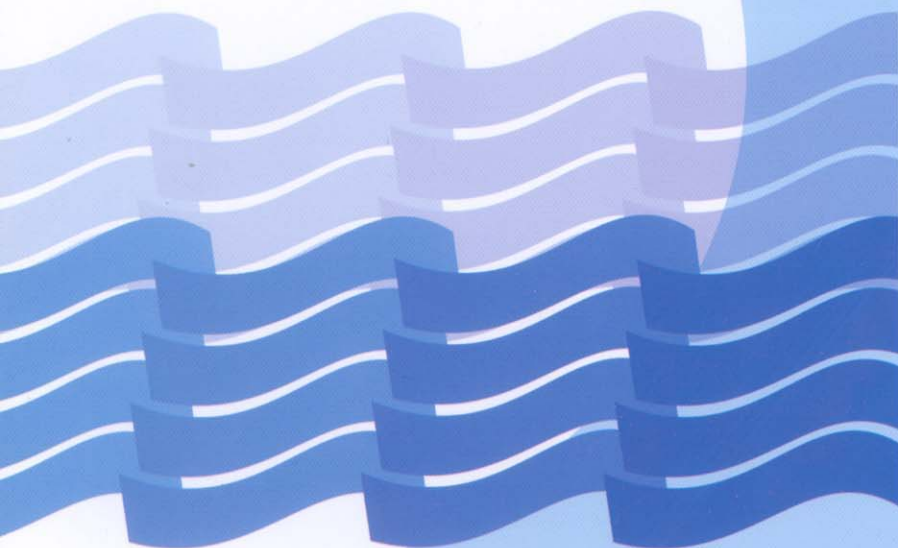




تاریخچه مدل‌های کاهیدگی و معیارهایی برای انتخاب مدل مناسب



تاریخچه مدل‌های کاهیدگی و معیارهایی برای
انتخاب مدل مناسب

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور وزارت نیرو در جهت نیل به این هدف با مشخص نمودن رشته‌های اصلی مهندسی آب اقدام به تشکیل مجامع علمی - تخصصی با عنوان کمیته‌ها و زیرکمیته‌های فنی نموده که وظیفه تهیه این استانداردها را به عهده دارند.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین می‌گردد:

- استفاده از تخصصها و تجارب کارشناسان و صاحب نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره کاریها و اتلاف منابع مالی و غیر مالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحب نظرانی که فعالیت آنها با این رشته از مهندسی آب مرتبط می‌باشد موجب امتنان کمیته فنی ۱۳-۱ (لرزه خیزی و مهندسی زمینلرزه) خواهد بود.

اعضای کمیته

کارشناسان کمیته (لرزه‌خیزی و مهندسی زمینلرزه) که در تهیه این نشریه همکاری داشته‌اند عبارتند از :

آقای مهندس مجید بهنام	از شرکت مهندسی مشاور مهاب‌قدس	لیسانس مهندسی معدن
آقای مهندس ابراهیم مالکی	از شرکت مهندسی مشاور مهاب‌قدس	فوق‌لیسانس ژئوفیزیک

سایر کارشناسانی که از کمیته فوق در بررسی این نشریه همکاری داشته‌اند عبارتند از :

آقای مهندس علی‌اکبر اسلامی	از مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی	فوق‌لیسانس ژئوفیزیک
و مهندسی زمینلرزه		
آقای دکتر منوچهر قریشی	از سازمان زمین‌شناسی کشور	دکترای لرزه زمین‌ساخت
آقای مهندس علی‌اکبر معین‌فر	آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی سازه و زلزله
آقای دکتر عباس مهدویان	از شرکت مهندسی مشاور مهاب‌قدس	دکترای زلزله‌شناسی
آقای مهندس احمد نادرزاده	از طرح مطالعات زلزله تهران بزرگ	فوق‌لیسانس مهندسی سازه و زلزله
خانم مهندس مهیار نوربخش	از طرح تهیه استانداردهای مهندسی	فوق‌لیسانس ژئوتکنیک
آب‌کشور		

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه
۳	۲- تاریخچه مدل کاهیدگی
۱۴	۳- تغییرات بنیادی در مدل کاهیدگی
۲۳	۴- مدل کاهیدگی بهنگام شده جهان
۲۳	۴-۱ مدل کاهیدگی آبراهامسون و سیلوا، (۱۹۹۷)
۲۵	۴-۲ مدل آمبرسینز، سیمپسون و بومر (۱۹۹۶)
۲۶	۴-۳ بور، جویئر و فومال (۱۹۹۷)
۲۸	۴-۴ مدل کاهیدگی کمپیل، (۱۹۹۷)
۳۱	۴-۵ مدل کاهیدگی صدیق، چنگ، اگان، مکدیس و یانگز (۱۹۹۷)
۳۲	۴-۶ مدل اسپودیک و همکاران، (۱۹۹۷)
۳۳	۴-۷ مدل کاهیدگی یانگز و همکاران (۱۹۹۷)
۳۴	۴-۸ مدل کاهیدگی تورو، آبراهامسون و اشنایدر (۱۹۹۷)
۳۵	۴-۹ مدل آتکینسون و بور (۱۹۹۷)
۳۸	۵- کاربرد مدل‌های کاهیدگی و دسته‌بندی آنها
۳۸	۵-۱ برآورد دقیق پارامترهای جنبش نیرومند زمین
۳۸	۵-۲ ارائه دسته‌بندی‌هایی برای انتخاب مناسب‌تر مدل‌های کاهیدگی مختلف
۳۸	۵-۲-۱ پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌های کاهیدگی
۴۲	۵-۲-۲ عدم یقین در محاسبات
۴۲	۵-۲-۳ روش برازش داده‌های جنبش نیرومند زمین

«مدل کاهیدگی پارامترهای جنبش نیرومند زمین»

۱- مقدمه :

پارامترهای انتشار و تأثیر پراکنش^۱ موج، آهنگ کاهش هندسی^۲ و آهنگ کاهش میرایی غیر الاستیک زمین را در مسیر موج از چشمه لرزه‌ای تا ساختگاه موردنظر مشخص می‌کند. متغیر مستقل اصلی که مشخص‌کننده این پارامترها می‌باشد، فاصله است. از آنجا که گسیختگی همراه با زمینلرزه می‌تواند دهها کیلومتر گسترش یابد، لذا استفاده از چشمه لرزه‌زا در تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین تأثیر بسیار زیادی دارد. پژوهشگران این فواصل را بصورت‌های مختلف نشان داده شده در شکل ۱- در نظر گرفته‌اند که برای فواصل بسیار نزدیک (کمتر از ده کیلومتر) می‌تواند در تخمین بیشینه پارامترهای جنبش نیرومند زمین باعث بروز تفاوت‌های چشمگیری شود. عوامل دیگری نظیر سازوکار چشمه لرزه‌زا، زمین‌شناسی ساختگاه و توپوگرافی ساختگاه نیز می‌تواند در تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین تأثیر داشته باشد. اولین مدل‌های کاهیدگی پارامترهای جنبش نیرومند زمین دارای شکل کلی زیر بودند:

$$Y = C_1 e^{C_2 M} / (R + C_3)^{C_4}$$

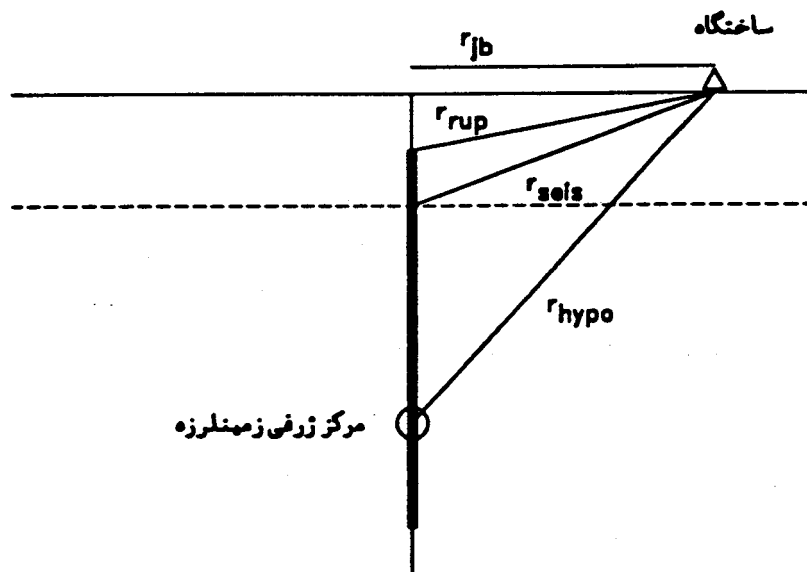
در مدل فوق C_1 ، C_2 ، C_3 و C_4 ضرایب، M بزرگای زمینلرزه و R فاصله کانونی بر حسب کیلومتر می‌باشد. در این مدل ساده تنها به بزرگای زمینلرزه و فاصله چشمه نقطه‌ای لرزه‌زا تا ساختگاه موردنظر توجه شده است. در صورتی که در مدل‌های اخیر شکل کلی مدل کاهیدگی بصورت زیر می‌باشد:

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M + C_3 \ln\{R^2 + [C_4 \exp(C_5 M)]^{1/2}\} + [C_6 + C_7 \ln(R) + C_8 M] F + [C_9 - C_{10} \ln(R)] S_{SR} + [C_{11} + C_{12} \ln(R)] S_{HR} + \sigma$$

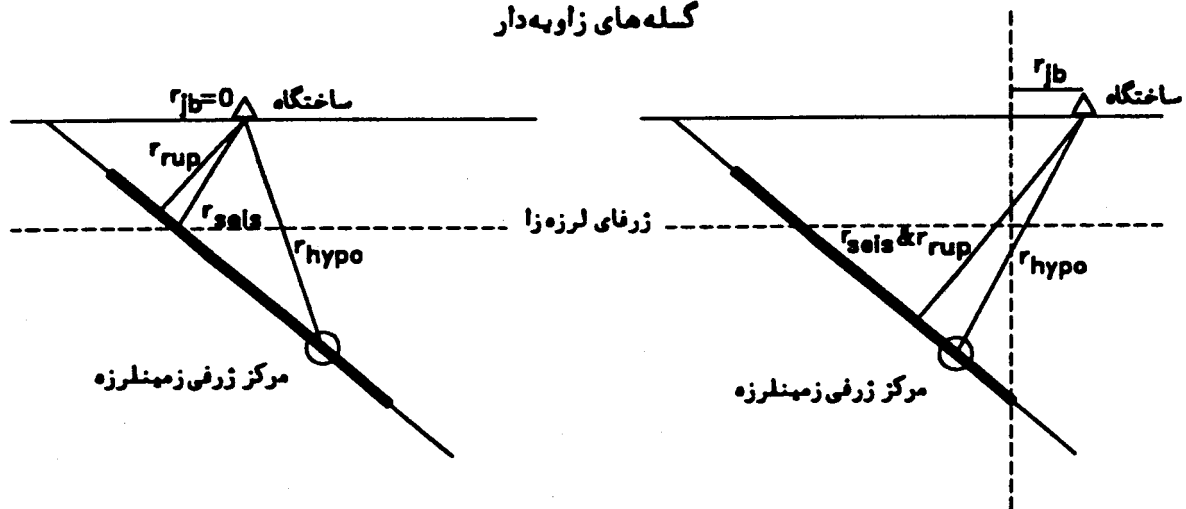
که در مدل فوق C_1 و C_{12} ضرایب ثابت، M بزرگای زمینلرزه و R فاصله چشمه لرزه‌زا تا ساختگاه بر حسب کیلومتر، F ضریبی برای ساز و کار چشمه لرزه‌زا، S_{SR} ضریبی برای سنگهای نرم ساختگاه، S_{HR} ضریبی برای سنگهای سخت ساختگاه و σ خطای محاسبات مدل برای سطح ۸۴ درصد می‌باشد.

همانطوری که ملاحظه می‌شود در مدل‌های اخیر کوشش شده است که رابطه‌ای بین ساز و کار زمینلرزه، زمین‌شناسی ساختگاه و میزان خطای محاسبات مدل با پارامترهای جنبش نیرومند زمین ارائه گردد.

گسله های قائم



گسله های زاویه دار



- r_{jb} : نزدیکترین فاصله افقی از تصویر قائم گسیختگی
 r_{rup} : نزدیکترین فاصله از سطح گسیختگی
 r_{seis} : نزدیکترین فاصله از سطح گسیختگی لرزه‌زا
 r_{hypo} : فاصله از کانون زمینلرزه

شکل ۱- مدل لرزه زمینساختی چشمه لرزه‌ای خطی در نظر گرفته شده برای مدل‌های مختلف کاهیدگی
 پارامترهای جنبش نیرومند زمین (برگرفته از آبراهامسون و شدلاک ۱۹۹۷)

۲- تاریخچه مدل کاهیدگی :

تا پیش از پژوهش نیومن^۱ در سال ۱۹۵۴، اطلاعاتی در دست نمی‌باشد. نامبرده مدل کاهیدگی بیشینه شتاب جنبش نیرومند زمین را بر پایه زمینلرزه‌های آمریکا (کالیفرنیا) و شتابنگاشت‌های آنها بصورت زیر ارائه نمود:

$$\log a = 4/79 - 1/92 \log D$$

این رابطه مستقل از بزرگای زمینلرزه می‌باشد و برای زمینلرزه‌های ویرانگر در نظر گرفته شده است و D فاصله دستگاه شتابنگار تا مرکز سطحی زمینلرزه‌ها می‌باشد.

پس از این مدل کاهیدگی از سال ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ مدل‌های کاهیدگی جنبش نیرومند زمین توسط استوا و روزنبلوت^۲ برای زمینلرزه‌های آمریکا، بلوم^۳ برای زمینلرزه‌های کالیفرنیا، آمریکا، میلن و داوینپورت^۴ برای زمینلرزه‌های کانادا و آمریکا و استوا و هندرون^۵ برای زمینلرزه‌های آمریکا تهیه گردید. مدل‌های ارائه شده خیلی نزدیک به یکدیگر بوده و فاصله کانونی و بزرگای زمینلرزه‌ها تنها پارامترهای بکار گرفته شده در این مدل‌ها بودند. ویژگی‌های این مدل‌ها در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است.

در سال‌های بین ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ و به ویژه پس از رویداد زمینلرزه سن فرناندوی کالیفرنیا مدل‌های کاهیدگی بیشتری با ثبت نگاشت‌های زیادی از شتاب این زمینلرزه ارائه گردید. از آنجمله می‌توان به پژوهش‌های کلود و پرز^۶، داوینپورت^۷، دنووان^۸، استوا و ویلاورد^۹، مک‌گایر^{۱۰}، ارفال و لاهود^{۱۱}، کمپیل و دوک^{۱۲}، سید و همکاران^{۱۳}، تریفوناک^{۱۴}، گورپینا و ساوی^{۱۵}، مک‌گایر^{۱۶}، دونوان و بورنستین^{۱۷}، مک‌گایر^{۱۸}، کرنل و همکاران^{۱۹}، اسپینوسا^{۲۰} اشاره نمود. در تمامی مدل‌های ارائه شده بیشتر از داده‌های زمینلرزه‌ای و شتابنگاری باختر آمریکا بویژه کالیفرنیا استفاده شده است. در مدل‌های ارائه شده از بزرگای زمینلرزه و فاصله کانونی زمینلرزه تا ایستگاه‌های ثبت‌کننده شتاب (یا دیگر پارامترها) استفاده شده است. بزرگای زمینلرزه‌های بکار گرفته شده بین $M_s 4/0$ تا $M_s 7/7$ می‌باشد و فاصله دستگاه‌های شتابنگار از کانون زمینلرزه بین ۵ تا حداکثر ۳۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های این مدل‌ها در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است.

