

بررسی انرژی‌های داخلی لرزه‌ای غیرخطی

در سازه‌های بتنی مسلح

غلامرضا قدرتی امیریⁱ؛ امید فریدونیⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، با توجه به اثبات ضعف روش سنتی در پیش‌بینی صحیح رفتار سازه‌ها در برابر زلزله، سعی شده است تا با بررسی کلی روش نوین انرژی در طرح لرزه‌ای سازه‌ها، که بنیان توجیه علمی اکثر روش‌های پیشنهادی پژوهشگران است، با آن به عنوان یک روش مستقل طراحی برخورد شود و در ادامه، معادلات بنیادی صورت‌های مختلف انرژی‌های لرزه‌ای در معادله تعادل انرژی سازه تعریف شده است. این انرژی‌های لرزه‌ای برای تعدادی سازه بتنی مسلح چند درجه آزاد با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی در راستای ارائه فرمول‌بندی‌های کاربردی برای آیین‌نامه‌های زلزله محاسبه شدند؛ سپس با تجزیه و تحلیل نمودارهای تاریخچه‌زمانی آنها ارزیابی کلی از صورت‌های مختلف انرژی به عنوان بنیانی برای کاربرد عملی این روش در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه شده است.

کلمات کلیدی

طراحی لرزه‌ای، انرژی‌های لرزه‌ای سازه‌ها، سازه‌های بتنی مسلح

Investigation of Nonlinear Internal Seismic Energy in R.C. Structures

G. Ghodrati Amiri; O. Fereidooni

ABSTRACT

It has been proved that increasing structural strength as the unique parameter in the common design method does not suffice safety or the reduction of structural damages. Different researches showed that the earthquake destructive effects are affected by seismic input energy, received by structure during the ground motion that its prediction is not possible by nonlinear strength response spectra or even displacement response spectra. In this research, some common RC structures have been chosen, and nonlinear time history dynamic analyses of these designed structures have been performed. Based on the results of this procedure and basic structural seismic energy equations, values of different energy parameters in the structures have been calculated and their time history graphs have been drawn. By investigation on these graphs, it is evident that by using energy concepts, the most of effective structural seismic behaviour parameters are justified and applicable in the seismic design procedure.

KEYWORDS

Seismic design, Structural seismic energies, R.C. structures.

i دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران: ghodrati@iust.ac.ir

ii کارشناس ارشد مهندسی عمران - زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

لرزه‌ای سازه‌ها به یک تحول متکی بر تغییر بنیان طراحی از مقاومت به تغییر شکل نزدیک می‌شود [۶].

پیشگامان روش طراحی بر اساس تغییر شکل، برای توجیه فرایند طراحی پیشنهادهای خود از مفاهیم انرژی بهره می‌گیرند. در واقع، انرژی لرزه‌ای سازه‌ها بنیان اصلی کلیه تئوری‌های طراحی لرزه‌ای مبتنی بر تغییر شکل است و اکثر پارامترهای موثر در فرایند طراحی در قالب آن، قابلیت توجیه و یا ارضا می‌یابند. بر همین اساس، یک روند پژوهشی برای ارائه روشی جدید؛ که بتواند مستقیماً از مفهوم انرژی و پارامترهای آن استفاده کند، آغاز شد تا روشی بنیادی‌تر و منطبق‌تر بر واقعیت پیشنهاد شود. [۱۰]

۲- تاریخچه تحقیقات

نخستین بار در سال ۱۹۵۶، Housner [۱۱] یک تحلیل از طراحی حدی بر اساس انرژی را پیشنهاد کرد که در آن ظرفیت جذب انرژی کافی سازه در برابر زلزله‌های بزرگ، به‌عنوان عامل اطمینان و سلامتی سازه مطرح می‌شد. وی عقیده داشت زلزله، انرژی را به سازه وارد می‌سازد که قسمتی از آن استهلاک پیدا کرده و قسمتی دیگر به‌صورت انرژی جنبشی (حرکت جرم) و انرژی کرنشی (تغییر شکل قابل برگشت اعضای سازه) باقی می‌ماند.

به دلیل وجود مسائل متعدد در برآورد انرژی نیاز و ظرفیت و نقش آنها در فرایند طراحی، برای حدود یک ربع قرن، مفاهیم مربوط به انرژی نادیده گرفته شد؛ ولی بعدها تقریباً از اوایل دهه نود به بعد، بحث استفاده از مفاهیم انرژی در طرح لرزه‌ای سازه‌ها، توجهات زیادی را به‌خود جلب کرد و موضوع انرژی به‌طور جدی‌تری دنبال شد. در سال ۱۹۸۴ Zahrah و Hall [۱۲] پارامترهای مؤثر در جذب انرژی لرزه‌ای در سیستم‌های یک درجه آزاد را بررسی کردند و امکان در نظرگیری تعداد سیکل‌های پلاستیک معادل، به‌عنوان یک مشخصه مهم در طراحی لرزه‌ای را؛ که بر اساس انرژی پسماند محاسبه می‌شد، خاطر نشان ساختند. Akiyama [۱۳] در سال ۱۹۸۵ کتابی را در زمینه طراحی حالت حدی سازه‌ها منتشر ساخت که در آن به تشریح اصول اولیه روش انرژی با استفاده از روش Housner احتیاط ورزید و بر این اساس، روشی را برای طراحی سازه‌های فولادی ارائه کرد. بررسی عمیق و دقیق‌تر پارامترهای انرژی در معادله تعادل لرزه‌ای به وسیله Uang و Bertero [۱۴]، به ارائه دو حالت مختلف برای معادله تعادل انرژی با تعاریف ریاضی منجر شد. ضمن اینکه ژرف‌نگری موجود در مطالعات آنها بعضی نکات انحرافی موجود را در تحقیقات قبل از این تحقیق، در خصوص انرژی

زلزله به عنوان یک پدیده کاملاً تصادفی و مخرب، اکثر تحقیقات سال‌های اخیر پژوهشگران سازه را به خود معطوف کرده است. ماهیت ناشناخته زلزله و اثرات متفاوت آن بر روی سازه‌های مختلف، مجهولات روش‌های طراحی لرزه‌ای را متعدد و زیاد کرده است. تلاش پژوهشگران بر آن استوار است تا با شناخت کافی از این پدیده، فرمولاسیون و روش مناسبی را برای مقابله با آن و یا کاستن اثرات مخرب آن ارائه دهند تا ایمنی کافی برای سلامت جانی انسان‌ها فراهم شود.

در دهه ۶۰ میلادی، فلسفه طراحی بر اساس مقاومت سازه برای درجات مختلف شکست در برابر بارهای وارده احتمالی در مدت زمان بهره‌برداری بوده است. با پیشرفت‌های صورت گرفته در دهه ۷۰ میلادی، طراحی بر اساس مقاومت برای دو حد مختلف (حد سرویس‌دهی و حد فروریزش) صورت می‌گرفت. در روش طراحی بر اساس مقاومت، زلزله با یک سری نیروهای جانبی مدل می‌شود که پارامتر کلیدی حل مسائل سختی است و اعضای سازه به نحوی طرح می‌شوند که ظرفیت مقاومتی لازم را در شکل‌پذیری‌های تسلیم و محلی داشته باشند. ضریب شکل‌پذیری صرفاً به صورت کلی و برای همه سازه محاسبه شده و شکل‌پذیری اعضا به طور مستقل بررسی نمی‌شود. [۵] در سال‌های اخیر، ثابت شده است که افزایش مقاومت نمی‌تواند ایمنی را کاملاً تامین کند و یا مقدار خسارت را کاهش دهد. [۶] در واقع، نحوه توزیع مقاومت بسیار مهم‌تر از بحث برش پایه است که در روش‌های سنتی طراحی به اندازه کافی به آن توجه نمی‌شود. پس از رخ دادن زلزله‌های مخرب در سال‌های اخیر و وارد آمدن خسارات سنگین جانی و مالی خصوصاً زلزله‌های Kobe (1995) [۷] و Northridge (1994) [۸] که ضعف روش طراحی لرزه‌ای مرسوم را ثابت می‌کرد، نیاز به تغییر در بنیان آیین‌نامه‌های لرزه‌ای کاملاً احساس شد. با وجود اینکه روش‌های مختلفی برای توجیه رفتار لرزه‌ای سازه و جایگزینی یا اصلاح روش سنتی پیشنهاد شده است؛ ولی هنوز هیچ روشی تا آن حد گسترش نیافته است که بتواند پاسخگوی همه مسائل علمی و عملی باشد [۹]. در میان روش‌های پیشنهادی، روش طراحی بر اساس تغییر شکل سازه، با توجه به ملموس بودن آن، بسیار مورد توجه قرار گرفته و پیشرفت نسبتاً خوبی داشته است. یکی از دلایل گرایش به سوی این روش، آن است که اکثر مهندسين طراح به ایجاد تغییر شکل سالم در سازه تحت اثر زلزله‌های مخرب و بزرگ توجه خاصی دارند که با پیشرفت‌های صورت‌گرفته به نظر می‌رسد که طرح مقاوم

در طرح لرزه‌ای سازه‌ها، تعدادی سازه بتنی مسلح متعارف با استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی بررسی و مطالعه شد که خلاصه شرح عملیاتی انجام شده، همچنین نتایج حاصل از این عملیات‌ها در این مقاله ذکر شده است.

۳- معادلات انرژی در سیستم یک درجه آزاد

به عنوان مقدمه، لازم است که معادلات دینامیکی تعادل سیستم یک درجه آزاد تحت اثر جنبش زمین یادآوری شود: [۲۰]

$$m\ddot{v}_i + c\dot{v}_i + f_s = 0 \quad (1)$$

در این معادله، c ضریب میرایی لزج، m جرم سیستم، v_i تغییر مکان مطلق، v تغییر مکان نسبی و f_s مقدار نیروهای خارجی وارد بر سیستم است. اگر تغییر مکان لرزه‌ای زمین فرض شود:

$$v_i = v + v_g \quad (2)$$

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + f_s = -m\ddot{v}_g \quad (3)$$

الف) انرژی مطلق: انتگرال‌گیری از رابطه (۳) نسبت به تغییر مکان نسبی v در کل زمان زلزله رابطه زیر را نتیجه خواهد داد:

$$\int m\ddot{v}_i dv + \int c\dot{v} dv + \int f_s dv = 0 \quad (4)$$

که با کمک رابطه (۲) رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$\int m\ddot{v}_i dv = \int m\ddot{v}_i (dv_i - dv_g) = \int m \frac{dv_i}{dt} dv_i - \int m\ddot{v}_i dv_g = \frac{1}{2} m\dot{v}_i^2 - \int m\ddot{v}_i dv_g \quad (5)$$

اکنون تعاریف زیر را با توجه به روابط (۴) و (۵) می‌توان ارائه کرد:

$$E_k = \frac{1}{2} m\dot{v}_i^2 \quad (6) \text{ انرژی جنبشی مطلق:}$$

$$E_c = \int c\dot{v} dv = \int c\dot{v}^2 dt \quad (7) \text{ انرژی میرایی:}$$

$$E_A = \int f_s dv \quad (8) \text{ انرژی جذب شده:}$$

در نهایت می‌توان رابطه زیر را به عنوان معادله تعادل انرژی سازه نتیجه گرفت:

$$E_I = E_K + E_C + E_A \quad (9)$$

که در آن E_I انرژی مطلق ورودی بوده و با توجه به رابطه (۵) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E_I = \int m\ddot{v}_i dv_g \quad (10)$$

با کمی دقت در رابطه انرژی ورودی مطلق می‌توان فهمید که این رابطه، مقدار کار انجام یافته به وسیله برش پایه $m\ddot{v}_i$ تحت اثر تغییر مکان سیستم را نمایش می‌دهد.

ب) انرژی نسبی: در صورتی که از (۳) انتگرال‌گیری شود، رابطه زیر بدست می‌آید:

ورودی و نیز محاسبه ظرفیت استهلاک انرژی پسماند مشخص ساخت. Uang و Bertero [۱۴]-[۱۶] را می‌توان از جمله افراد پیشرو در روش انرژی دانست که سبب گسترش فعالیت‌های موجود و توجه بیش از پیش سایر محققان به این زمینه شده‌اند. آنها استفاده از انرژی ورودی را به عنوان یک بنیان برای انتخاب زلزله‌های طراحی مفید ارزیابی کرده و انرژی ورودی را به عنوان یک پارامتر قابل اعتماد و خوش‌آتیه برای تعریف پتانسیل خرابی زمین‌لرزه‌ها معرفی کردند. مطالعات پارامتری گسترده‌ای نیز که به وسیله Fajfar, Vidic, و Fischinger [17],[18] در خصوص طیف‌های انرژی ورودی و انرژی پسماند و نسبت این دو انجام شد، تأثیر پارامترهای مختلف روی طیف‌ها را مشخص کرد. نتیجه تلاش آنها سبب معرفی پارامتر جدید γ شد که انتظار می‌رود بیانگر تأثیر پدیده خستگی کم سیکل باشد. آنها از این پارامتر برای تعریف شکل‌پذیری معادل نیز استفاده کرده و آن را نوعی اصلاح برای روش‌های سنتی دانستند.

همزمان با معرفی پارامترهای انرژی، در روش‌های محاسبه اندیس‌های خرابی سازه‌ها از مزایای تجمعی بودن پارامتر انرژی نیز استفاده شد. Ang و Park [۱۹] مدلی را براساس انرژی ارائه دادند که به عنوان یکی از پرطرفدارترین مدل‌های خرابی در ارزیابی خرابی لرزه‌ای سازه‌های بتنی شناخته شده است. اگرچه ایده اولیه محاسبه اندیس‌های خرابی، ارزیابی خرابی لرزه‌ای پس از زلزله بود؛ ولی امروزه امکان استفاده از مدل‌های خرابی برای تعیین معیارهای طراحی لرزه‌ای نیز مطرح شده است.

پژوهش‌های نظری و آزمایشگاهی بسیاری در زمینه انرژی در سطح دنیا در حال انجام است که با توجه به وسعت تحقیقات در حال انجام و نتایج حاصل از آنها، نظریه تغییر بنیان آیین‌نامه‌ها، به اصول و مفاهیم انرژی چندان بعید به نظر نمی‌رسد؛ هرچند که در حال حاضر این روش تنها می‌تواند پایه‌ای برای فرایندهای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در آینده باشد [۱۰]. استفاده از روش انرژی در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله نیازمند برآورد نیاز و ظرفیت لرزه‌ای برحسب انرژی است. با وجود اینکه در حال حاضر ناشناخته‌های زیادی در توجیه علمی و کاربردی عملی پارامترهای انرژی وجود دارد؛ که مانع از تدوین روشی قانونمند بر اساس آن شده است، ولی استفاده از آن به عنوان مفهوم بنیادی طرح لرزه‌ای کاملاً به اثبات رسیده است [۶].

به منظور مطالعه روش انرژی در طرح لرزه‌ای سازه‌ها و بررسی نحوه تعیین مقادیر انرژی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس معادلات بنیادی انرژی، در راستای ارائه فرمولاسیون کاربردی

$$E_k(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \dot{v}_i(t) \dot{v}_j(t) \quad (21) \text{ انرژی جنبشی نسبی:}$$

$$E'_i(t) = - \int \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \ddot{v}_g(t) dv_i \right) dt \quad (22) \text{ انرژی ورودی نسبی}$$

۵- معادلات انرژی در سیستم چند درجه آزاد

غیرخطی

در حالت ارتجاعی خطی، شناسه‌های دینامیکی سازه (جرم، میرایی، سختی) در طول پاسخ سازه مقادیر ثابتی را اختیار می‌کنند؛ ولی اگر چنانچه سازه از مرحله ارتجاعی خارج و وارد مرحله غیرارتجاعی شود ضریب میرایی و سختی آن ثابت نبوده و دستخوش تغییرات می‌شوند. در واقع، در رابطه‌های فوق $c(t)$ و $k(t)$ به ترتیب جایگزین C و k می‌شوند. برای تحلیل این نوع سازه‌ها، رعایت گام‌های زیر ضروری است:

الف) مدل‌سازی گسسته سیستم مورد نظر و تعریف رفتار پسماند اعضا.

ب) محاسبه تاریخچه زمانی، شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین.
ج) تحلیل غیرخطی سیستم تحت اثر زلزله معلوم و محاسبه تاریخچه زمانی تغییر مکان، سرعت و شتاب در کلیه درجات آزادی سازه.

