

محور		آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای سازه ها
زمان		چهارشنبه ۱۳۹۳/۳/۱۷ ساعت ۱۸:۳۰ - ۱۶:۳۰
مکان		ساختمان تحصیلات تکمیلی - سالن شماره ۳
هیئت رئیسه جلسه		دکتر منصور ضیائی فر، دکتر بهنود گنجوی و دکتر محمدرضا داودی
کد مقاله	عنوان مقاله	نویسندگان
A-11-2333-3	عملکرد ساختمان های بنایی دارای جداساز لغزشی ماسه ای تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل	آرش تنکاوی، محمد قاضی
A-11-3153-4	ارزیابی شاخص خسارت در سازه های بتن آرمه با الگوریتم کنترل فعال	هاشم شریعتمدار، فرزانه شهبابیان مقدم
A-11-3024-2	بررسی سازه جداسازی شده با جداگر پاندولی اصطکاکی سه قوسی همراه با میراگر ویسکوز	علیرضا خدادادی، عبدالرحیم جلالی، محمود میری
A-11-701-2	تاثیر میزان نامنظمی در پلان بر پتانسیل خرابی پیشرونده ی ساختمان های فولادی با سیستم قاب خمشی و مهاربندی دوگانه	مجید مرادی افرایلی، حمیدرضا توکلی
A-11-701-3	The Effect of Retrofitting Types on Behavior of Steel Frames Subjected to Progressive Collapse Under Seismic Load	حمیدرضا توکلی، مجید مرادی افرایلی
A-11-1420-2	بهبود عملکرد لرزه ای اتصال تیر به ستون توسط میراگر شکافدار فولادی با شکاف های لوزی	سعید فراهی شهری، سید روح الله موسوی
A-11-2478-2	عیب یابی سازه ها با استفاده از روش دو مرحله ای مبتنی بر شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی و الگوریتم اجتماع ذرات جامعه تأثیر پذیر	حامد فتح نجات، پیمان ترکزاده، رامین قیاسی
A-11-968-2	مطالعه و بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر عملکرد لرزه ای قاب های خمشی بتن آرمه با میانقاب بنایی	الشن آهنی، بهزاد رافضی، فتح اله عثمان زاده، میر نقی موسوی

ارزیابی شاخص خسارت در سازه‌های بتن آرمه با الگوریتم کنترل فعال

هاشم شریعتمدار، فرزانه شهبان مقدم

دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Shariatmadar@Ferdowsi.um.ac.ir
fshahabianm@gmail.com

خلاصه

در این مقاله یک سیستم کنترل فعال برای سازه‌های بتن آرمه با رفتار غیر خطی طراحی شده و عملکرد آن با استفاده از شاخص‌های خسارت پیشنهادی ارزیابی می‌گردد. برای رسیدن به هدف مذکور سه سازه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه تحت ۴ رکورد زلزله اصلی با شدت‌های مختلف بررسی شده و در مجموع ۶۰ تحلیل کنترل نشده و کنترل شده غیر خطی در محیط نرم افزار MATLAB صورت می‌پذیرد. در ادامه سه شاخص خسارت شکل‌پذیری، جابجایی نسبی طبقات و شاخص خسارت پارک و انگ معرفی می‌گردند. در نهایت جهت ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی به بررسی و مقایسه شاخص‌های خسارت در این سازه‌ها در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده پرداخته می‌شود. نتایج حاکی از آن است که کنترل فعال، رفتار سازه‌های بتنی غیر خطی را بهبود داده و سطح خسارت را حداقل یک پله بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: کنترل فعال، سازه‌های بتن آرمه، رفتار غیر خطی، شاخص خسارت.

۱. مقدمه

هدف از کنترل سازه یا تامین آسایش ساکنین است که از طریق کاهش شتاب صورت می‌گیرد و یا هدف تامین ایمنی ساکنین است که از طریق کاهش خسارت محقق می‌شود. اکثر کارهایی که تاکنون در زمینه کنترل انجام گرفته رفتار سازه را خطی در نظر گرفته اند و از مدل‌های خطی بهره جویی کرده اند اما به دلیل آنکه رفتار سازه در مقابل زلزله‌های بزرگ و حتی متوسط غیر خطی است بایستی از مدل‌های غیر خطی استفاده کرد. بحث خسارت در کنترل سازه هم غالباً معطوف به ارزیابی جابجایی نسبی طبقات بوده است در حالی که این شاخص به تنهایی نمی‌تواند بیانگر خسارت در بارهای دوره ای باشد.

