

## تهیه رابطه کاهندگی شتاب برای فلات ایران

غلامرضا قدرتی امیری<sup>۱\*</sup>، سید علی رضویان امرئی<sup>۲</sup> و سید امین رضویان امرئی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۲	تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ها نیازمند پارامترهای مختلفی از زلزله مانند شتاب پایه طراحی، طیف‌های طراحی و رکوردهای زلزله می‌باشد. برای به دست آوردن شتاب پایه و طیف‌های طراحی یک ساختمان، روش متداول مبتنی بر آنالیزهای تحلیل خطر زلزله می‌باشد. در این روش شتاب پایه و طیف‌های طراحی بر اساس لرزه خیزی منطقه، شرایط ساختگاهی و کمک‌گیری از روش‌های آماری احتمالی به دست می‌آید. یکی از الزامات این روش وجود روابط کاهندگی مناسب برای پارامتر PGA می‌باشد. هدف اصلی این مقاله تکمیل و به روز کردن رابطه کاهندگی قدرتی و همکاران (۲۰۰۷) برای به دست آوردن روابط کاهندگی شتاب برای مناطق لرزه خیزی زاگرس و البرز - ایران مرکزی در شرایط ساختگاهی بستر سنگی و خاکی می‌باشد. در این تحقیق ۸۵۸ رکورد زلزله، برای البرز و ایران مرکزی و زاگرس، در به دست آوردن مدل‌ها استفاده شده است که از این تعداد ۴۷۷ رکورد مربوط به البرز و ایران مرکزی است. برای پردازش همه جانبه رکوردهای زلزله از نرم افزار SWS استفاده شده است. عملیات برازش و رگرسیون‌گیری برای ماکزیمم دو مولفه افقی انجام گرفته و ضرایب روابط کاهندگی شتاب به دست آمده است.
<b>واژگان کلیدی:</b> رابطه کاهندگی، شتاب، شرایط تکتونیکی، ایران.	

## ۱- مقدمه

با پهنه‌های مختلف کشور متفاوت می‌باشند. بعلاوه، مشاهده شده است که گاهی در هنگام بررسی‌های خطر زمین‌لرزه برای سازه‌های مهندسی مهم در کشور از چندین مدل نامناسب برای شرایط ایران استفاده شده و در نهایت از میان پارامترهای حاصل از آنها میانگین وزنی انتخاب و معرفی می‌شود. به دلیل اهمیت استفاده از مدل‌های کاهندگی که بر پایه داده‌های شتاب‌نگاری مربوط به زمین‌لرزه‌های سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۹ در کشور ایران است، در این تحقیق مهم-ترین داده‌های قابل اعتماد از ایالت‌های لرزه زمین‌ساختی مختلف کشور براساس داده‌های موجود از زمین‌لرزه‌های رخ داده انتخاب، و عملیات محاسبه روابط کاهندگی بر روی آنها در ادامه مطالعات قبلی قدرتی و همکاران [۱ و ۲] انجام

انجام صحیح بررسی‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه و یافتن پارامترهای جنبش نیرومند برای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، مستلزم به کار بردن مدل‌های کاهندگی مناسب برای کشور است. متأسفانه در گذشته به دلیل کمبود چنین مطالعاتی در کشور و عدم دسترسی به داده‌های پایه شتاب‌نگاری تصحیح شده، در هنگام بعضی از بررسی‌های خطر زمین‌لرزه برای سازه‌های مهم مهندسی از مدل‌هایی استفاده شده که براساس داده‌های جنبش نیرومند زمین در سایر کشورهای لرزه خیز توسعه داده شده‌اند. این در حالی است که این رابطه‌ها برای محل‌هایی توسعه داده شده‌اند که از نظر ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی و پارامترهای زلزله شناختی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghodrati@iust.ac.ir

۱. استاد، قطب مطالعات بنیادی در مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور

۳. کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

شده است.

شده به وسیله مدل استفاده شده و بر اساس این معیارها فرم بهینه تابع رگرسیون و ضرایب بهینه تعیین گردید.

## ۲- مدل‌های کاهندگی

مرحله اساسی در شکل‌دهی روابط کاهندگی، انتخاب تابع و یا مدلی ریاضی است که تعیین کننده ارتباط میان متغیرهای مستقل و وابسته خواهد بود. به طور کلی فرم تابعی چنین مدلی، به مبنای داده مورد استفاده و هدف از به کارگیری مدل بستگی خواهد داشت. در اینجا نکته با اهمیت، یافتن شکل تابع فوق برای فواصل نزدیک است، که این مهم به کمک مدل‌سازی فرآیند گسیختگی میسر می‌شود [۳].

سودمند بودن مدل رگرسیون را می‌توان از طریق تحلیل واریانس امتحان کرد. اما به هر حال کارایی کلی مدل را می‌توان از تحلیل باقیمانده‌ها به دست آورد [۴].