د) با فرض اینکه ماتریس میرایی، ترکیبی خطی از ماتریس جرم و سختی است، در هر مرحله از تحلیل باید ماتریس سختی و در نتیجه ماتریس میرایی تشکیل شوند.
ه) انتگرال‌گیری در این حالت، به صورت عددی خواهد بود و در نتیجه، انتگرال به سیگما تبدیل خواهد شد.
با توجه به موارد فوق، نتایج زیر برای سازه‌های متعارف؛ که در آنها ماتریس جرم قطری است، حاصل می‌شوند:

(23) انرژی میرایی:

$$E_c(t_f) = \sum_{i=0}^{t_f} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}(t) \dot{v}_i(t) \dot{v}_j(t) \right) \Delta t$$

(24) انرژی جذب شده:

$$E_A(t_f) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij}(t) v_i(t) v_j(t)$$

(25) انرژی جنبشی مطلق:

$$E_k(t_f) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_{ii} \dot{v}_i^2(t)$$

(26) انرژی جنبشی نسبی:

$$E'_k(t_f) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_{ii} \dot{v}_i^2(t)$$

(27) انرژی ورودی مطلق:

$$\frac{1}{2} m \dot{v}^2 + \int c i d v + \int f_s d v = - \int m \ddot{v}_g d v \quad (11)$$

در این حال تعاریف انرژی ورودی و انرژی جنبشی در حالت نسبی به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$E'_k = \frac{1}{2} m \dot{v}^2 \quad (12) \text{ انرژی جنبشی نسبی:}$$

$$E'_i = - \int m \ddot{v}_g d v \quad (13) \text{ انرژی ورودی نسبی:}$$

معادله تعادل انرژی نسبی می‌شود:

$$E'_i = E'_k + E_c + E_A \quad (14)$$

با دقت در رابطه (13) معلوم می‌شود که انرژی ورودی نسبی، بر خلاف انرژی ورودی مطلق برابر کار انجام یافته به وسیله نیروی جانبی $-m\ddot{v}_g$ روی سیستم با پی بدون جنبش است.

عموماً در تحقیقات صورت گرفته، انرژی ورودی نسبی ملاک عمل قرار گرفته است؛ ولی با توجه به مقدار بیشتر E'_i توصیه می‌شود که در سازه‌های با پیوند کوتاه از E_i و در سازه‌های با پیوند بلند از E'_i استفاده شود. در سازه‌های کاملاً صلب، استفاده از E'_i به هیچوجه صحیح به نظر نمی‌رسد؛ زیرا مقدار انرژی ورودی نسبی در این سازه‌ها تقریباً صفر خواهد بود [16].

۶- معادلات انرژی در سیستم چند درجه آزاد

در سازه‌های با درجه آزادی بیش از یک، معادله تعادل دینامیکی بسته به درجه آزادی سازه به صورت ماتریسی بیان می‌شود که در نتیجه، یک دستگاه n معادله دیفرانسیل؛ n مجهول به وجود می‌آید؛ با این فرض که رفتار سازه‌ها خطی است، بدان معنا که مشخصات دینامیکی سیستم (جرم، ضریب میرایی و سختی) در طول زلزله ثابت باقی می‌ماند. معادله تعادل دینامیکی سازه‌های چند درجه آزاد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[m] \ddot{v}(t) + [c] \dot{v}(t) + [k] v(t) = 0 \quad (15)$$

$$[m] \ddot{v}(t) + [c] \dot{v}(t) + [k] v(t) = -[m] \ddot{v}_g(t) \quad (16)$$

با انتگرال‌گیری از دو رابطه فوق، انرژی سیستم محاسبه خواهد شد که ذیلاً به تفکیک انرژی نسبی و مطلق آورده شده است:

$$E_k(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \dot{v}_i(t) \dot{v}_j(t) \quad (17) \text{ انرژی جنبشی مطلق:}$$

$$E_c(t) = \int \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \dot{v}_i(t) \dot{v}_j(t) \right) dt \quad (18) \text{ انرژی میرایی:}$$

$$E_A(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} v_i(t) v_j(t) \quad (19) \text{ انرژی جذب شده:}$$

$$E_i(t) = - \int \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \ddot{v}_g(t) dv_i \right) dt \quad (20) \text{ انرژی ورودی مطلق:}$$

اساس آیین‌نامه حداقل بار وارده بر ساختمان‌ها و ابنیه فنی (تجدید نظر در استاندارد ۵۱۹ ایران - سال ۱۳۷۹) [۱] بارگذاری استاتیکی معادل 550 Kg/m^2 بار مرده و 200 Kg/m^2 بار زنده و همچنین آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (ویرایش دوم - آذر ۱۳۷۸ - ایران) [۲] بارگذاری، با برنامه رایانه‌ای SAP2000 [۲۱] آنالیز و بر اساس آیین‌نامه طراحی سازه‌های بتنی مسلح ACI [۴] طراحی شده‌اند. تمامی مقاطع و جزییات بکار رفته در عملیات بعدی، بر اساس همین فرایند مرسوم طراحی تعیین شده‌اند.

۸- نرم‌افزار IDARC

رفتار بتن و سازه‌های بتنی در هنگام وقوع زلزله، ارتجاعی نبوده و رفتاری غیرخطی و رفت و برگشتی خواهند داشت. در نتیجه برای ارزیابی دقیق از رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی، علاوه بر داشتن بیش از لازم از رفتار غیرخطی و پسماند بتن، باید بتوان آن را به نحوی مناسب، قابل‌کاربرد در معادلات و مدلسازی‌های ریاضی کرد که بنیانی برای تهیه نرم‌افزارهای رایانه‌ای است.

آنچه مسلم است، برنامه‌های رایانه‌ای ارائه شده قادر به شبیه‌سازی کامل رفتار پیچیده اعضا و سازه‌های بتنی تحت اثر بارهای تصادفی لرزه‌ای نیستند، که این خود، از دقت عملیاتیهای انجام گرفته می‌کاهد. به همین دلیل، تلاش اکثر پژوهشگران در محدوده‌های آزمایشگاهی و رایانه‌ای حول ارائه مدل‌های مناسب ریاضی برای رفتار لرزه‌ای بتن و همچنین شبیه‌سازی دقیق همراه با عملیات محاسباتی رایانه‌ای با دقت کافی متمرکز است.

نرم‌افزار IDARC (Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings) [۲۲] بر اساس علم تئوری رفتار غیرخطی و دینامیکی اعضای بتنی مسلح و با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی سازه‌ها در دانشگاه ایالتی بوفالو نیویورک تهیه شده است. این نرم‌افزار تا حد زیادی نواقص و اشکالات موجود در سایر نرم‌افزارهای تحلیل دینامیکی غیرخطی (مثل DRAIN-2DX [۲۳]) را برطرف کرده و قابلیت‌های مدل‌سازی بیشتری را نسبت به آنها داراست. این نرم‌افزار می‌تواند تحلیل جامع خسارت را در مقیاس‌های محلی و سراسری انجام داده و یک شاخص خسارت کالیبره شده ارائه دهد که خود گامی بزرگ در ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی مسلح محسوب می‌شود. [۳]

برنامه IDARC مدل ساختمان‌های بتنی مسلح را به صورت سه بعدی پذیرفته و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی را در یک امتداد انجام می‌دهد. در تحلیل استاتیکی پس از تعیین

$$E_I(t_f) = \sum_{i=0}^{t_f} \left(\sum_{i=1}^n m_{ii} \ddot{v}_{ii}(t) \dot{v}_g(t) \right) \Delta t$$

(۲۸) انرژی ورودی نسبی:

$$E'_I(t_f) = - \sum_{i=0}^{t_f} \left(\sum_{i=1}^n m_{ii} \ddot{v}_{ii}(t) \dot{v}_i(t) \right) \Delta t$$

در معادله بالا، Δt گام انتگرال‌گیری و t_f انتهای زمان انتگرال‌گیری است. باید به این نکته توجه شود که روابط فوق بر اساس ارتباط خطی ماتریس میرایی با ماتریس‌های جرم و سختی محاسبه شده‌اند و اگر ماتریس میرایی، تابع خطی از ماتریس‌های جرم و سختی نباشد، فرمول‌های فوق تغییر خواهند کرد.

