

## ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های ریزدانه با استفاده از الگوریتم دسته‌بندی گروهی داده‌ها

حامد جاودانیان<sup>\*</sup>، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

عبدالحسین حداد، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

یاسر جعفریان، استادیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

E-mail: javdani an@eng.sku.ac.ir

دریافت: ۹۴/۰۱/۲۳ - پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۷

### چکیده

با توجه به اینکه عملکرد صحیح تأسیسات زیربنایی نیاز به طراحی دقیق دارد، بنابراین ارزیابی دقیق پارامترهای کلیدی با به‌کارگیری روش‌های نوین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سازه‌های خاکی و سیستم‌های حمل و نقل، به‌عنوان بخشی از مهمترین ابنیه‌ی فنی و زیرساخت‌ها که خدماتی ضروری برای بشر فراهم می‌نمایند، همواره برآورد و پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار خاک، بخصوص در برابر بارهای دینامیکی، بسیار اهمیت دارد. خواص دینامیکی خاک‌ها شامل مدول برشی و نسبت میرایی از پارامترهای بسیار مهم جهت بررسی رفتار دینامیکی و همچنین مدل‌سازی این مصالح می‌باشند. ارزیابی صحیح این پارامترها برای انجام تحلیل‌های دقیق‌تر مسائل دینامیک خاک و یا اندرکنش خاک-سازه ضروری می‌باشد. روش‌های آزمایشگاهی مختلفی جهت اندازه‌گیری خصوصیات دینامیکی خاک‌ها موجود بوده و مطالعات بسیاری انجام شده است. در این مطالعه، بر اساس نتایج موجود و با استفاده از الگوریتم دسته‌بندی گروهی داده‌ها (GMDH) دو مدل جهت ارزیابی مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌های چسبنده ارائه گردیده است. بررسی صحت عملکرد مدل‌های ارائه شده، با استفاده از نتایج آزمون‌های ساتریفیوژ صورت گرفت. این مدل‌ها نسبت به پارامترهای ورودی آنالیز حساسیت شده و دقت آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، مدل‌های ارائه شده با برخی روابط موجود مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان از دقت بالای مدل‌های ارائه شده (مبتنی بر GMDH) در ارزیابی خصوصیات دینامیکی خاک‌های چسبنده دارد.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های خاکی، خاک‌های ریزدانه، مدول برشی، میرایی خاک

### ۱. مقدمه

است. از این رو، ارزیابی دقیق این پارامترها و تغییرات آنها با کرنش برشی در حل مسائل مختلفی چون تحلیل پاسخ نهشته‌های خاکی و یا اندرکنش خاک-سازه بسیار مهم می‌باشد. رفتار دینامیکی خاک‌های مختلف تحت شرایط متفاوت، توسط بسیاری از محققین ژئوتکنیک

خصوصیات دینامیکی مصالح ژئوتکنیک در قالب پارامترهای مدول برشی (G) و نسبت میرایی (D) بیان می‌گردد. در مسائل دینامیک خاک، پاسخ این مصالح به تحریکات برشی مانند اثر زلزله از اهمیت بالایی برخوردار

می‌باشد. روش‌های محاسبات نرم مانند شبکه‌های عصبی، نوروفازی، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیک به عنوان ابزارهای قدرتمند جهت مدل‌های غیرخطی، به طور موفقیت‌آمیزی در تحلیل‌های مختلف مهندسی ژئوتکنیک مانند ظرفیت باربری پی (رضانیا و جوادی، ۲۰۰۷؛ ارنک، ۲۰۱۳)، مدل‌سازی تنش- کرنش خاک‌ها (الیس و همکاران، ۱۹۹۵)، نفوذپذیری خاک (بیلماز و همکاران، ۲۰۱۲)، روانگرایی (بازیار و جعفریان، ۲۰۰۷؛ بازیار و همکاران، ۲۰۱۱؛ قربانی و همکاران، ۲۰۱۲؛ جعفریان و همکاران، ۲۰۱۳)، منحنی‌های رفتار دینامیک خاک (جعفریان و همکاران، ۲۰۱۴؛ جاودانیان و همکاران، ۲۰۱۴)، جنبش نیرومند زمین (جعفریان و همکاران، ۲۰۱۰) و ماکزیمم تنش انحرافی ماسه‌های کربناتی (شاه- نظری و همکاران، ۲۰۱۳) به‌کار گرفته شده است. روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها (GMDH) نیز کاربردهای موفقیت‌آمیزی در مهندسی عمران داشته است. نجف‌زاده و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از این روش، مدلی جهت تخمین آبخستگی پایه‌های پل در خاک‌های ریزدانه ارائه دادند.

در مطالعه حاضر، بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی، مدل‌هایی مبتنی بر GMDH جهت ارزیابی  $G/G_{max}$  و D خاک‌های ریزدانه ارائه شده است. پارامترهای ورودی مدل‌های مذکور شامل کرنش برشی، فشار محدود کننده مؤثر و نشانه خمیری است. صحت عملکرد مدل‌های ارائه شده به کمک نتایج آزمون‌های سانتیفیوژ و همچنین در مقایسه با روابط و چارت‌های موجود اثبات شده است. همچنین، مطالعات پارامتریک و دقت مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲. مجموعه نتایج آزمایشگاهی

مهمترین اطلاعات مورد نیاز جهت تعیین خصوصیات دینامیکی خاک‌ها، نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد. مجموعه وسیعی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین مختلف (مهندسین ارتش ایالات متحده،

لرزه‌ای و به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی دینامیکی و سیکی مورد بررسی قرار گرفته است (سنتاکیس و همکاران، ۲۰۱۲؛ یسودا و ماتسوموتو، ۱۹۹۳؛ ساکسنا و ردی، ۱۹۸۹؛ هاردین و کالینسکی، ۲۰۰۵؛ خان و همکاران، ۲۰۱۱؛ هاردین و درنویچ، ۱۹۷۲-الف).

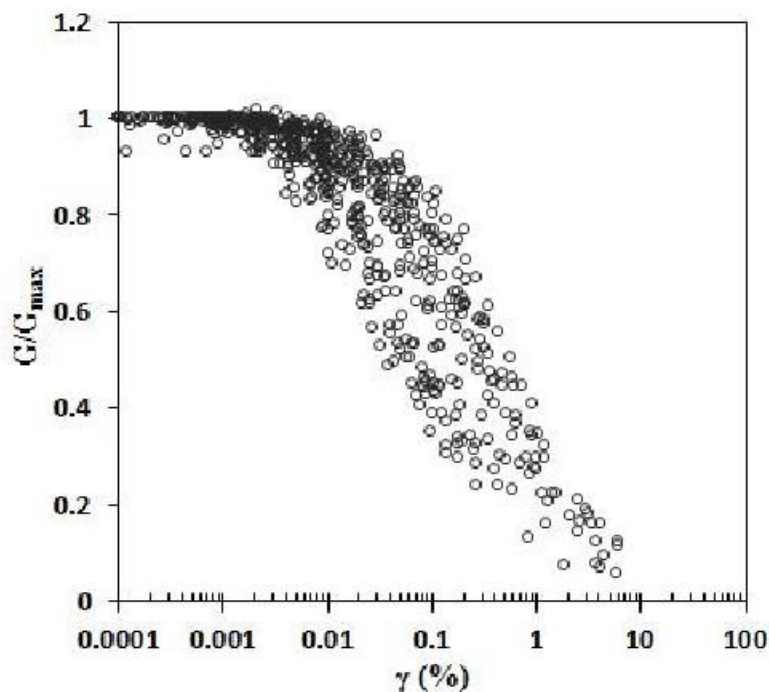
مطالعات بسیاری جهت بررسی پارامترهای مؤثر بر مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه صورت گرفته است (هاردین و درنویچ، ۱۹۷۲-ب؛ دارندلی، ۲۰۰۱؛ استوک و همکاران، ۱۹۹۹؛ ریچارت و همکاران، ۱۹۷۰؛ حداد و شفابخش، ۲۰۰۷). بر اساس این مطالعات، کرنش برشی ( $\gamma$ )، فشار محدود کننده مؤثر ( $\sigma'_0$ )، و نشانه خمیری (PI) مهمترین عوامل مؤثر بر نسبت مدول برشی ( $G/G_{max}$ ) و نسبت میرایی (D) خاک‌های چسبنده می‌باشند. مدول برشی خاک در کرنش‌های برشی کوچک (حدود  $10^{-5}$ ) را مدول برشی ماکزیمم ( $G_{max}$ ) می‌نامند. این پارامتر از پارامترهای اساسی در تحلیل‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای از جمله بررسی اثرات ساختگاهی به شمار می‌آید. مدول برشی ماکزیمم هم به روش صحرایی و هم به روش آزمایشگاهی قابل محاسبه می‌باشد. این پارامتر در روش آزمایشگاهی معمولاً با استفاده از آزمون‌های ستون تشدید محاسبه می‌گردد.

