

بررسی رفتار لرزه‌ای قابهای مهاربندی شده بتن آرمه

مجتبی اصل حمد الله نیاⁱ؛ ابوالقاسم کرامتیⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، رفتار لرزه‌ای قابهای خمشی بتن آرمه که با استفاده از المان‌های بتن آرمه مهاربندی شده‌اند، بررسی شده است. این بررسی شامل ساخت چند مدل قاب دو بعدی بتن آرمه و تحلیل غیرخطی استاتیکی و دینامیکی آنها می‌باشد. نتایج به دست آمده از تحلیل غیرخطی قابهای بتن آرمه مهاربندی شده از نظر سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی با نتایج حاصل از تحلیل قابهای خمشی و قابهای خمشی به همراه دیوار برشی مقایسه شده است. مقایسه این سه سیستم سازه‌ای نشان می‌دهد که قابهای بتن آرمه مهاربندی شده، رفتار لرزه‌ای بهتری نسبت به دو سیستم دیگر دارند.

واژگان کلیدی

قاب بتن آرمه، مهاربند، غیرخطی، سختی، شکل‌پذیری، جذب انرژی

Seismic Behavior of Reinforced Concrete Braced Frames

M.A.Hamdollahnia ; A.Keramati

ABSTRACT

Seismic behavior of reinforced concrete braced frames is investigated in this paper. Study includes the modeling of some two Dimensional Reinforced Concrete braced frames using nonlinear static and dynamic analysis. The results of braced frame analysis such as stiffness, strength, ductility and energy dissipation are compared with those of Reinforced Concrete frames and Reinforced Concrete frames with shear wall. This comparison concludes that Reinforced concrete braced frames has better seismic performance.

KEYWORDS

Reinforced concrete frame, Brace, Nonlinear, Stiffness, Ductility, Energy dissipation

۱- مقدمه

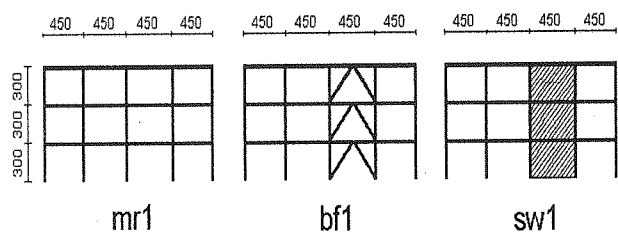
تلفات جانی و مالی ناشی از آن با گسترش مراکز جمعیتی در شهرهای بزرگ، محققین را به بررسی رفتار سازه‌های بتن آرمه و پیشنهاد سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در برابر بارهای جانبی واداشته است. تحقیقات گسترده‌ای بر روی رفتار المان‌های مختلف سازه‌ای بتن آرمه انجام گرفته و روش‌های مختلفی برای تعیین نیروهای داخلی المان‌ها در محدوده رفتار خطی و غیرخطی پیشنهاد گردیده و همچنین در اکثر کشورهای لرزه‌خیز جهان، آیین‌نامه طراحی سازه‌های بتن آرمه با ملاحظات لرزه‌ای تدوین و منتشر شده است.

امروزه، استفاده از بتن مسلح در ساخت سازه‌های متداول در جوامع شهری گسترش فراوانی یافته است. مزایای مختلف استفاده از مصالح بتن آرمه از جمله استحکام، دوام، سهولت اجرا، قیمت تجاری مناسب و غیره مهندسان سازه را به استفاده هرچه بیشتر از این مصالح سوق می‌دهد. سازه‌های با ارتفاع کم تا ساختمان‌های بلندمرتبه عظیم با استفاده از مصالح بتن مسلح در سراسر دنیا ساخته و استفاده شده‌اند. وقوع زمین‌لرزه‌های شدید در نقاط مختلف جهان و افزایش

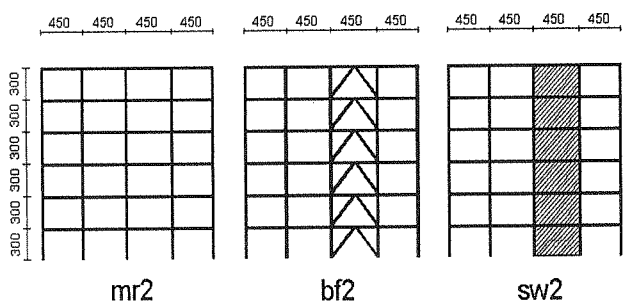
ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه؛ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

ⁱⁱ استادیار دانشکده عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

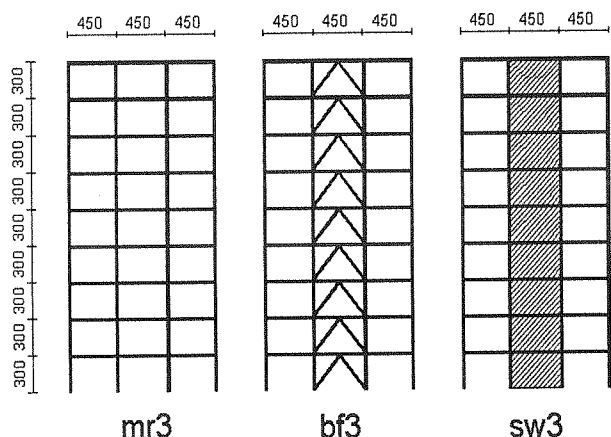
ملی ساختمان ایران انجام شده است.



