اثر وضعیت‌های محلی خاک بر پاسخ میدان آزاد سطح زمین

سعید مشیرآبادی
دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
s.moshirabadi@modares.ac.ir

علی بیت اللهی
استادیار، مدیر بخش مهندسی زلزله و خطرپذیری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
beitollahi@bhrc.ac.ir

حمزه شکیب
استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
shakib@modares.ac.ir

علیرضا کاظمی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
alirkaz@gmail.com

کلید واژه‌ها: *اثر ساختگاه، پاسخ میدان آزاد سطح زمین، رفتار خطی خاک، رفتار غیرخطی خاک، نرم‌افزار مطلب*

چکیده

تعیین اثرات ساختگاه با لحاظ نمودن رفتار دینامیکی خاک محلی یکی از چالش‌های مهم پیشرو در بسیاری از پروژه‌های اجرایی و همچنین تحقیقاتی محسوب می‌گردد. از طرفی با توجه به رویکرد جدید آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مبتنی بر طراحی لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای برمبنای سطوح عملکردی مختلف، ارزیابی اثرات ساختگاه با لحاظ نمودن تؤام سیستم سازه‌ای در بسیاری از موارد اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این مطالعه تلاش شده است تا با توسعه برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار مطلب رفتارهای یک بعدی و دو بعدی محیط خاکی بدون حضور سیستم سازه‌ای، در دو وضعیت خطی و غیرخطی تعیین گردد. برای این منظور درگام نخست پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین با اعمال تحریک لرزه‌ای در تراز سنگ بستر و انجام تحلیل فوریه در حوزه فرکانس برای ستون خاک تحت انتشار موج برشی افقی (S-H) صورت می‌پذیرد. در گام بعد معادلات تعادل برای ستون خاک مفروض با لحاظ نمودن رفتار هیسترزیس آن شامل اثرات تغییرات مدول برشی و مدول میرایی، در حوزه زمان حل می‌شوند. همچنین جهت مدلسازی دو بعدی محیط خاک از روش المان محدود با فرض کرنش ثابت استفاده می‌شود. در این راستا سه نمونه خاک با مشخصات مفروض، تحت تحریک لرزه‌ای ناشی از شتابنگاشت السنترو در تراز سنگ بستر لحاظ شده و پاسخ‌های سطح آزاد زمین ارزیابی می‌شوند. نتایج بیانگر آن است که برنامه توسعه یافته از قابلیت مناسبی جهت تخمین اثرات ساختگاه بصورت تحلیل‌های یک و دو بعدی را دارا می‌باشد. در ضمن پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین حاصل از تحلیل یک و دو بعدی محیط خاک مفروض در شرایط خطی از تغییرات ناچیزی بدلیل اثرات ضریب پواسون برخوردار می‌باشند، اگرچه میزان اختلاف پاسخ‌ها با لحاظ نمودن رفتار غیرخطی خاک چشمگیرتر می‌گردند. همچنین پاسخ تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین برای نمونه خاک نرم‌تر و پاسخ شتاب آن برای خاک سخت‌تر نسبت به تحریک ورودی در تراز سنگ بستر، با تشدید قابل توجهی همراه می‌باشد.

مقدمه

تخمین اثرات ساختگاه به عنوانی یکی از مراحل مهم و اساسی جهت ارزیابی اثرات اندرکنش سیستم خاک - سازه مطرح می‌باشد. ارزیابی اثرات خاک بر پاسخ میدان آزاد زمین معمولاً با استفاده از تئوری انتشار امواج زمین صورت می‌پذیرد که در این راستا می‌توان خاک واقع بروی

سنگ بستر با استفاده از تحلیل‌های یک بعدی (1D)، دو بعدی (2D) و یا سه بعدی (3D) مدلسازی نمود. برای این منظور غالباً حرکت لرزه‌ای اعمالی (بصورت تحریک ورودی) در تراز سنگ بستر واقع در قسمت زیرین خاک پیرامون منطقه مورد نظر اعمال شده و سپس با استفاده از انجام آنالیزهای مربوطه در دو حوزه زمان و یا فرکانس، پاسخ‌های لرزه‌ای در سطح زمین تعیین می‌شوند. بنابراین انجام تحلیل‌های لرزه‌ای مرتبط با اثرات دینامیکی ساختگاه نیازمند آشنایی مناسب با تئوری انتشار امواج در بستر خاکی بوده که در این راستا بایستی به دو چالش اساسی توجه ویژه‌ای معطوف گردد؛ اولاً، تحریک میدان آزاد متأثر از ویژگی‌های دینامیکی خاک منطقه بوده که در نتیجه آن تغییراتی در تحریک لرزه‌ای اعمال می‌گردند؛ ثانیاً، شرایط مرزی مابین خاک و سازه پیرامون و همچنین اثرات اندرکنشی آنها می‌تواند تغییراتی را در تحریک میدان آزاد ایجاد نمایند (Wolf, 1985). مطالعات پیشین حاکی از آن است که برای خاک بسیار سخت اثرات اندرکنشی مابین سیستم خاک - سازه بسیار ناچیز بوده که در نتیجه آن فرض پای گیردار برای سیستم‌های سازه‌ای سطحی (واقع در سطح زمین)، فرض مناسبی محسوب می‌گردد. حال آنکه برای شرایطی که خاک نرم در زیر سازه سطحی واقع گردد، اثرات اندرکنشی قابل توجه شده و فرض پای گیردار برای سازه صحیح نمی‌باشد (Clough & Penzien, 1993). اگرچه حضور سازه‌های رو و یا زیرزمینی در خاک پیرامون نیز می‌تواند تغییراتی را در تحریک لرزه‌ای اعمالی و به تبع آن پاسخ لرزه‌ای میدان آزاد زمین ایجاد نمایند، اما در این پژوهش از اثرات سیستم خاک - سازه اجتناب نموده (بعبارتی از اثرات رو سازه صرفنظر شده است) و فقط اثرات رفتار دینامیکی خاک بر پاسخ میدان آزاد آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (Li et al., 2014).

