

مطالعه آزمایشگاهی رفتار برشی تیرهای عمیق بتن مسلح کامپوزیتی الیافی توانمند

محمد کاظم شربندار^۱، ابوذر حمزه نژادی^۲، علی خیرالدین^۳

- ۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، ایران
- ۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه دانشگاه سمنان، ایران
- ۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

Civil_abuzar@yahoo.com

چکیده

استفاده از بتن‌های ویژه و توانمند در سازه‌های بتنی به علت خصوصیات منحصربه‌فرد این نوع از بتن‌ها، رو به گسترش می‌باشد. از این‌رو کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی در سال‌های اخیر شاهد پیشرفت‌های چشمگیر و زیادی بوده‌اند. از طرفی با توجه به کاربرد گسترده تیرهای عمیق در سازه‌هایی نظیر ساختمان‌های بلند، سدها، اسکله‌های دریایی، دیوارهای برشی و ...، بنابر این بررسی رفتار آنها برای طراحان سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. یکی از مهمترین مشکلات در سازه‌های بتنی، تردی و شکنندگی نسبی و عدم قدرت باربری بعد از ترک خوردگی و در نتیجه طاقت و قدرت جذب انرژی پایین بتن می‌باشد. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکل مسلح کردن بتن به الیاف می‌باشد که سبب تشکیل ترک‌های ریز چندانگانه می‌گردد که مشخصه اصلی تامین شکل‌پذیری کششی مصالح HPFRCC است. با توجه به بررسی عمده استفاده از این مصالح بر روی رفتار خمشی و کمتر مورد توجه قرار گرفتن رفتار برشی، در این تحقیق اقدام به بررسی رفتار برشی این مصالح در تیرهای عمیق شده است. در این راستا پاسخ تجربی تعداد ۵ تیر شامل تیرهای ساده عمیق مسلح HPFRCC تحت بار متمرکز در وسط دهانه با نسبت دهانه برشی به عمق ۰/۷۵ مورد بررسی قرار گرفته است. تیرهای عمیق گروه اول با درصد متفاوت الیاف ۰، ۱ و ۲ درصد و تیرهای گروه دوم با الیاف فولادی ۰ و ۲ درصد ساخته شد. نمونه‌های گروه اول فاقد آرماتور برشی جان و نمونه‌های گروه دوم دارای آرماتور برشی جان می‌باشند. پس از انجام آزمایشات، ملاحظه گردید که با افزایش درصد الیاف فولادی در تیرهای عمیق، ظرفیت باربری و همچنین شکل‌پذیری نمونه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافت.

کلمات کلیدی: تیر عمیق، بتن توانمند، الیاف فولادی، HPFRCC

۱. مقدمه

برخی از اعضای خمشی بتن مسلح مانند تیرها، دارای نسبت ارتفاع به دهانه بیش از حد معمول بوده و ضخامت آن‌ها در مقایسه با ارتفاع ناچیز است در این المان‌ها که با نام تیر عمیق شناخته می‌شوند، نیروهای خارجی و واکنش‌های تکیه‌گاهی واقع در صفحه‌ی عضو نیز حالت تنش صفحه‌ای را ایجاد می‌نمایند. تیرهای عمیق بتن مسلح که یکی از مهم‌ترین اعضای بتنی در سازه‌های ساختمانی و غیر ساختمانی به شمار می‌روند، در مقایسه با تیرهای معمولی رفتار پیچیده و متفاوتی دارند. این پیچیدگی بیشتر شامل حالت گسیختگی غالب یعنی شکست برشی آن‌ها می‌باشد. از این‌رو در آئین‌نامه‌های مختلف تحلیل و طراحی سازه‌های بتن مسلح ضوابط جداگانه‌ای ارائه می‌گردد. نمونه‌های تیر عمیق را می‌توان در دیواره مخازن و سیلوهای بتن مسلح، دیوارهای برشی، دال‌های پلیسه‌ای مشاهده نمود. در سکوهای دریایی از فونداسیون‌های جعبه‌ای یا کیسون استفاده می‌گردد که دیواره این پی‌ها به صورت تیر عمیق می‌باشد. در بعضی موارد این پی‌ها شامل شبکه‌ای از تیرهای عمیق متقاطع

هستند که مجموعه آن‌ها بایستی بارسازه را به بستر دریا انتقال دهد. از طرفی کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی (FRCC) در سال‌های اخیر شاهد پیشرفت‌های چشمگیر و زیادی بوده‌اند. عمده‌ی این پیشرفت‌ها به سبب توسعه‌ی هر چه بیشتر ملات، گونه‌های مختلف الیاف، اندرکنش ملات-الیاف، فرایند تولید کامپوزیت، درک مناسب‌تر در خصوص مکانیزم‌های اصلی کنترل رفتار و بهبود مستمر میزان هزینه‌های اجرایی می‌باشد. علاوه بر آن می‌توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی (فوق روان کننده‌ها) با امکان دستیابی به مقاومت‌های بالا همراه با کمترین کاهش در کارایی ملات، کاربرد ریز پرکننده‌ها مثل دوده سیلیسی و خاکستر بادی و فهم بهتر از چگونگی تأثیر آن‌ها بر تخلخل، مقاومت و دوام ملات اشاره نمود. این موارد همگی باعث پیشرفت‌های اساسی در ساخت و مدل‌سازی رفتار این کامپوزیت‌ها شده‌اند. نسبت دادن واژه‌های پیشرفته یا با عملکرد بالا به مصالح مهندسی بیانگر تفاوت آن‌ها با مصالح متداول و معمولی است که با توجه به آخرین فناوری‌ها و موقعیت مکانی آن‌ها در سازه بکار می‌رود. در این تحقیق، واژه با عملکرد بالا به رده‌ی خاصی از مصالح بتن الیافی اطلاق می‌شود که دارای رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش پس از بروز اولین ترک‌خوردگی‌ها هستند که همراه با شکل‌گیری ترک‌های چندگانه و رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد است. استفاده از مصالح با عملکرد بالا به جای مصالح متداول از مدت‌ها پیش مدنظر پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات بسیاری را به خود اختصاص داده است. این مصالح علاوه بر افزایش ظرفیت سازه‌ها در برابر زلزله، به تأمین پایایی بیشتر سازه‌ها در برابر عوامل مضر محیطی نیز کمک می‌کنند. یکی از این مصالح با عملکرد بالا که در سالیان اخیر، پیشرفت چشمگیری داشته، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی با عملکرد بالا (HPFRCC) می‌باشد. در دهه‌ی ۱۹۶۰، رامولدی و همکاران بررسی تأثیر الیاف فولادی بر کاهش شکنندگی بتن را در دستور کار قرار دادند [۱ و ۲]. این روند با کاربرد سایر انواع الیاف ادامه یافت و در سال‌های اخیر ترکیب انواع الیاف با طول‌های مختلف در دستور کار قرار گرفت. نامان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ مصالحی را معرفی نمودند که جدا از FRC ها طبقه‌بندی می‌شدند و شامل یک بخش سخت-شوندگی کرنش در منحنی تنش-کرنش کششی خود بودند و در رده مصالح با عملکرد بالا HPFRCC قرار گرفتند. بیشتر اعضای ساخته شده با این مصالح، شامل ملات سیمانی بدون درشت‌دانه هستند و به همین دلیل ملات یا خمیر سیمانی مسلح شده توسط الیاف نام‌گرفته‌اند [۳ تا ۱۲]. هرچند HPFRCC دارای ویژگی‌هایی است که در بتن معمولی و FRC وجود ندارد اما به علت مسائل اقتصادی و اجرایی، کاربرد آن‌ها بیشتر به امور تحقیقاتی و کاربردهای خاص محدود گشته است. پیشنهاداتی برای استفاده بتن الیافی شده و روابطی نیز برای تعیین ظرفیت نهایی تیرهای عمیق ارائه شده است اما تیرهای عمیق ساخته شده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی با عملکرد بالا (HPFRCC) تاکنون مورد توجه قرار نگرفته و کارهای عددی و آزمایشگاهی بسیار کمی در ارتباط با رفتار برشی تیرهای عمیق ساخته شده از این مصالح انجام داده شده است لذا به نظر می‌رسد که ضرورت دارد مطالعات بیشتری بر روی مباحث سازه‌ای و کاربردی این مصالح انجام گیرد و رفتار برشی تیرهای عمیق ساخته شده با این مصالح با عملکرد بالا بررسی گردد.

۲. ضوابط طراحی آیین نامه ای

آیین‌نامه ACI-318 از دیدگاه برشی، تیر با نسبت دهانه به عمق مؤثر $\frac{h}{d}$ کمتر از ۴ را به‌عنوان تیر عمیق تعریف می‌کند و روشی را برای محاسبه مقاومت برشی برای بارگذاری از بالا ارائه داده است (دهانه ساده) و فرض کرده است که ظرفیت برشی تیر توسط بتن و فولاد تأمین می‌شود. مطابق با روابط ۱ تا ۵ می‌توان ظرفیت برشی تیر عمیق بر اساس آیین‌نامه ACI-318 را

¹Fiber Reinforced Cement based Composites

²High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites

محاسبه نمود. در این روابط V_n ، مقاومت اسمی برش V_c ، مقاومت برشی ناشی از بتن؛ V_s ، مقاومت برشی ناشی از فولاد جان؛ V_u ، مقاومت برشی طراحی در مقطع بحرانی ϕ ضریب کاهش برای برش ۰/۸۵ می‌باشد.

$$V_n = V_c + V_s \quad (۱)$$

$$V_u \leq \phi V_n \quad (۲)$$

$$V_n < 0.177 \left(10 + \frac{L_n}{d} \right) \sqrt{f'_c} bd \quad 2 \leq \frac{L_n}{d} < 5 \quad (۳)$$

$$V_n < 2.12 \sqrt{f'_c} bd \quad \frac{L_n}{d} < 2 \quad (۴)$$

در روابط فوق f'_c مقاومت مشخصه استوانه بتنی $(0.85 f_{cu})$ ؛ L_n دهانه آزاد تیر؛ b عرض تیر و d عمق مؤثر تیر می‌باشد. مقاومت برشی ناشی از بتن طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$V_c = (3.5 - 2.5 M_u / V_u d) (0.5 f'_c + 175 p_w V_u d / M_u) bd \quad (۵)$$

در رابطه فوق M_u ، لنگر خمشی ناشی از بار طراحی در مقطع بحرانی و $p_w = A_s / bd$ ، نسبت فولاد مصرفی تیر است. همچنین طبق ضوابط مبحث نهم مقررات ملی، ضوابط تیرهای عمیق برای تیرهایی قابل کاربرد است که نسبت دهانه به عمق مؤثر آن‌ها کوچک‌تر از ۲ باشد و نیروهای خارجی در وجه فشاری مقابل وجهی که روی تکیه‌گاه می‌نشینند وارد آید به‌طوری که امکان به وجود آمدن بازوهای فشاری از سمت بار به سمت تکیه‌گاه موجود باشد. مقدار V_r مجموع مقاومت برشی بتن V_c و مقاومت برشی آرماتور V_s می‌باشد. نیروی برشی مقاوم نهایی بتن V_c مطابق با ضوابط مبحث نهم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$V_c = (3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d}) (0.19 \phi_c \sqrt{f'_c} + 12 \rho_w \frac{V_u d}{M_u}) bd \quad (۵)$$

۲. برنامه آزمایشگاهی

• مشخصات مصالح

جهت شبیه سازی مقاومت بتن در ساختمان های موجود که با تیر عمیق بتن مسلح ساخته شده اند، طرح اختلاط مورد استفاده جهت حصول میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۶۰ MPa طراحی شد. میانگین واقعی مقاومت فشاری با استفاده از آزمایشهای فشاری روی نمونه های استوانه ای تعیین می شود. آرماتورهای فولادی کششی و فشاری از نوع میلگرد آبدار رده AIII با مقاومت تسلیم میانگین حاصل شده از آزمایش های کشش تک محوری برابر با ۴۹۴MPa و میلگردهای برشی از نوع AI با تنش تسلیم ۲۵۰MPa هستند. نسبت های وزنی اختلاط مصالح در HPFRCC مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است که بر مبنای وزن سیمان مصرفی می باشد. این نسبت های اختلاط نیز بر مبنای کارهای مشابه که در آنها از روان کننده ای استفاده نشده، انتخاب گردیده اند. همچنین در جدول ۲ خصوصیات فیزیکی الیاف فولادی مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۱- نسبت‌های اختلاط مصالح در بتن HPFRCC

| Number | Name | W/C | Cement/Sand | Steel Fiber (%) |
|--------|-------|------|-------------|-----------------|
| 1 | HP-0% | 0.38 | 1 | 0 |
| 2 | HP-1% | 0.38 | 1 | 1 |
| 3 | HP-2% | 0.38 | 1 | 2 |

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی الیاف فولادی مورد استفاده

| نوع الیاف | طول (mm) | L/D | چگالی (Kg/m ³) | مدول الاستیسیته (GPa) |
|-----------|----------|------|----------------------------|-----------------------|
| فولادی | ۵۰ | ۶۲/۵ | ۷۸۵۰ | ۲۰۰ |

• نمونه‌های آزمایش

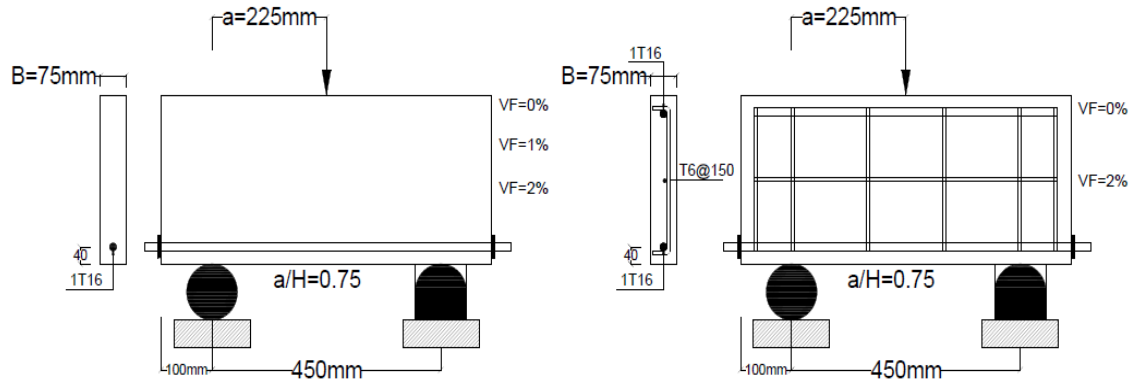
با توجه به متغیرهای تعریف شده و اهداف مورد بررسی تعداد ۵ نمونه تیر عمیق ساخته می‌شود. تیرها با توجه به میزان الیاف مورد استفاده و آرایش آرماتورهای برشی جان متفاوت می‌باشند. تمامی تیرها به طریقی طراحی شده‌اند که دارای فولاد خمشی به اندازه کافی هستند تا طریقه فروپاشی بصورت برشی باشد نمونه‌ها از نظر آرماتورهای مصرفی کششی و نحوه بارگذاری کاملاً مشابه می‌باشند. تمامی تیرها به صورت متمرکز و از بالای تیر و در وسط دهانه بارگذاری شده‌اند و آرماتورهای مصرفی از نوع بدون آج و قطر ۶/۵ میلیمتر به عنوان آرماتوربرشی و یک عدد میلگرد به قطر ۱۶ میلیمتر به عنوان میلگرد اصلی کششی استفاده شده است. به منظور ایجاد مهار لازم علاوه بر اینکه تیرها از هر طرف ۱۰ سانتیمتر بزرگتر ساخته شدند، میلگردها در انتها از سوراخ‌های یک صفحه فولادی به ضخامت ۱۰mm عبور داده شده‌اند. شمای کلی تیرهای مورد بررسی در شکل ۱ و ابعاد تیرهای عمیق آزمایش شده در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین در شکل ۲ مشخصات تیرهای ساخته شده ارائه شده است.



شکل ۱- شمای کلی تیرها

جدول ۳- مشخصات تیرهای گروه‌های مختلف

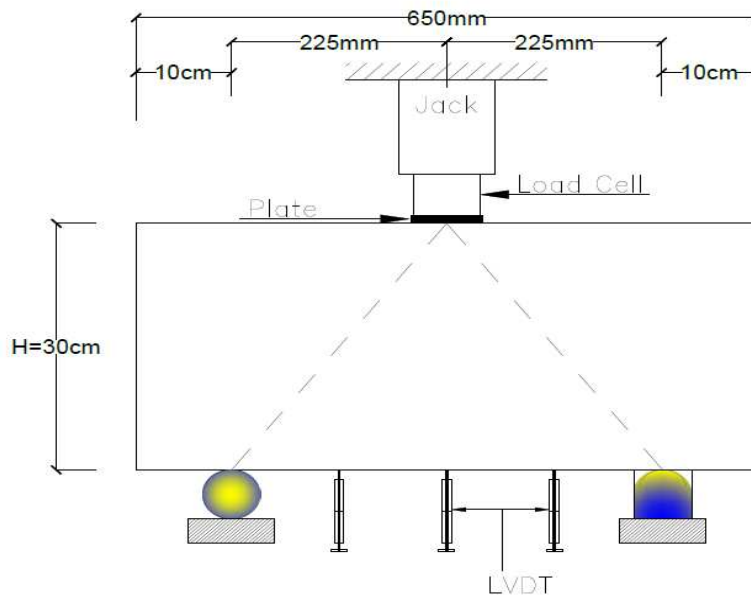
| نام | a/h | درصد الیاف | ارتفاع (mm) | عرض (mm) | دهانه (mm) | آرماتور برشی جان |
|-------|------|------------|-------------|----------|------------|------------------|
| R0-F0 | 0.75 | ۰٪ | ۳۰۰ | ۷۵ | ۴۵۰ | بدون آرماتور |
| R0-F1 | 0.75 | ۱٪ | ۳۰۰ | ۷۵ | ۴۵۰ | بدون آرماتور |
| R0-F2 | 0.75 | ۲٪ | ۳۰۰ | ۷۵ | ۴۵۰ | بدون آرماتور |
| R1-F0 | 0.75 | ۰٪ | ۳۰۰ | ۷۵ | ۴۵۰ | با آرماتور |
| R1-F2 | 0.75 | ۲٪ | ۳۰۰ | ۷۵ | ۴۵۰ | با آرماتور |



شکل ۲- الگوی نمونه تیرهای مورد آزمایش

• سیستم آزمایش

جهت انجام آزمایش، به منظور اعمال بار از یک عدد جک به ظرفیت ۵۰۰KN به همراه تغییر مکان سنج های خطی (LVDT) استفاده گردید. نیروی وارده به صورت متمرکز در وسط دهانه اعمال گردید. تیرها با شرایط تکیه گاهی دو سر ساده مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین به منظور جلوگیری از تمرکز تنش و لهیدگی تیر در تکیه گاه ها و نقاط اعمال بار از صفحات فولادی به ابعاد ۷۵در۱۰۰ به ضخامت ۲۰ میلیمتر استفاده شد. دهانه تیر عمیق فاصله مرکز به مرکز صفحات فلزی تکیه گاهی در نظر گرفته شده است. بارگذاری تیرها با استفاده از جک و با سرعت متوسط و با گام های مشخص تا مرحله شکست ادامه یافت. همچنین به منظور اندازه گیری کرنش های آرماتور های کششی و برشی، کرنش سنج هایی بر روی آرماتور ها لحاظ گردید.

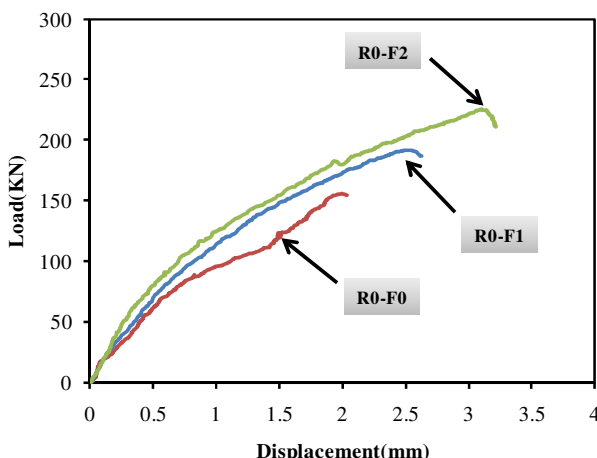


شکل ۳- برپایی آزمایش و جانمایی تجهیزات

۴. نتایج آزمایش

- رفتار بار تغییر مکان نمونه ها فاقد آرماتور برشی

نمودار نیرو - تغییر مکان وسط دهانه برای ۳ نمونه تیر در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۴ نمونه R0-F2 دارای بیشترین ظرفیت باربری به میزان ۲۲۵/۶۹ کیلونیوتن و نمونه R0-F0 دارای کمترین ظرفیت باربری به میزان ۱۵۵/۶۷ کیلونیوتن می باشد. مقدار حداکثر ظرفیت باربری نمونه ها ۱/۴۴ برابر مقدار حداقل می باشد. همانطوری که در شکل دیده می شود، استفاده از الیاف فولادی موجب افزایش ظرفیت باربری نمونه های آزمایشگاهی به میزان قابل توجهی شده است. همچنین با افزایش درصد الیاف فولادی در نمونه ها، تغییر مکان نهایی قابل تحمل به وسیله نمونه های آزمایشگاهی افزایش یافته است. تغییر مکان نهایی برای نمونه دارای ۲ درصد الیاف فولادی ۳/۲۱ میلیمتر می باشد که ۵۸ درصد بیشتر از تغییر مکان نمونه R0-F0 می باشد.



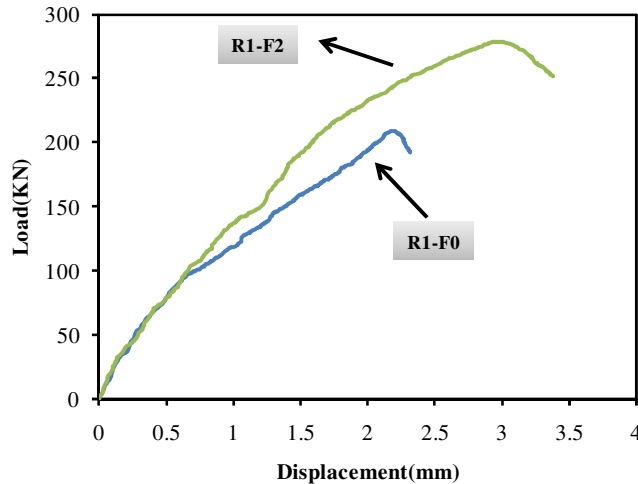
شکل ۴- منحنی بار-تغییر مکان نمونه ای گروه اول (فاقد آرماتور برشی جان)

- رفتار بار تغییر مکان نمونه ها دارای آرماتور برشی

در این گروه دو نمونه تیر بتنی عمیق قرار دارد. نمونه های بتنی از لحاظ ابعاد و اندازه کاملاً با نمونه های سری T1-R0 یکسان می باشند. تنها تفاوت این نمونه ها با نمونه های گروه قبلی داشتن آرماتور برشی می باشد. مطابق با شکل ۵ در گروه دوم نمونه R1-F2 دارای ظرفیت بالاتری نسبت به نمونه R0-F0 می باشد. ظرفیت نهایی نمونه R1-F2 حدود ۳۳ درصد بیشتر از نمونه R0-F0 می باشد. همچنین تغییر مکان نهایی نمونه R1-F2 به میزان قابل توجهی بیشتر از نمونه R0-F0 می باشد. تغییر مکان نهایی نمونه R1-F2 حدود ۴۶ درصد بیشتر از نمونه R0-F0 می باشد. شکل رفتاری و منحنی بار تغییر مکان هر دو نمونه در این دو گروه تقریباً مشابه می باشد. این دو نمونه تا تغییر مکان حدود ۰/۷ میلیمتر دارای رفتاری مشابه می باشند.

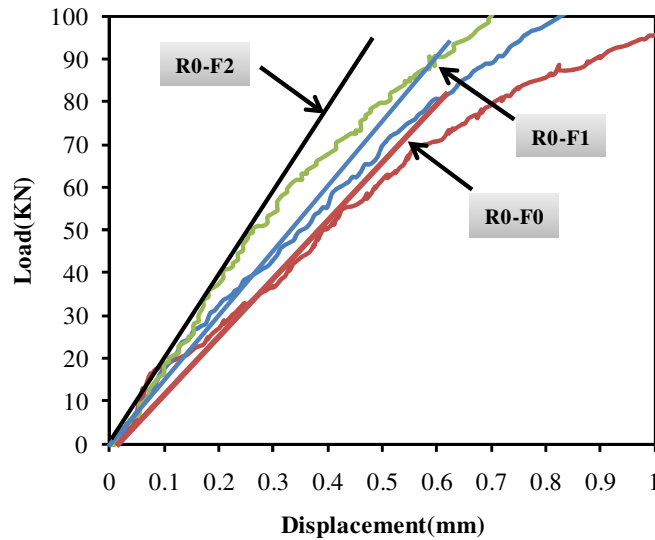
- تغییرات سختی در نمونه ها

به منظور بررسی سختی اولیه نمونه های آزمایشگاهی و مقایسه میزان سختی هر نمونه در مقایسه با سایر نمونه ها، شیب اولیه منحنی ملاک مقایسه بین نمونه ها قرار گرفت. همانطوری که در شکل ۶ نشان داده شده است، در گروه اول با افزایش میزان الیاف سختی نمونه های آزمایشگاهی افزایش یافته است. از طرفی در گروه دوم نیز با افزایش میزان الیاف سختی نمونه ها افزایش یافته است. در گروه اول سختی نمونه های داری ۰، ۱ و ۲ درصد الیاف فولادی به ترتیب ۱۳۳، ۱۵۰ و ۲۱۰

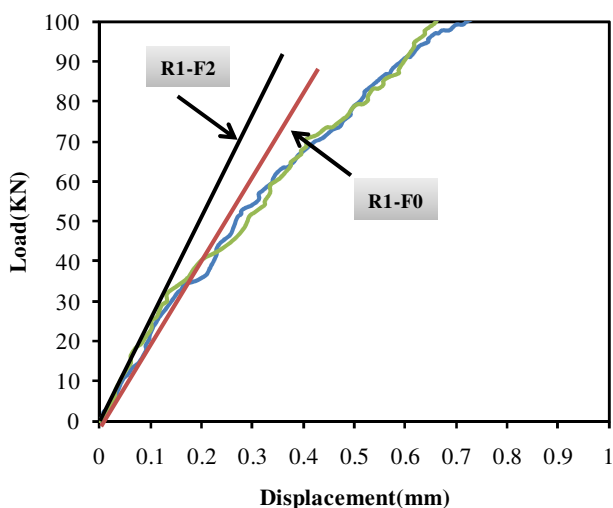


شکل ۵- منحنی بار-تغییر مکان نمونه ای گروه دوم (دارای آرماتور برشی جان)

کیلونیوتن-میلیمتر می باشد. همانطور که از داده ها ملاحظه می شود، سختی نمونه دارای ۲ درصد الیاف فولادی به ترتیب ۵۷ و ۴۰ درصد بیشتر از نمون های گروه R0-F0 و R0-F1 می باشد. مطابق شکل ۷ در گروه دوم (گروه R1) دو نمونه تیر بتنی عمیق قرار دارد. نمونه های بتنی از لحاظ ابعاد و اندازه کاملاً با نمونه های سری R0 یکسان می باشند. تنها تفاوت این نمونه ها با نمونه های گروه قبلی داشتن آرماتور برشی می باشد. در گروه دوم نمونه R0-F2 دارای ظرفیت بالاتری نسبت به نمونه R0-F0 می باشد. همچنین سختی نمونه R0-F2 ۲۶۰ کیلونیوتن-میلیمتر می باشد که نسبت به نمونه R2-F0 که دارای سختی ۲۲۰ کیلونیوتن-میلیمتر می باشد، ۱۸ درصد افزایش دارد. همچنین در گروه دوم دارای آرماتور برشی جان، سختی نمونه R1-F2، ۲۶۰ می باشد که از نمونه R0-F2 در گروه اول حدود ۲۴ درصد بیشتر است.



شکل ۶- تغییرات سختی نمونه های گروه اول (فاقد آرماتور برشی جان)



شکل ۷- تغییرات سختی نمونه های گروه دوم (دارای آرماتور برشی جان)

• شکل پذیری برشی نمونه ها

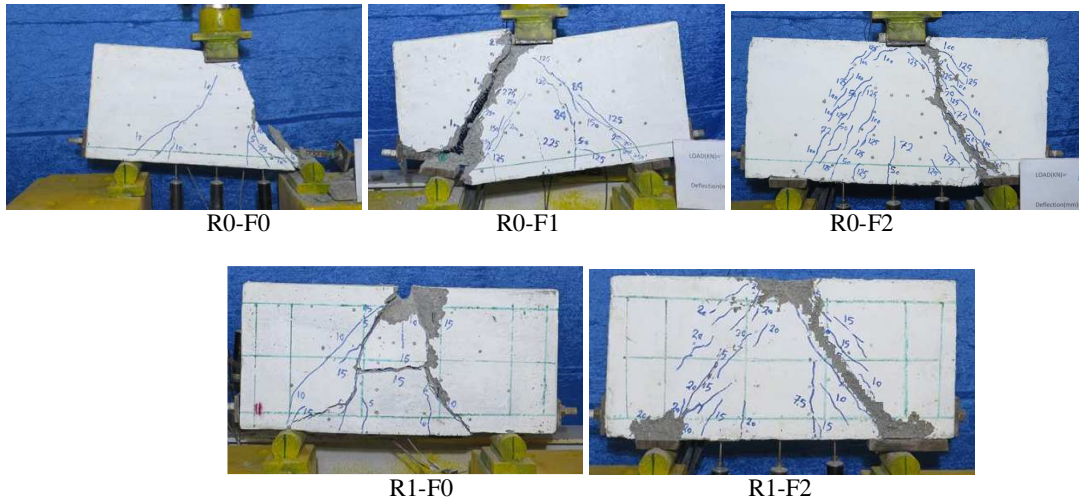
بنا بر تعریف شکل پذیری برشی برای نمونه های دارای رفتار برشی عبارت است از مساحت زیر منحنی بار- تغییر مکان نمونه تقسیم بر مساحت معادل با تغییر مکان نقطه دارای بار حداکثر. این شاخص به نحوی نشان دهنده شکل پذیری برشی برای نمونه های تیر عمیق می باشد. در جدول شماره ۴، این پارامتر برای ۵ سری نمونه آزمایشگاهی محاسبه شده است. همانطوری که ملاحظه می شود در نمونه های گروه اول، با افزایش درصد الیاف، شکل پذیری برشی نمونه افزایش می یابد. همچنین در نمونه های دارای آرماتور در گروه دوم، میزان شکل پذیری از نمونه های فاقد آرماتور برشی جان، بیشتر می باشد.

جدول ۴- نتایج شکل پذیری برشی نمونه ها

| نمونه | بار حداکثر KN | تغییر مکان معادل بار حداکثر mm | تغییر مکان نهایی mm | کل مساحت زیر منحنی | مساحت زیر منحنی تا بار حداکثر | شکل پذیری برشی |
|-------|------------------|---|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------|
| R0-F0 | ۱۵۵/۶۷ | ۱/۹۹ | ۲/۰۳ | ۱۸۴/۷۷ | ۱۸۱/۱۷ | ۱/۰۱۹۱ |
| R0-F1 | ۱۹۱/۵۹ | ۲/۵۴ | ۲/۶۳ | ۳۲۶/۴۴ | ۳۰۱/۳۲ | ۱/۰۸۰ |
| R0-F2 | ۲۲۵/۶۹ | ۳/۰۹ | ۳/۲۱ | ۴۸۵/۵۹ | ۴۴۱/۷۷ | ۱/۱۰ |
| R1-F0 | ۲۰۸/۸۰ | ۲/۲۰ | ۲/۳۱ | ۲۹۳/۸ | ۲۷۱/۶۲ | ۱/۰۸۱ |
| R1-F2 | ۲۷۸/۸۵ | ۳ | ۳/۳۸ | ۶۲۵/۱۴ | ۵۲۲/۴۱ | ۱/۱۹۶ |

• مد های انهدام نمونه ها

پس از بررسی نتایج مربوط به ۴ نمونه تیر آزمایشگاهی مشخص گردید که تمامی این نمونه ها دارای رفتاری برشی می باشند. این رفتار برشی در قالب منحنی های بار-تغییر مکان نمونه ها کاملاً مشهود می باشد. از طرفی مطابق با شکل ۱۰، تمامی نمونه ها دارای انهدام برشی به صورت رخ دادن ترک قطری از تکیه گاه تا محل اعمال بار می باشند. زاویه ترک در تمامی نمونه ها نزدیک به ۴۵ درجه می باشد.



شکل ۱۰- مد انهدام برشی نمونه ها

۵. نتیجه گیری

مطابق با نتایج به دست آمده از آنالیز مدل های آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل گردید:
۱- ظرفیت باربری در نمونه های فاقد آرماتور برشی در گروه اول به میزان قابل توجهی با افزایش درصد الیاف فولادی افزایش می یابد. این میزان افزایش ظرفیت در نمونه های دارای الیاف فولادی ۲ درصد نسبت به نمونه های دارای الیاف فولادی ۱ درصد و نمونه فاقد الیاف به ترتیب ۵۵ و ۵۵ درصد می باشد.

۲- در نمونه های گروه دوم نیز که دارای آرماتور برشی جان می باشند، ظرفیت باربری نمونه ها نسبت به نمونه های مشابه در گروه اول، افزایش یافت. این افزایش در گروه F2 حدود ۲۳ درصد و در گروه F0 حدود ۳۴ درصد بود.

۳- در نمونه های آزمایشگاهی با افزایش درصد الیاف در هر گروه سختی اولیه نمونه ها افزایش یافت. این افزایش سختی اولیه نمونه ها در گروه دوم نیز با افزایش درصد الیاف افزایش یافت. از طرفی اضافه نمودن آرماتور های برشی در گروه دوم موجب افزایش سختی اولیه نمونه ها گردید. این افزایش سختی اولیه در گروه F2 حدود ۲۴ درصد و در گروه F0 حدود ۶۵ درصد بود.

۴- پس از آنالیز داده های آزمایشگاهی مشخص گردید که افزایش درصد الیاف و همچنین اضافه نمودن آرماتور های برشی میزان ضریب شکل پذیری برشی را افزایش می دهد. از طرفی ملاحظه گردید که در دو گروه نمونه های F2 در گروه دوم که دارای آرماتور برشی جان می باشند، نسبت به نمونه مشابه در گروه اول (فاقد آرماتور برش جان)، دارای ضریب شکل پذیری (حدود ۹ درصد بیشتر) بزرگتری می باشند.

۶. مراجع

- [1] Romualdi J.P. and Batson G.B., 1963. "Mechanics of crack arrest in concrete". Journal of Engineering Mechanics, ASCE Proc., 89(EM3):147-168.
- [2] Romualdi J.P. and Mandel J.A. 1964. "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement". Journal of ACI, :657-670.
- [3] Bolander, J. 1999. "Spring network model of fiber reinforced cement composites". High Performance Fiber Reinforced Cement Composites . HPRCC 3,. H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, 341-350.
- [4] Vandewalle, L., et al, 2003. "RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete", Sigma-epsilon-design method - Final Recommendation. Materials and Structures 36(262):560-567.
- [5] Aveston, J., Cooper, G.A., and Kelly, A. 1971. "Single and multiple fracture, the properties of fiber composites". Conference Proceedings of National Physical Laboratory, IPC, Science and Technology Press, Ltd., 14-24.
- [6] Krenchel, H. and Stang, H. 1989. "Stable microcracking in cementitious materials". In Brittle Matrix Composites 2. A.M. Brandt and J.H. Marshall, eds., 20-33.
- [7] Curbach, M. and Jesse, F. 1999. "High-Performance Textile-Reinforced Concrete", Structural Engineering International 9(4, 1):289-291(3).
- [8] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. 2003. "Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites". In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPRCC-4), Proc. Of the 4th Int'l RILEM Workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt.
- [9] Naaman, A.E. 1992. "SIFCON: Tailored properties for structural performance". In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, eds., 18-38.
- [10] Alwan, J., and Naaman, A.E., 1994. "New formulation for the elastic modulus of fiber reinforced quasi brittle matrices". ASCE Journal of Engineering Mechanics, 120 (11), 2443-2460.
- [11] Balaguru, P., and Shah, S.P., 1992. "Fiber reinforced cement composites". McGraw Hill, New York.
- [12] Bentur, A., and Mindess, S., 1990. "Fiber reinforced cementitious composites". Elsevier Applied Science, London, UK.