



بررسی عددی پاسخ دینامیکی خاکهای رسی

دکتر محمد مهدی احمدی^۱، مهندس مهدی احسانی^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

mehsani@civil.sharif.edu

خلاصه

در این مقاله نتایج بدست آمده از آنالیزهای دینامیکی انجام گرفته بر روی خاک رس توسط نرم افزارهای متفاوت، با هم مقایسه گردیده است. بارگذاری وارد بر مدل دو نوع هارمونیک و طیف زلزله بوده و بصورت تاریخچه زمانی شتاب، به بستر سنگی اعمال شده است. در بارگذاری نوع دوم، از طیف زلزله السنترو استفاده شده و در هر دو نوع بارگذاری، فرض شده است که بستر سنگی در کف مدل قرار دارد. آنالیزها ابتدا به صورت یک بعدی توسط نرم افزارهای NERA, EERA صورت گرفته است. سپس برای مدلسازی واقعی تر، آنالیزهای دوبعدی و سه بعدی توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS انجام شد و شتابهای خروجی در همه حالات یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی در فواصل مختلف با هم مقایسه گردید. در مرزهای کناری مدل جابجایی افقی و در کف مدل جابجایی افقی و قائم مقید شده است. در آنالیزهای دوبعدی برای کسب نتایج واقعی تر و جلوگیری از انعکاس امواج از مرزهای کناری به داخل مدل، از المانهای نیمه بینهایت و مرزهای جاذب انرژی استفاده شده است.

واژه های کلیدی : مدلسازی عددی، پاسخ دینامیکی، شرایط مرزی، رس

مقدمه

بررسی پاسخ دینامیکی انواع خاکها توسط مدل های عددی می تواند اطلاعات مفیدی در زمینه روانگرایی و نشست های ناشی از بار دینامیکی مانند زلزله فراهم کند. به همین منظور مدلسازی عددی رفتار دینامیکی خاکهای رسی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله در ابتدا مدلسازی یک بعدی توسط نرم افزارهای EERA و NERA انجام شد. برنامه کامپیوتری EERA در سال ۱۹۹۸ تحت FORTRAN 90 با همان مفاهیم اولیه SHAKE ساخته شد. EERA در حقیقت خلاصه "Equivalent linear Earthquake Response" می باشد و به علت استفاده از مدول برشی سکانتی بجای مدول تانژانتی و نیز نسبت میرائی روش مورد استفاده به روش خطی معادل موسوم می باشد. در سال ۲۰۰۱ اصول بکار رفته در EERA به برنامه NERA اضافه گردید که یک برنامه آنالیز پاسخ غیر خطی سایت بر اساس مدل مواد Iwan و Mroz می باشد. NERA در اصل خلاصه عبارت "Nonlinear Earthquake Response Analysis" است و از تمام کارائیهای FORTRAN 90 و Excel در آن استفاده شده است. در این نرم افزارها خاک به صورت لایه لایه و با فرضیات زیر در نظر گرفته می شود :

- به صورت افقی همگن هستند.

- در جهت افقی تا بینهایت ادامه دارند.

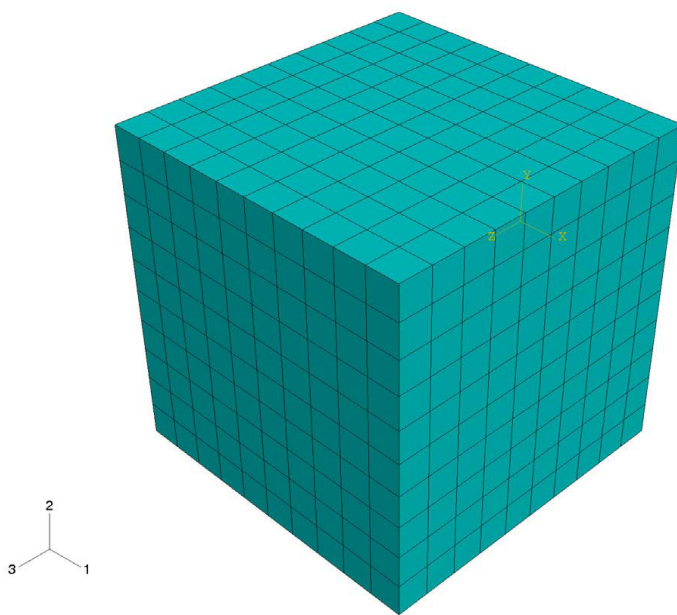
- تنها تحت حرکت افقی از طرف سنگ بستر می باشند.

