

## بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌ها و دره‌های دوبعدی و سه‌بعدی با هندسه نیم سینوسی در برابر امواج محرک ساده

ماکان نوربخش

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
makan.noorbakhsh@gmail.com

امیرمهدی حلبیان

استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
mahdi@cc.iut.ac.ir

کلیدواژه‌ها: تأثیرات توپوگرافی، اثرات سه‌بعدی، تپه و دره، تحلیل عددی اختلاف محدود، ضریب شکل و کرنش مرجع

### چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر توپوگرافی سطحی دره و تپه با بهره‌گیری از تحریک موج ریکر پرداخته می‌شود. در این راستا از روش اختلاف محدود و نرم‌افزار FLAC استفاده می‌شود. نخستین هدف در این مطالعه، بررسی درستی عملکرد این نرم‌افزار در انجام تحلیل‌های دینامیکی است که از طریق مقایسه با برخی نتایج حاصل از کارهای گذشته سنجیده خواهد شد. در قدم بعد به بررسی تفاوت‌های میان مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته می‌شود. تأثیر هندسه اعم از تپه یا دره بودن عوارض و نیز ابعاد مدل‌ها در غالب ضرایب شکل متفاوت نیز از جمله موارد مورد بررسی خواهد بود. در نهایت تأثیر نوع خاک مورد توجه قرار گرفته است. نوع خاک در اینجا صرفاً در غالب پارامتر کرنش مرجع که از مهم‌ترین پارامترهای معرف رفتار دینامیکی خاک‌ها است، لحاظ شده است. این بررسی نشان داده است که نتایج حاصل از این نرم‌افزار با نتایج حاصل از کارهای گذشته قابل مقایسه بوده و از یک روند خاص پیروی می‌کند. همچنین تأثیر هندسه مدل‌ها در غالب هندسه تپه یا دره، دوبعدی یا سه‌بعدی بودن و نیز ضرایب شکل مختلف و نیز تأثیر مشخصات خاک در غالب پارامتر کرنش مرجع، اگرچه کلیات رفتاری مدل‌ها را در کل زیاد تغییر نمی‌دهد، اما می‌تواند جزئیات رفتاری نقاط مختلف در سطح عوارض را بسته به شرایط مسئله کاملاً تحت تأثیر قرار دهد.

### مقدمه

عوامل مختلفی بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مؤثر است که از آن جمله می‌توان به مشخصات منبع موج، اثرات مسیر حرکت موج و شرایط محلی ساختگاه اشاره کرد. زلزله‌های اخیر و حوادث ناشی از آن نشان داده است که در میان عوامل مذکور، شرایط محلی ساختگاه از جمله بیشترین تأثیرات را در این زمینه خواهد داشت. در بسیاری از زلزله‌های گذشته می‌توان تأثیرات مخرب اثرات توپوگرافی را مشاهده کرد. مطالعه اثر عوارض توپوگرافی بر پدیده انتشار و تفرق موج، امری پیچیده است چراکه بسته به هندسه مسئله و عارضه مورد مطالعه، نوع و فرکانس و زاویه موج ورودی، اندرکنش‌های متفاوتی از امواج با عارضه در محیط و در نتیجه شرایط گوناگون و متفاوتی می‌تواند بروز نماید. چنین مسئله‌ای را تنها می‌توان با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته به‌صورت دقیق و اقتصادی و با در نظر گرفتن شرایط واقعی محیط مورد تحلیل و بررسی قرار داد. ۳ روش اصلی در این زمینه شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های نیمه‌تحلیلی و روش‌های عددی است. در این بین روش‌های عددی با توجه به پیشرفت علم رایانه و استفاده از آن در تحلیل‌ها، غالباً نسبت به سایر روش‌ها دارای کاربرد و استفاده بیشتری هستند. معمولاً این روش‌ها یا به‌صورت روش اجزای محدود (Smith, 1975; Day, 1977; Bielak, 1999) و اختلاف محدود (Boor, 1971, 1973; Moczo, 1989, 1993; Hill, 1999) یا به‌صورت روش‌های مرزی (معادلات انتگرال مرزی، روش انتگرال مرزی، روش اجزای مرزی مستقیم و غیرمستقیم) و یا به‌صورت تلفیقی از این روش‌ها (اجزای محدود و یک روش تحلیلی، اجزای محدود و اجزای نامحدود، اجزای مرزی و اجزای محدود، اختلاف محدود و اجزای مرزی) دسته‌بندی می‌شود. چنین روش‌هایی با توجه به سهولت نسبی در مدل‌سازی، دقت مطلوب، کاهش حجم محاسبات در مقایسه با روش‌های دیگر، اقلان شرط تشعشع امواج در بی‌نهایت و بررسی هر نوع مدل با هندسه خاص به‌صورت جامع، بیشتر مورد توجه و استقبال محققین واقع شده است، هرچند



معایبی نظیر گسسته سازی دامنه مسئله و موارد دیگر نیز به آن نسبت داده شده است. تاکنون تحقیقات بسیار زیادی پیرامون بررسی تأثیر توپوگرافی بر پاسخ ساختگاه در غالب مطالعات دوبعدی و سه بعدی بر روی انواع عارضه با اشکال و هندسه‌های متفاوت انجام شده است. عمده این مطالعات به صورت دوبعدی بوده و مطالعات سه بعدی نیز غالباً بر روی اشکال هندسی با تقارن محوری انجام شده است. همچنین عمده این بررسی‌ها با هدف توسعه روش‌های تحلیلی گذشته و یا ایجاد روش‌های پیشرفته جدید انجام شده است و تعداد بررسی‌های پارامتریک این مسئله به نسبت کمتر بوده است.