1- Newman

2- Esteva & Rosenblueth - 1964

3- Blume - 1965

4- Milne & Davenport - 1969

5- Esteva & Hendron - 1969

6- Cloud & Perez - 1971

7- Davenport - 1972

8- Donovan - 1973_a - 1973_b - 1973_c - 1973_d

9- Esteva & Villavered - 1974

10- Mc Guire - 1974

11- Orphal & Lahoud - 1974

12- Campbell & Duke - 1974_a - 1974_b

13- Seed et al - 1976_b

14- Garpina & Sovy - 1977

15- Donovan & Bornstein - 1978

16- Cornell et al - 1979

17- Espinosa - 1979

جدول ۱- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی شتاب جنبش زمین از سال ۱۹۵۴ تا سال ۱۹۸۰

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
New Man	۱۹۵۴	کلیه زمینها	کلیه ساز و کارها	مستقل از بزرگا	از مرکز سطحی "D"	$\log a = 4/79 - 1/92 \log D$	برای زمینلرزه‌های بزرگتر از $M \geq 5$ (معمولاً برای بزرگای طراحی)
Gutenberg & Richter	۱۹۵۶	زمینهای سنگی	کلیه ساز و کارها	m_b یا M_s	$D \geq 150$	$\log a_0 = -2/1 + 0/81 M - 0/27 M^2$ $a = a_0 F_a$ (شکل ۱)	ژرفای کانونی ۱۵ کیلومتر برای زمینلرزه‌های طراحی در نظر گرفته شده است.
Kanay	۱۹۵۷	کلیه زمینها	کلیه ساز و کارها	M	R	$a = \frac{0/0051}{T_G} 10^{0/61 M - \log R + Q}$ $P = 1/66 + 3/60 / R$ $Q = 0/167 - 1/83 / R$	برای زمینلرزه‌های کالیفرنیا و ژاپن پریود اصلی ساختگاه $T_G =$
Benioff	۱۹۶۲	زمینهای سنگی	کلیه ساز و کارها	M	$D \geq 19/2$	$a = \left(\frac{a_0 1/25}{1 + D/Y_0} \right)^n$, $\log a_0 = -2/1 + 0/81 M - 0/27 M^2$ $n = (1 + (1/2/5 T_p))$ T_p پریود غالب شتاب بر روی پی سنگ می‌باشد.	شتاب بر روی سنگ کف $Y_0 = 76/8 \text{ km}$

ادامه جدول ۱- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی شتاب جنبش زمین از سال ۱۹۵۴ تا سال ۱۹۸۰

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
Esteva & Rosenblueth	۱۹۶۴	زمینهای سخت	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	$R \geq 15 \text{ km}$	$a = 2000 e^{0.8M} R^{-2}$	برای زمینهای سنگی $a = 110 e^{0.8M} R^{-1/6}$
Wiggins	۱۹۶۴	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	فاصله کانونی R (بر حسب مایل)	$\frac{a}{v} = (82/6 - 7/59 M - 0/36 R)$ $V = \frac{1/14 \times 10^{-3} \times E^{1/3}}{(\rho_s \times V_s)^{1/2} R^{1/37}}$ $\log E = 9/4 + 2/14 M - 0/054 M^2$	ρ_s دانسیته خاک V_s سرعت برشی خاک فوت ثانیه R بر حسب مایل V بر حسب اینچ ثانیه a بر حسب $g \times 10^{-3}$ (گال)
Housner	۱۹۶۵	برای زمینهای آبرفتی سخت	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	فاصله نزدیک به مرکز سطح کیلومتر $D \leq 80$	ارائه نمودار (شکل ۲)	از روی منحنی برای بزرگای M_L و M_V, M_6, M_5
Blume	۱۹۶۵	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$M_6/0 - 8/5$	R	$a = a_{og} (1 + \frac{D^2}{h^2})^{-1}$	فاکتور ساختگاه در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.
Kanai (۱۹۶۶)	۱۹۶۶	زمین سنگی	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	R	$\log a = 0/61 M - (1/66 + \frac{3/6}{R}) \times \log R$ $+ (0/167 - \frac{1/83}{R} + 0/698 - 0/5 \log Tp)$	T_p پریود غالب شتاب بر روی پی سنگ می‌باشد.
Krishna & Chandra	۱۹۶۹	زمین سخت	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	D	$a = \frac{4591 \times 10^{M-5}}{h + \sqrt{2} \times 10^{M-5}} e^{-0/26 (D/h)^{2/3}}$	h ژرفای کانونی بر حسب کیلومتر D فاصله از مرکز سطحی زمین لرزه

ادامه جدول ۱- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی شتاب جنبش زمین از سال ۱۹۵۴ تا سال ۱۹۸۰

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
Milne & Davenport	۱۹۶۹	کلیه زمینلرزه‌ها	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	D	$a = \frac{0.0069 e^{1/64 M}}{1/1 e^{1/1 M} + D}^2$	برای زمینلرزه‌های خیلی نزدیک $e^{0.54 M}$
Tamura, Migukoshi & ono	۱۹۶۹	کلیه زمینلرزه‌ها	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	D	$\log a = -3/17 + M - 1/73 \log D$	
Cloud & Perez	۱۹۶۹	کلیه زمینلرزه‌ها	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	D	$\log a = 6/0 - 2 \log(0.625 D + 43)$ $\log a = 6/5 - 2 \log(0.625 D + 80)$	برای حد پایین برای حد بالا
Ballard	۱۹۶۹	زمین سنگی	کلیه سازوکارها	m_b یا M_s	R	$a = 1320 e^{0.58 M} (R + 25)^{-1/52}$	
Esteva	۱۹۷۰	زمین سخت	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	R	$a = 1/254 e^{0.8 M} (R + 25)^{-2}$	
Mickey	۱۹۷۱	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	R	$\log a = 1/325 + 0.466 M - 1/41 \log R$	برای $R \leq 15$ بکار نمی‌رود.
Denham & Small	۱۹۷۱	زمینهای غیرمتراکم	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	R	$\log a = 2/80 + 0.20 M - 1/10 \log R$	برای استرالیا کاربرد دارد.
Schnabel & Seed	۱۹۷۱	زمین سنگی	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	از گسل مسبب	شکل ۵	ارائه منحنی برای بزرگای $M5/2$, $M8/5$, $M6/6$, $M7/6$, $M5/6$

ادامه جدول ۱- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی شتاب جنبش زمین از سال ۱۹۵۴ تا سال ۱۹۸۰

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
Davenport	۱۹۷۲	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	$R \geq 15$	$\log a = 2.74 e^{0.8M} - R^{-1/64}$	برای زمینلرزه با فاصله کانونی کیلومتر $R \geq 15$ کاربرد دارد.
Donovan	۱۹۷۳	سنگی	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	R	$a = 10.80 e^{0.5M} (R+25)^{-1/32}$ $a = 10.80 e^{0.5M} (R+25)^{-1/65}$	نامبرده دو مدل ارائه نموده است که مدل پایینی اصلاح شده مدل بالایی است.
Esteva & Villaverde	۱۹۷۳	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	R	$a = 5600 e^{0.8M} (R+40)^{-2}$	
Orphal & Lahoud	۱۹۷۴	سنگی و آبرفتی	کلیه سازوکارها	M_s یا m_b	$R \geq 15$	$a = 64/75 \times 10^{-0.4M} R^{-1/39}$	برای زمینلرزه؛ کیلومتر $R \geq 15$ کاربرد دارد.
Campbell & Duke	۱۹۷۴ (a)	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$4/5 \geq M_s < 8/5$	$15 < R < 160$	$a = 3/31 \times 10^{-3} e^{M(0.33M-1/47)} \times R^{-3} \times S$	ضریب S برای ساختگاه بر روی سنگ کف ۱/۸۰ است. ضریب S برای ساختگاه بر روی سنگ رسوبی ۳/۶۳ است. ضریب S برای ساختگاه بر روی آبرفت با ژرفای کمتر از ۶۰ متر ۳/۷۴ است. ضریب S برای ساختگاه بر روی آبرفت با ژرفای بیش از ۶۰ متر ۵/۱۲ است.

ادامه جدول ۱- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی شتاب جنبش زمین از سال ۱۹۵۴ تا سال ۱۹۸۰

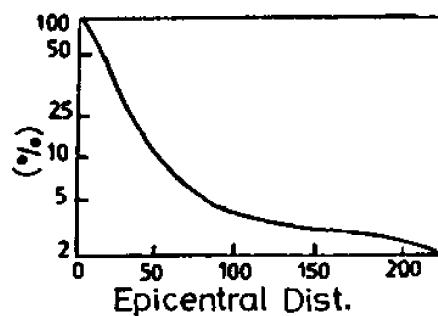
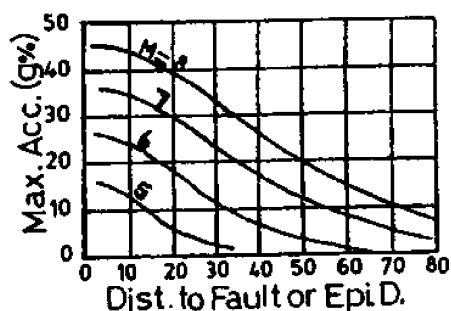
نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
Campbell & Duke	۱۹۷۴ (b)	زمینهای مختلف	کلیه ساز و کارها	$4/5 < M < 8/5$	$15 \leq R \leq 16$	$a = 3/13 \times 10^{-4} e^{M(0/33M - 1/47)} \times R^{3/79} \times S$	ضریب S برای ساختگاه بر روی سنگ کف $S = 0/57 R^{0/46}$ است. ضریب S برای ساختگاه سنگهای رسوبی $S = 1/02 R^{0/51}$ است. ضریب S برای ساختگاه آبرفتی با ژرفای کمتر از ۶۰ متر $S = 0/37 R^{0/81}$ است. ضریب S برای ساختگاه آبرفتی با ژرفای بیش از ۶۰ متر $S = 0/65 R^{0/74}$ است.
Bath	۱۹۷۵	سنگی و آبرفتی	کلیه ساز و کارها	M	R	$a = 1/03 h^{0/6} \times 10^{-0/5M} \times R^{-1/5}$	h ژرفای کانونی (کیلومتر)
Trifunac & Brady	۱۹۷۶	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	M	R	$\log a = M + \log A_0(R) - \log a_0$	برای زمینهای مختلف بر طبق جدول شماره دو
Seed et al	۱۹۷۶	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	M	R	$A = aR^{-c}$	شتاب از روی منحنی نمایش برآورد می‌شود.

ادامه جدول ۱- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی شتاب جنبش زمین از سال ۱۹۵۴ تا سال ۱۹۸۰

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
Singh & Paul	۱۹۷۷	سنگی و آبرفتی	کلیه سازوکارها	M	R	$a = ۱۳/۲۴ \times ۱۰^{-۰/۵} M \times R^{-۱/۴}$	در این مدل برای ساختگاه سنگی توان برابر $۱/۴$ - و برای ساختگاه آبرفتی $۱/۳۷$ -
Mc Guire	۱۹۷۷	سنگی و آبرفتی	کلیه سازوکارها	M	R	$a = ۴۷۲ \times ۱۰^{-۰/۲۷۸} M (R+ ۲۵)^{-۱/۳۰۱}$	برای فاصله $R \leq ۱۵$ m قابل استفاده نمی‌باشد.
Donovan & Bornstein	۱۹۷۸	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$۴/۵ \leq M \leq ۷/۷$	$۱۰ \leq R \leq ۲۰۰$	$a = ۲/۱۹۸ \times ۱۰^{-۲/۱} R \times e^{(۰/۰۴۶ + ۰/۱۹۳ \ln R) M}$ $(R+ ۲۵)^{-۲/۵۱۵ + ۰/۲۱۱ \ln R}$	محاسبه خطای محاسباتی بصورت منحنی ارائه شده است. ($\sigma \ln a$)
Mc Guire	۱۹۷۸	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$۴/۵ \leq M \leq ۷/۷$	$۱۰ \leq R \leq ۲۰۰$	$a = ۰/۰۳۰۶ e^{۰/۸۹ M} \times R^{-۱/۱۷} \times e^{-۰/۲۰۵}$	$\sigma \ln a = ۰/۶۲$
Cornell et al	۱۹۷۹	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$۳/۰ \leq M \leq ۷/۷$	$۲۰ \leq R \leq ۲۰۰$	$a = ۰/۸۶۳ e^{۰/۸۶ M} (R+ ۲۵)^{-۱/۸}$	این مدل برای غرب آمریکا تهیه شده است $\sigma \ln a = ۰/۵۷$
Espinosa	۱۹۷۹	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$۴/۰ \leq M \leq ۹/۲$	$۵ \leq R \leq ۳۰۰$	$V = ۶/۱۷ \times ۱۰^{-۴} e^{۲/۳ M} \times R^{-۱/۳۵}$	(این مدل برای سرعت ارائه شده است)
Boore et al	۱۹۸۰	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$۵/۰ \leq M_L \leq ۵/۷$ $۶/۰ \leq M_L \leq ۶/۴$ $۷/۱ \leq M_L \leq ۷/۶$	$۵ \leq R \leq ۵۰$ $۱۵ \leq R \leq ۵۵$ $۴۰ \leq R \leq ۱۵۰$	$a = ۱/۵ BR^{-۰/۹}$ $a = ۱۰/۰ R^{-۱/۲}$ $a = ۳۹۸ R^{-۲/۰}$	محاسبه خطای محاسباتی بصورت منحنی ارائه شده است ($\sigma \ln a$)

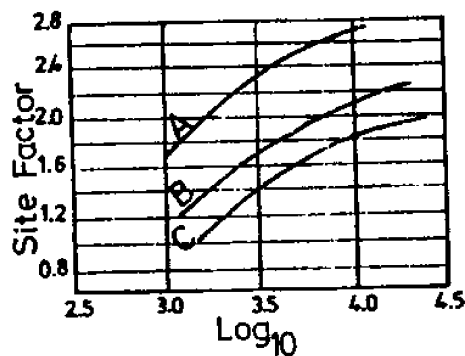
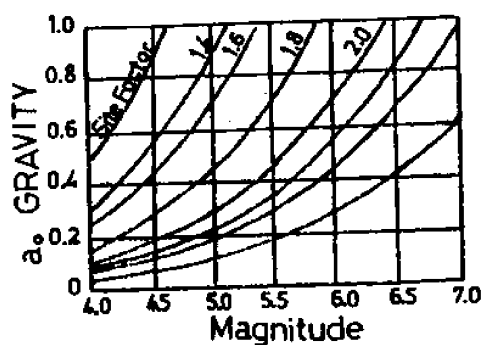
از سال ۱۹۸۰ به بعد به سازوکار زمینلرزه‌ها و زمین‌شناسی ایستگاههای شتابنگار توجه بیشتر شده است، بطوریکه عملاً به عنوان ضریبی در مدل‌های کاهیدگی جنبش نیرومند زمین داخل شده است.

