

بررسی انرژی زمین لرزه در تعدادی قاب خمشی بتن مسلح

محسن غفوری آشتیانی، استاد و رئیس پژوهشگاه
هاله ملکی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه پژوهشگاه

۱- چکیده

ترسیم می‌نماید. در حقیقت سازه زمانی زمین لرزه را تحمل می‌کند که قادر باشد انرژی وارده در طول زمین لرزه را به نحوی جذب یا تلف کند که دچار شکست نابهنگام یا تسلیم از طریق سازوکار نامطلوب نشود. از این رو، بررسی انرژی زمین لرزه در سازه‌ها می‌تواند رفتار سازه و نقاط ضعف طراحی را به صورت دقیقتر و واقعی تر بیان کند.

۳- مفاهیم پایه

معادلات انرژی نسبی در سیستم یک درجه آزاد، با انتگرال گیری از رابطه اساسی دینامیک بر روی متغیر تغییر مکان به دست می‌آید [۱]:

$$\int m \ddot{v} dv + \int c \dot{v} dv + \int f_s dv = - \int m \ddot{v}_g dv \quad (1)$$

$$E_K + E_D + E_A = E_I \quad \text{یا} \quad E_K + E_D + E_S + E_H = E_I \quad (2)$$

رابطه (۲) بیانگر این است که انرژی ورودی به سازه (E_I)، برابر با مجموع انرژی است که از طریق جنبش سازه (E_K)، میرایی لزج (E_D) و رفتار مصالح (E_A) جذب یا تلف می‌شود. در این معادله انرژی جذب شده (E_A) شامل دو بخش انرژی رفتار ارتجاعی (E_S) و انرژی رفتار هیسترتیک (E_H) است. این رابطه برای سیستم‌های چنددرجه آزاد عبارت است از:

$$\int [m] [\ddot{v}(t)] dv + \int [c] [\dot{v}(t)] dv + \int [k] [v(t)] dv = - \int [m] [\ddot{v}_g(t)] dv \quad (3)$$

۴- ساختمانهای مورد بررسی

به منظور بررسی چگونگی برقراری معادلات انرژی در سیستم‌های سازه‌ای معمولی، چهار قاب خمشی بتن مسلح با تعداد چهار، شش، هشت (شکل ۱) و ده طبقه انتخاب شدند [۲] و توسط برنامه DRAIN-2DX تحت اثر چهار شتابنگاشت ال سنترو، گزلی، ناغان و طیس مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفتند [۳].

نکات ملحوظ شده در ارتباط با انتخاب قابها و مدل‌سازی آنها عبارتند از:

- قابهای انتخاب شده، سازه‌های متعارف در ساخت و سازهای شهری می‌باشند؛

در مقاله حاضر، انرژی زمین لرزه در چهار قاب خمشی بتن مسلح، از طریق تحلیل غیرخطی آنها تحت اثر چهار شتابنگاشت مختلف محاسبه و اثر برخی از پارامترهای سازه‌ای و لرزه‌ای بر نتایج بررسی گردیده است. مقدار بیشینه انرژی ورودی در هر حالت محاسبه و با مقادیر حاصل از روابط تجربی مقایسه شده است. نسبت انرژی هیسترتیک به انرژی ورودی به دست آمده و اثر عوامل گوناگون بر آن بررسی شده است. چگونگی توزیع انرژی هیسترتیک و میرایی در طبقات ساختمان، به منظور یافتن شمای پراکندگی خسارت، تعیین گشته و مطابقت آن با نتایج به دست آمده از تحلیل غیرخطی (مفاصل خمیری، منحنی‌های هیستریزس طبقات) مطالعه شده است.

۲- مقدمه

وقوع زمین لرزه در پی آزادسازی حجم زیادی از انرژی، محیط اطراف نقطه آزادسازی انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ اما، از دیدگاه مهندسی آنچه امروزه در طراحی ساختمانها مورد توجه قرار می‌گیرد نیروی وارد بر سازه‌ها بر اثر زمین لرزه است که بر این اساس سازه به گونه‌ای طراحی می‌شود تا در برابر این نیرو به حد کافی مقاوم باشد؛ ولی ارزیابی تعادل سازه در برابر تک پارامتر مقاومت، نمی‌تواند بیان‌کننده رفتار سازه در طول مدت جنبش شدید باشد و در اغلب موارد در تعیین واکنش سازه پس از حد ارتجاعی و چگونگی توزیع خسارت در اجزای سازه‌ای، دید روشنی به طراح نمی‌دهد. به نظر می‌رسد که برای کنترل رفتار سازه نیاز به پارامترهای دیگری همچون انرژی زمین لرزه می‌باشد. انرژی (با تعریف کلی سطح زیر منحنی نیرو- تغییر مکان) به دلیل استفاده از انتگرال در محاسبه آن (رابطه ۱)، اثر زمین لرزه را در کل مدت زمان جنبش شدید بیان می‌کند و پیگیری چگونگی اتلاف یا جذب آن در سازه، شمایی از چگونگی رفتار سازه را

۴-۱- شتابنگاشتهای مورد استفاده

به منظور بررسی اثر شتابنگاشت زمین لرزه بر میزان انرژی وارده به سازه ها، چهار شتابنگاشت همپایه شده با خصوصیات کاملاً متفاوت در نظر گرفته شد. جدول (۱) خصوصیات این شتابنگاشتها را در مقایسه با یکدیگر نشان می دهد. لازم به ذکر است که این شتابنگاشتها لزوماً با ویژگیهای ساختگاهی تعریف شده در مرحله طراحی متناسب نیستند.

جدول (۱): مقایسه ویژگیهای شتابنگاشتهای مورد استفاده (PGA=0.35g)

زمین لرزه	PGA (Cm/s ²)	PGV (Cm/s)	t _D (s)	T _g (s)	PGA/PGV (1/s)
ال سنترو	۳۴۳/۴	۳۷/۹۹۸	۱۹/۲	۲/۱۲	۹/۰۳۷
گزللی	۳۴۳/۴	۴۰/۴۶۳	۲۰/۴۶	۹/۴	۸/۴۸۷
طمس	۳۴۳/۴	۴۹/۹۷	۲۵	۱۱/۰۸	۶/۸۷۲
ناغان	۳۴۳/۴	۳۸/۸۵۴	۵	۲/۱	۸/۸۳۸

PGA= حداکثر شتاب زلزله، PGV= حداکثر سرعت زلزله، t_D= مدت زمان زلزله،

T_g= دوره تناوب غالب زلزله (g = 9.81 m/s²)

۵- نتایج تحلیل

قابهای چهارگانه، تحت اثر شتابنگاشتهای موردنظر، تحلیل دینامیکی غیرخطی شدند. اثر افزایش PGA (از طریق اعمال حداکثر شتاب ۰/۳۵g، ۰/۵g و ۰/۶۵g)، درصد میرایی (میرایی لزوج ۲، ۵ و ۷ درصد)، مدل میرایی (متناسب با جرم، متناسب با سختی و متناسب با جرم و سختی) و اثر P-Δ بر روی پاسخ انرژی سازه بررسی شد.

۵-۱- تاریخچه زمانی انرژی

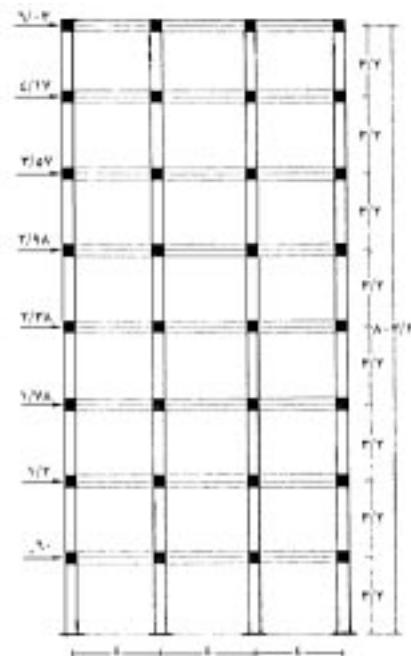
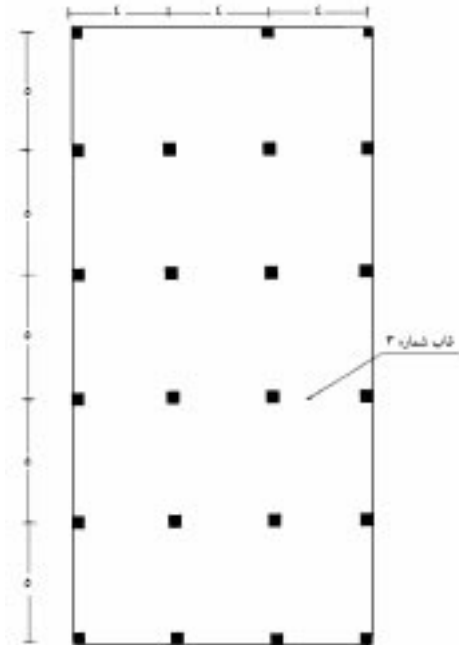
منحنی های انرژی ورودی، انرژی هیسترتیک، انرژی میرایی لزوج، انرژی جنبشی و میزان خطا (انرژی ورودی منهای مجموع انرژیهای هیسترتیک، میرایی و جنبشی و ناشی از خطاهای برنامه) برای هر تحلیل استخراج شد.

