

بررسی آزمایشگاهی رفتار برشی تیرهای ساخته شده بتنی با کارایی بسیار بالا (UHPC)

علیرضا علی نژاد انرجان

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه

مسعود پوربابا *

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه، عضو انجمن بتن آمریکا

چکیده

بتن با کارایی بسیار بالا (UHPC: Ultra-High Performance Concrete) که یکی از پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی بتن محسوب می‌شود، دارای مقاومت فشاری و کششی، کارایی و شکل پذیری بالا و نسبت آب به سیمان کم می‌باشد. طرح اختلاط این بتن شامل آب، میکروسیلیس، الیاف فلزی، سیمان، ماسه ریزدانه، فوق‌روان کننده و پودر کوارتز می‌باشد. در این مقاله، سه نمونه تیر بتنی با کارایی بسیار بالا با استفاده از مصالح بومی ایران ساخته شده و تحت بارگذاری خمشی چهارنقطه‌ای قرار گرفته‌اند. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی رفتار برشی تیرها، بدست آوردن مقاومت برشی بیشینه و مقایسه با ظرفیت‌های پیش‌بینی شده آیین‌نامه‌ای می‌باشد. ماکزیمم شکل پذیری این تیرها با اندازه‌گیری مقدار تغییر مکان در وسط دهانه، حدود ۱۱ میلی‌متر بدست آمده است. نتایج نشان داده‌اند که نسبت مقاومت‌های برشی آزمایشگاهی به مقاومت‌های برشی تئوری بر اساس روابط مقاومت برشی بتن الیافی آیین‌نامه‌های رایلم (RILEM) و استرالیا به طور میانگین، به ترتیب برابر با ۳/۹ و ۲/۹ بدست آمده است.

کلمات کلیدی: تیر بتنی، بتن با کارایی بسیار بالا، گسیختگی برشی، مقاومت برشی بیشینه

۱- مقدمه

افزودن حدود ۸ درصد وزنی پودر کوارتز باعث افزایش مقاومت فشاری این نوع بتن‌ها می‌شود. همچنین با افزایش الیاف فولادی در این نوع بتن‌ها مقاومت فشاری و کششی آن افزایش یافته ولی افزایش بیش از ۲ درصد حجمی الیاف فلزی ضمن غیراقتصادی کردن آن عملاً کارایی بتن را بشدت پایین آورده و بتن در رده بتن‌های با کارایی بسیار بالا قرار نمی‌گیرد.

آزمایش‌های مختلفی در رابطه با ظرفیت برشی بتن با کارایی بسیار بالا توسط محققین انجام پذیرفته است. از جمله Voo و همکاران، تحقیقاتی بر روی هشت تیر با متغیرهای مختلف از جمله نسبت دهانه به عمق تیر، مقدار و نوع الیاف فلزی مصرفی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲]. این محققین به این نتیجه رسیدند که در تیرهای ۱ شکل با بتن با کارایی بسیار بالا برش عمدتاً توسط جان تحمل شده و روابط موجود برای پیش‌بینی مقاومت برشی این نوع بتن‌ها بسیار محافظه کارانه هستند. در سال ۲۰۱۳، Baby و همکاران برای حصول اطمینان از حاشیه ایمنی طراحی تیرهای بتنی UHPC در برش بر اساس بندهای آیین‌نامه‌ای، ۱۱ تیر ۱ شکل به طول ۳ متر و ارتفاع ۰/۳۸ متر را تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج تحقیقات Baby و همکاران نشان دادند که نیروهای برشی نهایی آزمایشگاهی تیرهای مختلف ساخته شده با بتن با کارایی بسیار بالا بیش از مقادیر پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه ریلیم بودند. متوسط نسبت نیروهای برشی آزمایشگاهی به نیروهای برشی آیین‌نامه ریلیم حدود ۴/۵ بود که نشان دهنده ضریب اطمینان زیاد آیین‌نامه ریلیم در برآورد نیروی برشی بتن‌های با کارایی بسیار بالا بود [۱۳ و ۱۴].

همچنین آزمایش‌هایی توسط عزیز و علی در سال ۲۰۱۶ بر روی تیرهای عمیق و بدون میلگردهای جان انجام یافته است که از سه نوع بتن با مقاومت‌های فشاری مختلف استفاده شده بود. نتایج نشان دادند که با افزایش مقاومت فشاری بتن‌ها از ۴۲ مگاپاسکال به ۱۳۵ مگاپاسکال نیروی برشی متحمل ۱۵۰ درصد افزایش یافت و تیرهای ساخته شده با بتن با کارایی بسیار بالا به مراتب مقاومت برشی بیشتری از بتن‌های با مقاومت معمولی داشتند [۱۵].

در سال ۲۰۱۴ پوربابا و همکاران تحقیقاتی بر برش تیرهای بتنی با کارایی بسیار بالا و بتنی معمولی انجام داد. ایشان ۲۰ تیر را به طول ۲۲ اینچ با درصد‌های مختلف آرماتور طولی در فلوریدای آمریکا تست کردند و سپس ۱۸ تیر را با همان مشخصات ولی با بتن با

بتن با کارایی بسیار بالا دارای مشخصات مکانیکی و دوام عالی بوده و یکی از پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی بتن محسوب می‌شود. این نوع بتن دارای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چسبندگی و شکل‌پذیری بسیار بالا و نسبت آب به سیمان و نفوذپذیری بسیار کم و در نتیجه دوام بسیار زیاد می‌باشد [۱].

مطالعات اولیه بر روی بتن با کارایی بسیار بالا در سال ۱۹۷۰ توسط پروفیسور Bache در دانمارک و حین توسعه تکنولوژی ساخت بتن تقویت شده متراکم انجام شده است. کشور فرانسه اولین کشوری می‌باشد که استفاده از بتن با کارایی بسیار بالا را به رسمیت شناخته است. مطالعات اولیه بر روی این نوع بتن در سال ۱۹۹۵ و با استفاده از تکنولوژی بتن پودری واکنش‌پذیر انجام گرفته است [۲]. پس از آن مطالعات مختلفی بر روی بتن با کارایی بسیار بالا انجام شده است. از جمله موارد مطالعه شده طرح اختلاط مورد استفاده در ساخت بتن با کارایی بسیار بالا می‌باشد که توسط شرکت Ductul[®] ارائه و بصورت تجاری به بازار عرضه شد [۳]. معیار اصلی در ساخت بتن با کارایی بسیار بالا این است که بتوان با کاهش ترک‌های ریز و مویی به طرح اختلاط‌هایی با چگالی بالا و همگن دست یافت. با به‌کارگیری تکنیک‌هایی همچون جایگزینی ریزدانه به جای درشت‌دانه در بتن، بهبود مشخصات مواد سیمانی می‌توان به این بتن دست یافت. همچنین اضافه نمودن میکروسلیس، کاهش نسبت وزنی آب به مواد سیمانی به کمتر از حدود ۰/۲، استفاده از فوق روان‌کننده‌ها، بهینه‌سازی دانه‌بندی برای دستیابی به بیشترین چگالی مصالح، افزودن مقدار مناسبی الیاف فولادی برای تامین شکل‌پذیری کافی و فراهم نمودن شرایط مناسب عمل‌آوری، ساخت این نوع بتن را امکان‌پذیر کرده است [۴-۶].

جغتائی و پوربابا طرح اختلاط جدیدی بواسطه ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بتن الیافی با کارایی بسیار بالا با مصالح ریزدانه بومی در ایران ارائه کرده‌اند [۷]. طرح اختلاط دیگری نیز توسط خالو و همکاران ارائه شده است [۸]. علاوه بر این، تحقیقاتی توسط رخشانی مهر و همکاران و همچنین پوربابا و همکاران در رابطه با تاثیر مصالح مختلف مانند الیاف فولادی [۹ و ۱۰] و همچنین مقدار پودر کوارتز در رفتار بتن با کارایی بسیار بالا توسط پوربابا و جغتائی [۱۱] انجام شده است. نتایج تحقیقات فوق نشان دادند که

ارائه شده است، ساخته شده است. طرح اختلاط مزبور در جدول ۱ نشان داده شده است [۷]. نسبت آب به مواد سیمانی بر اساس این جدول برابر با ۰/۱۸۴ می‌باشد که کمتر از ۰/۲ و در نتیجه مقداری مطلوب می‌باشد بطوریکه مقاومت‌های فشاری بدست آمده پس از انجام آزمایشهای تعیین مقاومت فشاری نیز کاملاً رضایت بخش بودند.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن با کارایی بسیار بالا

نسبتهای اختلاط (Kg/m ³)	مصالح مصرفی
۶۹۵	سیمان پرتلند
۹۹۲	ماسه ریزدانه
۲۲۸	میکروسیلیس
۲۰۶	پودر کوارتز
۶۰	فوق روان کننده
۱۵۱	الیاف فولادی
۱۶۷	آب

مصالح به کار رفته در این طرح اختلاط به شرح زیر می‌باشد:

- سیمان پرتلند: سیمان به کار رفته در این طرح اختلاط از نوع II بوده تهیه شده است.
- میکروسیلیس: میکروسیلیس یک پوزولان بسیار واکنش پذیر می‌باشد که در این تحقیق از شرکت فروآلیاژ ایران تهیه شده است. مشخصات شیمیایی آن شامل SiO_2 به میزان ۸۵ درصد، Fe_2O_3 به میزان ۲ درصد، CaO به میزان ۱/۵ درصد، Al_2O_3 به میزان ۱ درصد، MgO به میزان ۲ درصد، C به میزان ۳ درصد، L.O.I به میزان ۳/۵ درصد و رطوبت ۱ درصد می‌باشد. همچنین مشخصات فیزیکی آن شامل، شکل ذرات بصورت کروی، اندازه ذرات کوچکتر از ۴۰ میکرومتر، دانسیته فله ای ۳۰۰-۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، سطح ویژه ۲۰-۱۴ مترمربع در گرم و همچنین وزن مخصوص ۶۰۰-۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد.

- فوق روان کننده: به دلیل نسبت آب به سیمان بسیار کم در بتن با کارایی بسیار بالا، استفاده از فوق روان کننده‌ها نقش تعیین کننده ای در رسیدن به کارایی مورد نظر دارند بطوریکه توسعه این نوع بتن بدون استفاده از فوق روان کننده امکان پذیر نمی‌باشد. در این پژوهش از فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات اتر استفاده

کارایی بسیاری بالای ساخته شده در ایران تست نمودند. در هر دو پروژه تحقیقاتی، نصف تیرها با بتن با کارایی بسیار بالا و نصف دیگر با بتن معمولی در آمریکا و ایران تست شدند. نتایج این تست-ها نشان داد که تیرهای با بتن با کارایی بسیار بالا دارای شکل پذیری و مقاومت برشی بسیار بالایی نسبت به تیرهای ساخته شده با بتن معمولی بودند [۱۶].

بدست آوردن مقاومت برشی دقیق در تیرهای بتنی یکی از زمینه‌های پر چالش تحقیقاتی از دیر باز تا کنون بوده، بطوریکه برای طراحی سازه‌های بتن آرمه تحت برش، فرمول‌های تئوری وجود ندارد و فرمول‌های پیشنهادی آیین‌نامه‌ها اغلب بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده‌اند. با وجود مطالعات گسترده مزبور تا به امروز رابطه‌ای واضح برای مکانیزم خرابی و نیروی برشی بتن، ارائه نشده است و در نتیجه در آیین‌نامه‌ها با اعمال ضرایب اطمینان زیاد روابطی برای محاسبه مقاومت برشی بتن نوشته شده است که اغلب این مطالعات در محدوده بتن معمولی بوده در نتیجه روابط تجربی ارائه شده نیز در محدوده بتن‌های معمولی بوده و آن روابط تجربی برای بتن‌های مقاومت بالا و بتن‌های با کارایی بسیار بالا قابل استفاده نیستند.

از طرفی مطالعات برش در بتن‌های با مقاومت بالا و علی‌الخصوص بتن‌های با کارایی بسیار بالا با توجه به نو بودن، خیلی محدود بوده و با وجود انجام تحقیقاتی در دهه‌های اخیر و استفاده از ابزار تحلیلی پیشرفته، تا به امروز مکانیزم دقیق برش این نوع بتن‌ها به طور کامل قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. علاوه بر این، اطلاعات کافی در رابطه با تیرهای با کارایی بسیار بالا با مقطع مستطیلی و بدون میلگردهای عرضی (خاموت) وجود ندارد. در حقیقت، اغلب تحقیقات آزمایشگاهی که در سال‌های گذشته انجام شده است در رابطه با تیرهای پیش‌تنیده و معمولاً با مقطع اشکل P و اشکل P-اند، در نتیجه انجام تحقیقات بیشتر در این رابطه و ویژه در مقاطع مستطیلی با آرماتورهای فولادی معمولی و مقاومت بالا و بدون پیش‌تنیدگی الزامی می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- طرح اختلاط و مصالح مصرفی

در این تحقیق در مجموع سه تیر بتنی با کارایی بسیار بالا در آزمایشگاه و با استفاده از طرح اختلاطی که توسط پوربابا و جغتائی

می‌شود. استفاده از مواد پوزولانی در پایداری صنعت سیمان و بتن نیز بسیار مهم است. در تحقیق حاضر از پودر کوارتز با حداکثر دانه به سایز ۳۵ میکرون استفاده شده است. مواد متشکله آن شامل SiO_2 به مقدار ۲۱/۱۶ درصد، Al_2O_3 به مقدار ۴/۲۲ درصد، Fe_2O_3 به مقدار ۳/۹ درصد، CaO به مقدار ۶۳/۵۲ درصد، MgO به مقدار ۱/۵۲ درصد، K_2O به مقدار ۰/۵۹ درصد، Na_2O به مقدار ۰/۴ درصد و LOI به مقدار ۱/۳۲ درصد بود. ضمناً تاثیر این نوع پودر کوارتز (با معدن یکسان) بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان قبلاً توسط صدر ممتازی و همکاران بررسی شده است [۱۸].

• میلگردهای مصرفی: آرماتورهای طولی استفاده شده از نوع AIII بوده که دارای تنش جاری شدن (fy) به میزان ۴۰۰ مگاپاسکال و همچنین دارای تنش گسیختگی (fu) به میزان ۶۰۰ مگاپاسکال بودند. این میلگردها دارای تغییرشکل پلاستیکی (در زمان گسیختگی) ۱۴ درصد می‌باشند.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش شامل ۳ تیر با نام‌گذاری B38، B39 و B40 می‌باشد و تمامی آن‌ها با استفاده از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۱ ساخته شدند. هدف اصلی از انجام این آزمایش‌ها مقایسه مقاومت برشی حاصل از محاسبات آیین‌نامه‌ای و مقاومت برشی حاصل و همچنین مقایسه ۳ نمونه تیر بتن با کارایی بسیار بالا با یکدیگر می‌باشد. مقطع نمونه‌ها به شکل مستطیل می‌باشد بطوریکه دارای طول ۵۵۸/۸ میلی‌متر (۲۲ اینچ)، دهانه برشی برابر با ۱۵۲/۴ میلی‌متر (۱۶ اینچ)، عمق ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) و عرض ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ) می‌باشند (لازم بذکر است که دلیل استفاده از اعداد غیر رند در طول و ابعاد نمونه‌ها استفاده از ابعاد تست شده قبلی توسط مولف در دانشگاه فلوریدای آمریکا است که دارای طول کل ۲۲ اینچ و طول دهانه ۱۸ اینچ با دهانه برشی ۶ اینچ در نمونه‌ها بودند، برای مقایسه صورت گرفته شده است). تفاوت سه نمونه در سطح مقطع میلگردهای مصرفی و در نتیجه در درصد آرماتور طولی می‌باشد. میلگردهای طولی به کار رفته در نمونه‌های B38، B39 و B40 به ترتیب عبارتند از $3\Phi 14$ ، $3\Phi 12$ و $3\Phi 10$ و در نتیجه درصدهای آرماتور طولی بترتیب عبارت بودند از $\rho=0.020$

شده است. لازم بذکر است که استفاده از این نوع روان کننده بدلیل پیشنهاد محققین مختلف از جمله Wille و همکاران بنا بر تاثیر بسیار مناسب بر خواص بتن مورد تاکید است [6]. فوق-روان کننده استفاده شده برنگ زرد روشن و بصورت مایع، بدون خاصیت اسیدی و بازی (PH=6.5)، با جرم حجمی ۱/۰۶ کیلوگرم در لیتر، میزان کلراید موجود کمتر از ۰/۱ درصد و خاصیت قلیایی (Na_2O) کمتر از ۱/۵ درصد بود.

• آب مصرفی: در ساخت این نوع بتن از مخلوط آب و یخ و مخلوط فوق‌روان کننده و یخ استفاده شده است که این عمل موجب کاهش دمای هیدراسیون و افزایش خاصیت دیرگیری در بتن می‌شود.

• الیاف فولادی: الیاف فولادی با توجه به مدول الاستیسیته، کرنش، قابلیت شکل‌پذیری و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین نوع الیاف به حساب می‌آیند. الیاف به کار رفته در این تحقیق بشکل مستقیم (بدون خم و قلاب انتهایی)، با طول ۱۳ میلی‌متر و قطر ۰/۱۶ میلی‌متر، دانسیته آن برابر ۷/۸-۸/۰ گرم بر سانتیمترمکعب و همچنین دارای مقاومت کششی ۲۷۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. با وجود مزیت‌های میکروالیاف، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از گلوله شدن به عمل آید که الک کردن یکی از این روش‌ها به شمار می‌رود [۱۷].

• سنگدانه: در سنگدانه‌ها معمولاً خواص فیزیکی مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرند زیرا در مقایسه با ویژگی‌های شیمیایی، تاثیر بیشتری روی عملکرد بتن حاصل دارد. سنگدانه به کار رفته در این تحقیق از نوع ریزدانه بوده و از ماسه رودخانه‌ای استفاده شده است. حداکثر قطر ماسه ۱/۱ میلیمتر بود که با گذراندن از الک استاندارد نمره ۱۶ حاصل شد. ماسه سه بار شسته شده و ارزش ماسه ای آن ۹۵ درصد و وزن مخصوص حالت اشباع با سطح خشک آن حدود ۲/۲ گرم بر سانتیمترمکعب بود. با توجه به حذف دانه‌های بزرگتر از ۱/۱ میلیمتر، دانه‌های کوچکتر در محدوده ماسه استاندارد با منحنی پیوسته قرار داشتند.

• پودر کوارتز: استفاده از پوزولان‌های طبیعی باعث کاهش حرارت هیدراسیون، افزایش مقاومت نهایی، کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر سولفات و کاهش فعالیت قلیایی سلیکا

بررسی آزمایشگاهی رفتار برشی تیرهای ساخته شده بتنی با ...

با میکسرهای معمولی دارد. بطوریکه گاهی میکسرهای معمولی قادر به میکس این نوع بتن‌ها نیستند. جهت حل این مشکل یک میکسر افقی با دینام قوی طراحی و ساخته و از آن استفاده شد تا ساخت بتن با کارایی بسیار بالا مقدور گردد.



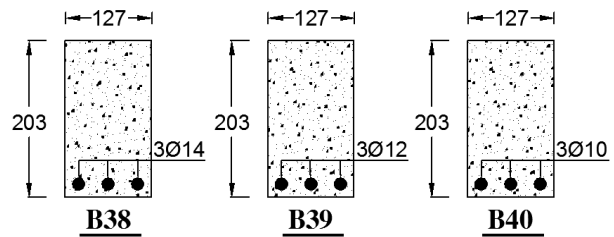
شکل ۱- قالب نمونه‌های آزمایش.



شکل ۲- نمونه‌های آزمایش.

لازم بذکر است که با وجود اینکه برای ساخت هر سه تیر از یک مخلوط بتن استفاده شد، از بتن هر تیر دو عدد نیز مکعب ۱۰ (جمعا به تعداد ۶ عدد) نمونه برداری به عمل آمد. پس از نگهداری نمونه‌ها در تانکر آب در دمای آزمایشگاه در سن ۲۸ روزگی آزمایش تعیین مقاومت فشاری انجام شد. متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها ۱۳۵ مگاپاسکال شد که با کسر ۱۰ مگاپاسکال از آن مقاومت فشاری تقریبی نمونه استوانه‌ای طبق پیشنهاد Baby و همکاران [14] به مقدار ۱۲۵ مگاپاسکال، جهت انجام محاسبات مقاومت برشی بدست آمد.

$\rho=0.014$ و $p=0.010$. انتخاب درصد آرماتورهای طولی به نحوی بود که رفتار تیر بر اساس نیروهای برشی کنترل شود؛ نه بر اساس خمش. ابعاد و میلگردگذاری تیرهای با کارایی بسیار بالا ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- ابعاد مقطع تیرها و میلگردهای طولی.

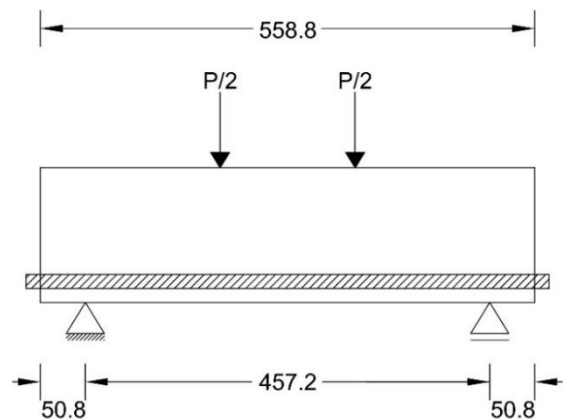
قالب‌های نمونه‌ها بر اساس ابعاد و مشخصات اشاره شده ساخته شده‌اند که در شکل ۲ و ۳ به ترتیب قبل و بعد از بتن‌ریزی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش به دلیل بررسی مقاومت برشی بتن‌های با کارایی بسیار بالا، فاقد میلگردهای عرضی (خاموت) می‌باشند.

روند اختلاط بتن به این ترتیب می‌باشد که بر اساس توصیه‌های Wille و همکاران در سال ۲۰۱۱ و گزارش‌های Graybeal در سال ۲۰۱۳ ابتدا میکروسیلیس و ماسه ریزدانه به مدت تقریبی ۵ دقیقه مخلوط می‌شوند. سپس قبل از افزودن آب، سیمان و پودر کوارتز اضافه شده و حداقل به مدت ۵ دقیقه در حالت کاملاً خشک با یکدیگر مخلوط می‌شوند [3,6]. پس از آن نصف مخلوط آب و یخ به آرامی به میکسر اضافه شده و پس از ۴ دقیقه مخلوط شدن، نصف باقیمانده مخلوط آب و یخ به میکسر اضافه شد. سپس پس از ۴ دقیقه میکس، به روش پیشنهادی Tue و همکاران در سال ۲۰۰۸ به منظور بهبود روانی و کارایی، فوق‌روان‌کننده و یخ مرحله به مرحله افزوده می‌شود [19]. لازم بذکر است که یخ اضافه شده به فوق‌روان‌کننده از همان آب و یخ اولیه وزن شده بوده و اضافه تر از آن نباید باشد. این یخ ضمن کاهش دمای فوق‌روان‌کننده، باعث ترکیب شدن بهتر فوق‌روان‌کننده با مخلوط می‌شود، چون طبق تجربه‌های قبلی مشخص شد که افزودن فوق‌روان‌کننده بدون مخلوط با آب یا یخ تاثیر کمتری نسبت به این حالت داشت.

ذکر این نکته ضروری است که ساخت بتن با کارایی بالا با توجه به نسبت آب به سیمان بسیار پایین، نیاز به انرژی بیشتری در مقایسه

۳-۲- سیستم بارگذاری و جزئیات آزمایش

بارگذاری نمونه‌ها به صورت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای می‌باشد که به صورت شماتیک در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که قبل از شروع بارگذاری نمونه‌های اصلی، در مرحله اولیه یک نمونه به صورت آزمایشی با استفاده از بتن معمولی ساخته شده و تحت بارگذاری قرار گرفته است. این عمل برای ارزیابی دستگاه آزمایش (test set up) و همچنین حصول اطمینان از صحت آزمایش انجام گرفته است. بارگذاری به صورت افزایشی با گام‌های ۱۰ کیلونیوتن تا مرحله گسیختگی اعمال می‌شود. در هر سه نمونه برای بدست آوردن تغییر مکان از دو LVDT استفاده شده است بطوریکه یکی از آن‌ها در داخل محور بارگذاری دستگاه می‌باشد و برای ایجاد دقت بیشتر، LVDT دیگری برای ثبت و اندازه‌گیری تغییر مکان قائم در وسط دهانه تعبیه شده است.



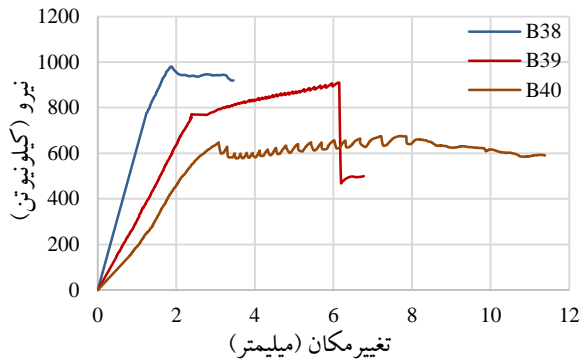
شکل ۳- نحوه بارگذاری تیرها به صورت شماتیک.



شکل ۴- بارگذاری تیرها در آزمایشگاه

۴-۲- مقاومت برشی آزمایشگاهی

پس از اعمال بار بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی تا مرحله خرابی نمونه‌ها، نمودار نیرو- تغییرمکان که در وسط دهانه تیرها اندازه‌گیری شده است، در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار نیرو- تغییرمکان.

نیروهای گسیختگی بدست آمده از آزمایش‌ها برای سه نمونه B38، B39 و B40 در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نیروی اصلی P در حین وارد شدن به نمونه، به دو قسمت مساوی ($P/2$) تقسیم و به نمونه وارد می‌شود. با بررسی شکل ۴ مشخص می‌شود که نیروی برشی در دهانه برشی (فاصله تکیه‌گاه تا محل اعمال بار) برابر $P/2$ می‌باشد. بنابراین نیروی $P/2$ باید ملاک عمل قرار بگیرد.

جدول ۲- نیروی گسیختگی برشی تیرها در آزمایشگاه

نوع تیر	$P/2$ (KN)
B38	۴۹۰
B39	۴۵۵
B40	۳۳۸

۵-۲- بررسی نحوه گسیختگی تیرها

نحوه گسیختگی تیرهای بتنی با کارایی بسیار بالا و گسترش ترک در آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم بذکر است که دهانه برشی (a) برابر $152/4$ میلیمتر است که از تقسیم دهانه به ۳ قسمت مساوی ($L/3$) حاصل و در بارگذاری استفاده شده است، که در اینجا L برابر $457/2$ میلیمتر است. همان‌طور که از شکل ۷ به وضوح قابل مشاهده است، ترک‌های تیر B38 بدلیل درصد آرماتور طولی بیشتر نسبت به دو تیر دیگر، بصورت برشی می‌باشد.

نتایج تحقیقات پوربابا و همکاران بر روی ۳۸ تیر بتنی که جهت مقایسه نصف آنها از بتن معمولی و نصف دیگر از بتن با کارایی بالا بودند نیز نشان داد که تیرهای با بتن معمولی فقط دارای یک یا دو ترک متقارن قطری تقریباً ۴۵ درجه بودند در حالیکه در تیرهای کاملاً مشابه با بتن با کارایی بالا ترک‌های خمشی و برشی بوجود آمدند که نهایتاً با توجه به درصد آرماتور طولی بکار رفته، با خرابی برشی به تسلیم رسیدند [20].

لازم بذکر است که بدلیل مقاومت مناسب و بالای کششی و پس از ترک خوردگی بتن‌های با کارایی بالا اغلب شکست برشی به همراه ترک‌های کوچک خمشی نیز همراه می‌شود مگر آنکه درصد آرماتورهای طولی بسیار زیاد باشد که در این حالت فقط ترک برشی به همراه ترکهای بسیار ریز خمشی اتفاق می‌افتد.

۳- محاسبه مقاومت برشی تیرها

۳-۱- محاسبه بر اساس RILEM TC 162-TDF

بر اساس RILEM TC 162-TDF، مقدار ظرفیت برشی کل برابر است با [21]:

(۱)

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd}$$

در این رابطه، V_{cd} مقاومت برشی عضو بدون میلگردگذاری عرضی، V_{fd} سهم برشی ناشی از الیاف فولادی و V_{wd} سهم برش ناشی از میلگردگذاری عرضی می‌باشد.

محاسبه V_{cd}

V_{cd} با استفاده از معادله ۲ قابل محاسبه می‌باشد:

$$V_{cd} = [0.12k(100 \rho_l f_{ck})^{1/3} - 0.15 \sigma_p] b_w d \quad (2)$$

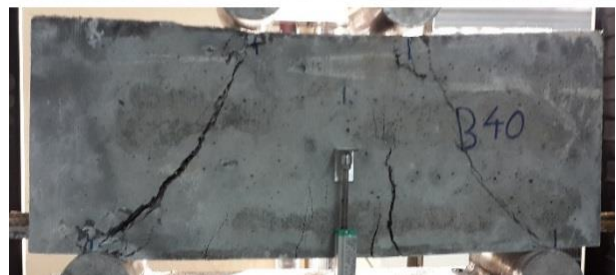
در این معادله داریم:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (3)$$

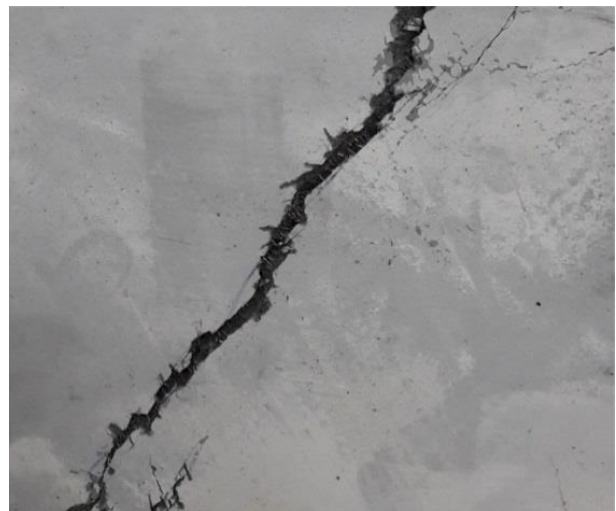
$$\rho_l = \frac{A_s}{b_w d} \leq 0.02 \quad (4)$$

$$\sigma_{cp} = N_{sd} / A_c \quad (5)$$

ولی ترک‌های تیرهای B39 و B40 به صورت خمشی- برشی می‌باشند ولی نهایتاً گسیختگی نهایی آنها برشی است. ولی مود گسیختگی همه تیرها به طور قابل توجهی دارای رفتار شکل پذیر می‌باشد. همچنین همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است الیاف فولادی سهم قابل توجهی در دوختن ترک‌های بتن دارند.



شکل ۷- نحوه ترک خوردگی و گسترش ترک‌ها در نمونه‌ها.



شکل ۸- ترک دوخته شده بوسیله الیاف فولادی

الیافی شامل بتن‌های با کارایی بالا به‌مراه الیاف جهت بررسی و محاسبات رفتار این بتن‌ها پس از ترک خوردگی اولیه ارائه شده است.

محاسبه V_{wd}

V_{wd} سهم مقاومت برشی ناشی از میلگردهای عرضی و یا متمایل در بتن الیافی می‌باشد که در تحقیق حاضر به دلیل عدم وجود میلگردهای برشی، برابر با صفر می‌باشد.

۲-۳- محاسبه بر اساس راهنمای طرح در استرالیا

این روش طراحی که بر مبنای اصل مکانیک سازه‌ای استوار است، برای مقاومت، بهره‌برداری و دوام در نظر گرفته شده است [3].

مقاومت برشی تیرهای بتن با کارایی بسیار بالا بر این اساس استوار است که تنش اصلی کششی در محور خنثی و یا در محل اتصال جان و بال تیر به بیشترین مقدار ترک نخورده مقطع در خمش برسد. این مقدار بیشینه در معادلات ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

$$\tau = 5 + 0.13\sqrt{f'_c} \quad (12)$$

$$V = \tau \times b \times d \quad (13)$$

در این معادلات، τ تنش برشی، V مقاومت برشی کل در تیر UHPC و f'_c مقاومت فشاری نمونه بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت‌های برشی حاصل از روابط فوق در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- ظرفیت برشی حاصل از روابط بر حسب کیلونیوتن

تیر	RILEM TC 162-TDF (V_R)	راهنمای طرح استرالیا (V_A)
B38	۱۱۱/۹۹	۱۴۸/۲۷
B39	۱۰۹/۴۱	۱۴۹/۰۹
B40	۱۰۵/۹۸	۱۴۹/۹۰

۴- مقایسه مقاومت برشی تئوری و آزمایشگاهی تیرها

بر اساس مقاومت‌های برشی آزمایشگاهی بدست آمده، بر خلاف نتایج حاصل از تحلیل تئوری تیرها، با ثابت بودن تمام مشخصات تیرها، با افزایش مقدار میلگردهای طولی مقاومت برشی گسیختگی افزایش می‌یابد.

که d عمق موثر مقطع، A_s مساحت میلگردهای طولی، b_w کمترین عرض موثر مقطع، N_{sd} نیروی طولی مقطع بر اساس بارگذاری یا پیش‌تنیدگی می‌باشد. f_{ck} مقاومت فشاری بتن UHPC بوده که طبق آزمایشهای انجام شده برابر ۱۲۵ مگاپاسکال بدست آمده است.

محاسبه V_{fd}

V_{fd} که مقاومت برشی ناشی از الیاف فولادی در بتن UHPC می‌باشد با استفاده از معادله ۶ قابل محاسبه می‌باشد.

$$V_{fd} = 0.7k_f k_1 \tau_{fd} b_w d \quad (6)$$

که در این معادله k_f ضریبی برای در نظر گرفتن سهم بال‌ها در مقاطع T شکل می‌باشد.

$$k_f = 1 + n \left(\frac{h_f}{b_w} \right) \left(\frac{h_f}{d} \right) \leq 1.5 \quad (7)$$

$$n = \frac{b_f - b_w}{h_f} \leq \left(3, \frac{3b_w}{h_f} \right) \quad (8)$$

$$k_1 = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (9)$$

در این معادلات h_f ارتفاع بال‌های مقطع، b_f پهنای بال‌های مقطع، b_w پهنای جان مقطع می‌باشد و τ_{fd} مقداری است که براساس آن افزایش مقاومت برشی در اثر وجود الیاف فولادی در بتن UHPC در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از معادله ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$\tau_{fd} = 0.12 f_{Rk,4} \quad (10)$$

$$f_{R,4} = \frac{3F_{R,4} \times L}{2b \times h_{sp}^2} \quad (11)$$

مقدار $F_{R,4}$ با استفاده از آزمایش تیر شکاف دار بصورت خمش سه نقطه‌ای بدست می‌آید که برای این نوع بتن‌ها توسط پوربابا [16] در آزمایشگاه انجام و محاسبه شده است. بر اساس نمودار نیرو- باز شدگی ترک (F-CMOD) حاصل از این بارگذاری، مقدار $F_{R,4}$ برابر است با نیروی ناشی از جابجایی در CMOD برابر با ۳/۵ میلی‌متر. بر این اساس مقدار دقیق $F_{R,4}$ برابر با ۶۲۷۱۰ نیوتن توسط پوربابا بدست آمده است. در واقع در این مقدار نیرو ترک از پیش جاسازی شده در تیر بدون آرماتور بمیزان ۳/۵ میلیمتر باز شده است. این تست توسط آیین‌نامه ریلیم برای بتن‌های

اساس راهنمای طرح استرالیا (Design Guideline in Australia) و ریلیم (RILEM TC 162-TDF) قرار گرفته است. علاوه بر این نحوه گسیختگی و گسترش ترک‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- بر اساس مقاومت‌های برشی آزمایشگاهی بدست آمده، بر خلاف نتایج حاصل از تحلیل تئوری تیرها، با ثابت بودن تمام مشخصات تیرها، با افزایش مقدار میلگردهای طولی، مقاومت برشی گسیختگی به طور چشمگیر افزایش می‌یابد.

۲- مقاومت‌های برشی بدست آمده از روابط تئوری راهنمای استرالیا بیشتر از مقاومت‌های برشی حاصل از آیین نامه ریلیم و نتایج آزمایشگاهی نیز در کل بیشتر از روابط تئوری می‌باشند. همچنین تفاوت موجود بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری حاصل قابل توجه می‌باشد. مقادیر مقاومت‌های برشی آزمایشگاهی به طور میانگین $3/9$ برابر نسبت به نتایج تئوری حاصل از آیین نامه ریلیم و $2/9$ برابر نسبت به نتایج تئوری حاصل از راهنمای استرالیا بیشتر می‌باشد. عدد بدست آمده برای آیین نامه ریلیم در این آزمایش‌ها نزدیک به عدد بدست آمده توسط Baby و همکاران می‌باشد ($4/5$) که در ادبیات فنی به آن اشاره شده است.

۳- در پیش‌بینی مقاومت برشی با استفاده از روابط تئوری موجود، با افزایش میلگردهای طولی، مقدار مقاومت برشی به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد ولی در حالت دست‌یابی به مقاومت برشی صورت تجربی، تغییرات این پارامتر به صورت غیرخطی می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده حاصل از آزمایشها در این تحقیق، افزایش درصد آرماتور طولی، ρ ، از $0/10$ به $0/14$ و همچنین از $0/14$ به $0/20$ درصد بترتیب باعث افزایش مقاومت برشی نهایی از 338 کیلونیوتن به 455 کیلونیوتن و همچنین از 455 کیلونیوتن به 490 کیلونیوتن شد.

۴- در رابطه با نحوه ترک‌خوردگی و گسترش ترک‌ها، ابتدا ترک‌های برشی با زاویه حدود 45 درجه بوجود می‌آیند و سپس قبل از اینکه تیرها به گسیختگی نهایی برسند، ترک‌های کم عرض خمشی نیز شروع می‌شوند. سپس ترک‌های برشی بازتر شده بطوریکه نهایتاً باعث خرابی تیر از این ترک‌ها می‌شوند. تیرهای با بتن با کارایی بالا دارای دارای رفتار بسیار شکل‌پذیر می‌باشند که این موضوع در حین گسیختگی نهایی، با خیز زیاد وسط دهانه به وضوح قابل مشاهده بود.

در حالت کلی مقاومت‌های برشی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی خیلی بیشتر از مقاومت‌های برشی حاصل از روابط تئوری استرالیا و ریلیم می‌باشند. ضمناً مقاومت‌های برشی بدست آمده از روابط تئوری راهنمای استرالیا بیشتر از مقاومت‌های برشی حاصل از روابط آیین نامه ریلیم (RILEM TC 162-TDF) هستند. همچنین تفاوت موجود بین نتایج آزمایشگاهی و تئوری حاصل قابل توجه می‌باشد. نسبت مقاومت‌های برشی آزمایشگاهی به مقاومت‌های برشی پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به تئوری.

تیر	V_{exp}/V_R	V_{exp}/V_A
B38	۴/۳۸	۳/۳۰
B39	۴/۱۶	۳/۰۵
B40	۳/۱۹	۲/۲۵
میانگین نسبت مقاومت برشی آزمایشگاهی به تئوری	۳/۹	۲/۹

در پیش‌بینی مقاومت برشی با استفاده از روابط تئوری موجود، مقدار مقاومت برشی با افزایش میلگردهای طولی، به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد ولی در حالت دست‌یابی به مقاومت برشی نهایی به صورت آزمایشگاهی، تغییرات این پارامتر به صورت غیرخطی می‌باشد؛ بطوریکه تغییرات مربوط به مقاومت‌های برشی تیرهای B38 و B39 که به ترتیب دارای درصد آرماتور طولی $\rho=0.020$ و $\rho=0.014$ می‌باشند، کمتر بوده و با افزایش این درصد از $\rho=0.010$ به $\rho=0.014$ ، مقدار مقاومت برشی به صورت کاملاً چشمگیر افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا با استفاده از طرح اختلاط بتن با کارایی بسیار بالا سه نمونه آزمایشگاهی ساخته شده و مقاومت برشی نمونه‌های آزمایشگاهی پس از طی مراحل عمل‌آوری و بارگذاری خمشی چهارنقطه‌ای بدست آمده است. مقاومت‌های برشی آزمایشگاهی مورد مقایسه با مقاومت‌های برشی با استفاده از روابط تئوری بر

۶- مراجع

ساخته شده با مصالح بومی، هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن

ایران، تهران، مهرماه، ۱۳۹۵.

[12] Voo, Y. L., Poon, W. K., Foster, S. J., Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultrahigh-Performance Concrete Beams without Stirrups, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 11, November 1, 2010.

[13] Baby, F., Marchand, P., and Toutlemonde, F., Shear behavior of UHPFRC beams. I: Experimental investigation, *Journal of Structural Engineering*, 10.1061/ (ASCE) ST.1943-541X.0000907, 04013111, 2013.

[14] Baby, F., Marchand, P., and Toutlemonde, F. (2013) Shear behavior of UHPFRC beams. II: Analysis and design provisions. *Journal of Structural Engineering*, 10.1061/ (ASCE) ST.1943-541X.0000908, 4013112.

[15] Aziz, O.Q., Ali, M.H., Shear strength and behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPC) deep beams without web reinforcement, *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, Vol.2, Issue 3, pp. 85-96, 2013.

[16] Pourbaba, M., Shear Capacity of Ultra-High Performance Concrete Rectangular Beams, Doctoral Dissertation, Sharif University of Technology, International Campus, 2017.

[۱۷] مستوفی نژاد، د.، سازه‌های بتن آرمه (جلد اول)، اصفهان، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۷.

[۱۸] صدر ممتازی، ع.، سعیدی فر، ن. و بلالایی، ف.، بررسی تاثیر پودر کوارتز بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و زیرساخت‌های شهری، ۷ و ۸ مرداد، ۱۳۹۴.

[19] Tue, N.V., Ma, J. and Orgass, M., Influence of Addition Method of Superplasticizer on the Properties of Fresh UHPC, *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, pp. 93-100, 2008.

[20] Pourbaba, M., Joghataie, A., Determining Shear Capacity of Ultra-high Performance Concrete Beams by Experiments and Comparison with Codes, *Scientia Iranica.*, Article in Press, Accepted Manuscript, Available Online from 23 August 2017.

[21] RILEM TC 162-TDF, Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, *Final Recommendations*, *Materials and Structures*, Vol. 36, pp. 560-567, 2003.

[1] Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I- Girders, Publication No. FHWA (Federal Highway Administration)-HRT-06-115, 2006.

[2] Toutlemonde, F., Resplendino, J., *Designing and Building with UHPFRC*, State-of-the-Art and Development, Wiley-ISTE, ISBN: 978-1-84821-271-8, 2010.

[3] Ultra-High Performance Concrete, a State-of-the-Art Report for the Bridge Community Publication No. FHWA (Federal Highway Administration)-HRT-13-060, 2013.

[4] Richard, P., Cheyrezy, M., Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 7, pp. 1501-1511, 1995.

[5] Sobolev, K., The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures, *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 7, pp. 901-907, 2004.

[6] Wille, K., Naaman, A. E., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance Concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way, *ACI Materials Journal*, vol. 108, no. 1, pp. 46-54, 2011.

[۷] جغتائی، ع.، پوربابا، م.، ساخت آزمایشگاهی بتن الیافی با کارایی بسیار بالا (UHPFRC) با مصالح ریزدانه بومی کشور و ارائه طرح اختلاط بهینه در ایران، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۵.

[8] Khaloo, AR., Karimi, H., Asadollahi, S., and Dehestani, M., A new mix design method for ultra-high strength concrete (UHPC), *ACI Material*, Vol. 114, No. 2, pp. 215-224, M/A 2017.

[۹] رخشانی مهر، م.، بخشی، ح.، بررسی تاثیر مقدار الیاف و رده مقاومت بر مشخصات مکانیکی بتن با الیاف فولادی، تحقیقات بتن، سال هشتم، شماره اول، بهار و تابستان، صفحه ۱۰۱-۱۱۲، ۱۳۹۴.

[۱۰] جغتائی، ع.، پوربابا، م.، بررسی آزمایشگاهی تاثیر مقدار میکروالیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن الیافی با کارایی بسیار بالا با مصالح بومی (UHPFRC)، دهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۳۰ و ۳۱ فروردین، ۱۳۹۶.

[۱۱] پوربابا، م.، جغتائی، ع.ر.، پناه پور، ح. و همایخت، م.، بررسی آزمایشگاهی تاثیر پودر کوارتز در بتن الیافی با کارایی بسیار بالای

Experimental Study on the Shear Behavior of Beams Made of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)

Alireza Alinezhad Anarjan

M.Sc. Student at the Islamic Azad University, Maragheh Branch

Masoud Pourbaba*

Faculty member of the Islamic Azad University, Maragheh Branch (member of ACI)

Abstract

Ultra-High Performance Concrete which is one of the latest advances in concrete technology, has excellent properties as high compressive and tensile strength, durability, ductility and low water to cement ratio. UHPC formulation consist of water, silica fume, steel fibers, cement, fine sand, superplasticizer, and ground quartz, which has been made using local. In this study, three specimens using UHPC have been made in laboratory and have been tested under shear four-point loading in the laboratory of Tabriz University. The main purpose of this study is to evaluate the shear behavior of beams, obtain the maximum experimental shear strength and to compare with the theoretical ones. The maximum ductility of beams which are measured based on the displacement of beams' mid span, obtained about 11 mm. Based on results, the average ratio of experimental shear to theoretical ones based on RILEM TC162-TDF and Australian codes are about 2.9 and 3.9, respectively.

Keywords: concrete beam, ultra high performance concrete, shear failure, maximum shear capacity.

* Corresponding Author: mpourbaba@yahoo.com

