

ارزیابی معیارهای عملکردی برای ستون‌های بتنی مسلح بر پایه نتایج آزمایشگاهی

محمد خان محمدی^۱؛ محمدصادق معرفت^۲؛ علی گلی؛ محمدکاظم بحرانی

چکیده

برای بررسی معیارهای عملکردی در ساختمان‌های متداول در ایران، شش نمونه ستون بتنی تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است. نمونه‌ها معرف ساختمان‌های سه تا پنج طبقه با سازه قاب خمشی و شکل پذیری متوسط می‌باشد. برپایه تعاریف و ضوابط FEMA356 و ATC 40، ترازهای خدمت رسانی، قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش، روی منحنی نیرو-تغییر مکان، برای یکایک نمونه‌ها مشخص شده است. برپایه نتایج، معیارهای دوران پلاستیک، شکل پذیری و شاخص خسارت برای ترازهای مختلف تعیین شده است. نتایج با توصیه‌های موجود در مراجع مختلف مقایسه شده است. در مورد دوران پلاستیک و شکل پذیری، حدود ارایه شده با FEMA356 محافظه‌کارانه به نظر می‌رسد. شاخص خسارت در تراز ایمنی جانی، بیانگر خسارت شدید نیست، به گونه‌ای که امکان تعمیر میسر می‌باشد. مقادیر سایر شاخص‌ها نیز در مراحل مختلف متغیر است. با توجه به این واقعیت، روابط ریاضی برای تغییرات شکل پذیری و شاخص خسارت در برابر بارهای دوره‌ای، ارایه شده است. به کمک این روابط، پاسخ ستون‌ها را در مراحل مختلف می‌توان به نحو نسبتاً مناسبی ارزیابی کرد و از آنها در مدل‌سازی عددی استفاده کرد.

کلمات کلیدی

ایمنی جانی، آستانه فروریزش، شکل پذیری، دوران پلاستیک، شاخص خسارت

Evaluation of Performance Criteria for Reinforced Concrete Columns Based on Experimental Results

M. Khanmohammadi, M. S. Marefat, A. Goli, M.K. Bahrani

ABSTRACT

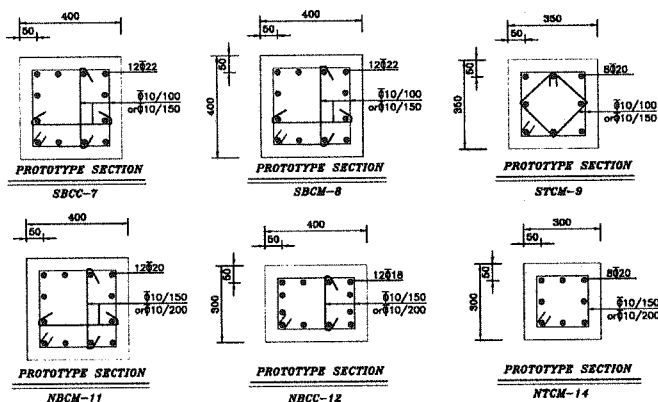
To evaluate performance criteria's of existing reinforced concrete buildings in Iran, cyclic load test on six columns has been carried out. Specimens represent reinforced concrete buildings with proportioned constructions, in accordance with provisions of intermediate ductility, ACI318-99. According to quality criteria's which defined in FEMA356 & ATC 40, different performance levels such as operational, immediate occupancy, life safety and collapse prevention indicates on base shear-top displacements backbone curve of each specimen. Based on performance levels, some different criteria such as plastic rotation, ductility, and damage index were developed. All results compared with other researches. Plastic rotation and ductility have more margins in compare with FEMA356 accepted criteria's. Damage index in life safety level has shown a repairable range for columns. Based on experimental results for different design criteria and for different performance level some mathematical equations developed and presented. Based on these equations, modeling of capacity will be convenient and useful.

KEYWORDS

Life safety, collapse prevention, ductility, plastic rotation, damage index.

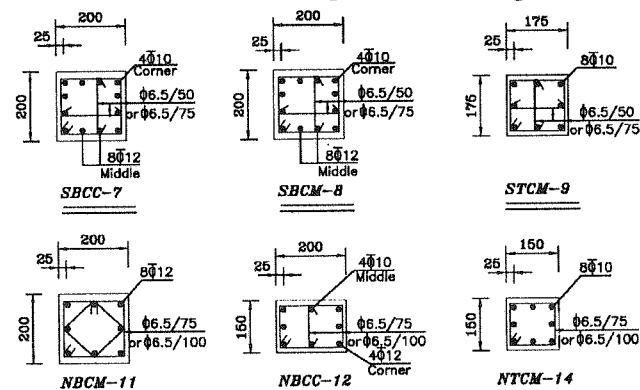
^۱ دکتری سازه، دانشگاه تهران: mkhan394@yahoo.com

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران: mmarefat@ut.ac.ir



شکل (۱): هندسه و مشخصات زیر سازه اصلی (مقیاس کامل)

جک قائم ۲۵۰ kN، متصل به انتهای ستون، نیروی محوری فشاری را بر نمونه‌ها وارد می‌کند. نیروی جک‌ها به وسیله سلول بار اندازه‌گیری می‌شود. در هر آزمایش تعدادی کرنش سنج و تغییر مکان سنج استفاده شده است. آرایش کرنش سنج‌ها به گونه‌ای است که ناحیه پلاستیک مورد انتظار در انتهای عضو راکتور کند. بارگذاری رفت و برگشتی، به شیوه نیمه استاتیک و در مود کنترل تغییر مکان با نسبت کم، اعمال شده است. رویه بارگذاری در شکل (۴) ارائه شده است. این رویه اجازه خواهد داد تا پارامترهای اساسی همانند افت مقاومت تناوبی، کاهش سختی، شکل پذیری، پتانسیل زایل کردن انرژی و نوع گسیختگی ارزیابی شود.



