بررسی پارامتریک تأثیر حضور سازه بر رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب با در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک- سازه در خاک‌های با سختی متوسط

عمید عرفانی*، علی قنبری، علی معصومی؛ دانشگاه خوارزمی، تهران

تاریخ: دریافت ۹٤/۸/۳۰ **پذیرش** ۹۵/۱/۱۵

چکیده

زلزله‌های گذشته نشان داده‌اند که بی‌نظمی‌های توپوگرافی تأثیرات چشم‌گیری بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه داشته و با بزرگ‌نمایی پاسخ‌ها سبب آسیب‌های شدیدی بر سازه‌ها شده است. تحقیقات صورت گرفته بر رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب نشان داده است که پاسخ دینامیکی سطح آزاد و سیستم خاک- سازه به‌شدت تحت تأثیر شکل توپوگرافی و ویژگی‌های خاک ساختگاه است. هم‌چنین زاویه و ارتفاع شیب، فرکانس تحریک ورودی، رفتار غیرخطی خاک و عمق سنگ بستر از دیگر پارامترهای مؤثر بر پاسخ کل سیستم است علاوه بر این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حضور سازه در مجاورت شیب بر تغییر الگوی رفتار لرزه‌ای این توپوگرافی بسیار مؤثر بوده است اما این بررسی‌ها بسیار محدود است از این رو، در این تحقیق به بررسی تأثیر حضور سازه در تغییر الگوی رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب می‌پردازیم. پارامترهای بررسی شده در این مقاله برای بررسی اندرکنش توپوگرافی- خاک-سازه، زاویهٔ شیب و فرکانس‌تحریک وروردی است که نتایج نشان می‌دهند در حالت حضور سازه در مجاورت شیب به‌طورکلی در محل سازه شاهد افزایش پاسخ نسبت به میدان آزاد هستیم که به‌طور میانگین، مقدار شتاب افقی در محل سازه تقریباً ۱/۳ برابر شتاب در میدان آزاد است و هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که حضور سازه در مجاورت شیب موجب انتقال حداکثر پاسخ به فاصله‌ای دورتر از محل سازه می‌شود که به‌طور میانگین مقدار شتاب افقی در این نقطه نیز تقریباً ۱/٦ برابر شتاب در میدان آزاد است. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده در این مقاله برای یک نوع خاک با سختی متوسط که بر اساس آیینامه ۲۸۰۰ در ردهٔ تیپ III قرار می‌گیرد ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی شیب، اندرکنش خاک-سازه، رفتار لرزه‌ای شیب

* **نویسنده مسئول** Amid.Erfani@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

مقدمه

امروزه با توجه به افزایش ارزش اقتصادی زمین و از طرفی کمبود فضاهای با کاربری مسکونی در مناطق شهری، شاهد ساخت و سازهایی در مجاورت شیب‌های تند هستیم. با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران، توجه به شیب محل ساختگاه سازه و بررسی پایداری این سازه‌ها می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. به توپوگرافی شیب در مقایسه با توپوگرافی‌های تپه‌ای و دره‌ای شکل کم‌تر توجه قرار شده است به‌طوری‌که در اواخر دهه ۱۹۶۰ به اهمیت این نوع توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای زمین توجه شد. شاید این توجه نداشتن به این دلیل است که نامتقارنی هندسی این نوع توپوگرافی بررسی‌های تحلیلی را پیچیده کرده و از طرفی دیگر می‌توان این دلیل را آورد که تعیین و اندازه‌گیری داده‌های field در این زمینه کار دشوار و هزینه‌برداری است (به‌علت پراکندگی امواج انعکاسی از این توپوگرافی) از زلزله‌های مخربی که تأثیر این نوع توپوگرافی در آن‌ها مشهود بوده است. می‌توان به زلزله‌های کانال بیگ شیل[1] (۱۹۸۵)، ویتی‌یر نارو[2] (۱۹۸۷)، ایژن گریس[3] (۱۹۹۵)، آتن گریس[4] (۱۹۹۹) اشاره کرد که در زلزله ۱۹۹۹ آتن میزان آسیب در نقاط مختلف به‌شدت غیریک‌نواخت بود. اگرچه روابطی در این زمینه در مقالات ارائه شده اما هنوز در بیش‌تر آیین‌نامه‌های مدرن، اجرایی نشده است. تاکنون پژوهش‌*های* تقریباً گسترده‌ای در زمینهٔ تأثیر توپوگرافی در بزرگ‌نمایی حرکت لرزه‌ای سطح زمین و پارامترهای مؤثر بر رفتار این توپوگرلفی صورت گرفته است به‌طوری‌که عده‌ای از محققان ([۱]، [۲]، [۳]، [٤]، [٥]، [٦]، [۷]، [۸]) با در نظرگیری رفتار خطی و غیرخطی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ارتفاع و زاویهٔ شیب، عمق سنگ بستر، فرکانس تحریک ورودی، لایه‌بندی خاک ساختگاه، نسبت امپدانس بستر، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ساختگاه بر رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب پرداخته‌اند که به‌طورکلی نتایج این محققان، بزرگ‌نمایی پاسخ‌های افقی و ایجاد پاسخ قائم را در مجاورت این توپوگرافی نشان می‌دهد.

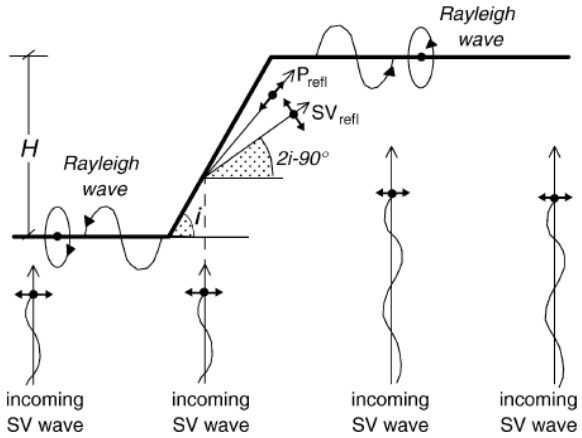
1. Canal Beagle Chile 2. Whittier Narrows 3. Aegion Greece 4. Athens Greece

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

هم‌چنین پژوهش‌*های* محدودی ([۳] و [۸]) نیز برای یک شیب ۳۰ درجه به ارتفاع ٤٠ متر به بررسی تأثیر حضور سازه بر تغییر رفتار لرزه‌ای و الگوی بزرگ‌نمایی پاسخ‌ها به‌وسیلهٔ این توپوگرافی پرداخته‌اند. از این رو، در این تحقیق، بررسی پارامتریک المان محدود تأثیر حضور سازه در مجاورت توپوگرافی شیب در تغییر الگوی رفتاری این توپوگرافی در یک خاک همگن با سختی متوسط و قرار گرفته بر سنگ بستر صلب انجام شده است.

