

## تأثیر شکل عوارض توپوگرافی دره‌ای شکل بر پتانسیل روانگرایی خاک‌ها

حمید علی الهی

استاد یار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، گروه عمران، زنجان، ایران  
h.alielahi@iauz.ac.ir

مهدی نقیلو

دانش آموخته کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، گروه عمران، زنجان، ایران  
mehdy1358@yahoo.com

**کلید واژه‌ها:** عوارض توپوگرافی دره‌ای شکل، بزرگنمایی، اضافه فشار آب حفره‌ای، مدل عددی تنش موثر

### چکیده

شرایط ساختمانی و توپوگرافی می‌تواند بر تمام پارامترهای مهم یک جنبش نیرومند زمین از قبیل مدت تداوم دامنه، طول موج و غیره اثرگذار باشد. مهندسان بطور سنتی، چنین اثراتی را با استفاده از مدل‌های ساده مبتنی بر توصیف یک بعدی از پروفیل محلی خاک و انتشار امواج لرزه‌ای و با موفقیت ارزیابی نموده‌اند، لذا صرفاً ساختمانهایی برای این نوع مدل‌سازی مناسب خواهند بود که از گستردگی نسبتاً وسیعی در پهنای منطقه مورد مطالعه نسبت به ضخامت لایه رسوبی برخوردار باشند. از طرفی پیچیدگی وجود خاک‌های نرم و سست در دره‌ها و اثرات آنها بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دره‌ای شکل، لزوم بررسی این اثرات را دوچندان می‌کند. در این بین، خاکهای نرم با پتانسیل روانگرایی و ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای می‌تواند به پیچیدگی این پاسخ‌ها و الگوهای بزرگنمایی بیافزاید. در این تحقیق با استفاده از مدل رفتاری تنش موثر موجود در نرم افزار Flac 2D مبتنی بر روش تفاضل محدود، به مطالعه پاسخ لرزه‌ای و الگوهای بزرگنمایی دره‌های پر شده با مصالح خاکی سست با پتانسیل روانگرایی و اضافه فشار آب حفره‌ای، پرداخته شده است. در این راستا با تغییر پارامترهای هندسی تأثیرگذار در مساله نظیر شکل دره دوزنقه‌ای در مقایسه با اشکال دیگر و فرکانس‌های متفاوت موج ورودی در قالب مطالعات پارامتریک به آرایه الگوهای بزرگنمایی در نقاط مختلف دره پرداخته شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که روانگرایی در دره‌های رسوبی بیشتر از زمین آزاد بدون وجود عوارض توپوگرافی به وقوع می‌پیوندد و شروع پدیده روانگرایی با سرعت بیشتری از گوشه دره آغاز می‌شود.

### مقدمه

امروزه اهمیت تأثیر شرایط محلی خاک و توپوگرافی سطحی و شرایط ساختمانی بر شدت و وسعت خرابی ساختمان‌ها و توزیع مکانی آنها حین زلزله کاملاً آشکار است. بررسی تأثیر شرایط ساختمانی در برابر امواج لرزه‌ای، از جمله مباحث مهم در زمینه دانش مهندسی زلزله می‌باشد. فلسفه اهمیت این موضوع، الگوهای رفتاری پیچیده عوارض توپوگرافی بوده که منجر به ایجاد تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بین امواج گسیل شده از چشمه و امواج رسیده به سطح زمین می‌شود. شرایط ساختمانی و توپوگرافی می‌تواند بر تمام پارامترهای مهم یک جنبش نیرومند زمین از قبیل مدت تداوم دامنه، طول موج و غیره اثرگذار باشد. اثرات محلی ساختمانی نقش مهمی در طراحی مقاوم در برابر زلزله ایفا نموده و بایستی بصورت مجزا با آن پرداخته شود. مهندسان بطور سنتی، چنین اثراتی را با استفاده از مدل‌های ساده مبتنی بر روش‌های یک بعدی (1D) از پروفیل محلی خاک و انتشار امواج لرزه‌ای و با موفقیت ارزیابی نموده‌اند. لذا ساختمانهایی برای این نوع مدل‌سازی مناسب خواهند بود که از گستردگی نسبتاً وسیعی در پهنای منطقه مورد مطالعه نسبت به ضخامت لایه رسوبی برخوردار باشند. لیکن حوادث اخیر نظیر زلزله هیوگوکن نانبو ژاپن سبب مرگ ۶۰۰۰ تن گردید که پیچیدگی قابل ملاحظه‌ای در الگوهای تقویت لرزه‌ای حاصل از اثرات ساختمانی 2D و 3D را آشکار ساخت. از طرفی پیچیدگی وجود خاک‌های نرم و سست در دره‌ها و اثرات آنها به پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دره‌ای شکل، لزوم بررسی این اثرات را دوچندان می‌کند. در این بین خاکهای نرم با پتانسیل روانگرایی و ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای می‌تواند به پیچیدگی این پاسخ‌ها و الگوهای تغییر مکان بیافزاید. سونگ [۱] در سال ۱۹۹۷ به مطالعه اثر هم‌زمان عوارض توپوگرافی زمین و روانگرایی بر پاسخ لرزه‌ای زمین پرداختند. در این راستا به