شکل (۱): ابعاد هندسی مدل‌های گروه اول



شکل (۲): ابعاد هندسی مدل‌های گروه دوم



شکل (۳): ابعاد هندسی مدل‌های گروه سوم

برای تعیین بارهای لرزه‌ای در روش تحلیل استاتیکی خطی از روش استاتیکی معادل آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران [۱] استفاده شده است. بارگذاری لرزه‌ای در روش غیرخطی استاتیکی و دینامیکی بر اساس ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود انجام گرفته است [۲]. برای انجام تحلیل‌های دینامیکی، سه شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه طبرستان، ناغان و السنترو انتخاب شده است. برای تحلیل‌های خطی استاتیکی، از نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده و طراحی سازه‌های قابها بر اساس ضوابط آیین‌نامه ACI318-99 با فرض شکل پذیری متوسط برای المان‌های قاب و دیوار انجام پذیرفته است.

پس از تعیین نیروهای داخلی اعضا، طراحی هرکدام از المان‌ها به وسیله نرم‌افزار صورت گرفته است. در طراحی

از جمله سیستم‌های باربر جانبی متداول در سازه‌های بتن‌آرمه می‌توان سیستم قاب خمشی و سیستم قاب بتن‌آرمه به همراه دیوار برشی را ذکر کرد. طراحی هرکدام از این سیستم‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌های موجود انجام می‌گیرد. وقوع زلزله‌های شدید در چند سال اخیر، مزایا و معایب هرکدام از این سیستم‌ها را تا اندازه‌زیادی مشخص کرده و با پیشرفت علوم کامپیوتر نیز امکان مطالعه عددی هرکدام از این سیستم‌ها فراهم شده است.

بررسی‌های محققین بر روی این دو سیستم سازه‌ای نشان می‌دهد که سیستم قاب خمشی با وجود دارا بودن نرمی و شکل‌پذیری زیاد، از لحاظ مقاومت و سختی جانبی دچار ضعف است. در مقابل، با وجود اینکه سیستم دیوار برشی، مقاومت و سختی زیادی در برابر بارهای جانبی ناشی از زلزله دارد، ولی به طور ناگهانی دچار کاهش سختی و مقاومت شده و از شکل‌پذیری کمی برخوردار می‌باشد. از لحاظ ظرفیت جذب انرژی در اثر تغییرشکل‌های غیرخطی نیز سیستم قاب خمشی وضعیت بهتری نسبت به سیستم دیوار برشی دارد.

برای رفع معایب ذکر شده، سیستم جدیدی پیشنهاد شده است که در آن، مزایای این دو سیستم در کنار هم قرار گرفته و معایب تا اندازه‌ای رفع شده است [۹]. در این سیستم، قاب خمشی بتن‌آرمه به وسیله المان‌های منشوری بتن‌آرمه مهاربندی می‌شود. شکل این مهاربندها به منظور سهولت در اجرا، به شکل (۸) در نظر گرفته می‌شود و اتصال آنها به قاب اصلی به صورت گیردار می‌باشد. این المان‌ها در اصل به صورت تیر-ستون عمل کرده و دارای سختی خمشی و محوری می‌باشند. برای بررسی رفتار این سیستم، چند مدل دو بعدی قاب بتن‌آرمه ساخته شده و تحت تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی قرار گرفته‌اند. در مرحله بعد، رفتار این قابها در هر سه سیستم باربر جانبی بررسی و مقایسه شده است.

۲- نحوه مدلسازی و تحلیل

برای هرکدام از سیستم‌های سازه‌ای قاب خمشی، قاب خمشی به همراه دیوار و قاب خمشی مهاربندی شده سه مدل دو بعدی (۳، ۶ و ۹ طبقه) ساخته شد. ابعاد هندسی هرکدام از قابها در شکل‌های (۱) تا (۳) نشان داده شده است.

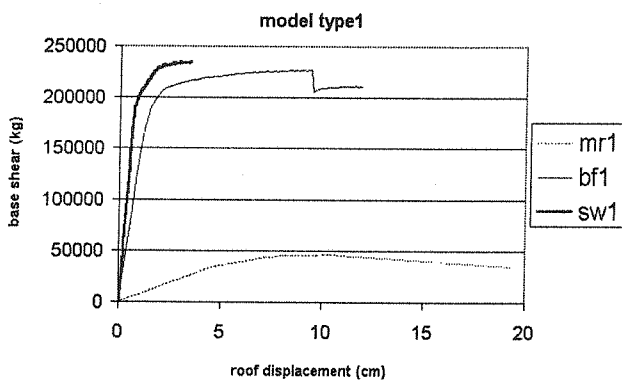
برای تعیین بارهای ثقلی و لرزه‌ای، کاربری سازه‌ها مسکونی، در منطقه با خطر نسبی لرزه‌ای زیاد و خاک نوع II فرض گردیده است. سهم بارگیر ثقلی هرکدام از قابها، نواری به عرض ۶ متر از کف هر طبقه (۳ متر از هر طرف) در نظر گرفته شده است. بارگذاری ثقلی قابها بر اساس مبحث ششم مقررات

چون دیافراگم سقف طبقات صلب فرض شده است، جابجایی افقی نقاط در هر طبقه یکسان در نظر گرفته شده و به همین خاطر یکی از نقاط طبقه بام برای هرکدام از قابها بعنوان نقطه کنترل سازه برای بارگذاری جانبی انتخاب شده است. توزیع بارهای جانبی برای هرکدام از قابها مطابق توزیع نوع اول مندرج در دستورالعمل بهسازی انجام گرفته است. بر این اساس، نیروهای جانبی اعمال شده بر هرکدام از مدل‌ها با توزیعی متناسب با توزیع بار جانبی در روش استاتیک خطی در نظر گرفته شده است [۲] و [۴]. پس از مدلسازی هندسه سازه، اعمال بارهای ثقلی و توزیع بارهای جانبی در ارتفاع آن، تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌ها انجام می‌پذیرد. منحنی نیرو- تغییر شکل جانبی هرکدام از مدل‌ها در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

