

تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی بهسازی شده با استفاده از شبکه

عصبی مصنوعی

مریم شرافتی سوها، کارشناس ارشد راه و ترابری، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند

علی دهقان بنادکی*، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند

مهدی خواری، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

Email: A.Dehghanbanadaki@damavandiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۷ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۳۱

چکیده

امروزه، استفاده از روش اختلاط عمیق برای بهبود روسازی جاده‌ها گسترش یافته است. یکی از مهمترین اهداف این روش، افزایش ضریب باربری کالیفرنیا و کاهش نشست روسازی می‌باشد. در سال‌های اخیر، مدل‌سازی به وسیله هوش محاسباتی، جایگاه ویژه‌ای در مهندسی عمران پیدا کرده است و تخمین رفتار و فرایند مقاوم‌سازی، که با پیچیدگی‌های فراوانی روبرو بوده، تا حدودی به کمک این روش‌ها میسر شده است. هدف اصلی این تحقیق، ساخت یک مدل محاسباتی جهت تخمین ضریب باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی می‌باشد. بدین منظور، ابتدا این نوع خاک با درصد‌های مختلفی از سیمان و ماسه خوب دانه‌بندی شده و بر مبنای استانداردهای معتبر، مقاوم‌سازی شده و آزمایش‌هایی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوره و باربری کالیفرنیا روی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده انجام شد. پس از انجام تست‌های آزمایشگاهی، یک مجموعه از اطلاعات برای ساخت مدل هوش محاسباتی جمع‌آوری شد. در این تحقیق، از مدل پرسپترون چندلایه با معماری‌های مختلف شامل یک و دو لایه مخفی با تعداد نرون‌های متفاوت برای تخمین استفاده شد. برای این هدف، پارامترهای ورودی به مدل شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، زمان عمل‌آوری و میزان ماسه در نظر گرفته شدند و آنالیز حساسیت با الگوریتم گارسون انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش میزان ماسه به عنوان یک پُرکننده طبیعی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش باربری کالیفرنیا دارد. به عنوان مثال، در میزان سیمان ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، افزایش میزان ماسه به اندازه ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب باربری کالیفرنیا را از ۳۱٪ به ۵۹٪ افزایش داد. همچنین، نتایج مدل‌سازی به دست آمده نشان داد که بهترین مدل با متوسط مربعات خطای ۰/۴۱ و متوسط ضریب رگرسیون ۰/۹۹ بهترین عملکرد را در تخمین ضریب باربری کالیفرنیا داشت.

واژه‌های کلیدی: اختلاط عمیق خاک، مقاوم‌سازی، پرسپترون چندلایه

۱. مقدمه

تراکم‌پذیری بسیار زیاد و قابلیت دسترسی دشوار از ویژگی‌های مشکل‌ساز خاک‌های مردابی محسوب می‌شوند (هوات، ۲۰۰۲). این خاک‌ها بر اساس محتوای

خاک‌های مردابی (پیت) به عنوان خاک‌های بسیار نرم و مرطوب در نظر گرفته می‌شوند. ظرفیت باربری کم،

آموزش این شبکه باید علاوه بر داده‌های آموزشی (ورودی شبکه)، خروجی صحیح آنها نیز به شبکه آموزش داده شود.

تحقیقات گسترده‌ای در مورد کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه در مهندسی عمران انجام گرفته است (سینها و ونگ، ۲۰۰۸؛ گنایدین و همکاران، ۲۰۱۰؛ تاراونه، ۲۰۱۶؛ معروف پور و همکاران، ۲۰۱۷؛ یگانه بختیاری و همکاران، ۲۰۱۷؛ مهدیار و همکاران، ۲۰۱۸؛ شایک و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعه گنایدین و همکاران (۲۰۱۰) برای تخمین مقاومت فشاری تک-محوری (UCS) خاک‌های چسبنده و تعیین مقاومت برشی این نوع خاک‌ها از شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه استفاده شده است. برای این پیش‌بینی، روش‌های مختلف رگرسیون خطی و غیرخطی نیز به کار رفته است. نتایج نشان داد که همبستگی قابل قبولی بین خواص خاک و مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد. علاوه بر این، شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهادی آن‌ها برای پیش‌بینی UCS عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مختلف رگرسیون خطی و غیرخطی نشان دادند.

ظرفیت باربری شمع‌ها نیز توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی تخمین زده شده است. در این رابطه، پویا نژاد و جکسا (۲۰۱۷) از مجموعه ۵۰۰ تست نفوذ مخروط که در نقاط مختلف انجام شده استفاده کردند تا ظرفیت باربری را برای شمع‌های تکی محاسبه کنند. در این مجموعه، هر دو نوع شمع درجا و کوبیده شده لحاظ شدند. در ساخت مدل شبکه عصبی، پارامترهایی مانند ابعاد شمع، مصالح شمع، خواص مختلف خاک پایه و بار وارده به عنوان ورودی و ظرفیت باربری نهایی به عنوان هدف در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در آموزش شبکه از روش پس‌انتشار خطا استفاده شد. به منظور به دست آوردن بهترین معماری شبکه، مدل‌های مختلفی با یک، دو، سه و چهار لایه مخفی شامل تعداد نرون‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین مدل با کمترین درصد خطا انتخاب شد. نتایج نهایی نشان داد که

آب، خواص فیبر و درصد تجزیه به ۱۰ گروه طبقه‌بندی می‌شوند (فون پُست، ۱۹۲۲). علاوه بر اختلاف در مقدار آب، خاک‌های مردابی به ویژه در میزان مواد آلی نیز متفاوت هستند که منجر به واکنش‌های متفاوت با تثبیت-کننده‌های مختلف می‌شوند. خاک‌های مردابی دامنه اسیدیته بسیار وسیعی دارند و طیف pH آن‌ها از ۲ تا ۶ است (کاظمیان و همکاران، ۲۰۱۱). در ۳۰ سال گذشته، پیشرفت‌های روز افزونی در زمینه تکنیک‌های بهبود این خاک‌ها انجام گرفته است. در این میان، می‌توان به روش اختلاط عمیق خاک (DSM) اشاره کرد (قربانی و حسن-زاده شوئیلی، ۲۰۱۸؛ کوگور و همکاران، ۲۰۰۳). در این روش، مواد پایدارکننده‌ای نظیر سیمان یا آهک با استفاده از یک حفار با محور توخالی به صورت مکانیکی با خاک مخلوط می‌شود. هدف از این روش، دستیابی به پارامترهای ژئوتکنیک اصلاح شده از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت برشی و نفوذناپذیری است. این روش برای بهسازی محدوده‌ی وسیعی از خاک‌های نرم غیرآلی و خاک‌هایی که سایر روش‌های بهسازی در آن‌ها مناسب نیستند کاربرد دارد (هوات، ۲۰۰۲).

