

چکیده

به کارگیری ستون‌های سنگی، از جمله روش‌های مناسب و شناخته شده در بهسازی خاک‌های سست محسوب می‌شود. این مقاله، به بررسی تأثیر احداث ستون‌های سنگی بر فرکانس اصلی ساختگاهی با تحلیل عددی می‌پردازد. برای بررسی مسئله، نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS با تحلیل مودال به کار رفته است. نتایج نشان می‌دهد احداث ستون‌های سنگی، می‌تواند فرکانس اصلی ساختگاه را تا چهار برابر افزایش دهد. ضریب بزرگنمایی فرکانس اصلی ساختگاه (α) بر اساس پارامترهای بدون بعد، شامل نسبت‌های سرعت موج برشی ستون سنگی به خاک، ارتفاع به قطر و مساحت به سطح بارگیر ستون سنگی، بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت ارتفاع به قطر ستون و لاغر شدن ستون، α کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی آرایش‌های مختلف ستون‌های سنگی بیان می‌دارد که α در آرایش مثلثی بیشتر از مقدار متناظر در آرایش مربعی می‌باشد. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، ستون‌های سنگی شناور برخلاف ستون‌های سنگی اتکایی تأثیر چندانی بر فرکانس اصلی ساختگاه نخواهد داشت. در ادامه با کمک الگوریتم ژنتیک بر مبنای رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR)، α به شکل رابطه‌ای سه متغیره بر پایه‌ی پارامترهای بدون بعد و با همبستگی مناسبی بیان شده است. در پایان، یک روش معادل دوطرفه‌ای با فرض کرنش مسطح برای ساده‌سازی مسئله‌ی سه‌بعدی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: ستون‌های سنگی، فرکانس اصلی، روش اجزای محدود، ABAQUS، الگوریتم ژنتیک EPR، بهسازی خاک

یادداشت تحقیقی

بررسی تأثیر احداث ستون‌های سنگی بر فرکانس اصلی ساختگاهی به روش اجزای محدود

مسعود مطلبیان

دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه عمران، تهران

مسعود حاجی علیوی بناب (نویسنده مسئول)

استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، hajialilue@tabrizu.ac.ir

محمد داوودی

استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۱- مقدمه

استفاده از ستون سنگی به منظور مسلح‌سازی و بهسازی خاک، در مقایسه با سایر روش‌ها از جمله تزریق، تراکم دینامیکی، مسلح‌سازی با ژئوتکستیل و غیره ساده‌تر و درعین حال اقتصادی‌تر بوده و در برخی موارد کارایی بهتری را ارائه می‌نماید [۴].

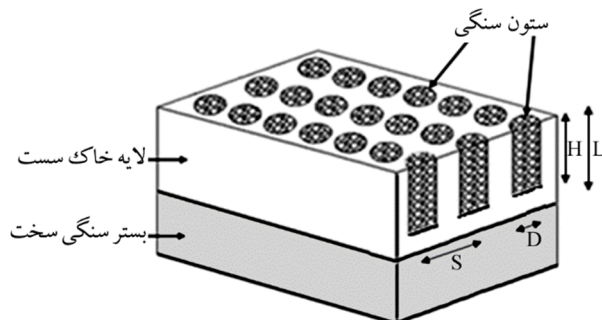
بر اساس مورد استفاده، ستون‌های سنگی عمدتاً دارای آرایش مربعی^۲ یا آرایش مثلثی^۳ می‌باشد (شکل ۱) [۵]. در آرایش مثلثی تعداد ستون‌های سنگی در یک مساحت ثابت، بیشتر از حالت مربعی می‌باشد. در آرایش‌های مثلثی و مربعی، سطح بارگیر هر ستون (A)، به ترتیب شش ضلعی منتظم و مربع خواهد بود [۶].

احداث ستون‌های سنگی^۱ به‌عنوان یک روش مؤثر، اقتصادی و همچنین سازگار با محیط‌زیست از جمله روش‌های متداول برای بهسازی زمین‌های دارای خاک‌های سست چسبیده و غیر چسبیده به‌شمار می‌آید [۱]. این روش، مبتنی بر تعویض ۱۵ الی ۳۵ درصد حجم خاک نامرغوب به وسیله‌ی حفر چاه‌هایی با قطر، عمق و فاصله‌ی معین از یکدیگر و پر کردن چاه‌ها به وسیله‌ی ماسه، شن یا سنگریزه و متراکم نمودن به‌صورت ستون‌های عمودی می‌باشد [۲].

تکنیک ستون‌های سنگی به‌منظور افزایش ظرفیت باربری، پایداری شیب شیروانی، کاهش نشست، افزایش سرعت زهکشی و کاهش پتانسیل روانگرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

$$\alpha = \frac{f_s}{f_1} \quad (3)$$

در حالت کلی $\alpha \geq 1.0$ بوده و هر قدر تأثیر بهسازی بیشتر باشد، α مقادیر بیشتری را به خود اختصاص خواهد داد.

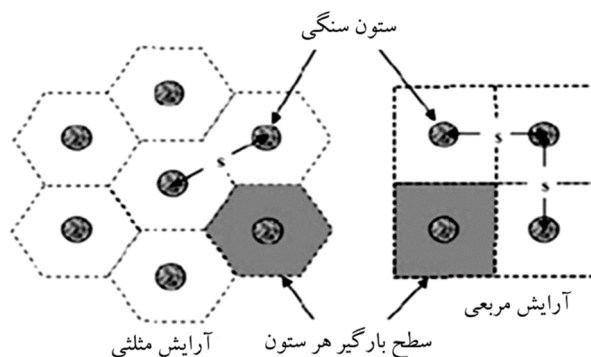


شکل (۲): لایه ی یکنواخت خاکی بهسازی شده با ستون سنگی

مقاله ی حاضر به بررسی عددی عوامل مؤثر بر پارامتر α در ساختگاه های بهسازی شده با ستون های سنگی به روش اجزای محدود پرداخته و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ارتفاع لایه خاکی (L)، سرعت موج برشی خاک (V_{soil})، سرعت موج برشی ستون سنگی (V_{stone})، فاصله (S)، قطر (D)، ارتفاع (H)، مساحت (A_s)، سطح بارگیر (A) و آرایش ستون های سنگی (مربعی یا مثلثی) را بر نتایج بررسی می نماید.

برای تعیین مقادیر فرکانس اصلی ساختگاه بهسازی شده با ستون سنگی، از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS6.12 استفاده گردیده است. مدل سازی های صورت گرفته در اکثر موارد در فضای سه بعدی و در برخی موارد (قسمت ۹ مقاله) دو بعدی می باشد.

تحلیل های صورت گرفته در نرم افزار، تحلیل مودال با استفاده از محاسبه ی مقادیر ویژه^۵ می باشد. تحلیل مودال از جمله روش های تحلیل لرزه ای برای بررسی رفتار لرزه ای سیستم ها به شمار می آید. این روش در شرایطی که پاسخ سیستم در محدوده ی خطی باشد، قابل استفاده می باشد. نخستین مرحله در این روش، تعیین فرکانس های طبیعی زاویه ای $\{\omega\}$ و شکل مدهای ارتعاشی $\{\phi\}$ با حل مسئله ی مقادیر ویژه بر اساس رابطه (۴) می باشد [۱۲].



