

بررسی آزمایشگاهی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دو سرگیردار تحت بار چرخه‌یی و یکنوا

ابوالفضل عربزاده* (دانشیار)

روح الله هیزجی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۷۳-۶۷-۲-۳۵، شماره ۲/۴، ص. ۲۳-۶۷)

تیرهای عمیق بتن مسلح به دلیل هندسه، شرایط مرزی و رفتاری که در مقایسه با تیرهای معمولی دارند، نوع خاصی از تیرها محسوب می‌شوند. به عنوان مثال، فرض توزیع تنش - کرنش خطی در مقطع عرضی تیرهای مذکور معتبر نیست. در چند دهه‌ی اخیر، مطالعات گسترده‌یی بر روی تیرهای عمیق دو سر ساده انجام شده است، اما مطالعات کمی به تیرهای عمیق بتن مسلح دو سرگیردار و پیوسته اختصاص یافته است. در نوشتار حاضر، رفتار دو تیر عمیق بتن مسلح دو سرگیردار با شرایط یکسان (یکی تحت بار چرخه‌یی و دیگری تحت بار یکنوا) آزمایش و رفتار آن‌ها بررسی شده است. نتیجه‌ی آزمایش نشان داد که هر دو تیر به صورت برشی گسیخته شده و همچنین ظرفیت نهایی تیر تحت بار چرخه‌یی، کاهش چندانی نسبت به بارگذاری یکنوا نداشته است.

واژگان کلیدی: تیر عمیق، بتن مسلح، دو سرگیردار، بار چرخه‌یی، بار یکنوا.

۱. مقدمه

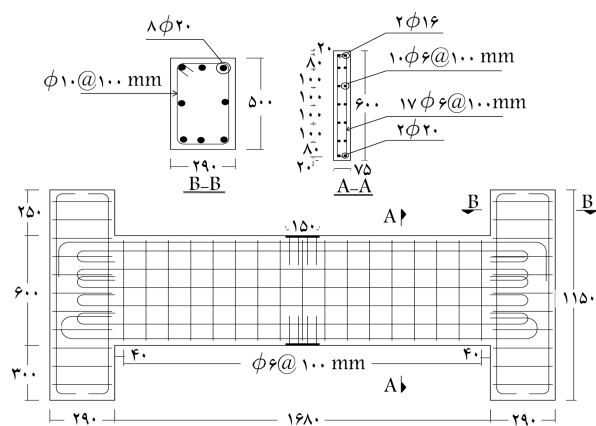
بسیاری از تیرهای بتن مسلح براساس نسبت دهانه به عمق به دو دسته‌ی تیرهای معمولی و تیرهای عمیق تقسیم می‌شوند. هنگامی که نسبت دهانه به عمق تیرها بزرگ باشد، رفتار سازه‌یی آن‌ها به صورت خمشی است و با کاهش نسبت ذکر شده، سختی برشی قابل توجه خواهد بود.^[۱] قابل ذکر است که رفتار تیرها تحت تأثیر عوامل دیگری نیز مانند: مقاومت بتن، خصوصیات آرماتورها، شرایط تکیه‌گاهی و نحوه‌ی اعمال بار است. براساس آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا^[۲]، تیرهای با نسبت دهانه به عمق کمتر از ۴، به عنوان تیرهای عمیق طبقه‌بندی می‌شوند و در آیین‌نامه مذکور، روش خرپایی برای طراحی تیرهای عمیق دو سر ساده پیشنهاد شده است. طبق مطالعات صورت گرفته، در هیچ یک از آیین‌نامه‌های بین‌المللی، روشی برای طراحی تیرهای عمیق بتن مسلح با تکیه‌گاه‌های دو سرگیردار یا نیمه‌گیردار ارائه نشده است. در سال‌های اخیر، مطالعات قابل توجهی بر روی تیرهای عمیق با تکیه‌گاه ساده انجام شده است. اما در خصوص تیرهای عمیق دو سرگیردار و پیوسته، پژوهش‌های بسیار کمتری صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات آرتورو^[۳] و همکاران (۲۰۱۷) در خصوص شکست برشی تیرهای پیوسته تحت بار چرخه‌یی اشاره کرد^[۴] با توجه به اینکه اخیراً تمایل به استفاده از تیرهای عمیق بتنی افزایش یافته است، احتمال به وجود آمدن شرایط تکیه‌گاهی گیردار برای تیرهای عمیق بتنی نیز افزایش یافته است. بنابراین نیاز به پژوهش‌های بیشتری بر روی تیرهای دو سرگیردار است.^[۵] همچنین

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۵، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۳

DOI:10.24200/J30.2018.5198.2214

برای بار یکنوا، قابل استفاده برای بار چرخه‌یی هم هستند.^[۷] بنتز^[۶] و همکاران (۲۰۱۰) نیز به آزمایش ۸ عدد تیر عمیق ساده در ۲ گروه پرداختند که شامل تیرهایی با طول دهانه‌ی متفاوت تحت بار چرخه‌یی و بار یکنوا بودند. هدف از آزمایش مذکور، تأثیر وجود خاموت‌ها در مقاومت تیرهای عمیق بود. ۴ تیر با خاموت و ۴ تیر عمیق دیگر بدون خاموت انتخاب شده بودند که نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که خاموت‌ها نقش به‌سزایی در مقاومت تیرهای



شکل ۱. جزئیات آرماتورگذاری و ابعاد نمونه‌های آزمایش شده.



شکل ۲. تقویت‌های صورت گرفته در محل اعمال بار.

میلی‌متر به همراه ۴ میلگرد نمره ۱۰ به صورت U شکل، جهت تقویت بیشتر به نمونه جوش شده و مطابق شکل ۲ در بالا و پایین آن کار گذاشته شده است. آرماتورگذاری هر دو نمونه کاملاً مشابه بوده و آرماتور فوقانی آن‌ها، ۲ عدد میلگرد آجدار نمره ۱۶ و آرماتور تحتانی ۲ عدد میلگرد آجدار نمره ۲۰ است. همچنین از ۱۷ عدد میلگرد ساده‌ی نمره ۶ به فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر در هر شبکه‌ی تیرهای نمونه استفاده شده است. آرماتورهای طولی ستون هم ۸ عدد میلگرد آجدار نمره ۲۰ و خاموت‌های آن‌ها نیز آرماتور آجدار نمره ۱۰ به فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر بوده است. مشخصات نمونه‌های آزمایش شده در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. بارگذاری

جهت بارگذاری یکنوا، بار خطی با سرعت خیلی کم و به طور یکنواخت به نمونه‌ی SM اعمال شده است. همچنین جهت اعمال بار چرخه‌ی به نمونه‌ی اول (SC) از روش کنترل تغییرمکان استفاده شده است که الگوی آن در دستورالعمل ATC-۲۴^[۱۲] ارائه شده است (شکل ۳). مراحل بارگذاری مطابق شکل ۳ به این صورت است که ابتدا ۳ سیکل جابه‌جایی به اندازه‌ی $\frac{1}{8}$ تغییرمکان جاری شدن تیر اعمال می‌شود. سپس ۳ سیکل دیگر به اندازه‌ی $\frac{1}{8}$ تغییرمکان جاری شدن تیر، جابه‌جایی وارد خواهد شد و در مرحله‌ی بعد، ۳ سیکل جابه‌جایی معادل تغییرمکان جاری شدن تیر، بار وارد می‌شود. به همین ترتیب تا ۳ مرحله‌ی دیگر در هر مرحله به اندازه‌ی تغییرمکان جاری شدن تیر به بارگذاری اضافه می‌شود. از مرحله‌ی چهارم به بعد، در هر مرحله ۲ سیکل بارگذاری اعمال می‌شود، تا نمونه گسیخته شود.

عمیق دارند. به طوری که وجود خاموت افزایش حدود ۲۰ تا ۶۰ درصدی در مقاومت تیرهای عمیق دارند. همچنین ظرفیت باربری تیرهای عمیق دارای کمیته‌ی خاموت یا بیشتر، تحت بار چرخه‌ی نسبت به بار یکنوا کاهش چندانی ندارد.^[۸] درخصوص ترمیم تیرهای عمیق بتنی پس از شکست، کلایتون^۱ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از میلگردهای پس کشیده‌ی SFRP موفق شدند به ظرفیتی بیشتر از حالت اولیه دست یابند.^[۹] همچنین ساتادرو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۳)، یک رابطه‌ی ضمنی برای تحلیل تیرهای عمیق تحت بار دینامیکی ارائه کردند.^[۱۰]

در نوشتار حاضر، رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دو سرگیردار تحت بار چرخه‌ی یکنوا به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. برای این منظور دو تیر کاملاً مشابه با نسبت دهانه به عمق ۲/۸ ساخته شده است که یکی تحت بار چرخه‌ی و دیگری تحت بار یکنوا آزمایش شده است. آزمایش‌های مذکور در آزمایشگاه سازی دانشگاه تربیت مدرس و در مقیاس $\frac{1}{8}$ انجام شده است. برای بررسی رفتار برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دو سرگیردار، تیر ذکر شده تحت بار چرخه‌ی از بالا و پایین آزمایش شد و در محل اعمال بار در بالا و پایین آن از دو عدد ورق فولادی استفاده شده است.

۲. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت مطالعه‌ی رفتار تیرهای عمیق تحت بار چرخه‌ی و یکنوا، دو نمونه‌ی کاملاً مشابه ساخته شده است، که نمونه‌ی اول با نام SC^{۱۲} تحت بار چرخه‌ی و نمونه‌ی دوم با نام SM^{۱۳} تحت بار یکنوا آزمایش شده‌اند. اندازه‌ی نمونه‌های آزمایش شده براساس امکانات آزمایشگاه و به گونه‌ی انتخاب شده است که مقیاس کردن آن‌ها تأثیری در نتایج نداشته باشد. مطابق پژوهش‌های نور^{۱۴} و بسول^{۱۵} با کاهش اندازه‌ی نمونه مخصوصاً در نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر از ۵۰ × ۱۰۰ میلی‌متر، مقاومت بتن و ضریب اصلاح افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقیاس کردن نمونه بین $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{4}$ خطایی در حدود $\pm 15\%$ به همراه دارد. این در صورتی است که نمونه‌هایی که تا ۶ برابر کوچک‌تر می‌شوند، نتایج نمونه به نتایج اصلی تغییری نمی‌کند.^[۱۱] بر این اساس اندازه‌ی نمونه‌های مورد مطالعه در نوشتار حاضر به مقدار بیشینه‌ی $\frac{1}{8}$ تیر واقعی انتخاب شده‌اند. بنابراین مقیاس کردن نمونه‌ها، تأثیری در نتایج نخواهد داشت.

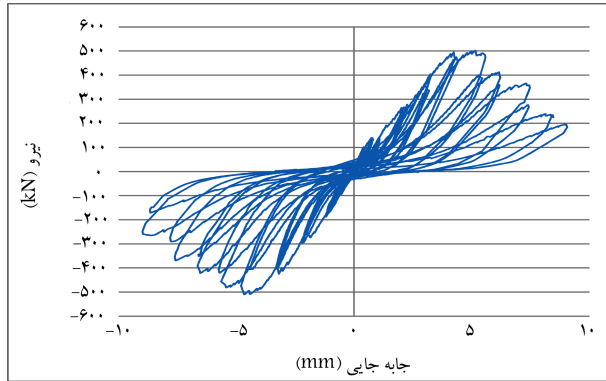
۱.۲. مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش شده، تیرهایی به دهانه‌ی ۱۶۸۰ میلی‌متر، ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۷۵ میلی‌متر هستند. جهت تأمین گیرداری تیرها، در دو انتهای آن‌ها از دو عدد بلوک بتنی با سطح مقطع ۲۹۰ × ۵۰۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۱۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است که هر کدام از دو بلوک مذکور به همراه ۱۲ عدد بولت نمره‌ی M۲۷ گرید ۸/۸ با مقاومت تسلیم ۸۸۰ مگاپاسکال به قاب صلب فولادی آزمایشگاه متصل شده است. مطابق مطالعات پیشین نویسندگان نوشتار حاضر،^[۵] دو عدد بلوک بتنی مذکور می‌توانند شرایط گیرداری کامل را برای تیر عمیق مورد آزمایش تأمین کنند. میزان پوشش بتن در بالا و پایین نمونه‌ها، ۲۰ میلی‌متر بوده و جزئیات آرماتوربندی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است (تمامی ابعاد نشان داده شده بر روی شکل بر حسب میلی‌متر است).

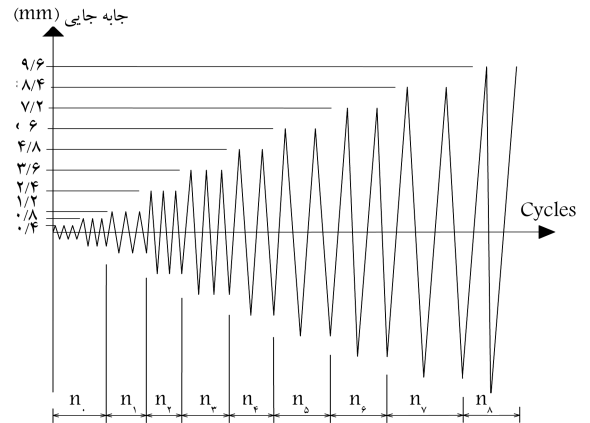
جهت جلوگیری از وقوع خرابی نمونه‌ها در اثر لهیدگی، یک ورق فولادی به طول ۱۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و عرضی برابر با ضخامت نمونه‌ها یعنی ۷۵

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایش شده.

نمونه	مشخصات نمونه‌ی مکعبی بتن		آرما توره‌های فوقانی		آرما توره‌های تحتانی		آرما توره‌های قائم جان		آرما توره‌های افقی جان		نوع بارگذاری
	$f_{CU} (MPa)$	$E (MPa)$	نوع آرما تور	$f_y (MPa)$	نوع آرما تور	$f_y (MPa)$	نوع آرما تور	$f_y (MPa)$	نوع آرما تور	$f_y (MPa)$	
SC	۴۳٫۸	۳۰۵۰۸٫۲	۲T۱۶	۵۵۵٫۹	۲T۲۰	۴۱۰	۲ × ۱۷φ۶	۳۷۴٫۲۷	۲ × ۵φ۶	۳۷۴٫۲۷	چرخه‌یی
SM	۴۲٫۱	۲۹۹۱۰٫۹	۲T۱۶	۵۵۵٫۹	۲T۲۰	۴۱۰	۲ × ۱۷φ۶	۳۷۴٫۲۷	۲ × ۵φ۶	۳۷۴٫۲۷	یکنوا



شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی وسط تیر نمونه‌ی اول (SC).



شکل ۳. الگوی بارگذاری چرخه‌یی.

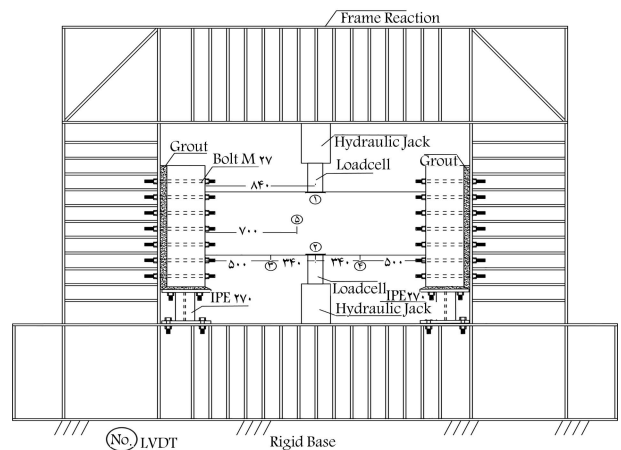
شدند و برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها از ۵ عدد LVDT^{۱۸} استفاده شده است که ۲ عدد از آن‌ها در وسط و در بالا و پایین تیر، ۲ عدد دیگر در پایین تیر و به فاصله‌ی ۵۰۰ میلی‌متر از بر تکیه‌گاه‌ها و LVDT پنجم نیز جهت نشان دادن جابه‌جایی‌های خارج از صفحه در بدنه‌ی تیر نصب شده است. همچنین جهت مشاهده‌ی بهتر موقعیت ترک‌های ایجاد شده، بدنه‌ی نمونه به صورت شبکه‌ی ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر علامت‌گذاری شده است.

۳. نتایج آزمایش

در بخش حاضر، رفتار تیر عمیق از نظر برش و همچنین منحنی نیرو - جابه‌جایی و الگوهای ترک بحث و بررسی شده‌اند.

۳.۱. منحنی نیرو - جابه‌جایی

با توجه به نتایج حاصل از نیروسنج‌ها و جابه‌جایی تیر، منحنی نیرو - جابه‌جایی وسط تیر نمونه‌ی اول (SC)، در شکل ۵ مشاهده می‌شود که مطابق آن بیشینه‌ی ظرفیت تیر در حدود جابه‌جایی ۵ میلی‌متر اتفاق افتاده و همچنین بیشینه‌ی ظرفیت تیر در بارگذاری از بالا، ۵۰۱ kN و تحت بارگذاری از پایین، ۵۰۱ kN بوده است. نتایج آزمایش اخیر نشان می‌دهد که منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ی اول، استهلاک انرژی کم (حلقه‌های هیستریزس نازک) دارند و کاهش جزئی بار وارد شده به تیر تحت تغییر مکان‌های یکسان در سیکل‌های متوالی، تغییر شکل‌های ماندگار خیلی کوچک و شکل‌پذیری کم دارند. همچنین جاری شدن آرما توره‌های عرضی مانع بسته شدن کامل ترک‌ها در حین باربرداری می‌شود، لذا بازشدگی عرض ترک‌ها در طول قطر اصلی تیر مشاهده می‌شود (دقیقاً در محل خاموت‌هایی که جاری می‌شوند). علت استهلاک انرژی کم در حلقه‌ها می‌تواند به دلیل رفتار برشی باشد، چون در رفتار خمشی، استهلاک انرژی زیاد است و برخلاف آن در رفتار برشی، استهلاک انرژی خیلی کمتر است. همچنین با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که سختی قبل از شکست تیر در حدود ۱۲۲ kN/mm و سختی بعد از شکست در



شکل ۴. شماتیک نصب تجهیزات جهت آزمایش نمونه‌ها.

علت تکرار سیکل‌ها به این دلیل است که نرم‌شدگی بتن در هر مرحله مشاهده شود.

باتوجه به آزمایش بارگذاری استاتیکی یکنواخت انجام شده بر روی نمونه‌ی مشابه تیر ذکر شده توسط سویدی و عربزاده،^[۷] تغییر مکان جاری شدن آن ۱٫۲ میلی‌متر است. بنابراین بارگذاری با ۰٫۴ میلی‌متر تغییر مکان آغاز شده و مطابق الگوی توضیح داده شده ادامه یافته است تا نمونه گسیخته شود. این بارگذاری توسط ۲ عدد پمپ هیدرولیکی در بالا و پایین تیر به همراه ۲ عدد نیروسنج^{۱۶} (جهت اندازه‌گیری مقدار بار وارده) نصب شده، اعمال می‌شود. در شکل ۴، به صورت شماتیک، نصب تجهیزات^{۱۷} جهت آزمایش نمونه‌های مورد نظر مشاهده می‌شود.

۳.۲. وسایل اندازه‌گیری

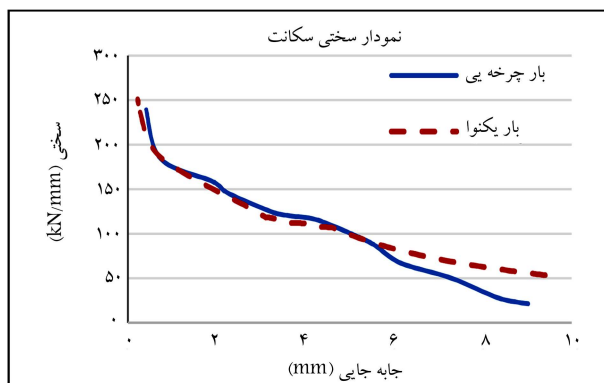
در هر نمونه، نیروهای وارد شده توسط ۲ عدد نیروسنج در محل اعمال بار اندازه‌گیری

مشاهده می‌شود که مطابق آن سختی سکانتی هر دو نمونه تا جابه‌جایی‌های قبل از شکست تیر، تقریباً یکسان است؛ اما در جابه‌جایی‌های بعد از شکست تیر، سختی سکانتی نمونه تحت بار چرخه‌یی نسبت به بار یکنوا کاهش یافته است.

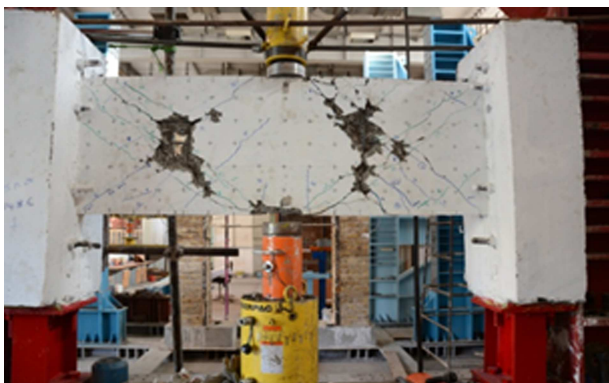
۲.۳. الگوی ترک خوردگی

تیر نمونه‌ی اول (SC) که مطابق الگوی بار ذکر شده در قسمت قبلی آزمایش شد، در ۳ مرحله‌ی تکرار سیکل اول دچار هیچ گونه ترکی نشد. اما در اولین تکرار سیکل دوم تحت نیروی ۱۳۰ کیلو نیوتن، اولین ترک از پایین به صورت قطری ایجاد شد. سپس با معکوس شدن جهت بارگذاری، ترک‌هایی عمود بر ترک‌های قبلی تحت نیروی ۱۳۷ کیلو نیوتن ایجاد شد. با ادامه‌ی روند بارگذاری چرخه‌یی، ترک‌های مذکور گسترش یافتند و ترک‌های جدید نیز اضافه شدند. نهایتاً الگوی ترک خوردگی نهایی تیر نمونه‌ی اول تحت بار چرخه‌یی مطابق شکل ۹ ایجاد شد که مطابق آن شکست تیر در اثر ترک‌های قطری اصلی است، که تحت بارگذاری از بالا و پایین، همدیگر را قطع کرده و در محل قطع ترک‌های قطری مذکور، بتن کاملاً خرد شده است.

ترک‌های ذکر شده تقریباً از لبه‌ی بیرونی ورقه‌ی بارگذاری شروع شده و تا محل تکیه‌گاه‌ها ادامه یافته‌اند که با محور اصلی تیر حدوداً زاویه‌ی ۴۵ درجه ساخته‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که سایر ترک‌های ایجاد شده تقریباً موازی ترک‌های قطری اصلی هستند که نشانگر شکست برشی تیر است. نکته‌ی قابل تأمل دیگر این است که مطابق شکل مذکور، ترک‌های ایجاد شده تحت بارگذاری از بالا، قرینه‌ی ترک‌های ایجاد شده تحت بارگذاری از پایین هستند.



شکل ۸. مقایسه‌ی نمودار سختی سکانتی تیر نمونه‌ی اول (SC) و نمونه‌ی دوم (SM).



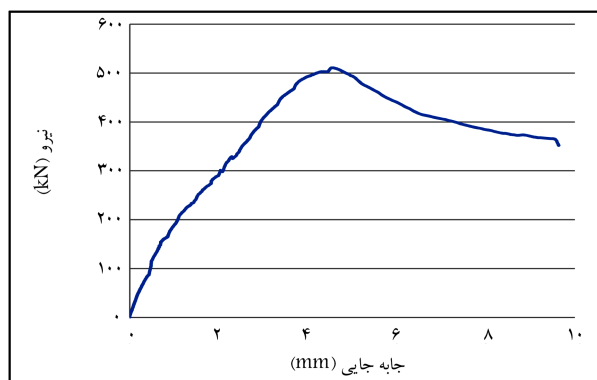
شکل ۹. ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ی اول (SC).

حدود 78 kN/mm است. به عبارتی بعد از شکست تیر، با افزایش ۱ میلی‌متر جابه‌جایی، مقاومت تیر 78 kN کاهش یافته است.

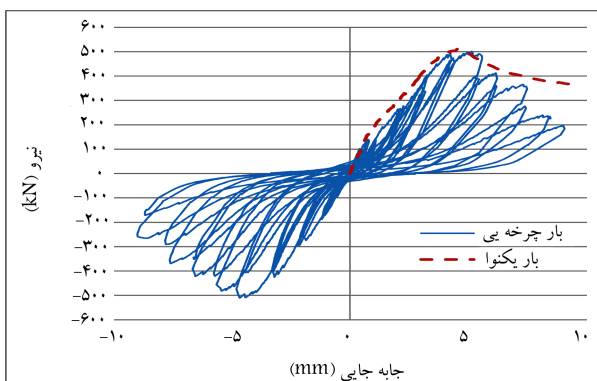
شکل ۶، نمونه‌ی دوم (SM) را نشان می‌دهد که به صورت یکنوا بارگذاری شده است، به طوری که بیشینه‌ی ظرفیت باربری آن 511 kN است. با توجه به منحنی بار - تغییر مکان تیر در حالت بارگذاری یکنوا مشاهده می‌شود که سختی اولیه‌ی تیر تا حدود 130 kN ، یعنی ۲۵٪ ظرفیت نهایی آن، سختی ثابت 235 kN/mm دارد. سپس با ترک خوردن بتن، سختی تیر کمی کاهش یافته است که در حدود نصف سختی اولیه‌ی تیر یعنی در حدود 120 kN/mm است. نکته‌ی قابل توجه دیگر، رفتار بعد از شکست تیر دوم است که مقاومت آن به شدت کاهش یافته و در حدود 36 kN/mm شده است. به عبارتی بعد از شکست تیر، با افزایش ۱ میلی‌متر جابه‌جایی، مقاومت تیر 36 kN کاهش یافته است.

در شکل ۷، مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی تیر نمونه‌ی اول تحت بار چرخه‌یی با تیر نمونه‌ی دوم تحت بار یکنوا مشاهده می‌شود که مطابق آن ظرفیت و سختی تیر نمونه‌ی دوم در بارگذاری چرخه‌یی کاهش قابل توجهی نداشته است؛ اما با توجه به سختی سکانت تیرها بعد از شکست که قبلاً به آن اشاره شده است، سختی تیر تحت بار چرخه‌یی بعد از شکست به نصف سختی بعد از شکست نمونه تحت بارگذاری یکنوا کاهش یافته است. به عبارتی، می‌توان گفت رفتار این نوع تیرها تا قبل از شکست برای هر دو نوع بارگذاری تفاوت چندانی ندارد. اما بعد از شکست، تیر تحت بار چرخه‌یی ضعیف‌تر می‌شود که به دلیل ترک‌های عمود بر هم است.

همچنین سختی سکانتی برای هر دو نمونه به صورت مقایسه‌یی در شکل ۸،



شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی وسط تیر نمونه‌ی دوم (SM).



شکل ۷. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابه‌جایی وسط تیر نمونه‌ی اول (SC) و نمونه‌ی دوم (SM).

جدول ۲. خلاصه‌ی نتایج نمونه‌های آزمایش شده.

نوع شکست	مقدار خطا V_u/V_{STM}	ظرفیت تیر		تنش برشی نرمال شده $V_u/\sqrt{f'_c}$	نیروی جاری شدن نیروی اولین ترک		نمونه
		تحلیلی $V_{STM}(KN)$	آزمایشگاهی $V_u(KN)$		$V_y(KN)$	$V_{cr}(KN)$	
برشی	۰/۹۱	۵۶۰/۴	۵۱۰	۰/۹۷۸	۴۳۰	۱۳۰	SC
برشی	۰/۹۳	۵۴۵/۷	۵۱۱	۰/۹۸۸	۴۴۳	۱۰۸	SM

الگوهای ترک و تغییرشکل تیرها، ۲ تیر عمیق تحت برش با نسبت دهانه به عمق ۲/۸ تحت بارگذاری یکنوا و چرخشی آزمایش شدند و این نتایج به دست آمد:

۱. برای هر ۲ تیر آزمایش شده، اولین ترک قطری تحت نیرویی در حدود ۲۵٪ ظرفیت نهایی تیر اتفاق افتاده است.

۲. اغلب ترک‌های ایجاد شده در هر ۲ نمونه، موازی ترک‌های قطری بودند و شکست تیرها در اثر گسترش ترک‌های قطری اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده‌ی شکست برشی تیرهای نمونه است. زیرا در شکست خمشی، ترک‌هایی در محل اتصال تیر ایجاد می‌شود که تحت بارگذاری چرخشی تقریباً به صورت متقارن است؛ به صورتی که در محل تقاطع ترک‌های اصلی، بتن خرد می‌شود و در صورت ادامه‌ی بارگذاری، علاوه بر افزایش عرض ترک، بتن محل تقاطع فرو می‌ریزد و در آنجا حفره ایجاد خواهد شد. اما تحت بارگذاری یکنوا با ادامه‌ی بارگذاری، فقط عرض ترک افزایش می‌یابد.

۳. نمودارهای نیرو - جابه‌جایی تیرهای نمونه تحت بار یکنوا و چرخشی نشان می‌دهند که سختی قبل از شکست تیر تحت هر دو نوع بار تقریباً یکسان است و تفاوت محسوس نداشتند. اما بعد از شکست، سختی تیر تحت بار چرخشی به شدت کاهش پیدا می‌کند و حدود نصف سختی در حالت بارگذاری یکنواست.

۴. منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ی اول SC دارای استهلاك انرژی کم (حلقه‌های هیستریزس نازک)، کاهش جزئی بار وارد شده به تیر تحت تغییرمکان‌های یکسان در سیکل‌های متوالی، تغییرشکل‌های ماندگار خیلی کوچک و شکل‌پذیری کم است. همچنین جاری شدن آرماتورهای عرضی مانع بسته شدن کامل ترک‌ها در حین باربرداری می‌شود. به‌طورکلی تغییرشکل‌های ماندگار در ترک‌ها، در طول قطر اصلی تیر مشاهده شده است. استهلاك انرژی کم در حلقه‌های چرخشی می‌تواند به علت رفتار برشی باشد. چون در رفتارهای خمشی استهلاك انرژی زیاد است و حلقه‌های هیستریزس بازتر هستند.

۵. تنش برشی نرمال شده نسبت به $\sqrt{f'_c}$ در هر دو نمونه حدود ۰/۹۸ است که مطابق موارد مشابه که در پیشینه‌ی پژوهش ارائه شده است، برای تیرهای عمیق با تکیه‌گاه ساده، تنش برشی نرمال شده برابر ۰/۷۳ است که نشان می‌دهد تیرهای گیردار آزمایش شده، تنش برشی در حدود ۱/۳۴ بیشتر نسبت به تیرهای دارای تکیه‌گاه معمولی متحمل می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت تیرهای عمیق آزمایش شده در نوشتار حاضر با تکیه‌گاه گیردار حدوداً ۳۴٪ نسبت به تکیه‌گاه ساده افزایش خواهد یافت.

۶. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با روابط تحلیلی نشان می‌دهد که در هر دو نمونه در حدود ۸٪ خطا وجود دارد که می‌توان گفت مقداری از آن مربوط به عدم قطعیت کامل از مقاومت بتن در انجام آزمایش، خطاهای جزئی مربوط به وسایل اندازه‌گیری در آزمایشگاه و همچنین مقداری هم به علت تقریب روابط تحلیلی روش خرابایی است.

در نمونه‌ی دوم که مقاومت فشاری بتن ۱/۷ مگاپاسکال کمتر است، مقاومت دستک فشاری به این صورت محاسبه می‌شود:

$$F = 0.67 \times 42.1 \times 75 \times 170.8 = 361.3 \text{ kN}$$

ظرفیت نهایی تیر دوم نیز مانند نمونه‌ی اول از این رابطه به دست می‌آید:

$$P_{Us} = 2 \times [(361.3 \times \sin 31.35) + (2 \times 12.2 \times \sin 58.72) + (2 \times 12.2 \times \sin 50.07) + (2 \times 12.2 \times \sin 43.75) + (2 \times 12.2 \times \sin 38.72) + (2 \times 12.2 \times \sin 33.79)] = 545.7 \text{ kN}$$

با توجه نتایج آزمایش انجام شده، تیر دوم تحت بار استاتیکی با ظرفیت $P_{test} = 511 \text{ kN}$ گسیخته شده است. بنابراین می‌توان با محاسبه‌ی خطا (Error) به صورت تقریبی نتیجه گرفت که ظرفیت تیر دوم تحت بار یکنوا در حدود ۷٪ نسبت به روابط تحلیلی کاهش یافته است.

$$Error = ((545.7 - 511) / 545.7) \times 100 = 6.4\%$$

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مدل تحلیلی ارائه شده تقریباً برای هر دو حالت بارگذاری صادق است و می‌توان از آن برای تیرهای دو سرگیردار تحت بار یکنوا و چرخشی استفاده کرد. در جدول ۲، خلاصه‌ی نتایج به دست آمده ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که رفتار تیرهای عمیق دو سرگیردار تحت بارگذاری چرخشی تقریباً مشابه رفتار آن‌ها تحت بار یکنواست و تفاوت اصلی آن‌ها در مرحله‌ی بعد از شکست است. همچنین تنش برشی نرمال شده نسبت به $\sqrt{f'_c}$ حدوداً ۰/۹۸ است، در صورتی که تنش برشی نرمال شده برای تیرهای عمیق با تکیه‌گاه ساده برابر ۰/۷۳ است.^[۸] افزایش تنش برشی نرمال شده نشان می‌دهد که تنش برشی در تیرهای با تکیه‌گاه پیوسته و گیردار، در حدود ۱/۳۴ برابر بیشتر نسبت به تیرهای با تکیه‌گاه معمولی است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت تیرهای عمیق مشابه نمونه‌های آزمایش شده در نوشتار حاضر با تکیه‌گاه گیردار، حدوداً ۳۴٪ نسبت به تکیه‌گاه ساده افزایش خواهد یافت. بنابراین به طورکلی، هر دو تیر آزمایش شده از نظر مقاومت، سختی، تغییرشکل و ظرفیت بیانگر این نکته بودند که روش تحلیلی پیشنهادی در برخی نوشتارها،^{[۱۲] و [۱۳]} برای تیرهای عمیق دو سرگیردار تحت بارهای یکنوا یا چرخشی قابل استفاده است و دقت خوبی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر برای مشاهده‌ی رفتار تیرهای عمیق، منحنی بار - جابه‌جایی،

پانویسها

1. ACI 318-14
2. Arturo
3. monotonic load
4. cyclic loads
5. Subedi
6. Sergio M. Alcocer
7. Claudia M. Uribe
8. STM
9. Bentz
10. Clayton
11. Satadru
12. specimen with cyclic loading
13. specimen with monotonic loading
14. Noor
15. Boswell
16. load cell
17. test setup
18. linear variable displacement transformer (LVDT)

منابع (References)

1. Rogowsky, D.M., MacGregor, J.G. and Ong, S.Y. "Tests of reinforced concrete deep beams", *ACI Journal*, **83**(4), pp. 614-623 (July-Aug., 1986).
2. Alcocer, S.M. and Uribe, C.M. "Monotonic and cyclic behaviour of deep beams designed using strut-and-tie models", *ACI Structural Journal*, **105**(3), pp. 327-337 (May-June, 2008).
3. ACI 318-14, "building code requirements for structural concrete", American Concrete Society Materials and Structures (2014).
4. Tena-Colunga, A., Urbina-Californias, L.A. and Archundia-Aranda, H.I. "Cyclic behavior of continuous reinforced concrete haunched beams with transverse reinforcement designed to fail in shear", *Construction and Building Materials*, **151**, pp. 546-562 (2017).
5. Arabzadeh, A. and Hizaji, R. "Effects of dimension and boundary condition of columns in rigidity of reinforced concrete deep beams", *3rd International Conference on Architecture, Structure, and Civil Engineering (ICASCE)*, Norway (17,18,19 Aug., 2016).
6. Subedi, N.K. and Arabzadeh, A. "Some experimental results for reinforced concrete deep beams with fixed-ended supports of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical resistivity of concrete", *Structural Engineering Review*, **6**(2), pp. 105-128 (1994).
7. Alcocer, S.M. and Medina Uribe, C.A. "Monolithic and cyclic behavior of deep beams Designed using strut-and-tie models", *ACI Structural Journal*, **105**(3), pp. 327-337 (May-June, 2008).
8. Mihaylov, B.I., Bentz, E.C. and Collins, M.P. "Behavior of large deep beams subjected to monotonic and reversed cyclic shear", *ACI Structural Journal*, **107**(6), pp. 726-734 (Nov.-Dec., 2010).
9. Burningham, C.A., Pantelides, Ch.P. and Reaveley, L.D. "Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods", *Composite Structures*, **125**, pp. 256-265 (2015).
10. Adhikary, S.D., Li, B. and Fujikake, K. "Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions", *Nuclear Engineering and Design*, **259**(2), pp. 14-18 (June, 2013).
11. Noor, F.A. and Boswell, L. F. "Small scale modelling of concrete structures", Elsevier Science Publishers LTD. (1992).
12. ATC-24, "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures for buildings", Report No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA (1992).
13. Arabzadeh, A., Rahaie, A.R. and Aghayari, R. "A simple strut-and-tie model for prediction of ultimate shear strength of RC deep beams", *International Journal of Civil Engineering*, **7**(3), pp. 141-153 (Sep., 2009).
14. Arabzadeh, A. "Truss analogy for the analysis of reinforced concrete fixed-ended deep beams", *The 2ed International Conference in Civil Engineering on Computer Applications, Research and Practice*, Bahrain (6-8 Apr., 1996).