



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

ارزیابی پارامترهای موثر بر پاسخ دینامیکی دو بعدی دره‌های خالی به منظور بهبود مطالعات ریزپهنه‌بندی

احسان نفیسی^۱، بهروز گتمیری^۲

۱- فارغ-التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک-دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی عمران، کد پستی: ۱۳۱۳۱-۱۴۱۷۶

۲- استاد دانشگاه تهران و دانشگاه پل-ها و راه-های فرانسه، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده

مهندسی عمران، کد پستی: ۱۳۱۳۱-۱۴۱۷۶

Ehsannafici@ut.ac.ir

چکیده

مطالعات نظری و مشاهدات زلزله‌های واقعی در مورد تفرق امواج در توپوگرافی‌های سطحی نشان داده است که پاسخ زمین در یک زلزله و در دو نقطه‌ی نزدیک به هم کاملاً متفاوت بوده است، حداقل بخشی از علت این امر به اثرات ساختگاه نسبت داده شده است. در تحقیق حاضر مقایسه تاثیر پارامترهای مختلف در دره‌ها مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی شکل تحت تحریک لرزه‌ای امواج SV از نوع ریکر با انتشار در زوایای مختلف بر پاسخ زمین در نقاط مختلف به کمک برنامه‌ی هیبرید صورت گرفته است. در این برنامه جهت بررسی پاسخ دینامیکی ساختگاه از ترکیب روش اجزای محدود (FEM) و روش اجزای مرزی (BEM) استفاده شده است. مصالح الاستیک، خشک و همگن می باشند و دره‌ها به صورت خالی از رسوبات مدل شده‌اند. نقاط و زوایای بحرانی دره مشخص شده و پارامترهایی برای نشان دادن اثرات توپوگرافی در انواع دره تعریف شده‌اند. مشخص شده است که تغییر زاویه امواج می‌تواند حالتی بحرانی در مرکز دره‌های مستطیلی عمیق ایجاد کند و همچنین تشدید در لبه‌ی تمام دره‌ها را افزایش دهد. نتایج در قالب نمودارهایی کاربردی برای الگو و میزان بزرگ‌نمایی جابه‌جایی در عرض دره ارائه شده که از آنها در مطالعات ریز پهنه بندی و کاهش خطرپذیری می‌توان استفاده کرد.

کلمات کلیدی: اثر ساختگاه، دره‌های آبرفتی، برنامه هیبرید، امواج SV مایل

۱- مقدمه

پس از گزارشات متعدد از الگوی خرابی زلزله‌های مشهور در چند دهه اخیر [۱-۳] مانند زلزله سال ۱۹۸۵ شیلی [۴] و یا زلزله ۲۰۰۵ کشمیر [۵] و اثبات تاثیر ساختگاه، یعنی شرایط ژئوتکنیکی و هندسه‌ی بستر سنگی در الگو و شدت حرکات زمین، مطالعات گسترده‌ای جهت اطلاع از پارامترهای تاثیر گذار و میزان تاثیر هر پارامتر بر حرکات زمین در توپوگرافی‌های گوناگون (مانند دره، تپه و شیروانی) صورت گرفته است. با وجود تحقیقات انجام شده پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای زمین در ساختگاه دشوار بوده و بیشتر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای تنها ضخامت و عمق لایه خاک را در دستور کار خود قرار داده‌اند. به عنوان مثال آیین‌نامه‌هایی مانند ۱۹۹۴، ۱۹۹۷، NEHRP، IBC۲۰۰۰ و UBC ۱۹۹۷ این اثرات را به صورت میانگین سرعت موج برشی در ضخامت



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

معینی از آبرفت در نظر گرفته و با دسته‌بندی نوع زمین بر اساس سرعت موج برشی ضریب بزرگ‌نمایی ارائه می‌دهند [۶ و ۷]؛ این کار به معنی بی‌توجهی به اثرات دو بعدی و سه بعدی ساختگاه بوده و در بسیاری از موارد باعث دست کم گرفتن حرکات زمین در حضور توپوگرافی‌های گوناگون می‌شود.

انتخاب روش ارزیابی این اثرات به اهمیت منطقه مورد مطالعه و امکانات و اطلاعات در دسترس [۸] وابسته است (جهت اطلاعات دقیق‌تر و جزئیات بیشتر بارد^۱ در سال ۱۹۹۷ به بررسی روش‌های ارزیابی ساختگاه جهت پهنه بندی پرداخته است [۹]، همچنین مراجعه به تحقیق لاکاوه^۲ و همکاران در این زمینه مفید می‌باشد [۱۰]). در موارد ساده راه حل‌های تحلیلی جواب بسته‌ای برای مسئله به دست می‌دهند که برای مقاصدی مانند صحت سنجی سایر روش‌ها قابل استفاده است [۱۱-۱۴]. همچنین مشاهدات بزرگ مقیاس در زلزله با جزئیات مناسب و قابل استفاده تنها در ساختگاه‌هایی که زلزله‌ی بزرگی را تجربه کرده‌اند در دسترس و قابل استفاده می‌باشد [۱۵ و ۱۶]. با پیچیده شدن وضعیت مورد بررسی داده‌های حاصل از حل به روش‌های عددی به عنوان ابزاری قدرتمند بررسی پراکندگی امواج در پیکربندی‌های گوناگون را ممکن ساخته است [۱۷-۱۹].