هندسده نیم سینوسی از جمله متداول‌ترین هندسه‌های موجود در طبیعت است. از این رو در این تحقیق نیز این نوع هندسه مورد توجه قرار گرفته است. (Bouchon (1985 از جمله نخستین افرادی بوده است که به بررسی تأثیر عوارض توپوگرافی سطحی با هندسه نیم سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین پرداخته است. وی این نوع عارضه‌ها را در برابر امواج حجمی SH, SV و P مورد بررسی قرار داد. بر اساس نتایج کارهای او، بزرگنمایی روی قله و کوچک نمایی بر روی یال تپه، دو پدیده مهم در رفتار لرزه‌ای این نوع تپه‌ها هستند خصوصاً در محدوده طول موج‌های قابل مقایسه با ابعاد عارضه و بزرگتر از آن (۲ تا ۲۰ برابر ارتفاع تپه). همچنین مطالعات او شامل بررسی تأثیر نسبت شکل تپه نیز بوده است که با افزایش این نسبت، بر بزرگنمایی قله و کوچک نمایی یال تپه و وسعت نواحی بزرگنمایی و کوچک نمایی افزوده می‌شود. همچنین این محقق در بررسی دیگر با هندسه سه بعدی نشان داد که محدوده بزرگنمایی بالای تپه به موازات قطر بزرگتر مقطع عارضه گسترش یافته و عرض آن با طول موج مهاجم متناسب خواهد بود. با تغییر جهت تابش موج در راستای قطر کوچک، مقادیر بزرگنمایی با ثابت ماندن الگو، کاهش خواهد یافت. مطالعات Geli (1988) نیز نشان داده است که در محدوده فرکانس‌های بدون بعد کوچکتر از ۲/۵ حرکت قله تقویت شده و یال و کف تپه نیز در همان محدوده فرکانسی، تناوبی از بزرگنمایی و کوچک نمایی را تجربه خواهد کرد. مطالعات (Sohrabi Bidar and Kamalian (2003, 2010, 2013 نیز از جمله بررسی‌های پارامتریک در زمینه تأثیر نسبت شکل‌ها، ضریب پواسون و طول موج‌های مختلف بر روی پاسخ این نوع عوارض توپوگرافی در برابر امواج مهاجم متفاوت بوده است.

در تحقیق پیشرو با استفاده از روش عددی اختلاف محدود به بررسی پارامتریک هندسه‌های تپه و دره به صورت دو و سه بعدی در برابر موج محرک ساده پرداخته می‌شود. بدین منظور از دو نرم‌افزار FLAC 2D ورژن ۷ و FLAC 3D ورژن ۵ استفاده می‌شود. نخستین هدف در این مطالعه، بررسی درستی عملکرد این نرم‌افزارها در انجام تحلیل‌های دینامیکی است که با مقایسه با برخی نتایج حاصل از کارهای گذشته سنجیده خواهد شد. در قدم بعد به بررسی تفاوت‌های میان مدل‌های دوبعدی و سه بعدی پرداخته می‌شود. تأثیر هندسه اعم از تپه یا دره بودن عوارض و نیز ابعاد مدل‌ها در غالب ضرایب شکل متفاوت نیز از جمله موارد مورد بررسی است. در نهایت تأثیر نوع خاک مورد توجه قرار گرفته است. نوع خاک در اینجا صرفاً در غالب پارامتر کرنش مرجع که از مهم‌ترین پارامترهای معرف رفتار دینامیکی خاک‌ها است، لحاظ شده است.

## روش مطالعات

مدل‌سازی نیازمند استفاده از یک مدل رفتاری برای خاک است. جهت سهولت در مطالعات، از مدل الاستوپلاستیک موهركولمب در این قسمت استفاده شده که یک مدل الاستیک خطی محسوب می‌شود. پارامترهای مدل در بررسی‌های اصلی عبارت است از خاک ماسه‌ای با چگالی وزنی  $2 \text{ t/m}^3$ ، مدول برشی  $1200 \text{ MPa}$ ، چسبندگی  $10 \text{ KPa}$ ، زاویه اصطکاک داخلی  $35^\circ$  درجه، ضریب پواسون  $0/3$  و سرعت موج برشی تقریبی  $775 \text{ m/s}$ . در تحلیل دینامیکی با توجه به مدل‌های دینامیکی و میرایی تعریف‌شده در نرم‌افزار، رفتار غیرخطی خاک لحاظ خواهد شد. برای این منظور از میرایی هیسترتیک تعریف‌شده در نرم‌افزار و مدل میرایی Hardin/Drnevich استفاده شده تا مدل رفتار دینامیکی و غیرخطی Finn در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود. روابط حاکم بر منحنی‌های مدول برشی و میرایی در این مدل مطابق با فرمول‌های زیر خواهد بود (Ishihara, 1996):