منظور انجام این مطالعه از روش اجزای مرزی با مدل رفتاری غیر خطی خاک استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مقادیر بزرگنمایی تحت تاثیر دو پارامتر سرعت موج برشی مصالح داخل دره و زیر آن و همچنین نسبت عمق به عرض دره می باشد. گلاگوتی و همکارانش [۲] در سال ۲۰۱۰ به بررسی انتشار موج لرزه‌ای در یک عارضه دره‌ای شکل پر شده با مصالح نرم آبرفتی تحت امواج قائم SV و P پرداختند. تحقیقات آنها با استفاده از مدل غیر خطی تنش کل به صورت دو بعدی انجام گرفت. نتایج نشان داد که تاثیرات تمرکز موج در نزدیکی لبه‌های دره و امواج سطحی تولید شده در گوشه‌های آن نقش اصلی در تشدید قابل توجه ضرایب بزرگنمایی حرکت لرزه‌ای دارد. گلاگوتی و همکارانش [۳] در سال ۲۰۱۲ به مطالعه تحلیل غیر خطی دره‌های دوزنقه‌ای در معرض تابش امواج SV با انتشار عمودی پرداختند. در این تحقیق پاسخ لرزه‌ای عوارض دره ای شکل پر شده با مصالح سست با دو مدل خطی و غیر خطی (بدون لحاظ فشار آب حفره‌ای) مورد مقایسه قرار گرفت. مطالعات آنها نشان داد که با ملایم شدن شیب دره، مقادیر بزرگنمایی کاهش یافته و پاسخ‌ها به پاسخ‌های سطح آزاد گرایش پیدا می‌کند. همچنین پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل‌های یک بعدی نتایج محافظه کارانه‌ای برای مقادیر بزرگنمایی دارند.

با توجه به تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود که تاکنون مطالعات محدودی در زمینه تاثیر عوارض توپوگرافی دره‌ای شکل بر پاسخ لرزه‌ای خاک‌های سست با پتانسیل ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای و روانگرایی مبتنی بر تنش موثر انجام شده است. لذا در این تحقیق، به بررسی پارامتریک شکل دره‌های دوزنقه‌ای در مقایسه با اشکال دیگر و اندرکنش لرزه‌ای آنها با خاکهای روانگرا پرداخته شده است.

## مدلسازی عددی و اعتبار سنجی مدل

در این تحقیق به بررسی شکل دره‌های دوزنقه‌ای پر شده با مصالح سست روانگرا بر الگوهای بزرگنمایی سطح زمین تحت انتشار امواج قائم زلزله کوبه پرداخته شده است. در این راستا از برنامه دو بعدی Flac2D مبتنی بر روش تفاضل محدود استفاده شده است. این برنامه دارای قابلیت‌های فراوان از جمله در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ، مدل‌های رفتاری مختلف خاک و در نظر گرفتن فشار آب می‌باشد. به منظور مدلسازی مصالح نرم با پتانسیل روانگرایی از مدل تنش موثر فین [۴] استفاده شده است. در این مدل با استفاده از رابطه تجربی مارتین و همکاران [۱] ارتباط میان کاهش حجم توده خاک ( $\Delta V_{\epsilon d}$ ) و میزان بزرگی کرنش‌های برشی تناوبی ( $\gamma$ ) محاسبه می‌شود.

$$\Delta V_{\epsilon d} = c_1 (X - c_2 V_{\epsilon d}) + \frac{c_3 V_{\epsilon d}^2}{X + c_4 V_{\epsilon d}} \quad (1)$$

برن در سال ۱۹۹۱ [۶] رابطه ساده‌تری نسبت به رابطه مارتین جهت محاسبه ( $\Delta V_{\epsilon d}$ ) ارائه نمودند.

$$\frac{\Delta V_{\epsilon d}}{X} = c_1 \exp(-c_2 (\frac{V_{\epsilon d}}{X})) \quad (2)$$

که در این رابطه مقدار  $c_1$  در رابطه ۲ با تراکم نسبی خاک مرتبط شده و به صورت رابطه زیر ارائه شده است.

$$c_1 = 7600(Dr)^{-2.5} \quad (3)$$

و همچنین ثابت  $c_2$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$c_2 = \frac{c_1}{0.4} \quad (4)$$

به منظور اطمینان به نتایج مدلسازی عددی و دستیابی به پارامترهای صحیح، مدل عددی یک بعدی پروفیل روانگرایی حل شده توسط سونگ [۲] ۱۹۹۷ مورد صحت سنجی قرار گرفته است. شرایط ژئوتکنیکی مساله مورد بررسی مطابق شکل ۱ ارائه شده است. پروفیل خاک مورد نظر شامل یک لایه ماسه‌ای با عدد SPT بین ۷ تا ۲۰ می‌باشد که دارای پتانسیل روانگرایی است. این مساله در برنامه تفاضل محدود Flac با استفاده از مدل فشار آب حفره‌ای فین [۴] مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای ( $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_0}$ ) پیش‌بینی شده توسط برنامه Flac با مطالعات پیشین سونگ [۱] هم‌خوانی مناسبی دارد. لذا مقادیر  $c_1$  و  $c_2$  مدل کالیبره شده اضافه فشار آب حفره‌ای در این تحقیق به ترتیب برابر ۰/۷۶ و ۰/۵۶ حاصل شده است.

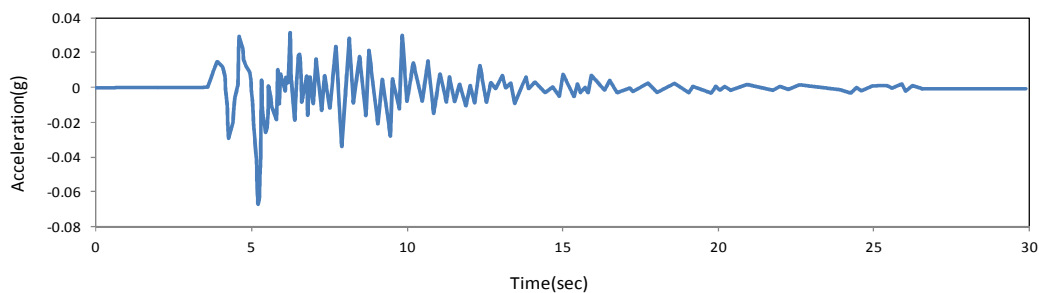
لازم به ذکر است که ابعاد مش بندی در مدل با استفاده تحلیل‌های حساسیت ابعاد و نیز با در نظر گرفتن تئوری انتشار امواج برشی در محیط و با توجه به فرکانس موج ورودی کنترل شده است که می‌توان با استفاده از رابطه زیر اندازه المان‌ها (مش‌بندی) را بدست آورد:

$$f = \frac{C_s}{(5 \text{ to } 10)\Delta L} \quad (5)$$

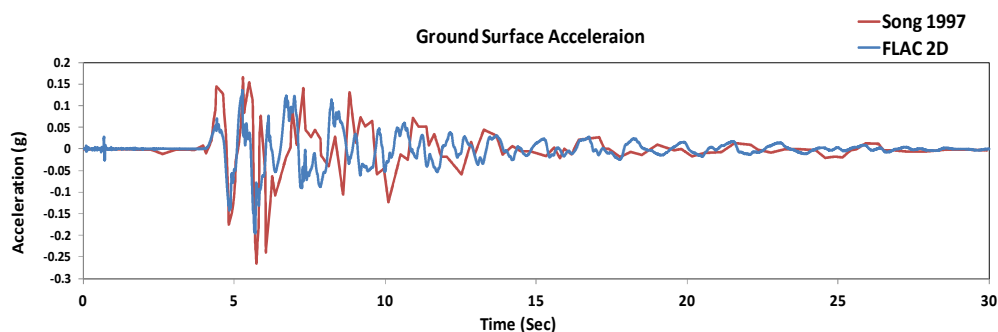
در رابطه فوق،  $C_s$  سرعت موج برشی در محیط،  $f$  فرکانسی مورد نظر برای مش بندی و  $L$  ابعاد المان تفاضل محدود می باشد. مدل های دارای المان های ریزتر هر چند قادر به مدل سازی دقیق محدوده ی فرکانسی بزرگتری می باشند، ولی با توجه به تعداد بالای تحلیل های صورت گرفته این ابعاد به مدت زمان زیادی جهت انجام تحلیل دینامیکی نیاز دارند؛ بنابراین، از میان این مدل ها، مدلی انتخاب می گردد که ضمن حفظ دقت مساله نیاز به زمان کمتری برای انجام تحلیل داشته باشد. ابعاد المان ها مدل عددی در این تحقیق، با توجه به تحلیل حساسیت و فرکانس موج های ورودی، برابر ۱ در نقاط نزدیک دره و ۲ متر نقاط دور انتخاب شده است. همچنین علاوه بر دور نمودن ابعاد مدل از طرفین مدل عددی، از مرزهای میدان-آزاد (Free-field) در طرفین مدل به منظور جلوگیری از تأثیر انعکاس امواج استفاده شده است.

Depth (m)	Soil Type	Soil Profile	SPT N-value	$V_s$ m/sec	$V_p$ m/sec	$G_s$ * to $P_n$	Damping ratio *
0	W.T.		< 10	170	330	$4 \times 10^7$	0.02
10	Sandy gravel fill		7 - 20	210	780	$8.4 \times 10^5$ to $8.4 \times 10^7$	0.02 to 0.4
20	Silty clay		< 10	180	1480	$5.3 \times 10^7$	0.02
30	Gravelly sand and silty		18	245	1330	$11 \times 10^7$	0.01
40	Alternate layers of gravelly sand and silt (Diluvium)		35	305	1530	$18 \times 10^7$	0.01
50							
60	Silty clay (Diluvium)		12	303	1610	$23 \times 10^7$	0.01
80				320	2000	$20 \times 10^7$	0.01

شکل ۱: شرایط ژئوتکنیکی مساله بررسی شده توسط سونگ [۱]

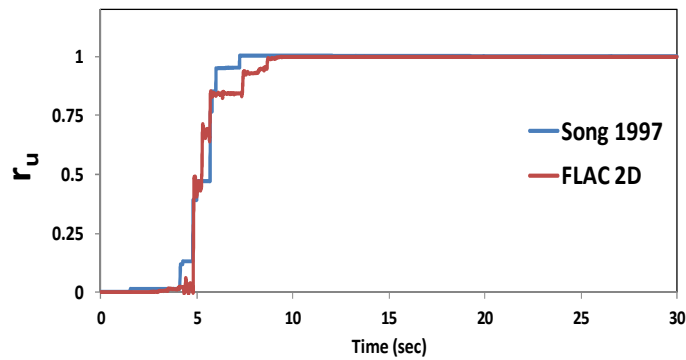


شکل ۲: تاریخچه زمانی شتاب ورودی (زلزله کوبه) مدل سونگ [۱]



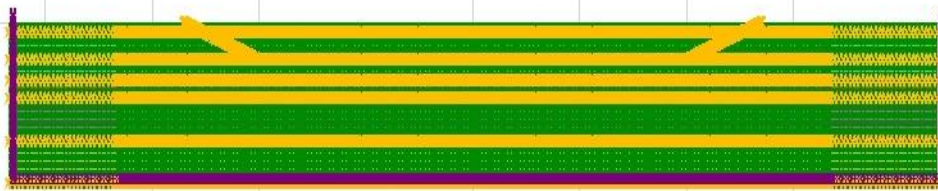
شکل ۳: مقایسه تاریخچه زمانی شتاب در سطح زمین مدل عددی تحقیق حاضر با مطالعات سونگ [۱]



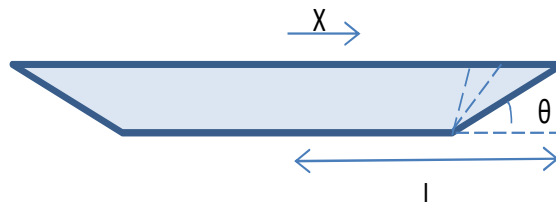


شکل ۴: مقایسه تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره ای مدل عددی تحقیق حاضر با مطالعات سونگ [۱] در عمق ۱۲ متری

در ادامه بر مبنای مدل عددی اعتبار سنجی شده، اشکال مختلف دره دوزنقه ای با زوایای شیب ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ درجه به صورت دوبعدی در نرم افزار Flac مدل سازی شده که در اشکال ۵ و ۶ ارایه شده است. در این تحقیق منظور از حداکثر بزرگنمایی عبارت است از حاصل تقسیم حداکثر دامنه فوریه پاسخ سطح زمین با وجود دره بر حداکثر دامنه فوریه بدون حضور دره می باشد. موج ورودی در نظر گرفته شده به منظور انجام مطالعات پارامتریک، از همان شتابگاشت مدل اعتبارسنجی شده یعنی تاریخچه زمانی شتاب زلزله کوبه مطابق شکل ۲ می باشد.



شکل ۵: هندسه مدل دوزنقه ای، لایه های خاک به همراه شرایط مرزی آنی در برنامه Flac2D



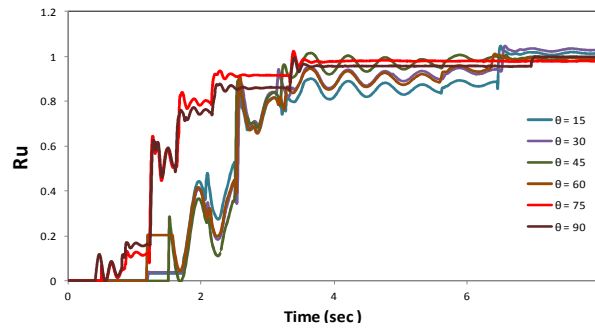
شکل ۶: نمای شماتیک دره دوزنقه ای به همراه پارامترهای آن

## بررسی نتایج بدست آمده

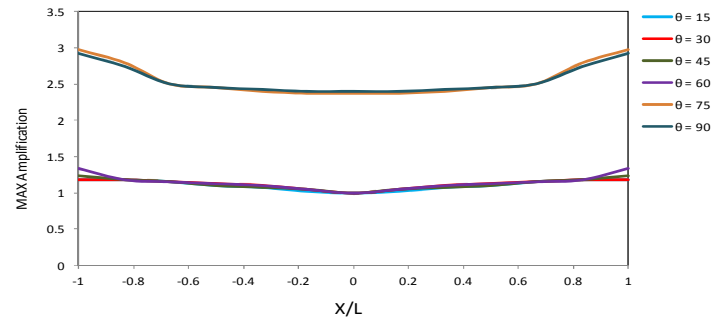
اکثر شهرها و بناها بر روی دره های آبرفتی سست واقع شده اند. لذا بررسی و مطالعه اثرات لایه های آبرفتی به ویژه در مناطق لرزه خیز و تأثیر آنها بر پاسخ لرزه ای سطحی زمین و اندرکنش آنها با عوارض توپوگرافی دره ای شکل جزو چالش های مهم مهندسی ژئوتکنیک می باشد. لذا در این تحقیق سعی شده در چهارچوب مطالعات عددی به این موضوع پرداخته شود. در این راستا در قالب مطالعات پارامتریک بر روی مدل صحنه گذاری شده تأثیر عوامل مختلفی نظیر زاویه دره دوزنقه ای، شکل دره و فرکانس موج ورودی بر الگوی بزرگنمایی و مقادیر طیف پاسخ نقاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

مطابق شکل ۷، به تأثیر زاویه دره ( ) دوزنقه ای شکل بر الگوی اضافه فشار آب حفره ای پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می شود در دره دوزنقه ای با افزایش زاویه دره، نسبت اضافه فشار آب حفره ای سریعتر به یک (روانگرایی) رسیده است. به عبارت دیگر فشار آب حفره ای بیشتری در گوشه به علت اثر شکل توپوگرافی و انتشار امواج سطحی رایلی در برخورد با گوشه دره ایجاد شده است. لذا این موضوع موجب افزایش سریعتر شروع روانگرایی (افزایش اضافه فشار آب حفره ای) در دره تیز گوشه تر با زوایای شیب بیشتر می باشد.

همچنین در شکل ۸، نتایج ماکزیمم بزرگنمایی در زوایا مختلف دره دوزنقه ای شکل در فواصل مختلف از مرکز دره قابل مشاهده است. نتایج بدست آمده برای این مدل نشان می دهند که با فاصله گرفتن از مرکز دره به گوشه دره در سطح زمین و با افزایش زوایای شیب دره، مقادیر ماکزیمم بزرگنمایی افزایش می یابد که این مقادیر در دو زاویه ۷۵ و ۹۰ درجه به حداکثر مقدار خود رسیده است.

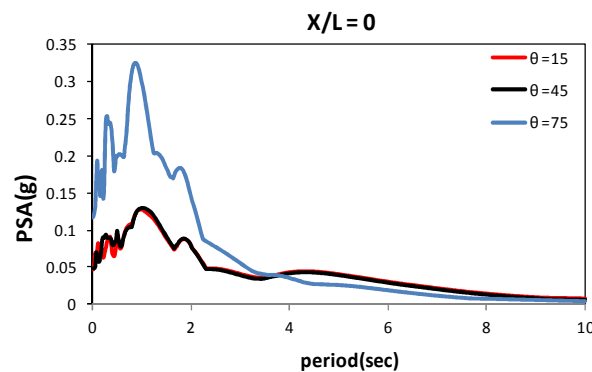


شکل ۷: تاریخچه زمانی  $r_u$  در عمق ۱۲ متری از سطح زمین در لایه روانگرا برای زوایای مختلف دره دوزنقه‌های شکل

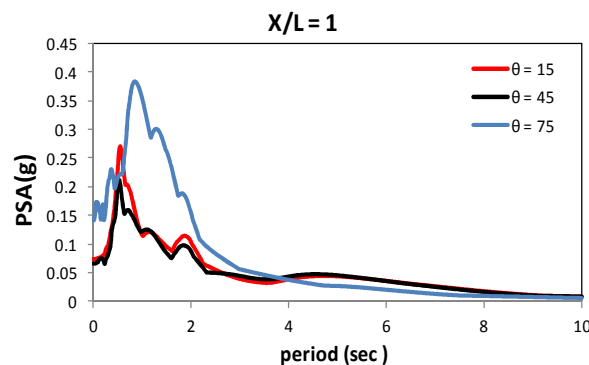


شکل ۸: نمودار ماکزیمم مقادیر بزرگنمایی در فواصل مختلف سطح دره بر حسب  $X/L$

در شکل ۹ و ۱۰ مقادیر طیف پاسخ شتاب در دو نقطه وسط ( $X/L=0$ ) و گوشه دره ( $X/L=1$ ) برای زوایای مختلف عارضه توپوگرافی دره نشان داده شده است. نتایج به دست آمده برای این مدل نشان می‌دهند. با افزایش زاویه دره دوزنقه‌ای و تیز گوشه تر شده آن، مقادیر طیف پاسخ در محدوده پریودهای ۰/۱ تا ۱ ثانیه افزایش می‌یابند و در پریودهای بالا این تاثیر را بین می‌رود. از طرفی مقادیر طیف پاسخ در گوشه دره به علت اثر شکل توپوگرافی نسبت به نقطه وسط دره بیشتر حاصل شده است.



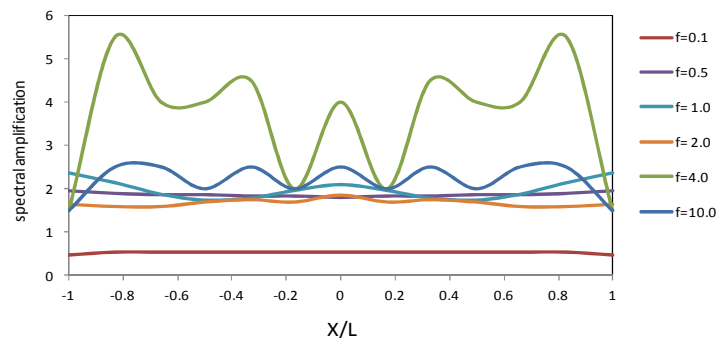
شکل ۹: نمودار طیف پاسخ در وسط دره ( $X/L=0$ ) برای زوایای مختلف دره دوزنقه‌های شکل



شکل ۱۰: نمودار طیف پاسخ در گوشه دره ( $X/L=1$ ) برای زوایای مختلف دره دوزنقه‌های شکل

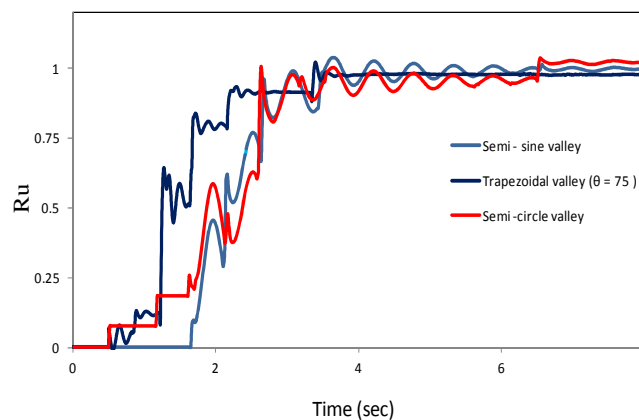


همچنین نمودار بزرگنمایی سطح دره با زاویه ۷۵ درجه در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که مقادیر بزرگنمایی طیفی در نزدیک گوشه دره بعلاوه اثر شکل توپوگرافی بیشتر بوده و در پروفیل خاک مورد مطالعه مقادیر حداکثر بزرگنمایی در فرکانسهای بالای موج ورودی (پریودهای پایین) بدست آمده است. به عبارت دیگر حضور دره موجب تحریک بیشتر مقادیر بزرگنمایی سطح زمین در فرکانسهای بالا موج ورودی می گردد. البته حداکثر این مقادیر در فرکانس ۴ ایجاد شده است.

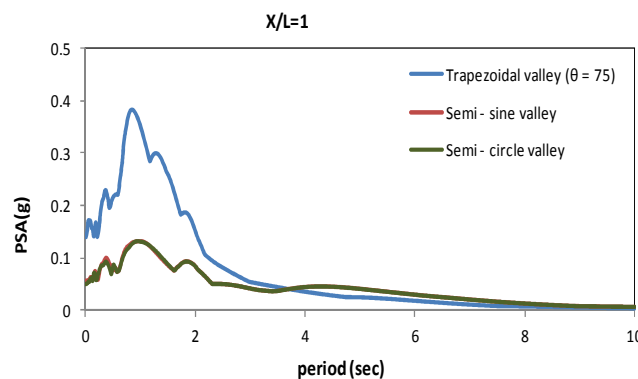


شکل ۱۱: نمودار بزرگنمایی طیفی پاسخ روی سطح زمین برحسب فرکانس مختلف برای دره دوزنقه‌ای با زاویه ۷۵ درجه

همچنین در شکل ۱۲ مقایسه تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای برای شکل‌های مختلف دره شامل دره‌های نیم سینوسی و نیم‌دایره‌ای با دره دوزنقه‌ای شکل با زاویه شیب ۷۵ درجه نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که دره دوزنقه‌ای با افزایش فشار آب حفره‌ای سریع‌تری نسبت به اشکال دیگر دره، روانگرایی را تجربه کرده است. به عبارت دیگر اضافه فشار آب حفره‌ای به علت نرم تر بودن شکل‌های دره‌های نیم سینوسی و نیم‌دایره‌ای نسبت به دره دوزنقه‌ای شکل موجب افزایش سریع‌تر شروع روانگرایی در دره دوزنقه‌ای شکل شده است. همچنین مطابق شکل ۱۳ در مقادیر طیف پاسخ دره دوزنقه‌ای شکل در گوشه دره و در پریودهای کم نسبت دره سینوسی و نیم‌دایره‌ای شکل، افزایش بیشتری مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲: تاریخچه زمانی  $R_u$  در عمق ۱۲ متری از سطح زمین در لایه روانگرا برای اشکال مختلف شکل دره



شکل ۱۳: مقایسه نمودارهای طیف پاسخ در گوشه دره برای اشکال مختلف عوارض توپوگرافی دره

## جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از مدل رفتاری تنش موثر موجود در نرم افزار Flac 2D مبتنی بر روش تفاضل محدود، به مطالعه پاسخ لرزه‌ای و الگوهای بزرگنمایی دره‌های پر شده با مصالح خاکی سست با پتانسیل روانگرایی و اضافه فشار آب حفره‌ای، پرداخته شده است. در این راستا با تغییر پارامترهای هندسی تاثیرگذار در مساله نظیر شکل دره و فرکانس‌های متفاوت موج ورودی در قالب مطالعات پارامتریک به ارایه الگوهای بزرگنمایی در نقاط مختلف دره پرداخته شده است. از جمله نتایج مهم این تحقیق شامل:

۱. در دره دوزنقه‌ای شکل با افزایش زاویه دره، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای ( $\Gamma_{II}$ ) سریعتر به یک (روانگرایی) رسیده است. به عبارت دیگر اضافه فشار آب حفره‌ای در گوشه دره به علت اثر شکل توپوگرافی و انتشار امواج سطحی رایلی در برخورد با گوشه دره ایجاد شده است. لذا این موضوع موجب افزایش سریعتر شروع روانگرایی در دره تیز گوشه‌تر شده است. در واقع شروع روانگرایی در آبرفتهای واقع در دره‌های تیز گوشه از کناره‌های دره شروع شده و سپس بقیه نقاط روانگرا می شوند.
۲. با فاصله گرفتن از مرکز دره به گوشه دره در سطح زمین و با افزایش زوایای شیب دره، مقادیر ماکزیمم بزرگنمایی افزایش می‌یابد که این مقادیر در دو زاویه ۷۵ و ۹۰ درجه به حداکثر مقدار خود رسیده است.
۳. با افزایش زاویه دره دوزنقه‌ای و تیز گوشه تر شده آن، مقادیر طیف پاسخ در محدوده پریودهای ۰/۱ تا ۱ ثانیه افزایش می‌یابد و در پریودهای بالاتر این تاثیر از بین می‌رود. از طرفی مقادیر طیف پاسخ در گوشه دره به علت اثر شکل توپوگرافی نسبت به نقطه وسط دره بیشتر حاصل شده است.
۴. مقادیر بزرگنمایی طیفی در نزدیک گوشه دره بعلاوه اثر شکل توپوگرافی بیشتر بوده و در پروفیل خاک مورد مطالعه مقادیر حداکثر بزرگنمایی در فرکانس‌های بالای موج ورودی (پریودهای پایین) بدست آمده است. به عبارت دیگر حضور دره موجب تحریک بیشتر مقادیر بزرگنمایی سطح زمین در فرکانسهای بالای موج ورودی می‌گردد. البته حداکثر این مقادیر در فرکانس ۴ ایجاد شده است.
۵. دره دوزنقه‌ای شکل با افزایش فشار آب حفره‌ای سریع‌تری نسبت به اشکال دیگر دره یعنی دره‌های نیم سینوسی و نیم دایره‌ای شکل، روانگرایی را تجربه کرده است. به عبارت دیگر اضافه فشار آب حفره‌ای به علت نرم تر بودن شکل‌های دره نیم سینوسی و نیم دایره‌ای نسبت به دره دوزنقه‌ای شکل موجب افزایش سریع‌تر شروع روانگرایی در دره دوزنقه‌ای شکل شده است. همچنین مقادیر طیف پاسخ در دره گوشه دره دوزنقه‌ای شکل و در پریودهای کم نسبت دره سینوسی و نیم‌دایره‌ای شکل، افزایش بیشتری مشاهده شده است.

## مراجع

- Byrne P (1991) "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand," Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics [St Louis, Missouri, No 124, pp 47-55
- Gelagoti F, Kourkoulis R, Anastasopoulos I, Tazoh T and Gazetas G (2010) "Seismic Wave Propagation in a Very Soft Alluvial Valley: Sensitivity to Ground-Motion Details and Soil Nonlinearity, and Generation of a Parasitic Vertical Component", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 100, No 6 pp3035-3054
- Gelagoti F, Kourkoulis R, Anastasopoulos I and Gazetas G (2012) "Nonlinear Dimensional Analysis of Trapezoidal Valleys Subjected to Vertically Propagating SV Waves", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 102, No 3, pp 999-1017
- Itasca Consulting Group (2005) "FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua," Ver 50 User's Guide Minneapolis: Itasca
- Kuhlemeyer RL and Lysmer J (1973) "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems," J Soil Mech & Foundations, Div ASCE, vol 99 (SM5), pp 421-427
- Martin GR, Finn WDL and Seed HB (1975) "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading," J Geotech, Div ASCE, 101(GT5): 423-438
- Song Q (1997) "The Effects of Local Geology and Liquefaction on Seismic Ground Motion", PhD Thesis, university of Ottawa, Canada