پژوهش‌های انجام شده در این موضوع براساس تئوری انتشار امواج است زیرا محققان عامل اصلی ایجاد مؤلفهٔ جابه‌جایی قائم و بزرگ‌نمایی حرکات سطحی را انعکاس امواج برخورد کرده به شیب می‌دانند. امواجی که در محیط خاک براثر زلزله و حضور توپوگرافی شیب ایجاد می‌شوند شامل امواج قائم ورودی SV- امواج منعکس شده از سطح شیب- امواج عبوری و انعکاسی از لایه‌های خاک- امواج رایلی- امواج SP (امواجی که بعد از برخورد به شیب انکسار یافته و دقیقاً روی شیب و با سرعتی برابر با سرعت امواج P حرکت می‌کنند و این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که نسبت پواسون خاک برابر ۰/۳۵ و زاویهٔ شیب برابر با $\arcsin(V_s/V_p)$ باشد) در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نحوهٔ انتشار امواج در محیط بررسی شده نشان داده شده است.



شکل۱. امواج ایجاد شده در محیط خاک بر اثر حضور توپوگرافی شیب [۱]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

مروری بر پژوهش‌های محققان گذشته

نتایج پژوهش‌های محققان معمولاً بزرگ‌نمایی حرکت افقی و قائم را در تاج و کاهش حرکت در پاشنه شیب را نشان می‌دهند اما میزان این بزرگ‌نمایی و نیز رفتار توپوگرافی شیب به پارامترهای گوناگونی وابسته است که در ادامه به پژوهش*های* محققان پرداخته می‌شود. هم‌چنین لازم به توضیح است که ضرایب A_h و A_v که به‌ترتیب بیان‌گر ضریب افقی و قائم بزرگ‌نمایی توپوگرافی هستند به‌ترتیب به‌صورت $(a_{h,max}/a_{h,ff})$ و $(a_{v,max}/a_{h,ff})$ و ضریب A_S که بیان‌گر تأثیر شرایط خاک (صرف نظر از حضور توپوگرافی) در بزرگ‌نمایی پاسخ است نیز به‌صورت $(a_{h,ff}/a_0)$ تعریف می‌شود. که a_0 دامنهٔ تحریک ورودی، $a_{h,max}$ حداکثر شتاب افقی ایجاد شده در سطح زمین و $a_{h,ff}$ شتاب افقی در میدان دور هستند.

بررسی‌های بوکوالس[1] و پاپادیمیتروس[2] [۱] نشان می‌دهد که تغییرات شتاب افقی حرکت سطح زمین در مجاورت تاج شیب (حدودا ۱۰ متر) به‌شدت با فاصله از تاج نوسان می‌کند برای تحریک با فرکانس زیاد و برای شتاب قائم نیز همین نتایج ارائه شده است هم‌چنین نتایج پژوهش‌های این محققان نشان می‌دهد که افزایش زاویهٔ شیب (i) و نسبت ارتفاع شیب به طول موج تحریک ورودی (h/λ) علاوه بر افزایش مقادیر پاسخ‌ها موجب غیریک‌نواختی شدید این پاسخ‌ها نیز می‌شود.

گزتاس[3] و همکاران [۲] که به بررسی منطقه آدامز[4] یونان که در مجاورت درهٔ رودخانه کیفیسوس[5] واقع است پرداخته‌اند، نشان دادند که تأثیر توپوگرافی دوبعدی برای یک شیب ۳۰ درجه فقط تا فاصلهٔ ۵۰ متری از لبهٔ تاج شیب قابل توجه است که شتاب افقی در مجاورت این شیب در یک خاک همگن و یک‌نواخت با ضریب تقریباً ۱/۲ در مقایسه با میدان دور افزایش می‌یابد در حالی‌که این ضریب برای شتاب قائم ۰/۲ برابر شتاب افقی است و توپوگرافی شیب موجب تغییر محتوای فرکانسی تحریک ورودی شده و لایه‌بندی خاک ساختگاه این توپوگرافی علاوه بر افزایش بزرگ‌نمایی پاسخ‌ها سبب تغییرات ناگهانی پاسخ نیز می‌شود.

1. Bouckovalas 2. Papadimitriou 3. Gazetas 4. Adames 5. Kifissos

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

آسیماکی[1] و همکاران [۳] برای تحریک ورودی مشخص و ثابت نشان دادند که بزرگ‌نمایی ناشی از توپوگرافی شیب با افزایش ارتفاع شیب افزایش یافته و نتایج پژوهش‌های تریپ[2] و همکاران [٤] نشان می‌دهد که هرچه عمق سنگ بستر کم‌تر باشد میزان بزرگ‌نمایی پاسخ سطح زمین بیش‌تر و با بزرگ‌تر شدن طول موج تحریک ورودی نسبت به ارتفاع شیب اثرات این توپوگرافی ناچیز و با افزایش زاویهٔ شیب میزان بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که بیش‌ترین بزرگ‌نمایی پاسخ سطح زمین در شیب قائم رخ می‌دهد. هم‌چنین نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که انتشار یا انکسار امواج لرزه‌ای به‌وسیلهٔ توپوگرافی شدیداً وابسته به فرکانس تحریک ورودی است و مکان رخ دادن حداکثر مقدار شتاب افقی در پشت تاج شیب به‌وسیلهٔ طول موج غالب تحریک ورودی کنترل می‌شود ($x = 0.2\lambda_0$ که x فاصلهٔ از تاج شیب است).

ریزیتانو[3] و همکاران [٦] و دهاکال[4] [۷] نیز بر این نکته تأکید دارند که با افزایش زاویهٔ شیب میزان پاسخ‌ها در تاج افزایش می‌یابد. پژوهش‌های آسیماکی و کوزل[5] [۸] نشان می‌دهد که اثر توپوگرافی برای طول موج‌های تقریباً برابر با بعد افقی سازه یا کوچک‌تر از آن مشهودتر است و بر اساس بررسی‌های دهاکال [۷] با افزایش ارتفاع شیب اثر امواج تحریک با فرکانس کوچک‌تر در بزرگ‌نمایی ناشی از توپوگرافی شیب بیش‌تر است و تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی تأثیر ناچیزی در بزرگ‌نمایی حرکات سطح زمین دارد اما بر اثر کاهش چسبندگی مقادیر پاسخ شتاب، سرعت و تغییر مکان سطح زمین مجاور شیب افزایش یافته و نتایج برای شیب‌های تندتر نیز شدیدتر می‌شود.

