



## بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی بین بتن عادی و بتن فوق توانمند

محمد شکرچی زاده<sup>۱</sup>، سهیل جعفری نژاد<sup>۲\*</sup>، امیر مهدی ربیعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲\*</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
(s\_jafarinejad@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup> کارشناسی مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۵/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۸/۱۰)

### چکیده

ویژگی‌های منحصربه‌فرد و فوق‌العاده بتن فوق‌توانمند به‌عنوان مصالحی نوین در علم مهندسی عمران، افق‌های جدید و هیجان‌انگیزی را پیش روی طراحان سازه قرار داده است. یکی از این افق‌های طراحی که می‌تواند در آینده بسیار کاربردی باشد، ایده سازه‌های مرکب بتن عادی و بتن فوق‌توانمند است که باهدف استفاده حداکثری از ظرفیت مصالح، مطرح گردیده است. از این ایده می‌توان هم در ساخت سازه‌های جدید و هم در ترمیم و بهسازی سازه‌های موجود بهره برد. چنان‌که مطالعات و کاربردهای عملی اثبات نموده‌اند؛ سازه مرکب بتن‌آرمه عادی و بتن فوق‌توانمند، نسبت به سازه بتن‌آرمه اولیه، هم‌زمان بادوام‌تر و پر مقاومت‌تر خواهد بود. حال آنکه در هر سازه مرکبی، عملکرد یکپارچه مصالح با یکدیگر بسیار حیاتی است و این عملکرد یکپارچه از مسیر مقاومت پیوستگی بین مصالح به دست خواهد آمد. به‌علاوه، با توجه به جدید بودن ایده سازه‌های مرکب بتن عادی و بتن فوق‌توانمند، مطالعات بسیار محدودی در سطح دنیا در رابطه با مقاومت پیوستگی بین این مصالح انجام گرفته است؛ بنابراین در این مطالعه به‌عنوان بخشی از مجموعه مطالعات در رابطه با کاربرد بتن فوق‌توانمند در دانشکده فنی دانشگاه تهران، مقاومت پیوستگی بین بتن عادی و بتن فوق‌توانمند با استفاده از دو نوع آزمایش متداول، در حالات مختلف آماده‌سازی سطح بتن پایه، بررسی گردیده است. مطابق نتایج این پژوهش مقاومت پیوستگی بین این دو مصالح به‌شدت به شرایط آماده‌سازی سطح بتن پایه بستگی داشته و در صورت انجام آماده‌سازی سطحی مناسب، شرایط بسیار بهتری را حتی نسبت به ضوابط موجود در مراجع ایجاد می‌نماید.

### کلمات کلیدی

بتن فوق‌توانمند، مقاومت پیوستگی، بهسازی سازه‌های بتنی، سازه‌های مرکب بتن عادی و بتن فوق‌توانمند.



# Experimental Study of Continuity Resistance between Usual and Ultra High Performance Concrete

Mohammad Shekarchi Zadeh<sup>1</sup>, Soheil Jafari Nejad<sup>2\*</sup>, Amir Mehdi Rabiee<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor, School of Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2\*</sup> M.Sc. of Structural Engineering, School of Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran (s\_jafarinejad@ut.ac.ir)

<sup>3</sup> B.Sc. of Civil Engineering, School of Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Date of received: 05/08/2019, Date of accepted: 01/11/2019)

## ABSTRACT

*The unique properties and characteristics of ultra-high performance concrete as a new material in civil engineering have brought exciting new horizons to the designers. One of these design horizons that could be very applicable in the future is the idea of a composite of ultra-high performance and usual concrete, which has been put forward to make maximum use of the material capacity. This idea is useable in both of the new construction and repair (improvement) of existing structures. As studies and practical applications have shown, composite of usual and ultra-high performance concrete than original concrete structures will be stronger and durable. However, in any composite structures, the integrated performance of the materials is very important and this integrated performance will make through the interconnection resistance between materials. Also, as regards to the newness of composite the ultra-high performance and usual concrete, limited studies were conducted about to continuity strength between these materials. Therefore, the present research is one of a part in the collection studies related to applicable ultra-high performance concrete in faculty of engineering of Tehran University, continuity strength between usual and ultra-high performance concrete with using ordinary tests in a different mode of base concrete preparation has been studied. According to the results of this study, the continuity of the strength between the two materials is highly dependent on the basic concrete level preparation conditions and, if proper level preparation is carried out, will result in better conditions than even the reference standards*

## Keywords:

*Ultra-high performance concrete, Continuity strength, Improvement concrete structures, Composite ultra-high performance and usual concrete structures.*



## ۱- مقدمه

بتن فوق توانمند و یا به اختصار UHPC<sup>۱</sup> معمولاً به مصالحی با پایه سیمانی گفته شده که حداقل حدود ۱۵۰ مگاپاسکال مقاومت فشاری داشته و برای دارا بودن رفتار شکل پذیر حاوی مقدار کافی الیاف باشد. آغاز مطالعات بر روی این مصالح نوین در سطح دنیا به حدود ۲۵ سال گذشته برمی گردد و در طی این زمان پژوهش های زیادی در این رابطه صورت گرفته و نتایج جالبی مانند دست یابی به مقاومت های فشاری خیلی بالا تا حدود ۸۰۰ مگاپاسکال، گزارش گردیده است [۱-۳]. حال آنکه طرح اختلاط ویژه بتن فوق توانمند موجب می شود تا هزینه تمام شده تولید آن در قیاس با بتن های عادی بسیار بیش تر باشد. همین موضوع منجر به آن گردیده تا ایده هایی جهت استفاده اقتصادی و کاربردی از بتن فوق توانمند توسط پژوهشگران ارائه گردد. استفاده مرکب از بتن عادی و یا توانمند با بتن فوق توانمند یکی از این ایده ها است که در سال های اخیر مورد توجه بسیار واقع شده و حتی در برخی از کشورهای دنیا به صورت عملی نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. هدف اصلی در این ایده آن است که در محل هایی از سازه که تحت تأثیر بارهای بزرگ و یا عوامل مخرب محیطی قرار می گیرند، از بتن فوق توانمند و در سایر قسمت ها از بتن عادی استفاده نمود. با وجود آنکه از این روش می توان هم در ساخت سازه های جدید و هم در ترمیم و بهسازی سازه های بتنی موجود استفاده کرد و طیف وسیعی از کاربردها را می توان برای آن تصور نمود ولی، عمده کاربردهای عملی از آن به سه محور افزایش باربری سازه های بتنی موجود، افزایش دوام و ترمیم سازه های بتنی موجود و پر کردن درزهای اجرایی بین قطعات پیش ساخته بتنی خلاصه گشته است. رفتار سازه این المان های مرکب رفتار ویژه بوده و توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. افزایش حدود سه برابری مقاومت خمشی یک تیر بتن مسلح عادی با کاربرد تنها حدود ۵ سانتی متر بتن فوق توانمند، یکی از نتایج جالب این مطالعات بوده است [۶]. بایستی توجه نمود که در هر سازه ی مرکبی رفتار یکپارچه مصالح با یکدیگر بسیار حیاتی است چنان که در صورت عدم وجود رفتار یکپارچه، باربری سازه به شدت کاهش یافته و رفتار مکانیکی آن تحت تأثیر قرار می گیرد. این رفتار یکپارچه از مسیر مقاومت پیوستگی بین مصالح حاصل می شود. به همین خاطر قبل انجام هر مطالعه دیگری بر روی عمل کرد این سازه ها، مقاومت پیوستگی بین دو ماده اصلی بایستی بررسی گردد و به این پرسش پاسخ مناسب داده شود که آیا مقاومت پیوستگی بین بتن فوق توانمند و بتن پایه ایجاد می گردد یا خیر. به صورت طبیعی، با توجه به جدید بودن موضوع سازه های مرکب بتن عادی و بتن فوق توانمند، مطالعات محدودی در این رابطه در سطح دنیا انجام گرفته است [۷]. حال آنکه مطالعات به مراتب بیشتری در رابطه با مقاومت پیوستگی بین دو بتن عادی انجام شده است [۸، ۹]. با بررسی مجموعه این مطالعات مشخص می گردد که با توجه به ماهیت پیچیده مقاومت پیوستگی آزمایش های زیادی برای اندازه گیری این مقاومت طراحی شده که دو آزمایش Pull off و Slant shear پرکاربردترین این آزمایش ها هستند؛ بنابراین در این مطالعه نیز از همین دو آزمایش برای بررسی مقاومت پیوستگی استفاده گردیده است.

## ۲- مواد و مصالح

بر اساس مطالعات متنوعی که در سال های اخیر بر روی بهینه سازی طرح اختلاط بتن فوق توانمند و مشخصات آن در دانشکده فنی دانشگاه تهران و مجموعه انستیتو مصالح ساختمانی صورت گرفته است [۱۰، ۱۱] و به روزرسانی این طرح ها که در آغاز این مطالعه انجام گرفت؛ در ساخت بتن فوق توانمند مورد استفاده، از سیمان پرتلند نوع ۱-۵۲۵ تولید کارخانه سیمان شهرکرد، سنگ دانه بازالتی با حداکثر اندازه اسمی ۲/۳۶ میلی متر و میکروسیلیس تهیه شده از شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران به عنوان پوزولان مصرفی

<sup>1</sup> Ultra high performance concrete



استفاده شده است. همچنین الیاف فولادی پر مقاومت وارداتی به طول و عرض ۱۳ و ۰/۱۷ میلی‌متر به همراه فوق روان‌ساز با پایه پلی‌کربوکسیلات<sup>۲</sup> به‌عنوان افزودنی شیمیایی به مخلوط بتن تازه اضافه گردیده است. در ساخت بتن پایه نیز سیمان پرتلند نوع ۲ تولید کارخانه سیمان تهران، به همراه سه نوع سنگ‌دانه ماسه، شن نخودی و شن بادامی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده گردیده است. به دلیل نسبت آب به سیمان کم در این طرح، فوق روان‌ساز با پایه پلی‌کربوکسیلات به مقدار اندک به مخلوط اضافه شده تا روانی مناسب حدود ۹ سانتی‌متری در آزمایش روانی استاندارد ASTM C143 تأمین گردد. همچنین نوع آب مصرفی در ساخت بتن فوق توانمند و بتن پایه نیز آب شرب شهر تهران بوده است. جزییات طرح مخلوط این دو نوع بتن اشاره شده، در جدول (۱) بیان می‌گردد. در جدول (۲) نیز جزییات مشخصات مکانیکی بتن فوق توانمند استفاده شده، آورده شده است. علاوه بر نکات بیان شده در این جداول، بایستی اشاره کرد که مطابق آزمایش‌های انجام گرفته، مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد بتن پایه حدود ۵۱/۶ مگاپاسکال و روانی مخلوط بتن فوق توانمند تازه در حدود ۱۵۲ میلی‌متر در آزمایش ASTM C1437 به دست آمده است.

جدول ۱: طرح مخلوط بتن فوق توانمند و بتن پایه استفاده شده.

مقدار		مشخصه طرح مخلوط
بتن پایه	بتن فوق توانمند	
۴۱۸	۱۲۰۰	کل مواد سیمانی ( $\text{kg/m}^3$ )
۰	۲۰	نسبت پوزولان به کل مواد سیمانی (/)
۰/۴۵	۳	نسبت فوق روان‌ساز به کل مواد سیمانی (/)
۳۳	۱۷	نسبت آب آزاد به مواد سیمانی (/)
۱۸۰۸	۹۹۹	سنگ‌دانه ( $\text{kg/m}^3$ )
۰	۱۵۷	الیاف فولادی ( $\text{kg/m}^3$ )

جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن فوق توانمند استفاده شده.

مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)
۱۶۳/۷	۸/۹	۳۵/۸

### ۳- جزییات روش آزمایش‌ها

چنان‌که قبلاً نیز بیان گردید، در مطالعه حاضر از دو نوع آزمایش پرکاربرد Pull off مطابق استاندارد ASTM C1583 [۱۲] و Slant shear مطابق استاندارد ASTM C882 [۱۳] جهت بررسی مقاومت پیوستگی استفاده گردیده است. تمامی آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران و با استفاده از تجهیزات و ادوات این مرکز انجام گرفته است. در ادامه مختصری در رابطه با جزییات روش انجام این آزمایش‌ها و جزییات آماده‌سازی نمونه‌های مورد استفاده شرح داده می‌شود. همچنین در این پژوهش به جهت بررسی اثر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطح بتن پایه در مقاومت پیوستگی و مشخص کردن

<sup>2</sup> Polycarboxylate



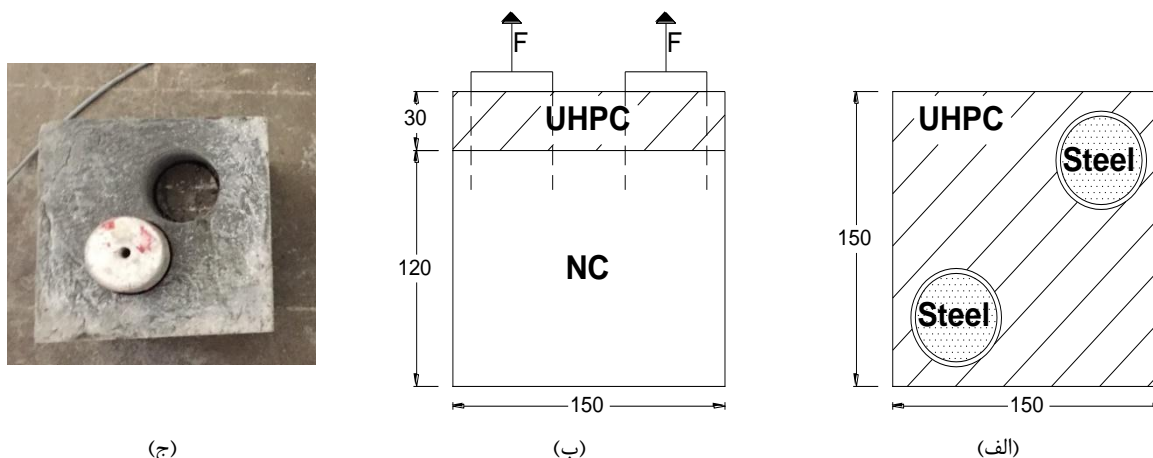
بهترین روش آماده‌سازی، سطح بتن پایه در نمونه‌ها به چهار روش مختلف آماده‌سازی گردیده که جزییات مربوط به این قسمت نیز پس از معرفی آزمایش‌ها آورده شده است.

### ۱-۳- آزمایش Pull off

آزمایش Pull off مقاومت پیوستگی را تحت تأثیر کشش خالص اندازه‌گیری می‌کند. روش انجام این آزمایش به این صورت بوده است که نمونه‌هایی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ در ۱۲۰ میلی‌متر از بتن پایه ساخته‌شده و این نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب با دمای ثابت ۲۳ درجه سانتی‌گراد، عمل‌آوری گردیده‌اند. سپس این نمونه‌ها به مدت یک هفته داخل محیط آزمایشگاه قرار گرفته و بعد از این مدت عملیات آماده‌سازی سطحی بر روی آن‌ها صورت گرفته است. سطح آماده‌سازی شده، سطح صاف و صیقلی به دست آمده در مجاورت قالب بوده است. این سطح پس از آماده‌سازی شستشو شده تا گردوخاک‌های احتمالی موجود حذف گردند. یک هفته بعد، نمونه بتن پایه دوباره داخل قالب مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر قرار گرفته و مخلوط بتن فوق توانمند تازه، تهیه‌شده و بر روی این سطح اضافه گردیده؛ بنابراین ضخامت تقریبی لایه بتن فوق توانمند ۳۰ میلی‌متر بوده است. این نمونه مرکب دوباره با استفاده از آب ۲۳ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده است. بر روی نمونه مرکب تهیه‌شده پس از طی فرایندهای اشاره‌شده فوق، مغزه‌گیری به قطر و عمق ۵۰ میلی‌متر انجام‌شده و سپس دیسک فولادی آزمایش با استفاده از چسب مخصوص به قسمت مغزه‌گیری شده متصل گردیده است. سپس با استفاده از دستگاه آزمایش Pull off تنش کششی به این دیسک با سرعت ثابت در بازه  $35 \pm 15 \text{ KPa/s}$  اعمال گردیده است. با افزایش این تنش نمونه از قسمت مغزه‌گیری شده شکسته می‌شود و با استفاده از رابطه ۱ مقاومت پیوستگی محاسبه می‌گردد.

$$P = F / A \quad (1)$$

در این رابطه  $P$  مقاومت پیوستگی نمونه،  $F$  حداکثر نیروی اعمالی دستگاه و  $A$  سطح مقطع قسمت مغزه‌گیری شده است. شکل (۱) جزییات نمونه‌های تهیه‌شده برای این آزمایش و ابعاد تقریبی اجزای آن‌ها را به صورت شماتیک و یک نمونه واقعی آزمایش‌شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نمونه‌های آزمایش Pull off به صورت شماتیک و واقعی (تمامی واحدها میلی‌متر هستند). الف: نما از بالا به صورت شماتیک، ب: نما از روبرو به صورت شماتیک، ج: نمونه واقعی آزمایش‌شده.



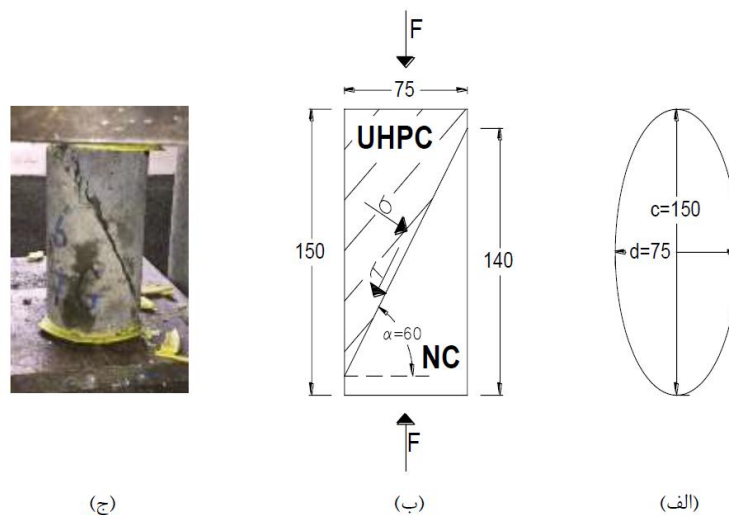
## ۳-۲- آزمایش Slant shear

آزمایش Slant shear مقاومت پیوستگی را تحت اثر مرکب خمش و برش اندازه‌گیری می‌کند. روش انجام این آزمایش به این صورت بوده که با استفاده از قالب‌های استوانه‌ای مخصوص آزمایش، نمونه‌هایی از بتن پایه به شکل نیم استوانه‌ی مورب ساخته می‌شوند. مشابه آزمایش Pull off این نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده و بعد از آن یک هفته در محیط آزمایشگاه قرار داده شده‌اند. سپس سطح مورب این نمونه‌ها، آماده‌سازی شده و پس از شستشو دادن این سطح، نمونه‌ها دوباره یک هفته در محیط آزمایشگاه قرار گرفته‌اند. سپس نیم استوانه‌های تهیه‌شده دوباره داخل قالب قرار گرفته‌اند و با استفاده از بتن فوق توانمند نیمه دیگر قالب پر شده است. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه مرکب در آب ۲۳ درجه سانتی‌گراد، دو سطح فوقانی و تحتانی این نمونه‌ها کپینگ شده و سپس عملیات بارگذاری با استفاده از جک فشاری بر روی آن‌ها انجام گرفته است. با در نظر گرفتن مقادیر نیروی فشاری اعمالی از جک بر روی نمونه‌ها، با استفاده از دو رابطه ۲ و ۳ می‌توان تنش فشاری و برشی بر روی سطح برش در نمونه‌ها را محاسبه نمود. مقدار حداکثر این تنش برشی به‌عنوان مقاومت برشی **Slant shear** در نظر گرفته می‌شود.

$$\sigma = F \cdot \cos(\alpha) / (c \cdot d \cdot \pi / 4) \quad (۲)$$

$$\tau = F \cdot \sin(\alpha) / (c \cdot d \cdot \pi / 4) \quad (۳)$$

در روابط فوق  $\sigma$  تنش فشاری ایجادشده بر روی سطح برش،  $F$  حداکثر نیروی اعمالی از طرف جک فشاری،  $\alpha$  زاویه سطح برش با افق،  $c$  و  $d$  طول دو قطر سطح برش بیضی‌شکل و  $\tau$  تنش برشی در محل سطح برش هستند. با توجه به پیچیدگی هندسی نمونه مورد بحث، پارامترهای  $c$ ،  $d$  و  $\alpha$  در قسمت الف و ب شکل ۲ که نمونه‌های این آزمایش و سطح برش در آن‌ها را به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهند مشخص شده. همچنین در این دو قسمت شکل، برخی از ابعاد تقریبی نمونه‌های این آزمایش آورده شده است. به‌علاوه در این شکل، یکی از این نمونه‌های مرکب پس از پایان بارگذاری نمایش داده شده و در آن به‌خوبی مشخص است که محل شکست این نمونه در محل تماس دو ماده بوده است.



شکل ۲: جزییات نمونه‌های آزمایش Slant shear (واحدها میلی‌متر و درجه هستند). الف: سطح برش به‌صورت شماتیک، ب: نمای روبرو نمونه مرکب به‌صورت شماتیک، ج: نمونه مرکب پس از بارگذاری با جک فشاری.



## ۳-۳- آماده سازی سطوح بتن پایه

در این پژوهش سطح هر کدام از نمونه‌های بتن پایه با یکی از روش‌های زیر آماده‌سازی سطحی شده است.

الف- سند بلاست: روش سند بلاست مورد استفاده در این مطالعه، سند بلاست خشک بوده و سطح هر کدام از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر، ۱۵ ثانیه در معرض ذرات ساینده قرار گرفته است. در سایر نمونه‌ها این زمان به تناسب مساحت سطح تعیین گردیده و بر روی نمونه اعمال شده است.

ب- شیار زدن: روش شیار زدن سطح نمونه‌های بتن پایه به این صورت بوده است که با استفاده از دستگاه فرز، شیارهایی در دو جهت عمود بر هم و به فاصله ۲۰ میلی‌متر و عمق ۳ تا ۴ میلی‌متر ایجاد گردیده است.

ج- برس سیمی: با استفاده از برس سیمی متصل شده به دستگاه فرز، سطح برخی از نمونه‌های بتن پایه آماده‌سازی شده است. مدت‌زمان این آماده‌سازی برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متری حدود ۴۰ ثانیه بوده و برای سایر نمونه‌ها به تناسب مساحت سطح تعیین گردیده است.

د- بدون آماده‌سازی: برای داشتن معیار مناسب مقایسه، بر سطح برخی از نمونه‌های بتن پایه آماده‌سازی ویژه‌ای انجام نشده و فقط به شستشو با آب اکتفا شده است.

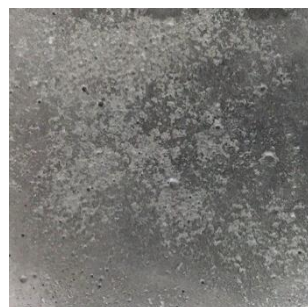
شکل (۳) تصویر ظاهری سطوح آماده‌سازی شده به روش‌های مختلف را در قیاس با یکدیگر نمایش می‌دهد.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳: شکل ظاهری سطوح آماده‌سازی شده به روش‌های مختلف. الف: سند بلاست شده، ب: شیار زده، ج: برس سیمی زده، د: بدون آماده‌سازی.



## ۴- بحث و بررسی نتایج

## ۴-۱- نتایج آزمایش Pull off

جدول (۳) خلاصه نتایج آزمایش Pull off را نمایش می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود مقاومت پیوستگی در حالت بدون آماده‌سازی ۰/۵۹ مگاپاسکال به دست آمده در حالی که این مقدار در حالت سند بلاست شده ۳/۶۷ مگاپاسکال بوده است. به بیان دیگر، آماده‌سازی سطحی مناسب موجب گردیده تا مقاومت پیوستگی بیش از ۶ برابر گردد که همین امر، اهمیت آماده‌سازی سطحی مناسب را در کاربردهای عملی به خوبی نمایش می‌دهد. از طرف دیگر، برخلاف انتظار اولیه، برس سیمی زدن موجب افزایش مقاومت پیوستگی در نمونه‌ها نشده و حتی اندکی این پارامتر را کاهش داده است.

جدول ۳: خلاصه نتایج آزمایش Pull off.

روش آماده‌سازی سطحی	تعداد نمونه	مقاومت پیوستگی (MPa)	ضریب تغییرات (%)	مود شکست
بدون آماده‌سازی	۳	۰/۵۹	۱۰/۷	اتصال
برس سیمی	۴	۰/۵۵	۶/۲	اتصال
شیار زده	۴	۲/۷۲	۱۴/۷	اتصال
سند بلاست	۴	۳/۶۷	۸/۷	بتن پایه (۱) بتن پایه اتصال (۳)

بعلاوه، با دقت در مد شکست ارائه شده در جدول، مشخص می‌شود که به جز در حالت سند بلاست، که در یکی از نمونه‌های این حالت کلاً بتن پایه به صورت کششی شکسته شده و در سه نمونه دیگر آن ترکیب شکست بتن پایه و اتصال رخ داده است، در سایر نمونه‌ها اتصال بین بتن فوق توانمند و بتن پایه، حلقه ضعیف باربری بوده و جدایش در این قسمت رخ داده است. این موضوع هم به خودی خود نمایش دهنده مقاومت پیوستگی بیش‌تر در حالت سند بلاست شده در قیاس با سایر حالات آماده‌سازی است و هم این مهم را بیان می‌کند که مقدار ۳/۶۷ مگاپاسکال به دست آمده به عنوان مقاومت پیوستگی در حالت سند بلاست شده، حد پایین مقاومت پیوستگی است؛ چنان‌که در صورت جایگزینی بتن پایه با بتنی مقاوم‌تر احتمالاً مقدار مقاومت پیوستگی به دست آمده افزایش خواهد یافت.

## ۴-۲- نتایج آزمایش Slant shear

خلاصه نتایج آزمایش Slant shear در جدول (۴) نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در این حالت، مقاومت پیوستگی در نمونه‌هایی که سطح بتن پایه سند بلاست شده باشد، بیش از ۲/۵ برابر حالتی بوده که این سطح بدون آماده‌سازی باشد. همچنین بازم برس سیمی زدن منجر به افزایش قابل توجه مقاومت پیوستگی نشده است. مد گسیختگی نمونه‌های این آزمایش نیز در حالتی که سطح بتن پایه سند بلاست شده باشد، برخلاف دیگر حالت که در تمامی آن‌ها شکست از محل اتصال رخ داده است، به سمت شکستگی بتن پایه حرکت کرده است. بنابراین در اینجا نیز عدد ۲۹/۴ مگاپاسکال به دست آمده برای مقاومت پیوستگی Slant shear نمونه‌های سند بلاست شده، حد پایین مقاومت پیوستگی در این حالت خواهد بود.





جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش Slant shear

روش آماده‌سازی سطحی	تعداد نمونه	مقاومت پیوستگی (MPa)	تنش فشاری بیشینه (MPa)	ضریب تغییرات مقاومت پیوستگی (%)	مود شکست
بدون آماده‌سازی	۳	۱۰/۷	۱۰/۷	۱۲/۷	اتصال
برس سیمی	۳	۱۳/۵	۶/۲	۱۰/۳	اتصال
شیار زده	۳	۱۹/۶	۱۴/۷	۹/۹	اتصال
سند بلاست	۳	۲۹/۴	۸/۷	۷/۱	بتن پایه (۱) اتصال (۱) بتن پایه اتصال (۱)

## ۴-۳- نتایج آزمایش Slant shear

ACI 546-06 به‌عنوان مرجعی معتبر در زمینه‌ی ترمیم سازه‌های بتنی، جدول (۵) را برای حداقل مقادیر قابل قبول مقاومت پیوستگی بین بتن پایه و بتن ترمیمی در سنین مختلف، پیشنهاد نموده است [۱۴]. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از دو آزمایش انجام‌شده‌ی Slant shear و Pull off با مقادیر این جدول، مشخص می‌گردد که در صورت انجام آماده‌سازی سطحی بتن پایه با استفاده از روش سند بلاست و یا شیار زدن حدود مورد انتظار ارضا می‌شود.

جدول ۵: حداقل مقاومت پیوستگی بین بتن پایه و بتن ترمیمی ارائه‌شده توسط [۱۴].

مقاومت پیوستگی (MPa)			
سن بتن ترمیمی	۱ روز	۷ روز	۲۸ روز
آزمایش Slant shear	۶/۹-۲/۸	۱۲-۶/۹	۲۱-۱۴
آزمایش کشش مستقیم	۱-۰/۵	۱/۷-۱	۲/۱-۱/۷

جدول (۳) و (۴) به‌خوبی اهمیت آماده‌سازی سطحی مناسب را در مقاومت پیوستگی بین بتن پایه و بتن فوق توانمند نمایش داده‌اند. در هر دو این آزمایش‌ها مشخص گردید که نمونه‌هایی که سطح بتن پایه در آن‌ها با استفاده از سند بلاست آماده‌سازی سطحی شده است؛ بیش‌ترین مقاومت پیوستگی را به دست داده‌اند. همچنین نمونه‌های شیار زده در مرتبه بعدی قرارگرفته و نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی و برس سیمی زده‌شده، کمترین مقاومت پیوستگی را داشته‌اند؛ بنابراین، می‌توان گفت که نتایج این دو آزمایش Slant shear و Pull off با یکدیگر قابل مقایسه است و با توجه به ماهیت مقایسه‌ای نتایج این آزمایش‌ها در کاربردهای عملی، می‌توان به انجام یکی از آن‌ها اکتفا نمود. اگرچه به‌صورت طبیعی، انجام هر دو آن‌ها نتایج بیش‌تر و با قابلیت اعتماد بالاتری را به دست می‌دهند. بعلاوه، بنا بر آنچه در پیش‌ازاین بیان گردید، توصیه می‌گردد که در کاربردهای عملی در صورت امکان از روش سند بلاست برای آماده‌سازی سطحی استفاده گردد. همچنین در حالاتی که استفاده از این روش ممکن نباشد، شیار زدن به صورتی که در این مطالعه انجام شد نیز، می‌تواند، مقاومت پیوستگی مناسبی را ایجاد کند و حدود مورد انتظار جدول ACI 546 را ارضا نماید. همچنین ذکر این نکته نیز ضروری است که مطابق نتایج این جداول، روش برس سیمی زدن، تأثیر چندانی بر روی مقاومت پیوستگی ندارد و استفاده از این روش در کاربردهای عملی توصیه نمی‌شود.



## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

اهم نتایج به دست آمده در این مطالعه را می توان در سه محور زیر خلاصه نمود:

- ۱- مقاومت پیوستگی بین بتن پایه و بتن فوق توانمند به شدت به چگونگی آماده سازی سطحی بتن پایه بستگی دارد و در صورت انجام آماده سازی سطحی کافی، مقاومت پیوستگی مناسب بین دو مصالح ایجاد می گردد؛ بنابراین، در کاربردهای عملی بایستی توجه گردد که آماده سازی سطحی مناسبی بر روی بتن پایه انجام گیرد.
- ۲- از میان روش های مختلف آماده سازی سطحی، روش سند بلاست کردن، بیشترین مقاومت پیوستگی را به دست می دهد؛ بنابراین، استفاده از این روش در کاربردهای عملی توصیه می شود. البته در صورتی که انجام این روش امکان پذیر نباشد، استفاده از روش شیار زدن نیز با جزییاتی که در این مطالعه انجام شده است؛ مطابق جدول ACI، مقاومت پیوستگی مناسبی را ایجاد می کند و می تواند در عمل کاربردی باشد.
- ۳- استفاده از برس سیمی زدن با استفاده از دستگاه فرز برای آماده سازی سطحی، برخلاف انتظار اولیه، تأثیر مناسبی بر روی مقاومت پیوستگی بین بتن فوق توانمند و بتن پایه نداشته و بنابراین برای کاربردهای عملی توصیه نمی گردد.

## ۶- مراجع

- 1- Richard, P., and Cheyrezy, M., 1995, **Composition of reactive powder concretes**, Cement and concrete research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511.
- 2- Cheyrezy, M., Maret, V., and Frouin, L., 1995, **Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete)**, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1491-1500.
- 3- Talebinejad, I., Bassam, S. A., Iranmanesh, A., and Shekarchizadeh, M., 2004, **Optimizing mix proportions of normal weight reactive powder concrete with strengths of 200–350 MPa. In Ultra high performance concrete (UHPC)**, international symposium on ultra-high performance concrete, pp. 133-141.
- 4-Brühwiler, E., and Denarié, E., 2013, **Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete**, Structural Engineering International, Vol.23, No.4, pp.450-457.
- 5-Noshiravani, T., and Brühwiler, E., 2013, **Experimental investigation on reinforced ultra-high-performance fiber-reinforced concrete composite beams subjected to combined bending and shear**, ACI Structural Journal, Vol.110, No.2, pp.251.
- 6- Habel, K., Denarié, E., and Brühwiler, E., 2006, **Structural response of elements combining ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes and reinforced concrete**, Journal of Structural Engineering, Vol.132, No.11, pp.1793-1800.
- 7- Carbonell Muñoz, M. A., Harris, D. K., Ahlborn, T. M., and Froster, D. C., 2013, **Bond performance between ultrahigh-performance concrete and normal-strength concrete**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.26, No.8, pp.04014031.
- 8- Julio, E. N., Branco, F. A., and Silva, V. D., 2004, **Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface**, Construction and Building Materials, Vol.18, No.9, pp.675-681.



- 9- Silfwerbrand, J., 2003, **Shear bond strength in repaired concrete structures**, Materials and Structures, Vol.36, No.6, pp.419-424.
- 10-Noori, A., Shekarchi, M., Moradian, M., and Moosavi, M., 2015, **Behavior of Steel Fiber-Reinforced Cementitious Mortar and High-Performance Concrete in Triaxial Loading**, ACI Materials Journal, pp.112.
- 11- Babanajad, S. K., Farnam, Y., and Shekarchi, M., 2012, **Failure criteria and triaxial behaviour of HPFRC containing high reactivity metakaolin and silica fume**, Construction and Building Materials, Vol.29, pp.215-229.
- 12- ASTM C1583, 2004, **Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)**, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 13- ASTM C882/882M-05e1., 2005, **Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete by Slant Shear**, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 14-American Concrete Institute (ACI), 2006, **Guide for the selection of materials for the repair of concrete**, ACI 546.3R-06, Farmington Hills, MI.