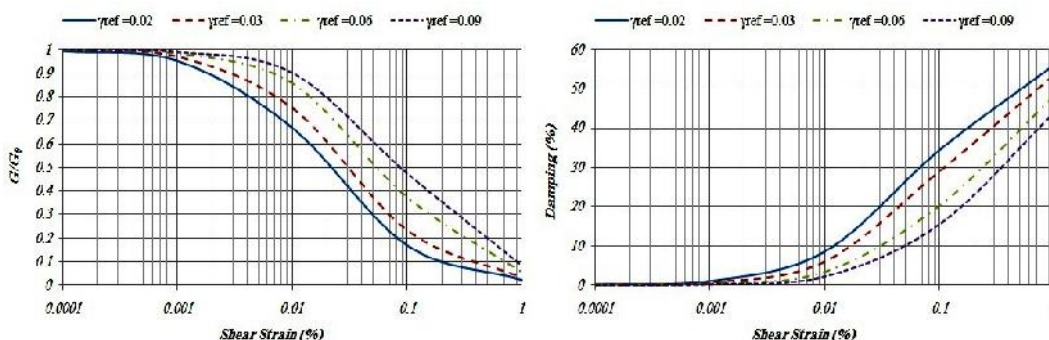
$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{x}{x_r}} \quad (1)$$

$$D = \frac{4}{f} \left(1 + \frac{1}{\frac{x}{x_r}}\right) \left(1 - \frac{1}{\frac{x}{x_r}} \ln\left(1 + \frac{x}{x_r}\right)\right) - \frac{2}{f} \quad (2)$$

G

و  $G_0$  به ترتیب مدول برشی و مدول برشی اولیه،  $D$  میرایی، کرنش برشی و  $r$  کرنش مرجع نامیده شده و نشان‌دهنده کرنش رفتار الاستیک خاک در تنشی برابر با تنش گسیختگی است. این پارامتر می‌تواند مطابق نمودار ۱ بر مدول برشی نرمال‌شده و میرایی و در نتیجه رفتار دینامیکی خاک تأثیر داشته باشد. از این رو تأثیر این پارامتر در این بررسی مورد توجه قرار گرفته است.





شکل 1: تأثیر پارامتر کرنش مرجع در نمودارهای مدول برشی نرمال شده و نسبت میرایی

برای ساخت مدل‌ها در هر دو نسخه دوبعدی و سه‌بعدی نرم‌افزار، مرزها از هر طرف تا مقدار ۳ الی ۵ برابر شعاع از مرکز مدل امتداد یافتند و ضخامت پی نیز دو برابر ارتفاع عارضه برای مدل دره و یک برابر ارتفاع عارضه برای مدل تپه در نظر گرفته شد. چنین ابعادی بر مبنای کنترل مدل‌های مختلف در نسخه دوبعدی نرم‌افزار جهت تعیین ابعاد بهینه مدل که در عین افزایش دقت تحلیل‌ها، سبب عدم افزایش بیش‌ازحد زمان تحلیل نیز شود، به‌دست‌آمده است. افزایش دقت تحلیل به معنای گستردگی کافی مدل به‌منظور اطمینان از جذب یا میرایی امواج در مرزها و کف مدل و عدم بازتاب آن‌ها است. شعاع یا نصف عرض عوارض نیز حداکثر ۲۰ متر لحاظ شده است. برای ساخت مدل‌های دوبعدی در ورژن سه‌بعدی برنامه، بعد سوم تا ابعاد قابل توجه امتداد یافته تا اثرات سه‌بعدی بودن تا حد امکان کاهش یابد. استفاده از مرزهای جاذب تعریف‌شده در نرم‌افزار نیز کمک می‌کند تا از تأثیر مرزها بر پاسخ دینامیکی مدل از طریق عدم انعکاس موج‌های تابیده‌شده به مرزها جلوگیری شود. رابطه ریاضی تپه‌های نیم سینوسی در دو بعد و در صفحه XZ به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده است و رابطه دره نیز به همان صورت ولی با علامت منفی خواهد بود:

$$\begin{aligned} z(x) &= 0.5h(1 + \cos(\pi x / b)) & |x| \leq b \\ z(x) &= 0 & |x| > b \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه  $h$  برابر ارتفاع یا عمق عارضه و  $b$  شعاع آن است. نسبت  $h/b$  نسبت شکل نامیده شده که تأثیر آن در پاسخ‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فضای سه‌بعدی نیز کافی است به‌جای پارامتر  $x$  در رابطه بالا، عبارت  $\sqrt{x^2 + y^2}$  جایگزین شود تا مقاطع سه‌بعدی نیم سینوسی تپه یا دره با مقطع دایره‌ای شکل در صفحه  $xy$  حاصل شود. جهت کنترل خروجی‌ها تعداد ۵ نقطه کنترلی در روی سطح تپه یا دره و در راستای محور موازی  $x$  و گذرنده از مرکز مدل در نظر گرفته شد. مختصات این نقاط به‌صورت  $x/b$  برابر ۰ (نقطه قله تپه یا کف دره)، ۰/۳۵ (تقریبی)، ۰/۷ (تقریبی)، ۱ (دامنه تپه یا دره) و ۲ (شرایط تقریبی میدان آزاد) بوده است.  $x$  فاصله از مرکز مدل و  $b$  شعاع یا نصف عرض مدل است. بدین ترتیب سه سری مدل در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های ساخته‌شده در نرم‌افزار FLAC 2D، مدل‌های دوبعدی در نرم‌افزار FLAC 3D و مدل‌های سه‌بعدی در نرم‌افزار FLAC 3D.

بسیاری از مطالعات گذشته پیرامون بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی در چارچوب بی‌بعد معرفی‌شده توسط Sanchez-Sesma (1983) انجام‌گرفته است. در این روش از پارامترهای بی‌بعد نظیر  $T$  برای تحلیل در حوزه فرکانس و زمان بی‌بعد برای تحلیل در حوزه زمان استفاده می‌شود که با رابطه‌های زیر تعیین می‌گردند:

$$T = \frac{1}{y} = \frac{fc}{\dot{S}b} = \frac{z}{2b} \quad (4)$$

$$\ddagger = \frac{tc}{2b} \quad (5)$$

$T$  پریود بی‌بعد، زمان بی‌بعد، فرکانس بی‌بعد،  $c$  سرعت موج برشی،  $b$  شعاع یا نصف عرض عارضه و  $y$  طول موج خواهد بود. این پارامترها در بردارنده هندسه مسئله، خصوصیات مصالح و ویژگی‌های حرکت ورودی بوده و ارزیابی و مطالعات پارامتریک مسئله با استفاده از این پارامترهای بی‌بعد، راحت‌تر خواهد بود.

به دلیل سادگی و از همه مهم‌تر، سرعت بالای تحلیل و محاسبات، در این بررسی از یک ریزموج یا موجک به‌عنوان یک پالس لرزه‌ای استفاده گردید. موجک لرزه‌ای در واقع زنجیره‌ای کوتاه از موج است که ویژگی‌های آن دارا بودن زمان آغاز معلوم و نیز محدود بودن انرژی است که با گذشت زمان میرا می‌شود. از تعریف موجک لرزه‌ای می‌توان چنین نتیجه گرفت که انرژی موجک در محدوده فرکانس‌های ویژه‌ای متمرکز است.



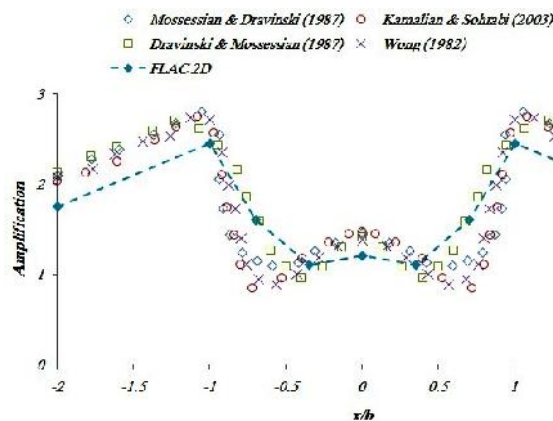
تعریف یک موجک به وسیله فرکانس غالب آن بسیار ساده‌تر از تعریف به وسیله شکل آن در بازه زمانی است. در این تحقیق از موجک ریکر (Ricker) به‌عنوان محرک ورودی و به‌صورت جابجایی از پیش تعیین‌شده استفاده گردید. این موجک پیش‌ازاین نیز در تحقیقات مشابه در بررسی تأثیر عوارض توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفته است (SohrabiBidar and Kamalian, 2003, 2010, 2013). موجک ریکر بر اساس دو پارامتر اصلی زمان مشخصه ( $t_0$ ) و فرکانس غالب ( $f_p$ ) و همچنین دامنه حداکثر ( $A_{max}$ ) به‌صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود. این موجک می‌تواند محدوده فرکانسی از نصف تا دو برابر فرکانس مرکزی خود را پوشش دهد. در نهایت مقدار پارامترهای موج ورودی برای تحلیل  $t_0 = 0.9$  در نظر گرفته شده تا هم شکل کاملی از تابع موج به دست آید و هم از انجام تحلیل‌های اضافی که تأثیری در جنبش مدل ندارند جلوگیری شود.  $A_{max} = 1mm$  و مدت‌زمان تداوم کل زلزله ۲/۵ ثانیه در نظر گرفته شد. محاسبه فرکانس غالب یا فرکانس زاویه‌ای موج مهاجم نیز با توجه به رابطه ۴ و فرض یک مقدار مشخص برای فرکانس بی‌بعد انجام می‌شود. بر این اساس دامنه موج ورودی در تحلیل‌های اصلی در حدود ۴/۸ برابر طول کلی عارضه‌ها (فرکانس غالب برابر ۴ هرتز و فرکانس بی‌بعد ۰/۲) بوده است که در محدوده‌ای محسوب می‌شود که می‌تواند تأثیرات زیادی بر عارضه داشته باشد (Geli, 1988). در بسیاری از مطالعات گذشته، محدوده پریودهای بی‌بعد از حدود ۰/۲۵ (پریودهای بسیار کوتاه) تا حدود ۸/۳۳ (پریودهای بسیار بلند) به‌عنوان محدوده پریودهای موردعلاقه در مسائل مهندسی و با توجه به ابعاد متداول عوارض توپوگرافی در شهرها در نظر گرفته شده است. نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که است که رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی به مقدار بسیار زیادی وابسته به این محدوده فرکانس یا طول موج ورودی خواهد بود و پیش‌ازاین مطالعات پارامتریک در این زمینه انجام شده است (SohrabiBidar and Kamalian, 2010, 2013). با توجه به این موضوع، محدوده فرکانسی مورد استفاده در این تحقیق و نتایج حاصل از آن مربوط به محدوده فرکانس‌های بی‌بعد پایین است.

