



تحلیل دینامیکی غیر خطی (IDA) چلیک‌های فضاکار دو لایه کروی، تعیین شکل پذیری و بررسی ضریب رفتار آنها

علیرضا سلاجقه¹، عیسی سلاجقه²، حسین تاج‌الدینی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

Alireza.salajeghe@iauk.ac.ir

2- استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

eysasala@yahoo.com

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

Hossein.tajaddiny@iauk.ac.ir

چکیده

چلیک کروی دولایه در گروه سازه‌های فضاکار می‌باشد که از دو لایه تشکیل یافته که بوسیله اعضای مورب و بوسیله اتصالات مفصلی به هم متصل گردیده‌اند، هدف از این تحقیق تعیین شکل پذیری و بررسی ضریب رفتار تعدادی از سازه‌های فوق می‌باشد. در این تحقیق بر مبنای در نظر گرفتن رفتار غیر خطی هندسی و غیر خطی مصالح و با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی افزایشی سعی بر آن شده که با تعیین ضریب رفتار دیدی نزدیک به واقعیت در خصوص نحوه پاسخ این سازه‌ها در برابر نیروهای زلزله حاصل گردد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی غیرخطی، بارهای دینامیکی زلزله، چلیک‌های دولایه فضا کار، شکل پذیری، ضریب رفتار

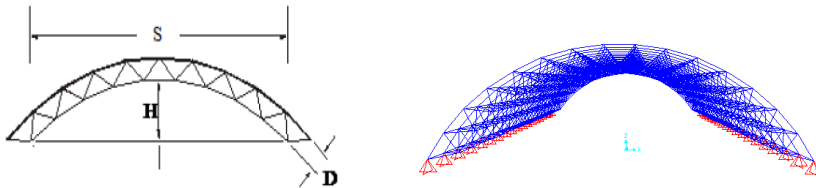
1. مقدمه

شکل پذیری سازه‌ها عامل مهمی در ارزیابی رفتار لرزه‌ای آنها می‌باشد. یک فاکتور مهم در بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها ضریب رفتار (ضریب کاهش) می‌باشد. فلسفه کاربردی ضریب رفتار در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، احتساب انرژی است که یک سازه از زمانی که اولین مفصل پلاستیک در آن تشکیل می‌شود تا زمانی که به مکانیزم خرابی کامل می‌رسد، تحمل یا جذب می‌کند. هدف از این مقاله بررسی شکل‌پذیری و ضریب رفتار چلیک‌های دولایه کروی تحت بارگذاری زلزله می‌باشد. در این مقاله مدل‌های مختلفی از چلیک‌های فضاکار با نسبت‌های مختلف عرض به دهانه و ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل غیر خطی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و مصالح تحت بارگذاری فراینده انجام گرفته است. منحنی‌های رفتاری نیرو-جابجایی (منحنی ظرفیت سازه) این سازه‌ها در نقاط حساس ترسیم شده است. در بحث غیر خطی مصالح رفتار عضو خرابایی سه بعدی در کشش با مدل دو خطی و در فشار کمانش و بعد از آن رفتار پس کمانشی اعضا نیز لحاظ

گردیده است و با استفاده از شیوه‌های ارائه شده شکل پذیری و ضریب رفتار این سازه‌ها محاسبه شده است. از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده (IDA) جهت تحلیل غیر خطی استفاده گردیده زیرا که این روش قادر به تعیین رفتار سازه حتی پس از فروجهش‌ها و ناپایداری‌های موضعی ممکن دیگر می‌باشد. برای این منظور ابتدا به منظور دستیابی به ابعاد بهینه اعضا از نرم افزار Sap2000 استفاده شده است پس از طراحی به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی به روش بار افزون از نرم افزار Seismo Struct V6.5 استفاده شده است.