پژوهش‌های ریزیتانو و همکاران [٦] روی شیب ۳۰ درجه بر محیط خاکی همگن نیمه بینهایت نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک مقادیر حداکثر A_h و A_v روی تاج رخ نمی‌دهد (بر خلاف حالت با فرکانس ۲ هرتز) بلکه در فاصله‌ای مشخص از تاج شاهد این بزرگ‌نمایی هستیم و با افزایش فرکانس تحریک میزان و تغییرات این پارامترها نیز زیاد می‌شود.

1. Assimaki 2. Tripe 3. Rizzitano 4. Dhakal 5. Kausel

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

این محققان به تأثیر سهم شرایط خاک در بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب در سطح مجاور شیب پرداختند به‌طوری‌که در فرکانس‌هایی که فرکانس تحریک ورودی نزدیک فرکانس طبیعی لایه آبرفت است تأثیرات شرایط خاک (مقادیر ضریب A_S) بارزتر بوده است و شرایط توپوگرافی قابل چشم پوشی است اما برای مقادیر فرکانس‌های ورودی که دور از فرکانس طبیعی لایه آبرفت است اثر توپوگرافی غالب است که تحقیقات تریپ و همکاران [٤] نیز همین رفتار را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که PI خاک بر آستانه کرنش برشی خطی تأثیر می‌گذارد بنابراین بر بزرگ‌نمایی یا کاهندگی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نیز مؤثر است از این رو، این محققان رفتار لرزه‌ای شیب را به‌وسیله رفتار خطی معادل خاک، با در نظرگیری پارامترهای دامنهٔ شتاب تحریک (a_0)، فرکانس تحریک (f) و پلاستیسیته (PI) بررسی کردند که نتایج نشان می‌دهد که تأثیر PI بر رفتار توپوگرافی شدیداً به فرکانس تحریک وابسته است. هم‌چنین نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که در رفتار خطی معادل مقادیر A_h و A_v شدیداً تحت تأثیر مقدار دامنهٔ شتاب تحریک ورودی است. در این پژوهش محققان به مقایسه پاسخ‌ها در دو حالت خطی و خطی معادل پرداخته‌اند که نتایج نشان می‌دهد در ارزیابی مقادیر A_h و A_v فرضیات رفتار خاک تأثیر به‌سزایی دارد به‌طوری‌که اگر رفتار غیرخطی خاک در نظر گرفته نشود نتایج در حالت الاستیک تا ۳۰ درصد کم‌تر ارائه خواهد شد و روند پاسخ‌ها در دو نوع رفتار نیز متفاوت خواهد بود.

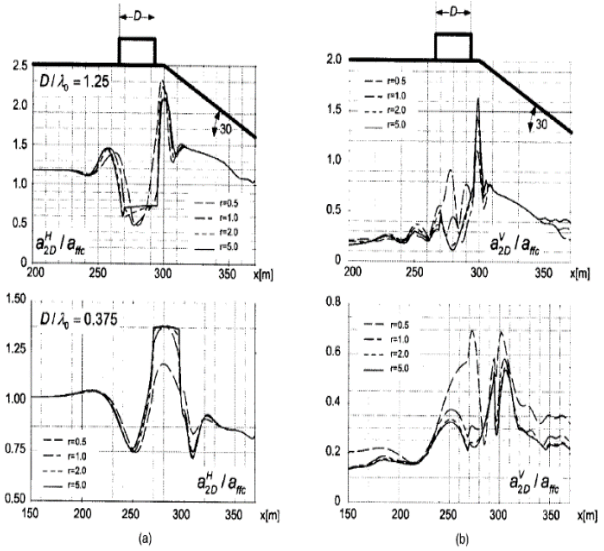
آسیماکی و همکاران [۳] با مدل‌سازی سازه به‌صورت یک بلوک جامد در مجاورت یک شیب ۳۰ درجه به بررسی اثر حضور سازه بر تغییر رفتار این توپوگرافی پرداخته‌اند. بر اساس آنالیزهای پارامتری الاستیک امواج به دام افتاده (امواج برخورد کننده و منکسر شده) در داخل سازه منجربه افزایش قابل توجه مؤلفهٔ شتاب قائم و کاهش مؤلفه پاسخ افقی شتاب در محل سازه نسبت به میدان آزاد می‌شود که این پدیده به مسیر دوار امواج به دام افتاده در سازه نسبت داده شده که باعث اعمال حرکت گهواره‌ای شدیدی می‌شود و شدت حرکت قائم با افزایش سختی سازه کاهش می‌یابد (به‌دلیل توانایی نداشتن سازه صلب برای پیروی از حرکت‌های اختلافی) و نتایج آنالیزهای غیرخطی در خاک نسبتاً نرم نشان می‌دهد که هنگامی که سازه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

تحت بارگذاری‌های دینامیکی قرار می‌گیرد ناحیهٔ زیر فونداسیون تسلیم شده و تغییر شکل‌های غیرالاستیک ایجاد می‌شود که این سبب کاهش امپدانس دینامیکی محیط نیمه‌بینهایت خاک شده که موجب بزرگ‌نمایی حرکت سازه نیز می‌شود. تأثیر حضور سازه در تغییر الگوی بزرگ‌نمایی پاسخ در مجاورت شیب در نسبت امپدانس‌های بالا نیز قابل توجه‌تر است.

آسیماکی و کوزل [۸] به بررسی تغییر الگوی بزرگ‌نمایی امواج به‌علت حضور سازه در کنار شیب ۳۰ درجه پرداخته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آنالیزهای الاستیک چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ضریب بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب افقی و قائم در سطح زمین (در مکان سازه) کاهش یافته و در منطقه بین سازه و تاج شیب نیز افزایش می‌یابد. بنابراین نتایج آنالیزهای الاستیک این محققان نشان می‌دهد که حضور سازه در محل حداکثر پاسخ سطح مجاور شیب نه تنها بر پاسخ در محل سازه بلکه بر پاسخ بین سازه و تاج شیب نیز مؤثر است.