در سال‌های اخیر توجه زیادی به تحقیقات در زمینه کنترل فعال سازه‌ها شده است که مرور کلی بر این روش‌ها توسط سونگ^۱ انجام شده است [۱]. شریعتمدار به همراه دانشجویان خود تاکنون کارهای بسیاری در زمینه کنترل فعال و غیر فعال سازه‌های بتنی خطی انجام داده اند [۲]. اتری^۲ و همکارانش در زمینه معرفی سازه‌های مرجع برای بحث کنترل سازه‌های فولادی غیر خطی کار کرده اند [۳]. کارهایی که در زمینه کاربرد شاخص‌های خسارت دقیق‌تر در بحث کنترل سازه تاکنون مطرح شده اند بسیار اندک بوده و به طور نمونه می‌توان به کار پینکاو [۴] و کرم‌الدین [۵] اشاره کرد. پینکاو^۳ و همکارانش در بررسی میراگر جرم تنظیم شده غیر فعال روی یک ساختمان ۲۰ طبقه بتنی نشان دادند که گرچه حداکثر جابجایی سازه خیلی کاهش نیافته ولیکن اندیس خسارت پارک و انگ بسیار کاهش داشته است.

در این مقاله هدف طراحی یک سیستم کنترل فعال برای سازه‌های بتن مسلح غیر خطی می‌باشد. از مدل‌سازی غیر خطی استفاده می‌شود تا هر چه بهتر بیانگر رفتار واقعی سازه در مقابل زلزله باشد. جهت بررسی کاهش خسارت در سازه سعی شده است که از شاخص‌های خسارت دقیق‌تری

¹ Soong

² ohtori

³ Pinkaew

چون شکل پذیری و پارک و انگ استفاده شده و سطح خسارت نیز تعیین شود. برای رسیدن به اهداف مذکور سه سازه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه بررسی خواهند شد.

۲. کنترل سازه

سیستم های کنترل را می توان بر اساس نیاز به انرژی و یا بر اساس روش و نحوه عملکرد به چهار دسته اصلی: الف) سیستم های کنترل غیرفعال ، ب) سیستم های کنترل فعال ، ج) سیستم های کنترل نیمه فعال و د) سیستم کنترل مرکب یا هیبرید ، تقسیم نمود. دستگاه های غیرفعال با جذب بخشی از انرژی ورودی، از سازه محافظت می نمایند. این دستگاه ها نیاز به توان خارجی نداشته و لذا بسیار مطمئن می باشند. جداگر لرزه ای و میراگر جرمی تنظیم شده نمونه هایی از دستگاه های غیرفعال محسوب می شوند. دستگاه های فعال در مقایسه با نمونه های غیرفعال بسیار مؤثرتر اند و می توانند با شرایط بارگذاری مختلف انطباق یابند، زیرا این دستگاه ها با استفاده از پاسخ های سازه ای دریافت شده توسط حسگرها، نیروی کنترل مورد نیاز را تعیین می نمایند. اما این سیستم ها نیازمند مقدار توان خارجی قابل توجهی می باشند. همچنین این سیستم ها می تواند به ناپایداری سیستم بیانجامند. میراگر جرمی فعال و تاندون فعال از جمله سیستم های کنترل فعال می باشند. دستگاه های کنترل نیمه فعال را می توان یک سیستم غیر فعال دانست که ویژگی هایش به صورت فعال کنترل می شوند این دستگاه ها به منابع توانی بزرگ همچون دستگاه های فعال نیازی ندارند. این مورد خصوصاً در زمان قطع توان بخاطر خرابی ناشی از زلزله، یک مزیت محسوب می شود. این دستگاه ها دارای مشخصاتی است که می تواند در هر لحظه تنظیم شده و انرژی را جذب یا مستهلک نماید، لذا پایداری سیستم را تضمین می نماید. در نتیجه می توان گفت که این سیستم ها از جهت کاهش پاسخ های سازه ای از دستگاه های غیرفعال بسیار مؤثرتر بوده و از سیستم های فعال نیز مطمئن تراند زیرا این دستگاه ها در زمان قطع توان می توانند بصورت غیر فعال عمل کنند. سیستم های با سختی متغیر نیمه فعال و دستگاه های سیال کنترل پذیر از جمله سیستم های کنترل نیمه فعال محسوب می شود. در نهایت سیستم هیبرید ترکیبی از سیستم فعال و غیر فعال است به طوری که سیستم غیر فعال بخش اعظم پاسخ را کنترل کرده و سیستم فعال جهت بهینه کردن پاسخ سیستم غیر فعال به کار می رود.

۳. روند مدل سازی و تشکیل ماتریس های جرم ، سختی و میرایی سازه

سازه های مدل شده در این پژوهش، قاب های دو بُعدی اند. تمامی المان ها به صورت یک جز محوری- خمشی- برشی با بعد خطی مدل شده اند. یعنی همان چیزی که معمولاً در تئوری تحلیل سازه ها از آن استفاده می شود و بدان مدل حد واسط^۴ گویند. از آنجا که تنها مدل غیر خطی سازه می تواند نمایانگر رفتار واقعی سازه در مقابل زلزله باشد. از یک مدل هیستریزس دو خطی جهت اعمال رفتار غیر خطی اعضا استفاده می شود. گره ها در محل اتصال تیرها به ستون ها تعریف شده، در نتیجه اعضا بین گره ها شکل گرفته که شامل تیر و ستون می باشند. هر گره می تواند سه درجه آزادی مشتمل بر جابجایی در جهات X و Y و چرخش حول محور Z (محور خارج از صفحه) داشته باشد. فرض می شود جرم در گره ها متمرکز بوده، لذا ماتریس جرم سازه بصورت قطری خواهد بود. با توجه به ناچیز بودن نیروی اینرسی دورانی در مقایسه با اینرسی انتقالی به درجات آزادی دورانی، جرمی تعلق نمی گیرد. جرم هر طبقه مربوط به هر قاب بین دهانه ها تقسیم شده و به المان های تیری اختصاص داده شده است.