۶- سازه‌های مطالعه شده در این پژوهش

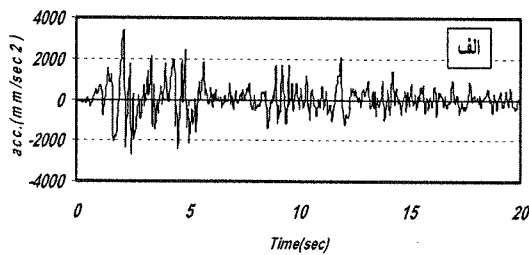
مطالعات انجام شده در این پژوهش بر روی سازه‌های متعارف صورت گرفته و از بررسی حالات خاص و پیچیده سازه‌ها صرف‌نظر شده است. یکی از عمده دلایل این نوع برخورد با روش انرژی، عدم پیشرفت کافی این روش در طرح لرزه‌ای سازه‌هاست. تا آن حدی که مطالعه سازه‌های متعارف را تکراری قلمداد نکرده و یا بررسی سازه‌های خاص و پیچیده را ضروری تلقی نمی‌کند. [۹] در واقع، سعی بر آن بوده است تا با بررسی معادلات بنیادی انرژی ورودی لرزه‌ای سازه‌ها، محاسبه طیف تاریخچه زمانی و همچنین طیف پاسخ آنها در سازه‌های متعارف، تلاشی برای راهگشایی در ارائه فرمولاسیون‌های مناسب کاربردی در طرح لرزه‌ای این نوع سازه‌ها، بر اساس انرژی صورت گیرد. با این نگرش، تعدادی سازه با مشخصات زیر انتخاب و بررسی شده‌اند:

- ۱- ساختگاه کلیه سازه‌ها شهر تهران و نوع کاربری آنها مسکونی فرض شده است.
- ۲- سازه‌ها از نوع قاب خمشی بتنی مسلح با رفتار برشی در ارتفاع فرض شده‌اند.
- ۳- کلیه سازه‌ها چه از لحاظ پلان و چه از لحاظ ارتفاع هیچگونه نامنظمی ندارند.
- ۴- سازه‌ها در پلان مربع شکل بوده و در سه تپ مختلف سه، پنج و هفت دهانه‌ای با دهانه‌های یکسان پنج متری بررسی شده‌اند.
- ۵- سازه‌ها در سه تپ مختلف سه، پنج و هفت طبقه‌ای با ارتفاع طبقه‌ای یکسان ۳/۵ متری بررسی شده‌اند.

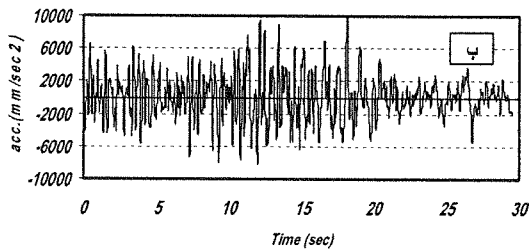
۷- طراحی سازه‌های مورد نظر به روش سنتی

به منظور در اختیار داشتن یک طرح اولیه از سازه‌های مورد نظر برای کاربری در تحلیل دینامیکی، کلیه سازه‌ها بر

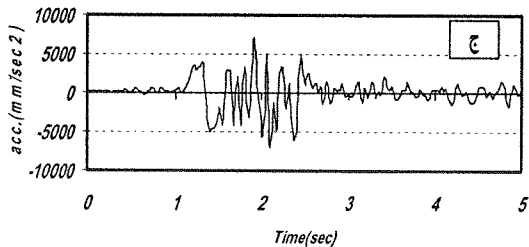
غیرخطی اعضای بتن‌آرمه پیشنهاد شده‌اند که برای مدل‌سازی بتن تحت بارگذاری لرزه‌ای بکار گرفته می‌شوند. هریک از این مدل‌ها یک سری فرضیات برای پارامترهای مختلف موثر بر حلقه‌های پسماند دارند که نتایج متفاوتی را در آنالیزهای تاریخیچه زمانی نتیجه داده است، هرچند که هنوز هم برای ارائه مدل واقع‌بینانه‌تری؛ که نتایج بهتری را نتیجه بدهد، تحقیقات ادامه دارد و یک نتیجه کاملاً قاطعی حاصل نگردیده است. با این وجود، در تحقیقات انجام‌شده درمورد انتخاب مدل بهتر و مناسب‌تر مدل تاکدا بهترین پاسخ‌ها را داشته است [۲۴].



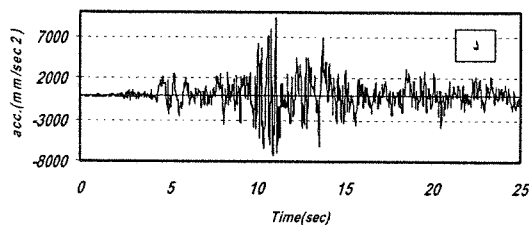
الف) زلزله السنترو



ب) زلزله منجیل



ج) زلزله ناغان



د) زلزله طبس

شکل (۱): شتاب‌نگاشت

پارامترهای مقاومت و سختی اعضای سازه‌ای، تحلیل شکست را تحت بارگذاری یکنواخت انجام داده و پررود طبیعی سازه را محاسبه می‌کند. در بخش تحلیل دینامیکی، مقادیر بیشینه پاسخ و انرژی پسماند تلف‌شده را ارائه داده و خسارت نهائی را تحلیل می‌کند. [۳]

۹- زلزله‌های ورودی

یکی از مهم‌ترین فرایندهای مطرح در طرح لرزه‌ای سازه‌ها تعیین زلزله طرح و یا پارامترهای مربوط به زلزله در طراحی است که لازمه آن، انجام تحلیل خطرپذیری لرزه‌ای بر روی گستره مورد نظر می‌باشد. این تحلیل در روش انرژی باید تا حد امکان بر اساس پارامترهای انرژی صورت گیرد؛ ولی با توجه به اینکه این بخش از فرایند طراحی، خارج از اهداف این پژوهش است، برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، چهار زلزله مختلف انتخاب شده‌اند که با توجه به محل ساختگاه سازه و بر اساس آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ [۲] به بیشینه شتاب $PGA = 0.35g$ مقیاس شده‌اند. شتاب‌نگاشت این زلزله‌ها در شکل (۱) و مشخصات مختلف لرزه‌ای آنها پس از مقیاس کردنشان در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌ها

زلزله	زمان آغاز جنبش شدید	مدت زمان لرزه شدید	PGA (mm/sec ²)
	(sec)	(sec)	
السنترو S00E ۱۹۴۰م	12.2	19.2	3418.98
منجیل ۱۳۶۹ هـ	9.4	20.46	9810.0
ناغان ۱۳۵۶ هـ	2.11	5	7074.4
طبس ۱۳۵۷ هـ	11.08	24.62	9153.9

۱۰- انتخاب مدل پسماند مناسب

با توجه به اینکه اعضای سازه‌ای تحت اثر بارهای لرزه‌ای از محدوده خطی خارج می‌شوند و همچنین به‌خاطر حالت دینامیکی و متناوب بارهای لرزه‌ای، باید به بررسی رفتارهای غیرخطی سازه‌های بتنی مسلح تحت اثر بارهای دینامیکی پرداخته شود. برای درک بهتر موضوع باید ابتدا رفتار لرزه‌ای مصالح، سپس رفتار لرزه‌ای اعضای بتنی به‌طور مستقل و در نهایت، رفتار لرزه‌ای کل سازه بررسی شود. یک مدل پسماند خوب باید رفتار چرخه‌ای واقعی را به‌گونه‌ای بیان کند که مقدار سختی و مقاومت در اثر جابجایی، در هر زمانی از آنالیز تاریخیچه زمانی معین باشند. در حالت کلی، این مدل باید منطبق بر موارد: الف) واقعیت، ب) صحت، ج) سادگی و د) ثبات باشد. مدل‌های پسماند متفاوت و زیادی برای شبیه‌سازی رفتار

۱- ماتریس جرم سازه‌ها مطابق بارگذاری انجام شده بر اساس استاندارد ۵۱۹ ایران [۱] محاسبه شده است.

۲- ماتریس سختی سازه‌ها براساس رفتار برشی آنها محاسبه شده است.

۳- ماتریس میرایی سازه‌ها متناسب با ماتریس جرم و سختی فرض شده و از روابط زیر محاسبه شده است:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (30)$$

$$\zeta_n = \frac{\alpha T_n}{2\pi} + \frac{\beta\pi}{T_n} \quad (31)$$

در رابطه فوق ζ_n ضریب میرایی مود n ، T_n پریود مود n ، α ضریب ماتریس جرم و β ضریب ماتریس سختی است. مقادیر α و β از روابط فوق، بر اساس پریودهای دو مود اول سازه‌ها و با توجه به مقدار ثابت ۵٪ برای ضریب میرایی محاسبه شده و در جدول (۲) آورده شده است.

۴- مقادیر انرژی‌های لرزه‌ای طبقات بر اساس تاریخچه زمانی جابجایی طبقات محاسبه شده‌اند.