ژانگ و همکاران (۲۰۰۵) معادلاتی را بر اساس مدل هیپربولیک، جهت تخمین نسبت مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌ها ارائه نمودند. پارامترهای مورد استفاده در معادلات مذکور شامل کرنش برشی، فشار محدود کننده مؤثر و نشانه خمیری بوده است. ایشان نتایج آزمایشگاهی را بر اساس سن زمین‌شناسی به سه دسته تقسیم نموده تا اثر این پارامتر را نیز در روابط خود لحاظ نمایند. کوکوشو و همکاران (۱۹۸۲) و همچنین دوبری و وستیک (۱۹۸۷) در مطالعات خود نشان دادند که مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌های چسبنده به شدت تحت تأثیر نشانه خمیری خاک می‌باشند.

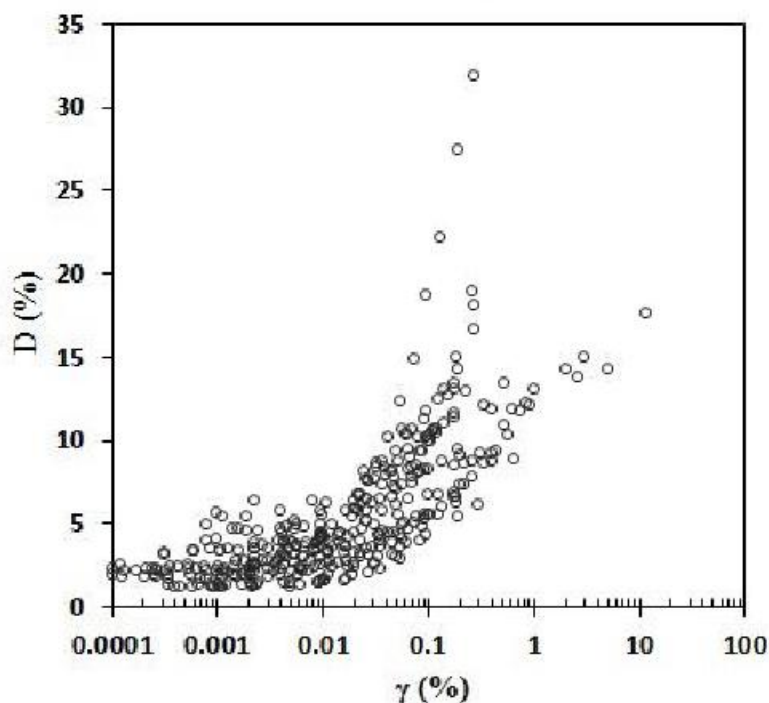
یکی از روش‌های محاسباتی که امروزه جهت ارائه‌ی مدل‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبات نرم

این مطالعات جهت بررسی پارامترهای دینامیک خاک‌های ریزدانه مختلف و تحت شرایط متفاوت، در سطوح کرنش کوچک و بزرگ و به کمک دستگاه‌هایی چون ستون تشدید، برش ساده سیکلی، برش پیچشی سیکلی و سه محوری سیکلی صورت گرفته است. این نتایج در شکل-های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

۱۹۷۸؛ شرکت فوگرو- مک‌کلیند، ۱۹۹۲؛ بوردن و همکاران، ۱۹۹۴ و ۱۹۹۶؛ استوک و همکاران، ۱۹۹۵؛ لی، ۱۹۹۶؛ لائزو و همکاران، ۱۹۹۷؛ شرکت اس و می، ۱۹۹۸؛ استوک و دارندلی، ۱۹۹۸؛ کاسرتا و همکاران، ۲۰۱۲) روی خاک‌های ریزدانه جمع‌آوری و تحلیل گردید.



شکل ۱. نتایج آزمایشگاهی مدول برشی خاک‌های چسبیده



شکل ۲. نتایج آزمایشگاهی نسبت میرایی خاک‌های چسبیده

دسته تا حد ممکن به هم نزدیک باشند. پارامترهای آماری مجموعه نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ آمده است.

هشتاد درصد نتایج آزمایشگاهی جهت آموزش و ۲۰٪ نیز جهت ارزیابی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. انتخاب داده‌ها برای مراحل آموزش و ارزیابی شبکه به گونه‌ای صورت گرفت که پارامترهای آماری هر دو

جدول ۱. پارامترهای آماری نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده در مدل‌های پیشنهادی

متغیر	مدل	پارامترهای آماری			
		میانگین	انحراف معیار	مینیم	ماکزیمم
فشار محدود کننده، $\sigma'_0$ (kPa)	$G/G_{max}$	۱۱۸/۲	۱۲۹/۳۳	۱۶	۵۷۵
نشانه خمیری، PI (%)	D	۱۷۰/۲۰	۱۷۵/۴۱	۱۶	۷۶۶
گرشش برشی، $\gamma$ (%)	$G/G_{max}$	۴۶/۵۷	۳۲/۲۷	۵	۱۳۲
نسبت مدول برشی، $G/G_{max}$	D	۴۷/۹۹	۳۶/۸۶	۱۰	۱۳۲
نسبت میرایی، D (%)	$G/G_{max}$	۰/۱۶۹	۰/۶۱۶	۰/۰۰۰۱	۶/۵۰
	D	۰/۱۲۲	۰/۶۷۹	۰/۰۰۰۱	۱۱/۴۱
	$G/G_{max}$	۰/۸۱۷	۰/۲۳۳	۰/۰۵۶	۱/۰
	D	۵/۲۹	۴/۱۱	۱/۰۴	۳۱/۸۸

خودسازماندهی داده بوده که به تدریج مدل‌های پیچیده-تری در طول ارزیابی عملکرد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی تولید می‌کند (کلاتتری و همکاران، ۲۰۰۹؛ نجف‌زاده و عظمت‌الله، ۲۰۱۳).

الگوریتم GMDH برای ارزیابی رفتارهای محیطی سیستم‌های غیرخطی با پیچیدگی زیاد به کار برده می‌شود. ایده اصلی GMDH ساختن یک تابع تحلیلی مبتنی بر یک شبکه پیش‌رونده بر اساس توابع انتقالی دو جمله‌ای می‌باشد. ساختار آن به صورت یک شبکه چند لایه پیش‌رونده می‌باشد که مشابه شبکه‌های عصبی مصنوعی است، با این تفاوت که برعکس شبکه‌های عصبی، تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌ها در هر لایه نامعلوم بوده و در طول فرایند آموزش تعیین می‌شود (نریمان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳؛ نجف‌زاده و لیم، ۲۰۱۵).