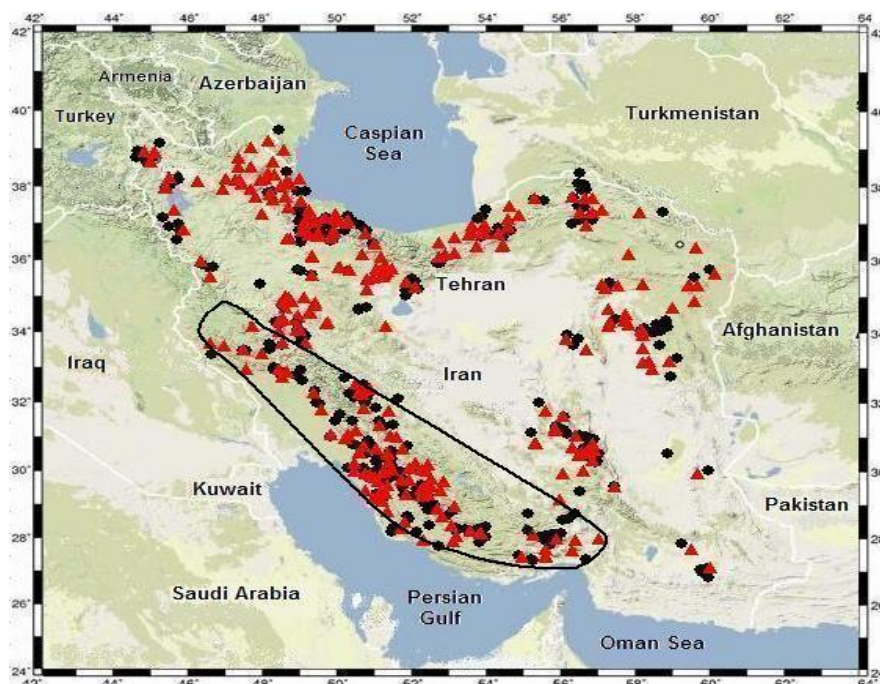
باقیمانده به دست آمده در برگزیده تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده  $Y$  می‌باشد. در این تحلیل برای برآورد کارایی مدل از مقایسه پارامترهای آماری نظیر تغییرات تابع استهلاک و بررسی میزان تغییرات پیش‌بینی

### ۱-۲- شرایط تکتونیکی ایران و تهیه کاتالوگ

با توجه به تفاوت‌های موجود در استان‌های لرزه‌خیزی ایران در این تحقیق با تقسیم‌بندی ایران به دو ناحیه زاگرس و البرز و ایران مرکزی روابط کاهندگی برای این دو ناحیه به دست آمده است. با توجه به اهداف تحقیق چند ضلعی با مختصات رئوس ذیل شکل (۱) را به عنوان ناحیه زاگرس و مابقی کشور را به عنوان البرز و ایران مرکزی تقسیم‌بندی می‌نماییم.

### ۳- تهیه کاتالوگ

یکی از مهم‌ترین مسائل در مدل کاهندگی داشتن یک کاتالوگ مناسب زلزله است. یک کاتالوگ مناسب باید دارای داده‌های کافی جهت امکان برازش یک منحنی باشد. همچنین هر چقدر کیفیت داده‌های موجود از لحاظ دقت مناسب‌تر باشد به همان نسبت مدل ارائه شده دقیق‌تر و دارای انحراف کمتر خواهد بود.



شکل ۱- محدوده نواحی زاگرس و البرز و ایران مرکزی نسبت به یکدیگر- محدوده داخل منحنی ناحیه زاگرس را نشان می‌دهد [۲]

نتایج تحقیقات محققین مانند قدرتی و همکاران (۱ و ۲)، زارع [۸] و ... به دست آمد.

### ۳-۱- بزرگا

دستگاه‌های اندازه‌گیری زلزله امکان اندازه‌گیری کمیته مشخص را که بزرگای زلزله نامیده می‌شود، فراهم می‌سازد.

در مطالعه حاضر کاتالوگ زلزله‌های رخ داده در ایران، از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۹ میلادی گردآوری گردیده است. کاتالوگ زلزله از مراکز مختلف اطلاعاتی شامل مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان [۵]، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله [۶]، سازمان ملی زمین‌شناسی آمریکا [۷] و همچنین

با توجه به تمامی موارد ذکر شده در بندهای قبلی و با صرف زمان و دقت بسیار و تصحیحات لازم در نهایت کاتالوگ مورد استفاده در این تحقیق حاصل گردید.

در انتخاب رکوردهای انتخابی علاوه بر مواردی مانند دقت مقادیر بزرگا، فاصله، امکان تعیین شرایط ساختگاه و در دسترس بودن رکورد زلزله، صرفاً داده‌هایی مورد استفاده قرار گرفت که زلزله مسبب آنها دارای بزرگای مساوی و یا بیشتر از ۴ در مقیاس امواج سطحی هستند. علت این امر دقت بالاتر داده‌های موجود برای این زلزله‌ها و همچنین اهمیت تطابق مدل برای زلزله‌هایی با بزرگایی در این دامنه است.