2. ساختار و شکل هندسی چلیک‌های فضاکار دو لایه مورد بررسی

گروهی از چلیک‌ها با نسبت‌های ارتفاع به دهانه متفاوت، مورد مطالعه قرار گرفته اند. دهانه (S) در این گروه به میزان 30 و 40 و 50 و 60 و 70 متر در نظر گرفته شده، و نسبت ارتفاع به دهانه (H/S) به میزان 0.3 و 0.4 و 0.5 برای هر مدل در نظر گرفته شده است. فاصله بین دولایه (D) نیز در تمام مدلها ثابت و برابر 1.5 متر منظور شده است. هندسه چلیک‌ها به صورت شماتیک در شکل زیر نشان داده شده است. تکیه گاه چلیک نیز با تعبیه تکیه گاه مفصلی بر روی گره‌های لایه بیرونی در طول لبه چلیک برآورده شده است



شکل (1-2): هندسه و پیکربندی چلیکهای دو لایه فضاکار کروی

تمامی مدل‌های مورد بررسی، در برابر بارهای استاتیکی شامل بار مرده و بار برف و بار باد و تغییرات درجه حرارت بارگذاری شده اند. بار مرده چلیک‌ها، شامل وزن المانها، اتصالات، قطعات الحاقی و وزن پوشانه در نظر گرفته شده، و بار برف نیز مطابق شدیدترین حالت بارگذاری مطابق با آیین نامه Eurocode8 [1] بر سازه اعمال گردید است پس از آنالیز، همه مدلها به خوبی و در حد بهینه طراحی شده اند معیار اصلی طراحی در انتخاب مقطع، نیز کماتش اعضای فشاری، در نظر گرفته شده است.

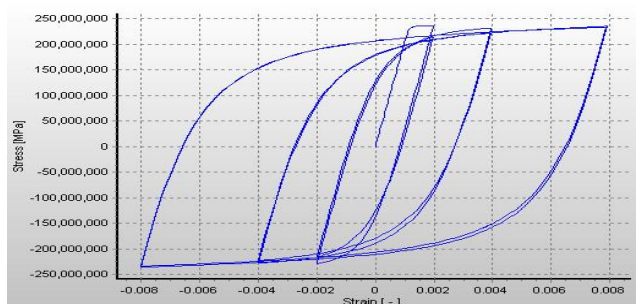
3. بررسی رفتار غیر خطی چلیک‌ها

سازه‌هایی که در معرض زلزله قرار می‌گیرند، ممکن است تغییر شکلهایی خارج از محدوده الاستیک، تجربه کنند. کلاً تغییر شکل غیر ارتجاعی، به شدت نیروی محرک و پارامترهای غیرخطی سازه بستگی دارد. به

دلیل ماهیت زلزله، اجزای سازه، در حین زلزله چرخه های بارگذاری و باربرداری پیایی را تجربه می کنند. این حلقه ها ظرفیت سازه را برای جذب انرژی بیان می کنند. عواملی مثل سیستم سازه ای، مصالح، اتصالات و غیره، عامل بروز رفتار غیرخطی سازه خواهند بود. عوامل بروز رفتار غیر خطی در اعضای سازه ها را می توان به دو عامل کلی اصلی تقسیم بندی کرد که عبارتند از، غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی. غیر خطی مصالح، دربرگیرنده الگوی بار - تغییر مکان مصالح سازه و غیرخطی هندسی، بیانگر تغییرشکلهای بزرگ سازه هستند. در این تحقیق هر دو عامل غیرخطی مد نظر قرار گرفته اند. هدف اصلی از انجام آنالیز غیر خطی و تعیین ضریب رفتار، در واقع پیدا کردن ضریب کاهش نیروی استاتیکی معادل زلزله می باشد.

چلیک های دولایه از المانهایی تشکیل شده اند، که تنها نیروهای محوری را تحمل می کنند. بنابر این در این گونه سازه ها، رفتار اعضای فشاری که در معرض کمانش هستند، و همچنین انتظار مقاومت پس کمانشی چنین اعضای، در بررسی رفتار غیرخطی بسیار مهم می باشد. در این تحقیق برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح، خصوصاً رفتار پس کمانشی المانها در فشار، از نمودار تنش کرنش مطابق شکل 1-3 استفاده گردیده است. مطلب مهمی که در آنالیز غیر خطی مطرح می شود، شکل پذیری است. شکل پذیری در واقع ظرفیت سازه، برای تحمل تغییرشکلهای ماندگار، تحت بار ثابت، بدون ناپایداری سازه است. یا به عبارتی، شکل پذیری، نسبت تغییرشکل سازه قبل از خرابی، به تغییرشکل لحظه تسلیم، یا آغاز رفتار غیرخطی است. شکل پذیری و در مقابل آن تردشکنی یک سازه به رفتار غیر ارتجاعی سازه وابسته اند.