۵- واحد استفاده شده در این پژوهش تن-میلیمتر و ثانیه است.

جدول (۲): مقادیر پریود دو مود اول سازه‌ها و ضرایب

ماتریس‌های جرم و سختی در ماتریس میرایی

دهانه (m)	تعداد طبقه	T_1 (sec)	T_2 (sec)	α	β
3	3	0.46	0.15	0.5150	0.0018
3	5	0.73	0.24	0.3239	0.0029
3	7	1.00	0.35	0.2327	0.0041
5	3	0.52	0.17	0.4553	0.0020
5	5	0.80	0.27	0.2936	0.0032
5	7	1.03	0.35	0.2277	0.0042
7	3	0.81	0.27	0.2909	0.0032
7	5	0.52	0.17	0.4553	0.0020
7	7	1.01	0.35	0.2310	0.0041

۱۳- بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی‌های

لرزه‌ای

با فرضیات مذکور، سازه‌های مورد نظر تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های انتخابی، آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی شده و مقدار انرژی ورودی سازه‌ها به صورت تاریخچه زمانی محاسبه شده‌اند که نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی‌های لرزه‌ای این سازه‌ها، به عنوان نمونه، در اشکال (۲) تا (۶) آورده شده است. در نگاهی کلی، نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی لرزه‌ای برای زلزله السنترو با شروعی کاملاً یکنواخت و در حد صفر پس از حدود ۱/۷ ثانیه، افزایش نسبی یافته و در حدود ۲/۱ ثانیه پس از آغاز جنبش، پرشی ناگهانی دارد. پس از حدود ۲ ثانیه ثبات در زمان ۴ ثانیه پس از آغاز جنبش، پرش دیگری در آنها مشاهده می‌شود. از این زمان به

مدل تاکدا تقریباً بهترین مدل پیشنهادی است که در سال ۱۹۷۰ به وسیله تاکدا و همکارانش ارائه شد. این مدل براساس مشاهدات آزمایشگاهی فراوان تهیه و ارائه شده است که شامل تغییرات سختی در نقطه شکست خمشی و نقاط تسلیم، همچنین پدیده سخت‌شدگی کرنش است. تفاوت اصلی این مدل با مدل‌های دیگر آن است که در این مدل منحنی‌های داخلی منحنی‌های پسماند نیز قوانین پسماند دارند. رابطه زوال سختی حین باربرداری در این مدل به صورت زیر است:

$$K_r = \frac{(F_c + F_y)}{(D_c + D_y)} (D_m / D_y)^{-a} \quad (29)$$

در رابطه بالا، K_r سختی حین باربرداری، F_c نیروی مقاوم شکست، F_y نیروی مقاوم تسلیم، D_c جابجایی شکست، D_y جابجایی تسلیم، D_m بیشینه جابجایی قبلی و a پارامتر $USDP$ است. [۲۴]

۱۱- تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها

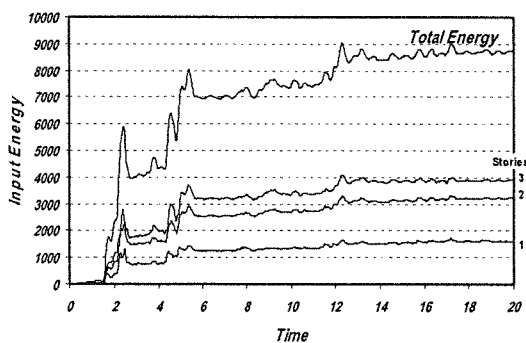
- در انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی نکات زیر مدنظر بوده‌اند:
- ۱- با توجه به تاثیر زیاد Δt در نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی، مقدار آن برای تحلیل برابر ۰/۰۲ ثانیه فرض شد.
- ۲- کلیه مقاطع تیرها و ستون‌ها بر اساس طراحی انجام شده به روش سنتی در برنامه منظور شده‌اند.
- ۳- مدل تاکدا برای مدل‌سازی رفتار پسماند بتن مسلح انتخاب شده است.
- ۴- ضریب میرایی سازه برابر ۵٪ و متناسب با جرم و سختی سازه فرض شده است.
- ۵- با توجه به قابلیت نرم‌افزار IDARC اثر $P-\Delta$ در تحلیل منظور شده است.
- ۶- از اثرات مؤلفه قائم زلزله در تحلیل‌ها صرف‌نظر شده است.

۱۲- محاسبه انرژی‌های لرزه‌ای با استفاده از نتایج

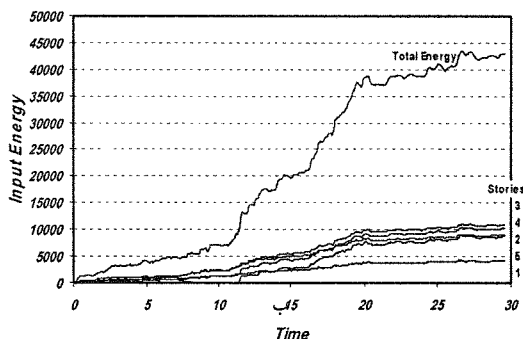
تحلیل دینامیکی غیرخطی

بر اساس روابط ذکر شده در قسمت‌های قبل و با استفاده از روش‌های عددی، مقادیر انرژی‌های لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه در طول زمان زلزله قابل محاسبه است که در این پژوهش، نتایج محاسبه انرژی‌های ورودی مطلق، جنبشی مطلق، پسماند مطلق، جذب‌شده مطلق و درصد خطای تعادل در قالب نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی رسم و بررسی شده است. محاسبه انرژی‌های لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس نکات زیر انجام گرفته است:

بعد نمودارها با روندی یکنواخت و پرش‌هایی کوچک تا انتهای جنبش ادامه می‌یابند. نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی‌های لرزه‌ای برای زلزله منجیل از همان ابتدا با روندی افزایشی و پرش‌هایی کوچک آغاز می‌شود، این پرش‌ها تا حدود ۴/۵ ثانیه پس از جنبش نیز ادامه می‌یابند. در این زمان، در نمودارها پرش بزرگ‌تری نسبت به روند اولیه مشاهده می‌شود. این نمودارها با همان روند نامنظم تا انتهای جنبش ادامه می‌یابند و پرش‌های بزرگی در حدود زمان‌های ۹/۵۲ و ۱۵/۲ تا ۱۶/۹ در آنها مشاهده می‌شود. نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی ورودی در زلزله ناغان بجز دو پرش ناگهانی و شوک مانند در ۱/۱ و ۲/۲ ثانیه پس از آغاز جنبش حالتی یکنواخت و منظم دارد. مقادیر انرژی‌های ورودی قبل از پرش اول در حد صفر است. به نظر می‌رسد که زلزله ناغان، انرژی مخرب خود را در قالب دو ضربه به سازه وارد می‌کند. نمودارهای تاریخچه زمانی انرژی لرزه‌ای برای زلزله طبس پس از حدود ۵ ثانیه، که در حد نسبتاً پایینی است، با افزایشی نسبی از این زمان، پرش نسبتاً بزرگی در ۱۰/۱ ثانیه پس از آغاز جنبش دارد. پرش دیگری نیز در حدود ۱۵/۴ ثانیه پس از آغاز جنبش در این نمودارها مشاهده می‌شود. با توجه به شکل شتاب‌نگاشت‌های ورودی زلزله، می‌توان پرش‌های فوق را ناشی از تغییرات موجود در این شتاب‌نگاشت‌ها دانست. به عبارت دیگر، در هر زمانی که شتاب‌نگاشت زلزله دچار تغییرات می‌شود، در نمودار انرژی‌های لرزه‌ای نیز پرشی مشاهده می‌شود. به منظور بررسی بهتر نمودارها، در زیر نمودارها به تفکیک بررسی شده است.



الف: سازه سه طبقه - سه دهانه



ب: سازه پنج طبقه - سه دهانه

شکل (۲): تاریخچه زمانی انرژی ورودی تحت اثر زلزله السنترو ($\zeta = 5\%$ ، واحد انرژی $\frac{\text{ton.mm}^2}{\text{sec}^2}$ و واحد زمان (sec))

۱۳-۲- انرژی جنبشی کل

از شکل (۳) چنین برمی‌آید که انرژی جنبشی، بخشی از انرژی لرزه‌ای سازه است که باعث جنبش سازه می‌شود. شکل کلی نمودار انرژی جنبشی بسیار نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی است و عموماً اندکی بعد از آغاز جنبش شدید زلزله در حول و حوش بیشینه سرعت زلزله به مقدار حداکثر خود می‌رسد. مقدار این انرژی در مقایسه با سایر صورت‌های انرژی، بسیار کوچک است. این موضوع در حالتی که مقدار انرژی ورودی

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود انرژی ورودی به عنوان پارامتر نیاز در معادله تعادل انرژی، بیان‌کننده پتانسیل تخریب زلزله است، و با توجه به اینکه با سطح زیر نمودار شتاب زلزله متناسب است، شکل آن از شکل شتاب‌نگاشت طرح پیروی می‌کند. این موضوع کاملاً در نمودارهای این صورت از انرژی سازه‌ای مشهود است. در تمامی نمودارهای انرژی ورودی، یک پرش در حول و حوش آغاز جنبش شدید زمین‌لرزه مشاهده می‌شود. این پرش به خاطر شکل متفاوت شتاب‌نگاشت‌های طرح، در شتاب‌نگاشت طبس ملایم‌تر از شتاب‌نگاشت ناغان و منجیل رخ می‌دهد. نمودار انرژی ورودی کل پس از این پرش با شیبی ملایم به مقدار بیشینه خود می‌رسد. مقدار بیشینه انرژی ورودی لزوماً در انتهای زمان زلزله نیست؛ ولی عموماً در زمان‌های انتهایی جنبش لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. پرش‌های کوچکی را که در

۱۳-۱- انرژی ورودی کل

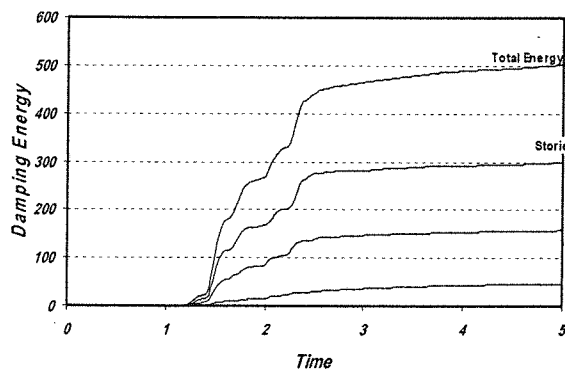
همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود انرژی ورودی به عنوان پارامتر نیاز در معادله تعادل انرژی، بیان‌کننده پتانسیل تخریب زلزله است، و با توجه به اینکه با سطح زیر نمودار شتاب زلزله متناسب است، شکل آن از شکل شتاب‌نگاشت طرح پیروی می‌کند. این موضوع کاملاً در نمودارهای این صورت از انرژی سازه‌ای مشهود است. در تمامی نمودارهای انرژی ورودی، یک پرش در حول و حوش آغاز جنبش شدید زمین‌لرزه مشاهده می‌شود. این پرش به خاطر شکل متفاوت شتاب‌نگاشت‌های طرح، در شتاب‌نگاشت طبس ملایم‌تر از شتاب‌نگاشت ناغان و منجیل رخ می‌دهد. نمودار انرژی ورودی کل پس از این پرش با شیبی ملایم به مقدار بیشینه خود می‌رسد. مقدار بیشینه انرژی ورودی لزوماً در انتهای زمان زلزله نیست؛ ولی عموماً در زمان‌های انتهایی جنبش لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. پرش‌های کوچکی را که در

خیلی بزرگ است کاملاً محسوس است. مقدار انرژی جنبشی با توجه به معادله آن، در آخر جنبش لرزه‌ای به صفر می‌رسد.

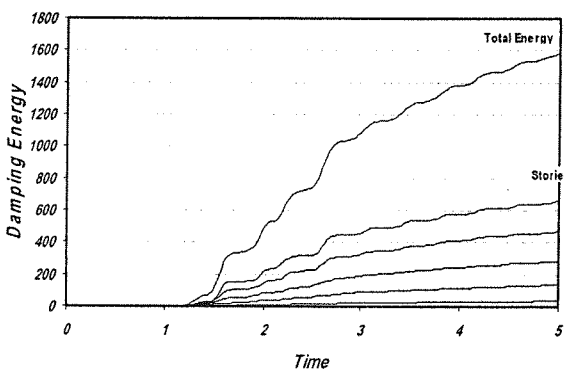
۱۳-۳- انرژی میرایی کل

با توجه به شکل (۴) می‌توان گفت که این صورت از انرژی لرزه‌ای بیانگر مقدار انرژی تلف‌شده از طریق استهلاك سیستم سازه است که مانند انرژی جنبشی یک جزء مطلوب در معادله تعادل انرژی محسوب می‌شود که نه تنها تاثیری در خرابی سازه ندارد، بلکه به خاطر مقدار قابل توجه آن از مقدار خسارت سازه‌ای به نحو مطلوبی می‌کاهد. شکل کلی نمودار انرژی میرایی مانند شکل نمودار انرژی ورودی است با این تفاوت که نسبت به آن شیب ملایم‌تر و نظم بیشتری دارد.

شکل (۵) چنین برمی‌آید که جذب انرژی لرزه‌ای به وسیله سازه به دو صورت انرژی کرنشی ارتجاعی و انرژی پسماند صورت می‌گیرد. در یک طرح مطلوب لرزه‌ای یا باید این بخش از انرژی لرزه‌ای با افزایش پتانسیل اتلاف انرژی سازه کنترل شود و یا با اعمال تمهیدات خاص در سازه، مقدار ظرفیت آن تا حد نیاز ارتقا یابد. شکل کلی نمودار انرژی جذب‌شده هم از شکل کلی شتاب‌نگاشت طرح پیروی می‌کند و پرشی در آن در حوالی آغاز جنبش شدید زمین‌لرزه مشاهده می‌شود، هر چند که به نظر می‌رسد پرش در نمودار انرژی جذب‌شده با افزایش انرژی‌های میرایی و جنبشی در این ناحیه تا حوالی مقدار بیشینه ظرفیتشان رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، با رسیدن سازه به مقدار بیشینه ظرفیت اتلاف انرژی خود، انرژی جذب‌شده برای ایجاد تعادل در انرژی سازه‌ای وارد عمل می‌شود.

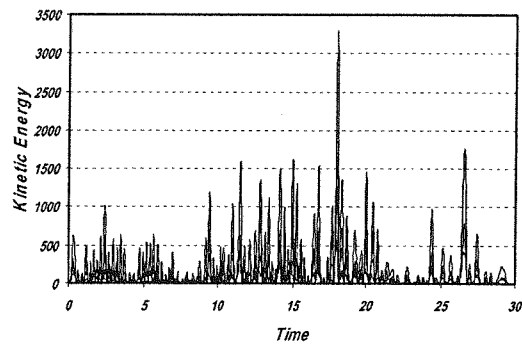


الف: سازه سه طبقه - سه دهانه

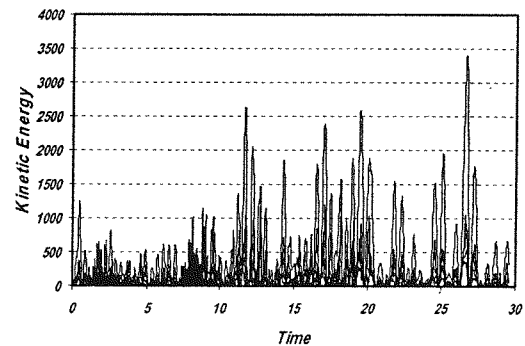


ب: سازه پنج طبقه - سه دهانه

شکل (۴): تاریخچه زمانی انرژی پسماند تحت اثر زلزله ناغان ($\zeta = 5\%$ ، واحد انرژی $\text{ton.mm}^2/\text{sec}^2$ و واحد زمان sec)



