



## رابطه کاهیدگی طیف پاسخ شتاب در ایران

حسین صادقی<sup>1</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>2</sup>، محمد جلادت<sup>3</sup>

1- دانشیار، مرکز تحقیقات زمین لرزه شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات زمین لرزه شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

[sadeghi@um.ac.ir](mailto:sadeghi@um.ac.ir)

[nhafezi@shahroodut.ac.ir](mailto:nhafezi@shahroodut.ac.ir)

[jaladat\\_2006@yahoo.com](mailto:jaladat_2006@yahoo.com)

### خلاصه

در این مطالعه با استفاده از داده های زیاد حرکات قوی ثبت شده توسط شبکه ملی شتاب نگاری ایران (NSMNI) به دنبال رابطه ای بودیم که بتواند طیف پاسخ را برای محدوده پریودی 0/1 تا 3 ثانیه و برای میانگین دو مولفه افقی حرکات قوی، پیش بینی کند. روابط کاهیدگی طیف پاسخ برای میرایی بحرانی 5٪ به صورت تابعی از پریود، بزرگی زلزله و فاصله کانونی در شرایط ساختمانی مختلف برآورد گردید. برای این منظور دو مولفه افقی 883 رکورد شتاب نگار مورد پردازش قرار گرفت تا مدل پیش بینی کننده حرکات قوی برای ایران و سه زیر منطقه اصلی لرزه ای آن (البرز، زاگرس و شرق ایران)، و همچنین ناحیه جنوب مرکزی بدست آید. مجموعه داده ها شامل 79 زلزله از 1987 تا 2007 میلادی و با ممان بزرگی 5 و بالاتر از آن می باشد. مدل کاهیدگی انتخاب شده به صورت یک مدل سه تکه ای می باشد. برای تعیین ضرایب کاهیدگی از روش مونت کارلو استفاده شد. نتایج نشان می دهند که تنها دو ضریب به شدت وابسته به پریود می باشند در حالی که دیگر ضرایب وابستگی خاصی به پریود ندارند. در این مطالعه وابستگی فرکانسی ضرایب کاهیدگی در ایران و زیر مناطق لرزه ای آن در ساختمان های خاک و سنگ مورد بررسی قرار گرفت. کلمات کلیدی: طیف پاسخ، روابط کاهیدگی، اثر ساختمان، ضریب میرایی

### مقدمه

منطقه مورد مطالعه فلات ایران با عرض جغرافیایی 25 تا 40 درجه شمالی و طول جغرافیایی 44 تا 63 درجه شرقی می باشد (شکل 1). فلات ایران منطقه ای با فعالیت لرزه خیزی بالا می باشد، که در طول تاریخ شکل گیری آن تعداد زیادی زلزله فاجعه بار در آن رخ داده است [1 و 2]. ویژگی های سازه تکنونیک ایران بسیار پیچیده می باشد و در مناطق مختلف تفاوت بارزی را نشان می دهد. لرزه خیزی، مکانیزم گسلش و سازه تکنونیک ایران توسط محققان زیادی مورد بحث واقع شده است [3، 4، 5، 6، 7 و 8]. محققین مرزهای تکنونیک ایران را بر اساس تفاوت سبک تکنونیک هر منطقه تعریف کرده اند. اگر چه تعداد زیادی حرکات قوی توسط شبکه ملی شتاب نگاری ایران (NSMNI) ثبت شده است، اما توزیع غیر یکنواخت این داده ها بر روی ایران ما را محدود به ارائه مدل پیش بینی کننده حرکات قوی، تنها برای سه منطقه تکنونیک مجزای البرز، شرق و زاگرس و همچنین برای جنوب مرکزی ایران کرد.

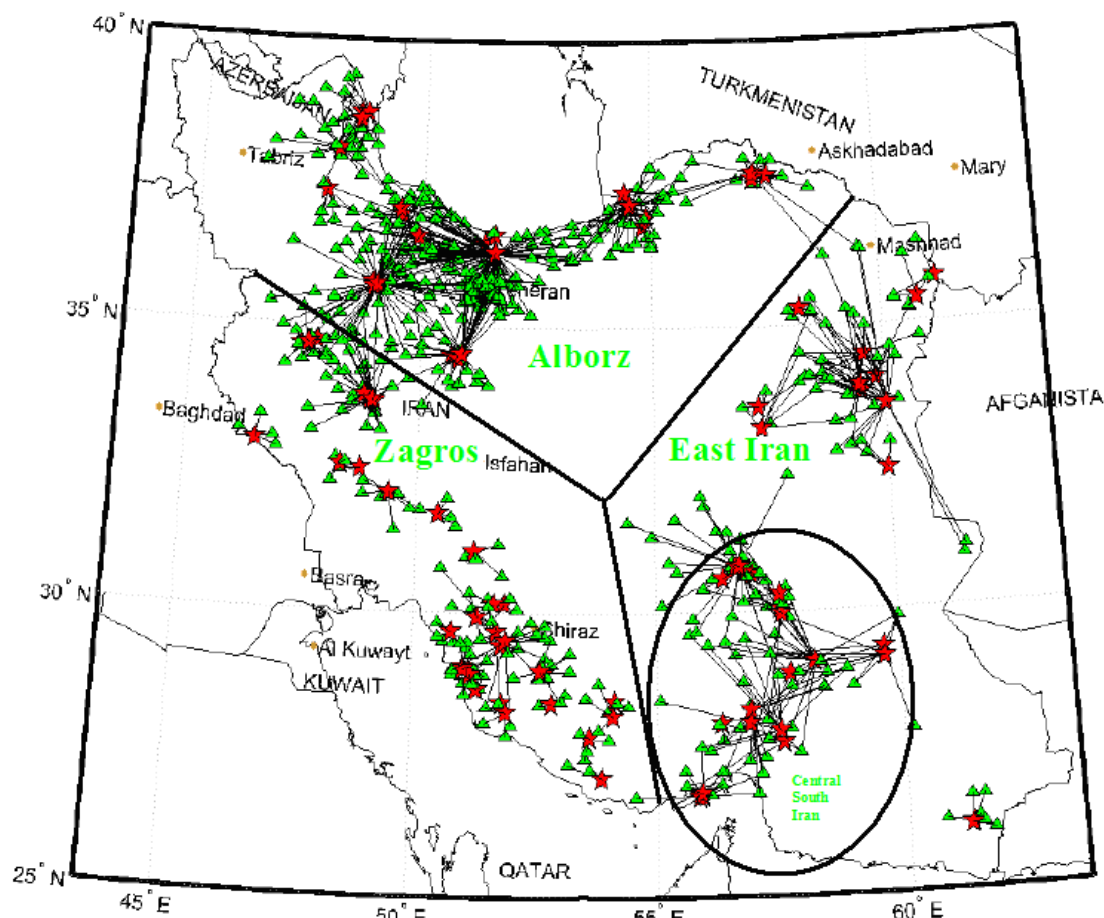
در این مطالعه رابطه ای ارائه شد که طیف پاسخ<sup>1</sup> شتاب مطلق در میرایی بحرانی 5٪ و در محدوده پریودی 0/1 تا 3 ثانیه را پیش بینی می کند. از اینرو، روابط کاهیدگی<sup>2</sup> طیف پاسخ برای میرایی بحرانی 5٪ به صورت تابعی از پریود، ممان بزرگی و فاصله کانونی در شرایط ساختمانی مختلف برآورد گردید.

<sup>1</sup> - Response Spectra

<sup>2</sup> - Attenuation Relations

## داده های حرکات قوی

در این مطالعه مولفه های افقی 883 رکورد شتاب نگار مربوط به 79 زلزله با ممان بزرگی بالاتر از 5 استفاده شد. این رکورد ها به گونه ای انتخاب شده اند که هر زلزله حداقل 3 رکورد با فاصله کانونی کوچکتر از 350 کیلومتر داشته باشند. با استفاده از مولفه های افقی این داده ها مدل پیش بینی کننده طیف پاسخ شتاب مطلق در میرایی 5٪ و در محدوده پریودی 0/1 تا 3 ثانیه برای ایران و همچنین برای مناطق فعال تکتونیکی آن (البرز، زاگرس و شرق و ناحیه جنوب مرکزی ایران) ارائه شد. شکل 1 محل وقوع و ایستگاه های ثبت کننده این زلزله ها را نشان می دهد. جدول 1 مشخصات زلزله ها به همراه محل وقوع آن در مناطق فوق را نشان می دهد. کانون زلزله و ایستگاه ها در شکل 1 نشان داده شده است.

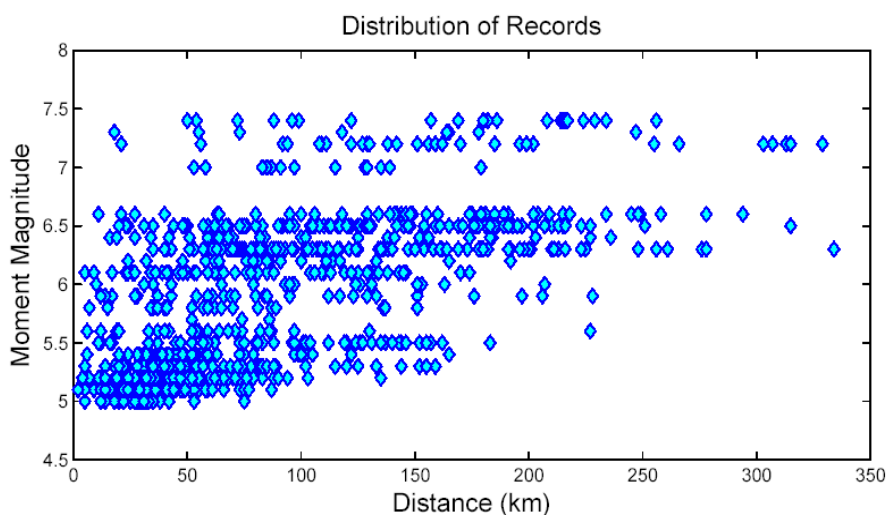


شکل 1- کانون زلزله ها (79 زلزله)، ایستگاه های ثبت کننده (573 ایستگاه) و مناطق تکتونیکی مورد مطالعه (البرز، شرق، زاگرس و جنوب مرکزی ایران).

شکل 2 توزیع بزرگی زلزله ها را بر حسب فاصله کانونی نمایش می دهد تعداد رویداد های مورد استفاده و تعداد رکورد های متناظر به آن برای ایران و زیر مناطقش در جدول 1 آورده شده است. این جدول همچنین حاوی اطلاعاتی درباره شرایط ساختمانی ایستگاه ثبت کننده رکورد نیز می باشد. شرایط ساختمانی ایستگاه های شتاب نگاری به صورت ساختمان خاک و سنگ طبقه بندی شد. این طبقه بندی بر اساس سرعت موج برشی (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن-BHRC) صورت گرفت. با استفاده از متوسط سرعت موج S در 30 متر رویی زمین (Vs-30)، برای ساختمان خاک سرعت موج برشی کمتر یا مساوی 750 متر بر ثانیه و برای ساختمان سنگ سرعت موج برشی بزرگتر از 750 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین روش نسبت طیفی (Nakamura (1989) [9] که از نسبت طیفی بین مولفه های افقی و عمودی داده های حرکات قوی حاصل می شود نیز برای



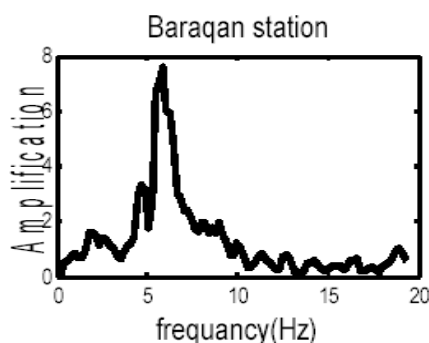
طبقه بندی شرایط ساختمانی 30 ایستگاه شتاب نگاری استفاده شد (شکل 3). بدین صورت که اگر محل پیک نسبت طیفی (H/V) کمتر از 7/5 هر تری بود ساختمانی خاک و اگر بیشتر از 7/5 هر تری بود ساختمانی سنگ فرض گردید.



شکل 2- توزیع زلزله ها بر حسب فاصله کانونی و بزرگی ممان لرزه ای

جدول 1- تعداد زلزله ها و رکورد های هر ساختمانی در مناطق تکتونیکی مختلف

No. of	Iran	Alborz	Zagros	East	Central South
Events	79	20	27	32	20
Records	883	423	198	262	175
Rock sites	213	58	68	87	65
Soil sites	556	274	121	161	100



شکل 3- نسبت طیفی برای ایستگاه براقان

### مدل کاهیدگی حرکات قوی

یک مدل کاهیدگی سه تکه ای منطبق با مدل (Atkinson & Mereu (1992) [10] استفاده شد تا مجموعه داده ها به سه محدوده فاصله ای

مختلف برازش شوند:



$$\begin{aligned} \log A_{ij}(f) &= a(f) + b(f)M_i - c_1(f) \log R_{ij} - k(f)R_{ij} & R \leq R_1 \\ \log A_{ij}(f) &= a(f) + b(f)M_i - c_1(f) \log R_1 - c_2(f) \log(R_{ij}/R_1) - k(f)R_{ij} & R_1 < R \leq R_2 \\ \log A_{ij}(f) &= a(f) + b(f)M_i - c_1(f) \log R_1 - c_2(f) \log(R_2/R_1) \\ &\quad - c_3(f) \log(R_{ij}/R_2) - k(f)R_{ij} & R > R_2 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $A_{ij}$  دامنه طیفی مشاهده شده مربوط به زلزله  $i$  ام در ایستگاه  $j$  ام می باشد. در این رابطه  $M$  بزرگی ممانی،  $R$  فاصله کانونی،  $c_1, c_2, c_3$  ضریب پخش هندسی و  $k$  کاهیدگی غیر الاستیک است. در این مدل، فواصل کمتر از  $R_1$  متناظر با کاهیدگی امواج مستقیم و فاصله بین  $R_1$  و  $R_2$  متناظر با رسیدن امواج انعکاسی از لایه های مختلف پوسته و مرز موهو و بر هم نهی آنها با امواج مستقیم می باشد.

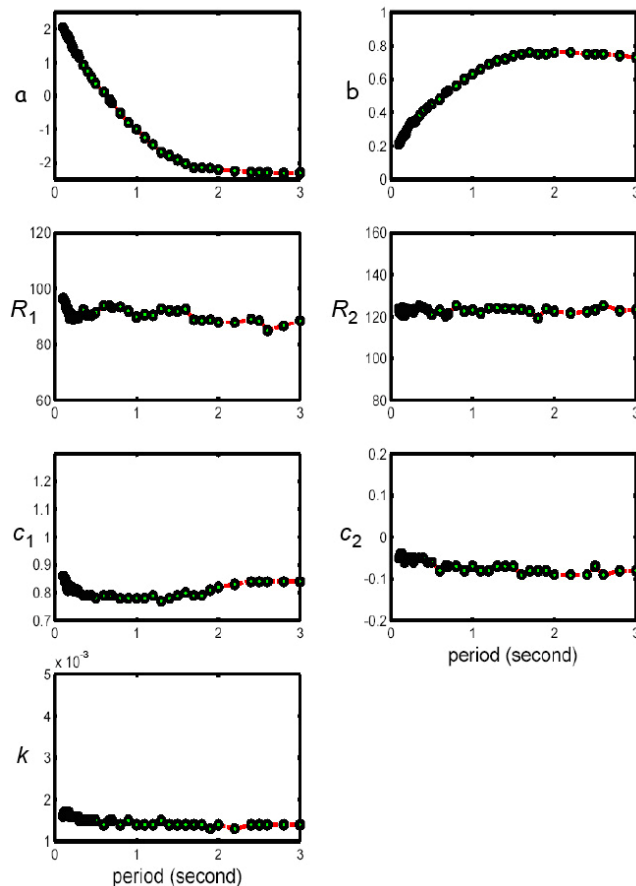
به علت محدودیت مربوط به توزیع داده ها برای فواصل بالاتر از  $R_2$  (شکل 2)، ضریب پخش هندسی 0/5 در نظر گرفته شد. برای تعیین دیگر ضرایب کاهیدگی ( $a, b, R_1, R_2, c_1, c_2, k$ ) از روش مونت کارلو همانطور که توسط ایزانلو (1384) [11] برای شرق ایران بکار برده شد، استفاده کردیم. در این روش با تولید اعداد رندوم در محدوده تعریف شده برای هر یک از ضرایب، همه ترکیبات احتمالی پارامتر های کاهیدگی بررسی و در نهایت ترکیبی که کمترین استاندارد خطا را داشته باشد، معرفی می شود.