تعاریف متعددی برای ضریب رفتار سازه، ارائه شده است. ضریب رفتار، فاکتوری است که ظرفیت غیرخطی سازه را بیان می کند و در بسیاری از آیین نامه ها از آن به عنوان ضریب کاهش نیروی استاتیکی معادل زلزله، یاد شده است مطابق [1] ضریب رفتار هر سازه ای با ضریب شکل پذیری مرتبط است. این تحقیق نیز بر مبنای همین رویکرد پیش رفته است. یعنی ابتدا ضریب شکل پذیری مدلهای اسپیس با توجه به ضریب شکل پذیری، ضریب رفتار هر مدل بدست آمده است.



شکل (1-3): رفتار غیر خطی المان خرابایی جهت آنالیز دینامیکی غیر خطی

4. تحلیل دینامیکی غیر خطی افزایشی (IDA)

تحلیل های دینامیکی افزایشی به عنوان یک روش تحلیل پارامتریک و به اشکال مختلف جهت تخمین مناسب از عملکرد سازه در اثر بارهای لرزه ای مطرح شده است. افزایش تدریجی بارهای لرزه ای اولین بار توسط [2] Mehanny and deierlin و [3] Bertero مطرح و جهت بررسی عملکرد سازه ها مورد استفاده قرار گرفت. ولی قانونمند شدن آن اولین بار توسط [4] Vamvatsikos and cornell به منظور بررسی عملکرد سازه ها مورد استفاده قرار گرفت. در این روش سازه مورد نظر با تحلیل دینامیکی که تحت اثر یک یا چند زلزله که برای سطوح مختلف از شدت مقیاس شده اند تحلیل میشود و منحنی پارامتر مربوط به پاسخ در برابر پارامتر شدت زلزله ترسیم می شود این منحنی که در حالت کلی در فضای دو متغیر IM و DM ترسیم می شود به منحنی IDA معروف است. در مواردی که از چندین زلزله جهت رسیدن به هدف استفاده می شود لازم است درون یابی های مناسب و خلاصه سازی هایی جهت رسیدن به یک توزیع احتمالاتی از نیاز سازه در برابر شدت زلزله صورت گیرد. تحقیقات انجام شده توسط [5] Shome et al نشان میدهد که شتاب طیفی در مود اول سازه با میرایی 5 درصد انتخاب مناسبی برای معیار شدت (IM) می باشد و با توجه به اینکه در این اینجا بحث بر روی رفتار کلی سازه و اجزای سازه ای می باشد حداکثر مقدار جابجائی نسبی تراز بام به عنوان معیار آسیب (DM) انتخاب می شود.

