

بررسی اثرات توپوگرافی سطح در بزرگنمایی حرکات زمین

میثم نجاری^۱، علیرضا سعیدی عزیز کندي^۲

۲.۱. دانشکده فنی، دانشگاه تهران

Meysamnajari@ut.ac.ir

خلاصه

اثرات ساختگاه را می توان به دو دسته اثر توپوگرافی (سطحی و زیر سطحی) و بزرگنمایی آبرفت طبقه بندی کرد. در این تحقیق سعی شده است بزرگنمایی توپوگرافی سطح مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. علیرغم اینکه این اثر می تواند بزرگی و محتوای فرکانسی حرکات لرزه ای زمین را به شدت تغییر دهد و تاثیر بسزایی در خرابی های ناشی از زلزله داشته باشد هنوز به خوبی در آیین نامه ها وارد نشده است. شکل، زاویه شیب عارضه توپوگرافی و فرکانس موج برخوردی سه پارامتر موثر بر بزرگنمایی توپوگرافی می باشند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته اند.

کلمات کلیدی: بزرگنمایی توپوگرافی، حرکات لرزه ای زمین، فرکانس موج برخوردی، محتوای فرکانسی، عوارض توپوگرافی

۱. مقدمه

اثرات توپوگرافی می تواند طبیعت لرزش زمین را در طول زلزله تحت تاثیر قرار دهد. در گذشته نزدیک چندین وضعیت ثبت شده و مشاهده شده از زلزله نشان داده است که توپوگرافی تاثیر زیادی در میزان خسارات ناشی از زلزله داشته است. اغلب پس از زلزله های مخرب گزارش شده است که در مناطق کوهستانی ساختمانهایی که بر روی صخره ها یا تپه ها قرار گرفته اند بسیار بیشتر از ساختمانهای روی بستر صاف آسیب دیده اند. لذا به حساب آوردن این اثرات در آیین نامه های لرزه ای، برنامه ریزی کاربری زمین و طراحی برای کاهش خطرات زلزله الزامی می باشد. برای مثال زلزله ۱۹۶۸ توکاچی اوکی در ژاپن به ساختمانهای نزدیک لبه یک صخره خسارات زیادی وارد کرد در حالیکه ساختمانهایی که به اندازه کافی از آن لبه دور بودند متحمل هیچ خسارتی نشدند. زلزله اخیر کوزانی در یونان نشان داد روستاهایی که بر روی تپه ها ساخته شده بودند آسیب های جدی ای دیدند. بعلاوه چندین شواهد ثبت شده وجود دارد که نشان می دهد توپوگرافی سطح بزرگی و محتوای فرکانسی لرزش زمین را بسیار تحت تاثیر قرار می دهد. برای مثال در طول زلزله سال ۱۹۸۰ در جنوب ایتالیا اثر افزایش دو درجه ای در مقیاس MSK را در اثر توپوگرافی شاهد بودیم. با این حال مطالعه نتایج حاصل از برداشت ها روی اثرات توپوگرافی در برابر اثرات زمین نرم بسیار کمتر است و لذا هنوز برداشت نتایج آماری از آن غیر ممکن است.

۲. مکانیزم بزرگنمایی توپوگرافیک [۱]

بطور کلی اثر توپوگرافی سطح به سه فرایند فیزیکی مربوط است:

۱. حساس بودن حرکات سطح به زاویه برخورد که خصوصاً برای امواج SV در اطراف زاویه بحرانی بزرگ است. زاویه شیب تغییرات زیادی در جابه جایی های سطح زمین ایجاد می کند. این اثر به عنوان عامل اصلی خرابی ها در زلزله ۱۹۸۷ کالیفرنیا منطقه Whittier Narrow بیان شده است.
۲. متمرکز شدن یا پراکنده شدن امواج لرزه ای باز تابش شده از توپوگرافی سطح. این مطلب در مراجع بوسیله یک گوه ساده تشریح شده است. اگر گوه با زاویه $\frac{2\pi}{n}$ در معرض امواج صفحه ای SH قرار گیرد آنگاه به سادگی می توان پاسخ را با در نظر گرفتن انعکاس ها در

۲.۱. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش خاک و پی

سطح گوه بررسی کرد. وقتی پی می بریم که $(n-1)$ انعکاس رخ می دهد می توانیم نتیجه بگیریم که بزرگنمایی حرکت در راس گوه باید $2n$ برابر بزرگتر از امواج برخوردی باشد.

۳. آنکسار امواج سطحی و حجمی به سمت پایین و خارج از عارضه توپوگرافی که می تواند منجر به الگوهای تداخلی بین امواج مستقیم و انکسار یافته شود.

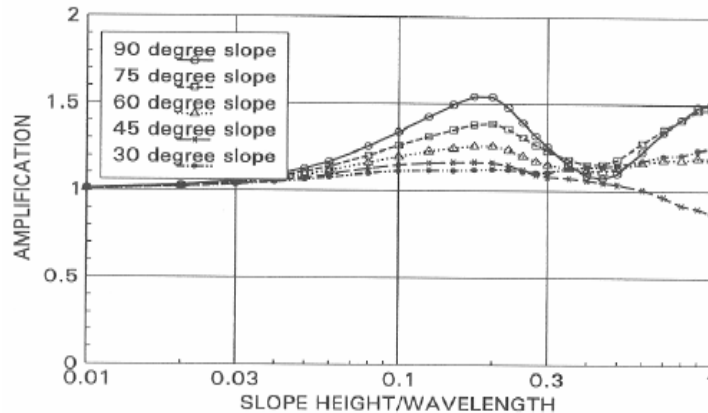
۳. آیین نامه های موجود و بزرگنمایی توپوگرافیک [۲]

همانطور که بیان کردیم اثرات توپوگرافی سطح هنوز کامل شناخته نشده است و داده‌های مشاهداتی و ثبت شده موجود برای رسیدن به نتایج آماري كفايت نمی‌کند. بهمين دليل است که هیچ رابطه تجربی‌ای هنوز برای این اثرات موجود نیست. در اغلب آیین نامه‌های لرزه‌ای اثرات توپوگرافیک وارد نشده است. آیین نامه‌هایی که اثر بزرگنمایی توپوگرافی را در نظر می‌گیرند عبارتند از آیین نامه لرزه‌ای PS-۹۲ فرانسه و آیین نامه اروپا (۲۰۰۲, Draft EC-۸). آیین نامه فرانسه ضریبی را پیشنهاد کرده است که به سادگی اثر توپوگرافی را وارد کار طراحان و مهندسان می‌کند. این ضریب نسبتاً ساده می‌باشد: ضریب مربوطه تابع فرکانس است و به میزان شیب و تغییرات آن در همسایگی نزدیک منطقه ساخت مربوط می‌شود. این آیین نامه‌ها افزایش $40\% - 20\%$ را در شتاب حداکثر افقی اعمال می‌کنند ولی هیچکدام از آیین نامه‌ها اثر افزایش مؤلفه قائم لرزش را در نظر نمی‌گیرند. همچنین فاصله تا سطح آزادی که آیین نامه‌ها در نظر می‌گیرند کمتر از آن چیزی است که مشاهده شده است. لذا این ضرایب دقت کافی را در پیش بینی اثر توپوگرافی ندارند. بعنوان مثال Bouckovalas و همکارانش این مسئله را روی زلزله آتن در ۷ سپتامبر ۱۹۹۹، که ۱۴۳ کشته ۱۰۰۰۰۰ بی خانمان و ۱۰۰ ساختمان با تخریب 100% بجای گذاشت بررسی کردند. در این زلزله تعدادی لرزش قوی در مناطقی که خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکنیکی آنها معلوم بود ثبت شد. بررسی این اطلاعات نشان داد که ضریب بزرگنمایی توپوگرافی گاه به حدود ۳ هم می‌رسد در حالیکه آیین نامه‌های موجود حداکثر ضریب را ۱٫۵ بیان می‌کنند.

۴. بزرگنمایی توپوگرافی در شیبهای شیروانی

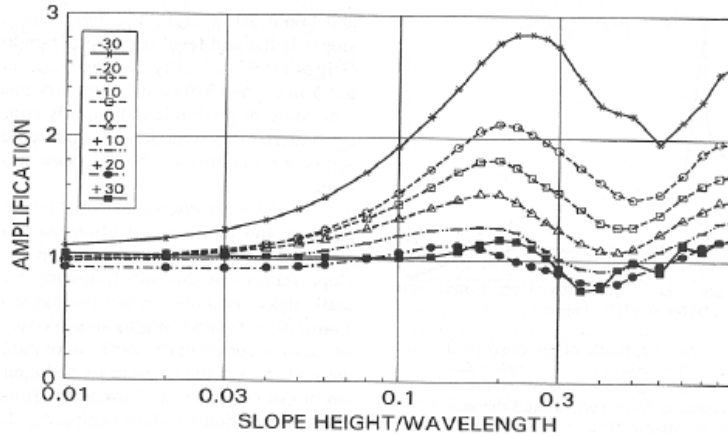
۴-۱. خلاصه ای از مطالعات انجام شده [۳،۴،۵،۶]

تاثیر توپوگرافی شیب شیروانی در بزرگنمایی زلزله توسط Ashford, (۱۹۸۳) sitar & clough و همکاران (۱۹۹۷) و همچنین Ashford & sitar, (۱۹۹۴) برای امواج SH صفحه‌ای و SV/P تحت زاویه‌های برخورد مختلف بررسی شده است. محققین یاد شده بیان کردند که میزان بزرگنمایی با زیاد شدن زاویه شیب افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین اثر را در همسایگی قله داریم و برای شیب به ارتفاع H و طول موج λ ، تحت شرایط $H/\lambda \approx 0.2$ بیشترین مقدار بزرگنمایی رخ می‌دهد و در نزدیکی $H/\lambda = 0.4$ مقدار حداقل رخ می‌دهد. برای پاسخ امواج SV مؤلفه قائم تمایل به افزایش را تا $H/\lambda = 0.9$ نشان می‌دهد. برای امواج برخوردی قائم SV تصویر ۱ توسط Ashford و همکاران (۱۹۹۷) ارائه شده است.



تصویر ۱- اثر زاویه شیب شیروانی بر میزان بزرگنمایی توپوگرافیک (برای شیب پله ای)

همچنین Ashford & sitar (۱۹۹۷) متوجه شدند که بزرگنمایی‌ای که در تصویر ۱ وجود داشت برای شرایطی که امواج برخوردی به نحوی تورب دارند و به سمت قله حرکت می‌کنند به شدت افزایش می‌یابد. در تصویر ۲ اثر تورب موج برخوردی را ملاحظه می‌کنیم.



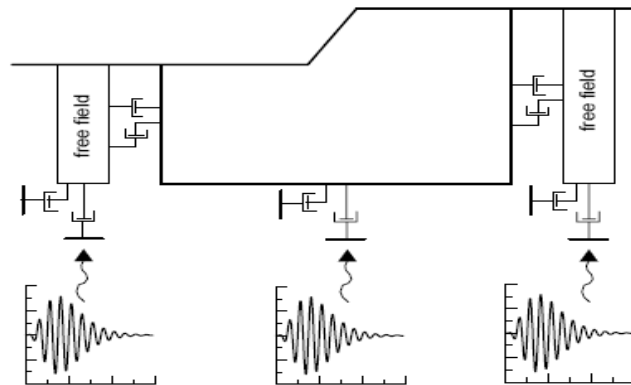
تصویر ۲- اثر تورب موج برخوردی بر بزرگنمایی توپوگرافیک (برای شیب شیروانی)

بعلاوه نتایج مطالعات Gatmiri و Nguyen در شبیه‌ها نشان داد هنگامی که فرکانس لرزش پایین است جا به جایی افقی سطح در گوشه بالایی شیب افزایش یافته است و سپس به تدریج در قسمت بالایی سطح از شیب کاهش یافته است. در سطح پایین جا به جایی افقی کاهش یافته و به مقدار حداقل در کف شیب می‌رسد. سپس وقتی از شیب دور می‌شود به تدریج افزایش می‌یابد. در فاصله‌ای به اندازه کافی دور از شیب بزرگی پاسخ لرزه‌ای زمین به مقدار خود در نیم فضا می‌رسد. همچنین دیده می‌شود که مؤلفه قائم جا به جایی سطح مقدار ماکسیمم خود را روی شیب نزدیک پای شیب دارد ($u_{y-max} = 0.41$). توجه شود که در حالت نیم صفحه همگن اگر جا به جایی ورودی تنها شامل جا به جایی افقی باشد (برای مثال برخورد قائم انتشار امواج SV) جا به جایی قائم روی تمام سطح صفر است. با توجه به وجود شیب که باعث پخش پیچیده امواج می‌شود جا به جایی قائم سطح غیر صفر است. اما در فرکانسهای بزرگ تغییرات جابجایی افقی بارزتر می‌شود و دارای پیکها و مینیمم های متناوب میباشد و پیچیده تر از حالت فرکانس پایین است و علت آن هم برهم نهی پیچیده امواج مختلف شامل امواج برخوردی بازتابش شده و امواج سطحی رایلی بر روی شیب و اطراف آن می‌باشد. بعلاوه محل تغییر مکان افقی حداقل و حداکثر کمی جابه جا می‌شود. همچنین فاصله تا سطح آزاد نیز بیشتر از قبل می‌شود. در مورد مولفه قائم دیده شده است که با افزایش فرکانس افزوده می‌شود. اثر زاویه شیب نیز بدین گونه است که با افزایش آن مقادیر بزرگنمایی و یا میرایی روی شیب شیروانی بارزتر و قابل توجه تر می‌شود.

۲-۴. ارائه فرمول هایی برای اندازه گیری اثر شیب شیروانی در بزرگنمایی زلزله [۲،۷،۸]

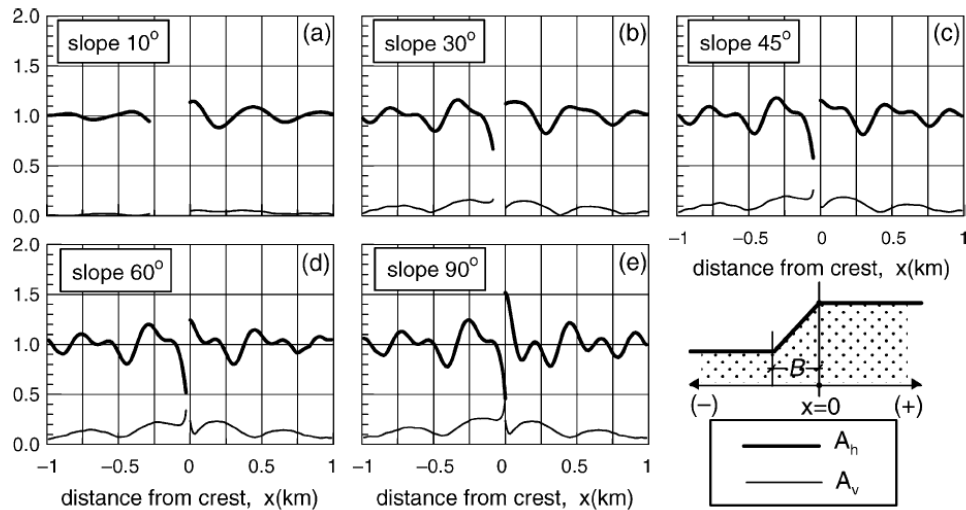
Bouckovalas و همکارانش روابطی را برای تحلیل عددی پاسخ لرزه‌ای شیب‌های شیروانی با فرض رفتار ویسکوالاستیک برای خاک تحت انتشار امواج قائم SV ارائه کرده اند و اثر هندسه شیب و فرکانس تحریک غالب را بررسی نموده اند. تحلیل‌های عددی با روش FDM

برای خاک با رفتار ویسکوالاستیک خطی با سرعت موج برشی $500 \frac{m}{s}$ و $v = \frac{1}{3}$ و $\rho = 2 \frac{mg}{m^3}$ انجام شده است (تصویر ۳).



تصویر ۳- تصویر شماتیک مدل اجزا مجزای یک شیب شیروانی

آنها ضرایب بزرگنمایی توپوگرافیک را به صورت $A_h = \frac{a_h}{a_{h,ff}}$, $A_v = \frac{a_v}{a_{v,ff}}$ تعریف کرده اند که در آن a_h, a_v شتابهای حداکثر افقی و قائم را در هر نقطه از سطح زمین بیان می کنند. نتایج یکسری از تحلیل ها را در تصویر ۴ می بینیم.



تصویر ۴- اثر زاویه شیب روی بزرگنمایی افقی و قائم برای شیب شیروانی با $(\frac{H}{\lambda} = 0.2)$

نتایج آنها از لحاظ کمی و کیفی برای ضریب میرایی کمتر از ۰.۵٪ با کارهای Sitar, Ashford هم خوانی دارد. همچنین روابط ۱ الی ۴ (بهمراه جدول ۱) را برای بدست آوردن مقادیر $A_{h,max}$, $A_{v,max}$, D_h/H , D_v/H بر حسب پارامترهای $N, \xi, I, H/\lambda$ ارائه کرده اند. مطالعه آماری انجام شده روی داده ها نشان داد که انحراف استاندارد هر رابطه بین ۴۰٪ - ۲۹٪ می باشد.

$$A_{v,max} = F_{Av} \left(\frac{H}{\lambda}\right) G_{Av}(I) H_{Av}(\xi) J_{Av}(N) \quad (1)$$

$$A_{h,max} = 1 + F_{Ah} \left(\frac{H}{\lambda}\right) G_{Ah}(I) H_{Ah}(\xi) J_{Ah}(N) \quad (2)$$

$$D_h/H = F_{Dh} \left(\frac{H}{\lambda}\right) G_{Dh}(I) H_{Dh}(\xi) J_{Dh}(N) \quad (3)$$

$$D_v/H = F_{Dv} \left(\frac{H}{\lambda}\right) G_{Dv}(I) H_{Dv}(\xi) J_{Dv}(N) \quad (4)$$

جدول ۱- فرم تحلیلی توابع J, H, G, F در روابط ۱ الی ۴

Parameter	$F(H/\lambda)$	$G(I)$	$H(\xi)$	$J(N)$
$A_{h,max}$	$(H/\lambda)^{0.4}$	$(I^2 + 2I^6)/(I^3 + 0.02)$	$1/(1 + 0.9\xi)$	0.225
$A_{v,max}$	$(H/\lambda)^{0.8}$	$I^{0.5} + 1.5I^5$	$1/(1 + 0.15\xi^{0.5})$	0.75
D_h/H	$(H/\lambda)/((H/\lambda)^2 + 0.2)$	$(I^{1.5} + 3.3I^8)/(I^4 + 0.07)$	$1/(0.71 + 3.33\xi)$	$N^{0.43}$
D_v/H	$(H/\lambda)/((H/\lambda)^2 + 0.2)$	$(I^{1.5} + 3.3I^8)/(I^4 + 0.07)$	$0.233/\xi^{0.78}$	1.00

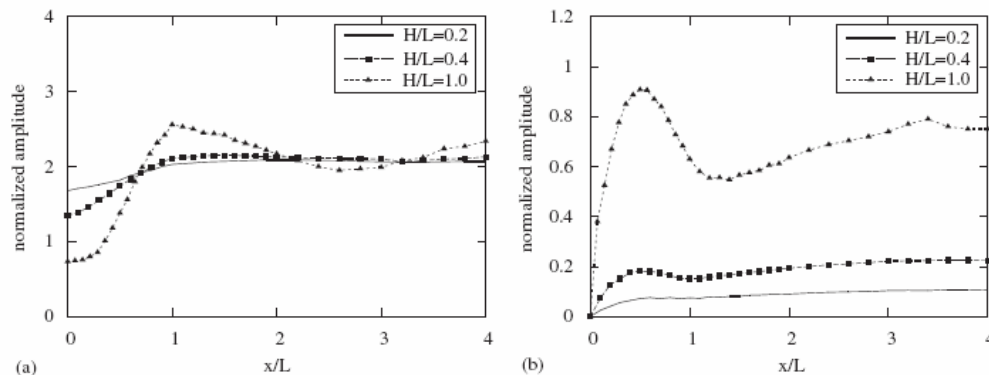
درفرمول های بالا $I = i/90$ پارامتر تغییر زاویه شیب، H/λ ارتفاع بی بعد (طول موج غالب امواج SV ورودی می باشد)، N تعداد چرخه های تحریک های مهم که برای سطح تنش برابر با $\frac{1}{2}$ حداکثر تعریف شده است و (ξ) ضریب میرایی بحرانی هیستریزس خاک میباشد. آنها از این تحلیلها نتیجه گرفتند که زاویه شیب i و ارتفاع بی بعد شده عرضه توپوگرافی H/λ همانند اثر آن روی فاصله تا سطح آزاد در جلو و پشت شیب اثر مهم و غیر یکنواختی روی تشدید افقی و قائم حرکات زمین داشته اند (A_{H1} , A_V). همچنین ضریب میرایی ξ تنها بر روی فاصله تا سطح آزاد اثر دارد و نیز N اثر کمتری روی لرزه دارد. Bouckovalas و همکارانش سپس صحت روابط خود را با مقایسه با زلزله های Aigion (۱۵ June ۱۹۹۹) و Athens (۷ September ۱۹۹۹) بررسی کرده و نتایج را قابل قبول ارزیابی کردند. آنها همچنین نتیجه گرفتند که برای شرایط متداول مهندسی (برای مثال $H/\lambda = 0.1 - 0.2$, $i = 25 - 75$, $\xi = 5 - 15\%$) محدوده تغییرات محاسبه شده برای مقادیر حداکثر افقی و قائم $A_{v-max} = 0.1$, $A_{h-max} = 1.2 - 1.5$ می باشد و نیز فاصله تا سطح آزاد D_{ff} بعنوان D_v , D_h حدود H (۲-۸) است.

۳-۴ اثر مشاهده شده زلزله Northridge ۱۹۹۴ در منطقه Pacific Palisades [۹،۱۰،۱۱]

یکی از مثال های رخ داده اخیر بزرگنمایی توپوگرافیک در صخره های ساحلی منطقه Pacific Palisades در زلزله ۱۹۹۴ Northridge می باشد. در اثر این زلزله چندین زمین لغزش و گسیختگی صخره های ساحلی مشاهده شد. Ashford (۱۹۹۷) و همکاران مطالعه ای را روی بزرگنمایی توپوگرافیک برای محاسبه پاسخ این صخره های ساحلی انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که بیشترین خرابی در جایی که به تندترین شیب نزدیک بوده رخ داده است. آنچه بطور کیفی از خرابی ها می توان نتیجه گرفت این است که خرابی ها روی راس دره ها و شیب ها بیشترین مقدار را داشته است. بعلاوه آنها بیان کردند بزرگنمایی برای امواج SH حدود ۲۵٪ و برای امواج SV حدود ۵۰٪ بوده است. با در نظر گرفتن اثر زاویه شیب روی پاسخ لرزه ای، اثر توپوگرافی برای شیبهای بیشتر از 60° خودش را خوب نشان می دهد و با کاهش شیب کم می شود. بعلاوه فرکانس طبیعی سایت پشت قله از پاسخ بیشتر می شود که با مشاهدات Sitar & Clough تطابق خوبی دارد. اگر فرکانس طبیعی سایت تقریباً برابر فرکانس توپوگرافی باشد آنگاه پاسخ بزرگنمایی می شود. تحت هیچ شرایطی بزرگنمایی توپوگرافیک بیشتر از پاسخ در فرکانس طبیعی نبوده است.

۵. اثرات توپوگرافی در دره ها [۳]

اثرات زاویه شیب و فرکانس موج برخوردی نیز توسط Nguyen و Gatmiri برای دره ها بررسی شده است (پاسخ نیم صفحه $u_x = 2$ ؛ $u_y = 0$ در نظر گرفته شده است به نحوی که $u_x > 2$ به معنای بزرگنمایی و $u_x \leq 2$ به معنای میرایی و کاهش حرکت زمین می باشد). دیده شده است که در داخل دره کاهش جابجایی افقی را داریم که مقدار حداقل آن در کف دره است و حداکثر مقدار در لبه بالایی رخ می دهد. در خارج دره نیز بزرگی تغییر مکان برای دو مولفه به کندی تغییر می کند. اما با افزایش فرکانس بازهم مانند گذشته تناوب پیک ها و مینیمم ها افزوده می شود و مقادیر حداکثر و حداقل قابل توجه تر می شوند. همچنین می توان دید که اگر فرکانس بی بعد به افزایش خود ادامه دهد، مقدار پیک بزرگی تغییر مکان خیلی تغییر نمی کند اما طیف حرکت زمین پیچیده تر می شود. در زیر نمونه ای از این تحلیلها را برای یک دره مثلثی تحت فرکانس بدون بعد $\eta = 2L/\lambda$ برابر ۰.۵ مشاهده می کنیم (تصویر ۵).



تصویر ۵- اثر زاویه شیب روی پاسخ لرزه ای یک دره مثلثی تحت فرکانس بدون بعد ۰.۵ (a) تغییر مکان افقی (b) تغییر مکان قائم

۶. اثرات توپوگرافیک در تپه‌ها [۳]

در مورد تپه‌ها همانطور که از شکل آن نیز پیداست رفتار کاملاً مشابه دره‌ها می‌باشد اما در جهت عکس. یعنی به جای افزایش کاهش می‌بینیم و بالعکس. بنابراین همان نتایج دره‌ها را برای تپه‌ها هم داریم. قابل ذکر است که در تپه‌ها روی قله همیشه افزایش حرکت را داریم که این مقدار گاه به حدود دو برابر حرکت نیم فضای آزاد نیز می‌رسد

۷- نتیجه گیری

۱. اثبات شده است که اثرات ساختگاه می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی شدت و محتوای فرکانسی زلزله ایجاد کند. در بسیاری زلزله‌ها نظیر زلزله ۱۹۶۸ توکاچی اوکی، کوزانی (یونان)، ۱۹۸۰ جنوب ایتالیا و ... دیده شده است که ساختمانهای ساخته شده در کنار عوارض توپوگرافی نظیر دره‌ها و کوهها اسبب های جدی تری نسبت به بستر صاف دیده اند. این پدیده به علت بزرگنمایی توپوگرافیک می‌باشد. لذا در نظر گرفتن این اثرات در آیین نامه‌های لرزه‌ای، برنامه ریزی کاربری زمین و طراحی برای کاهش خطرات زلزله الزامی می‌باشد.
۲. آیین نامه‌هایی که تاکنون اثر توپوگرافیک را وارد کرده اند آیین نامه PS-۹۲ فرانسه و آیین نامه اروپا EC-۸(۲۰۰۰-Draft۲۰۰۲) می‌باشد که حداکثر این ضریب در آیین نامه‌های یاد شده در حدود ۱,۴ است. لیکن در عمل بزرگنمایی‌هایی بیش از این هم دیده شده است. همچنین این آیین نامه‌ها اثر افزایش مولفه قائم را در نظر نمی‌گیرند. در مطالعه‌ای که توسط Bouckovalas و همکارانش انجام شد نیز دیده شد که متوسط بزرگنمایی توپوگرافیک در سائیتی که بررسی کرد ۵۰٪ بود و در شرایطی به مقادیر نزدیک ۳ (۲۰۰٪) هم می‌رسید که این نشان می‌دهد آیین نامه‌های موجود اثر را به خوبی پیش بینی نمی‌کنند.
۳. در مورد شیب شیروانی Ashford & Sitar بیان می‌کنند که بیشترین اثر بزرگنمایی را در نزدیکی قله داریم (بالای شیب شیروانی) و این مقدار برای $(\frac{H}{\lambda} = 0.2)$ حداکثر و برای $(\frac{H}{\lambda} = 0.4)$ حداقل مقدار خود را دارد. با توجه به نمودارهای ارائه شده توسط Ashford & Sitar برای شیب شیروانی می‌بینیم در حالتی که راستای انتشار امواج قائم است با افزایش شیب شیروانی بزرگنمایی توپوگرافیک افزوده می‌شود که حداکثر آن را برابر ۱,۵ بیان کرده اند. همچنین آنها نموداری ارائه کرده اند که اثر تورب انتشار موج از راستای قائم را نشان می‌دهد. می‌بینیم که با افزایش تورب راستای انتشار موج، اثرات توپوگرافیک بیشتر می‌شود.
۴. مطالعه Gatmiri و همکاران روی شیب‌های شیروانی (پله‌ای) نشان داد که رفتار در فرکانس‌های پایین و بالا متفاوت است بنحوی که با افزایش فرکانس رفتار پیچیده تر می‌شود و حداکثر مقادیر بزرگنمایی با افزایش شیب بیشتر می‌گردد و نیز این مقدار حداکثر را برای فرکانس بدون بعد ۰,۵ برابر ۱,۵ (۵۰٪) بدست آوردند. همچنین دیده می‌شود که با افزایش زاویه شیب برای یک فرکانس خاص بزرگنمایی بیشتر می‌شود.
۵. در مورد دره‌های مثلثی دیده شد که در داخل دره مولفه افقی زلزله کاهش می‌یابد و نیز بازهم با افزایش فرکانس رفتار پیچیده تر می‌شود. بیان شد که رفتار تپه‌ها مشابه رفتار دره‌ها می‌باشد منتهی در جهت عکس.
۶. در فرکانس‌های پایین حرکت لرزه‌ای زمین در قله تپه، گوشه بالایی شیب‌ها و لبه‌های دره‌ها افزایش می‌یابد و بر روی بستر این اشکال کاهش می‌یابد. اما برای فرکانس‌های بالا این مسئله همواره درست نیست. مثلاً حرکت در کف دره و تپه ممکن است افزایش یابد. اما یک استثنا، بزرگنمایی در قله تپه می‌باشد.
۷. تغییر مکان نسبی در داخل عارضه و در کنار عارضه اتفاق می‌افتد. این نوع تغییر مکان بخاطر وجود امواج سطحی و تداخل آن با امواج برخوردی و بازتابش شده می‌تواند اثر مهمی روی رفتار لرزه‌ای سازه‌هایی که نزدیک عارضه قرار گرفته‌اند داشته باشد. بنابراین در نظر گرفتن این فاکتور در طراحی‌ها ضروری است.
۸. دیدیم حتی هنگامی که سیگنال ورودی موج صفحه‌ای SV با برخورد قائم می‌باشد مؤلفه قائم حرکت سطح غیر صفر است. بزرگی این مؤلفه ممکن است با مؤلفه افقی قابل قیاس باشد. بنابراین گاه نیاز است اثر همزمان حرکت زمین در دو یا سه جهت مطالعه شود.
۹. دیده شد که ضریب میرایی فقط روی فاصله تا سطح آزاد اثر می‌گذارد و نیز N اثر خیلی کمی روی لرزه دارد. همچنین Bouckovalas و همکارانش چهار رابطه بدست داده اند که مقادیر A_{h-max} ، A_{v-max} ، $\frac{D_h}{H}$ ، $\frac{D_v}{H}$ را بر حسب پارامترهای N ، ξ ، I ، $\frac{H}{\lambda}$ بدست می‌دهد. همچنین کارآماری روی داده‌ها انجام شده که نشان داد انحراف استاندارد هر رابطه بین ۴۰٪ - ۲۹٪ می‌باشد.
۱۰. فاصله تا سطح آزاد D_{ff} بعنوان D_h و D_v حدود $(2-8)H$ است.
۱۱. توپوگرافی عمدتاً شتاب حداکثر زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهد و محتوای فرکانسی حرکت زمین را به مقدار کمتری تغییر می‌دهد. عرض ناحیه تحت تاثیر قرار گرفته‌ای که توسط روابط Bouckovalas بدست می‌آید در پشت قله کمتر از واقعیت و برای مولفه قائم بیشتر از واقعیت می‌باشد.

۱۲. اثر توپوگرافی شیب باعث افزایش یا کاهش شتاب حداکثر لرزه‌ای زمین در جلو و پشت قله می‌شود. همچنین شتاب قائمی ایجاد می‌کند که با تحریک ورودی تداخل می‌کند (بر هم نهی). اثر توپوگرافی به شدت با فاصله از شیب تغییر می‌کند. به نحوی که تشخیص آن بر اساس اندازه گیری‌های میدانی به تنهایی نیاز به شبکه متراکم لرزه‌نگاری دارد.

۱۳. اثرات توپوگرافی برای $\frac{H}{\lambda} < 0.16$ و شیب بیشتر از $i > 17^\circ$ اهمیت پیدا می‌کنند. اگر این شرایط وجود داشته باشند مقادیر حداکثر بزرگنمایی برای مؤلفه‌های افقی و قائم پشت قله معمولاً در حدود $A_{v_max} = 0.1-1.10$, $A_{h_max} = 1.2-1.5$ تغییر می‌کند در حالیکه شرایط سطح آزاد در پشت قله در فاصله $D_{ff} = (2-8)H$ رخ می‌دهد.

منابع و مآخذ:

۱. Bard, P., Thomas, J. "Wave propagation in complex geological structures and their effects on strong ground motion".
۲. Bouckovalas, G., Kouretzis, G. (۲۰۰۱) "Review of soil and topography effects in the September ۷, ۱۹۹۹ Athens (Greece) earthquake". Fourth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics San Diego, California.
۳. Nguyen, K. Gatmiri, B (۲۰۰۷) "Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity". Soil dynamics and earthquake engineering.
۴. Kamalian, M. Gatmiri, B. Sohrabi Bidar, A. (۲۰۰۳) "On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM". JSEE: Summer ۲۰۰۳, Vol. ۵, No. ۲
۵. Ashford, S., Sitar, N. (۲۰۰۲) "Simplified method for evaluating seismic stability of steep slopes". Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering.
۶. Ashford, S. Sitar, N. (۱۹۹۵) "Topographic amplification in steep slopes". Earthquake geotechnical engineering, Balkema, Rotterdam.
۷. Bouckovalas, G., Papadimitriou. (۲۰۰۵) "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion". Soil dynamics and earthquake engineering.
۸. Bouckovalas, G., Papadimitriou. "Geotechnical aspects of the ۱۹۹۵ Agion (Greece) earthquake".
۹. Sholtis, S. Stewart, J (۱۹۹۹) "Topographic effects on seismic ground motions above and below a cut slope in sand".
۱۰. Sitar, N. And Roessig, L., Ashford, S., Stewart. (۱۹۹۷). "Seismic response of steep natural slopes, structural fills, and reinforced soil slopes and walls". Seismic behavior of ground and geotechnical structures, Balkema, Rotterdam.
۱۱. Stewart, J., Sholtis, S. (۲۰۰۴). "Case study of strong ground motion variations across cut slope". Soil dynamics and earthquake engineering.