شکل (۱): ستون های سنگی با آرایش مربعی و مثلثی [۵]

از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای، ستون های سنگی عمدتاً برای کاهش پتانسیل روانگرایی و اثرات گسترش جانبی در خاک های دانه ای استفاده می گردد [۷]. باین وجود، عملکرد لرزه ای و تأثیرات این المان های مسلح کننده بر پاسخ لرزه ای ساختگاه، به صورت بسیار محدودی مورد بررسی قرار گرفته و نیازمند مطالعه و بررسی های بیشتر است [۸].

تعیین فرکانس اصلی ساختگاه^۴ از موارد مهم مطرح در طراحی لرزه ای سازه ها به شمار می آید [۹]. تقسیم بندی نوع زمین در اکثر آیین نامه های طراحی لرزه ای سازه بر اساس پریرود اصلی (معکوس فرکانس اصلی) ساختگاه صورت می پذیرد [۱۰].

برای لایه ی خاک یکنواخت به ارتفاع H که دارای سرعت موج برشی ثابت V_s بوده و بر روی بستر سنگی صلب قرار دارد، فرکانس های طبیعی ساختگاه مطابق با رابطه ی (۱) قابل محاسبه خواهد بود [۱۱].

$$f_n = \frac{V_s}{4H} (2n-1) \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

که پارامتر n معرف شماره مود انتخابی می باشد. فرکانس اصلی (فرکانس طبیعی در مود اول) برابر خواهد بود با:

$$f_1 = \frac{V_s}{4H} \quad (2)$$

اگر همین خاک مطابق شکل (۲) با ستون های سنگی بهسازی شده و فرکانس اصلی این ساختگاه بهسازی شده، برابر با f_s فرض شود، پارامتر α را می توان به عنوان ضریب بزرگنمایی فرکانس اصلی ساختگاه، مطابق با رابطه ی (۳) تعریف نمود:

ستون‌ها برابر با S و فاصله‌ی مرکز ستون گوشه تا مرز جانبی برابر با $S/5$ است. شکل (۳-ب) مود اول ارتعاشی (خروجی ABAQUS) را نشان می‌دهد.

در ادامه‌ی مقاله، ابتدا مسئله برای لایه‌ی یکنواخت خاکی (بدون وجود ستون سنگی) صحت‌سنجی شده و نتایج عددی و تحلیلی مقایسه می‌گردد.

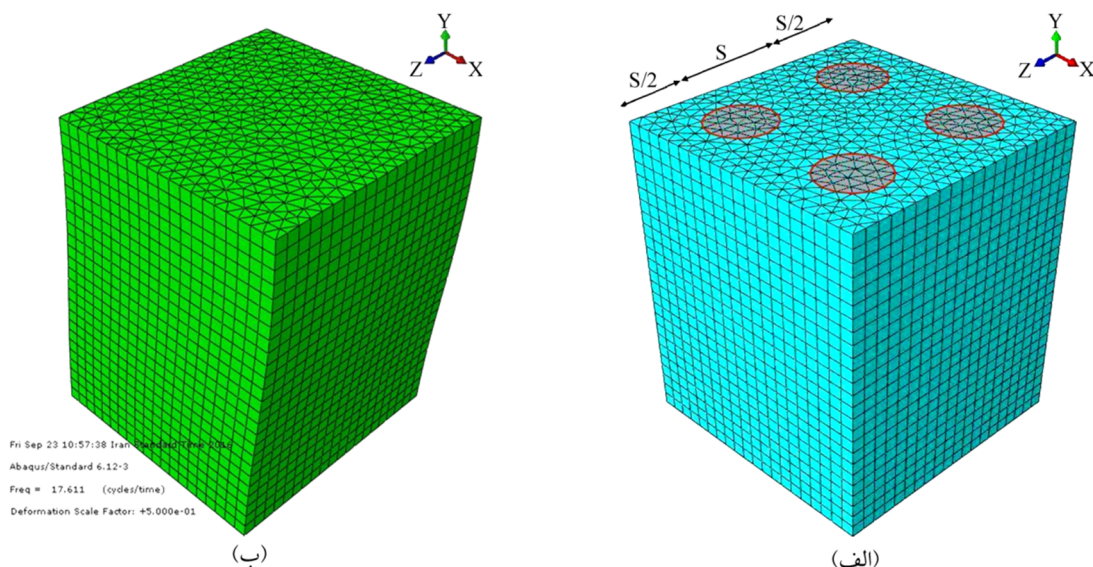
۲- صحت‌سنجی مسئله برای لایه‌ی یکنواخت خاکی (بدون وجود ستون سنگی)

برای بررسی بهتر روش اجزای محدود و تدقیق نتایج عددی با نتایج تحلیلی، ستونی از خاک به ارتفاع ۱۰ متر، با مشخصات خطی مصالح، مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده و مسئله به صورت عددی مدل شده است و شکل‌های مختلف مودی (تا مود سوم) و همچنین فرکانس‌های متناظر استخراج و تعیین شده است. برای مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار از المان‌های مکعبی Quad به ضلع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است (شکل ۴-الف).

$$[K]\{\phi\} = \omega^2[M]\{\phi\} \quad (۴)$$

در این رابطه $[M]$ و $[K]$ ، ماتریس جرم و سختی برای سیستم المان محدود هستند. دومین مرحله‌ی تعیین پاسخ دینامیکی مودال گذاری سیستم است. عملکرد نرم‌افزار ABAQUS حل معادله‌ی فوق، تعیین فرکانس‌های طبیعی، اشکال متناظر مودی و درصد مشارکت هر مود در پاسخ سیستم می‌باشد. با توجه به اینکه در مقاله‌ی حاضر هدف صرفاً تعیین فرکانس‌های طبیعی سیستم به خصوص فرکانس اول می‌باشد، نتایج به دست آمده از مرحله‌ی نخست تحلیل مد نظر بوده و تعیین پاسخ دینامیکی مودال با برهم‌نهی مودهای به دست آمده از تحلیل مودال ملاحظه نمی‌گردد.

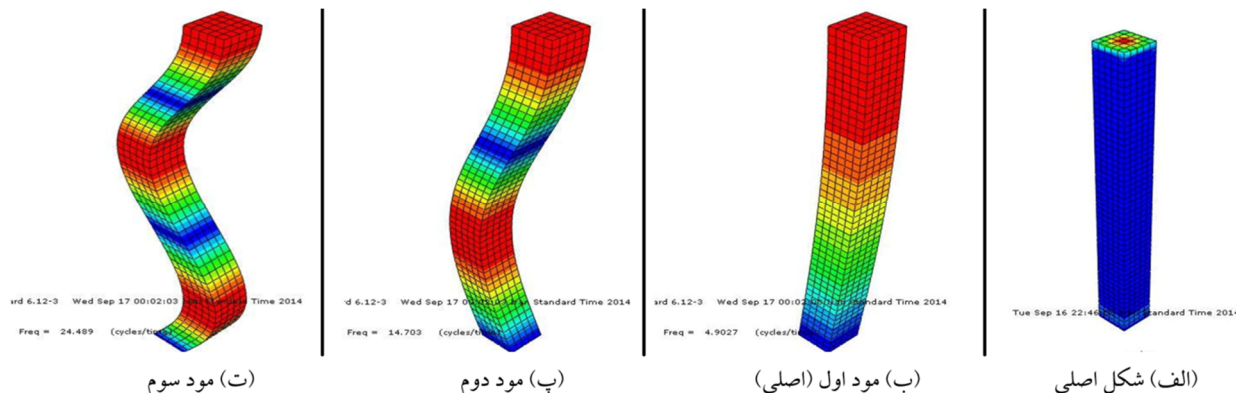
با توجه به تحلیل مودال مسئله، رفتار خاک و ستون سنگی به صورت خطی فرض شده و همچنین سرعت موج برشی و جرم مخصوص خاک و ستون سنگی در عمق ثابت در نظر گرفته شده است. شکل (۳-الف) مدل مش‌بندی شده‌ای از شبکه‌ی 2×2 ستون‌های سنگی را نشان می‌دهد. فاصله‌ی مرکز تا مرکز



