

# اتصال اعضای خمشی بتن مسلح پیش ساخته با استفاده از بتن فوق توانمند (UHPC)

مهراوه رخشانی مهر (دانشجوی دکتری)

محمدرضا اصفهانی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

سیدروح‌الله موسوی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان زاهدان

مهندسی عمران شریف، (پیاورد ۱۳۹۳)  
دربی ۲-۳۰، شماره ۲۱، ص. ۶۳-۷۲

در این پژوهش، برای بررسی مقاومت پیوستگی بتن فوق توانمند، ۳۶ آرماتور فولادی از بلوک‌های بتنی بیرون کشیده شدند. علاوه بر این، تعداد ۹ تیر آزمایشگاهی که هر یک از اتصال دو تیر خمشی پیش ساخته‌ی مجزا تشکیل شده است و همچنین یک نمونه‌ی بدون وصله در مقیاس واقعی ساخته و آزمایش شدند، و به کمک نتایج آزمایش بیرون کشیدگی اثر پارامترهای مختلف در پیوستگی بررسی شدند. مقایسه‌ی شاخص شکل پذیری نمونه‌های تیری وصله دار نشان می‌دهد که استفاده از بتن فوق توانمند در محل اتصال قطعات پیش ساخته‌ی اعضای خمشی باعث ساده سازی جزئیات اتصال شده است. در این نوشتار، رابطه‌ی طراحی برای تعیین طول وصله و مقدار آرماتور جانبی مورد نیاز وصله ارائه شده است. مقدار میانگین نسبت مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی به مقاومت پیوستگی حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی در نمونه‌های ساخته شده از بتن معمولی  $1/10$  با انحراف معیار  $0/5$  و در نمونه‌های ساخته شده از بتن فوق توانمند  $1/27$  با انحراف معیار  $0/10$  به دست آمده است.

واژگان کلیدی: اتصال، بتن فوق توانمند (UHPC)، شکل پذیری، طول وصله، قطعات پیش ساخته، مقاومت پیوستگی.

## ۱. مقدمه

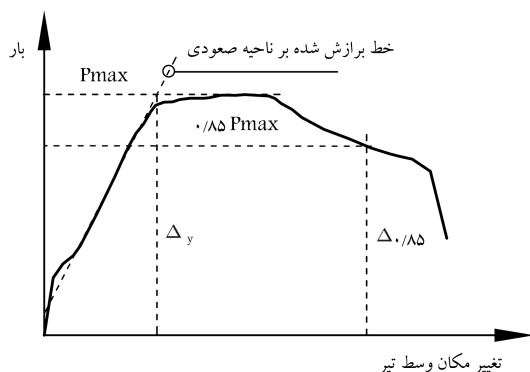
پژوهش‌های پژوهشگران طی دو دهه‌ی اخیر منجر به پیدایش بتنی جدید با خواص فوق العاده شده است. این بتن که با عنوان بتن فوق توانمند (UHPC)<sup>[۱]</sup> معرفی شده است، علاوه بر غیر قابل نفوذ بودن، ضعف عمده‌ی بتن، یعنی مقاومت کششی پایین، را تا حد زیادی بر طرف کرده است. دوام و مقاومت فشاری بسیار زیاد UHPC آن را ماده‌ی ایده‌آل برای اجرای سازه‌های با عمر طولانی تبدیل کرده است.<sup>[۲]</sup> بتن فوق توانمند (UHPC) توانایی بسیار زیادی برای استفاده در نقاط اتصال قطعات پیش ساخته‌ی پل‌ها دارد. هم‌اکنون، وزارت راه کشورهای آمریکا و کانادا در حال بررسی استفاده از UHPC در ساخت پل‌های بزرگ هستند. بیشتر این پژوهش‌ها بر روی استفاده از UHPC در محل اتصال قطعات پیش ساخته‌ی پل‌ها متمرکز شده‌اند.<sup>[۳]</sup> از آنجا که کارایی اتصالات بتنی به پیوستگی بین بتن و آرماتور بستگی دارد، قبل از به کارگیری UHPC در سازه‌ها باید پیوستگی آن با آرماتور بررسی شود. تاکنون پژوهش‌های کمی برای بررسی پیوستگی بین آرماتور و UHPC انجام شده است. آزمایش بیرون کشیدگی<sup>[۴]</sup> یکی از راه‌های ساده و کم هزینه برای بررسی پیوستگی بین بتن و آرماتور است.<sup>[۳]</sup> لیکن همان‌طور که در ۹۱a-

است.<sup>[۵-۸]</sup> در اجرای بسیاری از اعضای بتن مسلح از جمله پل‌ها، برای سهولت اجرا از قطعات پیش ساخته استفاده می‌شود. همواره اتصال یکپارچه‌ی این قطعات پیش ساخته مورد توجه پژوهشگران و مجریان طرح‌های مذکور بوده است. در عین حال در مواردی که از بتن معمولی استفاده شود، نیاز به فضای نسبتاً زیادی در محل اتصال قطعات پیش ساخته وجود دارد. با اجرای اتصال به کمک بتن فوق توانمند، فضای اتصال کوچک تر می‌شود و موفقیت در اجرا بیشتر خواهد بود. پیش از بررسی اتصال اعضای خمشی لازم است مطالعاتی در مورد پیوستگی آرماتور و بتن صورت گیرد. علاوه بر این، برای طراحی طول وصله در محل اتصال قطعات پیش ساخته‌ی اعضای خمشی

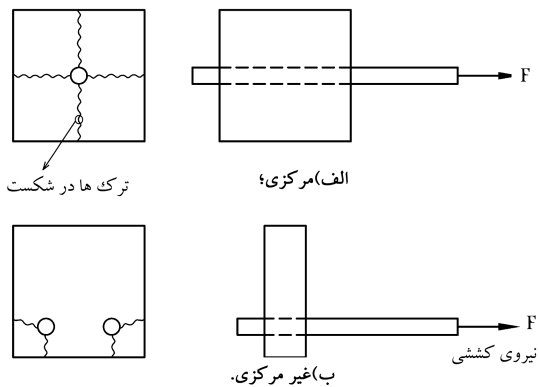
\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۱/۷/۹، پذیرش ۱۳۹۱/۱۰/۵

rakhsh\_77@yahoo.com  
esfahani@um.ac.ir  
s.r.mousavi@endg.usb.ac.ir



شکل ۱. پارامترهای مورد استفاده در شاخص شکل پذیری.<sup>[۹]</sup>



شکل ۲. آزمایش بیرون کشیدگی.

### ۳.۲. آزمایش پیوستگی

آزمایش بیرون کشیدگی قدیمی ترین، ساده ترین و ارزان ترین روش برای تعیین تنش پیوستگی بین بتن و آرماتور است. در این آزمایش، آرماتور در یک نمونه بتنی به شکل استوانه یا مکعب قرار داده شده است و سپس در حالی که بتن در جای خود ثابت نگه داشته شده است، آرماتور به سمت خارج کشیده می شود. این آزمایش می تواند برای بررسی و مقایسه اثر پارامترهای مختلف روی مقاومت پیوستگی به کار رود. با این حال، این آزمایش تنش پیوستگی را بیشتر از تنش پیوستگی واقعی که در یک تیر خمشی ایجاد می شود، نشان می دهد. بنابراین، این آزمایش برای تعیین مقاومت پیوستگی برای اهداف طراحی مناسب نیست. در پژوهش های مختلف از دو نوع آزمایش بیرون کشیدگی مرکزی<sup>۴</sup> و بیرون کشیدگی غیرمرکزی<sup>۵</sup> برای بررسی مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور استفاده شده است (شکل ۲). بیرون کشیدگی مرکزی، آزمایشی رایج است و از آن برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر پیوستگی استفاده می شود. برای شبیه سازی رفتار پیوستگی بین آرماتور و بتن در دال ها و تیرها و تعیین مقاومت پیوستگی موضعی (مقاومت پیوستگی در طول کوتاه) از آزمایش بیرون کشیدگی غیرمرکزی استفاده می شود.<sup>[۵]</sup> شکل شکست در این آزمایش، معمولاً از نوع شکافت است.

به منظور تعیین مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور برای اهداف طراحی، از آزمایش های تیر وصله دار استفاده می شود. مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور در تیرها را می توان در هر دو ناحیه ی لنگر ثابت و متغیر مورد مطالعه قرار داد. لیکن در بسیاری از پژوهش ها، مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور در محل وصله در ناحیه ی لنگر ثابت مورد بررسی قرار گرفته است.

باید رابطه یی ارائه شود که بتواند هم زمان مقاومت و شکل پذیری خمشی لازم را برآورده سازد. روابطی که تاکنون آیین نامه های طراحی برای محاسبه ی طول وصله ارائه کرده اند، شکل پذیری خمشی تیر را الزاماً تأمین نمی کنند. در این نوشتار، نتایج آزمایش انجام شده بر روی ۱۸ نمونه ی بیرون کشیدگی ارائه شده است. به کمک نتایج آزمایش، اثر پارامترهای مختلف بر پیوستگی مانند ضخامت پوشش آرماتور و اثر آرماتور فوقانی بررسی شده اند. علاوه بر این، با هدف ارائه ی یک رابطه ی طراحی برای تعیین طول وصله ی آرماتور، ۹ عدد تیر خمشی که هر یک از دو عضو خمشی پیش ساخته ی مجزا تشکیل شده اند، طراحی و ساخته شده اند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی این مطالعه و سایر نتایج گذشته، رابطه یی برای محاسبه ی طول وصله ارائه می شود. این رابطه، ترکیب مناسبی از دو عامل طول وصله و آرماتور جانبی را به نحوی ارائه می دهد که علاوه بر تأمین مقاومت پیوستگی کافی، شکل پذیری لازم برای جلوگیری از خطرات ناشی از شکست ترد و ناگهانی نیز تأمین شود.

## ۲. مبانی پژوهش

### ۲.۱. بتن فوق توانمند

در اوایل دهه ی ۸۰ میلادی، ایده ی استفاده از یک دانه بندی بسیار ریز در ساخت بتن پیشنهاد شد. این ایده از آنجا ظهور پیدا کرد که پژوهش ها نشان دادند ضعیف ترین بخش بتن در ناحیه ی پیوستگی بین ملات و سنگ دانه های درشت ایجاد می شود. با حذف سنگ دانه های درشت، این ناحیه ی ضعیف حذف می شود و ریزترک های ناحیه ی انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن می شوند، محدود خواهند شد. این بتن با توجه به خواص ویژه، بتن فوق توانمند (UHPC) نامیده شده است.

بتن فوق توانمند دارای مقاومت فشاری بسیار زیادی است. این بتن تقریباً غیر قابل نفوذ است و همین امر باعث می شود تا بسیاری از ضعف های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل های یخ بنندان، خوردگی آرماتور و حمله ی یون های کلر را نداشته باشد. همچنین ضعف عمده ی بتن یعنی مقاومت کششی پایین را تا حد زیادی مرتفع کرده است. برتری اصلی بتن فوق توانمند، بهبود دوام سازه های بتنی است. دوام فوق العاده ی بتن فوق توانمند در برابر عوامل مختلف، آن را ماده ی ایده آل برای اجرای سازه های با طول عمر زیاد تبدیل کرده است. بتن فوق توانمند دارای توانمندی زیادی برای ایجاد نقاط اتصال سازه یی در ساخت پل هاست. در صورتی که از این ماده برای نقاط اتصال استفاده شود، طول وصله ی آرماتور به مقدار چشم گیری کاهش می یابد.

### ۲.۲. شاخص شکل پذیری

برای بررسی شکل پذیری در تیرها، یک شاخص شکل پذیری تغییرمکانی به صورت شکل ۱ پیشنهاد شده است.<sup>[۹]</sup> در این روش، شاخص شکل پذیری تیر از رابطه ی ۱ محاسبه می شود:

$$i = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (1)$$

در این رابطه، نسبت تغییرمکان متناظر با ۰.۸۵ نیروی بیشینه (روی شاخه ی نزولی منحنی بار-تغییرمکان) به تغییرمکان متناظر با نیروی بیشینه (حد رفتار کشسان) به عنوان شاخص شکل پذیری معرفی شده است. شکل ۱، نحوه ی تعیین پارامترهای اشاره شده را نشان می دهد.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های بیرون‌کشیدگی غیر مرکزی برای بتن UHPC.

نمونه	تعداد	$d_b$ (mm)	$C/d_b$
P-۱	۳		۱٫۵
P-۲	۳	۱۴	۲٫۵
P-۳	۳		۴٫۵
P-۴	۳		۱٫۵
P-۵	۳	۲۵	۲٫۵
P-۶	۳		۴٫۵

داده شده است، در هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی دو آرماتور در ترازهای مختلف قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، برای هر یک از پارامترهای مورد بررسی ۳ نمونه‌ی مشابه ساخته و آزمایش شدند. در این آزمایش‌ها، در مجموع ۳۶ آرماتور فولادی به قطرهای ۱۴ و ۲۵ میلی‌متر از بلوک‌های بتنی UHPC بیرون کشیده شدند.

### ۲.۳. نمونه‌های آزمایش تیرهای خمشی

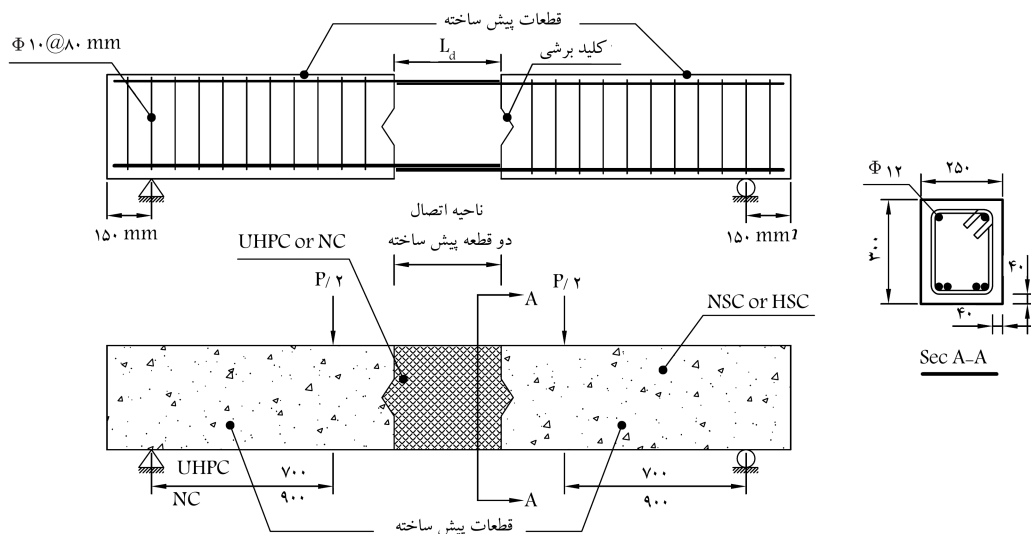
پس از انجام آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی و بررسی اولیه‌ی مقاومت پیوستگی آرماتور و بتن فوق توانمند، نمونه‌های اصلی شامل ۹ عدد تیر خمشی، که هر یک از دو عضو خمشی پیش‌ساخته‌ی مجزا به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر تشکیل شده بودند، طراحی و ساخته شدند (شکل ۴).

برای طراحی وصله‌ی نمونه‌های تیری، در محل اتصال دو عضو پیش‌ساخته استفاده شده است: [۱۰]

$$l_d = \frac{A_b f_s}{a \sqrt{f'_c}} \quad (2)$$

که در آن،  $f_s$  تنش کششی آرماتور در لحظه‌ی شکست است. در حالت محافظ‌کارانه،  $f_s$  را می‌توان با جایگزین کردن مقدار  $a$  به کمک رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود:

$$a = \gamma_{12} d_b \frac{C/d_b + 0.5}{C/d_b + 3.6} \quad (3)$$

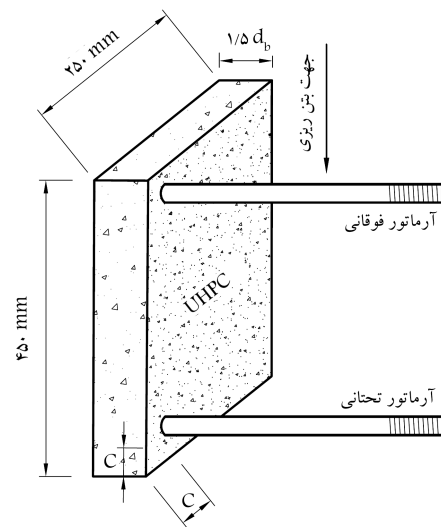


شکل ۴. مشخصات نمونه‌های تیری (ابعاد به میلی‌متر).

## ۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

### ۱.۳. نمونه‌های آزمایش بیرون‌کشیدگی

برای شبیه‌سازی رفتار پیوستگی بین آرماتور و بتن در دال‌ها و تیرها و تعیین مقاومت پیوستگی موضعی (مقاومت پیوستگی در طول‌های کوتاه) از آزمایش بیرون‌کشیدگی غیرمرکزی استفاده می‌شود. [۵] در این برنامه‌ی آزمایشگاهی، ابتدا مقاومت پیوستگی آرماتور و بتن فوق توانمند توسط آزمایش بیرون‌کشیدگی غیرمرکزی بررسی شد. بدین منظور ۱۸ نمونه‌ی بیرون‌کشیدگی غیرمرکزی طراحی و ساخته شدند. در این آزمایش‌ها برای جلوگیری از جاری شدن آرماتور و برای دستیابی به توزیع یکمواخت تنش پیوستگی، طول پیوستگی کوتاه و ۱٫۵ برابر قطر آرماتور در نظر گرفته شد. [۵] برای ساخت نمونه‌ها از سه ضخامت پوشش  $C$  متفاوت  $1.5d_b$ ،  $2.5d_b$  و  $4.5d_b$  استفاده شد. موقعیت قرارگیری آرماتور در لحظه‌ی بتن‌ریزی، جهت بتن‌ریزی و ابعاد کلی نمونه‌ها در شکل ۳ و جدول ۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان



شکل ۳. مشخصات نمونه‌های بیرون‌کشیدگی غیر مرکزی.

نتایج به دست آمده<sup>[۱۰]</sup> رابطه‌ی ۲ در صورتی برای تعیین طول وصله مناسب است که مقدار مشخصی آرماتور جانبی (خاموت) در طول وصله قرار داده شود. مقدار خاموت لازم به صورت رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$\frac{A_t}{S} = \frac{67C}{f_R A_b} \left[ \frac{(1.63M)}{(0.88 + 0.12 \frac{C_{med}}{C})(M+1)} - 1 \right] \quad (4)$$

که در آن مقدار  $M$  به کمک رابطه‌ی ۵ تعیین می‌شود:

$$M = \cos h \left( 0.0022 l_d \sqrt{3 \frac{f'_c}{d_b}} \right) \quad (5)$$

در این روابط،  $C$  و  $C_{med}$  به ترتیب میانه و کمیته‌ی بین ۳ مقدار  $(C_s + d_b)/2$ ،  $C_x$  و  $C_y$  هستند که  $C_x$  پوشش جانبی آرماتورها،  $C_y$  پوشش تحتانی آرماتورها و  $C_s$  فاصله‌ی بین دو آرماتور وصله‌شده‌ی مجاور در مقطع عرضی است.  $d_b$  قطر آرماتور،  $l_d$  طول وصله،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن،  $A_t$  سطح مقطع آرماتور جانبی،  $S$  فاصله‌ی بین آرماتورهای جانبی و  $A_b$  سطح مقطع آرماتور طولی وصله‌شده است. مقدار  $f_R$  برای کوچک‌تر یا مساوی با  $0.11$  برابر  $1$  و برای  $R_T$  بزرگ‌تر از  $0.11$  مساوی  $1.16$  در نظر گرفته شده است ( $R_T$  سطح نسبی آج است).

پژوهشگران نشان داده‌اند که استفاده از این روابط در تمام نمونه‌های تیری ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و بتن با مقاومت معمولی، شکل‌پذیری کافی برای همه نمونه‌ها ایجاد خواهد کرد. در عین حال برای مقاصد طراحی و تأمین یک ضریب اطمینان مناسب برای مقاومت و شکل‌پذیری پیشنهاد شده است که طول وصله‌ی محاسبه‌ی را در ضریب  $1.3$  ضرب کرد.<sup>[۱۱]</sup>

از مجموع ۹ نمونه‌ی آزمایشگاهی مذکور، برای اتصال قطعات پیش‌ساخته در ۲ نمونه از بتن با مقاومت معمولی NSC، در ۲ نمونه از بتن با مقاومت بالای HSC و در ۵ نمونه از بتن فوق توانمند UHPC در محل اتصال استفاده شد. علاوه بر این، یک نمونه‌ی بدون وصله به عنوان نمونه‌ی شاهد نیز ساخته و آزمایش شد تا شکل‌پذیری آن، که از نظر آیین‌نامه شکل‌پذیری مناسبی محسوب می‌شود، مبنایی برای بررسی شکل‌پذیری تیرهای وصله‌دار قرار گیرد. شکل ۴ و جدول ۲، مشخصات نمونه‌های تیری را نشان می‌دهد.

در تمام نمونه‌های تیرهای خمشی از پوشش بتن یکسان به ضخامت  $40$  میلی‌متر روی آرماتورهای طولی کششی با دو قطر متفاوت  $20$  و  $25$  میلی‌متر استفاده شد. ابعاد کلی مقطع عرضی تیرها  $250 \times 300$  میلی‌متر بود. مقدار آرماتور جانبی در

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های تیر خمشی.

نمونه	اختلاط	$f'_c$ (MPa)	$d_b$ (mm)	$l_d$ (mm)	آرماتورگذاری جانبی در طول وصله
B-۱				۲۵۰	
B-۲			۲۵	۲۵۰	
B-۳	UHPC	۱۲۵		۲۷۰	$\phi 6 @ 40$ mm
B-۴			۲۰	۱۸۰	
B-۵				۱۴۰	
B-۶	NSC	۳۰	۲۰	۴۶۸	
B-۷			۲۵	۶۴۷	$\phi 10 @ 43$ mm
B-۸	HSC	۷۰	۲۰	۳۰۷	
B-۹			۲۵	۴۲۴	
B-۱۰	NSC	۲۰	۲۰	-	-

طول وصله، در هر سری از نمونه‌های این برنامه‌ی آزمایشگاهی ثابت در نظر گرفته شد. با فرض یک مقدار ثابت برای نسبت  $A_t/S$ ، مقدار طول وصله‌ی پایه‌ی  $l_d$  با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ محاسبه شد. در نمونه‌های وصله‌شده با بتن فوق توانمند، از دو طول وصله‌ی متفاوت  $1/3 l_d$  و  $l_d$  استفاده شد. بر این اساس، طول وصله‌ی نمونه‌های B-۱، B-۲، B-۳، B-۴، B-۵، B-۶، B-۷، B-۸، B-۹، B-۱۰ برابر طول محاسبه‌شده به کمک رابطه‌های ۴ و ۵ و طول وصله‌ی نمونه‌های B-۳ و B-۵ برابر طول محاسبه‌شده به کمک رابطه‌های ۴ و ۵ در نظر گرفته شد. در نمونه‌های B-۶ تا B-۹ که در محل اتصال آنها از بتن معمولی استفاده شده است، طول وصله‌ی  $1/3$  برابر رابطه ۲ در نظر گرفته شد. در تمام نمونه‌های تیری، دو آرماتور فشاری به قطر  $12$  میلی‌متر در قسمت بالایی مقطع عرضی قرار داده شد. به منظور کالیبره‌کردن دستگاه آزمایش نمونه‌های تیری آزمایش، ابتدا دو نمونه‌ی مشابه B-۱ و B-۲ ساخته و آزمایش شدند. از آنجا که این دو نمونه رفتار تقریباً مشابهی نشان دادند، برای سایر نمونه‌ها فقط یک نمونه ساخته شد.

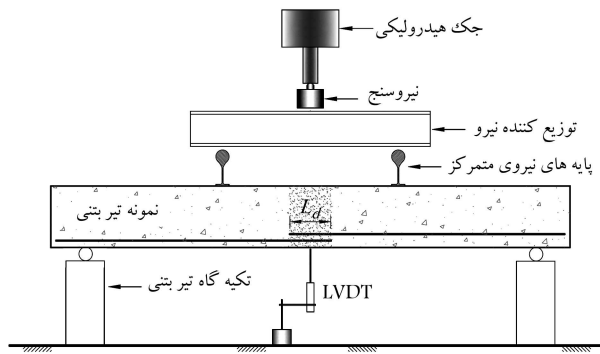
### ۳.۳. مشخصات مصالح

بتن فوق توانمند دارای توانمندی زیادی برای ایجاد نقاط اتصال سازه‌ی در ساخت پل‌هاست. در صورتی که این ماده برای نقاط اتصال استفاده شود، انتظار می‌رود طول وصله‌ی آرماتور به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. با هدف مقایسه، سه نوع بتن با مقاومت معمولی NSC، مقاومت بالای HSC و فوق توانمند UHPC در محل اتصال قطعات پیش‌ساخته استفاده شد. برای ساخت بتن با مقاومت معمولی NSC از سیمان تیپ ۲ با نسبت آب به مواد سیمانی  $0.45$  استفاده شد و بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه‌ها در این بتن  $25$  میلی‌متر بود. برای ساخت بتن با مقاومت  $70$  مگاپاسکال، سیمان تیپ ۲، میکروسیلیس و فوق روان‌کننده به کار رفت و نسبت آب به مواد سیمانی  $0.30$  بود. بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های مصالح سنگی در این نوع بتن به  $15$  میلی‌متر محدود شد. برای تعیین مقاومت فشاری هر یک از تیرها ۳ نمونه‌ی استوانه‌ی استاندارد به ابعاد  $150 \times 300$  میلی‌متر تهیه و در شرایط مشابه تیرهای نمونه عمل‌آوری شد.

برای ساخت UHPC از طرح اختلاط<sup>[۱۲]</sup> استفاده شد. در ساخت UHPC، بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های سنگی  $0.8$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای ساخت UHPC از سیمان پرتلند معمولی ASTM I/525، پودر کوارتز با قطر ذرات کمتر از  $10$  میکرومتر، میکروسیلیس خاکستری و فوق روان‌کننده با پایه‌ی پلی‌اتر پرکر بوکسیلات استفاده شد. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در این برنامه‌ی آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های UHPC، برای هر یک از طرح‌ها ۳ نمونه‌ی مکعبی به ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  و ۳ نمونه‌ی استوانه‌ی بی به قطر  $76$  میلی‌متر ساخته و تحت شرایط مشابه نمونه‌های اصلی نگه‌داری شدند. برای تبدیل مقاومت‌های فشاری مکعبی و استوانه‌ی بی به استوانه‌ی استاندارد (قطر  $102$  میلی‌متر)، به ترتیب از ضرایب  $0.96$  و  $0.99$  استفاده شد.<sup>[۱۳]</sup> آرماتورهای به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها از نوع AIII با دو قطر  $20$  و  $25$  میلی‌متر با تنش تسلیم اسمی به ترتیب  $460$  و  $420$  مگاپاسکال بود.

### ۴.۳. دستگاه و روند آزمایش

برای آزمایش نمونه‌های بیرون‌کشیدگی غیرمرکزی، یک صفحه‌ی فولادی به ضخامت  $30$  میلی‌متر بین نمونه و جک به عنوان تکیه‌گاه قرار گرفت (شکل ۵). برای عبور آرماتور از این صفحه، یک سوراخ به قطر  $30$  میلی‌متر در مرکز آن تعبیه شد. این صفحه‌ی فولادی به صورت افقی قرار گرفت و با یک تکیه‌گاه پیچی به یک قاب فولادی صلب



شکل ۶. دستگاه آزمایش نمونه‌های نیروی.

## ۵. نتایج آزمایش

### ۱.۱.۵. آزمایش بیرون کشیدگی

پیوستگی بین آرماتور و بتن را می‌توان به صورت یک نیروی برشی تعریف کرد. با فرض توزیع یکنواخت تنش در طول پیوستگی، تنش پیوستگی بین آرماتور و بتن (تنش پیوستگی معادل یکنواخت) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$u = F / \pi d_b L$$

در این رابطه،  $F$  نیروی اندازه‌گیری شده در لحظه‌ی شکست،  $L$  طول پیوستگی است. خلاصه‌ی نتایج آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است، که در آن برای مقایسه‌ی اثر پارامترهای مختلف، مقاومت پیوستگی نمونه‌ها نسبت به ریشه‌ی دوم مقاومت فشاری بی‌بعد شده است. مقاومت فشاری استوانه‌ی بتن برای تمام نمونه‌ها ۱۱۹ مگاپاسکال بوده است.

### ۱.۱.۵. رابطه‌ی بین مقاومت پیوستگی و نسبت $C/d_b$

در شکل‌های ۷ و ۸، رابطه‌ی بین  $C/d_b$  و  $\frac{u}{\sqrt{f_c}}$  نمونه‌های بیرون کشیدگی برای آرماتور به قطر ۱۴ و ۲۵ میلی‌متر نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های UHPC با افزایش نسبت  $C/d_b$  مقدار  $\frac{u}{\sqrt{f_c}}$  افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، در این شکل‌ها رابطه‌ی به دست آمده،<sup>[۵]</sup> برای تعیین مقاومت پیوستگی

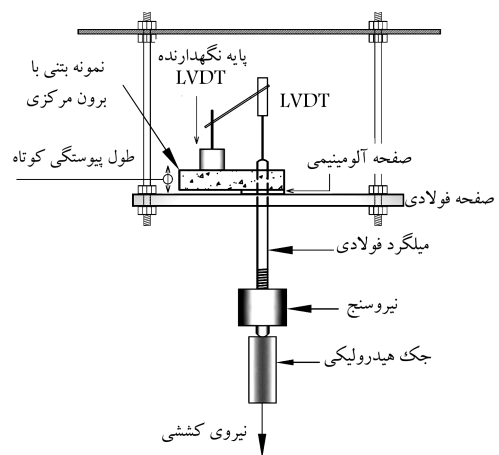
جدول ۴. نتایج آزمایش نمونه‌های بیرون کشیدگی برای بتن UHPC.

نمونه*	$u / \sqrt{f_c}$	$u$ (MPa)	$F$ (kN)	$d_b$ (mm)
P-۱ <sub>b</sub>	۲٫۲۰	۲۴٫۰۴	۲۳٫۰۸	۱۴
P-۱ <sub>t</sub>	۱٫۹۹	۲۱٫۶۹	۲۰٫۶۲	
P-۲ <sub>b</sub>	۲٫۹۷	۳۲٫۴۳	۳۲٫۸۷	
P-۲ <sub>t</sub>	۲٫۶۰	۲۸٫۳۸	۲۷٫۷۹	
P-۳ <sub>b</sub>	۳٫۷۵	۴۰٫۹۰	۴۲٫۶۰	
P-۳ <sub>t</sub>	۲٫۸۵	۳۱٫۱۰	۳۳٫۸۸	
P-۱۰ <sub>b</sub>	۲٫۱۴	۲۳٫۳۸	۷۰٫۱۹	۲۵
P-۱۰ <sub>t</sub>	-	-	-	
P-۱۱ <sub>b</sub>	۲٫۹۶	۳۲٫۲۹	۹۴٫۷۲	
P-۱۱ <sub>t</sub>	۲٫۶۲	۲۸٫۵۳	۸۳٫۸۶	
P-۱۲ <sub>b</sub>	۳٫۱۳	۳۴٫۲۰	۱۰۱٫۰۲	
P-۱۲ <sub>t</sub>	۳٫۱۱	۳۳٫۹۵	۹۹٫۷۵	

\* : b = bottom bars, t = top bars

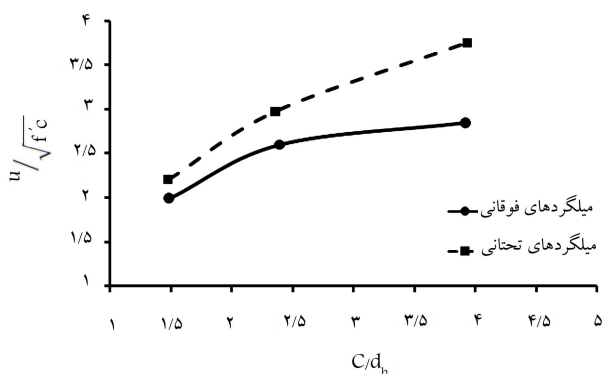
جدول ۳. مواد و طرح اختلاط به کاررفته در نمونه‌ها.

اختلاط	مصالح		
	(kg/m <sup>3</sup> )		
	UHPC	HSC	NSC
سیمان	۶۶۵	۵۲۰	۴۵۰
میکرو سیلیس	۲۰۰	۴۱٫۶۰	-
پودر کوارتز	۲۸۵	-	-
ماسه‌ی کوارتز (۰-۰٫۶ mm)	۱۰۲۰	-	-
W/c	۰٫۲۰	۰٫۳۰	۰٫۴۵
فوق روان‌کننده (مایع)	۲۳	۴٫۲۰	-
مصالح سنگی درشت‌دانه (۱۵-۲۵ mm)	-	-	۴۳۰
مصالح سنگی ریزدانه (۶-۱۵ mm)	-	۶۳۵	۳۰۰
ماسه (۰-۶ mm)	-	۱۰۵۰	۹۴۰

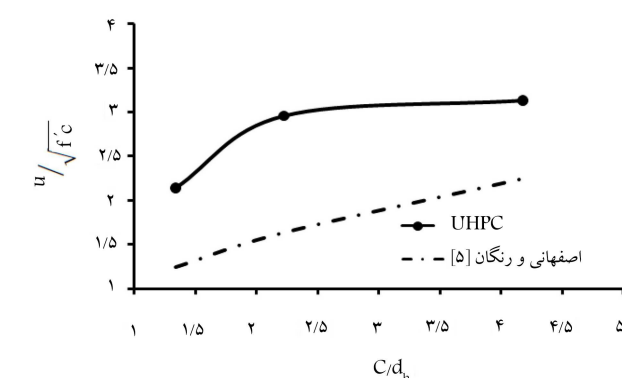


شکل ۵. دستگاه آزمایش بیرون کشیدگی غیرمرکزی.

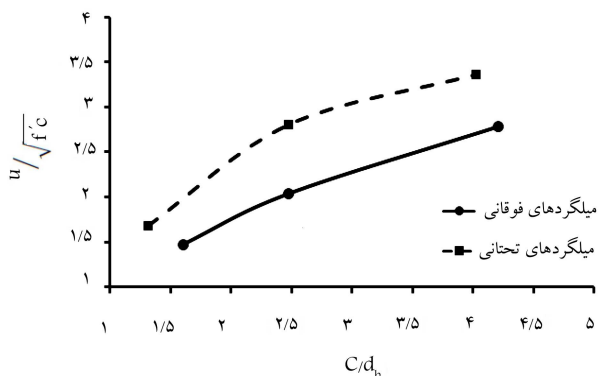
متصل شد. برای حذف اصطکاک بین صفحه‌ی تکیه‌گاه و سطح بتن و همچنین یکنواخت کردن توزیع تنش فشاری تکیه‌گاهی از یک قطعه‌ی آلومینیومی کوچک بین صفحه‌ی فولادی و سطح نمونه استفاده شد. همچنین سطح این صفحه‌ی آلومینیومی در محل تماس با نمونه، گریس‌کاری شد تا اثر اصطکاک بین صفحات به میزان کمینه کاهش یابد. نیروی اعمال‌شده‌ی جک به وسیله‌ی یک Load cell، که در حد فاصل جک و آرماتور قرار داشت، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقدار جابجایی (لغزش) آرماتور، یک LVDT<sup>۶</sup> در قسمت بارگذاری نشده‌ی آرماتور نصب شد (شکل ۵). دستگاه آزمایش نمونه‌های تیری در شکل ۶ نمایش داده شده است. هر یک از تیرها روی دو تکیه‌گاه ساده قرار گرفتند. نیرو از طریق یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن به تیر اعمال شد. برای اعمال خمش چهار نقطه‌ی، بار از جک به یک تیر فولادی صلب و سپس به صورت دو نیروی متمرکز به تیر منتقل شد. نیروی اعمال‌شده‌ی جک به وسیله‌ی یک LOAD CELL، که در حد فاصل جک و تیر صلب فولادی قرار داشت، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقدار خیز، یک LVDT در وسط تیر نصب شد. داده‌های خروجی از LOAD CELL و LVDT توسط سیستم جمع‌آوری هم‌زمان اطلاعات در گام‌های زمانی یک ثانیه به وسیله‌ی رایانه ثبت شد. بار به صورت افزایشی به نمونه اعمال شد که پس از هر نمونه، ترک‌های مشاهده‌شده روی سطح تیر علامت زده شدند.



شکل ۹. اثر آرماتور فوقانی به قطر ۱۴ میلی‌متر.



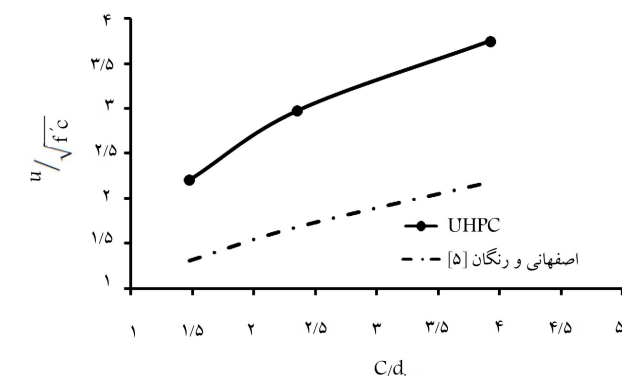
شکل ۷. رابطه‌ی بین  $\frac{u}{\sqrt{f'_c}}$  و  $C/d_b$  در نمونه‌های بیرون‌کشیدگی (آرماتور ۱۴).



شکل ۱۰. اثر آرماتور فوقانی به قطر ۲۵ میلی‌متر.

جدول ۵. اثر آرماتور فوقانی.

اختلاف	$u_{mean,t}$ (top)	$u_{mean,b}$ (bottom)	$u_{mean,b}/u_{mean,t}$
UHPC	۲۸٫۷۳	۳۲٫۷۷	۱٫۱۴



شکل ۸. رابطه‌ی بین  $\frac{u}{\sqrt{f'_c}}$  و  $C/d_b$  در نمونه‌های بیرون‌کشیدگی (آرماتور ۲۵).

موضعی در بتن‌های با مقاومت بالا (HSC) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقدار  $\frac{u}{\sqrt{f'_c}}$  برای نمونه‌های UHPC بسیار بیشتر از مقادیر این رابطه است.<sup>[۵]</sup>

### ۲.۱.۵. اثر آرماتور فوقانی

محققان<sup>[۱۴، ۱۵]</sup> نشان دادند که به علت کاهش مقاومت بتن اطراف آرماتور فوقانی، محبوس شدن هوای آزاد در بتن اطراف آرماتور فوقانی و جداشدگی دانه‌ها در هنگام بتن‌ریزی و پرکردن قالب، تنش پیوستگی آرماتورهای تحتانی نسبت به تنش پیوستگی آرماتورهای فوقانی در نمونه‌های مشابه و با مشخصات یکسان بیشتر است. در شکل ۹، اثر آرماتور فوقانی برای آرماتورهای به قطر ۱۴ میلی‌متر و در شکل ۱۰، برای آرماتورهای به قطر ۲۵ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار مقاومت پیوستگی آرماتورهای فوقانی نسبت به آرماتورهای تحتانی کمتر است.

مقاومت پیوستگی آرماتورهای فوقانی و تحتانی به تفکیک برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار میانگین نسبت مقاومت پیوستگی آرماتورهای تحتانی به آرماتورهای فوقانی نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این جدول، در بتن فوقی توانمند (UHPC)، مقدار میانگین مقاومت پیوستگی آرماتورهای تحتانی تقریباً ۱٫۱۴ برابر آرماتورهای فوقانی است.

با انجام آزمایش بیرون‌کشیدگی بر روی آرماتور فولادی و بتن معمولی نشان داده شد که ضریب اثر آرماتور فوقانی در بتن معمولی ۱٫۳ است.<sup>[۱۵]</sup> در طرح اختلاط بتن فوقی توانمند، اندازه‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ی ۰٫۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ریزبودن اندازه‌ی ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بتن فوقی توانمند سبب کاهش تخلخل و افزایش یکنواختی ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بتن فوقی توانمند و در نتیجه همگن شدن

آن می‌شود. از طرف دیگر، در بتن فوقی توانمند، دو پدیده‌ی آب‌انداختگی موضعی و جدایی ذرات در مقایسه با بتن معمولی کمتر است، که این مسئله سبب می‌شود اثر آرماتور فوقانی در بتن فوقی توانمند به مراتب نسبت به بتن معمولی کمتر باشد.

### ۲.۵. آزمایش تیری

#### ۱.۲.۵. شکل شکست و توزیع ترک‌ها

شکل ۱۱، رشد ترک و شکست نمونه‌های تیری را نشان می‌دهد. در نمونه‌ی بدون وصله‌ی B-۱۰، شکست نمونه به صورت شکل‌پذیر و به صورت خمشی پس از تحمل تغییرشکل‌های زیاد اتفاق افتاده است. شکست سایر نمونه‌ها به جز نمونه‌های B-۳ و B-۵، مشابه نمونه‌ی بدون وصله‌ی B-۱۰، به صورت شکل‌پذیر و با جاری شدن آرماتورهای تحتانی در خارج ناحیه‌ی وصله همراه بود. شکست دو نمونه‌ی B-۳ و B-۵ به صورت ترد و ناگهانی بود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، طول وصله‌ی این نمونه‌ها برابر طول رابطه‌های ۴ و ۵ در نظر گرفته شده است. به دلیل مقاومت فشاری زیاد بتن فوقی توانمند، طول وصله‌ی محاسبه‌شده به کمک این رابطه‌ها در نمونه‌های مذکور بسیار کم است (به ترتیب ۱۸ و ۱۴ میلی‌متر). کم بودن طول وصله‌ی آرماتور در این نمونه‌ها باعث می‌شود آرماتور ناحیه‌ی وصله، متناسب با تغییرشکل خمشی تیر بتنی خم نشود و در نتیجه فشار مکانیکی آرماتورها به پوسته‌ی بتن باعث شکافت

جدول ۶. خلاصه‌ی از نتایج آزمایش.

	(۱۳)	(۱۲)	(۱۱)	(۱۰)	(۹)	(۸)	(۷)	(۶)	(۵)	(۴)	(۳)	(۲)	(۱)
$i = \frac{\Delta_{r, \Delta d}}{\Delta y}$													
Eq. ۱	$A_t/S$	$l_d$ (mm)	$\frac{u_{test}}{u_{ACI}}$	$\frac{u_{test}}{u_{ESF}}$	$u_{ACI}$	$u_{ESF}$	$u_{test}$ (MPa)	$f_s$ (MPa)	$M_{test}$ (kN.m)	$f'_c$ (MPa)	$d_b$ (mm)	Specimen number	
	۲٫۶۳	۳۵۰	۲٫۷۹	۱٫۲۲	۳٫۳۴	۷٫۶۶	۹٫۳۲	۵۲۲٫۰۰	۱۱۴٫۳۸	۱۲۵	۲۵	B-۱	
	۳٫۳۰	۳۵۰	۲٫۸۳	۱٫۲۴	۳٫۳۴	۷٫۶۶	۹٫۴۸	۵۳۱٫۱۳	۱۱۶٫۳۸	۱۲۵	۲۵	B-۲	
	۱٫۰۵	۰٫۷۱	۲۷۰	۲٫۹۱	۱٫۱۵	۳٫۳۴	۸٫۴۳	۴۲۰٫۶۸	۹۲٫۱۸	۱۲۵	۲۵	B-۳	
	۴٫۴۱	۱۸۰	۲٫۷۸	۱٫۴۰	۵٫۹۷	۱۱٫۹۱	۱۴٫۶۶	۵۲۷٫۸۴	۷۴٫۰۲	۱۲۵	۲۰	B-۴	
	۱٫۱۴	۱۴۰	۲٫۴۵	۱٫۳۷	۵٫۹۷	۱۰٫۷۳	۱۶٫۶۳	۴۶۵٫۸۷	۶۵٫۳۳	۱۲۵	۲۰	B-۵	
			۲٫۷۵	۱٫۲۷								mean	
			۰٫۱۸	۰٫۱۰								S.D	
	۱۰٫۶۰	۴۶۸	۱٫۶۴	۱٫۱۵	۳٫۶۵	۵٫۱۷	۶٫۰۰	۵۶۱٫۹	۷۸٫۵۷	۳۱	۲۰	B-۶	
	۲٫۳۰	۶۴۷	۲٫۳۵	۱٫۰۳	۲٫۲۲	۴٫۶۹	۵٫۲۳	۵۴۱٫۳۰	۱۱۰٫۳۹	۳۱	۲۵	B-۷	
	۶٫۸۴	۱٫۸۳	۳۰۷	۱٫۵۶	۵٫۵۹	۷٫۹۰	۸٫۷۶	۵۳۷٫۸۰	۸۲٫۲۶	۷۴	۲۰	B-۸	
	۲٫۶۷	۴۲۴	۲٫۱۷	۱٫۰۶	۳٫۴۰	۷٫۱۸	۷٫۳۷	۵۰۰٫۰	۱۱۴٫۰۳	۷۴	۲۵	B-۹	
	۲٫۱۱	-	-	-	-	-	-	۴۴۶٫۰۰	۶۳٫۰۵	۲۲	۲۰	B-۱۰	
			۱٫۹۳	۱٫۱۰								mean	
			۰٫۳۹	۰٫۰۵								S.D	

بتن شود. لازم به توضیح است رابطه‌های ۴ و ۵ برای بتن‌های با مقاومت معمولی و با مقاومت بالا ارائه شده است.

### ۲.۲.۵. مقاومت پیوستگی نمونه‌های آزمایشگاهی

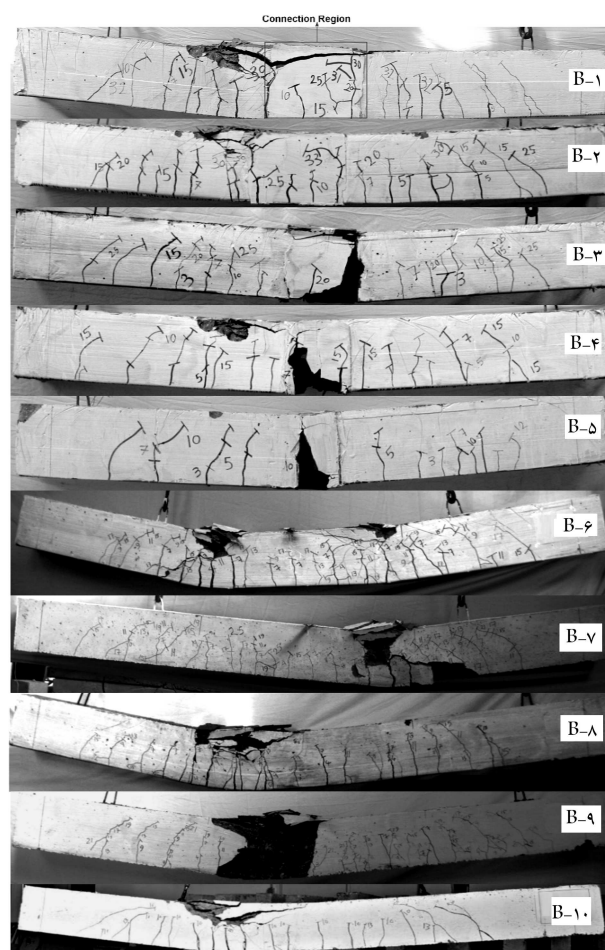
مقاومت پیوستگی را می‌توان با استفاده از مقدار تنش ایجاد شده در آرماتور تعیین کرد (جدول ۶). تنش آرماتور را می‌توان بر اساس روابط کشسان - خمیری مقاطع خمشی بتن مسلح به دست آورد. این مسئله قبلاً توسط پژوهشگران استفاده و توصیه شده است: [۸-۶]

$$f_s = \frac{M}{A_s j d} \quad (۶)$$

در این رابطه،  $M$  لنگر نهایی شکست است و در نمونه‌های UHPC برابر با  $M = ۰٫۷ P_{test}$  و در نمونه‌های NSC و HSC برابر با  $M = ۰٫۹ P_{test}$  است.  $A_s$  سطح مقطع کل آرماتورهای کششی بر حسب میلی‌متر مربع و  $j d$  بازوی لنگر مقاوم است. برای محاسبه‌ی میانگین تنش پیوستگی، نیروی کلی به‌وجودآمده در آرماتور فولادی،  $A_b \times f_s$ ، بر سطح تماس آرماتور با بتن در طول وصله ( $\pi \times d_b \times l_d$ ) تقسیم می‌شود (رابطه‌ی ۷):

$$u_{test} = \frac{A_b f_s}{\pi d_b l_d} \quad (۷)$$

در این رابطه  $A_b$  سطح مقطع یک آرماتور طولی وصله شده،  $L_d$  طول وصله،  $f_s$  تنش آرماتور و  $d_b$  قطر آرماتور است. در جدول ۶، خلاصه‌ی از نتایج آزمایش شامل لنگرهای نهایی (ستون ۴)، تنش به‌وجودآمده در آرماتور (ستون ۵)، تنش‌های پیوستگی نهایی (ستون ۶) و شاخص‌های شکل‌پذیری (ستون ۱۳) ارائه شده است. همچنین در ستون‌های ۷ و ۸ در جدول ۶، تنش پیوستگی محاسبه‌شده [۱۰] و آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸-۱۱ [۱۶] ارائه شده است. در ستون‌های ۹ و ۱۰ این جدول، نتایج آزمایش با مقادیر محاسبه‌شده مقایسه شده است. همان‌طور که در ستون ۴ در جدول ۶ ملاحظه می‌شود، لنگر نهایی شکست در نمونه‌های B-۱، B-۲، B-۷ و B-۱۰



شکل ۱۱. تیرهای نمونه پس از آزمایش.

B-9 تقریباً با یکدیگر برابر هستند. علاوه بر این، مقایسه‌ی تنش‌های ایجادشده در آرماتور در نمونه‌های B-1، B-2، B-7 و B-9 نشان می‌دهد که تنش موجود در آرماتورها، در همه‌ی این نمونه‌ها از تنش جاری شدن اسمی آرماتور بیشتر است و این مطلب نشان می‌دهد آرماتورها در همه‌ی این نمونه‌ها جاری شده‌اند و تیر به ظرفیت نهایی‌اش رسیده است. این نمونه‌ها از آرماتور به قطر ۲۵ میلی‌متر ساخته شده و طول وصله‌ی آنها ۱٫۳ برابر طول رابطه‌های ۴ و ۵ انتخاب شده است. در محل وصله‌ی نمونه‌های B-7 و B-9 از بتن معمولی و در محل وصله‌ی نمونه‌های B-1 و B-2 از UHPC استفاده شده است. در جدول ۶، طول وصله‌ی نمونه‌های B-1 و B-2، ۳۵ میلی‌متر و نسبت  $A_t/S$  آنها ۰٫۷۱ به دست آمده است.  $A_t$  سطح مقطع آرماتور جانبی وصله و  $S$  فاصله‌ی آرماتورهای جانبی وصله است. این مقادیر در نمونه‌ی B-7 به ترتیب ۶۴۷ میلی‌متر و ۱٫۸۳ و در نمونه‌ی B-9 به ترتیب ۴۲۴ میلی‌متر و ۱٫۸۳ به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در صورت استفاده از UHPC در محل اتصال با طول وصله و مقدار آرماتور جانبی کمتر می‌توان به ظرفیت نهایی شکست دست پیدا کرد. این مطلب در مقایسه‌ی نمونه‌های B-4، B-6 و B-8 نیز صادق است. در محل اتصال قطعات پیش‌ساخته‌ی نمونه‌ی B-4 از UHPC و در نمونه‌های B-6 و B-8 از بتن معمولی استفاده شده است. مقایسه‌ی تنش‌های ایجادشده در آرماتور در نمونه‌های B-4، B-6 و B-8 نشان می‌دهد تنش موجود در آرماتورها در همه‌ی این نمونه‌ها از تنش جاری شدن آرماتور بیشتر است و این مطلب نشان می‌دهد آرماتورها در همه‌ی این نمونه‌ها جاری شده‌اند و تیر به ظرفیت نهایی‌اش رسیده است. طول وصله‌ی آرماتور و نسبت  $A_t/S$  وصله‌ی نمونه‌ی B-4 به ترتیب ۱۸۰ میلی‌متر و ۰٫۷۱ و در نمونه‌ی B-6، ۴۶۸ و ۱٫۸۳ و در نمونه‌ی B-8، ۳۰۷ و ۱٫۸۳ به دست آمده است.

نمونه‌های B-3 و B-5 به ترتیب مشابه نمونه‌های B-1 و B-4 هستند. در نمونه‌های B-3 و B-5 از بتن UHPC، طول وصله‌ی حاصل از رابطه‌های ۴ و ۵ در ضریب ۱٫۳ ضرب نشده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، لنگر نهایی شکست و تنش کششی آرماتورهای این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های مشابه (B-1 و B-4) کمتر است. با این حال تنش آرماتور این نمونه‌ها به تنش جاری شدن آرماتور نزدیک است و آرماتورها در آستانه‌ی جاری شدن قرار دارند. لیکن شکست این نمونه‌ها به صورت ترد و شکننده بود. کوتاه‌بودن طول وصله‌ی این نمونه‌ها سبب تغییرشکل خمشی آرماتورها از تغییرشکل خمشی تیرهای بتنی کمتر می‌شود و فشار مکانیکی آرماتورها به بتن پوسته باعث شکافت پوسته‌ی بتن در محل وصله می‌شود.

از ستون ۹ جدول ۶ ملاحظه می‌شود مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت  $u_{test}/u_{Esf}$  در نمونه‌های UHPC به ترتیب مقادیر ۱٫۲۷ و ۰٫۱۰ به دست آمده است. این مطلب نشان می‌دهد که مقاومت پیوستگی UHPC نسبت به بتن معمولی بیشتر است. با این حال از رابطه‌ی اصفهانی و کیانوش<sup>[۱۷]</sup> می‌توان به طور محافظکارانه برای تخمین مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار UHPC استفاده کرد. در جدول ۶، مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت  $u_{test}/u_{Esf}$  در نمونه‌های وصله‌شده با بتن معمولی به ترتیب مقادیر ۱٫۱۰ و ۰٫۰۵ به دست آمده است. این مطلب نشان می‌دهد رابطه‌ی اصفهانی و کیانوش<sup>[۱۷]</sup> برای نمونه‌های وصله‌شده با بتن معمولی جواب‌های منطقی و محافظکارانه به دست می‌دهد.

همان‌طور که در ستون ۱۰ جدول ۶ نشان داده شده است، مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت  $u_{test}/u_{ACI318-11}$  در نمونه‌های وصله‌شده با UHPC به ترتیب مقادیر ۲٫۷۵ و ۰٫۱۸ و در نمونه‌های وصله‌شده با بتن معمولی به ترتیب ۱٫۹۳ و ۰٫۳۹ به دست آمده است. بنابراین می‌توان گفت آیین‌نامه‌ی

ACI 318-11<sup>[۱۷]</sup> نتایج نمونه‌های تیری وصله‌دار ساخته‌شده از بتن معمولی و UHPC را دست پایین و با پراکندگی زیادی پیش‌بینی می‌کند.

### ۳.۲.۵. شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایشگاهی

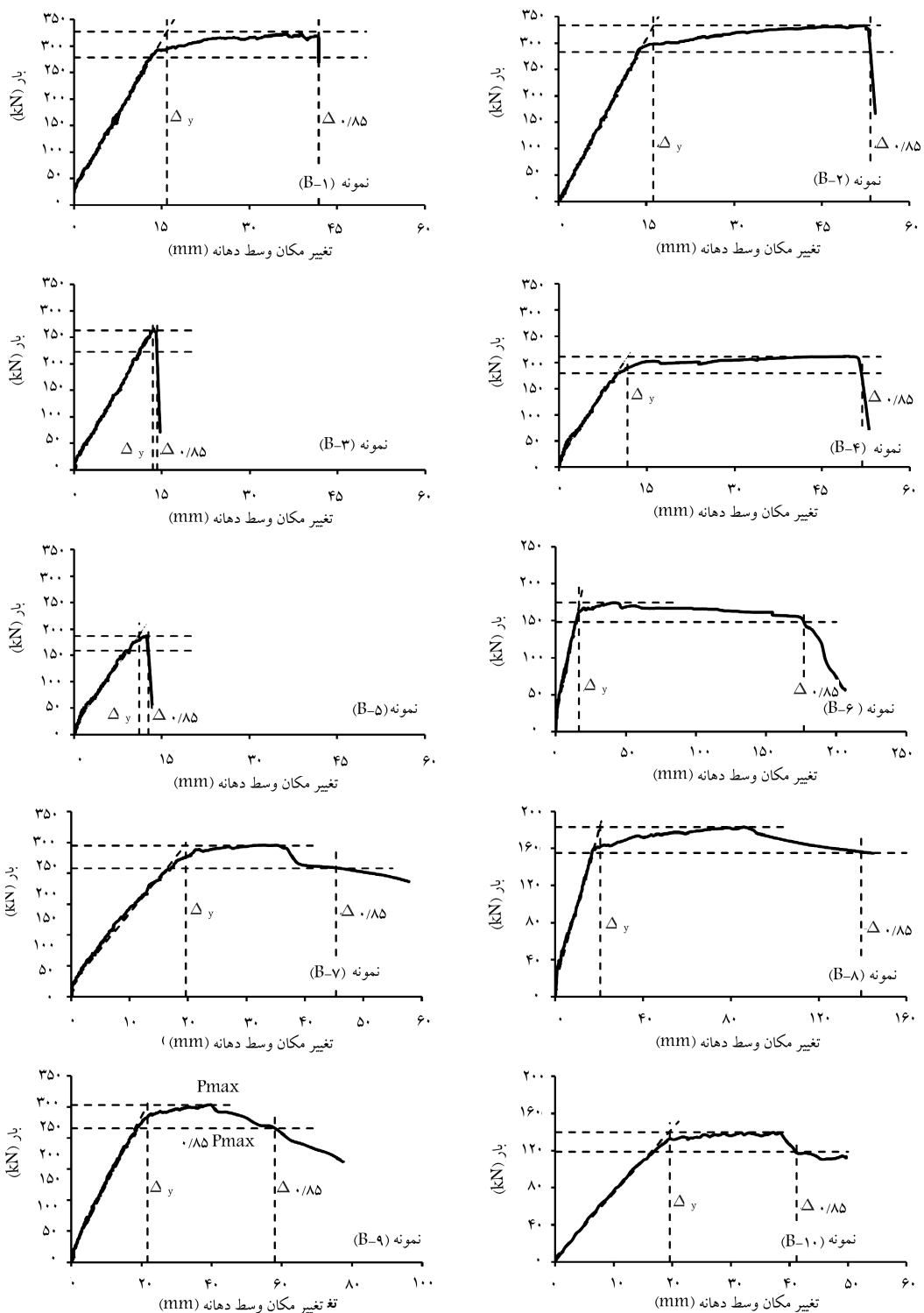
شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های تیری در جدول ۶ و رابطه‌ی نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها در شکل ۱۲ ارائه شده است. نمونه‌ی B-1 فاقد وصله است و از نتایج آن، که از نظر خمشی شکل‌پذیر است، می‌توان به‌عنوان شاخص شکل‌پذیری استفاده کرد. این نمونه دارای مقدار آرماتور خمشی کمتر از مقدار بیشینه‌ی آیین‌نامه‌ی ACI 318-11<sup>[۱۶]</sup> است. با توجه به شکل ۱۲ و جدول ۶ مشاهده می‌شود که شاخص شکل‌پذیری این نمونه حدود ۲/۱۱ برآورد شده است. با استفاده از این مقدار می‌توان شکل‌پذیری سایر نمونه‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

نمودار بار-تغییر مکان دو نمونه‌ی مشابه B-1 و B-2 در شکل ۱۲ و شاخص شکل‌پذیری این نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که این دو نمونه تقریباً رفتار مشابهی دارند. به این دلیل از سایر نمونه‌ها فقط یک نمونه ساخته و آزمایش شد.

چهار نمونه‌ی B-1، B-2، B-7 و B-9 از آرماتور ۲۵ تهیه شده است و همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مقدار طول وصله‌ی این نمونه‌ها به کمک رابطه‌های ۴ و ۵ تعیین شده است. در این نمونه‌ها، طول وصله‌ی حاصل از رابطه‌های ۴ و ۵ در ضریب ۱٫۳ ضرب شده است. در نمونه‌های B-1 و B-2 در محل اتصال قطعات پیش‌ساخته از بتن فوق توانمند UHPC، در نمونه‌ی B-7 از بتن با مقاومت معمولی NSC و در نمونه‌ی B-9 از بتن با مقاومت بالا HSC استفاده شده است. رابطه‌ی بار-تغییر مکان این نمونه‌ها در شکل ۱۲ و شاخص شکل‌پذیری این نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمام این نمونه‌ها رفتاری مشابه نمونه‌ی بدون وصله‌ی B-1 از خود نشان می‌دهند. شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های B-1، B-2، B-7 و B-9 به ترتیب برابر ۲٫۶۳، ۳٫۳۰، ۲٫۳۰ و ۲٫۶۷ است و از شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ی بدون وصله‌ی B-1 بیشتر است.

تأثیر استفاده از UHPC در محل اتصال قطعات پیش‌ساخته را می‌توان با مقایسه‌ی رفتار بار-تغییر مکان و شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های B-4، B-6 و B-8 با نمونه‌ی B-1 نیز بررسی کرد. نمودار بار-تغییر مکان این نمونه‌ها در شکل ۱۲ و شاخص شکل‌پذیری آنها در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر سه‌ی این نمونه‌ها، مشابه نمونه‌ی بدون وصله، به صورت یکپارچه رفتار می‌کنند. علاوه بر این، شاخص شکل‌پذیری این نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴٫۴۱، ۱۰٫۶۰ و ۶٫۸۴ است؛ که از شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ی بدون وصله به مقدار زیادی بیشتر است. بنابراین، همه‌ی این نمونه‌ها دارای شکل‌پذیری قابل قبولی هستند. با توجه به آنچه بیان شد، می‌توان گفت در صورت استفاده از رابطه‌های ۲ الی ۵ برای طراحی وصله‌ی قطعات پیش‌ساخته و اعمال ضریب ۱٫۳ برای طول وصله، عضو خمشی مرکب، مشابه نمونه‌ی یکپارچه رفتار می‌کند. از طرف دیگر همان‌طور که در جدول ۶ ملاحظه می‌شود، مقدار طول و آرماتور جانبی وصله در نمونه‌های UHPC به مراتب نسبت به نمونه‌های NSC و HSC کمتر است. این مطلب نشان می‌دهد در صورت استفاده از UHPC در محل اتصال قطعات پیش‌ساخته حتی با جزئیات اتصال ساده‌تر می‌توان به رفتار یکپارچه در نمونه‌ها دست یافت.

نمونه‌های B-3 و B-5 به ترتیب مشابه نمونه‌های B-1 و B-4 هستند که در محل اتصال آنها از UHPC استفاده شده است. لیکن از ضریب ۱٫۳ برای طول وصله‌ی محاسباتی استفاده نشده است. نمودار بار-تغییر مکان این نمونه‌ها در شکل ۱۲ و شاخص شکل‌پذیری آنها در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور



شکل ۱۲. شکل پذیری نمونه‌های مختلف تیری.

تحت اثر بارهای وارده اطمینان حاصل شود. در نمونه‌های این برنامه‌ی آزمایشگاهی طول وصله ۱/۳ برابر مقدار رابطه‌های ۴ و ۵ منجر به رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ها شده است. تأثیر متغیر قطر آرماتور کششی در شکل‌پذیری نمونه‌ها را می‌توان به ترتیب در نمونه‌های (B-۶ و B-۷)، (B-۸ و B-۹) و (B-۱ و B-۴) بررسی کرد. مقایسه‌ی نمودار بار - تغییر مکان و شاخص شکل‌پذیری این نمونه‌ها نشان می‌دهد با افزایش

که ملاحظه می‌شود، رفتار این نمونه‌ها شکل‌پذیر نیست و شکست آنها به صورت ترد است. در این نمونه‌ها فشار مکانیکی آرماتورها (به دلیل کم بودن طول وصله) بر پوسته‌ی بتن سبب شکافت بتن و در نتیجه شکست ترد این نمونه‌ها می‌شود. بنابراین می‌توان گفت برای اتصال قطعات پیش‌ساخته به کمک UHPC باید یک طول وصله‌ی کمیته برای آرماتورها در نظر گرفته شود تا از رفتار یکپارچه‌ی نمونه‌ها

قطر آرماتور، شکل‌پذیری نمونه‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌یی کاهش می‌یابد. با این حال تمام این نمونه‌ها از خود شکل‌پذیری قابل قبولی نشان می‌دهند.

## ۶. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از UHPC در محل اتصال اعضای خمشی پیش‌ساخته‌ی بتن‌آرمه است. به طوری که عضو مرکب مقاومت، شکل‌پذیری و یکپارچگی کافی داشته باشد. در این برنامه‌ی آزمایشگاهی، ابتدا برای بررسی مقاومت پیوستگی بتن UHPC، ۳۶ آرماتور فولادی به قطرهای ۱۴ و ۲۵ میلی‌متر از بلوک‌های UHPC بیرون کشیده شده‌اند. علاوه بر این، ۹ نمونه‌ی تیری مرکب وصله‌دار ساخته‌شده از دو تیر پیش‌ساخته آزمایش شدند. بر اساس این مطالعه، این

نتایج حاصل شد:

۱. در مورد مقاومت پیوستگی نمونه‌های UHPC، ضریب اثر آرماتور فوقانی ۱/۱۴ به دست آمده است، که کمتر از ضریب اثر آرماتور فوقانی در بتن‌های معمولی و با مقاومت بالاست. به نظر می‌رسد، همگن‌بودن ذرات تشکیل‌دهنده‌ی UHPC و عدم جداسازی ذرات، کم‌بودن تخلخل و آب‌نیافتن موضعی سبب کاهش اثر آرماتور فوقانی UHPC نسبت به بتن معمولی و مقاومت بالا شده است.
۲. نمونه‌های طراحی‌شده با اعمال ضریب ۱/۳ در طول وصله‌ی محاسباتی پیشنهادی قبلی در محل اتصال اعضای پیش‌ساخته، دارای مقاومت پیوستگی و شکل‌پذیری مناسبی هستند. در این صورت، استفاده از مقدار آرماتور جانبی محاسباتی قبل کافی به نظر می‌رسد.
۳. در صورت استفاده از UHPC در محل اتصال قطعات پیش‌ساخته، با جزئیات اتصال ساده‌تر می‌توان به مقاومت و شکل‌پذیری‌های مناسبی دست یافت.

## پانوشته‌ها

1. ultra high performance concrete (UHPC)
2. pullout
3. spliced-bar beams
4. concentric pullout
5. eccentric pullout
6. linear variable displacement transducer (LVDT)

## منابع (References)

1. Firas, S.A., Gilles, F. and Robert, L. "Bond between carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): Experimental study", *Construction and Building Materials*, **25**(2), pp. 479-485 (2010).
2. Graybeal, B. "Behavior of ultra-high performance concrete connections between precast bridge deck elements", Ductal Science library, CBC, pp. 1-13 (2010).
3. Achillides, Z. and Pilakoutas, K. "Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions", *Journal of Composites for Construction*, **8**(2), pp. 173-181 (2004).
4. ASTM C234-91a., *Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel*, ASTM Annual Book of Standards, Section 4, Construction, Philadelphia (1991).
5. Esfahani, M.R. and Rangan, B.V. "Local bond strength of reinforcing bars in normal strength and high-strength concrete (HSC)", *ACI Structural Journal*, **95**(2), pp. 96-105 (1998).
6. Esfahani, M.R. and Rangan, B.V. "Bond between normal strength and high-strength concrete and reinforcing bars in splices in beams", *ACI Structural Journal*, **95**(3), pp. 272-279 (1998).
7. Turk, K., Benli, A. and Calayir, Y. "Bond strength of tension lap-splices in full scale self-compacting concrete beams", *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, **32**(6), pp. 377-386 (2008).
8. Aziznamini, A., Pavel, R., Hatfield, E. and Ghosh, S.K. "Behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in high-strength concrete", *ACI Structural Journal*, **96**(5), pp. 826-835 (1999).
9. Cohn, M.Z. and Barlett, M. "Computer-simulated flexural tests of partially pre-stressed concrete sections", *ASCE Journal of Structural Division*, **108**(ST12), PP. 2747-2765 (1982).
10. Esfahani, M.R. and Kianoush, M.R. "Development/splice length of reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **102**(1), pp. 22-30 (2005).
11. Mohammadzadeh, B., Esfahani, M.R. and Shooshtari, A. "Ductility analysis of lap-spliced reinforced concrete beams", *Journal of Civil Engineering*, **22**(1), pp. 63-82 (2011).
12. Ma, J. and Schneider, H. "Properties of ultra-high-performance concrete", *LACER*, **7**, pp. 25-32 (2002).
13. Graybeal, B. and Davis, M. "Cylinder or cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, **105**(6), pp. 603-609 (2008).
14. Esfahani, M.R., Kianoush, M.R. and Lachemi, M. "Bond strength of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars in normal and self-consolidating concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **32**, pp. 553-560 (2005).
15. Esfahani, M.R., Lachemi, M. and Kianoush, M.R. "Top-bar effect of steel bars in self-consolidating concrete (SCC)", *Cement & Concrete Composites*, **30**(1), pp. 52-68 (2008).
16. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*, Farmington Hills, MI, pp. 473 (2011).