شکل (۲): جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

۳- نتایج آزمایش

رفتار بار- تغییر مکان جانبی نسبی؛ که در انتهای آزاد نمونه‌ها ثبت شده است، به عنوان مشخصه اصلی پاسخ اعضا، در شکل (۶) تا شکل (۱۰) ارائه شده است. در این شکل‌ها نحوه تخریب و ترک خوردگی نیز مشخص شده است.

روش عملکردی مبنایی نسبتاً جدید برای طرح سازه‌های مقاوم در برابر زلزله ارائه کرده است. در این روش سعی شده تا راهکاری برای پیش بینی دقیق‌تر عملکرد سازه در برابر زلزله تدوین شود و حدهای عملکردی متنوع همچون ایمنی جانی، جلوگیری از فروریزش و قابلیت استفاده بی وقفه تعریف شود. به دلیل نوپا بودن ایده، روش‌ها و معیارهای مطرح شده به حد کافی کامل نشده و مطالعات و آزمون بیشتری را طلب می‌کند. از جمله موارد درخور بررسی، می‌توان از معیارهای طراحی نام برد. این معیارها شامل شاخص‌هایی نظیر دوران پلاستیک، تغییر شکل نسبی، و شاخص خسارت می‌باشد. این شاخص‌ها به پارامترهایی همچون شکل پذیری، میزان استهلاک انرژی، ظرفیت تغییر شکل و نیز انحناء وابسته می‌باشد. برای بررسی شاخص‌های مذکور و انطباق دستورالعمل‌های بین المللی با شرایط محلی در ایران، یک برنامه تحقیقاتی در آزمایشگاه سازه دانشکده فنی دانشگاه تهران به اجرا درآمده است. در بخشی از این مطالعه، تعداد شش نمونه ستون بتنی، از ساختمان‌های متعارف با قاب خمشی سه تا پنج طبقه، تحت بارگذاری رفت و برگشتی آزمایش شده است. برپایه نتایج به دست آمده، معیارهای عملکردی برای مراحل مختلف بارگذاری تعیین شده، و توصیه‌های موجود در نقد و بررسی شده است.

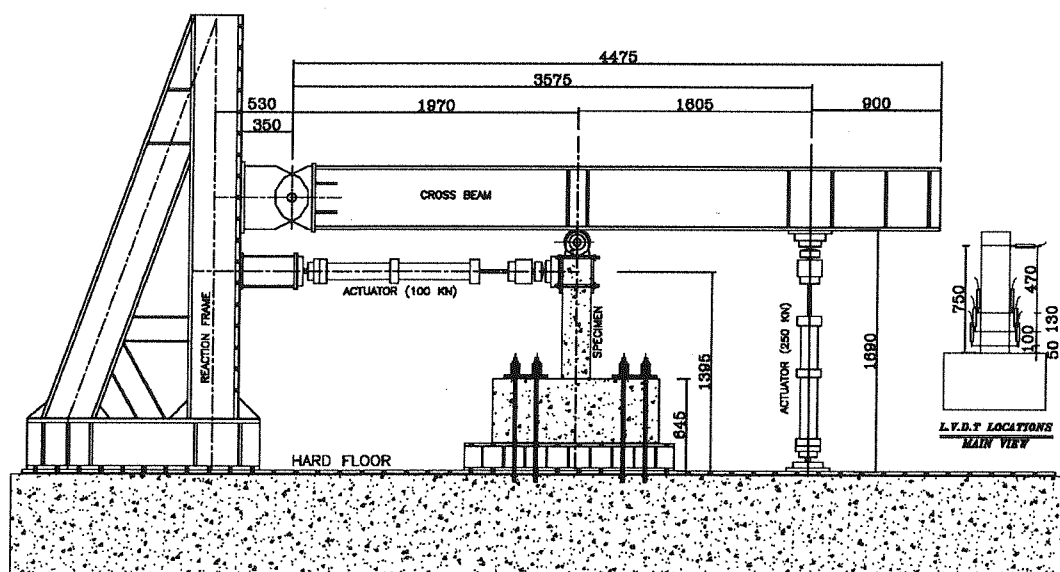
۲- برنامه آزمایش

شش نمونه ستون به‌عنوان نماینده ستون‌های بتنی طبقات دوم و چهارم ساختمان‌های بتنی تا پنج طبقه مسکونی، تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته است. مشخصات اعضای اصلی بر اساس میانگین خواص ستون‌ها در ساختمان‌های متداول انتخاب شده و در شکل (۱) نشان داده شده است.

