

بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای طره‌ای بتن مسلح سبکدانه تحت بار سیکلی

فرخ آقامحمدزاده

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش سازه و زلزله، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه عمران، تهران، ایران

حسن افشین *

دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه سهند

مسعود نکویی

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

برای کاربرد بتن سبکدانه در سازه، نیاز به بررسی رفتار تیرهای بتن آرمه سبکدانه است. هدف مطالعه حاضر عبارت از بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای طره‌ای ساخته شده از بتن سبکدانه طبیعی اسکوریا تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. برای بررسی آزمایشگاهی سه نمونه تیر کنسولی از بتن مسلح سبکدانه ساخته شد و تحت اثر بارگذاری تغییرمکانی سیکلی قرار گرفت. در این تحقیق عملکرد تیرهای خمشی ساخته شده از بتن سبکدانه طبیعی بر اساس پارامترهای کاهش سختی، کاهش مقاومت، شکل پذیری، جذب انرژی، میرایی و اسکوز معادل، سختی خمشی و مقادیر ضریب ترک خوردگی تحقیق گردید. در بررسی عددی، نمونه با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل گردید و همانند شرایط آزمایشگاهی تحت اثر تغییرمکان اعمالی تحلیل گردید. منحنی هیستریزس بار-تغییرمکان حاصل از نرم‌افزار ABAQUS شبیه نتایج آزمایشگاهی بدست آمد. در این کار آزمایشگاهی تمامی تیرها به ظرفیت خمشی رسیدند. بعد از رسیدن به ظرفیت خمشی، ترکهای قطری در گره اتصال ایجاد و شروع به بازشدن کردند. این تحقیق نشان داد که سختی تیرها با افزایش دامنه سیکل‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دامنه سیکل‌ها تا رسیدن به شکل پذیری ϵ کاهش محسوسی در مقاومت تیرها مشاهده نشد. نتیجه گرفته شد تیرهای بتن مسلح سبکدانه رفتار شکل پذیری دارند.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری تغییرمکانی سیکلی، بتن سبکدانه، منحنی هیستریزس، کاهش سختی، شکل پذیری.

* نویسنده مسئول: Hafshin@sut.ac.ir

۱- مقدمه

آزمایش‌های محدودی بر روی رفتار خمشی شش تیر بتن مسلح سبکدانه با مقاومت بالا توسط Ahmad و Batts انجام شد [۲]. از تحقیقات ایشان نتایج زیر بدست آمد:

۱- در حالت قبل از ترک، تغییر شکل به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین نسبت بالای میلگرد باعث افزایش سختی در بارگذاری می‌شود.

۲- شکل‌پذیری تغییر مکانی با افزایش نسبت میلگرد کششی تا ۰/۰۲۵ کاهش می‌یابد و لی در مقادیر بالاتر از ۰/۰۲۵ این نسبت تأثیری در شکل‌پذیری تغییر مکانی ندارد.

۳- برای نسبت ثابت میلگرد با افزایش در مقاومت فشاری اندیس شکل‌پذیری تغییر مکانی کاهش می‌یابد.

۴- تیرهای بتن سبک‌دانه با مقاومت فشاری کم و یا زیاد با نسبت سطح مقطع میلگرد (ρ) به سطح مقطع میلگرد حالت تعادل (ρ_b) $\frac{\rho}{\rho_b} \geq 0.4$ شکل‌پذیری تغییر مکانی کمی را از خود نشان می‌دهند.

Liml و همکاران نتایج زیر را ارائه دادند [۳]:

۱- پاسخ خمشی تیر بتنی مسلح با مصالح سبکدانه خیلی شبیه با تیر بتنی با وزن معمولی معادل است.

۲- افزایش در مقاومت فشاری بتن علاوه بر مقاومت نهایی تیر بار مربوط به اولین ترک و سختی بعد از ترک را افزایش می‌دهد.

۳- افزایش در مقدار میلگرد کششی، حداکثر پهنای ترک را تحت اثر بار خدمت کاهش می‌دهد و سختی بعد از ترک و مقاومت نهایی تیر را افزایش می‌دهد اما در عوض شکل‌پذیری را خیلی شدید کاهش می‌دهد.

مطابق تحقیقات Paraschiva تیرهای بتن سبک‌دانه در مقایسه با بتن معمولی تحت بار کمتر خیلی آسان‌تر ترک می‌خورند و باز شدگی ترک معمولاً بزرگتر و ظرفیت لهیدگی برای برش کوچک‌تر است. این وجود اختلاف بین تیرهای سبک‌دانه و معمولی برای تیرهای با دهانه برشی کوچک بیشتر از تیرهای با دهانه برشی بزرگ است [۴].

انتظاری رفتار سازه‌ای تیر بتن سبک ساخته شده از سبک‌دانه اسکوریا را مورد مطالعه قراردادند و نتایج زیر را ارائه نمودند [۵]: در تمامی نمونه‌ها بعد از مرحله ترک خوردگی خمشی به دلیل کاهش لنگر اینرسی تیر، یک تغییر شیب در منحنی بار- تغییر مکان که مربوط به ترک خوردگی بود مشاهده می‌شود. مجدداً با افزایش

در مناطق لرزه خیز نیروی حاصل از وقوع زلزله اثر قابل توجهی بر سازه‌ها دارد و عمده نیروی وارده بر سازه‌ها ناشی از نیروی زلزله می‌باشد. با توجه به این که هر سازه‌ای متناسب با وزن خود از نیروی زلزله سهم می‌برد، یکی از راه‌های کاهش نیروی زلزله کاهش بار مرده ساختمان‌ها می‌باشد. با توجه به این که در سازه‌های بتن آرمه ابعاد المان‌های سازه‌ای نسبتاً بزرگ می‌باشد، کاهش وزن مخصوص بتن می‌تواند سبب کاهش قابل ملاحظه بار مرده سازه گردد. با استفاده از انواع گوناگون مصالح سبک-دانه و طرح اختلاط مناسب می‌توان بتن سبک‌وزن و با مقاومت کافی تولید کرد. این نوع بتن می‌تواند ضمن دارا بودن مزیت وزن حجمی کم، دارای مقاومت و دوام مطلوب و معادل با بتن معمولی باشد. کاهش بار مرده منجر به کاهش نیروی زلزله، کاهش ابعاد تیر، ستون، پی و نیز کاهش حداقل آرماتور مورد نیاز، کاهش هزینه ساخت، افزایش فضای مورد استفاده با کاهش ابعاد ستون‌ها و ابعاد دالها و تیرها می‌شود. به علت عایق بودن، بتن سبک موجب جلوگیری از اتلاف انرژی گرمایی و مقاومت نسبتاً خوب در برابر آتش می‌شود.

۲- مرور تحقیقات گذشته

کارهای آزمایشگاهی انجام یافته روی رفتار تیرهای ساخته شده از بتن سبک‌دانه را می‌توان در دو بخش بارگذاری استاتیکی و بارگذاری چرخه‌ای در نظر گرفت. خلاصه‌ای از کارهای انجام یافته روی رفتار تیرهای دوسر مفصلی ساخته شده از بتن سبک‌دانه تحت اثر بارگذاری استاتیکی در زیر ارائه می‌گردد:

Ahmad و Barker آزمایش‌های خمشی بر روی شش تیر بتن سبک‌دانه مسلح انجام دادند که از مشاهدات رفتار تیرها و آنالیز داده‌های آزمایش، نتایج زیر گزارش گردید [۱]:

۱- تنش بلوک مستطیلی ارائه شده از طرف مقررات ACI-318 برای محاسبه ظرفیت خمشی اعضاء بتنی سبک‌دانه با میلگرد تقویتی در یک طرف تیر، محافظه کارانه می‌باشد.

۲- تیرهای بتن سبک‌دانه با مقاومت بالا و معمولی دارای شکل‌پذیری کم می‌باشد.

۳- برای یک نسبت ثابت میلگرد، با افزایش مقاومت بتن کاهش شکل‌پذیری مشاهده می‌شود.

در المان‌های بتن مسلح شکل‌پذیر، بعد از جاری شدن المان، تغییرشکل پلاستیک در ناحیه کوچکی از طول المان متمرکز می‌شود که مفصل پلاستیک نامیده می‌شود. عملکرد مفصل پلاستیک تعیین‌کننده رفتار المان از لحاظ ظرفیت بار و تغییرشکل است [۸].

در بیشتر تیرهای شکل‌پذیر مفصل پلاستیک در انتهای تیر در محل اتصال تیر-ستون تشکیل می‌شود. تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای تیر در نتیجه جاری شدن میلگرد طولی در آن ناحیه است [۹].

در گذشته تحقیقات زیادی بر روی رفتار اتصال تیر-ستون تحت اثر بارگذاری شبه‌لرزه‌ای انجام یافته‌است [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳]. هدف مطالعه حاضر عبارت از بررسی رفتار مفصل پلاستیک در انتهای تیر طره‌ای ساخته شده از بتن سبک‌دانه طبیعی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. برای بدست آوردن چنین هدفی، المان تیر متصل به ستون به قسمی آزمایش گردید که ستون به عنوان تکیه‌گاه افقی برای المان تیر قائم عمل کند. به عبارت دیگر تیر به صورت یک المان قائم تحت اثر خمش و برش قرار گرفت. تغییرشکل افقی در انتهای آزاد هر نمونه بدون هیچگونه نیروی محوری خارجی در تیر اعمال گردید. تغییر شکل افقی به نحوی بر تیر اعمال گردید که بتوان رفتار در محدوده الاستیک و غیر الاستیک را بدست آورد. سه المان اتصال تیر و ستون بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ از یک قاب ساختمانی مطابق شکل (۱) تهیه گردیده و در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تحت آزمایش قرار گرفتند. ابعاد مقطع تیر و ستون مربع شکل به ضلع ۲۰۰ میلی‌متر، طول تیر ۱/۵ متر میلگردهای طولی تیر و ستون از چهار عدد میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر (نسبت میلگرد طولی ۰/۶۸٪) و آرماتور برشی از میلگرد قطر ۸ میلی‌متر با فاصله ۱۰۰ میلی‌متر (نسبت میلگرد عرضی ۰/۵٪) بود. مشخصات میلگرد مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

جدول ۱- مشخصات میلگرد مصرفی

تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (Gpa)	تنش جاری شدن (MPa)	قطر میلگرد (mm)
۶۱۲	۲۰۴	۴۱۲	۱۲
۶۶۵	۲۰۴	۴۴۵	۸

بار تغییر شکل به صورت خطی افزایش داشته تا این که فولادهای کششی به مرحله تسلیم برسند. با تسلیم آرماتورهای اصلی شیب منحنی بار- تغییر مکان یا منحنی لنگر انحنای کاهش زیادی را نشان دادند.

کارهای انجام‌یافته روی رفتار تیرهای طره‌ای تحت بار چرخه‌ای رفت و برگشتی:

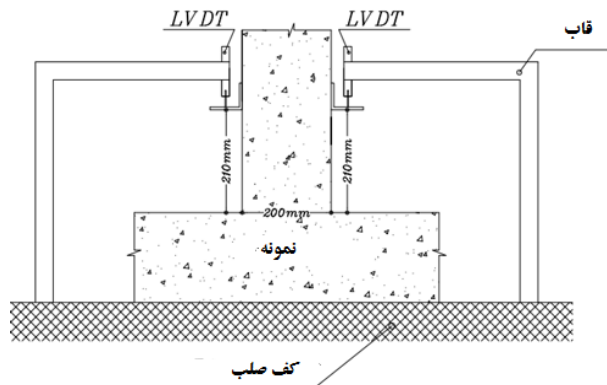
رفتار چرخه‌ای هفت تیر طره‌ای بتن مسلح سبک توسط Nmai و Darwin مورد بررسی قرار گرفت [۶]. بر اساس کارهای آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که استفاده از نسبت میلگرد طولی کم، تنش برشی و فشاری را در تیر تحت بار چرخه‌ای کاهش می‌دهد و در نتیجه نرخ زوال را کاهش می‌دهد. کاهش فاصله خاموتها و افزایش نسبت آرماتور کششی به فشاری، تعداد حلقه‌های غیرالاستیک تحمل شده و انرژی استهلاکی را افزایش می‌دهد. Sasmal و همکاران عملکرد لرزه‌ای مجموعه تیر-ستون در گره اتصال خارجی را برای سازه‌های بتن مسلح طراحی شده بر اساس آئین نامه اروپا و استاندارد هند در سه حالت مختلف عملکرد آئین‌نامه (طراحی برای بار ثقلی، غیرشکل‌پذیری و شکل‌پذیر) ارزیابی کردند [۷]. از تحقیقات ایشان نتایج زیر حاصل گردید:

در نمونه‌های غیرشکل‌پذیر مشاهده شد که اعوجاج برشی و زوال سختی و مقاومت بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. عملکرد نمونه‌های شکل‌پذیر بر اساس آئین‌نامه اروپا و استاندارد هند از نظر کاهش مقاومت و سختی تقریباً شبیه هم هستند. نتیجه گرفته شد که حتی نمونه‌های شکل‌پذیر هم بیشتر انرژی را از طریق گسترش خسارت در ناحیه گره اتصال مستهلک می‌کند که برای پایداری سازه نامطلوب و خطرناک است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

سازه‌ها باید شکل‌پذیری لازم را برای تحمل نیروی زلزله داشته باشند. با در نظر گرفتن این موضوع که در سازه‌ها مکانیزم شکست تیر باعث شکل‌پذیری بیشتری نسبت به مکانیزم شکست ستون می‌شود، تأثیر شکل‌پذیری تیرها بر رفتار سازه بیشتر از شکل‌پذیری ستون‌ها می‌باشد. همچنین با توجه به این حقیقت که در بیشتر سازه‌های ساخته شده از بتن سبک، سقف و تیرها را از بتن سبک و ستون‌ها را از بتن معمولی به کار می‌برند، نیاز بررسی شکل‌پذیری تیرهای ساخته شده از بتن سبک‌دانه آشکار می‌گردد.

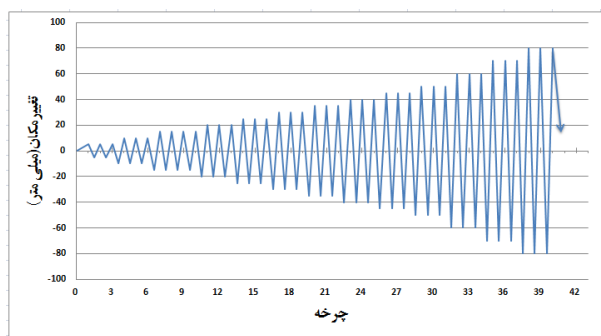
تغییر شکل خطی خمشی توسط دو عدد تغییر مکان سنج اندازه گیری گردید که آن‌ها همانند شکل (۳) به اندازه ۲۱ سانتی متر از بر ستون قرار داده شدند. تغییر شکل طولی اساساً بعلا اثر خمش است. چنین اندازه گیری در تعیین کرنش بتن، انحنا مفصل و کشیده گی مفصل کمک می کند.



شکل ۳- نحوه نصب تغییر مکان سنج (LVDT) برای اندازه گیری انحنا ی خمشی

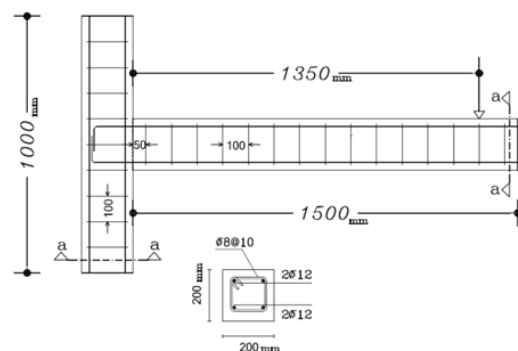
۳-۱- انتخاب تغییر مکان اعمالی

اثر واقعی زلزله در طبیعت دینامیکی می باشد، اما آزمایش چرخه های شبیه سازی شده، اثر شبه استاتیکی دارد. با این حال اختلاف بین شکل حلقه های هیستریزس حاصل از آزمایش شبه استاتیک و آزمایش دینامیکی چندان زیاد نیست. الگوی تغییر مکان استفاده شده در این مطالعه مطابق شکل (۴) می باشد که در آن هر دامنه تغییر مکان سه بار تکرار شده و افزایش تدریجی دامنه چرخه های تغییر مکان در حالت الاستیک و غیرالاستیک تا شکل پذیری تجمعی بیشتر از ۳۲ به کار رفته است. بنابراین انتظار می رود الگوی تغییر مکان حاضر، رفتار نمونه تحت بار گذاری شبه لرزه ای با شرایط شدید ترک خوردگی و شکست را آزمایش کند [۱۴].



شکل ۴- نحوه تغییر مکان اعمالی بر نمونه

نمونه ها از بتن سبک دانه سازه ای ساخته شدند. برای تهیه بتن از سنگ دانه اسکوریا با حداکثر اندازه دانه ۵ میلی متر استفاده شد و مقاومت استوانه ای بتن سبک دانه ۲۷ مگاپاسکال و وزن مخصوص آن 1800 kg/m^3 به دست آمد. با استفاده از نتایج آزمایش ها، نمودار نیروی برشی-تغییر مکان انتهایی آزاد تیر رسم و درباره عملکرد کلی سازه تحقیق شد. همانطور که در شکل (۱) دیده می شود محل اثر نیرو به فاصله ۱۳۵۰ میلی متر از بر ستون می باشد. در نتیجه طول دهانه برشی ۱۳۵۰ میلی متر و نسبت طول دهانه برشی به ارتفاع تیر ۶/۷۵ می باشد. برای انتقال نیرو به تیر از ورق به ضخامت ۲۰ میلی متر در انتهای آزاد تیر استفاده گردید و در محل اعمال نیرو یک مفصل بکار رفت. ستون به عنوان تکیه گاه به کف صلب با پیچ و مهره متصل شده و نیرو توسط یک جک که به یک بارسنج وصل بود به نمونه ها اعمال گردید برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیر هنگام اعمال بار جانبی، در دو طرف تیر مهار جانبی استفاده شد. برای اندازه گیری تغییر مکان نوک تیر از تغییر مکان سنج استفاده گردید. ناحیه مفصل پلاستیک تیر برای اندازه گیری تغییر شکل قطری (اعوجاج برشی) و قائم (انحنا ی خمشی) تجهیز شد (شکل ۲).



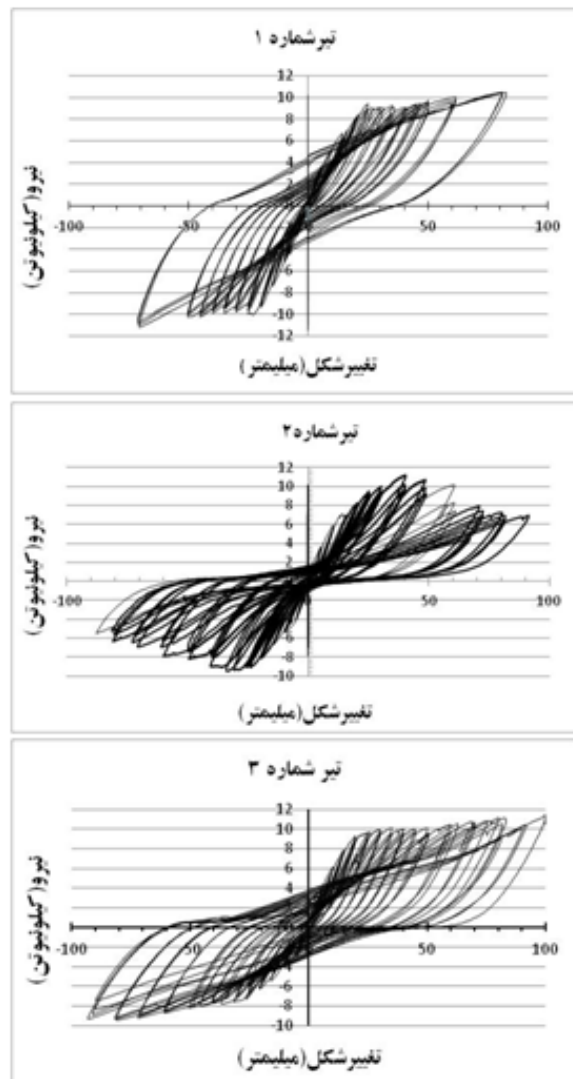
شکل ۱- شما تیک از نمونه



شکل ۲- نمونه تحت آزمایش

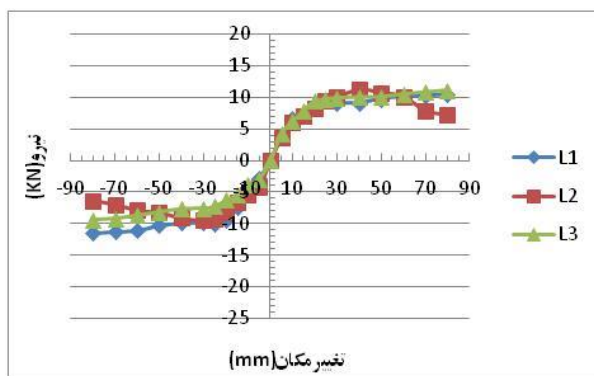
۴- بررسی نتایج آزمایش

نمودار هیستریزس نیرو-تغییر مکان نوک نمونه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی بار تغییر شکل نوک نمونه‌ها

آزمایش ترک‌های کوچک در وجه کششی تیر در ناحیه اتصال تیر به ستون شروع به تشکیل شدن کردند. تحت اثر افزایش کرنش کششی، ترک‌ها عریض‌تر شدند که این پدیده مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد. این کرنش‌های کششی باعث ضعیف شدن بتن در فشار می‌شوند، به گونه‌ای که مقاومت فشاری بتن نمونه کمتر از مقاومت فشاری بتن در آزمایش استاندارد می‌شود [۱۵]. با ادامه آزمایش و رسیدن به سیکل‌های تغییر شکل بالا، ترک‌های کششی با باربرداری بسته نشدند و نیز ترک‌های مایل در جان تیر ایجاد شدند. ترک‌های کششی وجه جدید کششی به ترک‌های برشی و ترک‌های کششی نیم سیکل قبلی وصل شدند. با ادامه آزمایش به تدریج بتن ناحیه فشاری محل اتصال تیر خرد شد و میلگرد طولی در این ناحیه نمایان گردید و بقیه تیر مانند یک المان صلب حول این ناحیه که مانند یک کاسه مقعر بود دوران کرد. شکل این ناحیه خرابی که مانند یک کاسه مقعر با شیب ملایم بود نشان می‌داد که مکانیزم خرابی ترکیبی از خمش و برش می‌باشد.



شکل ۶- پوش حلقه‌های هیستریزس منحنی بار-تغییر شکل نوک نمونه‌ها (L1: نمونه اول، L2: نمونه دوم، L3: نمونه سوم)

به دلیل شیب ملایم ناحیه خرابی می‌توان حدس زد که تأثیر شکست خمشی بیشتر از شکست برشی است (شکل ۷). در این کار تجربی تمامی تیرها به ظرفیت خمشی رسیدند. بعد از رسیدن به ظرفیت مقاومت خمشی، ترک‌های قطری در گره اتصال ایجاد و شروع به باز شدن کردند.

۴-۳- استهلاک انرژی

تحمل یک رخدادهای لرزه‌ای برای سازه‌ها به ظرفیت استهلاک انرژی آن‌ها بستگی زیادی دارد. هر چه انرژی بیشتری مستهلک گردد، عملکرد نمونه بهتر می‌باشد.

۴-۱- کاهش مقاومت

در شکل (۶) پوش حلقه‌های هیستریزس منحنی بار-تغییر مکان نوک نمونه‌ها نمایش داده شده است. با توجه به شکل در نمونه‌های ۱ و ۳ کاهش مقاومت ملاحظه نمی‌گردد.

۴-۲- تفسیر مکانیزم خرابی

زوال مقاومت با توجه به پوش حلقه‌های هیستریزس برای هر نمونه مورد بحث قرار می‌گیرد. برای دقت بحث نیاز است که نوع مکانیزم شکست شناخته شود. برای تمام نمونه‌ها در مراحل اولیه

غیرالاستیک در هر سیکل نوسان (سطح بسته چرخه) را برابر انرژی کرنشی سیستم معادل با رفتار الاستیک می‌گیرند [۱۶]. برای یک چرخه، میرایی ویسکوز معادل از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\xi_{eqi} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_i}{E_{si}} \quad (1)$$

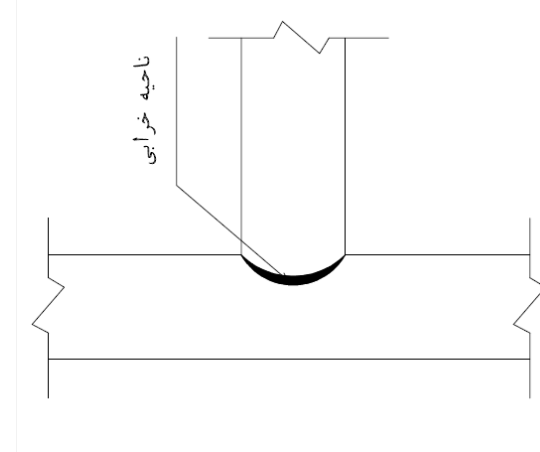
که در رابطه بالا ξ_{eqi} ضریب میرایی ویسکوز معادل برای چرخه E_i انرژی مستهلک شده در چرخه و برابر با مساحت حلقه بسته چرخه است و E_{si} انرژی الاستیک مستهلک شده در چرخه است. در شرایط آزمایش شبه استاتیک، فرکانس طبیعی نمونه برابر فرکانس تحریک نیست اما با این وجود در میان محققین میرایی ویسکوز معادل به عنوان یک تقریب رضایت‌بخش مورد قبول واقع شده است [۱۶]. ضرایب میرایی ویسکوز معادل تا لحظه پایان آزمایش برای چرخه‌ها محاسبه شده و در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- ضرایب میرایی ویسکوز معادل نمونه‌ها ξ_{eqi} %

دامنه چرخه (میلی‌متر)	نمونه اول (L1)	نمونه دوم (L2)	نمونه سوم (L3)
۵	۶	۵/۷	۱۱
۱۰	۷/۵	۸/۳	۷/۴
۱۵	۵	۵/۶	۵/۳
۲۰	۴/۶	۴/۷	۶/۴
۲۵	۸	۶/۴	۹
۳۰	۱۲	۸	۱۲/۴
۴۰	۱۸	۱۱/۷	۱۷
۵۰	۱۹/۵	۱۲/۶	۲۲
۶۰	۲۵/۵	۱۹	۲۵
۷۰	۲۸/۵	۱۵	۲۷
۸۰	۲۹	۱۵/۷	۲۷

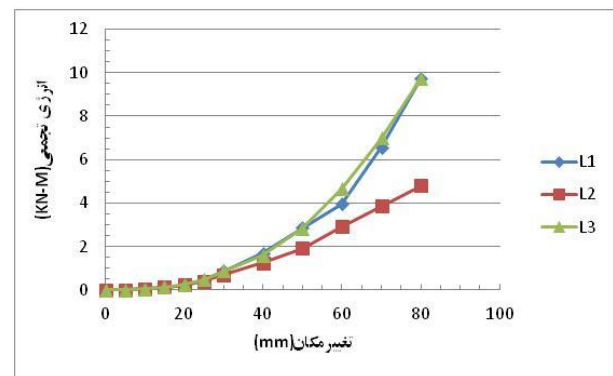
۴-۵- شکل پذیری

شکل‌پذیری ظرفیت یک عضو یا سازه برای تحمل تغییر شکل غیرالاستیک بدون کاهش محسوس در سختی و یا مقاومت می‌باشد. تعریف عبارت اخیر احتیاج به حدهای قابل استفاده برای سختی و یا مقاومت دارد. بنابراین شکل‌پذیری منطبق بر این حدود



شکل ۷- ناحیه خرابی انتهایی تیر

یک روش سنجش انرژی مستهلک شده عبارت از محاسبه مساحت سطح بسته حلقه هیستریزس در نمودار بار-تغییر شکل می‌باشد که استهلاک تجمعی انرژی (جمع استهلاک انرژی) نامیده می‌شود. استهلاک تجمعی انرژی برابر کل انرژی مستهلک شده توسط نمونه تا نقطه شکست اسمی می‌باشد که از جمع مقادیر قدر مطلق مساحت بسته نمودار بار-تغییر شکل به دست می‌آید. معمولاً هرچه تعداد چرخه‌های بارگذاری افزایش یابد، انرژی مستهلک شده تجمعی بطور یکنواخت افزایش می‌یابد. استهلاک تجمعی انرژی نمونه‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸- استهلاک تجمعی انرژی (L1: نمونه اول، L2: نمونه دوم، L3: نمونه سوم)

۴-۴- میرایی ویسکوز معادل

برای یک سازه غیرالاستیک، جذب انرژی حاصل از رفتار هیستریزس می‌تواند به سادگی توسط ضریب میرایی ویسکوز معادل نمایش داده شود و فرض شود که سازه رفتار الاستیک دارد. برای تعیین میرایی ویسکوز معادل، انرژی تلف شده در سیستم

بنابراین ظرفیت خمشی و برشی تیرها عبارتند از:

$$M_n = 14 \text{ KN.M}$$

$$V_n = \frac{M_n}{l} = \frac{14}{1.35} = 10.38 \text{ KN}$$

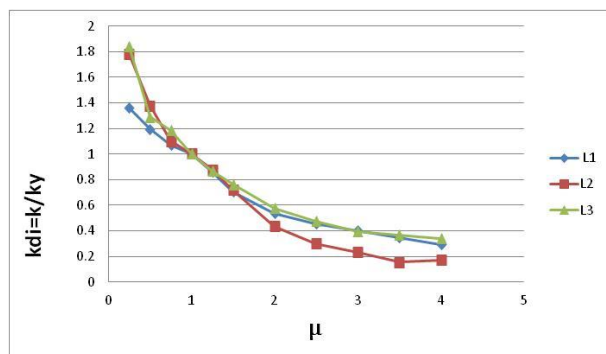
متوسط مقاومت نمونه‌ها در آزمایش $V_n = 10.5 \text{ KN}$ بدست آمد.

۴-۷- زوال سختی

سختی یک مشخصه کلیدی در اطمینان و پایداری سازه می‌باشد. زوال سختی از خواص المان‌های بتن مسلح تحت اثر بار چرخه‌ای می‌باشد. برای هر حلقه، سختی سکانتی عبارت از نسبت حداکثر نیرو (Q) به تغییرمکان مربوطه (δ) است. زوال سختی نشانگر تغییرات سختی سکانتی چرخه‌های بارگذاری برحسب تغییر شکل اعمالی بر المان است. نسبت زوال سختی برای چرخه I از رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$K_{di} = \frac{Q}{\delta} \quad (4)$$

عامل مهمی که بر نرخ زوال سختی اثر می‌کند نسبت دهانه برشی به عمق است، که نرخ زوال را افزایش می‌دهد. زوال سختی نسبت به سختی منطبق به شروع جاری شدن میلگرد طولی در کشش مقیاس می‌شود. همانطور که از شکل (۹) ملاحظه می‌شود نسبت سختی سکانتی در پایان آزمایش به سختی سکانتی در شروع جاری شدن برای تمام نمونه‌ها ۰/۲۵ گردید.



شکل ۹- زوال سختی نمونه‌ها برحسب شکل پذیری (L1: نمونه

اول، L2: نمونه دوم، L3: نمونه سوم)

۴-۸- صلیبیت خمشی

برای منظور پیش‌بینی نیاز و ظرفیت لرزه‌ای سازه، نیاز به دانستن مقدار صلیبیت خمشی مؤثر المان است. روش‌های حاضر بر اساس کارهای محققین بر روی بتن معمولی می‌باشد [۱۷، ۱۸، ۱۹]. برای تحلیل لرزه‌ای و طراحی، اختلاف سختی در رفتار قبل و بعد از

می‌تواند شکل‌پذیری قابل استفاده نامیده شود و در روند طراحی استفاده شود. شکل‌پذیری تعریف عمومی و یا اندازه‌گیری عمومی ندارد و معمولاً توسط اندیس شکل‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود که نسبت تغییر شکل نهایی به تغییر شکل در جاری شدن است.

اندیس شکل‌پذیری از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta}{\delta_y} \quad (2)$$

δ_y تغییرمکان در شروع جاری شدن و δ حداکثر تغییرمکان برای چرخه مورد نظر است که سه تا جابجایی در نظر گرفته می‌شوند که عبارتند از ظرفیت نهایی (δ_u)، شکست اسمی و انتهای آزمایش (δ_{end}) که برای تحقیق حاضر مقادیر مربوطه در جدول (۳) ارائه شده‌اند (آزمایش تا شکست تیرها ادامه نیافت).

جدول ۳- جابجایی جاری (δ_y) شدن، نهایی (δ_u) و پایان

آزمایش (δ_{end}) نوک نمونه‌ها (میلی‌متر)

نمونه	جهت مثبت			جهت منفی		
	δ_y	δ_u	δ_{end}	δ_y	δ_u	δ_{end}
L1	۲۰	۸۰	۸۰	-۲۰	-۸۰	-۸۰
L2	۲۰	۴۰	۸۰	-۲۰	-۳۴	-۸۰
L3	۲۰	۸۰	۸۰	-۲۰	-۸۰	-۸۰

مقادیر شکل‌پذیری تغییرمکانی نمونه‌ها (متوسط جهت مثبت و منفی) در جدول (۴) نشان داده شده‌است.

جدول ۴- شکل‌پذیری در حالت ظرفیت نهایی (μ_u) و پایان

آزمایش (μ_{end})

نمونه	μ_u	μ_{end}
L1	۴	۴
L2	۱/۸۵	۴
L3	۴	۴

۴-۶- برآورد مقاومت خمشی

برای یک مقطع بتنی با میلگرد کششی در صورتی که فولادها در لحظه شکست تسلیم شده باشند، ظرفیت خمشی مطابق آیین‌نامه ACI 318-05 از رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$M_n = A_s f_y \left(d - 0.59 \frac{A_s f_y}{f'_c b} \right) \quad (3)$$

برای تحقیق حاضر:

$$A_s = 226 \text{ mm}^2, \quad f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$f'_c = 27 \text{ MPa} \quad d = 165 \text{ mm}, \quad b = 200 \text{ mm}$$

تغییر مکان ۵ میلی متر تقسیم گردید که مقادیر مذکور در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶- مقادیر ضریب ترک خوردگی تیرها (R)

نمونه	نمونه اول	نمونه سوم
R	۰/۳۳	۰/۳۶

۵- بررسی عددی با استفاده از برنامه ABAQUS

نمونه‌های مورد آزمایش با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی گردیده و نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. پارامترهای رفتار مصالح برای مدل‌سازی در ادامه شرح داده می‌شود.

۵-۱- تعریف رفتار بتن در نرم‌افزار [۲۱]

تعیین رفتار غیرخطی بتن مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی سازه‌های بتن آرمه است. در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، رفتار بتن را می‌تواند به سه روش مدل ترک پخشی، مدل شکست ترد و مدل خسارت پلاستیک بتن تعریف کرد. در مدل خسارت پلاستیک بتن فرض بر این است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جنبه اصلی مکانیزم گسیختگی بتن می‌باشد و برای مدل‌سازی شکست مصالح ترد تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای (کشش و فشار متناوب) طراحی شده است به طوری که امکان بازیابی سختی در طی بارهای رفت و برگشتی وجود دارد. مدل خسارت پلاستیک بتن، حالت تعمیم‌یافته معیار شکست دراگر-پراگر می‌باشد. این معیار یک سطح شکست مخروطی دارد و یکی از نظریه‌های قوی در مدل‌سازی شکست بتن آرمه است [۲۲، ۲۳].

برای مدل‌سازی بتن از المان C3D20 Solid استفاده شده است. المان ۲۰ گرهی دارای انعطاف پذیری لازم برای مدل کردن المان‌های خمشی هستند.

برای معرفی سطح تسلیم در نرم افزار ABAQUS لازم است تا پارامترهای مربوط به آن در برنامه تعریف شوند. این پارامترها که در ادامه به طور خلاصه به آن‌ها اشاره می‌شود برای مشخص شدن تابع تسلیم مورد استفاده در نرم افزار ضروری‌اند.

K_c : شکل صفحه انحراف با ضریبی بانام K_c تعیین می‌شود. این ضریب نشان‌دهنده نسبت فاصله بین محور هیدرواستاتیک با نصف

ترک خوردگی نادیده گرفته می‌شود و فقط اختلاف بین رفتار قبل و بعد از جاری شدن در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. بنابراین رفتار خمشی المان را می‌توان به صورت یک مدل دوخطی در نظر گرفت که در آن نقطه جاری شدن معادل جاری شدن لایه بیرونی میلگرد طولی است. صلیبت خمشی مؤثر عبارتست از شیب خطی که نقطه مبدا را به نقطه جاری شدن در نمودار لنگر انحنا وصل می‌کند. صلیبت خمشی واقعی بین صلیبت خمشی ترک نخورده و صلیبت خمشی ترک خورده قرار دارد. بنابراین صلیبت خمشی مؤثر اثر سخت‌شدگی کششی را در نظر می‌گیرد. صلیبت خمشی مؤثر از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$E_c I_e = \frac{M_y}{\phi_y} \quad (5)$$

M_y و ϕ_y عبارت از لنگر و انحنا در شروع جاری شدن است. مقادیر لنگر و انحنا از روی نتایج آزمایش محاسبه گردیده و مقادیر صلیبت خمشی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف در جدول (۵) نشان داده شده است (برای نمونه ۲ تغییر مکان سنج‌های مربوط به انحنا کار نکردند).

جدول ۵- مقادیر صلیبت خمشی (کیلو نیوتن متر مربع) نمونه‌ها در

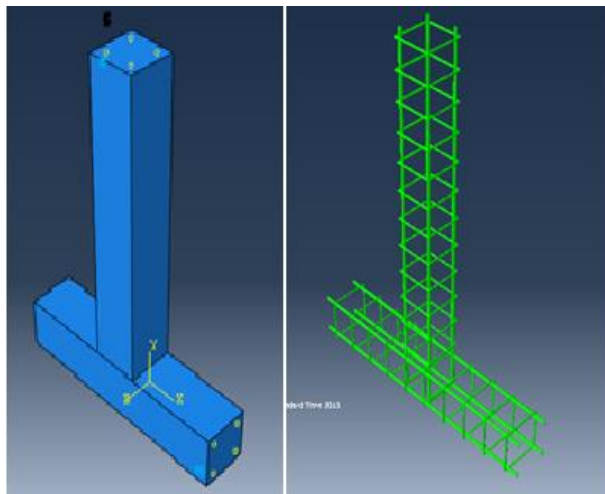
چرخه‌های مختلف

دامنه چرخه (میلی متر)	نمونه اول	نمونه سوم
	صلیبت خمشی	صلیبت خمشی
۵	۶۹۵/۸	۸۰۰/۵
۱۰	۵۰۲/۵	۶۲۶/۳
۱۵	۴۶۳/۸	۵۶۵/۴
۲۰	۳۳۷/۷	۴۶۱/۳
۲۵	۲۲۶/۳	۲۹۱/۳
۳۰	۱۵۹/۷	۲۱۵
۴۰	۱۰۵/۵	۱۳۴/۷
۵۰	۸۰/۹	۱۱۴/۷

نسبت صلیبت خمشی مؤثر ($E_c I_e$) به صلیبت خمشی ترک نخورده کل مقطع ($E_c I_g$) را با R نشان می‌دهند. برای تیرهای با سطح مقطع مستطیلی مقدار R بین ۰/۳ الی ۰/۵ تغییر می‌کند برای تعیین R مقدار EI در سیکل تغییر مکان ۲۵ میلی متر را به EI سیکل

بازیابی سختی: بازیابی سختی بتن، متغیری است که در رفتار چرخه‌ای باید مدنظر قرار داده شود. متغیر بازیابی سختی فشاری به منظور بسته شدن ترک‌های ایجاد شده در ماده ناشی از تغییر حالت بار از کشش به فشار تحت بار چرخه‌ای تعریف می‌گردد. در این تحقیق متغیر بازیابی سختی فشاری برابر 0.3 و متغیر بازیابی سختی کششی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

مدل استفاده شده و نحوه میلگردگذاری در ABAQUS در شکل (۱۰) آورده شده است. برای دیدن اثر باریک‌شدگی، در محل اتصال تیر به ستون یک ترک در مدل تعریف شده است. در حقیقت قسمت بتن المان را در دو قسمت مجزاء تیر و ستون مدل شده که در محل اتصال به صورت صلب به هم وصل شده‌اند. درجات آزادی پائین نمونه در سطح تماس با زمین بسته شد و انتهای آزاد تیر تحت اثر تغییر شکل اعمالی قرار گرفت.



شکل ۱۰ - مدل استفاده شده ABAQUS

مقاومت جاری شدن فولاد 400 مگاپاسکال و مقاومت نهایی آن 620 مگاپاسکال منظور گردید.

منحنی تنش-کرنش پلاستیک: برای تعریف رفتار فشاری بتن با استفاده از مرجع [۵] و براساس رابطه پیشنهادی مندر از رابطه (۷) استفاده گردید (شکل ۱۱). برای معرفی منحنی تنش-کرنش پلاستیک به نرم‌افزار کرنش خطی متناظر با ماده آسیب‌نندیده برابر کرنش متناظر با تنش $0.5 f'_c$ در نظر گرفته شد (شکل ۱۲).

$$f_c = f'_{cc} \left[\frac{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right) * kr}{kr - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^{kr}} \right] \quad (7)$$

النهار فشاری و نصف النهار کششی است. در این تحقیق، طبق توصیه نرم افزار، مقدار این ضریب 0.666 تعریف شده است.

زاویه اتساع (ψ): زاویه اتساع رابطه بین کرنش تغییر حجمی و کرنش برشی را بیان می‌کند. هنگامی که ψ برابر صفر باشد، ماده هیچ‌گونه کرنش تغییر حجمی ندارد. به عبارتی ψ زاویه بین خط مماس به سطح خرابی و محور هیدرواستاتیک در صفحه نصف النهار می‌باشد و معمولاً بین 30 الی 40 درجه است. در این تحقیق $30/5$ درجه بکار برده شده است.

پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک: عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن می‌باشد. مقدار پیش فرض آن 0.1 است.

ویسکوزیته: این مؤلفه برای همگرایی بهتر تحلیل‌ها به کار می‌رود. برای ویسکوزیته عدد خاصی مدنظر نیست و مقدار آن تأثیر زیادی در رفتار بتن ندارد. در این پژوهش، مقدار ویسکوزیته برابر 0.001 در نظر گرفته شده است.

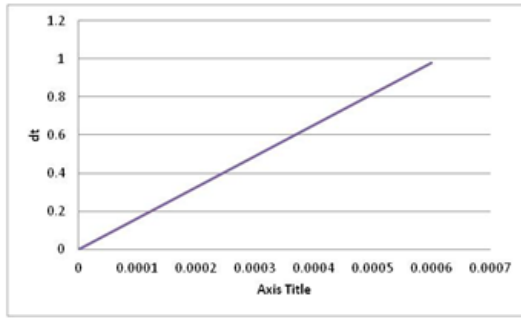
نسبت مقاومت در تنش دومحوره به تنش تک‌محوره فشاری $\left(\frac{f_{b0}}{f_{c0}}\right)$: از آزمایش‌های انجام گرفته معمولاً این نسبت را برابر $1/16$ در نظر می‌گیرند.

تعریف رفتار کششی بتن در نرم‌افزار: به منظور مدل‌سازی رفتار کامل کششی بتن آرمه، یک رابطه تنش-کرنش پس از گسیختگی بتن تحت کشش به کار می‌رود.

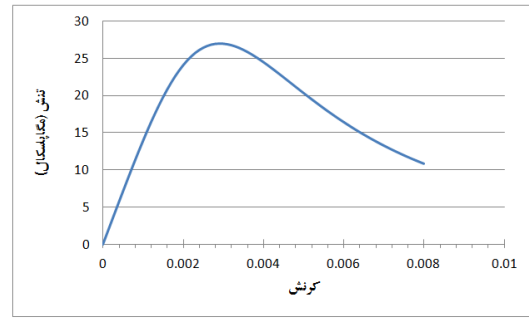
تعریف رفتار فشاری بتن در نرم‌افزار: به منظور تعریف رابطه تنش-کرنش فشاری بتن، کاربر باید اطلاعات مربوط به مقاومت فشاری (σ_c)، کرنش غیرخطی (ε_c^{tn}) متناظر با مقادیر تنش و متغیر آسیب فشاری (d_c) و کرنش متناظر با آن آسیب را در نرم‌افزار تعریف نماید. مقادیر کرنش واقعی با استفاده از رابطه (۶) باید به کرنش غیرخطی تبدیل شوند:

$$\varepsilon_c^{tn} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \quad (6)$$

که در آن ε_{oc}^{el} کرنش خطی متناظر با ماده آسیب‌نندیده می‌باشد. متغیر آسیب: متغیر آسیب کششی (d_t)، به صورت نسبت کرنش ترک‌خوردگی به کرنش نهایی تعریف می‌گردد. همچنین متغیر آسیب فشاری (d_c)، به صورت نسبت کرنش غیرخطی به کرنش نهایی تعریف می‌گردد. در صورت عدم تعریف آسیب‌های کششی و فشاری ماده به صورت پلاستیک رفتار می‌کند.

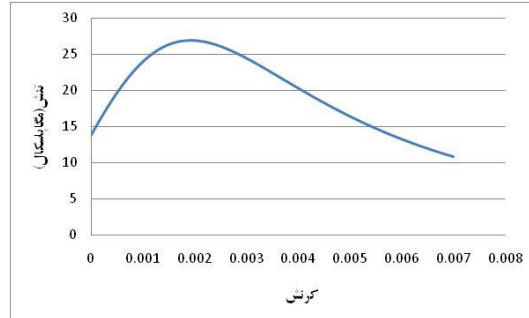


شکل ۱۵- متغییر آسیب برای رفتار کششی بتن



شکل ۱۱- منحنی تنش- کرنش بتن در فشار

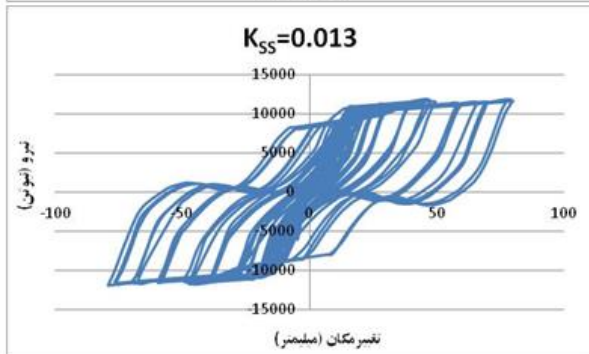
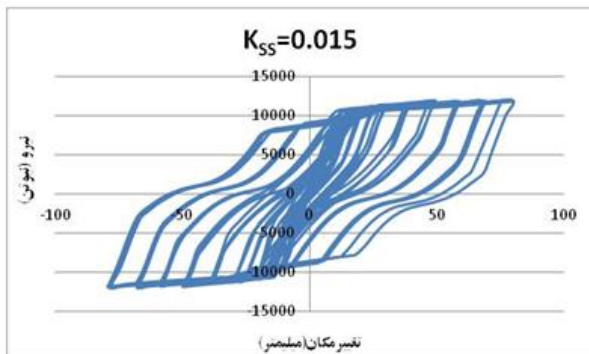
برای اتصال تیر به ستون با خطا و آزمون سختی‌های عمودی و برشی اتصال به ترتیب $k_{nn} = 0.16 N/mm^2$ و $k_{ss} = 0.015 N/mm^2$ اعمال گردید. یک بار هم $k_{ss} = 0.013 N/mm^2$ در نظر گرفته شد. نمودار هیستریزس بار-تغییر مکان برای این دو حالت در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می‌شود با کاهش مقدار سختی برشی به مقدار $k_{ss} = 0.013$ در محل اتصال مقدار باریک‌شدگی زیاد شد.



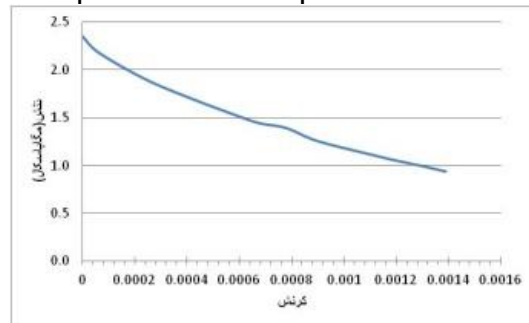
شکل ۱۲- منحنی تنش- کرنش پلاستیک معرفی شده به نرم افزار

منحنی تنش-کرنش کششی بتن هم مطابق شکل (۱۳) در نظر گرفته شد. متغییر آسیب در فشار از رابطه (۸) [۲۴] و کشش به صورت عددی و به صورت اشکال (۱۴) و (۱۵) اعمال گردید.

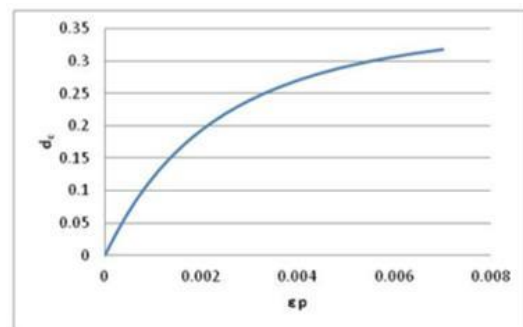
$$d_c = \frac{155\varepsilon}{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{0.0035}\right)^{1.08}\right]^{1.08}} \quad (8)$$



شکل ۱۶- نمودار هیستریزس بار-تغییر شکل بدست آمده از نرم افزار ABAQUS برای سختی‌های متفاوت



شکل ۱۳- منحنی تنش- کرنش بتن در کشش



شکل ۱۴- متغییر آسیب برای رفتار فشاری بتن

۶- نتیجه گیری

- متوسط نسبت سختی سکانتی در سیکل با دامنه ۸۰ میلی متر به سختی سکانتی در شروع جاری شدن (سیکل با دامنه ۲۰ میلی متر)