در تحقیق پیش رو تاثیر دره‌های خالی با اشکال مستطیل، دوزنقه و مثلث بر پراکندگی امواج لرزه‌ای برشی از نوع ریکر با انتشار در زوایای مختلف بررسی شده است و برای این منظور از برنامه هیبرید استفاده شده است. هیبرید یک برنامه کامپیوتری است که در سال ۲۰۰۲ توسط گتمیری و همکاران برای پاسخ دینامیکی محیط‌های متخلخل خشک و اشباع در حالت دو بعدی گسترش پیدا کرده است [۲۰-۲۲]. در این برنامه برای محدوده‌ی رسوبات از روش اجزای محدود و برای محدوده نیم‌فضا از روش اجزای مرزی استفاده شده و با استفاده از کامپایلر فرترن ۹۰ و به زبان فرترن تهیه شده است. دره‌ها به شکل مستطیل، مثلث و دوزنقه به صورت خالی از رسوبات مدل شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با انحراف امواج از حالت قائم در مواردی در مرکز دره بر خلاف انتظار، کاهش حرکت دیده نمی‌شود و همچنین لبه‌ی دره تشدید حرکت بیشتری نشان می‌دهد. پارامترهایی برای به تصویر کشیدن اثرات توپوگرافی تعریف شده سپس نمودارهایی ارائه شده که می‌توانند با نشان دادن روند بزرگ‌نمایی دره‌های مذکور با توجه به وضعیت ژئوتکنیکی و هندسی ساختگاه و زاویه انتشار موج مهاجم، در تکمیل مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای به کار گرفته شوند.

۲- روش حل

برای حل مسئله از برنامه هیبرید استفاده شده است. نرم‌افزار هیبرید بر اساس ترکیب روش‌های المان محدود و المان مرزی به منظور محاسبه پاسخ دینامیکی محیط‌های متخلخل، اشباع و خشک، همگن و غیر همگن، خطی و غیر خطی با استفاده از کامپایلر فرترن ۹۰ و به زبان فرترن تهیه شده است. بخش اجزاء محدود با استفاده از المانهای هشت گرهی و بخش عناصری مرزی با استفاده از المانهای سه گرهی مجزا سازی شده اند [۲۰-۲۲].

۳- مشخصات مدل

دره‌ها خالی از رسوبات و به شکل مستطیل، دوزنقه و مثلث مدل شده‌اند. هندسه دره‌ها و مبدا استفاده شده برای مختصات نقاط مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است.

L : نصف عرض دهانه‌ی دره ، مقدار L در تمام دره‌ها برابر ۱۰۰ متر می‌باشد.

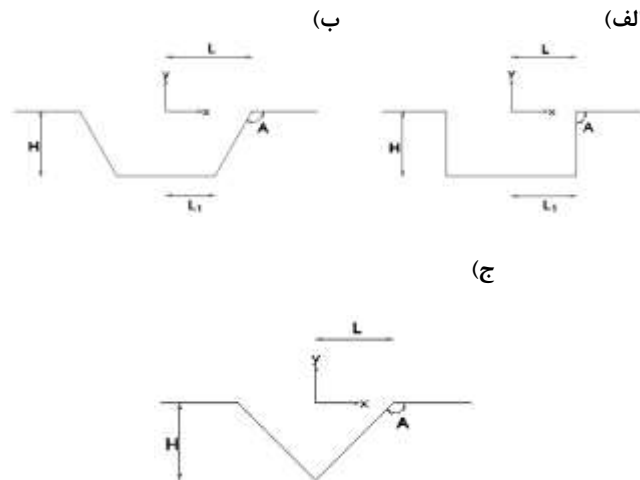
H : عمق دره

L_۱ : نصف عرض دره در کف

^۱ Bard

^۲ Lacave

پارامتر بی بعد H/L نسبت عمق نام داشته و هر سه شکل دره مستطیل و ذوزنقه و مثلث برای نسبت عمق های ۱، ۰.۸، ۰.۶، ۰.۴ و ۰.۲ مدل شده اند.



