

پیش‌بینی مدول الاستیک دینامیکی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از روش بررسی گروهی داده‌ها

محسن سعادت، میثم بیات*^۲

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۲۷

دریافت مقاله: ۹۸/۰۷/۲۴

چکیده

مدول الاستیک یکی از پارامترهای مهم در ژئوتکنیک است که معمولاً از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی یا در محل اندازه‌گیری می‌شود. در این زمینه، آزمایش سه‌محوری یکی از روش‌های شناخته شده در تعیین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی خاک است. در این تحقیق با استفاده از آزمایش سه‌محوری تناوبی و اندازه‌گیری موضعی کرنش، مدول الاستیک دینامیکی خاک‌های مخلوط شن و ماسه در سطح کرنش خیلی کوچک (حدود 10^{-5}) مطالعه شده است. تاثیر پارامترهای دانه‌بندی (ضریب انحنا و ضریب یکنواختی)، مقدار شن، تنش همه جانبه و دانسیته نسبی بر روی مدول الاستیک دینامیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، پایگاه داده‌ای شامل ۱۲۰ رکورد تشکیل شده است. با استفاده از این پایگاه داده، دو مدل برای پیش‌بینی مدول الاستیک دینامیکی با استفاده از الگوریتم بررسی گروهی داده‌ها (GMDH) توسعه داده شده است. تفاوت این دو مدل در استفاده از پارامترهای ورودی متفاوت است، به گونه‌ای که در مدل اول از ضریب انحنا (C_c) و در مدل دوم از ضریب یکنواختی (C_u) به عنوان پارامتر ورودی دانه‌بندی خاک در مدل استفاده شده است. مقایسه مقدار خطا بر اساس شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان‌دهنده برتری نسبی مدل دوم نسبت به مدل اول است. اگرچه مقدار ضریب همبستگی (R) در هر دو مدل مقادیر رضایت بخشی داشته و الگوریتم (GMDH) توانایی مناسبی جهت پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیک نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: مدول الاستیک، خاک دانه‌ای، آزمایش سه‌محوری، بررسی گروهی داده‌ها.

۱. استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲. استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

bayat.m@pci.iaun.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

مدول الاستیک یکی از پارامترهای مهم در طراحی‌ها محسوب می‌شود، زیرا به صورت مستقیم سختی مصالح را نشان می‌دهد. این پارامتر از دو روش استاتیکی و دینامیکی قابل دستیابی است. مدول الاستیک دینامیکی (E_d) یکی از پارامترهای مهم در پروژه‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای است که می‌توان آن را از طریق اندازه‌گیری سرعت موج فشاری در آزمایش‌های انتشار موج در محل یا با استفاده از المان‌های خمشی (Bender elements) یا لوپ بارگذاری تناوبی در آزمایش‌های المانی همچون سه محوری بدست آورد. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که دو مدول یانگ استاتیکی (E_{50}) و دینامیکی در انواع خاک‌ها با یکدیگر رابطه دارند (Asef and Farrokhrouz, 2017; Wichtmann et al., 2017). در این مطالعات، مدول الاستیک استاتیکی یا E_{50} معمولاً از طریق شیب نمودار تنش-کرنش در نقطه ۵۰٪ مقدار مقاومت ماکزیمم و مدول الاستیک دینامیکی یا E_d از طریق اندازه‌گیری سرعت موج فشاری یا برشی به دست آمده است. ارتباط بین این دو پارامتر معمولاً بصورت رابطه (۱) تعریف شده است:

$$E_{50} = \alpha E_d - \beta \quad (1)$$

در مطالعات گذشته، ضریب α بین ۰/۵ تا ۱/۵ و ضریب β بین ۱ تا ۳۰ در نظر گرفته شده است (Asef and Farrokhrouz, 2017). قابل ذکر است در این رابطه مدول الاستیک استاتیکی و دینامیکی بر اساس GPa هستند. مقدار مدول الاستیک به دست آمده از طریق آزمایش انتشار موج در محل یا در آزمایشگاه، مقادیر مدول الاستیک دینامیکی محدود در سطوح کرنش خیلی کوچک (حدود 10^{-6}) را می‌دهد. با استفاده از آزمایش‌هایی همچون سه محوری تناوبی بسته به سطح تنش وارده نیز می‌توان این پارامتر را در سطوح کرنش مختلف بدست آورد. تاکنون مطالعات زیادی بر روی پارامترهای اثرگذار بر روی سختی خاک در سطوح کرنش‌های مختلف با استفاده از آزمایش‌های ژئوفیزیکی از طریق اندازه‌گیری سرعت موج (Wave velocity) یا ستون تشدید

(Resonant column)، استوانه توخالی (Hollow cylinder)،

برش ساده (Simple shear) و سه محوری تناوبی (Cyclic Triaxial) انجام شده است (Cabalar, 2010; Cai et al., 2015; Camacho-tauta, 2014; Camacho-tauta et al., 2013; Cherian and Kumar, 2017; Kawaguchi et al., 2001; Madhusudhan and Senetakis, 2016; Moayerian, 2012; Souto et al., 1994). از جمله نتایج مشترک در تمامی این تحقیق‌ها، کاهش مقدار سختی خاک در کرنش‌های بزرگ‌تر از مقدار آستانه (حدود 10^{-5}) با افزایش سطح کرنش خاک است. در واقع همانند آنچه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سختی خاک در کرنش‌های بزرگ‌تر از کرنش آستانه روند کاهشی دارد که این تغییرات غیرخطی در سطوح کرنش‌های متوسط تا بزرگ به دلیل رفتار غیر خطی خاک است و قبل از آن در محدوده کرنش‌های کوچک رفتار خاک الاستیک و مقدار سختی ثابت است.

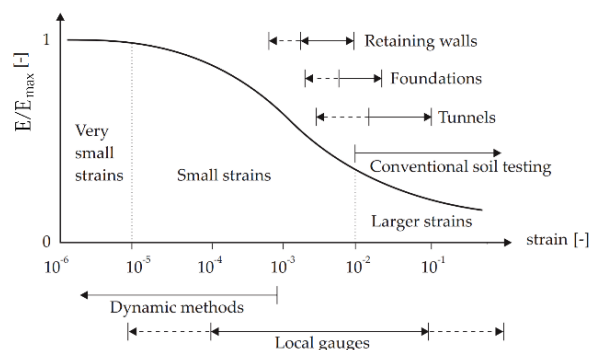
گودرزی و همکاران (Goudarzy et al. 2016, 2017)، اثر اضافه شدن ریزدانه غیرخمیری (لای) را در خاک‌های ماسه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که اضافه شدن لای به ماسه باعث کاهش سختی خاک می‌شود. کای و همکاران (Cai et al. 2015) با استفاده از آزمایش‌های المانی همچون سه محوری تناوبی و ستون تشدید نشان دادند که افزایش تنش موثر و دانسیته نسبی باعث افزایش غیرخطی در مقادیر سختی می‌شود. بیات و قلندرزاده (Bayat and Ghalandarzadeh, 2018) اثر تنش همه جانبه و دانسیته نسبی را بر روی خاک‌های مخلوط شن و ماسه در سطوح کرنش‌های خیلی کوچک تا بزرگ بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار سختی تابعی از سطح کرنش، دانسیته نسبی و دانه‌بندی خاک است. تاکنون مطالعات زیادی بر روی تغییرات سختی خاک در سطوح مختلف کرنش انجام شده است (Bayat and Ghalandarzadeh, 2019; Biglari and Ashayeri, 2011; Cherian and Kumar, 2017; Chien and Oh, 2001; Ishihara, 1996; Jafarian et al., 2018; a; Kallioglou et al., 2009; Maher et al., 1994; Zhang et al., 2005; Zhu et al., 2014) که نتایج این تحقیق‌ها نشان می‌دهد، پارامترهای تاثیرگذار بر روی سختی خاک‌های دانه‌ای عمدتاً عبارتند از سطح کرنش، تنش موثر همه جانبه، دانسیته نسبی، وضعیت

(Ivakhnenko, 1970). این روش یک خانواده از الگوریتم-های شبکه عصبی جهت یادگیری است که قابلیت‌های مختلفی مانند انجام رگرسیون، پیش‌بینی سری‌های زمانی و طبقه‌بندی داده‌ها را دارد. ساختار این روش مشابه سایر انواع شبکه‌های عصبی از واحدهای کوچکی به نام نرون تشکیل شده که در چندین لایه قرار گرفته‌اند. اولین لایه شبکه شامل متغیرهای ورودی به الگوریتم (متغیرهای مستقل) و آخرین لایه حاوی مقدار خروجی شبکه (متغیر وابسته) است. در بین لایه اول و آخر تعدادی لایه اصطلاحاً مخفی وجود دارند که عملیات شبیه‌سازی را انجام می‌دهند. هر کدام از نرون‌ها در لایه‌های مخفی به تنهایی ساختار پیچیده‌ای ندارند ولی با توجه به امکان تنوع در ترکیب، الگوریتم قادر به شبیه‌سازی ساختارهای پیچیده‌ای بوده و ضمناً از سرعت آموزش مناسبی برخوردار است. در حالت کلی ساختار خروجی یک نرون در لایه‌های مخفی یا لایه آخر در روش GMDH مشابه رابطه (۲) است. این رابطه در ریاضیات با عنوان چندجمله‌ای کلموگوروف-گابور (Kolmogorov-Gabor) شناخته می‌شود.

$$Y(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (2)$$

در رابطه (۲)، n تعداد متغیر ورودی به یک نرون و x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای ورودی به نرون را نشان می‌دهند. Y مقدار خروجی نرون و a_i, a_{ij}, a_{ijk} اعداد ثابتی هستند که مقادیر آن‌ها در زمان آموزش شبکه تعیین می‌شود. ورودی‌های هر نرون در اولین لایه مخفی شبکه، متغیرهای ورودی (مستقل) به شبکه و در لایه‌های بعد، مقادیر خروجی نرون‌های لایه قبلی هستند. شایان ذکر است که در اکثر کاربردهای عملی روش GMDH، یک چند جمله‌ای جبری حداکثر درجه دو از مقادیر ورودی به نرون ($n=2$) استفاده می‌شود که تنها شامل سه عبارت اول رابطه (۲) است. بنابراین در حالت متداول هر نرون دو مقدار ورودی و یک خروجی خواهد داشت. پیچیدگی تدریجی ساختار شبکه این قابلیت را به الگوریتم می‌دهد که بتواند با استفاده از نرون‌های نسبتاً محدود، رفتار یک سیستم را تقلید کرده و آن را شبیه‌سازی نماید. رابطه (۳) ساختار خروجی یک نرون در شبکه را نشان می‌دهد (Onwubolu, 2015).

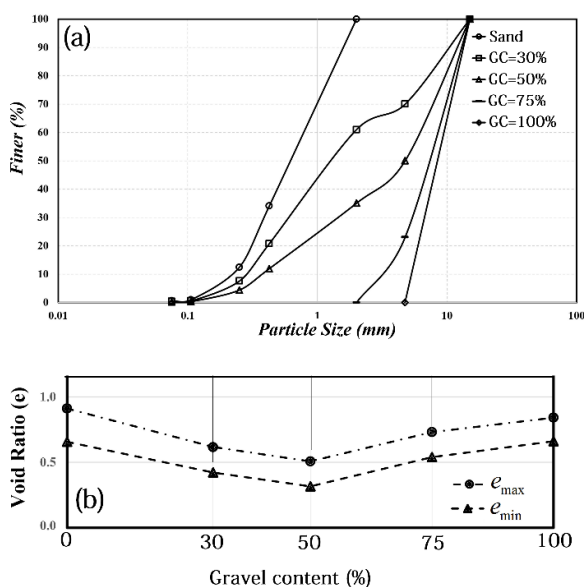
تنش وارده (همسان یا ناهمسان)، بافت اولیه خاک، خصوصیات دانه‌بندی (اندازه متوسط دانه‌ها و گستردگی اندازه دانه‌ها) و شکل دانه‌ها (تیز گوشه یا گرد گوشه). در عوامل ذکر شده افزایش تنش همه جانبه، دانسیته نسبی و یا تیز گوشگی دانه‌ها باعث افزایش سختی می‌شود، درحالی‌که افزایش سطح کرنش و یا اعمال تنش ناهمسان بصورت کششی موجب کاهش سختی می‌شود.



شکل ۱. رابطه بین نسبت مدول الاستیک خاک و کرنش محوری در سازه‌های مختلف بر اساس محدوده سطح کرنش (Bayat and Ghalandarzadeh, 2018)

اگر چه تاکنون مدل‌های تجربی زیادی جهت پیش‌بینی سختی خاک در شرایط مختلف توسط محققین ارائه شده است (D'Elia and Lanzo, 1996; Escribano and Nash, 2015; Hardin and Black, 1968; Payan et al., 2016a; b) از روش محاسبات نرم (Soft Computing) در پیش‌بینی مدول الاستیک خاک استفاده نشده است. همچنین قابل ذکر است در مدل‌های ارائه شده انتخاب فرم مدل‌های تجربی و ضرایب مربوطه کاملاً تصادفی بوده است. در ادامه در مورد روش مورد استفاده جهت تخمین مدول الاستیک خاک در این مطالعه توضیحات کامل آورده شده است که نشان دهنده تفاوت با روش‌های تجربی گذشته متکی بر روش محاسبات نرم است.

روش بررسی گروهی داده‌ها (Group Method of Data Handling) در سال ۱۹۷۰ توسط ایواخنکو معرفی شد



شکل ۲. خصوصیات زیرگروه‌های خاکی مورد استفاده در این تحقیق، (a) منحنی دانه‌بندی (b) نسبت منافذ حداکثر و حداقل

منحنی دانه‌بندی و تغییرات نسبت منافذ (Void ratio) حداکثر و حداقل در شکل (۲) ارائه شده است. قابل ذکر است این آزمایش‌ها بر اساس ASTM D4253 و ASTM D4254 انجام شده است. برای به دست آوردن نسبت منافذ حداقل، خاک را درون ظرفی که دارای یک سرپوش سنگین است ریخته و در فرکانس و مدت‌زمان مشخصی تحت لرزش قرار داده تا به متراکم‌ترین حالت ممکن برسد. به‌منظور محاسبه نسبت منافذ حداکثر، باید خاک با دقت و به آرامی به‌وسیله یک بیلچه مخصوص با ارتفاع سقوط ثابت ۱۳ میلی‌متر و به‌صورت ماریچ، درون ظرف ریخته شود. نتایج نشان می‌دهد که در مخلوط ماسه با ۵۰ درصد شن، کمترین مقدار نسبت منافذ حداکثر و حداقل وجود دارد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که در این نمونه‌ها ذرات ماسه کاملاً بین فضای خالی ذرات شن قرار گرفته و در این ترکیب مقدار فضای خالی کل حداقل شده است. پارامترهای مربوط به دانه‌بندی گروه‌های خاکی مورد استفاده در این تحقیق نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

$$\hat{E} = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، مقدار تخمین زده‌شده برای مقدار خروجی واقعی شبکه توسط یک نرون بوده و ضرایب ثابت a_0 تا a_5 با استفاده از مقادیر متغیرهای ورودی به نرون و پس از کمینه کردن یک تابع خطای متداول مانند جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) تعیین می‌شوند. رابطه (۴) نحوه محاسبه RMSE برای ارزیابی هر نرون را نشان می‌دهد. همچنین شاخص MSE به صورت مجذور شاخص RMSE تعریف می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (E_i - \hat{E}_i)^2}{M}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، M تعداد داده‌های موجود برای آموزش شبکه و E_i و \hat{E}_i مقدار تخمین زده‌شده و مقدار واقعی برای داده آموزشی شماره i است.

در این مقاله بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری تناوبی انجام شده بر روی پنج گروه خاک دانه‌ای مخلوط شن و ماسه، تاثیر پارامترهای دانه‌بندی (ضریب انحنا و ضریب یکنواختی)، مقدار شن، تنش همه جانبه و دانسیته نسبی بر روی مدول الاستیک دینامیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است. پایگاه داده‌ای شامل ۱۲۰ رکورد از نتایج آزمایش‌های سه محوری تشکیل شده است.

با استفاده از این پایگاه داده، دو مدل برای پیش‌بینی مدول الاستیک دینامیکی با استفاده از الگوریتم بررسی گروهی داده‌ها (GMDH) توسعه داده شده است. در مدل اول از C_c و در مدل دوم از C_{II} به عنوان پارامتر موثر جهت نشان دادن اثر دانه‌بندی استفاده شده است. در ادامه فرآیند انجام آزمایش‌ها و نحوه استفاده از روش GMDH در تخمین پارامتر مدول الاستیک توضیح داده شده است.

۲. روش انجام تحقیق

در این مطالعه برای نشان دادن اثر دانه‌بندی بر روی مدول الاستیک دینامیکی از ۵ گروه خاکی (ماسه به همراه درصد‌های مختلف شن) استفاده شده است.

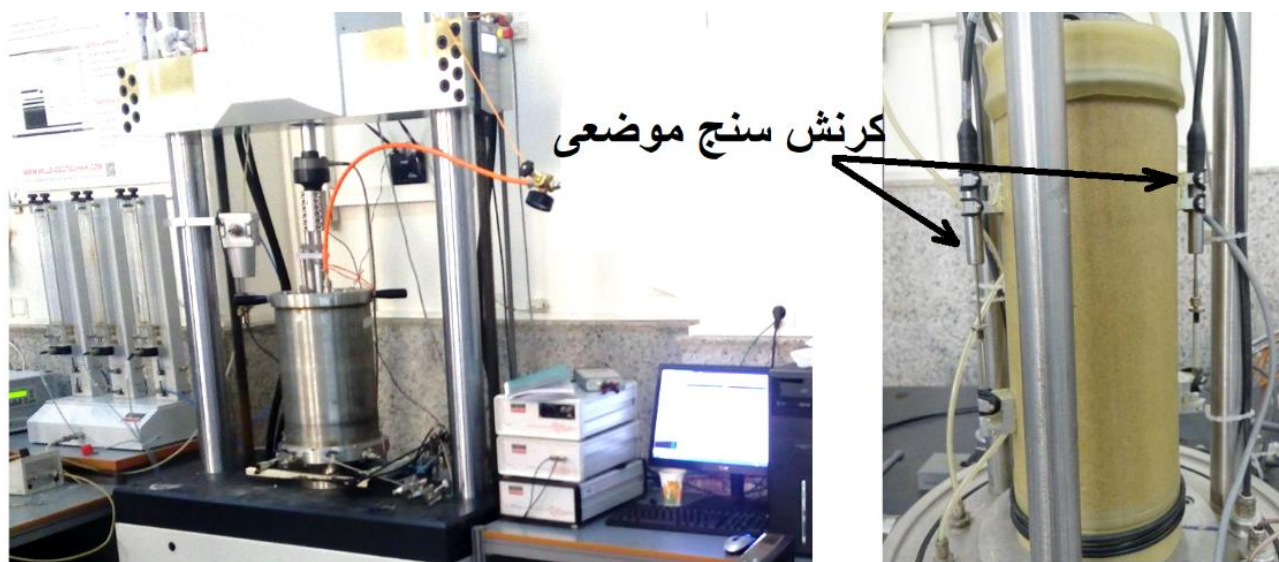
دانه باشد و همچنین نسبت یک به دو قطر به ارتفاع طبق ASTM D3999 رعایت شده است.

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، دو کرنش-سنج به صورت موضعی بر روی غشاء جهت اندازه‌گیری دقیق کرنش محوری چسبانده شده‌اند. از طریق میانگین‌گیری کرنش ثبت شده در هر دو کرنش سنج چسبانده شده بر روی نمونه، مقدار کرنش محاسبه شده است. پس از ساخت نمونه و اشیاع‌سازی آنها، بارگذاری انجام شده است. جزئیات انجام آزمایش‌ها بصورت دقیق‌تر در کارهای گذشته نویسندگان قابل مشاهده است (Bayat and Ghalandarzadeh 2018, 2019). نمونه‌ای از لوپ بارگذاری در این آزمایش نیز در شکل (۴) ارائه شده است. بر روی هر نمونه طبق ASTM-D3999، ۴۰ سیکل بارگذاری اعمال شده و از لوپ دهم جهت تعیین مدول الاستیک خاک استفاده شده است.

جدول ۱. خصوصیات دانه‌بندی گروه‌های خاکی مورد استفاده

GC (%)	C _u	D ₅₀	C _c
0	3.59	0.61	0.88
30	7.02	1.15	0.63
50	15.39	4.75	0.76
75	2.67	7.07	1.03
100	1.80	8.3	0.95

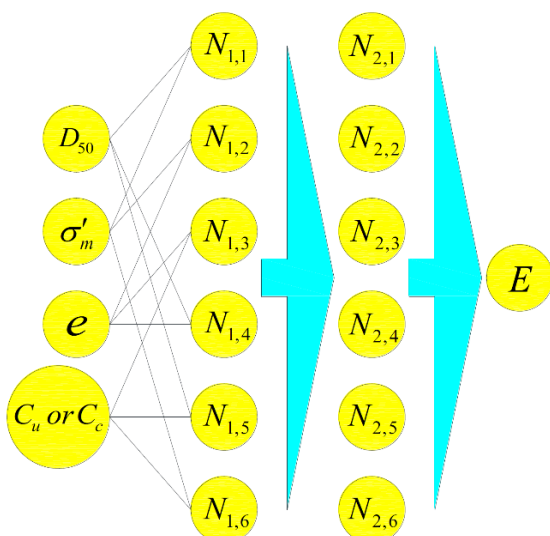
در این تحقیق با استفاده از دستگاه سه محوری تناوبی مجهز به کرنش‌سنج‌های موضعی، مقدار مدول الاستیک خاک بر اساس لویهای تنش-کرنش بدست آمده در طول انجام آزمایش‌ها در حدود سطح کرنش معادل 10^{-5} مورد ارزیابی قرار گرفته است. این آزمایش بر اساس ASTM D3999 انجام شده و نمونه‌های آزمایشی دارای قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر هستند. بر اساس ابعاد ذکر شده، حداقل قطر نمونه بر حسب بزرگترین اندازه شن که بایستی ۶ برابر قطر بزرگترین



شکل ۳. دستگاه سه محوری مورد استفاده و نمونه سه محوری ساخته شده به همراه کرنش‌سنج‌های موضعی

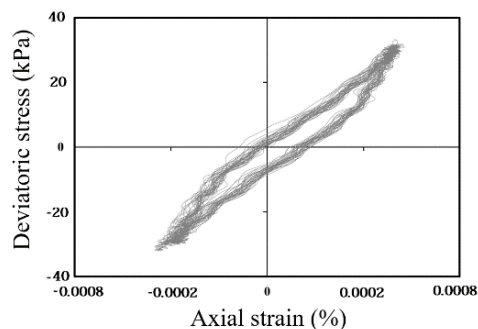
GMDH در این تحقیق نشان داد که تعداد کمتری از نرون‌ها نیز برای تخمین مقدار جواب کافی است. به همین دلیل در لایه مخفی دوم نیز شش نرون در نظر گرفته شده است. بدیهی است که در این لایه، شش نرون برتر از بین ۱۵ انتخاب محتمل انتخاب می‌شوند. نرون‌های برتر بر حسب تعریف، نرون‌هایی هستند که خروجی آن‌ها نسبت به مقدار هدف مساله RMSE کمتری نسبت به سایر نرون‌ها داشته باشد. همچنین تعداد دو لایه مخفی برای شبکه می‌تواند با دقت مناسبی مقدار خروجی را تخمین بزند و افزایش بیشتر تعداد لایه‌ها تاثیر قابل توجهی بر دقت جواب ندارد.

بر اساس مطالب ارائه شده ساختار شبکه GMDH در این تحقیق مطابق شکل (۵) است. با توجه به آنکه نرون‌های برتر در لایه مخفی اول و دوم از قبل نامشخص هستند، نمی‌توان ارتباط دقیق بین نرون‌ها را در شکل نشان داد، اگرچه این ارتباط در لایه ورودی مشخص بوده و در شکل نشان داده شده است. در لایه مخفی دوم نیز دو نرون از بین شش نرون موجود انتخاب شده و برای تخمین مقدار مدول الاستیک در لایه خروجی استفاده می‌شوند. با توجه به اسکالر بودن مقدار مدول الاستیک به عنوان خروجی شبکه، لایه آخر تنها به یک نرون نیاز خواهد داشت.



شکل ۵. ساختار استفاده شده در این مطالعه برای شبکه

GMDH



شکل ۴. لوپ هیستریسیس در آزمایش سه محوری تناوبی

۲-۱. توسعه مدل‌های GMDH

در این تحقیق از قابلیت رگرسیون شبکه جهت تخمین مقدار مدول الاستیک خاک (متغیر وابسته) با استفاده از متغیرهای ورودی (مستقل) استفاده شده است. در این راستا دو مدل GMDH جهت شبیه‌سازی رفتار خاک توسعه داده شده است. متغیرهای ورودی و خروجی به هر مدل در جدول (۲) مشخص شده‌اند.

جدول ۲. داده‌های معرفی شده به شبکه GMDH جهت

تخمین مدول الاستیک خاک

Output variable for models (I) and (II)	Input variable to model (II)	Input variable to model (I)
E	$C_u, D_{50}, e, \sigma'_m$	$C_c, D_{50}, e, \sigma'_m$

در جدول (۲)، C_u و C_c به ترتیب نشان دهنده ضریب انحنای ضریب یکنواختی برای گروه خاکی مورد نظر است و D_{50} ، e و σ'_m نیز نسبت منافذ، قطر متوسط ذرات خاک و تنش موثر اعمال شده در آزمایش است.

با توجه به وجود چهار متغیر ورودی در هر مدل، در اولین لایه مخفی شبکه به تعداد $\binom{4}{2}=6$ حالت امکان انتخاب دو متغیر از بین چهار متغیر ورودی وجود دارد. در نتیجه به شش نرون در لایه مخفی اول نیاز است. در لایه مخفی دوم به تعداد $\binom{6}{2}=15$ حالت امکان انتخاب دو نرون از بین شش نرون لایه مخفی اول وجود دارد، با این وجود اجرای متعدد برنامه

بیش از اندازه (Over fitting) و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری شبکه خواهد شد. از آنجا که انتخاب نرون‌های برتر نیز جزئی از روند آموزش محسوب می‌شود، داده‌های استفاده شده برای انتخاب نرون برتر نیز در گروه داده‌های آموزشی معرفی شده‌اند.

برای ارزیابی کارایی الگوریتم GMDH در پیش‌بینی مقدار مدول الاستیک خاک از ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی مطابق با رابطه (۵) استفاده شده است. مقدار این ضریب بین -۱ تا +۱ تغییر می‌کند، به گونه‌ای که مقادیر مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم و مقادیر منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس بین دو متغیر است. همچنین قدرمطلق مقدار ضریب میزان شدت همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد (Onwubolu 2015).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) \times (\hat{E}_i - \bar{\hat{E}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{E}_i - \bar{\hat{E}})^2}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، R ضریب همبستگی، \bar{E} میانگین مدول الاستیک پیش‌بینی شده توسط الگوریتم و $\bar{\hat{E}}$ میانگین مدول الاستیک آزمایشگاهی برای n داده موجود جهت محاسبه مقدار ضریب همبستگی است.

در استفاده از انواع مختلف شبکه عصبی از جمله GMDH باید توجه داشت که این الگوریتم‌ها عموماً کارایی مناسبی در دورنیایی دارند، اگرچه ممکن است نتوانند در برونیایی دقت مناسبی داشته باشند (Hagan et al., 1997; Russell and Norvig, 2016). بر این اساس استفاده از الگوریتم GMDH برای پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیک در محدوده‌ای از داده‌های ورودی که خارج از محدوده آموزش شبکه هستند، به علت خطای احتمالی زیاد توصیه نمی‌شود.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج آزمایش‌ها

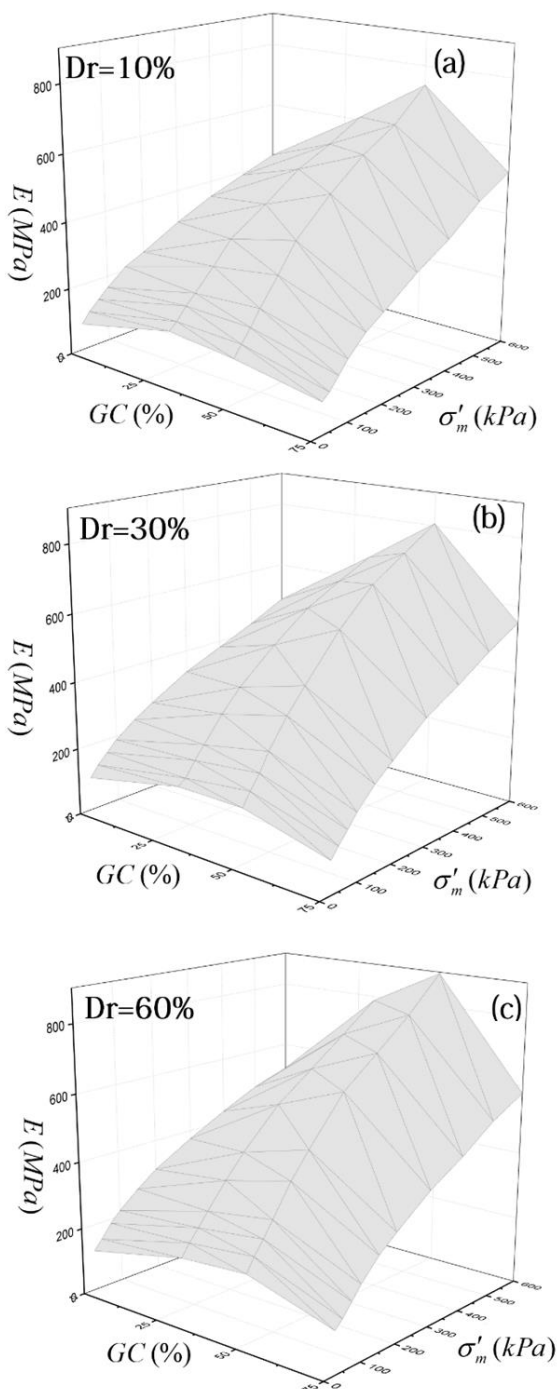
اثر دانسیته نسبی، تنش همه جانبه موثر و مقدار شن اضافه شده به ماسه میزبان بر روی مقدار مدول الاستیک دینامیکی

در شکل (۵)، $N_{i,j}$ نرون شماره j در لایه شماره i بوده و متغیرهای ورودی و خروجی شبکه (مطابق جدول (۲)) نشان داده شده‌اند.

در این مطالعه، تاثیر پارامترهای موثر همچون تنش همه جانبه موثر، دانسیته نسبی و اضافه شدن مقدار شن به ماسه میزبان بر روی تغییرات مدول الاستیک خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش سه محوری تناوبی بررسی شده است و در انتها با استفاده از روش بررسی گروهی داده‌ها، دو مدل جهت تخمین مدول الاستیک خاک‌های مخلوط شن و ماسه ارائه شده است.

۲-۲. آموزش و صحت‌سنجی شبکه GMDH

شبکه GMDH نیز مشابه سایر الگوریتم‌های یادگیری بایستی در ابتدا آموزش دیده و سپس عملکرد آن ارزیابی یا اصطلاحاً صحت‌سنجی شود. معمولاً اکثر داده‌های مشاهداتی موجود جهت آموزش استفاده شده و تعداد کمتری برای صحت‌سنجی نیاز هستند. تعداد داده‌های استفاده شده در تحقیق برای مراحل مختلف آموزش و همچنین صحت‌سنجی شبکه مطابق جدول (۳) است. البته باید توجه داشت که قبل از تخصیص مقادیر داده‌ها برای آموزش و صحت‌سنجی لازم است کلیه داده‌ها به طور تصادفی مخلوط شوند. این عمل امکان ایجاد خطا ناشی از مراحل یا زمان برداشت داده‌ها را کاهش می‌دهد. بنابراین جدول (۳) تنها تعداد داده‌های استفاده شده در هر قسمت و نه ترتیب آنها را نشان می‌دهد. نکته مهم دیگر آن است که صحت‌سنجی شبکه مشابه سایر الگوریتم‌ها باید با داده‌هایی انجام شود که در آموزش شبکه استفاده نشده‌اند. این داده‌ها در ابتدای کار و قبل از شروع روند آموزش جهت استفاده در مرحله صحت‌سنجی کنار گذاشته می‌شوند. از کل داده‌های انتخاب شده برای آموزش شبکه در این تحقیق، بخش کوچکی (۲۰٪) جهت انتخاب نرون‌های برتر و ایجاد ساختار شبکه در هر مرحله استفاده می‌شوند. مزیت این رویکرد آن است که انتخاب نرون‌های برتر صرفاً بر اساس نتایج داده‌های آموزش اولیه (داده‌های استفاده شده در تعیین ضرایب ثابت) نبوده و این عمل باعث جلوگیری از آموزش



شکل ۶. تغییرات مدول الاستیک در مقابل مقدار شن و تنش همه جانبه موثر متوسط (a) دانسیته نسبی ۱۰٪، (b) دانسیته نسبی ۳۰٪، (c) دانسیته نسبی ۶۰٪

در این تحقیق با توجه به اینکه اندازه متوسط ذرات در پنج گروه خاکی تغییرات کمی دارد، دو پارامتر C_u و C_c برای نشان

خاک مورد مطالعه در شکل (۶) نشان داده شده است. همان-طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش تنش همه جانبه و دانسیته نسبی در یک مقدار شن ثابت باعث افزایش غیرخطی مدول الاستیک شده است که مشابه با نتایج سایر محققین در این زمینه است (Payan et al., 2016a; Youd and Idriss, 2001; Zhou et al., 2017). از طرف دیگر، اضافه شدن شن به ماسه تا ۵۰٪ باعث افزایش مدول الاستیک شده و پس از آن یعنی در ۷۵٪ شن باعث کاهش مدول الاستیک شده است. نتایج به دست آمده در این قسمت توافق خوبی با نتایج محققین گذشته دارد (Hubler et al. 2018).

جدول ۳. تعداد داده‌های استفاده شده در GMDH

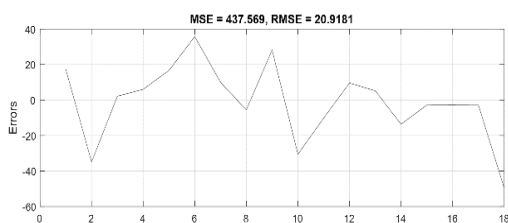
Total experimental data	Network training		Test (Validation) of GMDH Performance
	Selection of superior neurons	Determination of coefficient in relation (2)	
120	20	82	18

۳-۲. نتایج مدل‌های GMDH

در شکل‌های (۷) و (۸) نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل‌های اول و دوم با استفاده از ۱۸ داده آزمایشگاهی نشان داده شده است. مقایسه مقادیر داده‌های آزمایشگاهی (هدف) و داده‌های پیش‌بینی شده توسط GMDH (خروجی) نشان‌دهنده کارایی مناسب این الگوریتم در پیش‌بینی رفتار غیرخطی سیستم است. علت کارایی مناسب الگوریتم GMDH آن است که این الگوریتم با وجود استفاده از تعداد محدودی نرون با ساختار نسبتاً ساده به دلیل تنوع زیاد در ترکیب نرون‌های مختلف امکان تقلید رفتارهای پیچیده‌ای را دارد.

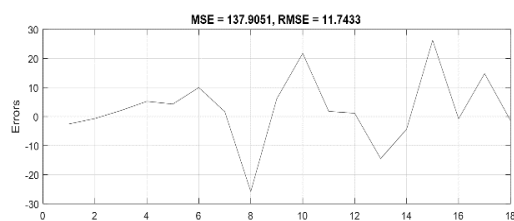
در بیشتر تحقیق‌های گذشته (Bayat and Bayat, 2013; Menq, 2003; Payan et al., 2016b; Wichtmann et al., 2015)، اثر دانه‌بندی بر روی تغییرات سختی و مقاومت برشی خاک با استفاده از D_{50} و C_u بررسی شده است و در گروه‌های خاکی که تغییرات اندازه متوسط ذرات کم است، تنها از پارامتر C_u به عنوان ضریب اعمال تغییرات منحنی دانه-بندی استفاده می‌شود (Payan et al., 2016b).

دوم نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند اگرچه میانگین خطا در دو مدل اختلاف کمی (حدود یک واحد) با یکدیگر دارند، انحراف معیار خطا در مدل دوم کمتر از مدل اول (حدود ده واحد) است. در نتیجه با وجود آن که هر دو مدل وضعیت رضایت‌بخشی از نظر میانگین خطا (میانگین خطای نزدیک به صفر) و انحراف معیار دارند، مدل دوم کمی نسبت به مدل اول برتری دارد.



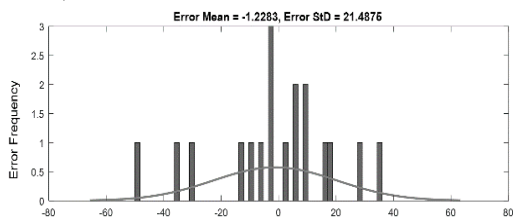
شکل ۷. مقادیر میانگین مربعات و جذر میانگین مربعات خطا

به ازای ۱۸ داده صحت‌سنجی در مدل اول



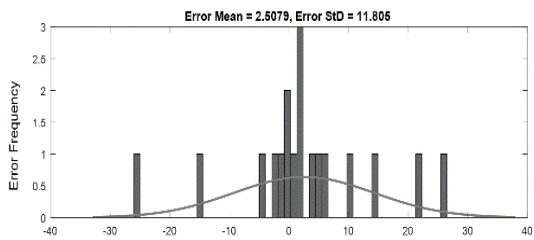
شکل ۸. مقادیر میانگین مربعات و جذر میانگین مربعات خطا

به ازای ۱۸ داده صحت‌سنجی در مدل دوم



شکل ۹. مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر خطا در تخمین

مدول الاستیک به ازای داده‌های صحت‌سنجی در مدل اول

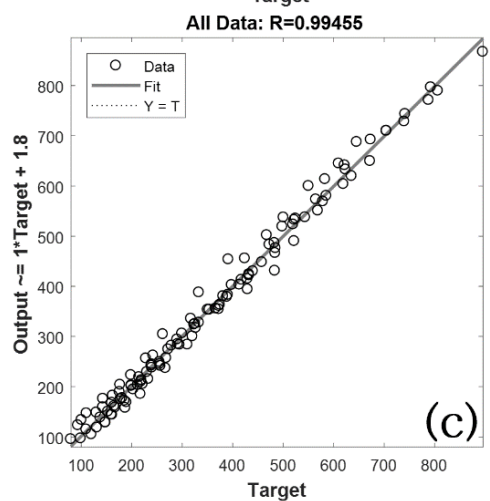
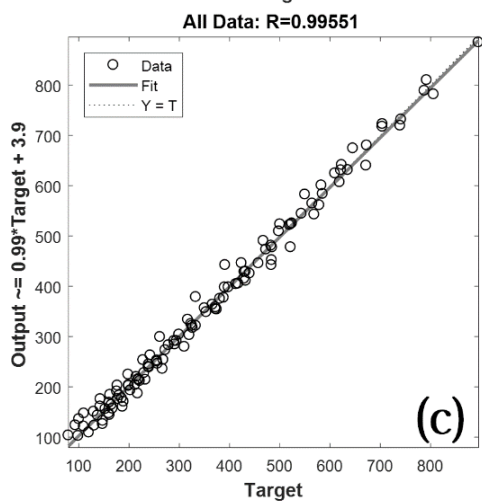
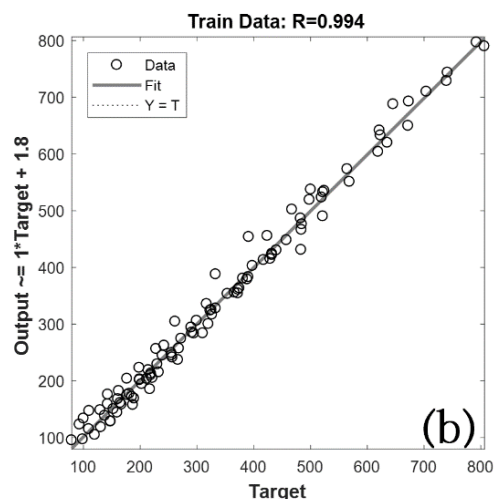
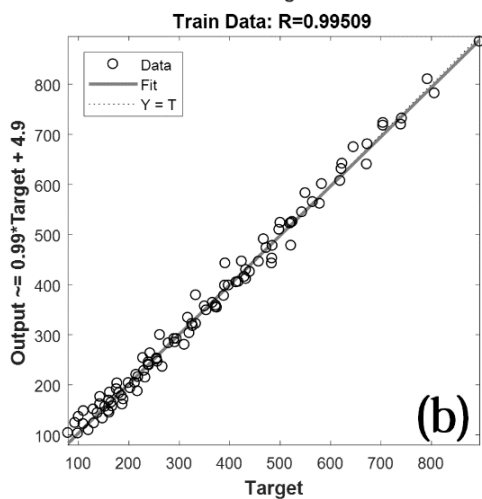
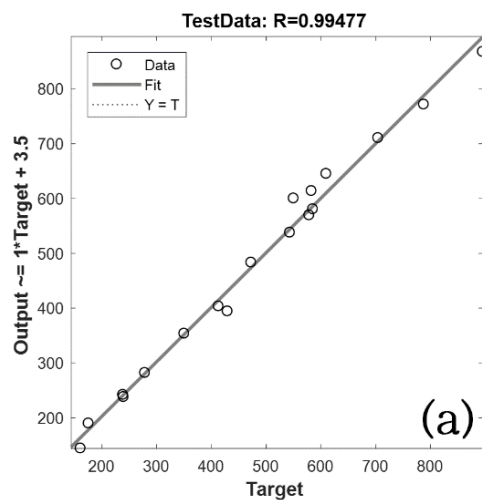
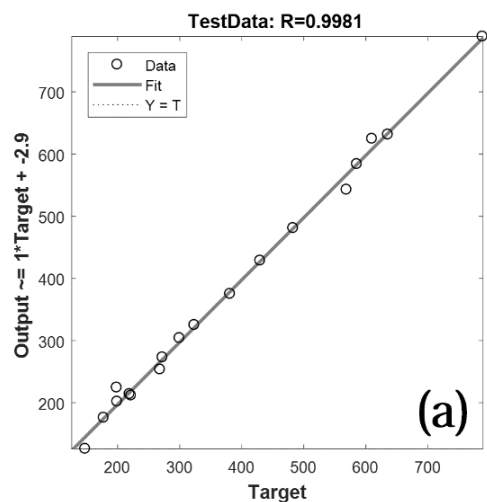


شکل ۱۰. مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر خطا در

تخمین مقدار مدول الاستیک به ازای داده‌های صحت‌سنجی

در مدل دوم

دادن اثر منحنی دانه‌بندی انتخاب شده است. در شکل‌های (۷) و (۸) مقادیر MSE و RMSE برای ۱۸ داده صحت‌سنجی آورده شده است. مشاهده می‌شود که شاخص خطا (RMSE) در مدل دوم مطلوب‌تر از مدل اول است و این موضوع به آن معنی است که استفاده از پارامتر C_u به عنوان یک پارامتر ورودی برای مدل مناسب‌تر از استفاده از C_c به عنوان ورودی است. این موضوع ممکن است به این دلیل باشد که نسبت C_u به C_c پارامتر مناسب‌تری جهت اعمال اثر تغییر اندازه متوسط ذرات نسبت به یکدیگر و گستردگی دانه‌بندی است. در واقع با توجه به تعریف $C_u = D_{60}/D_{10}$ ، افزایش مقدار C_u ، گسترش اندازه قطر ذرات در اندازه‌های مختلف (به عبارت دیگر خوب دانه‌بندی بودن خاک) را نشان می‌دهد، در حالی که بر اساس تعریف $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$ ، مقدار C_c بین ۱ تا ۳ گسترش اندازه متوسط قطر ذرات خاک را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، افزایش C_u نسبت به افزایش C_c مفهوم فیزیکی مناسب‌تری نسبت به گسترش اندازه قطر ذرات موجود و خوب دانه‌بندی شدن خاک دارد. همچنین مقادیر خطای دارای مقادیر مثبت و منفی به ازای داده‌های مختلف بوده است. نکته مهم آن است که چنانچه میانگین مقدار خطا همیشه در یک جهت خاص (در جهت مثبت یا منفی) دارای مقدار قابل توجهی باشد، یک خطای سیستماتیک یا اریبی (Bias) در آن جهت وجود دارد. در صورت ایجاد چنین حالتی می‌توان مقدار خروجی مدل را به اندازه مقدار قرینه اریبی اصلاح نمود تا میانگین خطا به صفر نزدیک شود. اریبی می‌تواند ناشی از یک خطای ثابت در دستگاه آزمایش و یا فرد آزمایش‌کننده باشد. در نتایج این تحقیق مقدار میانگین خطا (حداکثر ۲/۵ در مدل دوم) در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده مدول الاستیک (در دامنه ۲۰۰ تا ۹۰۰) بسیار ناچیز بوده و در نتیجه اریبی خاصی در نتایج مشاهده نمی‌شود. از این رو اصلاح مقادیر خروجی مدل برای لحاظ نمودن مقدار اریبی نیاز نیست. در شکل‌های (۹) و (۱۰) مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر خطا در تخمین مدول الاستیک به ازای ۱۸ داده صحت‌سنجی در مدل‌های اول و



شکل ۱۲. مقادیر واقعی (هدف) در مقابل مقادیر تخمینی با داده‌های (a) صحت‌سنجی (b) آموزش (c) کل داده‌ها در مدل دوم

شکل ۱۱. مقادیر واقعی (هدف) در مقابل مقادیر تخمینی با داده‌های (a) صحت‌سنجی (b) آموزش (c) کل داده‌ها در مدل اول

استفاده از الگوریتم بررسی گروهی داده‌ها (GMDH) توسعه یافته است. تفاوت این دو مدل در استفاده از پارامترهای ورودی متفاوت است، به گونه‌ای که در مدل اول از ضریب انحنای (C_c) و در مدل دوم از ضریب یکنواختی (C_u) به عنوان پارامتر ورودی دانه‌بندی خاک در مدل استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها افزایش غیرخطی سختی خاک را با افزایش تنش همه جانبه و دانسیته نسبی نشان می‌دهد.

همچنین اضافه شدن شن به ماسه در یک سطح تنش و دانسیته نسبی خاص تا ۵۰٪، باعث افزایش سختی و بعد از آن باعث کاهش سختی شده است. نتایج الگوریتم بررسی گروهی داده‌ها نشان‌دهنده برتری نسبی مدل دوم نسبت به مدل اول است. در واقع پارامتر C_u پارامتر مناسب‌تری جهت نشان دادن اثر دانه‌بندی بر روی سختی خاک نسبت به C_c است. به طور کلی نتایج، استفاده از الگوریتم‌هایی مانند GMDH را جهت تخمین و پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیک خاک بدون انجام آزمایش‌های هزینه‌بر در یک محدوده نزدیک به مقادیر آموزشی شبکه فراهم می‌سازد.

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مقادیر ضریب همبستگی بین مقادیر مدل‌های اول و دوم با مقادیر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. این ضریب در مورد هر سه گروه داده‌های صحت-سنجی، داده‌های آموزشی و داده‌های کل بالاتر از ۹۸٪ بوده و بنابراین برازش مناسبی وجود دارد. اگرچه مقدار ضریب همبستگی به ازای داده‌های صحت‌سنجی در مدل دوم اندکی بیشتر از مدل اول بوده و از این نظر مدل دوم برتری اندکی نسبت به مدل اول دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از آزمایش سه محوری تناوبی با اندازه‌گیری کرنش به صورت موضعی، تغییرات مدول الاستیک در ۱۲۰ آزمایش بر روی ۵ گروه خاکی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر مقدار شن اضافه شده به ماسه میزبان، تنش همه جانبه و دانسیته نسبی بر روی مدول الاستیک دینامیکی خاک ارزیابی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، پایگاه داده‌ای شامل ۱۲۰ رکورد تشکیل شده است. با استفاده از این پایگاه داده، دو مدل برای پیش‌بینی مدول الاستیک دینامیکی با

منابع

- Asef, M. R., and Farrokhrouz, M., 2017. A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering, Elsevier*, 157, 359–363.
- Bayat, E., and Bayat, M., 2013. Effect of grading characteristics on the undrained shear strength of sand: Review with new evidences. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11).
- Bayat, M., and Ghalandarzadeh, A., 2018. Stiffness Degradation and Damping Ratio of Sand-Gravel Mixtures Under Saturated State. *International Journal of Civil Engineering, Springer International Publishing*, 16(10): 1261–1277.
- Bayat, M., and Ghalandarzadeh, A., 2019. Influence of Depositional Method on Dynamic Properties of Granular Soil. *International Journal of Civil Engineering, Springer International Publishing*, 17(6): 907–920.
- Biglari, M., and Ashayeri, I., 2011. An empirical model for shear modulus and damping ratio of unsaturated soils. *Unsaturated soils: Theory and practice*, 1(C1): 591–595.
- Cabalar, A. F., 2010. Applications of the oedometer, triaxial and resonant column tests to the study of micaceous sands. *Engineering Geology, Elsevier B.V.*, 112(1–4): 21–28.
- Cai, Y., Dong, Q., Wang, J., Gu, C., and Xu, C., 2015. Measurement of small strain shear modulus of clean and natural sands in saturated condition using bender element test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier*, 76: 100–110.
- Camacho-tauta, J., 2014. Shear modulus reduction curves of Guayuriba sands by cyclic triaxial and bender element tests. (August): 3–9.

- Camacho-tauta, J. F., Reyes-ortiz, O. J., and Álvarez, J. D. J., 2013. Comparison between resonant-column and bender element tests on three types of soils. *Dyna*, 80(182): 163–172.
- Cherian, A. C., and Kumar, J., 2017. Effects of Vibration Cycles on Shear Modulus and Damping of Sand Using Resonant Column Tests. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9): 1–6.
- Chien, L. K., and Oh, Y. N., 2001. Dynamic properties of hydraulic reclaimed soil under initial shear stress. *Geotechnical Engineering*, 32(2): 59–73.
- D'Elia, B., and Lanzo, G., 1996. Laboratory and field determinations of small-strain shear modulus of natural soil deposits. *Earthquake Engineering 11th World Conference*, Acapulco, Mexico.
- Escribano, D. E., and Nash, D. F. T., 2015. Changing anisotropy of G_0 in Hostun sand during drained monotonic and cyclic loading. *Soils and Foundations*, Elsevier, 55(5): 974–984.
- Goudarzy, M., Rahemi, N., Rahman, M., Asce, M., and Schanz, T., 2017. Predicting the Maximum Shear Modulus of Sands Containing Nonplastic Fines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9): 6017013.
- Goudarzy, M., Rahman, M. M., König, D., and Schanz, T., 2016. Influence of non-plastic fines content on maximum shear modulus of granular materials. *Soils and Foundations*, Elsevier, 56(6): 973–983.
- Hagan, M., Demuth, H., and Beale, M., 1997. *Neural network design*.
- Hardin, B. O., and Black, W. L., 1968. Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 94(SM 2): 353–369.
- Hubler, J. F., Athanasopoulos-Zekkos, A., and Zekkos, D., 2018. Monotonic and cyclic simple shear response of gravel-sand mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Ltd, 115(October 2017): 291–304.
- Ishihara, K., 1996. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. New York, Clarendon Press.
- Ivakhnenko, A. G., 1970. Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics. *Automatica*, 6(2): 207–219.
- Jafarian, Y., Javdanian, H., and Haddad, A., 2018. Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions. *Soils and Foundations*, 58(1): 172–184.
- Kallioglou, P., Tika, T., Koninis, G., Papadopoulos, S., and Pitilakis, K., 2009. Shear modulus and damping ratio of organic soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(2): 217–235.
- Kawaguchi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S., 2001. Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test. *15Th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1: 155–158.
- Madhusudhan, B. N., and Senetakis, K., 2016. Evaluating use of resonant column in flexural mode for dynamic characterization of Bangalore sand. *Soils and Foundations*, Elsevier, 56(3): 574–580.
- Maher, M. H., Ro, K. S., and Welsh, J. P., 1994. High strain dynamic modulus and damping of chemically grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13(2): 131–138.
- Menq, F.-Y., 2003. *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Doctoral dissertation.
- Moayerian, S., 2012. *Effect of Loading Frequency on Dynamic Properties of Soils Using Resonant Column*. University of Waterloo, 112.
- Naeini, S. A., Moayed, R. Z., Kordnaeij, A., and Mola-Abasi, H., 2018. Elasticity modulus of clayey deposits estimation using group method of data handling type neural network. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Elsevier, 121(April 2017): 335–343.
- Onwubolu, G., 2015. *GMDH and Implementation in C Methodology*. World Scientific Publishing Co., Inc.
- Payan, M., Khoshghalb, A., Senetakis, K., and Khalili, N., 2016a. Effect of particle shape and validity of Gmaxmodels for sand: A critical review and a new expression. *Computers and Geotechnics*, Elsevier Ltd, 72: 28–41.
- Payan, M., Senetakis, K., Khoshghalb, A., and Khalili, N., 2016b. Influence of particle shape on small-strain damping ratio of dry sands. *Géotechnique*, 66(7): 610–616.
- Russell, S., and Norvig, P., 2016. *Artificial intelligence: a modern approach*.
- Souto, A., Hartikainen, J., and Özüdoğru, K., 1994. Measurement of dynamic parameters of road pavement materials by the bender element and resonant column tests. *Géotechnique*, Thomas Telford Ltd, 44(3): 519–526.

- Wichtmann, T., Kimmig, I., and Triantafyllidis, T., 2017. On correlations between 'dynamic' (small-strain and 'static' (large-strain stiffness moduli – An experimental investigation on 19 sands and gravels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Ltd, 98(March): 72–83.
- Wichtmann, T., Navarrete Hernández, M. A., and Triantafyllidis, T., 2015. On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 69: 103–114.
- Youd, T. L., and Idriss, I. M., 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4): 297–313.
- Zhang, J., Andrus, R. D., and Juang, C. H., 2005. Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4): 453–464.
- Zhou, W., Chen, Y., Ma, G., Yang, L., and Chang, X., 2017. A modified dynamic shear modulus model for rockfill materials under a wide range of shear strain amplitudes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 92(October 2016): 229–238.
- Zhu, S., Yang, G., Wen, Y., and Ou, L., 2014. Dynamic shear modulus reduction and damping under high confining pressures for gravels. *Géotechnique Letters*, 4(3): 179–186.