در مقاله حاضر، آنالیزهای یک بعدی و دو بعدی میدان آزاد سطح زمین با لحاظ نمودن رفتارهای خطی و غیرخطی خاک تحت تحریک لرزه‌ای اعمالی در تراز سنگ بستر با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار مطلب جهت انتشار موج صورت می‌پذیرند. برای این منظور، در گام نخست، تحلیل خطی بستر خاکی در دو حوزه فرکانس و حوزه زمان انجام شده و پاسخ‌های میدان سطح آزاد زمین برای این شرایط با همدیگر مقایسه می‌شوند. در گام بعد، صحت‌سنجی برنامه توسعه یافته با نرم‌افزار EduShake ورژن 1.12، به عنوان یکی از نرم‌افزارهای شناخته شده کاربردی برای ارزیابی اثرات خاک محلی تحت تحریک لرزه‌ای تراز سنگ بستر، انجام می‌شود. در نهایت نیز با توسعه الگوریتم برنامه، پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین با لحاظ نمودن اثرات رفتار دینامیکی خاک ناشی از تغییرات مدول برشی و مدول میرایی با تغییر کرنش برشی آن، با انجام تحلیل‌های حوزه زمان برای محیط مدلسازی شده دو بعدی خاک ارزیابی می‌شوند.

مشخصات خاک و تحریک لرزه‌ای

در پژوهش حاضر، خاک محیط مدلسازی شده بصورت هموژن و یک لایه لحاظ شده است که مشخصات آن برای سه نمونه مختلف مفروض در جدول (۱) ارایه گردیده است. همچنین شتابنگاشت انتخابی نیز متناظر با زلزله السنترو به ماکزیمم شتاب ۰/۳۴ برابر شتاب ثقل (۰/۳۴g) انتخاب شده که با فرض اصلاح خطی خط مبنای آن، در تراز سنگ بستر اعمال می‌شود. در شکل (۱) نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی مرتبط با شتابنگاشت زلزله السنترو نمایش داده می‌شوند.

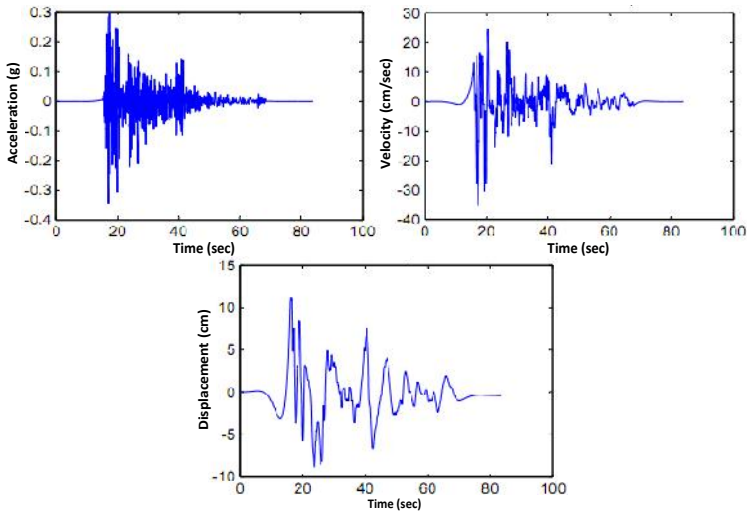
جدول ۱: مشخصات خاک هموژن یک لایه در سه نمونه مختلف مفروض

نمونه	ضخامت (m)	درصد میرایی (%)	سرعت موج برشی (m/sec)	جرم واحد حجم (kg/cm^3)
نمونه ۱	۵۰	۵	۸۰	۱۶۰۰
نمونه ۲	۵۰	۵	۲۰۰	۱۸۰۰
نمونه ۳	۵۰	۵	۶۰۰	۲۰۰۰