شکل شماره (۱): مشخصات هندسی دره ها، الف) مستطیل، ب) ذوزنقه، ج) مثلث

۴- مشخصات موج مهاجم

امواج لرزه ای در نظر گرفته شده SV از نوع ریکر بوده که معادله جابه جایی آن با زمان در معادلات (۱) و (۲) نشان داده شده است.

$$U(t) = A.(a^t - 0.5)e^{-a^t} \quad (1)$$

که در آن

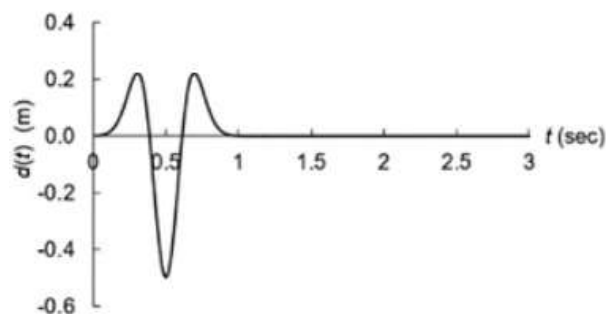
$$a = \pi \frac{t-T_s}{T_p} \quad (2)$$

A_0 : برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

T_s : برابر ۰.۵ در نظر گرفته شده است.

T_p : برابر ۰.۵ در نظر گرفته شده است.

دیاگرام جابه جایی بر حسب زمان برای موج ذکر شده در شکل شماره (۲) نشان داده شده است



شکل شماره (۲): جابه جایی موج ریکر با زمان

زاویه تابش امواج با α نمایش داده شده و نسبت به راستای قائم اندازه گیری شده و از -90° تا 90° درجه ، هر 20° درجه مدل شده است.

۵- پارامترهای مکانیکی مسئله

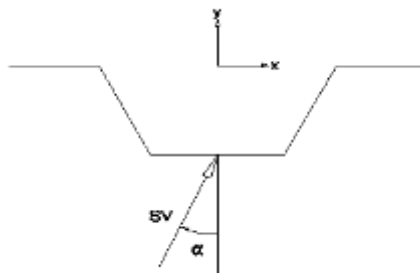
مصالح الاستیک، خشک و همگن می باشند و مشخصات مکانیکی مربوط در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول شماره (۱) : مشخصات مکانیکی مصالح

E (Mpa)	ν	ρ (kg/m^3)	C (m/s)
۶۷۲۰	۰,۴	۲۴۰۰	۱۰۰۰

۶- نتایج

بزرگ‌نمایی در یک نقطه (Am) به صورت نسبت جابه‌جایی کل (برآیند جابه‌جایی افقی و قائم) در یک نقطه به جابه‌جایی کل در نقطه‌ای دور از دره (عدم تاثیر توپوگرافی) محاسبه شده است جهت مثبت زاویه‌ی تابش و سیستم مختصات مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است.



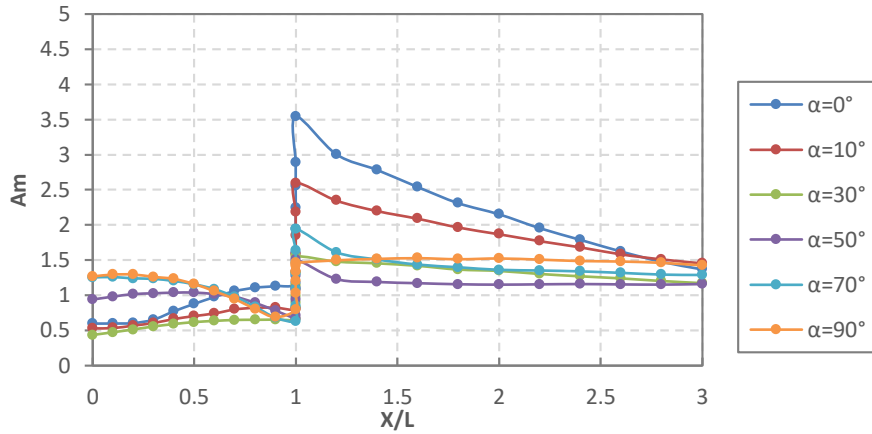
شکل شماره (۳) : جهت مثبت زاویه‌ی تابش امواج و فاصله از مرکز دره

پاسخ دوبعدی نقطه‌ای با فاصله‌ی X از مرکز دره و با زاویه‌ی تابش موج α برابر پاسخ نقطه‌ای با فاصله‌ی X- و زاویه‌ی تابش α - می‌باشد. بنابراین با نمایش نیمی از دره در زوایای انتشار امواج -90° تا 90° پاسخ تمام نقاط دره در دسترس است.

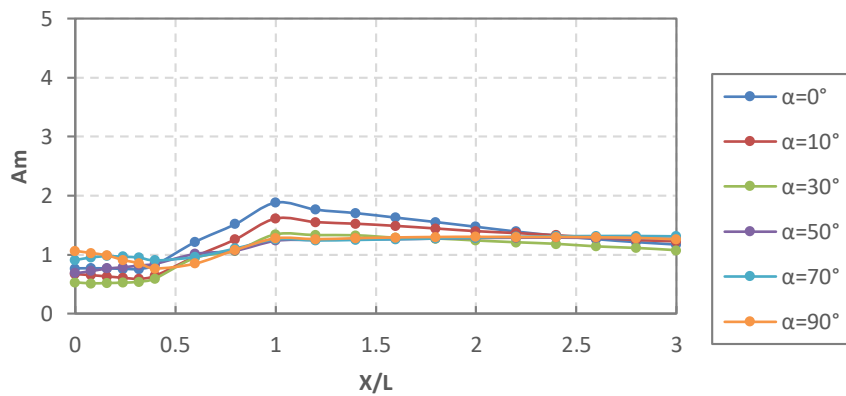
۶-۱- بررسی اثر زاویه تابش امواج بر الگوی بزرگ‌نمایی در عرض دره