شکل (۳): (الف) شبکه 2×2 از ستون‌های سنگی؛ مدل شده در نرم‌افزار ABAQUS (ب) مود متناظر ارتعاشی اول (در امتداد محور x) به دست آمده از قسمت خروجی نرم‌افزار

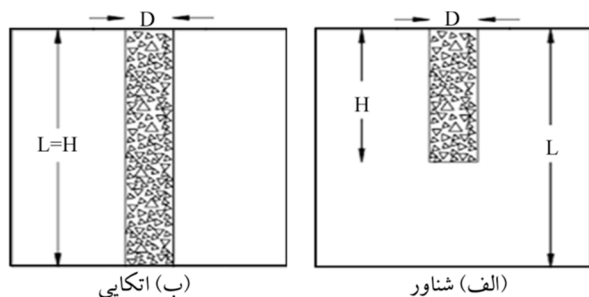
جدول (۱): پارامترهای اختصاص یافته به مصالح

نسبت پواسون	مدول الاستیک (مگاپاسکال)	جرم مخصوص مصالح (کیلوگرم/مترمکعب)	سرعت موج برشی (متر/ثانیه)	مدل رفتاری مصالح
۰/۳	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۹۶/۱۲	الاستیک خطی



شکل (۴): اشکال مختلف مودی برای ستون یکنواختی از خاک

اجرا گردد [۱۳]. برای مقایسه‌ی عملکرد ستون‌های سنگی شناور و اتکایی، مدل‌هایی با آرایش مربعی ($D=6m, L=6m, S=4m$) در نظر گرفته شده و پارامتر α برای مقادیر مختلف H/L برآورد می‌گردد.



شکل (۵): ستون‌های سنگی [۱۳]

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در ستون‌های سنگی شناور با $H < L$ با توجه به عدم اتکای قسمت تحتانی ستون، تأثیر ستون سنگی بر توده‌ی خاک نسبت به حالتی که ستون سنگی به صورت اتکایی ($L=H$) است، به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر است (شکل ۶). با توجه به تأثیر گذاری ناچیز ستون‌های سنگی شناور بر فرکانس اصلی ساختمان به سازه‌ی شناور شده از نرم‌افزار، استخراج و ارائه گردیده است.

در شکل‌های (۴-ب)، (۴-پ) و (۴-ت)، شکل‌های مودی و فرکانس‌های متناظر، به ترتیب برای مودهای اول تا سوم از نرم‌افزار به دست آمده است. همچنان که اشاره گردید، فرکانس‌های طبیعی برای مودهای مختلف با توجه به رابطه (۱) قابل برآورد می‌باشد. مقادیر تحلیلی به دست آمده از این رابطه، با مقادیر عددی به دست آمده از روش عددی در جدول (۲) مقایسه گردیده است. نتایج این جدول بیانگر تقارب بسیار مناسب نتایج عددی با نتایج تحلیلی است.

در ادامه مسئله با حضور ستون‌های سنگی مد نظر بوده و پارامترهای تأثیرگذار بر α بررسی شده و α بر اساس تعدادی پارامتر بدون بعد بیان می‌گردد. نتایج به دست آمده در ادامه‌ی بحث، صرفاً برای مود اول ارتعاشی مد نظر بوده و نتایج مربوط به فرکانس اصلی ساختمان به سازه‌ی شناور شده از نرم‌افزار، استخراج و ارائه گردیده است.

۳- تأثیر شناور یا اتکایی بودن ستون‌های سنگی بر α

با توجه به ارتفاع ستون سنگی و بر اساس عمق بستر سنگی، ستون می‌تواند به صورت اتکایی^۶ با انتهای واقع در بستر سنگی یا به صورت شناور^۷ با انتهای آزاد ستون در خاک، مطابق با شکل (۵)

جدول (۲): مقایسه‌ی فرکانس‌های طبیعی برای مودهای مختلف برای نتایج عددی و تحلیلی

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز) (تحلیلی - رابطه ۱)	فرکانس طبیعی (هرتز) (عددی - ABAQUS)	اختلاف (\pm درصد)
اول (اصلی)	۴/۹۰۳	۴/۹۰۳	۰
دوم	۱۴/۷۰۹	۱۴/۷۰۳	۰/۰۴
سوم	۲۴/۵۱۵	۲۴/۴۸۹	۰/۱

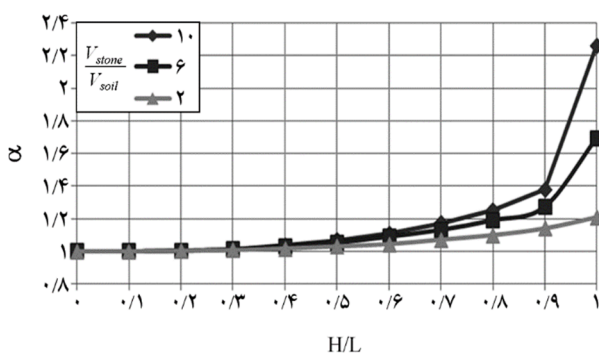
خاک بوده و لذا انتظار می‌رود در خاک بهسازی شده f_s علاوه بر خاک از سرعت موج برشی ستون‌های سنگی تأثیر بگیرد. لذا مقادیر مختلفی از سرعت موج برشی برای خاک و ستون سنگی آن چنان انتخاب می‌شود تا نسبت سرعت موج برشی ستون سنگی به خاک، مقداری ثابت باشد (جدول ۳). سایر پارامترها در هر پنج حالت یکسان فرض می‌شود ($S=1.5m, D=1m, H=4m$) بوده و آرایش مربعی در نظر گرفته می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد در هر پنج حالت، اگرچه فرکانس اصلی ساختمانی متفاوت است، اما α یکسان می‌باشد. با در نظر گرفتن این نکته، در این مقاله تأثیر سرعت موج برشی خاک و ستون سنگی بر α ، بر اساس V_{stone}/V_{soil} ملاحظه می‌گردد.