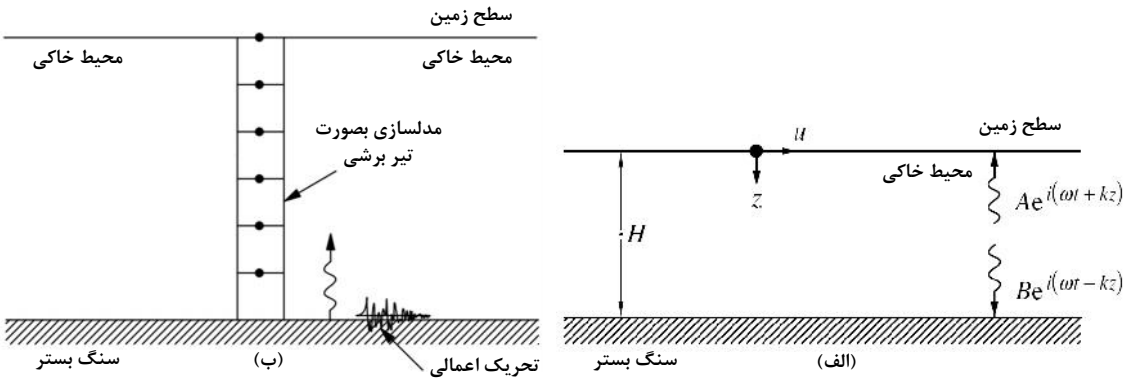
تحلیل میدان سطح آزاد خاک در حوزه فرکانس

اگرچه سرعت انتشار امواج در مجاورت نزدیکی سطح زمین کمتر از سرعت آن در اعماق زمین می‌باشد، اما تحریک افقی زمین از اهمیت چشمگیرتری در تحریک لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای سطحی برخوردار می‌باشد. بنابراین، تحلیل یک بعدی انتشار موج در محیط خاک برمبنای حاکمیت موج برشی افقی (S-H) با راستای قایم انتشاری، صورت می‌پذیرد (Datta, 2010). با توجه به اینکه انجام تحلیل‌ها در حوزه فرکانس با فرض رفتار خطی برای خاک صورت می‌پذیرد، لذا می‌توان به سهولت با استفاده از تئوری انتشار امواج در بستر خاک الاستیک و هموژن (شکل ۲ (الف))، پاسخ میدان آزاد سطح زمین تحت تحریک لرزه‌ای (با فرض تحریک هارمونیک) در تراز سنگ بستر را به صورت زیر ارزیابی نمود:

$$u(z,t) = Ae^{i(\mu t+kz)} + Be^{i(\mu t-kz)} \qquad (۱)$$



شکل ۱: نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییرمکان برای زلزله السنترو اعمالی در تراز سنگ بستر



شکل ۲: مدل یک بعدی برای تحلیل خاک الاستیک و همؤثن: (الف) در حوزه فرکانس، (ب) در حوزه زمان

در رابطه فوق μ فرکانس تحریک و k برابر با نسبت فرکانس تحریک به سرعت موج برشی در خاک می‌باشد. A و B به ترتیب دامنه انتشار موج برشی افقی در راستای مسیر حرکت به سمت بالا و پایین می‌باشد. حال با توجه به اینکه تنش برشی در سطح آزاد زمین برابر با صفر می‌باشد، بنابراین انتظار می‌رود که دامنه‌های امواج با همدیگر مساوی باشند ($A = B$). بنابراین پاسخ تغییرمکانی میدان آزاد سطح زمین برابر خواهد بود با:

$$u(z,t) = 2A\cos kze^{i\mu t} \qquad (۲)$$

بنابراین، تابع انتقال ($R(\mu)$) شامل نسبت دامنه خروجی (در سطح زمین) به دامنه ورودی (در تراز سنگ بستر) موج انتشاری تحت تحریک هارمونیک در شرایط نامیرا برابر با $\frac{1}{\cos kH}$ می‌باشد. حال با فرض نمودن میرایی خاک و مدل کلوین-ویجت (Kelvin-Voigt model) (Bratosin & Sireteanu, 2002) برای مدلسازی رفتار برشی خاک، تابع انتقال برابر است با:

$$R(\mu) = \frac{1}{\cos\left[\frac{\mu H}{V_s}(1+i2,\ )\right]} \qquad (۳)$$

در رابطه فوق $,$ نسبت میرایی ملحوظ شده برای خاک می‌باشد. در ادامه الگوریتم پیشنهادی برای تحلیل میدان آزاد در حوزه فرکانس برای هر نمونه از خاک‌های مفروض به صورت زیر ارایه می‌گردد:

۱- انجام آنالیز فوریه (FFT) شتابنگاشت ورودی و تعیین شتاب (شامل اعداد مختلط) به ازای گام‌های منفصل فرکانسی ($\Delta\mu$).

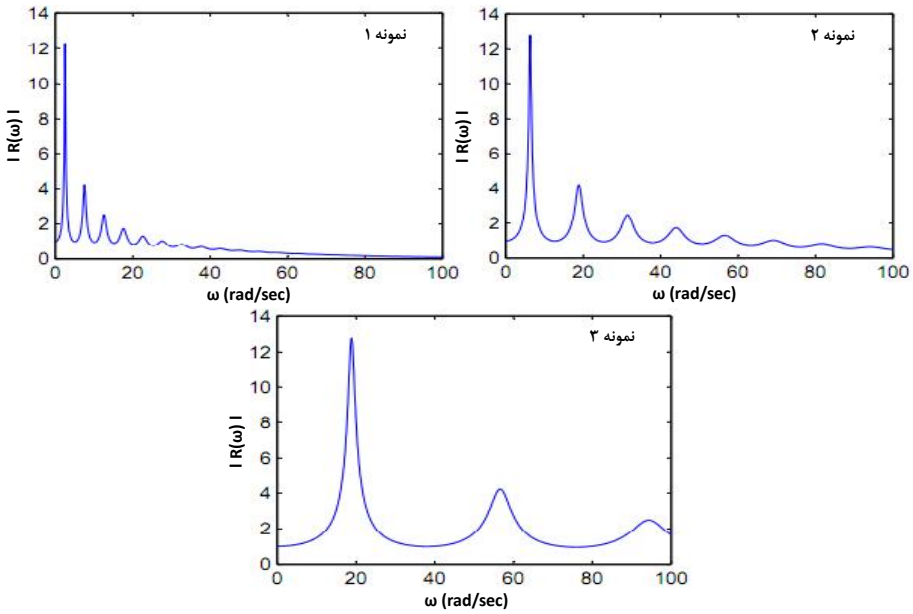
۲- تعیین تابع انتقال به ازای فرکانس‌های منفصل.