ایواخنکو (۱۹۷۶) با استفاده از چندجمله‌ای کولموگروف-گابور، تئوری GMDH را گسترش داد و ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی هر سیستم را می‌توان با سری توابع ولترا که مشابه چندجمله‌ای گسسته شده کولموگروف-گابور می‌باشد، به صورت زیر بیان کرد:

تعداد نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی در مراحل آموزش و ارزیابی شبکه برای ارائه مدل نسبت مدول برشی به ترتیب برابر با ۵۴۴ و ۱۳۶ تست، و برای ارائه مدل نسبت میرایی به ترتیب برابر با ۳۰۸ و ۷۷ تست بوده است. در مرحله بررسی صحت عملکرد مدل‌های ارائه شده، نتایج آزمون‌های سانتریفیوژ انجام شده توسط برنان و همکاران (۲۰۰۵) مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳. الگوریتم دسته‌بندی گروهی داده‌ها (GMDH)

برای مدل کردن این سیستم بایستی روابط صریح بین متغیرها به طور دقیق معلوم باشد. در اغلب سیستم‌ها این روابط نامعلوم بوده و استخراج آنها بسیار مشکل می‌باشد. در چنین مواردی می‌توان از روش‌های محاسبات نرم که داده‌محور هستند استفاده نمود. اجزای اصلی محاسبات نرم شامل منطق فازی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های تکامل‌گرا دارای توانایی‌های زیادی در شناسایی پدیده‌ها و سیستم‌های غیرخطی دارند. یکی از انواع این روش‌ها، مدل فراذهنی GMDH می‌باشد که یک رویکرد

محاسبه ضرایب وزنی در هر نرون به این صورت است که ابتدا فرض می‌شود که  $N$  پارامتر ورودی شبکه GMDH وجود دارد که برای هر کدام از این پارامترها  $P$  مقدار صحیح  $X_n = (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{np})$  و  $n = 1, \dots, N$  وجود داشته باشد. همچنین، شش ضریب وزنی برای هر نرون طوری محاسبه شود که میانگین مربعات خطا بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده حداقل باشد. آموزش شبکه GMDH در تکرار  $s$  ام جهت تشکیل چندجمله‌ای‌های درجه ۲ به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$y = h(w, X^{(s)}) \quad s = 1, \dots, m \quad (2)$$

که  $w$  بردار ضرایب وزنی در هر نرون،  $X$  بردار پارامترهای ورودی شبکه و  $m$  تعداد تکرارهای مرحله آموزش شبکه می‌باشد.

برای ساخت شبکه GMDH، ابتدا ترکیب‌های دوتایی از پارامترهای ورودی را باید در نظر گرفت. بعد از آن، در هر نرون با استفاده از روش حداقل مربعات خطا، ضرایب وزنی هر نرون و مقدار خطای مربوطه محاسبه می‌شوند. در هر لایه برای انتخاب نرون‌های برتر از نظر ویژگی طبقه‌بندی، از معیار زیر استفاده می‌شود:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i(\text{measured})} - Y_{i(\text{predicted})})^2}{N} \rightarrow \min \quad (3)$$

که در آن  $Y_{i(\text{measured})}$  و  $Y_{i(\text{predicted})}$  به ترتیب خروجی اندازه‌گیری شده و خروجی پیش‌بینی شده می‌باشند. در شبکه‌های پیشنهادی در این مطالعه، لایه اول دارای ۳ نرون بوده است.

به منظور بررسی دقت مدل‌های پیشنهادی، از شاخص‌های آماری شامل: ضریب همبستگی ( $R$ )، درصد میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، بایاس (Bias) و شاخص پراکندگی (SI) استفاده شده که از روابط زیر حاصل شده‌اند:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (1)$$

که در آن  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$

$A = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_m)$  به ترتیب بردارهای پارامترهای

ورودی و ضرایب وزنی در هر نرون می‌باشند.

الگوریتم GMDH بر اساس اصل تکامل توسعه یافته است که در آن فرایندهایی نظیر تولید نسل و انتخاب نرون‌های برتر در هر لایه دخالت دارند. در اولین لایه، نرون‌ها توسط ترکیب پارامترهای ورودی ایجاد شده و در لایه دوم به نرون‌های برتر قبلی متصل می‌شوند. انتخاب نرون‌های برتر که دارای بهترین ویژگی می‌باشند، بر اساس معیارهای خارجی که می‌توانند خطای موجود در هر نرون را ارزیابی نمایند، صورت می‌گیرد (نجف‌زاده و بارانی، ۲۰۱۱؛ نجف‌زاده و عظمت‌الله، ۲۰۱۳).

اگر تعداد شبکه GMDH دارای  $P$  پارامتر ورودی باشد، تعداد نرون‌های لایه اول برابر با  $L = \binom{P}{2}$  می‌باشد. همچنین، برای تولید نرون‌های لایه‌های میانی، ترکیب‌های دوتایی نرون‌های برتر لایه قبلی در نظر گرفته می‌شوند (ایواخنکو، ۱۹۷۶). بعد از محاسبه ضرایب وزنی بر اساس سری داده‌های آموزشی در هر نرون، معیارهای عملکرد برای نرون‌ها را می‌توان از طریق محاسبه ضریب همبستگی یا محاسبه میانگین خطای مربعات بین خروجی‌های مشاهده‌ای و محاسباتی به دست آورد. در نهایت، فقط نرون‌هایی که شاخص عملکرد بهتری نسبت به مقدار معیار آستانه دارند برای ایجاد لایه بعدی انتخاب خواهند شد. در هر لایه از شبکه GMDH می‌توان از یک مقدار متفاوت برای معیار آستانه استفاده کرد. وظیفه معیار آستانه در هر لایه، فیلتر کردن یا غیرفعال کردن نرون‌هایی می‌باشد که از اعتبار کمتری برخوردار هستند و تنها نرون‌هایی که دارای عملکردی بهتر از مقدار معیار آستانه باشند، به لایه بعدی انتقال داده می‌شوند (نجف‌زاده و همکاران، ۲۰۱۴). از طرفی، مکانیسم روش

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [Y_{i(measured)} - \bar{Y}_{(measured)}][Y_{i(predicted)} - \bar{Y}_{(predicted)}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [Y_{i(measured)} - \bar{Y}_{(measured)}]^2 \cdot \sum_{i=1}^N [Y_{i(predicted)} - \bar{Y}_{(predicted)}]^2}} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sum_{i=1}^N |Y_{i(predicted)} - Y_{i(measured)}|}{\sum_{i=1}^N Y_{i(measured)}} \times 100 \right] \quad (5)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [Y_{i(predicted)} - Y_{i(measured)}]^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N [Y_{i(predicted)} - Y_{i(measured)}]}{N} \quad (7)$$

$$SI = \frac{RMSE}{(1/N) \sum_{i=1}^N Y_{i(measured)}} \quad (8)$$

دقت مدل‌های پیشنهادی با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه‌های ارائه شده، در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. مقادیر  $R$ ،  $MAPE$ ،  $RMSE$ ،  $Bias$  و  $SI$  مدل پیشنهادی برای نسبت مدول برشی در مرحله آموزش به ترتیب برابر  $0/988$ ،  $0/120$ ،  $0/029$ ،  $0/015$  و  $0/042$  و در مرحله ارزیابی به ترتیب برابر  $0/981$ ،  $0/144$ ،  $0/035$ ،  $0/018$  و  $0/051$  می‌باشد. این پارامترها برای مدل پیشنهادی نسبت میرایی در مرحله آموزش به ترتیب برابر  $0/964$ ،  $4/833$ ،  $1/045$ ،  $0/913$  و  $4/464$  و در مرحله ارزیابی به ترتیب برابر  $0/951$ ،  $4/986$ ،  $1/078$ ،  $0/942$  و  $1/051$  می‌باشد.

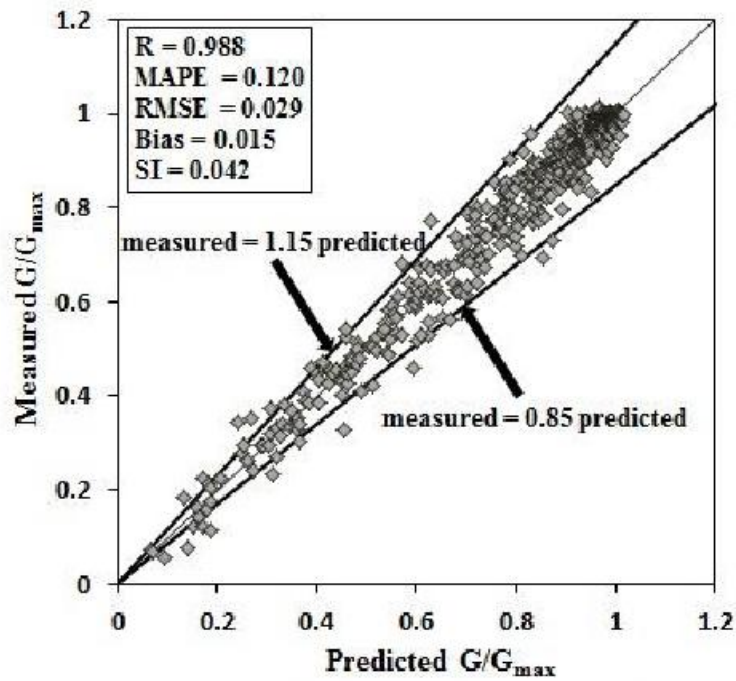
در این روابط،  $N$  تعداد داده‌های مورد استفاده، و  $Y_{i(predicted)}$ ،  $Y_{i(measured)}$  و  $\bar{Y}_{(predicted)}$  و  $\bar{Y}_{(measured)}$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده، مقادیر پیش‌بینی شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و متوسط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشند.

## ۴. نتایج و بحث

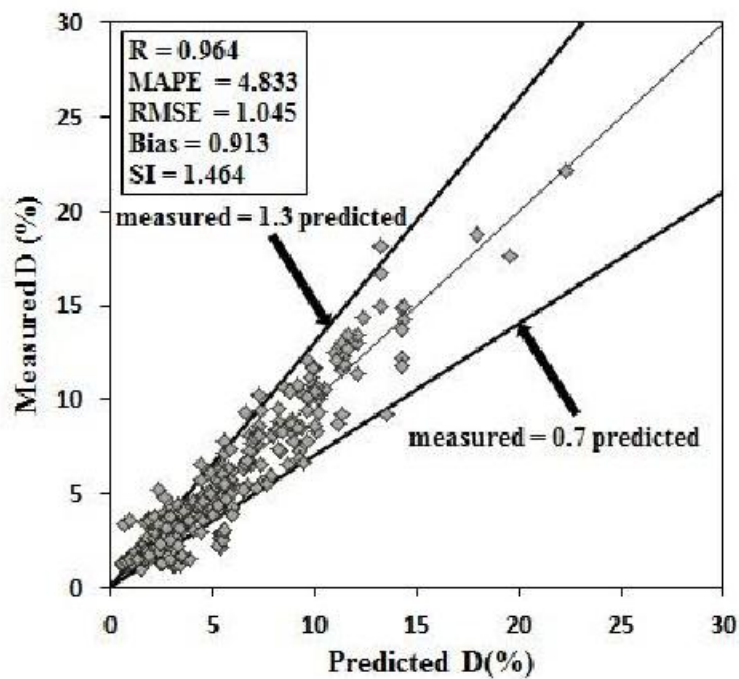
### ۴-۱. مدل‌های پیشنهادی

در این مطالعه، شبکه‌های زیادی با پارامترهای اولیه مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً با توجه به پارامترهای خطای محاسبه شده، مدل دارای بیشترین دقت انتخاب گردید.



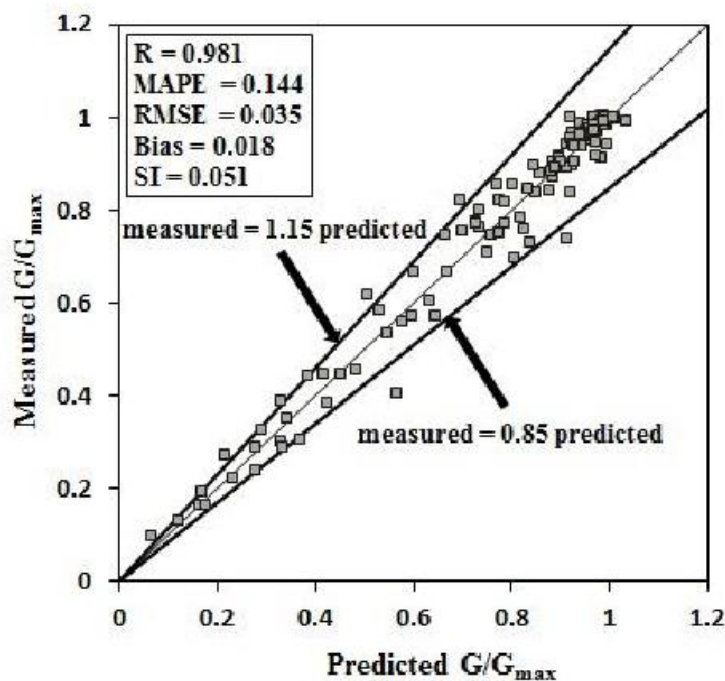


شکل ۳. مقادیر  $G/G_{max}$  اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مرحله آموزش شبکه

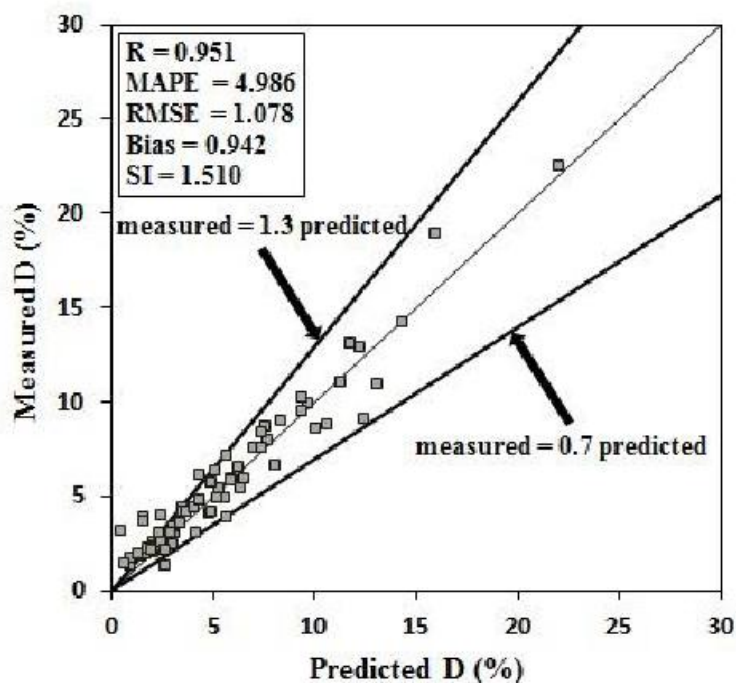


شکل ۴. مقادیر  $D$  اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مرحله آموزش شبکه

ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های ریزدانه با استفاده از الگوریتم دسته‌بندی گروهی داده‌ها



شکل ۵. مقادیر  $G/G_{max}$  اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مرحله ارزیابی شبکه



شکل ۶. مقادیر  $D$  اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مرحله ارزیابی

۱/۳۰ برابر مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشند، که این نشان از دقت قابل قبول مدل‌های پیشنهادی دارد. شاخص‌های آماری مدل‌های ارائه شده برای پارامترهای دینامیکی خاک‌های چسبنده در مراحل مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۳ تا ۶ مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های پیشنهادی برای نسبت مدول برشی محدود به خطوط متناظر با ۰/۸۵ و ۱/۱۵ برابر مقدار اندازه‌گیری شده، و برای نسبت میرایی محدود به خطوط متناظر با ۰/۷۰ و

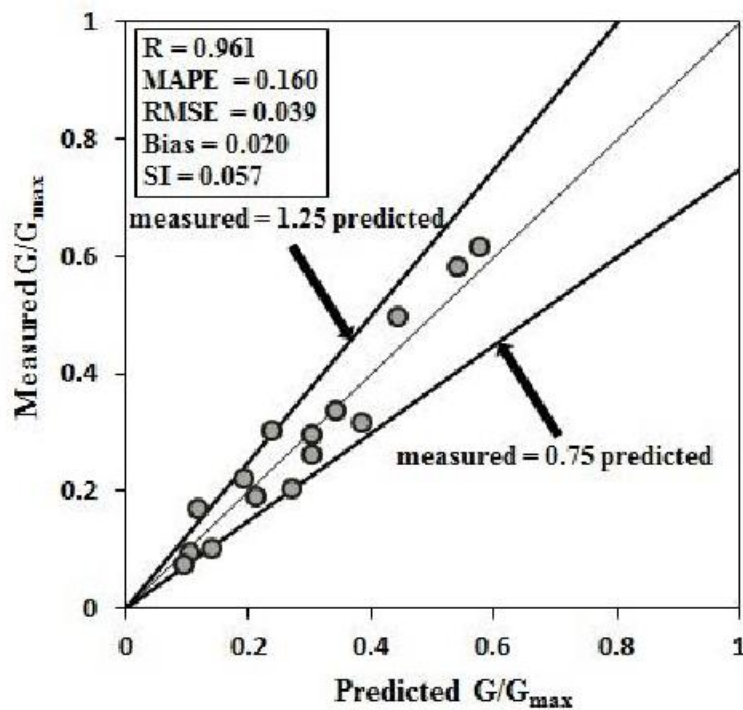


جدول ۲. شاخص‌های آماری مدل‌های ارائه شده

عملکرد مدل					نسبت مدول برشی					مرحله
نسبت میرایی					نسبت مدول برشی					
R	MAPE	RMSE	Bias	SI	R	MAPE	RMSE	Bias	SI	
۰/۹۶۰	۴/۸۰۵	۱/۰۳۹	۰/۹۰۸	۱/۴۵۵	۰/۹۸۵	۰/۱۳۲	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۰۵۰	کل داده‌های مورد استفاده
۰/۹۶۴	۴/۸۳۳	۱/۰۴۵	۰/۹۱۳	۱/۴۶۴	۰/۹۸۸	۰/۱۲۰	۰/۰۲۹	۰/۰۱۵	۰/۰۴۲	آموزش شبکه
۰/۹۵۱	۴/۹۸۶	۱/۰۷۸	۰/۹۴۲	۱/۵۱۰	۰/۹۸۱	۰/۱۴۴	۰/۰۳۵	۰/۰۱۸	۰/۰۵۱	ارزیابی شبکه
۰/۹۲۳	۵/۵۵۴	۱/۲۰۱	۱/۰۴۹	۱/۶۸۲	۰/۹۶۱	۰/۱۶۰	۰/۰۳۹	۰/۰۲۰	۰/۰۵۷	بررسی صحت عملکرد مدل

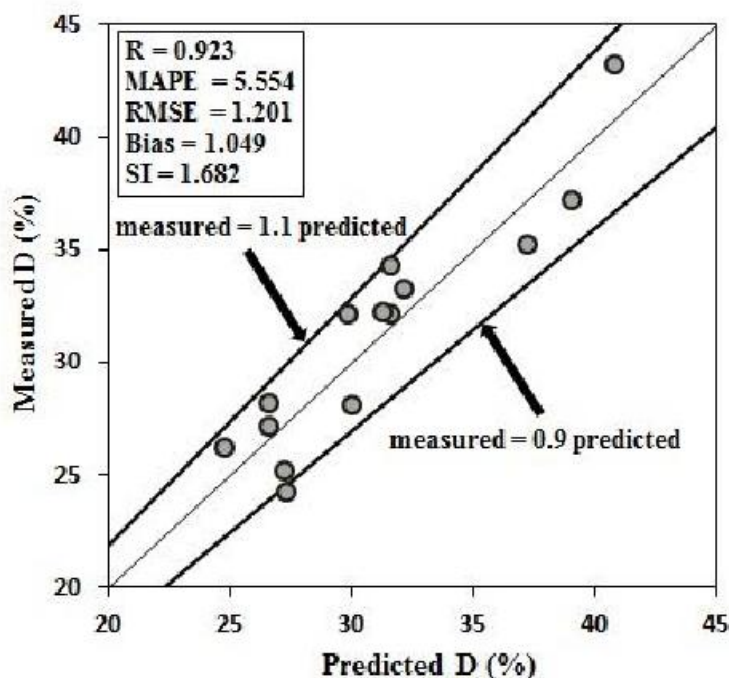
است. محدود بودن نتایج این مرحله به خطوط متناظر با ۰/۷۵ و ۱/۲۵ برابر مقدار اندازه‌گیری شده برای نسبت مدول برشی و ۰/۹ و ۱/۱ برابر مقدار اندازه‌گیری شده برای نسبت میرایی، نشان از دقت قابل قبول مدل‌های پیشنهادی جهت ارزیابی رفتار دینامیک خاک‌های ریزدانه دارد.

به منظور بررسی صحت عملکرد مدل‌های پیشنهادی برای پارامترهای دینامیکی خاک‌های چسبنده، نتایج آزمون‌های سانتریفیوژ برنان و همکاران (۲۰۰۵) روی خاک‌های رسی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این آزمون‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های GMDH پیشنهاد شده در این مطالعه، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده



شکل ۷. مقایسه مقادیر  $G/G_{max}$  اندازه‌گیری شده در آزمون‌های سانتریفیوژ و پیش‌بینی شده به کمک مدل‌های ارائه شده

ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌های ریزدانه با استفاده از الگوریتم دسته‌بندی گروهی داده‌ها

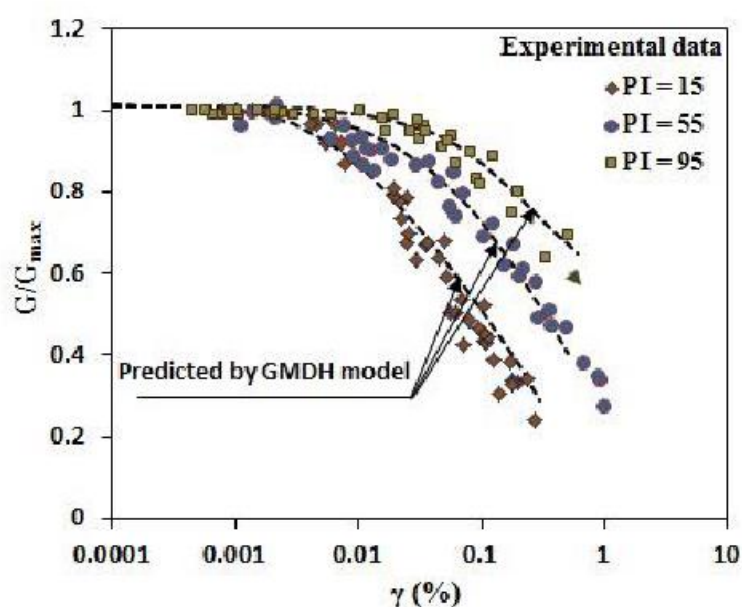


شکل ۸. مقایسه مقادیر D اندازه‌گیری شده در آزمون‌های ساتریفیوژ و پیش‌بینی شده به کمک مدل‌های ارائه شده

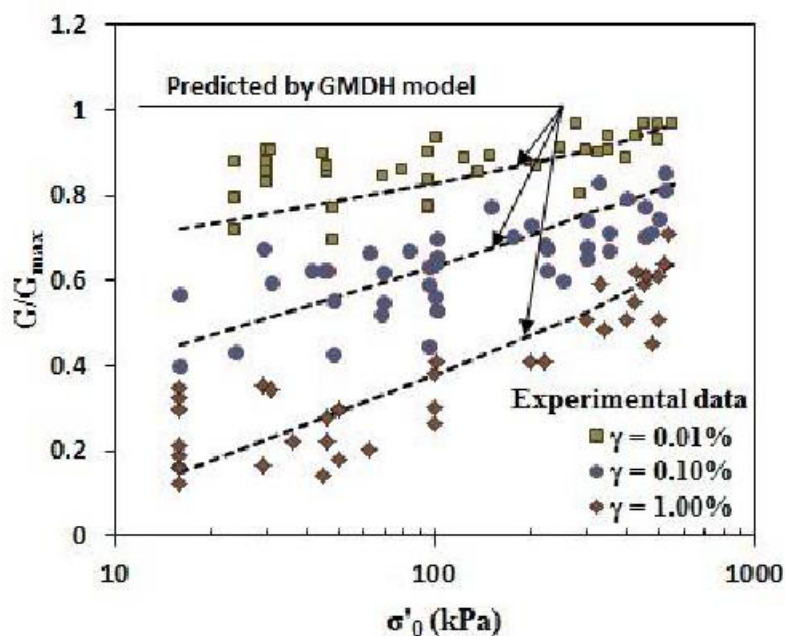
#### ۲-۴. آنالیز حساسیت و دقت مدل‌های پیشنهادی

در این بخش، به منظور بررسی اینکه آیا روند تغییرات نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی GMDH با پارامترهای ورودی، با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی در تطابق می‌باشد، مطالعات پارامتریک صورت گرفته است. به این منظور، اثر تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی

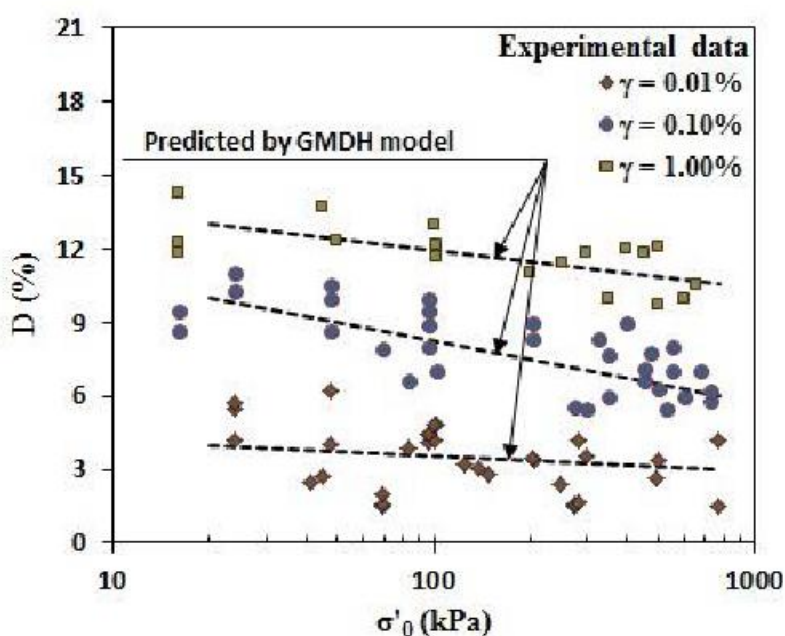
بر نسبت مدول برشی و نسبت میرایی مورد بررسی قرار گرفته، در حالی که پارامترهای دیگر دارای مقدار ثابت و برابر با مقدار میانگین خود در مجموعه‌ی داده‌ها (ارائه شده در جدول ۱) بوده است. تغییرات نسبت مدول برشی ( $G/G_{max}$ ) با کرنش برشی ( $\gamma$ ) و به ازای نشانه‌های خمیری (PI) متفاوت در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. تغییرات  $G/G_{max}$  در مقابل کرنش برشی به ازای نشانه‌های خمیری مختلف



شکل ۱۰. تغییرات  $G/G_{max}$  در مقابل  $\sigma'_0$  به ازای سطوح مختلف کرنش برشی



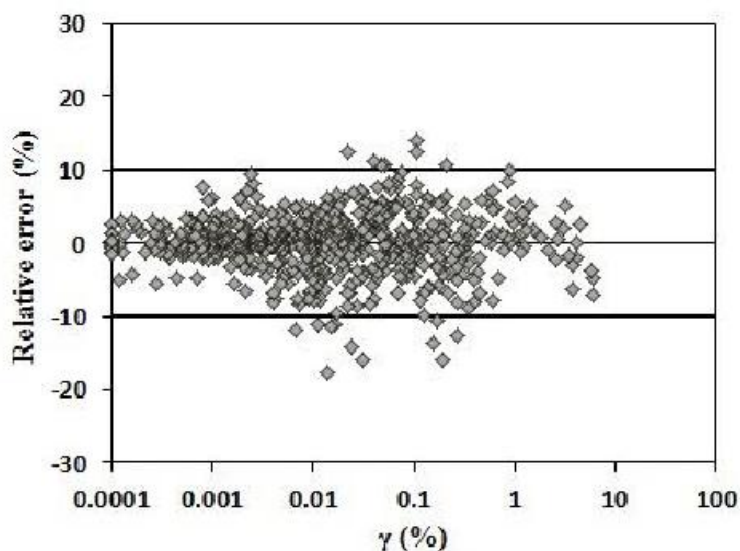
شکل ۱۱. تغییرات  $D$  در مقابل  $\sigma'_0$  به ازای سطوح مختلف کرنش برشی

می‌باشد. همچنین شکل ۱۱ نشانگر کاهش نسبت میرایی با افزایش  $\sigma'_0$  و همچنین افزایش  $\gamma$  می‌باشد که این تغییرات با نتایج کیم و نوک (۱۹۸۱) سازگاری دارد. علاوه بر این، تفاضل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای  $G/G_{max}$  و  $D$  به عنوان خطای نسبی محاسبه شده تا دقت مدل در پیش‌بینی نتایج بررسی گردد.

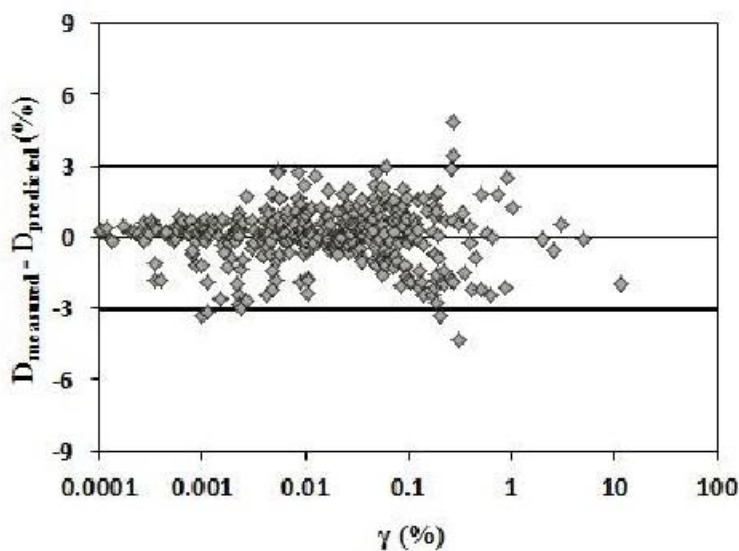
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تغییرات نسبت مدول برشی و نسبت میرایی با فشار محدود کننده مؤثر ( $\sigma'_0$ ) را با کرنش‌های برشی متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰،  $G/G_{max}$  با افزایش  $\sigma'_0$  و کاهش  $\gamma$ ، افزایش می‌یابد. این روند تغییرات با نتایج حاصل از مطالعات محققینی چون لانزو و همکاران (۱۹۹۷) و کاگوا (۱۹۹۲) در تطابق

کمتر از  $\pm 10\%$  و برای نسبت میرایی تفاضل مقادیر اندازه-گیری شده (نتایج آزمایشگاهی) با مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از  $\pm 3\%$  است. البته دقت مدل در کرنش‌های بیشتر نسبت به کرنش‌های کوچک کمی کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات خطای نسبی با افزایش کرنش برشی را نشان می‌دهند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، مدل‌های ارائه شده از دقت کافی برخوردار می‌باشند. برای نسبت مدول برشی، میزان خطا



شکل ۱۲. دقت مدل ارائه شده برای نسبت مدول برشی



شکل ۱۳. دقت مدل ارائه شده برای نسبت میرایی

ریزدانه را جمع‌آوری کرده و معادلاتی را برای محاسبه نسبت مدول برشی و نسبت میرایی آنها ارائه نمودند. ایشان پارامترهای دینامیکی خاک‌های چسبنده را بر اساس کرنش برشی، فشار محدود کننده مؤثر و نشانه خمیری در قالب روابط زیر نشان دادند:

##### ۵. مقایسه با مطالعات پیشین

به منظور بررسی عملکرد مدل‌های ارائه شده، مقادیر پارامترهای دینامیکی خاک‌های چسبنده حاصل از روابط ایشیباشی و ژانگ (۱۹۹۳) و همچنین روابط آکر و انسال (۲۰۰۷) استفاده شد. ایشیباشی و ژانگ (۱۹۹۳) مجموعه-ای از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به خاک‌های دانه‌ای و



$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, PI) \sigma'_0{}^{m(\gamma, PI)} \quad (9)$$

که در این رابطه  $\sigma'_0$  فشار محدود کننده مؤثر بوده و ضرایب  $K$  و  $m$  را به صورت توابعی از کرنش برشی و نشانه‌ی خمیری به صورت روابط (۱۰) تا (۱۲) ارائه نمودند:

$$m(\gamma, PI) = 0.272 \left[ 1 - \tanh \left\{ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (10)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left[ 1 + \tanh \left\{ \ln \left( \frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right\} \right] \quad (11)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{for } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{for } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{for } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{for } PI > 70 \end{cases} \quad (12)$$

آنها همچنین رابطه‌ی (۱۳) را برای نسبت میرایی ارائه نمودند:

$$D = \frac{0.333(1 + e^{-0.0145 PI^{1.3}})}{2} \left\{ 0.586 \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \left( \frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right\} \quad (13)$$

آکر و انسال (۲۰۰۷) با انجام آزمایش‌های سیکلی روی نمونه‌های خاک ریزدانه، به بررسی پارامترهای دینامیک خاک پرداختند. این نمونه‌ها از نقاط مختلف پس از زلزله-ی **Kocaeli** (۱۹۹۹) در ترکیه گرفته شده بود. ایشان بر اساس نتایج آزمایشگاهی، روابط زیر را برای نسبت مدول برشی و نسبت میرایی ارائه نمودند:

مقایسه نتایج آزمایشگاهی گردآوری شده و نتایج حاصل از معادلات ایشیباشی و ژانگ (۱۹۹۳) نشان داده که معادلات مذکور مقادیر  $G/G_{max}$  را در بازه ۰/۸ تا ۱/۰ بیشتر تخمین زده و خارج از این بازه را کمتر تخمین خواهد زد. همچنین مقادیر  $D$  کمتر از ۱۰٪ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر  $D$  بزرگتر از ۱۰٪ را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زده است.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + 21\gamma [1 - \exp(-106 \times PI^{-1.585})]} \quad (14)$$

$$D = -6.3 + 19.2 \times 0.998^{PI} [1.54 - \exp(-8.73 \times \gamma \times 0.99^{PI})] \quad (15)$$

شاخص‌های آماری مربوط به روابط موجود و همچنین مدل‌های GMDH ارائه شده در این مطالعه برای نسبت مدول برشی و نسبت میرایی در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان از دقت بالای مدل‌های ارائه شده در مقایسه با روابط موجود دارد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی گردآوری شده در این مطالعه و نتایج حاصل از روابط آکر و انسال (۲۰۰۷) نشان داده که این روابط مقادیر پارامترهای دینامیک در سطوح کرنش بالا را با دقت بسیار کم برآورد می‌نماید.

جدول ۳. مقایسه شاخص‌های آماری مدل‌های ارائه شده با روابط موجود

عملکرد مدل					نسبت مدول برشی					رابطه/مدل
نسبت میرایی					نسبت مدول برشی					
R	MAPE	RMSE	Bias	SI	R	MAPE	RMSE	Bias	SI	
۰/۷۹۱	۵/۱۸۷	۱/۹۷۷	۱/۷۷۱	۲/۸۰۳	۰/۸۹۸	۰/۲۲۰	۰/۰۹۴	۰/۰۶۲	۰/۱۹۴	Ishibashi and Zhang (1993)
۰/۷۳۹	۵/۶۱۷	۲/۵۸۱	۲/۰۰۳	۲/۶۹۶	۰/۸۱۷	۰/۲۸۴	۰/۱۰۸	۰/۰۷۹	۰/۲۴۸	Okur and Ansal (2007)
۰/۹۶۰	۴/۸۰۵	۱/۰۳۹	۰/۹۰۸	۱/۴۵۵	۰/۹۸۵	۰/۱۳۲	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۰۵۰	GMDH-based models

عمومیت این مدل‌ها، از نتایج آزمون‌های سانتیفریوژ استفاده شده است. همچنین، به منظور بررسی عملکرد مدل‌های ارائه شده در شرایط مختلف و مقایسه رفتار این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی تحلیل حساسیت انجام شده است.

نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که با افزایش فشار محدود کننده مؤثر و نشانه خمیری، نسبت مدول برشی و نسبت میرایی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش کرنش برشی، نسبت مدول برشی کاهش و نسبت میرایی افزایش می‌یابد. این روند تغییرات با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی در تطابق می‌باشد.

در نهایت، نتایج حاصل از مدل‌های GMDH برای پارامترهای دینامیکی خاک‌های چسبنده با نتایج حاصل از روابط سایر محققین مقایسه گردید. نتایج بیانگر دقت بالای مدل‌های مذکور در پیش‌بینی مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌های چسبنده می‌باشد.

#### ۷. سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری آقای دکتر محمد نجف‌زاده در ارائه مدل‌های GMDH تشکر و قدردانی می‌شود.

نتایج حاصل از مقایسه مقادیر حاصل از مدل‌های مبتنی بر روش GMDH با معادلات و منحنی‌های موجود نشان از دقت بالای مدل‌های ارائه شده در پیش‌بینی پارامترهای دینامیک خاک‌های چسبنده دارد.

#### ۶. نتیجه‌گیری

پارامترهای دینامیکی خاک‌ها نقشی اساسی در طراحی سازه‌های در معرض بارهای دینامیکی دارند. در این مطالعه، مجموعه نسبتاً وسیعی از پارامترهای دینامیکی (نسبت مدول برشی و نسبت میرایی) خاک‌های چسبنده حاصل از آزمون‌های ستون تشدید، برش ساده سیکلی، برشی پیچشی سیکلی و سه محوری سیکلی جمع‌آوری و تحلیل گردید.

به منظور ارائه مدلی جهت پیش‌بینی این پارامترها، روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس مطالعات وسیع آزمایشگاهی انجام شده در تحقیقات پیشین، مهمترین عوامل مؤثر بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های چسبنده شامل کرنش برشی، فشار محدود کننده مؤثر و نشانه خمیری می‌باشند. به منظور بررسی صحت عملکرد مدل‌های ارائه شده و همچنین



- Baziar, M. H. and Jafarian, Y. 2007. "Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: Capacity energy". *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 27: 1056-1072.
- Baziar, M. H., Jafarian, Y., Shahnazari, H., Movahed, V. and Tutunchian, M. A. 2011. "Prediction of strain energy-based liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An evolutionary approach". *Comp. Geosci.* 37: 1883-1893.
- Borden, R. H., Shao, L. and Gupta, A. 1994. "Construction Related Vibrations". Report No. FHWA/NC/94-007, Federal Highway Administration, Washington, D. C.
- Borden, R. H., Shao, L. and Gupta, A. 1996. "Dynamic properties of Piedmont residual soils". *J. Geotech. Eng.* 122: 813-821.
- Brennan, A. J., Thusyanthan, N. I. and Madabhushi, S. P. G. 2005. "Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131: 1488-1497.
- Caserta, A., Martino, S., Bozzano, F., Govoni, A. and Marra F. 2012. "Dynamic properties of low velocity alluvial deposits influencing seismically-induced shear strains: The Grottaperfetta valley test-site (Rome, Italy)". *Bull. Earthq. Eng.* 10: 1133-1162.
- Darendeli, M. B. 2001. "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves". PhD Thesis, University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Dobry, R. and Vucetic, M. 1987. "State of the art report: Dynamic properties and response of soft clay deposits". *Proc. Int. Symp. on Geotech. Eng. of Soft Soils*, 2: 51-87.
- Ellis, G. W., Yao, C., Zhao, R. and Penumado, D. 1995. "Stress-strain modeling of sands using artificial neural networks". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 121: 429-435.
- Fugro-McClelland, Inc. 1992. "Dynamic Laboratory Test Data". Mark Clark Expressway Stono River Crossing, Charleston, South Carolina.
- Ghorbani, A., Jafarian, Y. and Maghsoudi, M. S. 2012. "Estimating shear wave velocity of soil deposits using polynomial neural networks: Application to liquefaction". *Comp. Geosci.* 44: 86-94.
- Haddad, A. and Shafabakhsh, G. 2007. "Non-invasive continuous surface wave measurements for in situ damping ratio profiling of soils". *Int. J. Civil Eng.* 5(2): 93-103.
- Hardin, B. O. and Kalinski, M. E. 2005. "Estimating the shear modulus of gravelly soils". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131: 867-875.
- Hardin, B. O. and Drenvich, V. P. 1972a. "Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves". *J. Soil Mech. Found. Div.* 98: 667-692.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. 1972b. "Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects". *J. Soil Mech. Found. Div.* 98: 603-624.
- Ishibashi, I. and Zhang, X. 1993. "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay". *Soils Found.* 33: 182-191.
- Ivakhnenko, A. G. 1976. "The group method of data handling in prediction problems". *Soviet Auto. Control Automot.* 9(6): 21-30.
- Jafarian, Y., Haddad, A. and Javdanian, H. 2014. "Predictive model for normalized shear modulus of cohesive soils". *Acta Geodyn. Geomater.* 11(1): 89-100.
- Jafarian, Y., Kermani, E. and Baziar, M. H. 2010. "Empirical predictive model for the  $v_{max}/a_{max}$  ratio of strong ground motions using genetic programming". *Comp. Geosci.* 36: 1523-1531.
- Jafarian, Y., Vakili, R. and Sadeghi Abdollahi, A. 2013. "Prediction of cyclic resistance ratio for silty sands and its applications in the simplified liquefaction analysis". *Comp. Geotech.* 52: 54-62.
- Javdanian, H., Jafarian, Y. and Haddad, A. 2015. "Predicting damping ratio of fine-grained soils using soft computing methodology". *Arabian J. Geosci.* 8(6): 3959-3969.
- Kagawa, T. 1992. "Moduli and damping factors of soft marine clay". *J. Geotech. Eng.* 118: 1360-1375.
- Kalantary, F., Ardalan, H. and Nariman-zadeh, N. 2009. "An investigation on the  $S_u-N_{SPT}$  correlation using GMDH type neural networks and genetic algorithms". *Eng. Geol.* 104(1-2): 144-155.
- Khan, Z., El Naggar, M. H. and Cascante, G. 2011. "Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests". *J. Franklin Inst.* 348: 1363-1376.
- Kim, T. C. and Novak, M. 1981. "Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario". *Can. Geotech. J.* 18: 371-389.
- Kokusho, T., Yoshida, Y. and Esashi, Y. 1982. "Dynamic properties of soft clay for wide strain range". *Soils Found.* 22: 1-18.
- Lanzo, G., Vucetic, M. and Doroudian, M. 1997. "Reduction of shear modulus at small strains in simple shear". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 123: 1035-1042.
- Lee, R. C. 1996. "Investigations of Nonlinear Dynamic Soil Properties at the Savannah River Site". WSRC-TR-96-0062, Westinghouse Savannah River Company, Aiken, S. C.

- Najafzadeh, M. and Azamathulla, H. M. 2013a. "Group method of data handling to predict scour depth around bridge piers". *Neural Comp. Appl.* 23: 2107-2112.
- Najafzadeh, M. and Azamathulla, H. M. 2013b. "Neuro-fuzzy GMDH to predict the scour pile groups due to waves". *J. Comp. Civil Eng.* 29(5): 04014068.
- Najafzadeh, M. and Barani, G. A. 2011. "Comparison of group method of data handling based on genetic programming and back propagation systems to predict scour depth around bridge piers". *Sci. Iranica* 18(6): 1207-1213.
- Najafzadeh, M., Barani, G. A. and Azamathulla, H. M. 2013. "GMDH to predict scour depth around a pier in cohesive soils". *Appl. Ocean Res.* 40: 35-41.
- Najafzadeh, M., Barani, G. and Hessami Kermani, M. 2014. "Estimation of pipeline scour due to waves by GMDH". *J. Pipeline Syst. Eng. Prac.* 5(3): 06014002.
- Najafzadeh, M. and Lim, S. Y. 2015. "Application of improved neuro-fuzzy GMDH to predict scour depth at sluice gates". *Earth Sci. Inform.* 8: 187-196.
- Nariman-zadeh, N., Darvizeh, A. and Ahmad-zadeh, G. R. 2003. "Hybrid genetic design of GMDH type neural networks using singular value decomposition for modelling and prediction of the explosive cutting process". *J. Eng. Manufacture* 217: 779-790.
- Okur, D. V. and Ansal, A. 2007. "Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading". *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 27: 843-854.
- Ornek, M. 2014. "Estimation of ultimate loads of eccentric-inclined loaded strip footings rested on sandy soils". *Neural Comp. Appl.* 25: 39-54.
- Rezania, M. and Javadi, A. A. 2007. "A new genetic programming model for predicting settlements of shallow foundations". *Can. Geotech. J.* 44: 1462-1473.
- Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D. 1970. "Vibrations of Soils and Foundations". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Saxena, S. K. and Reddy K. R. 1989. "Dynamic moduli and damping ratios for monterey No.0 sand by resonant column tests". *Soils Found.* 29: 37-51.
- Senetakis, K., Anastasiadis, A. and Pitilakis, K. 2012. "The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands". *Geotech. Test. J.* 35: 1-17.
- Shahnazari, H., Tutunchian, M. A., Rezania, R. and Valizadeh, F. 2013. "Evolutionary-based approaches for determining the deviatoric stress of calcareous sands". *Comp. Geosci.* 50: 84-94.
- Stokoe II, K. H., Darendeli, M. B., Andrus, R. D. and Brown, L. T. 1999. "Dynamic Soil Properties: Laboratory, Field and Correlation Studies". *Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, 3: 811-845.
- Stokoe II, K. H. and Darendeli, M. B. 1998. "Laboratory Evaluation of the Dynamic Properties of Intact Soil Specimens: Garner Valley California". *Geotechnical Engineering Report GR98-3*, Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin.
- Stokoe II, K. H., Hwang, S. K., Darendeli, M. B. and Lee, N. J. 1995. "Correlation Study of Nonlinear Dynamic Soils Properties". *Final Report to Westinghouse Savannah River Company*, Aiken, S.C.
- S&ME, Inc. 1998. "Second Report of Seismic Analysis-Daniel Island Terminal, Charleston, South Carolina". *Project Rep. No. 1131-97-741*, Mount Pleasant, S.C.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1978. "Dynamic Test Report Sheets on Soil Samples for Richard B. Russell Dam". *Rep. No. EN-FS-77-84*, South Atlantic Division Laboratory, Marietta, Ga.
- Vucetic, M. and Dobry, R. 1991. "Effect of soil plasticity on cyclic response". *J. Geotech. Eng.* 117: 89-107.
- Yasuda, N. and Matsumoto, N. 1993. "Dynamic deformation characteristics of sand and rockfill materials". *Can. Geotech. J.* 30: 747-757.
- Yilmaz, I., Marschalko, M., Bednarik, M., Kaynar, O. and Fojtova L. 2012. "Neural computing models for prediction of permeability coefficient of coarse-grained soils". *Neural Comp. Appl.* 21: 957-968.
- Zhang, J., Andrus, R. D. and Juang, C. H. 2005. "Normalized shear modulus and material damping ratio relationships". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131: 453-464.