با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی هندسی و غیر خطی مصالح، پس از اولین تسلیم موضعی، ماتریس سختی سازه جهت گام بعدی آنالیز اصلاح میگردد. در این مطالعه، سعی بر آن شده با افزایش تدریجی برش پایه، در دو جهت جداگانه افقی و قائم، سازه تا انهدام کامل تحت آنالیز قرار گیرد و به این ترتیب ضریب شکل پذیری سازه تعیین گردد. در این تحقیق به منظور افزایش گام به گام برش پایه، شتاب اعمال شده به پای سازه گام به گام افزایش یافته است. یعنی در هر جهت، شتاب از صفر و با گام افزایشی 0.01g تا حدی که ناپایداری کلی سازه را سبب شود، افزایش یافته، و رفتار سازه در طی این گام ها ثبت شده است. برای هر گره سازه، نسبت تغییر شکل گره در آخرین گام آنالیز (لحظه فروپاشی سازه)، به تغییر شکل لحظه تسلیم سازه (لحظه ای که اولین گره ناپایدار شده و از آن لحظه به بعد رفتار سازه غیر خطی می شود)، به عنوان ضریب شکل پذیری گره مورد نظر ثبت شده، و از این میان از بین تمام گره ها، ضریب شکل پذیری گره بحرانی، به عنوان ضریب شکل پذیری سازه انتخاب گردیده است. گره بحرانی اولین گره ای است که تسلیم می شود. یعنی اولین گره ای که یکی از المانهایش کمانش کرده، و یا در اثر تسلیم کششی، از رده خارج می شود. عنوان ضریب شکل پذیری گره مورد نظر ثبت شده، و از این میان از بین تمام گره ها، ضریب شکل پذیری گره بحرانی، به عنوان ضریب شکل پذیری سازه انتخاب گردیده، اگر بخواهیم ضریب رفتار را مطابق [1] تعیین کنیم با توجه به اینکه زمان تناوب اصلی چلیک ها کمتر از 7 ثانیه است، از رابطه زیر استفاده می کنیم که در این آیین نامه

برای سازه های با زمان تناوب اصلی کمتر از 0.7 ارائه شده است. به این ترتیب می توان ضریب رفتار را از ضریب شکل پذیری تعیین کرد.

$$R = 1 + (\mu - 1) * \left(\frac{T}{0.7}\right) \quad \text{For } T \leq 0.7 \quad (1)$$

در این رابطه R ضریب رفتار و μ ضریب شکل پذیری و T زمان تناوب اصلی سازه است.

5. شتاب نگاشت‌های مورد استفاده

برای تحلیل با استفاده از شتاب نگاشت‌های واقعی با توجه به تحقیقات [5] صورت گرفته برای ساختمانهای کوتاه و متوسط تعداد 20 رکورد جهت انجام تحلیلهای مورد نظر کافی میباشد. در اینجا 20 شتاب نگاشت با شدت 6.5 تا 6.9 و فواصل متوسط که روی خاک C,D (NEHRP) [6] که معادل خاک نوع III,IV استاندارد 2800 ایران [7] می باشند مورد استفاده قرار گرفته است مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده در جدول شماره 1 به همراه مشخصات خاک آن آورده شده است.

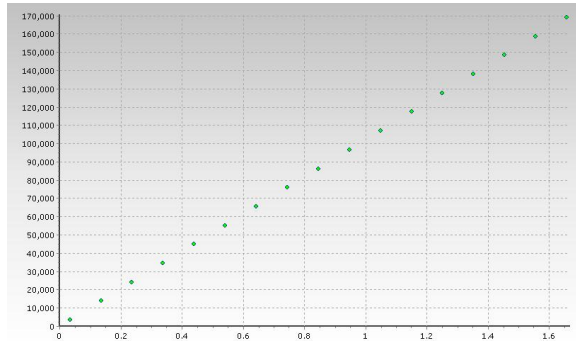
No	Event	Station	ϕ^1	Soil ²	M ³	R ⁴ (km)	PGA (g)
1	Northridge, 1994	LA, Baldwin Hills	090	B,B	6.7	31.3	0.239
2	Imperial Valley, 1979	Compuertas	285	C,D	6.5	32.6	0.147
3	Imperial Valley, 1979	Plaster City	135	C,D	6.5	31.7	0.057
4	Loma Prieta, 1989	Hollister Diff. Array	255	-,D	6.9	25.8	0.279
5	San Fernando, 1971	LA, Hollywood Stor. Lot	180	C,D	6.6	21.2	0.174
6	Loma Prieta, 1989	Coyote Lake Dam Downstream	285	B,D	6.9	22.3	0.179
7	Imperial Valley, 1979	Cucapah	085	C,D	6.5	23.6	0.309
8	Northridge, 1994	LA, Hollywood Storage FF	360	C,D	6.7	25.5	0.358
9	Loma Prieta, 1989	Anderson Dam Downstream	360	B,D	6.9	21.4	0.24
10	Loma Prieta, 1989	Hollister South & Pine	000	-,D	6.9	28.8	0.371
11	Loma Prieta, 1989	Sunnyvale Colton Ave	360	C,D	6.9	28.8	0.209
12	Superstition Hills, 1987	Wildlife Liquefaction Array	090	C,D	6.7	24.4	0.18
13	Imperial Valley, 1979	Chihuahua	282	C,D	6.5	28.7	0.254
14	Imperial Valley, 1979	El Centro Array #13	230	C,D	6.5	21.9	0.139
15	Imperial Valley, 1979	Westmoreland Fire Station	180	C,D	6.5	15.1	0.11
16	Loma Prieta, 1989	Halls Valley	090	C,C	6.9	31.6	0.103
17	Superstition Hills, 1987	Wildlife Liquefaction Array	360	C,D	6.7	24.4	0.2
18	Imperial Valley, 1979	Compuertas	015	C,D	6.5	32.6	0.186
19	Imperial Valley, 1979	Plaster City	045	C,D	6.5	31.7	0.042
20	San Fernando, 1971	LA, Hollywood Stor. Lot	090	C,D	6.6	21.2	0.21