۳- ضرب اعداد مختلط حاصل از تحریک ورودی (مرحله اول) در مقادیر تابع انتقال متناظر با فرکانس منفصل معین.

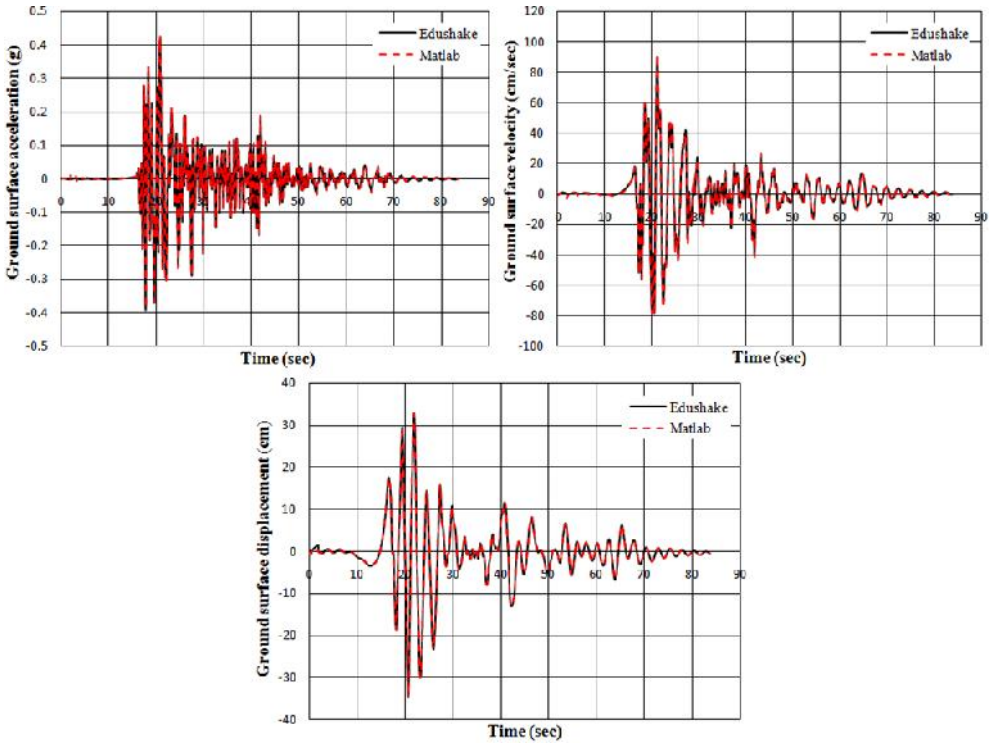
۴- اعداد مختلط حاصل از مرحله قبل بیانگر پاسخ تغییرمکان میدان سطح آزاد زمین در حوزه فرکانس بوده که با تبدیل معکوس فوریه (IFFT) آن، تاریخچه زمانی پاسخ در حوزه زمان معین می‌گردد.

۵- تعیین تاریخچه زمانی سرعت و شتاب برای سطح زمین از پاسخ تغییرمکان میدان آزاد آن.