یک رهنمود برای مدل‌های کاهیدگی شتاب، سرعت، جابه‌جایی بر حسب فاصله و بزرگای



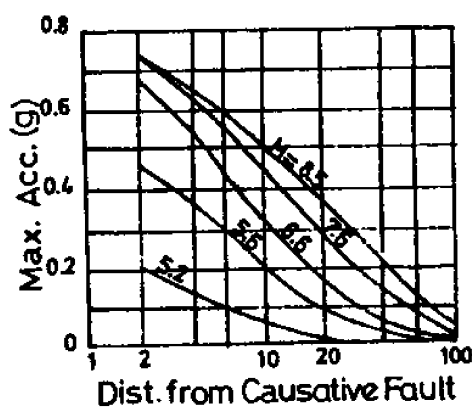
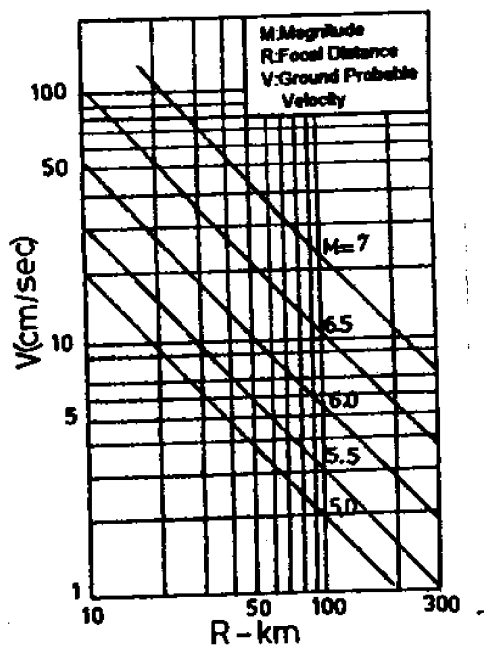
شکل ۲- بیشینه شتاب جنبش نیرومند زمین
بر حسب فاصله

شکل ۱- مدل کاهیدگی شتاب بر حسب فاصله کنونی



شکل ۴- تعیین شتاب در مرکز سطحی زمینلرزه

شکل ۳- تعیین شاخص ساختگاه



شکل ۵- متوسط مقدار بیشینه شتاب جنبش
نیرومند زمین بر روی سنگ

شکل ۶- احتمال بیشینه سرعت جنبش نیرومند زمین

شکل‌های ۱ تا ۶ مربوط به جدول ۱

جدول پیوست شماره ۲ جدول شماره ۱
 $\log_{10} A_e(R)$ نسبت به فاصله R تا مرکز سطحی زمینلرزه

$-\log_{10} A_e(R)$	(R)km	$-\log_{10} A_e(R)$	R(km)	$-\log_{10} A_e(R)$	R (km)
۴/۳۳۶	۳۷۰	۳/۲۳۰	۱۴۰	۱/۴۰۰	۰
۴/۳۷۶	۳۸۰	۳/۲۷۹	۱۵۰	۱/۵۰۰	۵
۴/۴۱۴	۳۹۰	۳/۳۲۸	۱۶۰	۱/۶۰۵	۱۰
۴/۴۵۱	۴۰۰	۳/۳۷۸	۱۷۰	۱/۷۱۶	۱۵
۴/۴۸۵	۴۱۰	۳/۴۲۹	۱۸۰	۱/۸۳۳	۲۰
۴/۵۱۸	۴۲۰	۳/۴۸۰	۱۹۰	۱/۹۵۵	۲۵
۴/۵۴۹	۴۳۰	۳/۵۳۰	۲۰۰	۲/۰۷۸	۳۰
۴/۵۷۹	۴۴۰	۳/۵۸۱	۲۱۰	۲/۱۹۹	۳۵
۴/۶۰۷	۴۵۰	۳/۶۳۱	۲۲۰	۲/۳۱۴	۴۰
۴/۶۳۴	۴۶۰	۳/۶۸۰	۲۳۰	۲/۴۲۱	۴۵
۴/۶۶۰	۴۷۰	۳/۷۲۹	۲۴۰	۲/۵۱۷	۵۰
۴/۶۸۵	۴۸۰	۳/۷۷۹	۲۵۰	۲/۶۰۳	۵۵
۴/۷۰۹	۴۹۰	۳/۸۲۷	۲۶۰	۲/۶۷۹	۶۰
۴/۷۳۲	۵۰۰	۳/۸۷۷	۲۷۰	۲/۷۴۶	۶۵
۴/۷۵۵	۵۱۰	۳/۹۲۰	۲۸۰	۲/۸۰۵	۷۰
۴/۷۷۶	۵۲۰	۳/۹۷۵	۲۹۰	۲/۹۲۰	۸۰
۴/۷۹۷	۵۳۰	۴/۰۲۴	۳۰۰	۲/۹۵۸	۸۵
۴/۸۱۷	۵۴۰	۴/۰۷۲	۳۱۰	۲/۹۸۹	۹۰
۴/۸۳۵	۵۵۰	۴/۱۱۹	۳۲۰	۳/۰۲۰	۹۵
۴/۸۵۳	۵۶۰	۴/۱۶۴	۳۳۰	۳/۰۴۴	۱۰۰
۴/۸۶۹	۵۷۰	۴/۲۰۹	۳۴۰	۳/۰۸۹	۱۱۰
۴/۸۸۵	۵۸۰	۴/۲۵۳	۳۵۰	۳/۱۳۵	۱۲۰
۴/۹۰۰	۵۹۰	۴/۲۹۵	۳۶۰	۳/۱۸۲	۱۳۰

جدول پیوست شماره ۳:

بزرگا		۴/۰-۴/۹		۵/۰-۵/۹		۶/۰-۶/۹		۷/۰-۷/۹		
دسته بندی ساختگاه		۰	۱	۲	۰	۱	۲	۰	۱	۲
شتاب	log a ₀	۱/۸۰۰	۱/۳۹۰	-	۱/۸۳۰	۱/۹۴۰	۱/۶۰۰	۲/۶۱۰	۳/۶۱۰	-
	σ	۰/۰۳۶	۰/۵۱۹	-	۰/۴۹۳	۰/۶۵۳	۰/۶۱۲	۰/۶۷۰	۰/۱۰۷	-
	log a ₀	۱/۳۸۰	۱/۰۷۰	-	۱/۵۶۰	۱/۵۴۰	۱/۴۱۰	۱/۹۴۰	۲/۸۷۰	-
	σ	۰/۳۰۹	۰/۳۶۸	-	۰/۵۰۳	۰/۳۱۳	۰/۳۹۰	۰/۶۷۸	۰/۱۶۳	-
سرعت	log v ₀	۲/۶۹۰	۲/۶۷۰	-	۳/۰۰۰	۳/۰۷۰	۳/۰۱۰	۳/۱۰۰	۴/۱۵۰	-
	σ	۰/۱۷۷	۰/۱۰۱	-	۰/۵۱۹	۰/۳۲۷	۰/۵۱۰	۰/۳۳۱	۰/۶۳۰	-
	log v ₀	۲/۳۲۰	۲/۴۱۰	-	۲/۵۹۰	۲/۷۳۰	۲/۶۵۰	۲/۷۷۰	۳/۷۶۰	-
	σ	۰/۲۵۶	۰/۳۶۶	-	۰/۶۷۳	۰/۱۸۰	۰/۳۳۰	۰/۷۰۸	۰/۶۲۰	-
جابجایی	log d ₀	۲/۸۹۰	۲/۸۸۰	-	۳/۲۱۰	۳/۳۰۰	۳/۴۴۰	۳/۳۳۰	۴/۳۱۰	-
	σ	۰/۴۴۱	۰/۱۴۷	-	۰/۴۹۱	۰/۳۳۶	۰/۰۸۵	۰/۴۰۵	۰/۶۶۲	-
	log d ₀	۲/۶۸۰	۲/۷۷۰	-	۳/۰۱۰	۳/۱۶۰	۳/۰۲۰	۳/۰۱۰	۴/۰۹۰	-
	σ	۰/۱۷۱	۰/۳۶۸	-	۰/۴۸۴	۰/۳۹۰	۰/۶۲۳	۰/۳۶۸	۰/۶۲۱	-
	افقی	۳	۲		۲۴	۱۵	۲	۸۲	۱۱	۷
	قائم	۶	۴		۴۳	۳۰	۳	۱۶۱	۲۱	۳۱

σ- انحراف از معیار

۰- آبرفت یا رسوبات نرم با سرعت پایین

۱- سنگهای نوع متوسط

۲- سنگهای سخت یا پی سنگی

۳- تغییرات بنیادی در مدل کاهیدگی

از سال ۱۹۸۰ میلادی با رهیافت به داده‌های بیشتر شتابنگاشتی مدل‌های کاهیدگی با تدقیق پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌های کاهیدگی نظیر بزرگا، فاصله، شرایط ژئوتکنیکی ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین از یک سو و از سوی دیگر در نظر گرفتن عدم یقین در محاسبات و بکارگیری روش‌های گوناگون ریاضی کاربردی در پردازش داده‌های جنبش نیرومند زمین نظیر روش وزنی غیرخطی کمترین مربعات^۱، روش دو مرحله‌ای برگشتی^۲، روش وزنی قطری^۳ و روش‌های یک مرحله‌ای بیشینه درست‌نمایی^۴ تغییراتی بنیادی در مدل‌های کاهیدگی رخ داده است. فرآیند این کوششها بدست دادن مدل‌های کاهیدگی بوده است که شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه موردنظر نظیر بسترهای سنگی و خاکی و پارامترهایی به‌منظور در نظر گرفتن سازوکار زمینلرزه‌ها و برآورد میزان شتاب جنبش نیرومند زمین برای سطوح ۵۰ و ۸۴ درصد در این مدلها مورد توجه قرار گرفته است.

این مدلها توسط کمپبل^۵، جوینر و بور^۶، بولت و امبرهامسون^۷ و ... ارائه گردید. باید خاطرنشان ساخت که خطای مدل کاهیدگی σ_{lna} با توجه به خطای تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین محاسبه و ارائه شده است.

به‌هر حال مدل‌های ارائه شده از سال ۱۹۸۰ میلادی به بعد مطابق جدول شماره ۲ می‌باشد که در زیر به‌ویژگیهای آن اشاره می‌شود:

- مدل کاهیدگی بور و همکاران^۸ بر پایه زمینلرزه‌های باختر آمریکا برای ساختگاههای خاکی و سنگی، برای بزرگای زمینلرزه بر حسب M_L و فواصل مختلف ارائه شده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی اسپینوسا^۹ بر پایه زمینلرزه‌های خاور آمریکا برای بزرگای بین $M_L 4/0$ تا $M_L 7/5$ و فواصل بین ۵ تا ۳۰۰ کیلومتر ارائه شده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی باتیس^{۱۰} بر پایه زمینلرزه‌های کالیفرنیا برای بزرگای $M_b 5/0$ تا $M_b 6/5$ و فواصل ۱۰ تا ۳۵۰ کیلومتر ارائه شد و همچنین وی بر پایه زمینلرزه‌های آمریکای مرکزی مدل جداگانه‌ای با شرایط دیگر ارائه کرد (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی کمپبل در سال ۱۹۸۱ بر پایه زمینلرزه‌های جهان که دارای بزرگای بین $5/0$ تا $7/7$ و در فواصل کمتر از ۵۰ کیلومتری ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند به وقوع پیوسته‌اند تهیه و ارائه گردید. این مدل‌های کاهیدگی برای ساختگاه سنگی و ساختگاه خاکی با ضخامت بیش از ۱۰ متر ارائه شده است (جدول ۲).

1- Weighted Nonlinear Least - Squares Method

2- در کتابهای خواجه‌نوری (فرایازی) Regression

3- Diagonal Weighting Scheme

4- One - Stage Maximum - Likelihood Method.

5- Campbell - 1981

6- Joyner & Boore - 1981

7- Bolt & Abrahamson - 1982

8- Boore et al - 1980

9- Espinosa - 1980

10- Battis - 1981

- مدل کاهیدگی هنکز و مک‌گایر^۱ بر پایه زمینلرزه‌های کالیفرنیا برای بزرگای M_L ۴/۰ تا M/L ۶/۵ و فواصل بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتری از ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه شده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی هاسگاوا و همکاران^۲ بر پایه زمینلرزه‌های کانادا برای بزرگای M_L یا M_b بین ۴/۵ تا ۷/۰ و فواصل بین ۱۰ تا ۲۰۰ کیلومتری از ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه شده است. این مدل کاهیدگی قادر به برآورد بیشینه شتاب مؤلفه‌های افقی و قائم جنبش نیرومند زمین می‌باشد (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی جویئر و بور^۳ بر پایه زمینلرزه‌های شمال باختری آمریکا برای بزرگای M_s ۵/۰ تا M_s ۷/۷ و فواصل کمتر از ۳۷۰ کیلومتری ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه شده است. این مدل دارای ضرایبی است که می‌تواند شتاب را برای ساختگاههای خاکی و سنگی برآورد نماید و نیز خطای تخمین مدل کاهیدگی (σ_{lna}) برای مؤلفه‌های شتاب افقی و قائم جنبش نیرومند زمین ارائه گردیده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی بولت و آمبراهامسون در سال ۱۹۸۲ بر پایه زمینلرزه‌های شمال باختری آمریکا برای فواصل کمتر از ۳۷۰ کیلومتری ایستگاههای ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین، برای بسترهای سنگی و خاکی و برای سه بازه بزرگای زمینلرزه $5/9 \leq M_s \leq 6/9$ ، $6/9 \leq M_s \leq 7/7$ ، $7/7 \leq M_s \leq 7/5$ ارائه شده است. برای این مدل کاهیدگی خطای تخمین مدل کاهیدگی محاسبه و ارائه گردیده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی ناتلی و هرمن^۴ در سال ۱۹۸۴ برای دره می‌سی‌سی‌پی برای بزرگای زمینلرزه در بازه $7/5 \leq M_s \leq 7/5$ و فواصل بین ۳ تا ۲۰۰ کیلومتری ایستگاههای ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه شده است. این مدل با احتساب خطای تخمین مدل کاهیدگی برای برآورد بیشینه شتابهای افقی و قائم جنبش نیرومند زمین همراه بوده است. (جدول ۲)
- مدل کاهیدگی سابتا و پاگلیر^۵ در سال ۱۹۸۷ بر پایه زمینلرزه‌های باختر آمریکا برای بسترهای سنگی و برای سازوکار راندگی ارائه گردید. یک مدل مربوط به زمینلرزه‌های با بزرگای بین ۴/۵ تا ۶/۵ و مدل دیگر مربوط به زمینلرزه با بزرگای ۶/۵ تا ۷/۴ بوده است. به همین ترتیب دو مدل کاهیدگی دیگر برای سازوکار امتداد لغز با توجه به بزرگای زمینلرزه‌ها ارائه شد. علاوه بر مدلهای کاهیدگی بیشینه شتاب، مدلهای طیفی پاسخ زمین نیز برای بسترهای سنگی نیز تهیه و ارائه شده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی پتروسکی و مارسلینی^۶ در سال ۱۹۸۸ بر پایه زمینلرزه‌های کشورهای اروپایی برای بسترهای خاکی و سنگی و برای بزرگای $7/0 \leq M \leq 3/0$ و فواصل ۸ تا ۲۰۰ کیلومتری ایستگاههای ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه گردیده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی بور و آلکینسون^۷ در سال ۱۹۸۸ بر پایه زمینلرزه‌های شمال باختری آمریکا برای بزرگای گشتاوری در بازه $5 \leq M_{lg} \leq 7$ و فواصل ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتری ایستگاههای ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه

1- Hanks & Mc Guire - 1981

2- Hasegawa et al - 1981

3- Joyner & Boore - 1981

4- Nuttli & Herrmann

5- Sabetta & Pugliese

6- Petrovski & Marcellini

7- Boore & Alkinson

- شده است. در این مدل ژرفای کانونی زمینلرزه‌ها ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است (جدول ۲).
- مدل کاهیدگی جویئر و بور در سال ۱۹۸۸ با توجه به اطلاعات بیشتر از زمینلرزه‌های رویداده در شمال باختری آمریکا مدل قبلی را مورد بازنگری قرار داده است. در این مدل ضریبی برای بسترهای خاکی در نظر گرفته شده است و علاوه بر آن بیشینه مقادیر شتاب جنبش نیرومند زمین برای سطوح ۵۰ و ۸۴ درصد با توجه به خطای مدل کاهیدگی قابل برآورد است. این مدل کاهیدگی نیز دارای مدل طیفی می‌باشد (جدول ۲).
 - مدل کاهیدگی کمپیل در سال ۱۹۸۹ با توجه به اطلاعات بیشتر از زمینلرزه‌های جهان مدل قبلی را مورد بازنگری قرار داده است. در این مدل که یک مدل جهانی نامیده شده است مؤلفه‌های افقی و قائم بیشینه شتاب جنبش نیرومند زمین برای سازوکارهای راندگی و امتداد لغز یا نرمال و ساختگاههای خاکی و سنگی قابل محاسبه است. در این مدل بزرگای زمینلرزه‌های کوچکتر از ۶، M_L و برای بزرگای بزرگتر از ۶، M_s در نظر گرفته شده است. این مدل کاهیدگی نیز دارای مدل طیفی می‌باشد (جدول ۲).
 - مدل کاهیدگی کمپیل در سال ۱۹۹۰ با انجام محاسبات مجدد، مدل قبلی را مورد بازنگری قرار داد و مدل کاهیدگی کاملتری با منظور نمودن ضرایب جدید ارائه نمود (جدول ۲).
 - مدل کاهیدگی آمبرسیز و بومر در سال ۱۹۹۱ بر پایه زمینلرزه‌های کشورهای اروپایی، ترکیه، ایران، پاکستان و فلسطین اشغالی برای بازه بزرگای $7/5 \leq M_s \leq 4/0$ و فواصل کمتر از ۲۰۰ کیلومتری ایستگاههای ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه شده است. در این مدل فاصله کانونی در نظر گرفته شده است و شرایط ساختگاه و سازوکار زمینلرزه به صورت یکسان در مدل منظور گردیده است (جدول ۲).
 - مدل کاهیدگی تتودولیدیس و پاپازاجوز در سال ۱۹۹۱ بر پایه داده‌های شتابنگاشتی زمینلرزه‌های کشورهای یونان، ژاپن و آلاسکا برای بازه بزرگای $7 \leq M_s \leq 4/5$ و فواصل رومرکز زمینلرزه‌ها بین ۵ تا ۲۴۰ کیلومتر از ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین ارائه گردید. این مدل صرفاً برای برآورد بیشینه شتاب افقی برای سطوح ۵۰ و ۸۴ درصد با توجه به خطای تخمین مدل کاهیدگی برای بسترهای سنگی، خاکی و آبرفتی می‌باشد (جدول ۲).
 - مدل کاهیدگی تتو و همکاران در سال ۱۹۹۲ بر پایه داده‌های شتابنگاشتی زمینلرزه‌های ایتالیا برای بازه بزرگای $6/6 \leq M_L \leq 4/0$ و در بازه فاصله $170 \text{ km} \leq R \leq 3/2 \text{ km}$ ارائه گردید. این مدل کاهیدگی قادر به برآورد بیشینه شتاب جنبش نیرومند زمین برای سطوح ۵۰ و ۸۴ درصد خطای تخمین مدل کاهیدگی می‌باشد. (جدول ۲)
 - مدل‌های کاهیدگی صدیق و همکاران در سال ۱۹۹۳ بر پایه داده‌های شتابنگاشتی زمینلرزه‌های باختر آمریکا برای بزرگای کمتر از ۶/۵ و بیش از ۶/۵ ارائه گردید. این مدل‌ها نیز برای بسترهای سنگی و سازوکارهای راندگی و امتداد لغز یا نرمال به صورت جداگانه کاربرد دارد. این مدل کاهیدگی نیز دارای مدل طیفی است (جدول ۲).

جدول ۲- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی ارائه شده از سال ۱۹۸۱ تا سال ۱۹۹۳

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
اسپنوسا	۱۹۸۰	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$4/5 \leq M_L \leq 7/5$	$5 \leq R \leq 300$	$a = 5/235 \times 10^{-7} \times e^{2/3 M} \times R^{-0/06}$ $a = 1/776 \times 10^{-5} \times e^{2/3 M} \times R^{-1/59}$ $a = 4/153 \times 10^{-3} \times e^{2/3 M} \times R^{-2/93}$ $a = 1/119 \times 10^{-6} \times e^{2/3 M} \times R^c$ $(C = 0/11 - 0/22 \ln R)$	این روابط برای خاور آمریکا تهیه شده است و بترتیب برای فواصل $10 \leq R \leq 60$, $R \leq 10$ و $5 \leq R \leq 300$ و $60 \leq R \leq 300$ کیلومتر قابل استفاده است.
باتیس	۱۹۸۱	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$5 \leq M_b \leq 6/5$	$10 \leq R \leq 350$	$a = 0/348 \times e^{1/21 M} (R+25)^{-2/08}$ $\sigma \ln a = 0/71$	این مدل برای منطقه کالیفرنیا است
کمپیل	۱۹۸۱ a	برای زمینهای سنگی یا خاکی با ضخامت کمتر از ۱۰ متر و زمینهای خاکی با ضخامت بیش از ۱۰ متر		$M_L \leq 6/0$ $M_s \geq 6/0$	$R = R_f$	$a = 0/0159 \times e^{0/868 M} [R+C(M)]^{-1/09}$ $C(M) = 0/0606 \times e^{0/7 M}$ $\sigma \ln a = 0/37$	این مدل جهانی معرفی شده است. "Wordwide"
هنکز و مک‌گایر	۱۹۸۱			$M = M_L$ $4/0 \leq M \leq 6/5$	$10 \leq R \leq 100$	$a = 0/119 R^{-1} \left[\frac{2 f_{\max}}{f_0} \ln \left(\frac{2 f_{\max}}{f_0} \right) \right]^{0/5}$	
هاسگاو و همکاران	۱۹۸۱	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$M = M_L$ $M = M_b$	$R = R_h$ $10 \leq R \leq 200$	$a = 1/02 \times 10^{-2} e^{1/3 M} \times R^{-1/5}$ $a = 3/47 \times 10^{-3} e^{1/3 M} R^{-1/1}$	این رابطه برای باختر کانادا است. این رابطه برای خاور کانادا است.

ادامه جدول ۲- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی ارائه شده از سال ۱۹۸۱ تا سال ۱۹۹۳

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
جوینر و بور	۱۹۸۱	برای کلیه زمینها (خاک و سنگ)	کلیه سازوکارها	$5/0 \leq M \leq 7/7$	$R \leq 37/0$	$a = 0/0955 e^{0/573M} \times D^{-1} \times e^{-0/00587D}$ $D = (R^2 + 7/3)^{0/5}$ $\sigma Lna = 0/6$	این مدل برای شمال باختری آمریکا تهیه شده است.
بولت و آبراهامسون	۱۹۸۲	برای کلیه زمینها (خاک و سنگ)	کلیه سازوکارها	$5/0 \leq M \leq 5/9$ $6/0 \leq M \leq 6/9$ $7/0 \leq M \leq 7/7$	$R \leq 37/0$	$a = 1/2 [(R+23)^2 + 1]^{0/33} \times e^{-0/066(R+23)}$ $a = 1/2 [(R+25)^2 + 1]^{0/42} \times e^{-0/044(R+25)}$ $a = 0/24 [(R+15)^2 + 1]^{0/1} \times e^{-0/022(R+15)}$	این مدل‌های کاهیدگی برای شمال باختری آمریکا تهیه شده است. خطای مدل کاهیدگی برای مدلها به ترتیب $g = 0/06$ و $g = 0/1$ و $g = 0/5$ می‌باشد.
ناتلی و هرمان	۱۹۸۴	برای کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$4/5 \leq M \leq 7/5$	$3 \leq R \leq 20/0$	$a = 3/79 \times 10^{-3} \times e^{1/15M} \times D^{-0/83} \times e^{-0/00159R}$ $D = (R^2 + H_{min}^2)^{0/5}$ $H_{min} = 0/0186 \times e^{1/05M}$ $\sigma Lna = 0/55$	این مدل کاهیدگی برای دره می‌سی‌سی‌پی تهیه شده است.
سابتا و پاگلینز	۱۹۸۷	برای زمین سنگی یا خاکی با سبزی	سازوکار راندگی	$M_L = M < 5/5$	$2 \leq d \leq 20/0$	$\log a = -1/562 + 0/306 M - \log(d^2 + 5/8)^{0/5} + 0/169 S + 0/173 P$ $P = 0$ بر صدک ۵۰ $P = 1$ بر صدک ۸۴	این مدل کاهیدگی بر پایه داده‌های کشورهای اروپایی تهیه شده است و برای مؤلفه افقی می‌باشد.

ادامه جدول ۲- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی ارائه شده از سال ۱۹۸۱ تا سال ۱۹۹۳

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
بور و الکینسون	۱۹۸۸	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$M = M_{lg}$ $5.0 \leq M_{lg} \leq 7.0$	$10 \leq R \leq 100$ $R = (d^2 + h^2)^{0.5}$	$\ln a = -4/34 + M_{lg} - \ln R - 0.0046 R$ $M = 2/715 - 0.277 M_{lg} + 0.127 M_{lg}^2$ $\sigma \ln a = 0.6$	بزرگای گشتاوری M_{lg} این مدل کاهیدگی برای شمال غربی آمریکا کاربرد دارد و ژرفای کانونی ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.
جوینر و بور	۱۹۸۸	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$5 \leq M \leq 7.7$	$R = (r^2 + h^2)^{0.5}$	$\log a_H = 0.43 + 0.23 (M - 6) - \log R$ $-0.0027 R + S$ $\sigma \ln(a) = 2/3$ $\sigma \log a = 0.28$ بستر خاک: $S \neq 0$ بستر سنگ: $S = 0$	این مدل کاهیدگی برای شمال غربی آمریکا تهیه شده است و شامل مدل طیفی نیز می‌باشد.
پتروسکی و مارسلین	۱۹۸۸	کلیه زمینها	کلیه سازوکارها	$3.0 \leq M \leq 7.0$	$8.0 \leq d \leq 200$ d فاصله کانونی است	$\ln a = 6/48 + 0.5438 M - 1/333$ $\ln(R + 20)$	این مدل کاهیدگی برپایه داده‌های کشورهای اروپایی تهیه شده است و شامل مؤلفه افقی می‌باشد.

ادامه جدول ۲- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی ارائه شده از سال ۱۹۸۱ تا سال ۱۹۹۳

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
کمپیل	۱۹۸۹	خاک و سنگ (کلیه زمینها)	برای سازوکار رانده و یا معکوس $F=1$ و برای سازو کار امتداد لغز و نرمال $F=0$ است	$M_L=M < 6$ $M_S = M > 6$	$R \leq 6$ $R = (d^2 + h^2)^{0.5}$ h ژرفای کانونی معادل ۱۰ کیلومتر است	$\ln a_H = -2/47 + 1/8 M - 1/81$ $[R + 0/311 e^{0/597M}] + 0/382 F$ $\sigma \ln a_H = 0/421$ $\ln a_V = -4/003 + 0/978 M - 1/45$ $[R + 0/0536 e^{0/674}] + 0/239 F$ $\sigma \ln a_V = 0/569$	این مدل کاهیدگی جهانی است و برای مؤلفه‌های افقی و قائم کاربرد دارد و شامل مدل طیفی برای مؤلفه‌های افقی و قائم بر روی خاک و سنگ است.
کمپیل	۱۹۹۰	کلیه زمینها (طیف برای خاک و سنگ)	برای سازوکار رانده و معکوس $F=1$ و برای سازوکار امتداد لغز و نرمال $F=0$ است	$M_L=M < 6$ $M_S=M > 6$	$R=(d^2 + h^2)^{0.5}$ h ژرفای کانونی معادل ۱۰ کیلومتر است $R \leq 6$	$\ln a_H = -2/245 + 1/09 M - 1/89$ $[R + 0/361 e^{0/576M}] + 0/218 F$ $\sigma \ln a_H = 0/45$ $\ln a_V = -3/829 + 0/991 M - 1/5$ $[R + 0/079 e^{0/661M}] + 0/111 F$ $\sigma \ln a_V = 0/575$	این مدل کاهیدگی جهانی است و برای مؤلفه‌های افقی و قائم کاربرد دارد و شامل مدل طیفی برای مؤلفه‌های افقی و قائم بر روی خاک و سنگ است.
دهلی و همکاران	۱۹۹۰	کلیه زمینها ساختمانهای خاکی مناسب (نمی‌باشد)	برای کلیه ساز و کارها	$3/0 \leq M < 7/8$ $M = M_s$	$10 \leq r \leq 1300$ (r فاصله کانونی)	$\ln a = -1/471 + 0/849 M - \ln r$ $-0/00418 r$	این مدل کاهیدگی بر پایه داده‌های کشورهای اروپایی، کانادا و باختر آمریکا، استرالیا و چین تهیه شده است.

ادامه جدول ۲- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی ارائه شده از سال ۱۹۸۱ تا سال ۱۹۹۳

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
امبرسیز و بومر	۱۹۹۱	برای کلیه زمینها	برای کلیه ساز و کارها	$4/0 \leq M \leq 7/5$ $M = M_s$	$r = (d^2 + h^2)^{0/5}$ $0 \leq r \leq 200$	$\log a = -1/09 + 0/238 M - \log r$ $-0/0005 r + 0/28 P$ $r = (d^2 + 6/0^2)^{0/5}$ $\log a = 0/87 + 0/217 M - \log r$ $-0/00117 r + 0/26 P$ $r = (d^2 + h^2)^{0/5}$	این مدل کاهیدگی بر پایه داده‌های کشورهای اروپایی، ترکیه، ایران، اسرائیل و پاکستان
ادریس	۱۹۹۱	برای بستر سنگی	برای ساز و کار امتداد لغز $F=0$ برای ساز و کار رانندگی $F=1$ است	$M_L = M < 6/0$ $M_S = M_W =$ $M > 6/0$	برای زمینلرزه‌های کوچکتر از ۶. فاصله از کانون زمینلرزه برای زمینلرزه‌های بزرگتر از نزدیکتر فاصله گسلش سطحی	$\ln a_H = -0/15 + e^{(2/261 - 0/083 M)}$ $-e^{(1/602 - 0/142 M)} \times \ln(R+20) + 0/2 F + \sigma$ $\sigma = 1/39 - 0/14 M$ $\ln a_H = -0/05 + e^{(3/477 - 0/284 M)}$ $-e^{(2/475 - 0/286 M)} \times \ln(R+20) + 0/2 F + \sigma$ $\sigma = 1/39 - 0/14 M$	مدل کاهیدگی اول برای بزرگای کمتر از ۶ و مدل کاهیدگی دوم برای بزرگای بیش از ۶ این مدل نیز از مدل طیفی برخوردار است.
کمپیل	۱۹۹۱	برای خاک و سنگ نرم	برای ساز و کار امتداد لغز $F=0$ برای ساز و کار رانندگی $F=1$ است	$4/7 \leq M \leq 7/7$ $M = M_s$	برای فاصله نزدیک $R \leq 60$	$\ln a_H = -2/245 + 1/605 M - 2/623$ $\times \ln(R+0/536 e^{0/612 M}) + 0/297 F \pm \sigma$ $\sigma = 0/38 : M \geq 6/2$ برای بزرگای	این مدل جهانی بوده و دارای مدل طیفی نیز می‌باشد.