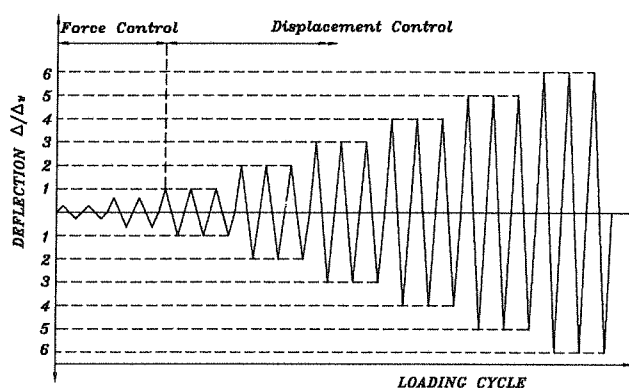
نمونه‌های آزمایشگاهی به مقیاس ابعادی ۱:۲ ساخته شده است. نمونه‌های مقیاس شده و نیز مشخصات آرماتورگذاری طولی و عرضی آنها در شکل (۲) ارائه شده است. جدول (۱) نیز بیانگر مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. ابزار بندی آزمایش در شکل (۳) نمایش داده شده است. جک هیدرولیک ۱۰۰ کیلو نیوتن برای اعمال بارگذاری رفت و برگشتی به انتهای آزاد ستون‌ها متصل است.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی مصالح و موقعیت نمونه ها

NTCM-14	NBCC-12	NBCM-11	STCM-9	SBCM-8	SBCC-7	عنوان نمونه
بالا	پایین	پایین	بالا	پایین	پایین	طبقه
میانی	کناری	میانی	میانی	میانی	کناری	موقعیت در پلان
0.31	0.23	0.245	0.19	0.22	0.16	نسبت بار محوری
20.1	25.2	24.5	24	28	27	مقاومت مشخصه بتن (MPa)
0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	کرنش نهایی
670	670	670	670	670	670	تنش نهایی (MPa)
205	203	203	204	203	203	مدول ارتجاعی (GPa)
0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	کرنش جاری شدن
393	393	393	393	393	393	تنش جاری شدن (MPa)
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	کرنش نهایی
375	375	375	375	375	375	تنش نهایی (MPa)
0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	کرنش جاری شدن
220	220	220	220	220	220	تنش جاری شدن (MPa)

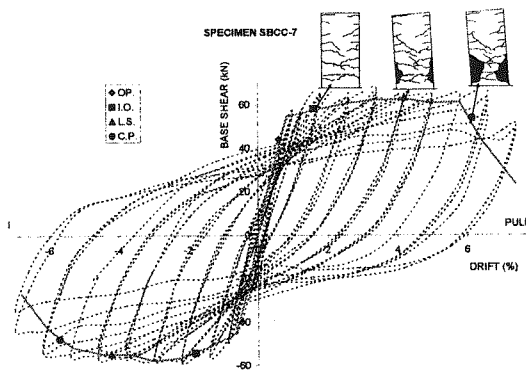


شکل (۳): نمای از ابزاربندی آزمایش

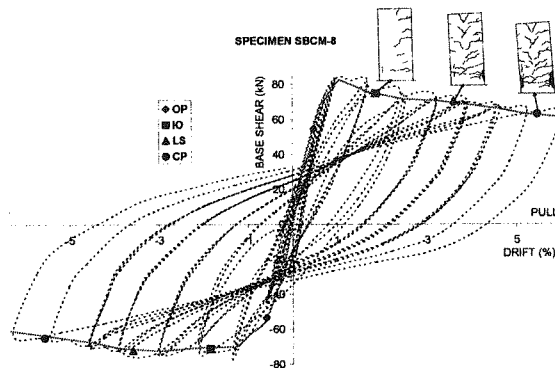


شکل (۴): نحوه بارگذاری نمونه ها

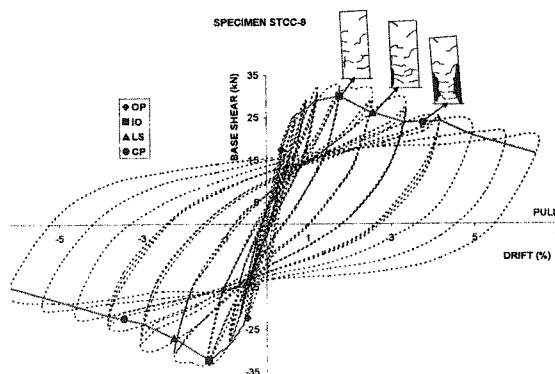
الگوی ترک خوردگی در مراحل مختلف، با دقت زیاد و با اندازه گیری درحین تست ثبت شده است. هدف از ارایه شکلها، بررسی معیارهای طراحی در ترازهای مختلف عملکردی است. در هر شکل حالت های حدی شامل OP : خدمت رسانی، IO : قابلیت استفاده بی وقفه، LS : ایمنی جانی و CP : آستانه فروریزش مشخص شده است.



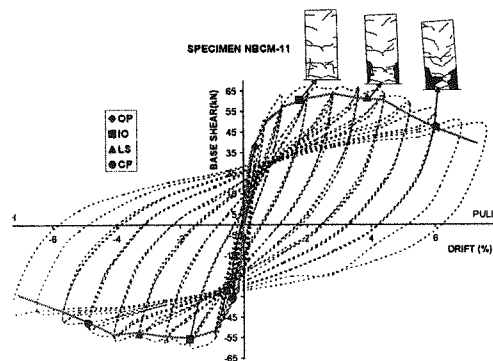
شکل (۶): ترازهای عملکردی برای نمونه SBCC-7