$$a(t) = A_{max} \left[ 1 - 2(f \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2 \right] e^{(f \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2} \quad (6)$$

## عملکرد نرم‌افزار

به‌عنوان نخستین رویکرد در این تحقیق، نخست عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده بررسی می‌شود. بدین منظور به بررسی رفتار لرزه‌ای یک نمونه دره نیم‌دایره‌ای در نسخه دوبعدی نرم‌افزار و مقایسه پاسخ‌های حاصل با نتایج مطالعات قبل پرداخته می‌شود. مطابق مطالعات گذشته جنس مصالح معرفی شده برای مدل دوبعدی دره نیم دایره‌ای، ماسه‌سنگ با چگالی وزنی  $2.65 \text{ t/m}^3$ ، مدول یانگ  $11650 \text{ MPa}$ ، ضریب پواسون  $0.28$  و سرعت موج برشی تقریبی  $1300 \text{ m/s}$  بوده است. فرکانس بی‌بعد برابر  $0.5$  و شعاع مدل برابر  $100$  متر لحاظ شده است. بر این اساس مطابق رابطه ۴، مقدار فرکانس زاویه‌ای موج مهاجم برابر  $20/4$  دور در ثانیه محاسبه می‌شود. سایر پارامترهای محرک ورودی مطابق موارد ذکر شده در بالا است. برای پارامتر کرنش مرجع از چند مقدار در محدوده  $0.02$  تا  $0.11$  استفاده شده است.

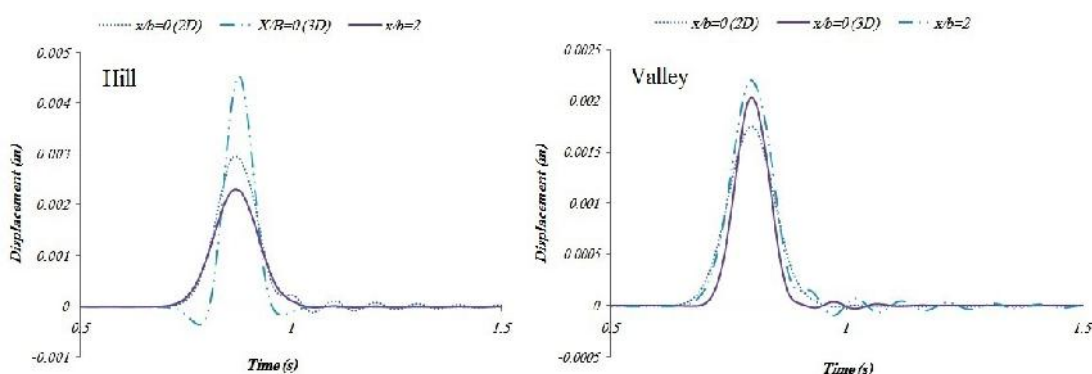
در نمودار ۲ مقایسه‌ای میان پاسخ طیفی بزرگنمایی افقی مدل با نتایج حاصل از مطالعات گذشته با نسبت میرایی ۵ درصد نشان داده شده است. الگوی بزرگنمایی طیفی از نسبت حداکثر دامنه طیف شتاب افقی ثبت‌شده در نقاط کنترلی روی سطح مدل به دامنه طیف محرک ورودی به دست آمده است. نمودار خط چین در این شکل مربوط به تحلیلی است که بیشترین همگرایی را به نتایج حاصل از مطالعات گذشته نشان داده که مربوط به مدل با کرنش مرجع برابر  $0.06$  است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شکل کلی تغییرات با آنچه از مطالعات گذشته حاصل شده است از یک روند خاص پیروی می‌کند. با این حال اختلافاتی بین مقادیر بزرگنمایی به‌خصوص در کناره‌های دره به چشم می‌خورد که با فاصله گرفتن از کناره‌های ناهنجاری توپوگرافی، همگرایی جواب‌ها بیشتر خواهد بود. چنین اختلافاتی با توجه به استفاده از روش‌های تحلیلی متفاوت در مطالعات قبلی تا حدودی قابل توجیه است.



شکل ۲: مقایسه مقادیر بزرگنمایی به دست آمده از نسخه دوبعدی نرم‌افزار با نتایج حاصل از مطالعات قبلی

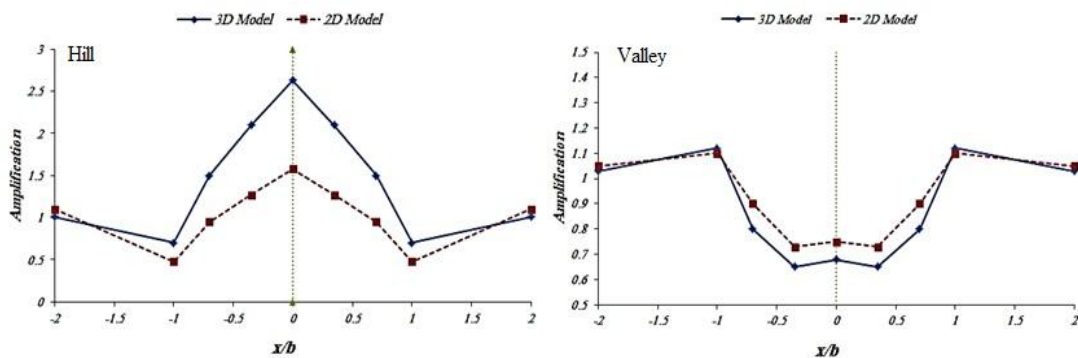
## تأثیرات سه‌بعدی مدل

جهت بررسی تأثیرات سه‌بعدی شدن مدل، به مقایسه پاسخ‌های حاصل از مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی ساخته‌شده در نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار پرداخته می‌شود. از دید جابجایی‌ها، در نمودار ۳ مقایسه‌ای میان تاریخچه تغییر مکان افقی در نقطه قله تپه و کف دره ( $x/b=0$ ) و در شرایط میدان آزاد برای مدل‌های با ضریب شکل  $0/4$  و کرنش مرجع برابر  $0/03$  انجام شده است. نقطه  $x/b=2$  بر روی سطح ساختگاه قرار دارد و تقریباً می‌توان شرایط این نقطه را مطابق حرکت میدان آزاد و دور از هندسه عارضه در نظر گرفت. نتایج تغییر مکان این نقطه میدان آزاد در مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی تقریباً یکسان بوده است. مطابق این نمودار مشاهده می‌شود که جابجایی قله تپه چه در حالت دوبعدی و چه در حالت سه‌بعدی، از تغییر مکان سطح ساختگاه بیشتر خواهد بود. با حرکت از سوی دامنه تپه به سمت قله، میزان تشدید تغییر مکان‌ها افزایش خواهد یافت. همچنین مدل سه‌بعدی، دامنه تغییر شکل بیشتری را نسبت به مدل دوبعدی از خود نشان داده است به‌گونه‌ای که در مدل سه‌بعدی، حداکثر تغییر مکان قله در حدود ۲ برابر حداکثر تغییر مکان نقطه میدان آزاد به دست آمده است. این در حالی است که برای مدل دوبعدی، این نسبت برابر  $1/3$  بوده است. برخلاف عارضه تپه، برای مدل دره، تفاوت دامنه نتایج اندک بوده و نقطه کف، تغییر مکان کمتری را نسبت به نقطه میدان آزاد تجربه می‌کند. به عبارتی جابجایی‌ها دچار تعدیل می‌شود به طوری که نسبت حداکثر دامنه جابجایی کف به نقطه دامنه آزاد برابر  $0/8$  برای مدل دوبعدی و  $0/9$  برای مدل سه‌بعدی است.



شکل ۳: تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی مرکز مدل‌های تپه و دره دو و سه‌بعدی با ضریب شکل  $0/4$  و کرنش مرجع برابر  $0/03$

در نمودار ۴ روند تغییرات بزرگنمایی طیفی در مدل‌های تپه و دره نشان داده شده است. در این قسمت بزرگنمایی افقی طیفی مدل‌ها در یک نقطه به صورت نسبت حداکثر دامنه طیف شتاب افقی آن نقطه به حداکثر دامنه طیف شتاب افقی در روی سطح آزاد ساختگاه (نقطه  $x/b=2$ ) تعریف شده است. مطابق این نمودار نقطه قله تپه دارای بیشترین مقدار بزرگنمایی است. این مقدار با افزایش فاصله از نقطه قله کاهش یافته و حتی در محل دامنه تپه، الگوی رفتاری به صورت کوچک نمایی تغییر کرده است. مدل سه‌بعدی مقادیر بزرگنمایی بیشتری را نسبت به مدل دوبعدی نشان داده است. برای مدل‌های دره برخلاف مدل تپه، در کف یا مرکز مدل شاهد کوچک نمایی هستیم که به تدریج با فاصله گرفتن از مرکز مدل، مقدار آن کاهش می‌یابد تا در نقطه لبه دره شاهد تغییر رفتار به وضعیت بزرگنمایی باشیم. این رفتار دقیقاً عکس چیزی است که در مدل تپه مشاهده شد. همچنین تفاوت نتایج مدل دوبعدی و سه‌بعدی در مدل دره نسبت به مدل تپه بسیار کمتر است. با توجه به این نمودار و نیز نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان‌ها به نظر می‌رسد که اثرات سه‌بعدی شدن در مدل دره نسبت به مدل تپه بسیار کمتر خواهد بود. از این رو استفاده از مدل‌های دوبعدی دره به جای مدل‌های سه‌بعدی متقارن در ارزیابی پاسخ دینامیکی ساختگاه می‌تواند معقول باشد.



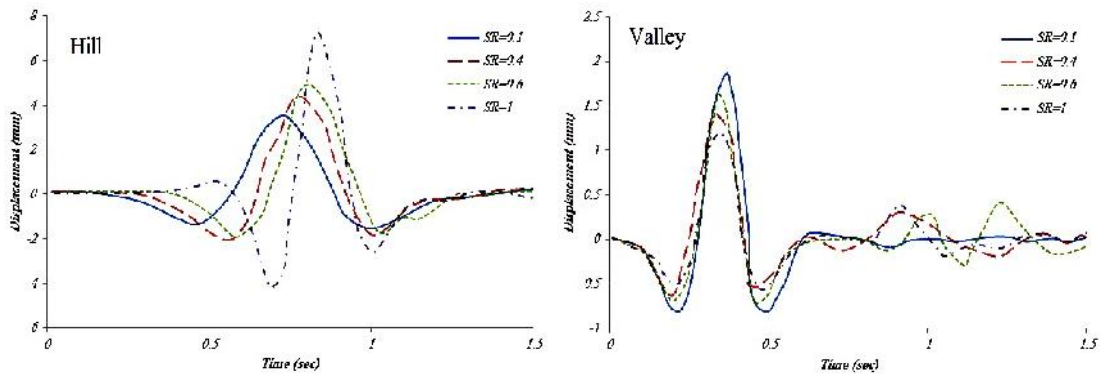
شکل ۴: تغییرات بزرگنمایی طیفی افقی در مدل‌های تپه و دره دو و سه‌بعدی با ضریب شکل  $0/4$  و کرنش مرجع برابر  $0/03$



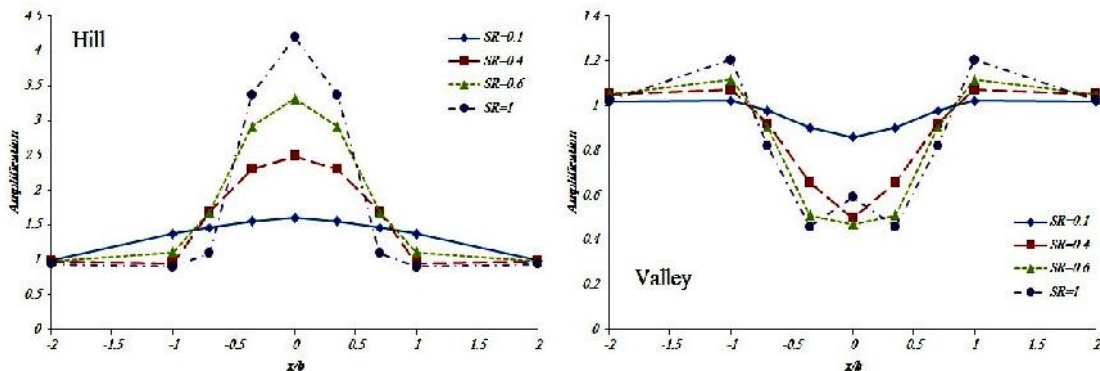


## تأثیر ضریب شکل

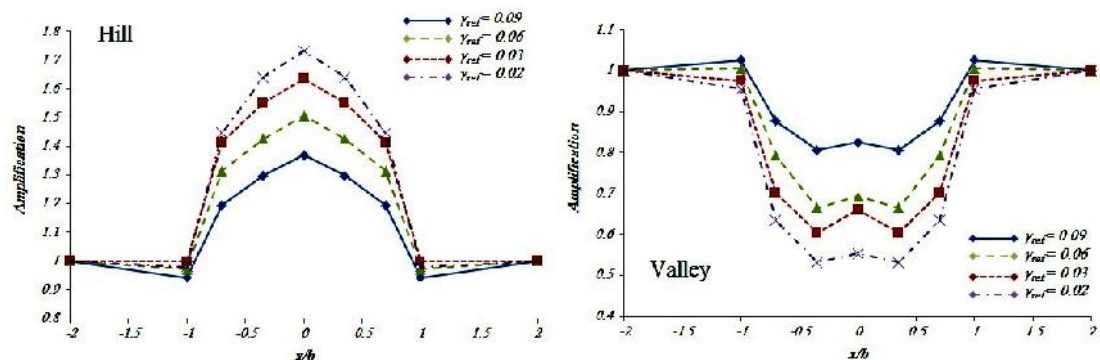
شکل ۵ نشان‌دهنده تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی در مرکز مدل‌های سه‌بعدی با نسبت‌های شکل متفاوت و کرنش مرجع برابر  $0.03$  است. مطابق این نمودار با افزایش نسبت شکل، حداکثر جابجایی در مرکز یا قله مدل‌های تپه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر مرکز تپه‌هایی با ارتفاع بیشتر، تغییر مکان‌های بیشتری را از خود نشان خواهند داد. این در حالی است که برای مدل‌های دره، رفتاری کم‌وبیش متضاد مشاهده می‌شود. برای دره‌ها با افزایش نسبت شکل از مقدار جابجایی مرکز مدل کاسته می‌شود. به عبارتی مرکز دره‌های عمیق‌تر، شاهد تغییر مکان‌های کمتری خواهد بود. در شکل ۶ نیز الگوهای بزرگنمایی افقی طیفی مدل‌های دره و تپه برای نسبت‌های شکل متفاوت نشان داده است. پتانسیل بزرگنمایی در تپه‌ها و کوچک‌نمایی در دره‌ها با افزایش نسبت شکل، افزایش می‌یابد، بدین معنا که در تپه‌های بلندتر شاهد افزایش مقدار بزرگنمایی و در دره‌های عمیق‌تر شاهد افزایش کوچک‌نمایی طیفی خواهیم بود. تغییر الگو از بزرگنمایی به کوچک‌نمایی در لبه مدل دره‌ها با افزایش ضریب شکل نیز قابل توجه است.



شکل ۵: تأثیر ضریب شکل بر تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی مرکز مدل‌های تپه و دره سه‌بعدی با کرنش مرجع برابر  $0.03$



شکل ۶: تأثیر ضریب شکل بر الگوی بزرگنمایی طیفی افقی مدل‌های تپه و دره سه‌بعدی با کرنش مرجع برابر  $0.03$



شکل ۷: تأثیر پارامتر کرنش مرجع بر الگوی بزرگنمایی طیفی افقی مدل‌های تپه و دره دوبعدی با ضریب شکل  $0.4$

## تأثیر کرنش مرجع

شکل ۷ نشان‌دهنده الگوی بزرگنمایی طیفی افقی در مدل‌های دوبعدی تپه و دره با نسبت شکل ۰/۴ و مقادیر متفاوت کرنش مرجع است. آنچه از این نمودارها مشهود است، کاهش پتانسیل بزرگنمایی در مدل تپه و کاهش پتانسیل کوچک‌نمایی در مدل دره با افزایش مقدار کرنش مرجع است. کاهش کرنش مرجع به معنای ضعیف‌تر شدن خاک در برابر بارگذاری دینامیکی است که سبب کاهش سریع‌تر در مقدار مدول برشی و تولید میرایی بیشتر به ازای یک مقدار کرنش برشی سیکلی خواهد شد.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از تحلیل‌های عددی اختلاف محدود، به مقایسه‌ای اولیه از رفتار لرزه‌ای عارضه‌های نیم سینوسی به صورت تپه و دره پرداخته شود. برای این منظور مدل‌های تپه و دره با هندسه دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از یک ریزموج با زمان تداوم محدود مورد بررسی قرار گرفت.

مطابق نتایج مشاهده شد که چگونه هندسه عارضه می‌تواند رفتار لرزه‌ای ساختگاه را دچار تغییر نماید. به‌عنوان مثال در قله مدل‌های تپه شاهد هم بزرگنمایی جابجایی‌های افقی و هم بزرگنمایی افقی طیفی هستیم که با افزایش فاصله از قله به سمت دامنه، از مقدار آن کاسته خواهد شد. اثرات سه‌بعدی بودن مدل نیز در این قسمت قابل توجه بوده و به صورت کلی مدل سه‌بعدی ضرایب بزرگ‌تری نسبت به مدل دوبعدی داشته است. این نتایج برای مدل‌های دره برعکس بوده است به‌گونه‌ای که کف دره دچار کوچک‌نمایی جابجایی افقی و طیفی شده است که با فاصله از مرکز، از مقدار آن کاسته خواهد شد. تأثیرات سه‌بعدی بودن مدل در این حالت چندان قابل توجه نبوده و برعکس حالت مدل‌های تپه‌ای شکل، در مدل‌های دره ضرایب بزرگنمایی مدل سه‌بعدی بعضاً از مدل دوبعدی کمتر نیز بوده است. هرچند در نهایت مشاهده شد که شکل الگوهای بزرگنمایی بر اثر سه‌بعدی شدن مدل در کل تغییر چندان نمی‌کند و این تغییرات اکثراً در جزئیات رفتاری مشاهده شده است. همچنین مشاهده شد که با افزایش نسبت شکل، حداکثر جابجایی در مرکز یا قله مدل‌های تپه افزایش و در مرکز مدل‌های دره کاهش خواهد یافت. پتانسیل بزرگنمایی در تپه‌ها و کوچک‌نمایی در دره‌ها نیز با افزایش نسبت شکل، افزایش می‌یابد. کاهش پتانسیل بزرگنمایی در مدل تپه و کاهش پتانسیل کوچک‌نمایی در مدل دره با افزایش مقدار کرنش مرجع نیز از دیگر نتایج حاصل از این تحقیق بوده است. این نتایج با توجه به استفاده از محدوده فرکانس بی‌بعد پایین در این تحقیق حاصل شده است.

## مراجع

پنجی م، کمالیان م، عسگری ج، و جعفری م (۱۳۹۱) مروری بر ادبیات فنی تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج مهاجم SH، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال پانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۹۱

Bouchon M, Schultz CA and Toksos MN (1996) Effect of Three-Dimensional Topography on Seismic Motion, Journal of Geophysical Research, 101(B3): 5835-5846

Dravinski M and Mossessian T (1987) Scattering of Plane Harmonic P, SV, and Rayleigh Waves by Dipping Layers of Arbitrary Shape, Bulletin of the Seismological Society of America, 77(1): 212-235

Geli L, Bard PV and Julien B (1988) The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 78, pp. 42-63

Ishihara K (1996) Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Oxford Science Publications, pp. 360

Itasca Consulting Group (2013) FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA

Kamalian M, Gatzmiri B and Sohrabi-Bidar A (2003) On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM, JSEE, 5, 35-45

Mossessian TK and Dravinski M (1987) Application of a hybrid Method for Scattering of P, SV, and Rayleigh Waves by Near-Surface Irregularities, Bulletin of the Seismological Society of America, 77(5): 1784-1803

Sanchez-Sesma FJ, Bravo MA and Herrera I (1985) Surface motion of topographical irregularities for incident P, SV, and Rayleigh waves, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 263-269



- Sohrabi Bidar A, Kamalian M and Jafari MK (2010) Seismic Response of 3D Gaussian Shaped Valleys to Vertically Propagating Incident Waves, *Geophysical Journal International*, 183 (3): 1429-1442
- Sohrabi Bidar A and Kamalian M (2013) Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 52, 1-12
- Wong HL (1982) Effect of Surface Topography on the Diffraction of P, SV, and Rayleigh Waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(4): 1167-1183