ادامه جدول ۲- ویژگیهای مدل‌های کاهیدگی ارائه شده از سال ۱۹۸۱ تا سال ۱۹۹۳

نام پژوهشگران	سال میلادی	نوع زمین	سازوکار	بزرگا	فاصله بر حسب کیلومتر	مدل کاهیدگی شتاب جنبش زمین	ملاحظات
تئودولیدیس و پاپازاچوس	۱۹۹۱	برای سنگ $S=0$ برای آبرفت و خاک $S=1$	برای کلیه سازو کارها	$4/5 \leq M \leq 7/0$ $M = M_S$	$5 \leq R \leq 24/0$ فاصله از رومرکز زمینلرزه‌ها	$\ln a_H = 3/88 + 1/12 M - 1/65 \ln$ $(r + 15) + 0/41 S + 0/71 P$ $P=0$ برای 50 صدک $P=1$ برای 84 صدک	این مدل بر پایه داده‌های شتابنگاشتی کشور یونان، ژاپن و آلاسکا تهیه شده است. «دارای مدل طیفی نیز می‌باشد.»
تنتو و همکاران	۱۹۹۲	برای کلیه زمینها	برای کلیه سازو کارها	$4/0 \leq M \leq 6/6$ $M = M_L$	$3/2 \leq R \leq 17/0$ برای فاصله کم از گسل مسبب یا مرکز سطحی زمینلرزه	$\ln a_H = 4/73 + 0/52 M - 0/00216 R$ $-\ln R$ $\sigma = 0/67$	این مدل برای کشور ایتالیا تهیه شده است و دارای مدل طیفی نیز می‌باشد.
صدیق و همکاران	۱۹۹۳	برای زمینهای سنگی	برای سازو کار رانده دو مدل کاهیدگی ارائه شده است. برای سازو کار امتداد لغز دو مدل کاهیدگی ارائه شده است.	$7/4 > M \geq 6/5$ $4/5 \leq M < 6/5$ $7/4 > M \geq 6/5$ $4/5 \leq M < 6/5$	نزدیکترین فاصله از گسل مسبب	$\ln a_H = -1/92 + 1/1 M - 2/1 \ln$ $[R + e^{(-0/4845 + 0/524 M)}]$ $\ln a_H = -0/442 + M - 2/1 \ln$ $[R + e^{(1/2965 + 0/25 M)}]$ $\ln a_H = -1/274 + 1/1 M - 2/1 \ln$ $[R + e^{(-0/4845 + 0/524 M)}]$ $\ln a_H = -0/624 + M - 2/1 \ln$ $[R + e^{(1/2965 + 0/25 M)}]$	مدلهای کاهیدگی ارائه شده برای غرب آمریکا می‌باشد و نیز دارای طیف پاسخ برای مؤلفه‌های افقی و قائم است.

۴- مدل‌های کاهیدگی بهنگام شده جهان :

روند تغییرات بنیادی در مدل‌های کاهیدگی از ۱۹۸۰ به بعد شروع شده است. در دسامبر سال ۱۹۹۳ با همکاری کلیه کشورهای لرزه‌خیز جهان به‌ویژه ژاپن و آمریکا یک کارگاه تخصصی تحت عنوان جنبش نیرومند زمین در کالیفرنیا آمریکا برگزار گردید و آخرین مدل‌های کاهیدگی به صورت جهانی و یا قاره‌ای و یا به‌ویژه ناحیه‌ای از کشورهای لرزه‌خیز جهان در مجموعه مقالات این کارگاه تخصصی به چاپ رسید. پس از برگزاری این کارگاه تخصصی و ارائه دستاوردهای آن، دانشمندان این بخش از لرزه‌شناسی مهندسی بر آن شتوند تا آخرین کوششهای خود را با رهنمودهای حاصل از این کارگاه تخصصی جنبش نیرومند زمین و رویداد زمینلرزه‌های مخرب در غرب آمریکا و ژاپن (زمینلرزه مخرب و ویرانگر کوبه) ارائه نموده و یک جلد از بولتن نامه‌های پژوهشی لرزه‌شناسی^۱ (جلد ۶۸- ویژه ژانویه و فوریه ۱۹۹۷) به این امر مهم اختصاص دهند و آخرین پژوهشها و مدل‌های کاهیدگی را با واریسی و ژرف‌نگری پژوهشگران معروف فی چون آمبرهامسون و شدلاک بر این مدلها ارائه نمایند. در این بخش چکیده‌ای از برخی مدل‌های ارائه شده بیان می‌شود:

۱-۴ مدل کاهیدگی آبراهامسون و سیلوا (۱۹۹۷)

Abrahmson, N.A., Silva, W.J., 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است :

"Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes."

Reference : Seismological Research letters, Vol. 68, No. 1, Jan/Feb ۱۹۹۷, pp ۹۴-۱۲۷ .

خلاصه : با استفاده از ۶۵۵ عدد نگاشت ثبت شده از ۵۸ زمینلرزه رویداده، مدل‌های کاهیدگی تجربی طیف پاسخ برای مؤلفه‌های میانگین افقی و قائم و برای زمینلرزه‌های کم‌عمق در نواحی فعال زمین‌ساختی بدست آمده است. در این مدل همچنین با تعیین یک ضریب، امکان مشخص کردن تفاوت بین فرا دیواره و فرو دیواره گسل وجود دارد. پاسخ ساختگاه بصورت مجازی و بصورت غیرخطی بوده و بیشینه سطح شتاب در روی سنگ وابسته می‌باشد. محدودیتها: از نظر بکارگیری بزرگا و فاصله به محدودیتی در مقاله اشاره نشده است.

روابط :

طیف پاسخ شبه شتاب افقی :

$$\ln S_a(g) = f_1(M, r_{rup}) + F f_2(M) + H_w f_3(M, r_{rup}) + S f_4(Pga_{rock})$$

1- Seismological Research Letters

تعریف نمادهای بکار برده شده :

Sa(g): طیف پاسخ شتاب بر حسب (g)

M: بزرگای گشتاوری (M_w)

R: فاصله که بر حسب r_{rup} (نزدیکترین فاصله از سطح گسیختگی) و ضریب ثابت C_4 با استفاده از این رابطه

$$R = (r_{rup}^2 + C_4^2)^{1/2}$$
 محاسبه می شود:

F: ضریب نوع گسلش (۱ برای معکوس، ۵/۰ برای معکوس/مایل و ۰ برای غیر از آن)

S: ضریب ساختگاه (۰ برای سنگ یا خاک کم عمق، ۱ برای خاک عمیق)

Hw: ضریب مربوط به گسل (۱ برای ساختگاه قرار گرفته روی فرادیواره، ۰ غیر از آن)

$$f_1(M, r_{rup}) = a_1 + a_2(M - C_1) + a_{12}(\lambda/5 - M)^n + [a_3 + a_{13}(M - C_1)] \ln R \quad \text{و} \quad M \leq C_1$$

$$f_1(M, r_{rup}) = a_1 + a_2(M - C_1) + a_{12}(\lambda/5 - M)^n + [a_3 + a_{13}(M - C_1)] \ln R \quad \text{و} \quad M > C_1$$

$$= a_5 \quad M \leq 5/8$$

$$f_2(M) = a_5 + \frac{(a_6 - a_5)(M - 5/8)}{(C_1 - 5/8)} \quad 5/8 < M < C_1$$

$$= a_6 \quad M \geq C_1$$

$$f_2(M, r_{rup}) = f_{Hw}(M) f_{Hw}(r_{rup})$$

$$= 0 \quad M \leq 5/5$$

$$\Rightarrow f_{Hw}(M) = M - 5/5 \quad 5/5 < M < 6/5$$

$$= 1 \quad M \geq 6/5$$

$$= 0 \quad r_{rup} < 4$$

$$= a_9 \frac{r_{rup} - 4}{4} \quad 4 < r_{rup} < 8$$

$$\Rightarrow f_{Hw}(r_{rup}) = a_9 \quad 8 < r_{rup} < 18$$

$$= a_9 \left(1 - \frac{r_{rup} - 18}{9}\right) \quad 18 < r_{rup} < 24$$

$$= 0 \quad r_{rup} > 25$$

$$f_{\Delta}(PGA_{rock}) = a_{10} + a_{11} \ln(PGA_{rock} + C_5)$$

PGA_{rock} : بیشینه شتاب پذیرفتنی در سنگ (g)

خطای استاندارد :

$$= b_1 \quad M \leq 5/0$$

$$\sigma_{(M)} = b_1 - b_2(M - 5) \quad 5/0 < M < 7/0$$

$$= b_1 - 2b_2 \quad M \geq 7/0$$

$$\begin{aligned}
&= b_3 & M \leq 5.0 \\
\tau_{(M)} &= b_3 - b_4(M - 5) & 5.0 < M < 7.0 \\
&= b_3 - 2b_4 & M \geq 7.0 \\
\\
&= b_5 & M \leq 5.0 \\
\sigma_{total} (M) &= b_5 - b_6(M - 5) & 5.0 < M < 7.0 \\
&= b_5 - 2b_6 & M \geq 7.0
\end{aligned}$$

۲-۴ مدل آمبرسیز، سیمپسون و بومر (۱۹۹۶)

Ambraseys, N.N., Simpson, K.A. and Bommer, J.J., 1996

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۶ ارائه شده است:

"Prediction of Horizontal & Vertical Response Spectra in Europe".

Reference : Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. ۲۵, pp ۳۷۱-۴۱۲

خلاصه: مجموعه بزرگی از اطلاعات ثبت شده از زمینلرزه‌ها بکار برده شده است تا معادلات مربوط به محاسبه بیشینه شتاب و طیف پاسخ برای مؤلفه‌های افقی و قائم در ناحیه اروپا و نواحی مجاور آن (مانند خاورمیانه) بدست آید. این روابط بر حسب بزرگا، فاصله از چشمه لرزه‌ای و زمین‌شناختی ساختگاه بدست آمده است.

محدودیتها: این روابط برای استفاده در بازه بزرگای $4 < M_s < 7.5$ و فاصله از چشمه بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر مناسب می‌باشند.

روابط:

۱- بیشینه شتاب افقی:

$$\log(a_h) = -1/48 + 0/266 M_s + 0/922 \log(r) + 0/117 S_A + 0/124 S_s + 0/25 P$$

۲- بیشینه شتاب قائم:

$$\log(a_v) = -1/74 + 0/273 M_s + 0/954 \log(r) + 0/076 S_A + 0/058 S_s + 0/26 P$$

۳- طیف پاسخ شتاب افقی و قائم:

$$\log(S_A) = C_1 + C_2 M_s + C_4 \log(r) + C_A S_A + C_S S_s + \sigma P$$

۴- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط :

a_v, a_h و S_A : بیشینه شتاب افقی و قائم و طیف پاسخ شتاب افقی و قائم (همگی بر حسب g)

M_s : بزرگای بر حسب مقیاس بزرگای امواجی سطحی زمین

r : که با رابطه تعریف می شود: $r = (d^2 + h^2)^{1/2}$

که در آن d نزدیکترین فاصله افقی از ایستگاه به تصویر سطحی گسیختگی گسل است و h در دو حالت در نظر گرفته می شود که یکی بصورت ضریب ثابت است که از حل معادله جنبش زمین بدست می آید و در حالت دوم بصورت ضریب متغیر می باشد.

S_S و S_A : اثر ساختگاه که به سه دسته بصورت زیر تقسیم می شود:

۱- سنگی (طبقه بندی R، میانگین سرعت امواج برشی بزرگتر از $750 \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}$ $V_s > 750$)

۲- خاک سفت (طبقه بندی A، میانگین سرعت امواج برشی بین $360 \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}$ و $750 \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}$ $360 \leq V_s \leq 750$)

۳- خاک نرم (طبقه بندی S، میانگین سرعت امواج برشی کمتر از $360 \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}$ $V_s < 360$)

(σ): انحراف معیار محاسبه پارامتر جنبش موردنظر زمین است و ضریب ثابت P دارای مقدار صفر برای صدک ۵۰٪ و ۱ برای صدک ۸۴٪ می باشد.

۳-۴ مدل بور، جویئر و فومال (۱۹۹۷)

Boore, D.M., Joyner, W.B., Fumal, T.E., 1997

این مقاله در سال ۱۹۹۷ با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر ارائه شده است.

"Equation for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western American Earthquakes: A Summary of Recent Work"

Reference : Seismological Research letters, Vol. ۶۸, No. 1, Jan/Feb ۱۹۹۷, pp ۱۲۸-۱۵۳

خلاصه: این مقاله خلاصه ای از آخرین مطالعات انجام شده بمنظور محاسبه طیف پاسخ و بیشینه شتاب مؤلفه افقی برای زمینلرزه های کم عمق در شمال باختری آمریکا می باشد. ضرایب ارائه شده همان ضرایب قبلی هستند با این تفاوت که در جداول مربوط به بیشینه شتاب و طیف پاسخ به جای لگاریتم در مبنای ده از لگاریتم طبیعی پارامترهای جنبش زمین استفاده شده است. معادلات پارامترهای جنبش زمین را بر حسب بزرگای گشتاوری، فاصله، شرایط ساختگاه و سازوکار گسل (امتداد - لغز، معکوس - لغز یا غیر مشخص) ارائه می دهند. شرایط ساختگاه بر حسب میانگین سرعت امواج برشی بر روی ۳۰ متر لایه بالایی بیان شده و مقادیر میانگین سرعت امواج برشی برای ساختگاههای نمونه سنگی و خاکی که توسط بوسیله برنامه ملی کاهش خطر (NEHRP)^۱ زلزله توصیه شده است

1- National Earthquake Hazard Reduction Program

نیز ذکر شده است. اضافه بر این نسبت به نقاط بیشتری برای بازه بزرگ و فاصله در روابط داده شده است. سرانجام در جداول مربوط به پارامترهای ورودی تصحیحاتی برای طبقه‌بندی ساختگاهها و بزرگای زمینلرزه انجام شده است (این تصحیحات، در برآورد پارامترهای جنبش زمین تغییرات کوچک ولی مورد نیازی را ایجاد می‌کند و مزیت آن این است که دیگر نیازی به تغییر در ضرایب روابط نمی‌باشد).

محدودیتها: این روابط برای استفاده در بازه بزرگای $7/5 < M < 5/5$ و فاصله تا کیلومتر $r \leq 80$ مناسب می‌باشد.

روابط:

۱- بیشینه شتاب افقی یا طیف پاسخ شبه شتاب بر حسب (g)

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4 \ln r + b_5 \ln \frac{V_s}{V_A} \pm \sigma \ln Y$$

۲- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط:

Y: بیشینه شتاب افقی یا طیف پاسخ شبه شتاب بر حسب g

M: بزرگای گشتاوری (M_w)

r: فاصله است که با رابطه $r = (r_{jb}^2 + h^2)^{1/2}$ بیان می‌شود

و در آن:

r_{jb} : نزدیکترین فاصله افقی از تصویر قائم گسیختگی و

h: ضریب ثابت است که از حل معادله بوسیله آنالیز برگشتی حاصل می‌شود

و b_1 سازوکار گسل است که شامل: b_{1SS} زمینلرزه‌های امتداد - لغز^۱

b_{1RS} زمینلرزه‌های معکوس - فشاری^۲

b_{1ALL} اگر هیچ نوع سازوکاری مشخص نباشد.

$\sigma \ln Y$ - انحراف از معیار $\ln Y$ می‌باشد

- مقادیر توصیه شده برای میانگین سرعت برشی

NEHRP Site Class B	۱۰۷۰ m/sec	در طبقه‌بندی B ساختگاه برنامه ملی کاهش خطر زلزله
NEHRP Site Class C	۵۲۰ m/sec	در طبقه‌بندی C ساختگاه برنامه ملی کاهش خطر زلزله
NEHRP Site Class D	۲۵۰ m/sec	در طبقه‌بندی D ساختگاه برنامه ملی کاهش خطر زلزله
Rock	۶۲۰ m/sec	در سنگ
Soil	۳۱۰ m/sec	در خاک

Campbell, K.W., 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است :

"Empirical Near-Source Attenuation Relationships for horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Pseudo - Acceleration Response Spectra"

Reference : Seismological Research Letters, Vol. ۶۸ , No. 1, Jan/Feb ۱۹۹۷ , pp ۱۵۴-۱۷۹.

خلاصه: در این مقاله روابطی برای محاسبه بیشینه مقادیر شتاب، سرعت و همچنین طیف پاسخ شبه شتاب (برای میرایی ۵٪) مؤلفه‌های افقی و قائم جنبش نیرومند زمین داده شده است. در این مقاله ذکر شده است که این روابط در واقع بازنگری مطالعات سابق این محقق طی سالهای ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۴ بوده است و در آن ضمن برطرف نمودن موارد ضعف قبلی بر نکات قوت آن افزوده شده است. کاربرد این روابط برای تمام دنیا و بخصوص در مناطق زمینساختی فعال می‌باشد.

محدودیتها: محدوده بزرگ و فاصله‌ای که می‌بایست رعایت شود به ترتیب $M_w > 5$ و کیلومتر $R_{SEIS} \leq 60$ می‌باشد.

روابط:

۱- شتاب افقی:

$$\begin{aligned} \ln(A_H) = & -3/512 + 0/904 M - 1/328 \ln\{\sqrt{R_{SEIS}^2 + (0/149 \exp(0/647 M))^2}\} \\ & + [1/125 - 0/112 \ln(R_{SEIS}) - 0/957 M] F \\ & - [0/440 - 0/171 \ln(R_{SEIS})] S_{SR} \\ & + [0/405 - 0/222 \ln(R_{SEIS})] S_{HR} + \varepsilon_1 \end{aligned}$$

۲- سرعت افقی:

$$\begin{aligned} \ln(V_H) = & \ln(A_H) + 0/26 + 0/29 M - 1/44 \ln[R_{SEIS} + 0/203 \exp(0/958 M)] \\ & + 1/89 \ln[R_{SEIS} + 0/361 \exp(0/576 M)] \\ & - (0/0001 - 0/000565 M) R_{SEIS} - 0/12 F - 0/15 S_{SR} - 0/30 S_{HR} \\ & + 0/75 \tanh(0/51 D)(1 - S_{HR}) - F_v(D) + \varepsilon_2 \end{aligned}$$

۳- طیف پاسخ شبه شتاب افقی (پریود ۰/۰۵ تا ۴/۰ ثانیه):

$$\begin{aligned} \ln(SA_H) = & \ln(A_H) + C_1 + C_7 \tanh[C_7 (M - 4/7)] \\ & + (C_4 + C_5 M) R_{SEIS} + 0/5 C_6 S_{SR} \\ & + C_6 S_{HR} + C_8 \tanh(C_8 D) (1 - S_{HR}) + F_{SA}(D) + \varepsilon_3 \end{aligned}$$

۴- شتاب قائم:

$$\begin{aligned} \ln(A_V) = & \ln(A_H) - 1/58 - 0/10 M - 1/5 \ln[R_{SEIS} + 0/079 \exp(0/661 M)] \\ & + 1/89 \ln[R_{SEIS} + 0/361 \exp(0/576 M)] - 0/11 F + \varepsilon_4 \end{aligned}$$

۵- سرعت قائم:

$$\begin{aligned} \ln(V_V) = & \ln(V_H) - 2/15 + 0/07 M - 1/24 \ln[R_{SEIS} + 0/0394 \exp(1/17 M)] \\ & + 1/44 \ln[R_{SEIS} + 0/0203 \exp(0/958 M)] + 0/10 F \\ & + 0/46 \tanh[2/68 D] - 0/53 \tanh(0/47 D) + \varepsilon_5 \end{aligned}$$

۶- طیف پاسخ شبه شتاب قائم (پریود ۰/۰۵ تا ۴/۰ ثانیه):

$$\begin{aligned} \ln(SA_V) = & \ln(SA_H) + C_1 - 0/10 M + C_7 \tanh[0/71 (M - 4/7)] \\ & + C_7 \tanh[0/66 (M - 4/7)] - 1/5 \ln[R_{SEIS} + 0/071 \exp(0/661 M)] \\ & + 1/89 [R_{SEIS} + 0/361 \exp(0/576 M)] - 0/11 F + C_4 \tanh(0/51 D) + \\ & C_8 \tanh(0/57 D) + \varepsilon_6 \end{aligned}$$

۷- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط:

A_V و A_H : بیشینه شتاب افقی و قائم

SA_V و SA_H : طیف پاسخ شبه شتاب افقی و قائم برای میرایی ۰/۵

V_V و V_H : بیشینه سرعت افقی و قائم

M_w : بزرگای گشتاوری

R_{SEIS} : نزدیکترین فاصله از سطح گسیختگی لرزه‌زا

که می توان آن را به وسیله رابطه زیر محاسبه نمود.

$$d_{SEIS} = \frac{1}{\gamma} [H_{BOT} - H_{TOP} - W \sin(\alpha)] + H_{TOP} \quad \text{اگر } d_{seis} \geq H_{Top}$$

$$d_{SEIS} = H_{TOP} \quad \text{در غیر این صورت:}$$

که در آن W پهنای گسیختگی است که می توان آن را به وسیله رابطه زیر ارائه شده توسط ولز - کاپراسمیت محاسبه نمود.

$$\log W = -1.01 + 0.32 M_w$$

F: برای نوع گسلش (° برای امتداد لغز، ۱ غیره)

S_{SR}: ضریب ساختگاه (سنگ نرم)

S_{HR}: ضریب ساختگاه (سنگ سخت)

D: عمق تا سنگ بستر بر حسب کیلومتر

$$F_V(D) = 0 \quad \text{اگر } D \geq 1 \text{ کیلومتر}$$

$$F_V(D) = -0.3(1 - S_{HR})(1 - D) - 0.15(1 - D) S_{SR} \quad \text{اگر } D < 1 \text{ کیلومتر}$$

$$F_{SA}(D) = 0 \quad \text{اگر } D \geq 1 \text{ کیلومتر}$$

$$F_{SA}(D) = C_{\phi}(1 - S_{HR})(1 - D) + 0.5 C_{\phi}(1 - D) S_{SR} \quad \text{اگر } D < 1 \text{ کیلومتر}$$

ε: خطای تصادفی با میانگین صفر و انحراف معیار معادل با خطای محاسبه ln(A_H) که بصورت زیر داده شده است:

$$\varepsilon_1: A_H < 0.068 g \Rightarrow \sigma_{A_H} = 0.55$$

$$0.068 g \leq A_H \leq 0.21 g \Rightarrow \sigma_{A_H} = 0.173 - 0.14 \ln(A_H)$$

$$A_H > 0.21 g \Rightarrow \sigma_{A_H} = 0.39$$

$$\varepsilon_2: \sigma_{VH} = (\sigma_{AH}^2 + 0.06^2)^{1/2}$$

$$\varepsilon_3: \sigma_{SAH} = (\sigma_{AH}^2 + 0.27^2)^{1/2}$$

$$\varepsilon_4: \sigma_{AV} = (\sigma_{AH}^2 + 0.36^2)^{1/2}$$

$$\varepsilon_5: \sigma_{VV} = (\sigma_{VH}^2 + 0.30^2)^{1/2}$$

$$\varepsilon_6: \sigma_{SAV} = (\sigma_{SAH}^2 + 0.39^2)^{1/2}$$

۵-۴ مدل کاهیدگی صدیق، چنگ، اگان، مکدیدی و یانگز (۱۹۹۷)

Sadigh, K., Chang, C.-Y., Egan, J.A., Makdissi, F., Youngs, R.R., 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است:

"Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data"

Reference : Seismological Research Letters, Vol. ۶۸ , No. 1, Jan/Feb ۱۹۹۷ , pp ۱۸۰-۱۸۹

خلاصه: در این مقاله روابط کاهیدگی برای محاسبه بیشینه شتاب و طیف پاسخ شتاب در مورد زمینلرزه‌های کم عمق ارائه شده است. روابط بر مبنای داده‌های شتابنگاشتی (در اولویت اول) از زمینلرزه‌های کالیفرنیا می‌باشد. روابط برای زمینلرزه‌هایی با نوع گسلش امتداد لغز و معکوس، شرایط ساختگاه، سنگ و رسوبات عمیق خاک سفت داده شده است.

محدودیتها: بازه بزرگای $4 < M < 8$ و فاصله بیشتر از ۱۰۰ کیلومتر

روابط:

۱- بیشینه شتاب افقی و طیف پاسخ شتاب (میرایی ۰.۵٪) برای ساختگاههای سنگی

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 (\lambda/5 - M)^{2/5} + C_4 \ln[r_{rup} + \exp(C_5 + C_6 M)] + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \pm \text{Sigma} \ln(Y)$$

۲- بیشینه شتاب افقی و طیف پاسخ شتاب (میرایی ۰.۵٪) برای ساختگاههای با خاک عمیق

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 \ln(r_{rup} + C_4 \exp(C_5 M)) + C_6 + C_7 (\lambda/5 - M)^{2/5} \pm \text{Sigma} \ln(Y)$$

۳- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط:

Y: بیشینه مقادیر شتاب یا طیف پاسخ بر حسب g

M: بزرگای گشتاوری M_w

r_{rup} : نزدیکترین فاصله از سطح گسیختگی

C_1 : ضریب مربوط به سازوکار گسل

Sigma ln(Y): انحراف از معیار ln Y (بر حسب PGA و همینطور بزرگا داده شده است)

۶-۴ مدل اسپودیچ و همکاران (۱۹۹۷)

Spudich, P. et al, 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است:

"SEA۹۶ - A New Predictive Relation for Earthquake Ground Motions in Extensional Tectonic Regimes"

Reference : Seismological Research Letters, Vol. ۶۸, No. ۱, Jan/Feb ۱۹۹۷, pp ۱۹۰-۱۹۸

خلاصه: در این مقاله روابط بیشینه مقادیر شتاب افقی و طیف پاسخ شبه سرعت (میرایی ۰.۵٪) ارائه شده است که برای جنبش زمین ناشی از زمینلرزه در رژیمهای زمین ساختی کششی مناسب می باشد. این مقاله که به عنوان SEA-۹۶ مشخص شده است در اصل بر مبنای مطالعات اسپودیچ و همکاران در سال ۱۹۹۶ بوده است که قسمتی از مطالعات مربوط به طرح برآورد خطر برای ساختگاهی در نوادا بمنظور دفع زباله های هسته ای می باشد.

محدودیتها: در مقاله توصیه شده است که از این روابط در بازه بزرگای $5 < M < 7/7$ و فاصله بین صفر تا ۷۰ کیلومتر برای زمینلرزه هایی در مناطق کششی استفاده شود.

توضیح: مناطق کششی، مناطقی هستند که در آنها لیتوسفر بصورت ناحیه ای گسترش یافته است.

روابط:

۱- بیشینه شتاب افقی (g) و طیف پاسخ شبه سرعت (cm/s) برای مؤلفه میانگین افقی (میرایی ۰.۵٪):

$$\log_{10} Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4 R + b_5 \log_{10} R + b_6 \tau \pm \sigma \log(Y)$$

۲- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط:

Y: بیشینه شتاب افقی و یا طیف پاسخ شبه سرعت

R: فاصله و برابر است با: $R = (r_{jb}^2 + h^2)^{1/2}$

r_{jb} : نزدیکترین فاصله افقی از تصویر قائم گسیختگی

h: ضریب ثابت بدست آمده از روش برگشتی

τ : ضریب ساختگاه که برای سنگ برابر صفر و

برای خاک برابر ۱ است

$\sigma \log Y$: انحراف معیار محاسبه Y و برابر است با: $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$

Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Silva W.J., Humphrey, J.R., 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است:

"Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes"

Reference : Seismological Research Letters, Vol. ۶۸, No. 1, Jan/Feb ۱۹۹۷, pp ۵۸-۷۳

خلاصه: در این مقاله روابط کاهیدگی بمنظور محاسبه بیشینه مقادیر شتاب و طیف پاسخ شتاب افقی برای زمینلرزه‌های رویداده در مناطق فرورانشی فصل مشترکی^۱ و درون ورقه‌ای^۲ برای سنگ و خاک داده شده است. روابط بوسیله تحلیل برگشتی و استفاده از یک مدل برگشتی متأثر اتفاقی انجام شده است. با این مطالعات مشخص شد که آهنگ کاهیدگی بیشینه جنبش نیرومند زمین برای زمینلرزه‌ها در مناطق فرورانشی کم‌تر از زمینلرزه‌های رویداده کم‌عمق پوسته‌ای در نواحی فعال زمین‌ساختی می‌باشد. این اختلاف در درجه اول در زمینلرزه‌های بزرگ مشخص می‌باشد. بیشینه جنبش نیرومند زمین با افزایش عمق زمینلرزه بیشتر شده و زمینلرزه‌های درون ورقه‌ای مقادیری در حدود ۵۰ درصد بیشتر از زمینلرزه‌های فصل مشترکی بوجود می‌آورند.

محدودیتها: زمینلرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری بزرگتر از M5 و فواصل بین ۱۰ تا ۵۰۰ کیلومتر

توضیح: این مقاله روابطی را برای زمینلرزه‌های مناطق فرورانشی ارائه می‌دهد. دو نوع زمینلرزه برای مناطق فرورانشی در نظر گرفته شده است، زمینلرزه‌های فصل مشترکی و درون ورقه‌ای زمینلرزه‌های فصل مشترک، رویدادهای رانگیهای با زاویه کم هستند که در فصل مشترک مابین صفحات فرا رانده شده و فرو رانده شده اتفاق می‌افتند. زمینلرزه‌های درون ورقه‌ای در طول صفحات فرو رانده شده اقیانوسی که بصورت مشخص رویدادهای گسلیده نرمال با زاویه زیاد بوده است و نتیجه کشش شیب به سوی پائین در صفحات فرو رانش می‌باشند.

روابط:

۱- بیشینه شتاب و طیف پاسخ شتاب (میرایی ۵٪) مؤلفه افقی برای ساختگاه سنگی:

$$\ln(Y) = 0.2418 + 1.414 M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln[r_{rup} + 1/7818 \exp(0.554 M)] \\ + 0.00607 H + 0.3846 Z_T \pm Sd \\ Sd = C_4 + C_5 M$$

۲- بیشینه مقادیر شتاب و طیف پاسخ شتاب (میرایی ۵٪) مؤلفه افقی برای ساختگاه خاکی :

$$\ln(Y) = -0.6687 + 1.438 M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln[r_{rup} + 1.097 \exp(0.617 M)] \\ + 0.00648 H + 0.3643 Z_T \pm Sd \\ Sd = C_4 + C_5 M$$

۳- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط :

Y : بیشینه شتاب و یا طیف پاسخ شبه شتاب افقی

M : بزرگای گشتاوری M_w

r_{rup} : نزدیکترین فاصله به گسیختگی (کیلومتر)

H : عمق به کیلومتر

Z_T : نوع چشمه (فصل مشترکی °)

(درون ورقه ای ۱)

۸-۴ مدل کاهیدگی تورو، آبراهامسون و اشنایدر (۱۹۹۷)

Toro, G.R., Abrahamson, N.A., Schneider, J.F., 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است:

"Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America : Best Estimates and Uncertainties"

Reference : Seismological Research letters, Vol. ۶۸, No. ۱, Jan/Feb ۱۹۹۷, pp ۴۱-۵۷

خلاصه: این مدل کاهیدگی جنبش زمین برای ساختگاههای سنگی در مرکز و شمال شرقی آمریکا براساس یک مدل تصادفی آماری جنبش زمین بدست آمده است که در آن چهار مجموعه از روابط کاهیدگی (دو ناحیه مختلف پوسته ای و در دو مقیاس مختلف بزرگا) حاصل شد. در این روابط عدم یقین ها همانطور که برای مدل جنبش زمین در نظر گرفته شد برای مقادیر هر کدام از پارامترها نیز محاسبه گردید. در مقایسه با داده ها و همینطور سایر روابط ارائه شده برای این منطقه نتایج قابل قبول و مشابه بود.

