

تحقیقات بتن  
سال هفتم، شماره اول  
بهار و تابستان ۹۳  
ص ۵۵-۶۹  
تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۱۰  
تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۹

## بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح خود متراکم با مقاومت بالا

امید رضایی فر

استادیار دانشگاه سمنان

امیر قدس \*

دانشجو دکتری مهندسی سازه دانشگاه سمنان

### چکیده

در این تحقیق تأثیر بتن SCC با مقاومت بالا بر رفتار برشی، ممان ترک خوردگی و نحوه ترک خوردگی تیرهای بتن مسلح مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای اصلی آزمایش نوع بتن، فاصله خاموت‌ها و تغییرات مقاومت بتن است. بدین منظور ۹ عدد تیر مورد آزمایش قرار گرفتند که تعداد ۳ عدد از تیرها دارای بتن معمولی با مقاومت ۴۰ مگا پاسکال و ۶ عدد از آنها دارای بتن SCC مقاومت بالا با مقاومت های ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال بودند. برای هر کدام از گروهها از فواصل خاموت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ میلی‌متر استفاده شده است. تیرهای آزمایشی بر روی تکیه‌گاه‌های ساده و توسط دو بار متمرکز تحت بارگذاری قرار گرفتند. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی، منجر به افزایش سختی، کاهش تغییر مکان‌ها و افزایش مقاومت برشی نهائی تیرها می‌گردد. الگوها و مدل‌های ترک خوردگی تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا در بار نهایی مشابه بودند. همچنین کاهش فاصله خاموت‌ها در دهانه برشی منجر به افزایش شکل پذیری و بار گسیختگی در کلیه تیرها گردید.

واژگان کلیدی: بتن خودتراکم، پودر سنگ آهک، پودر میکرو سیلیس، جعبه L-BOX، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، لنگر ترک خوردگی، مقاومت برشی نهایی.

\* نویسنده مسئول: Amir.ghods83@gmail.com

## ۱- مقدمه

انجام شد تا زمانی که منجر به گسیختگی برشی در تیرها شد. پس از انجام آزمایش از آزمایش‌ها برای تیرهای معمولی و SCC با مقاومت بالا مقایسه صورت گرفت.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- خواص مصالح

سه مخلوط بتنی در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفتند: یک بتن معمولی با مقاومت مشخصه مکعبی  $40 \text{ MPa}$  و دو مخلوط بتن SCC مقاومت بالا با مقاومت مشخصه مکعبی  $60$  و  $80$  مگاپاسکال.

شن مصرفی از یک مصالح سنگی شکسته با اندازه ذرات اسمی  $20-6$  میلی‌متر و ماسه مصرفی از یک ماسه رودخانه ای شهر آمل با اندازه ذرات اسمی  $6-0$  میلی‌متر انتخاب گردید. شایان ذکر است ماسه مصالحی است که در کل از الک نمره چهار گذشته و روی الک شماره  $100$  می‌ماند و شن سنگ‌دانه‌هایی است که کلاً روی الک نمره  $4$  باقی می‌ماند. ضمناً، به دلیل وجود سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر در دپوی ماسه، ماسه موجود از الک نمره  $4$  عبور داده شد. نسبت وزن مصالح خشک شده در گرمخانه (مصالح فاقد رطوبت جذب شده) به حجم مصالح، معرف وزن مخصوص مصالح می‌باشد که این مقدار برای ماسه و شن به ترتیب  $2580/1$  و  $2640/2$  کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.

در مخلوط‌های SCC مقاومت بالا غالباً مقادیر مصالح پودری بالا به دلیل رسیدن به یک مقدار تسلیم کافی و چسبندگی مخلوط تازه مصرف می‌شود. بنابراین، شیره دهی، جدا شدگی و ته نشینی کاهش می‌یابد. چون استفاده از مقادیر بالای سیمان هزینه را افزایش می‌دهد و منجر به بالا رفتن حرارت هیدراسیون می‌شود، لذا معمولاً مصالح سیمانی دیگری از قبیل پودرسنگ آهک (LSP)، سرباره آهنگدازی (GGBS) و خاکستر زغال سنگ (Fly Ash) بجای سیمان در مخلوط‌های گوناگون SCC استفاده می‌شود [۲]. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا ساخته شده در این تحقیق با سیمان پرتلند نوع دو، پودرسنگ آهک (LSP) و پودر میکرو سیلیس به‌عنوان پرکننده تهیه گردیدند و مخلوط‌های بتن معمولی فقط از سیمان پرتلند نوع دو استفاده کردند.

یکی از فرآورده‌های جدید فوق روان کننده بنام Viscocrete.1

توسعه بتن خود متراکم (SCC) یک موفقیت مطلوب در صنعت ساخت به منظور غلبه کردن بر مشکلات مربوط به بتن ریزی است. بتن خود متراکم توسط پارامترهایی از قبیل کارگران ماهر، شکل و میزان میلگردها یا آرایش یک سازه تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و به دلیل روانی بالای آن و مقاومت در مقابل جدا شدگی می‌تواند مسافت‌های خیلی طولانی پمپاژ شود. مفهوم بتن خود متراکم در سال  $1986$  به وسیله پروفیسور هاجیمه اکامورا پیشنهاد شد، اما نخستین نمونه در ابتدا در سال  $1988$  در ژاپن توسط پروفیسور ازوا در دانشگاه توکیو ساخته شد و از آن هنگام، تحقیقات گوناگونی انجام شده است.

بتن خود متراکم، در حال حاضر می‌تواند به‌عنوان یک مصالح ساختمانی پیشرفته، طبقه بندی شود، همان‌طوری که از نام آن پیداست، لازم نیست برای رسیدن به حالت متراکم ویریه شود.

این بتن دارای مزایا و منافع زیادی نسبت به بتن معمولی می‌باشد که به‌عنوان مثال می‌توان به بهبود کیفیت بتن، کاهش تعمیرات در محل، دوره‌های سریع‌تر ساخت، هزینه‌های کلی پایین‌تر و تسهیل فرآیند اتوماسیون در ساخت بتن اشاره کرد. همچنین باعث بهبود کلی شرایط بهداشتی و ایمنی به علت حذف استفاده از ویراتورها و یک کاهش اساسی در میزان سر و صدای محیطی در اطراف کارگاه می‌شود. ترکیب مخلوط‌های بتنی SCC شامل نسبت‌های قابل توجهی از مصالح غیر آلی ریزدانه را شامل می‌شود که کاربرد مواد افزودنی را که به‌عنوان فرآورده‌های زاید و پسمانده در نظر گرفته شدند و هیچ‌گونه کاربرد عملی ندارند و همچنین هزینه‌های تخلیه و دفع آنها بسیار زیاد است را ممکن می‌سازد [۱].

کار تجربی در تحقیق حاضر شامل آزمایش تیرهای بتن مسلح ساخته شده از مخلوط‌های بتنی معمولی و SCC با مقاومت بالا است.