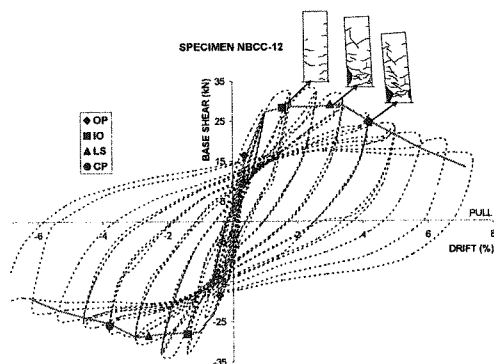
شکل (۵): ترازهای عملکردی برای نمونه SBCC-8



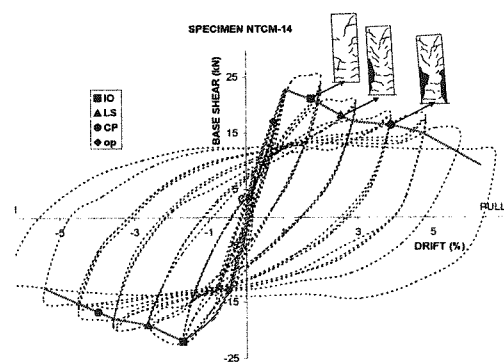
شکل (۸): ترازهای عملکردی برای نمونه STCC-9



شکل (۷): ترازهای عملکردی برای نمونه NBCM-11



شکل (۱۰): ترازهای عملکردی برای نمونه NBCC-12



شکل (۹): ترازهای عملکردی برای نمونه NTCM-14

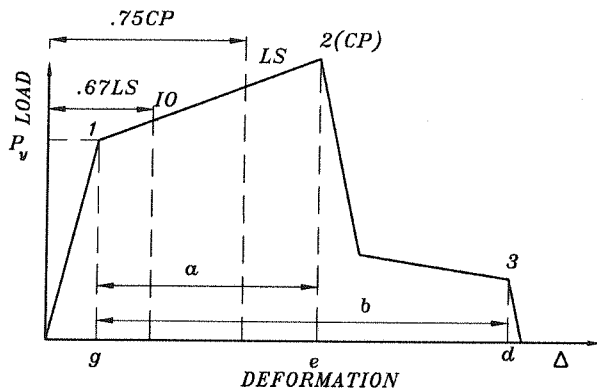
پذیرتر گردد. همچنین، بین دو سطح ایمنی جانی و آستانه فروریزش، دامنه ایمنی محدود قابل تعریف است. تراز عملکردی خدمت رسانی نیز در برخی از مراجع [۲] تعریف شده است. این تراز بالاتر از سطح قابلیت استفاده بی وقفه قرار می‌گیرد. برای انطباق هر مرحله از پاسخ سازه با یکی از سطوح عملکردی، لازم است معیارهای متناظر با هر تراز مشخص شود. از مرور مراجع مذکور، می‌توان شاخصه‌های هر تراز را به شرح زیر توصیف کرد:

از نظر کیفی، قابلیت استفاده بی وقفه، IO لازم می‌دارد که خسارت به حدی باشد که ایمنی سازه محفوظ و مقاومت و سختی آن، ضرورتاً، به اندازه قبل از زلزله باقی بماند. از نظر

۸- ترازبندی رفتار نمونه‌ها

در روش عملکردی هم رفتار سازه و هم میزان آسیب پذیری آن در برابر زلزله دسته‌بندی می‌شود. در مراجع مختلف [۱]، [۲] و [۳] ترازهای گوناگون عملکردی و نیز سطوح مورد قبول ارائه شده است. در اغلب مراجع، سه سطح عمده عملکردی تعریف شده است که شامل قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش می‌باشد. معمولاً بین دو سطح قابلیت استفاده بی وقفه و ایمنی جانی، دامنه کنترل خسارت تعریف می‌شود. طراحی در این بازه اجازه خواهد داد تا میزان خسارت ناشی از زلزله محدود شود و ترمیم بعد از زلزله امکان

پرکننده‌ها و دیوارها تخریب شده و یا در آستانه تخریب هستند و سازه در آستانه فروریزش قرار دارد. ترک‌ها در اجزای سازه ای بسیار توسعه پیدا کرده‌اند و در نقاط بحرانی مفصل پلاستیک ایجاد شده است [۸]، [۲].



شکل (۱۱): نقاط عملکردی بر روی منحنی ایده ال شده [۲۰]

توصیف‌های ارائه شده برای ترازهای عملکردی در مراجع گوناگون عمدتاً به صورت کیفی است، و معیارهای فوق بندرت کمی شده است. در این مطالعه، سعی شده است که نقاط عملکردی برای نمونه‌های آزمایشی تعیین و ارائه گردد. در شکل (۵) تاشکل (۱۰)، علاوه بر ترسیم نحوه ترک خوردگی و خسارت در عضو، مراحل متناظر با هر عملکرد نیز مشخص شده است. تعیین نقاط به کمک مشاهدات دقیق روی نمونه‌ها و با در نظر گرفتن شدت خسارت، پهنا و گسترش ترک‌ها و نقاط تعریف شده در منحنی و با توجه به توصیه‌های مراجع فوق و نیز قضاوت مهندسی صورت گرفته است.

۵- معیارهای متناسب با ترازهای عملکردی

معیارهای متنوعی برای ترازهای عملکردی قابل بررسی است که از جمله می‌توان به این شاخصه‌ها اشاره کرد: تغییر شکل جانبی نسبی یا Drift، میزان دوران پلاستیک، شکل پذیری، شاخص خسارت. در این مطالعه، معیارهای فوق با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، عددی شده است. هدف این است که ضوابط به صورت کمی بررسی و توصیه‌های موجود تکمیل شود.