امروزه، مدل‌سازی فرایند مقاوم‌سازی خاک‌ها با استفاده از هوش مصنوعی کاربرد فراوانی به دست آورده است. با توجه به پیچیدگی فرایند بهسازی و عوامل مختلف تأثیرگذار در مقاوم‌سازی، استفاده از این ابزارهای قدرتمند می‌تواند از لحاظ اقتصادی به این نوع طرح‌ها کمک کند. یکی از مهمترین و قدرتمندترین نوع ابزارهای هوش مصنوعی که در مهندسی عمران کاربرد فراوانی دارد، شبکه‌های عصبی مصنوعی است. از مهمترین ویژگی‌های شبکه عصبی این است که می‌تواند به عنوان تخمین زننده قدرتمند عمل کند. یکی از معروف‌ترین و اولین شبکه عصبی مصنوعی، مدل پرسپترون چندلایه (MLP) است. شبکه پرسپترون چندلایه مجموعه‌ای از نرون‌های پایه است که در سه لایه قرار می‌گیرند. این سه لایه با نام‌های لایه ورودی، لایه پنهان (که می‌تواند چندلایه نیز باشد) و لایه خروجی شناخته می‌شوند. برای

خشک خاک برای ساخت مدل استفاده شدند. نتایج نشان داد که هر دو مدل دقت بالایی در تخمین زدن نسبت باربری کالیفرنیا را دارند. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر وزن مخصوص خشک خاک، بیشترین تأثیر را بر نسبت باربری کالیفرنیا دارد.

یک نوع تعمیم یافته از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل انفیس و یا ترکیبی با سیستم‌های فازی می‌باشد. این مدل کاربرد فراوانی در مهندسی خاک و پی داشته است. به عنوان مثال، شمشیربند و همکاران (۲۰۱۵) از روش‌های مختلفی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و ترکیب ماشین‌های بردار پشتیبان با الگوریتم خفاش و مدل‌های مختلف انفیس برای پیش‌بینی مقاومت تک‌محوره آجرهای سیمانی مخلوط با خاک مردابی استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی روی ۵۷۶ نمونه آجر ساخته شده با ترکیبات مختلف خاک مردابی، ماسه و سیمان برای آموزش مدل‌های محاسباتی استفاده شد. در مدل‌های اشاره شده، زمان عمل‌آوری، میزان سیمان، درصد خاک مردابی و درصد ماسه به عنوان پارامترهای ورودی و مقاومت فشاری تک‌محوره به عنوان هدف مدل انتخاب شد. نتایج محاسبات مدل‌ها با مقایسه ضریب رگرسیون و مجموع مربعات خطا در مورد داده‌های آموزش، تعمیم و تست نشان داد که مدل انفیس بهترین پیش‌بینی را برای مقاومت تک‌محوره دارد.

۲. اهداف تحقیق

هدف اصلی این مطالعه، تخمین نسبت باربری کالیفرنیا خاک پیت مقاوم‌سازی شده به وسیله سیمان و پرکننده طبیعی (ماسه) می‌باشد. در این راستا، تأثیر میزان ماسه نیز بر نسبت باربری کالیفرنیا بررسی شده است. بدین منظور، آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا روی نمونه‌های مختلف این نوع خاک انجام گرفت. سپس، با آماده شدن این مجموعه اطلاعات، یک شبکه عصبی چندلایه آموزش دید و در نهایت، با استفاده از

بهترین مدل با یک لایه مخفی شامل ۱۰ نرون، کمترین مربعات خطا را داشته و توان پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌های تکی با بیشترین دقت را دارد.

در ارتباط با تخمین نسبت باربری کالیفرنیا خاک‌ها، تاها و همکاران (۲۰۱۹) روی یازده نوع خاک مختلف دانه‌ای آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا را انجام دادند و از این نتایج برای آموزش یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی چندلایه استفاده کردند. پارامترهای حد روانی، حد خمیری، حد انقباض، رطوبت بهینه و بیشترین وزن مخصوص خشک به عنوان پارامترهای ورودی مدل و نسبت باربری کالیفرنیا به عنوان هدف مدل انتخاب شد. در مجموع ۲۰۷ آزمایش از تحقیقات مختلف جمع‌آوری شدند. در این آزمایش‌ها، دامنه نسبت باربری کالیفرنیا بین اعداد ۲۶٪ تا ۹۸٪ قرار داشت. نتایج مدل‌سازی نشان داد که متوسط ضریب رگرسیون آموزش، تعمیم و تست در حدود ۹۵٪ بود که با در نظر گرفتن مجموع مربعات خطای بسیار کم نشان‌دهنده قدرت بسیار بالای مدل پیشنهادی در ارتباط با تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های دانه‌ای است. تحقیق دیگری در ارتباط با تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های رسی توسط بات و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد. در این تحقیق، نسبت باربری کالیفرنیا توسط مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی تخمین زده شد. در مدل ساخته شده توسط شبکه‌های عصبی، پارامترهایی مانند حدود اتربرگ، رطوبت بهینه و بیشترین وزن مخصوص خشک خاک در نظر گرفته شدند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بهترین مدل با کمترین مربعات خطا (۰/۹) و با ضریب رگرسیون ۹۷٪ توانایی تخمین نسبت باربری کالیفرنیا این نوع خاک‌های رسی را دارد. در مطالعه مشابه دیگری در ارتباط با تخمین نسبت باربری کالیفرنیا خاک‌های رسی که توسط سابات (۲۰۱۳) انجام شد، از مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. در این تحقیق، پارامترهایی نظیر میزان آهک، حدود اتربرگ، رطوبت بهینه و بیشترین وزن مخصوص

تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی بهسازی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

بارندگی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر متفاوت است. برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیک خاک‌های پیت، نمونه‌های بلوکی به قطر ۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۵۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌ها بر اساس سیستم طبقه‌بندی (فون پست، ۱۹۲۲) و سیستم استاندارد آمریکا (۲۰۰۰) طبقه‌بندی شدند. به منظور تعیین استحکام برشی خاک‌های مردابی، چندین آزمایش برش در نقاط و عمق‌های متفاوت انجام شد. جدول ۱، مشخصات شیمیایی سیمان مورد مصرفی را نمایش می‌دهد. جدول ۲، مشخصات پایه خاک مردابی و ماسه خوب دانه‌بندی شده را با استانداردهای مربوطه نشان می‌دهد.

آنالیز حساسیت، تأثیر پارامترهای ورودی بر نسبت باربری کالیفرنیا مقایسه گردید.

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱. خاک مورد مطالعه و آزمایش‌های پایه

نمونه خاک پیت که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته از ناحیه پونتیان ایالت جوهور در مالزی و از عمق حدود یک متر به دست آمده است. این نوع خاک پیت در این منطقه موجب فروزش است سازه‌های بسیاری با وجود وزن کم آن‌ها شده است (کاظمیان و همکاران، ۲۰۱۱). در این منطقه بسته به شدت بارش باران، میزان

ترکیب‌های شیمیایی	میزان مواد
SiO ₂	۲۱
Al ₂ O ₃	۵/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۳
CaO	۶۸/۶
MgO	۱/۱
SO ₃	۱/۱
Na ₂ O	۱/۱
K ₂ O	۱/۱

نتایج	آزمایش‌ها و استانداردها
خاک فیبری	طبقه بندی (ASTM 5715-00)
H ₃	طبقه بندی (Von Post)
۴۹۵	درصد رطوبت. (% BS 1377, 1990 بخش دوم)
۰/۸۹	نفوذپذیری (m/day) (BS 1377, 1990 بخش ششم)
۲۶۰	حد روانی (BS 1377, 1990 بخش دوم)
۹۱	ترکیبات آلی. (% BS 1377, 1990 بخش سوم)
۴/۱	pH (BS 1377, 1990 بخش سوم)
۸۰	محتوای فیبری (%). (ASTM 1997-91)