برنامه آزمایش شامل  $9$  عدد تیر است که  $3$  عدد از این تیرها از مخلوط‌های بتن معمولی با مقاومت  $40$  مگا پاسکال و  $6$  عدد دیگر از این تیرها از مخلوط‌های بتن SCC با مقاومت بالا با مقاومت‌های  $60$  و  $80$  مگا پاسکال ساخته شدند. در هر یک از گروه‌ها از فواصل خاموت گذاری  $80$ ،  $100$  و  $133$  میلی‌متر استفاده شد. پس از  $28$  روز، روی این تیرها آزمایش بارگذاری

## ۲-۴- روش‌های آزمایش برای بررسی خواص بتن تازه SCC

روش‌های آزمایش استفاده شده برای بررسی خواص بتن تازه SCC، روانی اسلامپ، جعبه L شکل می باشد. آزمایش اسلامپ شامل تعیین قطر متوسط نمونه بتنی پخش شده روی یک صفحه ستون پس از انجام آزمایش اسلامپ بدون هیچ تراکمی می باشد. این آزمایش قابلیت تغییر شکل بتن را تحت اثر وزن خود در مقابل اصطکاک سطح صفحه ستون بدون وجود هیچ نیروی خارجی مورد بررسی قرار می دهد. به خاطر طبیعت لزج SCC، اندازه گیری جریان اسلامپ زمانی انجام شد که جابجایی قابل تشخیص زیادی از بتن مشاهده نشد. در این آزمایش، زمان T50 نیز اندازه گیری شد، T50 زمان رسیدن به پخش افقی ۵۰۰ میلی متر روی صفحه ستون می باشد. اندازه های جعبه L شکل استفاده شده در شکل (۱) نشان داده شده است. ممکن است اندازه گیری خواص مختلف از قبیل قابلیت‌های پر کردن و جا گرفتن و جدا شدگی سنگدانه ها با جعبه L شکل انجام شود. قسمت قائم جعبه با ۱۲/۷ لیتر بتن پر می شود و برای یک دقیقه به همان حال رها می شود که اجازه داده شود جدا شدگی در سنگدانه‌ها اتفاق بیفتد. پس از آن دریاچه باز می شود و بتن از قسمت قائم جعبه به قسمت افقی و از بین میلگردها وارد می شود. ارتفاعات H1 و H2 بتن اندازه گیری شد و برای تعیین  $h_2/h_1$  جعبه L شکل به کار می رود [۲].

که بر پایه کوپلیم طراحی شده (پلی کربوکسیلیک اصلاح شده) برای مخلوط‌های SCC مقاومت بالا استفاده گردید.

## ۲-۲- معرفی ویژگی‌های نمونه‌ها

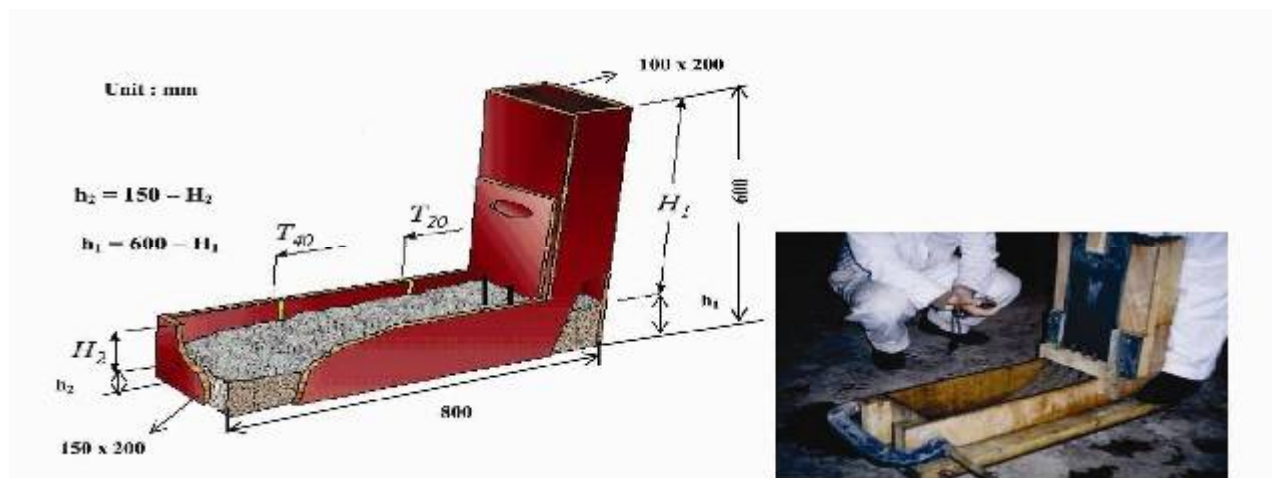
جهت سهولت در تشخیص مربوط به تیرها، از حروف اختصاری استفاده می شود که در این قسمت به توضیح آن‌ها می پردازیم. تیرهایی که بتن آن‌ها از نوع معمولی است با علامت NC و تیرهایی که بتن آن‌ها از نوع SCC با مقاومتی ۶۰ مگا پاسکال می باشد با علامت SCC60 و تیرهایی که بتن آن‌ها از نوع SCC با رده مقاومتی ۸۰ مگا پاسکال می باشد، با علامت SCC80 نشان داده می شود. عددی که بعد از S نشان داده می شود نشان دهنده فاصله خاموت‌ها در طول دهانه برشی تیرها می باشد.

## ۳-۲- نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های SCC مقاومت بالا و بتن معمولی

نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های SCC مقاومت بالا استفاده شده در این تحقیق با آزمایش مخلوط‌ها و بر پایه گزارش‌های جامع از پروژه‌های مختلف تعیین گردیدند. نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های NC و SCC60 و SCC80 در یک متر مکعب در جدول (۱) نشان داده می شوند. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا حاوی پودر سنگ آهک و پودر میکرو سیلیس بودند که روانی و چسبندگی و محدودیت تولید گرما را افزایش می دهند. عموماً چنین مصالحی واکنش کمتری نسبت به سیمان دارند و می توانند مشکلات حاصله از افت روانی بتن پر سیمان را کاهش دهند [۳].

جدول ۱- نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های SCC و بتن معمولی

نسبت‌های اختلاط (kg/m <sup>3</sup> )	مقادیر اجزای تشکیل دهنده بتن‌های مختلف (kg/m <sup>3</sup> )		
	NC	SCC <sub>60</sub>	SCC <sub>80</sub>
سیمان	۴۵۰	۴۵۰	۴۹۵
پودرمیکروسلیس	—	۵۰	۵۵
پودر سنگ آهک	—	۱۵۰	۱۶۵
شن بااندازه ذرات اسمی ۲۰-۶ میلی متر	۱۰۰۲/۵	۸۶۲/۵	۸۱۷/۹
ماسه بااندازه ذرات اسمی ۰-۶ میلی متر	۶۹۳/۵	۶۶۳/۵	۶۲۹/۱
آب مؤثر	۲۰۴	۱۶۵	۱۷۷
فوق روان کننده (Viscocrete I)	—	۹	۱۱
نسبت آب مؤثر به سیمان	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۶
نسبت آب مؤثر به پودر	—	۰/۲۶	۰/۲۵

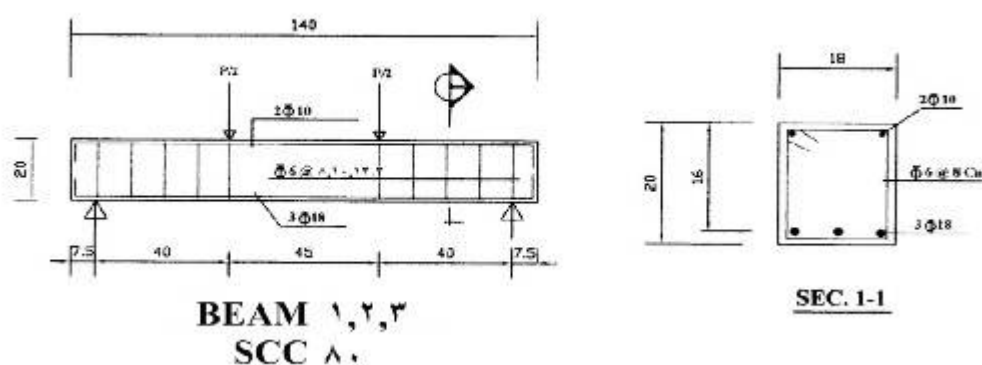


شکل ۱- آزمایش جعبه L-BOX

### ۲-۵- طرح سازه‌ای تیرها در ابعاد واقعی

تیرها نسبت به بارهای وارده و نحوه آرایش میلگردها در شکل (۲) نشان داده شده است. برای هر رده ۴۰، ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال تعداد ۳ عدد تیر در نظر گرفته شد. تیرهای ساخته شده از بتن معمولی با سه میلگرد ۱۶ برای ناحیه کششی و ۲ میلگرد ۱۰ برای ناحیه فشاری مسلح شدند و تیرهای ساخته شده از SCC با مقاومت بالا دارای مقاومت های ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال، به ترتیب هر کدام با سه میلگرد ۱۶ و ۱۸ برای ناحیه کششی (۲۱/۰ ρ) و ۲ میلگرد ۱۰ برای ناحیه فشاری مسلح شدند.

در این بررسی به تعداد ۹ عدد تیر با ابعاد یکسان مورد آزمایش بارگذاری قرار گرفتند. طول کلیه تیرها ۱۴۰ سانتی متر در نظر گرفته شد که بر روی تکیه گاه‌هایی با دهانه ۱۲۵ سانتی متر (L=۱۲۵cm) مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند. عرض مقطع این تیرها ۱۸ سانتی متر (b=۱۸cm) و ارتفاع مقطع ۲۰ سانتی متر (h=۲۰cm)، عمق مؤثر ۱۶ سانتی متر (d=۱۶cm) و نسبت طول دهانه برشی به عمق مؤثر ۲/۵ (a/d=۲/۵) انتخاب گردید. (مود خمشی و برشی ترکیبی) مشخصات هندسی یکسان



شکل ۲- مشخصات هندسی تیرها نسبت به بارهای وارده و نحوه آرایش میلگردها

### ۲-۶- روش آزمایش تیرها

آزمایش کلیه تیرها پس از گذشت ۲۸ روز از تاریخ بتن‌ریزی انجام گرفت. قبل از اعمال بار بر روی تیرها، برای مشخص شدن

هر کدام از این گروه‌ها در طول دهانه برشی با استفاده از میلگردهای به قطر ۶mm به فواصل ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ میلی‌متر خاموت گذاری گردیدند.

### ۳- نتایج حاصل از آزمایش

#### ۳-۱- نتایج آزمایش‌ها روی بتن تازه مخلوط‌های

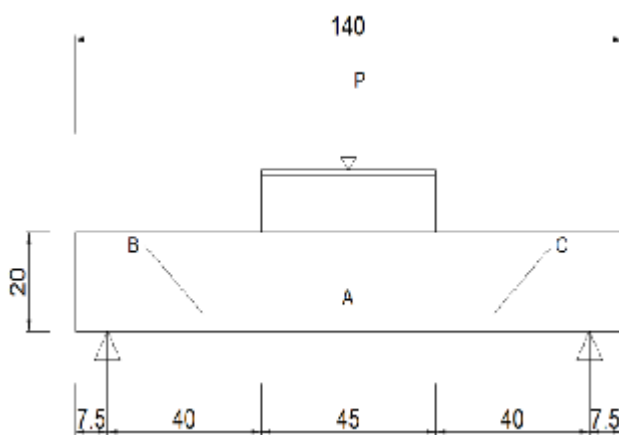
#### SCC

برای کنترل طرح اختلاط و اهداف پذیرش لازم بود. روانی اسلامپ و L-box برای آزمایش کارایی SCC مقاومت بالا مورد استفاده قرار گرفتند.

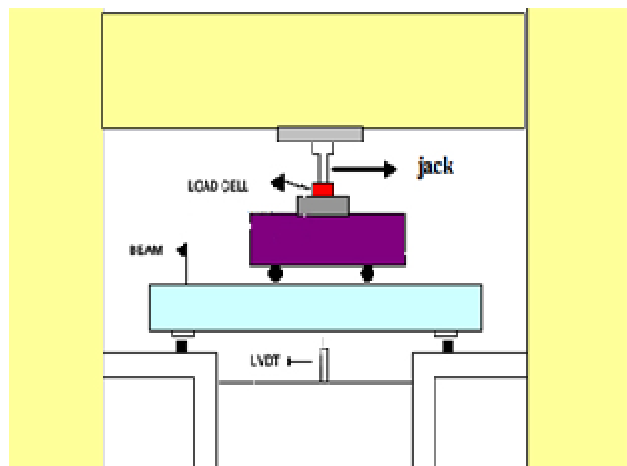
نتایج آزمایش‌ها خواص تازه مخلوط‌های SCC مقاومت بالا و NC در جدول (۲) نشان داده شده است. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا روانی و کارایی بیشتری نسبت به مخلوط‌های بتن معمولی داشتند. مخلوط‌های بتن معمولی به وسیله آزمایش اسلامپ معمولی مورد سنجش قرار گرفته‌اند و خواص تازه آنها قابل مقایسه با همان خواص در SCC نمی باشد. به طوری که، تفاوت اساسی خواص مخلوط‌های SCC آنها را مجاب می‌سازد که قابلیت روانی و کارایی بالایی داشته باشند. نسبت حجم درشت دانه در مخلوط‌های مرجع بطور قابل توجهی بالاتر از مخلوط‌های SCC هست. مخلوط‌های SCC مقاومت بالا طوری طراحی شدند که فیلر بیشتری داشته باشند. مخلوط‌های SCC همچنین شامل ملات بیشتر و درشت دانه کمتر می باشند که این در افزایش کارایی مؤثر است. با این حال، افزایش در قابلیت روانی به شدت تحت اثر فوق‌روان کننده Viscocrete1 می‌باشد.

مسیر ترک‌ها که بر اثر اعمال بار به وجود می‌آیند، سطح تیر با رنگ سفید پوشانده شده و پس از آن، محل دقیق اعمال بار، محل تکیه گاه‌ها، محل قرارگیری خیزسنج در مرکز تیر و نقاط مربوط به سنجش کرنش‌ها به طور دقیق تعیین و علامت گذاری شد. پس از قرار دادن تیر بر روی تکیه گاه‌ها، از موقعیت صحیح تکیه گاه‌ها و محل اعمال بار و تراز بودن تیر و تکیه گاه‌ها اطمینان حاصل می‌شود. شکل (۳) طرح کلی دستگاه بارگذاری و شکل (۴) شکل مدل سازی شده تیر را همراه با موقعیت اعمال بار و دکه‌های سنجش کرنش را نشان می‌دهد که بر روی میلگرد کششی و فشاری و در ناحیه بتن فشاری جهت انجام صحت آزمایش نصب گردید. همان طوری که مشاهده می‌شود، بار کل به وسیله یک تیر فولاد صلب به صورت دو بار متمرکز به صورت مرحله به مرحله (۱ تن) به تیرها وارد گردید و سلول بار کالیبره شده بین جک و تیر فولادی قرار دارد.

لازم به ذکر است که وقتی از بار گسیختگی صحبت می‌شود، منظور همان بار کل وارده از سلول بار است که ابتدا به تیر فولادی صلب وارد شده و از طریق آن به صورت دو بار متمرکز و متقارن به تیر بتنی وارد می‌گردد. کرنش سنج‌های B و C به ترتیب در نواحی دهانه‌های برشی سمت چپ و راست تیرها قرار گرفتند.



شکل ۴- نحوه اعمال نیرو بر تیرهای آزمایش و کرنش سنج‌ها



شکل ۳- طرح کلی دستگاه بارگذاری

جدول ۲- نتایج آزمایش‌ها بر روی بتن تازه

آزمایش‌ها	گروه	NC	SCC <sup>۶۰</sup>	SCC <sup>۸۰</sup>
روانی اسلامپ	روانی اسلامپ (mm)	۸۳	۶۸۰	۷۱۰
	T50 (Sec)	_____	۳	۴
جعبه L شکل	نسبت h2/h1	_____	۰/۹۵	۱

است و نسبت های افزایش نسبی مقاومت تا مقاومت های ۲۸ روز در شکل (۶) قابل مشاهده است. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان می دهند که مقاومت های واقعی بتن های SCC بالاتر از مقاومت های مشخصه طراحی بودند، در حالی که مخلوط های بتن معمولی در محدوده طراحی قرار دارند. همان طور که انتظار می رفت مقاومت فشاری به شدت به وسیله نسبت آب به سیمان و فیلر مورد استفاده (پودرسنگ آهک و میکروسیلیس) تحت تأثیر بودند به طوری که مخلوط های SCC با مقاومت بالا در سنین اولیه دارای مقاومت بالایی بودند که این امر می تواند به دلیل اثر تسریع کنندگی پودرسنگ آهک بر روی هیدراسیون سیمان باشد [۲]. نتایج موجود در شکل (۶) نشان می دهند که اختلاف قابل توجهی در نمودار افزایش رشد مقاومت در هیچ یک از مخلوط های مورد مطالعه وجود ندارد.

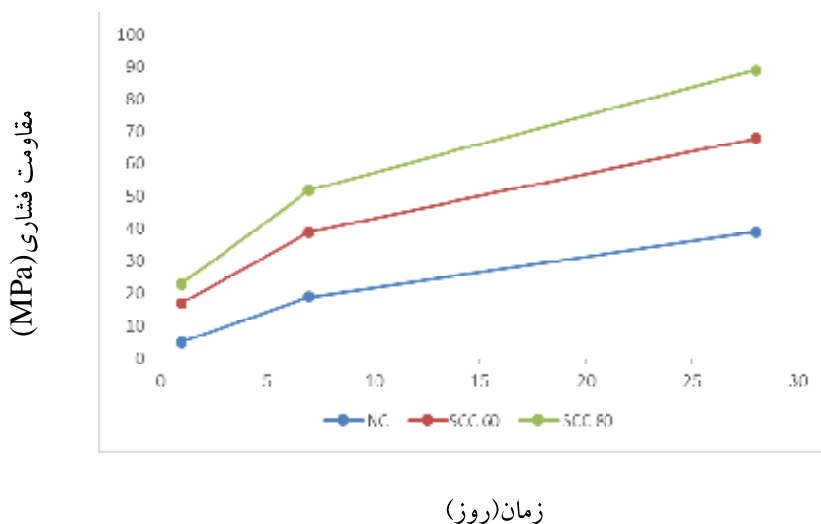
مقادیر روانی اسلامپ مخلوط های SCC مقاومت بالا به ترتیب برابر با ۶۸۰ و ۷۱۰ میلی متر بود. همچنین مقادیر T50 مخلوط های SCC مقاومت بالا به ترتیب ۳ و ۴ ثانیه قرار داشت. نتایج جعبه L شکل مخلوط های SCC مقاومت بالا قابلیت تغییر شکل و روانی مناسبی را نشان داد و نسبت انسداد h2/h1 بزرگتر از ۰/۸ بوده که مقدار ۰/۸ اغلب به عنوان حد بحرانی کوچکتر در نظر گرفته می شود [۲]. نسبت مقادیر برای مخلوط های SCC مقاومت بالا نزدیک به یک بود. این مقدار بالا قابلیت تغییر شکل بدون انسداد را در میان موانع نزدیک به هم (میلگردها) و قابلیت روانی بالای بتن SCC را نشان داد.

### ۳-۲- بررسی رفتار مقاومت فشاری

نمونه های مقاومت فشاری مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰× ۱۰۰mm پس از گذشت یک روز قالب برداری شدند و سپس نمونه ها در آب بعمل آورده شدند تا زمانی که آزمایش ۱، ۷ و ۲۸ روزه انجام بشود. در شکل (۵) افزایش مقاومت تا ۲۸ روز برای مخلوط های بتنی SCC مقاومت بالا و معمولی نشان داده شده

### ۳-۳- بررسی رفتار مقاومت کششی غیر مستقیم

مقاومت کششی غیر مستقیم در ۲۸ روز بر روی نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰۰mm و طول ۲۰۰mm انجام شد و نمونه ها



شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری نمونه های آزمایش

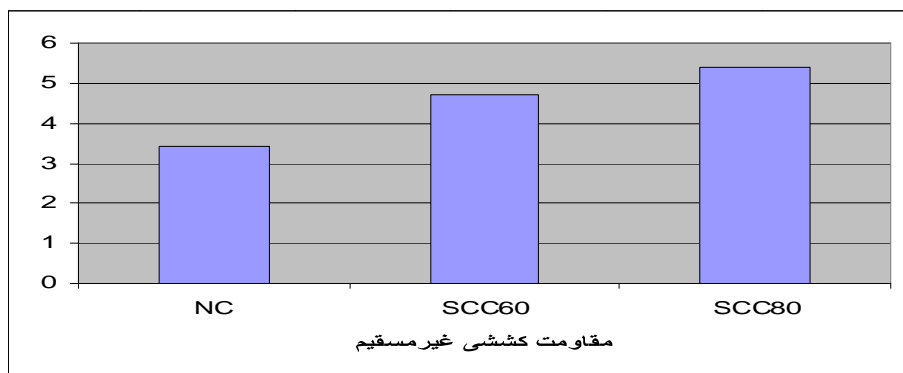
تیرها نسبت به بتن معمولی NC در فواصل خاموت گذاری متناظر نشان می دهند.

در شکل بالا مشاهده می شود که استفاده از بتن SCC مقاومت بالا منجر به افزایش شیب منحنی های بار-خیز تیرها در مقایسه با بتن معمولی می گردد. تیرهای SCC مقاومت بالا دارای سختی بیشتر و تغییر مکان های کمتری در مقایسه با تیرهای بتن معمولی تحت بارگذاری یکسان می باشند (این امر مبین قابلیت جذب انرژی بیشتر تیرهای SCC مقاومت بالا در مقایسه با تیرهای بتن معمولی است). در منحنی های بار-خیز تیرهای SCC مقاومت بالا، در موقعیت انتهای حد خطی شکست قابل توجهی وجود می آید. در تیر SCC80 به فاصله خاموت ۸۰ میلی متر علاوه بر افزایش مقاومت، می توان به سختی و قابلیت جذب انرژی بیشتر دست پیدا کرد. از سوی دیگر، تیر بتن معمولی با فاصله خاموت ۱۳۳ میلی متر دارای کمترین سختی در میان تیرهای مورد آزمایش است.

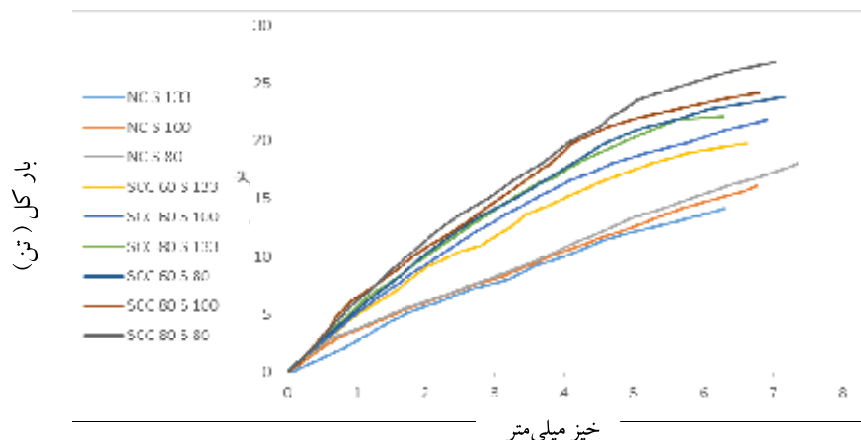
در آب تا زمانی که تاریخ آزمایش به اتمام رسید، به عمل آورده شد. مقایسه مقاومت های کششی غیر مستقیم ۲۸ روزه مخلوط های با مقاومت بالا و بتن معمولی در شکل (۷) نشان داده شده است. ملاحظه گردید که مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط های SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن NC بیشتر است. همچنین نتایج نشان می دهند که ارتباط مقاومت فشاری با مقاومت کششی غیر مستقیم در مورد مخلوط های SCC مقاومت بالا و بتن معمولی تقریباً مشابه است.

### ۳-۴- رابطه بار-خیز

با ترسیم منحنی های تجربی بار-خیز، می توانیم سختی، تغییر مکان و تغییر شکل تیرها را مورد ارزیابی قرار دهیم. این منحنی ها در شکل (۸) نشان داده شده است. در ابتدا کلیه تیرها ترک نخورده و سالم بودند. با افزایش بارگذاری ترک در وسط دهانه اتفاق می افتد. شکل (۸) تأثیر استفاده از بتن SCC با مقاومت بالا روی واکنش های بار-خیز



شکل ۷- مقاومت کششی غیر مستقیم (شکاف خوردگی) مخلوط های SCC و معمولی



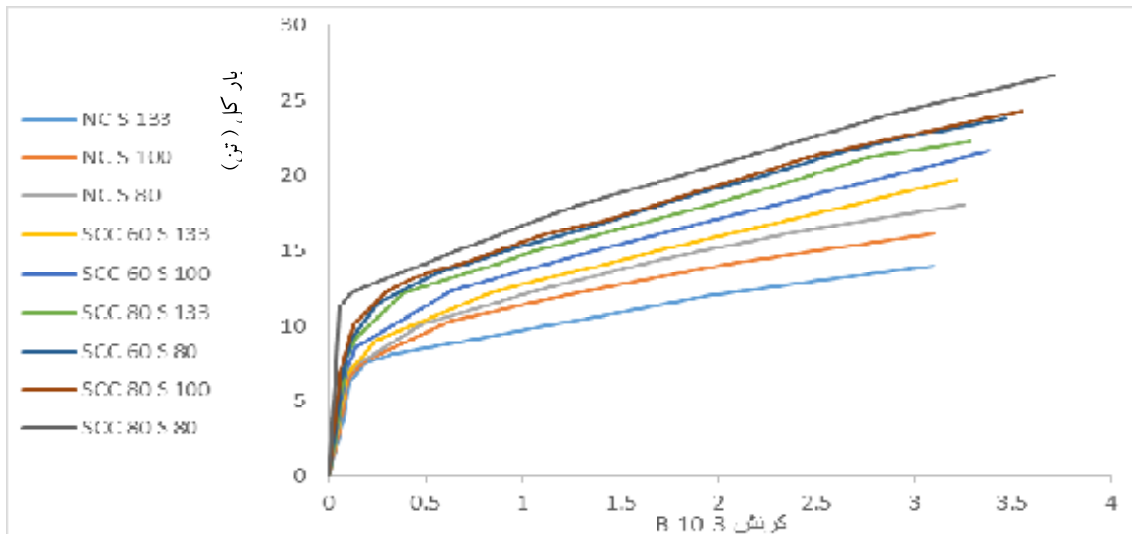
شکل ۸- منحنی تجربی بار-خیز تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا

کرنش سنج‌های B و C به منظور بررسی تأثیر نوع بتن، فاصله خاموت‌ها و مقاومت بتن بر بازشدگی ترک‌های قطری، با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه کرنش سنج‌های مزبور کاملاً در نواحی برشی قرار داشتند، تأثیر استفاده از بتن SCC مقاومت بالا، فاصله خاموت‌ها و مقاومت بتن بر مقادیر ثبت شده از آنها نسبتاً قابل توجه است.

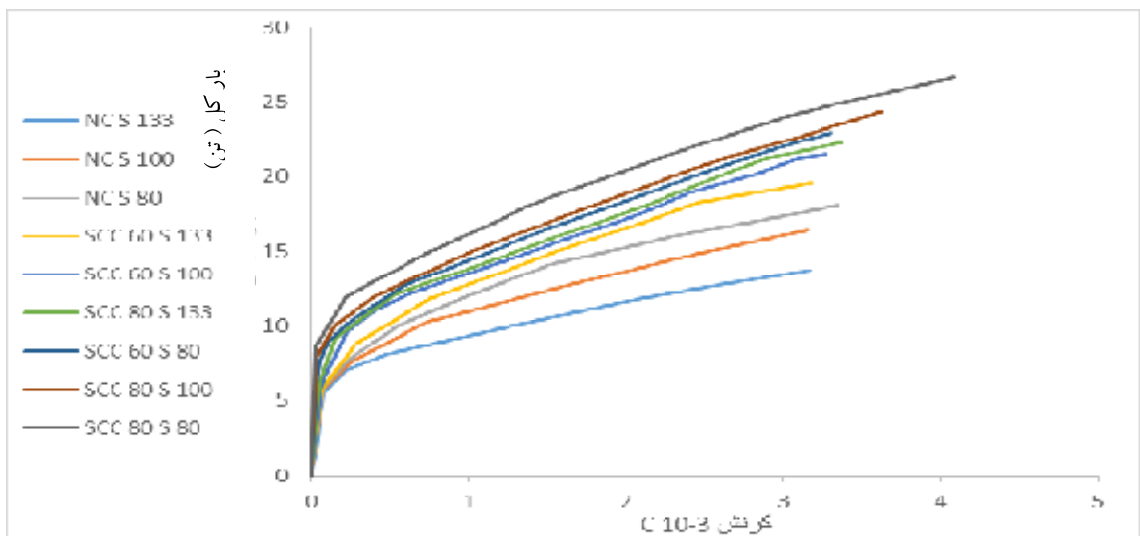
شکل (۹ و ۱۰) تأثیر استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی روی واکنش‌های بار-کرنش B و C تیرها در هر یک از فواصل خاموت گذاری متناظر نشان می‌دهند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، نتایج نشان می‌دهند که کاهش فاصله خاموت‌ها در هر یک از گروه‌ها منجر به افزایش شیب منحنی‌های بار-خیز تیرها می‌گردد. این امر مبین این است که کاهش فاصله خاموت‌ها سبب افزایش سختی و کاهش تغییر مکان‌های تیرها تحت بارگذاری یکسان می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهند که کاهش فاصله خاموت‌ها در هر یک از گروه‌های آزمایشی منجر به مقیدتر کردن پیشرفت ترک خوردگی مایل و شکل پذیری بیشتر تیرها می‌شوند.

### ۳-۵- بررسی رفتار بار-کرنش B و C



شکل ۹- منحنی‌های بار-کرنش B تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا



شکل ۱۰- منحنی‌های بار-کرنش C تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا



### ۳-۶- رفتار ترک خوردگی و الگوی ترک‌ها

کلیه نمونه‌های تیر در برش گسیخته شدند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی، روی زمان تشکیل اولین ترک خوردگی (برشی و خمشی) و عملکرد بهتر بهره‌برداری تیرها در بارهای سرویس تأثیر دارد. مقادیر موجود در جدول (۳)، بار و لنگر ترک خوردگی متوسط در هر یک از گروه‌های مورد آزمایش در این تحقیق را نشان می‌دهند.

برای کلیه تیرها، در بارهای کم، وقتی که تنش کششی در بتن از مقاومت کششی (مدول گسیختگی) کمتر است تمام مقطع بتنی در مقابله با لنگر خمش مؤثر است. با افزایش تدریجی بار وارد بر تیرها، ترک خوردگی در دهانه خمشی عمدتاً از ترک‌های قائم عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر که به سبب لنگر خالص است، تشکیل می‌شوند. ترک خوردگی بیرون منطقه خمش خالص با ترک خوردگی خمشی شروع شد، اما هر قدر که بار افزایش می‌یافت ترک‌های دیگری تشکیل شدند و هر قدر تنش‌های برشی بزرگ‌تر شدند، ترک‌ها بیشتر به صورت ترک‌های قطری نمایان شدند. پس از آن، ترک خوردگی به سمت مجاورت نقاط بارگذاری در وجه فشاری تیرها پیش رفتند تا اینکه این ترک‌های ممتد برشی سبب گسیختگی تیرها شدند.

با مقایسه رفتار ترک خوردگی در تیرهای مورد آزمایش نتیجه می‌شود که الگوها و نمونه‌های ترک خوردگی در کلیه تیرها تحت بار نهایی مشابه‌اند. در تیرهای SCC مقاومت بالا، تعداد ترک خوردگی برشی بیشتری نسبت به تیرهای بتن معمولی وجود داشت. از این رو، استفاده از بتن‌های SCC با مقاومت بالا در تیرها منجر به عملکرد بهتر در بهره‌برداری و شروع اولین ترک برشی و خمشی و کاهش عرض ترک تحت بارگذاری یکسان می‌گردد. نحوه ترک خوردگی در تیرهای مورد مطالعه تحت اثر بار نهایی برشی در شکل‌های (۱۱) الی (۱۹) نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود کلیه تیرهای SCC مقاومت بالا و بتن معمولی رفتار مشابه‌ای را در واکنش‌های بار- کرنش B و C نشان می‌دهند. در منحنی‌های بار- کرنش B و C مشاهده می‌شود که کلیه تیرها در ابتدای بارگذاری، از نظر سختی اولیه رفتاری مشابه دارند. با افزایش بارگذاری، شکست قابل توجهی در منحنی‌های بار- کرنش B و C اتفاق می‌افتد که این امر نشان دهنده بازشدگی ترک‌های قطری تشکیل شده در دهانه‌های برشی است. ملاحظه می‌شود این شکست در تیرهای SCC مقاومت بالا به دلیل سختی و مقاومت فشاری بالاتر، دیرتر اتفاق می‌افتد. پس از تشکیل ترک‌های قطری، میلگردهای برشی شروع به کار کردند و مقاومت برشی را از طریق انتقال مستقیم نیروی برشی افزایش دادند و از توسعه ترک‌های قطری جلوگیری کردند و در ادامه ترک‌های قطری به سمت ناحیه فشاری گسترش یافتند. در نهایت با تسلیم میلگردهای برشی، قسمت بالای تیر به دلیل ترکیب تنش‌های برشی و فشاری شکسته شد. (با قرایت کرنش سنج‌های تعبیه شده در محل مورد نظر)

با مقایسه کلی منحنی‌های بار- کرنش تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا در فواصل خاموت گذاری متناظر ملاحظه می‌شود که تیرهای SCC مقاومت بالا به دلیل مقاومت فشاری و سختی بیشتر، شیب بیشتری در منحنی‌های بار- کرنش B و C نسبت به تیرهای بتن معمولی نشان می‌دهند. در شرایط بارگذاری یکسان، ترک‌های قطری تشکیل شده در تیر SCC80 با فاصله خاموت ۸۰ میلی‌متر، دارای کمترین عرض نسبت به تیرهای دیگر است؛ بنابراین، استفاده از بتن SCC مقاومت بالا در تیرها سبب کاهش کرنش‌های B و C در مقایسه با تیرهای بتن معمولی در فواصل خاموت گذاری متناظر می‌شود.

جدول ۳- بار و لنگر ترک خوردگی متوسط هر یک از گروه‌ها

گروه	بار ترک خوردگی (Ton)	لنگر ترک خوردگی (Ton)
NC	۲/۸۵	۰/۵۷
SCC۶۰	۳/۸۵	۰/۷۶
SCC۸۰	۴/۴۵	۰/۸۸



شکل ۱۲- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر NCS100



شکل ۱۱- نحوه ترک خوردگی آزمایش تیر NCS80



شکل ۱۴- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر SCC60S80



شکل ۱۳- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر NCS133



شکل ۱۶- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر SCC60S133



شکل ۱۵- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر SCC60S100



شکل ۱۸- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر SCC80S100



شکل ۱۷- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر SCC80S80



شکل ۱۹- نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر SCC80S133

### ۳-۷- لنگر توک خوردگی

با افزایش تدریجی بار وارد بر تیر از مقدار صفر تا مقداری که باعث خرابی تیر گردد، مراحل مختلفی از رفتار تیر قابل تشخیص است. در بارهای کم، وقتی که تنش کششی در بتن از مقاومت کششی (مدول گسیختگی) کمتر است. در این حالت، هر دو مصالح بتن و فولاد به صورت کِشسان (خطی) و یا نزدیک به آن رفتار می کنند و در این وضعیت، تغییرات کرنش در ارتفاع تیر خطی است و هر دو مصالح بتن و فولاد از قانون هوک پیروی می کنند (تنش متناسب با کرنش است). با افزایش بیشتر بار، بتن به مقاومت کششی خود می رسد و در این مرحله ترک های کششی در نواحی کششی تشکیل می شود. بالاخره با افزایش بیشتر بار، ظرفیت نهایی برشی تیر فرا می رسد.

با توجه به فرضیات مربوط به تحلیل کِشسان مقطع، برای محاسبه تنش در فولاد و بتن، از ایده مقطع تبدیل یافته استفاده می شود. مقطع تبدیل یافته از کل مقطع بتنی و  $n$  برابر سطح مقطع فولاد تشکیل می یابد.  $n$  نسبت ضریب الاستیسیته فولاد به بتن است که به عنوان نسبت مدولی نامیده می شود  $(n = E_s/E_c)$  [۵].

لنگر ترک خوردگی تئوریک از فرمول خمش تیرهای همگن به دست می آید:

$$M_{cr} = \frac{frI}{y'} \quad (1)$$

که در آن:

$f_r$ : مدول گسیختگی بتن است و تنش کششی بتن به مدول گسیختگی  $f_r$  محدود می شود.

۱: ممان اینرسی مؤثر مقطع است که مساوی ممان اینرسی مقطع ترک نخورده تبدیل یافته است.

$y'$ : فاصله لایه کششی انتهایی مقطع تا مرکز سطح است [۵].  
در محاسبات عملی، ممان اینرسی مقطع ترک نخورده را می توان با دقت خوب مساوی ممان اینرسی مقطع کلی بتنی یعنی  $I_g$  فرض نمود. در نتیجه لنگر ترک خوردگی در کارهای عملی طبق آیین نامه بتن ایران به جای رابطه (۱) رابطه ساده تر زیر پیشنهاد شده است: (البته در کارهای پژوهشی که نیازمند دقت بالاتر می باشند توصیه نمی شود).

$$M_{cr} = \frac{frI_g}{yt} \quad (2)$$

مدول گسیختگی بتن (مقاومت کششی خمشی بتن) در روابط فوق با استفاده از رابطه زیر استفاده می شود: (رابطه ۹-۱۷-۳)

$$f_r = 0.6 \sqrt{f_c} \quad (3)$$

که در آن:

$f_c$ : مقاومت مشخصه فشاری بتن (نیوتن بر میلی متر مربع)

$f_r$ : مدول گسیختگی بتن (مقاومت کششی خمشی بتن)

$yt$ : فاصله تار خارجی کششی تا محور خنثی کل مقطع بتنی

(میلی متر) است [۵].

آیین نامه ACI 318-05 مدول گسیختگی بتن با وزن معمولی را به صورت زیر پیشنهاد می کند:

$$f_r = 2 \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

پیش‌بینی آیین‌نامه 318-05 ACI در برآورد ممان ترک‌خوردگی تیرهای ساخته‌شده از بتن مقاومت بالا، نتایج نزدیک‌تری را نسبت به سایر روابط استفاده‌شده در تخمین لنگر ترک‌خوردگی تیرهای SCC مقاومت بالا به دست می‌دهد. از این رو، رابطه پیشنهادشده توسط آیین‌نامه 318-05 ACI در تخمین لنگر ترک‌خوردگی بتن مقاومت بالا، می‌تواند برای بتن SCC مقاومت بالا استفاده شود.

### ۳-۸- مقاومت برشی نهایی

علاوه بر تأمین مقاومت خمشی، تیرهای بتن مسلح باید در مقابل ایجاد ترک‌های کششی قطری که ناشی از ترکیب تنش برشی و تنش قائم خمشی می‌باشند، مقاوم باشند. اغلب تیرهای بتن مسلح در مناطقی که نیروی برشی زیاد است، توسط خاموت‌ها مسلح می‌شوند [۵].

طبق آیین‌نامه بتن ایران، مقاومت برشی تأمین‌شده توسط بتن در اعضای تحت اثر برش و خمش از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_c = v_c b_w d \quad (6)$$

که در رابطه فوق:

$b_w$ : پهناي جان (میلی‌متر)

که در آن  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [۴].

نتایج تجربی و تئوریک لنگرها در ابتدای ترک‌خوردگی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴) نشان می‌دهد که پیش‌بینی آیین‌نامه بتن ایران و ACI 318-05 در برآورد لنگر ترک‌خوردگی در هر یک از گروه‌های آزمایشی NC و SCC مقاومت بالا نسبت به نتایج تجربی محافظه کارانه است. ملاحظه می‌شود که این اختلاف در مورد تیرهای بتن SCC مقاومت بالا در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است.

آیین‌نامه 318-05 ACI رابطه دیگری را برای بتن‌های با مقاومت بالا پیشنهاد می‌کند که به صورت زیر است:

$$f_r = 2.97 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

که در رابطه بالا  $f'_c$  مقاومت مشخصه بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [۴]. در جدول (۵) ممان ترک‌خوردگی حاصل از رابطه (۵) برای مقایسه با لنگر ترک‌خوردگی به دست آمده از آزمایش‌های تیرهای SCC مقاومت بالا نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج تئوریک و تجربی لنگر ترک‌خوردگی در هر یک از گروه‌ها

تیرهای گروه آزمایشی	رابطه (۱-۴) و (۴-۴) (t.m)	رابطه (۳-۴) و (۴-۴) (t.m)	آیین‌نامه 318-05 ACI (t.m)	متوسط نتایج آزمایش
NC	۰/۴۲۷	۰/۴۱۴	۰/۴۲۹	۰/۵۷
SCC <sub>۶۰</sub>	۰/۶۰۸	۰/۵۸۹	۰/۵۹۲	۰/۷۶
SCC <sub>۸۰</sub>	۰/۷۲۸	۰/۶۴۱	۰/۶۴۳	۰/۸۸

جدول ۵- ممان ترک‌خوردگی تیرهای SCC با مقاومت بالا با استفاده از رابطه (۵)

تیرهای گروه آزمایشی	آیین‌نامه 318-05 ACI	متوسط نتایج آزمایش
SCC <sub>۶۰</sub>	۰/۸۷۸	۰/۷۶
SCC <sub>۸۰</sub>	۰/۹۵۵	۰/۸۸

$$v_s = \Phi_s A_v f_y \frac{d}{s} \quad (9)$$

در رابطه فوق،  $\Phi_s$ ، ضریب جزئی ایمنی مقاومت فولاد است که برابر با ۰.۸۵ پیشنهاد کرده است [۵].

آیین نامه ACI 318-05، نیروی مقاوم برشی نهایی میلگردهای برشی عمود بر محور عضو را به صورت زیر پیشنهاد می کند [۴]:

$$v_s = A_v f_y \frac{d}{s} \quad (10)$$

در جدول (۶) مقاومت برشی نهایی به دست آمده از روابط استاندارد های بتن ایران، ACI 318-05 و نتایج آزمایش نشان داده شده است:

جدول (۶) نشان می دهد که مقادیر برآورد شده توسط روابط آیین نامه های ایران و ACI 318-05 برای تیرهای SCC مقاومت بالا نسبت به نتایج به دست آمده از آزمایش ها محافظه کارانه است (آیین نامه ACI 318-05 نتایج نزدیک تری را در مقایسه با نتایج آیین نامه بتن ایران در محاسبه مقاومت برشی نهایی برشی به دست می دهد). این امر می تواند به دلیل کمبود داده های آزمایشگاهی و تجارب عملی در مورد بتن های خود متراکم با مقاومت بالا توسط این آیین نامه ها باشد.

جدول ۶- نتایج تئوریک و تجربی مقاومت برشی نهایی تیرهای مورد آزمایش

تیر	مقاومت برشی نهایی به دست آمده از آیین نامه بتن ایران (ton)	مقاومت برشی نهایی به دست آمده از آیین نامه ACI 318-05 (ton)	مقاومت برشی نهایی حاصل از نتایج آزمایش (ton)
NCS۸۰	۴/۶۵	۵/۸۸	۹
NCS۱۰۰	۴/۱۵	۵/۳۱	۸
NCS۱۳۳	۳/۶۵	۴/۷۵	۷
SCC۶۰S۸۰	۵/۴۷	۶/۹۸	۱۱/۸۵
SCC۶۰S۱۰۰	۴/۹۷	۶/۴۱	۱۰/۷۵
SCC۶۰S۱۳۳	۴/۴۷	۵/۸۵	۹/۶
SCC۸۰S۸۰	۵/۷۸	۷/۳۴	۱۳/۲۵
SCC۸۰S۱۰۰	۵/۲۸	۶/۷۷	۱۲
SCC۸۰S۱۳۳	۴/۷۸	۶/۲۱	۱۱

d: فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح میلگرد کششی طولی (میلی متر)

$v_c$ : تنش برشی قابل حمل توسط بتن در حالت نهایی که توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$v_c = 0.2\Phi_c \sqrt{f_c} \quad (7)$$

که در آن،  $\Phi_c$  ضریب جزئی ایمنی مقاومت بتن است و آیین نامه بتن ایران این ضریب را برابر با ۰.۶ پیشنهاد کرده است [۵].

آیین نامه ACI 318-05، مقاومت برشی تأمین شده توسط بتن در اعضای غیر پیش تنیده را که تنها تحت اثر برش و خمش قرار دارند، به صورت زیر پیشنهاد می کند:

$$v_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (8)$$

که در آن  $f'_c$  مقاومت فشاری مشخصه بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع است [۴].

آیین نامه بتن ایران نیروی برشی مقاوم نهایی میلگردها،  $v_s$ ، وقتی که میلگرد برشی عمود بر محور عضو بکار برده شود، به صورت زیر تعریف می کند:

## ۴- نتیجه گیری

۶- پیش‌بینی استاندارد ACI 318-05 در برآورد لنگر ترک خوردگی تیرهای ساخته شده از بتن مقاومت بالا، برای تیرهای ساخته شده از بتن SCC مقاومت بالا نیز می‌تواند استفاده شود.

۱- با استفاده از بتن SCC با مقاومت بالا، علاوه بر افزایش مقاومت برشی نهایی در تیرها، به سختی و قابلیت جذب انرژی بیشتری در مقایسه با بتن معمولی می‌توان دست یافت.

۲- با ثابت نگه داشتن میلگرد طولی و فاصله خاموت‌ها، استفاده از بتن SCC مقاومت بالا سبب افزایش مقاومت ترک خوردگی و مقاومت نهایی برشی تیرها می‌شود. این امر مبین آن است که بتن SCC مقاومت بالا روی زمان تشکیل اولین ترک خوردگی تأثیر دارد.

۳- با کاهش فاصله خاموت‌ها، کرنش‌ها و خیزهای تیر تحت بارگذاری یکسان کاهش می‌یابد. در حوزه بارهای سرویس چنین تأثیراتی مؤثرتر و مفیدتر است، زیرا علاوه بر کاهش عرض ترک‌ها، تغییر شکل‌ها و سختی برشی افزایش می‌یابد.

۴- در بار سرویس، ترک‌های بیشتر و عریض تری در تیرهای بتن معمولی نسبت به تیرهای بتن با مقاومت بالا در فواصل خاموت گذاری متناظر تحت بارگذاری یکسان وجود دارند که می‌تواند به اختلاف مقاومت فشاری (مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۸/۷ مگا پاسکال در برابر ۷۳.۶ مگا پاسکال) نسبت داده شود.

۵- با مقایسه رفتار ترک خوردگی تیرهای بتن معمولی و SCC مقاومت بالا می‌توان مشاهده نمود که الگوها و نمونه‌های ترک خوردگی در کلیه تیرها تحت بار نهایی مشابه بود.

## ۵- مراجع

- [1]. Okamura, H, "Self-Compacting High-Performance Concrete", Concrete International, pp.50-54 (1997).
- [2]. Sonebi, M., Bartos, P.J.M., Zhu, W., Gibbs, J., Tamimi, A., "Properties Of Hardened concrete", Advanced Concrete Masonry Centre, University Of Paisley, Scotland, United Kingdom.
- [3]. Pera, Husson, J., S. , Guilhot, B. "Influence of finely ground limestone on cement hydration", Cement & Concrete Composites, 1999 (21), 99-105.
- [4]. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05 318-02) and commentary (ACI 318-05 318 R-02)
- [5]. طراحی ساختمان‌های بتن مسلح بر مبنای آیین‌نامه بتن ایران (آبا) / شاپور طاحونی - تهران، دانشگاه تهران، موسسه انتشارات و چاپ، ۱۳۷۵.

## An Observation into Shear Behavior of High Strength Self-Compacting Concrete

O. Rezayifar

Assistant professor of Semnan University

A. Ghods\*

Structural engineering PhD student of Semnan University

( Received: 2014/1/12 - Accepted: 2015/4/29)

### Abstract:

In this research, we observe the effect of high strength SCC concrete on shear behavior, cracking moment & condition. The main testing parameters are concrete type, stirrups distance and concrete strength variation. Therefore nine samples were casted which three of them are normal concrete with 40 MPa strength and the others were SCC with high strength of 60 and 80 MPa. Stirrup distances of 80, 100 and 133 millimeters used for each groups. The testing beams were loaded with simple supports under two concentrate loads. The results have appeared that stiffness and ultimate shear strength increased with using SCC concrete whereas the displacement decreased. Modes of cracking and patterns of normal and high strength SCC concrete were the same in ultimate load and ductility and ultimate load is increases by stirrups distance reduction in each beams.

**Keywords:** self-compacting concrete, limestone powder, micro silica powder, L box, compressive strength, splitting tensile strength, cracking moment, ultimate shear strength

---

\* Corresponding author: Amir.ghods83@gmail.com