۵-۱-۱- انرژی ورودی (E_I)

در کلیه نمودارها، پس از چند ثانیه که مقدار انرژی بسیار کم است، پرشی در نمودار رخ می دهد. این پرش در زمین لرزه طمس تدریجی و در گزللی و ناغان ناگهانی است. در نمودارهای مذکور پرش در حدود دوره تناوب غالب زمین لرزه (T_g) و متناظر با نقطه آغاز جنبش شدید در نمودار نگاشت زلزله است. سایر پرشهای کوچک نمودار نیز در سایر اوجهای شتابنگاشت رخ می دهند (شکل ۲).

۵-۱-۲- انرژی هیسترتیک یا کار استاتیکی (E_S + E_H)

شکل کلی این منحنی با منحنی انرژی ورودی کاملاً همخوانی دارد؛ اما، شیب آن نسبت به منحنی E_I کمتر است به گونه ای که فاصله دو منحنی در انتهای زمان زمین لرزه بیشتر می شود. ناهمواری



شکل (۱): پلان ساختمان و قاب هشت طبقه نمونه

- در مدل سازی سازه ها بررسی مفاهیم انرژی از دید کلان مدنظر بوده و از ورود به جزئیات اعضا یا اتصالات خودداری شده است.
- به دلیل محدودیتهای نرم افزار DRAIN-2DX، در میان اثر پارامترهای لرزه ای سازه ها فقط اثر میرایی لزوج بررسی شده است. رفتار غیرخطی اعضای بتنی با مدل تاکدا تعریف و میزان شکل پذیری سازه ها در حدود قابل قبول سازه های طرح شده بر اساس ضوابط آیین نامه ای فرض گشته است.
- از اثر میانقابها در تحلیل صرف نظر شده است.

در قاب چهار طبقه کمتر از قابهای نرمتر است؛ به همین دلیل، میزان انرژی میرایی با افزایش طبقات سازه، رشد چشمگیری دارد.

۵-۱-۴- انرژی جنبشی (E_K)

میزان انرژی تلف شده در جنبش سیستم نسبت به سایر اجزای معادله انرژی بسیار کمتر است و به دلیل شکل غیر انتگرالی $E_K = \frac{[M]\{\dot{v}\}^2}{2}$ ، مقدار آن فزاینده نیست و در انتهای جنبش زمین لرزه دیده می شود. زمین لرزه دیده می شود. زمین لرزه دیده می شود.

اتلاف انرژی از طریق انرژی جنبشی، در زمین لرزه طبس چشمگیرتر از سایر زمین لرزه هاست. شاید دلیل آن کم بودن نسبی PGA/PGV در زمین لرزه طبس باشد. به نظر می رسد این زمین لرزه بزرگنمایی بیشتری بر روی سرعت دارد (در حالت طیف می توان سرعت سازه را با سرعت زمین مربوط نمود) و به همین دلیل انرژی جنبشی تلف شده در آن بیشتر است.

۵-۲- اثر پارامترهای لرزه ای روی منحنی های انرژی

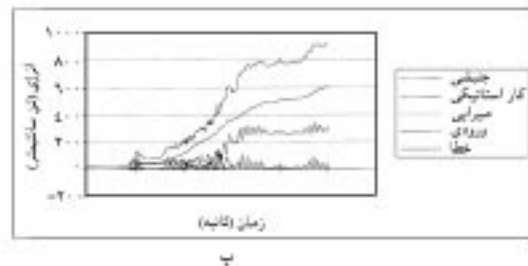
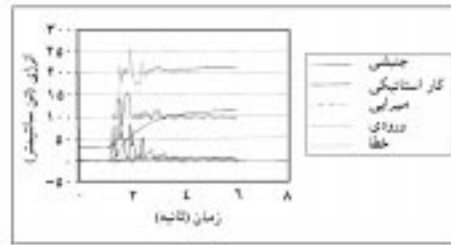
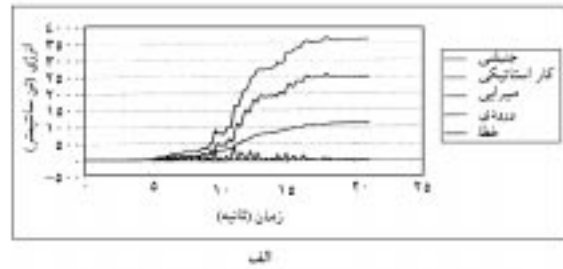
در این بخش اثر پارامترهای PGA ، نسبت و مدل میرایی و پدیده $P-\Delta$ بر روی منحنی های به دست آمده مورد بررسی قرار می گیرد. $1-2-5$ اثر دوره تناوب ساختمان تأثیر ارتفاع و در نتیجه دوره تناوب ساختمان بر روی منحنی های انرژی در بخش ۳-۵ بیشتر مورد توجه قرار می گیرد و در این قسمت به طور خلاصه، به آن پرداخته می شود.

۵-۱-۱-۲- انرژی ورودی

در زمین لرزه های ال سنترو و گزلی، با افزایش تعداد طبقات ساختمان، میزان انرژی ورودی نیز افزایش می یابد؛ اما، در زلزله های طبس و ناغان این روند مشاهده نمی شود. شاید دلیل آن متفاوت بودن این دو زمین لرزه است که یکی با دوره تناوب غالب بسیار بالا و دیگری با مدت جنبش بسیار کوتاه از دو زلزله دیگر متمایز است.

۵-۱-۲-۲- انرژی هیسترتیک و میرایی

در زلزله های ال سنترو و گزلی، افزایش طبقات، موجب افزایش انرژی هیسترتیک می شود؛ اگرچه این افزایش در قابهای شش، هشت و ده طبقه محسوس نیست. علت این امر شاید به این دلیل باشد که برخی طبقات این ساختمانها (طبقات انتهایی) اتلاف انرژی چندانی از خود



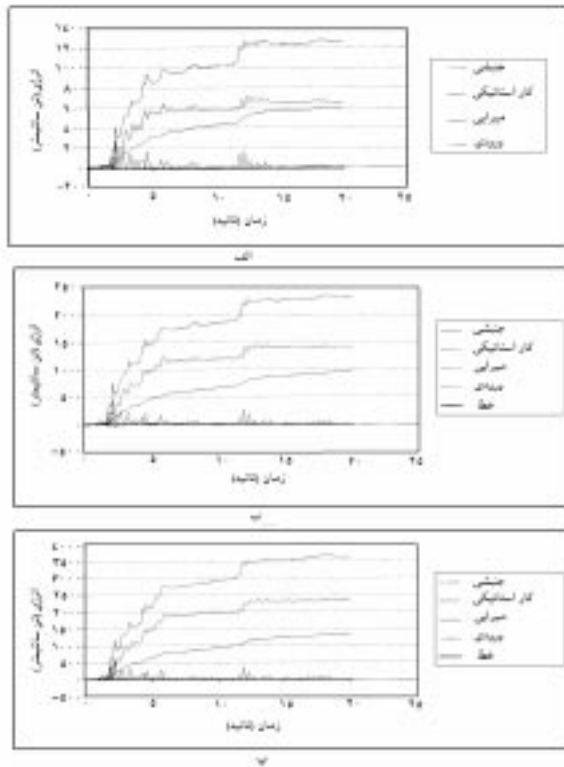
شکل (۲): تاریخچه زمانی انرژی در قاب هشت طبقه تحت اثر زمین لرزه الف: گزلی، ب: ناغان، پ: طبس ($PGA=0.35g$)، میرایی پنج درصد متناسب با جرم و سختی

E_H ، نسبت به منحنی E_I بیشتر است، دلیل این امر شاید ثابت بودن مقدار ماتریس جرم و تغییرات لحظه ای ماتریس سختی سیستم است که موجب ناهمواریها و پرشهای کوچک فراوانی در منحنی انرژی هیسترتیک سازه می گردد.

۵-۱-۳- انرژی میرایی لزوج (E_D)

منحنی E_D ضمن تطابق شکلی نسبی با منحنی E_I ، هموارتر و دارای تغییرات کمتری است. پرش آن نرمتر و تدریجی تر است و نسبت به منحنی E_H شیب بیشتری دارد. این مسأله نشان می دهد که با نزدیک شدن به انتهای جنبش شدید، انرژی میرایی نقش مؤثرتری در استهلاک انرژی ورودی دارد.

در زمین لرزه های ناغان، گزلی و ال سنترو، مقدار انرژی میرایی از انرژی هیسترتیک به مراتب کمتر است؛ اما، در زمین لرزه طبس، غیر از قاب چهار طبقه، منحنی انرژی میرایی در بالای انرژی هیسترتیک قرار می گیرد. این امر می تواند به دلیل کم بودن نسبت PGA/PGV در زلزله طبس باشد که اثر سرعت زمین را بیشتر نمایان می کند. بررسی طیف سرعت زلزله، نشان می دهد که بزرگنمایی سرعت



شکل (۳): تاریخچه زمانی انرژی در قاب هشت طبقه تحت اثر زمین لرزه ال سنترال الف: $PGA=0.35g$ ، ب: $PGA=0.5g$ ، پ: $PGA=0.65g$ (میرایی پنج درصد متناسب با جرم و سختی)

مقدار آن نیز تغییر قابل توجهی ایجاد نمی کند. تغییر مدل میرایی نیز اثر مشابهی دارد. به نظر می رسد در محدوده تغییرات درصد میرایی معمول این ساختمانها، می توان انرژی ورودی را مستقل از میرایی فرض نمود.

۲-۲-۲-۵ انرژی هیسترتیک

هرچند درصد میرایی تأثیری بر شکل منحنی ندارد، اما باعث تغییر مقدار آن می شود. با افزایش نسبت میرایی، قسمت اعظم انرژی ورودی جذب شده، انرژی تلف شده در حلقه های هیسترتیزس کاهش می یابد. منحنی E_A در میرایی ۲٪ بسیار به منحنی E_I نزدیک است؛ در حالی که، در میرایی ۷٪ سطح منحنی بسیار پایین است. تغییر مدل میرایی نیز تأثیر عمده ای بر E_H ندارد.

۲-۲-۳-۵ انرژی میرایی

افزایش نسبت میرایی موجب افزایش مقدار انرژی E_D می شود؛ اما، تغییر مدل میرایی تأثیری را در آن نشان نمی دهد.

۲-۲-۴-۵ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی تنها تابعی از جرم و سرعت سازه است؛ بنابراین، تغییر درصد و مدل میرایی اثر مشخصی بر مقدار آن ندارد.

نشان نمی دهند (بخش ۵-۵). در زلزله های ناغان و طیس چنین نیست. در زلزله ناغان انرژی هیسترتیک از الگوی انرژی ورودی پیروی می کند. در زمین لرزه های ال سنترال، گزلی و ناغان، انرژی میرایی هرچند همیشه کمتر از انرژی هیسترتیک است اما با افزایش طبقات روند افزایشی دارد؛ در حالی که در زمین لرزه طیس، غیر از قاب چهار طبقه، منحنی انرژی میرایی بالای منحنی انرژی هیسترتیک است. این امر می تواند به دلیل کم بودن نسبت PGA/PGV باشد که اثر سرعت زمین را بیشتر می نمایاند. پاسخ سرعت قابها در زلزله طیس نشان می دهد که اثر تشدید سرعت زمین در قابهای سخت تر به مراتب کمتر از قابهای نرم تر است؛ به همین دلیل، میزان انرژی میرایی با افزایش طبقات، رشد چشمگیری دارد.

۲-۲-۵ اثر PGA

در این بخش اثر زلزله های شدیدتر بر روی شکل و مقدار منحنی های انرژی بررسی می شود.

۲-۲-۱-۵ انرژی ورودی

تغییرات PGA تأثیری بر شکل کلی نمودار ندارد؛ اما، میزان انرژی ورودی را افزایش می دهد.

۲-۲-۲-۵ انرژی هیسترتیک

مقدار شتاب بیشینه تأثیری بر شکل کلی منحنی ندارد (شکل ۳)؛ اما، باعث افزایش آن می شود. آهنگ این افزایش بیش از افزایش انرژی ورودی است که بیانگر افزایش سطح خسارت سازه ای در زلزله هایی با شتاب بیشینه بالاتر است.

۲-۲-۳-۵ انرژی میرایی

افزایش PGA ، تغییری در شکل منحنی نمی دهد؛ اما، باعث افزایش مقدار آن می گردد. آهنگ این افزایش، نسبت به افزایش انرژی هیسترتیک کندتر است. به نظر می رسد با افزایش PGA ، توان میراکنندگی سازه کمتر و بخش عمده انرژی از طریق رفتار غیرارتجاعی تلف می شود.

۲-۲-۴-۵ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی در شکل منحنی تغییری نمی دهد؛ اما، به دلیل رابطه مستقیم PGA با PGV و در نتیجه سرعت پاسخ، مقدار انرژی افزایش می یابد.

۲-۲-۵ اثر نسبت و مدل میرایی (متناسب با سختی، متناسب با جرم، متناسب با جرم و سختی)

میرایی یک پارامتر سازه ای است که می تواند در چگونگی اتلاف انرژی مؤثر باشد. در این بخش تأثیرات این پارامتر بررسی می شود.

۲-۲-۱-۵ انرژی ورودی

تغییر درصد میرایی بر شکل تاریخچه زمانی تأثیری ندارد و در

تأثیر زلزله و \dot{v}_g شتاب زمین است. به منظور مستقل نمودن رابطه انرژی از جرم، که منجر به رابطه ای بین انرژی با شتاب زمین و سرعت پاسخ سیستم می شود، انرژی ورودی در واحد جرم تعریف شده [۴، ۵ و ۶] که مقدار بیشینه آن در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): انرژی ورودی بیشینه در واحد جرم با میرایی ۰.۵

زمین لرزه	PGA	انرژی ورودی بیشینه در واحد جرم (cm^2/s^2)			
		قاب چهار طبقه	قاب شش طبقه	قاب هشت طبقه	قاب ده طبقه
ال سنترو	0.35 g	۷۳۶۵/۶۸	۶۴۹۰/۴۵	۴۷۵۶/۳۶	۴۳۶۹/۹۱
ال سنترو	0.50 g	۱۴۶۳۳/۲۵	۱۱۴۹۴/۵۵	۸۷۶۹/۵۵	۷۹۹۶/۶۴
ال سنترو	0.65 g	۲۲۹۷۱/۷۵	۱۷۴۴۰/۰۰	۱۳۷۱۱/۷۱	۱۲۵۴۴/۹۱
گرلی	0.35 g	۷۲۵۱/۲۳	۱۰۸۰۰/۹۱	۱۴۵۲۹/۲۰	۱۳۷۹۳/۴۵
ناغان	0.35 g	۱۵۹۴/۱۳	۱۳۳۲/۷۷	۹۳۴/۸۴	۸۶۲/۰۹
طیس	0.35 g	۵۸۵۳/۳	۲۶۹۲/۲۷	۳۴۲۲/۳۵	۳۴۷۸/۰۹

نتایج نشان می دهد که بیشینه انرژی ورودی در واحد جرم به ازای $PGA=0.35g$ ، در قابهای شش، هشت و ده طبقه در زمین لرزه گرلی و در قاب چهار طبقه در زمین لرزه ال سنترو رخ داده است. هرچند تفاوت این مقدار برای زلزله های گرلی و ال سنترو در قاب چهار طبقه بسیار جزئی است، به نحوی که می توان زمین لرزه گرلی را به عنوان زلزله بحرانی برای این دسته از قابها و نگاشتهای فرض کرد؛ اما تحقیقات نشان می دهد که بیشینه انرژی ورودی به سازه، در زمین لرزه ای با Tg نزدیک به دوره تناوب اصلی سازه وارد می شود [۴ و ۵]. این مسأله معمولاً در سازه های بلند دوره و به دلیل تشدید رخ می دهد. در سازه های معمولی غالباً پاسخ بیشینه از شکل بارگذاری (نگاشت) پیروی می کند. بررسی پاسخ تغییر مکان و سرعت قابها نشانه بزرگنمایی بیشتر پاسخ در زلزله گرلی نسبت به ال سنتروست، که با افزایش دوره تناوب قابها بیشتر هم می شود. شاید این امر دلیل بحرانی بودن زلزله گرلی باشد؛ در حالی که پیروید غالب ال سنترو به دوره تناوب اصلی سازه ها نزدیکتر است.