محدودیتها: بازه تغییرات بزرگای گشتاوری $8 < M < 5$ و فاصله ۱ تا ۵۰۰ کیلومتر است (مناسبترین فاصله ۱ تا ۱۰۰ کیلومتر می باشد)

روابط :

۱- بیشینه مقادیر شتاب زمین (بر حسب g) و طیف شتاب (بر حسب g) برای مؤلفه افقی :

$$\ln(Y) = C_1 + C_2(M - 6) + C_3(M - 6)^2 - C_4 \ln R_M - (C_5 - C_4) \max \left[\ln \left(\frac{R_M}{100} \right), 0 \right] - C_6 R_M + \varepsilon_e + \varepsilon_a$$

۲- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط :

Y : بیشینه مقادیر شتاب زمین یا طیف شتاب

R_M : فاصله تعریف شده بصورت $(R_{jb}^2 + C_v^2)^{1/2}$

R_{jb} : نزدیکترین فاصله افقی از تصویر قائم گسیختگی

C₁ تا C₆ : ضرایب ثابت که با حل تابع فوق بدست می آیند.

M : بزرگا بر حسب بزرگای (M_{Lg}) و یا بزرگای گشتاوری (M_w)

ε_a و ε_e : عدم یقین مربوط به برآورد رابطه جنبش زمین که به بزرگا و فاصله بستگی داشته و انحراف معیار آنها برای فرکانسهای متفاوت و بر حسب بزرگا و فاصله در جداول داده شده است.

توضیح : بطورکلی ضرایب رابطه کاهیدگی در چهار حالت بر حسب بزرگای گشتاوری M_w یا بزرگای M_{Lg} و برای نواحی پوسته‌ای میان قاره‌ای و خلیج داده شده است.

۹-۴ مدل آتکینسون و بور (۱۹۹۷)

Atkinson, G.M., Boore, D.M., 1997

این مقاله با عنوان و مرجع مورد استفاده زیر در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است :

"Stochastic Point-Source Modeling of Ground Motions in the Cascadia Region"

Reference : Seismological Research Letters, Vol. ۶۸, No. ۱, Jan/Feb ۱۹۹۷, pp ۷۴-۸۵

خلاصه : مقاله کاربرد یک مدل آماری برای یک ارزیابی مقدماتی از روابط جنبش زمین در مورد ساختگاههای سنگی ناحیه کاسکادیا می باشد. پارامترهای مدل از آنالیز تجربی داده‌های لرزه‌نگاشتی ناحیه کاسکادیا بدست آمده است. مدل براساس چشمه‌های نقطه‌ای برون^۱ است که توسط پارامتری که معادل تنش با ۵۰ بار مشخص شده است.

1- Brune

فرضیات مدل با داده‌های جنبش نیرومند زمین از ناحیه کاسکادیا و داده‌های حاصل از زمینلرزه‌های بزرگ در نواحی دیگر فرورانده شده مقایسه گردید. شبیه‌سازی چشمه‌های نقطه‌ای با مشاهدات رویدادهای متوسط ($M < 7$) در ناحیه کاسکادیا همخوانی داشت. اما در مورد رویدادهای خیلی بزرگ ($M \geq 7/5$) در نواحی فرورانده شده نتایج نشان‌دهنده کاهش شدیدتر پیش‌بینی نسبت به رویدادهای مشاهده شده در دیگر نواحی بود (در نواحی نزدیک به چشمه زمینلرزه پیش‌بینی بیش از اندازه و در فواصل خیلی دور پیش‌بینی کمتر از اندازه بوده است).

محدودیتها: هرچند که به دلیل مشاهده اختلافاتی برای بزرگ‌های بالا نیاز به مطالعات بیشتر در مدلسازی کاهیدگی منطقه ضروری می‌باشد اما در حال حاضر روابط مقدماتی ارائه شده برای پیش‌بینی رویدادهای با بزرگای کوچکتر از $M < 7$ و فواصل کمتر از ۱۰۰ کیلومتر تخمین مناسب و محافظه‌کارانه‌ای را بدست می‌دهد.

روابط:

۱- پیشینه شتاب (g)، سرعت (cm/s) و طیف پاسخ شتاب (g)

$$\ln Y = C_1 + C_2 (M - 6) + C_3 (M - 6)^2 - \ln r_{\text{hypo}} - C_4 r_{\text{hypo}}$$

۲- تعریف نمادهای بکار برده شده در روابط:

Y: پیشینه شتاب، سرعت و طیف پاسخ شتاب

C_1 تا C_4 : ضرایب ثابت رابطه

M: بزرگای گشتاوری (M_W)

r_{hypo} : فاصله از کانون زمینلرزه

جدول ۳- چکیده‌ای از ویژگیهای روابط کاهیدگی بهنگام شده جهان

نام مدل کاهیدگی و مرجع	تاریخ	رابطه ارائه شده برای	محدوده بزرگ	محدوده فاصله	بیشینه پارامترهای جنبش زمین	طیف پاسخ	پارامترهای بکار برده شده در مدل	نوع گسلش (F)	نوع بزرگ (M)	تعریف فاصله	نوع ساختگاه	توضیحات
۱-۴- آبراهامسون و سیلوا	۱۹۹۷	تمام دنیا	$M > 6/0$			PSA - H	M,R,F,S,H W	معکوس و معکوس مایل	M_W	$r^2 = r_{rup}^2 + C^2$ ضریب ثابت $C^2 =$	سنگی، خاکی کم عمق، خاکی عمیق	برای زمینلرزه‌های کم عمق
۲-۴- آمبرسیز، سیمپسون و بومر	۱۹۹۶	اروپا و خاورمیانه	$M 4/0 - 7/6$	$Dis \leq 200$ (km)	PGA-H,V	PSA-H,V	M,r,S		M_S	$r^2 = d^2 + h_o^2$ ضریب ثابت $h_o =$	سنگی، خاکی سفت و خاکی نرم	برای مناطق فعال اروپا و خاورمیانه
۳-۴- یوروجوینر و فومال	۱۹۹۷	شمال غربی آمریکا	$M 5/5 - 7/5$	$Dis \leq 80$ (km)	PGA-H	PSA-H	M,rjb,F	امتداد لغز، معکوس لغز و غیره	M_W	$r^2 = r_{jb}^2 + h^2$ ضریب ثابت $h =$	دسته بندی سرعت برشی V_S	برای زمینلرزه‌های کم عمق
۴-۴- کمپبل	۱۹۹۷	تمام دنیا	$M > 5/0$	$Dis \leq 60$ (km)	PGA-H,V PGV-H,V	PSA-H,V	M,R _{seis} ,D,F,S	امتداد لغز، معکوس، رانده و غیره	M_W	R=R SEIS	سنگی سخت و نرم و خاکی سفت	برای نواحی فعال زمینساختی در تمام دنیا
۵-۴- صدیق و همکاران	۱۹۹۷	تمام دنیا	$M 4/0 - 8/0$	$Dis \leq 100$ (km)	PGA-H	PSA-H	M,R _{rup} ,F	امتداد لغز، معکوس رانده	M_W	$R = r_{rup}$	سنگی خاکی عمیق	برای زمینلرزه‌های کم عمق پوسته
۶-۴- اسپودیچ و همکاران	۱۹۹۷	تمام دنیا	$M > 5/0$	$Dis < 105$ (km)	PGA-H PSV-H,V		M,R		M_W	$R^2 = r_{jb}^2 + h^2$ ضریب ثابت $h =$	سنگی خاکی	برای مناطق زمینساختی کششی
۷-۴- یانگز و همکاران	۱۹۹۷	تمام دنیا	$M \geq 5/0$	$Dis 10 - 500$ (km)	PGA-H	PSA-H	M,R _{rup} ,H,Zt Zds,Zss	فصل مشترکی درون ورقه‌ای	M_W	$R = r_{rup}$ ژرفای کانونی $h =$	سنگی، خاکی عمیق و خاکی کم عمق سفت	برای مناطق فرو رانشی
۸-۴- تورو و همکاران	۱۹۹۷	مناطق مرکزی و شمال شرقی آمریکا	$M 5/0 - 8/0$	$Dis 1 - 500$ (km)	PGA-H	PSA-H	M,R _M		M_W MLg	$R_M^2 = r_{jb}^2 + C^2$ ضریب ثابت $C^2 =$	سنگی	برای زمینلرزه‌های کم عمق پوسته
۹-۴- انکینسون و بور	۱۹۹۷	ناحیه کاسکادیا		$Dis < 100$ km $fd 5 - 50$ km	PGA-H PGV-H	PSA-H	M,Rhypo, Frequency		M_W	R=R SEIS	سنگی	برای زمینلرزه‌های کم عمق پوسته

۵- کاربرد مدل‌های کاهیدگی و دسته‌بندی آنها

۵-۱ برآورد دقیق پارامترهای جنبش نیرومند زمین

به منظور برآورد صحیح پارامترهای پذیرفتنی جنبش نیرومند زمین ناشی از وقوع زمینلرزه، تعیین بزرگا و فاصله آن رویداد از ساختگاه موردنظر از اطلاعات اولیه و پایه در ارزیابی خطر زمینلرزه می‌باشد. از طرف دیگر تجارب کسب شده از وقوع زمینلرزه‌ها و رفتار سازه‌ها در مقابل آنها، ارزیابی مجدد معیارهای طراحی لرزه‌ای سازه‌های مهندسی با اهمیت و همچنین تصحیح نحوه برآورد پارامترهای پذیرفتنی جنبش نیرومند زمین پس از وقوع هر زمینلرزه ضروری می‌باشد. تاکنون مناسبترین و فراگیرترین نحوه اینگونه برآوردها بکارگیری معادلات و روابط کاهیدگی می‌باشد که در ساده‌ترین شکل آن، جنبش نیرومند زمین برحسب تابعی از بزرگا و فاصله بیان می‌شود.

بطورکلی روابط کاهیدگی جنبش نیرومند زمین به دو صورت تجربی و نظری بدست می‌آیند. در روش تجربی از نگاشته‌های رویداده جنبش نیرومند زمین (زمینلرزه‌های ثبت شده) و در روش نظری از مدل‌های لرزه شناختی برای ایجاد مصنوعی جنبش نیرومند زمین (با مدل نمودن خصوصیات چشمه، ساختگاه و ...) استفاده می‌شود. در واقع این دو روش مکمل یکدیگر می‌باشند. زیرا در روشهای تجربی داده‌ها را با استفاده از تابعی که از روشهای نظری حاصل می‌شود برازش می‌دهند و در روشهای نظری داده‌های تجربی برای تشخیص و مدل کردن پارامترها بکار گرفته می‌شوند.

مهمترین پارامترهای جنبش نیرومند زمین که در ارزیابی‌های خطر زمینلرزه موردنظر بوده و دارای کاربرد مهندسی می‌باشند، شامل بیشینه مقادیر شتاب، سرعت، تغییر مکان و همچنین طیف پاسخ شتاب یا سرعت در نسبت میرایی ۵٪، برای مؤلفه‌های افقی و قائم بوده و در روابط کاهیدگی با درنظر گرفتن شرایطی قابل محاسبه است.

۵-۲ ارائه دسته‌بندی‌هایی برای انتخاب مناسب‌تر مدل‌های کاهیدگی مختلف

۵-۲-۱ پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌های کاهیدگی

از آنجا که در نواحی مختلف جهان، زمینلرزه‌ها با ویژگی‌ها و در شرایط مختلفی بوقوع می‌پیوندند، اولین گام ارائه یک تقسیم‌بندی کلی براساس شرایط منطقه‌ای زمین‌ساختی زمینلرزه‌ها می‌باشد. براین اساس سه دسته مهم در روابط ارائه شده به شرح زیر مشاهده می‌گردد:

۱- زمینلرزه‌های کم عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی

۲- زمینلرزه‌های کم عمق پوسته رویداده در نواحی پایدار زمینساختی

۳- زمینلرزه‌های رویداده در نواحی فرورانشی^۱
جدول شماره ۳ براساس این دسته‌بندی ارائه شده است.

لذا محققینی که می‌خواهند برای نواحی خاص یا کل جهان روابط کاهیدگی ارائه دهند در اولین قدم می‌بایست با توجه به شرایط زمینساختی موردنظر خود نسبت به جمع‌آوری و انتخاب نگاشتهای مربوط به زمینلرزه‌ها اقدام نمایند.

در مراحل بعد پارامترهای مهم دیگری مطرح می‌باشند که می‌بایست به روشنی تعریف و برای هر زمینلرزه تشخیص و تعیین شوند و در محاسبات آماری، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. مهمترین این پارامترها به شرح زیر می‌باشند.

- بزرگا: امروزه مورد توجه‌ترین بزرگای اندازه‌گیری شده، بزرگای گشتاوری می‌باشد. زیرا مستقیماً به ممان لرزه‌ای زمینلرزه وابسته است.

- فاصله: این پارامتر مشخص‌کننده فاصله چشمه لرزه‌زا نسبت به ساختگاه می‌باشد و از سوی محققین مختلف فاصله‌های مختلفی تعریف شده که مهمترین آنها به شرح زیر است.

Γ_{jb} = نزدیکترین فاصله افقی به تصویر قائم گسیختگی

Γ_{rup} = نزدیکترین فاصله به سطح گسیختگی

Γ_{seis} = نزدیکترین فاصله به سطح گسیختگی لرزه‌زا

Γ_{hypo} = فاصله از کانون زمینلرزه

- شرایط ساختگاه: پارامتری که مشخص‌کننده شرایط زمین‌شناختی ساختگاه بوده و در دسته‌بندی آن از تقسیم‌بندیهای کیفی نظیر جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده تا کمی بر مبنای سرعت امواج برشی لایه‌های سطحی استفاده می‌گردد.

سازوکار گسل: پارامتر مشخص‌کننده نوع گسلش و سازوکار غالب گسل ایجادکننده زمینلرزه، نظیر راندگی، امتداد لغز یا معکوس و غیره

عمق رسوبات: این پارامتر مشخص‌کننده ضخامت رسوبات تا سنگ بستر بوده و بخصوص در محاسبات مربوط به برآورد طیف پاسخ اثر دارد.

با استفاده از روشهای آماری مختلف امکان مدل‌نمودن این پارامترها و هرگونه پارامتر دیگری که اهمیت موردی آن مورد نیاز باشد ممکن خواهد بود. مدلهای کاهیدگی با پارامترهای گوناگون که از سوی محققین ارائه شده گویای این مسئله است. براساس روابط معتبر ارائه شده از سوی محققین مختلف که در این مطالعه شرحی از مهمترین آنها آورده شده است دسته‌بندیهایی به منظور انتخاب مناسبترین رابطه کاهیدگی (که می‌بایست تا حد امکان مشابه با شرایط ساختگاه مورد مطالعه باشد) در جدولهای ۳-۲ و ۳-۳ آورده شده است.