¹ Component ² USGS, Geomatrix soil class ³ moment magnitude ⁴ closest distance to fault rupture

جدول (1): مجموعه 20 شتاب نگاشت مورد استفاده

6. نمونه ای از نتایج تحلیل IDA صورت گرفته بر روی مدل های مورد مطالعه

مطابق آنچه در زیر ارائه گردیده است (شکل 6-1) نمودار حداکثر جابجایی گره تراز بام در مقابل حداکثر برش پایه در هر مرحله افزایش نسبی مقدار شتاب پایه به ازای استفاده از یک شتاب نگاشت ترسیم گردیده است

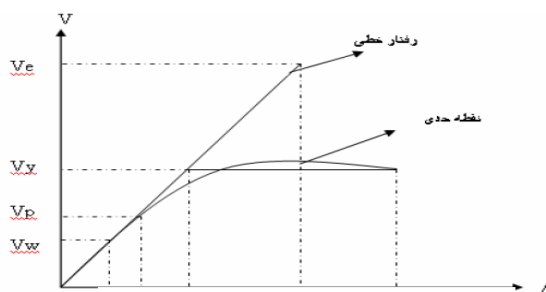


شکل (6-1): مقادیر حداکثر جابجایی نسبی تراز بام در مقابل حداکثر برش پایه در هر گام افزایش شتاب پایه

7. ضریب شکل پذیری و ضریب رفتار

آیین نامه های طراحی در مقابل زلزله الاستیک باقی ماندن سازه را در مواجهه با زلزله شدید الزامی نمی دانند. بلکه اجازه داده می شود تا سازه وارد محدوده رفتار پلاستیک شده و انرژی ناشی از زلزله را در خود مستهلک نماید. به همین دلیل در تعیین نیروی های معادل زلزله جهت تحلیل خطی و طراحی به روش تنش مجاز نیروی زلزله را بر ضریبی بنام ضریب رفتار تقسیم می شود این ضریب نشان دهنده عملکرد لرزه و قابلیت جذب انرژی آن می باشد. در ادامه روش محاسبه ضریب رفتار و شکل پذیری ارائه گردیده است

برای محاسبه ضریب رفتار تحت بار دینامیکی افزایشی، اصول کار همان روش محاسبه ضریب رفتار و شکل پذیری براساس جذب انرژی می باشد بدین صورت که هر یک از مدلها را جداگانه تحت شتاب نگاشت های انتخاب شده بصورت دینامیکی غیرخطی تحلیل نموده و نقاط ماکزیمم برش پایه و جابجایی تراز بام هر مرحله برداشت می شود. سپس منحنی پوش حاصل از نقاط اتصال ماکزیمم جابجایی و برش پایه رسم می گردد. با استفاده از منحنی های پوش حاصل از اتصال نقاط ماکزیمم نیرو و تغییر مکان منحنی هیستریزس هر یک از مدلها، و با استفاده از روابط زیر ضریب رفتار محاسبه می گردد.