- با مقایسه نتایج برای زلزله های ناغان و ال سنترو (که دارای Tg مشابه و طول مدت متفاوتند) اثر طول مدت جنبش بررسی می شود. میزان انرژی ورودی در کلیه سازه ها در زلزله ال سنترو بیشتر است (جدول ۴). هرچند نسبت این افزایش همانند نسبت مدت زمان دو زلزله نیست، اما تقریباً برای همه سازه ها در حدود مشابهی است. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که در دو زلزله با Tg و PGA همانند، اثر زلزله طولانی مدت بیشتر است.

- علی رغم افزایش طول مدت جنبش زمین در زلزله طیس، میزان انرژی آن نسبت به زلزله های ال سنترو و گرلی پایین تر است. این

به نظر می رسد پدیده $P-\Delta$ اثر قابل توجهی بر شکل و مقدار منحنی های انرژی ندارد. این امر با توجه به تعداد کم طبقات قابهای مورد مطالعه قابل قبول است؛ اما برای بیان حکم کلی، تحقیقات بیشتر بویژه در سازه های بلندمرتبه مورد نیاز است.

۵-۳- بیشینه انرژی ورودی

تاریخچه زمانی انرژی ورودی، مقدار انرژی وارده بر سازه را در هر لحظه زمانی نمایش می دهد؛ اما، آنچه از دیدگاه سازه ای حائز اهمیت است، میزان بیشینه آن و چگونگی برقراری توازن انرژی در این لحظه است. جدول (۲) مقدار انرژی ورودی بیشینه و زمان ثبت آن را نشان می دهد. در زمین لرزه های بلند مدت ال سنترو، گرلی و طیس، بیشینه انرژی ورودی در $\frac{1}{6}$ انتهایی نگاشت (تقریباً معادل انتهای زمان جنبش شدید) وارد می شود، در حالی که در زمین لرزه ناغان، این انرژی در زمانی نزدیکتر به ابتدای نگاشت وارد می شود. این امر می تواند به مدت زمان جنبش زمین مربوط باشد. حرکت رفت و برگشتی نسبتاً طولانی زمین در زلزله های بلند مدت، باعث انباشت انرژی ورودی و سیر افزایشی آن تا لحظات انتهایی پاسخ اجباری می شود؛ در حالی که، در زمین لرزه کوتاه مدت این اثر ناچیز است و عمده انرژی در حدود تکان اصلی (Tg) رخ می دهد. به نظر می رسد فرض ورود بیشینه انرژی در انتهای زمین لرزه در سازه های کوتاه و میان دوره [۴ و ۵] همیشه صحیح نیست؛ اما، در زلزله هایی با طول مدت نسبتاً زیاد، انرژی ورودی در انتهای جنبش تخمین مناسبی از بیشینه انرژی است.

جدول (۲): انرژی ورودی بیشینه در سازه های با میرایی ۰.۵

زمین لرزه	PGA	قاب چهار طبقه		قاب شش طبقه		قاب هشت طبقه		قاب ده طبقه	
		t (s)	E_I (ton-cm)	t (s)	E_I (ton-cm)	t (s)	E_I (ton-cm)	t (s)	E_I (ton-cm)
ال سنترو	0.35g	۹۰۱	۱۹/۱۲	۱۳۱۰	۱۸/۵۸	۱۳۲۰	۱۸/۳۶	۱۴۷۰	۱۷/۷۸
ال سنترو	0.5g	۱۷۹۰	۱۸/۷۴	۲۳۲۰	۱۸/۹۴	۲۳۶۰	۱۷/۹۲	۲۶۹۰	۱۸/۰۴
ال سنترو	0.65g	۲۸۱۰	۱۹/۱	۳۵۲۰	۱۸/۹۸	۳۶۹۰	۱۸/۰۴	۴۲۲۰	۱۷/۹۴
گرلی	0.35g	۸۸۷	۲۰/۴۸	۲۱۸۰	۱۷/۸	۳۹۱۰	۱۷/۸۲	۴۶۴۰	۲۰/۲
ناغان	0.35g	۱۹۵	۲/۸۲	۲۶۹	۳/۵۴	۲۵۴	۱/۹۶	۲۹۰	۱/۹۶
طیس	0.35g	۷۱۶	۲۴/۲۲	۱۲۷۰	۲۴/۶۲	۹۲۱	۲۴/۹۶	۱۱۷۰	۲۲/۴۶

۵-۳-۱- انرژی ورودی بیشینه در واحد جرم

انرژی ورودی انتگرال روی زمان است که از رابطه (۴) محاسبه می شود و بیانگر نسبت مستقیم انرژی ورودی با مقدار جرم سیستم است:

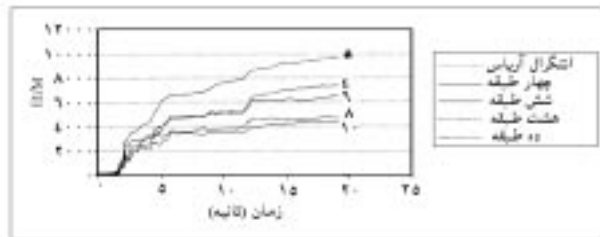
$$E_I = \int_0^T \{\dot{v}\}^T [M] \{\dot{v}\} dt \quad (4)$$

در این رابطه، $\{\dot{v}\}$ بردار سرعت سیستم، $[M]$ ماتریس جرم، $\{r\}$ بردار

تعاریف به کار رفته در بیان انرژی، شدت آریاس است که از رابطه (۵) به دست می آید [۷]:

$$I_{arias} = \frac{\pi}{2g} \int_{0.05}^{0.95} \ddot{v}_g^2(t) dt \quad (5)$$

پژوهشهای انجام شده بیانگر مطابقت بسیار مطلوب انتگرال شدت آریاس با منحنی انرژی ورودی بوده است. شکل (۵) این تطابق را برای زمین لرزه ال سنترو نشان می دهد. با استفاده از این خاصیت روابط (۶، ۷ و ۸) برای محاسبه بیشینه انرژی ورودی در واحد جرم سازه ها پیشنهاد شده است [۳].



شکل (۵): مقایسه انتگرال آریاس با انرژی در واحد جرم، زمین لرزه ال سنترو رابطه کوامورا- گالامبوس (۱۹۸۹):

$$\frac{EI}{m} = \frac{1}{8} T_1' \int_0^{t_D} \ddot{v}_g dt \quad (6)$$

رابطه فایفر- وی دیک- فی شینگر (۱۹۹۱):

$$\frac{EI}{m} = 2.2 \ddot{v}_g^2 \sqrt{t_D} \quad (7)$$

رابطه اصلاحی کوامورا- گالامبوس (۱۹۹۱):

$$\frac{EI}{m} = \frac{1}{5} T_1' \int_0^{t_D} \ddot{v}_g^2 dt \quad (8)$$

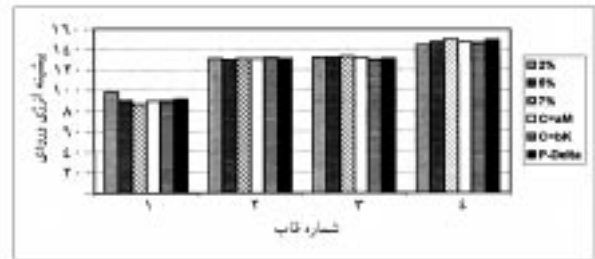
در این روابط، t_D مدت جنبش زمین و T_1' دوره تناوبی است که از رابطه (۹) محاسبه می شود:

$$T_1' = 4.3 \frac{PGV}{PGA} \quad (9)$$

جدول (۶) مقادیر محاسبه شده از روابط (۶، ۷، ۸ و ۹) را نشان می دهد. مقایسه جدول (۶) با جدول (۳) نشان می دهد که این روابط تخمین تقریبی از نتایج واقعی اند. برای زمین لرزه طیس روابط دست بالاست که دلیل آن بحرانی نبودن این زلزله برای قابهای مورد مطالعه است؛ اما به نظر می رسد رابطه (۸) تخمین نسبتاً مناسبی از بیشینه انرژی ورودی در واحد جرم، برای زمین لرزه های بحرانی ال سنترو و گزلی است.

امر می تواند به دلیل بالا بودن دوره تناوب غالب آن و یا به عبارتی کم بودن مقدار PGV/PGV در آن باشد که بزرگنمایی کمتری را در پاسخ قابها ایجاد می کند [۳].

تغییر درصد یا مدل میرایی اثر قابل توجهی در میزان بیشینه انرژی در واحد جرم ندارد (شکل ۴).



شکل (۴): اثر درصد و مدل میرایی بر انرژی ورودی بیشینه (زمین لرزه ال سنترو، $PGA=0.35g$)

پدیده $P-\Delta$ در انرژی ورودی به این دسته از قابها تأثیر قابل ملاحظه ای ندارد (شکل ۴).

نسبت بیشینه انرژی ورودی در واحد جرم کاملاً متناسب با مجذور نسبت PGA است (جدول ۵).

جدول (۴): اثر مدت زمان جنبش زمین بر انرژی ورودی ($PGA=0.35$)

ده طبقه	هشت طبقه	شش طبقه	چهار طبقه	
۵/۰۷	۵/۰۴	۴/۴۷	۴/۶۲	نسبت انرژی ورودی بیشینه ال سنترو به ناغان
۵/۷۵	۵/۹۴	۵/۰۲	۴/۶۴	نسبت انرژی ورودی در انتهای جنبش زمین در ال سنترو به ناغان
				نسبت مدت زمان نگاشت ال سنترو به ناغان
۳/۸۴				

جدول (۵): اثر PGA در انرژی ورودی بیشینه، زمین لرزه ال سنترو، میرایی متناسب ۵٪

EI_5/EI_{65}	EI_{35}/EI_{65}	EI_{35}/EI_5	
۰/۶۳۷	۰/۳۲۱	۰/۵۰۳	قاب چهار طبقه
۰/۶۵۹	۰/۳۷۲	۰/۵۶۵	قاب شش طبقه
۰/۶۴۰	۰/۳۴۷	۰/۵۴۲	قاب هشت طبقه
۰/۶۳۷	۰/۳۴۸	۰/۵۴۶	قاب ده طبقه
۰/۷۶۹	۰/۵۴	۰/۷	نسبت PGA
۰/۵۹۲	۰/۲۹۲	۰/۴۹۰	مجذور نسبت PGA

۲-۳-۵- تخمین انرژی ورودی

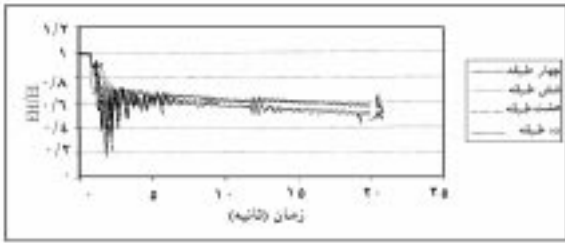
برای تخمین میزان انرژی وارده به سازه ها، روابط و فرمولهایی ارائه شده است که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از

جدول (۶): مقایسه شدت آریاس با مقادیر E_I/m بیشینه

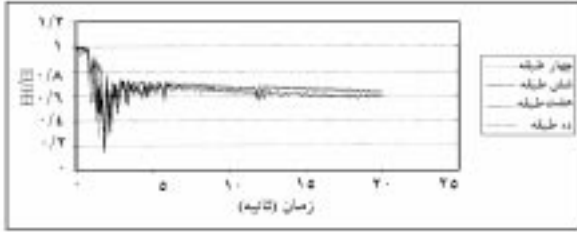
زمین لرزه	شدت آریاس (cm^2/s^3)		$E_I/m(cm^2/s^3)$			
	0.5~.75	0.5~.95	قاب چهار طبقه	قاب شش طبقه	قاب هشت طبقه	قاب ده طبقه
ال سنترو	۶۷۵۳۶	۸۶۸۳۲	۷۳۶۵/۷	۶۴۹۰/۵	۴۷۵۶/۴	۴۳۶۹/۹
گزلی	۸۵۳۱۶	۱۰۹۶۹۲	۷۲۵۱/۲	۱۰۸۰۰/۹	۱۴۵۲۹/۲	۱۳۷۹۳/۵
ناغان	۳۰۲۱۱	۳۸۸۴۲	۱۵۹۴/۱۳	۱۳۳۲/۸	۹۴۳/۸	۸۶۲/۱
طیس	۷۹۲۸۹	۱۰۱۹۴۳	۵۸۵۳/۳	۶۲۹۲/۳	۳۴۲۲/۴	۳۴۷۸/۱

۵-۴- نسبت انرژی هیسترتیک به انرژی ورودی

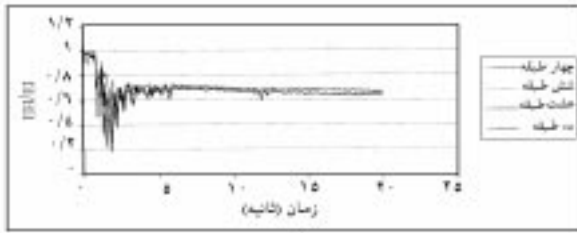
رفتار سازه ای در زمین لرزه مطلوب است که قادر به اتلاف مقادیر قابل توجهی انرژی از طریق رفتار غیرارتجاعی و حلقه های هیسترتیزس وسیع باشد. از سوی دیگر، چنین رفتاری موجب وارد آمدن خسارات سازه ای غیرقابل برگشت خواهد شد. از این دیدگاه، اتلاف انرژی در رفتار هیسترتیک باید دارای توجیه اقتصادی بوده، هزینه های بازسازی و ترمیم نیز در آن منظور گردد. از این رو نسبت انرژی هیسترتیک به انرژی ورودی می تواند بیانگر سطح خسارت کل در سازه ها باشد (شکل های ۶ و ۷).



الف



ب



پ

شکل (۷): تاریخچه زمانی نسبت E_H/E_I در قابهای چهارگانه تحت اثر زمین لرزه

ال سنترو الف: $PGA=0.35g$ ، ب: $PGA=0.5g$ ، پ: $PGA=0.65g$

(میرایی پنج درصد متناسب با جرم و سختی)

بررسی شکلها نشان می دهد که در کلیه منحنی ها سه قسمت متشابه قابل تشخیص است:

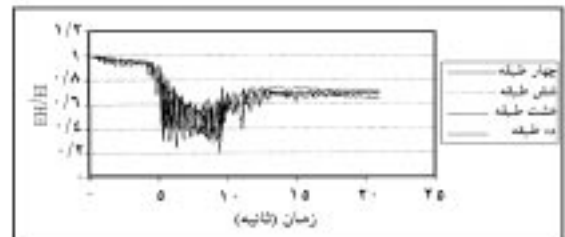
- آغاز زمین لرزه که در آن E_H/E_I از مقدار ۱ حالت بارگذاری ثقلی) آغاز می شود؛

- ثانیه های آغازین زلزله که نوسانات E_H/E_I بسیار شدید و نامنظم است و در کلیه موارد تا پیش از دوره تناوب غالب زمین (یا به صورت دقیقتر دوره تناوب بیشینه بزرگنمایی پاسخ سازه) ادامه دارد؛

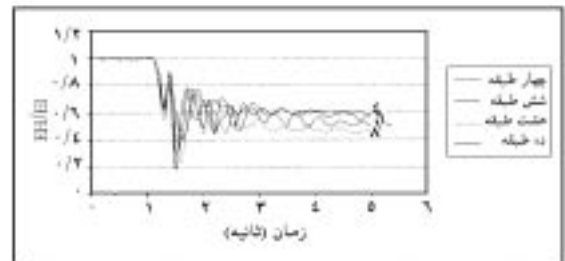
- انتهای زمین لرزه که در آن نوسانات نسبت E_H/E_I بسیار جزئی است و مقدار آن در کلیه قابها پیرامون عدد ثابت و معینی است. بدین ترتیب به نظر می رسد که می توان عدد ثابتی را برای این نسبت پیشنهاد نمود؛ زیرا، عمده انرژی زلزله پس از T_g به سیستم وارد می شود که متناظر با همین عدد ثابت می باشد.

۵-۴-۱- اثر زمین لرزه

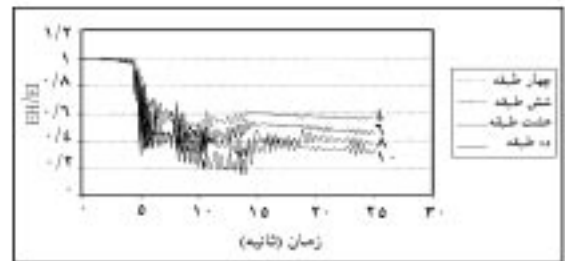
در زمین لرزه ناغان این نسبت از ۰/۴۸ برای قاب هشت طبقه تا ۰/۶ برای قاب چهار طبقه و در زلزله طیس از ۰/۳۲ برای قاب ده طبقه تا ۰/۶



الف



ب



پ

شکل (۶): تاریخچه زمانی نسبت E_H/E_I در قابهای چهارگانه تحت اثر زمین لرزه

الف: گزلی، ب: ناغان، پ: طیس، $PGA=0.35g$ ، میرایی

پنج درصد متناسب با جرم و سختی)

۵-۴-۵- تحقیق رابطه فایزر و همکاران

رابطه ارائه شده برای محاسبه نسبت E_H / E_I برای ساختمانهای بتن مسلح معمولی با نسبت میرایی پنج درصد [۸] با نتایج محاسباتی مقایسه شده است:

$$\frac{E_H}{E_I} = C_E \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right)^{C_H} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، C_E و C_H ضرایب متناسب با مدل میرایی می‌باشند [۸]. جدول (۸) دست بالا بودن این رابطه را نشان می‌دهد، که پوشش مناسبی برای مقادیر به دست آمده است.

جدول (۸): اثر نگاهت بر نسبت E_H/E_I (PGA=0.35g)، نسبت میرایی

متناسب پنج درصد

نسبت E_H/E_I			زمین لرزه
رابطه (۱۰)	حد بالایی	حد پایینی	
۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۵۲	ال سنتر
۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۶۵	گرلی
۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۴۸	ناغان
۰/۷۰	۰/۶۰	۰/۳۲	طبس

۵-۵- توزیع انرژی در طبقات ساختمان

میزان انرژی وارده به سازه و چگونگی جذب و اتلاف آن، می‌تواند بیانگر واکنش کلی سازه باشد؛ اما، مدلی از چگونگی رفتار آن را نمایش نمی‌دهد. میزان انرژی هیسترتیک در یک سازه، شاخصی از سطح خسارت سازه، یا میزان شکل پذیری آن است؛ اما نمی‌تواند بیانگر توزیع خسارت در اجزای مختلف آن و نوع سازوکار تسلیم یا فرو ریزش باشد. ضمن اینکه بیان انرژی در حالت کلی، همستگی بالایی با ویژگیهای سازه‌ای ندارد. حال آنکه توزیع انرژی در سازه، تا حدود زیادی از مدل سازه‌ای و خصوصیات آن پیروی می‌کند. به عبارت دیگر، آن بخش از مفهوم انرژی که متأثر از طراحی است، اتلاف انرژی در اعضای سازه‌ای است. به همین دلیل، در این بخش انرژی جذب و تلف شده در طبقات ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مطالعه اعضای تیر و ستون هر طبقه، به عنوان اعضای آن طبقه فرض شد و مجموع انرژی جذب و تلف شده در آنها، به عنوان انرژی طبقه تعریف شد. هرچند ممکن است این دسته بندی، کاملاً بر مفهوم اتلاف انرژی طبقات منطبق نباشد، اما در ارائه دیدگاهی کلی مفید است. شکل‌های (۸) و (۹) منحنی‌های به دست آمده برای قاب هشت طبقه را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که منحنی انرژی میرایی

برای قاب چهار طبقه متغیر است. به نظر می‌رسد در زمین لرزه‌های غیر بحرانی، رفتار سازه در جذب انرژی، از خصوصیات آن متأثر است و قاب صلب چهار طبقه بیشترین مقدار انرژی ورودی را از طریق رفتار هیسترتیز تلف می‌کند. در زلزله‌های بحرانی ال سنتر و گرلی به نظر می‌رسد رفتار سازه در جذب و اتلاف انرژی از خصوصیات سازه مستقل است؛ زیرا این نسبت در قابهای مختلف تقریباً مقدار یکسانی دارد. با توجه به اینکه حد بالای E_H / E_I برای کلیه زلزله‌ها مشابه است می‌توان این نسبت را با تقریب مناسبی، مستقل از نگاهت ورودی و خصوصیات سازه فرض کرد.

۵-۴-۲- اثر PGA

حد بالایی نسبت E_H / E_I ، از ۰/۶ برای $PGA=0.35g$ به ۰/۶۵ برای $PGA=0.5g$ و ۰/۶۹ برای $PGA=0.65g$ می‌رسد. این امر می‌تواند نمایانگر استفاده بیشتر از ظرفیت هیسترتیز سازه، در زمین لرزه‌های بزرگتر باشد. ضمن اینکه با بالا رفتن PGA ، نسبت محاسبه شده برای قابهای مختلف به یکدیگر نزدیکتر می‌شود.

۵-۴-۳- اثر نسبت و مدل میرایی

افزایش نسبت میرایی، باعث کاهش قابل توجه نسبت E_H / E_I می‌شود. این امر نمایانگر اثر قابل توجه میراگرها در کاهش خسارات سازه‌ای است؛ اما، مدل میرایی اثر قابل توجهی بر این نسبت ندارد. جز اینکه اختلاف مقدار نسبت برای قابهای مختلف در مدل متناسب با سختی بیش از مدل متناسب با جرم و سختی و هر دو بیشتر از مدل متناسب با جرم است که شاید دلیل آن رفتار نرمتر سازه‌های بلند و در نتیجه کاهش سختی باشد که بر مقدار انرژی میرایی اثر می‌گذارد (جدول ۷).

جدول (۷): اثر خصوصیات میراکنندگی سازه بر نسبت E_H/E_I

نسبت میرایی پنج درصد	میرایی پنج درصد مدل متناسب با جرم و سختی		مدل میرایی متناسب با جرم و سختی		تحلیل مرتبه دوم	حد بالایی E_H/E_I (۱۰)
	متناسب با جرم	متناسب با سختی	بدون اثر $P - \Delta$	اثر $P - \Delta$		
۰/۶۲	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۸۰	۰/۸۰
۰/۶۴	۰/۷۵	۰/۷۰	۰/۷۰	-	-	-

۵-۴-۴- اثر $P - \Delta$

در قابهای مورد مطالعه $P - \Delta$ کوچکترین تأثیری نشان نمی‌دهد؛ اما، برای تعمیم به سایر موارد نیاز به مطالعات بیشتر بویژه در سازه‌های بلند مرتبه است (جدول ۷).

تنها بخش متناسب با سختی آن است که برای اعضا قابل محاسبه است.

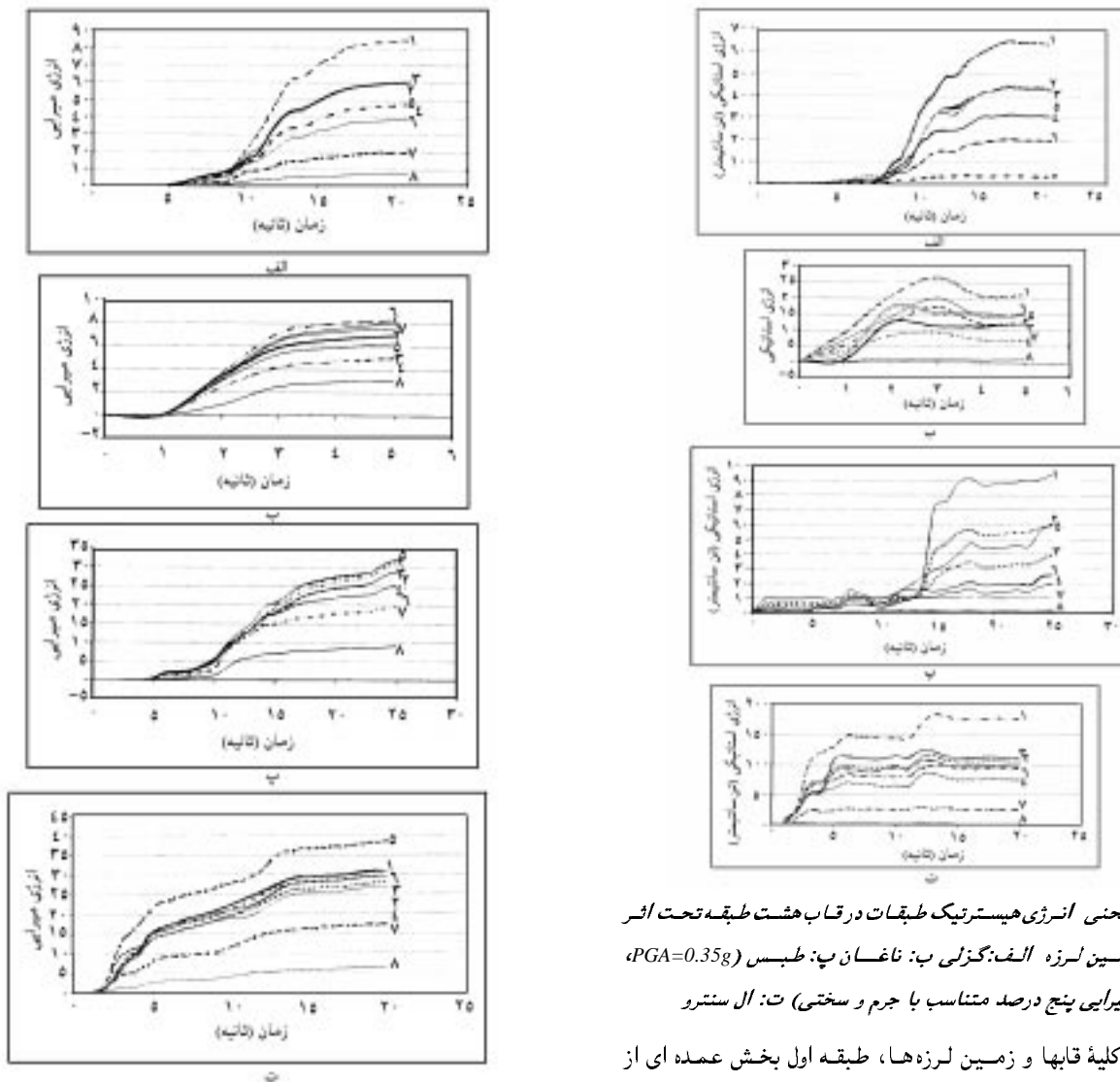
۶-۵- خصوصیات منحنی انرژی طبقات

اهم این ویژگیها عبارتند از:

- شکل کلی نمودارها با شکل منحنی کل ساختمان مطابقت دارد.
- منحنی ها دارای روند فزاینده ای می باشند و می توان مقدار انرژی در انتهای جنبش را به عنوان مقدار بیشینه آن فرض کرد.
- در کلیه قابها و زمین لرزه ها، طبقه انتهایی مشارکت ضعیفی در اتلاف انرژی در رفتار هیستریزس دارد و به نظر می رسد مطلقاً وارد ناحیه غیرخطی نمی شود. این نتیجه با منحنی هیستریزس طبقات کاملاً مطابقت دارد [۳]. انرژی میرایی در این طبقات نیز کمتر است؛ اما، نسبت به انرژی هیستریک سطح بالاتری دارد.

میرایی می توان مشاهده کرد طبقاتی که اتلاف انرژی بالاتری داشته اند در جذب آن نیز قوی تر عمل کرده اند؛ اما، به طور کلی توزیع انرژی میرایی در ساختمان، یکنواخت تر از انرژی هیستریک است.

- با افزایش PGA سطح منحنی ها افزایش می یابد. این افزایش در منحنی انرژی هیستریک طبقات نرمتر کمتر از سایر طبقات است که می تواند بیانگر استفاده از کل ظرفیت سازه در اتلاف انرژی در PGA بالاتر باشد. هرچند در عمل ممکن است سازه مدتها پیش از رسیدن به این مرحله با تشکیل سازوکار تسلیم فرویزد.
- افزایش PGA بدون اینکه در الگوی توزیع انرژی تغییر محسوس ایجاد کند، رفتار سازه را یکنواخت تر می نماید (شکل ۱۰).



شکل (۸): منحنی انرژی هیستریک طبقات در قاب هشت طبقه تحت اثر

زمین لرزه الف: گزلی ب: ناغان پ: طیس (PGA=0.35g)

میرایی پنج درصد متناسب با جرم و سختی) ت: ال سنتر

- در کلیه قابها و زمین لرزه ها، طبقه اول بخش عمده ای از اتلاف انرژی را به عهده دارد. اگرچه این مقدار همیشه بیشینه نیست اما بیانگر رفتار نرم طبقه اول است. در مورد انرژی

شکل (۹): منحنی انرژی میرایی طبقات قاب هشت طبقه تحت اثر زمین لرزه

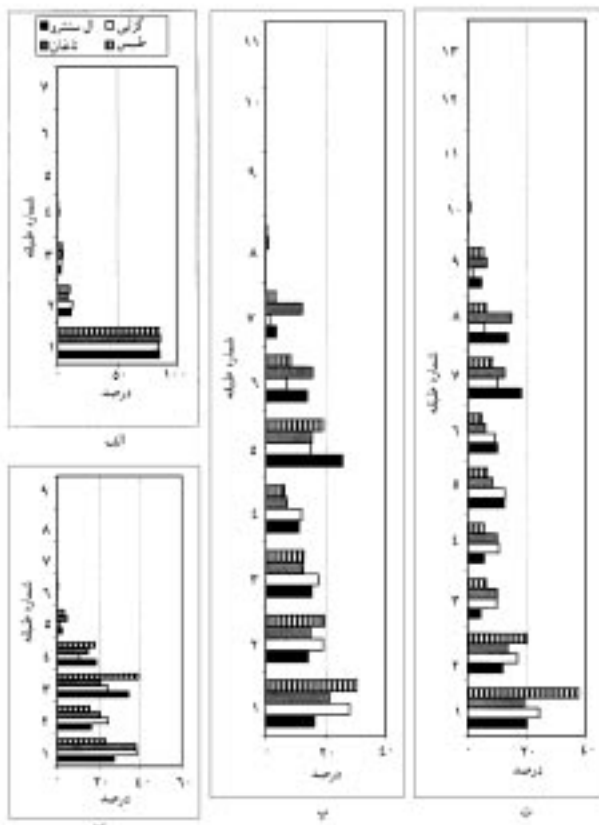
الف: گزلی ب: ناغان پ: طیس ت: ال سنتر

به دلیل تشکیل مفاصل خمیری در این رفتار سهم بسزایی دارند. با افزایش طبقات، مشارکت طبقات در اتلاف انرژی یکنواخت تر می‌شود و در کلیه قابها، در محل تغییر مقطع که موجب قویتر یا ضعیفتر شدن ناگهانی طبقه می‌شود، میزان انرژی هیسترتیک مقدار اوجی را نشان می‌دهد. انرژی در ستونها نیز در محل تغییر مقطع، معمولاً بیشتر از تیرها مشاهده می‌شود. این نتایج با نمای پراکندگی مفاصل خمیری [۳] همخوانی مطلوبی دارد.