نتایج نشان می دهند که ضرایب  $k, c_1, c_2, R_1, R_2$  وابستگی خاصی به پریود نداشته در حالی که ضریب ثابت کاهیدگی ( $a$ ) و ضریب بزرگی ( $b$ ) وابسته به پریود می باشند (شکل 4). ایزانلو (1384) [11] نیز وابستگی فرکانسی مشابه ای را برای ضرایب کاهیدگی برای شرق ایران بدست آورده است. فرم کلی ضرایب  $a, b$  به صورت زیر می باشد:

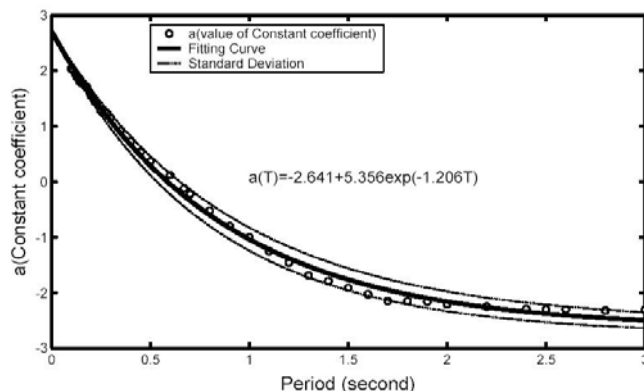
$$a_1 + a_2 \exp(-a_3 T) \quad (2)$$

$$a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 \quad (3)$$

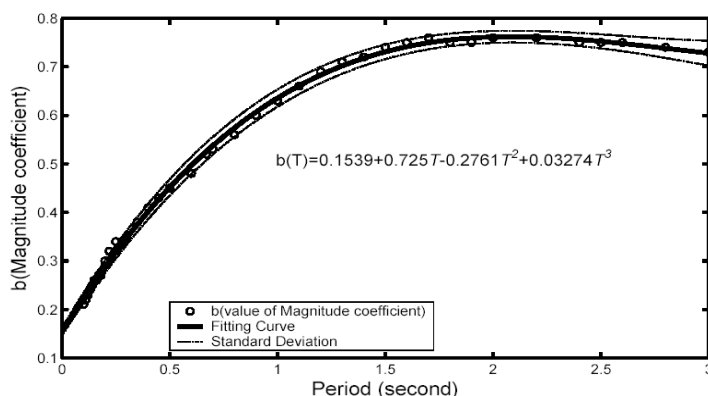
$$b_1 + b_2 T + b_3 T^2 + b_4 T^3 \quad (4)$$



شکل 4- وابستگی ضرایب موجود در رابطه کاهیدگی به پریود، برای ایران بدون در نظر گرفتن شرایط ساختمانی.



شکل 5 - تغییرات ضریب  $a$  در رابطه کاهیدگی بر حسب پریود و تابع برازش شده برای ایران بدون در نظر گرفتن شرایط ساختگاه.



شکل 6 - تغییرات ضریب  $b$  در رابطه کاهیدگی بر حسب پریود و تابع برازش شده برای ایران بدون در نظر گرفتن شرایط

نتایج حاصله برای ضرایب کاهیدگی به همراه بازه اولیه در نظر گرفته شده و نوع تابع برازش شده برای ضرایب کاهیدگی  $a$  و  $b$  در جدول 2 تا 4 آورده شده است. در جدول 5 نتایج میانگیری شده ضرایبی که وابستگی چندانی به پریود نداشته اند آورده شده است

جدول 2- بازه اولیه در نظر گرفته شده و نتایج حاصله از برازش تابع نمایی (رابطه 2) برای ضریب  $a$  در ایران و زیر مناطق ایران.

