اثر شیب شیروانی بر جابه‌جایی نسبی طبقات قاب‌های خمشی فولادی در ساختگاه‌های باخاک نرم

جعفر محمدی*، غلامرضا نوری، علی قنبری؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹٤/۱۱/۷ **پذیرش** ۹۵/۳/۱۸

چکیده

عوامل مختلفی در بحث اندرکنش خاک و سازه باید در نظر گرفته شود، که از جملهٔ آن‌ها می‌توان خواص مصالح لایه‌های زیرسطحی، توپوگرافی و هندسه ساختگاه و خصوصیات حرکت ورودی را نام برد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که امواج لرزه‌ای در برخورد با نامنظمی‌های توپوگرافی دچار شکست شده و باعث ایجاد حرکات لرزه‌ای شدیدتری نسبت به حالت بدون شیب در سطح زمین می‌شوند. دراین مقاله تأثیر توپوگرافی بر جابه‌جایی نسبی طبقات سه سازه با سیستم قاب خمشی فولادی بررسی شده است. برای این منظور ٦ مدل ترکیبی از خاک- سازه و توپوگرافی در نظر گرفته شده است. ۳ سازه ٦، ۹ و ۱۲ طبقه در دو فاصلهٔ نزدیک و دور از شیب ۲۰ درجه قرار داده شده و ۱۰ رکورد زمین‌لرزه ثبت شده روی سنگ‌بستر به مدل‌ها اعمال شد. جابه‌جایی نسبی طبقات به‌عنوان معیار بررسی تأثیر توپوگرافی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد توپوگرافی سبب افزایش جابه‌جایی نسبی طبقات می‌شود اما این افزایش در سازه ها و طبقات مختلف، متفاوت است. درصد افزایش جابه‌جایی نسبی ناشی از تأثیرات شیب با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در سازه ٦ طبقه تا ۲۵ درصد، سازه ۹ طبقه تا ۱۵ درصد و سازه ۱۲ طبقه تا ٦ درصد رشد، در میانگین مقادیر جابه‌جایی نسبی طبقات ملاحظه شد. هم‌چنین در سازه‌های ۹ و ۱۲ طبقه در برخی از طبقات کاهش جابه‌جایی نسبی طبقه مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: توپوگرافی، شیب، زلزله حوزه دور، جابه‌جایی نسبی طبقه، قاب خمشی فولادی

* **نویسنده مسئول** m.tekantape@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

مقدمه

تأثیرات مخرب توپوگرافی (شیب) در زلزله‌های مختلفی مشاهده و سبب ایجاد خسارات چشم‌گیری در سازه‌ها و شریان‌های حیاتی شده است [۱]. رخداد چنین حوادثی سبب می‌شود که تأثیرات توپوگرافی بر سازه‌های مهندسی امری مهم تلقی شود. بررسی‌های میدانی و عددی متعددی در این زمینه انجام شده است و مقادیر مختلفی در ارتباط با میزان تأثیر توپوگرافی روی بزرگ‌نمایی رکوردهای زلزله به‌دست آمده است. بعضی از این بررسی‌ها نسبت ۲ تا ۳ برابر را به‌عنوان ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی پیشنهاد می‌دهند [۲]. از روش‌های مختلفی نظیر المان محدود، المان مرزی، المان مجزا، المان طیفی و ترکیبی برای ارزیابی عددی اثرات توپوگرافی استفاده شده است [۳]، [٤]، [٥]، [٦]. روش‌های عددی و پژوهشی که بر مکانیسم و رفتار توپوگرافی انجام شده است میزان ضریب بزرگ‌نمایی کم‌تری را نسبت به بررسی‌های میدانی به‌دست می‌دهند [۲].

در بحث بررسی اثرات توپوگرافی فرض‌های مختلفی نظیر در نظر گرفتن سنگ بستر صلب و ارتجاعی، محیط نیمه بی‌نهایت، تحریک‌هایی با فرکانس‌های مختلف، شیب‌هایی با زوایای مختلف، ارتفاع شیب مختلف، جنس خاک مختلف بررسی شده است. هم‌چنین بیش‌تر این پژوهش‌ها به‌صورت دوبعدی انجام شده است [۳]، [٦]، [۷]. در حالت کلی می‌توان گفت که با افزایش زاویهٔ شیب میزان بزرگ‌نمایی توپوگرافی بیش‌تر می‌شود. این افزایش بزرگ‌نمایی به‌دلیل انعکاس امواج در هنگام برخورد با شیب و برگشت آن به‌سمت تاج شیب است.

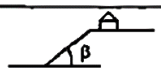
جورج و آچیلیاس (۲۰۰۵) با در نظرگیری سه نمونه توپوگرافی دوبعدی با زوایا و ارتفاع مختلف، به‌بررسی تأثیرات توپوگرافی بر امواج SV پرداختند. بررسی محققان مذکور این نتایج را دربرداشت:

۱. توپوگرافی در برخی حالات سبب افزایش شتاب و در برخی حالت دیگر سبب کاهش شتاب در لبهٔ شیب می‌شود و نمی‌توان به‌طور یقین عنوان کرد که توپوگرافی سبب افزایش شتاب‌ها در لبهٔ شیب می‌شود.
۲. تأثیرات بزرگ‌نمایی درشیب‌هایی با $H/\lambda \geq 0.16$ (نسبت ارتفاع شیب به‌طول موج تحریک) و زاویهٔ بزرگ‌تر از ۱٦ درجه مهم است و میزان بزرگ‌نمایی توپوگرافی برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

شتاب افقی ۱/۲ تا ۱/۵ برابر و برای شتاب قائم ۰,۱ تا ۱/۱ است [۳]. ایدریس و سید (۱۹٦۷) با استفاده از روش المان محدود و در نظرگیری سه شیب با ارتفاع‌های ٦/۱، ۷/۳ و ۱۵/۲ متری با زاویه ۲۷ درجه در خاکی همگن با سنگ بستر صلب تأثیرات شیب را بررسی کردند و نسبت شتاب تاج شیب به شتاب حالت بدون شیب را ۱/۵و ۲/۵ برای مقیاس‌های مختلف زلزله السنترو (۱۹٤۰) به‌دست آوردند [۸]

آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) برای در نظرگیری اثرات بزرگ‌نمایی توپوگرافی پیشنهاد می‌دهد که افزایش نیروی طراحی لرزه‌ای در بررسی پایداری شیب‌ها و یا نزدیک آن‌ها باید از طریق ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (S_T) برای شیب‌های با ارتفاع بیش از ۳۰ متر و با زاویهٔ میانگین بیش از ۱۵ درجه صورت گیرد. حداقل مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در این آیین‌نامه در شکل ۱ نشان داده شده است [۹].