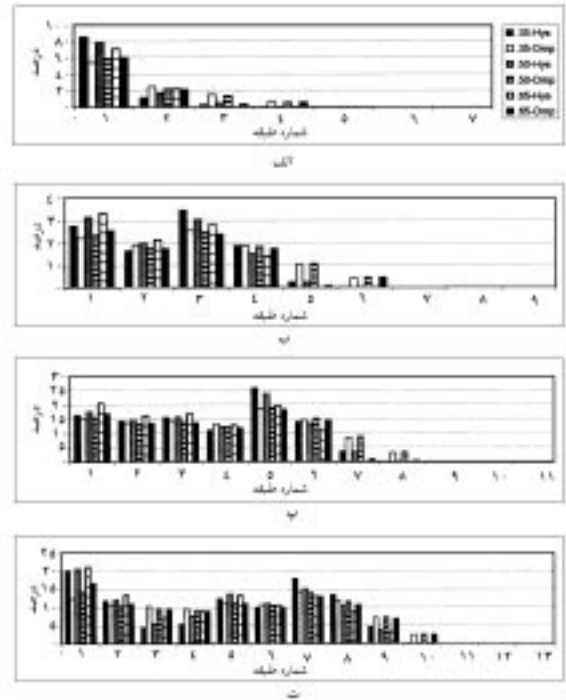
۶- نتایج

اگرچه برای دستیابی به نتایج دقیق نیاز به بررسی نمونه های بسیار بیشتری از قابها و ساختمانها می‌باشد، اما اهم نتایج به دست آمده از این بررسی عبارتند از:

- ۱- شکل تاریخچه زمانی انرژی ورودی بشدت متأثر از نگاشت ورودی است، که می‌توان آن را مشابه اتنگرال آریاس دانست.
- ۲- مقدار انرژی در انتهای جنبش را در سازه های میان مرتبه و زمین لرزه های با مدت زمان متوسط می‌توان تخمینی از مقدار پیشینه آن دانست و از روابط ساده محاسبه نمود.



شکل (۱۱): اثر زمین لرزه بر روی الگوی توزیع انرژی طبقات الف: چهار طبقه، ب: شش طبقه، پ: هشت طبقه، ت: ده طبقه



شکل (۱۰): اثر افزایش PGA بر روی الگوی توزیع انرژی طبقات الف: چهار طبقه، ب: شش طبقه، پ: هشت طبقه، ت: ده طبقه

با افزایش نسبت میرایی، انرژی میرایی افزایش و انرژی هیسترتیک کاهش می‌یابد. این افزایش در منحنی میرایی طبقات با میراکنندگی بالا بیشتر است. علاوه بر آن، افزایش نسبت میرایی، باعث تمرکز اتلاف انرژی هیسترتیک در یک طبقه می‌شود و با کاهش آن الگوی توزیع این انرژی در طبقات مختلف یکنواخت تر می‌شود.

- مدل میرایی و $P-\Delta$ تأثیری بر منحنی های انرژی نشان نمی‌دهند.
- تغییر نگاشت ورودی (زمین لرزه)، الگوی توزیع انرژی را در قابهای بلندتر تغییر می‌دهد؛ در حالی که، قاب چهار طبقه حساسیتی نسبت به آن نشان نمی‌دهد. شاید این امر به دلیل تأثیر مدهای بالاتر باشد؛ اما، در هر حال طبقات نرمتر سازه (طبقه اول یا طبقه دارای تغییر مقطع) بیشترین مقدار انرژی را تلف می‌کنند (شکل ۱۱).

۵-۲- درصد اتلاف و جذب انرژی در تیرها و ستونها

به منظور بررسی رفتار تیرها و ستونها، درصد جذب و اتلاف انرژی مجموعه تیرها یا ستونهای یک طبقه محاسبه شد (شکل ۱۲). بررسی نمودارها نشان داد که طبقات انتهایی در اتلاف انرژی مشارکت چندانی ندارند. به عبارت دیگر، طبقات انتهایی عموماً قویتر از آنچه لازم است ساخته می‌شوند. در کلیه قابها طبقه اول رفتار نرمی دارد و ستونها نیز

۳- این بررسی نشان داد که تغییر PGA باعث تغییر مقدار انرژی ورودی متناسب با توان دوم نسبت آن می شود.

۴- نسبت E_H / E_I برای سازه هایی با شکل پذیری یکسان تقریباً مقدار مشابهی است.

۵- درصد میرایی تأثیر قابل توجهی بر E_H / E_I دارد.

۶- توزیع انرژی هیسترتیک در طبقات بشدت متأثر از طراحی است و می تواند شاخص مناسبی از خسارت باشد.

۷- در طراحی بر پایه مقاومت، به نظر می رسد طبقات انتهایی دارای ظرفیتی بسیار بیشتر از مقاومت مورد نیازند.

۸- طبقه اول به دلیل تشکیل مفاصل خمیری در پای ستونها نقش عمده ای در اتلاف انرژی هیسترتیک دارد.

(به عبارت دیگر خسارت) جستجو نمود که به روش جدیدی در توزیع برش پایه منجر شود؛ به گونه ای که هر طبقه باید با مقاومتی بهینه طراحی شود تا کلیه طبقات ساختمان خسارت یکسانی را بپذیرند و سازه بتواند از حداکثر ظرفیت خود استفاده نماید. مطمئناً در چنین طرحی نیاز به در نظر گرفتن تفصیلات ویژه ای برای تیرها و ستونهاست تا پراکندگی مفاصل خمیری مطابق با الگوی فرو ریزش باشد. ضمن اینکه محدودیتهای اجرایی خواه ناخواه موجب انحراف رفتار واقعی سازه از رفتار مطلوب خواهد شد، اما به نظر می رسد در این زمینه به مطالعه و تحقیق بیشتری نیاز می باشد تا اثر پارامترهای دیگر همچون تغییر مکان نسبی طبقات و ظرفیت کم انحنای اعضا در طبقات فوقانی نیز مدنظر قرار گیرد.

۷- مراجع

1-Bertro V.V., Vang C. M., 1988, "Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake Resistant Design", UCB/EERC 88/18, University of California, Berkely.

۲- عرب زاده، فرهاد؛ غفوری آشتیانی، محسن. "بررسی فلسفه طرح ظرفیت و مقایسه آن با آیین نامه ACI از دو دیدگاه رفتار سازه در برابر زلزله و اقتصاد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۶.

۳- ملکی، هاله؛ غفوری آشتیانی، محسن. "انرژی زمین لرزه در سازه های قاب خمشی بتن مسلح"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۷.

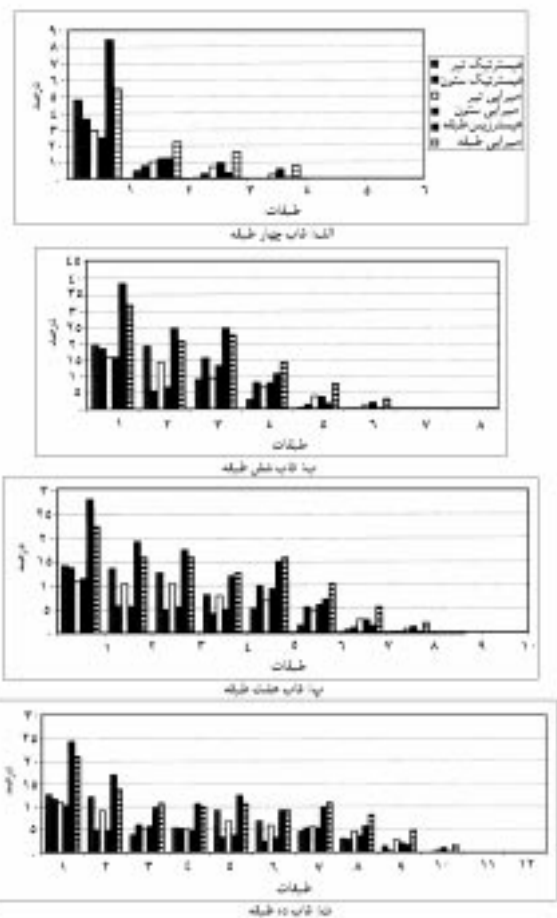
4-Fajfar P., & Vidic T., & Fischinger M., 1989, "Seismic Demand in Medium and Long Period Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18 (1989) PP. 1133-1144.

5-Fajfar P., & Vidic T., & Fischinger, M., 1991, "On the Energy Input Into Structures", Proc. Pacific Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.

6-Akyama, H., 1985, "Earthquake Resistant Limit-State Design for Buildings", University of Tokyo Press,

7-Arias, A., 1970, "A Measure of Earthquake Intensity" in Seismic Design for Nuclear Power Plants, ed. Hansen R.J., Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Mass.

8-Fajfar, P., & Vidic, T., & Fischinger M., 1994, "Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23



شکل (۱۲): درصد انرژی در تیرها و ستونها، زمین لرزه کزلی

۹- به نظر می رسد با در اختیار داشتن انرژی ورودی بیشینه به سازه از طریق روابط ساده و محاسبه انرژی هیسترتیک از نسبت E_H / E_I ، می توان شیوه ای برای توزیع این انرژی