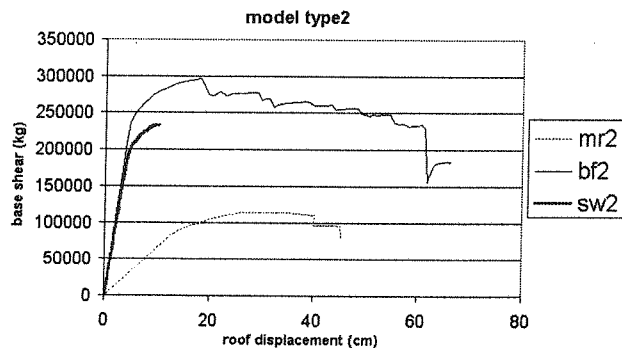
۳-۱- تعیین جابجایی‌های تسلیم، مقاومت حداکثر و

نهایی سازه

برای تعیین جابجایی نظیر تسلیم سازه از روش مساحت‌های معادل استفاده شده است. در این روش، همان گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، منحنی نیرو- تغییرشکل واقعی سازه به یک منحنی دوخطی تبدیل می‌شود. به طوری که مساحت‌های زیر این دو منحنی با هم برابر شود [۹].



شکل (۵): منحنی نیرو- تغییرشکل جانبی مدل‌های گروه اول

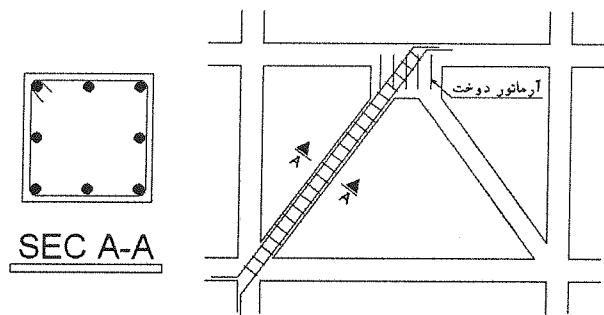


شکل (۶): منحنی نیرو- تغییرشکل جانبی مدل‌های گروه دوم

مهاربندها از ضوابط طراحی ستون (به علت عملکرد خمشی- محوری) استفاده شده است. شکل اجرایی و نحوه آرماتورگذاری مهاربندها در شکل (۴) نشان داده شده است. مشخصات غیرخطی هرکدام از المان‌ها بر اساس ابعاد مقطع و میزان آرماتورگذاری آن بر اساس ضوابط ذکر شده در دستورالعمل بهسازی تعیین شده است. تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی به وسیله نرم‌افزار RAM Perform-2D انجام شده است.

هرکدام از قابها با توجه به ابعاد المان‌ها مجدداً در این نرم‌افزار مدل شده و مشخصات غیرخطی المان‌ها با استفاده از مفاصل پلاستیک (به صورت متمرکز) معرفی و به آنها اختصاص داده می‌شود [۵]. مفاصل پلاستیک تیرها در دو انتهای آنها و مفاصل پلاستیک ستون‌ها و مهاربندها در دو انتها و وسط این المان‌ها (به علت عملکرد محوری - خمشی) تعریف می‌شود [۶].

برای تخصیص مشخصات غیرخطی دیوارهای برشی، از المان دیوار برشی معرفی شده در نرم‌افزار، با توجه به مشخصات مقطع دیوارها استفاده شده است. فرض کلی بر این بوده است که رفتار غالب در تیرها، رفتار خمشی، در ستون‌ها و بادبندها خمشی- محوری و در دیوارهای برشی به صورت برشی- خمشی است؛ لذا تعریف مفاصل پلاستیک نیز بر اساس همین فرض انجام یافته است [۷] و [۸].



شکل (۴): جزئیات اجرایی و نحوه آرماتورگذاری مهاربندها

۳- تحلیل استاتیکی غیرخطی (NSP)

پس از تشکیل هندسه مدل و اختصاص مشخصات خطی و غیرخطی المان‌ها، بارگذاری ثقلی هرکدام از قابها انجام می‌گیرد. ترکیبات بارهای ثقلی مرده و زنده بر اساس دستورالعمل بهسازی [۱] و مطابق روابط زیر در نظر گرفته شده است.

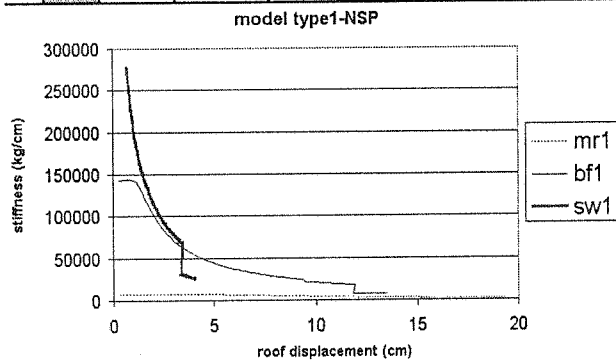
$$Q_G = 1.1 (Q_D + Q_L) \quad (1)$$

$$Q_G = 0.9 Q_D \quad (2)$$

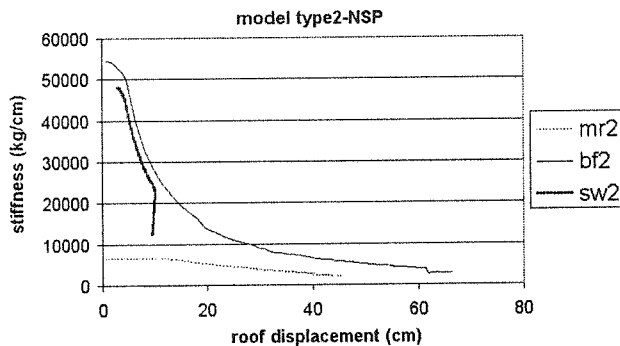
که در آن، Q_D بارهای مرده و Q_L بارهای زنده را نمایندگی می‌کنند.

جدول (۱): مقادیر جانبی و مقاومت قاب ها

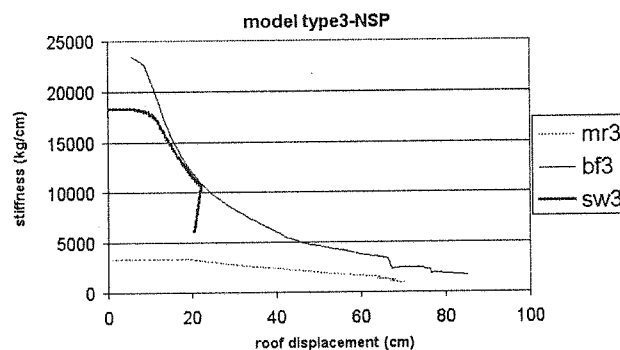
model	U_y (cm)	F_y (kg)	U_{max} (cm)	F_{max} (kg)	U_u (cm)	F_u (kg)	μ	
type1	mr1	۶/۷۱	۴۱۴۰۰	۱۰/۴۴	۴۵۹۲۰	۱۷/۷۸	۲۶۷۴۰	۲/۶
	bf1	۲/۲۵	۲۰۹۲۰۰	۹/۳۶	۲۶۶۷۰۰	۱۱/۸۸	۲۱۰۵۰۰	۵/۳
	sw1	۱/۰۶	۲۰۷۴۶۶	۳/۴۲	۲۳۴۴۴۲	۳/۴۲	۲۳۴۴۴۲	۳/۲
type2	mr2	۱۸/۷	۱۰۱۲۰۰	۲۶/۶۴	۱۱۳۴۰۰	۴۵	۹۴۴۸۰	۲/۴
	bf2	۱۰/۸۹	۲۸۱۸۰۰	۱۷/۸۲	۲۹۶۲۰۰	۵۵/۸	۲۳۷۲۰۰	۵/۱
	sw2	۵/۴	۲۰۹۹۲۹	۱۰/۰۸	۲۳۲۱۴۷	۱۰/۰۸	۲۳۲۱۴۷	۱/۹
type3	mr3	۲۳/۷۵	۸۷۹۶۰	۴۸/۶	۹۹۴۷۰	۶۷/۵	۸۳۵۱۰	۲
	bf3	۱۳/۵	۲۳۳۹۰۰	۳۲/۶	۲۵۳۱۰۰	۶۶/۱۵	۲۲۳۷۰۰	۴/۹
	sw3	۱۴/۰۲	۲۱۵۰۰۰	۲۲/۲	۲۳۵۰۰۰	۲۲/۲	۲۳۵۰۰۰	۱/۶



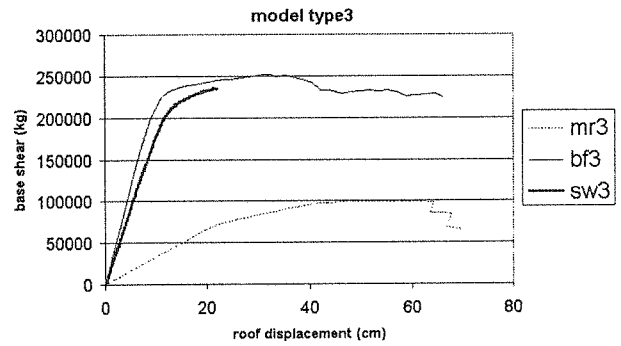
شکل (۹): مقادیر سختی جانبی مدل ها در گروه اول



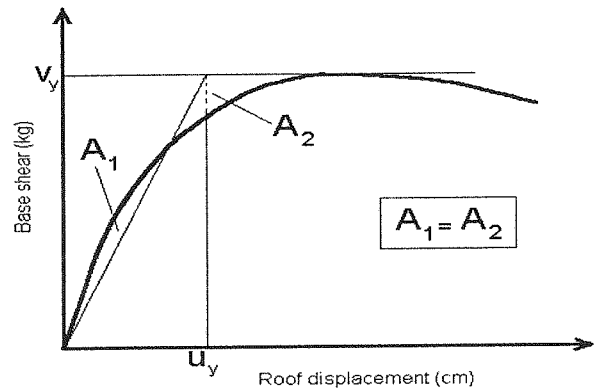
شکل (۱۰): مقادیر سختی جانبی مدل ها در گروه دوم



شکل (۱۱): مقادیر سختی جانبی مدل ها در گروه سوم



شکل (۷): منحنی نیرو- تغییر شکل جانبی مدل های گروه سوم



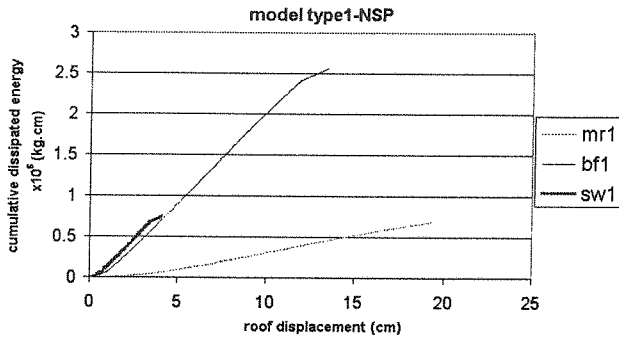
شکل (۸): نحوه تعیین نقطه تسلیم سازه

مقاومت حداکثر سازه به عنوان نقطه peak هرکدام از نمودارها انتخاب می شود. برای تعیین مقاومت نهایی و جابجایی نظیر آن، با استفاده از منحنی های تغییر شکل، نقطه نظیر ۸۰٪ مقاومت حداکثر در مرحله کاهش مقاومت به عنوان نقطه نهایی push سازه فرض شده است [۹]. در جدول (۱) مقادیر مقاومت و جابجایی نظیر نقطه تسلیم، حداکثر و نهایی سازه به همراه ضرایب شکل پذیری هر کدام از قابها نشان داده شده است. ضریب شکل پذیری هرکدام از مدل ها از نسبت جابجایی نهایی سازه به جابجایی نظیر تسلیم آن به دست آمده است.

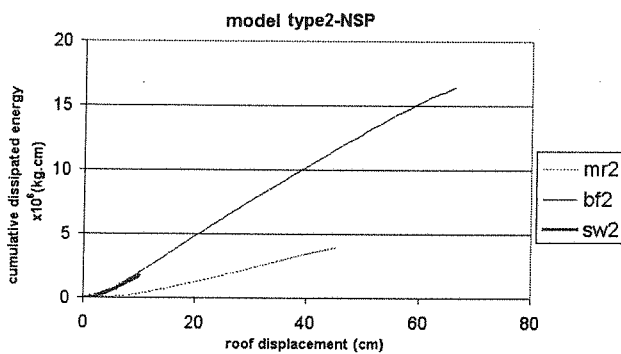
۳-۲- سختی قابها

با استفاده از مقادیر مقاومت جانبی سازه و جابجایی آن در طی بارگذاری افزایش یافته جانبی، مقادیر سختی هرکدام از قابها به ازای جابجایی های مختلف محاسبه و در شکل های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است.

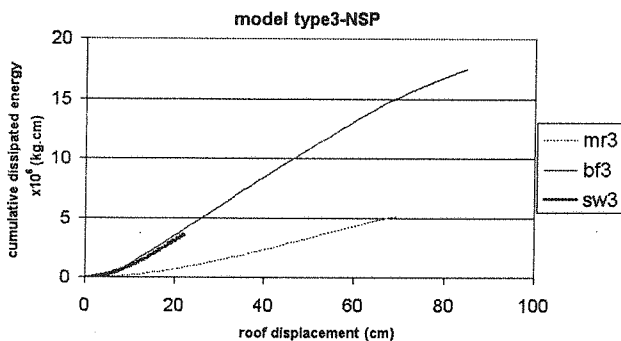
محاسبه و در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) به صورت نمودار نشان داده می‌شود.



شکل (۱۵): مقادیر تجمعی جذب انرژی در مدل‌های گروه اول



شکل (۱۶): مقادیر تجمعی جذب انرژی در مدل‌های گروه دوم

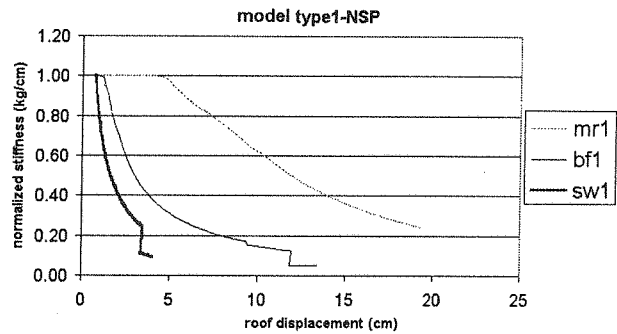


شکل (۱۷): مقادیر تجمعی جذب انرژی در مدل‌های گروه سوم

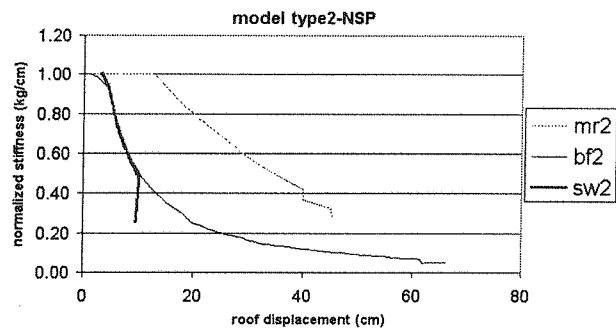
۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی (NDP)

برای انجام تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی مدل‌ها، به وسیله نرم‌افزار RAM Perform-2D، مشابه تحلیل غیرخطی استاتیکی، هندسه مدل ساخته شده و مفاصل پلاستیک به هرکدام از المان‌ها تخصیص داده می‌شود. جرم لرزه‌ای طبقات؛ که شامل کل جرم مرده به اضافه ۲۰٪ جرم زنده هرکدام از طبقات است، به صورت متمرکز در هر طبقه در نظر گرفته می‌شود. مقدار میرایی سازه برابر ۵٪ میرایی بحرانی فرض می‌شود. شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده برای تحلیل دینامیکی سازه‌ها، شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌های طیس، ناغان و السنترو است.

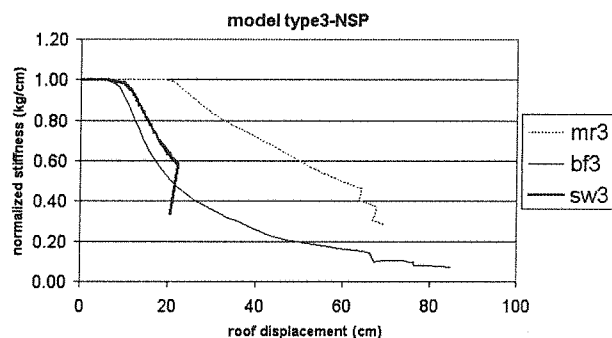
برای مقایسه نحوه کاهش سختی در هرکدام از مدل‌ها در طی بارگذاری افزایشی (pushover)، مقادیر سختی هرکدام از آن‌ها نرمالیزه می‌شود. به این ترتیب که مقادیر سختی هرکدام از مدل‌ها به ازای جابجایی‌های مختلف به سختی اولیه آن تقسیم می‌گردد. نمودار مقادیر سختی نرمالیزه هرکدام از مدل‌های تحلیل شده در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): مقادیر سختی نرمالیزه مدل‌ها در گروه اول



شکل (۱۳): مقادیر سختی نرمالیزه مدل‌ها در گروه دوم

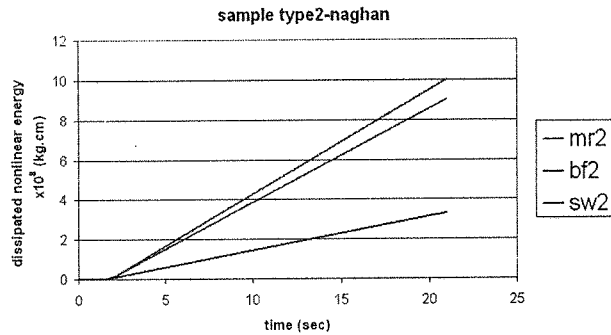


شکل (۱۴): مقادیر سختی نرمالیزه مدل‌ها در گروه سوم

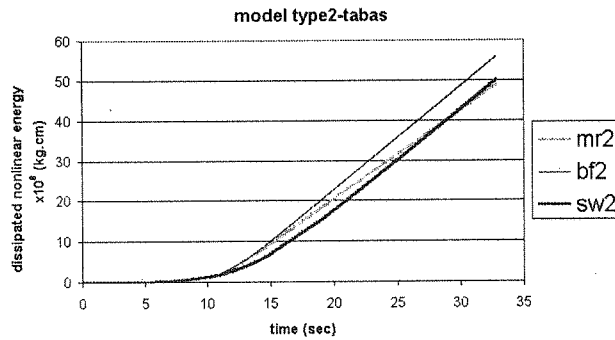
۳-۴- جذب انرژی

میزان انرژی جذب شده در هر سازه در اثر تغییرشکل‌های غیرخطی آن برابر با مساحت محصور در منحنی بارگذاری و باربرداری آن در نظر گرفته می‌شود. با در دست بودن نمودارهای نیرو- تغییرشکل، مقادیر انرژی جذب شده در جابجایی‌های مختلف برای هرکدام از مدل‌ها به صورت تجمعی

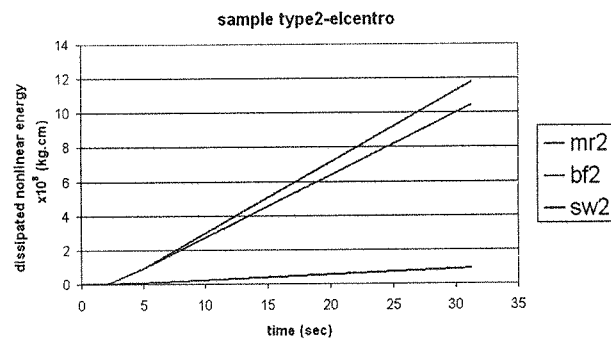
۴-۱- جذب انرژی



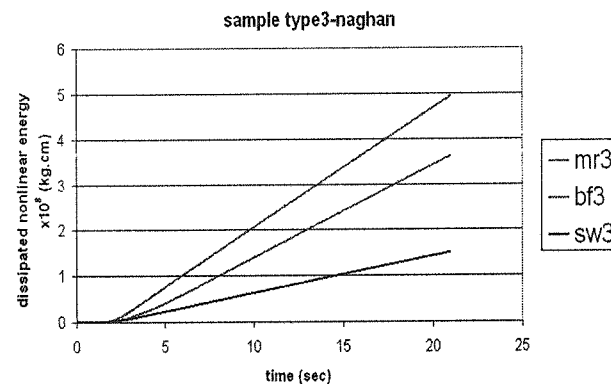
شکل (۲۱): مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه دوم (شتاب نگاشت ناغان)



شکل (۲۲): مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه دوم (شتاب نگاشت طبیس)

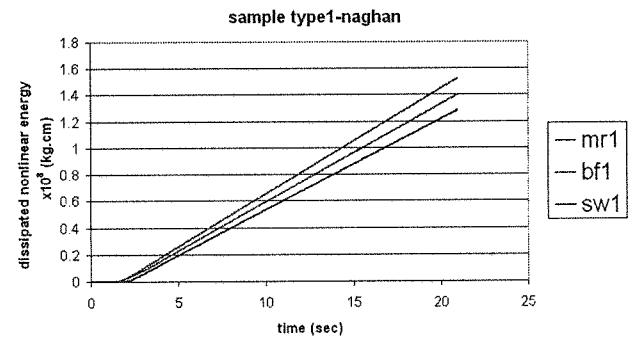


شکل ۲۳- مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه دوم (شتاب نگاشت السنترو)

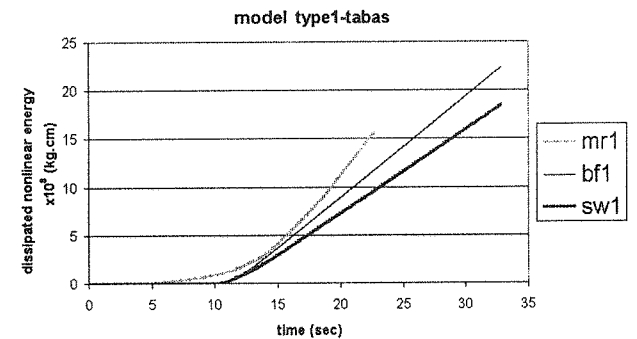


شکل ۲۴- مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه سوم (شتاب نگاشت ناغان)

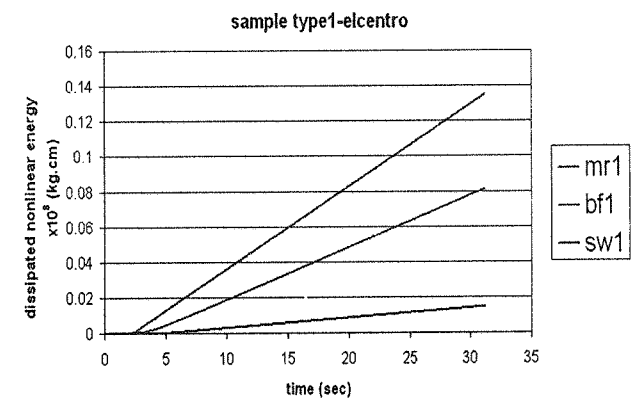
محاسبه میزان انرژی جذب شده به وسیله سازه در اثر ارتعاش ناشی از یک شتاب نگاشت در زمان های مختلف بسیار مشکل است. نرم افزار Perform دارای این قابلیت است که به ازای زمان های مختلف، مقدار انرژی جذب شده غیرخطی در سازه را محاسبه کند. منحنی های جذب انرژی به وسیله هر کدام از قابها به ازای هر شتاب نگاشت با استفاده از امکانات نرم افزار به صورت تجمعی ترسیم و در شکل های (۱۸) تا (۲۶) نشان داده شده است.



شکل (۱۸): مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه اول (شتاب نگاشت ناغان)



شکل (۱۹): مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه اول (شتاب نگاشت طبیس)



شکل (۲۰): مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل های گروه اول (شتاب نگاشت السنترو)

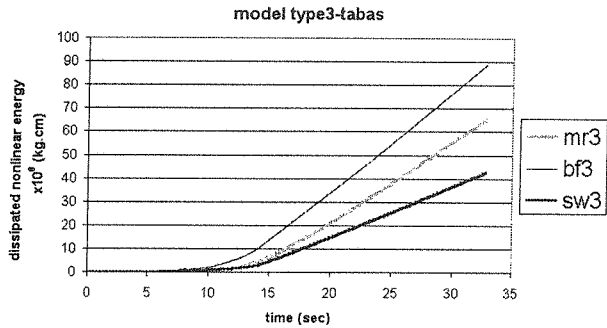
دست آمده است.

این موضوع با در نظر گرفتن افزایش تأثیر عملکرد خمشی دیوار برشی (نسبت به عملکرد برشی آن) در اثر افزایش ارتفاع قابل توجه می‌باشد. نمودارهای سختی نرمالیزه شده سیستم‌های مختلف سازه‌ای؛ که در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) آورده شده‌اند، نشان می‌دهد که میزان کاهش سختی در قاب خمشی بتن آرمه (mr) کمتر از قاب خمشی بتن آرمه مهاربندی شده (bf) و قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی (sw) است. با استفاده از همین نمودارها می‌توان نتیجه گرفت سیستم قاب خمشی مهاربندی شده بتن آرمه (bf) در مقایسه با سیستم قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی (sw) رفتار بسیار بهتری دارد.

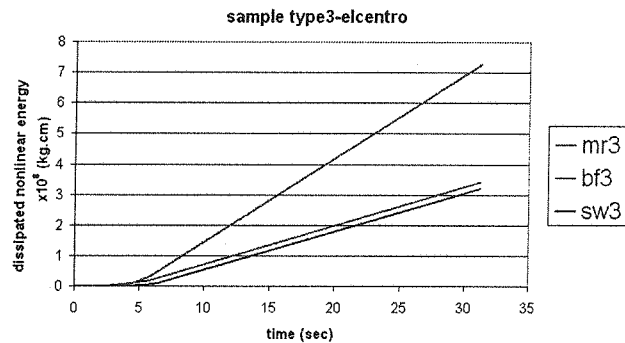
در هر سه گروه از قابهای مدلسازی شده، سیستم قاب خمشی به‌همراه دیوار (sw) دچار کاهش سریع و ناگهانی سختی شده است؛ در حالی که کاهش سختی در سیستم قاب خمشی (mr) و سیستم قاب خمشی مهاربندی شده (bf) به صورت تدریجی و با میزان رشد کمتری اتفاق می‌افتد.

از مقایسه مقادیر انرژی جذب شده به وسیله سیستم‌های مختلف سازه‌ای در روش استاتیکی غیرخطی نشان داده شده در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) این نتیجه حاصل می‌شود که میزان جذب انرژی در سیستم قاب خمشی بتن آرمه مهاربندی شده (bf) در هر سه گروه بسیار بیشتر از میزان جذب انرژی غیرخطی در سیستم قاب خمشی (mr) و قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی (sw) است. این مقدار در سیستم قاب مهاربندی شده (bf)، در حدود ۳ برابر میزان انرژی جذب شده در سایر سیستم‌ها به دست آمده است.

مقایسه ماکزیمم انرژی جذب شده به وسیله مدل‌های مختلف در هر سه گروه در روش دینامیکی غیرخطی با استفاده از نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۱۸) تا (۲۶) حاکی از این است که مقدار انرژی غیرخطی جذب شده به وسیله قابهای خمشی مهاربندی شده (bf) بیش از سایر سیستم‌های سازه‌ای است. همچنین سیستم قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی در گروه اول (sw1) مقدار انرژی بیشتری نسبت به سیستم قاب خمشی (mr1) دارد. در گروه دوم مقدار جذب انرژی به وسیله سیستم‌های سازه‌ای قاب خمشی (mr2) و قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی (sw2) مقادیر بسیار نزدیک به هم دارند. در گروه سوم مقدار انرژی جذب شده به وسیله سیستم قاب خمشی (mr3) بیشتر از مقدار انرژی جذب شده به وسیله سیستم قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی (sw3) است.



شکل ۲۵- مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل‌های گروه سوم (شتاب نگاشت طبس)



شکل ۲۶- مقادیر تجمعی انرژی جذب شده در مدل‌های گروه سوم (شتاب نگاشت السنترو)

۵- نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها

نتایج مندرج در جدول (۱) نشان می‌دهد سیستم قاب مهاربندی بتن آرمه (bf) در هر ۳ گروه از نظر مقاومت تسلیم، مقاومت حداکثر و مقاومت نهایی، مقادیر بسیار بیشتری نسبت به قاب خمشی بتن آرمه (mr) (حداقل ۲/۵ و حداکثر ۵/۷ برابر) و مقادیر بسیار نزدیک به سیستم قاب خمشی بتن آرمه و دیوار برشی (sw) (حداقل ۰/۹ و حداکثر ۱/۳ برابر) دارد. همچنین مقادیر ضرایب شکل‌پذیری مندرج در این جدول نشانگر آن است که مدل‌های (bf) ضریب شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر سیستم‌ها دارد. نسبت ضریب شکل‌پذیری مدل‌های (bf) به مدل‌های (mr)، حداقل ۲ و حداکثر ۲/۵ است. این در حالی است که نسبت ضریب شکل‌پذیری مدل‌های (bf) نسبت به مدل‌های (sw) دارای مقدار حداقل ۱/۶ و حداکثر ۳/۱ می‌باشد. مقادیر سختی مدل‌ها در گروه‌های سه‌گانه؛ که در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است، حاکی از آن است که مدل‌های (bf) و (sw) سختی قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدل‌های (mr) دارند. با استفاده از همین نمودارها می‌توان گفت مدل (sw1) از سختی اولیه بیشتری (در حدود ۲ برابر) نسبت به مدل (bf1) برخوردار است. در حالی که در گروه‌های دوم و سوم مقدار سختی مدل‌های (bf) بیشتر از مدل‌های (sw) به-

سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی نسبت به دو سیستم سازه‌ای قاب خمشی و قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی برتری دارد و رفتار لرزه‌ای بهتری نشان می‌دهد. این سیستم با وجود داشتن سختی و مقاومت قابل ملاحظه در برابر بارهای جانبی، نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای از شکل‌پذیری مناسب‌تری برخوردار است. میزان جذب انرژی بیشتر این سیستم نسبت به سایر سیستم‌ها یکی دیگر از عوامل برتری آن در نظر گرفته می‌شود.

۷- مراجع

- [۱] آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش دوم)، آذر ۱۳۷۸
 - [۲] دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان‌های موجود، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، خرداد ۱۳۸۱
 - [۳] Armagan Korkmaz; Ali Sari; "Evaluation of Lateral Load Pattern in Pushover Analysis", 16th ASCE Engineering Mechanics Conference (July 2003).
 - [۴] H.S. Lew ; Sashi K. Kunnath ; "Evaluation of Nonlinear Static Procedures for Seismic Design of Buildings", 33rd Joint Meeting of the UJNR Panel on Wind and Seismic Effects (2000).
 - [۵] Filip C. Filippou ; Ahmad Issa ; "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames Under Cyclic Load Reversals", Report No. UCB/EERC-88/12 , Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley, USA, (1988).
 - [۶] Shunsuke Otani ; "Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Building Structures " , University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4, (1980).
 - [۷] Structural Engineering Software, RAM International, "Perform 2D Element Description" , www.ramperform.com , (2000).
 - [۸] Structural Engineering software, RAM International, "Ram Perform UserGuide2D VER 1.20 " , www.ramperform.com , (2000)
 - [۹] Shan-Hua Xu & Di-Tao Niu, "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Braced Frames " , ACI Structural Journal , (January-february 2003).
- نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی استاتیکی و دینامیکی مدل‌های قاب دو بعدی نشان دادند که سیستم پیشنهادی قابهای مهاربندی شده بتن آرمه از نظر مقاومت در برابر نیروهای جانبی ناشی از زمین‌لرزه، یک سیستم مناسب و مقاوم است. مقایسه انجام شده میان این سیستم و سیستم های قاب خمشی و قاب خمشی به همراه دیوار برشی بیانگر آن است که مقاومت جانبی سیستم قاب مهاربندی شده بسیار بیشتر از سیستم قاب خمشی بتن آرمه بوده و به مقاومت جانبی سیستم قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی بسیار نزدیک است. سیستم پیشنهاد شده در مقایسه با سیستم قاب خمشی، سختی جانبی بیشتری دارد و سختی جانبی سیستم قاب خمشی به همراه دیوار برشی بیشتر از سیستم پیشنهادی ارزیابی می‌شود. میزان کاهش سختی در سیستم قاب خمشی به‌همراه دیوار برشی بسیار بیشتر از کاهش سختی در دو سیستم قاب خمشی و قاب مهاربندی شده است. همچنین کاهش سختی در سیستم قاب خمشی به همراه دیوار برشی به‌صورت بسیار ناگهانی اتفاق می‌افتد؛ در حالی‌که کاهش سختی در دو سیستم دیگر به صورت تدریجی است.
- مقایسه ضرایب شکل‌پذیری حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان داد که ضرایب شکل‌پذیری مدل‌های قاب خمشی مهاربندی شده در مقایسه با مدل‌های دیگر دارای مقادیر بیشتری است. بنابراین سیستم پیشنهادی جدید شکل‌پذیرتر از سیستم‌های قاب خمشی بتن آرمه و قاب خمشی به همراه دیوار برشی ارزیابی می‌شود.
- مقادیر انرژی جذب شده به وسیله مدل‌های قاب مهاربندی شده بتن آرمه، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مدل های قاب خمشی و قاب خمشی به همراه دیوار برشی است. نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهد که سیستم قاب مهاربندی شده بتن آرمه با استفاده از یک مکانیزم جذب انرژی در مهاربندهای بتن آرمه میزان قابل توجهی از انرژی وارد شده بر سازه در اثر زمین‌لرزه را جذب می‌کند و از این نظر نیز نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای برتری دارد.
- با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت، سیستم قاب خمشی مهاربندی شده با توجه به معیارهای مقاومت،