شکل شیب	میانگین زاویه شیب (β)	S_T
	>۱۵	≥۱/۲
	۱۵ تا ۳۰	≥۱/۲
	>۳۰	≥۱/۴

شکل ۱. مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (ST) در آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ [۹]

با توجه به مطالب گفته شده، در زمینهٔ بررسی تأثیرات توپوگرافی بر حرکات سطح آزاد پژوهش‌های زیادی انجام شده است اما، هیچ یک از این پژوهش‌ها به بررسی رفتار سازه‌های مجاور شیب نپرداخته‌اند. در این مقاله اثر وجود شیب بر جابه‌جایی نسبی طبقات و آسیب‌پذیری قاب‌های خمشی فولادی که بر ساختگاهایی با مشخصات خاک نرم قرار گرفته، بررسی شده است. برای انجام پژوهش‌ها، شیب ۲۰ درجه با مشخصات خاکی مطابق با بررسی قنبری و همکاران (۱۳۸۹) انتخاب شده است. برای بررسی تأثیر اثرات شیب بررسی شده، جابه‌جایی نسبی طبقات تحت اثر ۱۰ رکورد زمین لرزه‌های با مشخصات حوضهٔ دور واقع بر سنگ بستر بررسی شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

مدل‌های بررسی شده

در این پژوهش آسیب‌پذیری ۳ قاب خمشی فولادی بررسی شده است. قاب‌های بررسی شدهٔ کاراواسیلیس و همکاران (۲۰۰۷) بر اساس آیین‌نامهٔ اروپا [۷] طراحی و مقدار بارهای مرده و زنده نیز مطابق با پژوهش مورد نظر به مدل‌ها اعمال شده است [۱۰]. قاب‌های بررسی شده در نرم‌افزار آباکوس به‌صورت دوبعدی مدل و در مدل‌های مورد نظر از فولاد A36 با مقاومت تسلیم فولاد ۲۳۵ مگاپاسکال استفاده شده است. مدل‌سازی رفتار فولاد با استفاده از معیار تسلیم فون-میسز و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و ضریب پواسون ۰٫۳ صورت گرفته است. هم‌چنین منحنی فولاد سه‌خطی با سخت‌شوندگی سینماتیک به‌کار گرفته شده است. ارتفاع طبقات و طول دهانه قاب‌ها به‌ترتیب ۳ و ۵ متر است. شکل ۲ و جدول ۱ جزییات ابعاد قاب‌ها و پریود اصلی‌این قاب‌ها و پریود متناظر با حالت اندرکنش خاک-سازه را نشان می‌دهند. از میرایی رایلی برای در نظرگیری میرایی مصالح استفاده شده است (ξ = ٪۵) به‌این صورت که ضرایب α و β در رابطه ماتریس سختی (معادلهٔ ۱) از طریق روابط (۲) و (۳) به‌دست می‌آید. در روابط (۱)، (۲) و (۳) [M], [C] و [K] به‌ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی هستند. ω_2 و ω_1 نیز به‌ترتیب فرکانس‌های زاویه‌ای طبیعی اول و دوم به‌دست آمده از آنالیز ارتعاش آزاد است [۱۰].

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (۱)$$

$$\alpha = \xi\left(\frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1+\omega_2}\right) \quad (۲)$$

$$\beta = \xi\left(\frac{2}{\omega_1+\omega_2}\right) \quad (۳)$$

در این بررسی زاویهٔ شیب ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است. مشخصات خاک منطقه و شیب مورد نظر مطابق پژوهش قنبری و همکاران (۱۳۸۹) در ناحیهٔ بررسی شده با گمانه‌زنی در مناطق مختلف مطابق جدول ۲ به‌دست آمده است. منطقهٔ بررسی شده برای مشخصات خاک و شیب در این پژوهش بخش مرکزی و باختری شهرستان کرج است [۱۱].

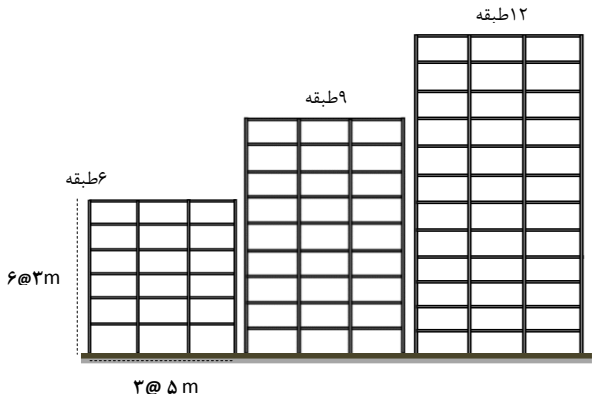
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

جدول ۱. مشخصات ابعاد تیر و ستون و پریود متناظر با حالات fix و SSI

		(شماره طبقات)IPE تیر–HEB ستون	T_{fix}	T_{SSI}
۱	٦ طبقه	*280-360(1-4)+ 260-330(5-6)*	۱/۱۲	۱/۳۱۹
۲	۹ طبقه	*340-360(1)+340-400(2-5)+320-360(6-7)+300-330(8-9)*	۱/٤٥	۱/٦٨٣
۳	۱۲ طبقه	*400-360(1)+400-400(2-3)+400-450(4-5)+360-400(6-7)+340-400(8-9)+340-360(10)+340-330(11-12)*	۱/۷۰٦	۲/۰۹۷

جدول ۲. مشخصات خاک منطقه مورد نظر [۱۱]

چگالی، (kg/m3)	۱۸۰۰
چسبندگی، c (Kpa)	۷۰
زاویه اصطکاک داخلی Ø	۳۱
ضریب پواسون	۰/۳۵
سرعت موج برشی(m/s)	۲۳۸

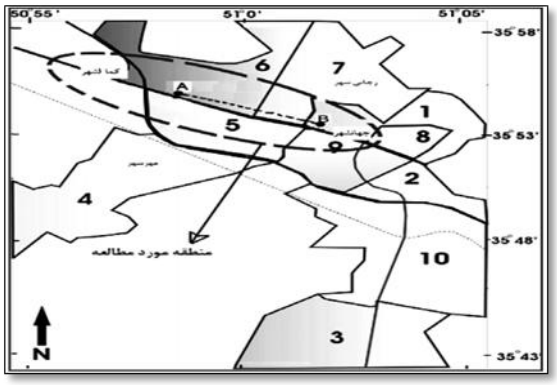


شکل۲. ارتفاع طبقات و طول دهانه‌ها

در منطقهٔ موردنظر حدود ۱۰۰ گمانه و چاه دستی حفر و آزمایش نفوذ استاندارد در همهٔ گمانه‌ها و در فواصل ۱۵ متری به‌تعداد ۱۳۰۰ مورد انجام شده است. هم‌چنین آزمایش‌های دیگری نظیر ١٤ آزمایش تحکیم، ۱۱۱ آزمایش برش مستقیم تند و کند، ٢٤ آزمایش تک محوری و ۳۲ آزمایش شکل۲ ارتفاع طبقات و طول دهانه‌ها سه‌محوری برای تعیین مشخصات ساختگاه منطقه صورت گرفته است [۱۱]. در شکل ۳ منطقهٔ مورد نظر مشخص شده است. نمایی از چند شیب در ناحیهٔ بررسی شده در شکل ٤ نشان داده شده است. شیب مفروض