غالباً به دلیل آنکه درجات آزادی سازه به طریق گفته شده بسیار زیاد است یا سازه را برشی فرض می کنند و یا به صورت دقیقتر از تراکم استاتیکی بهره می برند که در هر دو حالت تنها درجات آزادی انتقالی هر طبقه به عنوان درجات آزادی دینامیکی باقی می ماند. در این مقاله چون مدل سازی دقیقی از سازه الزامی بوده و از طرفی در تحلیل غیر خطی به درجات آزادی دورانی نیاز است از دو روش مذکور نمی توان استفاده کرد. تنها به دلیل آنکه کف طبقات صلب در نظر گرفته می شود و در نتیجه تمام درجات آزادی افقی یک طبقه دارای یک جابجایی افقی می شود لذا می توان جهت ساده سازی و کم کردن درجات آزادی مستقل انتقالی، به هر طبقه تنها یک درجه آزادی انتقالی اختصاص داد.

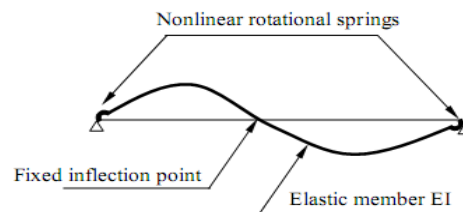
جهت محاسبه ماتریس میرایی از روش رایلی استفاده می شود. در این روش ماتریس میرایی سازه بر مبنای ترکیب خطی ضریبی از ماتریس جرم و ماتریس سختی متراکم شده و با فرض میرایی مودال بدست می آید. نسبت میرایی سازه در هر مود ارتعاش، با توجه به اینکه سازه بتن مسلح می باشد، برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است.

⁴ Center-line Model

۴. مدل غیر خطی اعضا

جهت تحلیل غیر خطی قاب های بتن مسلح تاکنون مدل های اجزا محدود بسیاری معرفی شده اند. نگو^۵ و اسکوردلیس^۶ اولین افرادی بوده اند که روی این مساله کار کرده اند [۴]. این مدل ها را می توان به صورت کلی به سه دسته تقسیم نمود: (۱) مدل های محلی (مدل های میکروسکوپیک)، (۲) مدل های کلی (مدل های عضوی) و (۳) مدل های نیمه محلی (مدل های فیزیکی). از میان مدل های معرفی شده تنها مدل های ۲ و ۳ برای بحث دینامیک سازه کاربردی می باشند زیرا که مدل ۱ دارای جزئیات بسیار ریز بوده که حجم محاسبات را بالا می برد.

در مدل های کلی یک عضو بتن آرمه خواه تیر یا ستون از یک یا چند المان دو گره ای خطی تشکیل می شود. مدل های کلی خود به دو دسته مدل های متمرکز و مدل های گسترده تقسیم می شوند. از آنجایی که غالباً رفتار غیر خطی به صورت متمرکز در دو سر تیر یا ستون اتفاق می افتد یک رویکرد اولیه برای مدل سازی رفتار غیر خطی عضو های بتن آرمه، استفاده از فترهای غیر خطی در دو انتهای عضو می باشد. اولین مدل متمرکز توسط گیسون^۷ در سال ۱۹۶۷ معرفی شده است [۶]. این مدل از یک عضو الاستیک به علاوه دو فنر دورانی غیر خطی متصل به دو سر عضو الاستیک تشکیل شده است. به گفته دیگر رفتار غیر خطی عضو تنها در دو فنر (با طول صفر) متمرکز شده و مابقی عضو الاستیک می ماند. رابطه لنگر- دوران فنر ها با در نظر گرفتن نقطه انحنا در وسط عضو نوشته می شود. شکل ۱ شماتیک این مدل را نشان می دهد. در این مقاله نیز جهت مدل سازی رفتار غیر خطی اعضا از مدل متمرکز گیسون استفاده می شود.