شکل (7-1): نمودار آنالیز خطی و غیر خطی سازه ها

نقطه ای از منحنی که در آن نمودار از حالت خطی به سمت غیر خطی شدن حرکت می کند، جا به جایی و نیرو در لحظه جاری شدن را نشان می دهد ($\Delta S, V_S$)

1-7. ضریب رفتار براساس سطح متناظر با بار نهایی

$$R = R_{\mu} * R_{\rho} = \frac{V_e}{V_y} * \frac{V_y}{V_p} = \frac{V_e}{V_p} \quad (2)$$

2-7. ضریب رفتار براساس سطح متناظر با تنش مجاز

$$R = R_{\mu} * R_{\rho} * Y = \frac{V_e}{V_y} * \frac{V_y}{V_p} * Y \quad (3)$$

3-7. ضریب شکل پذیری

ضریب شکل پذیری برابر با است با نسبت تغییر شکل حداکثر به تغییر شکل تسلیم، ضریب شکل پذیری تحت بار افزایشی بر اساس تسلیم ابتدای یا اولین مفصل پلاستیک محاسبه می شود. در این حالت

1-3-7. ضریب افزایش تغییر مکان

$$C_d = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (4)$$

2-3-7. ضریب اضافه مقاومت

$$R_s = \frac{V_y}{V_p} \quad (5)$$

3-3-7. ضریب شکل پذیری

$$\mu = \frac{Cd}{Rs} \quad (6)$$

Δe جا به جایی سازه در حالت نهایی و Vy برش پایه حد تسلیم می باشند
با استفاده از نتایج آنالیز برای هر دو جهت افقی و قائم، ضرایب شکل پذیری و متعاقب آن ضرایب رفتار
مدلهای مورد بررسی، تعیین گشته اند که تامل در نتایج بیانگر رفتار تردشکن مدلهای مورد بررسی (چلیکها)، علی
الخصوص تردشکنی در برابر برش پایه افقی می باشد. نتیجه نهایی نمونه ای از مدلهای مورد بررسی به طور
خلاصه در جداول شماره 2 و 3 آورده شده است.

جدول (2): ضرایب رفتار چلیک ها برای جهت افقی

دهانه به ارتفاع نسبت	0.3	0.4	0.5
پذیری شکل ضریب	1.0211	1.0135	1.00824
رفتار ضریب	1.00349	1.001705	1.00118

جدول (3): ضرایب رفتار چلیک ها برای جهت عمودی

دهانه به ارتفاع نسبت	0.3	0.4	0.5
پذیری شکل ضریب	1.2794	1.1049	1.00783
رفتار ضریب	1.0682	1.0178	1.00581

8. خلاصه و نتیجه گیری

با استفاده از نتایج آنالیز برای هر دو جهت افقی و قائم، ضرایب شکل پذیری و متعاقب آن ضرایب رفتار
مدلهای مورد بررسی، تعیین گشته اند، که نتایج تعدادی از این مدلها در قسمت قبل ارائه گردید. تامل در نتایج
حاصل بیانگر رفتار ترد شکن مدلهای مورد بررسی (چلیکها)، علی الخصوص تردشکنی در برابر برش پایه افقی
می باشد.

9. مراجع

- [1] Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures-Part 1-1: General rules-Seismic action and general requirements for structures” (2002), European Committee for Standardization (CEN)
- [2] Mehanny, S. S. and Deierlein, G. G. (2000). "Modeling and assessment of seismic performance of composite frames with reinforced concrete columns and steel beams," Report No. 136, The John A.



- [3] Bertero, V.V. (1977). "strength and deformation capacities of buildings under extreme environments," Structural Engineering and Structural Mechanics, K.S. Pister, ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 211-215.
- [4] Dimitrios. Vamvatsikos and C.Allin Cornell "Incremental Dynamic Analysis", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, CA 94305-4020, U.S.A.
- [5] Shome, N. and Cornell, C.A. "probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures," Report No. RMS-35, RMS Program, Stanford University, Stanford, (1999).
- [6] The NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, 2000 Edition
- [7] آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد 2800-ویرایش سوم)، 1384، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن