

## بررسی آزمایشگاهی معیارهای طراحی در روش عملکردی برای تیرهای بتنی مسلح

محمد خان محمدی\* و محمدصادق معرفت\*\*

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۸۳/۱۰/۶ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۹/۲۶)

**چکیده** - برای بررسی معیارهای عملکردی در ساختمانهای مسکونی با مشخصات متداول در ایران، شش نمونه تیر بتنی تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی و یک طرفه قرار گرفته است. نمونه‌ها بر پایه میانگین مشخصات موجود در ساختمانهای سه تا پنج طبقه در تهران طراحی شده است. بر پایه تعریف‌ها و ضوابط FEMA356 و ATC-40، ترازهای بهره برداری آبی، ایمنی جانی، و آستانه فروریزش، روی منحنی نیروی جانی - تغییر مکان، برای یکایک نمونه‌ها مشخص شده است. بر پایه نتایج، معیارهای دوران پلاستیک، تغییر شکل نسبی ماندگار، شکل پذیری، کرنش متوسط در پوسته بتن و در آرماتور طولی، شاخص خسارت، و طول مفصل پلاستیک، برای ترازهای مختلف تعیین شده است. بر پایه نتایج آزمایشها، حدود ارایه شده توسط FEMA356 برای دوران پلاستیک و شکل پذیری محافظه کارانه به نظر می‌رسد. در تراز بهره‌برداری آبی، بزرگی کرنش در آرماتور طولی، انطباق نسبتا خوبی با مقدار (۰/۰۱) ارایه شده در FEMA356 دارد. شاخص خسارت در تراز ایمنی جانی برابر ۰/۶ به دست آمده که بیانگر خسارت نسبتا شدید است، به گونه ای که امکان تعمیر تیرها دشوار است. مطالعات نشان داد که طول مفصل در تراز بهره برداری آبی تقریبا معادل ۵۰٪ طول آن در تراز ایمنی جانی است. و نیز اختلاف طول مفصل در ترازهای ایمنی جانی و آستانه فروریزش در حدود ۲۰٪ است.

واژگان کلیدی: بارگذاری رفت و برگشتی، شکل پذیری، ترازهای عملکردی، شاخصهای عملکردی

## Experimental Evaluation of Performance Criteria for Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading

M. Khan-Mohammadi and M. S. Marefat

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran

**Abstract:** To assess the performance criteria of the reinforced-concrete, five-storey residential buildings common in Iran, an

\*\* - دانشیار

\* - دانشجوی دکتری

experimental study in the structural laboratory of the University of Tehran has been conducted. The test program includes cyclic and monotonic load tests of six beams that represent three-to-five storey buildings with rigid frame structures. Using definitions given in FEMA-356 and ATC-40, stages of immediate occupancy, life safety, and collapse prevention have been identified on the drift-force curves of all specimens. Based on the test results, values of the plastic rotation, ductility, strain in concrete cover and in longitudinal bar, crack width, damage index, and length of plastic region at different levels have been determined. It was found that the recommended values of plastic rotation and ductility for reinforced concrete beams by FEMA-356 are conservative. The length of plastic hinge region in the stage of immediate occupancy is about half the plastic hinge length in the stage of life safety and it increases by 20% from life safety to collapse prevention.

**Keywords:** Cyclic reversal loading, ductility, performance levels, performance criteria

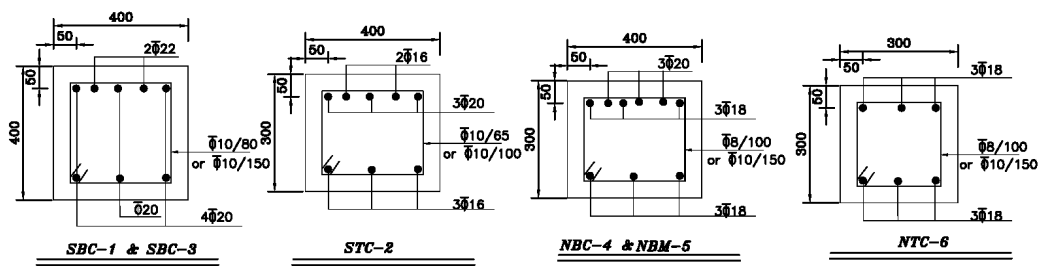
## فهرست علائم

تراز عملکردی ایمنی جانی	LS	تراز عملکردی آستانه فروریزش	CP
تراز بهره برداری بدون وقفه	OP	تغییر شکل نسبی	D
نسبت سختی بعد از جاری شدن به سختی سکانتی اولیه	r	شاخص خسارت پارک و انگ	DI <sub>pa</sub>
پارامتر ثابت	$\beta$	تغییر شکل نسبی ماندگار	D <sub>r</sub>
تغییر شکل پلاستیک	$\delta_p$	انرژی مستهلک شده	E <sub>H</sub>
انحنای نهایی	$\Phi_u$	تراز عملکردی بهره برداری آنی	IO
انحنای جاری شدن	$\Phi_y$	طول ناحیه پلاستیک	L <sub>p</sub>

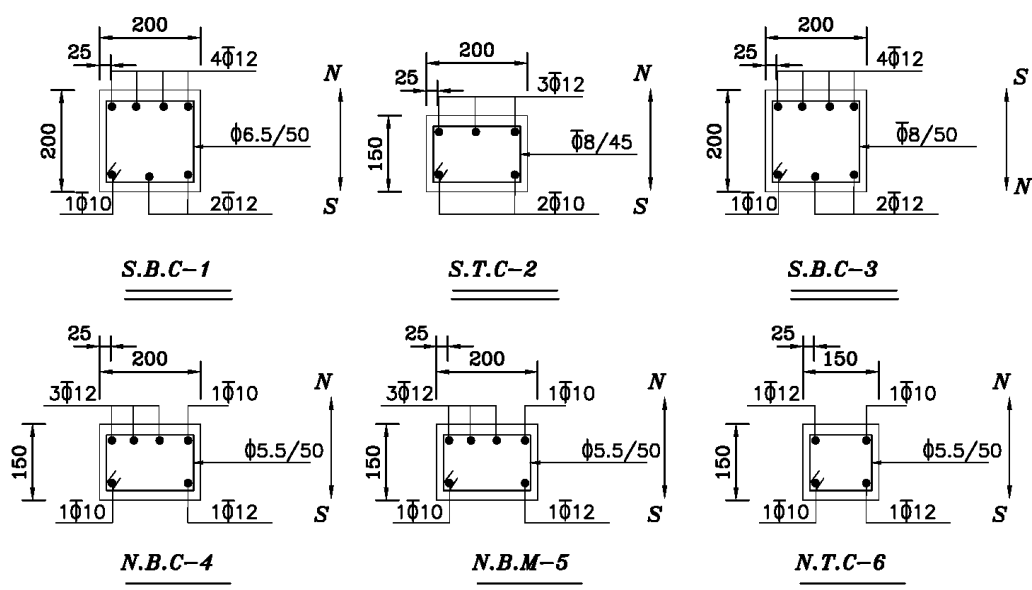
## ۱- مقدمه

مراجع [۱ و ۲] اشاره‌ای به معیار دوران پلاستیک در اعضاء سازه می‌کنند و از آنجایی که این دو مرجع با تاکید بر روی سازه‌های موجود و قدیمی ارائه شده‌اند استفاده از مقادیر ارائه شده در سازه‌های با طراحیهای نو، با تردید مواجه است. از طرفی معیارهای مفید دیگری همانند تغییر شکل نسبی، شکل پذیری و شاخص خسارت می‌توانند جایگزین مناسب و یا مکمل دوران پلاستیک در طراحی عملکردی باشند. از این رو برای بررسی پارامترهای مذکور در شرایط محلی ایران (محدودیت‌های هندسی دهانه‌ها، مشخصات ابعادی، مشخصات مصالح و روش اجرا)، یک برنامه تحقیقاتی در آزمایشگاه سازه دانشکده فنی، دانشگاه تهران، به اجرا درآمده است. در این مطالعه، تعداد شش نمونه تیر بتنی، از ساختمانهای متعارف با قاب خمشی سه تا پنج طبقه، با مشخصاتی شبیه میانگین مشخصات ساختمانها در تهران، تحت بارگذاری رفت و برگشتی و یک طرفه، آزمایش شده است. برپایه نتایج به دست آمده، معیارهایی همچون دوران پلاستیک، شاخص خسارت، شکل پذیری، کرنش در

بعد از وقوع زلزله‌های مخرب در دهه‌های اخیر و تحمیل خسارتهای سنگین مالی و جانی، لزوم بازنگری در سطح عملکردی ساختمانها آشکار شده، و ایده طراحی بر مبنای عملکرد مورد توجه قرار گرفته است. طی سالیان گذشته، روش عملکردی در طراحی لرزه‌ای گسترش چشمگیری یافته و مبنای و معیارهای آن در مراجع مختلف [۱-۳] ارائه شده است. به دلیل نوپا بودن ایده، روشها و معیارهای مطرح شده به حد کافی کامل نشده و مطالعات و آزمون بیشتری را طلب می‌کند. در دنیا آزمایشات زیادی بر روی اعضاء، اتصالات (گره‌ها) و نیز سیستمهای سازه‌ای انجام گرفته است لیکن آزمایشات هدفمند برای تعیین معیارهای عملکردی اجزا و یا سازه بسیار ناچیز است [۴]. بسیاری از محققان بر این عقیده‌اند لازم است دستورالعمل جدید برای آزمایشات با هدف تعیین معیارهای طراحی تهیه شود و با انجام آزمایشات مشخص، معیارهای طراحی عملکردی کامل شود [۵]. در حال حاضر تنها



شکل ۱- مشخصات مقطع و فولادگذاری اعضا در زیر سازه اصلی (واحدها به mm است)



شکل ۲- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی (واحدها بر حسب mm است)

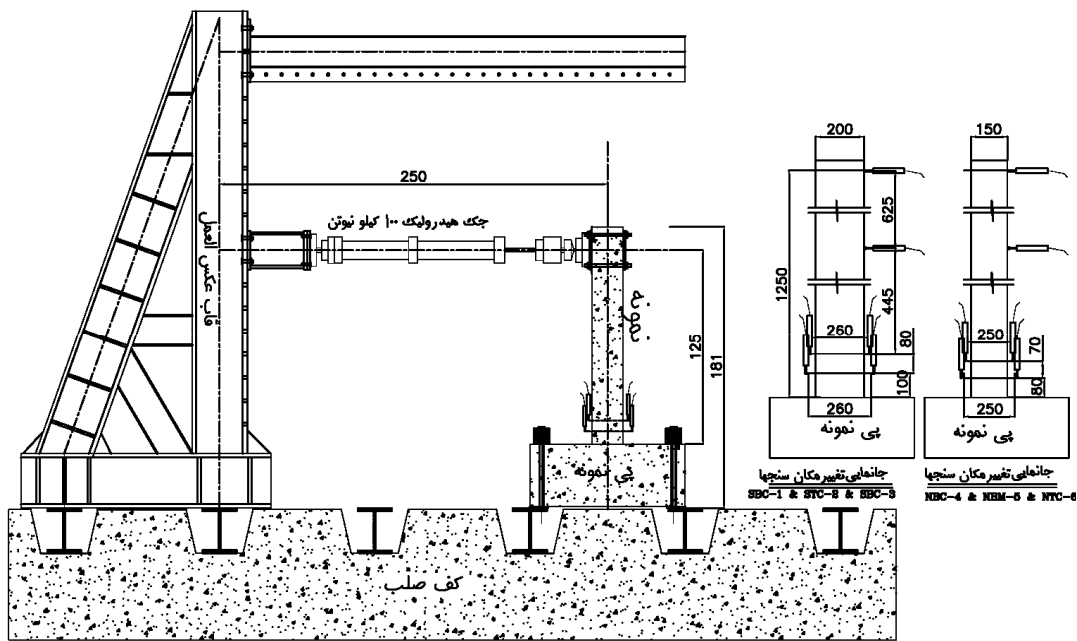
طولی و عرضی آنها در شکل (۲) ارائه شده است. جدول (۱) بیانگر خواص مصالح به کاررفته در نمونه‌ها است. ابزار بندی<sup>۱</sup> آزمایش در شکل (۳) نمایش داده شده است. جک هیدرولیک<sup>۲</sup> ۱۰۰ کیلونیوتن برای اعمال بارگذاری رفت و برگشتی<sup>۳</sup> و یکطرفه به انتهای آزاد تیرها متصل است. سلول بار جک هیدرولیک، نیروی افقی را اندازه‌گیری می‌کند. در هر آزمایش تعدادی کرنش‌سنج و تغییرمکان‌سنج<sup>۴</sup> استفاده شده است. آرایش کرنش‌سنجها به گونه‌ای بوده که بتوان ناحیه پلاستیک مورد انتظار در انتهای عضو را اندازه‌گیری کرد. بارگذاری رفت و برگشتی، به شیوه نیمه استاتیک<sup>۵</sup> و در مود کنترل تغییرمکان<sup>۶</sup> با نسبت کم<sup>۷</sup>، بر روی تمامی نمونه‌ها اعمال

بتن و فولاد و نیز طول ناحیه پلاستیک در مراحل مختلف بارگذاری تعیین شده است. معیارهای به دست آمده قابل استفاده در روش عملکردی است.

## ۲- برنامه آزمایش

مجموعاً شش تیر بتنی که معرف خصوصیات متوسط تیرها در طبقات پایین (طبقه دوم) و طبقات بالا (طبقه چهارم) است، انتخاب شده است. مشخصات مقطع و فولادگذاری اعضا در شکل (۱) نشان داده شده است.

نمونه‌های آزمایشگاهی به مقیاس ابعادی ۱:۲ ساخته شده است. نمونه‌های مقیاس شده و نیز مشخصات آرماتورگذاری



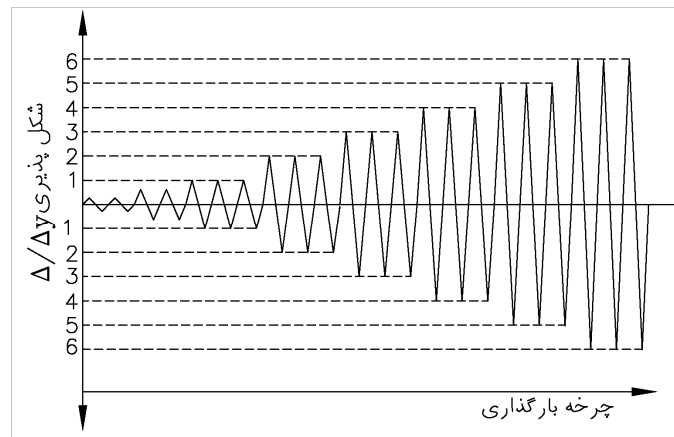
شکل ۳- نمائی از ابزار بندی آزمایش و نحوه بارگذاری

جدول ۱- مشخصات مصالح در نمونه‌های آزمایشگاهی

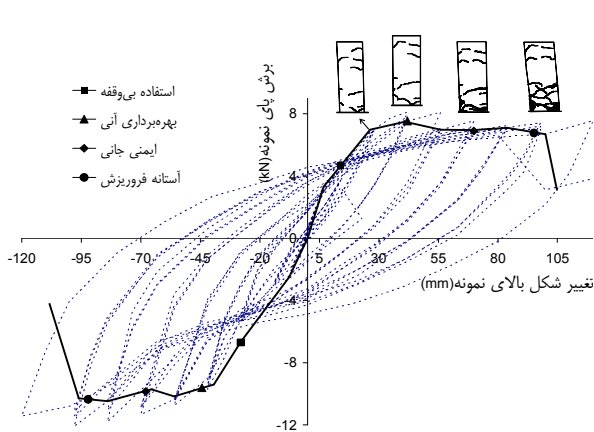
بتن	آرماتور طولی					آرماتور عرضی				نمونه	شماره
	تنش جاری شدن MPa	کرنش جاری شدن	مدول الاستیسیته GPa	تنش نهایی MPa	کرنش نهایی	تنش جاری شدن MPa	کرنش جاری شدن	تنش نهایی MPa	کرنش نهایی		
۲۶	۴۱۲	۰/۰۰۲	۲۰۵	۶۱۲	۰/۱۸	۲۲۰	۰/۰۰۱۲	۳۷۵	۰/۳۵	SBC-1	۱
۲۴	۴۱۲	۰/۰۰۲	۲۰۳	۶۱۲	۰/۱۸	۴۴۵	۰/۰۰۲۱	۶۶۵	۰/۱۵	STC-2	۲
۲۳/۲	۴۱۲	۰/۰۰۲	۲۰۴	۶۱۲	۰/۱۸	۴۴۵	۰/۰۰۲۱	۶۶۵	۰/۱۵	SBC-3	۳
۱۴/۶	۴۱۲	۰/۰۰۲	۲۰۸	۶۱۲	۰/۱۸	۲۲۰	۰/۰۰۱۲	۳۷۵	۰/۳۵	NBC-4	۴
۱۴/۶	۴۱۲	۰/۰۰۲	۲۰۱	۶۱۲	۰/۱۸	۲۲۰	۰/۰۰۱۲	۳۷۵	۰/۳۵	NBM-5	۵
۱۵/۲	۴۱۲	۰/۰۰۲	۲۰۵	۶۱۲	۰/۱۸	۲۲۰	۰/۰۰۱۲	۳۷۵	۰/۳۵	NTC-6	۶

ارزیابی شود. بارگذاری در چرخه های سه تایی بادامنه افزایش یابنده برابر با ضرایبی از  $\Delta y$  انجام شده است. مقدار  $\Delta y$  با استفاده از مشخصات مقطع ترک خورده و نیز مدلسازی اجزای محدود محاسبه شده است و سپس در حین آزمایش به دقت تعیین شده است.

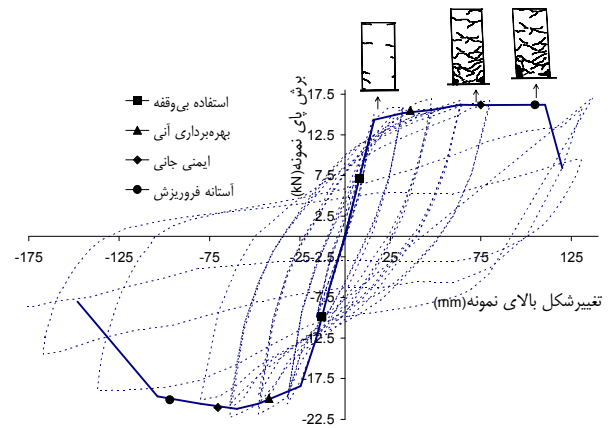
شده است و تنها نمونه NBM-5 تحت بارگذاری یکطرفه آزمایش شده است. رویه بارگذاری رفت و برگشتی در شکل (۴) ارائه شده است. این رویه اجازه خواهد داد تا پارامترهای اساسی مانند افت مقاومت تناوبی<sup>۹</sup>، کاهش سختی<sup>۹</sup>، شکل پذیری، پتانسیل زایل نمودن انرژی<sup>۱۰</sup> و نوع گسیختگی<sup>۱۱</sup>



شکل ۴- رویه بارگذاری رفت و برگشتی



شکل ۶- ترازهای عملکردی برای نمونه STC-2



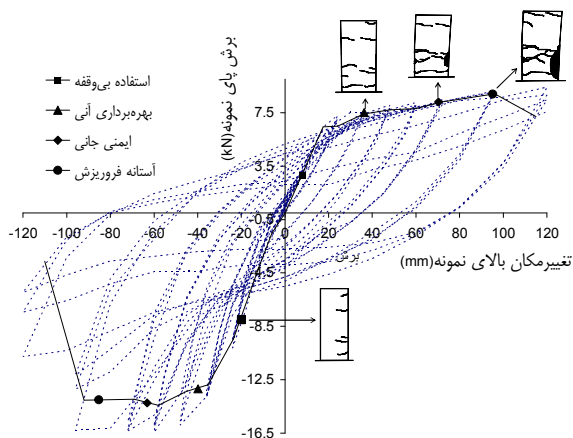
شکل ۵- ترازهای عملکردی برای نمونه SBC-1

### ۴- ترازهای عملکردی و معیارهای متناسب با آن

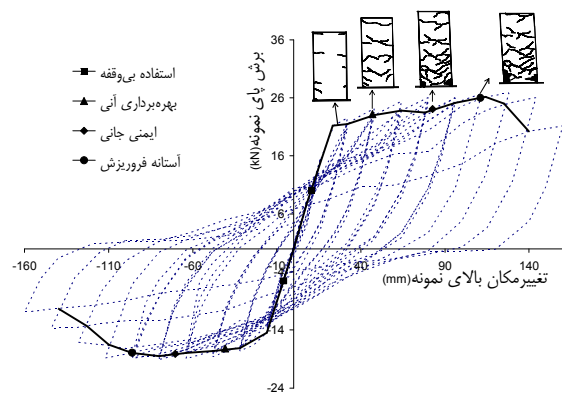
در دهه اخیر مراجع مختلف [۱-۳] ترازهای عملکردی متفاوتی را در روش طراحی عملکردی ارائه کرده‌اند. سه سطح عملکردی بهره‌برداری آنی<sup>۱۵</sup>، ایمنی جانی<sup>۱۶</sup>، و آستانه فروریزش<sup>۱۷</sup> از جمله اصلیت‌ترین این سطوح‌اند. سطح عملکردی استفاده بی‌وقفه<sup>۱۸</sup> نیز به عنوان سطح عملکردی بهره‌برداری کامل قبل از تراز بهره‌برداری آنی تعریف می‌شود. 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 در فوق، می‌توان شاخصهای کیفی و کمی سه تراز اصلی عملکردی را به شرح زیر توصیف کرد:

### ۳- نتایج آزمایش

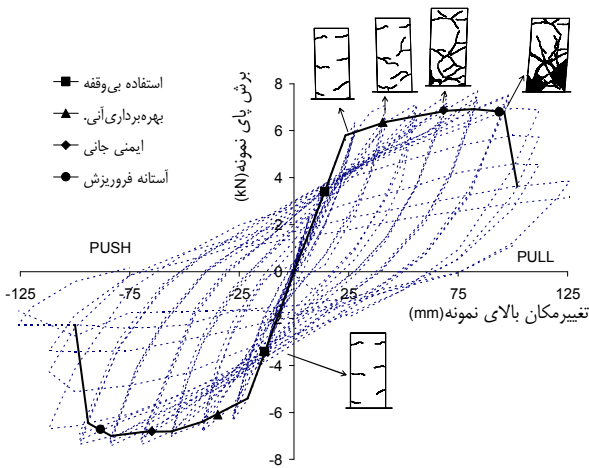
رفتار بار- تغییر مکان جانبی، که در انتهای آزاد نمونه‌ها ثبت شده، به عنوان مشخصه اصلی پاسخ اعضا، در شکل‌های (۵) تا (۱۰) ارائه شده است. در این اشکال روند گسترش خسارت و نیز پوش مقاومت رفت و برگشتی<sup>۱۲</sup> مشخص شده است. شکل (۹) رفتار نمونه NBM-5 را تحت بارگذاری یکطرفه نمایش می‌دهد. منحنی پوش با استفاده از تقاطع اولین سیکل سه تایی از n امین سیکل بارگذاری بادومین سیکل از n-1 امین سیکل بارگذاری قبلی ترسیم شده است [۲]. هدف از ارائه این شکلها، بررسی معیارهای طراحی<sup>۱۳</sup> در ترازهای مختلف عملکردی<sup>۱۴</sup> است.



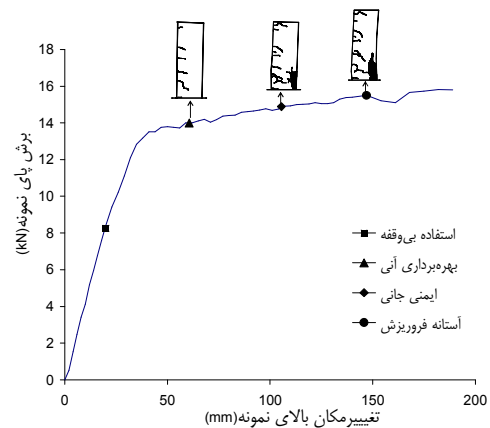
شکل ۸- ترازهای عملکردی برای نمونه NBC-4



شکل ۷- ترازهای عملکردی برای نمونه SBC-3



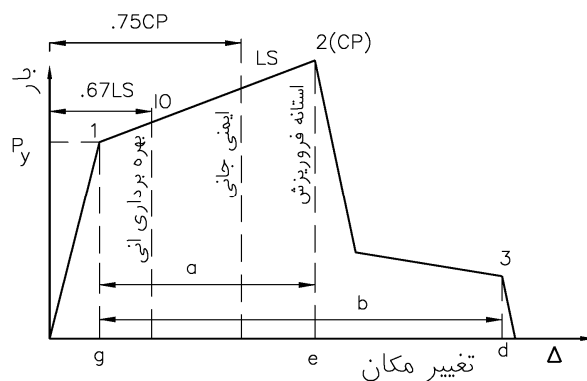
شکل ۱۰- ترازهای عملکردی برای نمونه NTC-6



شکل ۹- ترازهای عملکردی برای نمونه NBM-5

در تراز عملکرد 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. تغییر شکل نسبی ماندگار در سازه وجود خواهد داشت و در اعضا به خصوص تیرها، خسارت زیادی به وجود خواهد آمد. قله کن شدن پوشش بتن روی آرماتورها، و نیز ایجاد ترکهای برشی کوچکتر از ۳/۵ میلی‌متر، از مشخصات این سطح عملکردی است. دامنه پاسخ سازه متناظر با این سطح،

از نظر کیفی، بهره‌برداری بدون وقفه، IO، لازم می‌دارد که خسارت به حدی باشد که ایمنی سازه محفوظ بماند، و مقاومت و سختی آن، ضرورتاً، به اندازه قبل از زلزله باقی بماند. از نظر کمی، می‌بایست خسارت وارد بر سازه بسیار سبک بوده، و میزان تغییر شکلهای نسبی ماندگار ناچیز باشد. در این تراز، بیشترین کرنش در بتن (پوشش آرماتور) بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۴ بوده، و نیز کرنش در فولاد به ۰/۰۱ محدود می‌شود [۲۱]. خسارت ماندگار در سطح عضو مشهود خواهد بود و در منحنی پاسخ سازه، این تراز تا ۶۷ درصد تراز ایمنی جانی، LS، می‌تواند قرار بگیرد [۲]، شکل (۱۱).



شکل ۱۱- نقاط عملکردی بر روی منحنی ایدئال شده [۲۰۱]

جدول ۲- تغییر شکل نسبی جانبی (درصد) در ترازهای مختلف عملکردی

تغییر شکل نسبی ماندگار	متوسط نمونه ها	NTC-6	NBC-4	SBC-3	STC-2	SBC-1	نمونه / تراز
۱/۲	۳/۲	۳/۰	۳/۰	۳/۵	۳/۴	۳/۰	بهره برداری آبی
۳/۶	۵/۶	۵/۳	۵/۳	۶/۱	۵/۵	۵/۸	ایمنی جانبی
۵/۴	۷/۵	۷/۳	۷/۲	۷/۸	۷/۴	۸/۰	آستانه فروریزش

عملکردی است. این معیار برای کنترل رفتار سازه و تعیین میزان خسارت وارد بر آن کاربرد وسیع دارد. میزان تغییر شکل نسبی اندازه گیری شده برای شش نمونه تیر در جدول (۲) ارائه شده است.

در جدول (۲)، مقدار تغییر شکل ماندگار نیز ارائه شده است. تغییر شکل ماندگار به عنوان عامل موثر در میزان خسارت وارد به اعضا و نیز شاخصی از تعمیر پذیر بودن تلقی می شود. تغییر شکلهای ماندگار بر اساس معادله زیر قابل تعیین است [۶].

$$D_r = (\mu - 1) \times (1 - r) \times D \quad (1)$$

که در آن  $D$  تغییر شکل نسبی،  $\mu$  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. با پردازش مقادیر آزمایشگاهی، میزان تغییر شکل ماندگار در ترازهای عملکردی IO، LS و CP به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۳/۶ و ۵/۴ درصد با انحراف از معیار ۰/۴ و ۰/۸ و ۱ درصد، ارزیابی می شود. بعضی از مراجع مقدار تغییر شکل ماندگار با امکان ترمیم در ستونها را ۱/۶۷ درصد در نظر گرفته اند لیکن مطالعات

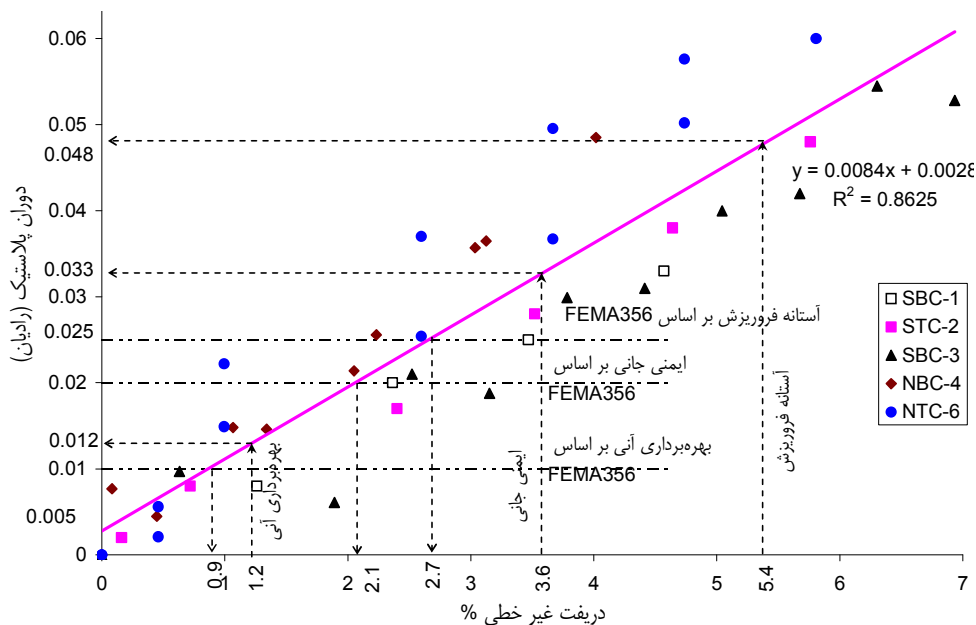
حداکثر تا ۷۵ درصد سطح عملکردی آستانه فروریزش خواهد بود [۲۰۱]، شکل (۱۱)

در تراز عملکردی آستانه فروریزش، CP، سازه دچار خسارت وسیع می شود، به گونه ای که در این حالت تنها امکان تحمل بارهای ثقیلی را داراست و دچار فروریزش نخواهد شد. در این حالت، کاهش شدیدی در میزان سختی و مقاومت سازه به وجود می آید، و تغییر شکلهای نسبی ماندگار زیادی در سازه وجود خواهد داشت و سازه در آستانه فروریزش قرار دارد. ترکها در اجزای سازه ای بسیار توسعه پیدا کرده اند، و در نقاط بحرانی مفصل پلاستیک ایجاد شده است [۲۰۱].

با در نظر گرفتن توصیفهای کمی و کیفی ارائه شده در مراجع مورد اشاره و نیز در نظر گرفتن شدت خسارت، پهنای گسترش ترکها، همچنین با قضاوت مهندسی، نقاط عملکردی در نمونه های آزمایشگاهی ارائه شده اند، شکلهای (۵) تا (۱۰).

#### ۴-۱- معیار تغییر شکل نسبی جانبی

تغییر شکل نسبی جانبی یکی از معیارهای مهم در طراحی



شکل ۱۲ - مقادیر متوسط دوران پلاستیک در برابر تغییر شکل ماندگار و مقایسه آن با حدود ارائه شده در مراجع [۲۰۱]

در طول ناحیه اندازه گیری است، زیرا که مقدار چرخش تنها در دو تراز از این ناحیه اندازه گیری شده است. با برآزش منحنی، رابطه‌ای خطی بین دوران پلاستیک با جابه جایی جانبی ماندگار به دست می‌آید، که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۲)، مقادیر دوران پلاستیک بر روی متوسط داده‌ها در سه تراز IO، LS و CP، به ترتیب، ۰/۰۳۳، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۴۸ رادیان به دست می‌آید.

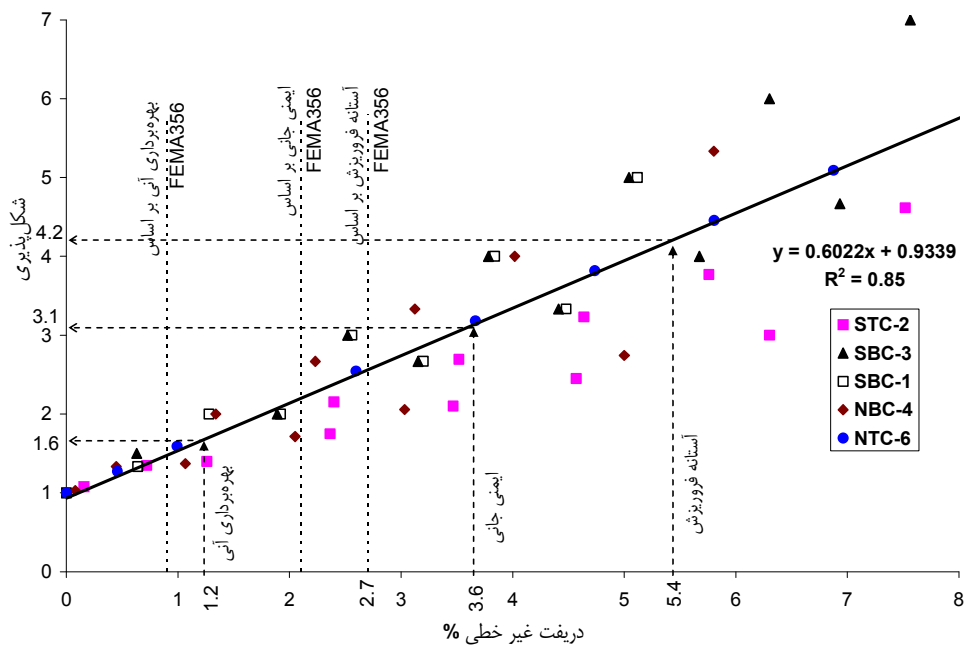
برای مقایسه، حدود قابل پذیرش مشخص شده در مراجع [۲۰۱] نیز در شکل (۱۲) ارائه شده است. براساس دسته‌بندی ارائه شده در مراجع مذکور، حدهای پذیرش دوران پلاستیک، برای تیرهایی با مشخصات مورد آزمایش، در ترازهای بهره‌برداری آبی، ایمنی جانی، و آستانه فروریزش، به ترتیب برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ رادیان است. از مقایسه این مقادیر با نتایج آزمایش، یعنی ۰/۰۳۳، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۱۲ رادیان، می‌توان دریافت که نتایج آزمایش، به ترتیب، ۲۰، ۶۵ و ۹۲ درصد از مقادیر پیشنهادی در مراجع [۲۰۱] بیشتر است. به عبارت دیگر توصیه‌های مراجع مذکور، به ویژه برای دو حد ایمنی جانی و آستانه فروریزش، بسیار محافظه کارانه به نظر می‌رسد.

انجام گرفته در مرجع [۶] این مقدار را ۲/۴ درصد در ستونها اعلام می‌کند. در مطالعات حاضر، با توجه به شدت تخریب بتن و میزان نفوذ خرابی به هسته عضو، و کماتش میلگردهای طولی، عددی بین ۲/۸ تا ۳/۲ درصد به عنوان تغییرشکل ماندگار، با امکان ترمیم، برآورد شده است. این مقدار معادل ۸۰ درصد مقدار به دست آمده برای تراز ایمنی جانی است. بدین ترتیب، براساس آزمایشهای انجام یافته، تغییرشکل نسبی ماندگار معادل ۲/۸ درصد را به عنوان حد ترمیم‌پذیری می‌توان پیشنهاد کرد. در مقایسه، توصیه مرجع [۶] به نتایج به دست آمده نزدیک است.

#### ۲-۴- معیار دوران پلاستیک

دورانهای پلاستیک عامل اصلی ایجاد تغییرشکلهای جانبی ماندگار است. دوران پلاستیک در نمونه‌های آزمایشگاهی، با تعبیه تعدادی LVDT در ناحیه مفصل پلاستیک، اندازه‌گیری شده است. شکل (۱۲) دورانهای پلاستیک مربوط به نمونه‌های مختلف را در مراحل مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر به دست آمده، در واقع، مبین متوسط دوران





شکل ۱۳- مقادیر متوسط شکل پذیری در ترازهای مختلف و مقایسه با مراجع [۲۰۱]

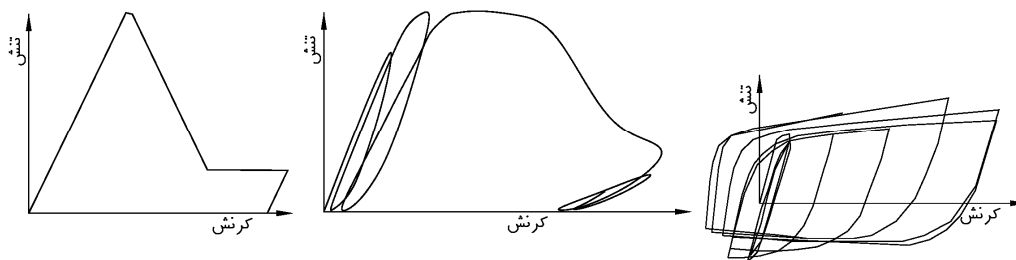
### ۳-۴ - معیار شکل پذیری

از عوامل اساسی مؤثر بر رفتار غیر خطی اعضا سازه‌ای، شکل پذیری است. شکل پذیری نقش مهمی در کاهش نیروی معادل استاتیکی 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 دیده می‌شود، متوسط نتایج با تقریب خطی نسبتاً خوبی قابل بیان است. برپایه این شکل، میزان شکل پذیری متناظر با ترازهای عملکردی بهره برداری آبی، ایمنی جانی، و آستانه فروریزش، به ترتیب، برابر ۱/۶، ۳/۱، و ۴/۲ است. در این خصوص مراجع [۲۰۱] 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 به ترتیب ۴۱، ۶۴ و ۹ درصد از توصیه‌های معادل در این مراجع بیشتر

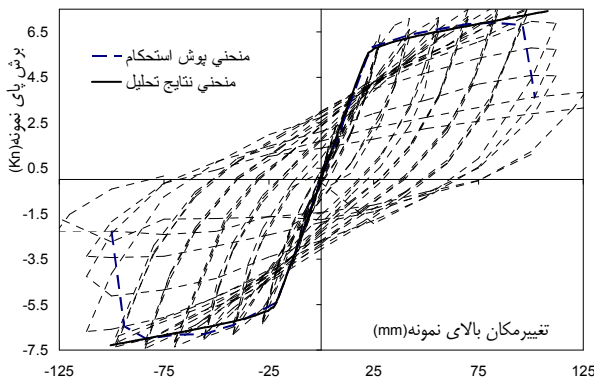
است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که توصیه‌های مراجع مذکور، در مقایسه با نتایج به دست آمده، در حد قابل توجه، محافظه کارانه است.

### ۴-۴ - کرنش در پوسته بتن و آرماتور طولی

با افزایش کرنش در پوسته بتن و پوسته شدن و قلوه کن شدن آن، روند تخریب شدت یافته و سختی جانبی عضو کاهش می‌یابد. آزمایشهای یکطرفه و رفت و برگشتی بر روی نمونه‌های NBC-4 و NBM-5 و نیز مطالعات انجام شده در مراجع مختلف [۶] نشان می‌دهد که مقدار کرنش، در لحظه شروع پوسته شدن نمونه‌ها، به تاریخچه تغییر مکان بستگی چندانی ندارد. بنابراین یک شاخص خسارت غیر تجمعی از کرنشهای بتن، برای تعیین شروع پوسته شدن کافی است. در این مطالعه، برای ارتباط دادن بین خسارت فیزیکی و پاسخهای مشخص، از مدلسازی عددی استفاده شده است. در این مدلسازی، رفتار نمونه تیرها با استفاده از مدل اجزای رشته‌ای<sup>۱۹</sup> مبتنی بر اجزای محدود [۷] شبیه‌سازی می‌شود [۸]. در این شبیه‌سازی اثر محصور شدگی توسط خاموتها و کمانش میلگردها

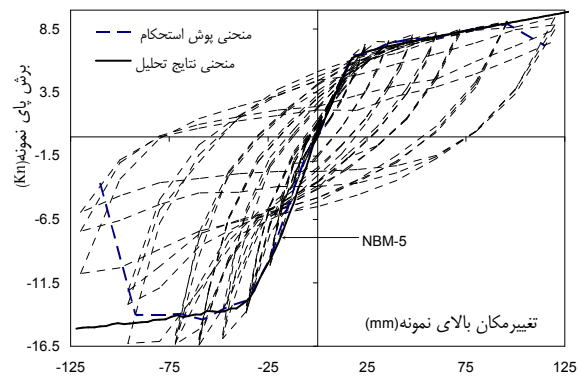


شکل ۱۴- رفتار مصالح در مدل تحلیلی، به ترتیب از چپ به راست، رفتار پوسته بتنی، هسته بتنی، و آرماتور



شکل ۱۶- منحنیهای تحلیلی و آزمایشگاهی

نمونه NTC-6



شکل ۱۵- منحنیهای تحلیلی و آزمایشگاهی

نمونه های NBC-4 و NBM-5

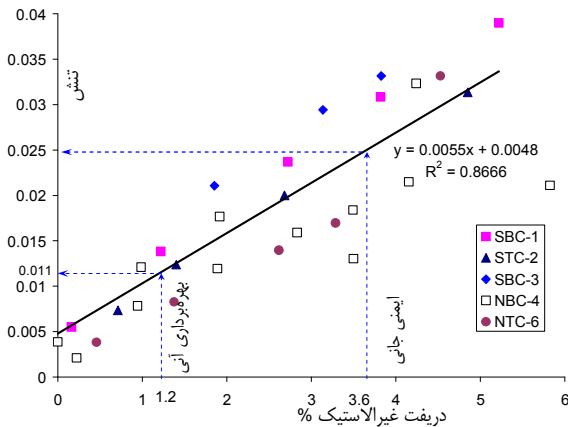
طور متوسط در روی طول ناحیه پلاستیک مورد انتظار در هر دامنه بارگذاری در دو وجه نمونه اندازه گیری شده است. کرنش در آرماتور طولی نیز به طور متوسط در ناحیه پلاستیک مورد انتظار در هر دامنه بارگذاری در دو وجه نمونه اندازه گیری شده است. شکل (۱۷) نشان دهنده مقادیر کرنشها در ترازهای عملکردی مختلف در پوسته بتن است. شکل (۱۸) نیز میزان کرنشها را در آرماتورهای طولی کششی بیان می کند. به طوری که دیده می شود، نتایج آزمون با تقریب مناسب به رابطه خطی نزدیک است. بدین ترتیب، یک رابطه پیوسته برای مقدار کرنش در تمامی طول بارگذاری قابل تعریف خواهد بود.

به طوری که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، مقدار کرنش در پوسته بتن در تراز بهره برداری آبی برابر  $0/0058$  است. این مقدار  $40$  درصد بیش از مقادیر ارائه شده در منابع مختلف برای این پارامتر ( $0/003$  تا  $0/004$ ) است [۲۰ و ۱۰]. از طرفی کرنش در پوسته بتن در زمان پوسته شدن معادل  $0/008$  برآورد شده است

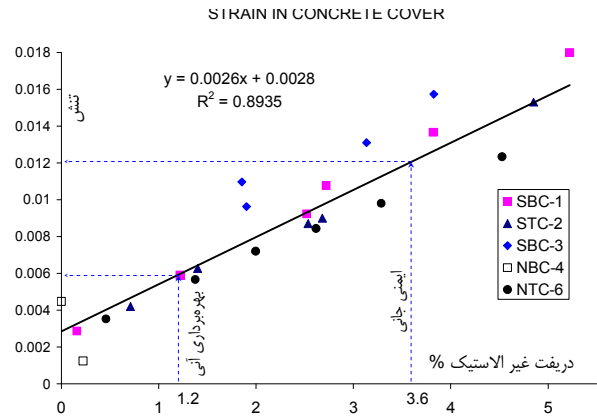
نیز مدل شده است [۹]. شکل (۱۴) مدل رفتار پوسته، هسته و آرماتور طولی را نشان می دهد.

تمامی نمونه ها تحلیل بارگذاری غیر خطی یکطرفه  $2^0$  شده و با نتایج آزمایش کالیبره شده اند. در این تحلیل غیرخطی شدن مصالح در مقطع و در طول عضو و نیز غیرخطی شدن به دلیل تغییرشکل های بزرگ در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از نتایج شبیه سازی عددی، مقادیر متوسط کرنشها در ترازهای مختلف عملکردی استخراج شده اند. شکل های (۱۵) و (۱۶)، به عنوان نمونه، انطباق نتایج آزمایش را با منحنی نظری نشان می دهد.

شکل های (۱۵) و (۱۶) انطباق مناسبی را بین مدل سازی عددی با نتایج آزمایش نشان می دهد. با استفاده از نتایج تحلیل، و با توجه به خسارت های فیزیکی متناسب، کرنشها در دورترین تار پوسته بتن، و نیز کرنش در آرماتورهای کششی در ناحیه انتهایی اعضا، تعیین شده است. مقادیر کرنش فشاری در پوسته بتن به



شکل ۱۸- مقادیر متوسط کرنش در آرماتورهای طولی در ترازهای مختلف عملکردی



شکل ۱۷- متوسط کرنش در پوسته بتن در ترازهای مختلف عملکردی

پتانسیل گسیختگی سازه وجود خواهد داشت. سایر ترازهای عملکردی نظیر بهره برداری آنی، ایمنی جانی، و آستانه فروریزش در محدوده صفر و یک قرار خواهند گرفت. شاخص خسارت به طور معمول مبتنی بر پارامترهایی همچون نیرو، تغییر شکل، و میزان استهلاك انرژی خواهد بود. شاخصهای خسارت متعددی توسط محققان مختلف تعریف شده است که از جمله معروفترین آنها، که بر اساس تغییر شکل و انرژی تعریف شده است، شاخص خسارت پارک و انگ (۱۹۸۵) به شرح زیر است:

$$DI_{pa} = U_{max}/U_{mon} + \beta(E_H / (f_y U_{mon})) \quad (2)$$

که در آن

$$U_{max} = \text{ماکزیمم تغییر شکل در عضو تحت بارگذاری}$$

$$U_{mon} = \text{ماکزیمم ظرفیت تغییر شکل در بارگذاری یکطرفه}$$

$$E_H = \text{انرژی مستهلک شده در طول بارگذاری و}$$

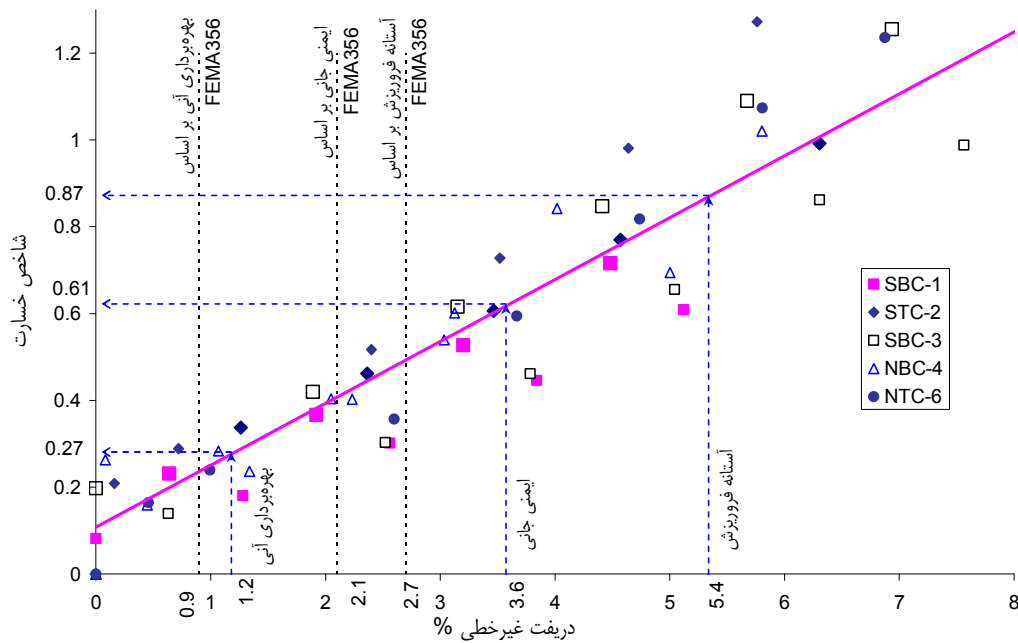
$$\beta = \text{پارامتر ثابت}$$

در آزمایشهای انجام گرفته، میزان خسارت وارد بر هر نمونه در تغییر شکلهای مختلف برآورد شده و سپس خسارت با استفاده از معادله (۲) بین دو مقدار حدی ۰ و ۱ مقیاس شده است. برای این منظور، پارامتر  $\beta$  در نمونه های مختلف تغییر داده شده است تا خسارت فیزیکی مشاهده شده کالیبره شود. شکل (۱۹) نتایج به دست آمده برای پارامتر شاخص خسارت را

که با مقادیر ارایه شده در مراجع مختلف [۶] مطابقت خوبی دارد. این مراجع میزان کرنش در زمان پوسته شدن را با توجه به نتایج آزمایش و نیز مدلسازی عددی برابر ۰/۰۰۹ گزارش کرده اند. با توجه به میزان جابه جایی جانبی، این حد را می توان با ایمنی جانی مترادف گرفت. برای تعیین مقدار متوسط کرنش غیر خطی در حالت فروریزش، شکل (۱۷) عددی برابر ۰/۰۱۲ را نشان می دهد. کرنش در آرماتورهای طولی، در حالت حدی بهره برداری آنی، از شکل (۱۸) مقداری برابر ۱/۱ درصد به دست می دهد، که انطباق مناسبی با مقدار (۱ درصد) ارائه شده در مراجع [۱۰ و ۲] دارد. طبق مقادیر به دست آمده از شکل (۱۸)، این مقدار برای حد ایمنی جانی برابر ۰/۰۲۵ به دست آمده است.

#### ۴-۵- شاخص خسارت<sup>۲۱</sup>

عددی کردن پتانسیل خسارت وارد بر سازه ها یکی از دغدغه های اصلی در مهندسی زلزله است. ارزیابی قابل اعتماد این پتانسیل کاربرد زیادی در طراحی و تقویت سازه ها خواهد داشت. یکی از شاخصهای مورد استفاده در این زمینه شاخص خسارت است. این شاخص در شکل ایدئال بین دو مقدار ۰ و ۱ نرمال می شود به گونه ای که در شاخص صفر انتظار هیچ گونه خسارت قابل توجه وجود ندارد، و در شاخص یک



شکل ۱۹- شاخص خسارت در ترازهای مختلف عملکردی

۰/۶۱ به دست آمده است. این مقدار از شاخص خسارت بیانگر مشکل بودن در ترمیم پذیری است و مبین حالتی است که خردشدگی و قلوه کن شدن در اعضا نسبتاً شدید بوده و خسارت به هسته بتن نیز نفوذ کرده است.

#### ۴-۶- طول ناحیه پلاستیک<sup>۲۲</sup>

طول ناحیه پلاستیک اهمیت به سزایی در مدلسازی رفتار غیرخطی اعضا در تحلیلهای لرزه‌ای مبتنی بر مدل متمرکز مفصل پلاستیک دارد. روابط متعددی بر اساس نتایج تحقیقات آزمایشگاهی برای برآورد طول ناحیه پلاستیک در انتهای اعضا پیشنهاد شده است [۱۳-۱۶] در این میان معادله (۳) انطباق بیشتری با نتایج آزمایشات داشته و مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱۷].

$$L_p = 0.08L + 0.022 f_y d_b > 0.044 f_y d_b \quad (\text{mm, MPa}) \quad (3)$$

که در آن

$L$  = طول عضو از محل ماکزیمم لنگر تا نقطه عطف

$f_y$  = تنش جاری شدن آرماتور طولی نمونه

$d_b$  = قطر آرماتور طولی نمونه

در نمونه‌های تحت آزمایش، به ازای تغییر شکلهای نسبی مختلف، ارائه کرده است. در تعیین مقادیر ارائه شده در شکل (۱۹) مقدار متوسط پارامتر ثابت  $\beta$  برابر ۰/۱۵ به دست آمده است که مطابقت خوبی با مقادیر ارائه شده توسط سایر محققان دارد [۱۱ و ۱۲].

از شکل (۱۹) مشخص می‌شود که شاخص خسارت در ترازهای بهره برداری آنی، ایمنی جانی، و آستانه فروریزش به ترتیب، برابر ۰/۲۷، ۰/۶۱، و ۰/۸۷ است. برخی محققان مقدار شاخص خسارت بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ را به عنوان خسارت پایین با ترک خوردگی کم، و شاخص خسارت بین ۰/۴ تا ۰/۵ را آستانه ترمیم ناپذیری ذکر می‌کنند [۱۱ و ۱۲]. در این آزمایشها، مقدار شاخص خسارت در تراز بهره‌برداری آنی ۰/۲۷ به دست آمده است که با میزان خسارت وارد بر نمونه‌ها انطباق مناسبی دارد. به علاوه، برابر آنچه در بند ۴-۱ ارائه شد (تغییر شکل نسبی ماندگار به عنوان شاخص ترمیم پذیری)، شاخص خسارت ۰/۵ تا ۰/۵۵ به عنوان شروع حد ترمیم ناپذیری به دست می‌آید که با مشاهدات خسارت فیزیکی نیز مطابقت دارد. در این مطالعه شاخص خسارت در تراز ایمنی جانی برابر

جدول ۳ - نسبت طول مفصل پلاستیک به مقدار معادله (۳)

متوسط نمونه‌ها	NTC-6	NBC-4	SBC-3	STC-2	نمونه تراز
۰/۴۴	۰/۳۲	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۶۲	بهره برداری آنی
۰/۸۸	۰/۶۷	۱/۱	۰/۹	۰/۹	ایمنی جانی
۱/۰۶	۰/۸۵	۱/۳۸	۱/۱	۱/۰	آستانه فروریزش

طور متوسط ۱۲٪ کمتر، و در تراز عملکردی آستانه فروریزش به طور متوسط ۶٪ بیشتر از مقادیر محاسبه شده از معادله (۳) است. بدین ترتیب، درحالت حدی ایمنی جانی مفصل پلاستیک تا ۹۰٪ شکل گرفته و غیرخطی شدن در این ناحیه کاملاً گسترش یافته است. درحالت حدی نهایی آستانه فروریزش، طول ناحیه تنها ۲۰٪ اضافه شده است، درحالی که با توجه به نتایج ارائه شده در بند ۴-۲، میزان دوران و جابه جایی جانبی پلاستیک به میزان ۵۰٪ بزرگ شده است. بنا براین استفاده از معادله (۳) در تحلیل غیرخطی، به تغییر شکلهای بزرگتر از واقعیت برای حالت حدی ایمنی جانی می‌انجامد. و در تراز آستانه فروریزش، به تغییرشکلهای کوچکتری می‌انجامد. در حالی که در تراز بهره برداری آنی لازم است نصف مقدار تعیین شده از معادله (۳) در تحلیل وارد شود.

## ۶- خلاصه و جمع بندی

برای تعیین معیارهای طراحی تیرهای بتن مسلح در ترازهای مختلف عملکردی، شش نمونه تیر تحت آزمایش بارگذاری رفت و برگشتی و یک طرفه واقع شده است. نمونه‌ها معرف تیرهای مورد استفاده در ساختمانهای سه تا پنج طبقه، با قاب خمشی و شکل پذیری متوسط، است. برخی نتایج مهم به دست آمده به شرح زیر است:

- در مورد دوران پلاستیک، حدود ارائه شده توسط FEMA356 در ترازهای عملکردی آستانه فروریزش، ایمنی جانی، و بهره برداری آنی، به ترتیب، ۲۰، ۶۵، و ۹۰ درصد کوچکتر از مقادیر متوسط آزمایشی است. و توصیه مرجع مذکور نسبتاً محافظه کارانه است.

از معادله (۳)، طول ناحیه پلاستیک برای نمونه‌های SBC - 1 , SBC - 3 , NBC - 4 برابر ۲۰۸ میلیمتر (معادل ۱/۰۵H)، و در سایر نمونه‌ها معادل ۱۹۱ میلیمتر (معادل ۱/۲۵H) به دست می‌آید. این معادله تنها یک مقدار را برای طول پلاستیک ارائه می‌کند، و تغییرات ناحیه پلاستیک را در مراحل مختلف بارگذاری در نظر نمی‌گیرد.

برای برآورد طول ناحیه پلاستیک در مراحل مختلف آزمایش از مقادیر انحنای به دست آمده توسط تغییرشکل سنجها، (LVDT) در طرفین نمونه‌ها و نیز معادله (۴) استفاده شده است. انحنای اندازه‌گیری شده به عنوان انحنای متوسط در ناحیه پلاستیک فرض شده، و مقادیر لنگر نسبت به ارتفاع وسط این ناحیه محاسبه شده است. برای تعیین مقدار جابه‌جایی جانبی غیرخطی،  $\delta_p$ ، تغییر مکان جاری شدن (اولین جاری شدن عضو از روی نمودارها) از کل تغییر شکل در منحنی بار - تغییر مکان کم شده است. سپس مقادیر متوسط انحنای جاری شدن و انحنای نهایی در معادله (۴) قرار گرفته و طول ناحیه پلاستیک،  $L_p$ ، تعیین گردیده است [۱۷]. معادله (۴) به شرح زیر است:

$$\delta_p = (\Phi_u - \Phi_y) L_p (L - L_p/2) \quad (4)$$

نتایج به دست آمده در جدول (۳) ارائه شده است.

از مقادیر جدول (۳) مشخص می‌شود که طول ناحیه پلاستیک در حالت بهره‌برداری آنی، به طور متوسط، در حدود نصف حالت حدی ایمنی جانی است. یعنی، سازه در این حالت نیز وارد فاز غیر خطی شده، اما دچار تغییر شکلهای نسبتاً بزرگ نشده است. بدین ترتیب، رفتار غیر خطی عضو در این حالت قابل توجه بوده و در هرگونه مدلسازی بایستی مورد توجه واقع شود. در تراز عملکردی ایمنی جانی طول ناحیه پلاستیک به

طول آن در تراز ایمنی جانی است و نیز اختلاف طول مفصل در ترازهای ایمنی جانی و آستانه فروریزش در حدود ۲۰٪ است.

نتایج این تحقیق براساس آزمایش شش نمونه تیر با میانگین مشخصات متداول در ساختمانهای سه تا پنج طبقه در تهران به دست آمده است. برای تعمیم نتایج، انجام مطالعات تکمیلی بر سایر انواع ساختمانها ضروری است. در عین حال، پارامترهای ارائه شده، امکان مدلسازی دقیقتر و ارزیابی واقع بینانه تری را از میزان خسارت پذیری اینگونه ساختمانها در برابر زلزله فراهم می کند. و چشم انداز مناسبی از شرایط محلی را در ارتباط با توصیه های موجود در مراجع بین المللی ارائه می دهد.

- کرنش در آرماتور طولی در تراز بهره برداری آنی (۰/۰۱۱)، انطباق خوبی با مقدار ارایه شده توسط FEMA356 دارد (۰/۰۱).
- کرنش در شروع پوسته شدن بتن ۰/۰۰۸ به دست آمده است که با گزارشهای محققان دیگر (۰/۰۰۹) هماهنگی مناسبی دارد.
- شاخص خسارت در تراز عملکردی ایمنی جانی، ۰/۶۱، بیانگر خسارت نسبتا شدید است. و چنانچه تیرها در زلزله واقعی در این تراز واقع شوند، می توان انتظار داشت که تعمیر غیر اقتصادی شود.
- طول مفصل پلاستیک در ترازهای مختلف عملکردی تغییر می کند. این طول در تراز بهره برداری آنی در حدود ۵۰٪

## واژه نامه

- |                            |                          |                          |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. set up                  | 9. stiffness degradation | 17. collapse prevention  |
| 2. actuator                | 10. energy dissipation   | 18. operational          |
| 3. reversal cyclic loading | 11. failure mode         | 19. fiber element        |
| 4. LVDT                    | 12. backbone curve       | 20. pushover             |
| 5. quasistatic             | 13. design criteria      | 21. damage Index         |
| 6. displacement control    | 14. performance level    | 22. plastic hinge length |
| 7. low rate                | 15. Immediat occupancy   |                          |
| 8. strength deterioration  | 16. life safety          |                          |

## مراجع

1. ATC-40. "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," ATC-40, Applied Technology Council, 1996b.
2. FEMA, FEMA356, "NEHRP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Federal Emergency Management Agency, 2000.
3. SEAOC Vision 2000 Committee. "Performance-Based Seismic Engineering of Buildings," Report, Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA., 1995.
4. Yael, D. Hose, and Frieder Seible, "Performance Evaluation Database for Concrete Bridge Components and Systems under Simulated Seismic Loads," PEER report, 1999/11, November 1999.
5. Kunnath, S. K., Bahy -A. El, Taylor A. W., and Stone W. C., "Cumulative Seismic Damage of Reinforced Concrete Bridge Piers," NISTIR 6075. Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology. October, 1997.
6. Lehman, D. E., and Moehle, J. P., "Performance-Based Design of Reinforced Concrete Bridge Columns," 12WCEE 2000, p.2065, 2000.
7. Antoniou, S., and Pinho, P., "SEISMOSTRUCT: A Program for Inelastic Damage Analysis of Buildings," *Civil Engineering Studies*, 2002.
8. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
9. Monti, G., and Nuti, C., "Nonlinear Cyclic Behaviour of Reinforcing Bars Including Buckling," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 12, pp. 3268-3284, 1992.
10. Priestly, MNJ., "Performance Based Seismic Design," Proceedings of the 12<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, January 31-February 4, 2000. (in CD-ROM)

11. Hindi, R. A., Sexsmith, R. G., and M.EERI, "A Proposed Damage Model for RC Bridges Columns under Cyclic Loading," *Journal of Earthquake Spectra*, Vol 17, No.2, pp. 261-289, 2001.
12. Park, Y. J., Ang, A. H. and Wen, Y. K., "Damage Limiting Aseismic Design of Building," *Earthquake Spectra*, Vol. 3, Number 1, pp.1-26, California, 1987.
13. Priestley, M. J. N and Park, R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading", *ACI Structural Journal*, 1987.
14. Chai, Y. H. , Priestley, M. J. N., and Seible, F., "Analytical Model for Steel Jacketed RC Circular Bridge Columns", *Journal. of Struc. Eng., ASCE* 120, 1994.
15. Corley, W. G., "Rational Capacity of Reinforced Concrete Beams", Bulletin D108, Skokie, Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, 1966.
16. Bayrak, O., and Sheikh, S., "Plastic Hinge Analysis," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, September 2001.
17. Paulay, T., and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New York, 1992.