۵- تأثیر نسبت ارتفاع به قطر ستون (H/D) بر α

برای بررسی نتایج، مقادیر مختلفی از ارتفاع (H) و قطر (D) ستون سنگی انتخاب می‌شود (جدول ۴). مقادیر H و D آن چنان انتخاب گردیده که H/D برابر با مقدار ثابت (مقدار ۴) باشد. سایر پارامترها در هر پنج حالت یکسان فرض می‌شود ($V_{stone}/V_{soil}=8$)، $S/D=1/5$ و آرایش مربعی). نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد

ستون‌های سنگی اتکایی، تمام بررسی‌های صورت گرفته در ادامه بر روی ستون‌های سنگی اتکایی صورت می‌پذیرد. همچنین در مدل‌سازی ستون‌های سنگی اتکایی، ستون کاملاً داخل لایه‌ی تحتانی قرار داده شده و فرض می‌گردد انتهای اتکایی ستون، هیچ‌گونه حرکت افقی، قائم یا دورانی را ندارد.



شکل (۶): مقایسه‌ی α در ستون‌های سنگی شناور ($H/L < 1.0$) و اتکایی ($H/L = 1.0$)

۴- تأثیر سرعت موج برشی خاک و ستون سنگی (V_{stone} و V_{soil}) بر α

در خاک بدون بهسازی، f_1 متأثر از سرعت موج برشی

جدول (۳): تأثیر نسبت V_{stone}/V_{soil} بر پارامتر α

$\alpha = \frac{f_s}{f_1}$	$f_1 = \frac{V_{soil}}{4H}$	f_s (ABAQUS)	$\frac{V_{stone}}{V_{soil}}$	V_{stone} (متر / ثانیه)	V_{soil} (متر / ثانیه)	حالات
۲/۱۵	۲/۵۰	۵/۳۸	۸	۳۲۰	۴۰	حالت ۱
۲/۱۵	۳/۷۵	۸/۰۶	۸	۴۸۰	۶۰	حالت ۲
۲/۱۵	۵/۰۰	۱۰/۷۵	۸	۶۴۰	۸۰	حالت ۳
۲/۱۵	۶/۲۵	۱۳/۴۴	۸	۸۰۰	۱۰۰	حالت ۴
۲/۱۵	۷/۵۰	۱۶/۱۳	۸	۹۶۰	۱۲۰	حالت ۵

جدول (۴): تأثیر نسبت H/D بر پارامتر α

$\alpha = \frac{f_s}{f_1}$	$f_1 = \frac{V_{soil}}{4H}$	f_s (ABAQUS)	H/D	H (متر)	D (متر)	حالات
۲/۱۴	۷/۵۰	۱۶/۰۵	۴	۲/۰۰	۰/۵۰	حالت ۱
۲/۱۵	۵/۰۰	۱۰/۷۵	۴	۳/۰۰	۰/۷۵	حالت ۲
۲/۱۵	۳/۷۵	۸/۰۷	۴	۴/۰۰	۱/۰۰	حالت ۳
۲/۱۵	۳/۰۰	۶/۴۶	۴	۵/۰۰	۱/۲۵	حالت ۴
۲/۱۶	۲/۵۰	۵/۳۹	۴	۶/۰۰	۱/۵۰	حالت ۵

پارامترهای مربوط به ستون سنگی و خاک $(H, S, V_{soil}, V_{stone})$ و D و همچنین پارامترهای بدون بعد $(S/D, V_{stone}/V_{soil})$ بر اساس جدول (۶) انتخاب شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش نسبت S/D (کاهش اثر بهسازی) α کاهش یافته و در $S/D = 4$ ، فرکانس اصلی ساختمان بهسازی شده حداکثر ۲۵ درصد افزایش می‌یابد ($\alpha = 1.25$). همچنین با افزایش نسبت H/D (لاغر شدن ستون سنگی) مقدار α کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی نتایج مربوط به آرایش‌های مربعی و مثلثی، بیان می‌دارد که پارامتر α در آرایش مثلثی (برای S/D های یکسان) تقریباً ۱۰ درصد بیشتر از مقادیر مشابه در آرایش مربعی می‌باشد. این موضوع به این دلیل است که در آرایش مثلثی، مساحت بارگیر هر ستون بیشتر از مقدار مشابه در آرایش مربعی می‌باشد.

۸- ارائه‌ی رابطه‌ی ریاضی برای تعیین α بر اساس پارامترهای بدون بعد

مطابق با شکل (۷)، پارامتر α بر اساس پارامترهای بدون بعد و برای دو آرایشی مربعی و مثلثی ارائه گردید. با توجه به تفاوت نتایج این دو آرایش، به جای پارامتر S/D ، مقدار A_S/A به صورت نسبت بارگیر ستون (مساحت تقسیم بر سطح بارگیر هر ستون) تعریف می‌گردد. برای آرایش‌های مربعی و مثلثی، به ترتیب با توجه به رابطه (۵) و (۶) و بر اساس نسبت S/D قابل محاسبه می‌باشد.

$$\frac{A_S}{A} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{S}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{A_S}{A} = \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \left(\frac{D}{S}\right)^2 \quad (6)$$

جدول (۵): تأثیر تعداد ستون‌های سنگی بر پارامتر α

۱	۲	۴	۳	۳	۳	۵	۵	ستون در جهت x
۱	۲	۴	۱	۳	۵	۳	۵	ستون در جهت z
۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۴	α

جدول (۶): دامنه‌ی پارامترهای مربوط به ستون سنگی و خاک

$\frac{V_{stone}}{V_{soil}}$	H/D	S/D		D (متر)	H (متر)	V_{soil} (متر / ثانیه)	V_{stone} (متر / ثانیه)	پارامتر
		دو بعدی	سه بعدی					
۱۰-۱	۱۰-۲	۴-۱/۵	۴-۲	۱/۵-۰/۶	۱۰-۲	۱۰۰-۴۰	۴۰۰-۱۰۰	محدوده تغییر

هر چند برای حالت‌های مختلف، مقادیر فرکانس اصلی ساختگاه متفاوت است، اما در هر پنج حالت، مقادیر α تقریباً یکسان می‌باشد. با در نظر گرفتن این نکته تأثیر ارتفاع (H) و قطر (D) ستون سنگی بر مقدار α ، صرفاً بر اساس نسبت (H/D) قابل ملاحظه می‌باشد.

