



تأثیر عدم قطعیت پارامترهای خاک بر روی پاسخ دینامیکی زمین با استفاده از تئوری میدان تصادفی

حسن نیک پور، امیر بذرافشان مقدم*

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

کلمات کلیدی:

عدم قطعیت
میدان تصادفی
شبیه‌سازی مونت کارلو
ضریب بزرگنمایی دینامیکی

خلاصه: امواج لرزه‌ای ناشی از وقوع زلزله در هنگام عبور از لایه‌های مختلف خاک دستخوش تغییرات زیادی می‌شوند. به همین جهت بایستی اثرات پارامترهای خاک را بر روی پاسخ دینامیکی زمین در نظر گرفت. پارامترهای موجود در یک لایه خاک ناهمگن تحت تأثیر مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌ها هستند که در این تحقیق تغییرپذیری ذاتی پارامتر مدول برشی خاک در نظر گرفته شده است. در این پژوهش با استفاده از تئوری میدان تصادفی و روش تفاضل محدود در چارچوب شبیه‌سازی‌های مونت کارلو، تأثیر تغییرپذیری مکانی دو بعدی پارامتر مدول برشی خاک بر روی ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین و طیف پاسخ شتاب سطح مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های یقینی مرسوم، فقط یک مقدار ثابت میانگین مدول برشی در مدل دینامیکی در نظر گرفته می‌شود، ولی در تحلیل‌های تصادفی، پارامتر مدول برشی خاک به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها نشان می‌دهد با افزایش ناهمگنی و تغییرات در مدول برشی خاک، مقادیر ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب تغییرات مدول برشی خاک و در نتیجه افزایش ناهمگنی پروفیل خاک، طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک حاصل از تحلیل‌های تصادفی کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

شده است که در ادامه تعدادی از این مطالعات شرح داده خواهد شد. راتود و همکاران [۲] از روش شبیه‌سازی مونت کارلو جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مختلف خاک در پارامترهای ورودی استفاده کردند. عدم قطعیت‌ها شامل محرک ورودی زمین، سرعت موج برشی، ضخامت لایه و خواص غیرخطی خاک در تحلیل‌ها بودند. ترن و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۸ اثر تغییرات احتمالاتی خصوصیات خاک مانند لایه‌بندی، سرعت موج برشی، منحنی‌های میرایی و کاهش مدول برشی بر روی پاسخ دینامیکی ساختگاه بررسی کردند. هابر و همکاران [۳] اثرات تغییرپذیری مکانی سرعت موج برشی را با استفاده از تئوری میدان تصادفی بر روی تغییرپذیری مکانی حرکات سطحی زمین مورد بررسی قرار دادند.

تحلیل پاسخ دینامیکی زمین یک روش مهم برای شبیه‌سازی امواج لرزه‌ای است که با عبور از لایه‌های خاک از سنگ بستر به سطح زمین می‌رسند. پاسخ دینامیکی زمین تابعی از مشخصات خاک است و عدم قطعیت در ویژگی‌های خاک که مقادیر آن در هر نقطه‌ای از خاک متفاوت است بر روی پاسخ دینامیکی زمین تأثیر به‌سزایی دارد. در بیشتر ساختگاه‌ها، ویژگی‌های خاک محلی مانند لایه‌بندی، سرعت موج برشی (V_s)، منحنی‌های میرایی و کاهش مدول برشی پاسخ دینامیکی خاک را کنترل می‌کنند و تأثیر قابل‌توجهی بر لرزش زمین دارند [۱]. به همین دلیل در این مطالعه سعی شده است تا با تصادفی در نظر گرفتن مدول برشی خاک به عنوان یک پارامتر مؤثر بر روی سرعت موج برشی خاک، تأثیر عدم قطعیت مدول برشی و در نتیجه سرعت موج برشی خاک بر روی پاسخ دینامیکی زمین مشخص شود. مطالعات پیشین جهت ارزیابی پاسخ خاک با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ویژگی‌های خاک محلی توسط محققین زیادی انجام

تفاوت مطالعات فوق با تحقیق حاضر در استفاده محققین از روش‌های قابلیت اطمینان تجربی و تئوری مختلف به منظور در نظر گرفتن تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک است که در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از تئوری میدان تصادفی در ترکیب با روش تفاضل محدود در چارچوب

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amir.bazrafshan@shahroodut.ac.ir



2D و در چارچوب شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی شده است.

۲- منابع اصلی عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک

عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی پاسخ سیستم‌های ژئوتکنیکی پیشامدی بسیار پیچیده است که از عوامل گوناگونی ناشی می‌شود. ویژگی‌های خاک در لایه‌هایی که همگن نامیده می‌شوند از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کنند. تغییرپذیری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در این لایه‌ها ناشی از منابع مختلفی هست. سه منبع اصلی عدم قطعیت در پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی عبارت‌اند از [۴]: تغییرپذیری مکانی ذاتی خاک، خطاهای اندازه‌گیری و عدم قطعیت انتقالی که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

تغییرپذیری مکانی ذاتی، حاصل از فرآیندهای زمین‌شناسی نظیر ته‌نشینی، هوازدگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، خشک شدگی، تحکیم، سیمانی شدن، آبشویی و غیره است که به طور پیوسته توده خاک درجا را تغییر می‌دهند و باعث به وجود آمدن عدم قطعیت اجتناب‌ناپذیری در مسائل ژئوتکنیکی می‌شود [۶ و ۵]. اندازه‌گیری ناشی از تجهیزات، کاربر، روند آزمایش و اثرات آزمایش‌های تصادفی است که دومین عامل مهم در تغییرپذیری خاک است. منبع سوم عدم قطعیت، عدم قطعیت انتقالی است که زمانی معرفی می‌شود که اندازه‌گیری‌های صحرایی یا آزمایشگاهی به خصوصیات خاک طراحی با استفاده از مدل‌های تجربی یا همبستگی تبدیل شوند [۴]. از این سه نوع عدم قطعیتی که در بالا ذکر شده است، تغییرپذیری ذاتی مکانی در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

۳- تئوری میدان تصادفی

همان‌طور که در بخش قبلی نیز به آن اشاره شد پارامترهای خاک دارای تغییرپذیری مکانی ذاتی می‌باشند، بدین مفهوم که این پارامترها از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کنند. اگر پارامتر مورد نظر تنها با یک متغیر تصادفی واحد مدل‌سازی شود، تغییرات مکانی پارامتر نمی‌تواند در نظر گرفته شود. به همین منظور جهت در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی ذاتی پارامترهای خاک، از تئوری میدان تصادفی استفاده شده و این پارامترها به صورت یک میدان تصادفی مدل می‌شوند. کاربرد تئوری میدان تصادفی توسط Vanmarcke [۷] پیشنهاد گردید. او بیان کرد که سه مشخصه برای بیان پارامتر تصادفی خاک مورد نیاز است:

۱. میانگین پارامتر تصادفی خاک (μ)

۲. انحراف استاندارد (σ) یا ضریب تغییرات (COV) که هر کدام از این پارامترها میزان پراکندگی و تغییرات پارامتر مورد مطالعه نسبت به مقدار

شبیه‌سازی‌های مونت کارلو این تغییرات مکانی در نظر گرفته شود.

در مهندسی زلزله، معمولاً هیچ داده‌ای در مورد ویژگی‌های تصادفی خاک محلی مانند ضخامت لایه، سرعت موج برشی، چگالی و مدول برشی به علت عدم قطعیت خصوصیات و ویژگی‌های خاک در دسترس نیست؛ بنابراین لازم و ضروری است که یک روش شبیه‌سازی برای فرآیندهای عدم قطعیت در نظر گرفته شود. روش‌های قابلیت اطمینان مختلفی برای تحلیل پاسخ زمین وجود دارند که بر اساس عدم قطعیت ویژگی‌های خاک است. این روش‌ها را می‌توان به پنج دسته شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)، روش‌های مبتنی بر اجزای محدود (FEM)، تئوری ارتعاش تصادفی (RVT)، روش‌های ارزیابی تقریبی و روش‌های زمین‌آماری تقسیم‌بندی نمود.