در نهایت کاتالوگ انتخابی بعد از پردازش رکوردها، اطلاعات ۸۵۸ رکورد زلزله جمع آوری شده برای کل ایران را ارائه می‌دهد، که از این تعداد ۴۷۷ رکورد مربوط به البرز و ایران مرکزی است. (شکل ۲)

### ۳-۵- تصحیح رکوردهای زلزله ایران

برای به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز با مقادیر قابل اعتماد نیازمند تصحیح رکوردهای زلزله می‌باشد. با توجه به تنوع دستگاه‌های ثبت زلزله و نحوه عددی نمودن رکوردهای آنالوگ در ایران تلاش گسترده‌ای برای به دست آوردن روش مناسب تصحیح رکوردها انجام پذیرفت [۱۲]. برای پردازش همه جانبه رکوردهای زلزله از نرم افزار SWS استفاده شده است [۱۳ و ۱۴].

### ۳-۴- تهیه رابطه کاهندگی شتاب برای فلات ایران

در این مطالعه پارامترهای بزرگا و فاصله به صورت مستقیم در مدل کاهندگی در نظر گرفته شدند. همچنین تأثیر نوع بستر و همچنین سازوکار گسل‌ها و شرایط تکتونیکی با تقسیم‌بندی داده‌ها در گروه‌های مختلف و به دست آوردن مدل‌ها برای هر گروه لحاظ گردیده است.

در ابتدا بسیاری از مدل‌های ارائه شده اخیر [۱۵] توسط محققینی نظیر امبرسیز و بومر [۱۶]، زارع [۸]، کمپل و بزرگنیا [۱۷] و ... مورد آزمایش قرار گرفت و با بررسی میزان خطای باقیمانده، ضریب رگرسیون و همچنین انحراف معیار مدل مناسب انتخاب گردید. بر این اساس مدل‌های به دست آمده برای نواحی زاگرس و همچنین البرز و ایران مرکزی برای شرایط مختلف ساختگاهی برای پارامتر شتاب برای مولفه افقی به دست آمد.

برای مشخص کردن نوع سنجه بزرگای استفاده شونده در روابط پیش‌بینی با بررسی داده‌ها، زمین‌لرزه‌های گزارش شده توسط Ambrasys، NEIS، JSC و دیگران مشخص شد، که Mw تنها در مورد تعداد اندکی از زمین‌لرزه‌ها گزارش شده است و علیرغم ارزش بی‌تردید این مقیاس بزرگا، نمی‌توان آن را مورد استفاده قرار داد. از سوی دیگر، به دلیل آنکه زمین‌لرزه‌های مورد نظر در محدوده بزرگای ۴ تا ۷/۷ گسترده شده بود، مسأله اشباع مقیاس‌های mb و Ms عملاً قابل صرف‌نظر بوده است. در نتیجه و با توجه به اینکه mb برای بیشتر رویدادها گزارش شده بود و Ms نیز برای رویدادهای بزرگتر در دسترس بود و اینکه زلزله‌های رخ داده در ایران سطحی هستند لذا در این تحقیق تمامی مقادیر بزرگا بر حسب بزرگای موج سطحی بیان شده است. به این منظور از رابطه کمیته ملی سدهای ایران [۹] برای تبدیل بزرگا بر حسب موج حجمی به بزرگا بر حسب موج سطحی استفاده شده است.

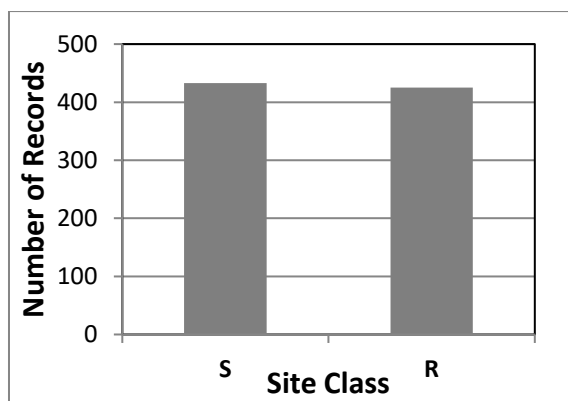
### ۳-۲- فاصله

فاصله مرکز زلزله تا ایستگاه شتاب‌نگار یکی از مهم‌ترین و موثرترین پارامترهای موجود در تهیه روابط کاهندگی می‌باشد. که با استفاده از مختصات جغرافیایی مرکز زلزله و ایستگاه شتاب‌نگار به محاسبه فاصله سطحی پرداخته شده است [۱۰].