نمودار بزرگ‌نمایی جابه‌جایی کل برای نقاط مختلف دره‌های خالی در اشکال (۴) و (۵) برای نسبت عمق برابر با یک نشان داده شده است. الگوی بزرگ‌نمایی برای سایر نسبت عمق‌ها مشابه بوده و مقدار آنها با کم شدن اثر ساختگاه (کم شدن نسبت عمق) برای هر سه شکل کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شد که در تمام موارد حد اثر بزرگ‌نمایی دز زاویه 10° - درجه رخ داده است. همچنین، در مرکز دره مشاهده می‌کنیم که بر خلاف تحقیقات گذشته و در انتشار قائم امواج که همواره شاهد کاهش حرکت بودیم، این اثر کاهشی کم‌رنگ شده و در مواردی موجب تشدید حرکت نیز می‌شود.

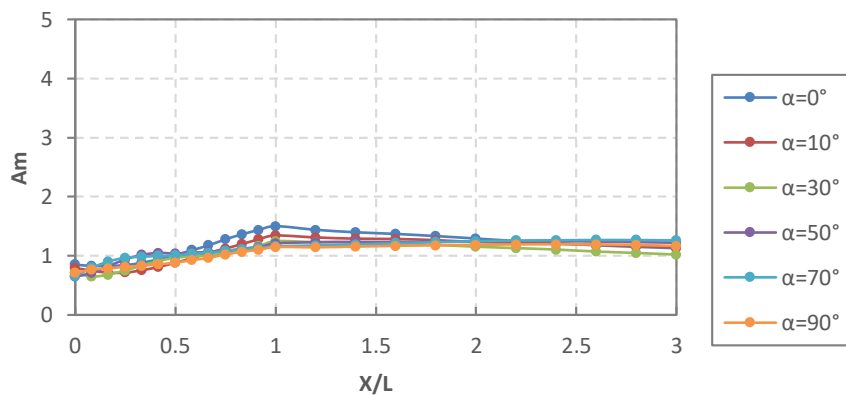
(الف)



(ب)



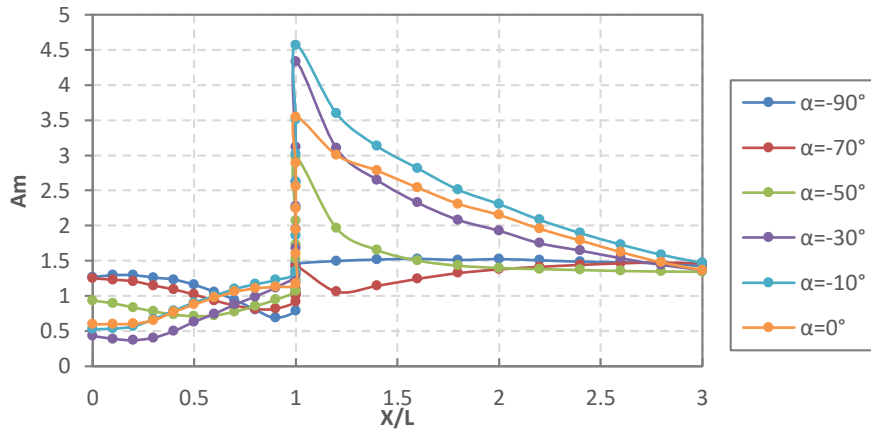
(ج)



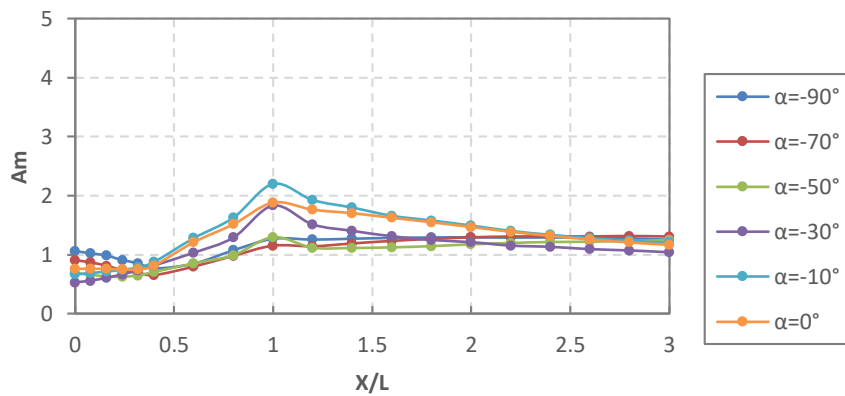
شکل شماره (۴) : بزرگ‌نمایی دره‌های خالی با نسبت عمق ۱ در مقابل فاصله از مرکز برای $\alpha \geq 0^\circ$ ، (الف) مستطیل، (ب) دوزنقه،

(ج) مثلث

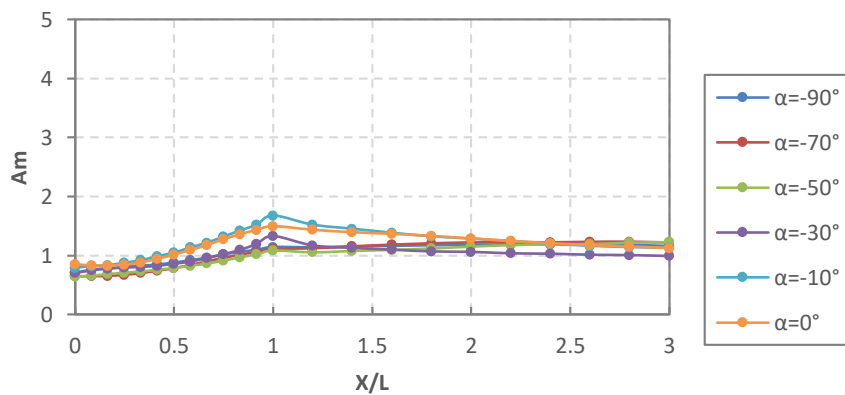
(الف)



(ب)



(ج)

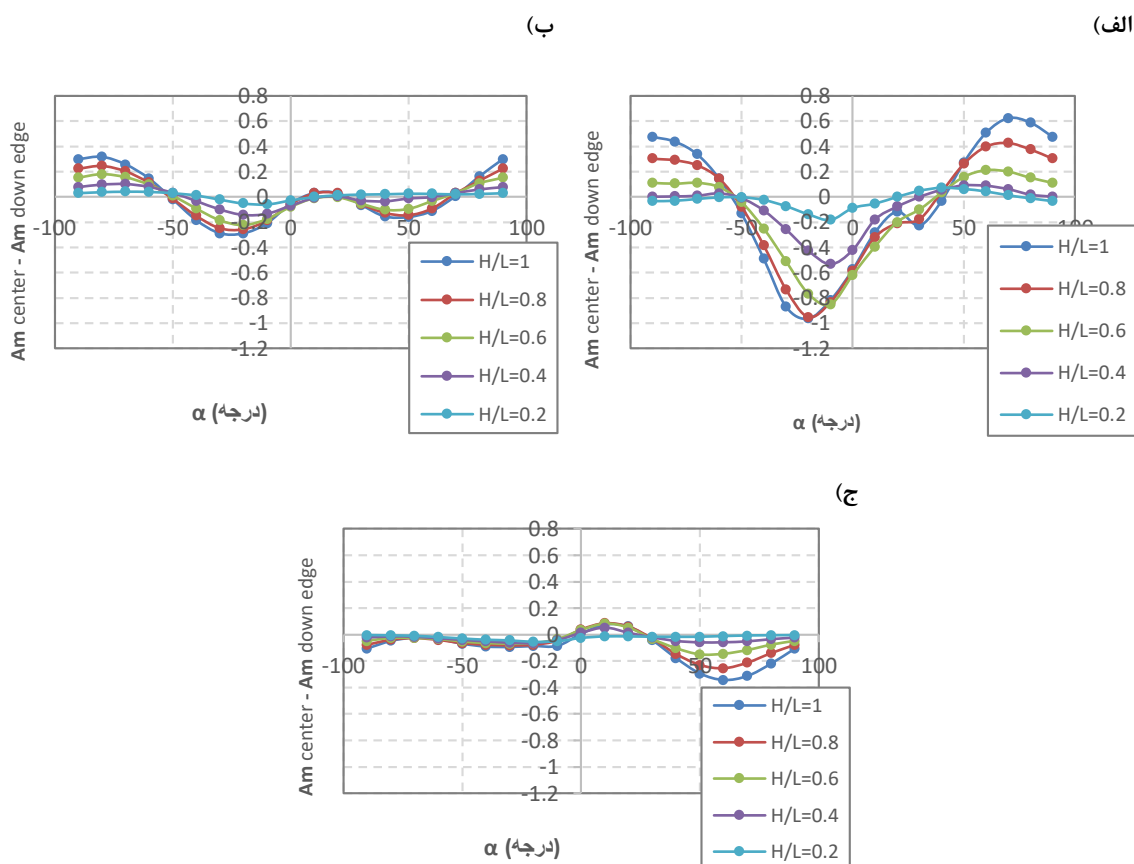


شکل شماره (۵) : بزرگ‌نمایی دره‌های خالی با نسبت عمق ۱ در مقابل فاصله از مرکز برای $\alpha \leq 0^\circ$ ، (الف) مستطیل، (ب) دوزنقه،

(ج) مثلث

۲-۶- بررسی الگوی اثر ترکیبی زاویه تابش امواج و آفست در هندسه‌های متفاوت دره

برای مشاهده‌ی روند تغییر بزرگ‌نمایی با حرکت از مرکز دره به سمت لبه در زوایای تابش مختلف موج به صورت اختلاف بزرگ‌نمایی در مرکز دره با نزدیک‌ترین نقطه‌ی مدل شده به لبه‌ی داخلی دره در مقابل زاویه‌ی تابش امواج در شکل (۶) نشان داده شده است. در مورد دره‌های مثلثی به دلیل عدم وجود بستر افقی کف (مرکز و لبه‌ی پایینی شیروانی بر هم منطبق‌اند) نمودار ذکر شده به صورت تفاضل لبه‌ی بالایی و پایینی دره رسم شده و ملاحظه می‌شود رفتاری مانند شیروانی‌ها از خود نشان می‌دهند (انگوبین در سال ۲۰۰۷ نشان داد که حرکت دره لبه‌ی بالایی یک شیروانی تشدید و در لبه‌ی پایینی آن کاهش می‌شود). [۲۳]



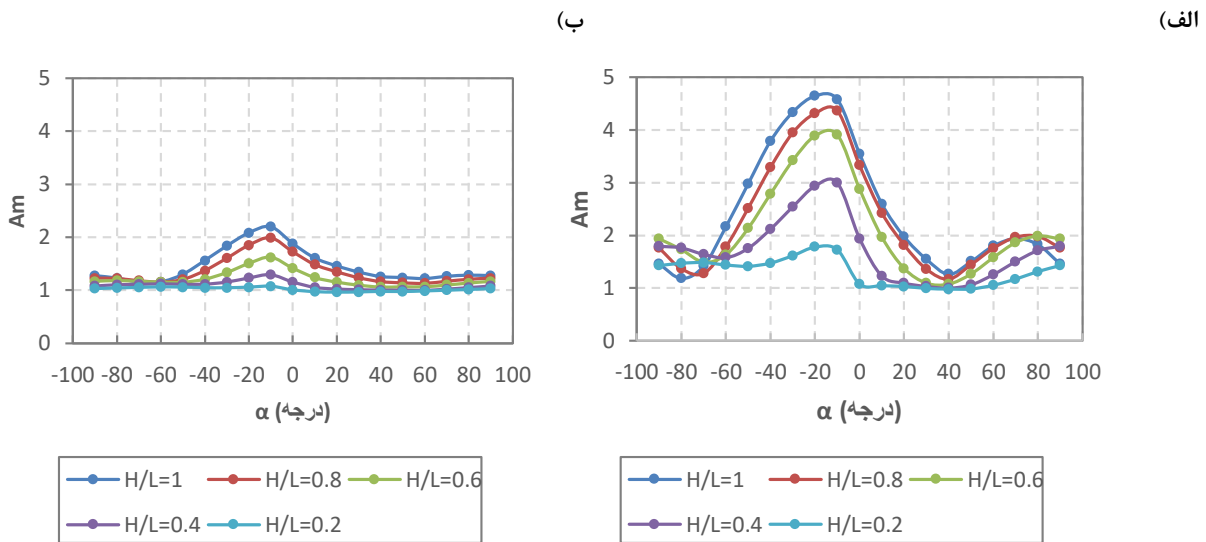
شکل شماره (۶) : نمودار $A_{center} - A_{down edge}$ در مقابل زاویه انتشار امواج، (الف) مستطیل، (ب) دوزنقه، (ج) مثلث

در شکل (۶) دیده می‌شود که بر خلاف انتشار قائم امواج که با حرکت از لبه به سمت مرکز همواره شاهد کاهش در حرکت بودیم در برخی موارد مرکز دره حالت بحرانی‌تری به خود می‌گیرد.

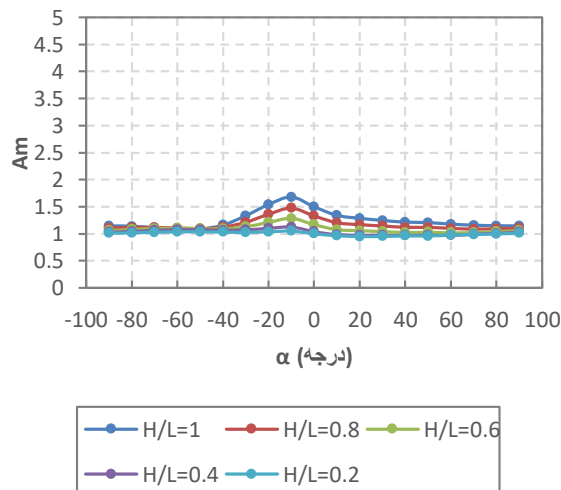
۳-۶- بررسی اثر زاویه‌ی تابش امواج و هندسه دره

نمودار بزرگ‌نمایی جابه‌جایی در لبه‌ی دره‌های خالی در شکل (۷) نشان داده شده است. در هر سه شکل دره و در هر نسبت عمق، حداکثر بزرگ‌نمایی در زاویه‌ای حدود 10° درجه اتفاق می‌افتد. با دور شدن از زاویه‌ی 10° مقدار بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابد اما با نزدیک شدن $|\alpha|$ به 90° مقداری افزایش در بزرگ‌نمایی دیده می‌شود (این اثر در شکل مثلث نسبت به سایر اشکال

بیشتر است) که در مقایسه با حداکثر بزرگنمایی کوچک است. این افزایش با افزایش اثر توپوگرافی افزایش می‌یابد، یعنی مقدار افزایش در مستطیل بزرگتر از دوزنقه و در دوزنقه بزرگتر از مثلث است.