هدف از این مقاله بررسی تغییرات مکانی پارامترهای خاک در تحلیل دینامیکی پاسخ زمین بر روی ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین و طیف پاسخ شتاب سطح زمین است. پارامتر خاک مورد نظر در این مقاله مدول برشی خاک می‌باشد که با استفاده از تئوری میدان تصادفی عدم قطعیت ذاتی این پارامتر و تغییرپذیری مکانی آن در پروفیل خاک در نظر گرفته شده است. تفاوت پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در پارامترهای خروجی متفاوت مورد بررسی (ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین و طیف پاسخ شتاب سطح زمین)، استفاده از یک مدل رفتاری خاک متفاوت (CHSoil) در مدل‌سازی عددی است که در ادامه به بررسی این مدل رفتاری پرداخته شده است و همچنین استفاده از یک روش متفاوت در تولید میدان تصادفی (تجزیه ماتریس کوواریانس) به منظور بررسی اثر تغییرات مکانی مدول برشی خاک بر روی پارامترهای خروجی است که در این روش تاثیر طول همبستگی ناهمسان و دو بعدی مدول برشی خاک و همچنین تاثیر ضرایب تغییرات مختلف مدول برشی خاک بر روی پارامترهای خروجی لحاظ گردیده است که در مطالعات قبلی تاثیر این دو ویژگی در نظر گرفته نشده بود.

توزیع آماری این پارامتر در این مقاله توزیع لوگ نرمال است. علت در نظر گرفتن این توزیع برای پارامتر مدول برشی به این جهت است که در توزیع لوگ نرمال امکان منفی شدن مقدار یک پارامتر وجود ندارد و از طرف دیگر این واقعیت که پارامترهای خاک از نظر فیزیکی همواره دارای مقادیر مثبت می‌باشند به اثبات رسیده است، بنابراین مطلوب است که از توزیع لوگ نرمال استفاده شود.

در این مطالعه یک پروفیل خاک بر اساس طبقه‌بندی نوع زمین در آیین‌نامه ۲۸۰۰ با استفاده از تلفیق تئوری‌های میدان تصادفی و تفاضل محدود به کمک زبان برنامه‌نویسی FISH در نرم‌افزار ژئوتکنیکی FLAC

$$\rho(X_1, X_2) = \frac{Cov(X_1, X_2)}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} E[X_1 X_2] - \mu^2 \quad (2)$$

در جدول ۱ تعدادی از توابع همبستگی رایج که در مراجع بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند آورده شده است که در این جدول L طول همبستگی و Δ فاصله بین دو نقطه t^* و t' است. مشخصه اصلی تابع همبستگی، طول همبستگی است و به عنوان فاصله مورد نیاز برای اینکه تابع همبستگی از ۱ به e^{-1} (۰/۳۶۷۹) تنزل کند [۹]. هر اندازه که طول همبستگی بزرگ‌تر باشد خاک در آن جهت همگن‌تر بوده و تغییرات نسبت به مکان کمتر است. طول همبستگی برای پارامترهای مختلف خاک متفاوت است و همچنین اگر از توابع همبستگی در دو بعد افق و قائم استفاده شود طول‌های همبستگی در جهات افقی و قائم با یکدیگر تفاوت دارند. در این مطالعه تابع همبستگی مورد استفاده، تابع همبستگی نمایی دو بعدی است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۱]:

$$\rho(\Delta x, \Delta y) = \exp\left(-\frac{|\Delta x|}{L_x} - \frac{|\Delta y|}{L_y}\right) \quad (3)$$

که در رابطه فوق، Δx و Δy فاصله بین نقاط در راستای افقی و قائم و L_x و L_y طول همبستگی در راستای افق و قائم می‌باشند. الرملی و همکاران بیان کردند که طول همبستگی عمودی از ۱ تا ۳ متر متغیر است در حالی که طول همبستگی افقی بزرگ‌تر بوده و در محدوده بین ۱۰ تا ۴۰ متر قرار دارد [۱۲].

۳-۲- تولید میدان تصادفی همبسته به روش تجزیه ماتریس کوواریانس
میدان تصادفی همبسته عبارت است از میدان تصادفی که در آن مقادیر پارامتر تصادفی خاک در طول‌های همبستگی مشخصی در راستای افق و قائم به یکدیگر همبستگی و وابستگی دارند. جهت تولید میدان تصادفی همبسته روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش میانگین متحرک، حوزه میانگین محلی، انتقال فوریه سریع و تجزیه ماتریس کوواریانس اشاره کرد که در این تحقیق از روش تجزیه ماتریس کوواریانس استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش در تحقیق حاضر این است که این روش می‌تواند یک میدان تصادفی همبسته از نظر آماری را با روابط بسیار صریح و مشخصی بین پارامترهای آماری مفروض و میدان تصادفی متناظر با آن شامل طول همبستگی از پیش تعیین

میانگین را نشان می‌دهند که محدوده ضریب تغییرات پارامترهای مقاومتی انواع خاک‌ها معمولاً بین ۱۰ تا ۸۰ درصد است.

۳. طول همبستگی (مقیاس نوسان) برای محاسبه فاصله‌ای که پارامتر خاک از نقطه‌ای به نقطه دیگر همبستگی نسبتاً زیادی را نشان می‌دهد.

۳-۱- ساختار همبستگی

ساختار همبستگی به این شکل است که ابتدا یک موقعیت خاص t^* در فضا که این فضا می‌تواند خاک باشد و یک پارامتر تصادفی X که در این مطالعه مدول برشی خاک است در نظر گرفته می‌شود. مقدار مدول برشی خاک در این نقطه، $X(t^*) = X^*$ ، یک مقدار تصادفی است. سپس موقعیت دیگری در خاک که با t' نشان داده می‌شود در نظر گرفته می‌شود که از نقطه t^* به اندازه $d = t^* - t'$ فاصله دارد. مقدار مدول برشی خاک نیز در این نقطه $X(t') = X'$ تصادفی خواهد بود. مقادیر دو متغیر تصادفی $X(t^*)$ و $X(t')$ مقداری همبستگی با یکدیگر دارند که با افزایش فاصله نقاط t^* و t' از همدیگر این همبستگی کاهش می‌یابد [۸]. به این همبستگی بین پارامترهای خاک در مکان‌های مختلف همبستگی مکانی گفته می‌شود که این همبستگی مکانی را می‌توان توسط تابع خودهمبستگی بیان کرد که در این تحقیق به اختصار تابع همبستگی بیان می‌شود. تابع همبستگی برای پارامتر تصادفی خاک (X) در دو مکان t^* و t' به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۹ و ۱۰].

$$\rho(X_1, X_2) = \frac{Cov(X_1, X_2)}{\sigma_{X_1} \sigma_{X_2}} = \frac{1}{\sigma_{X_1} \sigma_{X_2}} E[(X_1 - \mu_{X_1})(X_2 - \mu_{X_2})] \quad (1)$$

که در رابطه فوق، $Cov(x_1, x_2)$ تابع کوواریانس دو متغیر X_1 و X_2 و E امید ریاضی است.

از آنجایی که میدان تصادفی متشکل از یک تعداد بی‌نهایت پارامتر تصادفی خاک به ازای هر نقطه در فضا (X_1, X_2, \dots, X_k) است، جهت ساده‌سازی رابطه (۱) فرض می‌شود که تابع همبستگی فقط به موقعیت نسبی نقاط بستگی دارد و مستقل از موقعیت مکانی است که این فرض ایستایی یا همگنی آماری نامیده می‌شود و دلالت بر این دارد که میانگین و انحراف استاندارد در مکان‌های مختلف برابر است [۸]، لذا رابطه (۱) به رابطه (۲) تبدیل می‌گردد:

جدول ۱. توابع همبستگی یک بعدی رایج [۸ و ۱۰]

Table 1. Typical one-dimensional correlation functions [8, 10]

رابطه تابع همبستگی	تابع همبستگی
$\rho(\Delta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta \leq L \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	نویز سفید ایده آل
$\rho(\Delta) = \begin{cases} 1 - \frac{ \Delta }{L} & \text{if } \Delta \leq L \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	مثلثی (خطی)
$\rho(\Delta) = \exp\left(-\frac{ \Delta }{L}\right)$	نمایی
$\rho(\Delta) = \exp\left(-\pi\left(\frac{ \Delta }{L}\right)^2\right)$	گوسی
$\rho(\Delta) = \exp\left(-2\frac{ \Delta }{L}\right)$	مارکوف

$$C = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|\Delta x|}{L_x} - \frac{|\Delta y|}{L_y}\right) \quad (۶)$$

با توجه به اینکه در این مطالعه پارامتر مدول برشی خاک به عنوان پارامتر تصادفی در نظر گرفته شده است و همان طور که در بخش یک نیز به آن اشاره شد توزیع آماری این پارامتر لگاریتم نرمال است، جهت تولید یک میدان تصادفی مدول برشی با توزیع لگاریتم نرمال رابطه (۴) به رابطه (۷) تغییر می‌یابد [۱۳]:

$$G = \exp(\mu_{\ln G} + L.\varepsilon) \quad (۷)$$

که در این رابطه $\mu_{\ln G}$ از روابط (۸) و (۹) حاصل می‌شود [۱۳]:

$$\sigma_{\ln G}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_G^2}{\mu_G^2}\right) = \ln(1 + COV_G^2) \quad (۸)$$

$$\mu_{\ln G} = \ln \mu_G - \frac{1}{2} \sigma_{\ln G}^2 \quad (۹)$$

که در این روابط μ_G و σ_G به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد مدول برشی خاک و COV_G ضریب تغییرات مدول برشی خاک است.

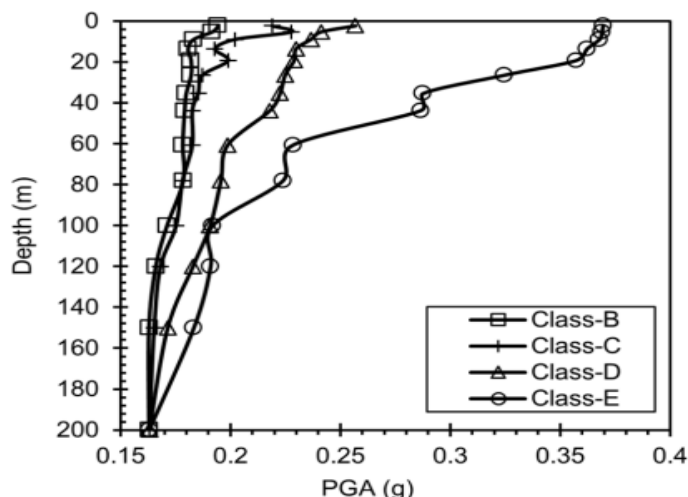
شده، مدل کند. همچنین روش تجزیه ماتریس کوواریانس اجازه در نظر گرفتن طول‌های همبستگی ناهمسان دو بعدی و ضرایب تغییرات مختلف پارامترهای خاک را می‌دهد [۱۳ و ۶]. روش تجزیه ماتریس کوواریانس، ماتریس چند بعدی را تولید می‌کند که کاهش نمایی تابع کوواریانس را نسبت به فاصله بین نقاط در بردارد. سپس مقادیر تولید شده در این روش می‌توانند به عنوان داده‌های ورودی برای کاربرد در روش مونت کارلو استفاده شوند [۱۳]. با استفاده از رابطه (۴) می‌توان یک میدان تصادفی نرمال همبسته را تولید نمود که این رابطه به شکل زیر است [۶]:

$$G = L.\varepsilon + \mu \quad (۴)$$

که در رابطه فوق، L ماتریس پایین مثلثی حاصل از تجزیه ماتریس کوواریانس به دو ماتریس پایین مثلثی و بالا مثلثی با استفاده از روش تجزیه چولسکی به صورت رابطه (۵) است و ε برداری از اعداد تصادفی با توزیع نرمال (میانگین صفر و انحراف استاندارد یک) است.

$$C = LL^T \quad (۵)$$

که در رابطه (۵) T ترانهاده است و C ماتریس کوواریانس است که با استفاده از رابطه (۶) که تجزیه شده رابطه (۲) است محاسبه می‌شود [۶].



شکل ۱. تغییرات مقدار شتاب بیشینه زمین (PGA) در طول عمق تحت زلزله ۲۰۱۵ نپال برای ساختگاه‌های مختلف [۱۸]

Fig. 1. Changes in the value of the peak ground acceleration (PGA) with depth for the 2015 Nepal earthquake for different site classes [18]

دهنده یک حقیقی‌سازی احتمالی از تغییرات مکانی خصوصیات خاک در سراسر ناحیه مورد تحلیل است.

۴- مرحله آخر تحلیل اجزای محدود قطعی با انجام تحلیل‌های متوالی با استفاده از توابع نمونه‌ای که شامل تغییرات مکانی خصوصیات خاک که در مرحله قبل تولید شدند، است.

۵- ضریب بزرگنمایی دینامیکی

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های هر زلزله شتاب حداکثر (PGA) یک زلزله است که از روی منحنی شتاب‌نگاشت آن استخراج می‌گردد. لایه‌های خاک به ویژه لایه‌های آبرفتی نسبت به PGA حرکت سنگ‌بستر حساس بوده، به طوری که با تغییر این شتاب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ دینامیکی آن‌ها به وجود می‌آید [۱۵]. از طرفی دیگر مهم‌ترین عامل به وجود آمدن آسیب‌های سازه‌ای در حین وقوع زلزله دست کم گرفتن مقدار شتاب حداکثر (PGA) است. همان‌طور که در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است شتاب بیشینه سنگ بستر با عبور از لایه‌های خاک و رسیدن به سطح زمین افزایش می‌یابد. به همین منظور محققین پارامتری را تعریف کردند که ضریب بزرگنمایی دینامیکی (DAF) نامیده شده و عبارت است از نسبت بین شتاب حداکثر در سطح زمین به شتاب حداکثر در سنگ بستر [۱۷ و ۱۶]. این ضریب پارامتری مورد نیاز جهت تخمین اینکه شتاب

۴- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو روشی است که با انتخاب تصادفی پارامترهای ورودی متناسب با تابع چگالی احتمال مشترک فرایندهای تصادفی به دنبال شبیه‌سازی این فرایندها است. روش مونت کارلو، روشی بسیار قدرتمند و انعطاف‌پذیر است و می‌تواند برای طیف وسیعی از مسائل به کار رود. همچنین استفاده از آن بسیار ساده است و اگر شبیه‌سازی به اندازه کافی انجام شود، می‌تواند بسیار دقیق باشد. در این روش نمونه‌هایی از متغیرهای ورودی احتمالاتی تولید می‌شوند و ترکیبات تصادفی آن‌ها برای انجام تعدادی محاسبات قطعی استفاده می‌شود. سپس اطلاعات در مورد توزیع و ممان‌های متغیر پاسخ از شبیه‌سازی‌های حاصل به دست می‌آید. مراحل شبیه‌سازی مونت کارلو به شرح زیر است [۱۴]:

۱- اولین مرحله از شبیه‌سازی مونت کارلو شناسایی یک مدل قطعی است که در آن از متغیرهای ورودی متعدد برای تخمین یک مقدار خروجی واحد استفاده می‌شود.

۲- مرحله دوم تعیین مشخصه‌های احتمالاتی خصوصیتی از خاک است که تغییرپذیری مکانی دارند که می‌توان به مقدار میانگین (روند)، تابع چگالی احتمال و تابع خودهمبستگی اشاره کرد.

۳- در مرحله بعدی توابع نمونه از میدان تصادفی با خصوصیات احتمالی تعیین شده در مرحله دوم تولید می‌شوند. هر تابع نمونه تولید شده نشان

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک ورودی [۱۹]

Table 2. Properties of input near field earthquakes [19]

نام زلزله	نام ایستگاه	سال وقوع	بزرگی ریشتر	حداکثر شتاب (g)
Cape Mendocino	Petrolia	۱۹۹۲	۷	۰/۶۳
Northridge	LA - Sepulveda VA	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۷۳

جدول ۳. مشخصات زلزله‌های حوزه دور ورودی [۱۹]

Table 3. Properties of input far field earthquakes [19]

نام زلزله	نام ایستگاه	سال وقوع	بزرگی ریشتر	حداکثر شتاب (g)
Landers	Coolwater	۱۹۹۲	۷/۳	۰/۴۲
Loma Prieta	Gilroy Array #3	۱۹۸۹	۶/۹	۰/۵۶

نرم‌افزار FLAC 2D است. از آنجایی که معمولاً خاک‌ها در معرض تنش انحرافی، کاهش سختی را همراه با تغییر شکل برگشت‌ناپذیر نشان می‌دهند، به منظور شبیه‌سازی این رفتار تنش- کرنش هذلولی معمولاً از مدل رفتاری معروف duncan-chang استفاده می‌شود. با این حال، این مدل دارای ایراداتی است که شامل موارد زیر است [۲۰]:

- ۱- ممکن است باعث ایجاد رفتار غیرواقعی در خاک در زمان گسیختگی و بعد از آن شود.
- ۲- روابط به کار رفته در این مدل تغییر حجم ناشی از تغییر در تنش برشی را در نظر نمی‌گیرد.
- ۳- روابط یک رفتار یکنواخت را در صفحه پیش‌بینی می‌کنند که همیشه واقع بینانه نیست (مقاومت خاک در تراکم و انبساط سه محوره معمولاً از نظر مقدار متفاوت است).

به همین جهت در این مطالعه از مدل رفتاری simplified cysoil (CHSoil) ارائه شده در نرم‌افزار FLAC 2D در مدل‌سازی پروفیل خاک به عنوان جایگزینی برای مدل دانکن و چانگ استفاده شده است که معایب این مدل را ندارد. این مدل رفتاری بر اساس معیار سخت شونده‌گی / نرم شونده‌گی است و می‌تواند یک رابطه تنش-کرنش واقعی را در لحظه گسیختگی و پس

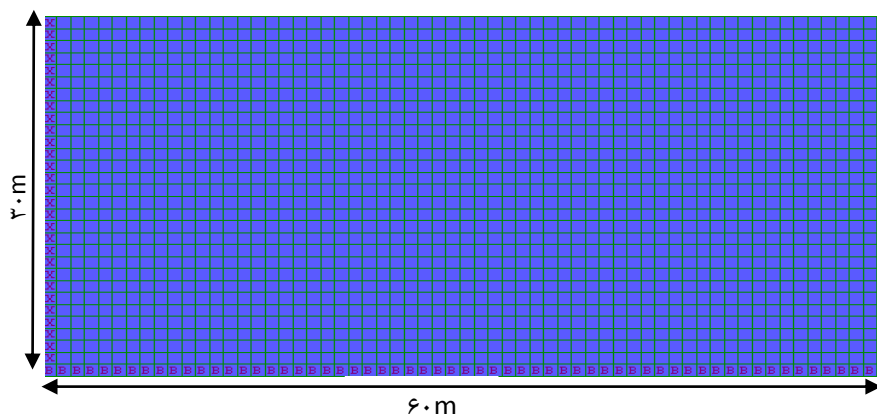
حداکثر چه مقدار از سنگ بستر تا سطح زمین افزایش خواهد یافت است که این ضریب در برخی مقالات نیز به عنوان ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین نیز نامیده شده است.

۶- محرک ورودی

جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی در این مطالعه، ۴ شتاب‌نگاشت از زلزله‌های مختلف دنیا در دو گروه زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور انتخاب شده‌اند. زلزله‌های مورد بررسی در این مطالعه شامل دو زلزله حوزه نزدیک Cape Mendocino و Northridge و دو زلزله حوزه دور Land-ers و Loma Prieta می‌باشند که مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده در جداول ۲ و ۳ مشخص شده است.

۷- مدل‌سازی دینامیکی

اولین مرحله مدل‌سازی دینامیکی تعیین هندسه مدل است که در این تحلیل مدل تفاضل محدود استفاده شده یک پروفیل خاک با توزیع احتمالاتی به ابعاد ۶۰ متر طول در ۳۰ متر عمق است که در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل رفتاری مورد استفاده در مدل‌سازی، مدل رفتاری (Simplified cysoil CHSoil)) ارائه شده در



شکل ۲. هندسه و المان‌بندی پروفیل خاک در FLAC 2D

Fig. 2. Geometry and soil profile meshing in FLAC 2D

از آن فراهم کند. همچنین این مدل برعکس مدل موهر-کولومب وابستگی سختی به سطح تنش را در نظر می‌گیرد [۲۰]. رفتار الاستیک مدل CHSoil با استفاده از قانون هوک بیان می‌شود. بیان افزایشی این قانون برحسب تنش و کرنش اصلی به شکل زیر است:

ضریب پواسون به مقادیر کوچک‌تر از ۰/۴۹ محدود می‌شود. بر این اساس مقدار مدول بالک الاستیک (K^e) بین $49.66G^e$ و $\frac{2}{3}G^e$ محدود می‌شود. مقادیر پارامترهای به کار رفته در این مدل رفتاری در جدول ۴ مشخص شده است. همچنین برای اکثر خاک‌ها، نمودار تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری به دست آمده در آزمایش سه محوری زهکشی شده را می‌توان با یک هذلولی تقریب زد. مدل CHSoil شامل قانون سخت شدن کرنش اصطکاکی برای در نظر گرفتن این رفتار است. در رابطه (۱۶) زاویه اصطکاک بسیج شده (φ_m) برحسب کرنش برشی پلاستیک (γ^p) ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma'_1 &= \alpha_1\Delta e_1^e + \alpha_2(\Delta e_2^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta\sigma'_2 &= \alpha_1\Delta e_2^e + \alpha_2(\Delta e_1^e + \Delta e_3^e) \\ \Delta\sigma'_3 &= \alpha_1\Delta e_3^e + \alpha_2(\Delta e_1^e + \Delta e_2^e)\end{aligned}\quad (10)$$

که در رابطه فوق $\alpha_1 = K^e + \frac{4G^e}{3}$ و $\alpha_2 = K^e - \frac{2G^e}{3}$ که K^e و G^e به ترتیب مدول برشی و بالک الاستیک وابسته به تنش هستند که به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۰]:

$$\sin\varphi_m = \frac{\sin\varphi_f}{R_f} \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma^p \frac{G^e R_f}{p'_m \sin\varphi_f}}\right) \quad (13)$$

$$G^e = G_{ref} p_{ref} \left(\frac{p'_m}{p_{ref}}\right)^n \quad (11)$$

در رابطه فوق φ_f زاویه اصطکاک نهایی و R_f ضریب گسیختگی است که یک پارامتر ثابت کوچکتر از یک است که در اکثر مواقع ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. رابطه (۱۳) در مدل CHSoil به منظور کالیبره کردن اصطکاک بسیج شده برحسب کرنش برشی پلاستیک استفاده می‌شود. استفاده از این قانون سخت شونده برای مدل‌سازی بارگذاری اولیه در آزمایش سه محوری، منحنی هذلولی تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری را ایجاد می‌کند [۲۰]. مقادیر پارامترهای این مدل رفتاری در جدول ۴ آمده است.

$$K^e = K_{ref} p_{ref} \left(\frac{p'_m}{p_{ref}}\right)^m \quad (12)$$

که در روابط فوق $p'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ مقدار اولیه فشار مؤثر میانگین است، p_{ref} فشار مبنا، G_{ref} و K_{ref} به ترتیب مدول برشی و مدول بالک مبنا و n و m توان‌های ثابت هستند. در این مدل رفتاری، مقادیر

جدول ۴. مشخصات آماری و احتمالاتی به کار رفته در مدل‌سازی دینامیکی [۲۰]

Table 4. Statistical and probabilistic characteristics used in dynamic modeling [21-23]

مقدار پارامتر	نماد	پارامتر آماری
۱۸۵۰	ρ	وزن مخصوص خاک ($\frac{\text{کیلوگرم}}{\text{مترمکعب}}$)
۰/۳	ν	ضریب پواسون
۳۰	φ_f	زاویه اصطکاک حداکثر (درجه)
۰/۱	ψ_f	زاویه اتساع نهایی (درجه)
۱۰	C	چسبندگی (کیلو پاسکال)
۳۸/۵	G_{ref}	مدول برشی مبنا (مگا پاسکال)
۸۳/۴	K_{ref}	مدول بالک مبنا (مگا پاسکال)
۰/۵	m	توان مدول برشی
۰/۵	n	توان مدول بالک
۱۰۱/۳	p_{ref}	فشار مبنا (کیلو پاسکال)
۱	p'_m	فشار مؤثر میانگین اولیه حداقل (کیلو پاسکال)
۰/۹۵	R_f	ضریب گسیختگی
۲۰،۴۰،۵۰	COV_G	ضریب تغییرات مدول برشی (%)
۲۵،۳۵،۴۰	L_H	طول همبستگی در راستای افقی (متر)
۱،۲،۳	L_V	طول همبستگی در راستای قائم (متر)

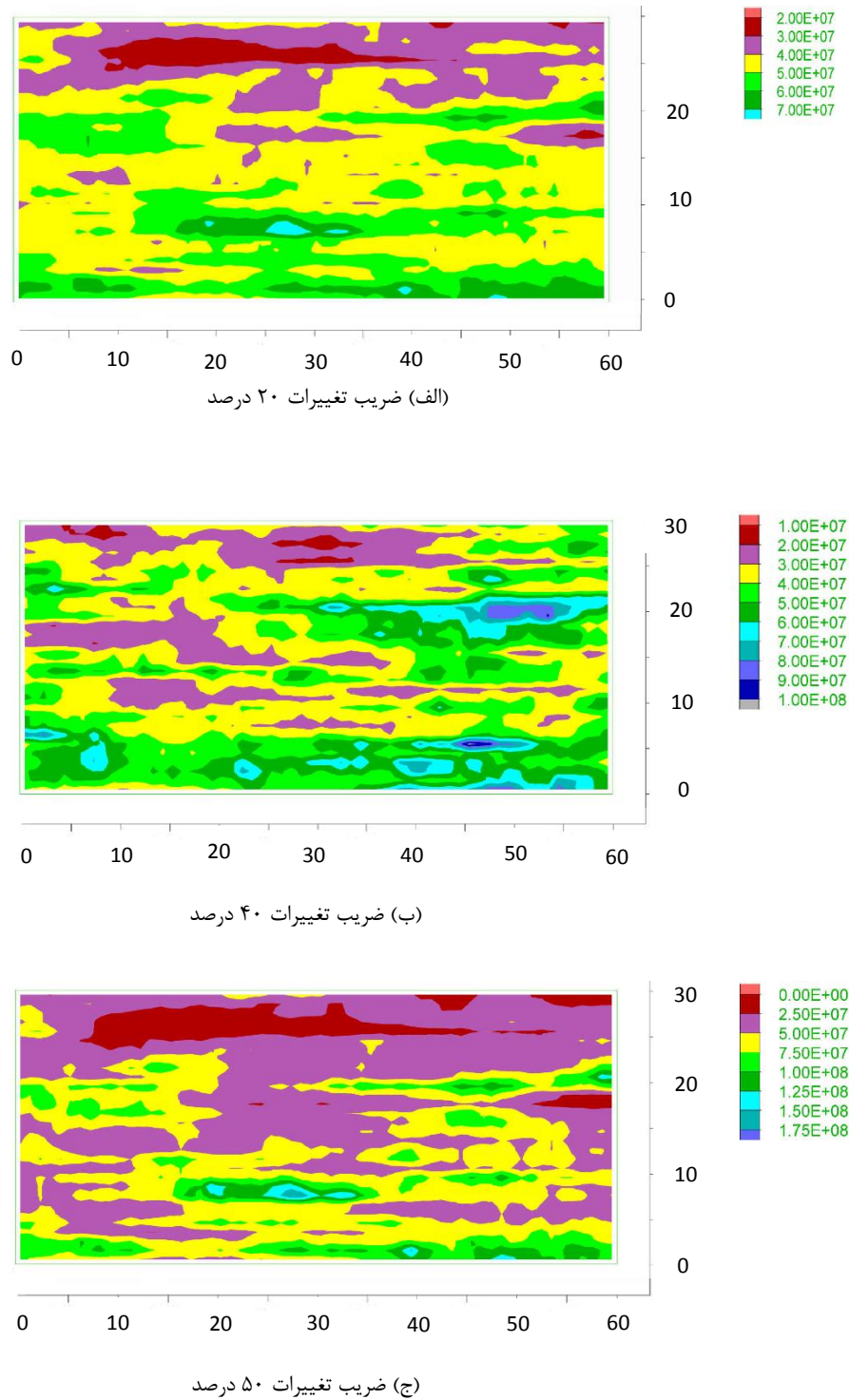
مونت کارلو است که نحوه محاسبه آن در ادامه آمده است. نمونه‌هایی از حقیقی‌سازی میدان تصادفی مدول برشی پروفیل خاک در نرم‌افزار FLAC 2D برای ضریب تغییرات ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد مدول برشی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل مقادیر مدول برشی برحسب پاسکال است و همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب تغییرات مدول برشی بازه تغییرات مقادیر مدول برشی افزایش می‌یابد و پراکندگی مقادیر مدول برشی نیز افزایش می‌یابد. در هر بار اجرای کد FISH یک حقیقی‌سازی میدان تصادفی مدول برشی صورت گرفته و با انجام تحلیل‌های دینامیکی در FLAC ضریب بزرگنمایی دینامیکی (DAF) در هر بار تحلیل محاسبه می‌شود.

جهت تعیین تعداد کفایت حقیقی‌سازی مونت کارلو (n) تا زمانی باید فرایند حقیقی‌سازی مونت کارلو تکرار شود که مقادیر میانگین متحرک

همچنین پارامترهای احتمالاتی به منظور در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی مدول برشی خاک شامل ضریب تغییرات و فاصله همبستگی در دو راستای افق و قائم در جدول ۴ مشخص شده‌اند.

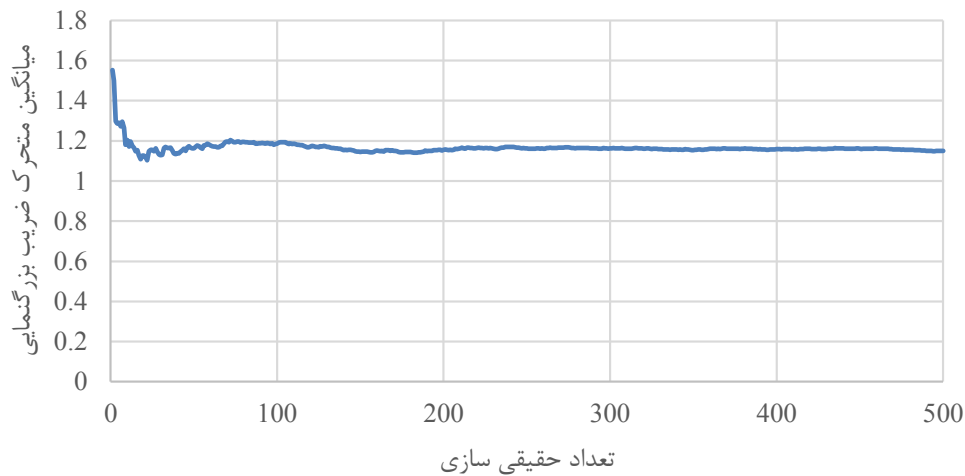
پایین مدل بر روی سنگ بستر انعطاف‌پذیر قرار گرفته که محرک لرزه‌ای ورودی به آن وارد می‌شود و در مرزهای جانبی از المان‌های جاذب استفاده شده است. در مدل تفاضل محدود از المان‌هایی به ابعاد یک متر استفاده شده است و در مجموع ۱۸۰۰ المان مربعی به کار رفته است.

تحلیل‌های دینامیکی تصادفی در این مطالعه با در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی مدول برشی خاک با ایجاد یک کد FISH در نرم‌افزار FLAC 2D صورت گرفته است. برای هر مجموعه‌ای از پارامترهای آماری و احتمالاتی ارائه شده در جدول ۴ شبیه‌سازی مونت کارلو با تکرار n مرتبه حقیقی‌سازی میدان تصادفی مدول برشی انجام می‌شود که n تعداد کفایت حقیقی‌سازی



شکل ۳. نمونه‌هایی از حقیقی‌سازی میدان تصادفی مدول برشی (Pa) پروفیل خاک برای ضریب تغییرات ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد

Fig. 3. Examples of realizing the random field of the shear modulus (Pa) of the soil profile for the coefficient of variation of 20, 40 and 50%



شکل ۴. ارزیابی کفایت تعداد حقیقی سازی‌ها برای ضریب تغییرات مدول برشی ۵۰٪ و طول همبستگی در راستای افقی ۲۵ متر و در راستای قائم ۱ متر

Fig. 4. Evaluation of the adequacy of the number of realizations for the coefficient of variation of the shear modulus of 50% and the correlation length in the horizontal direction of 25 meters and in the vertical direction of 1 meter

همچنین نتایج ضریب بزرگنمایی شتاب زمین حاصل از تحلیل‌های یقینی در نرم‌افزار deepsoil نیز به منظور صحت‌سنجی نتایج در جدول ۵ آورده شده است.

۸-۲- تحلیل‌های تصادفی

تحلیل‌های تصادفی انجام شده در این مطالعه در چهار گروه کلی (مربوط به چهار زلزله ورودی) قرار می‌گیرند. هر گروه شامل ضریب تغییرات مدول برشی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد با در نظر گرفتن طول‌های همبستگی مدول برشی افقی ۲۵، ۳۵ و ۴۰ متر و طول‌های همبستگی قائم ۱، ۲ و ۳ متر می‌باشد که در مجموع ۳۶ حالت مختلف برای تحلیل‌های دینامیکی آماده و برای هر حالت ۵۰۰ تحلیل با استفاده از حقیقی سازی مونت کارلو صورت گرفته است که بر این اساس تعداد ۱۸۰۰۰ تحلیل تصادفی انجام گرفته است. نمودارهای تغییرات میانگین ضریب بزرگنمایی مدل نسبت به ضریب تغییرات مدول برشی برای چهار زلزله دور و نزدیک در شکل ۵ آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب تغییرات مدول برشی، میانگین ضریب بزرگنمایی کاهش می‌یابد، لذا با افزایش میزان ناهمگنی در پروفیل خاک،

ضرایب بزرگنمایی به دست آمده به عددی ثابت همگرا شوند. شکل ۴ تغییرات میانگین متحرک ضریب بزرگنمایی دینامیکی را نسبت به تعداد حقیقی سازی‌های مونت کارلو برای ضریب تغییرات مدول برشی ۵۰ درصد نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد پس از ۵۰۰ تکرار حقیقی سازی مقدار میانگین متحرک ضریب بزرگنمایی تغییر قابل توجهی ندارد و از آنجایی که ضریب تغییرات مدول برشی بیشترین مقدار را دارا است (۵۰ درصد)، با توجه به مطالب ذکر شده در بالا پراکندگی مقادیر مدول برشی به بیشترین مقدار خود می‌رسد (بدترین حالت)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعداد ۵۰۰ حقیقی سازی مونت کارلو برای انجام تحلیل‌ها کفایت می‌کند.

۸-۱- تحلیل و بررسی نتایج ضریب بزرگنمایی شتاب زمین

۸-۱- تحلیل‌های یقینی

تحلیل‌های یقینی ضریب بزرگنمایی شتاب زمین با در نظر گرفتن یک مقدار میانگین ثابت و یکنواخت مدول برشی $G = 38.5MPa$ و برای چهار زلزله حوزه دور و نزدیک مشخص شده در بخش (۶) در نرم‌افزار FLAC 2D انجام گرفته است و نتایج آن به صورت جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. ضرایب بزرگنمایی شتاب زمین با در نظر گرفتن یک مقدار میانگین ثابت مدول برشی

Table 5. Magnification coefficients of ground acceleration considering a constant average value of shear modulus

ضرایب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین حاصل از نرم افزار deepsoil	ضرایب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین حاصل از نرم افزار FLAC 2D	نام زلزله ورودی
۱/۴۷	۱/۶۱	Cape Mendocino
۱/۳۲	۱/۱۵	Northridge
۱/۵۹	۱/۴۹	Landers
۱/۱۲	۱/۱۶	Loma Prieta

مدول برشی بر روی طیف پاسخ شتاب مشخص شود. بدین منظور طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک حاصل از هر تحلیل تصادفی برای زلزله نمونه (Loma Prieta) به دست آورده شده و میانگین طیف پاسخ شتاب ۵۰۰ تحلیل انجام گرفته در هر حالت، محاسبه شده و مطابق با شکل های ۶ تا ۸ با طیف پاسخ شتاب سنگ بستر و همچنین طیف پاسخ شتاب در حالت یقینی و بدون در نظر گرفتن تغییرات مکانی پارامتر مدول برشی مقایسه شده است.

با بررسی شکل ۶ می توان مشاهده کرد که میانگین طیف های پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک حاصل از تحلیل های تصادفی نسبت به طیف پاسخ شتاب سنگ بستر افزایش یافته است و طیف پاسخ شتاب با عبور امواج زلزله از میان پروفیل خاک و رسیدن به سطح زمین افزایش یافته است. همچنین با بررسی شکل ۷ مشاهده می شود که طیف پاسخ شتاب سطح در حالت یقینی و بدون در نظر گرفتن تغییرات مکانی مدول برشی، نسبت به میانگین طیف های پاسخ شتاب سطح حاصل از تحلیل های تصادفی افزایش یافته است و لذا می توان گفت که در تحلیل های یقینی طیف پاسخ شتاب سطح زمین بیش از حد برآورد شده است.

مقایسه میانگین طیف های پاسخ شتاب سطح برای ضریب تغییرات مدول برشی ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد در شکل ۸ نشان می دهد که با افزایش ضریب تغییرات مدول برشی، میانگین طیف پاسخ شتاب سطح زمین کاهش می یابد، لذا با افزایش ناهمگنی در پروفیل خاک طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک نیز کاهش می یابد.

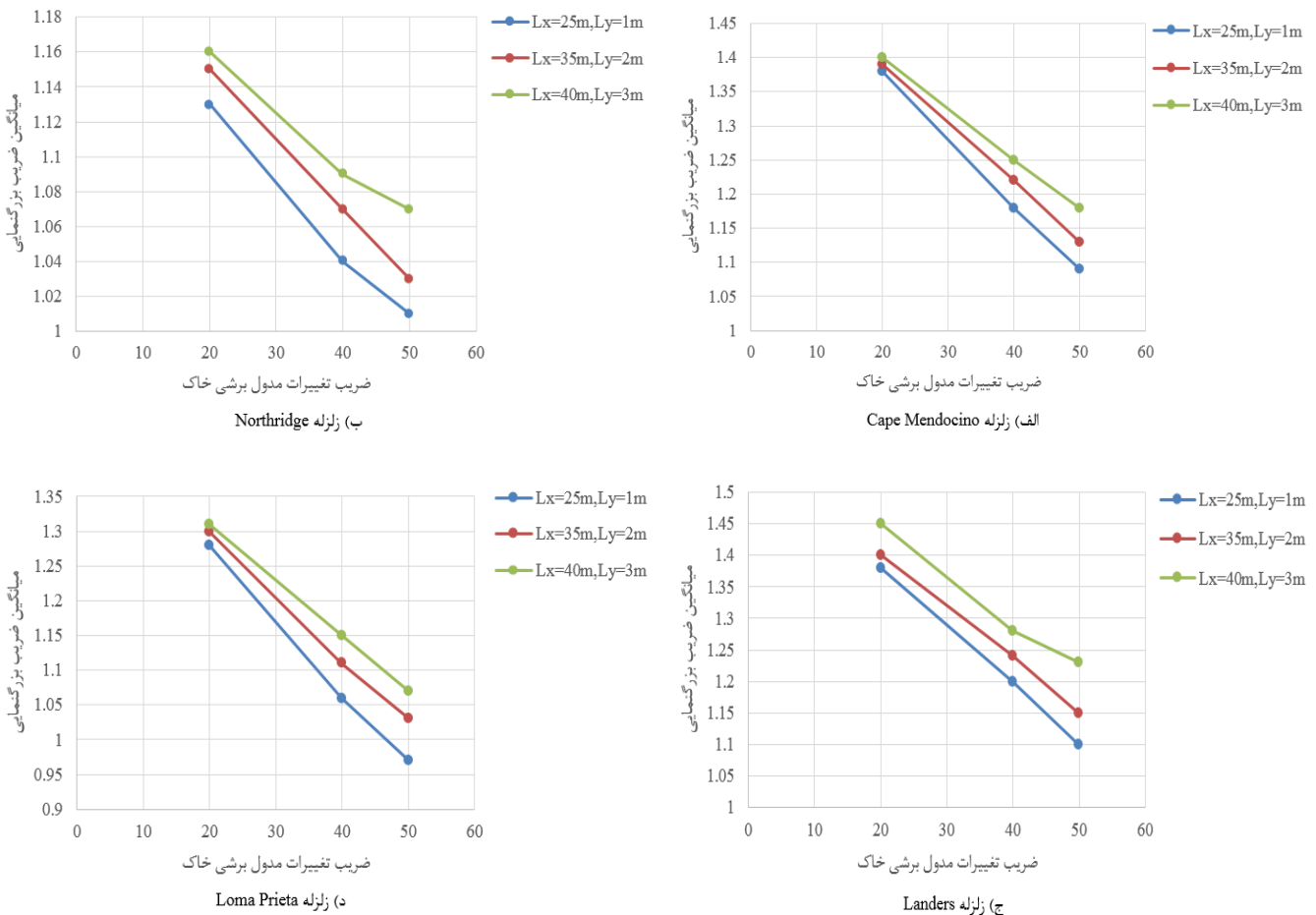
ضریب بزرگنمایی دینامیکی کاهش می یابد. همچنین ملاحظه می شود که با افزایش طول همبستگی مدول برشی که به معنی کاهش میزان ناهمگونی در پروفیل خاک است، میانگین ضریب بزرگنمایی شتاب زمین در تمامی حالات افزایش می یابد.

همچنین مشاهده می گردد هنگامی که در میدان تصادفی ایجاد شده ضریب تغییرات مدول برشی زیاد باشد، اثر پارامتر طول همبستگی اهمیت پیدا می کند و بالعکس زمانی که ضریب تغییرات مدول برشی کم باشد، اثر پارامتر طول همبستگی کاهش می یابد.

با مقایسه نمودارهای شکل ۵ با مقادیر جدول ۵ می توان به این نتیجه رسید که مقادیر ضریب بزرگنمایی شتاب زمین حاصل از تحلیل های یقینی بیشتر از مقادیر ضریب بزرگنمایی حاصل از تحلیل های تصادفی انجام شده است و این نشان دهنده برآورد بیش از حد مقادیر ضریب بزرگنمایی در تحلیل های یقینی است.

۹- تحلیل و بررسی نتایج طیف پاسخ شتاب پروفیل خاک

از آنجایی که طیف پاسخ نشان دهنده پاسخ سازه ها بر حرکات لرزه ای زمین است، در این تحقیق سعی شده است تا با بررسی میانگین طیف های پاسخ شتاب سطح زمین حاصل از تحلیل های تصادفی تحت اثر توزیع های مختلف پارامترهای احتمالاتی مدول برشی (ضریب تغییرات و طول همبستگی) و مقایسه آن با طیف پاسخ شتاب سطح زمین حاصل از تحلیل های یقینی و طیف پاسخ شتاب سنگ بستر، اثر تغییرات مکانی پارامتر



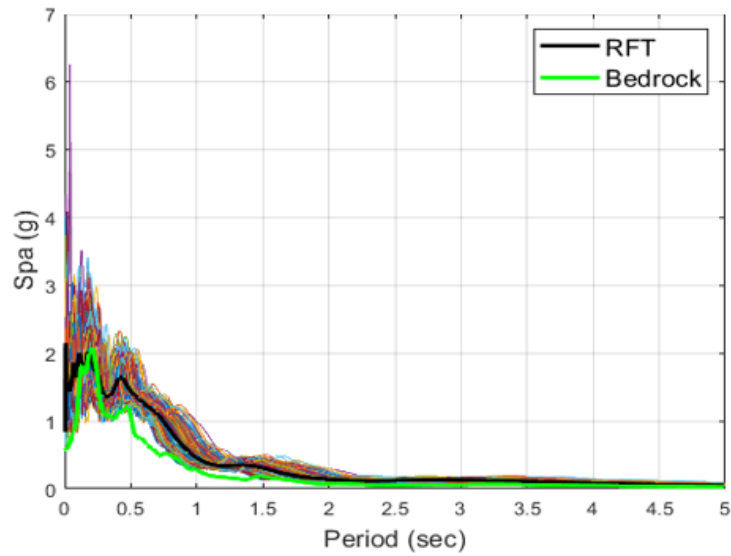
شکل ۵. نمودار تغییرات میانگین ضریب بزرگنمایی شتاب زمین نسبت به ضریب تغییرات بر اساس طول‌های همبستگی مختلف مدول برشی

Fig. 5. The graph of changes in the average magnification factor of ground acceleration compared to the coefficient of variation based on different correlation lengths of the shear modulus

تحلیل‌های یقینی مرسوم که در مدل از یک مقدار میانگین ثابت مدول برشی استفاده شده است، مقادیر ضریب بزرگنمایی ثابت می‌ماند و هیچ‌گونه تغییری نمی‌کند و اثرات ناهمگنی و تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک (ضریب تغییرات و طول همبستگی مدول برشی) در نظر گرفته نمی‌شود ولی در تحلیل‌های تصادفی با در نظر گرفتن پارامتر مدول برشی به عنوان پارامتری احتمالاتی در خاک که دارای تغییرپذیری مکانی است، در هر ضریب تغییرات و طول همبستگی، مدول برشی مقادیر ضرایب بزرگنمایی شتاب زمین متفاوت است و این نشان دهنده اثرات ناهمگنی و تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک بر روی ضریب بزرگنمایی شتاب زمین و به طور کلی بر روی پاسخ دینامیکی زمین است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های

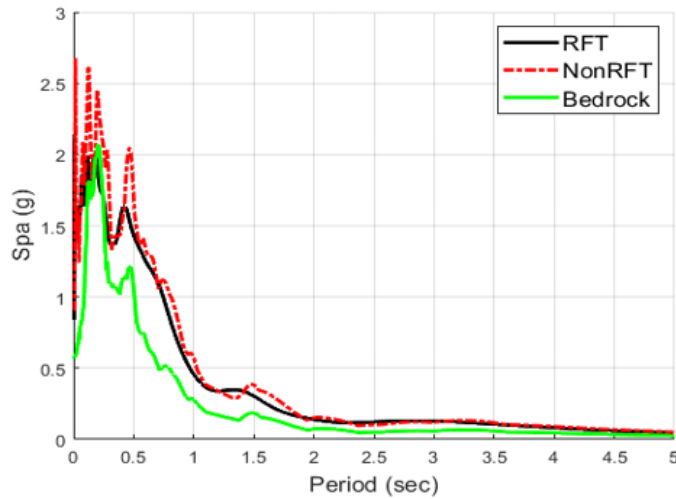
۱۰- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی عدم قطعیت و تأثیر تغییرات مکانی ذاتی پارامتر مدول برشی خاک بر روی ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب زمین و طیف پاسخ شتاب سطح زمین است. بدین منظور با ترکیب تئوری میدان تصادفی و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو تحلیل تفاضل محدود انجام و با اعمال محرک‌های ورودی متفاوت نتایج حاصل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده اهمیت در نظر گرفتن تغییرات مکانی ذاتی ویژگی‌های خاک را در بررسی پاسخ دینامیکی زمین نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های تصادفی، ضریب بزرگنمایی دینامیکی و مقایسه آن با تحلیل‌های یقینی می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که در



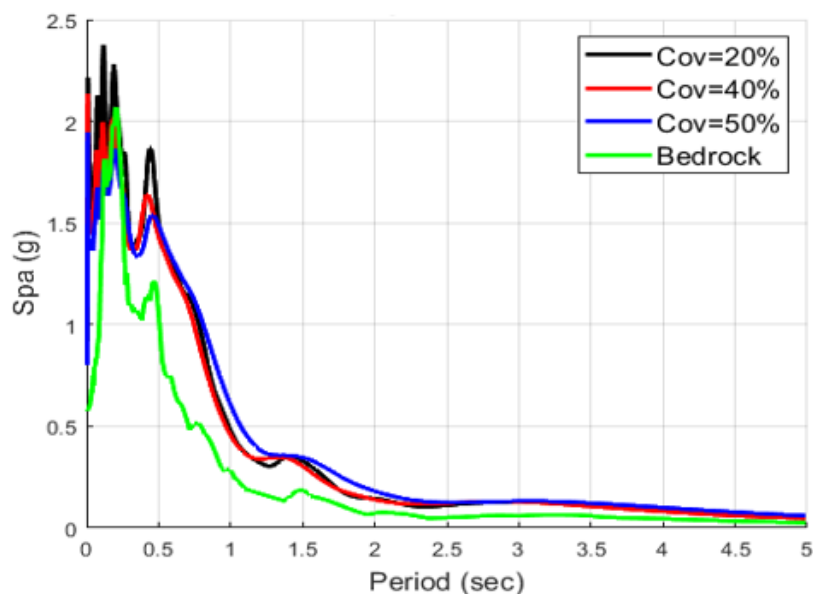
شکل ۶. مقایسه میانگین طیف‌های پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک حاصل از تحلیل‌های تصادفی برای ضریب تغییرات ۲۰ درصد و طول همبستگی افقی ۲۵ متر و قائم ۱ متر با طیف پاسخ شتاب سنگ بستر در زلزله Loma Prieta

Fig. 6. Comparison of the average acceleration response spectra of the surface soil profile obtained from random analyzes for the coefficient of variation of 20% and the horizontal correlation length of 25 meters and the vertical correlation length of 1 meter with the acceleration response spectrum of the bedrock for the Loma Prieta earthquake



شکل ۷. مقایسه میانگین طیف‌های پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک حاصل از تحلیل‌های تصادفی برای ضریب تغییرات ۲۰ درصد و طول همبستگی افقی ۲۵ متر و قائم ۱ متر با طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک در حالت یقینی و طیف پاسخ شتاب سنگ بستر در زلزله Loma Prieta

Fig. 7. Comparison of the average acceleration response spectra of the surface soil profile obtained from random analyzes for the coefficient of variation of 20% and the horizontal correlation length of 25 meters and the vertical correlation length of 1 meter with the acceleration response spectrum of the surface soil profile in deterministic state and the acceleration response spectrum of the bedrock for the Loma Prieta earthquake



شکل ۸. مقایسه میانگین طیف‌های پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک ضرایب تغییرات مختلف برای طول همبستگی افقی ۲۵ متر و قائم ۱ متر در زلزله Loma Prieta

Fig. 8. Comparison of the average response spectra of surface soil profile acceleration of different coefficients of variation for the horizontal correlation length of 25 meters and vertical correlation length of 1 meter for the Loma Prieta earthquake

منابع

- [1] T.-T. Tran, S.R. Han, D. Kim, Effect of probabilistic variation in soil properties and profile of site response, *Soils and Foundations*, 58(6) (2018) 1339-1349.
- [2] G.W. Rathod, K.S. Rao, K.K. Gupta, Monte Carlo Simulation for modelling uncertainties in ground response analysis, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(19) (2016) 709-714.
- [3] E.E. Haber, C. Cornou, D.Y. Abdelmassih, D. Jongmans, T. Al-Bittar, F. Lopez-Caballero, Effect of the 2D Spatial Variability of Linear Soil Properties on the Variability of Surface Ground Motion Coherency, in: *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V: Seismic Hazard Analysis, Earthquake Ground Motions, and Regional-Scale Assessment*, American Society of Civil

یقینی با تحلیل‌های تصادفی صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که نادیده گرفتن تغییرات مکانی مدول برشی خاک در تحلیل‌های یقینی منجر به برآورد بیش از حد ضریب بزرگنمایی شتاب زمین و طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب تغییرات مدول برشی و در نتیجه افزایش ناهمگنی در پروفیل خاک مقادیر ضریب بزرگنمایی شتاب زمین و همچنین طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول همبستگی در جهات افقی و قائم و در نتیجه کاهش ناهمگنی در پروفیل خاک ضرایب بزرگنمایی شتاب زمین افزایش می‌یابد. با بررسی میانگین طیف‌های پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک حاصل از تحلیل‌های تصادفی و مقایسه آن‌ها با طیف پاسخ شتاب سنگ بستر می‌توان به این نتیجه رسید که طیف‌های پاسخ شتاب سطح پروفیل خاک با عبور امواج زلزله از میان پروفیل خاک و رسیدن به سطح نسبت به طیف پاسخ شتاب سنگ بستر افزایش می‌یابند.

- Anisotropic Soils using Random Field Theory, Master's thesis, Guilan University, 2012.
- [14] R. Popescu, G. Deodatis, A. Nobahar, Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity, Probabilistic Engineering Mechanics, 20(4) (2005) 324-341.
- [15] B. Sunardi, J. Nugraha, Peak Ground Acceleration at Surface and Spectral Acceleration for Makassar City Based on a Probabilistic Approach, Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 17(1) (2016).
- [16] A. Tuncel, Ö.C. Özdag, E. Pamuk, M. Akgün, Comparison of the soil dynamic amplification factor and soil amplification by using microtremor and MASW methods respectively, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2017, pp. 032006.
- [17] P. Plengsiri, L.Z. Mase, S. Likitlersuang, Influence of ground variation on site amplification factor of Bangkok subsoils, Master's thesis, Department of Civil Engineering, Chulalongkorn University, 2018.
- [18] K. Bajaj, P. Anbazhagan, Ground motion site amplification factors for deep soil deposits sites in Indo-Gangetic Basin, (2017).
- [19] A.T. Council, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
- [20] F. Itasca, FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version. 8.0, in, Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, 2016.
- Engineers Reston, VA, 2018, pp. 348-358.
- [4] K.-K. Phoon, F.H. Kulhawy, Characterization of geotechnical variability, Can Geotech J, 36(4) (1999) 612-624.
- [5] A. Nobahar, Effects of soil spatial variability on soil-structure interaction, Doctoral (PhD) Thesis, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, 2003.
- [6] H. Kim, Spatial variability in soils: stiffness and strength, PhD Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005.
- [7] E.H. Vanmarcke, Probabilistic modeling of soil profiles, Journal of the geotechnical engineering division, 103(11) (1977) 1227-1246.
- [8] D.V. Griffiths, G. Fenton, Risk assessment in geotechnical engineering, John Wiley & Sons, Inc, (2008) 381-400.
- [9] A. Ahmed, Simplified and advanced approaches for the probabilistic analysis of shallow foundations, PhD thesis, University of Nantes, 2012.
- [10] F. Uribe Castillo, Probabilistic analysis of structures using stochastic finite elements, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2015.
- [11] H.S. Lizarraga, C.G. Lai, Effects of spatial variability of soil properties on the seismic response of an embankment dam, Soil Dyn Earthq Eng, 64 (2014) 113-128.
- [12] H. El-Ramly, N. Morgenstern, D. Cruden, Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay shale, Can Geotech J, 40(1) (2003) 192-208.
- [13] R. Alaie, Slope Stability Analysis in Heterogeneous and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Nikpoor, A. Bazrafshan Moghaddam, Effect of uncertainty of soil parameters on the dynamic response of soil using random field theory, Amirkabir J. Civil Eng., 54(11) (2023) 4189-4204.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20229.7372](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20229.7372)