1- Subduction Zone

جدول شماره ۳-۱- تقسیم‌بندی مدل‌های کاهیدگی براساس نواحی زمینساختی مکان رویداد زمینلرزه‌ها

نام مدل کاهیدگی	شرایط منطقه‌ای زمینساختی زمینلرزه‌ها
آبراهامسون و سیلوا (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی
آمرسیز (۱۹۹۶)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی
بور و جویئر و فومال (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی
کمپیل (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی
صدیق و همکاران (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی
اسپودیچ و همکاران (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی فعال زمینساختی
یانگز و همکاران (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های رویداده در نواحی فرورانشی
تورو و همکاران (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی پایدار زمینساختی
اتکینسون و بور (۱۹۹۷)	زمینلرزه‌های کم‌عمق پوسته رویداده در نواحی پایدار زمینساختی

جدول شماره ۳-۲- بکارگیری زمینلرزه‌های منجیل و طبس در روابط کاهیدگی

نام مدل کاهیدگی	زمینلرزه طبس (M7.4) 1978/9/16	زمینلرزه منجیل (M7.4) 1990/6/20
آبراهامسون و سیلوا (۱۹۹۷)	×	—
آمرسیز (۱۹۹۶)	×	×
بور و جویئر و فومال (۱۹۹۷)	—	—
کمپیل (۱۹۹۷)	×	×
صدیق و همکاران (۱۹۹۷)	×	—
اسپودیچ و همکاران (۱۹۹۷)	×	—
یانگز و همکاران (۱۹۹۷)	—	—
تورو و همکاران (۱۹۹۷)	—	—
اتکینسون و بور (۱۹۹۷)	—	—

جدول شماره ۳-۳- تقسیم‌بندی مدل‌های کاهیدگی براساس پارامترهای مدل شده و پارامترهای ارائه شده جنبش زمین

شرایط ساختگاه	پارامترهای مدل شده	بازه زمانی (ثانیه)	مؤلفه‌های بکار برده شده	پارامترهای جنبش زمین	نام مدل کاهیدگی
سنگی، خاکی عمیق	$M_W, r_{rup}, F1, HW$	0.0 - 5.0	Ave H	PSA	آبراهامسون و سیلوا (۱۹۹۷)
سنگی، خاکی سفت و نرم	M_S, r_{hypo}	0.0 - 2.0	Ave H, V	PSA, PGA	آمبرسز (۱۹۹۶)
سرعت امواج برشی	$M_W, r_{jb}, F2$	0.0 - 2.0	Ave H	PSA, PGA	بور و جویئر و فومال (۱۹۹۷)
سنگی سخت و نرم، خاکی	$M_W, r_{seis}, F2, D$	0.0 - 4.0	Ave H, V	PSA, PGA, PGV	کمپبل (۱۹۹۷)
سنگی، خاکی عمیق	$M_W, r_{rup}, F1, HW$	0.0 - 4.0	Ave H	PSA, PGA	صدیق و همکاران (۱۹۹۷)
سنگی، خاکی	M_W, r_{jb}	0.0 - 2.0	Ave H	PSV, PGA	اسپودیچ و همکاران (۱۹۹۷)
سنگی، خاکی	$M_W, r_{rup}, F3, H$	0.0 - 4.0 (3.0 rock site)	Ave H	PSA, PGA	یانگز و همکاران (۱۹۹۷)
سنگی	$M_W(or Mlg), r_{jb}$	0.0 - 2.0	Ave H	PSA, PGA	تورو و همکاران (۱۹۹۷)
سنگی، خاکی (ضرایب تقویت)	M_W, r_{hypo}	0.0 - 2.0	Ave H	PSA, PGA, PGV	اتکینسون و بور (۱۹۹۷)

در محاسبات مربوط به برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین علاوه بر مقدار میانه، عدم یقین یا انحراف معیار مربوط به اینگونه محاسبات نیز امروزه در ارزیابی‌های خطر زمینلرزه نقش بسیار مهمی دارد. در بسیاری از مدلها انحراف معیار وابسته به بزرگای می‌باشد بطوریکه رویدادهایی با بزرگای بیشتر دارای انحراف معیار کمتر نسبت به رویدادهای کوچکتر می‌باشند. کمپیل در سال ۱۹۹۷ برای محاسبه انحراف معیار علاوه بر بزرگا، تابعی وابسته به شتاب افقی را نیز در نظر گرفته است. در نمودار شماره ۱ انحراف معیار چند مدل برای مقادیر بیشینه شتاب به عنوان تابعی از بزرگا آورده شده است. در نمودار شماره ۲ نیز انحراف معیار برای طیف پاسخ شتاب نشان داده شده است. در اغلب مدلها، با افزایش پریرود انحراف معیار نیز بیشتر می‌شود.

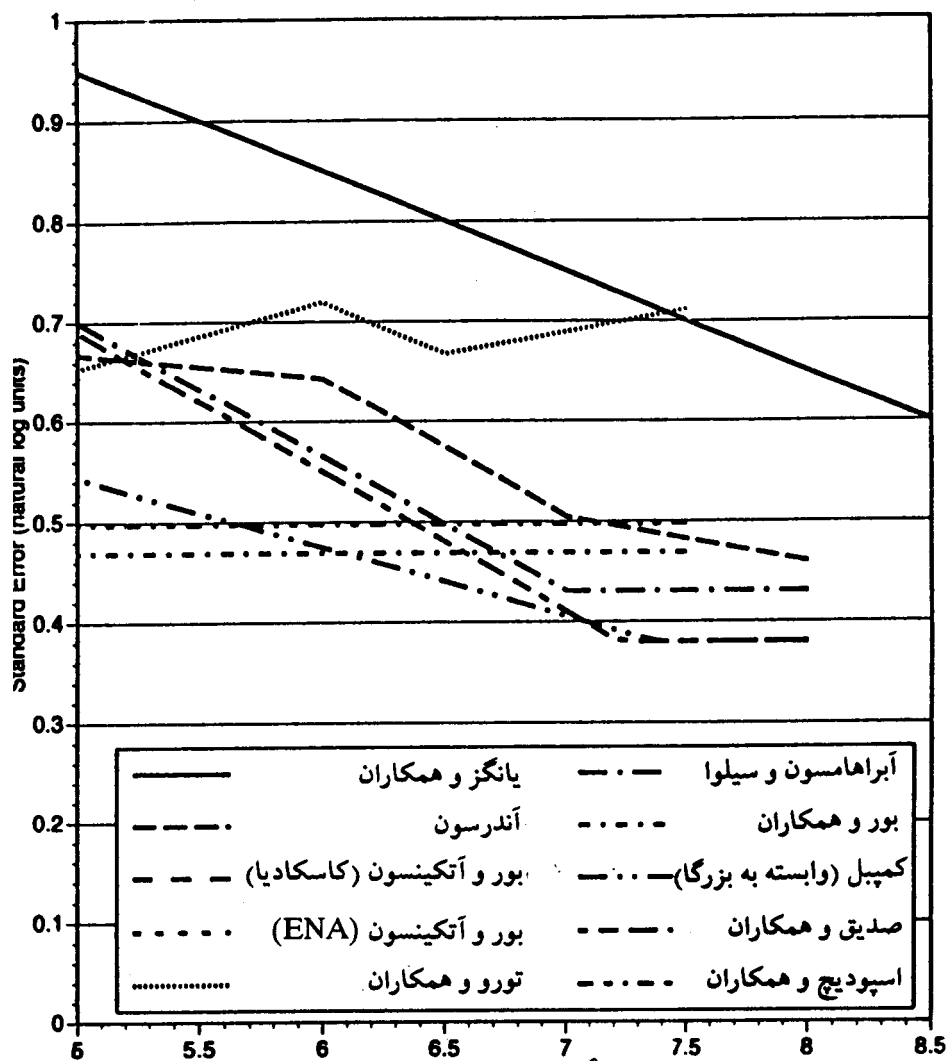
۵-۲-۳ روش برازش داده‌های جنبش نیرومند زمین

در گذشته به منظور برازش داده‌های زمینلرزه‌ها از روشهای معمول کمترین مربعات و حصول مدل‌های کاهیدگی جنبش نیرومند زمین استفاده می‌گردید. با افزایش اطلاعات در علم لرزه‌شناسی و افزونی داده‌های مربوط به زمینلرزه‌ها نقاط ضعف این روش که بخصوص ناشی از عدم توانایی آن در توزیع مناسب اثر بزرگا و فاصله می‌باشد آشکار گردید. برای مثال فوکوشیما و تاناکا در سال ۱۹۹۰ نشان دادند که روش معمول یک مرحله‌ای کمترین مربعات دارای خطاهای مهمی در برآورد بیشینه مقادیر شتاب افقی زمینلرزه‌های ژاپن می‌باشد. لذا از سوی محققین مختلف روشهای متفاوتی به منظور برازش هرچه بهتر داده‌ها ارائه شده است که معتبرترین آنها به شرح زیر می‌باشد:

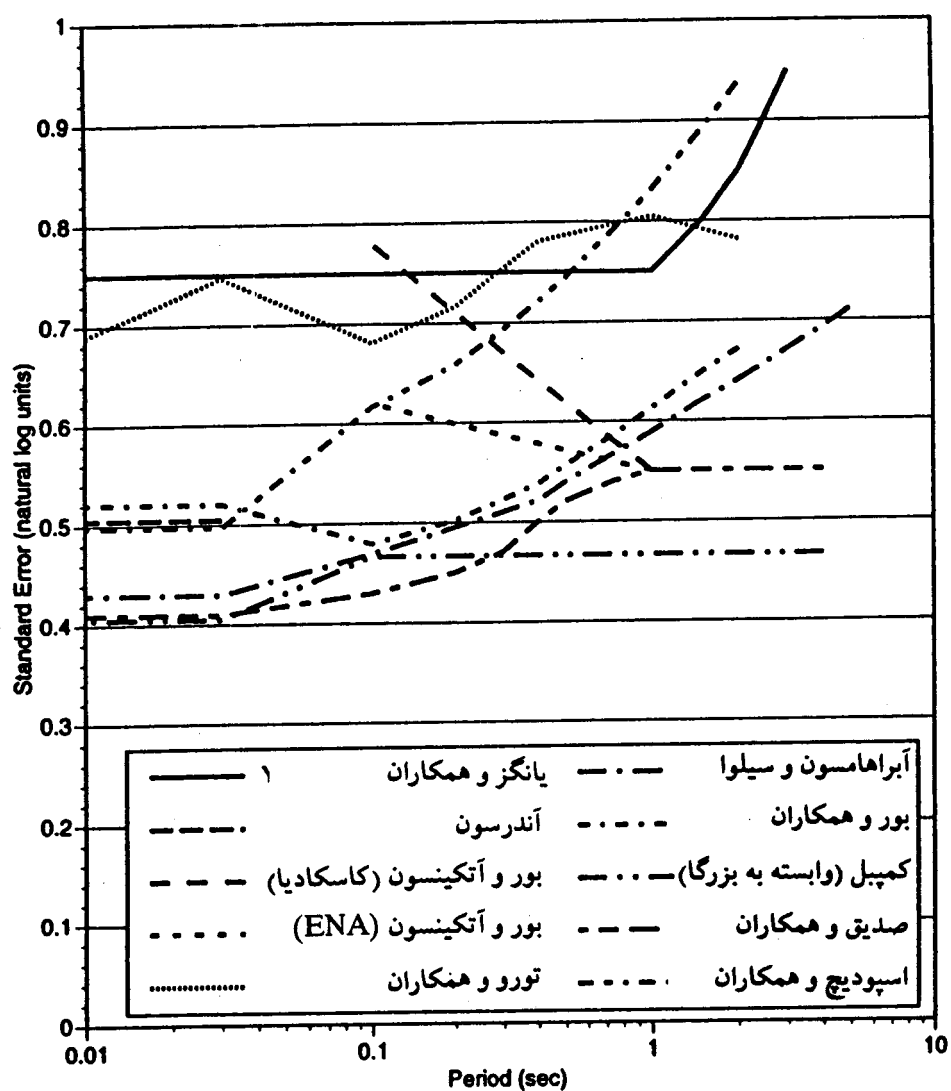
کمپیل در سالهای ۱۹۸۱-۱۹۹۷ از روش وزنی غیرخطی کمترین مربعات^۱ برای جبران نمودن توزیع غیرخطی داده‌ها نسبت به فاصله استفاده کرده است. بور و جویئر در سالهای ۱۹۸۱-۱۹۹۷ معرفی‌کننده روش دو مرحله‌ای تحلیل برگشتی به منظور تشخیص و جدانمودن تأثیر بزرگا از فاصله می‌باشند. به‌طوریکه در مرحله اول با استفاده از ضرایبی تأثیر فاصله و در مرحله دوم تأثیر بزرگا مورد تجزیه و تحلیل واقع می‌شود. فوکوشیما و تاناکا در سال ۱۹۹۰ نیز از یک روش مشابه دو مرحله‌ای استفاده کردند. در هر دو این روشها برای محاسبه بیشینه مقادیر شتاب در مرحله دوم تحلیل برگشتی تنها از زمینلرزه‌هایی استفاده شد که در بیشتر از یک ایستگاه ثبت شده بودند و به هرکدام از آنها وزنی داده می‌شد. ولی در محاسبات بیشینه مقادیر سرعت و طیف پاسخ به دلیل تعداد کم زمینلرزه‌های قابل استفاده، تمامی داده‌ها در مجموعه اطلاعاتی با وزن برابر مورد استفاده قرار می‌گرفت. در سال ۱۹۸۸ توسط بور و جویئر یک روش وزنی قطری^۲ پیشنهاد و در تحلیل‌های برگشتی دو مرحله‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

1- Weighted nonlinear least - squares method

2- Diagonal Weighting scheme



نمودار ۱- مقایسه خطای مدل‌های کاهیدگی مختلف برای بیشینه شتاب
جنبش نیرومند زمین (PGA) بر اساس بزرگای مختلف



نمودار ۲- مقایسه طیف پاسخ شبه شتاب براساس مدل‌های مختلف طیفی
به ازای بزرگای $M_s = 7.0$ در فاصله ۲۰ کیلومتر

ماسادا و اوتاکه در سال ۱۹۹۲ یک ماتریس وزنی^۱ برای تحلیل برگشتی دو مرحله‌ای پیشنهاد کردند که با روشهای قبلی متفاوت بود. ماتریس وزنی آنها در برگرنده تأثیرات غیرقطری نیز بود. مدل تأثیرات تصادفی^۲ توسط بریلینگر و پرایسلر در سالهای ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵ معرفی شد که در برگرنده روشهای یک مرحله‌ای بیشینه درستنمایی^۳ برای تخمین پارامترها در برآورد معادلات می‌باشد. آبراهامسون و یانگز در سال ۱۹۹۲ معرفی‌کننده یک الگوریتم جایگزین با منطق ریاضی محکمتر ولی با کارایی کمتر می‌باشند.

بطور کلی هرکدام از روشها اگر در جای خود به صورت درست بکار گرفته شوند می‌توانند قابل قبول باشند (نزدیکی جوابها در بیشتر روابط جدید نسبت به یکدیگر گویای این مسئله می‌باشد). روشهای یک مرحله‌ای از نظر سادگی و زمان محاسباتی کمتر مناسب‌تر بوده ولی روشهای دو مرحله‌ای از نظر فرضیات و کارایی بهتر می‌باشند.

1- Weighting matrix

2- Random effects model

3- One - stage maximum - likelihood methods