شبکه در پیش بینی افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۳ مقادیر نشست خاک پیش بینی شده توسط شبکه عصبی با مقدار واقعی به دست آمده از شبیه سازی عددی برای کلیه نمونه ها رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود شبکه به خوبی آموزش دیده و می تواند به خوبی کمیت مورد نظر ما را بر اساس پارامترهای طراحی پیش بینی کند. لذا در این پژوهش توانستیم ماشینی ارائه دهیم که بتوان با آن بدون شبیه سازی مقادیر نشست خاک را باتوجه به پارامترهای مؤثر ورودی به خوبی پیش بینی کند.



شکل ۱۲. نمودار رگرسیونی مربوط به داده‌ها به صورت تفکیک شده در شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه



شکل ۱۳. مقایسه میزان نشست خاک در زیر ساختمان به وسیله شبیه‌سازی و شبکه عصبی

۶. نتیجه‌گیری و بحث

داده‌ها برای تولید شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه در نرم‌افزار MATLAB مورد استفاده قرار گرفت. (۱) در شرایطی که دبی پمپاژ افزایش پیدا می‌کند میزان نشست افزایش یافته و همچنین باعث افزایش هزینه‌های اجرایی نیز می‌گردد؛ اما در یک دبی خاص افزایش زاویه اصطکاک داخلی

در این پژوهش نتایج به دست آمده از نرم‌افزار PLAXIS و تأثیر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و نفوذپذیری خاک و دبی پمپاژ آب بر نشست محیط پیرامون گود در اثر احداث زیرگذر شهید باقدرت شهر کرمان بررسی و بر اساس

در چسبندگی‌های کمتر، نشست های بیشتری را در پی دارد. همچنین تأثیر ضریب نفوذپذیری بر نشست خاک با افزایش زاویه اصطکاک داخلی کمتر می‌شود.

(۵) شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه به خوبی توانست نتایج مقادیر واقعی را پیش‌بینی کند و باتوجه به ضریب همبستگی خروجی شبکه عصبی و مدل‌سازی عددی که ۰,۹۸۲ بوده نشان می‌دهد که یک رابطه صحیح و قابل‌اعتماد از این شبکه عصبی آموزش داده شده حاصل شده است.

(۶) مقایسه انجام گرفته شده میان شبکه عصبی آموزش داده شده در این پژوهش و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که هر دو روش از اعتبار خوبی برخوردار هستند و می‌توان از شبکه‌های عصبی در پروژه‌های مهندسی استفاده بهینه کرد.

(۷) بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی مشاهده می‌شود که افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشترین تأثیر را در کاهش نشست خاک دارد؛ پس از آن افزایش چسبندگی خاک تأثیر بیشتری نسبت به دو پارامتر دبی و ضریب نفوذپذیری دارد. در نهایت دبی خشک اندازی دارای تأثیری بیشتر از ضریب نفوذپذیری دارد.

تأثیر بیشتری نسبت به افزایش چسبندگی بر کاهش نشست خاک دارد.

(۲) افزایش چسبندگی خاک باعث کاهش نشست می‌شود. تأثیر هم‌زمان افزایش چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر کاهش نشست سرعت بیشتری دارد و با افزایش هم‌زمان میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست خاک سریع‌تر کاهش پیدا می‌کند.

(۳) با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست خاک نیز کاهش می‌یابد که این امر به علت افزایش درگیری میان ذرات خاک با یکدیگر است. در صورت افزایش هم‌زمان زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک میزان نشست نیز بیشتر کاهش می‌یابد اما سرعت این کاهش کمتر می‌باشد.

(۴) با افزایش ضریب نفوذپذیری نشست افزایش پیدا می‌کند. پس از بررسی تغییرات نشست برای ضریب نفوذپذیری مختلف خاک مشاهده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش ضریب نفوذپذیری، نشست خاک کاهش می‌یابد.

تأثیر ضریب نفوذپذیری در چسبندگی‌های بیشتر، کمتر نمود پیدا می‌کند و تأثیر کمتری بر کاهش نشست دارد در حالی که

مراجع

- طاحونی، ش.، ۱۳۳۳. اصول مهندسی ژئوتکنیک. مؤسسه انتشارات پارس آیین، ۳۱۳ - ۳۱۹.
- معماریان، ح.، ۱۳۳۲. زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ چهارم.
- واحدی فر، م.، بلوری بزاز، ج.، ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مؤثر در طراحی انکرها در پایدارسازی گودبرداری‌ها و طرح بهینه آن‌ها، چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، ایران.
- کاوه، ع.، ایرانمنش، ع.، ۱۳۸۴. شبکه‌های عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی سازه‌ها، چاپ سوم؛ انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- قیاسی، و.، کوشکی، م.، ۱۴۰۰. بررسی عددی نشست سطح زمین در تونل‌زنی دایره‌ای تحت اثر هم‌زمان تغییرات مشخصات هندسی تونل و مکانیکی خاک در محیط اشباع و پیش‌بینی آن در شبکه عصبی مصنوعی، مجله مدل‌سازی در مهندسی، شماره ۶۴.
- Budiardjo, M. A., Ynng, S., Cheogenizadeh A., and Nikraz. H., 2015. Fitting under static loading: land subsidence, American journal of Applied Sciences, pp. 58-63.
- Chao-Feng Z., Wei-Wei S., Xiu-Li X., Miao-Kun L., Ning B., Guo-Xiong M., 2021. Construction dewatering in a metro station incorporating buttress retaining wall to limit ground settlement: Insights from experimental modelling, Tunnelling and Underground Space Technology, 116: 104124.
- Chen, Y., Zhao, W., Jia, P. J., and Han, J. Y., 2018. Proportion analysis of ground settlement caused by excavation and dewatering of a deep excavation in sand area. Indian Geotechnical Journal, 48(1), 103-113.
- Roy, D., and Keith E. R., 2009. Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering, Engineering Geology 107.3-4: 109-117.

- Wang, J., Huang, T., and Sui, D. 2013. A case study on stratified settlement and rebound characteristics due to dewatering in Shanghai subway station. *The Scientific World Journal* 2013.
- Lv, Y., Liu, T., Ma, J., Wei, S., and Gao, C., 2020. Study on settlement prediction model of deep foundation pit in sand and pebble strata based on grey theory and BP neural network. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(23), 1-13.
- Najafzadeh, M., and Zahiri, A., 2015. Neuro-fuzzy GMDH to predict scour depth around apier incohesive soils. *APPLIED Ocean Research*, 40(2013)35-41.
- Pujades, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., and Jurado, A., 2014. Dewatering of a deep excavation undertaken in a layered soil. *Engineering geology*, 178, 15-27.
- Shahin, A., Maier, H. R., and Jaksa, M. B., 2002. Predicting Settlement of Shallow Foundation Using Neural Networks, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128.9, 785-793.
- Shi, J. J., 2000. Reducing prediction error by transforming input data for neural networks. *Journal of computing in civil engineering*, 14(2), 109-116.
- Chen, S., and Xiang, Y., 2006. A procedure for theoretical estimation of dewatering-induced pile settlement. *Computers and Geotechnics*, 33(4-5), 278-282.
- Teparaksa, W., Sontiprasart, P., Prachayaset, N., and Keawsawasvong, S., 2015. Impact assessments of the deep basement construction in the MRT protection zone. In *The 28th KKHTCNN Symposium*. Civil Engineering, Bangkok, Thailand.
- Ni, X., Lu, J., Wang, Y., Shi, J., Chen, W., and Tang, L. 2021. Field investigation of the influence of basement excavation and dewatering on ground and structure responses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 117, 104121.
- Zhu, Y. F., Huang, Y. Z., Tan, Y. P., and Chen, J. J., 2015. Stratified settlement characteristics of the soil strata in Shanghai due to dewatering. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(6), A4014005..
- Zhang, Y. Q., Wang, J. H., and Li, M. G., 2018. Effect of dewatering in a confined aquifer on ground settlement in deep excavations. *International Journal of Geomechanics*, 18(10), 04018120.
- Wu, Y. X., Lyu, H. M., Han, J., and Shen, S. L., 2019. Dewatering-induced building settlement around a deep excavation in soft deposit in Tianjin, China. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(5), 05019003.
- Zhang, W., and Liu, H., 2021. *Design of Deep Braced Excavation and Earth Retaining Systems Under Complex Built Environment: Theories and Case Studies*. Springer Nature.
- Zhou, N., Vermeer, P. A., Lou, R., Tang, Y., and Jiang, S., 2010. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence. *Engineering Geology*, 114(3-4), 251-260.