شکل ۲. تأثیر حضور سازه بر تغییر پاسخ شتاب در مجاورت توپوگرافی شیب تحت آنالیز الاستیک [۸]

با مقایسه‌ای که بین مقادیر حداکثر پاسخ در حالت بدون حضور سازه و با حضور سازه انجام شده است نتایج آنالیزهای الاستیک نشان داده‌اند که در حالت حضور سازه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

$A_{h,max}$=2.2 و $A_{v,max}$=1.5 و در حالت عدم حضور سازه $A_{h,max}$=1.4 و $A_{v,max}$=0.8 بوده است [۸]

هم‌چنین نتایج بررسی‌های غیرخطی این محققان در سه پروفیل خاک A، B و C که به‌ترتیب بیان‌گر خاک‌های سخت (Vs=500 m/s)، نسبتاً سخت (Vs=400 m/s) و نرم (Vs=340 m/s) هستند نشان می‌دهد که آنالیزهای غیرخطی رفتار متفاوتی را نسبت به آنالیزهای الاستیک نشان می‌دهند [۸] با توجه به شکل ۳ به‌طوری‌که مشاهده می‌شود بزرگ‌نمایی ناشی از توپوگرافی شیب در ابتدا در نزدیکی فونداسیون محدود شده است و بلافاصله بعد از فونداسیون شاهد کاهش شدید پاسخ و در محل فونداسیون نیز شاهد افزایش پاسخ هستیم که با مقایسه نتایج با حالت میدان آزاد (پاسخ توپوگرافی شیب بدون حضور سازه) مقدار بزرگ‌نمایی پاسخ در محل فونداسیون تقریباً با مقادیر بزرگ‌نمایی پاسخ در حالت بدون حضور سازه یک‌سان است هم‌چنین به‌طوری‌که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با کاهش سختی خاک مقدار بزرگ‌نمایی پاسخ‌ها در محل فونداسیون نیز کاهش یافته و در منطقه‌ای بعد از سازه افزایش می‌یابد و برای مؤلفهٔ قائم A_v در هر سه پروفیل مقدار بزرگ‌نمایی یک‌سان بوده و به‌علت حرکت گهواره‌ای نقاط بزرگ‌نمایی تیز گوشه در دو طرف فونداسیون مشاهده می‌شود که این نقاط تیز گوشه در پاسخ میدان آزاد مشاهده نمی‌شوند از این رو، مؤلفهٔ A_v در حالت حضور سازه مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهد.

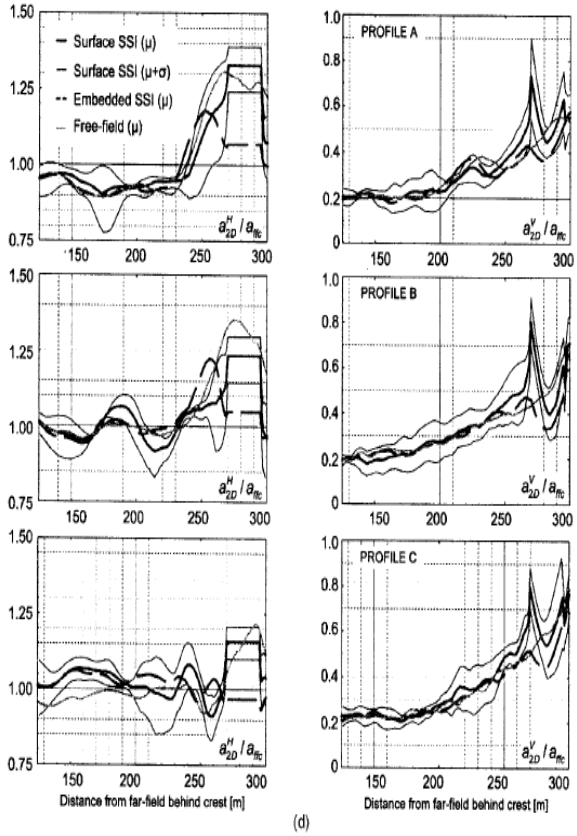
صحت‌سنجی تحقیقات

به‌منظور صحت‌سنجی پژوهش‌های انجام شده در این مقاله نتایج به‌دست آمده براساس مدل ارائه شده در شکل ۵ با نتایج تحقیقات تریپ و همکاران [٤] و تریپ و کونتویی[1] [۹] مقایسه شده است. بدین‌منظور یک شیب به ارتفاع ۵۰ متر، زاویهٔ ۹۰ درجه و ضخامت لایه خاک پشت شیب ۲۵۰ متر طبق مدل شکل ۵ مدل‌سازی شده و تحریک ورودی نیز به‌صورت موج سینوسی با دامنه g ۰/۱ و فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۵، و ۱۰ هرتز طبق بررسی‌های مذکور به مرز زیرین مدل به‌صورت موج SV اعمال شده و حداکثر شتاب افقی

1. Kontoe

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

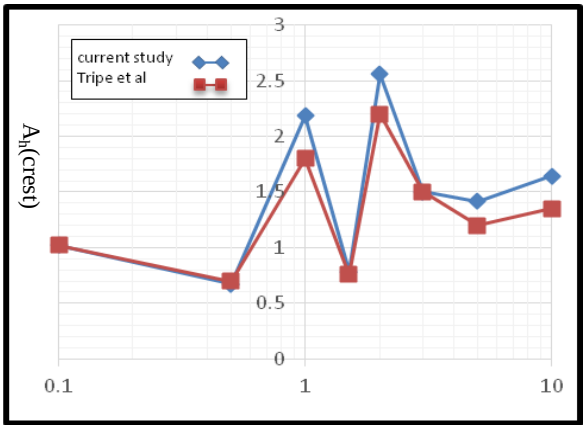


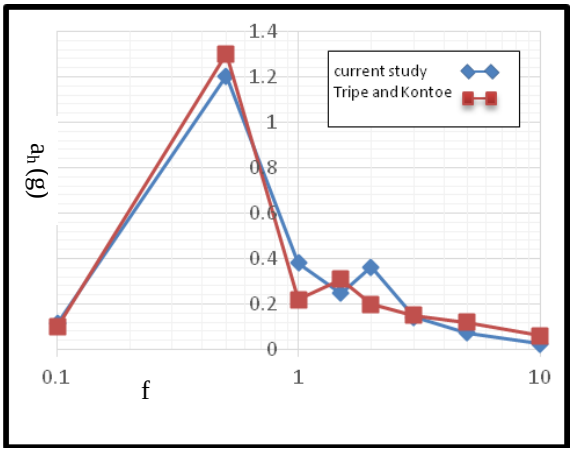
شکل ۳. تأثیر حضور سازه بر تغییر پاسخ شتاب در مجاورت توپوگرافی شیب در سه پروفیل خاک تحت آنالیز غیرخطی [۸]