(ج)

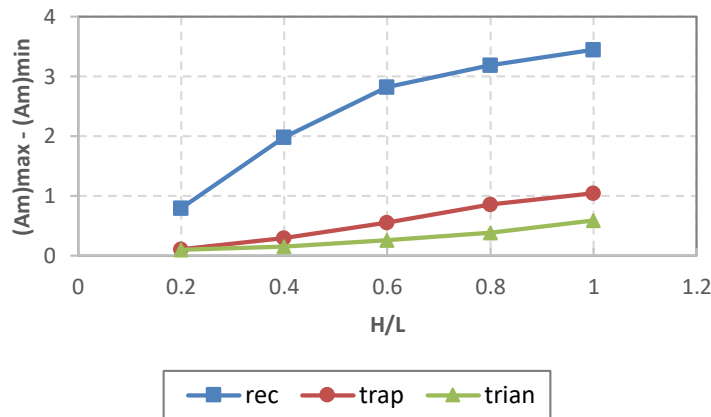


شکل شماره (۷): بزرگنمایی لبه دره‌های خالی در مقابل زاویه تابش امواج، الف) مستطیل، ب) دوزنقه، ج) مثلث

۴-۶- بررسی اثر ترکیبی نسبت عمق و زاویه تابش امواج

دو اثر زیر در مورد تغییرات نسبت عمق به وضوح قابل مشاهده است:

- در هر زاویه‌ی تابش موج با افزایش نسبت عمق مقدار بزرگنمایی افزایش می‌یابد و مقدار این افزایش با دور شدن از محل وقوع حداکثر بزرگنمایی یعنی 10° - درجه، کاهش می‌یابد. این امر در شکل (۷) قابل مشاهده است.
- اثر زاویه‌ی تابش امواج بر تغییرات بزرگنمایی با افزایش نسبت عمق افزایش می‌یابد. برای نشان دادن این مطلب نمودار حداکثر تغییرات بزرگنمایی در بازه‌ی 90° - تا 90° ، در مقابل نسبت عمق در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل شماره (۸) : حداکثر تغییرات بزرگ‌نمایی در مقابل نسبت عمق در لبه‌ی دره‌های خالی

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر ساختگاه به صورت توپوگرافی دره بر تغییر حرکات زمین تحت تحریک لرزه‌ای به صورت موج ریکر با انتشار در زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای تاثیرگذار بر بزرگ‌نمایی حرکات زمین در عرض دره‌ها در قالب نمودارهای کاربردی ارائه و مقایسه بین دره‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی انجام شد. الگوی بزرگ‌نمایی در عرض دره نشان داد که بر خلاف نتایج تحقیقات گذشته، مرکز دره‌هایی که اثر توپوگرافیکی زیادی بر حرکات زمین دارند در حالت انحراف امواج از حالت قائم نه تنها اثر کاهشی کمتری دارند بلکه می‌توانند موجب تشدید شوند؛ با حرکت از شکل مستطیل به مثلث این اثر کم‌رنگ می‌شود به طوری که در مستطیل حداکثر بزرگ‌نمایی ۱،۲۶، در دوزنقه ۱،۰۶، و در مثلث تشدید مشاهده نشد. معیاری برای نمایش دادن روند تغییرات بزرگ‌نمایی از مرکز به لبه مرفی ($A_{center} - A_{down\ edge}$) و نمودار مقایسه برای سه شکل ارائه شد سپس نمودار حداکثر تغییرات بزرگ‌نمایی در مقابل نسبت عمق برای مقایسه میزان تاثیر هر شکل در بزرگ‌نمایی جابه‌جایی رسم شد.