شکل ۱- مدل گیسون [۶]

۵. رفتار غیر خطی مصالح

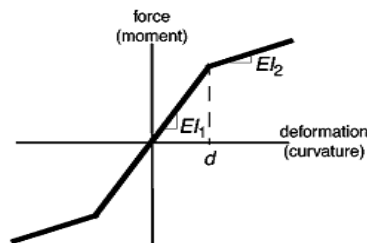
در تیر با مقطع بتن آرمه هم مدول الاستیسیته و هم ممان اینرسی مقطع به دلیل ترک خوردگی در طول بارگذاری تغییر خواهد کرد. در این میان تغییر در ممان اینرسی اهمیتی ویژه دارد. در یک مقطع بتن مسلح تحت لنگر خمشی، در مقادیر کم لنگر و تا زمانی که ترک خوردگی در مقطع اتفاق نیفتاده است کل بتن مقطع در ناحیه فشاری و در ناحیه کششی از خود سختی بروز می دهد. ترک خوردگی در لحظه ای اتفاق می افتد که تنش در دورترین تار کششی مقطع به مدول گسیختگی کششی بتن برسد. با در نظر گرفتن سه مرحله قبل از ترک خوردگی، ترک خوردگی و جاری شدن فولاد مقطع، منحنی لنگر- انحنا برای مقطع، که شیب آن سختی خمشی (EI) می باشد، رفتاری سه خطی خواهد داشت. اما اغلب جهت ساده سازی از مفهوم سختی خمشی موثر استفاده می شود. در این حالت منحنی لنگر- انحنا به صورت دوخطی مدل می شود یعنی مرحله اول و دوم با یک مرحله معادل جایگزین می شوند که شیب این قسمت معادل، همان سختی خمشی موثر می باشد [۷]. طبق آیین نامه آبا در صورت عدم وجود اطلاعات دقیق تر می توان سختی خمشی مقطع ترک خورده را برای عضو های تیری برابر 0.35 و برای ستون ها 0.70 سختی الاستیک در نظر گرفت [۸].

در این مقاله نیز جهت مدل کردن رفتار غیر خطی مصالح در مفاصل که فرض می شود در تمام گره ها امکان شکل گرفتن داشته باشند، از مدل دو خطی نمودار لنگر-انحنا استفاده می شود (شکل ۲). به طوری که شیب اولیه نمودار تا قبل از تشکیل مفصل (جاری شدن مقطع) همان سختی خمشی ترک خورده در نظر گرفته می شود. شیب قسمت دوم نیز طبق $ACI318$ برابر 5 درصد سختی الاستیک در نظر گرفته می شود [۹].

⁵ Ngo

⁶ Scordelis

⁷ Gibson



شکل ۲- مدل دو خطی رفتار مقطع بتن آرمه [۳]

انحنای متناظر با نخستین جاری شدن فولاد های کششی طبق رابطه ۱ قابل محاسبه می باشد.

$$\varphi_y' = \frac{\varepsilon_c}{d_n} \quad (1)$$

در رابطه ۱ صورت کسر، کرنش در دورترین تار فشاری بتن است که برای بتن معمولی حدود ۰/۰۰۱۵ در نظر گرفته می شود ولی برای بتن محصور این مقدار افزایش خواهد داشت و به حدود ۰/۰۰۵ نیز می رسد. منجر کسر در رابطه ۱ عبارت است از عمق محور خنثی در مرحله نخستین جاری شدن که از رابطه ۲ قابل محاسبه می باشد:

$$d_n = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y / E_s} d \quad (2)$$

یک روش تقریبی و قابل قبول آن است که انحنای جاری شدن را حدود ۱/۳۳ برابر انحنای متناظر با نخستین جاری شدن در نظر می گیرند. در صورتی که مقطع بتن آرمه دارای فولاد گذاری مناسب باشد، یعنی مقطع تحت مسلح بوده (فولاد های کششی موجود در مقطع کمتر از فولاد متوازن باشد و در نتیجه قبل از رسیدن مقطع به لحظه گسیختگی، فولاد های کششی جاری شده باشند) و فولاد گذاری فشاری و عرضی مناسب نیز داشته باشد، مقطع شکل پذیر بوده و انحنای نهایی به حدود ۷ تا ۸ برابر انحنای جاری شدن نیز خواهد رسید [۱۰].

۶. تحلیل تاریخچه زمانی به روش گام به گام نیومارک - بتا و معرفی شتابنگاشت های مورد استفاده

نیروی دینامیکی مورد بحث شتاب زمین بوده که تابعی پیچیده و دلخواه از زمان است. سیستم نیز غیر خطی بوده و در نتیجه سختی آن را باید لحظه ای اعمال کرد. به دلایل فوق الذکر حل تحلیلی معادلات حرکت سیستم ناممکن بوده و بایستی از روش های عددی بهره جست. قابل ذکر است که میرایی سیستم غالباً در هر حالتی به صورت خطی در نظر گرفته می شود زیرا که اطلاعات کافی در زمینه میرایی غیر خطی در دست نمی باشد. روش های عددی حل معادله دیفرانسیل حرکت معمولاً به صورت روش های گام به گام یا نموی است. در این روش ها معادلات دینامیکی جزئی سازه در هر گام به صورت رابطه ۳ نوشته می شود:

$$M\Delta\ddot{U} + C\Delta\dot{U} + K\Delta U = -MG\Delta\ddot{x}_g + P\Delta f + \Delta F_{err} \quad (3)$$