($a_{h,max}$) و ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (A_h) در تاج شیب محاسبه شده است (مدل رفتاری خاک الاستیک است و سایر مشخصات خاک در این مدل‌ها بر اساس مشخصات ارائه شده در پژوهش‌های مذکور است) و نتایج تحت فرکانس‌های مذکور در شکل ٤ ترسیم شده است به‌طوری‌که محور افقی بیان‌گر فرکانس تحریک ورودی و محور قائم بیان‌گر پاسخ‌های محاسبه شده در تاج شیب است. چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج مدل ارائه شده تطابق خوبی با نتایج پژوهش‌های این محققان دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]





شکل ٤. نتایج آنالیزها در تاج شیب قائم- نمودار بالا: ضریب افقی بزرگ‌نمایی توپوگرافی و نمودار پایین: شتاب افقی حداکثر

فرضیات و شیوهٔ آنالیزها

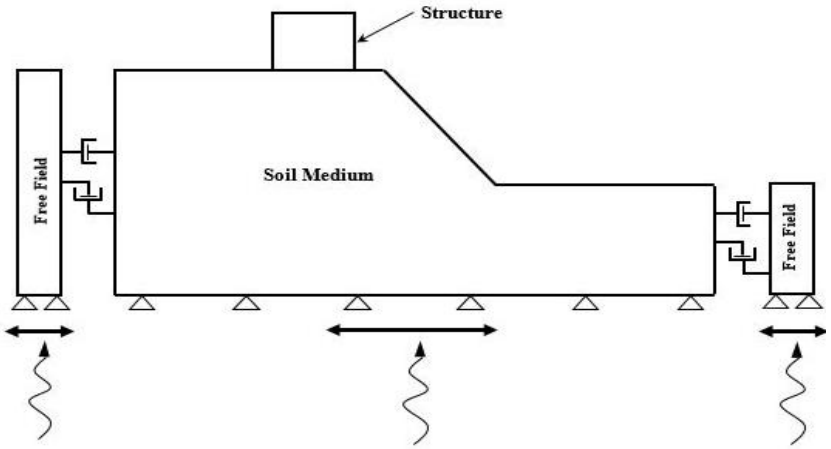
۱. مشخصات سیستم خاک و سازه

در این پژوهش نوعی خاک همگن با سرعت موج برشی ۳۲۰m/s، دانسیتهٔ ρ=۲۰۰۰Kg/m^3، نسبت پواسون ν=۰/۳۵، چسبندگی C = ۱۰۰ KPa و زاویهٔ اصطکاک داخلی Φ = ۳۷ مدل شده است. سازه به‌صورت بلوکی جامد با دانسیته ρ=٤۰۰ Kg/m^3 و نسبت پواسون ν=۰/۳۵ مدل شده که مرکز این بلوک در تمامی مدل‌ها در فاصلهٔ ۲۰ متری از لبه شیب واقع است و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

هم‌چنین هیچ‌گونه جابه‌جایی نسبی بین سازه و خاک وجود ندارد. به‌منظور در نظرگیری کاهش انرژی امواج در سیستم خاک-سازه میرایی رایلی با نسبت میرایی ۵٪=ζ (مطابق با سایر تحقیقات) به‌کار برده شده است.

میرایی رایلی وابسته به فرکانس است در حالی‌که در واقعیت میرایی خاک تقریباً مستقل از فرکانس است از این رو، به‌منظور کاهش اثر وابستگی میرایی به فرکانس ضرایب α و β بر اساس فرکانس‌های بین ω_1 و ω_2 انتخاب شده‌اند که انتخاب این دو فرکانس شدیداً وابسته به مدل مسئله و محتوای فرکانسی تحریک ورودی است که در این پژوهش ω_1 معادل با فرکانس طبیعی مد اول سیستم یک بعدی متناظر با لایه خاک پشت تاج شیب و ω_2 نیز متناظر با فرکانس غالب تحریک ورودی است [٤].



شکل ۵. مدل المان محدود سیستم خاک-سازه و شبیه‌سازی مرزهای جانبی به‌کار رفته در آنالیزها

۲. مدل‌سازی عددی

با توجه به این که معادلات حاکم بر حرکت برای درنظرگیری اندرکنش فونداسیون و خاک و روش حل این معادلات نسبتاً پیچیده است بنابراین در این پژوهش از روش مستقیم برای بررسی مسئله استفاده شده است. در این روش کل سیستم خاک-سازه در یک مرحله مدل شده و آنالیز می‌شود. در این بررسی به‌منظور مدل‌سازی سیستم خاک-سازه و حل معادلات پیچیده و شرایط مرزی و هندسی، نرم‌افزار المان محدود ABAQUS V6.11 به‌کار گرفته شده است. مدل المان محدود شامل یک شیب خاکی به ارتفاع h=۳۰m، زاویهٔ شیب متغیر i و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

عمق سنگ بستر H=٤٠m است که به‌صورت شماتیک در شکل ۵ ارائه شده است. رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب با فاکتورهای فرکانس تحریک ورودی و زاویهٔ شیب (i) بررسی شده است و سایر پارامترهای مؤثر بر رفتار این توپوگرافی ثابت در نظر گرفته شده است. قابل توجه است که فرض بر این است که طول بلوک سازه (بعد عمود بر صفحه) بسیار بزرگ‌تر از عرض سازه است و سازه بر یک فونداسیون نواری واقع است بنابراین شرایط کرنش صفحه‌ای بر مسئله حاکم است.

از آن‌جاکه خصوصیات و پارامترهای دینامیکی مصالح وابسته به سطح تنش است از این رو، ابتدا پیش از آغازتحلیل دینامیکی، تحت تحلیل استاتیکی تنش‌های اولیه در محیط خاک ایجاد و سپس تحریک به مدل اعمال شده است در مدل‌سازی با توجه به شرایط مرزی متفاوت در دو تحلیل، مدل‌سازی به‌گونه‌ای انجام شده که مرزهای استاتیکی اولیه درست در هنگام شروع تحلیل دینامیکی به مرزهای با شرایط نشان داده شده در شکل شماتیک ۵ تبدیل می‌شوند. تحریک ورودی با فرض شرایط کرنش صفحه‌ای به‌صورت امواج هارمونیک سینوسی با دامنهٔ g ۰/۲ که به‌صورت امواج برشی SV و به‌صورت قائم در صفحه در محیط خاک منتشر می‌شود. لازم به توضیح است که پژوهش‌*های* محققان نشان داده است که تأثیر امواج SV در رفتار توپوگرافی از دو نوع موج P و SH بیش‌تر است [١٦]، [١٧]، [١٨].

۱-۲. المان‌های خاک و سازه

به‌منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی محیط خاک مدل مور-کولمب به‌کار گرفته شده است. محققان بسیاری تاکنون این مدل را که مدلی الاستیک-پلاستیک کامل محسوب می‌شود برای بررسی مسائل دینامیکی اندرکنش خاک-سازه به‌منظور شبیه‌سازی رفتار خاک تحت تحریک بار زلزله در سیستم خاک-سازه به‌کار برده‌اند هم‌چنین رفتار بلوک سازه به‌صورت الاستیک در نظر گرفته شده است.

المان‌های محیط خاک و سازه در مدل المان محدود به‌صورت چهارضلعی هشت‌گره‌ای کرنش صفحه‌ای دوبعدی درنظر گرفته شده است. در تحلیل‌های دینامیکی ابعاد المان‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که امواج زلزله بتوانند از المان‌ها عبور کرده و اصطلاحاً فیلتر نشوند از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

این رو، فرکانس امواج تحریک ورودی و ویژگی‌های سرعت امواج در محیط خاک تعیین کننده است. از این رو، در این پژوهش ابعاد المان‌ها ۱ m درنظر گرفته شده است که با رابطهٔ $\Delta l<(\frac{1}{8}\sim\frac{1}{10})\lambda_{min}$ مطابقت دارد.

۲-۲. شرایط مرزی جانبی

محققان مدل‌های متفاوتی به‌منظور مدل‌سازی شرایط مرزهای جانبی، ارائه کرده‌اند. شوپرا[1] و گوتیروس[2] [۱۰] پیشنهاد کردند که گره‌های مرزهای جانبی در راستای قائم بسته و در راستای جانبی آزاد باشند، عمل‌کرد این مرزها که به مرزهای اولیه مشهورند در آنالیزهای استاتیکی با کمی فاصله از مدل اصلی نتایج قابل قبولی دارند اما در آنالیزهای دینامیکی این مرزها عمل‌کرد خوبی نداشته و باعث انعکاس و بازگشت امواج به محیط مدل می‌شوند. از این رو، به‌منظور جلوگیری از انعکاس امواج روست[3] و اتونیی[4] [۱۱] مرزهای ویسکوز را معرفی کردند که لیسمر[5] و کوهل‌میر[6] [۱۲] توسعه دادند. عمل‌کرد این مرزها براساس به کارگیری میراگرهای مستقل در جهت قائم و افقی در مرزهای جانبی مدل است که حضور این میراگرها موجب اعمال تنش‌های نرمال و برشی به‌صورت روابط (۱) و (۲) به مدل اصلی می‌شوند:

$$T_n = -\rho C_s V_s \quad (۱)$$

$$T_s = -\rho C_p V_p \quad (۲)$$

که در این روابط T_n و T_s به‌ترتیب تنش‌های قائم و برشی اعمال شده با میراگرها به محیط خاک در مرزهای جانبی، V_s و V_p مؤلفه‌های قائم و برشی سرعت در مرزهای جانبی، ρ دانسیته خاک و C_s و C_p سرعت امواج S و P در محیط خاک است. این مرزها برای امواج حجمی (فشاری یا برشی) که با زاویهٔ برخوردی بزرگ‌تر از ۳۰ درجه اعمال می‌شوند بسیار مؤثرند ولی برای امواج با زاویهٔ کم‌تر از ۳۰ درجه و یا امواج سطحی جذب انرژی کم‌تری داشته و عملا کارایی چندانی ندارند. درصورتی‌که منبع انرژی داخل محیط خاک باشد این مرزها عمل‌کرد مناسبی دارند ولی در صورتی‌که منبع دینامیکی مانند امواج زلزله از مرزهای پایینی به محیط اعمال شوند این مرزها موجب خروج انرژی از مرزها شده و انرژی موج در مرزهای کناری کم می‌شود در این شرایط مرزهای میدان آزاد در کناره‌های مدل بهترین عمل‌کرد را دارند.

1. Chopra 2. Gutierres 3. Roesset 4. Ettouney 5. Lysmer
6. Kuhlemeyer

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

در این پژوهش نیز برای مدل‌سازی شرایط بینهایت دور برای جلوگیری از انعکاس امواج از مرزهای مدل از مرز میدان آزاد استفاده شده است. بدین‌صورت که محیطی یک‌بعدی به عرض واحد که محاسبات یک‌بعدی آن‌ها به‌موازات شبکه اصلی تحت همان تحریک انجام شده و پاسخ آن‌ها به‌عنوان رفتار محیط بینهایت دور به مرزهای مدل اصلی اعمال می‌شود. چنان‌که در شکل ۵ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است مرزهای جانبی مدل اصلی با میراگرهای ویسکوز به شبکه میدان آزاد متصل شده که نیروهای (۳) و (٤) از شبکه میدان آزاد به مرزهای مدل اصلی اعمال می‌شود [۱۳]:

$$F_x = -[\rho C_p(V_x^m - V_x^{ff}) - \sigma_{xx}^{ff}]\ \Delta S_y \qquad (۳)$$

$$F_y = -[\rho C_s(V_y^m - V_y^{ff}) - \sigma_{xy}^{ff}]\ \Delta S_y \qquad (٤)$$

که در این روابط فوق F_x و F_y نیروهای اعمال شده از شبکه میدان آزاد به مرزهای محیط اصلی مدل در جهت افقی و قائم، V_x^m و V_y^m سرعت در جهت افقی و قائم در نقاط مرزهای شبکه اصلی، V_x^{ff} و V_y^{ff} سرعت در جهت افقی و قائم در مرز شبکه میدان آزاد، σ_{xx}^{ff} تنش افقی میانگین در مرز میدان آزاد، σ_{xy}^{ff} تنش برشی میانگین در مرز میدان آزاد و ΔS_y متوسط سایز ناحیه قائم در نقاط شبکه مرزی است.

هم‌چنین براساس پژوهش‌های رایهانی[1] و ناگار[2] [١٤] فاصلهٔ مرزهای جانبی از یک‌دیگر حداقل باید ۵ برابر عرض سازه باشد که در این پژوهش به‌منظور بررسی پاسخ سطح زمین، فاصلهٔ مرزهای جانبی بیش‌تر از فاصلهٔ مذکور درنظر گرفته شده است.

۳-۲. شرایط مرزی سنگ بستر

براساس پژوهش‌های کوکاک[3] و منجی[4] [۱۵] شرایط مرزی صلب[5] مناسب‌ترین و واقعی‌ترین شرایط برای مدل‌سازی سنگ بستر در آنالیزهای دینامیکی اندرکنش خاک-سازه محسوب می‌شود از این رو، براساس پژوهش‌های محققان گذشته در این بررسی نیز به‌منظور شبیه‌سازی سنگ بستر از این شرط مرزی استفاده شده و تحریک ورودی به‌صورت مستقیم به گره‌های زیرین مدل اعمال شده است.

1. Rayhani 2. Naggar 3. Kocak 4. Mengi 5. Rigid

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

تحلیل‌های عددی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS V6.11 به تحلیل غیرخطی دینامیکی اندرکنش خاک-سازه-توپوگرافی پرداخته شد که در آنالیزهای انجام شده تحریک ورودی به‌صورت تاریخچهٔ زمانی هارمونیک سینوسی با دامنهٔ g ۰/۲ در تراز سنگ بستر به مدل اعمال شده است. آنالیزهای انجام شده برای پارامترهای بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است. هم‌چنین علاوه بر آنالیزهای ارئه شده در جدول ۱، چهار آنالیز تحت فرکانس‌های مورد نظر بر یک ستون خاک به ضخامت ٤۰ متر و عرض ۲۰ متر که جابه‌جایی مرزهای جانبی آن در راستای قائم محدود شده و در مرز زیرین مشابه مدل ارائه شده در شکل ۵ شرایط سنگ بستر مدل‌سازی شده انجام شده است که آنالیز این ستون خاک که انتشار امواج در آن به‌صورت یک بعدی است برای محاسبه پاسخ میدان آزاد مدل‌های آنالیز شده طبق جدول ۱ برای محاسبه ضریب A_h انجام شده است [٤].

نتایج و تفسیر داده‌ها

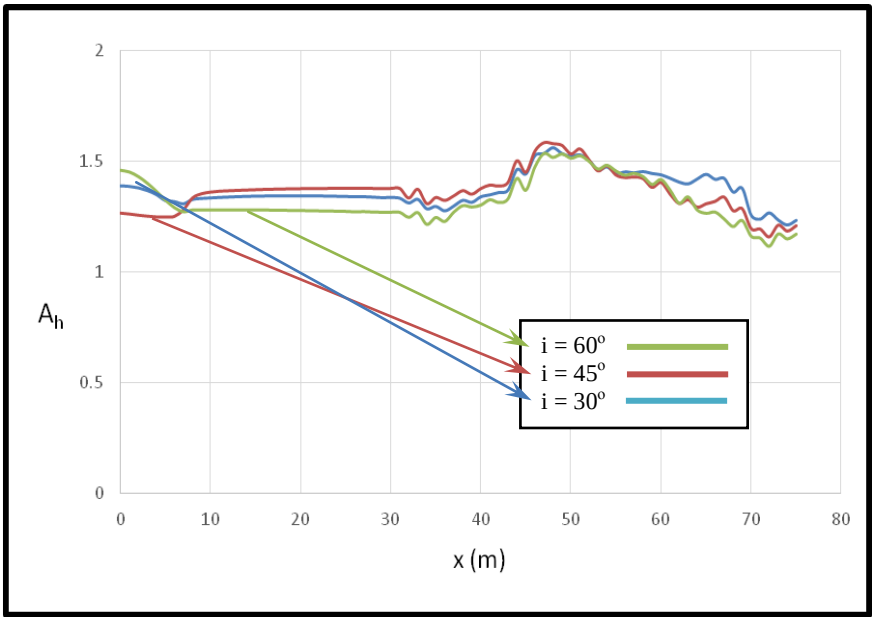
چنان‌که در شکل ٦ مشاهده می‌شود نتایج تمامی آنالیزها به‌صورت میانگین برای هر شیب ترسیم شده است. در این شکل محور افقی (x) بیان‌گر فاصله از تاج شیب است. چنان‌که مشاهده می‌شود پاسخ سطح زمین مجاور شیب در محل سازه نسبت به میدان آزاد بزرگ‌تر است و در تمام سطح زیرسازه این پاسخ یک‌نواخت است اما حضور سازه موجب شده است که حداکثر پاسخ سطح زمین به فاصله‌ای دورتر از سازه منتقل شود که این حداکثر پاسخ تقریباً در فاصله دو برابر عرض سازه از تاج شیب مشاهده می‌شود و بعد از آن پاسخ‌ها کاهش یافته و به‌سمت پاسخ میدان دور نزدیک می‌شود.

جدول ۱. خلاصه پارامترهای مورد نظر در آنالیزهای انجام شده

slope angle, i	f (Hz)
۳۰°	۱، ۳، ۷، ۱۰
٤۵°	۱، ۳، ۷، ۱۰
٦۰°	۱، ۳، ۷، ۱۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]



شکل ٦. تغییرات ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی تا فاصله ۷۵ متری از تاج شیب بر اثر حضور سازه در فاصله ۲۰ متری از تاج

نتایج ارائه شده در این مقاله فقط روی یک نوع خاک با سرعت موج برشی ۳۲۰ m/s بوده است و بر اساس پژوهش‌*های* انجام شده محققان به‌نظر می‌رسد که با افزایش سرعت موج برشی در خاک، حداکثر پاسخ در محل سازه رخ دهد (شکل ۳) که بررسی این مسئله در زوایای مختلف نیز می‌تواند نتایج جدیدی را به‌همراه داشته باشد.

با توجه به این‌که خاک اکثر مناطق بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران تقریباً در رده تیپ III است از این رو، نتایج این پژوهش در تحلیل منطقهٔ شهری در مجاورت یک شیب حائز اهمیت خواهد بود زیرا چنان‌که مشاهده شد حضور سازه‌های مجاور شیب علاوه بر افزایش پاسخ در محل سازه موجب افزایش چشم‌گیر پاسخ‌ها در فاصلهٔ دورتر از از لبه شیب (تقریباً دو برابر عرض سازه) می‌شوند که مطمئناً در تحلیل خطر منطقه مجاور یک شیب خاکی با مشخصات خاک تیپ III باید این نکته مدنظر قرار گیرد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

نتایج ارائه شده در این مقاله بر اساس تحریک هارمونیک است و فقط پارامتر زاویهٔ شیب بررسی شده است هم‌چنین محل حضور سازه در مجاورت شیب و نوع خاک نیز می‌تواند بر نتایج اثر چشم‌گیری داشته باشد که در پژوهش‌های آتی باید مورد توجه قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر حضور سازه بر رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب به ارتفاع ۳۰ متر که سنگ بستر در عمق ٤٠ متری از سطح زمین واقع است براساس روش مستقیم با نرم‌فزار المان محدود ABAQUS پرداختیم.