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

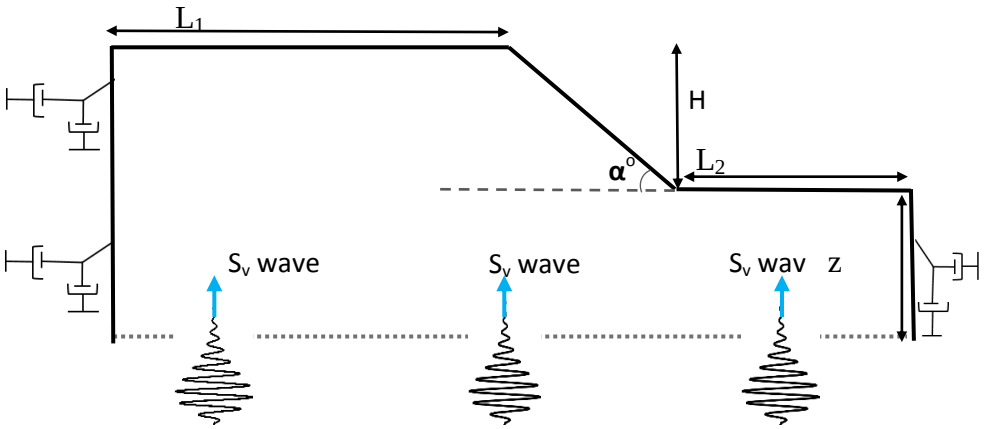
دارای ارتفاعی برابر با ۳۰ متر (H=30m) و سنگ‌بستر در عمق ٦۰ متری است. مدل‌سازی خاک با استفاده از روش اجزا محدود و به‌صورت دوبعدی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. برای جلوگیری از تأثیرات مرزها بر امواج S_V اعمال شده، در مرزهای کناری میراگرهایی در دو جهت افقی و قائم تعبیه شده است که جزییات مدل بررسی شده و شرایط مرزی به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ٦ و مقادیر ضریب میرایی دمپرها نیز در جدول ۳ نشان داده شده است [٤]. برای کاهش تأثیرات مرزها فاصله افقی مرز از شیب به‌اندازهٔ کافی بزرگ در نظر گرفته شده است (L1=L2=400m)[٤].



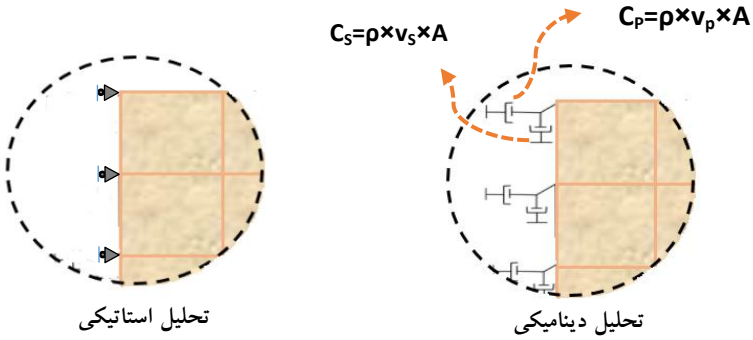
شکل۳ . منطقهٔ مورد نظر و مکان گمانه‌ها [۱۱]

شکل٤. نمایی از چند شیب موجود در منطقهٔ بررسی شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



شکل ۵. نمایی از نحوهٔ مدل سازی شیب و امواج ورودی



شکل ٦. شرایط مرزی استفاده شده در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی

جدول ۳. مقادیر ضریب میرایی میراگرهای افقی و قائم

موقعیت	$C_{S(gk/s)}$	$C_{P(gk/s)}$
گره های میانی	۱۷۱۳٦۰۰	۳٥٦٤۰۰۰
گره های کناری	۸٥٦۸۰۰	۱۷۸۲۰۰۰

صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی خاک، شیب ۹۰ درجه در پژوهش ترایپ و کونتوئه (۲۰۱۳) با بار هارمونیک سینوسی با دامنه ۰/۱g مدل شده است. مشخصات خاک و شیب مطابق پژوهش اشاره شده در نظر گرفته شده است. برای صحت‌سنجی شرایط مرزی موجود دراین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

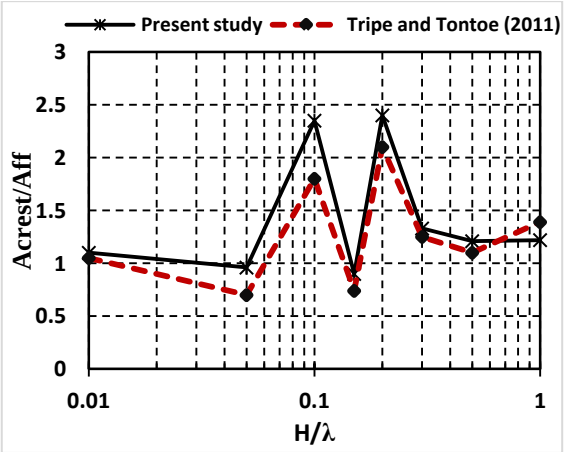
مقاله، نسبت شتاب افقی حداکثر ایجاد شده در تاج شیب به شتاب افقی میدان دور برای این مدل با مدل این محققان مقایسه شد. شکل ۷ تطابق نسبی دو نمودار را نشان می‌دهد (ارتفاع شیب=H، λ= طول موج تحریک) [۲].

در مدل‌های اصلی این پژوهش از مدل رفتاری الاستو- پلاستیک کامل با معیار تسلیم مور- کلمب، برای در نظرگیری رفتار خاک استفاده شده است. برای مش‌بندی از المان‌های چهاروجهی هشت گرهی استفاده شده است. به‌علاوه مش‌بندی به‌گونه‌ای انجام شده است که از فیلتر شدن فرکانس‌های بالا جلوگیری به‌عمل آید، به‌گونه‌ای که شروط ارائه شده در روابط (٤) و (٥) ارضا شود [٦].

$$h \leq \left(\frac{1}{8}-\frac{1}{5}\right)\frac{V_s}{f_{max}} \qquad (۴)$$

$$l \leq 5h \qquad (۵)$$

برای در نظرگیری میرایی خاک نیز از میرایی رایلی با نسبت میرایی ۵٪ استفاده شده است [٦].



شکل ۷. مقایسهٔ ضرایب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در فرکانس‌های مختلف با مقادیر به‌دست آمده به‌وسیلهٔ ترایپ و کونتوئه (۲۰۱۳)

انتخاب رکورد زلزله

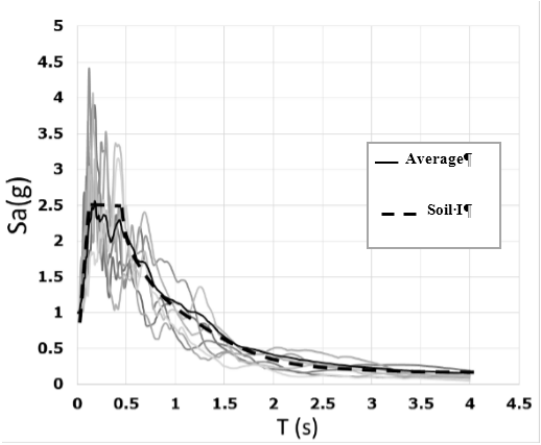
دراین پژوهش برای تخمین توزیع مقادیر جابه‌جایی نسبی طبقات از ۱۰ رکورد واقع بر سنگ‌بستر (سرعت موج برشی بیش‌تر از ٦٥٠متر بر ثانیه) و فاصلهٔ بیش‌تر از ۱۰کیلومتر استفاده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

شده است[۱۲]. رکوردها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که فاقد پالس باشند، جدول ٤. هم‌چنین شکل ۸ مقادیر شتاب طیفی رکوردها و طیف شتاب مربوط به خاک تیپ ۱ (سنگ) مطابق با آیین‌نامهٔ ۲۸۰۰ ایران را نشان می‌دهد. رکوردهای درنظرگرفته شده بزرگای بیش‌تر از ٦ دارند. تاریخچهٔ زمانی شتاب هریک از رکوردها در شکل ۹ نمایش داده شده است.

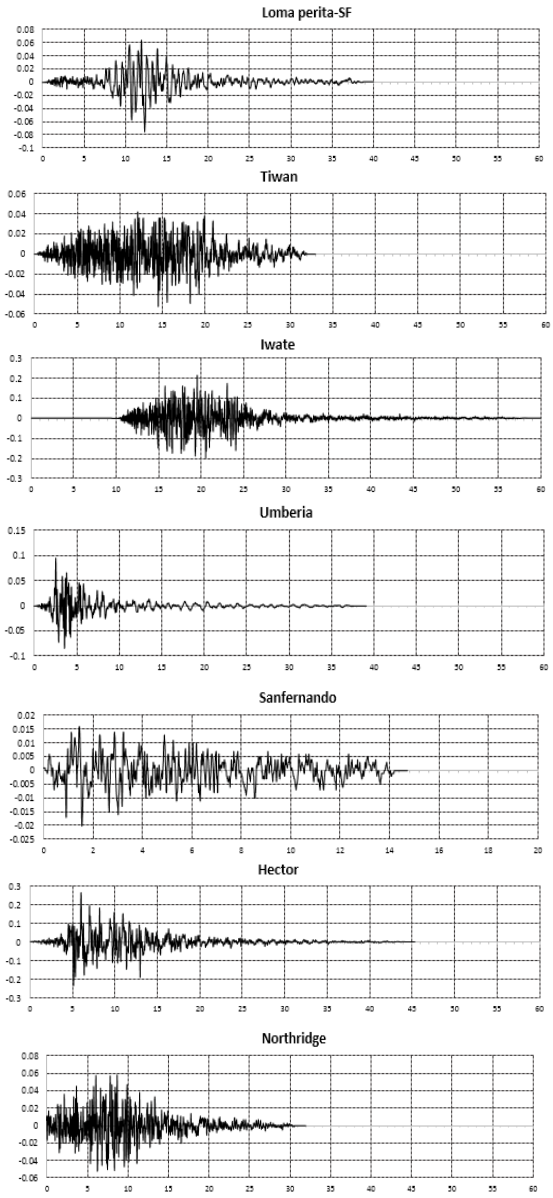
جدول ٤. مشخصات رکوردهای انتخابی [۱۲]

مکانیزم گسلش	مدت دوام نیرومند(s)	R(KM)	Vs(m/s)	بزرگا	ایستگاه	زلزله	
Reverse	*10.4*	*89*	*813.48*	*6.61*	*Cedar S*	*San* Fernando	*1*
Reverse	*10.1*	*14.7*	*681*	*6.93*	*San Jose*	*Loma Prieta*	*2*
Reverse	*11.7*	*11.6*	*726*	*7.13*	*hector*	*hector*	*3*
Reverse	*14.1*	*31.6*	*600*	*6.69*	*Lake H*	*Northridge-01*	*4*
Reverse	*10.2*	*78*	*614*	*6.93*	*SF - Cliff*	*Loma Prieta,*	*5*
Reverse	*11.5*	*21*	*655*	*6.9*	*Minase Y*	*Iwate*	*6*
Reverse	*10.6*	*19*	*678*	*5.6*	*Norcia*	*Umbria Marche*	*7*
normal	*12.4*	*51.35*	*671*	*7.3*	*SMART1*	*Taiwan SMART*	*8*
Reverse	*10*	*22.14*	*652.8*	*6.2*	*(tcu138)*	*Chi-Chi*	*9*
Reverse	*10*	*31*	*605*	*6.8*	*Joetsu Y*	*Chuetsu-oki*	*10*

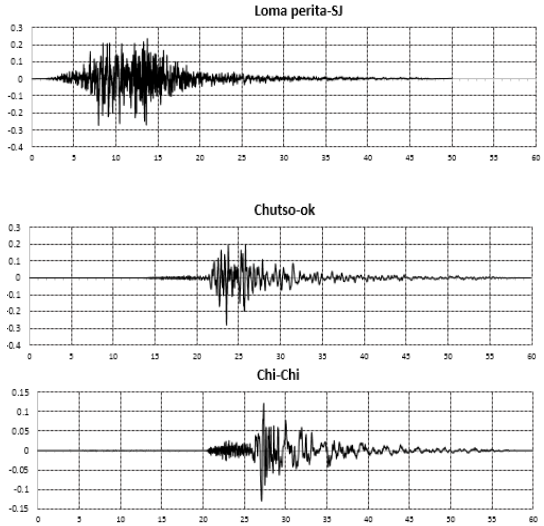


شکل ۸. میانگین طیف شتاب رکوردهای استفاده شده در آنالیز با طیف خاک تیپ I

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



شکل۹. تاریخچه زمانی شتاب رکوردهای استفاده شده

روش انجام کار و نتایج تحلیل‌ها

برای بررسی تأثیرات توپوگرافی مطابق شکل ۱۰، ٦ مدل در نظر گرفته شده است. ۳ سازه ٦، ۹ و ۱۲ طبقه در دو فاصلهٔ نزدیک و دور از شیب قرار داده شده و رکوردهای زمین‌لرزه‌های معرفی شده به‌آن‌ها اعمال شده است. حداکثر جابه‌جایی نسبی که هر طبقه از قاب‌های موردنظر در طول اعمال زلزله تحمل می‌کنند، ملاک بررسی تأثیرات توپوگرافی بر جابه‌جایی نسبی طبقات در نظر گرفته شده است [۱۳]. جابه‌جایی‌های نسبی به‌دست آمده برای هر طبقه از سازه‌های مجاور شیب ترکیبی از اثرات توپوگرافی و اثرات اندرکنش خاک- سازه است. مقادیر به‌دست آمده برای قاب‌هایی که در فاصلهٔ دور از لبهٔ شیب قرار گرفته‌اند، تنها تحت اثر اندرکنش خاک–سازه است، از این رو، برای به‌دست آوردن میزان تأثیر توپوگرافی بر جابه‌جایی نسبی طبقات سازه‌های مجاور شیب، کافی است درصد جابه‌جایی نسبی برای هر طبقه از سازه‌های قرار گرفته در فاصله دور و نزدیک از شیب با یک‌دیگر مقایسه شود تا بتوان تأثیرات توپوگرافی را بررسی کرد. از آن‌جاکه خاک به‌صورت مستقیم مدل شده است رکوردهای مورد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

نظر را که نماینده رکورد بر سنگ بستر هستند، به زیر خاک اعمال کرده و پاسخ سازه‌های موردنظر تحت اثر رکوردهای مختلف بررسی می‌شود.

چند نمونه از حداکثر جابه‌جایی‌های نسبی ایجاد شده در طبقات (ISD) برای زلزله‌های مختلف در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. نمودارهای میله‌ای برای دو گروه از مدل‌ها (۱. سازه مجاور شیب و ۲. سازه دور از شیب) رسم شده است. رفتار سازه قرار گرفته در فاصلهٔ دور از شیب را می‌توان معادل حالت بدون شیب (SSI) در نظر گرفت. با توجه به این‌که پارامترهای زیادی از جمله فرکانس تحریک ورودی تأثیر به‌سزایی در پاسخ سازه دارند، ملاحظه می‌شود که برای برخی از رکوردها تأثیرات توپوگرافی کم‌تر و برای برخی دیگر بیش‌تر است. دلیل این امر را می‌توان دور یا نزدیک بودن فرکانس تحریک از فرکانس سیستم، تأثیرات اتدرکنش اینرسی‌دار و جنبشی و حرکات گهواره‌ای دانست.

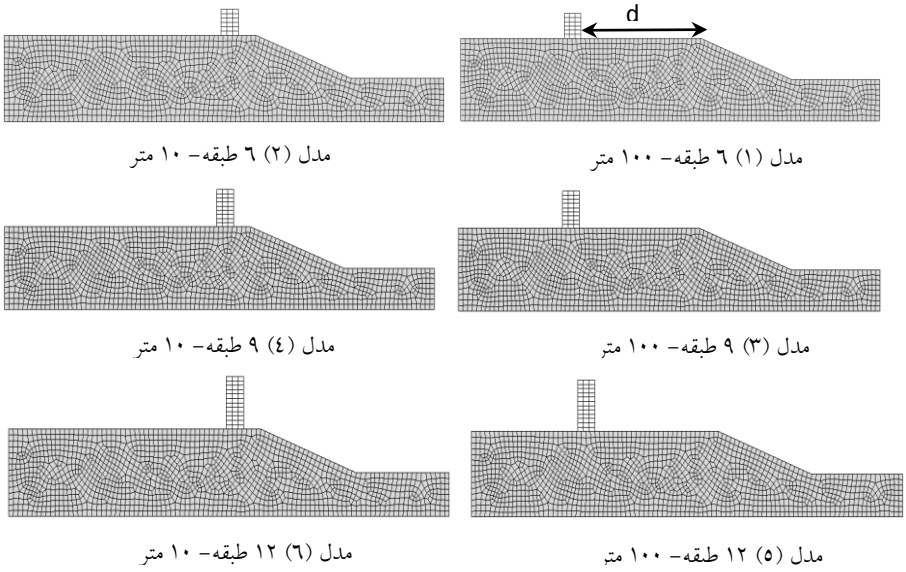
برای بررسی نتایج به‌صورت کلی‌تر از تمامی مقادیر به‌دست آمده برای حداکثر جابه‌جایی‌های نسبی ایجاد شده در طبقات میانگین‌گیری به‌عمل آمد. نتایج میانگین در نمودارهای شکل ۱٤ نشان داده‌شده است. مطابق شکل ۱٤ میزان تأثیرات توپوگرافی در سازه ٦ طبقه روند مشخصی دارد و شیب مورد نظر سبب افزایش میانگین جابه‌جایی نسبی همهٔ طبقات تحت زلزله‌های مختلف شده است. این در حالی‌است که در سازه‌های ۹ و ۱۲ طبقه، میانگین جابه‌جایی‌ها در بعضی از طبقات بیش‌تر و در بعضی دیگر کم‌تر بوده است به‌علاوه میزان تأثیرات توپوگرافی با افزایش تعداد طبقات کاهش یافته است.

افرایش جابه‌جایی نسبی میانگین برای هر طبقه مطابق با شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ ارائه شده است. براساس نمودارهای ارائه شده ملاحظه می‌شود که، تأثیرات توپوگرافی در سازه ٦ طبقه مشهودتر است. به‌گونه‌ای که هیچ طبقه‌ای رشد منفی نداشته است. براساس شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود که، طبقات ۱، ۲، ٦ دارای ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش در مقدار جابه‌جایی نسبی با در نظر گرفتن اثر شیب شده‌اند. این در حالیست که، طبقات میانی درصد رشد کم‌تری داشته‌اند مشهودتر است.

مطابق با شکل ۱٦ سه طبقه اول در قاب ۹ طبقه مجاور شیب دارای ۵ تا ۱۵ درصد رشد و طبقات ٦ و ۷ دارای ۵٪ کاهش در میزان جابه‌جایی نسبی شده‌اند. در سازه ۱۲ طبقه نیز،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

طبقات ٤، ٥ ، ٦، ١٠ و ١١ دارای رشد منفی و بقیه طبقات ٠ تا ٦ درصد رشد داشته‌اند. دلیل کاهش در مقادیر جابه‌جایی نسبی و ایجاد درصد رشد منفی در بعضی از طبقه‌های سازه‌های ٩ و ١٢ طبقه را می‌توان تغییر در شکل ارتعاش سازه‌های مورد نظر در اثر تأثیرات توپوگرافی دانست. به‌نظر نویسندگان مقاله، این تغییر در نحوهٔ ارتعاش سازه‌ها را می‌توان به حرکات گهواره‌ای ایجاد شده در سازه‌ها بر اثر برخورد امواج منعکس شده به‌سمت بالای شیب دانست. این تأثیرات در سازه‌های بلندتر مشهودتر است. در واقع این کاهش در مقادیر جابه‌جایی نسبی برای همهٔ طبقات صورت نمی‌گیرد بلکه تنها محل ایجاد جابه‌جایی نسبی حداکثر و حداقل در ارتفاع تغییر می‌کند و سبب می‌شود که بعضی از طبقات درصد رشد منفی داشته باشند. هر چند لازم است در این‌خصوص مطالعات بیش‌تری صورت پذیرد.

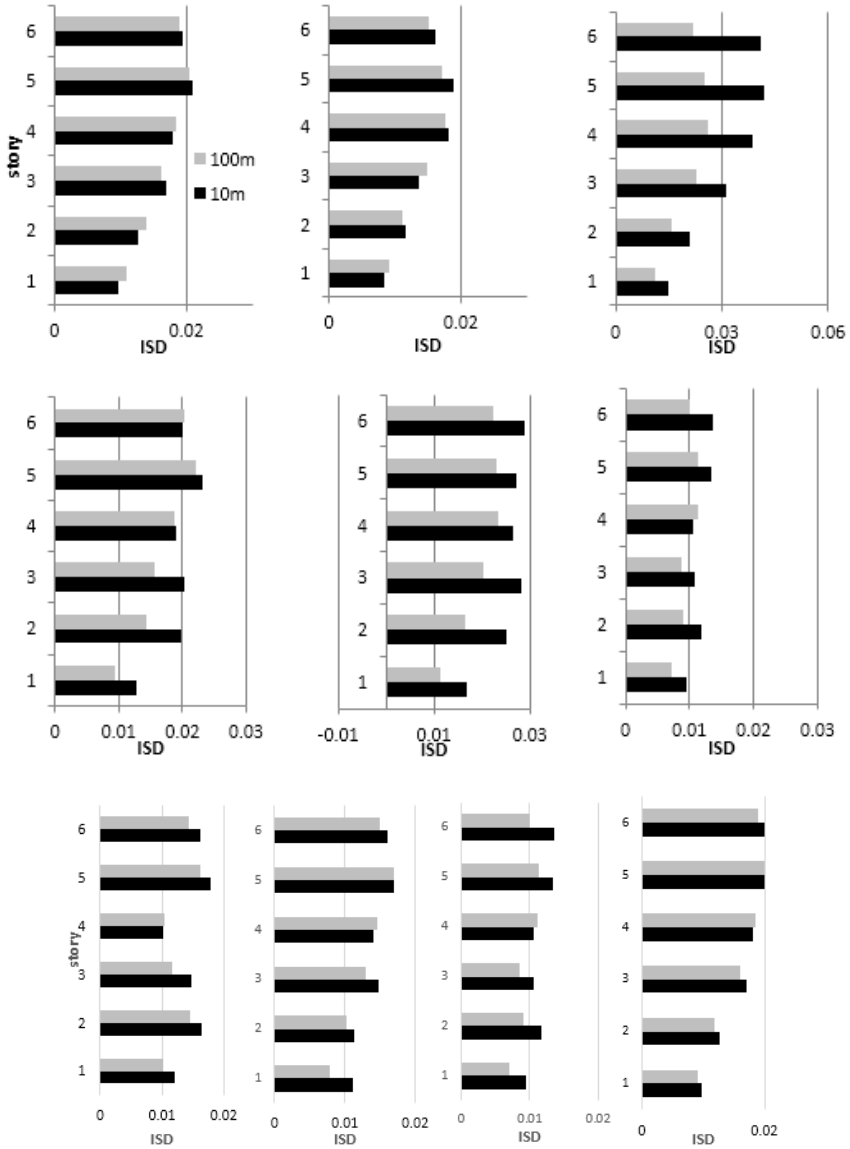


شکل١٠. شماتیکی از مدل‌های خاک- سازه- توپوگرافی در نظر گرفته شده

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

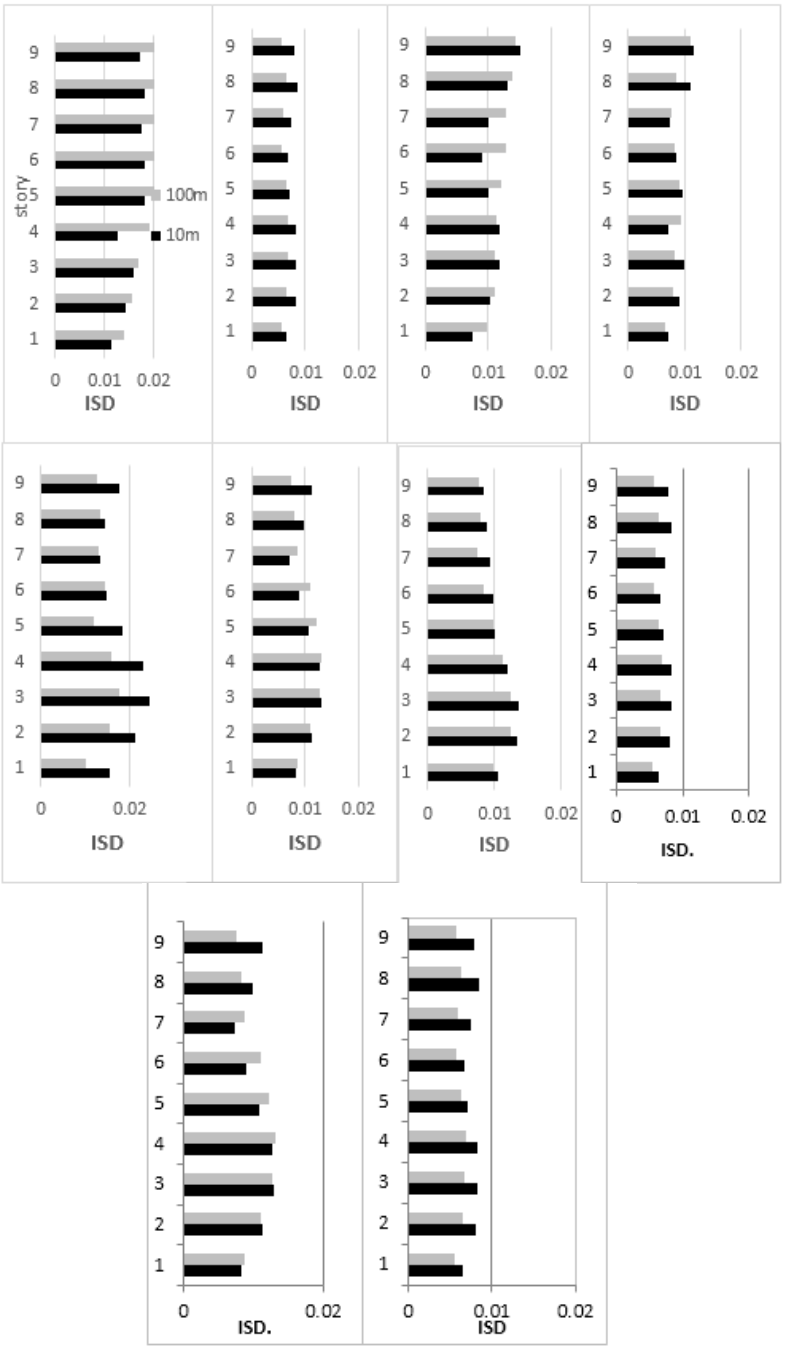
در این مقاله به بررسی تأثیرات شیب بر جابه‌جایی نسبی قاب‌های خمشی فولادی مجاور شیب با استفاده از مدل‌سازی ٦ مدل ترکیبی از خاک- سازه و توپوگرافی در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شد. مشخصات خاک مورد نظر از بررسی ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی منطقه جهانشهر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



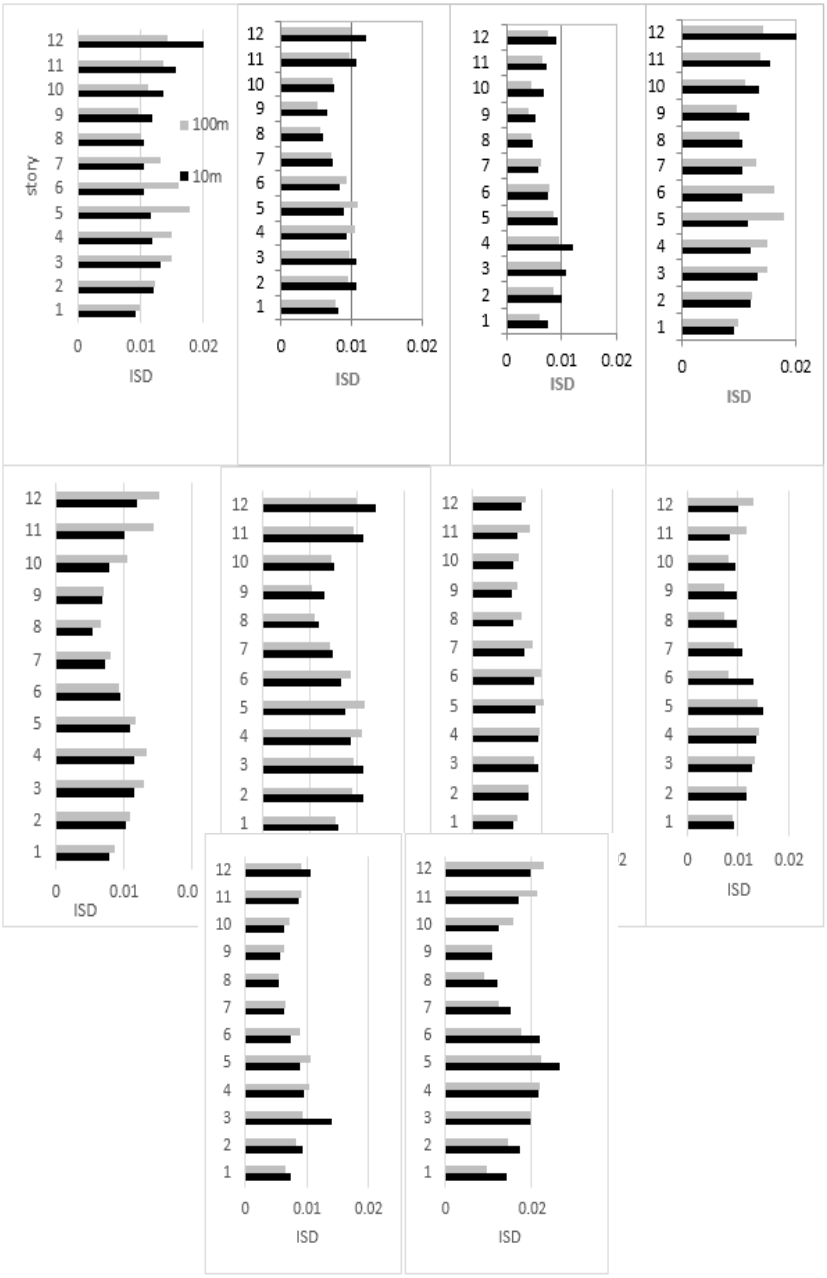
شکل۱۱. ب) نمودارهای حداکثر جابه‌جایی نسبی تحمل شده در هر طبقه برای زلزله‌های مختلف(سازه ٦ طبقه)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



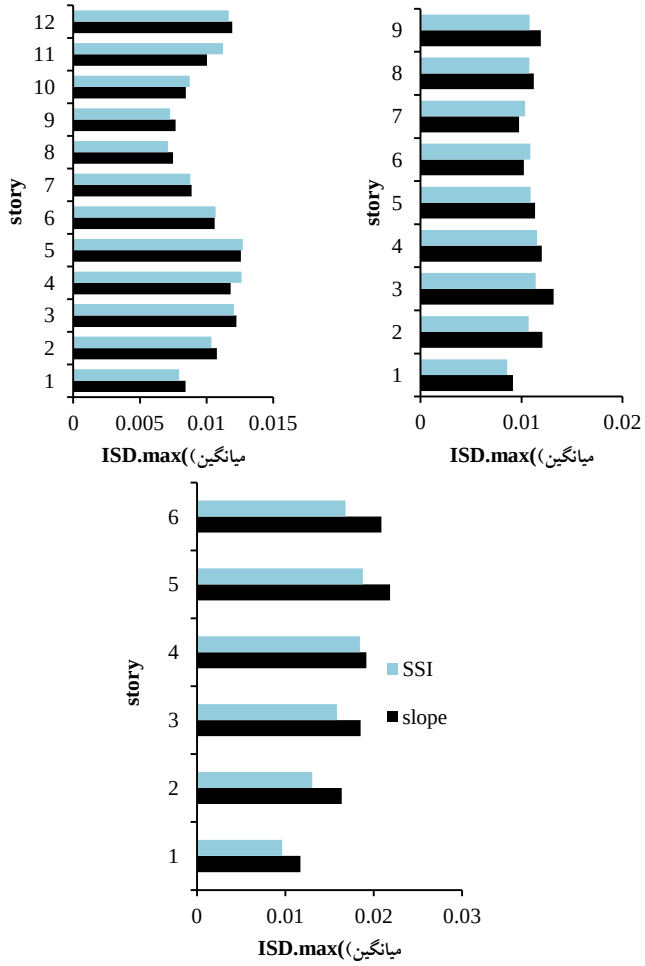
شکل۱۲. نمودارهای جابه‌جایی نسبی تحمل شده در هر طبقه برای زلزله‌های مختلف(سازه ۹ طبقه)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



شکل۱۳. نمودارهای حداکثر جابه‌جایی نسبی تحمل شده در هر طبقه برای زلزله‌های مختلف(سازه ۱۲ طبقه)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

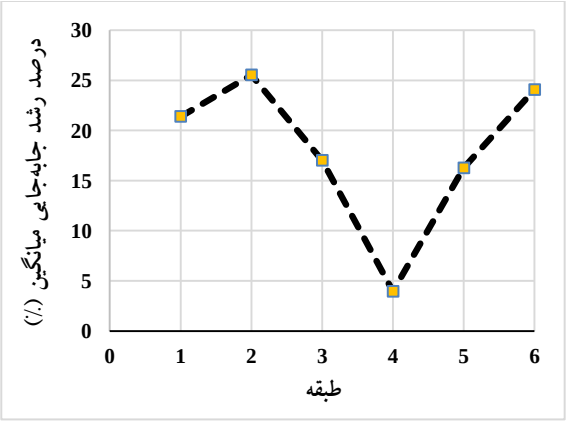


شکل۱٤. نمودارهای میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی تحمل شده در هر طبقه

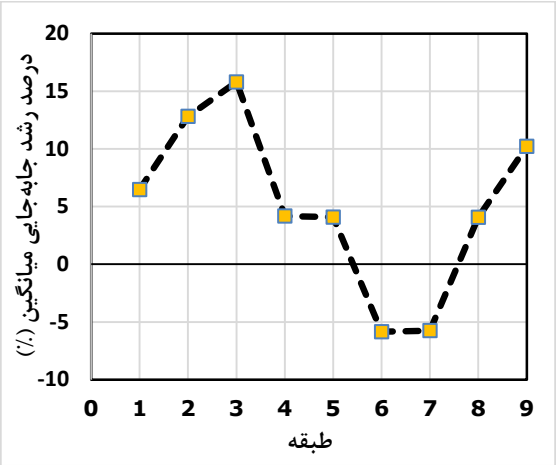
کرج (قنبری و همکاران ۱۳۸۹) گرفته شده است. سه قاب خمشی فولادی ٦، ۹ و ۱۲ طبقه در دو فاصلهٔ دور و نزدیک از شیب مورد قرار داده شد و با اعمال ۱۰ رکورد زمین‌لرزه ثبت شده روی سنگ‌بستر میزان جابه‌جایی نسبی ایجاد شده در هر طبقه از قاب‌ها، بررسی شد. نتایج نشان داد در حالت کلی، شیب بررسی شده سبب افزایش جابه‌جایی نسبی هر سه تیپ قاب می‌شود ولی با بررسی جزئی‌تر میزان درصد رشد، ملاحظه شد که، میزان افزایش جابه‌جایی نسبی میانگین برای تمامی رکوردها در سازهٔ ٦ طبقه بیش‌تر از ۹ طبقه و در ۹ طبقه بیش‌تر از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

۱۲ طبقه بوده است. هم‌چنین نتایج نشان از درصد افزایش منفی جابه‌جایی نسبی در بعضی از طبقات سازه‌های ۹ و ۱۲ طبقه داشت. که می‌توان علت این رشد منفی را ایجاد تغییر در شکل ارتعاش سازه‌های بلندتر در اثر حرکات گهواره‌ای ایجاد شده در پی دانست که در اثر امواج منعکس شده از شیب ایجاد شده‌اند.

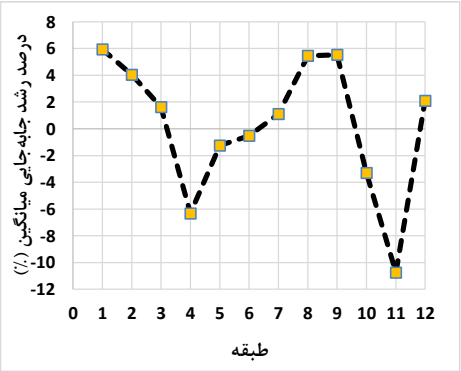


شکل۱۶. درصد رشد جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ٦ طبقه در اثر شیب موردنظر نسبت به‌حالت SSI



شکل۱۷. درصد رشد جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۹ طبقه در اثر شیب مورد نظر نسبت به حالت SSI

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]



شکل ۱۸. درصد رشد جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۱۲ طبقه در اثر شیب مورد نظر نسبت به حالت SSI

منابع

1. 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.
2. Tripe R., Kontoe S., K. C.Wong T., "Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers", Soil Dynamics and Earthquake Engineering; 50 (2013) 72-84.
3 George B., Achilleas G., "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", Soil dynamics and earthquake engineering, 25 (2005) 547-558
4. Assimaki D., Gazetas G., "Soil and topographic amplification on canyon banks and the 1999 Athens earthquake", Earthquake engineering 8 (no. 1) (2004) 1-43.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]

5. Bouckovalas g., Papadimitriou, "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", Soil dynamics and earthquake engineering, 25 (2005) 547-58.

6. Samuela R., Ernesto C., Giovanni B., "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. Euro code 8., "Design of structures for earthquake resistance; part 1: general rules. Seismic actions and rules for buildings", European committee for standardization. Brussels (2005).

8. Idriss I., seed b.,"response of earth banks during earthquakes", soil mech found div ASCE; 93(sm 3) (1967) 61-82.

۹. آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها دربرابر زلزله، آیین‌نامه ۲۸۰۰، ، مرکز تحقیقات راه، مسکن وشهرسازی، ویرایش چهارم (۱۳۹٤).

10. Karavasilis T. L., Makris N., Bazeos N., Beskos D. E., "Dimensional response analysis of multistory regular steel MRF subjected to pulse-like earthquake ground motions", Structural Engineering ASCE 2010; 136 921–32.

۱۱. قنبری ع.، زرنگ‌زاده س.، رضایی ف.، شیخ زکریایی س.، *مطالعه ویژگی‌های ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی کرج*، پژوهشکدهٔ علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۹).

12. Pacific earthquake engineering research center (peer) online strong motion database, http://peer.berkeley.edu/smcat/.

13. Minasidis G., Hatzigeorgiou D. E., .Beskos G. D., "SSI in steel frames subjected to near-fault earthquakes", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 66 (2014) 56-68.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.1.1.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.1.115]