

## ارزیابی اثر نوع بتن و قطر میلگرد بر مقاومت پیوستگی در سازه‌های بتن آرمه

سمانه خاکسفیدی<sup>۱</sup>، منصور قلعه نوی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

## چکیده

عملکرد سازه‌های بتنی متأثر از انتقال نیرو بین میلگرد و بتن (پیوستگی) است که به عوامل زیادی مانند مقاومت بتن، تنش تسلیم میلگرد، هندسه آج‌ها، قطر میلگرد، پوشش بتن و طول پیوستگی وابسته است. از یک سو مزیت‌های منحصر به فرد بتن‌های فوق‌توانمند مانند چگالی، ضریب کشسانی و مقاومت بالا، نفوذپذیری کم و دوام بالا در برابر حملات شیمیایی علاقه به استفاده از آن را در صنعت ساختمان افزایش داده است. از سوی دیگر پیشرفت علم مواد امکان تهیه میلگردهای با مقاومت تسلیم بالاتر با حفظ شکل پذیری مناسب را فراهم کرده است. درحالیکه اکثر روابط توصیه شده در آیین‌نامه‌ها براساس میلگردها و بتن‌های معمولی است. بنابراین ضرورت دارد تحقیقات بیشتری بر روی ترکیب مصالح جدید با همدیگر برای شناخت بهتر رفتار سازه‌ها صورت پذیرد. در این پژوهش تعداد ۲۴ نمونه مکعبی به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  سانتی‌متر و  $25 \times 25 \times 25$  سانتی‌متر، از بتن فوق‌توانمند و معمولی مسلح شده با یک میلگرد مقاومت بالا از قطرهای ۱۲، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر در راستای مرکز نمونه، با دو طول پیوستگی (دو و چهار برابر قطر میلگرد)، ساخته شده و تحت آزمایش بیرون کشیدگی<sup>۳</sup> قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن و نسبت پوشش بتن به قطر، طول پیوستگی و تنش تسلیم میلگرد نقش مهمی در امکان وقوع هر یک از حالت‌های گسیختگی دارند. هم‌چنین بتن فوق‌توانمند با افزایش مقاومت پیوستگی تا نزدیک پنج برابر بتن معمولی امکان کاهش عمده در طول مهاری مورد نیاز را فراهم می‌کند. با توجه به منحنی‌های پیوستگی-لغزش بتن فوق‌توانمند بدون الیاف ساخته شده در این پروژه رفتار تردتری نسبت به بتن معمولی دارد. در بتن معمولی با افزایش طول پیوستگی، بیشینه تنش پیوستگی افزایش می‌یابد، درحالی‌که در بتن فوق‌توانمند افزایش طول پیوستگی باعث کاهش بیشینه تنش پیوستگی می‌گردد. برای پیش‌بینی رفتار پیوستگی-لغزش مدل جدیدی پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: بتن فوق‌توانمند، میلگرد مقاومت بالا، پیوستگی، بیرون کشیدگی، طول پیوستگی.

\* نویسنده مسئول: منصور قلعه نوی

پست الکترونیکی: ghalehnovi@um.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

Ultra-High Performance Concrete (UHPC)<sup>۱</sup>Normal Strength Concrete (NSC)<sup>۲</sup>Pull out<sup>۳</sup>

## The effect of concrete type and rebar diameter on bond strength in reinforced concrete structures

Samaneh Khaksefidi<sup>1</sup>, Mansour Ghalehnovi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>- PhD student, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

Concrete is the most widely used building material in recent decades, and researchers are innovating in the production of this material to improve some of its properties such as strength and durability. A part of these innovative efforts has led to the production of a new class of concrete called ultra-high performance concrete (UHPC). UHPC has the unique mechanical features that provide opportunities for the development of new techniques of construction, repairs and renovation of concrete structures. While most of the recommended relationships in the standards are based on normal strength concrete (NSC), it is necessary to know more about ultra-high performance concrete behavior. This study aimed to investigate bond behavior (the interaction between rebar and concrete) because it directly affects the performance of concrete structures. 24 cubic concrete specimens (20 cm and 25cm wide) with a centered rebar and two bond lengths, using UHPC and NSC, were subjected to pull-out tests. Concrete's compressive strength and relative cover, bond length, and yield stress of the rebar significantly influence the failure mode. UHPC reduces the embedded length of rebars by increasing bond strength up to 5 times that in NSC. Regarding to the bond-slip curves, plain UHPC (used in this study) had less ductility than NSC. In NSC, increasing the bond length increases the maximum bond stress, while in UHPC, for increasing bond length, the maximum bond stress decreases. New relationships have been proposed to predict bond-slip behavior.

### ARTICLE INFO

Received: --/--/----

Accepted: --/--/----

### Keywords:

Ultra-high performance concrete  
high strength rebar  
bond  
pull-out

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

### Citation:

\*Corresponding author: Full name.

Email address: ghalehnovi@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

در حال حاضر بخش عمده ای از مطالعات در صنعت ساختمان بر مصالح بتنی متمرکز است. بسیاری از پژوهشگران در حال نوآوری در ساخت این مصالح، بررسی رفتار آن و برطرف کردن برخی محدودیت‌ها (مانند مقاومت کششی پایین، مقاومت کم در برابر حملات تهاجمی محیط و ابعاد بزرگ مقاطع) در استفاده از آن هستند. شاخه‌ای از این تلاش‌های نوآورانه منجر به تولید طبقه جدیدی از بتن‌ها به نام بتن فوق‌توانمند شده است که ویژگی‌های منحصر به فرد آن مانند چگالی، ضریب کشسانی و مقاومت بالا، نفوذ پذیری کم و دوام بالا در برابر حملات شیمیایی و ... فرصتهایی برای توسعه روش‌های جدید ساخت، تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی را فراهم می‌کند. ویژگی‌های مکانیکی بتن فوق‌توانمند، با امکان کاهش سطح مقطع، بار مرده سازه را کاهش می‌دهد و دوام بالای آن حتی در شرایط خورنده، هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه را به حداقل می‌رساند. این مزیت‌ها هزینه اولیه بالاتر در ساخت این بتن را توجیه می‌کند. اما استفاده از روابط آیین‌نامه‌های طراحی رایج که غالباً بر مبنای بتن معمولی هستند، برای استفاده از این نوع بتن با چالش همراه است. لذا پژوهش‌های بیشتر برای شناخت عملکرد سازه‌های این مصالح ضرورت دارد. اخیراً تلاش‌هایی برای بررسی رفتار غیرخطی سازه‌های بتن مسلح ساخته شده با بتن فوق‌توانمند صورت گرفته است. بخشی از این پژوهش‌ها به بررسی رفتار سخت‌شدگی کششی، عملکرد شاخه ای و رفتار پس از ترک خوردگی این بتن می‌پردازد [۱-۳].

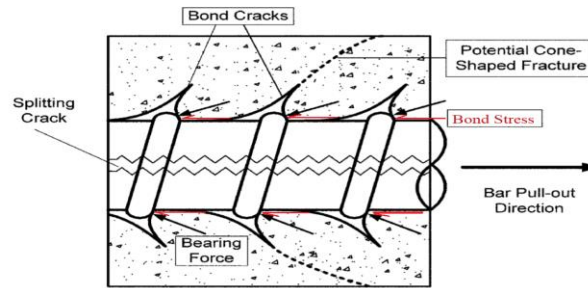
عملکرد سازه‌های بتن مسلح وابسته به عملکرد متقابل هر دو مصالح بتن و فولاد است. جهت استفاده از کل ظرفیت بتن لازم است میلگردهای تسلیح نیز از مقاومت کششی و پیوستگی بالایی با بتن برخوردار باشند. اخیراً میلگردهای فولادی با مقاومت کششی بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال در کشور تولید شده است. استفاده از میلگردهای مقاومت بالا در کنار بتن‌های پیش‌رفته با رفع مشکل تراکم میلگرد، امکان کوچک کردن مقاطع را فراهم می‌کند و منجر به طراحی اعضای سازه‌ای قوی‌تر و کاهش بار مرده سازه می‌شود. همچنین مقاومت بیشتر آن امکان استفاده بیشتر از ظرفیت مصالح بتن را نیز ممکن می‌سازد. البته برای اطمینان از اینکه دو مصالح بتن و میلگردهای فولادی مسلح‌کننده به خوبی با همدیگر کار کنند، تامین پیوستگی مناسب بین آن‌ها ضروری است. اگر پیوستگی کافی نباشد، رفتار و مشخصات گسیختگی و عملکرد سازه‌ای و خدمت‌پذیری سازه‌ها عوض خواهد شد. ساز و کار پیوستگی باعث انتقال نیروها بین بتن و فولاد می‌شود. اگرچه سال‌هاست رفتار پیوستگی انواع میلگردها در انواع بتن‌ها مورد بررسی محققان است [۴-۶]، لیکن تا کنون مقالات محدودی به بررسی رفتار پیوستگی بین بتن فوق‌توانمند و میلگردهای فولادی مقاومت بالا پرداخته‌اند. علاوه بر آن در بین همین پژوهش‌های اندک نیز تناقض‌هایی در بین یافته‌های پژوهشگران گزارش شده است که لزوم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه را یادآور می‌شود.

اندرکنش بین میلگردهای آج‌دار و بتن احاطه‌کننده آن‌ها به عنوان مقاومت پیوستگی شناخته می‌شود. رفتار پیوستگی شامل ساز و کارهای انتقال، تنش‌های پیوستگی و حالت‌های شکست است. ساز و کار انتقال پیوستگی شامل سه مولفه چسبندگی شیمیایی، اصطکاک و قفل و بست مکانیکی بین میلگرد و بتن احاطه‌کننده آن است. در میلگردهای ساده فقط دو مولفه چسبندگی شیمیایی و اصطکاک وجود دارد و قفل و بست مکانیکی تقریباً وجود ندارد. اما در میلگردهای آج‌دار قفل و بست مکانیکی سهم بزرگ‌تری نسبت به دو مولفه دیگر دارد. در یک عضو بتن مسلح وقتی میلگرد تحت کشش قرار می‌گیرد اثر چسبندگی شیمیایی به سرعت از بین می‌رود و تنش از طریق آج‌ها به بتن احاطه‌کننده اطراف آن منتقل می‌شود. مولفه افقی که در طول سطح تماس میلگرد با بتن عمل می‌کند تنش پیوستگی آنامیده می‌شود (شکل ۱). اگر طول مدفون میلگرد در بتن کوتاه در نظر گرفته شود، می‌توان تنش پیوستگی را در طول میلگرد یکنواخت فرض کرد. یا میانگین تنش پیوستگی در ناحیه پیوستگی مطابق رابطه ۱ را برای ارزیابی مشخصات پیوستگی به کار برد.

$$u = \frac{P_{\max}}{\pi \cdot d_b \cdot L_b} \quad (1)$$

Bond Resistance  
Chemical adhesion  
Bond Stress

که در آن  $P_{max}$  بیشترین بار بیرون کشیدگی،  $d_b$  قطر میلگرد و  $L_b$  طول مدفون میلگرد در بتن (طول پیوستگی) است.



شکل ۱: ساز و کار پیوستگی میلگردهای آج‌دار در بتن [۷]

اغلب مشخصات پیوستگی میلگردهای آج‌دار توسط روابط بین تنش پیوستگی و لغزش نسبی میلگرد توصیف می‌شود. لغزش به صورت تغییر مکان نسبی میلگرد نسبت به بتن تعریف می‌شود [۸].

مطالعات نشان می‌دهد که چندین عامل روی تنش پیوستگی کامپوزیت بتن و فولاد تاثیر می‌گذارد. این عوامل شامل مشخصات بتن (مقاومت فشاری، اندازه پوشش و ...) مشخصات میلگردهای تسلیح (مقاومت کششی، قطر، پوشش سطح، شکل آج و ...) است. علاوه بر آن عوامل دیگری مانند شرایط محیطی و خوردگی، نوع و سرعت بارگذاری و ... نیز می‌تواند تفاوت‌هایی در مشخصات پیوستگی ایجاد کند [۱۱-۸]. یوان و گریبل [۱۲] پنج طرح اختلاط تجاری بتن فوق‌توانمند را بررسی کردند و دریافتند که طول مدفون میلگردهای فولادی در بتن فوق‌توانمند می‌تواند به میزان زیادی کاهش یابد. با در نظر گرفتن مشخصات مکانیکی مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده در پنج روز اولیه به بیش از  $93(13/5 \text{ksi})$  مگاپاسکال در شرایط عمل‌آوری آزمایشگاهی می‌رسد. همچنین عنوان کردند که اگرچه میزان الیاف اثر عمده‌ای روی مقاومت فشاری نمی‌گذارد، اما روی پاسخ کششی تاثیر زیادی دارد؛ به طوری که ظرفیت کششی را از  $5/5(0/8 \text{ksi})$  مگاپاسکال به بیش از  $8/3(1/2 \text{ksi})$  مگاپاسکال می‌رساند. الکیسی و التویل [۹] به بررسی عوامل تاثیرگذار بر توسعه پیوستگی بین بتن فوق‌توانمند و میلگردهای تسلیح پرداخته‌اند. آن‌ها با انجام آزمایش بیرون کشیدگی به بررسی اثر پوشش اپوکسی، طول پیوستگی، قطر میلگرد، جهت بتن‌ریزی نسبت به میلگردها در درصد‌های مختلف الیاف فولادی در بتن پرداختند. هم‌چنین روابطی جداگانه بین تنش پیوستگی با هر یک از مقاومت فشاری بتن و طول پیوستگی پیشنهاد دادند. آن‌ها برای تخمین طول مدفون مورد نیاز در بتن فوق‌توانمند استفاده از بیشینه مقاومت پیوستگی فرضی معادل با  $1/1 \sqrt{f'_c}$  را پیشنهاد دادند. ژو و شیائو [۱۳] رفتار میلگردها با پوشش اپوکسی را در بتن فوق‌توانمند حاوی الیاف‌های فولادی بررسی کردند و گزارش دادند که رفتار پیوستگی - لغزش میلگردها با پوشش اپوکسی در بتن فوق‌توانمند مشابه رفتار این میلگردها در بتن معمولی است و برای شاخه صعودی و نزولی نمودارهای پیوستگی - لغزش مدل تحلیلی ارائه کردند. پیشرو و فنگ [۱۴] به بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر افزودن نانو سیلیس بر پیوستگی موضعی بتن فوق‌توانمند و میلگردهای فولادی پرداختند. آن‌ها رابطه‌ای برای تعیین تنش‌های پیوستگی در بتن‌های با مقاومت فشاری بیشتر از  $110$  مگاپاسکال پیشنهاد دادند. روی و همکاران [۱۵] آزمایش بیرون کشیدگی را برای تعیین تنش پیوستگی بین بتن فوق‌توانمند با مقاومت فشاری بین  $122/6$  تا  $176/1$  مگاپاسکال و میلگردهای فولادی با مقاومت حدود  $400$  مگاپاسکال استفاده کردند. به طور معمول اثر مشخصات بتن روی مقاومت پیوستگی توسط ریشه دوم مقاومت فشاری  $(\sqrt{f'_c})$  ارائه می‌شود که به مقاومت کششی بتن وابسته است. اصفهانی و رنگان [۱۶] در پژوهش خود روابطی را برای تخمین مقاومت پیوستگی

Yuan and Graybeal<sup>۱</sup>  
Alkaysi and El-Tawil<sup>۲</sup>  
Zhou and Qiao<sup>۳</sup>  
Roy et al.<sup>۴</sup>  
Esfahani and Rangan<sup>۵</sup>

حالت شکافت برای بتن معمولی و بتن مقاومت بالا پیشنهاد داده‌اند. یک بررسی آزمایشگاهی توسط مارچند و همکاران<sup>۱</sup> [۱۷] بر روی میلگردهای فولادی مدفون در بتن فوق‌توانمند با طرح اختلاط تجاری رایج در اروپا، حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن انجام شد که طی آن با اعمال سه روش بارگذاری مختلف رفتار پیوستگی مورد بررسی قرار گرفت و هیچ اثری از تاثیرگذاری روش های بارگذاری انتخاب شده مشاهده نگردید.

این پژوهش در نظر دارد طی یک برنامه آزمایشگاهی با مصالح تجاری موجود در ایران، نمونه‌هایی از بتن فوق‌توانمند و میلگردهای فولادی AIV، که علاوه بر مقاومت بالا، شکل آج آن‌ها نیز متفاوت با میلگردهای AIII است، ساخته و به بررسی رفتار پیوستگی این مصالح در کنار هم و مقایسه آن با بتن معمولی بپردازد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

ساخت نمونه‌ها، نگهداری و انجام آزمایش بر روی آن‌ها در آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد برنامه ریزی و اجرا شده است. مشخصات و میزان مصالح، دستگاه‌های مورد استفاده و جزئیات SETUP انجام آزمایش در این بخش توضیح داده می‌شود.

### ۲-۱- مصالح

- بتن: دو نمونه بتن معمولی و بتن فوق‌توانمند در این پژوهش استفاده شده است. بتن معمولی با طرح اختلاط مطابق جدول ۱ و برای تولید بتن فوق‌توانمند از طرح اختلاط مورد استفاده در پژوهش رهدار و قلعه‌نوی [۱۸] مطابق جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۲: طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند [۱۸]		جدول ۱: طرح اختلاط بتن معمولی مورد استفاده در این پژوهش	
مصالح	kg/m <sup>3</sup>	مصالح	kg/m <sup>3</sup>
سیمان پرتلند نوع II	۶۷۰	سیمان پرتلند نوع II	۴۸۵
میکرو سیلیس	۲۰۰	آب	۲۲۸
پودر کوارتز	۲۸۵	شن نخودی	۷۳۶
ماسه سیلیسی	۱۰۲۰	ماسه	۸۶۷
فوق روان کننده	۲۰/۱		
آب	۱۷۸		

در این پژوهش از فوق‌روان کننده نرمال بر پایه‌ی کربوکسیلات با نام تجاری Sure Plast 402 استفاده شده است. سیمان از تولیدات کارخانه سیمان شرق مشهد و پودر کواتز از محصولات لعاب شیشه مشهد تهیه شده است. همچنین از آب شرب مشهد برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. بزرگترین سنگ‌دانه ماسه سیلیسی ۱/۴ میلی‌متر و بزرگترین اندازه سنگ‌دانه بتن معمولی ۱۲ میلی‌متر و اسلامپ آن ۸ سانتی‌متر بوده است. هر دو بتن با یک مخلوط‌کن آماده شده و در قالب‌های چوبی بتن‌ریزی و پس از خروج از قالب تا رسیدن به سن ۲۸ روز در وان آب عمل‌آوری شده‌است. لازم به ذکر است از هر مخلوط‌کن سه نمونه مکعبی برای تست مقاومت فشاری ساخته شده و در شرایط نمونه‌های اصلی عمل‌آوری گردیده است. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳: مقاومت فشاری بتن‌های مورد استفاده در این پژوهش

نوع بتن	مقاومت فشاری (MPa)
NSC	۴۷/۸۷

Marchand et al.<sup>۱</sup>

Polypropylene<sup>۲</sup>

• **میلگرد:** میلگردهای مورد استفاده در این پژوهش از میلگردهای AIV تولید مجتمع کویر کاشان تهیه شده است که همانگونه که اشاره شد علاوه بر مقاومت بالا، شکل آج آنها نیز متفاوت با میلگردهای AIII است. سه قطر ۱۲، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر انتخاب شده است. مشخصات مکانیکی میلگردها در جدول ۴ و هندسه آجها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی میلگردها

نوع میلگرد	میانگین تنش تسلیم (MPa)	میانگین مقاومت نهایی (MPa)
AIV	۶۰۰/۳	۷۴۳/۳

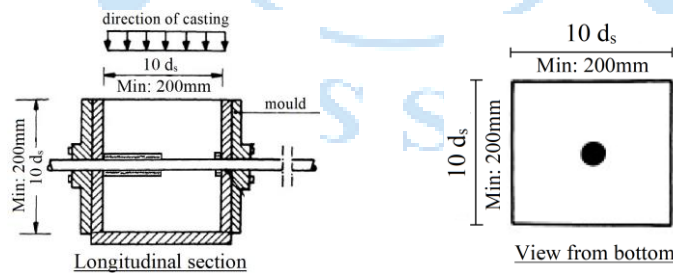


شکل ۲: هندسه آج‌های میلگردهای مورد استفاده در پژوهش

## ۲-۲- آماده سازی، تعداد و نام‌گذاری نمونه‌ها

. مطابق استاندارد RILEM<sup>۱</sup> RC6 [۱۹] نمونه‌های مورد نیاز به صورت مکعب‌های بتنی است که یک میلگرد در محور آن تعبیه

شده است (شکل ۳)

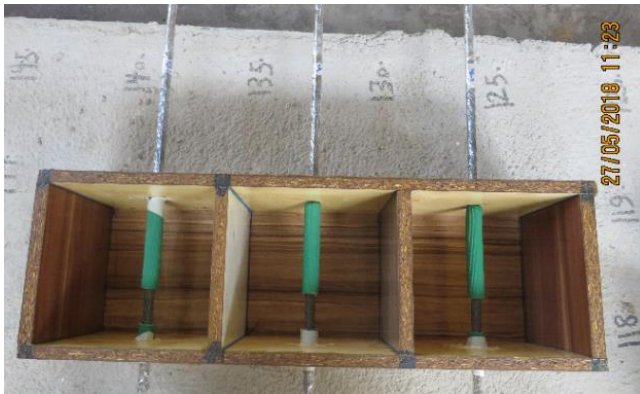


شکل ۳: ابعاد و هندسه نمونه و جهت بتن ریزی [۱۹]

ابعاد نمونه وابسته به قطر میلگرد است. بر این اساس برای نمونه‌های مسلح شده با میلگرد ۱۲ و ۱۶ مکعب‌هایی به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ سانتی‌متر و برای نمونه‌های مسلح شده با میلگرد ۲۵ مکعب‌هایی به ابعاد ۲۵×۲۵×۲۵ سانتی‌متر ساخته شد. در این پژوهش تنش پیوستگی در طول پیوستگی یکنواخت فرض می‌شود لذا طول پیوستگی باید به اندازه کافی کوتاه انتخاب شود. در استاندارد مذکور طول پیوستگی معادل ۵ برابر قطر میلگرد برای بتن معمولی پیشنهاد شده است، لیکن با ثابت در نظر گرفتن دیگر عوامل تاثیرگذار، به دلیل بالا بودن مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند و متعاقباً بالا بودن مقاومت پیوستگی آن نسبت به بتن معمولی، در طول پیوستگی ۵ برابر قطر میلگرد احتمال

International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)<sup>۱</sup>

گسیخته شدن میلگرد قبل از وقوع لغزش وجود دارد. یافتن طول پیوستگی بهینه میلگرد در بتن در شرایط مختلف، هدف بسیاری از پژوهش‌ها بوده است [۱۳، ۲۰]. در این پژوهش طول پیوستگی موثر میلگرد ۲ و ۴ برابر قطر میلگرد در نظر گرفته شده است. طول پیوستگی در انتهای نمونه با بیشترین فاصله از سر بارگذاری قرار می‌گیرد. برای این منظور دو انتهای میلگرد خارج از طول پیوستگی با لوله‌های PVC پوشانده می‌شوند؛ به گونه‌ای که در تماس با بتن نباشد و به راحتی از درون لوله‌ها بلغزند. بتن‌ریزی در قالب‌ها، طی سه مرحله صورت گرفته و در هر مرحله جهت تراکم مناسب و خارج شدن هوای موجود در بتن از میله زدن هر لایه و ضربات چکش پلاستیکی به قالب استفاده شده است. تا زمان خروج نمونه‌ها از قالب با یک گونی خیس و پوشش پلاستیکی از خشک شدن نمونه‌ها ممانعت به عمل آمده و تا سن ۲۸ روز در وان آب عمل‌آوری شده است (شکل ۴).



شکل ۴: مراحل آماده سازی نمونه‌ها

نام‌گذاری نمونه‌ها به گونه‌ای انجام شده است که اطلاعات مربوط به هندسه و مصالح تشکیل‌دهنده نمونه از نام آن قابل تشخیص باشد. اجزای الگوی کلی نام‌گذاری نمونه‌ها به ترتیب از چپ به راست عبارت است از: نوع بتن (U: بتن فوق‌توانمند، C: بتن معمولی) - قطر میلگرد - طول پیوستگی به صورت ضربی از قطر میلگرد - شماره نمونه مشابه. به عنوان مثال عبارت U-12-2d-II معرف نام‌گذاری دومین نمونه بتن فوق‌توانمند مسلح شده با میلگرد AIV به قطر ۱۲ میلیمتر و طول پیوستگی ۲ برابر قطر میلگرد می‌باشد. مشخصات کامل نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. هر یک از گروه‌های جدول ۵ شامل دو نمونه مشابه است. به عبارت دیگر در این پژوهش تعداد ۲۴ نمونه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است.

جدول ۵: مشخصات کامل نمونه‌ها

نام گروه	نوع بتن	نوع میلگرد	قطر میلگرد $d_b$ (mm)	طول پیوستگی $L_b$ (mm)	ضخامت پوشش بتن $c$ (mm)	$L_b/d_b$	$C/d_b$
U۴-۱۲-۲d	UHPC	AIV	۱۲	۲۴	۹۴	۲	۷/۸۳

U4-12-4d	UHPC	AIV	۱۲	۴۸	۹۴	۴	۷/۸۳
U4-16-2d	UHPC	AIV	۱۶	۳۲	۹۲	۲	۵/۷۵
U4-16-4d	UHPC	AIV	۱۶	۶۴	۹۲	۴	۵/۷۵
U4-25-2d	UHPC	AIV	۲۵	۵۰	۱۱۲/۵	۲	۴/۵۰
U4-25-4d	UHPC	AIV	۲۵	۱۰۰	۱۱۲/۵	۴	۴/۵۰
C4-12-2d	NSC	AIV	۱۲	۲۴	۹۴	۲	۷/۸۳
C4-12-4d	NSC	AIV	۱۲	۴۸	۹۴	۴	۷/۸۳
C4-16-2d	NSC	AIV	۱۶	۳۲	۹۲	۲	۵/۷۵
C4-16-4d	NSC	AIV	۱۶	۶۴	۹۲	۴	۵/۷۵
C4-25-2d	NSC	AIV	۲۵	۵۰	۱۱۲/۵	۲	۴/۵۰
C4-25-4d	NSC	AIV	۲۵	۱۰۰	۱۱۲/۵	۴	۴/۵۰

### ۳-۲- روش آزمایش

چندین روش به طور معمول برای تعیین مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن استفاده می‌شود [۱۹، ۲۳-۲۱]. یک روش تست بیرون-کشیدگی است. مزیت این روش سادگی تجهیزات مورد نیاز و ساده بودن نمونه‌های آن است با این حال یک نگرانی محصوریت اضافی فراهم شده بوسیله فشار وارد شده به نمونه اطراف ناحیه مهاری است. علاوه بر این میلگردهای تسلیح در کشش و بتن در فشار است که با رفتار واقعی تیر تفاوت دارد. لیکن RILEM [۱۹] هندسه نمونه را به گونه‌ای پیشنهاد داده است تا با ایجاد فاصله مناسب بین ناحیه مهاری و محل تکیه‌گاه فشاری بتن این اثر را به حداقل برساند. محققان بسیاری آزمایش بیرون کشیدگی را با صرف نظر از اثر این مورد بر روی نمونه‌هایی با ابعاد انتخابی انجام داده‌اند و یا روش دیگری را برای کاهش این اثر در آزمایشات خود به کار گرفته‌اند [۷، ۹].

مطابق RILEM-RC6، میلگرد تعبیه شده در وسط نمونه باید تحت کشش قرار گیرد. بنابراین SETUP آزمایش مطابق شکل ۵ طراحی و ساخته شده و از پایین به کف صلب آزمایشگاه متصل شده است. در سر بارگذاری میلگردها قبل از بتن ریزی توسط عملیات رولینگ رزوه ایجاد شده و درون یک غلاف فلزی پیچیده شده است. نهایتاً غلاف فلزی که جداره‌اش نیز دارای رزوه است درون نیرو سنج محکم شده است. ظرفیت نیروسنج ۳۰۰ کیلونیوتن و دقت آن ۰/۰۱ کیلونیوتن است. میزان جابجایی میلگرد و بتن توسط دو عدد سنسور اندازه گیری خطی با دقت مناسب که در بالا و پایین نمونه بر روی میلگرد قرار داده شده‌اند، ثبت می‌گردد و میانگین آن‌ها در نتایج استفاده می‌شود. میزان نیروی کششی و تغییر مکان‌ها در هر لحظه ثبت شده و مجموعه داده‌ها توسط کارت داده نصب شده به صورت خودکار بر روی یک دستگاه رایانه ذخیره شده است.

آزمون تعیین مقاومت فشاری نیز با استفاده از جک بتن‌شکن با ظرفیت ۳۰۰ تن انجام شده است.

<sup>۱</sup>Pull out

<sup>۲</sup>Load cell

<sup>۳</sup>Linear Variable Differential Transformer (LVDT)





ب) آزمایش مقاومت فشاری



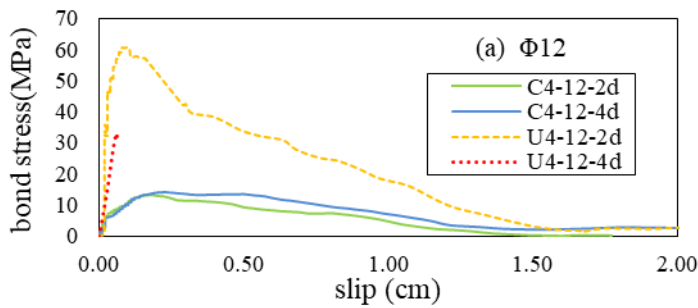
الف) آزمایش بیرون کشیدگی

شکل ۵: انجام آزمایش‌ها

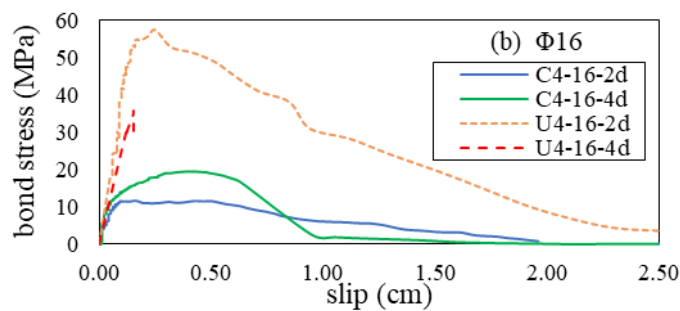
### ۳- نتایج آزمایش‌ها

#### ۳-۱- نمودارهای پیوستگی - لغزش

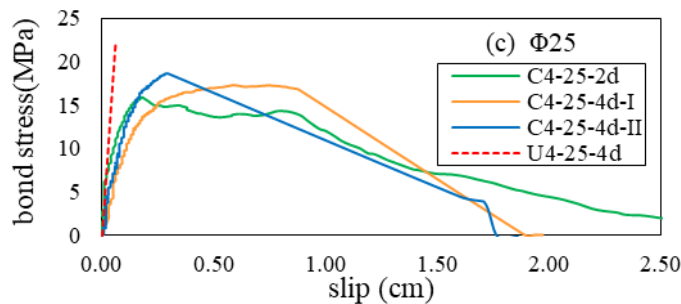
شکل ۶ منحنی‌های پیوستگی - لغزش میانگین هر گروه را نشان می‌دهد.



الف) قطر ۱۲



ب) قطر ۱۶



ج) قطر ۲۵

شکل ۶: منحنی‌های تنش پیوستگی - لغزش میلگردهای AIV در بتن فوق توانمند و معمولی برای الف) قطر ۱۲ ب) قطر ۱۶ ج) قطر ۲۵

در شروع بارگذاری در تمام منحنی‌ها یک شاخه با شیب بسیار زیاد مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده نفوذ آج‌ها به داخل ماتریکس و انتقال بار اعمالی از میلگرد به بتن از طریق ساز و کار چسبندگی شیمیایی و اصطکاک استاتیکی است. در این مرحله تقریباً لغزش قابل توجهی در میلگرد اتفاق نمی‌افتد. با افزایش بارگذاری چسبندگی شیمیایی از بین می‌رود و لغزش میلگرد آغاز می‌شود و اصطکاک از مرحله استاتیکی به دینامیکی وارد می‌شود و شاخه صعودی با رفتار خطی ادامه می‌یابد. در نمونه‌های بتن فوق توانمند با صرف نظر از منحنی‌های مربوط به تسلیم یا گسیختگی میلگرد، این رفتار تا حدود ۹۰ درصد تنش پیوستگی پیک ادامه دارد. انتهای این مرحله در بتن فوق توانمند بیش از ۵ برابر بالاتر از بتن معمولی قرار دارد. در این مرحله قفل و بست بین آج‌های میلگرد و بتن اطراف آن وارد کار می‌شود و نقش اصلی را دارد. با پیشرفت بارگذاری ترک‌های ریز در نوک آج‌ها و اطراف کلیدهای بتنی بین آج‌ها شروع به تشکیل می‌کنند اما تا زمانیکه تنش ایجاد شده در بتن از مقاومت کششی بتن تجاوز نکند، قفل و بست مکانیکی همچنان نقش ایفا می‌کند و باعث حفظ سختی می‌شود. بنابراین به تدریج بار تا رسیدن به مقدار حداکثر افزایش می‌یابد. در بعضی از نمونه‌ها در در بخش انتهایی این مرحله یک سطح افقی مشاهده می‌شود که به دلیل پیشرفت خردشدگی و پارگی بتن در بین آج‌هاست، در حالیکه هنوز بخشی از ظرفیت پیوستگی خود را دست‌نخورده حفظ کرده است. در تمام نمونه‌های این پژوهش تا این مرحله هیچ اثری از ترک در بیرون نمونه مشاهده نمی‌شود. با مقایسه لغزش متناظر باتنش پیوستگی حداکثر، بین دو نوع بتن مشاهده گردید که لغزش در منحنی‌های مربوط به بتن معمولی مقادیر بیشتری دارند. در این مرحله طول پیوستگی بیشتر، به معنای تعداد آج‌های درگیر بیشتر و رسیدن به بار پیک بیشتر است. همچنین لغزش متناظر با بار پیک نیز در نمونه‌های با طول پیوستگی بیشتر مقادیر بزرگتری دارد. با ادامه بارگذاری پس از تجاوز تنش ایجاد شده از مقاومت کششی بتن ترک‌ها رشد می‌کنند و در بعضی موارد تا سطح ادامه می‌یابند و قابل مشاهده می‌شوند. کلیدهای بتنی بین آج‌ها کاملاً برش می‌خورند و قفل و بست مکانیکی حذف می‌شود. در تمام نمونه‌ها بار به شدت افت می‌کند و لغزش به میزان زیاد افزایش می‌یابد. لذا در تمام منحنی‌ها نرم‌شوندگی مشاهده می‌گردد. شاخه نزولی در منحنی‌های مربوط به نمونه‌های بتن معمولی با شیب ملایم تری افت می‌کنند که بیانگر شکل‌پذیری بیشتر رفتار بتن معمولی در مقایسه با بتن فوق توانمند مورد استفاده در این پژوهش است. در مرحله نهایی، ماتریکس بتن بین آج‌ها پاره شده و معمولاً فاصله بین آج‌های میلگرد از ماتریکس پر می‌شود. در نمونه‌هایی که در حین آزمایش، بتن دچار ترک خوردگی و شکافت شده، میزان تنش به صفر می‌رسد؛ درحالی‌که در نمونه‌هایی که بدون مشاهده هیچ گونه ترکی در سطح بیرونی نمونه، تنها میلگرد از داخل بتن بیرون کشیده شده است، به دلیل اصطکاک این میلگرد با بتن اطراف آن مقداری تنش پس‌ماند وجود خواهد داشت. لغزش تا زمانی که میلگرد به صورت کامل از بتن خارج شود افزایش می‌یابد. با مقایسه تنش پس‌ماند در نمونه‌های با طول پیوستگی مختلف مشاهده گردید که با افزایش طول پیوستگی، تنش پس‌ماند بزرگتر است که دلیل آن افزایش مسیر انتقال تنش به واسطه افزایش طول پیوستگی است. در نمونه‌هایی که در آن‌ها حالت شکست بتن و یا حالت ترکیبی بیرون‌کشیدگی با ایجاد ترک در بتن رخ داده است تنش پس‌ماند با شکافت بتن به صفر رسیده است. در جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج آزمایشات ارائه شده است

جدول ۶: خلاصه نتایج نمونه‌ها

نام گروه	C/d	$L_b$ (mm)	حالت شکست	بار حداکثر $P_{max}$ (N)	تنش پیوستگی	$f'_c$ (MPa)	$\tau_{max} / \sqrt{f'_c}$
					حداکثر $\tau_{max}$ (MPa)		
U4-12-2d	7/83	24	بیرون کشیدگی	54869/95	60/64	102/62	5/98
U4-12-4d	7/83	48	گسیختگی میلگرد	64782/31	35/80	102/62	3/53
U4-16-2d	5/75	32	بیرون کشیدگی	92450/23	57/48	102/62	5/67
U4-16-4d	5/75	64	گسیختگی میلگرد	115516/21	35/91	102/62	3/54
U4-25-4d	4/50	100	گسیختگی میلگرد	270353/53	34/42	102/62	3/40
C4-12-2d	7/83	24	بیرون کشیدگی	11915/46	13/17	47/87	1/90
C4-12-4d	7/83	48	بیرون کشیدگی	25517/72	14/10	47/87	2/04
C4-16-2d	5/75	32	بیرون کشیدگی	18426/97	11/46	47/87	1/66
C4-16-4d	5/75	64	ترکیبی	62578/23	19/45	47/87	2/81
C4-25-2d	4/50	50	بیرون کشیدگی	62578/23	15/94	47/87	2/30
C4-25-4d-I	4/50	100	ترکیبی	132520/54	16/87	47/87	2/44
C4-25-4d-II	4/50	100	شکافت بتن	146614/08	18/67	47/87	2/70

## ۳-۲- حالت‌های شکست

در ستون چهارم جدول ۶ به حالت‌های شکست نمونه‌ها اشاره شده است. چهار حالت شکست؛ بیرون کشیدگی، تسلیم یا گسیختگی میلگرد، شکافت بتن و بیرون کشیده شدن میلگرد همراه گسترش ترک به سطح (حالت ترکیبی بیرون کشیدگی همراه با شکافت بتن) در بین نمونه‌ها مشاهده گردید (شکل ۷). البته گسیختگی میلگرد در طول پیوستگی اتفاق نیفتاده و تمام موارد گسیختگی میلگرد، در خارج از بتن و محل رزوه‌ها رخ داده است.



ب) حالت گسیختگی بیرون کشیده شدن میلگرد



الف) حالت گسیختگی میلگرد



د) حالت گسیختگی شکافت بتن



ج) حالت گسیختگی بیرون کشیده شدن میلگرد همراه با گسترش ترک به سطح (حالت ترکیبی)



شکل ۷: حالت‌های شکست

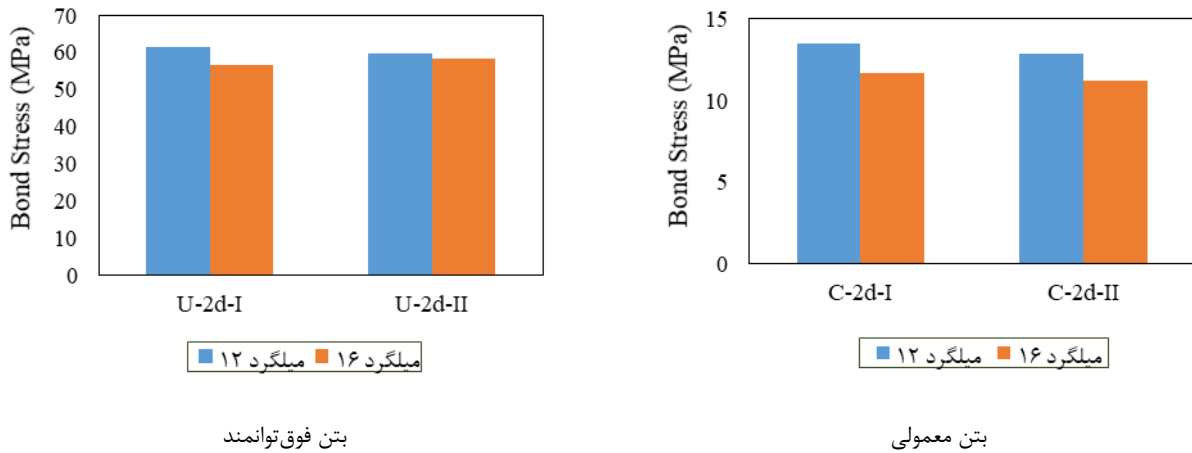
وقتی که تنش وارده به کلیدهای بتنی بین آج‌های میلگرد از ظرفیت برشی بتن تجاوز کند حالت بیرون کشیدگی اتفاق می‌افتد. در این حالت مشاهده گردید که کلیدهای بتنی بین آج‌های میلگرد به صورت برشی همراه میلگرد کنده شده و میلگرد بدون مشاهده هیچ گونه آسیب و ترک خوردگی در سطح نمونه از بتن بیرون کشیده می‌شود. علت ایجاد این حالت شکست، کم بودن طول پیوستگی برای انتقال کل تنش وارده به نمونه از میلگرد به بتن است که باعث برش خوردن کلیدهای بتن و سر خوردن میلگرد از داخل بتن می‌شود. از طرفی زیاد بودن پوشش بتن با ایجاد محصوریت اضافی، باعث می‌شود هیچ گونه عوارض نشان دهنده تخریب به سطح نرسد و سطح نمونه سالم بماند در صورتیکه پوشش نمونه کم و یا متوسط باشد حالت‌های دیگری از شکست امکان وقوع دارد. در پوشش‌های کم، حالت شکست به صورت ترک خوردگی شعاعی و شکافت نمونه به دو یا چند بخش (حالت شکافت) ناشی از تجاوز تنش‌های کششی حلقوی از حد ظرفیت کششی بتن خواهد بود. در این پژوهش تنها در نمونه C4-25-4d-II این حالت شکست اتفاق افتاده است؛ که نشان دهنده این است که پوشش بتنی در اکثر نمونه‌ها به اندازه کافی تامین شده است. در حالیکه در پوشش‌های متوسط، شکست به صورت رخداد همزمان بیرون کشیدگی میلگرد از بتن به صورت برشی به همراه ترک‌های شعاعی رخ خواهد داد (حالت ترکیبی بیرون کشیدگی به همراه گسترش ترک). این حالت در نمونه‌های گروه C4-16-4d-I و نمونه C4-25-4d-I مشاهده گردید. البته از تاثیر مقاومت بتن در احتمال رخ دادن هر یک از حالت‌های شکست نباید غافل بود. به عنوان نمونه شکل ۷-ج نشان می‌دهد که در نمونه بتن معمولی با طول پیوستگی چهار برابر قطر میلگرد و پوشش بتنی ۹۲ میلیمتر حالت گسیختگی ترکیبی بیرون کشیدگی به همراه گسترش ترک به سطح (حالت ترکیبی) اتفاق افتاده است، در حالی که نمونه مشابه از بتن فوق توانمند که در شکل ۷-الف نشان داده شده دچار گسیختگی میلگرد شده است. لذا علاوه بر انتخاب C/d مناسب، برای احتمال رخ دادن هر یک از حالت‌های گسیختگی باید به نوع بتن و مقاومت آن نیز توجه شود.

حالت شکست گسیختگی میلگرد زمانی رخ می‌دهد که پیش از آنکه ناحیه پیوستگی به حد ظرفیت نهایی برسد، میلگرد به حد جاری شدن برسد. با توجه به اعداد جدول ۶، بالا بودن مقاومت پیوستگی در نمونه‌های بتن فوق توانمند نسبت به نمونه‌های بتن معمولی سبب گردیده است که نمونه‌های بتن فوق توانمند با طول پیوستگی بیش از ۲ برابر قطر میلگرد دچار گسیختگی میلگرد شوند. در حالی که در نمونه‌های بتن معمولی با طول پیوستگی بزرگتر هم این حالت شکست رخ نداده است.

### ۳-۳- بررسی عوامل تاثیرگذار بر رفتار تنش پیوستگی - لغزش

#### ۳-۳-۱- اثر قطر میلگرد

حداکثر تنش پیوستگی برای نمونه‌های با هندسه یکسان و قطر میلگرد متفاوت برای هر دو نوع بتن در شکل ۸ مقایسه شده‌اند.



شکل ۸: اثر قطر میلگرد بر تنش پیوستگی حداکثر نمونه‌ها با طول پیوستگی دو برابر قطر میلگرد

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که اگر چه نمونه‌های با قطر میلگرد بالاتر نیروی بیشتری را تحمل می‌کند. اما از آنجایی که طول پیوستگی (که به صورت ضربی از قطر میلگرد تعریف شده است) نیز افزایش می‌یابد، تغییر چشمگیری در تنش پیوستگی مشاهده نمی‌گردد. برای نمونه‌های با  $L/d$  برابر ۲، میانگین تنش پیوستگی در نمونه‌های بتن فوق توانمند به ترتیب ۶۰/۶۴ مگاپاسکال برای قطر ۱۲ و ۵۷/۴۸ مگاپاسکال برای قطر ۱۶ می‌باشد. این مقادیر در نمونه‌های بتن معمولی به ترتیب برابر ۱۳/۱۶ مگاپاسکال برای قطر ۱۲ و ۱۱/۶۷ مگاپاسکال برای قطر ۱۶ است. بنابراین اثر قطر میلگرد بر تنش پیوستگی در نمونه‌های مشابه نسبتاً کم است به طوری که با افزایش قطر میلگرد تنش پیوستگی به میزان کمی کاهش می‌یابد. میزان کاهش در بتن معمولی اندکی بیشتر محسوس است. کاهش اندک تنش پیوستگی با افزایش قطر میلگرد در نتایج یو و شین<sup>۱</sup> [۲۴] برای بتن مقاومت بالا (۸۰-۱۸۰ مگاپاسکال) گزارش شده است. رآو و همکاران<sup>۲</sup> [۲۵] برای بتن معمولی با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و بتن مقاومت بالا با مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال و دی‌لارارد و همکاران<sup>۳</sup> [۲۶] برای بتن توانمند و بتن معمولی با مقاومت فشاری به ترتیب ۹۵ و ۳۱/۴۲ مگاپاسکال نیز به همین نتیجه رسیده‌اند.

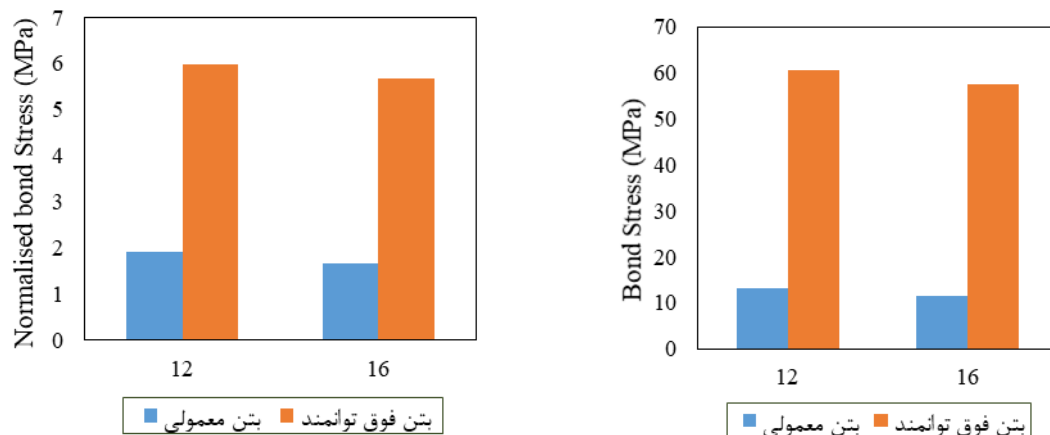
### ۲-۳-۳- اثر نوع بتن

برای بررسی اثر نوع بتن بر رفتار پیوستگی میلگردهای AIV، نمودار پیوستگی-لغزش نمونه‌های مشابه با حالت گسیختگی بیرون-کشیدگی انتخاب شده و در شکل ۹ ترسیم شده است.

Yoo and Shin<sup>۱</sup>

Rao et al.<sup>۲</sup>

De Larrard et al.<sup>۳</sup>



ب) اثر نوع بتن بر حداکثر تنش پیوستگی نرمالیز شده

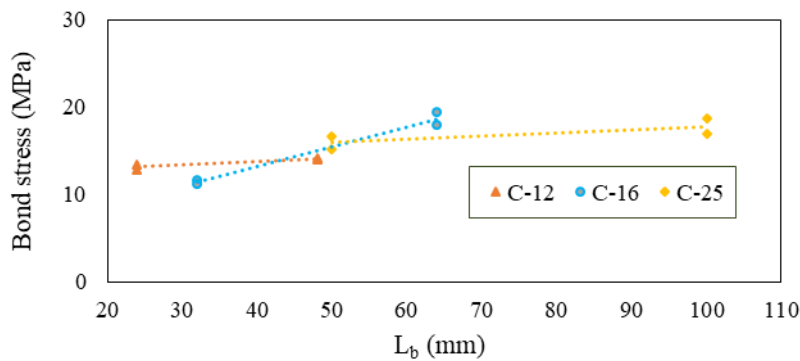
الف) اثر نوع بتن بر حداکثر تنش پیوستگی

شکل ۹: مقایسه اثر نوع بتن در نمونه های با طول پیوستگی دو برابر قطر میلگرد

از آنجایی که گسیختگی پیوستگی زمانی اتفاق می افتد که بتن در جلوی آج های میلگرد خرد شود؛ لذا مقاومت بتن نقش مهمی در میزان مقاومت پیوستگی دارد. در بررسی اثر مقاومت بتن بر رفتار پیوستگی دو مسئله را باید در نظر داشت؛ اول اینکه از آنجاییکه بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی، مقاومت کششی و ظرفیت برشی بیشتری دارد لذا تنش پیوستگی نیز متعاقب آن افزایش می یابد. ثانیاً باید توجه داشت که افزایش مقاومت باعث می شود تا توزیع تنش در طول پیوستگی به سمت غیر یکنواختی بیشتری پیش رود به طوری که اغلب نیروی بیرون کشیدگی اعمالی به نمونه توسط آج های اولیه نزدیک به سر بارگذاری تحمل می شود و باعث کاهش نیروی پیوستگی نهایی میانگین با فرض یکنواخت بودن تنش خواهد شد. به همین دلیل نمونه های انتخاب شده در این مقایسه با طول پیوستگی کوچک (۲d) انتخاب شده تا اثر غیر یکنواختی تنش در طول پیوستگی حذف شود و از طرفی در جدول ۶ برای قضاوت بهتر میانگین تنش پیوستگی نسبت به  $\sqrt{f'_c}$  نرمالیزه شده است. مشاهده گردید که مقاومت پیوستگی نرمال شده در بتن فوق توانمند تا سه برابر تنش در بتن معمولی افزایش داشته است. بنابراین مقاومت پیوستگی با افزایش مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد. البته افزایش حداکثر مقاومت پیوستگی و مقاومت پیوستگی نرمالیزه شده برای دیگر نمونه های مشابه حتی برای نمونه های که دچار گسیختگی میلگرد شده اند نیز در بتن فوق توانمند بیشتر از بتن معمولی می باشد. به هر حال میزان افزایش در مقاومت پیوستگی به همان میزان افزایش در مقاومت فشاری نیست. با توجه به داده های جدول در حالیکه میانگین مقاومت فشاری نمونه های بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی ۲/۱۴ برابر شده است. میانگین تنش پیوستگی در نمونه های با طول پیوستگی دو برابر قطر میلگرد برای قطر ۱۲ معادل ۴/۶ برابر و برای قطر ۱۶ معادل ۵/۰۲ برابر شده است.

### ۳-۳-۳- اثر طول پیوستگی

برای هر سه قطر میلگرد در نمونه های بتن فوق توانمند در طول پیوستگی ۴ برابر قطر، گسیختگی میلگرد رخ داده است. اما در طول پیوستگی معادل دو برابر قطر میلگرد در هر سه قطر حالت شکست بیرون کشیدگی میلگرد اتفاق افتاده است. در حالیکه در هیچ یک از نمونه های بتن معمولی گسیختگی میلگرد مشاهده نشده و به جز گروه C4-16-4d و نمونه C4-25-4d-II در بقیه نمونه ها گسیختگی بیرون کشیدگی میلگرد (گسیختگی پیوستگی) اتفاق افتاده است. تغییر مقاومت پیوستگی با افزایش طول پیوستگی در بتن معمولی برای قطرهای مختلف در شکل ۱۰ ترسیم شده است.



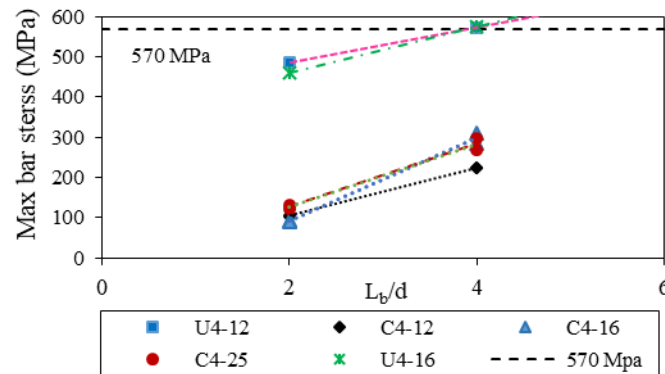
شکل ۱۰: تغییر مقاومت پیوستگی با افزایش طول پیوستگی در بتن معمولی برای قطرهای مختلف

حالت گسیختگی نام نمونه‌ها به جز C4-16-4d از نوع بیرون کشیدگی است. مطابق داده‌های جدول ۶ با صرف نظر از نمونه‌های دارای حالت گسیختگی ترکیبی، شکست میلگرد و شکافت، در نمونه‌های با حالت گسیختگی بیرون کشیدگی با افزایش طول پیوستگی مقدار تنش پیوستگی حداکثر افزایش یافته است. افزایش در مقادیر مقاومت پیوستگی نرمالیزه شده نیز مشاهده گردید. اما حسین [۲۷] و پور و علم [۲۸] در تحقیقات خود به ترتیب بر روی بتن سبک و بتن با سنگدانه‌های بازیافتی عکس این مطلب را گزارش کرده‌اند. در توضیح این مطلب می‌توان گفت که به دلیل اینکه در واقع توزیع تنش در طول میلگرد از سر بارگذاری تا سر آزاد به شدت تقلیل می‌یابد، انتظار می‌رود افزایش طول پیوستگی باعث کاهش میانگین تنش پیوستگی (که با فرض یکنواخت بودن توزیع تنش در طول پیوستگی) محاسبه شده، گردد. لیکن از آنجایی که مقاومت پیوستگی قویاً متأثر از قفل و بست مکانیکی آج‌های میلگرد و بتن اطراف آن است لذا طول پیوستگی بیشتر به معنای تعداد آج‌های درگیر بیشتر است و مقاومت بیرون کشیدگی بیشتری را ایجاد می‌کند. برای بتن معمولی در این پژوهش، محدوده طول پیوستگی‌های انتخابی در بازه‌ای است که با افزایش طول پیوستگی تاثیر قفل و بست مکانیکی آج‌ها بیشتر از تاثیر غیر یکنواخت بودن تنش است. لذا با افزایش طول پیوستگی تنش پیوستگی زیاد می‌شود. هم چنین این نتیجه نشان می‌دهد که فرض توزیع یکنواخت تنش در طول پیوستگی برای نمونه‌های بتن معمولی نزدیک به واقع است.

#### • تعیین طول مدفون بحرانی

برای اینکه حالت شکست گسیختگی میلگرد رخ ندهد، طول بحرانی دفن میلگرد در بتن باید تعیین گردد؛ براین اساس طول بحرانی به این صورت تعریف می‌شود: طول کافی برای دفن میلگرد در بتن به اندازه‌ای که قبل از اینکه میلگرد تحت کشش به مقاومت تسلیم برسد، از داخل بتن بلغزد [۱۳].

بدیهی است طول پیوستگی برای پیشگیری از رخداد حالت شکست گسیختگی میلگرد به تنش تسلیم میلگرد وابسته است و باید به نحوی اثر آن را در تعیین طول پیوستگی بحرانی لحاظ کرد. براساس نتایج تست کششی میلگردهای مورد استفاده در این پروژه، میانگین تنش تسلیم میلگردهای AIV برابر  $60.0/3$  مگاپاسکال است. اما در جهت اطمینان برابر  $57.0$  مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. ژو و شیائو [۱۳] و رونانکی و همکاران [۲۰] در پژوهش خود طول مدفون بحرانی را از تداخل امتداد بهترین خط گذرنده از نتایج آزمایش با تنش تسلیم مجاز تعیین کردند. در این پژوهش نیز این روش به کار گرفته می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: تعیین طول پیوستگی بحرانی

بر این اساس طول پیوستگی بحرانی برای نمونه‌ها استخراج و در جدول ۷ خلاصه شده است

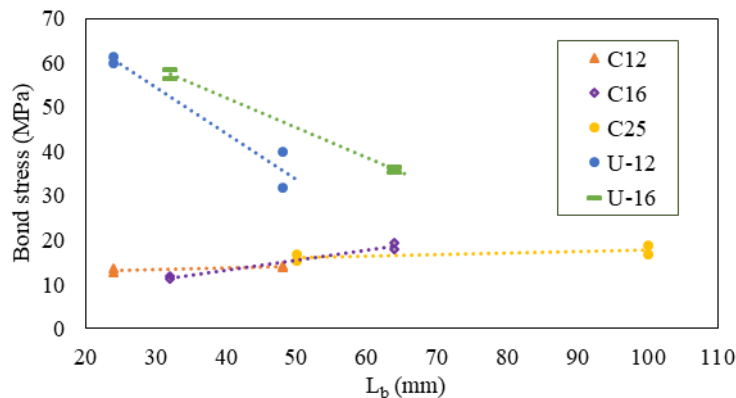
جدول ۷: تعیین طول مدفون بحرانی

گروه نمونه ها	C/d	طول مدفون بحرانی (L <sub>d</sub> /d <sub>b</sub> )
U-۱۲	۷/۸۳	۳/۹۴
U-۱۶	۵/۷۵	۳/۹۲
C-۱۲	۷/۸۳	۹/۷۹
C-۱۶	۵/۷۵	۶/۶۲
C-۲۵	۴/۵	۷/۶۴

مشاهده گردید با افزایش طول پیوستگی تنش بحرانی میلگرد در هر دو بتن (فوق توانمند و معمولی) تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد لیکن نرخ افزایش در بتن معمولی کمی بیشتر است. بتن فوق توانمند با بهبود رفتار پیوستگی میلگردهای فولادی در مقایسه با بتن معمولی امکان کاهش عمده در طول مدفون میلگرد را فراهم کرده است. به طوریکه طول پیوستگی بحرانی در نمونه های بتن فوق توانمند با میلگرد ۱۲ در مقایسه با طول پیوستگی نمونه مشابه از بتن معمولی حدود ۴۰ درصد کاهش ایجاد کرده است. در بتن فوق توانمند حداقل طول پیوستگی (ضریبی از قطر) در نسبت C/d برابر ۵/۷۵ برابر ۳/۹۲ و در نسبت C/d برابر ۷/۸۳ برابر ۳/۹۴ است. در حالیکه در بتن معمولی طول پیوستگی بحرانی در نسبت C/d برابر ۵/۷۵ برابر ۶/۶۲ و در نسبت C/d برابر ۷/۸۳ این مقدار برابر ۹/۷۹ است.

به دلیل اینکه در طول پیوستگی های بیش از ۲ برابر قطر میلگرد نمونه های بتن فوق توانمند دچار گسیختگی میلگرد شده بودند در مورد تاثیر طول پیوستگی بر تغییر مقاومت پیوستگی در این بتن ها اظهار نظری نشد. لیکن اکنون با توجه به طول پیوستگی بحرانی برای پیشگیری از حالت گسیختگی میلگرد که در جدول فوق ارائه گردید، مشاهده می گردد که برای گروه های U-۱۶ و U-۱۲ طول پیوستگی بحرانی نزدیک به چهار برابر قطر میلگرد قرار دارد، لذا احتمال اینکه تنش پیوستگی گزارش شده برای نمونه های بتن فوق توانمند با طول پیوستگی ۴d، نزدیک به تنش پیوستگی آن در صورت وقوع حالت گسیختگی پیوستگی باشد، بسیار زیاد است. مشاهدات میدانی نمونه های آزمایش نیز این فرضیه را تایید می کند. به طوری که در تعدادی از نمونه ها پس از گسیختگی میلگرد از محل رزوه شده با کمی اعمال کشش بیشتر به میلگرد، لقی شدن آن از داخل بتن مشاهده گردید. از این رو می توان با استفاده از تنش پیوستگی گزارش شده برای نمونه های با طول پیوستگی ۴d اثر طول پیوستگی را بر تنش پیوستگی در این بتن نیز بررسی کرد (شکل ۱۲).





شکل ۱۲: رابطه مقاومت پیوستگی حداکثر و طول پیوستگی

با توجه به داده‌های جدول ۶ و شکل ۱۲ مشاهده گردید که در بتن فوق‌توانمند با افزایش طول پیوستگی، تنش پیوستگی حداکثر کاهش می‌یابد. با توجه به تحلیل ارائه شده اخیر، و این حقیقت که افزایش حداکثر مقاومت پیوستگی باعث می‌شود تا توزیع تنش در طول پیوستگی به سمت غیریکنواختی بیشتری پیش رود؛ می‌توان نتیجه گرفت که در مورد بتن فوق‌توانمند برعکس بتن معمولی محدوده طول پیوستگی‌های انتخابی در بازه‌ای است که با افزایش طول پیوستگی تاثیر غیر یکنواخت بودن تنش بیشتر از تاثیر قفل و بست مکانیکی آج‌ها است. لذا افزایش طول پیوستگی باعث کاهش حداکثر تنش پیوستگی میانگین (محاسبه شده با فرض یکنواخت بودن توزیع تنش در طول پیوستگی)، می‌گردد. الکیسی و التویل<sup>[۹]</sup> نیز در آزمایشات خود بر روی بتن فوق‌توانمند کاهش تنش پیوستگی حداکثر با افزایش طول پیوستگی را برای طول پیوستگی‌های (۴، ۶ و ۱۰) برابر قطر میلگرد گزارش کرده‌اند [۹]. همین نتیجه توسط رآو و همکاران<sup>[۲۵]</sup> برای میلگردهای آج‌دار در بتن مقاومت بالا<sup>[۲۴]</sup> هم گزارش شده است؛ اما یافته‌های یو و شین [۲۴] برای بتن مقاومت بالا و بتن مقاومت فوق‌بالا<sup>[۲۵]</sup> نتایج پژوهش یوان و گریبل<sup>[۲۹]</sup> برای بتن فوق‌توانمند در تناقض با این یافته است. همچنین ژو و شیائو<sup>[۱۳]</sup> برای میلگردهای با پوشش اپوکسی در بتن فوق‌توانمند به ارتباط واضحی بین طول مدفون و مقاومت پیوستگی نرسیده‌اند و گزارش داده‌اند که مقاومت پیوستگی مستقل از طول پیوستگی است. بنابر تحلیل ارائه شده برای این واقعه می‌توان نتیجه گرفت که در بتن فوق‌توانمند فرض توزیع یکنواخت تنش فقط در طول‌های پیوستگی کوتاه می‌تواند فرض مناسبی باشد.

#### ۴-۳- مدل تحلیلی رفتار پیوستگی-لغزش

محققان زیادی تا کنون چندین مدل پیوستگی-لغزش را برای میلگردهای مدفون در بتن پیشنهاد داده‌اند. از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل BPE<sup>v</sup> اشاره کرد که برای رابطه پیوستگی-لغزش میلگردهای آج‌دار در بتن معمولی استفاده می‌شود [۳۰]. این روش بعدها توسط CEB-FIP Model Code 1990 [۳۱] برای نشان دادن رابطه پیوستگی-لغزش بین بتن و میلگرد با تعدادی از پارامترها تصویب شد.

Alkaysi and El-Tawil<sup>۱</sup>

Rao et al.<sup>۲</sup>

High strength concrete (HSC)<sup>۳</sup>

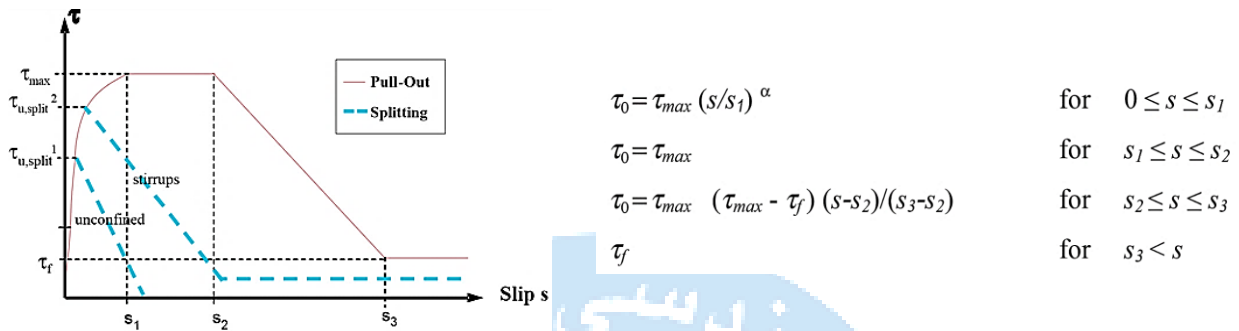
Ultra-high strength concrete (UHSC)<sup>۴</sup>

Yuan and Graybeal<sup>۵</sup>

Zhou and Qiao<sup>۶</sup>

Bertero-Popov-Eligehausen<sup>v</sup>

اغلب مدل‌های پیوستگی-لغزش، تحت حالت‌های گسیختگی مختلف به طور جداگانه توسعه داده شده است. مدل پیشنهاد شده در Model Code 2010 [۳۱] در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این مدل برای مد گسیختگی بیرون کشیدگی، یک شاخه صعودی تا رسیدن به تنش پیوستگی نهایی دارد که با یک بخش افقی ادامه می‌یابد که در آن به ازای ثابت ماندن تنش، لغزش افزایش می‌یابد. پس از آن، طی یک شاخه نزولی که به صورت خط مدل شده، تنش رو به کاهش می‌گذارد در حالی که لغزش زیاد می‌شود. سر انجام به یک مقدار ثابت مقاومت پیوستگی پس‌ماند می‌رسد که به دلیل اصطکاک خالص بین میلگرد، که بین آج‌هایش با کلیدهای بتنی برش خورده پر شده، با بتن اطراف آن است.

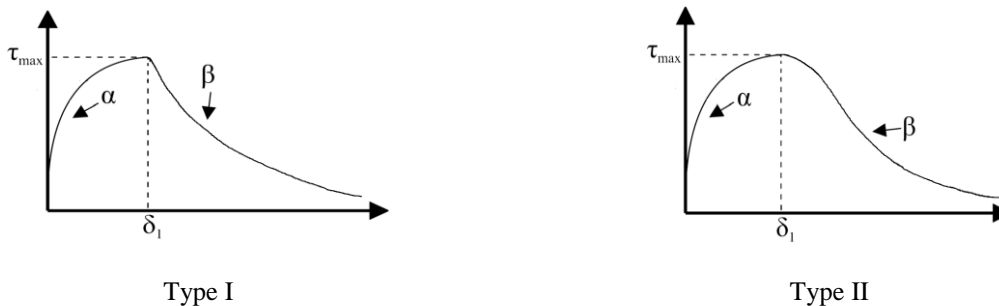


شکل ۱۳: مدل پیشنهادی برای رابطه پیوستگی لغزش مطابق با MC2010 [۳۱]

با دقت در وضعیت نمودارهای تنش پیوستگی لغزش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برای حالت گسیختگی بیرون کشیدگی در این پژوهش، برای شاخه صعودی همان رابطه پیشنهادی MC مناسب به نظر می‌رسد (رابطه ۲).

$$\tau = \tau_{max} \left( \frac{\delta}{\delta_1} \right)^\alpha; \delta < \delta_1 \quad (2)$$

بخش افقی مخصوصاً برای نمونه‌های بتن فوق‌توانمند قابل تشخیص نیست. به هر حال مدل پیشنهادی MC به واسطه محاسبه مقدار تنش ماکسیمم و انتخاب  $s_1$  و  $s_2$  در نمونه‌های بتن‌های معمولی هم با دشواری‌هایی همراه است. هم چنین شاخه نزولی نمودارهای تنش پیوستگی لغزش حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده با بتن فوق‌توانمند با شیب تندی افت می‌کند که نشان از رفتار ترد این بتن دارد. لذا با در نظر گرفتن نمودارهای تنش پیوستگی لغزش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی دو نوع کلی مطابق شکل ۱۴ قابل تشخیص است.



شکل ۱۴: مدل پیشنهادی برای رابطه پیوستگی لغزش بر اساس داده‌های این پژوهش

برای شاخه نزولی در هر دو نوع، رابطه‌نمایی پیشنهاد می‌گردد. برای شاخه نزولی نوع I:

$$\tau = \tau_{\max} \exp(-\beta(\delta/\delta_1 - 1)); \delta > \delta_1 \quad (3)$$

دقت مدل پیشنهادی نوع I برای نمونه های بتن فوق توانمند بسیار خوب است. هم چنین در این نمونه ها تنش پیوستگی حداکثر و لغزش متناظر آن به راحتی قابل شناسایی است.

برای نمونه های بتن معمولی که افت شدید در شاخه نزولی ندارند می توان از نمودار نوع II با رابطه پیشنهادی مطابق رابطه ۴ که نیازی به جدا کردن بخش افقی از شاخه نزولی ندارد؛ استفاده کرد. هم چنین استفاده از این رابطه برای نمونه های بتن فوق توانمند نیز با دقت مناسب امکان پذیر است.

$$\tau = \tau_{\max} \exp(-\beta(\delta/\delta_1 - 1)^2); \delta > \delta_1 \quad (4)$$

از برازش مدل های پیشنهادی ۲ و ۴ برای شاخه صعودی و نزولی، بر داده های آزمایشگاهی هر نمونه، مولفه های  $\alpha$  و  $\beta$  و میزان همبستگی با داده های آزمایشگاهی برای هر نمونه به دست آمده و در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸: پارامترهای تجربی مدل پیشنهادی

نوع بتن	نوع میلگرد	$d_b$ (mm)	C/d	$L_d/d_b$	$\tau_{\max}$ (MPa)	$\delta_1$ (mm)	$\alpha$	$R^2$	$\beta$	$R^2$
NSC	AIV	۱۲	۷/۸۳	۲	۱۳/۱۷	۱/۷	۰/۴۴۶۲	۰/۹۶۰۱	۰/۰۵۳۳	۰/۹۶۰۴
			۴	۱۴/۱۰	۲/۲	۰/۴۲۱۹	۰/۹۷۳۶	۰/۰۵۲۴	۰/۹۶۳۵	
		۱۶	۵/۷۵	۲	۱۱/۴۶	۱/۱	۰/۳۵۸۷	۰/۹۵۳۷	۰/۰۰۸۰	۰/۹۸۲۸
			۴/۵۰	۲	۱۵/۹۴	۱/۸	۰/۳۹۶۴	۰/۹۸۹۹	۰/۰۱۴۰	۰/۹۷۵۱
UHPC	AIV	۱۲	۷/۸۳	۲	۶۰/۶۴	۰/۸	۰/۴۵۳۷	۰/۹۸۷۳	۰/۰۱۳۶	۰/۹۳۷۱
			۱۶	۵/۷۵	۲	۵۷/۴۸	۲/۲	۰/۲۷۸۵	۰/۹۸۳۹	۰/۰۴۰۳

همانگونه که در ستون های ۹ و ۱۱ در جدول ۸ مشاهده می گردد؛ کلیه ضرایب تعیین بالاتر از ۰/۹ است. همبستگی مناسب با داده های آزمایشگاهی بیانگر دقت بالای مدل های پیشنهادی است.

#### ۴- نتایج

هدف این پژوهش بررسی پیوستگی بین بتن معمولی و فوق توانمند با میلگردهای فولادی مقاومت بالا است. در این پژوهش ۵۸ نمونه مکعبی با یک میلگرد تعبیه شده در محور نمونه ساخته و تحت آزمایش بیرون کشیدگی قرار گرفت. برای ساخت نمونه ها دو نوع بتن (فوق توانمند و معمولی)، میلگرد AIV، دو طول پیوستگی، سه نسبت C/d در نظر گرفته شد و به طور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

۱. بتن فوق توانمند مشخصات پیوستگی میلگردهای فولادی در بتن را بهبود می بخشد و طول مدفون میلگرد در بتن را کاهش می دهد؛ به طوری که تنش پیوستگی برای بتن فوق توانمند نزدیک به ۵ برابر این مقدار در نمونه های مشابه از بتن معمولی است. بیشترین تنش پیوستگی محاسبه شده در این پژوهش مربوط به میلگرد AIV در بتن فوق توانمند و برابر ۶۰/۶۴ مگاپاسکال در مقایسه با مقدار ۱۳/۱۷ مگاپاسکال برای نمونه مشابه از بتن معمولی است.

۲. میانگین تنش پیوستگی نرمالیزه شده نیز با افزایش مقاومت فشاری در بتن فوق توانمند افزایش می یابد.

۳. افزایش طول پیوستگی در بتن معمولی منجر به افزایش تنش پیوستگی حداکثر می‌شود. درحالی‌که در بتن فوق‌توانمند با افزایش طول پیوستگی تنش پیوستگی حداکثر کاهش می‌یابد.
۴. فرض توزیع یکنواخت تنش پیوستگی در طول پیوستگی برای نمونه های بتن معمولی نزدیک به واقع است. اما برای نمونه‌های بتن فوق‌توانمند تنها در طول‌های کوتاه ( در شرایط این پژوهش ۲ برابر قطر میلگرد) می‌تواند مناسب باشد.
۵. با افزایش قطر میگرد تنش پیوستگی حداکثر اندکی کاهش می‌یابد.
۶. شاخه نزولی منحنی‌های پیوستگی لغزش در بتن فوق‌توانمند با شدت بیشتری نسبت به بتن معمولی افت می‌کند که بیانگر رفتار ترد بتن فوق‌توانمند بدون الیاف مورد استفاده در این پروژه نسبت به بتن معمولی است.
۷. لغزش متناظر با تنش پیوستگی حداکثر در بتن فوق‌توانمند مقادیر کمتری نسبت به بتن معمولی دارد که تایید کننده رفتار ترد بتن فوق‌توانمند بدون الیاف است.
۸. لغزش متناظر با تنش پیوستگی حداکثر در بتن معمولی در نمونه های با طول پیوستگی بیشتر مقادیر بزرگتری دارد. این مسئله در مورد بتن فوق‌توانمند به دلیل گسیختگی میگرد در طول پیوستگی‌های بیش از دو برابر قطر میلگرد و عدم امکان مقایسه اظهار نظر نشده‌است.
۹. مدل‌های جدید پیوستگی لغزش برای حالت گسیختگی بیرون کشیدگی، دارای همبستگی مناسب با داده‌های آزمایشگاهی پیشنهاد شده‌است.

## مراجع

- [1] Rahdar, H.A. and Ghalehnovi, M. (2017). Post-Cracking Behavior of the Tensile Specimens Made from Ultra High Performance Concrete, Reinforced by GFRP Rebar. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(1), 172-201.
- [2] Khazaeu, A. and Ghalehnovi, M. (2018). Bearing stiffness of UHPC; an experimental investigation and a comparative study of regression and SVR-ABC models. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(3), 145-158.
- [3] Rahdar, H.A. and Ghalehnovi, M. (2016). Post-cracking behavior of UHPC on the concrete members reinforced by steel rebar. *Computers and Concrete*, 18(1), 139-154.
- [4] Harajli, M.H. and Mabsout, M. (2002). Evaluation of bond strength of steel reinforcing bars in plain and fiber-reinforced concrete. *ACI Structural Journal*, 99(4), 509-517.
- [5] Lin, H., Zhao, Y., Ozbolt, J., Feng, P., Jiang, C. and Eligehausen, R. (2019). Analytical model for the bond stress-slip relationship of deformed bars in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*, 198, 570-586.
- [6] Lin, X. and Zhang, Y. (2014). Evaluation of bond stress-slip models for FRP reinforcing bars in concrete. *Composite Structures*, 107, 131-141.
- [7] Chao, S.-H., Naaman, A.E. and Parra-Montesinos, G.J. (2009). Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites. *ACI Structural Journal*, 106(6), 897.
- [8] Sulaiman, M.F., Ma, C.-K., Apandi, N.M., Chin, S., Awang, A.Z., Mansur, S.A., et al. (2017). A review on bond and anchorage of confined high-strength concrete. *Structures*, 11, 97-109.
- [9] Alkaysi, M. and El-Tawil, S. (2017). Factors affecting bond development between Ultra High Performance Concrete (UHPC) and steel bar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 144, 412-422.
- [10] Shayanfar, M., Ghalehnovi, M. and Safiey, A. (2007). Corrosion effects on tension stiffening behavior of reinforced concrete. *Computers and Concrete*, 4(5).
- [11] Taber, L.H., Belarbi, A. and Richardson, D.N. (2002). Effect of Reinforcing Bar Contamination on Steel-Concrete Bond During Concrete Construction. *ACI Special Publication*, 209, 839-862.
- [12] Yuan, J. and Graybeal, B. (2016). Evaluation of Bond of Reinforcing Steel in UHPC: Design Parameters and Material Property Characterization. In *Proceedings, First International Interactive Symposium on UHPC*. Des Moines, Iowa
- [13] Zhou, Z. and Qiao, P. (2018). Bond behavior of epoxy-coated rebar in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 406-417.
- [14] Pishro, A.A. and Feng, X. (2018). Experimental and Numerical Study of Nano-Silica Additions on the Local Bond of Ultra-High Performance Concrete and Steel Reinforcing Bar. *Civil Engineering Journal*, 3(12), 1339-1348.

- [15] Roy, M., Hollmann, C. and Wille, K. (2017). Influence of volume fraction and orientation of fibers on the pullout behavior of reinforcement bar embedded in ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 582-593.
- [16] Esfahani, M.R. and Rangan, B.V. (1998). Bond between normal strength and high-strength concrete (HSC) and reinforcing bars in splices in beams. *Structural Journal*, 95(3), 272-280.
- [17] Marchand, P., Baby, F., Khadour, A., Battesti, T., Rivillon, P., Quiertant, M., et al. (2016). Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC. *Materials and Structures*, 49(5), 1979-1995.
- [18] Rahdar, H.A. and Ghalehnovi, M. (2016). The characteristic of ultra-high performance concrete and cracking behavior of reinforced concrete tensile specimens. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(2), 42-58.
- [19] RILEM-TC. (1994). *RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. London: E & FN SPON, 218-220.
- [20] Ronanki, V.S., Aaleti, S. and Valentim, D.B. (2018). Experimental investigation of bond behavior of mild steel reinforcement in UHPC. *Engineering Structures*, 176, 707-718.
- [21] A944-10, A. (2015). *Standard test method for comparing bond strength of steel reinforcing bars to concrete using beam-end specimens*. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [22] RILEM-TC. (1994). *RC 5 Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test, 1982*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. London: E & FN SPON, 213-217.
- [23] Looney, T.J., Arezoumandi, M., Volz, J.S. and Myers, J.J. (2012). An experimental study on bond strength of reinforcing steel in self-consolidating concrete. *International journal of concrete structures and materials*, 6(3), 187-197.
- [24] Yoo, D.-Y. and Shin, H.-O. (2018). Bond performance of steel rebar embedded in 80–180 MPa ultra-high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 93, 206-217.
- [25] Rao, G.A., Pandurangan, K., Sultana, F. and Eligehausen, R. (2007). Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete. In *Proceeding of the 6th International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures* Catania, Italy: Taylor & Francis, 295-301.
- [26] De Larrard, F., Shaller, I. and Fuchs, J. (1993). Effect of the bar diameter on the bond strength of passive reinforcement in high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, 90(4), 333-339.
- [27] Hossain, K.M.A. (2008). Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1491-1499.
- [28] Pour, S.M. and Alam, M.S. (2016). Investigation of compressive bond behavior of steel rebar embedded in concrete with partial recycled aggregate replacement. *Structures*, 7, 153-164.
- [29] Yuan, J. and Graybeal, B. (2015). Bond of Reinforcement in Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Structural Journal*, 112(6).
- [30] Eligehausen, R., Popov, E.P. and Bertero, V.V. (1982). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. In *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*; Athens, Greece 69-80.
- [31] Fédération internationale du béton. (2013). CEB-FIP model code 2010, first completed draft. Lausanne, Switzerland: Ernst & Sohn, a Wiley brand.