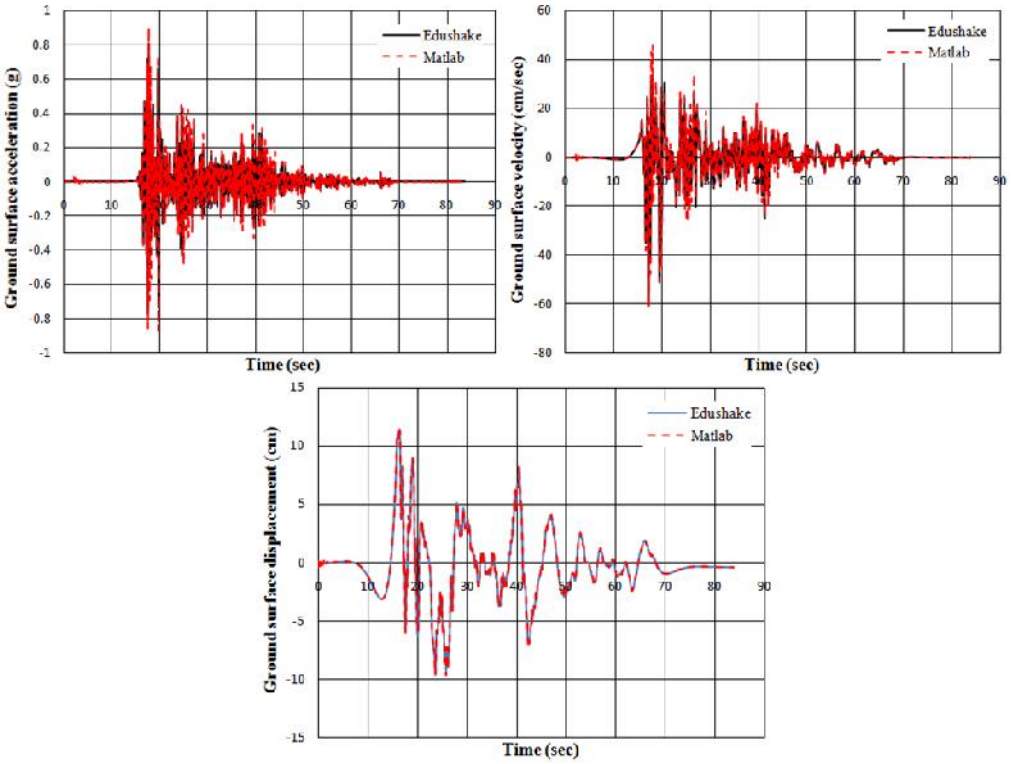
نمودار دامنه انتقال ($|R(\mu)|$) برای هر کدام از نمونه‌ها در شکل (۳) و نتایج مقایسه‌ای حاصل از تحلیل میدان آزاد سطح زمین با استفاده از برنامه توسعه یافته با تحلیل در حوزه فرکانس و نرم‌افزار EduShake برای نمونه‌های ۱ تا ۳ خاک به ترتیب در اشکال (۴) الی (۵) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳: نمودارهای دامنه انتقال برحسب فرکانس زاویه‌ای برای نمونه‌های خاک مفروض



شکل ۴: نمودارهای مقایسه‌ای تاریخچه زمانی پاسخ میدان آزاد سطح زمین برای خاک نمونه ۱ با تحلیل در حوزه فرکانس برای برنامه توسعه یافته و EduShake



شکل ۵: نمودارهای مقایسه‌ای تاریخچه زمانی پاسخ میدان آزاد سطح زمین برای خاک نمونه ۳ با تحلیل در حوزه فرکانس فرکانس برای برنامه توسعه یافته و EduShake

تحلیل میدان سطح آزاد خاک در حوزه زمان

برای حل یک بعدی در حوزه زمان فرض شده است که محیط خاکی در اعماق زمین تحت اثر امواج برشی افقی عملکردی مشابه با تیرهای برشی دارد که در نتیجه آن به ازای اعماق معین از خاک بطور ثابت مشخصاتی از قبیل سختی و میرایی در تراز میانی آن اختصاص می‌یابد. در شکل ۲ (ب) بطور شماتیک نحوه مدلسازی یک بعدی خاک بصورت تیر برشی (یا ستون برشی) نمایش داده شده است. در ادامه با حل نمودن معادله تعادل زیر در هر گام زمانی اعمال تحریک لرزه‌ای پاسخ میدان سطح آزاد خاک ارزیابی می‌شود:

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+R_K(u)=-MI\ddot{u}_g \qquad (۴)$$

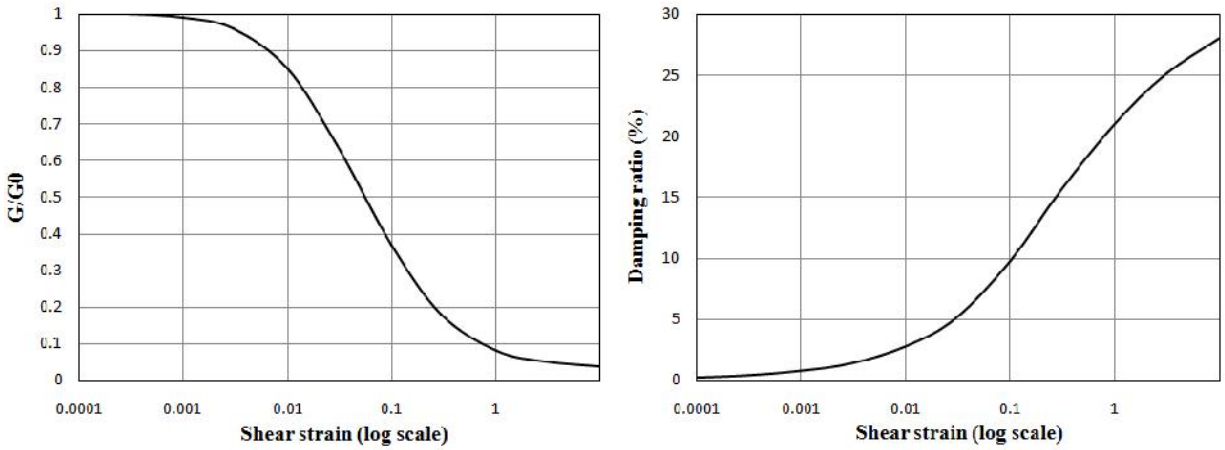
در معادله تعادل فوق M، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی را در هر کدام از المان‌های مدلسازی خاک بطور تیر برشی برای محیط خاکی با رفتار الاستیک را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در وضعیت پلاستیک روابطه مابین تغییرات کرنشی برشی در برابر: مدول برشی و همچنین تغییرات کرنشی برشی در برابر نیروی میرایی به صورت غیرخطی تغییر می‌نمایند، بنابراین رابطه تعادلی فوق بصورت زیر بازنویسی می‌گردد

$$M\ddot{u}+R_C(u)+R_K(u)=-MI\ddot{u}_g \qquad (۵)$$

برای این منظور بایستی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارتباط مابین تغییرات کرنش برشی با مدول برشی و همچنین تغییرات کرنش برشی و نیروی میرایی خاک معین گردد که برای نمونه‌های خاک مفروض به صورت شکل (۶) لحاظ شده است.