۶- تغییر شکل نسبی جانبی

تغییر شکل نسبی جانبی یکی از معیارهای مهم در طراحی عملکردی می‌باشد. این معیار برای کنترل رفتار سازه و میزان خسارت وارد بر آن کاربرد وسیع دارد. در ستون‌ها، به عنوان اعضای قائم، میزان تغییر شکل جانبی نه تنها بر رفتار کلی سازه اثر می‌گذارد، بلکه بر شدت آسیب وارد بر خود عضو،

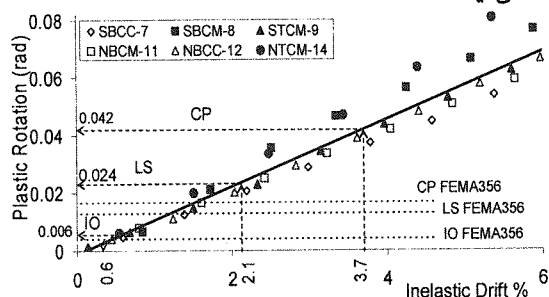
می‌بایست خسارت وارد بر سازه بسیار سبک بوده، و میزان تغییر شکل‌های نسبی ماندگار ناچیز باشد. ترک‌های جزئی بر روی المان‌های سازه ای و غیر سازه‌ای قابل قبول است و سایر تجهیزات ضروری ساختمان بدون آسیب به خدمت دهی ادامه می‌دهند. در این تراز، بیشترین کرنش در بتن (پوشش آرماتور) بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۴ است و کرنش در فولاد به ۰/۰۱ محدود می‌شود [۱]، [۲]؛ البته، خسارت ماندگار در سطح عضو مشهود خواهد بود. در منحنی پاسخ سازه، این تراز تا حداکثر ۶۷ درصد تراز ایمنی جانی، LS می‌تواند قرار بگیرد [۲] شکل (۱۱).

در تراز ایمنی جانی، LS اجزای سازه‌ای دچار خسارت جدی می‌شوند، ولی حاشیه اطمینانی در برابر شروع فروریزش جزئی و یا فروریزش کلی وجود خواهد داشت. در این سطح عملکردی، حفظ جان ساکنین از موارد اجباری است. امکان ترمیم ساختمان تا حد زیادی وجود دارد، لیکن این امر از نظر اقتصادی ممکن است مقرون به صرفه نباشد. از نظر کمی، در این سطح مقاومت و سختی به میزان زیاد کاهش یافته است، لیکن اعضای باربر قائم، به خدمت ادامه می‌دهند. گسیختگی خارج از صفحه در اعضای غیر سازه‌ای و دیوارها وجود ندارد؛ اما تغییر شکل نسبی ماندگار در سازه وجود خواهد داشت و خسارت قابل ملاحظه به جداکننده‌ها وارد می‌آید. در اعضا، بخصوص ستون‌ها، خسارت زیادی به وجود خواهد آمد. قلوه کن شدن پوشش بتن روی آرماتورها و نیز ایجاد ترک‌های برشی کوچک‌تر از ۲/۵ میلی‌متر، از مشخصات این سطح عملکردی است. دامنه پاسخ سازه متناظر با این سطح، حد اکثر تا ۷۵ درصد سطح عملکردی آستانه فروریزش خواهد بود [۱]، [۲]، (شکل ۱۱).

در تراز عملکردی آستانه فروریزش، CP ، سازه خسارت وسیع می‌بیند، به گونه‌ای که در این حالت تنها امکان تحمل بارهای ثقلی را دارا می‌باشد و دچار فروریزش نخواهد شد. در این حالت، کاهش شدیدی در میزان سختی و مقاومت سازه بوجود می‌آید و تغییر شکل‌های نسبی ماندگار زیادی در سازه وجود خواهد داشت. در این تراز، کاهش مقاومت، بخصوص در اعضای اصلی که بارهای ثقلی را تحمل می‌کنند، کنترل می‌شود؛ به گونه‌ای که بارهای ثقلی را تحمل کنند؛ اما امکان آسیب به ساکنین وجود خواهد داشت. در این تراز عملکردی، از نظر تکنیکی امکان ترمیم وجود نخواهد داشت و ایمنی لازم برای سکونت بعدی به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که در پس لرزه‌ها امکان گسیختگی کامل ساختمان وجود دارد. از نظر کمی، در این سطح میزان مقاومت و سختی باقیمانده در سازه کم می‌باشد، تغییر شکل‌های نسبی ماندگار بسیار زیاد بوده،

۷- دوران پلاستیک

دوران‌های پلاستیک عامل اصلی ایجاد تغییر شکل‌های جانبی ماندگار است. میزان دوران پلاستیک در نمونه‌های آزمایشگاهی با تعبیه تعدادی LVDT در ناحیه مفصل پلاستیک، اندازه گیری شد. شکل (۱۲) دوران‌های پلاستیک مربوط به نمونه‌های مختلف را در مراحل مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. با برآزش منحنی، رابطه‌ای خطی بین دوران پلاستیک با جابه جایی جانبی ماندگار به دست می‌آید که در شکل نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۲)، مقادیر دوران پلاستیک در سه حد IO ، LS و CP ، به ترتیب، $0/006$ ، $0/024$ و $0/042$ رادیان به دست می‌آید.