انتشار موج برشی به صورت عمودی در سیستم لایه ای یک بعدی انجام می گیرد. سپس آنالیزها به صورت دوبعدی و سه بعدی توسط نرم افزار ABAQUS انجام شد که در ادامه مقاله بیشتر در مورد آن بحث می شود.

نحوه مدل‌سازی خاک

در آنالیزهای یک‌بعدی که در ادامه در بخش آنالیز یک‌بعدی توضیح داده می‌شود از پیش فرض‌های نرم‌افزارهای NERA و EERA استفاده شده است. نرم‌افزار EERA محیط خاک را محیطی با رفتار معادل خطی در نظر می‌گیرد. در مقابل نرم‌افزار NERA خاک را به صورت محیطی غیرخطی فرض می‌کند. در همه آنالیزهای یک‌بعدی مذکور محیط خاک به صورت الاستیک رفتار می‌کند.

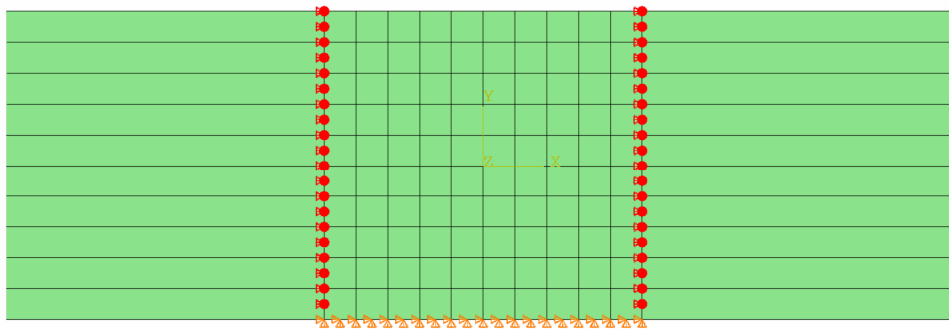
در آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی که در بخش آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی بیشتر بررسی می‌شوند از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی اشکال مختلف در شرایط متفاوت بارگذاری (استاتیکی - دینامیکی) و رفتارهای متفاوت خطی، غیرخطی، الاستیک و پلاستیک را داراست. در قسمت دوبعدی محیط خاکی به شکل مربع 10×10 متر در نظر گرفته شده است و برای المان‌بندی این محیط از المان‌های Solid مربعی 1×1 متر ۴ گره‌ای و همگن استفاده شده است. همچنین در آنالیز سه‌بعدی محیط خاکی به شکل مکعب $10 \times 10 \times 10$ متر ۸ گره‌ای و همگن استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱- مدل سه بعدی

شرایط مرزی

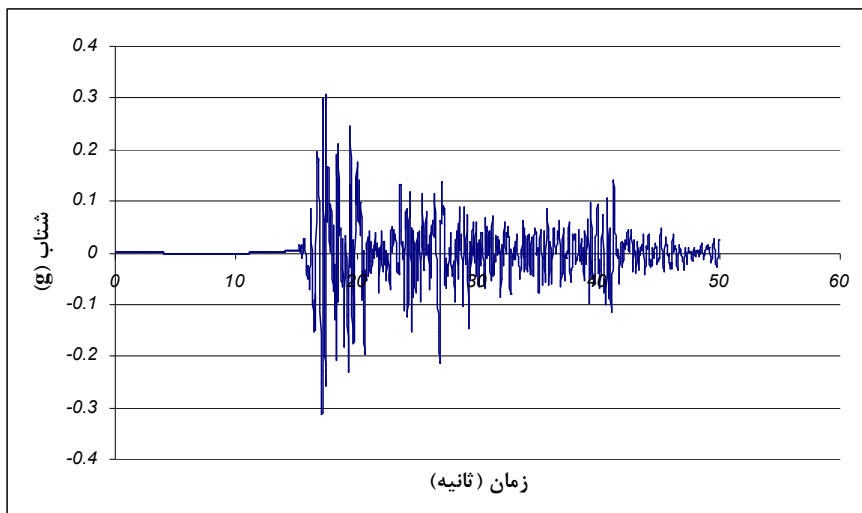
فرض شده است که کناره‌های مدل فقط امکان تغییر مکان قائم را دارند و در کف مدل از تغییر مکان همه گره‌ها در سه حالت X , Y , Z جلوگیری شده است. همچنین می‌توان از المانهای نیمه بی‌نهایت (مرز جاذب) در کناره‌های مدل استفاده کرد تا از انعکاس امواج لرزه‌ای از کناره‌ها به داخل مدل جلوگیری شود. شرایط مرزی مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شرایط مرزی غلطک در کنار و مفصل در کف و استفاده از المانهای نیمه بی‌نهایت در کنار

بارگذاری

در این مقاله بارگذاری از نوع دینامیکی می‌باشد. بارگذاری وارد بر مدل دو نوع هارمونیک و طیف زلزله بوده و به صورت تاریخچه زمانی شتاب به بستر سنگی اعمال شده است. در بارگذاری هارمونیک از موج سینوسی شکل با $PGA=0.4g$ و در بارگذاری زلزله، از طیف N-S زلزله السنترو با $PGA=0.32g$ استفاده شده است. فرکانس غالب این طیف تقریباً $1.83Hz$ می‌باشد (شکل ۳). در هر دو نوع بارگذاری هارمونیک و زلزله فرض شده است که بستگی سنگی در کف مدل قرار دارد. در آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده توسط نرم‌افزار ABAQUS تاریخچه زمانی شتاب وارد به گره‌های کف مدل اعمال شده است.



شکل ۳- تاریخچه زمانی شتاب زلزله السنترو اعمالی به کف مدل

آنالیز یک‌بعدی

در این بخش از نرم‌افزارهای NERA و EERA استفاده شده است. همانطور که در بخش‌های قبل کمی توضیح داده شد، EERA رفتار خاک را خطی و NERA رفتار خاک را غیر خطی در نظر می‌گیرد. در همه این نرم‌افزارهای یک‌بعدی، مدلی به ارتفاع ۱۰ متر از خاک در نظر گرفته شده است و ابعاد مدل از طرفین بی‌نهایت می‌باشد. همچنین بارگذاری دینامیکی به کف مدل که سنگ بستر قرار دارد اعمال شده است. به دلیل الاستیک فرض کردن رفتار خاک توسط این نرم‌افزارها، پارامترهای ورودی برای مدل کردن مصالح خاک ρ ، v و E می‌باشد. پس از آنالیز، شتاب خروجی در نقاط مختلف مدل قابل استخراج می‌باشد.

آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی

برای مدل‌سازی واقعی‌تر، آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. برخی از مزایای این نرم‌افزار بصورت ذیل می‌باشد:

- مدل‌های رفتاری متنوع خاک
- حل مسائل همبسته
- حل با روش المان محدود
- امکان مدل‌سازی آسانتر مسائل سه‌بعدی

در این نرم‌افزار می‌توان رفتار خاک را الاستیک و یا پلاستیک در نظر گرفت. همچنین این نرم‌افزار قابلیت آنالیز دینامیکی کامل، مودال و استاتیکی و همچنین آنالیز در حالت خطی و غیر خطی را داراست. برای مقایسه نتایج این نرم‌افزار با نتایج نرم‌افزارهای یک‌بعدی رفتار خاک به صورت الاستیک فرض شده است و آنالیز به صورت دینامیکی کامل و غیر خطی انجام گرفته است. همچنین برای یکسان سازی شرایط مدل دوبعدی و سه‌بعدی با یک مدل یک‌بعدی در کناره‌های مدل از غلطک‌های قائم استفاده شده است تا مانند مدل یک‌بعدی خاک فقط امکان تغییر مکان قائم را داشته باشد و در کف مدل از مفصل سه‌جهته استفاده شده است تا بتوان سنگ بستر را مدل کرد و از تغییر مکان کف جلوگیری کرد.



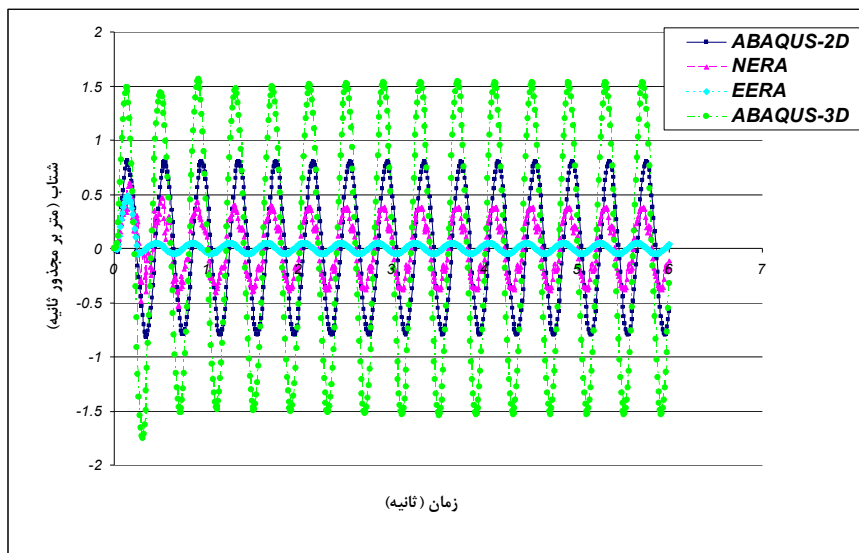
برای المان‌بندی مدل دوبعدی از المان‌های ۴ گره‌ای Solid و همگن با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ متر و برای المان‌بندی مدل سه‌بعدی از المان‌های هشت وجهی Solid ۸ گره‌ای و همگن با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ متر استفاده شده است. در انتهای آنالیز شتاب خروجی در نقاط مختلف مدل قابل استخراج است. برای کسب نتایج واقعی‌تر و جلوگیری از انعکاس امواج از مرزهای کناری به داخل مدل دوبعدی، از المانهای نیمه بی‌نهایت و مرزهای جذب انرژی استفاده شده است.

خصوصیات مصالح به کار رفته

خاک رس به کار رفته در این آنالیزها دارای مشخصات $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$ ، $\nu=0.45$ و $E=20 \text{ Mpa}$ و $D=5\%$ می‌باشد. در آنالیزهای دوبعدی و سه‌بعدی توسط نرم‌افزار ABAQUS، میرایی به صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است.

آنالیز هارمونیک

در این قسمت بار سینوسی شکل با $\text{PGA}=0.4g$ و فرکانس 2.5 Hz به عنوان بارگذاری هارمونیک به کف مدل (سنگ بستر) اعمال شده است. شتاب خروجی در نقاط وسط مدل و به ارتفاع ۳، ۶ و ۹ متر از کف مدل بدست آمده است. در شکل ۴ شتاب‌های خروجی حاصل از نرم‌افزارهای مختلف در حالت‌های یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی در ارتفاع ۳ متری از کف مدل با هم مقایسه شده‌اند.



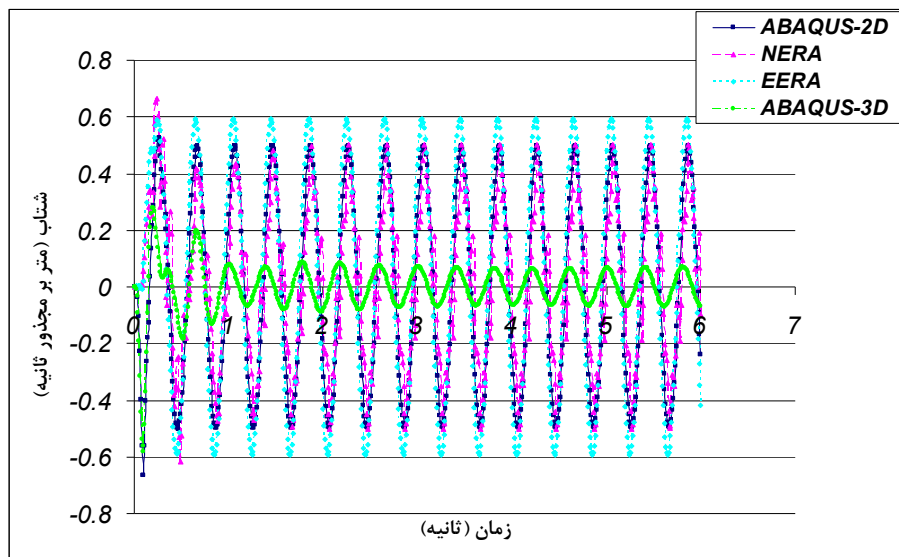
شکل ۴- شتاب‌های هارمونیک در ارتفاع ۳ متری از کف مدل

نتایج نرم‌افزار NERA و ABAQUS-2D نسبتاً به هم نزدیکند. اختلاف آنها را می‌توان به دوبعدی بودن مدل ABAQUS نسبت داد. چون در مدل دوبعدی با وجود استفاده از مرزهای جذب امکان انعکاس امواج به داخل مدل وجود دارد در حالی که این مسئله در مدل یک‌بعدی اتفاق نمی‌افتد و مدل از طرفین ابعاد بی‌نهایت دارد. زیاد بودن بیش از حد شتابها در مدل ABAQUS-3D می‌تواند به دلیل عدم استفاده از مرز جذب در این مدل باشد. همچنین با توجه به سه‌بعدی بودن آن، ابعاد مدل در همه جهات محدود می‌باشد. در نهایت، دلیل شتابهای کم EERA را می‌توان خطی فرض کردن رفتار خاک توسط این نرم‌افزار دانست. شکل ۵ شتابهای بدست آمده در ارتفاع ۶ متری از کف مدل حاصل از نرم‌افزارهای متفاوت را نشان می‌دهد. همانند شکل قبلی نتایج NERA و ABAQUS-2D به هم نزدیکند. زیرا در هر دو مدل رفتار خاک غیر خطی در نظر گرفته شده است و در مدل دوبعدی ABAQUS از مرزهای جذب استفاده شده است. همچنین در این شکل نتایج ABAQUS-3D مقادیر کمی را نشان می‌دهد. در این ارتفاع بر خلاف ارتفاع ۳ متری که انعکاس امواج باعث تشدید شتابهای خروجی شده بود، انعکاس امواج باعث کم شدن مقادیر شتابها شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که در این ارتفاع هم نتایج نرم‌افزارهای NERA و ABAQUS-2D نزدیکی خوبی با هم دارند. همچنین در این ارتفاع نتایج نرم‌افزار ABAQUS در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی بسیار به هم نزدیکند و علت آن می‌تواند کم بودن تداخل امواج حاصل از انعکاس از مرزهای مدل سه‌بعدی به داخل مدل باشد. با در نظر گرفتن سه شکل ۴، ۵ و ۶ می‌توان دریافت که شتابهای خروجی از نرم‌افزار ABAQUS چه در حالت دوبعدی و چه در حالت سه‌بعدی ابتدا روند کاهشی و سپس روند افزایشی با ارتفاع داشته است. همچنین روند شتابهای بدست آمده از NERA و EERA در ارتفاع صعودی می‌باشد.

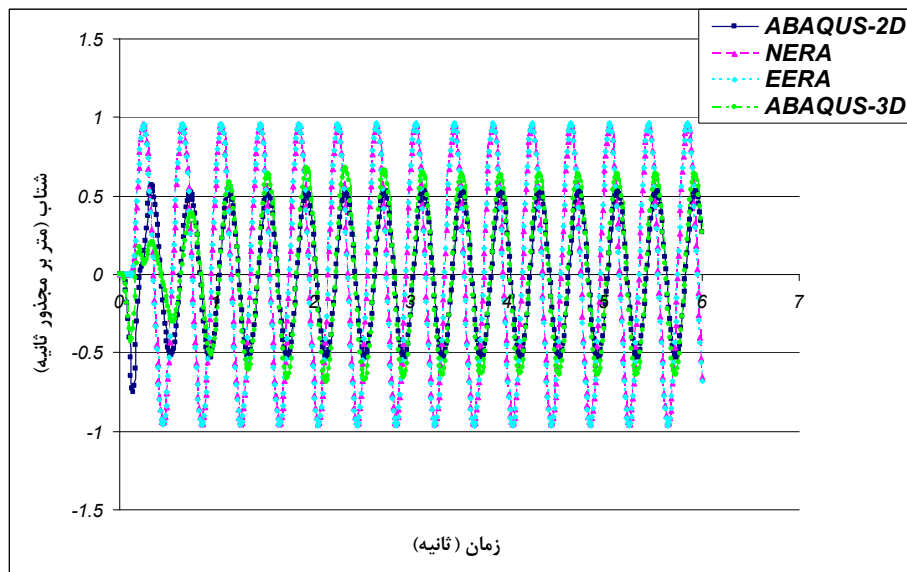


آنالیز زلزله

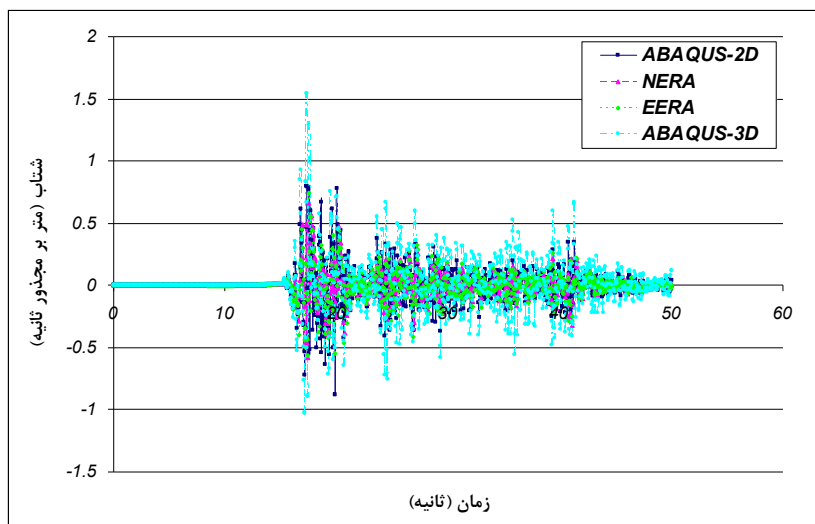
در این بخش از طیف N-S زلزله السنترو با $PGA=0.32g$ به عنوان بارگذاری دینامیکی استفاده شده است. همانند آنالیز هارمونیک شتاب خروجی در نقاطی به ارتفاع ۳، ۶ و ۹ متر از کف مدل تعیین شده است. شکل ۷ شتاب خروجی نرم افزارهای مختلف را در ارتفاع ۳ متری از کف مدل را نشان می دهد. خروجی نرم افزار ABAQUS در حالت سه بعدی مقادیر بیشتری را نسبت به بقیه نتایج نشان می دهد (مانند آنالیز هارمونیک). این افزایش را می توان ناشی از عدم استفاده از مرز جاذب در حالت سه بعدی دانست. همینطور نرم افزار EERA مقادیر کمتری را نشان می دهد. در شکل ۸ شتابها در ارتفاع ۶ متری از کف مدل بررسی شده اند. در این ارتفاع مقادیر EERA کمی بیشتر از سایر خروجیهاست در حالی که دیگر نتایج تطابق خوبی با هم دارند. در شکل ۹ که شتابها را در ارتفاع ۹ متری از کف مدل نشان می دهد باز هم مشخص است که مقادیر EERA بیش از سایر نرم افزارهاست.



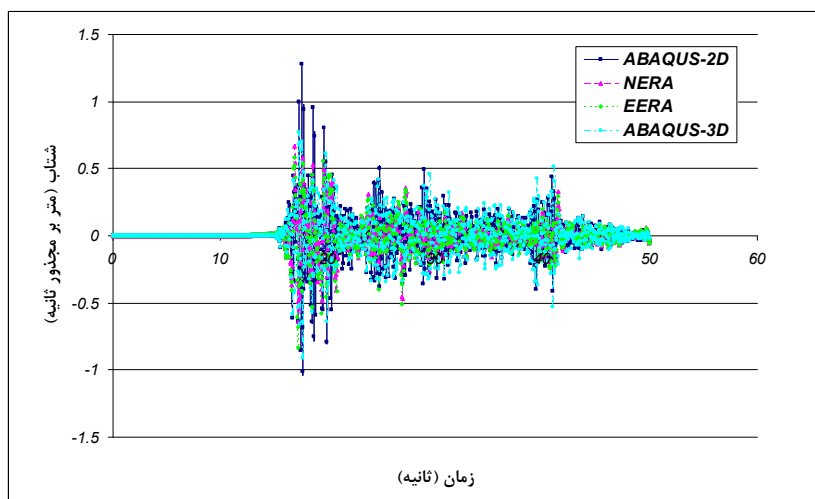
شکل ۵- شتابهای هارمونیک در ارتفاع ۶ متری از کف مدل



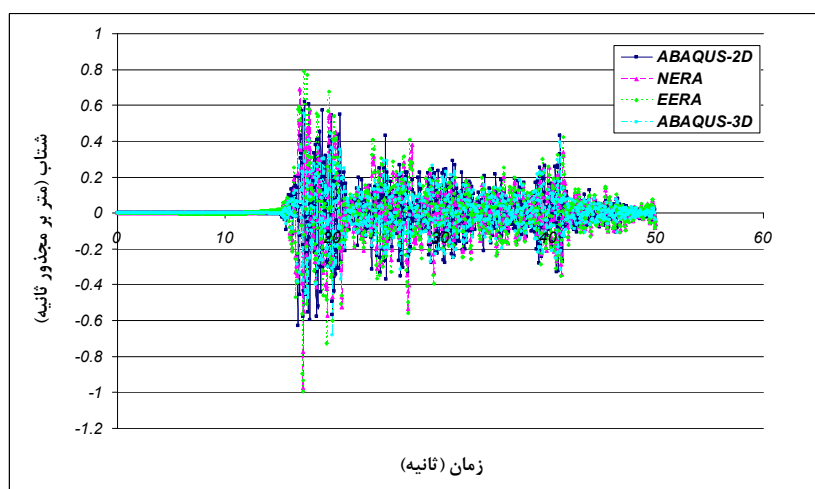
شکل ۶- شتابهای هارمونیک در ارتفاع ۹ متری از کف مدل



شکل ۷- شتابهای زلزله السنترو در ارتفاع ۳ متری از کف مدل



شکل ۸- شتابهای زلزله السنترو در ارتفاع ۶ متری از کف مدل



شکل ۹- شتابهای زلزله السنترو در ارتفاع ۹ متری از کف مدل



نتیجه‌گیری

- شتابهای خروجی از نرم‌افزار ABAQUS چه در حالت دوبعدی و چه در حالت سه‌بعدی ابتدا روند کاهشی و سپس روند افزایشی با ارتفاع داشته است.
- شتابهای بدست آمده از نرم‌افزارهای NERA و EERA با افزایش ارتفاع زیاد می‌شوند.
- خروجی‌های شتاب بدست آمده از NERA و ABAQUS-2D بهترین تطابق را با هم دارند زیرا رفتار خاک در هر دو مدل غیر خطی فرض شده است. همچنین با استفاده از مرزهای جاذب در مدل ABAQUS-2D، شرایط مرزی مدلهای یک‌بعدی و دوبعدی هم بهم نزدیک شد.
- انعکاس و تداخل امواج در مدل سه‌بعدی که در آن از مرزهای جاذب استفاده نشده است، گاهی باعث افزایش شتابها نسبت به نرم‌افزارهای دیگر می‌شود و گاهی هم باعث کاهش آنها می‌شود.

مراجع

1. Maheshwari, B.K., Truman, K.Z., Gould, P.L. and El Naggar, M.H. (2005) Three-dimensional nonlinear seismic analysis of single piles using finite element model: effects of plasticity of soil. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 5, No. 1.
2. Bentley, K.J. and El Naggar, M.H. (2000) Numerical analysis of kinematic response of single piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 1368-82.
3. EERA and NERA Manuals.
4. ABAQUS General finite element analysis program Version 6.6 manual.