مدل رفتاری الاستو-پلاستیک کامل با معیار تسلیم مور-کولمب برای المان‌های خاک در آنالیزهای لرزه‌ای اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته شده و سازه به‌صورت بلوکی جامد به عرض ۲۵ m و ارتفاع ١٦ m با نسبت امپدانس مشخص و با فرض رفتار الاستیک در فاصلهٔ ۲۰ متری از تاج شیب قرار داده شده است. تحریک ورودی نیز به‌صورت موج هارمونیک سینوسی از مرز زیرین مدل با دامنه g ۰/۲ تحت فرکانس‌های مختلف به مدل اعمال شده و اثر پارامترهای زاویهٔ شیب و فرکانس تحریک بر میزان پاسخ شتاب سطح زمین مجاور شیب ارزیابی شد.

نتایج تحقیقات عددی این مقاله که روی خاک با سرعت موج برشی m/s ۳۲۰ انجام شد (معادل خاک تیپ III آیینامه ۲۸۰۰ ایران) نشان می‌دهد که حضور سازه در مجاورت شیب الگوی بزرگ‌نمایی پاسخ افقی شتاب در سطح زمین مجاور شیب را تغییر می‌دهد به‌طوری‌که نتایج پژوهش‌های محققان گذشته که به بررسی رفتار لرزه‌ای این توپوگرافی پرداخته‌اند نشان می‌دهد که درصورت عدم حضور سازه در مجاورت شیب حداکثر پاسخ بسته به فرکانس تحریک در نزدیکی تاج شیب رخ می‌دهد اما نتایج این پژوهش چنان‌که در شکل ٦ مشاهده می‌شود نشان می‌دهد که حضور سازه در مجاورت شیب موجب افزایش یک‌نواخت پاسخ شتاب افقی سطح زمین در محل سازه می‌شود که مقدار ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در محل سازه به‌صورت میانگین تقریباً برابر با A_h = ۱/۳ است و از طرفی حضور سازه در این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

خاک موجب انتقال حداکثر پاسخ به فاصلهٔ تقریباً دو برابر عرض سازه از لبه شیب شده است که مقدار ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در این نقطه به‌صورت میانگین نیز تقریباً برابر با A_h=۱/٦ است.

از طرفی نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویهٔ شیب، پاسخ شتاب در لبه شیب افزایش و در محل سازه کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در شیب ٦۰ درجه حداکثر پاسخ در تاج شیب با ضریب بزرگ‌نمایی A_h =۱/٤٥ رخ می‌دهد و در محل سازه مقدار ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی برای این شیب، برابر با A_h =۱/۲٦ است. اما در شیب ۳۰ درجه میزان پاسخ در تاج شیب بزرگ‌تر از میزان پاسخ در شیب ٤٥ درجه است که می‌توان ایجاد امواج SP را دلیل این افزایش پاسخ در تاج شیب دانست زیرا چنان‌که در بخش مقدمه مقاله نیز ذکر شد اگر ضریب پواسون خاک برابر با ۰/۳٥ باشد درصورتی که زاویهٔ شیب برابر با مقدار $\arcsin(V_s/V_p)$ باشد امواج جدیدی در شیب ایجاد می‌شود که سرعت این امواج برابر با سرعت امواج P است. از این رو، چنان‌که مشاهده می‌شود در شیب ۳۰ درجه در تاج شیب میزان پاسخ از شیب ٤٥ درجه بیش‌تر است. هم‌چنین چنان‌که در شکل ٦ مشاهده می‌شود افزایش زاویهٔ شیب بر میزان تغییر پاسخ‌ها در فاصله ٥۰ متری از تاج نیز تقریباً ناچیز است.

منابع

1. George D., Bouckovalas, Achilleas G., Papadimitriou, "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25 (2005) 547-558.
2. Gazetas G., Kallou P.V., Psarropoulos P.N., "Topography and Soil Effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) Earthquake: The Case of Adámes", Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, Natural Hazards 27 (2002) 133-169.
3. Assimaki Dominic, Kauselb Eduardo, Gazetas George, "Wave propagation and soil-structure interaction on a cliff crest during the 1999

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

Athens Earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25 (2005) 513-527.

4. Tripe R., Kontoe S., Wong T.K.C., "Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50 (2013) 72-84.
5. Messaoudi A., Laouami N., Mezouer N., "Topographic effects on the seismic responses of slopes", 15 WCEE (2012).
6. Rizzitano Samuela, Cascone Ernesto, Biondi Giovanni, "Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67 (2014) 66-84.
7. Dhakal Subodh, "Emperical relations for earthquake response of slopes", Thesis for the degree of Master of Sience in Geo-information Sience and Earth observation (2004).
8. Assimaki Dominic, A.M.ASCE1, Kausel Eduardo, M.ASCE, "Modified Topographic Amplification Factors for a Single-Faced Slope due to Kinematic Soil-Structure Interaction", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE, November (2007).
9. Tripe R., Kontoe S., "A numerical investigation into the interaction between topographic and soil layer amplification of earthquake motion. In: Proceedings of the 5th international conference on earthquake geotechnical engineering", Santiago, Chile (2011).
10. Chopra A.K., Gutierres J.A., "A substructure method for earthquake analysis of structures including structure–soil interaction", Earthq Eng Struct Dyn, 6 (1) (1978) 51-69.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]

11. Roesset J.M., Ettouney M.M., "Transmitting boundaries: a comparison", Int J Numer Anal Methods Geomech,1 (1977) 151-76.

12. Lysmer J., Kuhlemeyer R.L., "Finite dynamic model for infinite media", J Eng Mech Div ASCE, 95 (6) (1969) 859-77.

13. Tabatabaiefar Hamid Reza, Fatahi Behzad, "Idealisation of soil-structure system to determine inelastic seismic response of midrise building frames", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 66 (2014) 339-351.

14. Rayhani M.H., El Naggar M.H., "Numerical modelling of seismic response of rigid foundation on soft soil", Int J Geomech, 8 (6) (2008) 336-46.

15. Kocak S., Mengi Y., "A simple soil-structure interaction model", Appl Math Model, 24 (8-9) (2000) 607-35.

16. Ashford S.A., Sitar N., "Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff", Bulletin of the Seismological Society of America, 87 (No. 3) (1997) 692-700.

17. Ashford S.A., Sitar N., Lysmer J., Deng N., "Topographic effects on the seismic response of steep slopes", Bulletin of the Seismological Society of America, 87 (No. 3) (1997) 701-9.

18. Kamalian M., Jafari M.K., Sohrabi-Bidar A., Razmkhah A., "Seismic response of 2-D semi-sine shaped hills to vertically propagating incident waves: amplification patterns and engineering applications", Earthquake Spectra, 24 (No. 2) (2008) 405-30.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.5.3]