- [6]. Nmai, C. K., and Darwin, D. (1984). "Cyclic Behaviour of Lightly Reinforced Concrete Beams." SM Report No. 12, University of Kansas Centre for Research, 139 pp.
- [7]. Sasmal S. Ramanjaneyulu K. Balthasar Novák and N. Lakshmanan. "Analytical and experimental investigations on seismic performance of exterior beam-column subassemblages of existing RC-framed building" *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2013; 42:1785-1805.
- [8]. Zhao X, Wu Y, Leung A, Fai H.(2011), "Plastic Hinge Length in Reinforced Concrete Flexural Members", *Procedia Engineering*, (The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction-EASEC12), pp. 1266-1274.
- [9]. Chutarat N, Aboutaha R S.(2003), "Cyclic Response of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints Reinforced with Headed Bars Experimental Investigation", *ACI Structural Journal*, Vol., 100(2), pp. 259-64.
- [10]. Durrani A J, Wight J K.(1985), "Behavior of interior beam-to-column connections under earthquake-type loading", *American Concrete Institute Journal of Proceedings*, Vol. 82(3), pp. 343-49.
- [11]. Ehsani M R, Wight J K.(1985), "Exterior reinforced concrete beam-to-column connections subjected to earthquake type loading", *American Concrete Institute Journal of Proceedings*, Vol. 82(4), 492-99.
- [12]. Ahmad, SH, Shah SP.(1985), "Behavior of hoop confined concrete under high strain rates, " *American Concrete Institute Journal of Proceedings*, Vol. 82(5), pp. 634-47.
- [13]. Saptarshi S, Ramanjaneyulu K.(2013), Novak B, Lakshmanan N, "Analytical and experimental investigations on seismic performance of exterior beam-column subassemblages of existing RC-framed building," *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol.42(12), pp. 1785-1805.
- [14]. FEMA-273,(1997) ,"NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Building Seismic Safety Council, Washington, DC.
- [15]. Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1986). "Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear." *Journal of The American Concrete Institute*, 83(2), pp. 219-231.
- [16]. Chopra, A. K. (2006), *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 912 pp.345
- [17]. ACI 318-05 (2005), "Building Code Requirements for Structural Concrete," (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), American Concrete Institute, USA.

برای نمونه‌ها ۲۵٪ شد(سختی مستقل از مقاومت با تکرار چرخه تغییرمکان و افزایش دامنه چرخه‌ها به صورت لگاریتمی کاهش یافت).

۲- در نمودار نیرو-تغییرمکان بعد از جاری شدن نمونه‌ها تا رسیدن به شکل‌پذیری ۴، با افزایش دامنه سیکل‌ها کاهش یا افزایش محسوسی در مقاومت نمونه‌ها مشاهده نگردید.

۳- میرایی ویسکوز معادل نمونه‌های بتن سبک‌دانه و معمولی شبیه هم بوده و با افزایش تعداد چرخه‌ها، با شیب ملایمی افزایش می‌یابد.

۴- ضریب ترک‌خوردگی ممان اینرسی نمونه‌های بتن سبک‌دانه ۰/۳۳ بدست آمد که شبیه تیرهای بتن معمولی می‌باشد.

۵- متوسط نیروی برشی آزمایشگاهی نمونه‌ها برابر نیروی برشی اسمی محاسباتی بدست آمد.

۶- منحنی هیستریزس بار-تغییرمکان حاصل از نرم‌افزار ABAQUS شبیه نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

۷- تیرهای مسلح ساخته شده از بتن سبک‌دانه با نسبت میلگرد طولی کم، شکل‌پذیر می‌باشند.

۷- مراجع

- [1]. Ahmad, S., Barker, R., "Flexural Behavior of Reinforced High Strength Lightweight Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, v.88, No.1 , Jan-Feb. 1991, pp. 69-77.
- [2]. Shuaib H. Ahmad and Jaime Batts " Flexural Behavior of Doubly Reinforced high-Strength Lightweight concrete Beams with Web reinforcement. *ACI Structural Journal/ May-June 1991.*
- [3]. H S Liml, T H Wee, M A Mansur and K H Kong "FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE BEAMS" *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006)*, 5 - 6 September 2006, Kuala Lumpur, Malaysia A-68.
- [4]. Eng. Mizgan Paraschiva" BEHAVIOR AND DESIGN OF LIGHTWEIGHT EINFORCED CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO SHEAR" Ph.D. Thesis Summary.
- [۵]. انتظاری، علیرضا (۱۳۹۰). بررسی رفتار سازه‌ای بتن سبک‌دانه. پایان‌نامه دکتری تخصصی مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی عمران گروه سازه دانشگاه تبریز.

- [18]. Mehanny, S. S. F., Kuramoto, H., and Deierlein, G. G. (2001), "Stiffness Modelling of Reinforced Concrete Beam-Columns for Frame Analysis," *ACI Structural Journal*, 98(2), pp. 215-225.
- [19]. Paulay, T., and Priestley, M. J. N. (1992). "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," John Wiley & Sons, 744 pp.351
- [20]. CEB.(1996), "RC Frames under Earthquake Loading: State of the Art Report," Thomas Telford: London, pp. 316.
- [21]. ABAQUS Inc,(2010), " ABAQUS 6.10 User's Manual", SIMULIA, U.S.A.
- [22]. Lubliner, J., Oliver J. Oller S. and Onate E. (1989) "A Plastic- Damage Model for Concrete," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, pp. 299329.
- [23]. Lee, J., and Fenves, G. L.(1998) "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No.8, pp. 892-900.
- [24]. Goto,Y., M.ASCE, Mizuno,K., Kumar,GH. (2012)" Nonlinear Finite Element Analysis for Cyclic Behavior of Thin-Walled Stiffened Rectangular Steel Columns with In-Filled Concrete" *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING* © ASCE DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000504.

An Overview of the New Approach in Frost Durability Evaluation of Concrete Structures

Farrokh Aghamohammadzadeh

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Hassan Afshin*

Civil Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

Masoud Nekooei

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Due to brittle of lightweight aggregate concrete, investigation the behavior of lightweight aggregate concrete beams and connection under cyclic loading is required for the application of this type of concrete in structures. This study is focused on the experimental and numerical investigation of the behavior of the beams constructed of scoria lightweight aggregate concrete. Three numbers of reinforced cantilever beams are made with lightweight aggregate concrete. In this research, performance of the plastic hinge in the reinforced cantilever beams made of lightweight aggregate concrete is investigated based on the ductility reduction, energy absorption, stiffness deterioration and strength deterioration. It was concluded that beam stiffness is reduced with increase in the amplitude of cycles. Also, strength is not reduced with increase in amplitude of the cycles until reaching ductility 4. In displacement cycles with the amplitude of 80mm, equivalent to ductility 4, no significance decrease in the strength is observed in hysteresis diagram. With respect to ratio of the shear span to significant depth of the test specimens, the flexural behavior is dominant and the beams sustain ductility of greater than 4. In the second stage the samples by using with the ABAQUS software was modeled and similar to the tests were applied under displacement control. It is observed that hysteresis curve of numerical analyze can be just as testing. As a result the reinforced lightweight aggregate concrete beams have ductile behavior.

Keywords: Lightweight aggregate Concrete, Hysteretic Diagram, Cyclic Loading, Stiffness Reduction, Ductility.

* Corresponding Author: Hafshin@sut.ac.ir