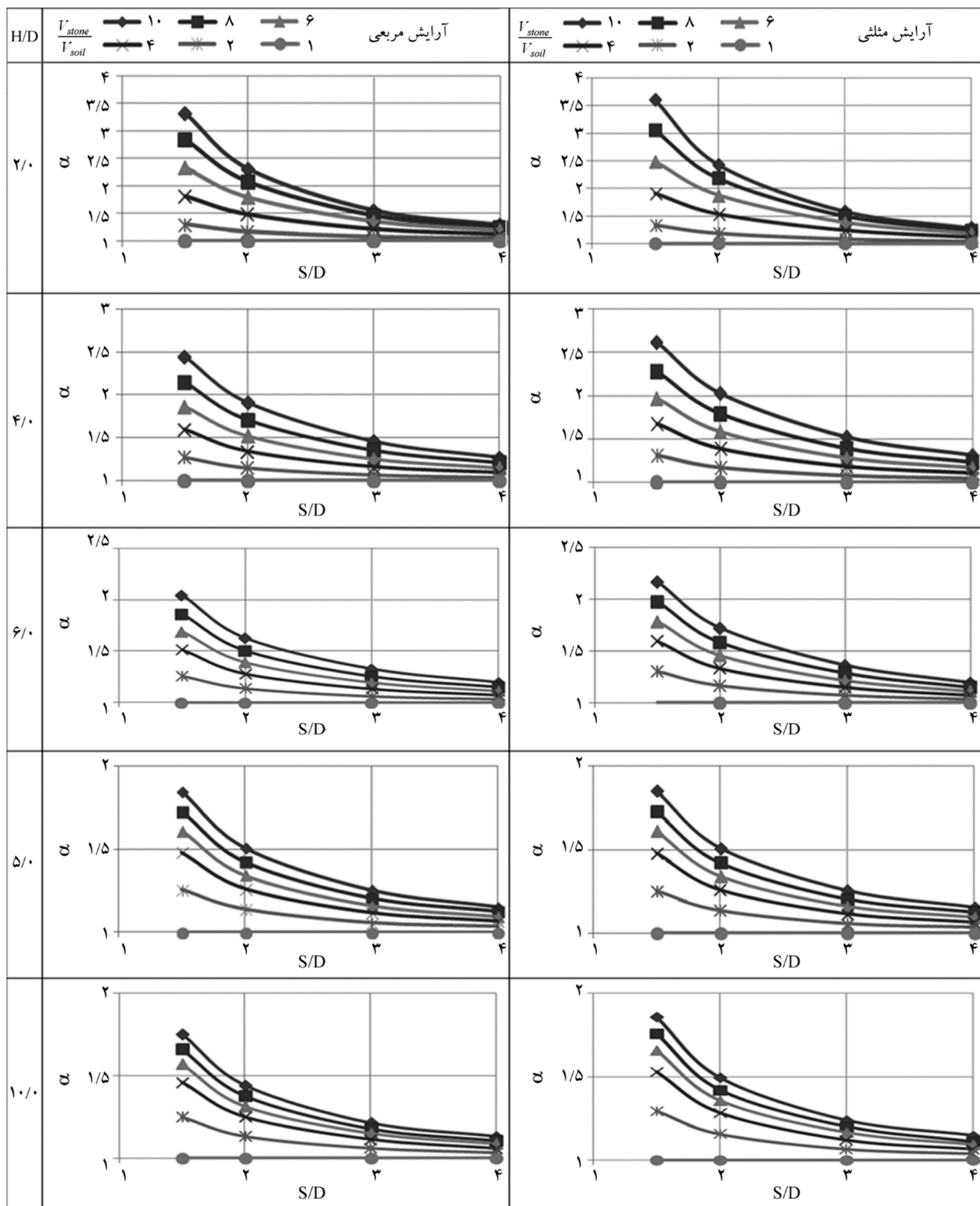
۶- بررسی تعداد ستون‌های سنگی بر α

برای بررسی تعداد ستون‌های سنگی در مسئله، پاره‌ای از چیدمان‌های مربعی ستون‌ها مطابق با جدول (۵) در نظر گرفته می‌شود. در تمامی چیدمان‌ها، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها برابر با S و فاصله‌ی مرکز ستون کناری تا مرز برابر با $S/2$ می‌باشد. سایر مشخصه‌ها در تمامی موارد ثابت فرض می‌شود ($S/D = 1.5, D = 1m$). با توجه به نتایج به دست آمده‌ی مستقل از تعداد ستون‌ها در ردیف یا ستون، فرکانس اصلی ساختگاهش تقریباً یکسان خواهد بود. لازم به ذکر است، نتایج به دست آمده در مورد فرکانس اصلی ساختگاه برای یک مسئله، زمانی قابل تعمیم‌دهی است که تمامی آن ساختگاه به وسیله‌ی مجموعه‌ای از ستون‌های سنگی بهسازی شده باشد. ضمناً تمامی مدل‌سازی‌های صورت گرفته در ادامه، بر اساس ستون سنگی واحد است.

۷- تعیین α بر اساس پارامترهای بدون بعد H/D و S/D

با توجه به نتایج فوق‌الذکر، می‌توان پارامتر α را بر اساس نسبت‌های بدون بعد $S/D, H/D$ و V_{stone}/V_{soil} ارائه نمود. مطابق شکل (۷)، α بر اساس پارامترهای یاد شده و برای آرایش‌های مربعی و مثلثی ارائه گردیده است.

دامنه‌ی پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی، شامل



شکل (۷): مقادیر α بر اساس H/D ، S/D و V_{stone}/V_{soil} برای آرایش مربعی و مثلثی

استفاده گردیده است. روش EPR بر اساس الگوریتم ژنتیک چندمنظوره^۹ برای جستجوی فرمول استوار بوده و یک تکنیک دو مرحله‌ای برای ساخت مدل‌های سمبولیک شامل تعیین

پارامتر α را می‌توان به صورت رابطه‌ی سه متغیره بر اساس مقادیر بدون بعد H/D ، A_s/A و V_{stone}/V_{soil} ارائه نمود. برای ارائه‌ی رابطه از روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR)^۹

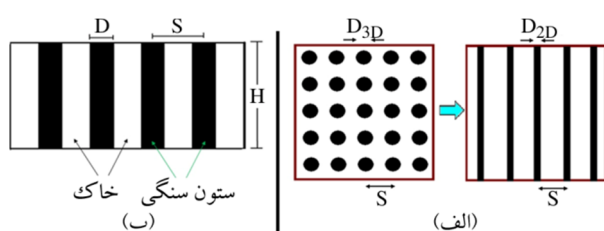
خطاها (RMSE)^{۱۱}، میانگین قدر مطلق خطاها (MAE)^{۱۲} و حداکثر قدر مطلق خطاها (MAXAE)^{۱۳} در جدول (۷) و برای داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی، ارائه گردیده است. نتایج به دست آمده بیانگر تطابق مناسب رابطه‌ی پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم ژنتیک EPR بر مبنای داده‌های عددی می‌باشد.

جدول (۷): ارزیابی عملکرد مدل‌های تخمین α

نوع داده‌ها	R	RMSE	MAE	MAXAE
آموزشی	۰/۹۸۵	۰/۴۴۵	۰/۳۰۴	۲/۰۶۵
صحت‌سنجی	۰/۹۸۴	۰/۳۶۷	۰/۲۵۳	۱/۳۰۶

۹- فرض دیوار حائل مجازی

در این قسمت، مسئله در حالت دو بعدی و با فرض کرنش مسطح^{۱۴} انجام می‌پذیرد. برای این کار ستون‌های سنگی که در یک ردیف قرار دارد، به صورت نوار معادل (شکل ۹-الف) فرض می‌شود. این نوارها در پروفیل خاک به صورت مجموعه‌ای از دیوارهای حائل قابل ملاحظه می‌باشد (شکل ۹-ب). مشابه با حالت سه‌بعدی، پارامتر α بر اساس مقادیر S/D و V_{stone}/V_{soil} قابل ارائه می‌باشد (شکل ۱۰). نحوه‌ی تعیین عرض، فاصله و ارتفاع معادل دو بعدی در قسمت ۱۰، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۹): (الف) نمای از بالای هندسه‌ی سه‌بعدی واقعی و دو بعدی معادل و (ب) پروفیل خاکی و ستون‌های سنگی در تحلیل دو بعدی معادل (کرنش مسطح)