۱. Assimaki, D., Gazetas, G., & Kausel, E. (۲۰۰۵). Effects of local soil conditions on the topographic aggravation of seismic motion: parametric investigation and recorded field evidence from the ۱۹۹۹ Athens earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, ۹۴(۳), ۱۰۵۹-۱۰۸۹.
۲. Athanasopoulos, G. A., Pelekis, P. C., & Leonidou, E. A. (۱۹۹۹). Effects of surface topography on seismic ground response in the Egean (Greece) ۱۵ June ۱۹۹۵ earthquake. *Soil dynamics and earthquake engineering*, ۱۸(۲), ۱۳۵-۱۴۹.
۳. Biondi, G., & Maugeri, M. (۲۰۰۵). Seismic response analysis of Monte Po hill (Catania). *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, ۱.
۴. Paolucci, R. (۲۰۰۲). Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities. *Earthquake engineering & structural dynamics*, ۳۱(۱۰), ۱۸۳۱-۱۸۵۳.
۵. Khan, S., van der Meijde, M., van der Werff, H., & Shafique, M. (۲۰۲۰). The impact of topography on seismic amplification during the ۲۰۰۵ Kashmir earthquake. *Natural hazards and earth system sciences*, ۲۰(۲), ۳۹۹-۴۱۱.
۶. HB.Ozmen, An Investigation on Soil Amplification through Site Factors Used in Seismic Design Codes, *Advances in Civil Engineering* Volume ۲۰۲۲, Article ID ۶۸۵۸۳۷۱, ۱۱ pages
۷. Pitilakis, K., Riga, E., & Anastasiadis, A. (۲۰۱۲). Design spectra and amplification factors for Eurocode ۸. *Bulletin of Earthquake Engineering*, ۱۰, ۱۳۷۷-۱۴۰۰.
۸. Sánchez-Sesma, F. J., Palencia, V. J., & Luzón, F. (۲۰۰۴). Estimation of local site effects during earthquakes: An overview. *From Seismic Source to Structural Response: Contributions of Professor Mihailo D. Trifunac*, ۴۴-۷۰.
۹. Bard, P. Y. (۱۹۹۷). Local effects on strong ground motion: basic physical phenomena and estimation methods for microzoning studies. *SERINA—Seismic Risk: An Integrated Seismological, Geotechnical and Structural Approach*, ۲۲۹-۲۹۹.
۱۰. Lacave, C., Bard, P. Y., & Koller, M. G. (۱۹۹۹). Microzonation: techniques and examples. *Block*, ۱۵, ۲۳.
۱۱. Liang, J., Liu, Z., Huang, L., & Yang, G. (۲۰۱۹). The indirect boundary integral equation method for the broadband scattering of plane P, SV and Rayleigh waves by a hill topography. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, ۹۸, ۱۸۴-۲۰۲.
۱۲. Jianwen, L., Yanshuai, Z., & Lee, V. W. (۲۰۰۵). Scattering of plane P waves by a semicylindrical hill: analytical solution. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, ۴, ۲۷-۳۶.
۱۳. Liang, J. W., Zhang, Y. S., & Lee, V. W. (۲۰۰۶). Surface motion of a semi-cylindrical hill for incident plane SV waves: Analytical solution. *Acta Seismologica Sinica*, ۱۹, ۲۵۱-۲۶۳.
۱۴. Nakamura, Y. (۱۹۸۹). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, ۳۰(۱).
۱۵. Nogoshi, M., & Igarashi, T. (۱۹۷۰). On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, ۲۳, ۲۶۴-۲۸۰.
۱۶. Fuyuki, M., & Matsumoto, Y. (۱۹۸۰). Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench. *Bulletin of the Seismological Society of America*, ۷۰(۶), ۲۰۵۱-۲۰۶۹.
۱۷. Minghui, H. A. O. (۲۰۱۴). Analysis of terrain effect on the properties of ground motion. *Acta Seismologica Sinica*, ۳۶(۵), ۸۸۳-۸۹۴.



۱۸. Komatitsch, D., & Vilotte, J. P. (۱۹۹۸). The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of ۲D and ۳D geological structures. *Bulletin of the seismological society of America*, ۸۸(۲), ۳۶۸-۳۹۲.
۱۹. Zhenpeng, L., Baipo, Y. A. N. G., & Yifan, Y. U. A. N. (۱۹۸۰, September). Effect of threedimensional topography on earthquake ground motion. In *Proc. of the ۷th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. ۲, pp. ۱۶۱-۱۶۸).
۲۰. Gatmiri, B., & Kamalian, M. (۲۰۰۲). On the fundamental solution of dynamic poroelastic boundary integral equations in the time domain. *International Journal of Geomechanics*, ۲(۴), ۳۸۱-۳۹۸.
۲۱. Gatmiri, B., Arson, C., & Nguyen, K. V. (۲۰۰۸). Seismic site effects by an optimized ۲D BE/FE method I. Theory, numerical optimization and application to topographical irregularities. *Soil dynamics and earthquake engineering*, ۲۸(۸), ۶۳۲-۶۴۵. ۱۳
۲۲. Le Pense, S., Gatmiri, B., & Maghoul, P. (۲۰۱۱, July). Influence of soil properties and geometrical characteristics of sediment-filled valleys on earthquake response spectra. In *۱۳th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN ۲۰۱۱)* (pp. ۱۳۰-۱۳۶).
۲۳. Nguyen, K. V. & Gatmiri, B. "Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity," *Soil dynamics and earthquake engineering*, vol. ۲۷, no. ۲, pp. ۱۸۳-۱۸۸, ۲۰۰۷.