

## مطالعه آزمایشگاهی شاخص‌های خرابی اتصالات تیر- ستون پل‌های بتنی راه‌آهن با فولاد مقاومت بالا تحت بار سیکلیک

حامد ارشدی، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
علی خیرالدین\*، استاد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
حسین نادرپور، دانشیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: Kheyroddin@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳

### چکیده

امروزه، استفاده از مصالح با مقاومت بالا، به دلیل ملاحظات اقتصادی و اجرایی، اهمیت فراوانی یافته و توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. استفاده از فولاد مقاومت بالا در سازه‌های بتن مسلح مزایای فراوانی همچون کاهش مصرف مصالح، زمان و هزینه‌های جانبی اجرای پروژه و بهبود کیفیت اجرا را دارد. اما از سوی دیگر، به علت تأثیرات ناشناخته و گاه نامناسب این دسته از مصالح بر رفتار سازه‌های بتنی (مانند شکل‌پذیری کلی، جذب انرژی و افزایش ترک‌خوردگی سازه‌های بتن آرمه) کاربرد آنها در سازه‌های با شکل‌پذیری ویژه با محدودیت روبرو شده است. در این مقاله، تأثیر کاربرد فولاد مقاومت بالا بر انواع شاخص‌های خرابی (برحسب تغییرمکان، انرژی و ترکیبی) در اتصالات تیر- ستون پل‌های راه‌آهن بتنی مسلح (که بر اساس ضوابط لرزه‌ای اعضای با شکل‌پذیری ویژه طراحی شده‌اند)، تحت بار سیکلیک، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد فولاد مقاومت بالا عموماً زوال نمونه‌ها را تسریع کرده و خرابی‌های سازه‌ای را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، با کاربرد میلگردهای مقاومت بالا، جذب انرژی نیز کاهش می‌یابد. اما با این حال، مشاهدات آزمایشگاهی نشان دادند که تأثیرات مضر فولاد مقاومت بالا به عنوان خاموت از تأثیر آن به عنوان میلگرد طولی کمتر است.

واژه‌های کلیدی: فولاد مقاومت بالا، پل‌های راه‌آهن با قاب صلب، شاخص خرابی، سازه بتن مسلح با شکل‌پذیری ویژه

### ۱. مقدمه

مانند پل‌ها، تونل‌ها و زیرگذرها نیز با استفاده از بتن مسلح اجرا می‌شوند. با این وجود، زمان‌بر بودن فرایند ساخت سازه‌های بتنی در قیاس با سازه‌های فلزی و ابعاد بزرگتر اعضای سازه‌ای، از جمله معایب سیستم‌های بتن مسلح می‌باشند. یکی از راه‌های مقابله با این دسته از

بتن مسلح، به علت مقاومت در برابر آتش، هزینه کم و نحوه پرداخت تدریجی هزینه‌ها، یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در ساخت سازه‌های مختلف در جهان می‌باشد. امروزه، بسیاری از زیرساخت‌های صنعت حمل و نقل

عملکرد لرزه‌ای آنها در برابر زلزله‌های شدید را از طریق تغییر ضوابط مربوط به طراحی و اجرا ارتقا دهند. برای مثال، یکی از ضوابط مهم جهت تأمین شکل‌پذیری و بهبود عملکرد لرزه‌ای، استفاده از میلگرد عرضی فراوان در نواحی محتمل تشکیل مفصل پلاستیک (مانند نقاط انتهایی تیرها و ستون‌ها) می‌باشد که سبب مشکلات اجرایی، اتلاف زمان ساخت و در نهایت هزینه‌های پروژه می‌شود. یکی از راه‌های مقابله با این مسأله، استفاده از فولاد مقاومت بالا و به تبع آن کاهش مصرف میلگرد می‌باشد (ارشدی و خیرالدین، ۲۰۱۶).

معایب، استفاده از فولاد و بتن با مقاومت بالا می‌باشد. به همین دلیل، کاربرد مصالح با مقاومت بالا در جهان مورد توجه فراوانی از سوی محققان قرار گرفته است (خیرالدین و همکاران، ۲۰۱۷). شکل ۱، یک نمونه پل با قاب بتن آرمه صلب را نشان می‌دهد. همانگونه که می‌دانیم، پل‌ها یکی از مهمترین المان‌ها در برقراری ارتباط بین نقاط مختلف بوده، که حفظ پایداری آنها در برابر زلزله‌های مخرب از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این رو، رفتار اتصالات تیر-ستون مورد توجه محققان فراوانی قرار گرفته است. به گونه‌ای که سعی کرده‌اند



شکل ۱. نمونه‌ای از پل راه‌آهن با قاب صلب

هزینه‌های بالاسری پروژه، زمان کلی ساخت پروژه و شلوغی و تراکم میلگردها، که مورد آخر در بهبود کیفیت اجرای بتن نیز نقش مهمی ایفا می‌کند (ارشدی و خیرالدین، ۲۰۱۶). در عین حال، کاربرد فولاد مقاومت بالا معایبی دارد که استفاده از آن را در سازه‌های بتن مسلح، با شکل‌پذیری ویژه در مناطق با لرزه خیزی بالا، محدود کرده است. برخی از این معایب عبارتند از:

- افزایش عرض ترک تحت بارهای سرویس و نهایی؛ مدول الاستیسیته میلگرد مقاومت بالا برابر با میلگرد با مقاومت معمولی است. بنابراین، با توجه به بالا

تعریف فولاد مقاومت بالا یک پدیده نسبی است که با گذشت زمان و پیشرفت فناوری تغییرات فراوانی کرده است. اما امروزه، عموماً فولاد با مقاومت بیشتر از  $MPa$  ۵۰۰ به عنوان فولاد مقاومت بالا در آیین‌نامه‌های ساختمانی در نظر گرفته می‌شود. کاربرد فولاد مقاومت بالا مزایای فراوانی دارد، از جمله: تقلیل هزینه‌ها از طریق کاهش مقدار مصالح، نیروی کاری که مصالح در محل ساخت استفاده می‌کند (آرما‌توربند)، زمان به‌کار بردن مصالح در ساخت، هزینه تجهیزات فرعی مانند جرتقیل‌ها یا بالابراهایی که مصالح را به محل ساخت منتقل می‌کنند،

• روش آب دادن و فرونشاندن: فرونشاندن، فرایند سرد کردن سریع فولاد است تا دمای خاصی (استیتیک) که در آن فولاد جامد دوباره کریستالیزه می‌شود. سپس، فولاد با آب یا روغن خنک می‌شود که منجر به ساخت مصالح با سختی و تردی می‌شود. لازم به ذکر است که نوعی از فولاد پرمقاومت با شکل‌پذیری ویژه در شرکت فولاد کویر کاشان (تحت عنوان فولاد A4 با مقاومت تسلیم ۵۸۰ MPa) به روش ترمیکس تولید می‌شود، که این روش شباهت بسیاری به روش آب دادن و فرونشاندن دارد. نکته دیگر آن است که در ایران و در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، صرفاً اجازه استفاده از فولاد A4 به روش ترمیکس در قاب‌های خمشی بتن آرمه با شکل‌پذیری متوسط داده شده است (ارشدی و خیرالدین، ۲۰۱۶).

مطالعات اولیه روی اعضای بتنی مسلح شده با فولاد مقاومت بالا به تحقیقات گسترده در مورد ستون‌ها توسط ریچارد و براون در سال ۱۹۳۴ بازمی‌گردد (ارشدی و خیرالدین، ۲۰۱۶). در این تحقیقات، تأثیر فولاد مقاومت بالا با مقاومت تسلیم حداکثر ۶۶۵ مگاپاسکال بررسی شده است. آنها نشان دادند که میلگردهای طولی با مقاومت تسلیم ۷۲ و ۹۶ (ksi) کاملاً تحت فشار محوری، مؤثر هستند. تدجینی و همکاران (۱۹۶۴)، نتایج آزمایش روی ستون‌هایی که با خروج از مرکزیت بارگذاری شده‌اند را منتشر کردند نتیجه گرفتند که تنش تسلیم کاملاً در مقابله با بار در میلگردهای با پله تسلیم حداکثر ksi ۹۰ مؤثر بوده است (تدجینی و همکاران، ۱۹۶۴). بعدها، یک مطالعه گسترده آزمایشگاهی در دهه ۱۹۶۰ میلادی در رابطه با اعضای بتنی مسلح شده با فولاد پرمقاومت با مقاومت تسلیم حداکثر ۸۲۸ مگاپاسکال انجام شد. این تحقیقات روی اعضای تحت بار فشاری با یا بدون خروج از مرکزیت، در جایی که میلگردهای طولی کاملاً در فشار هستند، انجام گردید. این آزمایش مقاومت خمشی، کنترل ترک خمشی، وصله‌های فشاری در ستون‌ها و خستگی را پوشش می‌داد. مقاومت‌های میلگردها بین ۵۵۰ ksi تا

رفتن سطح تنش در میلگردهای مقاومت بالا، به علت کاهش تعداد میلگردها در مقایسه با میلگردهای معمولی و مدول الاستیسیته یکسان، ترک‌های بزرگتری در اعضای بتن آرمه ایجاد کرده که قابلیت سرویس سازه را با مشکل مواجه می‌سازد.

• تهدید شکست ترد: در صورتی که بتن قبل از تسلیم فولاد خرد شود، شکست ترد رخ داده است که سبب استفاده کمتر از قابلیت میلگردها می‌شود. عموماً، برای جلوگیری از این مشکل، محدودیت‌هایی در تنش تسلیم میلگردهای فولادی در آیین‌نامه‌های مختلف ساختمانی اعمال می‌گردد.

• تأثیر نسبتاً ناشناخته فولاد مقاومت بالا بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح با شکل‌پذیری ویژه: کمبود داده‌های آزمایشگاهی در باره رفتار لرزه‌ای بتن مسلح شده با این دسته از میلگردها مانع از آن می‌شود که آیین‌نامه‌های ساختمانی از ظرفیت کامل این مصالح استفاده کنند.

• تولید فولاد مقاومت بالا با شکل‌پذیری مناسب: تولید فولاد مقاومت بالا با شکل‌پذیری مناسب مسأله مهمی است که بایستی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

امروزه، آیین‌نامه‌های ساختمانی اجازه استفاده از صرفاً روش‌های محدودی را در تولید فولاد مقاومت بالا می‌دهند، تا شکل‌پذیری میلگرد، علی‌رغم افزایش مقاومت آن، حفظ شود. برخی از این روش‌ها عبارتند از:

• عملیات سرد: عملیات سرد یا نورد سرد، یک روش قدیمی تولید فولاد پرمقاومت است که در دمای کمتر از دمای کریستالیزه شدن مجدد صورت می‌گیرد. این فرایند سبب جابجایی و حرکت در کریستال سازه می‌شود.

• روش میکروآلیازی: فولادهای با مقاومت بالاتر با اضافه کردن مقادیر کم تیتانیوم (Ti)، نوبیم (Nb) یا وانادیوم (V) به دست می‌آید.

نمونه‌های تیر مستطیل شکل با میلگردهای طولی بالا و پایین یکسان بود توسط اوتانی و همکاران (۱۹۹۶) ارائه شده است. داده‌های ۱۰۵ تیر که توسط اوتانی مشخص شده‌اند شامل منحنی‌های نیرو- تغییرشکل اندازه‌گیری شده تحت بارهای رفت و برگشتی ارائه گردیده است. اوتانی و همکاران (۱۹۹۶) همچنین به بیش از ۲۵ گزارش آزمایشگاهی اشاره کرده که بیشتر این گزارش‌ها به زبان ژاپنی و بدون هیچ ترجمه‌ای هستند. در ایالات متحده آمریکا، تأثیر فولاد MMFX (نوعی فولاد ابداعی جدید با مقاومت بالا که مقاومت مناسبی در برابر خوردگی دارد) بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن آرمه با شکل‌پذیری، مورد تحقیقات گسترده‌ای قرار گرفته است. این تحقیقات نشان دادند که اعضای بتنی مسلح با فولاد مقاومت بالا اگر درست طراحی شوند، می‌توانند به مقاومت مشابه و ویژگی‌های تغییرشکلی با اعضای مسلح فولاد معمولی برسند. در ادامه، تولایی (۲۰۱۱) به ارائه نمونه‌های جدیدتری از پاسخ رفت و برگشتی تیرهای بتنی ساخته شده از میلگردهای پر مقاومت می‌پردازد. رستریو (۲۰۰۰) نیز در تحقیقی دو ستون طره دایره‌ای را آزمایش کرد که یکی از ستون‌ها با فولاد گرید ۶۰ (ASTM 706) به عنوان فولاد عرضی و طولی و ستون دوم با فولاد گرید ۱۰۰ (ASTM 1035) به عنوان فولاد طولی و عرضی ساخته شده است. نتایج این آزمایش یک اشاره مثبت ارائه می‌دهد که فولاد مقاومت بالا می‌تواند به طور موفقیت-آمیزی برای سطح دررفت ۴٪ استفاده شود (رستریو، ۲۰۰۰). بعدها، رتنبرگ (۲۰۱۱) ستون‌های بتنی مسلح که توسط میلگردهای طولی با گرید ۱۲۰ ساخته شده بودند را آزمایش کرده و نتایج آنها را با نتایج همان ستون‌ها که با گرید ۶۰ ksi ساخته شده مقایسه می‌کند (ارشدی و خیرالدین، ۲۰۱۶). ژو و همکاران (۲۰۱۳) نیز سه سری تیر بتن مسلح با فولاد مقاومت بالا را به منظور بررسی عرض ترک و تغییرشکل‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها دو فرمول ساده‌سازی شده بر اساس نتایج

ksi ۱۲۰ بودند. در همان زمان، توماس و سوزن (۱۹۶۵) نتایج آزمایش‌های تیرهای مسلح با فولادهای پیش‌تندگی با مقاومت تسلیم ksi ۲۳۰ را منتشر کردند. نتایج این آزمایش‌های اولیه در ACI 318 ویرایش سال ۱۹۷۱ در نظر گرفته شد. در حالی که حد بالایی مقاومت تسلیم در آن زمان به ksi ۸۰ افزایش داده شد. اما در انجمن آمریکایی مصالح و آزمایش هیچ مشخصاتی برای فولادهای با مقاومت تسلیم بیش از ksi ۷۵ وجود نداشت. با این وجود، حد بالای مقاومت تسلیم فولادهای طولی در قاب‌ها و دیوارهای برشی ksi ۶۰ در نظر گرفته می‌شد. آزمایش‌های اولیه المان‌ها با فولاد مقاومت بالا شامل آزمایش‌های بار رفت و برگشتی نبود. آزمایش‌های بار رفت و برگشتی ابتدا در دهه ۱۹۶۰ توسط برنز و سیس (۱۹۶۲) انجام شد تا به مطالعه عملکرد و پاسخ المان‌های در معرض زلزله مانند نیروها و تغییرشکل‌ها بپردازند. در اوایل دهه ۱۹۷۰، کمیته لرزه‌شناسی انجمن مهندسان سازه کالیفرنیا متوجه نیاز به فولادهای با محدودیت‌های شدیدتری بر ویژگی‌های کششی خود نسبت به آنچه در آن زمان برای قاب‌های بتنی شکل‌پذیر نیاز بود، شدند. این محدودیت‌های مقاومت کششی و تسلیم به دنبال بهبود قابلیت اطمینان رفتار تیر ضعیف-ستون قوی بودند. این روند نهایتاً ادامه یافت تا اینکه انجمن بتن آمریکا<sup>۱</sup> ویژگی‌های فولادهای پر مقاومت گرید ۸۰ ksi را که در ASTM معرفی شده بود پذیرفت. با این وجود، فولاد گرید ۸۰ به علت کمبود اطلاعات آزمایشگاهی در باره اعضای بارگذاری شده به صورت رفت و برگشتی که در آنها فولاد با گرید بیشتر از ۸۰ ksi به کار رفته است، برای استفاده در قاب‌های با شکل‌پذیری ویژه و دیوارهای برشی ویژه مجاز نشد. از سوی دیگر، در ژاپن نیز محققان ژاپنی تلاش گسترده‌ای در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی جهت مطالعه تأثیر میلگردهای عرضی و طولی شکل‌پذیر با مقاومت تسلیم مازاد بر ksi ۸۰ انجام دادند. خلاصه‌ای از این تلاش‌ها که محدود به

<sup>۱</sup>- ACI 318

بررسی قرار می‌گیرند. ارشدی (۲۰۱۶) تحقیق جامعی در رابطه با تحلیل افزایش دینامیک با یک و چند رکورد انجام داده است. همچنین، ارشدی و همکاران (۲۰۱۴) رفتار سازه‌های فولادی بهسازی شده با جداساز لرزه‌ای را با روش زمان دوام بررسی کردند.

در این مقاله، با توجه به اهمیتی که کاربرد فولاد مقاومت بالا در ساخت سازه‌های بتن آرمه (به ویژه سازه‌های مرتبط با صنعت حمل و نقل مانند پل‌ها) دارد، به بررسی آزمایشگاهی انواع شاخص‌های خرابی (بر اساس تغییر مکان، انرژی جذب شده و ترکیبی) اتصالات تیر به ستون پل‌های راه‌آهن با قاب صلب بتنی مسلح با فولاد مقاومت بالا تحت بار سیکلیک پرداخته شده است. بدین منظور، سه اتصال تیر به ستون بر اساس ضوابط لرزه‌ای مربوط به طراحی اعضای با شکل‌پذیری ویژه آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI318-14) طراحی و ساخته شدند. در این اتصالات، فولاد مقاومت بالا با مقاومت تسلیم ۵۰۰ و ۵۸۰ مگاپاسکال (فولاد A3 و A4) به عنوان میلگرد طولی و عرضی استفاده گردیدند. این اتصالات تحت بار رفت و برگشتی در انتهای خود قرار گرفته و پاسخ‌های آنها به دست آمد. سپس، بر اساس پاسخ‌های به دست آمده، شاخص‌های خرابی مختلف بر حسب تغییر مکان، انرژی جذب شده و ترکیبی برای آنها محاسبه و مقایسه گردیدند.

## ۲. مشخصات آزمایشگاهی

### ۲-۱. مشخصات بتن

بتن به کار رفته در آزمایش‌ها، بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد که با نسبت آب به سیمان ۰/۴۳ و سیمان تیپ ۲ ساخته شده است. در حین ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، سه نمونه مکعبی استاندارد نیز از بتن مورد استفاده تهیه شد و در ۲۸ روز مورد آزمایش

آزمایشگاهی و نظریات قبلی ژو ارائه کردند. مؤسسه ملی تکنولوژی و استانداردهای آمریکا یک گزارش فوق‌العاده جامع در مورد کاربرد فولاد مقاومت بالا در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله در سال ۲۰۱۵ منتشر کرد (NIST, ۲۰۱۵) که تقریباً شامل تمامی تحقیقات منتشر شده در این زمینه تا زمان انتشار گزارش می‌باشد. ارشدی و خیرالدین (۲۰۱۶) هم در ایران در مقالاتی، ملاحظات لرزه‌ای استفاده از فولاد مقاومت بالا در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و کاربرد فولاد مقاومت بالا در اعضای قاب‌های با شکل‌پذیری ویژه را مورد بررسی قرار دادند. همچنین، ژیا و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش‌هایی روی اعضای ساخته شده از بتن الیافی با عملکرد فوق‌العاده بالا و میلگرد مقاومت بالا، به منظور مطالعه تأثیر فولاد مقاومت بالا بر عملکرد اصطکاکی و مقاومت برشی انجام دادند. خیرالدین و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر کاربرد فولاد مقاومت بالا بر کرنش بتن، ترک‌خوردگی بتن، میزان مصرف میلگرد، میزان افزایش دررفت و کاهش ممان اینرسی مؤثر در قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری متوسط توسط تحلیل استاتیک و دینامیک غیرخطی پرداختند. اسپری و همکاران (۲۰۱۸ a, b, c) نیز اخیراً در مجموعه مقالاتی به طور مفصل تأثیر زاویه قلاب میلگرد، پوشش بتن، آرایش میلگردهای مهاری بر مقاومت مهاری قلاب را در صورت استفاده از میلگردهای معمولی و مقاومت بالا بررسی کردند. در نهایت، چيو و کای (۲۰۱۸) کتابی در رابطه با مثال‌های طراحی از کاربرد فولاد مقاومت بالا در ستون‌های بتنی مسلح بر اساس رویکرد یورو کد<sup>۱</sup> منتشر کردند. در رابطه با بررسی تحلیلی شاخص‌های خرابی، روش‌های متعددی مانند تحلیل افزایش دینامیک<sup>۲</sup> و زمان دوام<sup>۳</sup> وجود دارد. در این روش‌ها، سازه تحت بار افزایش دینامیک قرار گرفته و پاسخ‌های سازه تا سطح مشخصی از شاخص خرابی مورد

<sup>۱</sup>- Eurocode 4

<sup>۲</sup>- Incremental dynamic analysis (IDA)

<sup>۳</sup>- Endurance time (ET) method

جدول ۱. مشخصات طرح اختلاط بتن

مقدار	مشخصه
۴۰۰	سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۷۲	آب ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۲۰۰	شن ( $\text{kg/m}^3$ )
۸۰۰	ماسه ( $\text{kg/m}^3$ )

مقاومت فشاری قرار گرفت که میانگین مقاومت فشاری آنها ۳۰/۵۲ مگاپاسکال به دست آمد. در ضمن، در ساخت بتن از سنگدانه‌های معمولی با حداکثر اندازه ۲۵/۴ میلی- متر استفاده شد. جدول ۱، مشخصات طرح اختلاط بتن و جدول ۲، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استاندارد مکعبی را نشان می‌دهند.

جدول ۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

شماره نمونه مکعبی استاندارد ( $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ )	وزن (kg)	چگالی $\rho$ ( $\text{gr/cm}^3$ )	مقاومت فشاری $\sigma$ ( $\text{N/mm}^2$ )
۱	۷/۸۷	۲/۳۳	۲۸/۳۴
۲	۷/۷۸۴	۲/۳۱	۳۲/۷۷
۳	۷/۸۱	۲/۳۱	۳۰/۴۵
میانگین	۷/۸۲۱	۲/۳۱۶	۳۰/۵۲

## ۲-۲. مشخصات فولاد مقاومت بالا

۵۰۰ مگاپاسکال و فولاد A4 دارای مقاومت تسلیم ۵۸۰ مگاپاسکال می‌باشد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی فولادهای مذکور در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده و منحنی رفتاری این فولادها در شکل‌های ۲ و ۳ ترسیم شده است.

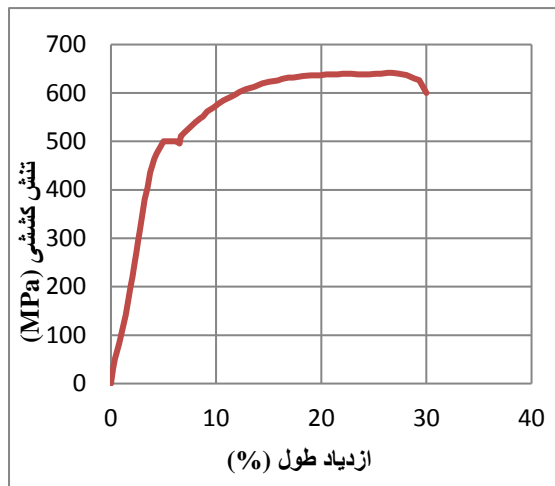
فولاد به کار رفته در این آزمایش، فولادهای A3 و A4 هستند که توسط کارخانه فولاد کویر کاشان به روش ترمیکس تولید شده‌اند. فولاد A3 دارای مقاومت تسلیم

جدول ۳. مشخصات مکانیکی و فیزیکی میلگرد A3

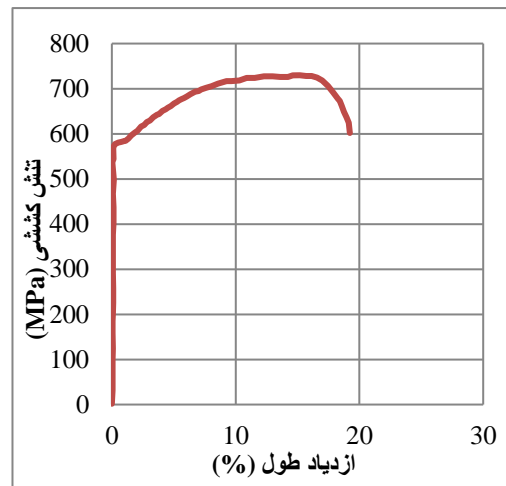
مدول (MPa)	تطویل (%)	تنش (MPa)	ازدیاد طول (mm)	نیرو (N)	
۲۶۰۱/۱	۲۴/۶۲	۶۴۰/۵۲	۴۱/۸	۲۴۳۴۸۴	نهایی
۱۹۴۱/۴۹	۳۰/۰۹	۵۸۴/۲۶	۵۱/۱	۲۲۲۰۹۸	شکست
۱۰۰۸۳/۹	۴/۹۴	۴۹۸/۸۴	۸/۴۱	۱۸۹۶۲۷	تسلیم

جدول ۴. مشخصات مکانیکی و فیزیکی میلگرد A4

مدول (MPa)	تطویل (%)	تنش (MPa)	ازدیاد طول (mm)	نیرو (N)	
۴۹۹۱/۲	۱۴/۶	۷۲۸/۹	۴۳/۸۱	۶۰۴۶۸۸	نهایی
۳۰۹۵/۴	۱۹/۲	۵۹۶/۴	۵۷/۸۰	۴۹۴۸۱۶	شکست
۲۶۰۶۱۱	۰/۱۶	۵۸۲/۹	۰/۶۷۱	۴۸۳۶۳۳	تسلیم



شکل ۳. منحنی رفتاری میلگرد A3



شکل ۲. منحنی رفتاری میلگرد A4

### ۲-۳. مدل‌های آزمایشگاهی

در این مقاله، سه اتصال تیر به ستون بتنی مسلح با هندسه و بتن با طرح اختلاط مشابه، و بر اساس ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه بتن آمریکا<sup>۱</sup> (مربوط به طراحی اعضای با شکل‌پذیری ویژه) طراحی و ساخته شدند. این اتصالات تیر-ستون می‌توانند کاربردهای متنوعی در صنعت حمل و نقل، از جمله به عنوان پایه پل، داشته باشند. در طراحی این اتصالات، فرض می‌شود که ستون کوتاه نقش فونداسیون و تکیه‌گاه برای تیر طره را داشته و با فرض تیر ضعیف-ستون قوی، ستون‌های کوتاه در طول آزمایش الاستیک باقی می‌مانند. در تمام ستون‌های کوتاه از فولاد با مقاومت تسلیم ۵۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است و فولاد با مقاومت تسلیم ۵۸۰ مگاپاسکال فقط در تیر طره به عنوان میلگرد طولی و عرضی به کار رفته است. برای این منظور، ابتدا مدل پایه که در آن صرفاً میلگرد با مقاومت ۵۰۰ مگاپاسکال به کار رفته طراحی و ساخته شده و در ادامه، سایر مدل‌ها با میلگردهای طولی

و عرضی معادل با مدل پایه طراحی و ساخته شدند. فاصله، اندازه و سایز میلگردهای طولی و عرضی معادل براساس معادلات ۱ و ۲ محاسبه گردیدند: میلگردهای طولی معادل:

$$N_1 A_s f_{y1} = N_2 A_s f_{y2} \quad (1)$$

میلگردهای عرضی معادل:

$$N_1 A_{sv} f_{y1} (d_1 / S_1) = N_2 A_{sv} f_{y2} (d_2 / S_2) \quad (2)$$

که  $N$  تعداد میلگردها،  $f_y$  تنش تسلیم،  $A_s$  سطح مقطع میلگرد طولی،  $d$  عمق مؤثر،  $A_{sv}$  سطح مقطع میلگرد عرضی و  $S$  فاصله میلگردهای عرضی می‌باشد.

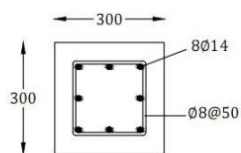
نام‌گذاری نمونه‌های مذکور به صورتی است که حرف اول  $B$  بیانگر تیر، حرف دوم  $L$  و عدد مقابل آن بیانگر میلگرد طولی و مقاومت تسلیم آن بر حسب مگاپاسکال، حرف سوم  $S$  و عدد مقابل آن بیانگر میلگرد عرضی و مقاومت تسلیم آن بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. جدول ۵، مشخصات و نام‌گذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup>- ACI318-14

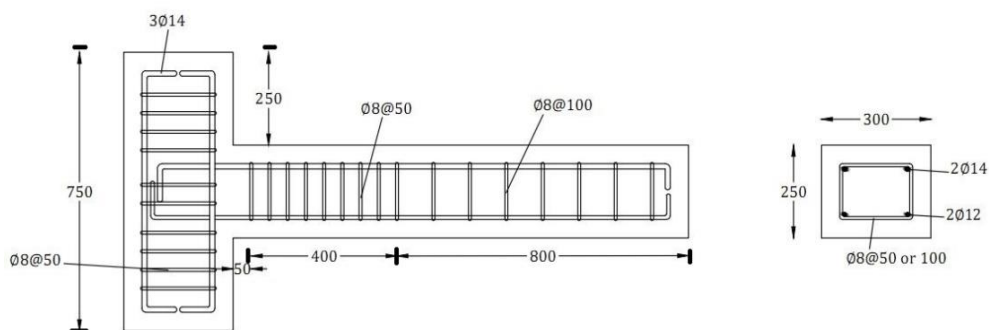
جدول ۵. نام‌گذاری و مشخصات مکانیکی مدل‌های آزمایشگاهی

مدل	مقاومت تسلیم میلگرد طولی	مقاومت تسلیم میلگرد عرضی
	$f_{yt}$ (MPa)	$f_{yt}$ (MPa)
BL500S500	۵۰۰	۵۰۰
BL500S580	۵۰۰	۵۸۰
BL580S580	۵۸۰	۵۸۰

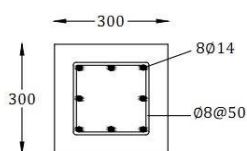
شکل‌های ۴ تا ۶، مشخصات هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که میلگردهای طولی با قلاب ۹۰ درجه در انتها و میلگردهای عرضی با قلاب ۱۳۵ درجه به کار رفتند. همچنین، در آزمایش، نمونه‌ها توسط جاکت‌های فولادی به کف صلب با بولت‌هایی متصل گردیدند.



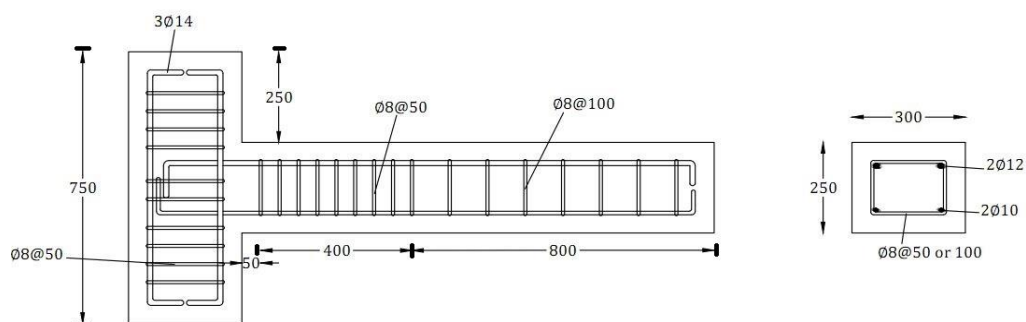
BL500S500



شکل ۴. مشخصات هندسی و آرایش میلگردگذاری مدل BL500S500

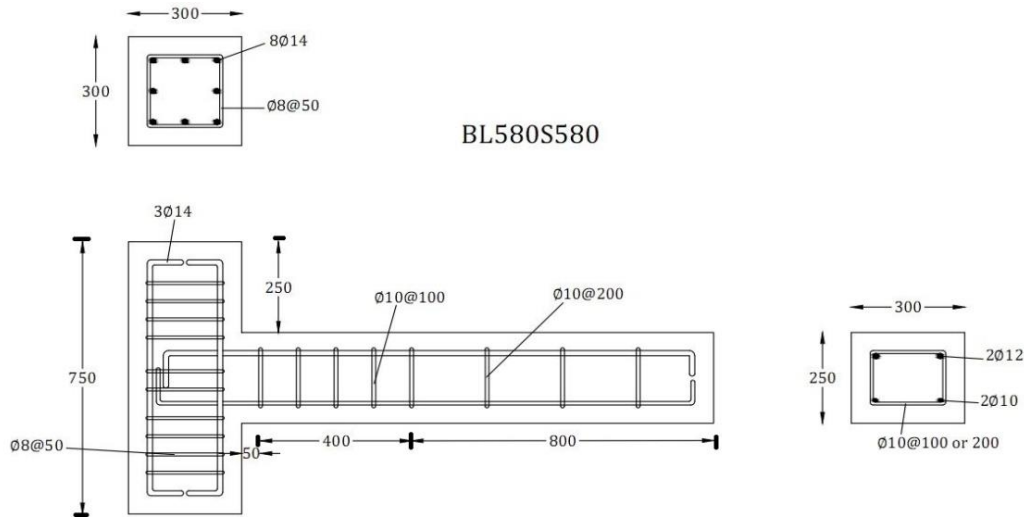


BL580S500



شکل ۵. مشخصات هندسی و آرایش میلگردگذاری مدل BL580S500





شکل ۶. مشخصات هندسی و آرایش میلگردگذاری مدل BL580S580

برگشتی و بر اساس کنترل تغییرمکان می‌باشد که در آن هر تغییرمکان (دریفت) سه بار تکرار شده تا یک سیکل تکمیل گردد. لازم به ذکر است که این بارگذاری تا زمانی که افت مقاومت نمونه‌ها معادل ۰/۸۵ حداکثر ظرفیت مجموعه در طول بارگذاری گردد ادامه می‌یابد. شکل ۹ نیز بارگذاری مذکور را که تغییرمکان کنترل می‌باشد نشان می‌دهد.

### ۳. مشاهدات آزمایشگاهی

پس از اعمال بار سیکلیک، پاسخ‌های سازه‌ای نمونه‌ها توسط ابزارهای سنجش تغییرمکان و نیرو مورد رصد و ثبت قرار گرفتند. بارگذاری تا زمانی که مفصل پلاستیک در ناحیه انتهایی تیر متصل به ستون تشکیل شود، ادامه یافته و پس از تشکیل مفصل پلاستیک و مکانیزم، بارگذاری متوقف گردید. با توجه به اینکه هدف این مقاله بررسی تأثیر فولاد مقاومت بالا بر شاخص‌های خرابی مختلف می‌باشد و اینکه گزارش مشاهدات دقیق آزمایشگاهی از جمله ظرفیت باربری، جذب انرژی و کاهش سختی در مقاله دیگری به صورت مبسوط مطرح گردیده است، بنابراین، در این مقاله، کمتر به این مباحث

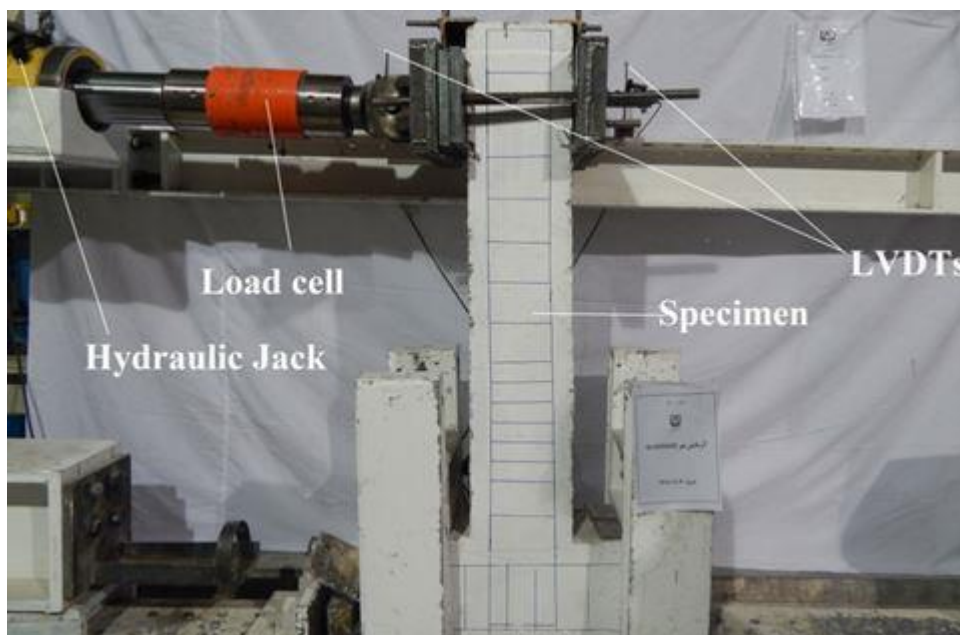
### ۴-۲. ست‌آپ آزمایشگاهی و پروتکل بارگذاری

بار جانبی رفت و برگشتی در انتهای اتصال تیر به ستون (تیر طره) توسط جک هیدرولیکی دو طرفه با ظرفیت ۲۰۰۰ KN در فشار و ۱۰۰۰ KN اعمال گردید. ظرفیت ابزار اندازه‌گیری بار<sup>۱</sup> در کشش و فشار ۱۰۰۰ KN می‌باشد. مدل‌ها به کف صلب توسط جاکت‌های فلزی در محل ستون کوتاه متصل گردیدند. جک هیدرولیکی هم از طریق یک مجموعه از ورق‌های فلزی در دو طرف تیر طره که توسط میله‌هایی با مقاومت فوق‌العاده بالا به هم متصل شده‌اند به انتهای اتصال تیر به ستون متصل و نیرو به این طریق اعمال گردید. تغییرمکان جانبی اتصالات توسط دو تغییرمکان‌سنج (LVDT) با ظرفیت ۵ سانتی‌متر در دو طرف و یک تغییرمکان‌سنج سیمی در یک طرف نمونه اندازه‌گیری می‌شود. شکل‌های ۷ و ۸ ست‌آپ به کار رفته در آزمایش را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که پروتکل بارگذاری رفت و برگشتی مدل‌های آزمایشگاهی بر اساس پروتکل پیشنهادی آیین‌نامه ACI-374 بوده که مختص اعضای بتنی مسلح به دست آمده است. این پروتکل بارگذاری (که توسط ACI-374 پیشنهاد شده است) یک بارگذاری شبه استاتیکی رفت و

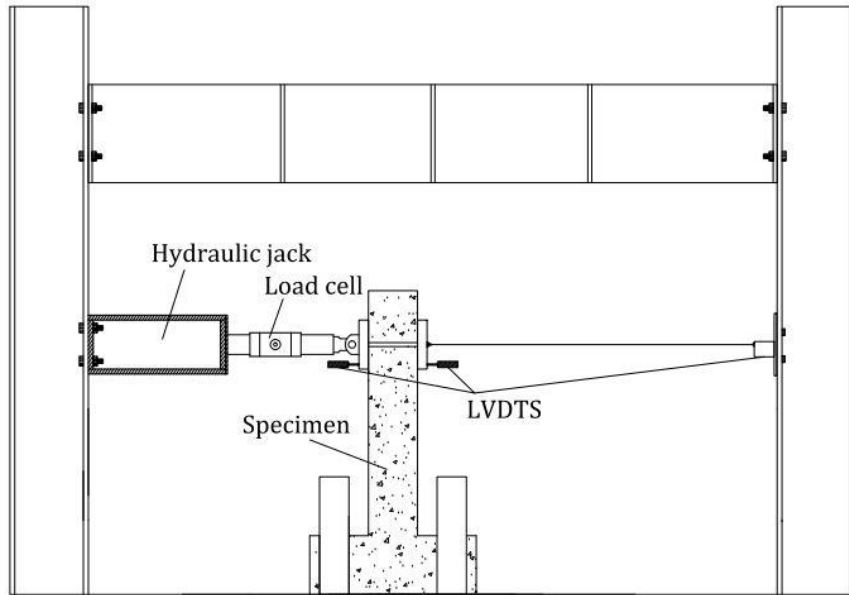
<sup>۱</sup>- Load cell

همچنین، با کاربرد فولاد مقاومت بالا، مشاهده گردید که عرض و عمق ترک‌ها افزایش یافته، ولی تعداد ترک‌ها کاهش یافتند. همچنین، مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این تأثیر فولاد مقاومت بالا در حالت استفاده به عنوان خاموت از حالتی که به عنوان میلگرد طولی استفاده می‌شود در برشی کردن رفتار سازه و افزایش عمق و عرض ترک‌ها کمتر است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نحوه ترک‌خوردگی و خرابی نمونه‌ها را در مراحل تشکیل اولین ترک‌ها، حداکثر بار و گسیختگی نمونه‌ها نشان می‌دهند.

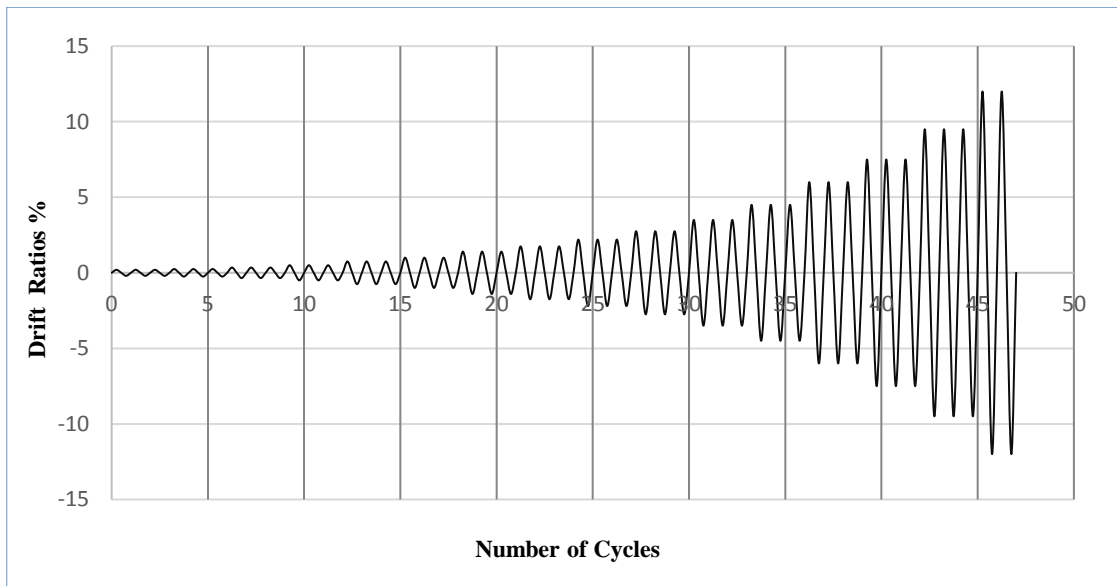
پرداخته شده و بر مباحث مرتبط با موضوع اصلی مقاله که شاخص‌های خرابی مختلف است تمرکز شده است. با این حال، نمودارهای هیستریزس اتصالات تیر به ستون در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که در نمودارهای هیستریزس مشخص است، با کاربرد فولاد مقاومت بالا، رفتار برشی جایگزین رفتار خمشی می‌گردد. این مسأله بدان معناست که در تغییر مکان‌های یکسان، ظرفیت باربری اتصالات تیر به ستون کاهش می‌یابد. در نتیجه حاکم شدن رفتار برشی به جای رفتار خمشی، انرژی مستهلک شده نیز کاهش می‌یابد.



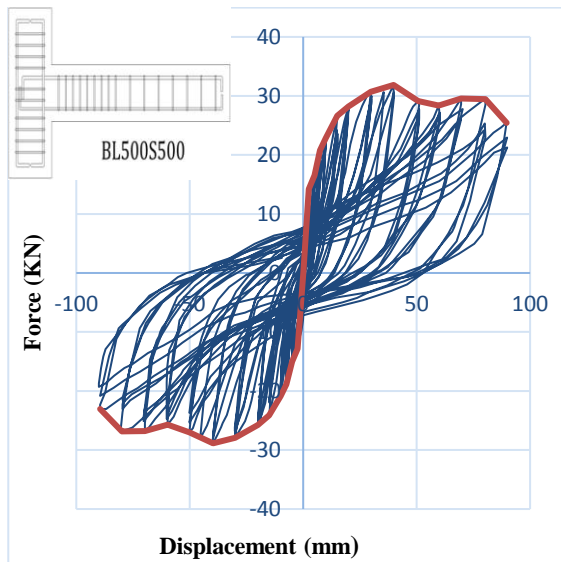
شکل ۷. جزئیات بارگذاری نمونه‌ها



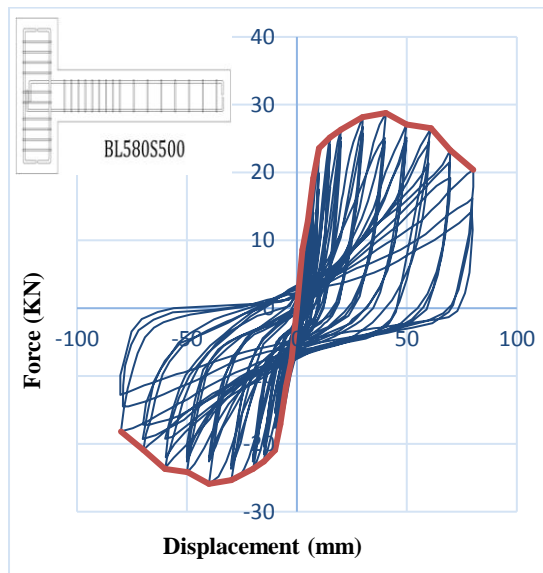
شکل ۸ ست آپ آزمایشگاهی



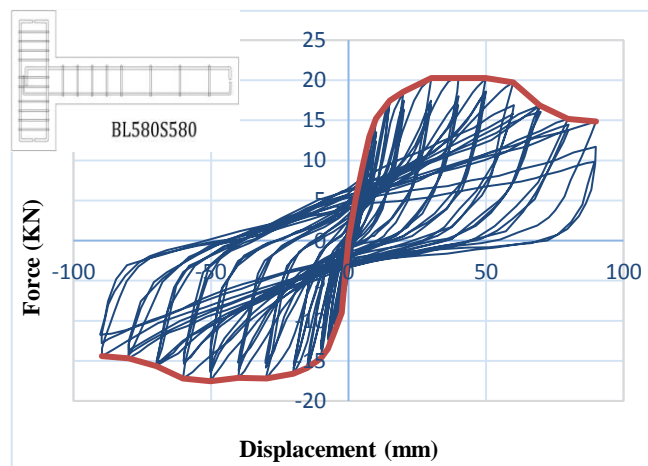
شکل ۹. پروتکل بارگذاری



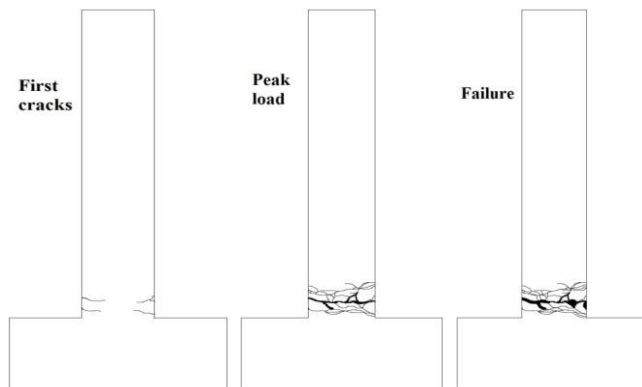
شکل ۱۱. منحنی هیستریزیس به همراه پوش مدل  
BL500S500



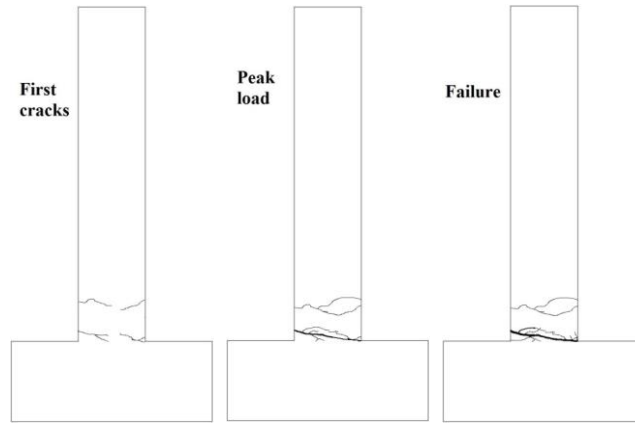
شکل ۱۰. منحنی هیستریزیس به همراه پوش مدل  
BL580S500



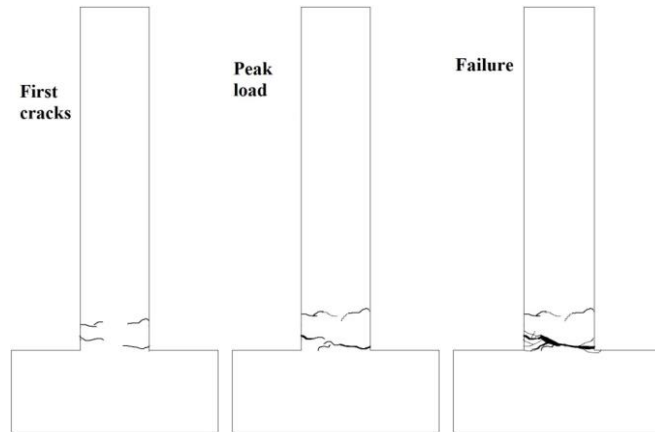
شکل ۱۲. منحنی هیستریزیس به همراه پوش مدل  
BL580S580



شکل ۱۳. نحوه ترک‌خوردگی نمونه BL500S500 در مراحل مختلف بارگذاری



شکل ۱۴. نحوه ترک خوردگی نمونه BL580S500 در مراحل مختلف بارگذاری



شکل ۱۵. نحوه ترک خوردگی نمونه BL580S580 در مراحل مختلف بارگذاری

- شاخص‌های خرابی منفرد: مربوط به مجموعه‌ای از اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌شوند. بر اساس شاخص خرابی به دست آمده که عددی بین صفر تا یک می‌باشد، حالات مختلفی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$DI < 0.10$	عدم خرابی یا ترک جزئی
$0.1 < DI < 0.25$	خرابی جزئی
$0.25 < DI < 0.4$	خرابی متوسط
$0.4 < DI < 0.8$	خرابی قابل توجه
$0.8 < DI$	گسیختگی

شاخص‌های خرابی بر حسب تغییر مکان حداکثری که در طول هر سیکل بارگذاری به دست می‌آیند، از جمله انواع شاخص‌های خرابی مهمی هستند که در این مقاله برخی از آنها مورد توجه قرار می‌گیرند. اولین شاخص

### ۳-۱. شاخص خرابی پیشنهادی توسط بانون و

ونزیانو (۱۹۸۲)

شاخص‌های خرابی برای مشاهده نحوه رفتار غیرخطی سازه‌ای در محدوده خرابی به کار می‌روند. اصولاً شاخص‌های خرابی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- شاخص‌های خرابی موضعی: در صورتی که بار سیکلیک و وابسته به تعداد سیکل‌های بارگذاری و باربرداری باشد، ماهیت تجمعی داشته و در صورتی که بار سیکلیک نباشد ماهیت غیرتجمعی دارند.

- شاخص‌های خرابی کلی: از طریق ادغام شاخص‌های خرابی موضعی، شاخص‌های خرابی کل سازه قابل محاسبه است. این شاخص‌های خرابی کلی با وزندهی به شاخص‌های خرابی موضعی یا با مقایسه خصوصیات مدال سازه قبل و بعد از تحریک لرزه‌ای به دست می‌آیند.

تندتر باشد، فرایند زوال نمونه‌ها سریع‌تر می‌باشد. به عبارت دیگر، شیب نمودار شاخص خرابی بیانگر سرعت گسترش خرابی و زوال نمونه‌ها می‌باشد. در این تحقیق، شیب خط روند (خطی) هر یک از نمودارهای مربوط به شاخص‌های خرابی به دست آمده است. این شیب برابر ۰/۱۲۲۴، ۰/۱۲۴۲ و ۰/۱۵۷۱ برای نمونه‌های BL500S500، BL580S580 و BL580S500 می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۶ نیز نشان داده شده است، فرایند زوال نمونه‌های BL500S500 و BL580S580 شبیه و کندتر از فرایند زوال نمونه BL580S500 می‌باشد. این مسأله بدان معناست که کاربرد خاموت مقاومت بالا در کنار میلگرد طولی مقاومت بالا تا حدود قابل قبولی فرایند گسیختگی و گسترش خرابی‌ها در نمونه را به تأخیر می‌اندازد و اثرهای مضر میلگرد مقاومت بالا را بالانس و خنثی می‌کند. لذا، کاربرد فولاد مقاومت بالا به عنوان خاموت در کنار میلگرد طولی توصیه می‌شود و نه هر یک به تنهایی. با این حال، نمونه BL500S500 بهترین رفتار را از منظر مواجهه با خرابی و سرعت گسترش خرابی دارد.

خرابی بر حسب تغییرمکان که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است بیانگر خرابی تجمعی خطی می‌باشد و توسط بانون و ونزیانو (۱۹۸۲) پیشنهاد گردیده است. برای محاسبه این شاخص خرابی، ابتدا عبارت تجمعی  $\beta_w$  از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

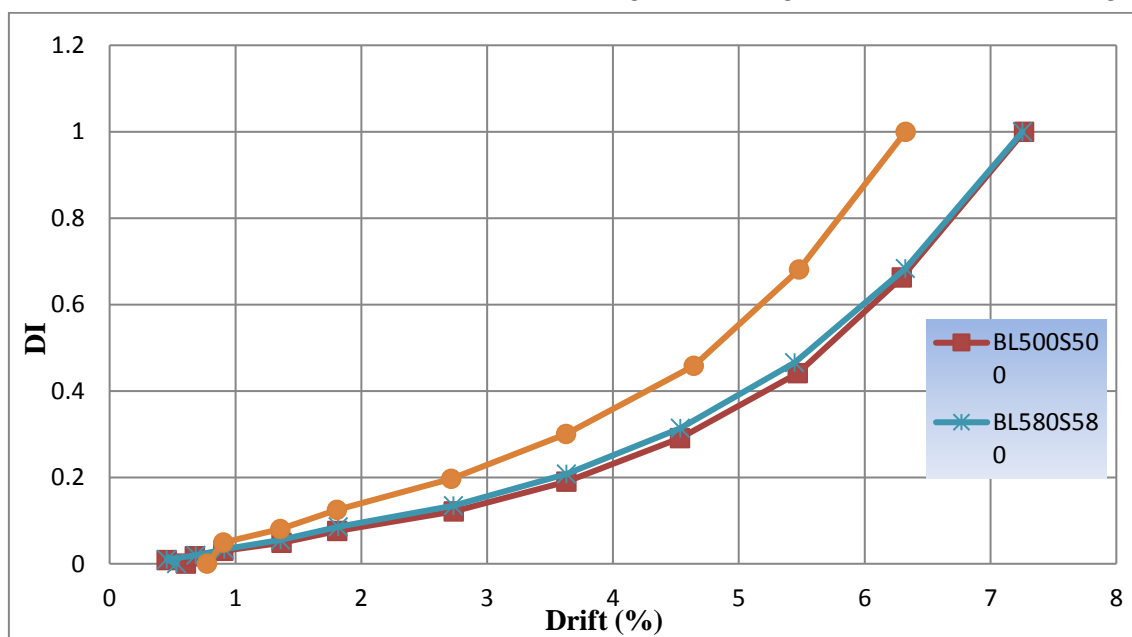
$$\beta_w = C \sum_i \frac{\delta_i}{\delta_f} \quad (3)$$

که در آن  $\delta_i$  حداکثر تغییرمکان در سیکل  $i$  ام،  $\delta_y$  تغییرمکانی است که در آن فولاد تسلیم می‌شود،  $\delta_f$  تغییرمکان نهایی که در آن مدل گسیخته می‌شود و  $C=0.1$  می‌باشند.

خرابی نهایی به صورت تابعی از  $\beta_w$  است. تابعی که در آن  $f(0)=0$  و  $f(1)=1$  می‌باشد. تعریف شاخص خرابی بر اساس  $\beta_w$  به صورت زیر می‌باشد:

$$DI = \frac{e^{n\beta_w} - 1}{e^n - 1} \quad (4)$$

که برای  $n=1$  حالتی که نقاط به صورت زیاد مسلح شده‌اند و در بقیه حالات  $n=-1$  می‌باشد. شکل ۱۶، شاخص خرابی بر حسب تغییرمکان را به روش فوق نشان می‌دهد. نکته مهم در رابطه با منحنی‌های شاخص خرابی آن است که هر قدر شیب منحنی شاخص خرابی



شکل ۱۶. منحنی شاخص خرابی محاسبه شده بر حسب تغییرمکان به روش بانون و ونزیانو (۱۹۸۲)

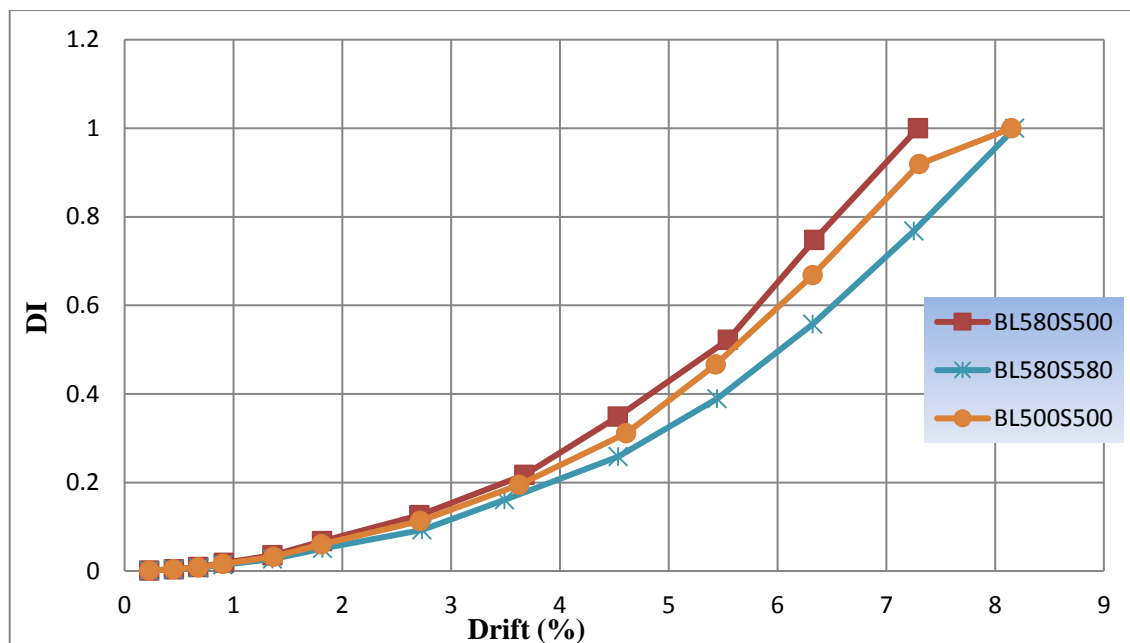
### ۳-۲. شاخص خرابی پیشنهادی استیفنز- یاوو (شاخص برحسب تغییرمکان)

(۱۹۸۷) نشان می‌دهد. در این شکل، شیب منحنی مربوط به نمونه BL580S500 از بقیه نمونه‌ها بیشتر و شیب نمونه BL580S580 از بقیه نمونه‌ها کمتر است و زوال آن سرعت کمتری دارد. در حالی که در واقعیت، نمونه BL500S500 زوال کندتری به نسبت نمونه‌ها داشته است. این مسأله بیانگر آن است که دقت این روش در مورد اتصالات تیر به ستون کمتر از باقی روش‌های مطرح شده در این تحقیق می‌باشد.

شاخص خرابی دومی که در این مقاله بر حسب تغییرمکان به دست آمده، شاخصی است که بر اساس مجموع نسبت‌های تغییرمکان پلاستیک محاسبه می‌شود. استیفنز و یائو (۱۹۸۷) شاخص خرابی دوم برحسب تغییرمکان را به صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$DI = \sum_i \left( \frac{\Delta\delta^+}{\Delta\delta f} \right)^{1.77} \quad (5)$$

که  $\Delta\delta^+$  افزایش مثبت تغییرمکان پلاستیک و  $\Delta\delta f$  برابر یک دهم ارتفاع تیر می‌باشد. شکل ۱۷، منحنی‌های شاخص خرابی نمونه‌ها را بر حسب روش استیفنز و یائو



شکل ۱۷. منحنی شاخص خرابی محاسبه شده بر حسب تغییرمکان به روش استیفنز و یائو (۱۹۸۷)

$$\mu m = um / uy \quad (7)$$

$$\mu u = uu \quad (8)$$

شکل ۱۸، منحنی شاخص‌های خرابی به روش پاول و الله آبادی (۱۹۸۸) را نشان می‌دهد. در این روش نیز همان فرایند مشاهده شده در دو روش قبل مشاهده می‌شود؛ یعنی نمونه‌های BL500S500 و BL580S580 فرایند زوال مشابه داشته و دیرتر از نمونه BL580S500 گسیخته می‌شوند. شیب نمودارهای شاخص خرابی به ترتیب ۰/۱۷۱، ۰/۱۴۸ و

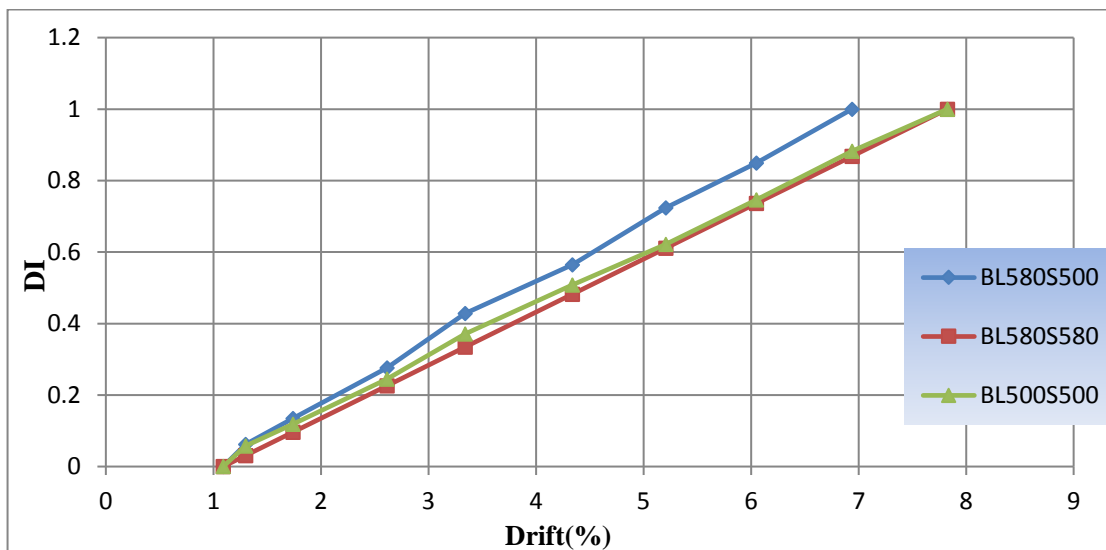
### ۳-۳. شاخص خرابی پیشنهادی پاول و الله آبادی

(۱۹۸۸)

شاخص خرابی سومی که بر اساس تغییرمکان محاسبه می‌شود، توسط پاول و الله آبادی (۱۹۸۸) مطرح شده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI = (um - uy) / (uu - uy) = (\mu m - 1) / (\mu u - 1) \quad (6)$$

که در آن،  $um$  تغییرمکان حداکثر،  $uu$  تغییرمکان نهایی،  $uy$  تغییرمکان تسلیم و  $\mu m$  و  $\mu u$  نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:



شکل ۱۸. منحنی شاخص خرابی محاسبه شده بر حسب تغییر مکان به روش پاول و الله‌آبادی (۱۹۸۸)

ذکر است که یکی از روش‌های محاسبه انرژی، محاسبه

سطح زیر حلقه‌های نمودار هیستریزس می‌باشد:

$$= \int F(\delta) d\delta \int dE \quad (10)$$

$$= \int M(\phi) d\phi$$

که در آن  $F(\delta)$ ،  $\delta$  نیرو و تغییر مکان نظیر و  $M(\phi)$  و  $\phi$

لنگر و دوران‌های نظیر یکدیگر می‌باشند. شکل ۱۹،

منحنی شاخص‌های خرابی بر حسب انرژی به روش

گازین و همکاران (۱۹۷۷) را نشان می‌دهد. شیب خط

روند خطی منحنی‌های شاخص‌های خرابی برابر

۴/۶۳۱۱، ۵/۹۴۲۷ و ۷/۳۴۳۸ برای نمونه‌های

BL500S500، BL580S580 و BL580S500 می‌باشد.

در این روش، بر خلاف روند روش‌های به‌کار رفته دیگر

در این تحقیق، منحنی شاخص‌های خرابی BL500S500

و BL580S580 اختلاف شیب بیشتری دارند. شاید دلیل

این واگرایی نتایج، دقت کمتر این روش در مقایسه با

سایر روش‌های محاسبه شاخص‌های خرابی باشد. با این

حال، هنوز نمونه BL580S500 بیشترین شیب و نمونه

BL500S500 کمترین شیب را دارد. این مسأله بدان

معناست که نمونه‌ای که در آن از فولاد معمولی به عنوان

میلگرد طولی و عرضی استفاده شده، بهترین رفتار از منظر

#### ۳-۴. شاخص خرابی پیشنهادی توسط گازین و

همکاران (۱۹۷۷)

اساساً شاخص‌های خرابی بر حسب انرژی ماهیت

تجمعی دارند. گازین و همکاران (۱۹۷۷) فرمولی را برای

محاسبه شاخص خرابی که بر اساس انرژی مستهلک

شده است برای سازه‌های بتنی مسلح پیشنهاد می‌کنند.

این فرمول صرفاً به انرژی مستهلک شده در طول سیکل -

هایی ارتباط دارد که در آنها نیروی نظیر تغییر مکان‌ها

بیشتر آن نیرویی است که سبب تسلیم میلگردها می‌شود.

فرمول مورد نظر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI = \sum_i \frac{F_i \delta_i}{F_y \delta_y} \quad (9)$$

در این روش، صرفاً سیکل‌هایی که در آنها  $\frac{F_i}{F_y} \geq 0.75$

باشد در نظر گرفته می‌شوند.  $F_i$  نیرویی است که در سیکل

$i$  ام به دست آمده،  $F_y$  نیرویی است که سبب تسلیم

میلگردها می‌شود،  $\delta_i$  تغییر مکان نظیر  $F_i$  و  $\delta_y$  تغییر مکان

نظیر  $F_y$  می‌باشد. این رابطه بر اساس تخمین گسیختگی

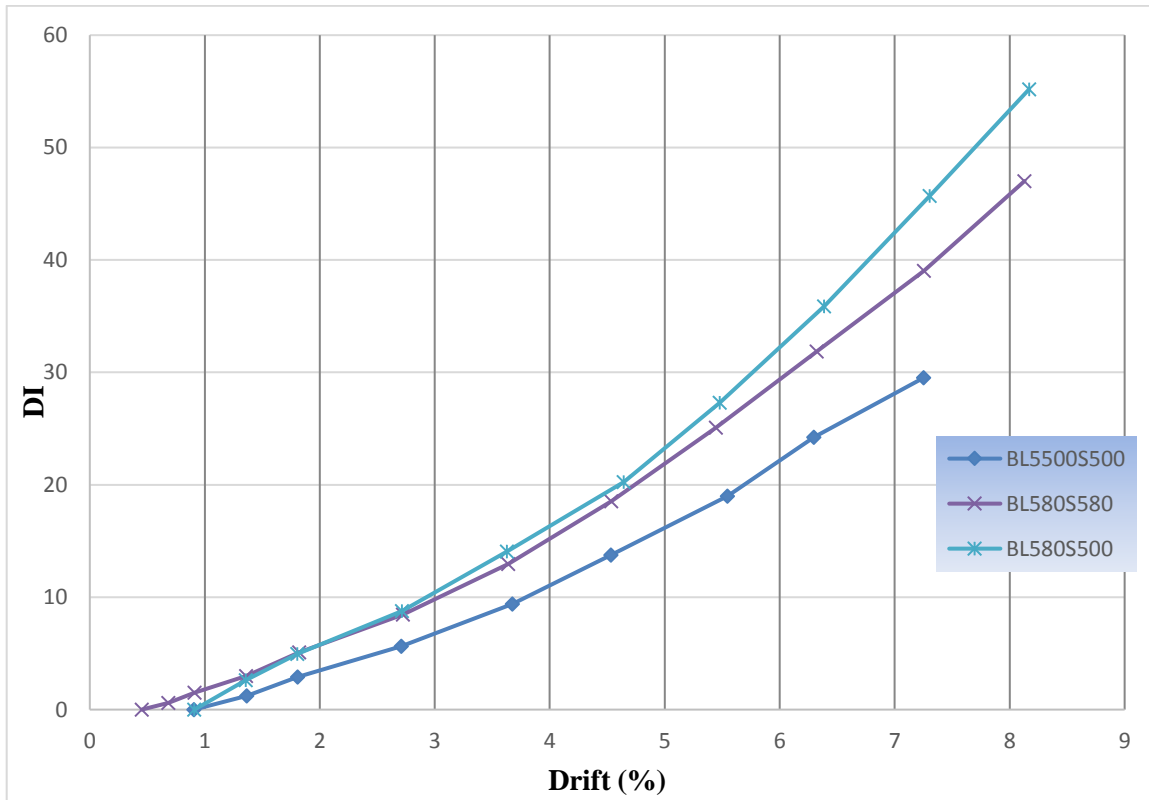
نمونه می‌باشد. بار نهایی نیز باری است که مربوط به

۰/۷۵ حداکثر باری است که نمونه تحمل می‌کند. لازم به



داشته و نمونه BL500S500 بیشترین جذب انرژی را دارد. این مسأله با مشاهدات آزمایشگاهی تطابق دارد.

مواجهه با خرابی بر اساس این شاخص خرابی را دارد. بر اساس مشاهدات حاصل از این روش می‌توان نتیجه گرفت که نمونه BL580S500 جذب انرژی کمتری



شکل ۱۹. منحنی شاخص خرابی بر حسب انرژی به روش گازین و همکاران (۱۹۷۷)

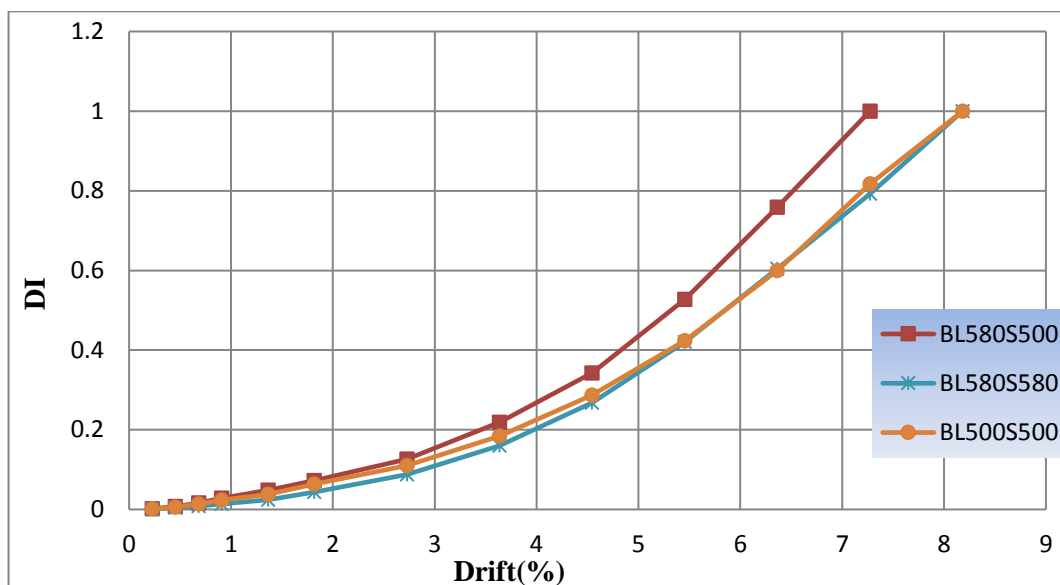
BL580S580 می‌باشد. در این روش نیز مشابه سایر روش‌های به کار رفته در این تحقیق (به جز روش مبتنی بر انرژی معرفی شده توسط گازین و همکاران، ۱۹۷۷)، شاخص‌های خرابی نمونه‌های BL500S500 و BL580S580 تقریباً بر هم منطبق بوده و زوال دیرتری به نسبت نمونه BL580S500 دارند. این مسأله بیانگر آن است که کاربرد فولاد مقاومت بالا به عنوان خاموت با میلگرد طولی مقاومت بالا به عنوان میلگرد طولی اندرکنش و رفتار مناسبی به نسبت زمانی که میلگرد مقاومت بالا صرفاً به عنوان میلگرد طولی به کار می‌رود دارد.

### ۳-۵. شاخص خرابی دوم بر حسب انرژی

این فرمول شامل محاسبه نسبت بین انرژی مستهلک شده در طول هر سیکل بارگذاری به کل انرژی مستهلک شده اتصال تیر به ستون می‌باشد که برای سازه‌های بتن مسلح توسط ردبرگز و پادیا (۲۰۰۹) معرفی شده است. فرمول مطرح شده برای این شاخص خرابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI = \sum_i \frac{\int dE}{E} \quad (11)$$

شکل ۲۰، منحنی شاخص‌های خرابی نمونه‌ها بر حسب انرژی را نشان می‌دهد. شیب خط روند خطی منحنی‌های شاخص‌های خرابی برابر ۰/۱۱۷۳، ۰/۱۲۹۷ و ۰/۱۱۷۳ برای نمونه‌های BL500S500، BL580S500 و BL580S580 است.



شکل ۲۰. منحنی شاخص خرابی بر حسب دررفت

تحت بار استاتیکی استاندارد هم‌پایه شده است. برای سازه‌های بتنی که با میلگردهای کمی مسلح شده‌اند، ضریب  $\beta$  برابر ۰/۲۵ بوده که در این شرایط، مشارکت انرژی عدد بالایی در حدود ۲۰٪ است. شکل ۲۱، منحنی شاخص‌های خرابی نمونه‌ها به روش ترکیبی (انرژی و تغییر مکان) را نشان می‌دهد. شیب خط روند خطی منحنی‌های شاخص‌های خرابی برابر ۰/۱۲۴۲، ۰/۱۳۷۶ و ۰/۱۲۴۳ برای نمونه‌های BL580S500، BL500S500 و BL580S580 می‌باشد. این روش نیز مشابه سایر روش‌های به‌کار رفته در این تحقیق (به جز روش مبتنی بر انرژی معرفی شده توسط گازین و همکاران، ۱۹۷۷)، منحنی شاخص‌های خرابی نمونه‌های BL500S500 و BL580S580 تقریباً بر هم منطبق بوده و فرایند گسیختگی یکسانی داشته و دیرتر از نمونه BL580S500 گسیخته می‌شوند.

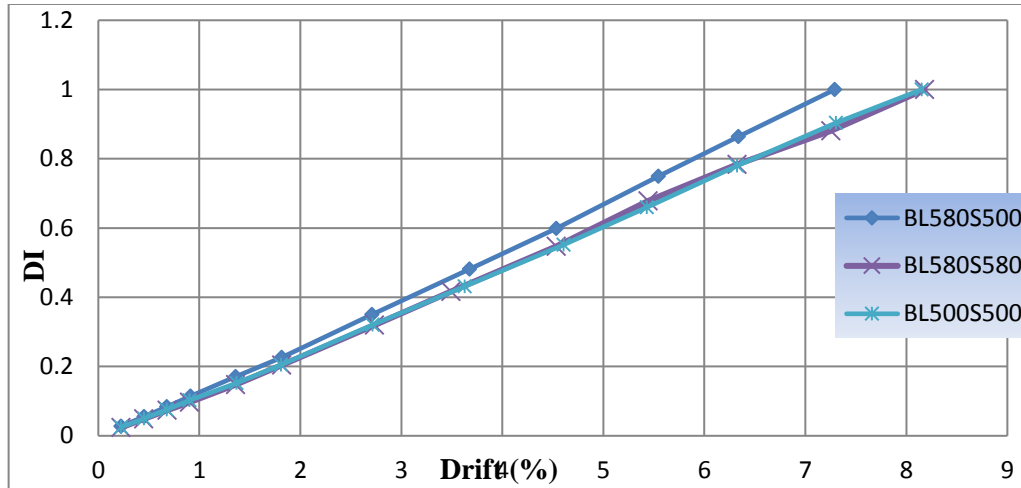
### ۳-۶. شاخص خرابی پیشنهادی توسط پارک و

آنگ (۱۹۸۵)

بتن مسلح از بتن و میلگرد تشکیل شده است. بتن، گسیختگی ترد و میلگرد، گسیختگی نرم دارد. به همین دلیل، مد گسیختگی بتن مسلح ترکیبی می‌باشد. یکی از شاخص‌های خرابی جامعی که وجود دارد شاخص خرابی ترکیبی است که انرژی و تغییر مکان را با هم در نظر می‌گیرد و توسط پارک و آنگ (۱۹۸۵) معرفی شده است. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI = \frac{\delta m}{\delta u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \delta u} \quad (6)$$

که عبارت اول  $(\frac{\delta m}{\delta u})$  بیانگر تغییر مکان نرمال شده و عبارت دوم بیانگر انرژی مستهلک شده است که در آن انرژی مستهلک شده مربوط به زمانی که میلگردها تسلیم شده‌اند به تغییر مکان لازم برای رسیدن به گسیختگی



شکل ۲۱. منحنی شاخص خرابی ترکیبی

#### ۴. نتیجه گیری

با قاب‌های صلب بتن آرمه به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با کاربرد فولاد مقاومت بالا، به طور کلی، زوال این نمونه‌ها تسریع شده و خرابی‌های بیشتری رخ می‌دهد. در ضمن، با کاربرد فولاد مقاومت بالا، عرض و عمق ترک‌ها بیشتر و تعداد ترک‌ها کمتر می‌شود که می‌تواند بر سرویس‌دهی آنها اثر بگذارد. با این حال، نتایج مربوط به مقایسه منحنی‌های شاخص‌های خرابی نشان می‌دهد که کاربرد فولاد مقاومت بالا به عنوان خاموت و میلگرد طولی نسبت به کاربرد آن به عنوان میلگرد طولی تنها، سرعت زوال نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. در ضمن، از بین روش‌های مختلف محاسبه شاخص‌های خرابی، همه روش‌ها، به جز روش مبتنی بر انرژی معرفی شده توسط گازین و همکاران (۱۹۷۷) نتایج نسبتاً مشابه و همگرایی دارند.

امروزه، بتن مسلح یکی از پرمصرف‌ترین مصالح مورد استفاده در ساخت سازه‌های مختلف، به ویژه سازه‌های مرتبط با صنعت حمل و نقل، مانند پل‌ها و تونل‌ها، می‌باشد. کارخانه‌های بسیاری در جهان، و از جمله ایران، رو به تولید میلگردهای با مقاومت تسلیم بیش از ۴۲۰ مگاپاسکال آورده‌اند که کاربرد آنها در اعضای بتن مسلح می‌تواند مزایای اقتصادی و اجرایی فراوانی داشته باشد. در عین حال، کاربرد این دسته از فولادها محدودیت‌هایی نیز به همراه می‌آورد. به همین دلیل، محققان بسیاری در جهان، کاربرد این دسته از فولادها در سازه‌هایی که نیاز است با شکل‌پذیری ویژه طراحی شوند را بررسی کرده‌اند. در این مقاله، تأثیر فولاد مقاومت بالا بر انواع شاخص‌های خرابی (بر حسب تغییرمکان، انرژی و ترکیبی) در اتصالات تیر به ستون پایه‌های پل‌های راه‌آهن

#### ۵. مراجع

- ACI. 2014. "Building code requirements for structural concrete and commentary". ACI 318-14, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Aoyama, H. 2001. "Design of Modern High-rise Reinforced Concrete Structures". Imperial College Press, London, UK.
- Arshadi, H. and Kheyroddin, A. 2016. "Seismic consideration about using HSR in earthquake resistant structures". International Conference on Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, May 27.
- Arshadi, H. and Kheyroddin, A. "Application of HSR in the members of special deformable frames". International Conference on Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, May 27.
- Arshadi, H. 2016. "An overview on the concepts and methodologies of incremental dynamic analysis IDA (with a single record and multiple records)". World Congress, Jeju Island, Korea.

- Arshadi, H., Izadifard, R. A. and Estekanchi, H. 2014. "The comparison of the IDA and ET on steel structures rehabilitated by isolators". *J. Rehabil. Civ. Eng.*, 2(2): 46-62. Available at: [http://civiljournal.semnan.ac.ir/article\\_208.html](http://civiljournal.semnan.ac.ir/article_208.html).
- Banon, H. and Veneziano, D. 1982. "Seismic safety of reinforced concrete members and structures". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 10: 93-179.
- Burns, N.H., and Seiss, C.P., 1962, *Load Deformation Characteristics of Beam-Column Connections in Reinforced Concrete*, Structural Research Series No. 234, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Chiew, P. and Cai, Y. Q. 2018. "Design Examples for High Strength Steel Reinforced Concrete Columns, A Eurocode 4 Approach". CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Gosain, N. K., Brown, R. H. and Jirsa, J. O. 1977. "Shear requirements for load reversal on reinforced concrete members". *J. Earthq. Eng.*, 103(7): 1461-1476.
- Kheyroddin, A., Arshadi, H. and Binaipour, F. 2017. "An overview of the effects of high-strength reinforcement (HSR) on the intermediate moment-resisting frames". *AUT J. Civ. Eng.*, 1(2): 177-188.
- NIST (The National Institute of Standards and Technology). 2015. "Use of high-strength reinforcement for earthquake resistance of concrete structures". NIST GCR Report 13-917-30, Prepared by the Applied Technology Council for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- Otani, S., Nagai, S. and Aoyama, H. 1996. "Load-deformation relationship of high-strength reinforced concrete beams". *Mete A. Sozen Symposium- A Tribute from his Students*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, ACI SP-162-2, pp. 35-52.
- Park, Y. J. and Ang, A. H. S. 1985. "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete". *J. Struct. Eng.*, 111: 722-739.
- Powell, G. H. and Allahabadi, R. 1988. "Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 16(5): 719-734.
- Restrepo, J. I. 2000. "Issues related to the seismic design of reinforced concrete structural systems". *SESOC J.*, 13(1): 50-58.
- Rautenberg J.M., Pujol S., Tavallali H. and Lepage A. 2011, "Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel", *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol: 110 (2).
- Rodriguez ME, Padilla D. 2009. "A Damage Index for the Seismic Analysis of Reinforced Concrete Members", *J Earthq Eng* 2009;13:364-83. doi:10.1080/13632460802597893.
- Sperry, J., Darwin, D., O'Reilly, M., Lequesne, R. D., Matamoros, A., Feldman, L. R., Yasso, S., Searle, N., DeRubeis, M. and Ajaam, A. 2018a. "Conventional and high-strength steel hooked bars: Detailing effects". *ACI Struct. J.*, 115(1): 247-257.
- Sperry, J., Yasso, S., Searle, N., DeRubeis, M., Darwin, D., O'Reilly, M., Matamoros, A., Feldman, L. R., Lepage, A., Lequesne, R. D. and Ajaam, A. 2018b. "Conventional and high-strength steel hooked bars: Detailing effects- Part 1: Anchorage tests". *ACI Struct. J.*, 115(1): 258-265.
- Sperry, J., Darwin, D., O'Reilly, M., Lequesne, R. D., Yasso, S., Feldman, L. R. and Lepage, A. 2018c. "Conventional and high-strength steel hooked bars: Detailing effects -Part 2: Data analysis". *ACI Struct. J.*, 115(1): 267-276.
- Stephens, J. E. and Yao, J. T. P. 1987. "Damage assessment using response measurements". *J. Struct. Eng.*, 113(4): 787-801.
- Tavallali, H. 2011. "Cyclic response of concrete beams reinforced with ultra-high strength steel". Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.
- Thomas, K., and Sozen, M.A., 1965, *A Study of the Inelastic Rotation Mechanism of Reinforced Concrete Connections*, Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 301, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Todeschini, C.E., Bianchini, A.C., and Kesler, C.E., 1964, "Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels," *ACI Structural Journal*, Vol. 61, No. 6, pp. 701-715.
- Xia, J., Xiao, Y., Mackie, K. R., Al-Ramahee, M. and Mirmiran, A. 2015. "Dowel action and shear strength contribution of high strength rebar embedded in ultra-high performance fiber reinforced concrete". *Eng. Struct.*, 83: 223-232.
- Zhou, J., Chen, S. and Chen, Y. 2013. "Calculation methods of the crack width and deformation for concrete beams with high-strength steel bars". *Frontiers Struct.Civ. Eng. J.*, 7(3): 316-324.