الف: سازه سه طبقه - سه دهانه

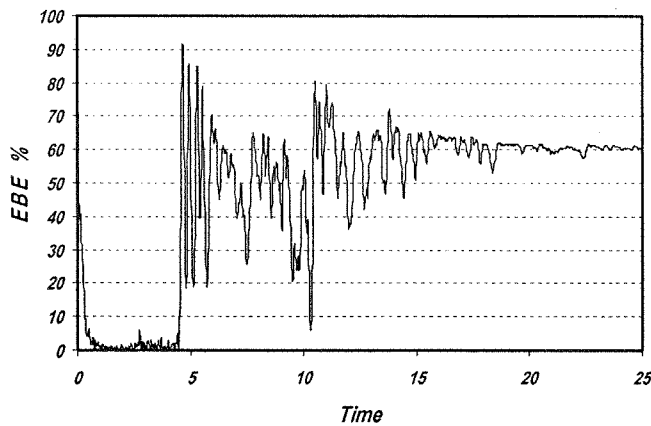


ب: سازه پنج طبقه - سه دهانه

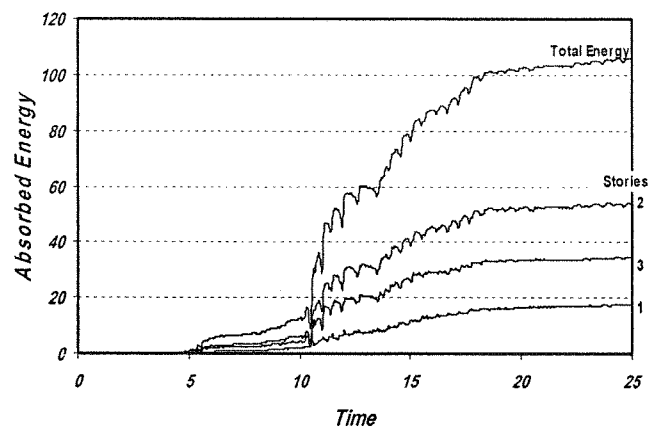
شکل (۳): تاریخچه زمانی انرژی جنبشی تحت اثر زلزله منجیل ($\zeta = 5\%$ ، واحد انرژی $\text{ton.mm}^2/\text{sec}^2$ و واحد زمان sec)

۱۳-۴- انرژی جذب‌شده کل

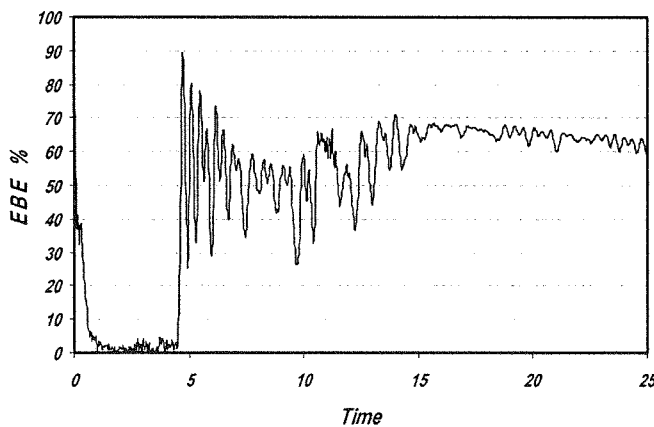
این قسمت از انرژی لرزه‌ای، بخش مخرب انرژی محسوب می‌شود. در واقع، آن بخشی از انرژی ورودی زلزله، که به وسیله انرژی میرایی تلف نمی‌شود و یا با جنبش سازه از بین نمی‌رود، باید به وسیله این صورت از انرژی، جذب سازه شود که گاهی اوقات تا تخریب کامل سازه نیز افزایش می‌یابد. از



الف: سازه سه طبقه - سه دهانه

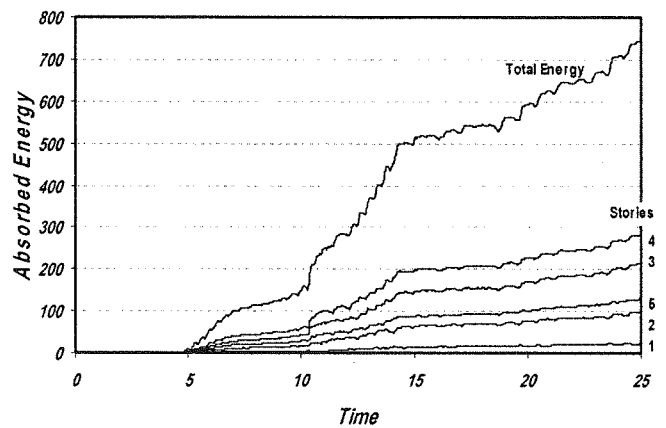


الف: سازه سه طبقه - سه دهانه



ب: سازه پنج طبقه - سه دهانه

شکل (۶): تاریخچه زمانی درصد خطای تعادل تحت اثر زلزله طبیس ($\zeta = 5\%$ و واحد زمان sec)



ب: سازه پنج طبقه - سه دهانه

شکل (۷): تاریخچه زمانی انرژی جذب شده تحت اثر زلزله طبیس ($\zeta = 5\%$ ، واحد انرژی $\frac{ton \cdot mm^2}{sec^2}$ و واحد زمان sec)

بر اساس نمودارهای رسم شده در اشکال (۲) تا (۶) می‌توان نکات زیر را برای توزیع صور مختلف انرژی لرزه‌ای در ارتفاع سازه برداشت کرد. فقط باید به این نکته توجه داشت که شماره‌گذاری طبقات از بالا به پایین صورت گرفته است به این معنی که شماره بالاترین طبقه، یک فرض شده است.

۱۳-۶- توزیع انرژی ورودی در طبقات

شکل کلی نمودار انرژی ورودی و ورودی طبقات مشابه نمودار انرژی ورودی کل است؛ ولی در مورد مقدار آن در طبقات مختلف در حالات متفاوت یک نوع بی‌نظمی دیده می‌شود. به عبارت دیگر، نمی‌توان رابطه‌ای مناسب بین مقدار انرژی ورودی در طبقات مختلف یک سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف و یا طبقات یکسان سازه‌های مختلف در زلزله‌های یکسان برقرار کرد. فقط آنچه که مسلم است، طبقات پایین‌تر عموماً

۱۳-۵- درصد خطای تعادل

این پارامتر می‌تواند یکی از پارامترهای مطرح و مؤثر در طرح لرزه‌ای سازه‌ها باشد که با توجه به شکل (۶) می‌توان گفت که در اکثر زمان زلزله، طرح لرزه‌ای حالتی غیراقتصادی دارد، ولی در زمانیکه که نمودار انرژی‌های لرزه‌ای دچار پرش می‌شوند درصد خطای تعادل مقادیر قابل قبولی را اختیار می‌کند که شاید ناشی از شوک لرزه‌ای وارد به سازه باشد. در کل شکل نمودار درصد خطای تعادل، شکلی نامنظم است که بجز چند لحظه در آغاز جنبش شدید زلزله مقادیر بزرگی را اختیار می‌کند. البته درصد خطای بالا می‌تواند ناشی از مقدار Δt که معادله تعادل شدیداً به آن حساس است و یا خطاهای محاسباتی و تحلیل‌های رایانه‌ای نیز باشد.

درصد بیشتری از انرژی ورودی کل را به خود اختصاص می‌دهند.

۱۳-۷- توزیع انرژی جنبشی در طبقات

در مورد انرژی جنبشی نیز بی‌نظمی بالا کاملاً مشهود است. در این حالت، گاهی طبقات مختلف یک سازه در زمان‌هایی متفاوت به مقدار بیشینه خود می‌رسند، هرچند که فاصله زمانی نقاط اوج آنها کم است. البته با توجه به مقدار کوچک انرژی جنبشی، این موضوع نمی‌تواند در طراحی لرزه‌ای کاربردی اهمیت چندانی داشته باشد.

۱۳-۸- توزیع انرژی میرایی در طبقات

شکل کلی نمودار انرژی میرایی طبقات کاملاً مشابه نمودار انرژی میرایی کل است. این نمودارها با شکلی منظم و روندی افزایشی، با شیبی ملایم و پرش‌هایی تدریجی به مقادیر بیشینه خود در انتهای زمان زلزله می‌رسند. توزیع انرژی میرایی در ارتفاع، حالتی یکنواخت دارد بطوری‌که پایین‌ترین طبقه، بیشترین و بالاترین طبقه، کمترین تاثیر را در اتلاف انرژی لرزه‌ای دارند.

۱۳-۹- توزیع انرژی جذب‌شده در طبقات

نمودار انرژی جذب‌شده طبقات هم از شکل کلی نمودار انرژی جذب‌شده کل پیروی می‌کند. انرژی جذب‌شده طبقات هم با روندی افزایشی در انتهای زمان زلزله به مقادیر بیشینه خود می‌رسند. هرچند که توزیع انرژی جذب‌شده در طبقات هم مانند توزیع انرژی ورودی حالتی نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی دارد؛ ولی در تمامی نمودارها بالاترین طبقه، کمترین سهم را در جذب انرژی داشته است.