شکل (۱۲): مقادیر متوسط دوران پلاستیک در برابر تغییر شکل ماندگار و مقایسه آن با حدود ارایه شده توسط [۱]، [۲]

برای مقایسه، حدود قابل پذیرش مشخص شده در مراجع [۱] و [۲] نیز در شکل (۱۲) ارایه شده است. براساس مقادیر مراجع مذکور، حدهای پذیرش دوران، برای ستون‌هایی مورد آزمایش، در ترازهای قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش، به ترتیب برابر $0/004$ و $0/013$ و $0/017$ رادیان می‌باشد. از مقایسه این مقادیر با نتایج آزمایش، یعنی $0/006$ ، $0/024$ و $0/042$ رادیان، می‌توان دریافت که نتایج آزمایش، به ترتیب، 50 ، 85 و 147 درصد از مقادیر پیشنهادی در مراجع [۱]، [۲] بیشتر است؛ به عبارت دیگر، توصیه‌های مراجع مذکور، به ویژه برای دو حد ایمنی جانی و آستانه فروریزش، به مقدار قابل توجهی محافظه کارانه به نظر می‌رسد.

۸- شکل پذیری

از عوامل اساسی مؤثر بر رفتار غیر خطی اعضا سازه‌ای، شکل پذیری است. شکل پذیری نقش مهمی در کاهش نیروی معادل استاتیکی در طراحی ظرفیتی و حفظ پایداری سازه در برابر زلزله دارد. با استفاده از نمودارهای (۵) تا (۱۰)، میزان شکل پذیری در جابه‌جایی، برای ترازهای مختلف عملکردی، محاسبه شده است. خلاصه نتایج به دست آمده برای نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. به طوری که

و نیز بر اعضای غیر سازه‌ای، نیز مؤثر است. با توجه به تعیین سطوح مختلف عملکردی برای شش نمونه ستون، که در بخش قبل ذکر شد، میزان تغییر شکل نسبی اندازه گیری شده در جدول (۲) ارایه شده است.

در این جدول متوسط تغییر شکل ماندگار نیز ارایه شده است. یکی از عوامل مؤثر بر میزان خسارت وارد بر سازه در اثر زلزله و قابلیت تعمیر آن، تغییر شکل ماندگار است. تغییر شکل‌های ماندگار بر اساس رابطه زیر قابل تعیین است [۴]:

$$D_r = (\mu - 1)(1 - r)D \quad (۱)$$

که در آن D تغییر شکل نسبی جاری شدن، μ شکل پذیری، r نسبت سختی بعد از جاری شدن به سختی سکانتی جاری شدن و D_r تغییر شکل نسبی ماندگار در عضو خواهد بود.

جدول (۲): تغییر شکل نسبی جانبی (در صد) در ترازهای مختلف

نمونه	تراز عملکردی		
	قابلیت استفاده بی وقفه	ایمنی جانی	آستانه فروریزش
SBCC - 7	1.7	4.21	5.92
SBCM - 8	1.87	3.6	5.52
STCM - 9	1.58	2.4	3.6
NBCM - 11	1.74	3.6	5.47
NBCC - 12	1.48	2.81	4.01
NTCM - 14	1.73	2.6	3.94
متوسط	1.68	3.2	4.74
تغییر شکل ماندگار	0.64	2.17	3.72

با پردازش مقادیر فوق، میزان تغییر شکل ماندگار در ترازهای عملکردی IO ، LS و CP به ترتیب برابر با $0/64$ و $2/17$ و $3/72$ درصد با انحراف از معیار $0/06$ و $0/12$ و $0/17$ درصد، ارزیابی می‌شود. بعضی از مراجع، مقدار تغییر شکل ماندگار با امکان ترمیم در ستون‌ها را $1/67$ در صد در نظر گرفته اند؛ لیکن مطالعات انجام گرفته در مرجع [۴] این مقدار را $2/4$ در صد اعلام می‌کند. در مطالعه حاضر، با توجه به شدت تخریب بتن و میزان نفوذ خرابی به هسته عضو و کمانش میلگردهای طولی، عددی بین $2/8$ تا $3/6$ درصد به عنوان تغییر شکل ماندگار، با امکان ترمیم برآورد شده است. حد پایین فوق معادل 25 درصد بیشتر از مقادیر به دست آمده برای تراز ایمنی جانی است. بدین ترتیب، براساس آزمایشهای انجام یافته، تغییر شکل نسبی ماندگار معادل $2/8$ درصد را به عنوان حد ترمیم پذیری می‌توان پیشنهاد کرد.

شدن، و $\beta =$ پارامتر ثابت می‌باشد.

مطالعات نشان داده است که مقادیر کمتر از ۰/۴ برای این شاخص بیانگر خسارت قابل تعمیر است و چنانچه شاخص بین ۰/۴ و ۱ باشد، خسارت غیر قابل تعمیر و چنانچه بزرگتر از ۱ باشد فرو ریزش کلی محتمل است [۶]. پارامتر β نمایشگر میزان تأثیر انرژی مستهلک شده در خسارت وارد بر سازه می‌باشد. شاخص خسارت پارک و انگ در مورد حد پایین ۰ و حد بالای ۱ رضایت بخش عمل نمی‌کند، به همین دلیل محققین در صدد اصلاح آن برآمده‌اند [۵].

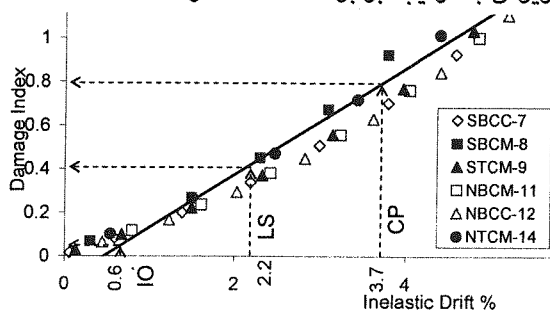
بزرگ نیا و برترو [۵] شاخص خسارت پارک و انگ را پس از اصلاح به شکل زیر ارائه کردند:

$$DI = (1 - \alpha)(\mu - \mu_e)(\mu_{mon} - 1) + \alpha E_H / E_{mon} \quad (3)$$

که در آن: $\mu =$ شکل پذیری، $\mu_e =$ شکل پذیری الاستیک، $\mu_{mon} =$ شکل پذیری در بارگذاری یک طرفه، $E_H =$ انرژی مستهلک شده در طول بارگذاری و $\alpha =$ پارامتر ثابت می‌باشد.

در آزمایش‌های انجام گرفته، میزان خسارت وارد بر هر نمونه در تغییر شکل‌های مختلف برآورد و سپس خسارت با استفاده از رابطه (۳) بین دو مقدار حدی ۰ و ۱ مقیاس شد. برای این منظور، پارامتر α در نمونه‌های مختلف تغییر داده شده است تا خسارت فیزیکی مشاهده شده کالیبره گردد. شکل (۱۴) نتایج به دست آمده برای پارامتر شاخص خسارت را در نمونه‌های تحت آزمایش، به ازای تغییر شکل‌های نسبی مختلف، ارائه کرده است. در تعیین مقادیر ارائه شده در شکل (۱۴) مقدار متوسط پارامتر ثابت α برابر ۰/۱۸ به دست آمده است که مطابقت خوبی با مقادیر ارائه شده در ادبیات در مقایسه با ثابت پارک و انگ (β) دارد [۶]، [۷].

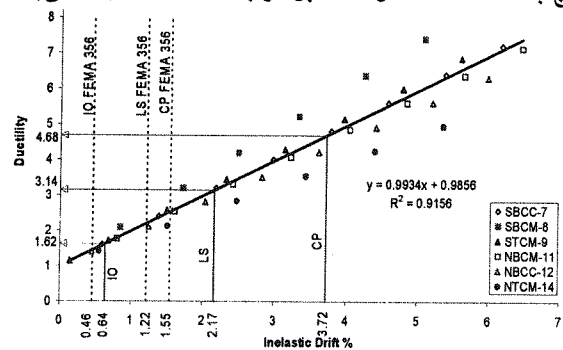
از شکل (۱۴) مشخص می‌شود که شاخص خسارت در ترازهای قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش به ترتیب، برابر ۰/۴، ۰/۴۲، و ۰/۸ است.



شکل (۱۴): شاخص خسارت در ترازهای مختلف عملکردی

برخی محققین مقدار شاخص خسارت بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ را به عنوان خسارت پایین با ترک خوردگی سبک و شاخص

دیده می‌شود، متوسط نتایج با تقریب خطی نسبتاً مناسبی قابل بیان است. برپایه این شکل، میزان شکل پذیری متناظر با ترازهای عملکردی قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش، به ترتیب، برابر ۳/۱۰۴/۶۲ و ۴/۶۸ می‌باشد. در این خصوص، مراجع [۱] و [۲] توصیه‌ای ارائه نکرده‌اند. در صورت معادل سازی توصیه‌های این مراجع، که در قالب دوران پلاستیک می‌باشد و در بخش قبل ذکر شد، مقدار شکل پذیری متناظر برای مرجع مذکور نیز محاسبه می‌شود. این مقادیر نیز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. به طوری که دیده می‌شود، مقادیر آزمایشگاهی در ترازهای قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش، به ترتیب ۸۵ و ۴۳ و ۱۲ درصد از توصیه‌های معادل در این مراجع بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که توصیه‌های مراجع مذکور در مقایسه با نتایج به دست آمده، در حد قابل توجه، محافظه کارانه می‌باشد.



شکل (۱۳): مقادیر متوسط شکل پذیری در ترازهای مختلف

۹- شاخص خسارت

یکی از روش‌های عددی کردن خسارت وارد بر سازه، تحت اثر زلزله، استفاده از شاخص خسارت می‌باشد. شاخص خسارت اثراتی همچون استهلاک انرژی، تاریخچه پاسخ عضو، شکل پذیری، افت مقاومت و سختی را به حساب می‌آورد. این شاخص در شکل ایده آل بین دو مقدار ۰ و ۱ نرمال می‌شود، به گونه‌ای که در شاخص صفر رفتار خطی باقی می‌ماند و در شاخص یک پتانسیل گسیختگی سازه وجود خواهد داشت. بدین ترتیب، ترازهای عملکردی نظیر قابلیت استفاده بی وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش در محدوده صفر و یک قرار خواهند گرفت. در ادبیات شاخص‌های خسارت متعددی تعریف شده است که از جمله معروف‌ترین آنها شاخص خسارت پارک و انگ [۶] است که به شرح زیر معرفی می‌شود:

$$DI_{pa} = \mu_{max} / \mu_{mon} + \beta E_H / (F_y \delta_y \mu_{mon}) \quad (2)$$

که در آن: $\mu_{max} =$ حداکثر شکل پذیری، $\mu_{mon} =$ شکل پذیری در بارگذاری یک طرفه، $E_H =$ انرژی در بارگذاری یک طرفه، $E_H =$ انرژی مستهلک شده در طول بارگذاری، $\delta_y =$ تغییر شکل جاری

اعتمادتری در مقایسه با مدل‌های عددی موجود، منجر شود؛ لیکن می‌بایست به این نکته توجه کرد که برای تعمیم نتایج به مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بیشتری نیاز است.