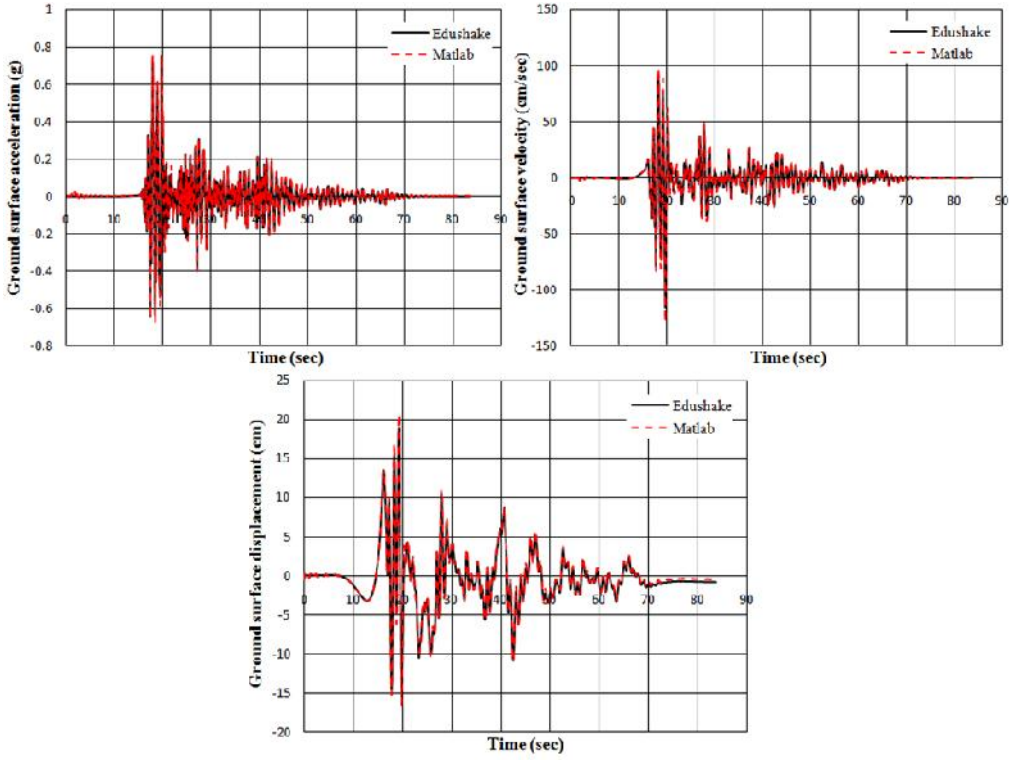
جهت مدلسازی دو بعدی خاک از روش المان محدود (FEM) با بکارگیری المان‌های مربعی با فرض شرایط کرنش ثابت (Plane strain) استفاده می‌شود. برای این منظور در هر گام زمانی معادلات تعادل برای کل محیط خاک حل و در نهایت پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین ارزیابی می‌شوند. برای جلوگیری از انکسار امواج حاصل از مرزهای واقع در اطراف محیط مش‌بندی شده، شرایط ارتعاش آزاد برای این مرزها لحاظ گردیده است. به عبارتی در این روش ابعاد محیط مش‌بندی شده به اندازه‌ای بزرگ لحاظ می‌شود که تأثیر امواج بازگشتی حاصل از این مرزها در ارتعاش سیستم خاک ناچیز می‌گردد (Towhata, 2008). برای این مطالعه عددی ابعاد مناسب برای سیستم خاک با توجه به شرایط مفروض معادل با ۲۰۰

متر لحاظ شده است. ابعاد مش‌های بکار گرفته شده جهت مدلسازی محیط خاکی بطور ثابت در هر دو جهت (شامل جهات طولی و عرضی) برابر با ۰/۵×۰/۵ متر اختیار شده است.