در معادله (۳)، M ، C و K ماتریس های جرم، میرایی و سختی سازه هستند. $\Delta\ddot{U}$ ، $\Delta\dot{U}$ و ΔU تغییرات جزئی پاسخ سازه، G بردار تاثیر شتاب حرکت زمین، $\Delta\ddot{x}_g$ تغییرات شتاب حرکت زمین، P بردار تاثیر نیروهای کنترل، Δf تغییرات نیروی کنترل و ΔF_{err} بردار نیروهای نامتعادل هستند. نیروهای نامتعادل اختلاف بین نیروهای داخلی سازه بر اساس مدل رفتار حلقوی (رفتار واقعی) و نیروهای داخلی با فرض سختی خطی ثابت در لحظه t در فاصله زمانی می باشند. این نیروهای نامتعادل در گام بعدی به صورت بار خارجی بر سازه اعمال می شوند. نیومارک جهت حل معادله دینامیکی جزئی روابطی را ارائه نمود که از آنها در این پژوهش بهره جویی شده است. برای انجام تحلیل غیر خطی سازه بر اساس روش گام به گام زمانی نیومارک - بتا از یک برنامه در محیط $MATLAB$ به صورت S -function بهره جویی می شود که توسط اتری^۸ و اسپنسر^۹ توصیه شده است [۳].

در این پژوهش از ده شتاب نگاشت که از چهار زلزله اصلی با شدت های مختلف به دست آمده است استفاده می شود. دو زلزله از نوع زلزله های میدان دور که عبارت اند از السترو و هاچینوهه با ضرایب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مقیاس شده اند. دو زلزله دیگر که از نوع زلزله های میدان نزدیک بوده و عبارت اند از نورتریج و کوبه با ضرایب ۰/۵ و ۱ مقیاس شده اند.

⁸ Othori
⁹ Spencer

۷. شاخص خسارت

بحث کنترل سازه بی ارتباط با مبحث خسارت نمی باشد. چه بسا اگر هدف از به کار بردن سیستم کنترل جلوگیری و یا کم کردن خسارت ناشی از زلزله است، بهتر می باشد که در طرح ریزی سیستم کنترل مبحث خسارت به گونه ای دیده شود و برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل از شاخص های خسارت و سطوح خسارت استفاده شود. در ادامه به انواع شاخص های خسارت که به نوعی کمی کردن بیان خسارت در سازه اند اشاره خواهد شد. شاخص جابجایی نسبی طبقات یک شاخص کلی غیر تجمعی است و می توان گفت راحت ترین و رایج ترین شاخص به کار گرفته شده می باشد. البته باید ذکر کرد که خیلی دقیق نبوده زیرا اثر بارگذاری دوره ای راکه می تواند منشا خسارت باشد در نظر نمی گیرد. رابطه این شاخص خسارت به صورت رابطه (۴) بوده و برای تعیین سطح خسارت با توجه به این شاخص از جدول (۱) استفاده می شود.

$$DI = \frac{\Delta m}{h} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، صورت کسر بیان گر حداکثر جابجایی نسبی طبقه و مخرج کسر ارتفاع طبقه می باشد.

جدول ۱- تعیین سطح خسارت سازه های بتنی از روی شاخص خسارت جابجایی نسبی [۱۱]

مقادیر جابجایی نسبی (متر) %	$D < 0.67$	$0.67 < D < 1.15$	$1.15 < D < 1.8$	$2.1 < D$
سطح خسارت	بدون خسارت: وجود ترک با تعداد کم و کوچک	خسارت اندک: ترک کوچک در طول عضو ها	خسارت متوسط: ترک شدید و وجود شکاف	خسارت شدید: پکیدن بتن و ظاهر شدن فولاد

شاخص شکل پذیری یک شاخص محلی غیر تجمعی می باشد که خسارت سازه را به صورت شکل پذیری تعریف می کند. کاربرد این نوع شاخص بسیار ساده است و به همین دلیل مورد استقبال مهندسان می باشد. μ ظرفیت شکل پذیری است که به صورت (۵) تعریف می شود:

$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، u_{max} بیانگر تغییر شکل بیشینه، u_y تغییر شکل تسلیم می باشد. برای تعیین سطح خسارت از روی این شاخص معیار مشخصی تاکنون ارائه نشده است. شاخص خسارت پارک و انگ یک شاخص محلی یا عضوی بوده که در سال ۱۹۸۵ ارائه شده است. این شاخص ترکیبی است از اثرات جابجایی جانبی ماکزیمم با انرژی اتلاف شده پلاستیک در انتهای یک عضو. رابطه (۶) این شاخص را نشان می دهد:

$$DI = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_u} + \frac{E_p \max}{M_y \Phi_u} \beta \quad (6)$$

در رابطه (۶)، Φ_{max} حداکثر چرخش ایجاد شده در عضو در تاریخچه بارگذاری، Φ_u بیشترین ظرفیت چرخشی مقطع، E_p انرژی پلاستیک اتلاف شده و β ضریب مثبتی است که با توجه به مشخصات و ویژگی های سازه تعیین می گردد. تحقیقات نشان می دهند که برای عضو های بتن مسلح مقدار β را می توان ۱/۱۵ در نظر گرفت. شاخص خسارت پارک و انگ از جمله پر کاربرد ترین شاخص ها در میان محققین می باشد و هم برای سازه های بتنی و هم فلزی قابل کاربرد می باشد. مزیت اصلی این شاخص، در انطباق آن با نتایج تجربی و همچنین سادگی و تناسب درجه بندی آن با خسارت مشاهده شده می باشد. با استفاده از جدول (۲) می توان سطح خسارت را از روی شاخص پارک و انگ تخمین زد.