۱۰	وزن واحد در محل (kN/m^3)
۱/۳۸	وزن مخصوص (BS 1377, 1990 بخش دوم)
	C_c (شاخص فشردگی) (ASTM D 2435-70)
۰/۰۶۵	C_α (شاخص فشردگی ثانویه) (ASTM D 2435-70)
۱۱	$C_u - VST$ (ASTM D-2573) (kPa)
۱۰	$C_u - UCT$ (BS 1377, 1990 بخش هفتم) (kPa)
۱۲	$C_u - UU$ (BS 1377, 1990 بخش هفتم) (kPa)
۳۲/۰	e حداقل (حداقل نسبت تخلخل) (SW)
۵۸/۰	e بیشینه (حداکثر نسبت تخلخل) (SW)
۱۲/۵	C_u (ضریب یکنواختی) (SW)
۲	C_c (ضریب انحنای) (SW)
۲/۶۴	وزن مخصوص (SW)
۱۷/۵۱	حداکثر چگالی خشکی (SW)
۳۶/۸	زاویه اصطکاک داخلی - درجه (SW)

۲-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق، به منظور آماده‌سازی خاک‌های پیت تثبیت شده با مخلوط سیمان و ماسه خوب دانه‌بندی شده، از استاندارد EuroSoilStab (2002) استفاده شده است. به طور خلاصه ابتدا خاک پیت را در مجاورت هوا خشک کرده و سپس نمونه خاک خشک از الک ۲ میلی - متری عبور داده شده است. در فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها، مقدار مخلوط مصرفی مورد نیاز بر اساس وزن مخصوص خاک پیت مرطوب در محل محاسبه شده است. بنابراین، ابتدا پس از عبور خاک از الک، خاک را با متوسط درصد رطوبت محل مخلوط کرده و بعد از آن مخلوط سیمان و

ماسه خوب دانه‌بندی شده با ترکیبات مختلف به آن اضافه شده است. شایان ذکر است که میزان سیمان مصرفی در این تحقیق از ۱۵۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده است. این بازه بهینه از نتایج قبل و بر مبنای نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری به دست آمده است (دهقان بنادکی و همکاران، ۲۰۱۳). پس از آن ماسه خوب دانه - بندی شده در مقادیر ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به مخلوط پیت و سیمان اضافه شده است. در نهایت، نمونه‌ها برای ۱۴، ۲۸، و ۹۰ روز در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. جدول ۳، مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. شکل ۱ نیز مواد مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	زمان عمل‌آوری (روز)	میزان سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	میزان ماسه (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱	۱۴	۱۵۰	۵۰
۲	۱۴	۱۵۰	۷۵
۳	۱۴	۱۵۰	۱۰۰
۴	۱۴	۱۵۰	۱۲۵
۵	۱۴	۱۵۰	۱۵۰

تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی بهسازی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

۱۷۵	۱۵۰	۱۴	۶
۲۰۰	۱۵۰	۱۴	۷
۵۰	۲۰۰	۱۴	۸
۷۵	۲۰۰	۱۴	۹
۱۰۰	۲۰۰	۱۴	۱۰
۱۲۵	۲۰۰	۱۴	۱۱
۱۵۰	۲۰۰	۱۴	۱۲
۱۷۵	۲۰۰	۱۴	۱۳
۲۰۰	۲۰۰	۱۴	۱۴
۵۰	۲۵۰	۲۸	۱۵
۷۵	۲۵۰	۲۸	۱۶
۱۰۰	۲۵۰	۲۸	۱۷
۱۲۵	۲۵۰	۲۸	۱۸
۱۵۰	۲۵۰	۲۸	۱۹
۱۷۵	۲۵۰	۲۸	۲۰
۲۰۰	۲۵۰	۲۸	۲۱
۵۰	۳۰۰	۲۸	۲۲
۷۵	۳۰۰	۲۸	۲۳
۱۰۰	۳۰۰	۲۸	۲۴
۱۲۵	۳۰۰	۲۸	۲۵
۱۵۰	۳۰۰	۲۸	۲۶
۱۷۵	۳۰۰	۲۸	۲۷
۲۰۰	۳۰۰	۲۸	۲۸
۵۰	۳۵۰	۲۸	۲۹
۷۵	۳۵۰	۹۰	۳۰
۱۰۰	۳۵۰	۹۰	۳۱
۱۲۵	۳۵۰	۹۰	۳۲
۱۵۰	۳۵۰	۹۰	۳۳
۱۷۵	۳۵۰	۹۰	۳۴
۲۰۰	۳۵۰	۹۰	۳۵
۵۰	۴۰۰	۹۰	۳۶
۷۵	۴۰۰	۹۰	۳۷
۱۰۰	۴۰۰	۹۰	۳۸
۱۲۵	۴۰۰	۹۰	۳۹
۱۵۰	۴۰۰	۹۰	۴۰
۱۷۵	۴۰۰	۹۰	۴۱
۲۰۰	۴۰۰	۹۰	۴۲

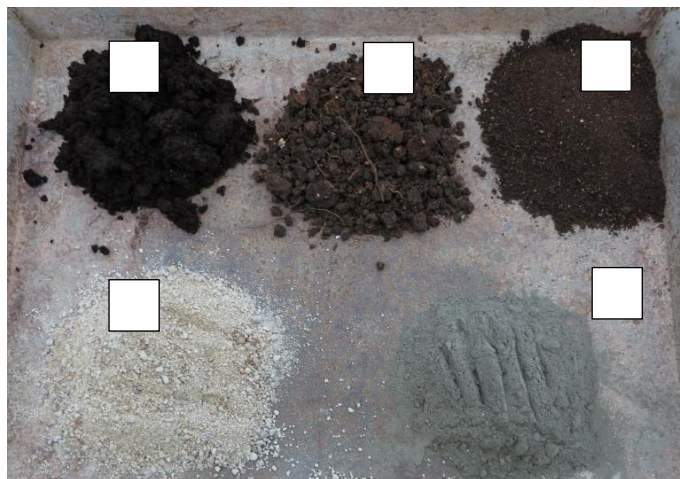
۳-۳. آزمایش باربری کالیفرنیا

جهت بررسی مصالح و خاک‌های مصرفی در قشرهای روسازی عنوان و انجام گردید، لذا به همان نام اولیه خود به مخفف عبارت فوق باقیمانده است. فشار لازم برای نفوذ پیستون در داخل مصالح سنگی شکسته مشخص استاندارد بوده و مقادیر آن در جدول ۴ ذکر شده است. شایان ذکر است که در این تحقیق از استاندارد AASHTO T 193 برای آزمایش باربری کالیفرنیا و از استاندارد BS 1377:1990: Part 7: section 7 (1990) استاندارد برای آزمایش مقاومت تک‌محوری استفاده شد.

ضریب باربری کالیفرنیا یک مصالح عبارتست از نسبت فشار لازم جهت اینکه پیستونی فلزی به مقطع ۳ اینچ مربع و شکل استاندارد یک مقدار معین در مصالح مربوطه نفوذ کند، به فشار لازم جهت اینکه همان پیستون به همان میزان در داخل مصالح سنگی شکسته فرو رود. هدف از انجام این آزمایش عبارتست از اندازه‌گیری فشار لازم جهت نفوذ پیستون در مصالح مورد نظر به روش معین در شرایط کاملاً کنترل شده رطوبت و تراکم و در نتیجه تعیین نسبت فوق‌الذکر. با توجه به این که آزمایش فوق برای اولین بار در سال ۱۹۲۲ به وسیله اداره راه‌سازی ایالت کالیفرنیا در آمریکای شمالی

جدول ۴. فشار لازم برای نفوذ پیستون در داخل مصالح سنگی شکسته

نیروی استاندارد (کیلوگرم)	فشار استاندارد (پوند بر اینچ مربع)	میزان نفوذ پیستون (اینچ)
۱۳۶۰	۱۰۰۰	۰/۰۱
۲۰۴۰	۱۵۰۰	۰/۰۲
۲۵۹۰	۱۹۰۰	۰/۰۳
۳۱۳۰	۲۳۰۰	۰/۰۴
۳۵۴۰	۲۶۰۰	۰/۰۵

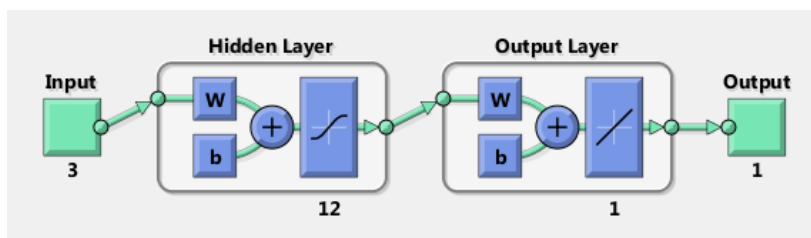


شکل ۱. مواد مورد استفاده در این تحقیق: (۱) خاک مردابی مرطوب، (۲) خاک مردابی خشک شده، (۳) خاک مردابی الک شده، (۴) سیمان و (۵) ماسه

۴. مدل شبکه عصبی مصنوعی

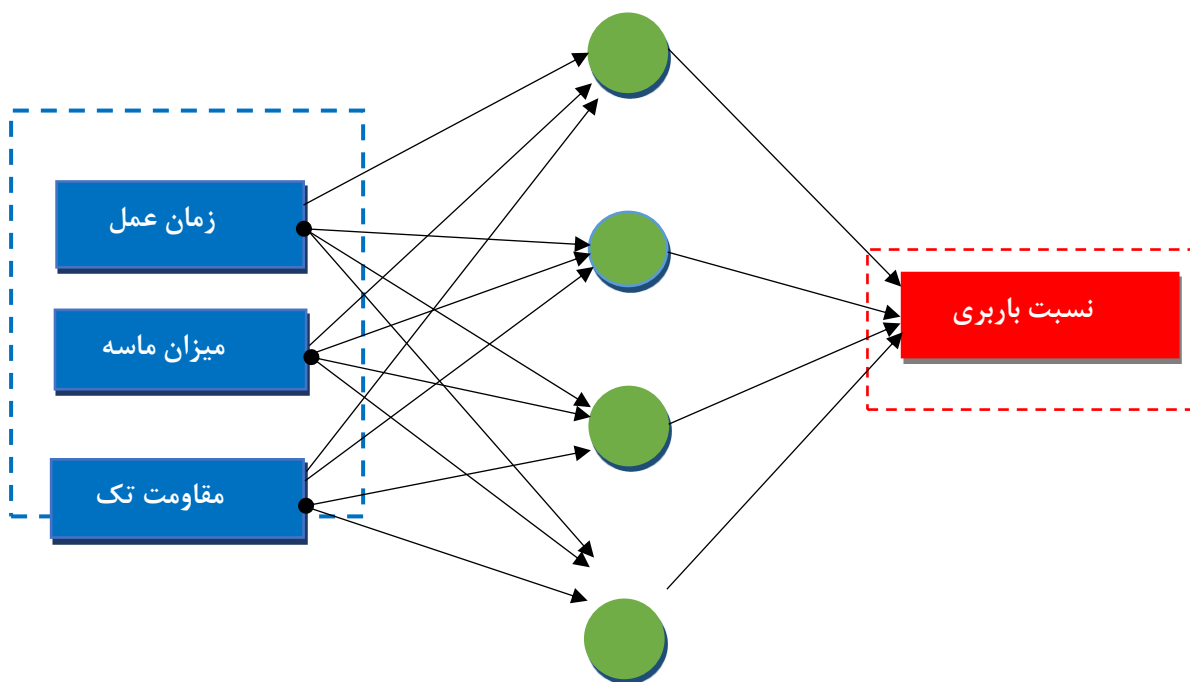
طراحی شبکه عصبی MLP با جمع‌آوری ۸۴ تست از نتایج آزمایشگاهی (۴۲ آزمایش تک‌محوری و ۴۲ آزمایش باربری کالیفرنیا) انجام شد که در این نمونه‌ها سه پارامتر از جمله مدت زمان عمل‌آوری، میزان ماسه و مقاومت تک‌محوری به عنوان ورودی‌های شبکه و ضریب باربری کالیفرنیا نیز به عنوان هدف در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که با توجه به اینکه میزان سیمان مصرفی و مقاومت تک‌محوری تابع یکدیگر می‌باشند، از این رو، برای ساخت مدل پرسپترون فقط مقاومت تک‌محوری به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. مدل پرسپترون این تحقیق دارای یک و دو لایه پنهان می‌باشد. برای تعیین تعداد عصب بهینه در لایه پنهان، مدل‌های مختلفی

ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای انجام این مهم، بر تعداد عصب‌ها در لایه پنهان هر یک از مدل‌ها تک تک افزوده شد. برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم لونیبرگ - مارکوارت استفاده شد. اساس این الگوریتم روش پس‌انتشار خطا است. در این روش، پس از محاسبه خطای اولیه شبکه، به عقب بازگشته و وزن‌ها و بایاس‌های لایه‌ها به‌هنگام می‌شوند. این مسیر آنقدر تکرار می‌شود که خطای محاسباتی به حداقل برسد (منهاج، ۱۳۷۹). در این تحقیق، برای تعیین تابع تحریک مناسب در لایه پنهان و خروجی از تابع تانژانت سیگموئید استفاده شد. شکل ۲- الف و ب، ورودی‌ها و خروجی‌های مدل MLP را نشان می‌دهد.



الف

ب



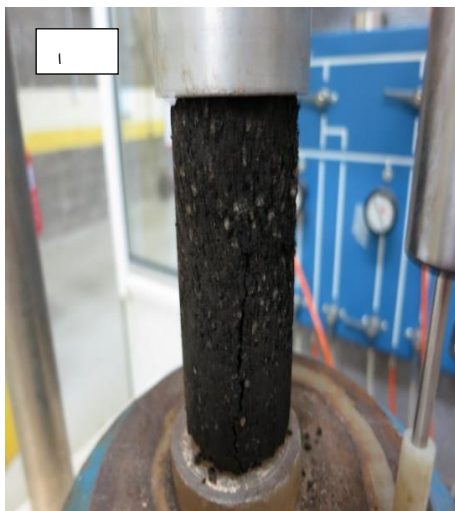
شکل ۲. الف) یکی از مدل‌های ساخته شده در متلب و ب) ورودی‌ها و خروجی‌های مدل MLP

۵. نتایج

۵-۱. نتایج آزمایشگاهی

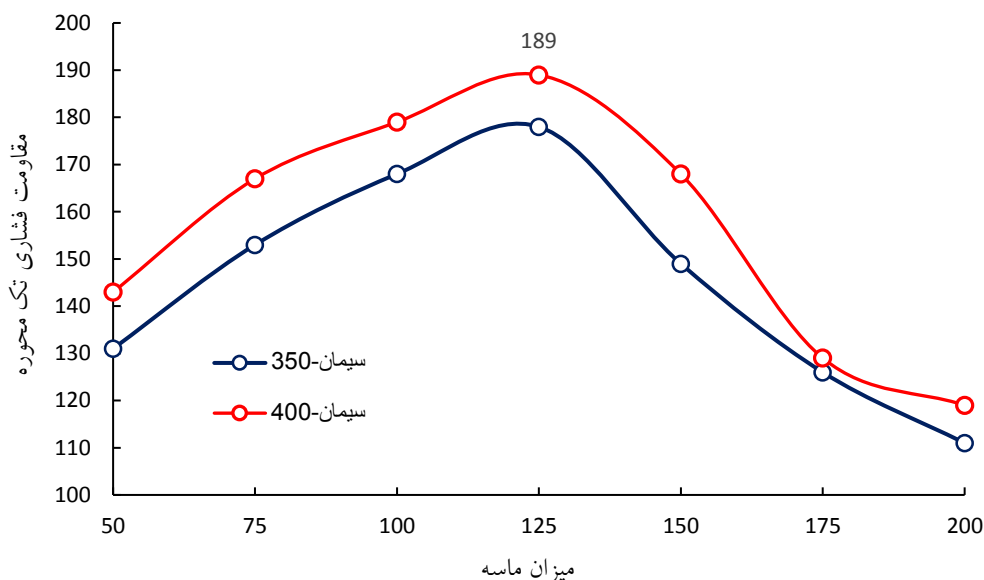
ثابت بودن میزان سیمان و عدم چسبندگی لازم است. اما رفتار این پرکننده طبیعی در آزمایش باربری کالیفرنیا نتایج متفاوتی را نشان داد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با ثابت نگهداشتن میزان سیمان در هر آزمایش، میزان ماسه افزایش یافته و تأثیر آن بر نسبت باربری کالیفرنیا بررسی شده است. طبق شکل ۵، با افزایش میزان ماسه در هر آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا افزایش یافته است. باید اشاره شود که به دلیل نسبت تخلخل بسیار زیاد خاک‌های مردابی (بر مبنای تحقیقات هوات، ۲۰۱۲، این نسبت تا عدد ۲۰ هم گزارش شده است) از ماسه می‌توان به عنوان یک پرکننده فضای خالی برای این نوع خاک‌ها استفاده کرد. بنابراین، افزایش ماسه باعث افزایش سختی نمونه شده که منجر به افزایش ضریب باربری کالیفرنیا در تمام نمونه‌ها شده است. این روند افزایشی تقریباً در تمام نمودارها یکسان است.

همانطور که در پیشینه‌ی تحقیق بیان شد، تأثیر سیمان بر مقاومت تک‌محوری و ضریب باربری کالیفرنیا همواره مثبت بوده است. اما یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر میزان ماسه بر نسبت باربری کالیفرنیا در میزان سیمان ثابت است. قبل از بررسی نسبت باربری، بر مبنای مطالعات قبلی می‌توان اشاره کرد که تأثیر میزان ماسه بر مقاومت فشاری رفتار متفاوتی را با دیگر آزمایش‌ها نشان داد. شکل ۳- الف و ب، دو نمونه آزمایش تک‌محوری را در حین آزمایش و پس از گسیختگی نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها، میزان ۱۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان میزان بهینه به دست آمد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، با افزایش بیشتر از ۱۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت کاهش پیدا کرد. یکی از دلایل محتمل،

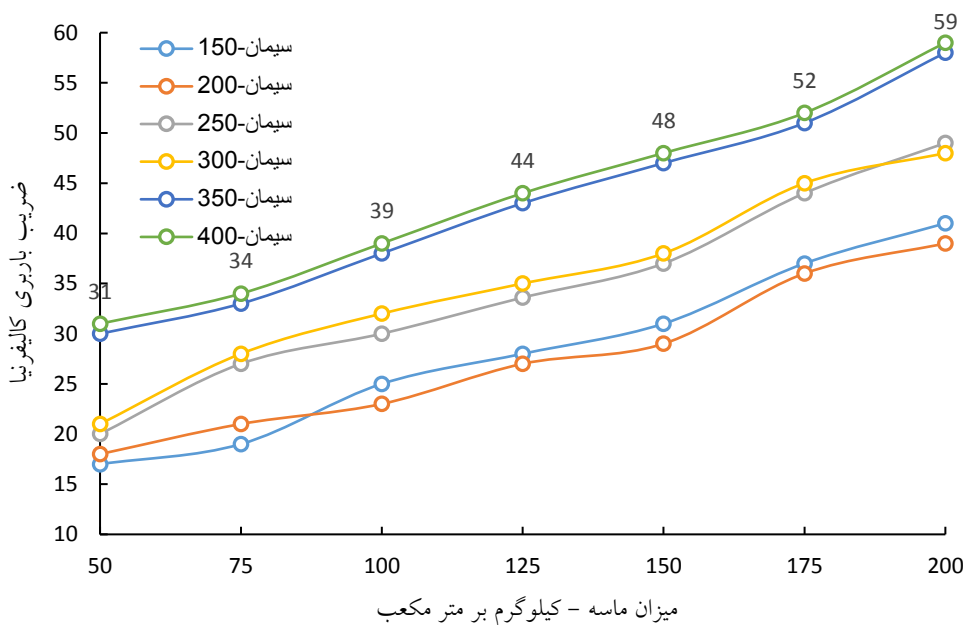


شکل ۳. آزمایش تک‌محوری: الف) در حین آزمایش و ب) پس از گسیختگی

تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی بهسازی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۴. تغییرات مقاومت تک‌محوری در مقادیر متفاوت ماسه



شکل ۵. تغییرات ضریب باربری بر اثر افزایش ماسه

۵-۲. نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی

برای تخمین ضریب باربری کالیفرنیا مدل‌های مختلفی با معماری‌های متنوع ساخته شد. منهای (۱۳۷۹) نشان داد که تمام توابع پیوسته با یک لایه مخفی و تعداد کافی نرون قابل تخمین زدن می‌باشند. اما در مورد توابع غیرپیوسته (مانند این تحقیق) برای مقایسه و به‌دست

آوردن جواب‌های احتمالی بهتر از لایه دوم نیز استفاده شده است. در مدل‌های ساخته شده این تحقیق، یک و دو لایه مخفی با یک تا ۱۲ نرون مورد بررسی قرار گرفت. برای به‌دست آوردن بهترین مدل، به‌صورت سعی و خطا، در هر مدل ۵۰ بار آموزش انجام شد و بهترین مدل انتخاب شد. معیارهای ضریب رگرسیون و متوسط

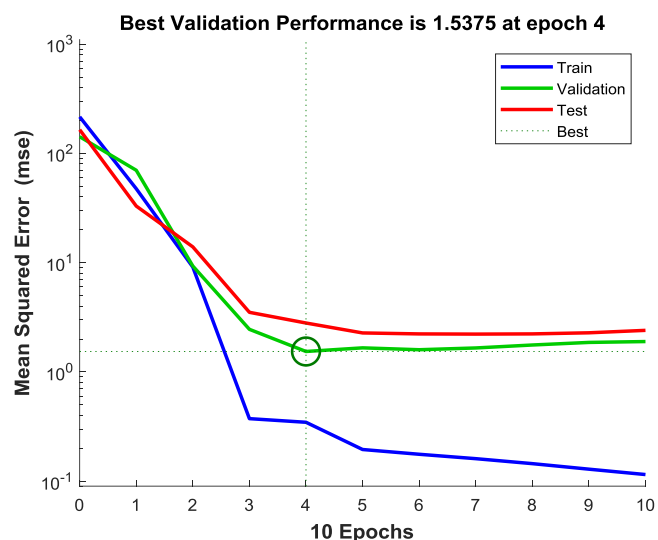
متوسط مربعات خطای ۰/۴۱ معرفی شد. شکل ۷ نیز به صورت گرافیکی، ضریب رگرسیون را در هر سه نوع داده نشان می‌دهد. همانند متوسط مربعات خطا، در جدول ۵، متوسط سه عدد آموزش، تعمیم و تست برای ضریب رگرسیون در نظر گرفته شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب رگرسیون زیاد و کم بودن ضریب متوسط مربعات خطا نشان‌دهنده قدرت بالای مدل پیشنهادی برای تخمین تابع هدف می‌باشد.

مربعات خطا در هر مدل محاسبه شد که نتایج کلی در جدول ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است که اعداد مربعات خطا در جدول ۵ متوسط سه عدد آموزش، تعمیم و تست هستند. همانطور که در این جدول نشان داده شده، مدل شماره ۲۱ با معماری $3 \times 9 \times 9 \times 1$ بهترین عملکرد را نشان داده است. در این راستا، شکل ۶، تغییرات متوسط مربعات خطا را در بهترین مدل در داده‌های آموزش، تعمیم و تست نشان می‌دهد. به عنوان مثال، بهترین عملکرد (کمترین خطا) مربوط به مدل ۲۱ با

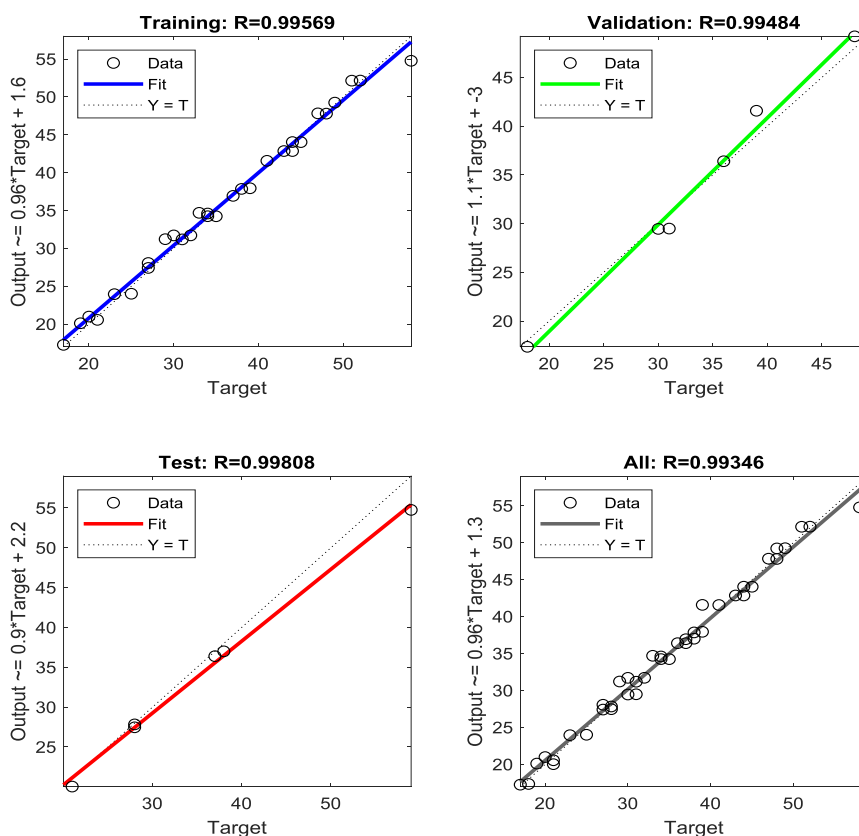
جدول ۵. معیارهای ارزیابی مدل‌های پرسپترون چند لایه

شماره مدل	ساختار مدل	MSE	R ²
۱	۳-۱-۱	۱۶/۲۱	۰/۷۱
۲	۳-۲-۱	۱۳/۲۵	۰/۷۶
۳	۳-۳-۱	۱۱/۴۵	۰/۷۶
۴	۳-۴-۱	۱۱/۲۵	۰/۸۱
۵	۳-۵-۱	۱۱/۴۴	۰/۸۲
۶	۳-۶-۱	۵/۴۱	۰/۸۵
۷	۳-۷-۱	۵/۴۱	۰/۸۴
۸	۳-۸-۱	۳/۴۱	۰/۸۲
۹	۳-۹-۱	۳/۴۱	۰/۹۲
۱۰	۳-۱۰-۱	۳/۴۱	۰/۹۲
۱۱	۳-۱-۱-۱	۲/۴۱	۰/۹۲
۱۲	۳-۲-۲-۱	۱/۴۱	۰/۹۴
۱۳	۳-۲-۲-۱	۱/۴۱	۰/۹۳
۱۴	۳-۲-۲-۱	۱/۴۱	۰/۹۵
۱۵	۳-۳-۳-۱	۰/۹۱	۰/۹۶
۱۶	۳-۴-۴-۱	۰/۸۱	۰/۹۷
۱۷	۳-۵-۵-۱	۰/۹۸	۰/۹۶
۱۸	۳-۶-۶-۱	۰/۵۴	۰/۹۵
۱۹	۳-۷-۷-۱	۰/۵۳	۰/۹۱
۲۰	۳-۸-۸-۱	۰/۵۱	۰/۹۲
۲۱	۳-۹-۹-۱	۰/۴۱	۰/۹۹
۲۲	۳-۱۰-۱-۱۰	۰/۴۵	۰/۹۲
۲۳	۳-۱۱-۱۱-۱	۰/۴۶	۰/۹۳
۲۴	۳-۱۲-۱۲-۱	۰/۴۸	۰/۹۴

تخمین نسبت باربری کالیفرنیا در خاک‌های مردابی بهسازی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۶. متوسط مربعات خطا در بهترین مدل



شکل ۷. ضریب رگرسیون بهترین مدل (۳×۹×۹×۱)

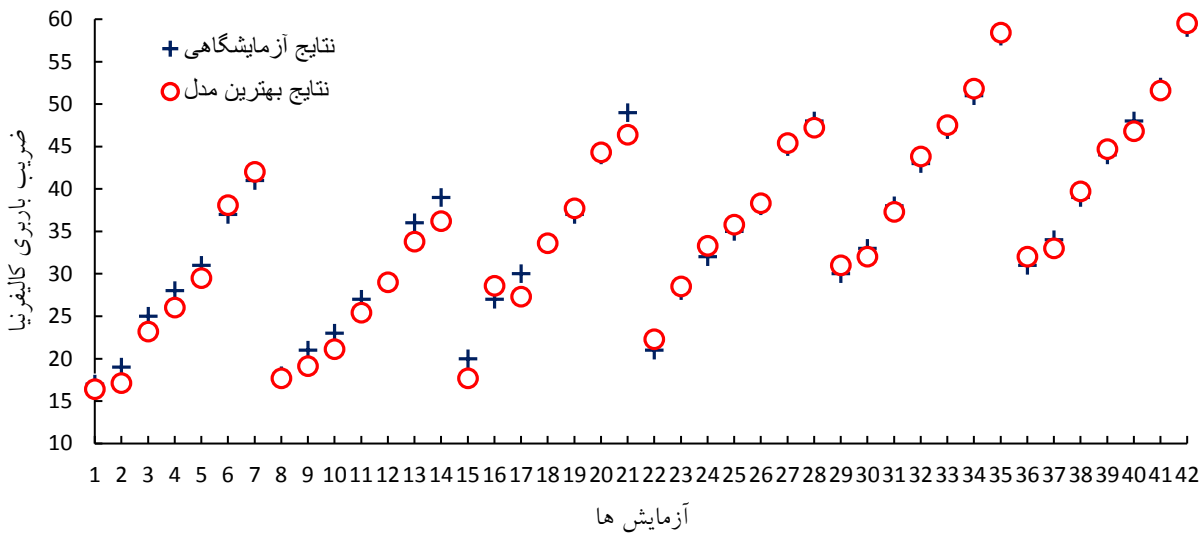
۳-۵. آنالیز حساسیت

با استفاده از بهترین مدل که در قسمت قبل به دست آمد، نسبت باربری کالیفرنیا برای تمام ۴۲ آزمایش محاسبه شد و نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. شکل ۸

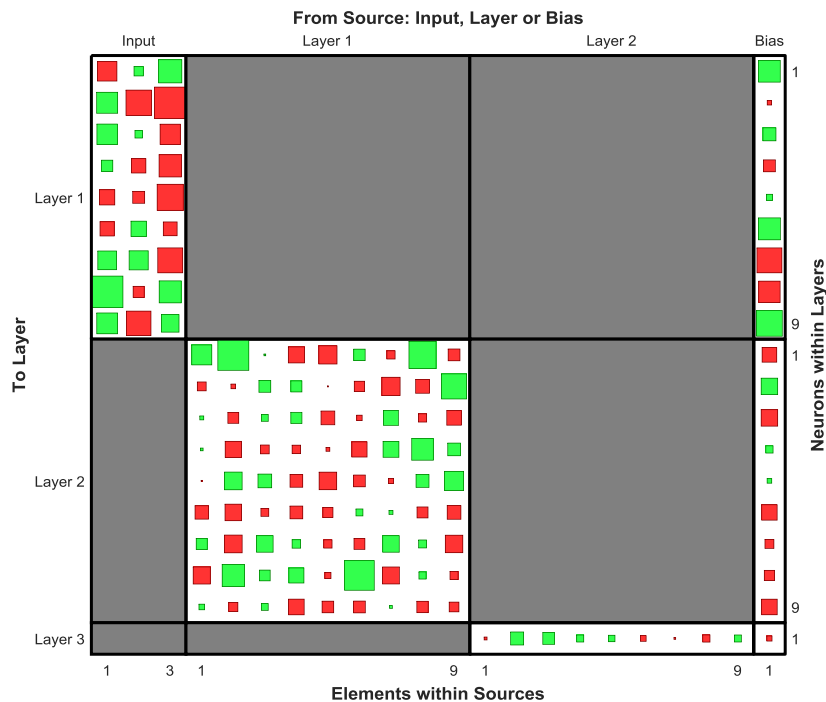
این مقایسه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل می‌توان مشاهده کرد، مدل پیشنهادی با دقت بالایی توانسته نسبت باربری کالیفرنیا را تخمین بزند. یکی از مهمترین توانایی‌های شبکه‌های عصبی، آنالیز حساسیت

استخراج شد و نتایج نهایی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر مبنای این شکل، پارامتر مقاومت تک‌محوره بیشترین نقش را در افزایش ضریب باربری کالیفرنیا نشان داد؛ در جایی که میزان ماسه تأثیر بیشتری نسبت به زمان عمل‌آوری نشان داد. با توجه به این نتایج، افزایش مقاومت تک‌محوره نقش پُرننگ‌تری نسبت به سایر عوامل در افزایش ضریب باربری کالیفرنیا خواهد داشت.

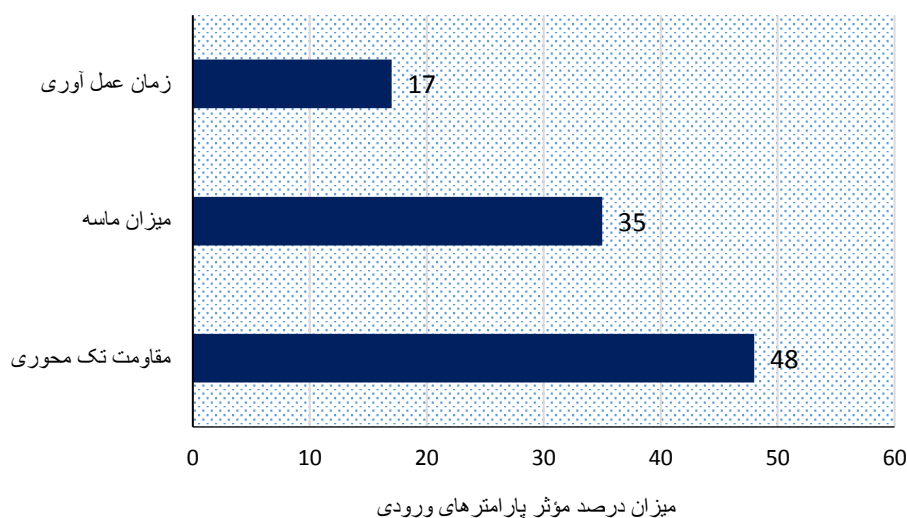
است. با توجه به این آنالیز می‌توان مؤثرترین پارامتر ورودی را که بر هدف تأثیر می‌گذارد به‌دست آورد. در این مطالعه، برای آنالیز حساسیت از الگوریتم گارسون استفاده شد (گارسون، ۱۹۹۱). پارامترهای ورودی الگوریتم گارسون به‌صورت گرافیکی در شکل ۹ و تحت عنوان ماتریس هیئت‌ون نشان داده شده است. برای انجام الگوریتم گارسون، وزن‌ها و بایاس‌های بهترین مدل



شکل ۸. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با خروجی بهترین مدل



شکل ۹. ماتریس هیئت‌ون بهترین مدل



شکل ۱۰. آنالیز حساسیت

۵. نتیجه گیری

- در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره، میزان ۱۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب ماسه به عنوان یک میزان بهینه به دست آمد. علت این کاهش، عدم وجود سیمان کافی برای چسبندگی لازمه در نمونه شناخته شد.
 - نتایج محاسبات نرم نشان داد که بهترین مدل با دو لایه مخفی و ۹ نرون در هر لایه بهترین عملکرد را با ضریب رگرسیون ۰/۹۹ و متوسط مربعات خطای ۴۱٪ در تخمین ضریب باربری کالیفرنیا داشته است.
 - نتایج آنالیزهای حساسیت نشان داد که پارامتر مقاومت تک‌محوره بیشترین نقش را در افزایش ضریب باربری کالیفرنیا دارد.
 - استفاده از مدل پیش‌بینی‌کننده این مطالعه می‌تواند به اعتبارسنجی طرح‌های اختلاط عمیق در خاک‌های مردابی کمک کند.
- در این تحقیق ۸۴ تست آزمایشگاهی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب باربری کالیفرنیا بر روی خاک مردابی با درصد‌های مختلفی از سیمان و ماسه انجام گرفت. در ادامه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مدل‌های مختلفی از پرسپترون چند لایه برای تخمین ضریب باربری کالیفرنیا، آموزش دید و بهترین مدل انتخاب شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که:
- با افزایش میزان سیمان در میزان ماسه ثابت، ضریب باربری نیز در تمام درصدها، افزایش یافت؛ در جایی که در مورد مقاومت فشاری تک‌محوره با در نظر گرفتن میزان سیمان ثابت و ماسه متغیر رفتار افزایشی تا انتهای طرح مشاهده نشد و پس از افزایش تا حد مشخصی، با افزایش ماسه بیشتر، مقاومت فشاری تک‌محوره کاهش یافت.

۶. منابع

- بیل، آر. و جکسون، تی. ۱۳۸۰. "آشنایی با شبکه‌های عصبی". ترجمه دکتر محمود البرزی، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- منه‌اج، م. ب. ۱۳۷۹. "مبانی شبکه‌های عصبی". جلد اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- AASHO. 1947. "Standard specifications for highway materials". Test T-193, Washington, D.C.
- Aladag, C. H., Kayabasi, A. and Gokceoglu, C. 2013. "Estimation of pressure meter modulus and limit pressure of clayey soils by various artificial neural network models". *Neural Comput. Appl.*, 23(2): 333-339.
- Basma, A. A. and Kallas, N. 2004. "Modeling soil collapse by artificial neural networks". *Geotech. Geolog. Eng.*, 22(3): 427-438.
- Bhatt, S., Jain, P. K. and Pradesh, M. 2014. "Prediction of California bearing ratio of soils using artificial neural network". *Am. Int. J. Res. Sci., Technol., Eng. Math.*, 8(2); 156-161.
- British Standard Institution. 1990. "Methods of test for soils for civil engineering purposes". London.
- Dehghanbanadaki, A., Ahmad, K. and Ali, N. 2013. "Influence of natural fillers on shear strength of cement treated peat". *Gradevinar*, 65(7): 633-640.
- Dehghanbanadaki, A., Khari, M., Arefnia, A., Ahmad, K. and Motamedi, S. 2019. "A study on UCS of stabilized peat with natural filler: A computational estimation approach". *KSCE J. Civ. Eng.*, 23(4): 1560-1572.
- EuroSoilStab. 2002. "Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils". Design guide soft soil stabilization, industrial and materials technologies programme (Brite- EuRam III), European Commission, CT97-0351, Project No. BE 96-3177, pp. 15-60.
- Fatih, I. and Gurkan, O. 2012. "Estimating compaction parameters of fine- and coarse-grained soils by means of artificial neural networks". *Environ. Earth Sci.*, 69(7): 2287-2297.
- Garson, G. D. 1991. "Interpreting neural-network connection weights". *Artif. Intell. Expert*, 6(7): 47-51.
- Ghorbani, A. and Hasanzadehshooiili, H. 2018. "Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing". *Soils Found.*, 58(1): 34-49.
- Gunaydin, O., Gokoglu, A. and Fener, M. 2010. "Prediction of artificial soil's unconfined compression strength test using statistical analyses and artificial neural networks". *Adv. Eng. Software*, 41(9): 1115-1123.
- Hasanipناه, M., Bakhshandeh Amnieh, H., Khamesi, H., Jahed Armaghani, D., Golzar, S. B. and Shahnazar, A. 2018. "Prediction of an environmental issue of mine blasting: An imperialistic competitive algorithm-based fuzzy system". *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 15(3): 551-560.
- Huat, B. B. K. 2002. "Some mechanical properties of tropical peat and organic soil". 2nd World Engineering Congress, Sarawak, pp. 82-87.
- Islam, M. D. and Hashim, R. 2010. "Stabilization of peat soil by soil-column technique and settlement of group columns". *Int. J. Phys. Sci.* 5(9): 1411-1418.
- Kazemian, S., Prasad, A., Huat, B. B. K., Bolouri Bazaz, J., Mohammed, T. A. and Abdul Aziz, F. N. 2011. "Effect of aggressive pH media on peat treated by cement and sodium silicate grout". *J. Central South Univ.*, 18: 840-847.
- Kogure, K., Yamaguchi, H. and Shogari, T. 2003. "Physical and pore properties of fibrous peat deposit". Proc. 11th Southeast Asian Geotechnical Conferences, Singapore.
- Mahdiyar, A., Jahed Armaghani, D., Marto, A., Nilashi, M. and Ismail, S. 2018. "Rock tensile strength prediction using empirical and soft computing approaches". *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 78: 4519-4531.
- Maroufpoor, E., Sanikhani, H., Emamgholizadeh, S. and Kişi, O. 2017. "Estimation of wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation systems by different data-driven methods". *Irrig. Drain.*, 67(2): 222-232.
- Pooya Nejad, F. and Jaksa, M. B. 2017. "Load-settlement behavior modeling of single piles using artificial neural networks and CPT data". *Comput. Geotech.*, 89: 9-21.
- Sabat, A. K. 2013. "Prediction of California bearing ratio of a soil stabilized with lime and quarry dust using artificial neural network". *Electron. J. Geotech. Eng.*, 18: 3261-3272.
- Shaik, S., Krishna, K. S. R., Abbas, M., Ahmed, M. and Mavaluru, D. 2018. "Applying several soft computing techniques for prediction of bearing capacity of driven piles". *Eng. Comput.*, 35: 1463-1474.
- Shamshirband, S., Tavakkoli, A., Roy, C. B., Motamedi, S., Song, K. I., Hashim, R. and Islam, S. M. 2015. "Hybrid intelligent model for approximating unconfined compressive strength of cement-based bricks with odd-valued array of peat content (0–29%)". *Powder Technol.*, 284: 560-570.

- Sinha, S. K. and Wang, M. C. 2008. "Artificial neural network prediction models for soil compaction and permeability" *Geotech. Eng. J.*, 26(1): 47-64.
- Taha, S., Gabr, A. and El-Badawy, S. 2019. "Regression and neural network models for California bearing ratio prediction of typical granular materials in Egypt". *Arab. J. Sci. Eng.*, 44: 8691-8705.
- Tarawneh, B. 2016. "Predicting standard penetration test N-value from cone penetration test data using artificial neural networks". *Geosci. Frontiers*, 8(1): 199-204.
- Von Post, L. 1922. "Geological survey of Sweden peat inventory and some of its hitherto missing data". *Tidskr.*, 1: 1-27.
- Yeganeh-Bakhtiary, A., Houshangi, H., Hajivalie, F. and Abolfathi, S. 2017. "A numerical study on hydrodynamics of standing waves in front of caisson breakwaters with WCSPH model". *Coast. Eng. J.*, 59(1): 1750005-1-1750005-31.