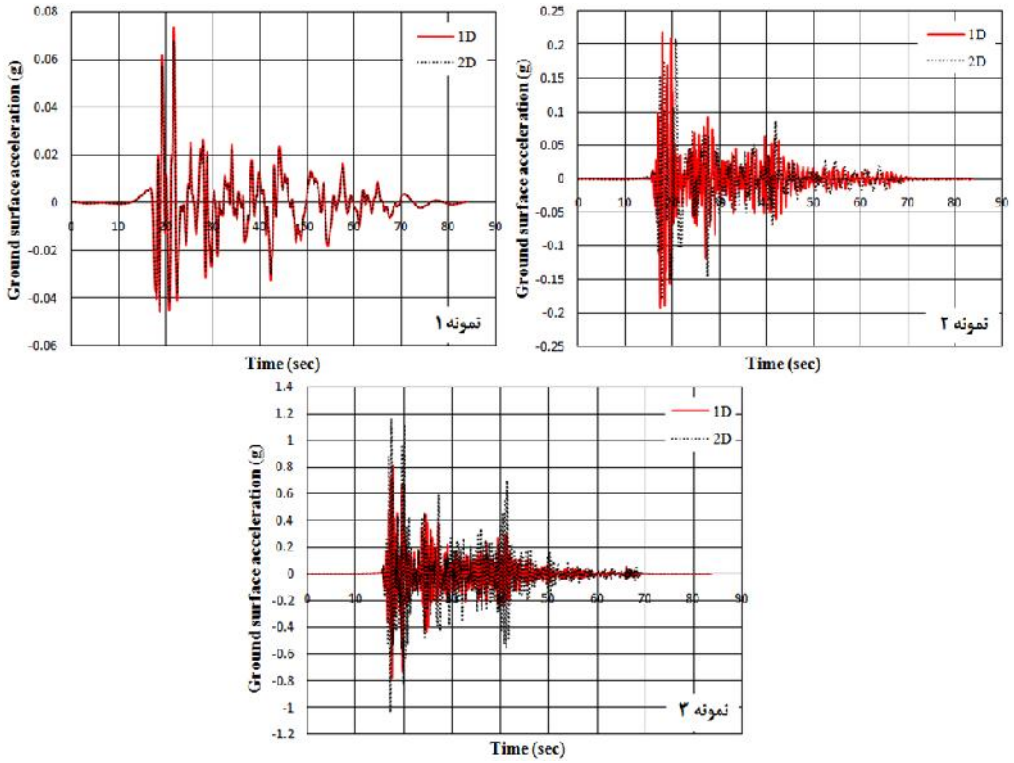
شکل ۶: نمودارهای تغییرات مدول برشی و میرایی در مقابل کرنش برشی برای نمونه‌های خاک مفروض

در شکل (۷) مقایسه مابین پاسخ سطح آزاد زمین با حل در حوزه زمان (بصورت دو بعدی) و EduShake با فرض رفتار الاستیک خطی خاک برای نمونه ۲ ارایه شده است.

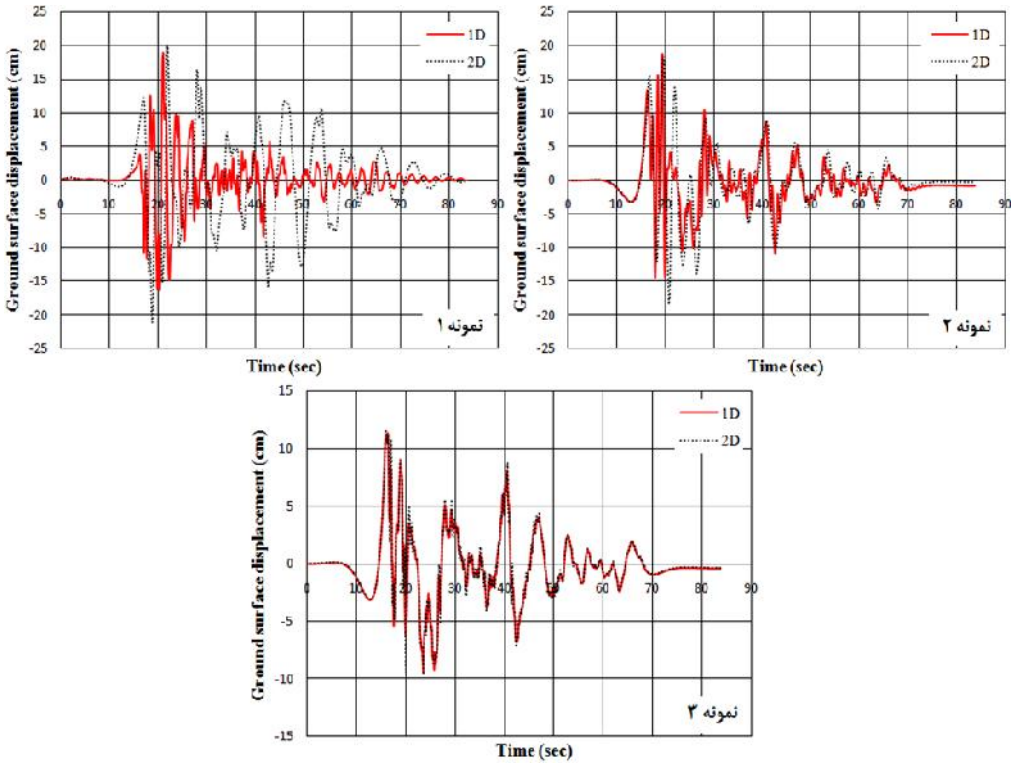


شکل ۷: نمودارهای مقایسه‌ای تاریخچه زمانی پاسخ میدان آزاد سطح زمین با فرض رفتار خطی خاک نمونه ۲ برای تحلیل زمانی در برنامه توسعه یافته بصورت دو بعدی و EduShake

در شکل (۸) نمودارهای پاسخ شتاب میدان آزاد سطح زمین و در شکل (۹) نمودارهای پاسخ تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین برای نمونه‌های مختلف خاک با فرض رفتار غیرخطی حاصل از تحلیل زمانی یک بعدی و دو بعدی نمایش داده می‌شوند.