جدول (۳): معیارهای پیشنهادی طراحی در ترازهای مختلف.

تراز / معیار	استفاده بی وقفه	ایمنی جانی	آستانه فروریزش
تغییر شکل نسبی ماندگار	0.64%	2.2%	3.7%
دوران پلاستیک (رادیان)	$\theta_p = 0.011D_r - 0.001$ 0.006	0.02	0.04
شکل پذیری	$\mu = 0.99D_r + 0.98$ 1.6	3.0	4.7
شاخص خسارت	$DI = 0.24D_r - 0.12$ 0.004	0.42	0.80

۱۱- مراجع

- [۱] ATC-40. (1996b). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40, Applied Technology Council.
- [۲] FEMA, FEMA356, NEHRP Guideline for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency.
- [۳] SEAOC Vision 2000 Committee (1995). Performance-based seismic engineering of buildings. Report, Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA.
- [۴] Lehman, D.E., Moehle, J.P. "Performance-Based Design of Reinforced Concrete Bridge Columns", 12WCEE 2000, p.2065
- [۵] Bozorgnia, Y., and Bertero, V.V. (2003). "Damage spectra: Characteristics and Applications to seismic risk reduction." Journal of Structural Engineering ASCE, October 2003.
- [۶] Park, Y.J., Ang, A.H. and Wen Y.K., 1987 "Damage Limiting Aseismic Design of Building." Earthquake Spectra, Vol.3, Number 1, ppl- 26 California.
- [۷] Hindi, R.A, Sexsmith, R.G., M.EERI, 2001 "A Proposed Damage Model for RC Bridges Columns under Cyclic Loading" Journal of Earthquake Spectra, V 17, No.2, pp.261-289.

خسارت بین ۰/۴ تا ۰/۵ را آستانه ترمیم ناپذیری ذکر می‌کنند [۶]، [۷]. در این آزمایش‌ها، مقدار شاخص خسارت در تراز قابلیت استفاده بی وقفه ۰/۴ به دست آمده است که با میزان خسارت وارده بر نمونه‌ها انطباق مناسبی دارد. به علاوه، با استفاده از تغییر شکل نسبی ماندگار، شاخص خسارت ۰/۵۵ به عنوان شروع حد ترمیم ناپذیری به دست می‌آید که با مشاهدات خسارت فیزیکی نیز مطابقت دارد. شاخص خسارت در تراز عملکردی ایمنی جانی ۰/۴۲ است که بیانگر ترمیم پذیری آسان می‌باشد؛ زیرا خردشدگی و نیز قلوه کن شدن در اعضا شدید نیست و خسارت کمی به هسته بتن نفوذ کرده است.

۱- خلاصه و جمع بندی

برای ارزیابی لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح در ساختمان‌های موجود، شش نمونه ستون تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی واقع شده است. نمونه‌ها معرف ستون‌های مورد استفاده در ساختمان‌های سه تا پنج طبقه، با قاب خمشی و شکل پذیری متوسط می‌باشد. دوران پلاستیک و شکل پذیری ستون‌های آزمایش شده، در ترازهای عملکردی آستانه فروریزش، ایمنی جانی و قابلیت استفاده بی وقفه ارایه شده است. مقادیر به دست آمده در سطح آزمایش‌های انجام پذیرفته اختلاف قابل ملاحظه‌ای با مقادیر ارایه شده در مراجع [۱] و [۲] دارد و به نظر می‌رسد استفاده از توصیه مراجع مذکور، می‌تواند محافظه کارانه باشد. شاخص خسارت در تراز عملکردی ایمنی جانی، ۰/۴۲، بیانگر خسارت شدید نیست؛ و چنانچه ستون‌ها در زلزله واقعی در این تراز عملکردی واقع شوند، می‌توان انتظار داشت که تعمیر بعد از زلزله آنها با دشواری زیادی همراه نباشد و عملیات ترمیم اقتصادی باشد. در این مطالعه سعی شد تا در سطح آزمایش‌های انجام پذیرفته، علاوه بر بررسی معیارهای ارایه شده با مراجع مختلف، اطلاعات تکمیلی نیز به دست آید. اطلاعات تکمیلی شامل مواردی نظیر تغییر شکل ماندگار، دوران پلاستیک و شاخص خسارت است. در جدول (۳) خلاصه‌ای از مقادیر به دست آمده ارایه شده است.

به طوری که در جدول (۳) دیده می‌شود، حدهای عملکردی به صورت رابطه ریاضی نیز ارایه شده است. استفاده از این روابط امکان تعیین مقادیر پارامترها را به صورت پیوسته و برای تمامی مراحل رفتار ستون‌های بتن مسلح، به وجود می‌آورد. این موضوع، به ویژه برای مدل‌سازی عددی و مطالعه پاسخ سازه در برابر سطوح مختلف عملکرد حائز اهمیت است. با توجه به اعمال شرایط بومی، کاربرد نتایج به دست آمده برای ساختمان‌های متداول در ایران می‌تواند به نتایج قابل