Region	Site	$-2.5 < a < +2.5$					
		$a_1$		$a_2$		$a_3$	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Iran	All	-2.641	0.110	5.356	0.101	1.206	0.080
	Soil	-2.807	0.194	5.541	0.164	1.015	0.101
Alborz	All	-2.638	0.176	5.799	0.166	1.253	0.127
Zagros	All	-2.432	0.124	5.922	0.174	1.760	0.159
	Soil	-2.452	0.158	5.887	0.193	1.592	0.171
East	All	-3.259	0.326	5.097	0.285	0.627	0.082
	Soil	-4.117	0.814	5.851	0.758	0.432	0.101
Central South	All	-2.867	0.252	4.878	0.211	0.845	0.109
	Soil	-3.954	0.830	5.794	0.765	0.468	0.117



جدول 3- بازه اولیه در نظر گرفته شده و نتایج حاصله از برازش تابع خطی (رابطه 3) برای ضریب a در ایران و زیر مناطق ایران.

Region	Site	$-2.5 < a < +2.5$							
		$a_1$		$a_2$		$a_3$		$a_4$	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Iran	Rock	2.350	0.056	-6.031	0.219	2.615	0.188	-0.3773	0.0429
Alborz	Soil	2.924	0.103	-4.566	0.217	0.978	0.079	0	0

جدول 4- بازه اولیه در نظر گرفته شده نتایج حاصله از برازش تابع خطی (رابطه 4) برای ضریب b در ایران و زیر مناطق ایران.

Region	Site	$0.1 < b < 1$							
		$b_1$		$b_2$		$b_3$		$b_4$	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Iran	All	0.1539	0.0076	0.725	0.030	-0.276	0.025	0.0327	0.0058
	Rock	0.1731	0.0097	0.871	0.038	-0.412	0.032	0.0613	0.0074
	Soil	0.1753	0.0095	0.543	0.020	-0.122	0.007	0	0
Alborz	All	0.0864	0.0101	0.839	0.039	-0.319	0.034	0.0362	0.0070
	Soil	0.0962	0.0147	0.646	0.031	-0.150	0.011	0	0
Zagros	All	0.0462	0.0177	1.170	0.070	-0.611	0.059	0.0996	0.0135
	Soil	0.0488	0.0241	1.098	0.095	-0.554	0.081	0.0884	0.0184
East	All	0.2799	0.0096	0.339	0.020	-0.063	0.007	0	0
	Soil	0.3016	0.0123	0.285	0.026	-0.044	0.009	0	0
Central South	All	0.2589	0.0138	0.414	0.029	-0.088	0.011	0	0
	Soil	0.2827	0.0162	0.311	0.034	-0.050	0.012	0	0

جدول 5- بازه اولیه در نظر گرفته شده برای هر یک از ضرایب کاهیدگی  $k$ ،  $c_2$ ،  $c_1$ ،  $R_2$ ،  $R_1$ ، به همراه نتایج حاصل شده برای ایران و زیر مناطق ایران

Region	Site	$60 < R_1 < 120$		$80 < R_2 < 160$		$0.7 < c_1 < 1.3$		$-0.2 < c_2 < 0.2$		$0.001 < k < 0.005$	
		$R_1$		$R_2$		$c_1$		$c_2$		$k$	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Iran	All	91.1	2.6	122.8	1.3	0.810	0.025	-0.0653	0.0161	0.0015	0.00012
	Rock	90.8	2.1	122.6	1.4	0.790	0.021	-0.0565	0.0127	0.0015	0.00007
	Soil	91.4	2.8	122.9	1.2	0.834	0.022	-0.0727	0.0193	0.0015	0.00014
Alborz	All	94.2	3.7	130.2	1.4	0.835	0.018	-0.0817	0.0168	0.0014	0.00011
	Soil	95.9	4.5	130.5	1.4	0.837	0.017	-0.0845	0.0186	0.0014	0.00012
Zagros	All	76.0	2.5	117.6	2.1	0.802	0.046	-0.0687	0.0105	0.0015	0.00010
	Soil	76.2	2.8	117.5	1.6	0.814	0.046	-0.0714	0.0147	0.0015	0.00011
East	All	77.2	0.8	117.1	1.7	0.825	0.018	-0.0367	0.0104	0.0016	0.00009
	Soil	77.7	1.5	117.4	1.6	0.871	0.011	-0.0463	0.0170	0.0016	0.00013
Central South	All	77.8	1.1	117.2	1.5	0.824	0.023	-0.0432	0.0136	0.0016	0.00010
	Soil	78.0	1.2	117.5	1.6	0.884	0.013	-0.0524	0.0183	0.0016	0.00014

در نهایت روابط کاهیدگی طیف پاسخ به صورت تابعی از پریود (T)، فاصله کانونی (R) و بزرگی ممان (Mw) بدست آمد. این رابطه دارای 8 ضریب بوده که تنها ضریب ثابت (a) و ضریب بزرگی (b) وابسته به پریود می باشند و دیگر ضرایب وابسته به پریود نمی باشند. با استفاده از نتایج ارائه شده در جدول 2 تا 5 رابطه کاهیدگی طیف پاسخ شتاب مطلق برای هر منطقه را می توان بدست آورد. به عنوان مثال رابطه کاهیدگی طیف پاسخ شتاب مطلق شرق ایران بدون در نظر گرفتن شرایط ساختگاه به صورت زیر می باشد:



برای  $R \leq 77.2$

$$\log A(T) = (-3.259 + 5.097e^{-0.627T}) + (0.2799 + 0.339T - 0.0631T^2)M - 0.8246 \log R - 0.0016R \quad (5)$$

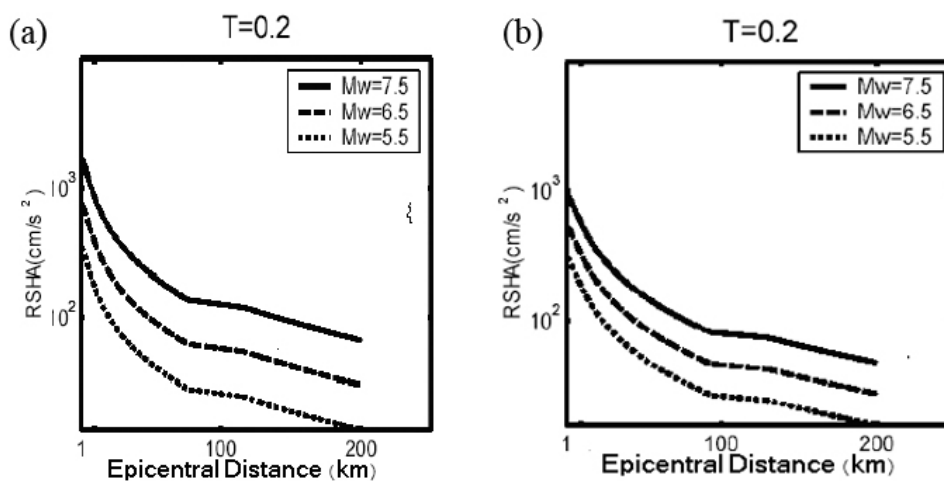
برای  $77.2 < R \leq 117.1$

$$\log A(T) = (-3.259 + 5.097e^{-0.627T}) + (0.2799 + 0.339T - 0.0631T^2)M - 0.8246 \log 77.2 + 0.0367 \log R / 77.2 - 0.0016R \quad (6)$$

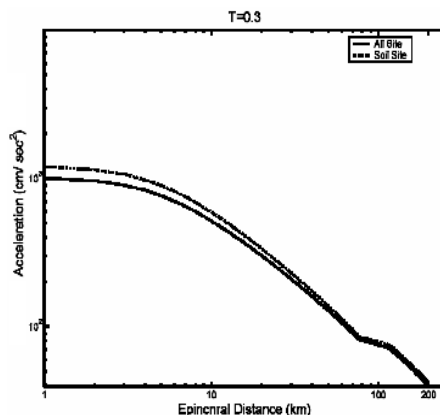
و برای  $R > 117.1$

$$\log A(T) = (-3.259 + 5.097e^{-0.627T}) + (0.2799 + 0.339T - 0.0631T^2)M - 0.8246 \log 77.2 + 0.0367 \log 117.1 / 77.2 - 0.5 \log R / 117.1 - 0.0016R \quad (7)$$

برای نمونه شکل های 7 منحنی های کاهیدگی را برای بزرگی های 5.5 و 6.5 و 7.5 و پرورد 02 ثانیه برای نواحی البرز و شرق بدون در نظر گرفتن شرایط ساختگاه نشان می دهند. همانگونه که از شکل 7 پیدا است، اثرات تقسیم پخش هندسی به سه قسمت، که شامل امواج پیکری، امواج انعکاسی و امواج سطحی است، باعث می شود منحنی های کاهیدگی وابسته به فاصله با آهنگ متفاوتی تغییر کند. این روند را می توان در منحنی های کاهیدگی نواحی دیگر و برای ساختگاه های خاک و سنگ و دیگر پرورد ها نیز مشاهده کرد. همچنین مقایسه ساختگاهی روابط کاهیدگی نیز نشان می دهد که دامنه طیف پاسخ برای ساختگاه خاک مخصوصاً در فواصل نزدیک بیشتر از دیگر ساختگاه ها می باشد (شکل 8).



شکل 7- منحنی کاهیدگی در ناحیه شرق ایران (a) و البرز (b) برای پرورد 02 ثانیه و برای بزرگی های مختلف.



شکل 8- مقایسه منحنی های کاهیدگی ساختگاه خاک (خط نقطه چین) و بدون در نظر گرفتن شرایط ساختگاه (خط مشکی) برای پریود 0.3 ثانیه و برای بزرگی 7 در شرق ایران.

## نتیجه گیری

در این مطالعه رابطه ای ارائه شد که طیف پاسخ شتاب مطلق در میرایی بحرانی 5٪، در محدوده پریودی 0/1 تا 3 ثانیه، برای ایران، سه زیر منطقه اصلی لرزه ای (البرز، زاگرس و شرق ایران) و جنوب مرکزی ایران را با استفاده از مولفه های افقی 883 رکورد مربوط به 79 زلزله از 1987 تا 2007 میلادی و با ممان بزرگی 5 و بالاتر ثبت شده توسط شبکه ملی شتابنگاری ایران، پیش بینی می کند. روابط کاهیدگی به صورت تابعی از پریود (T)، فاصله کانونی (R) و بزرگی ممان (Mw) بدست آمد. رابطه مذکور دارای 8 پارامتر بوده بجز ضریب ثابت (a) که با پریود افزایش می یابد و ضریب بزرگی (Mw) که با پریود کاهش می یابد، باقی ضرایب وابستگی خاصی به پریود نشان نمی دهند. در این رابطه می توان اثرات پخش هندسی را در منحنی های کاهیدگی به صورت سه قسمت مجزای مربوط به امواج مستقیم، امواج انعکاسی از موهو و امواج سطحی مشاهده نمود.

## مراجع

- 1- Ambraseys, N. N., and C.P. Melville (1982). *A History of Persian Earthquakes*, Cambridge University Press, New York, 219 pp.
- 2- Berberian, M. (1983). Continental deformation in the Iranian plateau (contribution to the seismotectonoc of Iran, part IV), *Geol. Surv. Iran* 52, 625 pp.
- 3- Stöcklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review, *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 52, 1229–1258.
- 4- Nowroozi, A. (1976). Seismotectonic provinces of Iran, *Bull. Seism. Soc. Am.* 66, 1249–1276.
- 5- Shoja-Taheri, J., and M. Niazi (1981). Seismicity of the Iranian plateau and bordering regions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, 477–489.
- 6- Berberian, M. (1983). Continental deformation in the Iranian plateau (contribution to the seismotectonoc of Iran, part IV), *Geological Survey of Iran*, 52, 625 pp.
- 7- صادقی ح. و ج. شجاع طاهری (1385). مشخصه های تنش تکتونیکی در فلات ایران با استفاده از تعیین سازوکار کانونی زلزله های ثبت شده، فصلنامه علوم زمین، 59، 102-119.
- 8- Engdahl, E. R., E. A. Bergman, and S. C. Myers (2008), Seismotectonics of the Iran Region, *American Geophysical Union, Fall Meeting*, abstract #T23D-06.
- 9- Nowroozi, A. (1976). Seismotectonic provinces of Iran, *Bull. Seism. Soc. Am.* 66, 1249–1276.
- 10- Atkinson, G. M., and R. F. Mereu (1992). The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada, *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2014–2031.
- 11- ایزانلو ع. (1384). "تعیین روابط کاهیدگی برای شرق ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.