شکل ۸: نمودارهای پاسخ شتاب میدان آزاد سطح زمین با فرض رفتار غیرخطی نمونه‌های مختلف خاک حاصل از تحلیل زمانی مدلسازی شده بصورت 1D و 2D توسط برنامه توسعه یافته



شکل ۸: نمودارهای پاسخ تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین با فرض رفتار غیرخطی نمونه‌های مختلف خاک حاصل از تحلیل زمانی مدلسازی شده بصورت 1D و 2D توسط برنامه توسعه یافته

بررسی نتایج حاصل از تحلیل بیانگر مدلسازی صحیح رفتارهای خطی و غیرخطی توسط برنامه توسعه یافته به صورت یک بعدی و دوبعدی می‌باشد. پاسخ میدان آزاد سطح زمین برای تحلیل‌های یک بعدی و دوبعدی محیط خاک تحت تأثیر انتشار موج برشی افقی در فاز خطی دستخوش تغییرات ناچیزی بوده، اما میزان تفاوت‌های پاسخ سطح زمین با لحاظ نمودن رفتار غیرخطی در این شرایط (شامل تحلیل‌های یک و دو

بعدی) قابل توجه می‌باشند. اختلاف پاسخ میدان آزاد سطح زمین با فرض رفتار خطی خاک در تحلیل دو بعدی نسبت به تحلیل یک بعدی محیط مدلسازی متأثر از ضریب پواسون خاک می‌باشد؛ در حالیکه در فاز غیرخطی با توجه به مشارکت رفتار دینامیکی خاک و تأثیر آن بر مدول میرایی و مدول برشی خاک در هر گام زمانی تحریک اعمالی، پاسخ سطح زمین با تغییرات زیادتری همراه می‌باشد. بررسی‌ها همچنین حاکی از آن است که پاسخ تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین برای خاک نرم‌تر و پاسخ شتاب میدان آزاد سطح زمین برای خاک سخت‌تر نسبت به تحریک ورودی در تراز سنگ بستر با تشدید قابل توجهی همراه می‌باشند. در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک باعث می‌گردد که کلیه پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین نسبت به وضعیت خطی آنها کاهش یابند که میزان کاهش پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین به خصوص برای خاک نرم‌تر نسبت به خاک سخت‌تر بدلیل رفتار هیسترزیس خاک چشمگیرتر می‌باشند.

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج حاصل از این مطالعه عددی بیانگر صحت و دقت مدلسازی محیط خاک با استفاده از برنامه توسعه یافته برمبنای انتشار موج برشی قایم به عنوان موج حاکم بر رفتار خاک می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه عددی حاکی از آن است که:

۱) در تحلیل حوزه فرکانس، ماکزیمم مقدار تابع انتقال و همچنین تعداد دامنه‌های آن برای خاک نرم‌تر بیشتر بوده که ماکزیمم دامنه تابع انتقال برابر با فرکانس طبیعی خاک ($V_s/2H$ ®) می‌باشد.

۲) در هر دو رفتارهای خطی و غیرخطی نمونه‌های مفروض، برای خاک نرم‌تر پاسخ تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین نسبت به خاک متراکم‌تر و بطور وارونه برای خاک متراکم‌تر پاسخ شتاب میدان آزاد سطح زمین نسبت به خاک نرم‌تر چشمگیرتر می‌باشد.

۳) لحاظ نمودن رفتار غیرخطی خاک باعث می‌گردد که کلیه پاسخ‌های سطح آزاد زمین بدلیل لحاظ نمودن اثرات هیسترزیس خاک (تغییرات مدول برشی و میرایی نسبت به کرنش برشی) کاهش یابند. با این وجود میزان تغییرات پاسخ سطح زمین برای خاک نرم‌تر نسبت به خاک متراکم‌تر با کاهش چشمگیرتری همراه می‌باشد.

۴) اختلاف فاز مابین پاسخ‌های سطح زمین در نمونه‌های مختلف خاک با فرض رفتار خطی برای شرایط مدلسازی دو بعدی نسبت به یک بعدی مشهودتر بوده که ناشی از اثرات نسبت پواسون نمونه‌ها می‌باشد.

اگرچه در این مطالعه پاسخ میدان آزاد سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفته است اما با توجه به اینکه حضور سازه‌های روی زمینی، و حتی زیرزمینی، در اکثر شرایط واقعی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد؛ بنابراین بایستی تلاش نمود تا با توسعه قابلیت‌های برنامه عددی اثرات اندرکنش سیستم سازه - خاک بطور همزمان ارزیابی و پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین برای این شرایط تعیین شوند. همچنین بایستی اثرات تؤام انتشار سایر امواج از جمله موج ریلی و ... نیز در پاسخ‌های میدان آزاد سطح زمین معین گردند.

مراجع

Bratosin D and Sireteanu T (2002) *Hysteretic damping modeling by nonlinear Kelvin-Voigt model*, Proc. of the Romanian Academy, Vol. 3

Clough RW and Penzien J (1993) Dynamics of Structures, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York

Datta TK (2010) Seismic Analysis of Structures, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK

Li M, Lu X, Lu, X and Ye L (2014) *Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6(5), 477-485

Towhata I (2008) Geotechnical Earthquake Engineering, Springer, Germany

Wolf JP (1985) Dynamic Soil Structure Interaction, Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