با توجه به موارد فوق، اظهارنظر در مورد نحوه توزیع انرژی‌های لرزه‌ای در ارتفاع سازه بسیار مشکل و دور از منطق است. به نظر می‌رسد حتی اظهارنظر نسبی در این زمینه هم، به تحقیقات تئوریک و آزمایشگاهی بیشتری نیازمند است.

۱۴- نتیجه‌گیری

۱- تقریباً در تمامی نمودارهای تاریخچه زمانی صورت‌های مختلف انرژی لرزه‌ای، یک پرش در حول و حوش زمان آغاز جنبش شدید زمین‌لرزه مشاهده می‌شود.

۲- نمودار تاریخچه زمانی انرژی ورودی کاملاً متأثر از شکل شتاب‌نگاشت زلزله است.

۳- مقدار بیشینه انرژی ورودی لزوماً در انتهای زمان جنبش اتفاق نمی‌افتد که در نتیجه استفاده از مقدار نهایی آن در طرح لرزه‌ای با اشکال همراه خواهد بود.

۴- نمودار تاریخچه زمانی انرژی جنبشی کاملاً نامنظم است و مقدار آن در انتهای جنبش لرزه‌ای به صفر می‌رسد.

۵- انرژی جنبشی نسبت به سایر صورت‌های انرژی، سهم کمتری در معادله تعادل انرژی دارد.

۶- نمودار تاریخچه زمانی انرژی میرایی، شکلی منظم‌تر و همچنین شیبی ملایم‌تر نسبت به سایر صورت‌های انرژی لرزه‌ای دارد و مقدار آن در ابتدای جنبش سازه، بسیار ناچیز است.

۷- نمودار تاریخچه زمانی انرژی جذب شده، از شکل شتاب‌نگاشت ورودی پیروی می‌کند. تاثیر این صورت از انرژی لرزه‌ای پس از رسیدن سازه به بیشینه ظرفیت اتلاف انرژی خود، در ایجاد تعادل انرژی سازه کاملاً محسوس است.

۸- درصد خطای تعادل انرژی لرزه‌ای در بیشتر زمان جنبش، مقادیر بزرگی دارد، ولی در زمان‌های اولیه جنبش و یا در حول و حوش زمان آغاز جنبش شدید زلزله، مقادیر کوچک و قابل قبولی را اختیار می‌کند.

۹- نمودار تاریخچه زمانی انرژی میرایی طبقات مختلف یک سازه، شکلی منظم و افزایشی دارد که با شیبی ملایم و پرش‌هایی تدریجی به مقدار بیشینه خود در انتهای زمان جنبش می‌رسد. بالاترین طبقه، کمترین و پایین‌ترین طبقه، بیشترین سهم را در اتلاف انرژی به صورت انرژی میرایی دارند.

۱۰- هرچند که سهم طبقات مختلف در جذب انرژی لرزه‌ای را در حال حاضر نمی‌توان معین کرد، ولی در موارد مطالعه شده، بالاترین طبقه همواره کمترین سهم را در جذب انرژی لرزه‌ای داشته است.

۱۵- ضوابط: فهرست علائم

α	ضریب ماتریس جرم
β	ضریب ماتریس سختی
ζ_n	ضریب میرایی مود nام
a	پارامتر USDP
c	ضریب میرایی لزج
D_c	جابجایی شکست
D_m	بیشینه جابجایی قبلی
D_y	جابجایی تسلیم
E_ζ	انرژی پسماند
E_A	انرژی جذب‌شده
E_I	انرژی ورودی مطلق

- Priestley, M. J. N. "Performance-Based Seismic Design." Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Newzeland, 2000.
- Comartin, C. D.; Greene, M.; Tubbesing, S. K. "The Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Earthquake of January 17, 1995: Preliminary Reconnaissance Report." EERI, Oakland, California, 1995.
- Mahin, S. A. "Lessons From Damage to Steel Buildings during the Northridge Earthquake." Engineering Structure, Vol. 20, No. 4, pp. 261-270, 1998.
- Bertero, V. V. "Performance - Based Seismic Engineering: Conceptual VS Innovative Approach." Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Newzeland, 2000.
- Safak, E.; Harmsen, S. "Seismic Hazard and Design by using Energy Flux." Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Newzeland, 2000.
- Housner, G. W. "Limit Design of Structures to Resist Earthquake." Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, California, pp. 5-13, 1956.
- Zahrah, T. F.; Hall, W. J. "Earthquake Energy Absorption in SDOF Structures." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 110, No. 8, pp. 1757-1772, 1984.
- Akiyama, H. "Earthquake Resistant Limit-State Design for Buildings." University of Tokyo Press, 1985.
- Uang, C. M.; Bertero, V. V. "Implication of Recorded Earthquake Ground Motion on Seismic Design of Building Structures." Report No. UBC/EERC-88/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkely, 1988.
- Uang, C. M.; Bertero, V. V. "Issues and Future Directions in the use of Energy Approach for Seismic-Resistant Design of Structures." In: Fajfar, P.; Krawinkler, H. "Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings." Elsevier Applied Science, pp. 3-22, 1992.
- Uang, C. M.; Bertero, V. V. "Use of Energy as a Design Criteria in Earthquake-Resistant Design." Report No. UBC/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkely, 1988.
- Fajfar, P.; Vidic, T. "Constant Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 23, pp. 523-537, 1994.
- Fajfar, P.; and Vidic, T.; Fischinger, M. "On the Energy Input into Structures." Proceedings of the Pacific Conference on Earthquake Engineering, Newzland, 1991.
- Park, Y.; Ang, A. H. S. "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete." Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 111, No. ST4, 1985.
- Clough, R. W., Penzien, J. "Dynamics of Structures." McGraw Hill, ISBN: 0-07011394, 1993.
- Computers & Structures Inc., "Studing SAP2000 Structural Program." Berkeley, California, 2000.
- Park, Y. J.; Reinhorn, A. M.; Kunnath, S. K. "IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Framed-Shear-Wall Structures." NCEER-87-0008, 1987.
- Parakash, V.; Filippou, F. C. "DRAIN-2DX: Base Program User Guide." Report No. UCB/SEMM-92/29, 1992.
- Esquivel, J. C. "Influence of Some Parameters on the Inelastic Earthquake Response using Different Hysteretic Models for Reinforced Concrete." Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema Rotterdam, 1992, pp. 4209-4215.
- [۶] E_K انرژی جنبشی مطلق
- [۷] E'_i انرژی ورودی نسبی
- [۷] E'_K انرژی جنبشی نسبی
- [۷] E_{BE} درصد خطای تعادل
- [۸] f_s مقدار نیروهای خارجی وارد بر سیستم
- [۹] F_c نیروی مقاوم شکست
- [۹] F_y نیروی مقاوم تسلیم
- [۱۰] k سختی سیستم
- [۱۰] K_r سختی حین باربرداری
- [۱۱] m جرم سیستم
- [۱۱] PGA بیشینه شتاب زلزله
- [۱۲] PGV بیشینه سرعت زلزله
- [۱۳] t زمان
- [۱۴] t_f مدت زمان جنبش شدید
- [۱۴] T_n پریود مود nام
- [۱۵] U تغییر مکان نسبی
- [۱۵] \dot{U} سرعت نسبی
- [۱۵] \ddot{U} شتاب نسبی
- [۱۵] U_g تغییر مکان زمین
- [۱۶] \ddot{U}_g شتاب زمین
- [۱۶] U_i تغییر مکان مطلق
- [۱۶] \dot{U}_i سرعت مطلق
- [۱۶] \ddot{U}_i شتاب مطلق
- [۱۷] \ddot{U}_i شتاب مطلق

۱۶-مراجع

- [۱] آیین‌نامه حداقل بار وارده بر ساختمان‌ها و ابنیه فنی (تجدید نظر در استاندارد ۵۱۹)، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۷۹.
- [۲] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰ - ویرایش دوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، آذر ۱۳۷۸.
- [۳] حسین‌زاده، ن؛ ناطقی‌الهی، ف. ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های بتنی مسلح متشکل از قاب - دیوار برشی، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۵.
- [۴] نقیه، م. (مترجم)، آیین‌نامه سازه‌های بتنی ACI 318-95 و تفسیر ACI 318R-95، نشر ارکان اصفهان، ۱۳۷۵.
- [۵] Chandler, A. M.; Tsangaris, M.; Lam, N. T. K.; Wilson, J. L.; Edwards, M.; Hutchinson, G. L. "Seismic Performance of RC Structures using Displacement Based Principles." Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, 1998