جدول ۲- جزئیات خسارت متناسب با شاخص پارک [۱۱]

درجه آسیب	نمود ظاهری	شاخص آسیب	وضعیت ساختمان
فرو ریزش	فرو ریختن موضعی یا کلی ساختمان	> 1	تخریب
شدید	خرد شدن گسترده بتن، نمایان شدن آرماتورهای کمانه کرده	$0.4 - 1.0$	غیر قابل تعمیر
متوسط	ترک های بزرگ و گسترده، متورق شدن بتن در اعضای ضعیف تر	$0.25 - 0.4$	قابل تعمیر
کم	ترک های کوچک، خرد شدن موضعی بتن در ستون ها	$0.1 - 0.25$	قابل تعمیر
ناچیز	بروز ترک های پراکنده	< 0.1	قابل تعمیر

۸. مدل سازی سیستم کنترل

دستگاه فضای حالت متغیر زمانی خطی مدل های سازه ای را می توان طبق روابط ۷ ارائه نمود:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + E\ddot{x}_g \\ y &= C_y x + D_y u + F_y \ddot{x}_g + v \\ z &= C_z x + D_z u + F_z \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه ۷، x بردار حالت، \ddot{x}_g شتاب اسکالر زمین، u ورودی اسکالر کنترل، y بردار پاسخ هایی که می تواند مستقیماً اندازه گیری شود و z بردار پاسخ هایی که می تواند تنظیم گردد، می باشد. v بردار نویزهای اندازه گیری است و $A, B, C_y, D_y, E, F_y, C_z, D_z, F_z$ نیز ماتریس هایی با ابعاد مناسب می باشد. از آنجا که تغییر مکان ها و سرعت ها مطلق نمی باشد، و وابسته به چارچوب خطی مرجعی است که نسبت به آن برداشت می شود، لذا اندازه گیری مستقیم آن در موقعیت های دلخواه سازه واقعی دشوار می باشد. در طی فعالیت زلزله، این دشواری به مراتب بیشتر می شود، چرا که فونداسیون متصل به سازه همراه با زمین جابجا شده و یک چارچوب مرجع لخت^{۱۰} را فراهم نمی نماید. لذا در عمل، اندازه گیری شتاب مطلق سازه ای جهت استفاده در تعیین کنش کنترل، بعنوان یک خروجی ایده آل محسوب می شود. در اینجا بردار z یا همان بردار پاسخ هایی که می تواند تنظیم گردد و یا به عبارتی پاسخ هایی از سازه که باید بهینه شود شامل شتاب مطلق طبقات خواهد بود. در این پژوهش از یک کنترلر LQG به همراه فیلتر کالمن بهره جویی می شود که محاسبات مربوطه با استفاده از تابع های گنجانده شده در جعبه ابزارهای Control نرم افزار *MATLAB* همانند تابع های *lqr* و *lqe* انجام می گردد.

برای ارزیابی رفتار مدل های سازه ای، نیاز به ابزاری تحلیلی است که علاوه بر رفتار سازه طی بارگذاری زلزله توانایی گنجاندن رفتار اصلی المان های کنترل کننده را نیز داشته باشد. لذا در این پژوهش سعی شده با برنامه نویسی تحت نرم افزار *MATLAB* و بهره گیری از جعبه ابزارهای Simulink و Control گنجانده در این برنامه این نیاز را مرتفع سازیم.

۹. تجزیه و تحلیل عددی سیستم های کنترل

هدف از تحقیق انجام شده، ارزیابی فناوری کنترل سازه در ارتقای عملکرد کلی سازه تحت تحریک زلزله می باشد. این تحقیق متمرکز بر قاب های خمشی بتن مسلح با رفتار غیر خطی و کنترل فعال سازه هاست. سه قاب سه، نه و بیست طبقه که می تواند به ترتیب نماینده سه سازه کوتاه، متوسط و بلند باشد، اختیار شده است. سازه های فوق بر مبنای اصول گفته شده شبیه سازی شده و پارامتر های سیستم های کنترل محاسبه و در برنامه *MATLAB* کدنویسی و برنامه نویسی شده است تحلیل این سیستم ها با استفاده از چهار شتاب نگاشت زلزله شامل دو رکورد زلزله میدان دور و دو رکورد زلزله میدان نزدیک با شدت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ قرار گرفته و در مجموع ۶۰ تحلیل کنترل نشده و کنترل شده تاریخچه زمانی غیر خطی صورت گرفته است. سازه های مورد مطالعه عبارت از سه قاب خمشی بتن مسلح طرح شده بر مبنای آئین نامه بتن *ACI* می باشد. تمامی قاب ها نیازهای طراحی را ارضاء نموده، ولیکن محدودیت جابجایی نسبی بین طبقات را برآورده نمی نمایند. این ساختمان ها، مسکونی بوده و برای بارهای ثقلی و زلزله طرح شده است. به منظور درک بهتر تأثیر سیستم های کنترل، ابتدا رفتار غیر خطی سیستم های کنترل نشده می بایستی تحلیل و مورد بررسی قرار گیرد مقادیر پاسخ های غیر خطی سازه های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه در حالت کنترل نشده تحت تحریک ۱۰ رکورد زلزله مورد نظر بررسی شده و ملاحظه می گردد که پاسخ های سازه به زلزله های متفاوت (میدان دور و میدان نزدیک) با شدت زلزله واحد تابع نوع زلزله و محتوی فرکانسی زلزله هاست. در هر صورت پاسخ به زلزله های میدان نزدیک وضعیت مخرب تری دارد، خصوصاً تغییر مکان های نسبی بیشتر از مقادیر مورد انتظار جهت طراحی سازه است. بنابراین جهت طراحی سازه های بتن مسلح در مناطق لرزه خیزی که منابع لرزه خیزی آنها گسل نزدیک می باشد باید توجه ویژه ای صورت گیرد و طراحی بر مبنای طیف طرح ساختمان صورت پذیرد.

برای هر سه سازه معرفی شده شاخص های خسارت شکل پذیری، جابجایی نسبی طبقات و شاخص خسارت پارک و انگک در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده تحت چهار رکورد زلزله اصلی معرفی شده، حساب شده و با هم مقایسه خواهد شد. از روی جداول موجود سطح خسارت نیز تعیین می شود. برای مقایسه شاخص خسارت جابجایی نسبی طبقات، از بیشینه این مقدار تحت هر کدام از زلزله های مذکور استفاده می شود جهت محاسبه

¹⁰ Inertial Reference Frame

شاخص جابجایی نسبی طبقات، تاریخچه جابجایی نسبی تمام طبقات سازه تحت هر کدام از زلزله ها از خروجی برنامه *Matlab* فراخوانی شده و با استفاده از برنامه ای که توسط نگارنده در محیط *Excel* نوشته شده، بیشینه آن ها برای هر زلزله استخراج می شود. جهت محاسبه شاخص خسارت شکل پذیری از آن جا که شاخصی محلی است نمی توان به صورت مستقیم از خروجی برنامه *Matlab* استفاده کرد. بدین منظور از نرم افزار *Matlab* تاریخچه نسبت انحنا به انحای جاری شدن بیشینه تمام طبقات را فراخوانی کرده سپس در برنامه پس پردازشی تولید شده در محیط *Excel*، مجموع این مقادیر و همچنین مجموع مربعات این مقادیر محاسبه و با بهره جویی از رابطه (۸) مقدار شاخص خسارت کل سازه به دست می آید.

$$D_g = \frac{\sum D_i^2}{\sum D_i} \quad (8)$$

جهت محاسبه شاخص خسارت پارک و انگ بدین طریق عمل می شود که ابتدا خروجی های برنامه *Matlab* را که به صورت نسبت انحنا به بیشینه به به انحای جاری شدن هر گره و همچنین نسبت انرژی پلاستیک به حاصلضرب لنگر جاری شدن در انحای جاری شدن بیشینه در تاریخچه زلزله، در هر کدام از گره ها می باشد فراخوانی می شود. سپس در برنامه پس پردازشی نوشته شده تغییرات لازم به داده ها داده شده و شاخص خسارت ابتدا برای هر عضو از رابطه (۶) و سپس برای کل سازه از رابطه (۸) محاسبه می گردد. به عنوان نمونه در جداول (۳) تا (۴) مقادیر شاخص های ذکر شده در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده برای سازه نه طبقه به همراه سطح خسارت برای ۴ زلزله اصلی مورد بحث آورده می شود.

جدول ۳- شاخص های خسارت سازه نه طبقه برای زلزله السترو (میدان دور)

	جابجایی نسبی		شکل پذیری		پارک و انگ	
	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده
شاخص خسارت	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۲۵	۰/۲۱
سطح خسارت	خسارت اندک	خسارت اندک			خسارت متوسط	خسارت کم

جدول ۴- شاخص های خسارت سازه نه طبقه برای زلزله نور تویج (میدان نزدیک)

	جابجایی نسبی		شکل پذیری		پارک و انگ	
	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده
شاخص خسارت	۰/۰۳۲	۰/۰۲۱	۱/۸۲	۱/۵۷	۱/۱۶	۰/۸۸
سطح خسارت	فروریزش	خسارت شدید			فروریزش	خسارت شدید

بررسی و ارزیابی نتایج برای سازه نه طبقه نشان می دهد که الگوریتم و روش کنترلی ارائه شده در این پژوهش، انواع مختلف شاخص های خسارت را برای هر دو نوع زلزله میدان نزدیک و دور کاهش می دهد. درصد کاهش شاخص جابجایی نسبی برای زلزله های میدان نزدیک تا ۵۲ درصد و برای زلزله های میدان دور تا ۲۵ درصد بوده است.