۱۰- ارائه‌ی روش معادل برای تبدیل مسئله‌ی سه‌بعدی واقعی به دو بعدی معادل

در این قسمت، یک روش معادل ارائه می‌شود تا بتوان مسئله‌ی واقعی سه‌بعدی را به صورت مسئله‌ای دو بعدی (کرنش

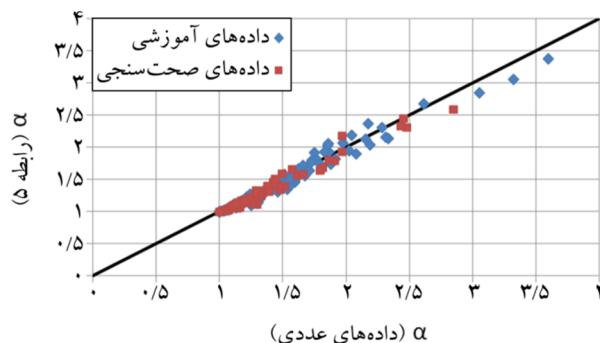
ساختر و تخمین پارامتر می‌باشد [۱۴].

این روش تکنیک جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته و در ابتدا برای مدل‌سازی پدیده‌های زیست‌محیطی توسط ارائه‌دهندگان آن به کار گرفته شد [۱۵]. پس از آن در حیطه‌ی مهندسی ژئوتکنیک، کارهای دیگری از جمله پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی [۱۶]، تعیین پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها [۱۷]، بررسی مدل‌های ساختاری خاک [۱۸] و مدل‌سازی مشخصه‌های نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک [۱۹]، توسط روش EPR انجام پذیرفته است. برای مدل‌سازی مسئله، از نرم‌افزاری تحت همین عنوان EPR استفاده شده است. این نرم‌افزار توسط جیوستولیزی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۴ بر پایه‌ی برنامه‌نویسی در محیط MATLAB ارائه شده است.

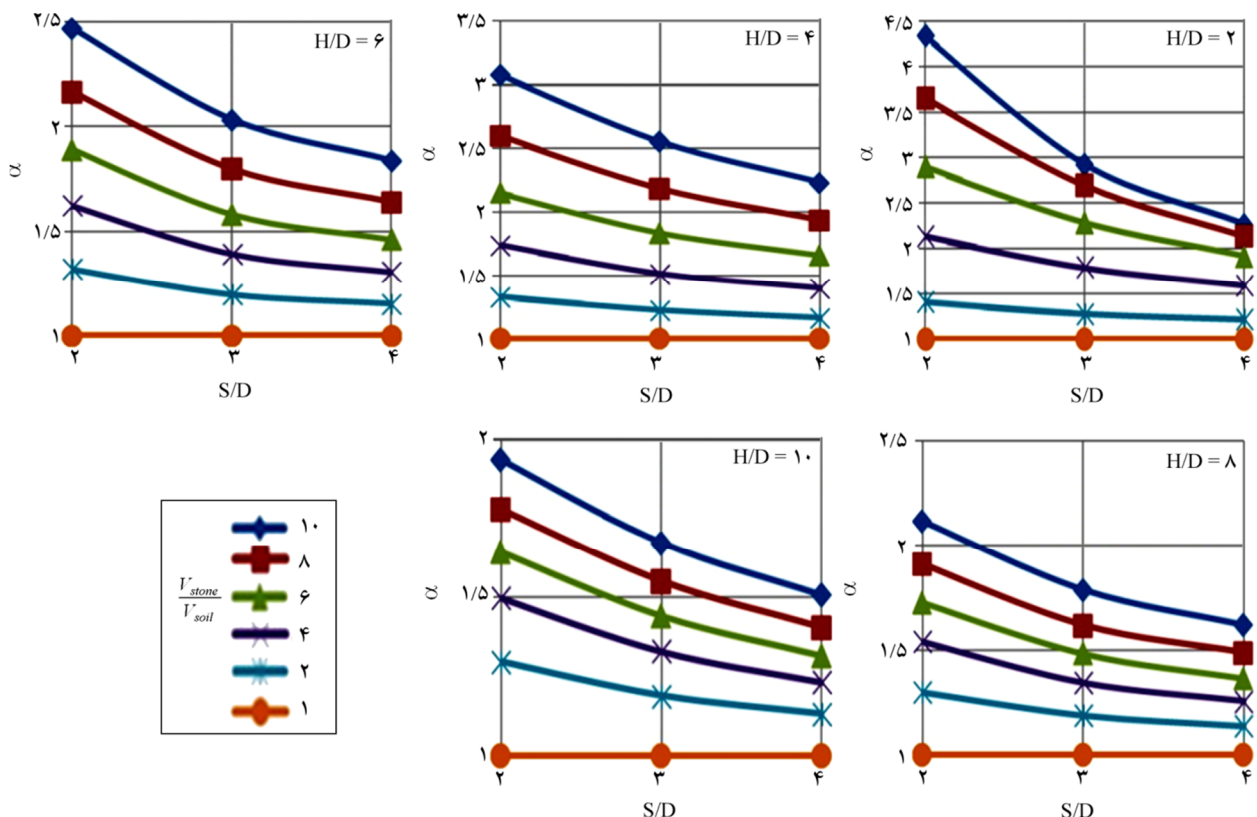
برای مدل‌سازی، از ۲۴۰ داده‌ی موجود به صورت تصادفی دو سوم مقادیر به عنوان داده‌های آموزشی و یک‌سوم باقیمانده به عنوان داده‌های صحت‌سنجی، انتخاب گردیده است. با توجه به نتایج مدل‌سازی، رابطه‌ی ارائه شده برای تعیین α به صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد مطابق رابطه (۷) به دست آمده است.

$$\alpha = \frac{f_s}{f_1} = 0.927 \frac{\left(\frac{A_s}{A}\right) \left(\frac{V_{stone}}{V_{soil}} - 1.0\right)}{\sqrt{\frac{H}{D}}} + 1.00 \quad (7)$$

همبستگی نتایج عددی (شکل ۷) و پیش‌بینی EPR (رابطه ۷)، برای داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی، در شکل (۸) ارائه گردیده است. برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل انتخابی، معیارهای مربوط به مجموع ضریب همبستگی (R)^{۱۵}، مجذور میانگین مربع



شکل (۸): همبستگی نتایج عددی و نتایج پیش‌بینی EPR برای پارامتر α



شکل (۱۰): مقادیر α بر اساس S/D و H/D برای حل دو بعدی مسئله

جدول (۸): مقایسه‌ی حالت‌های مختلف در مدل‌سازی معادل دو بعدی $S_{2D} = S_{3D}$

حالات	فاصله‌ی بین ستون‌ها (S)	ارتفاع ستون‌ها (H)	قطر ستون‌ها (D)	نسبت سطح بارگیر ستون (A_S/A)	ممان اینرسی هر ستون (I)
حالت اول	$S_{2D} = S_{3D}$	$H_{2D} = H_{3D}$	$S_{2D} = S_{3D}$	$(\frac{A_S}{A})_{2D} \neq (\frac{A_S}{A})_{3D}$	$I_{2D} \neq I_{3D}$
حالت دوم	$S_{2D} = S_{3D}$	$H_{2D} = H_{3D}$	$D_{2D} = \frac{\pi \times D_{3D}^2}{4S}$	$(\frac{A_S}{A})_{2D} = (\frac{A_S}{A})_{3D}$	$I_{2D} \neq I_{3D}$
حالت سوم	$S_{2D} = S_{3D}$	$H_{2D} = H_{3D}$	$D_{2D} = \sqrt[3]{\frac{\pi \times D_{3D}^4}{4S}}$	$(\frac{A_S}{A})_{2D} \neq (\frac{A_S}{A})_{3D}$	$I_{2D} = I_{3D}$

متفاوت خواهد بود. در حالت دوم قطر ستون‌های سنگی در مدل‌سازی دو بعدی چنان انتخاب می‌شود تا نسبت سطح بارگیر هر ستون برابر حالت سه‌بعدی گردد. در حالت سوم نیز قطر ستون‌های سنگی در مدل‌سازی دو بعدی آن‌چنان انتخاب می‌شود تا ممان اینرسی ستون‌های سنگی معادل دو بعدی، برابر با ممان اینرسی ستون‌های سنگی در حالت سه‌بعدی گردد. آرایش ستون‌ها از نوع مربعی بوده و سایر پارامترها یکسان فرض شده است ($V_{stone}/V_{soil} = 2$ و $S/D_{3D} = 2$).

نتایج به دست آمده بر اساس شکل (۱۱) بیانگر این موضوع

سطح (ساده‌سازی نمود). برای این کار مطابق با جدول (۸) سه حالت مختلف دو بعدی معادل در نظر گرفته می‌شود تا بتوان مناسب‌ترین جواب معادل دو بعدی را برآورد نمود. در هر سه حالت، فاصله و ارتفاع ستون‌های سنگی در حالات دو و سه بعدی برابر فرض شده و تنها متغیر، قطر ستون سنگی معادل دو بعدی است.

در حالت اول قطر ستون‌های سنگی در مدل‌سازی دو بعدی برابر با حالت سه‌بعدی واقعی فرض می‌شود. در نتیجه نسبت سطح بارگیر هر ستون (A_S/A) در مدل‌سازی دو و سه‌بعدی

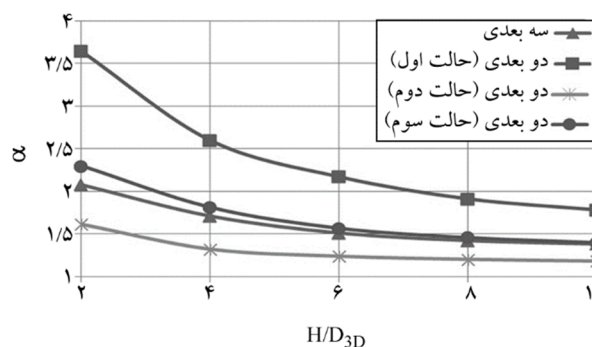
می‌باشد.

با توجه به پارامترهای بدون بعد در مسئله، با کمک الگوریتم ژنتیک چندمنظوره بر مبنای روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR)، پارامتر α در قالب یک رابطه ریاضی ارائه گردیده و تقارب و همبستگی مناسبی بین رابطه‌ی ارائه شده و داده‌های عددی هم برای داده‌های آموزشی و هم داده‌های صحت‌سنجی مشاهده شد. در انتهای مقاله نیز یک روش معادل دوبعدی برای ساده‌سازی مسئله واقعی سه‌بعدی با ملاحظه حالات مختلف ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد، اگر ممان اینرسی ستون‌های سنگی در حالت دو بعدی برابر با سه‌بعدی فرض گردد ($I_{2D} = I_{3D}$)، نتایج حالت دو بعدی معادل تقارب بهتری با نتایج سه‌بعدی خواهد داشت.

مراجع

1. Dheerendra, M.R., Nayak. S., and Shivashankar. R. (2013) A critical review of construction, analysis and behavior of stone columns. *Geotechnical and Geological Engineering*, **31**(1), 1-22.
2. McCabe, B.A., Nimmons, G.J., and Egan, D. (2009) A review of field performance of stone columns in soft soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, **162**(6), 323-334.
3. FHWA (1983) *Design and Construction of Stone Columns*. Vol. I. Report No. FHWA/RD83/026; Turner-Fairbank Highway Research Center, Virginia, U.S.A.
4. FHWA (1983) *Design and Construction of Stone Columns*. Vol II, Report No. FHWA/RD83/027; Turner-Fairbank Highway Research Center, Virginia, U.S.A.
5. Zahmatkesh, A. and Choobbasti, A.J. (2010) Investigation of bearing capacity and settlement of strip footing on clay reinforced with stone columns. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **4**(8), 3658-3668.
6. Pulko, B. and Majes, B. (2006) Analytical method for the analysis of stone-columns according to the Rowe Dilatancy theory. *Acta Geotechnica*

است که در حالت سوم و با برابر قرار دادن ممان اینرسی ستون‌ها، تقریب نسبتاً مناسبی بین نتایج روش معادل دو بعدی با نتایج واقعی سه‌بعدی برقرار می‌گردد. به عبارتی برای تبدیل مسئله‌ی واقعی سه‌بعدی به دو بعدی، در هندسه‌ی معادل دو بعدی با برابر قرار دادن ممان اینرسی ستون‌ها، مناسب‌ترین نتیجه قابل دستیابی است.



شکل (۱۱): مقادیر α برای H/D_{3D} در معادل‌سازی‌های دو بعدی مختلف

۱۰- نتیجه‌گیری

استفاده از ستون‌های سنگی، یکی از مناسب‌ترین تکنیک‌ها در اصلاح بسترهای خاکی نرم به‌شمار می‌آید. این تحقیق به تأثیر احداث ستون‌های سنگی بر ضریب بزرگنمایی فرکانس اصلی ساختگاه (α) به‌صورت عددی پرداخته و تأثیر پارامترهای مختلف بر α را به‌صورت پارامترهایی بدون بعد ارائه نموده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد احداث ستون‌های سنگی شناور تأثیر چندانی بر α نخواهد داشت؛ اما در ستون‌های سنگی اتکایی مقدار α می‌تواند به حدود چهار نیز برسد.

نتایج نشان می‌دهد که α می‌تواند به‌صورت پارامترهای بدون بعد V_{stone}/V_{soil} ، S/D و H/D و برای آرایش‌های مختلف مثلثی و مربعی بیان گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت S/D (کاهش اثر بهسازی) مقادیر α کاهش یافته و در برابر ۴، تأثیر ستون بر افزایش فرکانس اصلی ساختگاه حداکثر به ۲۵ درصد می‌رسد. همچنین با افزایش نسبت H/D (لاغر شدن ستون سنگی) مقادیر α کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج مربوط به آرایش‌های مربعی و مثلثی بیان می‌دارد که α در آرایش مثلثی حدوداً ۱۰ درصد بیشتر از مقادیر مشابه در آرایش مربعی

15. Giustolisi, O., Doglioni, A., Savic, D.A., and Webb, B.W. (2007) A multi-model approach to analysis of environmental phenomena. *Environmental Modelling & Software*, **22**(5), 674-682.
16. Rezanian, M. and Javadi, A.A. (2007) A new genetic programming model for predicting settlement of shallow foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, **44**(12), 1462-1473.
17. Javadi, A.A., Rezanian, M., and Nezhad, M.M. (2006) Evaluation of liquefaction induced lateral displacements using genetic programming. *Computers and Geotechnics*, **33**(4), 222-233.
18. Javadi, A.A. and Rezanian, M. (2009) applications of artificial intelligence and data mining techniques in soil modeling. *Geomechanics and Engineering*, **1**(1), 53-74.
19. Ahangar-Asr, A., Faramarzi, A., Mottaghifard, N., and Javadi, A.A. (2011) Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using evolutionary polynomial regression. *Computers and Geosciences*, **37**(11), 1860-1869.
20. Giustolisi, O., Savic, D.A., and Doglioni, A. (2004) Data reconstruction and forecasting by evolutionary polynomial regression. *Proceeding of the 6th World Conference on Hydroinformatics*, Singapore, Singapore, June.
7. Krishna, M. and Madhav, M.R. (2009) Engineering of ground for liquefaction mitigation using granular columnar inclusions: recent developments. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, **2**(3), 526-536.
8. Kim, J., Son, S., Mahmood, K., and Ryu, J. (2012) Site response and shear behavior of stone column-improved ground under seismic loading. *Proceeding of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
9. Sawafa, S. (2004) A simplified equation to approximate natural period of layered ground on the elastic bedrock for seismic design of structures. *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
10. Standard 2800 (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (4th edition)*. Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Building and Housing Research Center; Tehran, Iran (in Persian).
11. Ruiz, S. and Saragoni, G. (2009) Free vibration of soils during large earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(1), 1-16
12. Belyi, M., Belsky, V., Bajer, A., Kim, M., and Ianculescu, C. (2012) Advanced Linear Dynamics and Substructuring Capabilities in ABAQUS with Applications in Noise and Vibration Analysis. *Proceedings of the 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, September.
13. Malarvizhi, S.N., Ilamparuthi, K., and Bhuvaneshwari, S. (2006) Behavior of geogrid encased stone column and stone column stabilized soft clay bed. *Proceeding of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Hong Kong, China, August.
14. Giustolisi, O. and Savic, D. (2006) A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression. *Journal of Hydroinformatics*, **8**(3), 207-222.

اصطلاحات فنی

Stone Columns	۱- ستون‌های سنگی
Square Arrangement	۲- آرایش مربعی
Triangle Arrangement	۳- آرایش مثلثی
Fundamental Frequency of Site	۴- فرکانس اصلی ساختگاه
Eigenvalues	۵- مقادیر ویژه
End Bearing	۶- اتکایی
Floating	۷- شناور
Evolutionary Polynomial Regression (EPR)	۸- رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی
Multi Objective Genetic Algorithms	۹- الگوریتم ژنتیک چندمنظوره
Correlation Coefficient	۱۰- ضریب همبستگی

Root Mean Square Error (RMSE)	۱۱- مجذور میانگین مربع خطاها
Mean Absolute Error (MAE)	۱۲- میانگین قدر مطلق خطاها
Maximum Absolute Error (MAXAE)	۱۳- حداکثر قدر مطلق خطاها
Plane Strain	۱۴- کرنش مسطح

نشانه گذاری

V_{soil}	سرعت موج برشی خاک
V_{stone}	سرعت موج برشی ستون سنگی
S	فاصله مرکز به مرکز ستون سنگی
D	قطر ستون سنگی
H	ارتفاع ستون سنگی
L	ارتفاع لایه خاک
A	ضریب بزرگنمایی فرکانس اصلی ساختگاه
f_s	فرکانس اصلی ساختگاه بهسازی شده با ستون سنگی
f_0	فرکانس اصلی ساختگاه بدون بهسازی
A_s	مساحت هر ستون سنگی
A	سطح بارگیر هر ستون سنگی
I	ممان اینرسی هر ستون سنگی

Evaluation of Stone Columns Installation on Fundamental Frequency of Site with Finite Elements Method

Masoud Motalebian¹, Masoud Hajjalilue Bonab^{2*}, and Mohammad Davoodi³

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,
*Corresponding Author, email: hajjalilue@tabrizu.ac.ir

3. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Installation of stone columns is one of the proper and known methods for the improvement of weak soils. Stone column construction are employed to improve the bearing capacity, slope stability, and drainage rate, as well as reducing the settlement and liquefaction potential of the soft soil. In geotechnical earthquake engineering, stone columns are generally used to control the liquefaction potential of loose granular soils. However, the seismic performance of these inclusions has been partially studied and requires more researches. On the other hand, it is important to estimate a fundamental frequency of site for the seismic design of buildings and infrastructures and considers the basis of site classifications in seismic codes.

In this paper, the effects of stone column construction on the fundamental frequency of the sites are studied numerically. Finite element analysis was performed using ABAQUS. The analysis is a modal analysis through the calculation of eigenvalues. Analyses was carried out in 3D and 2D in some cases. According to the modal analysis of the problem, the behavior of the soil and stone column are considered linear elastic. Additionally, the shear wave velocity and density of the soil and stone columns are assumed constant in depth. The results demonstrated that stone columns construction can increase the fundamental frequency of the site to four times. The fundamental frequency amplification factor of the site (α) can be defined according to the dimensionless parameters including stone column to soil shear wave velocity, height to diameter, distance to diameter, and stone column arrangements.

The results indicated that α decreased with a rise in the ratio of the stone column height to diameter. Stone column arrangements are either square or triangle. When the triangle and square arrangements is used, zones of influences by each column as a regular hexagon and square, respectively. A comparison of the stone column arrangements demonstrated that, in triangle arrangement, α was greater than the corresponding value in square arrangement. The reason behind this is that in triangle arrangements, the zones of influence of each column is greater than the similar value in the square arrangement. Depending on the height of the column and depth of the bedrock, stone columns can be constructed as end bearing with their end on the bedrock or as floating with free end in the soil. The results indicate that, in floating stone columns, the effects of stone columns on α with respect to the condition where the stone column was end bearing, was considerably insignificant. In the following, tri-variant relation was determined for α . This relation was achieved using the Evolutionary Polynomial Regression (EPR). This method utilizes multi-objective genetic programming to derive regression equations by constructing symbolic models. Two-thirds of the data chosen to operate as training data and the other was used as testing data. The statistical parameters showed the good correlation and high accuracy of the derived relation for training and testing data. In the following, the problem is done in plane strain condition (2D). For this purpose, stone columns which were in a row, were assumed as equivalent strips and these strips were supposed as a set of considerable rigid

retaining walls in the soil profile. Similar to the 3D case, α can be presented by the values of dimensionless parameters. Finally, a 2D equivalent method for simplification of the 3D actual problem will be presented by examining the various cases. The results suggest that in the case the inertial moment of stone columns in 3D equal to 2D, relatively good approximation exists between the actual 3D and the equivalent 2D results.

Keywords: Stone Columns; Fundamental Frequency; FEM; EPR Genetic Algorithms; Soil Improvement