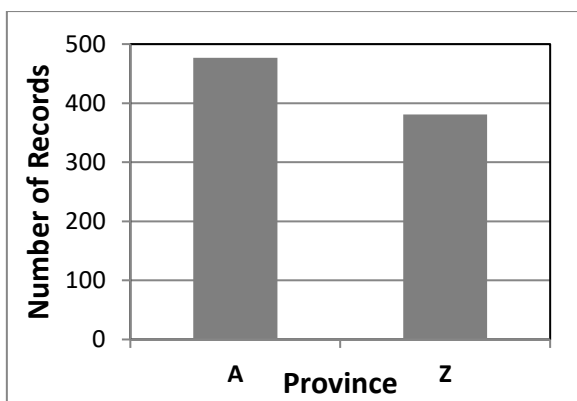
### ۳-۳- شرایط ساختگاهی

این پارامتر مشخص کننده شرایط زمین شناختی ساختگاه می‌باشد و در دسته‌بندی آن از تقسیم‌بندی‌های کیفی، نظیر جنس لایه‌های تشکیل دهنده و کمی، بر مبنای سرعت امواج برشی لایه‌های سطحی، استفاده می‌گردد. با توجه به اطلاعات موجود در زمینه تعیین شرایط ساختگاهی، نتیجه‌گیری نهایی منجر به انتخاب دو نوع شرایط ساختگاهی سنگ و خاک برای رکوردهای ایران گردید و مدل‌های ارائه شده در این تحقیق بر این اساس طبقه‌بندی گردیده‌اند. براساس این تقسیم‌بندی و با مقایسه آن با استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۱] می‌توان شرایط ساختگاهی سنگ را متناظر سرعت امواج برشی بیشتر یا مساوی ۳۷۵ متر بر ثانیه و شرایط ساختگاهی خاک را متناظر سرعت موج برشی کمتر از ۳۷۵ متر بر ثانیه فرض نمود.

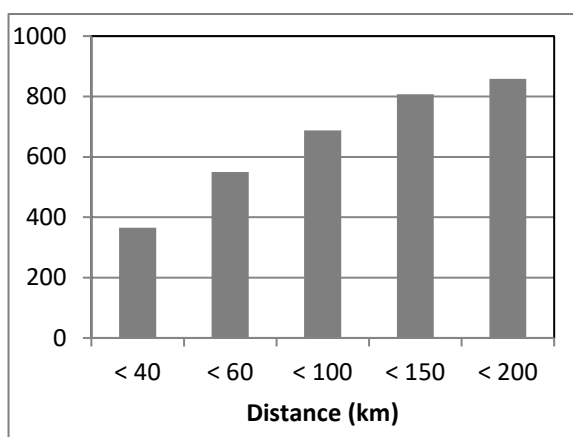
### ۳-۴- کاتالوگ نهایی مورد استفاده



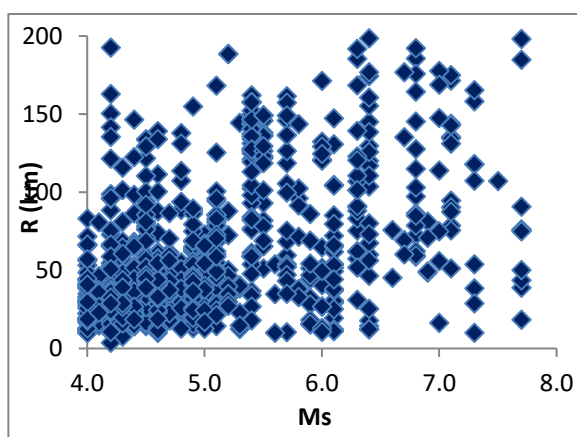
ب



الف



د



ج

شکل ۲- (الف)-فراوانی تعداد رکوردهای ثبت شده در کاتلוג نهایی برای منطقه زاگرس (Z) و البرز و ایران مرکزی (A)، (ب)- فراوانی تعداد رکوردها براساس شرایط ساختگاه: سنگ (R) و خاک (S)، (ج)- بزرگای رکوردها نسبت به فاصله و (د)- فراوانی تعداد رکوردها از لحاظ فاصله

مختلف ساختگاهی و تکنیکی برای شتاب به دست آمده است. در این رابطه PGA شتاب،  $M_s$  بزرگای سطحی و R فاصله کانونی می باشد. توجه شود که با توجه به اینکه هر رکورد زلزله دارای دو مولفه افقی و یک مولفه قائم می باشد، لذا با استفاده از نرم افزار Seismosignal [۱۸] شتاب برای ماکزیمم دو مولفه افقی به دست آمده و بر اساس ماکزیمم دو مؤلفه عملیات برازش و رگرسیون گیری روی این اعداد انجام گرفته است که نتایج در اشکال (۳) الی (۵) ارائه شده است.

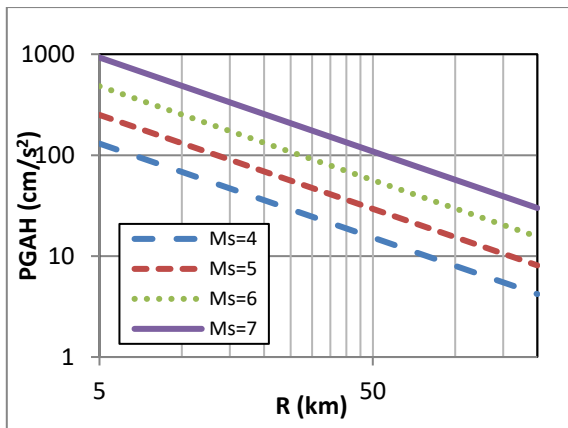
این بار با لحاظ کردن تجربیات به دست آمده در مدل های قبلی و مجدداً به کمک سعی و خطا، مدل ساده تر ولی با تعبیر فیزیکی بهتر به دست آمد هر چند میزان انحراف معیار اندکی افزایش یافت. مشخصات دقیق تر مدل های انتخابی در ادامه به همراه تفسیر نتایج ارائه گردیده است. مدل مورد استفاده برای طیف خطی شتاب به شکل زیر است:

$$\log(PGA) = C_1 + C_2 M_s + C_3 \cdot \log(R) \quad (1)$$

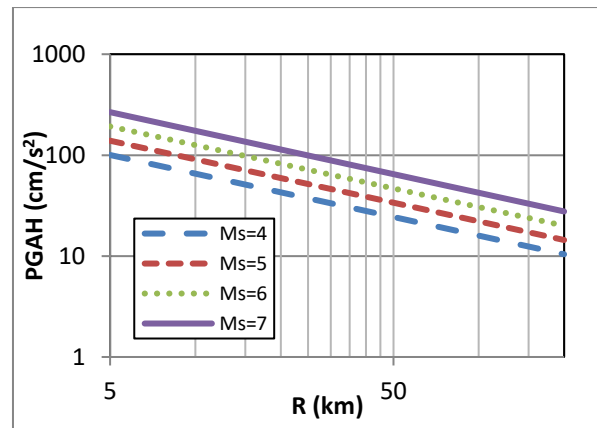
که بر اساس مدل فوق در جدول ۱ ضرایب مدل برای شرایط

جدول ۱- ضرایب رابطه کاهندگی شتاب

Seismic Province	Site Condition	Coefficients of the attenuation model			$\sigma$
		$C_1$	$C_2$	$C_3$	
Zagros	Rock	2.123	0.062	-0.587	0.36
Zagros	Soil	2.279	0.104	-0.790	0.42
Alborz & Central Iran	Rock	1.864	0.141	-0.614	0.2
Alborz & Central Iran	Soil	1.627	0.284	-0.930	0.32

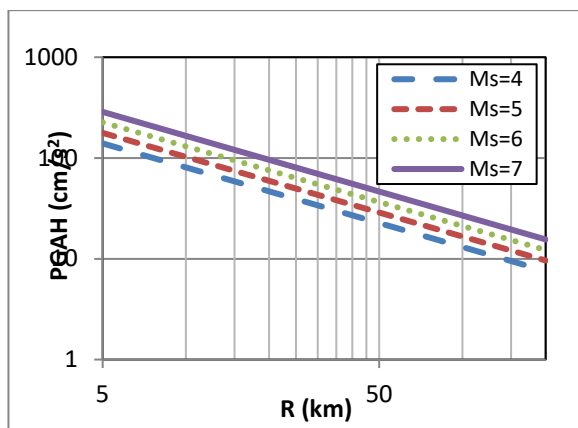


ب

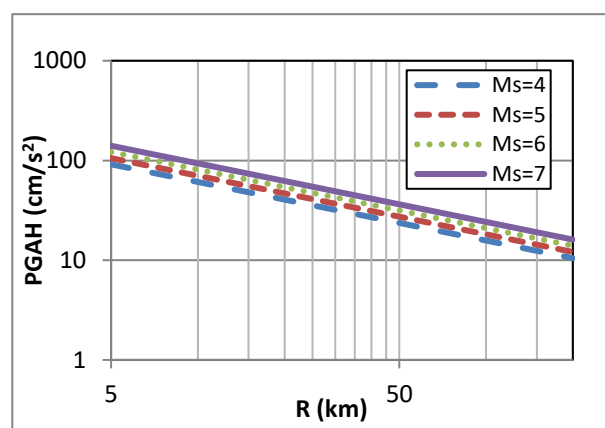


الف

شکل ۳- نمودار کاهندگی شتاب برای بزرگ‌گاه‌های مختلف البرز و ایران مرکزی: (الف)- سنگ و (ب)- خاک

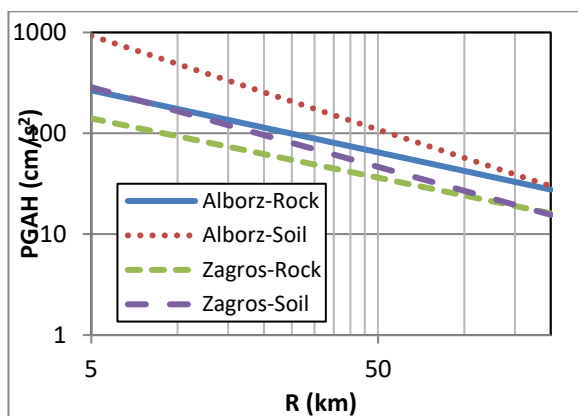


ب

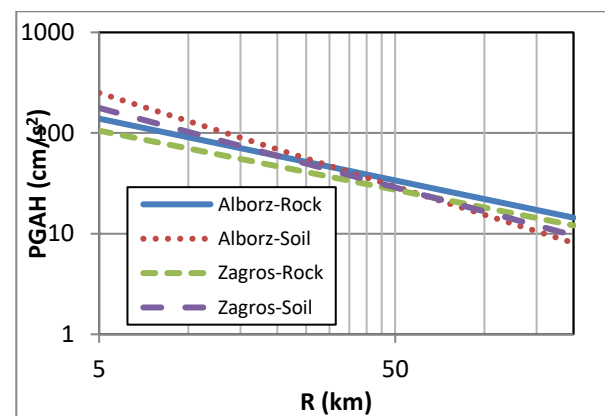


الف

شکل ۴- نمودار کاهندگی شتاب برای بزرگ‌گاه‌های مختلف زاگرس: (الف)- سنگ و (ب)- خاک



ب



الف

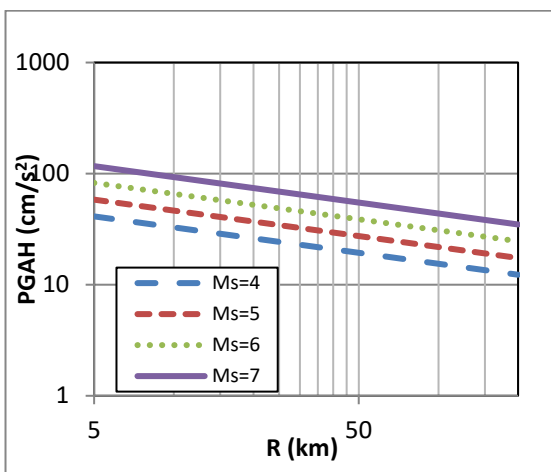
شکل ۵- نمودار کاهندگی شتاب برای بزرگ‌گاه‌های مختلف: (الف)- Ms=5 و (ب)- Ms=7

و مدل مذکور در جدول ۲ ضرایب مدل برای شرایط مختلف ساختگاهی و تکتونیکی برای شتاب به دست آمده است و نتایج در اشکال (۶) الی (۱۰) ارائه شده است.

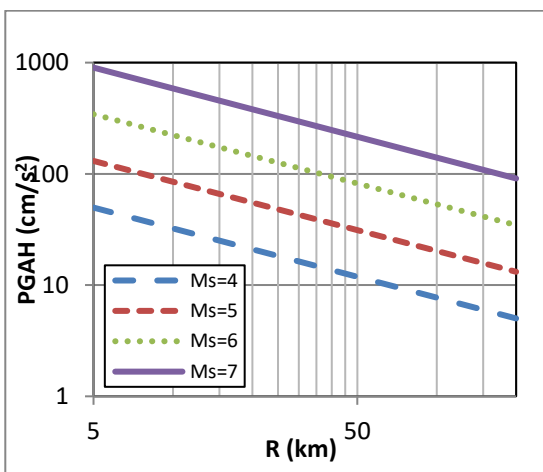
در ادامه برای بررسی میزان حساسیت رابطه به شعاع مطالعات، تنها از داده‌هایی استفاده شده است که در شعاع کمتر از ۶۰ کیلومتر قرار گرفته بودند و براساس این داده‌ها

جدول ۲- ضرایب رابطه کاهشدهنده شتاب برای شعاع ۶۰ کیلومتری

Seismic Province	Site Condition	Coefficients of the attenuation model			$\sigma$
		$C_1$	$C_2$	$C_3$	
Zagros	Rock	1.813	0.242	-0.923	0.45
Zagros	Soil	1.802	0.168	-0.667	0.46
Alborz & Central Iran	Rock	1.241	0.150	-0.327	0.2
Alborz & Central Iran	Soil	0.453	0.419	-0.621	0.3

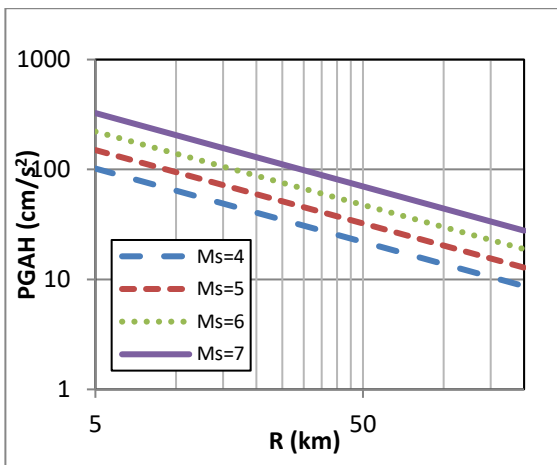


ب

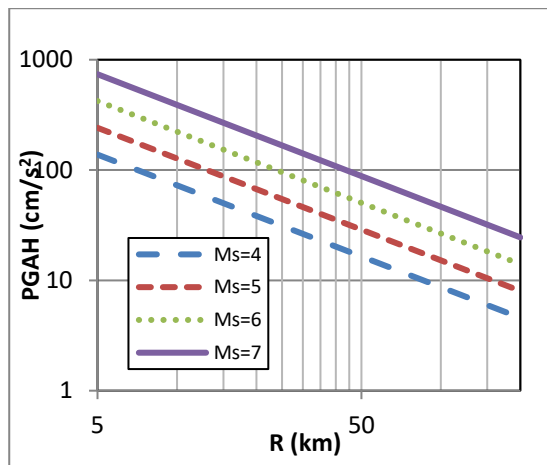


الف

شکل ۶- نمودار کاهشدهنده شتاب تا شعاع ۶۰ کیلومتری برای بزرگراه‌های مختلف البرز و ایران مرکزی: (الف)- سنگ و (ب)- خاک

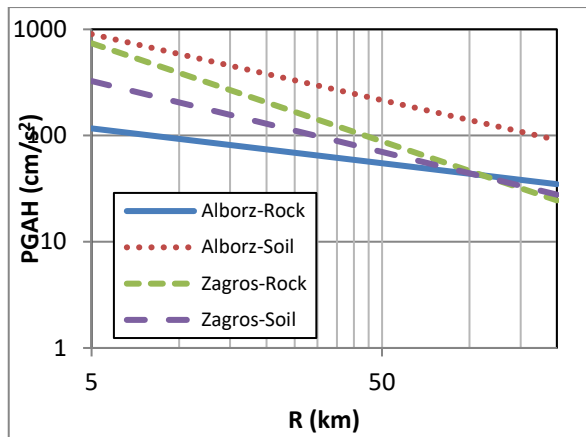


ب

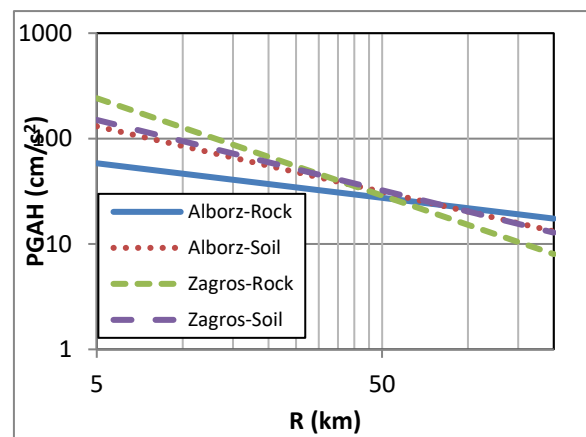


الف

شکل ۷- نمودار کاهشدهنده شتاب تا شعاع ۶۰ کیلومتری برای بزرگراه‌های مختلف زاگرس: (الف)- سنگ و (ب)- خاک

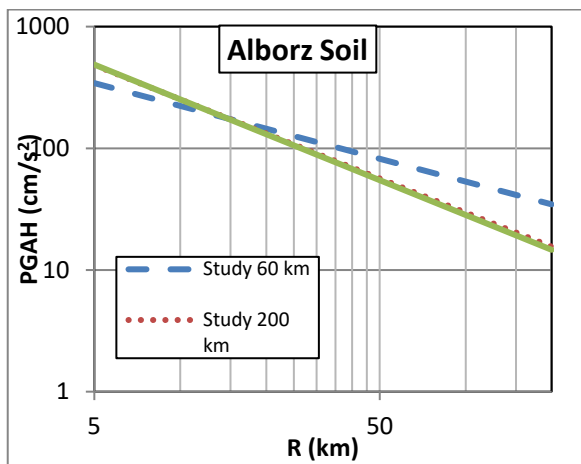


ب

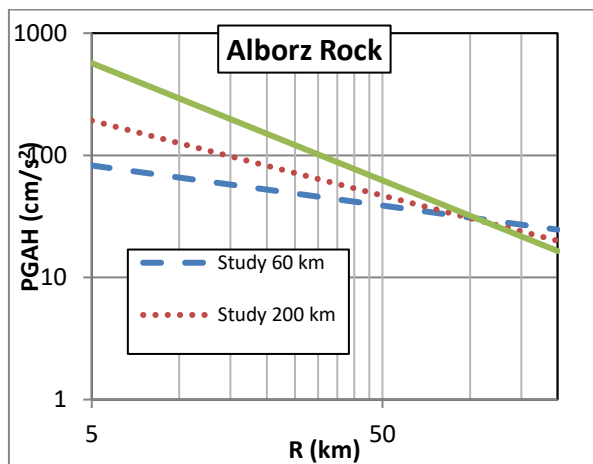


الف

شکل ۸- نمودار کاهندگی شتاب تا شعاع ۶۰ برای بزرگهای مختلف: (الف) -  $M_s=5$  و (ب) -  $M_s=7$

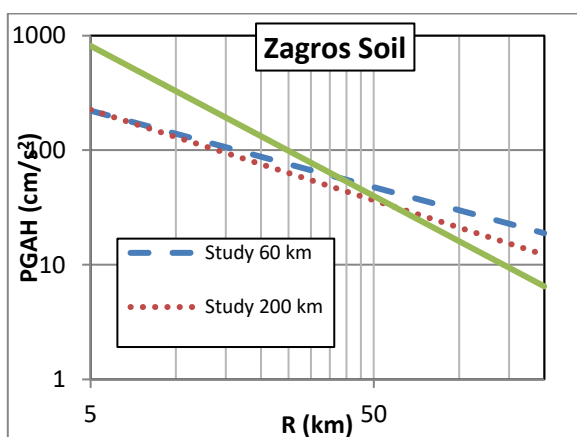


ب

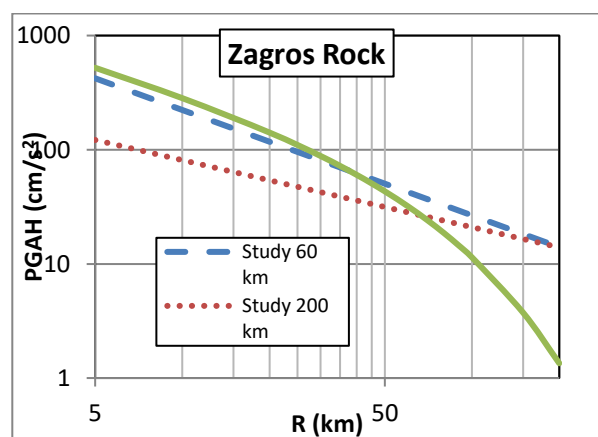


الف

شکل ۹- مقایسه نمودار کاهندگی شتاب برای بزرگها و فواصل مختلف با رابطه قدرتی و همکاران (۲۰۰۷) البرز و ایران مرکزی: (الف) - سنگ و (ب) - خاک



ب



الف

شکل ۱۰- مقایسه نمودار کاهندگی شتاب برای بزرگها و فواصل مختلف با رابطه قدرتی و همکاران (۲۰۰۷) زاگرس: (الف) - سنگ و (ب) - خاک

## ۵- بحث و بررسی نتایج

ساختگاهی سنگ و خاک برای رکوردهای ایران انتخاب گردید.

از فاصله کانونی برای به دست آوردن روابط استفاده شده است. تعداد رکوردهایی که شرایط فاصله کمتر از ۶۰ کیلومتر را بتوانند از نظر فاصله ارضا کرده و در محاسبات وارد شوند مناسب بوده، بنابراین این مورد به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و ضرایب مربوط به آن ارائه شده است. روابط کاهندگی ارائه شده نتایج خوبی برای فواصل کانونی بین ۷ تا ۱۵۰ کیلومتر و بزرگای سطحی بین ۴ تا ۷/۷ را ارائه می‌دهند.

در این تحقیق رابطه کاهندگی شتاب برای مؤلفه افقی زلزله برای شرایط تکتونیکی البرز و ایران مرکزی و زاگرس و با طبقه‌بندی خاک به دو گروه خاک و سنگ ارائه شده است. کاتالوگ زلزله‌های رخ داده در ایران، از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۹ میلادی تهیه گردیده و تمامی مقادیر بزرگا بر حسب بزرگای موج سطحی بیان شده است. ۸۵۸ رویداد زلزله، برای البرز و ایران مرکزی و زاگرس، در به دست آوردن مدل‌ها استفاده شده است که از این تعداد ۴۷۷ رکورد مربوط به البرز و ایران مرکزی است. دو نوع شرایط

## مراجع

[1] G. Ghodrati Amiri, A. Mahdavian, and F. Manouchehri Dana, "Attenuation relationships for Iran", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 11, No. 4, 2007, pp. 469-492.

[2] G. Ghodrati Amiri, M. Khorasani, R. Mirza Hessabi, and S.A. Razavian Amrei, "Ground-Motion Prediction Equations of Spectral Ordinates and Arias Intensity for Iran", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 14, 2010, pp. 1-29.

[3] J.G. Anderson, & J.E. Luco, "Parametric study of near field ground motions for oblique - slip dislocation models", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 73, 1983, pp. 45-57.

[4] N.R. Draper, & H. Smith, Applied Regression Analysis, 2nd edition, John Wiley & Sons, N.Y., 1981.

[5] BHRC, Building and Housing Research Center, <http://www.bhrc.ac.ir>.

[6] IIEES, International Institute of Earthquake Engineering & Seismology, <http://www.iiees.ac.ir/>.

[7] USGS, United States Geological Survey, <http://www.usgs.gov>

[8] M. Zare, M. Ghafory-Ashtiany, and P.Y. Bard, "Attenuation law for the strong motion in Iran", Proceeding of the 3rd International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran, 1999, pp. 345-354.

[9] IRCOLD, Iranian Committee of Large Dams, Relationship between Ms and mb, Internal Report (in Persian), 1994.

[10] Earthquake Information Bulletin, Vol. 2, No. 5, September-October, 1970.

[۱۱] آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله: استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.

[۱۲] غ. قدرتی امیری، م. زاهدی، ع. مهدویان، س. غلامی، محدوده فرکانسی مناسب جهت پردازش شتابنگاشت‌های ایران برای انواع شرایط ساختگاهی، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۳۸، شماره ۲، ۱۳۸۳، صفحه ۲۳۱-۲۴۹.

[13] M.D. Trifunac, & V.W. Lee, "Automatic digitization and processing of strong motion accelerograms", University of Southern California, Report No. 74-15 I, II, 1979.

[14] SWS, Seismic Work Station Software Inc, Pasadena, California, 1990.



[15] J. Douglas, "Ground motion estimation equations 1964-2010", PEER Report 2011/102, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, USA., 2011.

[16] N.N. Ambraseys, & J.J. Bommer, "The Attenuation of ground acceleration in Europe", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, No. 12, 1991, pp. 1179–1202.

[17] K.W. Campbell, & Y. Bozorgnia, "Campbell-Bozorgnia next generation attenuation (NGA) relations for PGA, PGV and spectral acceleration: A Progress Report", Proceedings of the 8th National Conference of Earthquake Engineering, San Francisco, California. 2006

[18] Seismosignal, Seismosoft Software Inc, version 3.2.0., 2009, <http://www.seismosoft.com>.