درصد کاهش شاخص های خسارت شکل پذیری و پارک و انگ مستقل از نوع زلزله می باشد و برای انواع زلزله ها حدود ۱۳ تا ۱۷ درصد می باشد. اختلاف درصد کاهش این دو شاخص به حدود ۳ درصد برای انواع زلزله ها محدود می شود. با توجه به بررسی سطح خسارت در سازه های کنترل شده و کنترل نشده، مشاهده می شود در اکثر موارد برای زلزله های مختلف و شاخص های خسارت گوناگون، سیستم کنترلی سطح خسارت را بهبود داده است، با استفاده از الگوی توزیع مناسب و بهینه عملگرها، بهبود عملکرد سیستم کنترلی امکان پذیر است.

علاوه بر جداول شاخص های خسارت برای سازه های مختلف تحت اثر زلزله های گوناگون که در بالا آورده شدند، درصد کاهش شاخص های خسارت برای سازه نه طبقه برای زلزله های مختلف در جدول ۵ به ترتیب، با هم مقایسه شده اند. با مقایسه درصد کاهش خسارت، مشاهده می شود که امکان کاهش درصد شاخص خسارت تا ۵۰ درصد امکان پذیر می باشد. از طرفی با توجه به اینکه بهترین درصد کاهش برای زلزله های میدان

نزدیک رخ داده است (که از نظر رفتاری دارای پیچیدگی می باشند) می توان نتیجه گرفت که می توان با توجه به مزایای سیستم کنترل فعال حلقه بسته که در این پژوهش استفاده شده است، رفتار سازه تحت بارهای زلزله پیچیده مانند زلزله های میدان نزدیک را به خوبی کنترل نمود.

جدول ۵- درصد کاهش شاخص های خسارت در سازه نه طبقه کنترل شده برای زلزله های مختلف

	السترو	هاچینوهه	نورتریج	کوبه
جابجایی نسبی	۱۸	۲۵	۳۴	۵۲
شکل پذیری	۱۴	۱۷	۱۴	۱۳
پارک و انگ	۱۶	۱۶	۲۴	۲۱

۱۰. نتیجه گیری

سه سازه مورد بحث در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده تحت تحریک ده نوع زلزله، تحلیل غیر خطی شدند. پاسخ های آن ها در دو حالت با هم مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن است که کنترل فعال سازه باعث کاهش پاسخ های سازه می شود و عوامل موثر در خسارت سازه، در حالت کنترل شده کاهش داشته است.

نتایج اساسی به طور اختصار در ذیل آمده است:

- ۱) استفاده از کنترل فعال پیشنهادی به طور کلی سطح خسارت را حداقل تا یک پله بهبود می دهد.
- ۲) بررسی انواع مختلف شاخص های خسارت نشان می دهد که برای تمامی سازه ها تحت هر دو نوع زلزله میدان نزدیک و دور، کاهش قابل توجهی ایجاد می گردد.
- ۳) بطور کلی می توان نتیجه گرفت که درصد کاهش شاخص های خسارت شکل پذیری و پارک و انگ مستقل از نوع زلزله است.
- ۴) کنترل فعال سازه بتنی در محدوده غیر خطی نیازمند مدل سازی مناسب رفتار هیستریزس اعضا می باشد. که این مهم در این پژوهش بنحو مناسبی صورت گرفته و در برنامه نویسی و تحلیل لحاظ گردیده است.

۱۲. مراجع

1. Soong, T.T. (1990), "Active structural control: theory and practice." John Wiley and Sons, New York.
۲. مشکوه رضوی، ح (۱۳۸۸)، "کنترل سازه ها با استفاده از میراگرهای جرمی فعال و غیر فعال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد.
3. Ohtori, Y., and Spencer, B. F., Jr.(2004), " Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings", Journal of Engineering Mechanics, ASCE.
4. Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P., and Chatupote, P.(2003) " seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structure", Eng. Struct.
۵. کرم الدین، ع (۱۳۸۸)، "کنترل خسارت سازه ها در برابر زلزله"، پایان نامه دکترای سازه، دانشگاه فردوسی، مشهد.
6. Taucer, F. and Fabio. (1991), "A fiber beam- column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures", college of engineering, university of California, Berkeley.
۷. مستوفی نژاد، د. (۱۳۸۷)، "سازه های بتن آرمه"، انتشارات ارکان دانش، اصفهان.
۸. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. (۱۳۸۴)، "آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله"، تهران.
۹. تقی نژاد، ر. (۱۳۸۷)، "طراحی و بهسازی لرزه ای سازه ها بر اساس سطح عملکرد با استفاده از تحلیل پوش آور"، نشر کتاب دانشگاهی، تهران.
10. Karthik, M. " Stress-Strain model of unconfined and confined concrete and stress-strain parameters". M.S thesis, Texas University.
۱۱. ایزد پناه، م، حبیبی، ع و یزدانی، آ. "ارزیابی وارد بر قاب های خمشی بتن مسلح با استفاده از تحلیل بار افزون"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد.