



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

## مروری بر اثر اندازه سطح تماس بر مقاومت برشی در محل اتصال مصالح ترمیم کننده و بتن اولیه (مروری)

امیررضا فرجی<sup>۱</sup>، سینا اسداللهی شاه بابلی<sup>۲</sup>، مهدی دهستانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه نوشیروانی، بابل.

۲- دستیار پژوهشی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نوشیروانی، بابل.

۳- استاد و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

Amirrezafaraji ۲۷@gmail.com

### چکیده

کامپوزیت های بتن به بتن به طور گسترده در طیف وسیعی از کاربردها مانند ساختمان ها، پل ها، روسازی ها، سدها و تونل ها مورد استفاده قرار گرفته اند. با پیر شدن زیرساخت های موجود و افزایش هزینه های بازسازی، تعمیر و تقویت سازه های بتنی اهمیت بیشتری یافته است. این مقاله یک بررسی پیشرفته و اطلاعات کلیدی در مورد عملکرد ترکیب های بتن به بتن ارائه می دهد. به طور خاص، بررسی مقاومت برشی در محل اتصال ترکیب بتن به بتن بررسی و مورد بحث قرار می گیرند. روش های آزمایش توسعه یافته برای تعیین استحکام پیوند تحت ترکیب های بار مختلف نیز شرح داده شده اند. یافته ها نشان می دهد که انتخاب مناسب ترکیب لایه ای و عامل پیوند، شرایط رابط، شرایط ریخته گری و نوع آزمون و عمل آوری و همچنین تکنیک های ارزیابی نه تنها منجر به عملکرد و دوام بیشتر ساختاری می شود، بلکه باعث استفاده بهینه از مواد و هزینه ریخته گری می شود. این بررسی با هدف شفاف سازی پارامترهایی که عملکرد این کامپوزیت ها را به حداکثر می رساند.

**کلمات کلیدی:** کامپوزیت بتن-بتن، تعمیر بتن، روش های آزمایش، آزمون برش دو سطحی.

### ۱- مقدمه

امروزه کاربرد کامپوزیت های چندلایه ی بتن به بتن به طور فزاینده ای در گستره های زیادی در حال افزایش می باشد. از مهمترین و پرکاربردترین موارد استفاده از این کامپوزیت ها در تعمیر و تقویت سازه های موجود و یا اعضای سازه ای جدید مانند سازه های پیش ساخته می باشد. این کامپوزیت ها به دو صورت اتصال بتن تازه به بتن سخت شده (سازه های آسیب دیده، لایه های روسازی و تقویت سازه های موجود) و یا اتصال بتن سخت شده به بتن سخت شده (اتصال اعضای سازه های پیش ساخته و اتصال عرشه پل ها به ستون ها می باشد) اشاره نمود. بسیاری از سازه ها در سرتاسر جهان در حال پیر شدن هستند و به پایان عمر سرویس دهی خود نزدیک می شوند بنابراین این تعمیر و تقویت این سازه ها امری حیاتی و مهم است. براساس گزارش زیرساخت آمریکا در آمریکا ۴۶۱۵۴ (۷,۵٪) عدد از ۶۱۷۰۰۰ عدد از پل های ملی آمریکا از نظر ساختاری ناقص هستند و نیاز به توانبخشی فوری دارند (Infrastructure Report CARD, ۲۰۲۱). در اروپا نیز بیش از ۵۰ درصد از پل ها دارای



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

سنی بیش از ۵۰ سال می باشند و باری بیشتر از باری که برای آنها طراحی شدند را در حال تحمل می باشند. (K.C. Brady et al, ۲۰۱۵). اگر یک روکش بتنی بدرستی طراحی، ساخته و اجرا شود می تواند همراه با مزایای اقتصادی و محیط زیستی عمر مفید سازه را تا ۳۰ سال نیز افزایش دهد (D. Harrington et al, ۲۰۰۷) و همین عوامل باعث افزایش محبوبیت این نوع از ترمیم و بازسازی شده است. استفاده از روکش بتنی برای ترمیم و تقویت سازه ها در امریکا از ۲٪ درصد از کل رو سازی های انجام شده به ۱۲ درصد رسیده است (J. Gross, D. Harrington, ۲۰۱۸). در حالی که استفاده از روکش بتنی یک راه حل ایدآل برای ترمیم و تقویت به نظر می رسد ولی باید این موضوع را نیز در نظر داشته باشیم که طبق تخمین (B. Mather, J. Warner, ۲۰۰۳) تا ۵۰ درصد از تعمیر ها با استفاده از روکشی بتنی با شکست مواجه شده است دلیل این عملکرد ضعیف را میتوان انتخاب نامناسب مصالح، نامناسب بودن روش ساخت و یا ترکیبی از هر دو عامل دانست. (( P.H. Emmons, ۱۹۹۴ )) (F. Saucier, M. Pigeon, ۱۹۹۱), (E.N.B.S. Júlio et al, ۲۰۰۶). این نوع از اتصال های بتن در کنار بتن باید استحکام سطحی کافی برای انتقال بار بین قطعات داشته باشند تا رفتاری یکپارچه مابین آنها ایجاد شود. اما استحکام پیوند ضعیف میتواند منجر به تولید و انتقال تنش های نامناسب و سرانجام جدا شدن زودرس و از بین رفتن اتصال بشوند. به همین دلیل است که سطح اتصال بتن به بتن در این سیستم به عنوان یک محل ضعف در نظر گرفته می شود که در صورت عدم انتقال نیرو کل فرآیند ترمیم و تعمیر را زیر سوال خواهد برد و باعث کاهش طول عمر سازه میشود (E. Bonaldo, ۲۰۰۵). خرابی های معمول در اتصالات بتن به بتن عبارتند از: لایه لایه شدن بتن بستر و یا ترک خوردن روکش که اغلب به انقباض غیر یکنواخت در شرایط محدود نسبت داده می شود ((Y. He, ۲۰۱۷), (P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, ۲۰۱۳), (C. Zanotti, N. Randl, ۲۰۱۹)). این ترک ها معمولا از لبه های پوشش بتنی شروع شده و به سمت مرکز منتشر می شود و باعث جدا شدن موضعی پوشش از بستر بتنی و در نهایت از دست دادن ظرفیت انتقال بار می شوند (H. Al-musawi et al, ۲۰۲۲). تلاش های تحقیقاتی بر روی رابطه بتن با بتن تانگون عمدتا بر بهبود و ارزیابی پیوند بین لایه مختلف بتن متمرکز بوده است و برای ارزیابی این پیوند نیز آزمون های گوناگون انجام شده است. این مقاله یک بررسی پیشرفته از تحقیقات تجربی و عددی در مورد آزمایش برش دوسطحی و استحکام پیوند بتن به بتن با تمرکز بروی پوشش های بتن تازه بر روی بسترهای بتنی به دلیل استقبال و گسترش بیشتر می باشد.

## ۲- روش تحقیق

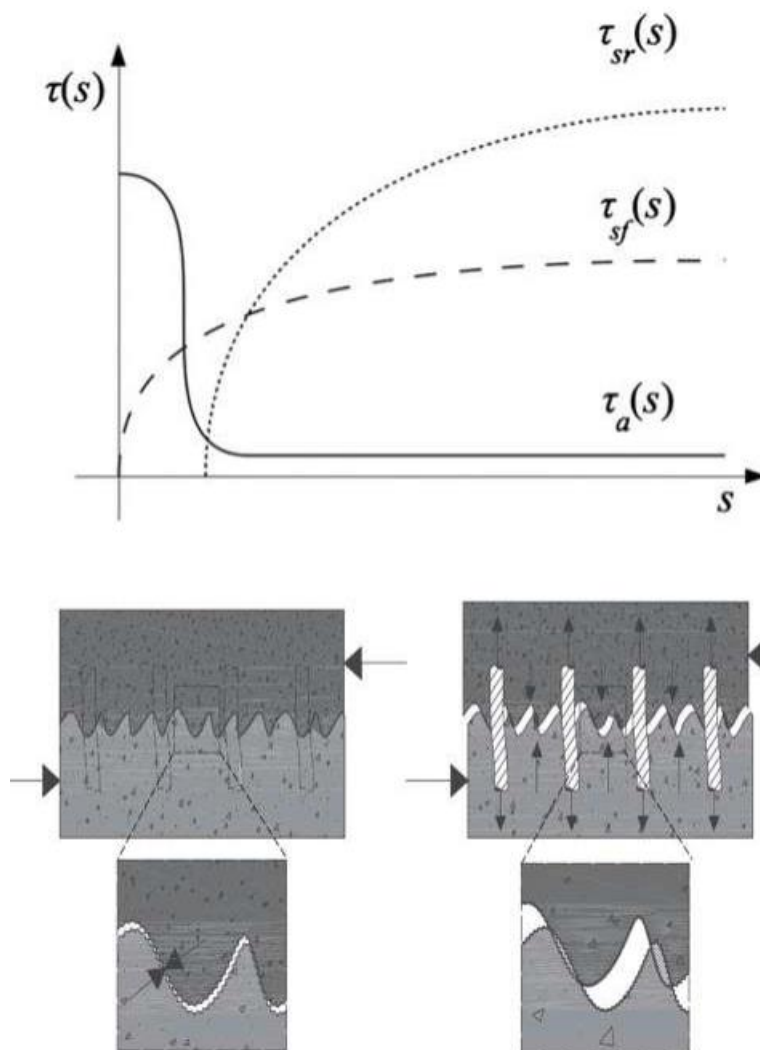
در این مقاله از روش تحقیق سیستماتیک (SLR) (D. Tranfield et al, ۲۰۰۳) که به عنوان یکی از تکنیک های رایج برای خلاصه کردن یافته های تحقیق در حوزه مهندسی ساختمان و مصالح شناسی است ((A. Behnood, ۲۰۱۹), (A. Behnood, ۲۰۲۰)) استفاده شده است. در کنار روش SLR یک رویکرد ۵ مرحله ای شامل: (۱) تعریف مسئله و انتخاب موضوع مطالعه، (۲) انتخاب پایگاه داده برای جمع آوری اطلاعات مورد نیاز و مرتبط، (۳) انتخاب مدارک مرتبط با موضوع مطالعه، (۴) تجزیه و تحلیل و ارزیابی اطلاعات انتخاب شده، (۵) ترکیب یافته های مراحل مراحل قبلی. در این پروژه موضوع مورد بررسی پیوند بتن به بتن در قالب ترمیم و تعمیر و به طور مشخص تر بررسی مقاومت برشی و آزمایش برش دو سطحی بوده است. و همچنین از سه منبع کتابشناختی معروف (Google scholar, Web of Sciene, and Scopus) برای جمع آوری اطلاعات استفاده شده است.

## ۳- مکانیسم های پیوند بتن-بتن

نظریه اصطکاک برشی یکی از پرکاربردترین رویکردها است. ارزیابی مقاومت برشی بین قطعات بتنی توسط بیرکلند و بیرکلند در سال ۱۹۶۶ (P.W. Birkeland, H.W. Birkeland, ۱۹۶۶) پیشنهاد شد و توسط اکثر استانداردهای اصلی نظیر ACI ۳۱۸-



P.M.D. Santos, ) جولیه و Eurocode ۲، ۱۴، fib Model code پذیرفته شده است. و بعدها مطالعات سانتوس و جولیه (P.M.D. Santos, ) و رندل (N. Randl, ۲۰۱۳) منجر به تکامل این نظریه و همچنین باعث تغییرات قابل توجهی در استاندارد ها شدند. علاوه بر این هریس و همکاران (K.A. Harries, ۲۰۱۳) که به طور جامع ماهیت رفتار اصطکاک برشی را از طریق یک بررسی عمیق که با یک مطالعه تجربی همراه بود تکمیل کردند. مطابق با نظریه اصطکاک برشی، مکانیسم انتقال بار بین اعضای بتنی توسط سه جزء اصلی ((N. Randl, ۲۰۱۳)، (fib Model code, ۲۰۱۰): (۱) چسبندگی اتصالات و درگیری مکانیکی، (۲) اصطکاک برشی، (۳) اثر مقاومت برشی ایجاد شده در میلگرد (شکل ۱) (N. Randl, ۱۹۹۹). چسبندگی عمدتاً با پیوندهای اتمی و مولکولی (پیوند اولیه و ثانویه)، و همچنین نیروهای همبستگی که مقاومت چسبندگی بالای سیمان سخت شده را در سطح مشترک توضیح میدهند. (A. Goyal et al, ۲۰۲۱). درگیری مکانیکی نوعی چسبندگیست که در سطح میکروسکوپی رخ می دهد. این به دلیل درگیری مکانیکی ویژگی های میکروسکوپی دو سطح و اصطکاک لغزشی بین سطوح ایجاد می شود و تغییر شکل برگشت ناپذیر ماتریس نیز عامل مهمی در به هم پیوستگی مکانیکی است. (J.C. Walraven, ۱۹۸۱). چسبندگی و درگیری مکانیکی تحت تاثیر عوامل متعددی از جمله ترکیب بتن، نوع عامل چسبندگی، زبری سطحی و در مقیاس میکرو ویژگی های منطقه انتقال سطحی (ITZ)، ریزترک ها و عوامل مرتبط میکرومکانیکی قرار دارند. انتقال برش مرتبط با نوع عامل چسبندگی و درگیری مکانیکی در مقادیر لغزش برشی بسیار کوچک (معمولاً کمتر از ۰،۰۵ میلیمتر (fib Model Code, ۲۰۱۰)) موثر می باشد. و انتظار می رود با افزایش لغزش برشی در امتداد فصل مشترک، همانطور که در شکل (۱) نیز مشخص است، کاهش یابد ((P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, ۲۰۱۲)، (K. )، (Zilch, R. Reinecke, ۲۰۰۰)). با اعمال نیروی نرمال فشاری به سطح مشترک، اصطکاک برشی، نیرویی که در برابر جابه جایی نسبی لایه های بتنی موازی با سطح اشتراک آنها مقاومت میکند به مکانیسم اصلی انتقال بار در لغزش متوسط پس از تخریب چسبندگی تبدیل می شود. اصطکاک برشی عمدتاً به زبری سطح (در مقیاس ماکرو) و میزان تنش معمولی در سطح مشترک بستگی دارد. اثر مقاومت برشی ایجاد شده در میلگرد سومین عامل مقاوم است و زمانی فعال می شود که آرماتور فولادی در سرتاسر سطح مشترک قرارگیرد و در برابر خمش مقاومت کند (fib Model Code, ۲۰۱۰). آرماتور فولادی به گونه ای طراحی شده است که به مکانیزم غالب انتقال بار در مقدار لغزش بالاتر تبدیل شود. در این حالت لغزش برشی نسبی بین لایه های بتنی در امتداد سطح مشترک منجر به جابجایی جانبی انتهای بالایی و پایینی میلگردهای تقویت کننده فولادی متقاطع می شود که باعث ایجاد تنش های خمشی می شود که توسط نیروهای کششی محوری ایجاد شده در آرماتور به دلیل باز شدن درز روی هم قرار می گیرد. ((fib Model Code, ۲۰۱۰)، (N. Randl, ۲۰۱۳)). این مقاومت در برابر خمش را اثر مقاومت برشی ایجاد شده در میلگرد می نامند. بزرگی تنش های مقاوم به نوع، در صد. مقاومت خمشی آرماتور تقاطع بستگی دارد.

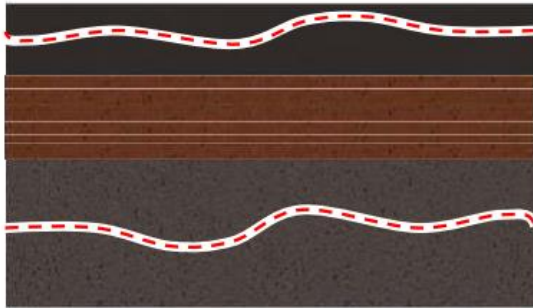


شکل شماره (۲): عوامل موثر در مکانیسم انتقال بار بتن-بتن.  $\tau_a(s)$  سهم چسبندگی،  $\tau_{sf}(s)$  سهم اصطکاک برشی و  $\tau_{sj}(s)$  سهم آرماتور برشی برای تنش های برشی. (P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, ۲۰۱۲)، (K. Zilch, R. Reinecke, ۲۰۰۰)، (H. Fernandes et al, ۲۰۱۷)

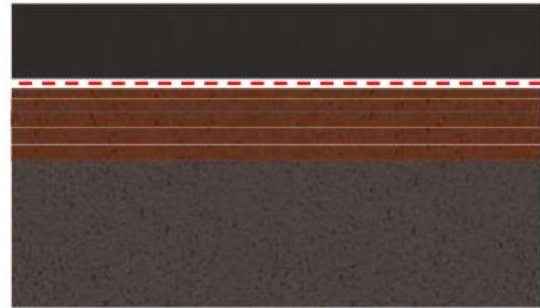
## ۴-روش های آزمون

روش های آزمایش مختلفی همراه با بارگذاری متفاوت برای توصیف پیوند بتن-بتن ایجاد شده اند. تفاوت اصلی بین این روش ها تنش وارد شده به لایه های رابط و بتنی است زیرا هر یک از این روش های آزمایش دارای ویژگی های خاصی هستند. مقدار نیروی تحمل شده توسط پیوند بستگی زیادی به نوع آزمایش دارد. ممیز و همکاران (A. Momayez et al, ۲۰۰۵) نشان دادند که استحکام پیوند سطحی بسته به نوع آزمایش می تواند تا ۸ مرتبه تغییر کند، و در نتیجه گرفت که روش آزمایش باید تا حد امکان با شرایط واقعی (مطلوب) مطابقت داشته باشد. علاوه بر این، حالت های شکست مشاهده شده در این روش های آزمایشی به شرایط بارگذاری و مواد مورد استفاده بستگی دارد. به طور کلی، همانطور که در شکل شماره (۲) نشان داده شده است، حالت های شکست در ترکیب های بتن به بتن را می توان به دو دسته شکست در محل اتصال بتن با بتن و یا شکست در هر یک از بتن ها، بسته به محل قرارگیری ترک طبقه بندی کرد. اگر این مسیر شکست در یکی از بتن های حجیم واقع

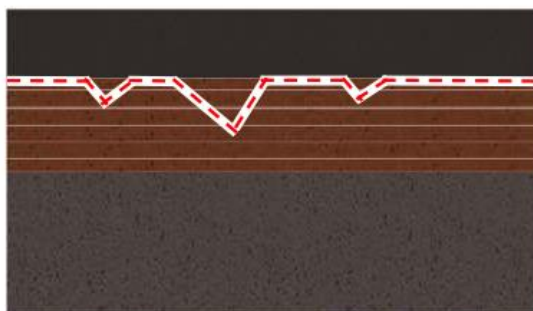
شود (یا در بتن بستر و یا در بتن رویه) بیانگر این موضوع است که محل اتصال دارای مقاومت خوبی بوده ولی اگر این ترک در خارج از محل اتصال باشد نشان از ضعف اولیه در یکی از بتن های حجیم و یا وجود ریز ترک ها و عوامل متعددی باشد.



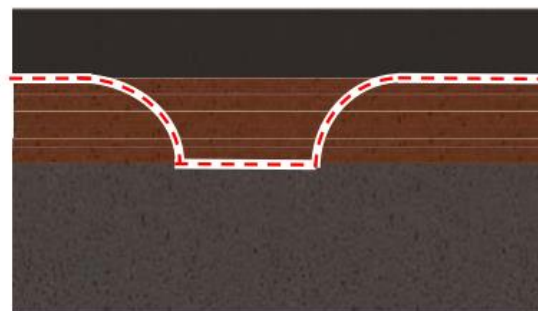
(a) Cohesive failure



(b) Interfacial failure



(c) Serrated interfacial failure



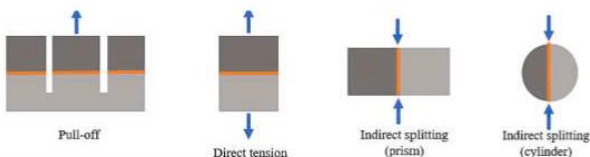
(d) Alternating crack

شکل شماره (۲): شکل شماتیک از حالت های مختلف خرابی بر اساس مکان های مسیر ترک. خطوط نقطه چین نشان دهنده محل تقریبی مسیر ترک اصلی است. (A.R. Akisanya, N.A. Fleck, ۱۹۹۲)، (D. Daneshvar et al, ۲۰۲۱)

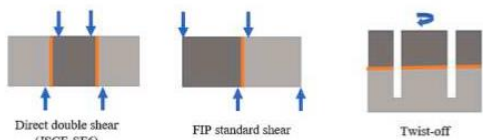
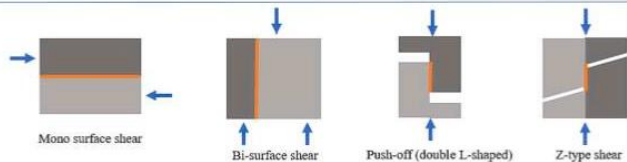
آزمایش های انجام شده برای بررسی استحکام پیوند مابین دو نمونه بتنی را میتوان با دو پارامتر نوع نیرو و محل اعمال نیرو نسبت به یکدیگر تمییز داد شکل شماره (۳).

Groups based on predominant load applied to the interface:

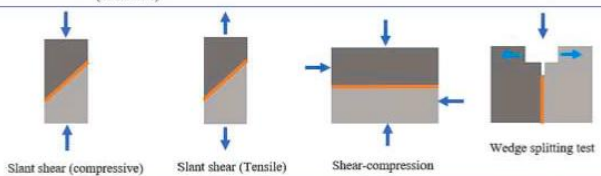
**I. Tensile**



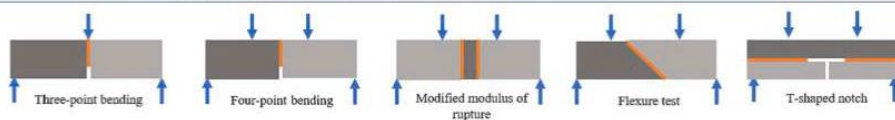
**II. Shear**



**III. Mixed-mode**



**III. Mixed-mode (Bending)**



شکل شماره (۳): نمای شماتیک از روش های مختلف آزمون مورد استفاده برای ارزیابی استحکام پیوند بتن-بتن

در جدول شماره (۱) توضیحات کاملی از آزمایش های شکل (۳) آورده شده است و همچنین مقادیری که در هر یک آزمون ها مورد بررسی قرار میگیرد به همراه مراجع آورده شده است.

جدول شماره (۱): خلاصه ای از روش های آزمون

Category	Test method	References	Concrete substrate	Concrete overlay	Studied parameters
"Tension"	Pull-off	(C. Zanotti, N. Randl, 2019), (A. Momayez et al, 2005), (M. Valipour, K.H. Khayat, 2020), (M. Rith et al, 2016), (P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, 2007)	NC	NC, UHPC, URH-LMC, URHAPMC, NSM, HSM	Material strength, overlay composition, age, fiber reinforcement, bonding agent, sample geometry, test setup
	Indirect splitting	(C. Zanotti, N. Randl, 2019), (D. Daneshvar et al, 2021), (P.M.D. Santos, E.N.B.S. Julio, 2011), (A.D. Espeche, J. Leon, 2011), (B.A. Tayeh et al, 2012)	NC	NC, UHPC, NSM, HSM	Material strength, differential shrinkage and stiffness, permeability, overlay modification, bonding agent, surface roughness, fiber reinforcement, failure criterion
"Shear"	Bi-Surface	(A. Momayez et al, 2005), (D.S. Santos et al, 2012), (A. Valikhani et al, 2020), (A. Momayez et al, 2004)	NC	NC, UHPC, NSM	Material strength, crossing reinforcement, differential shrinkage and stiffness, permeability, overlay modification, bonding agent, surface roughness, surface moisture, fiber reinforcement
	Push-off	(H.O. Jang et al, 2017), (A.A. Semendary et al, 2020), (J. Liu et al, 2020), (D. Guan et al, 2021)	NC, HSC, UHPC	NC, UHPC	Material strength, castellated key, dowel bar, overlay modification, surface roughness, fiber reinforcement
	Direct shear	(M.E. Mohamad et al, 2015), (M. Roy et al, 2014), (I. Ray et al, 2004)	NC	NC, HPFRC	Material strength, crossing reinforcement, overlay modification, surface roughness, curing temperature, fiber reinforcement
	Direct double shear	(Y. Zhang et al, 2020), (Y. Ju et al, 2020)	NC	UHPC, RPC	Material strength, age, overlay modification, W/B ratio, surface roughness, fiber reinforcement, curing condition, surface moisture, interface stress state
"Mixed mode"	Slant shear	(C. Zanotti, N. Randl, 2019), (B.A. Tayeh et al, 2012), (S. Feng et al, 2020), (R. Saldanha et al, 2013), (A.M. Diab et al, 2017), (C. Zanotti et al, 2014), (C. Zanotti, N. Banthia, 2016)	NC, HPC, UHPC	NC, HPC, UHPC, URH-LMC, URH-APMC, NSM and HSM	Material strength, overlay composition, crossing reinforcement, differential shrinkage and stiffness, permeability, overlay modification, bonding agent, surface roughness, surface moisture, fiber reinforcement, crossing reinforcement, sample geometry, test setup, failure criterion
	Wedge splitting	(D. Daneshvar et al, 2021), (E.K. Tschegg et al, 2009), (B. Chmielewska et al, 2015), (E.K. Tschegg et al, 2000), (X. Wang, M. Petrú, 2019)	NC, HPC	NC, PCCM	Material strength, crossing reinforcement, overlay modification, surface roughness, bonding agent, casting and curing temperatures, freeze-thaw cycles, fiber reinforcement
	Three-point bending	(M. Farzad et al, 2019), (K. Gadi, A. Guettala, 2017), (A. Mallat, A. Alliche, 2011), (Y.S. Wang et al, 2021)	NC, OM	NC, UHPC, SC, FRM, Geopolymer mortar	Material strength, overlay and substrate modification, surface roughness, surface moisture, fiber reinforcement
	Four-point bending	(P. Ganesh, A. Ramachandra Murthy, 2020), (M. Safdar et al, 2016), (H. Do Yun, 2013)	NC	UHPC, SHCC	Material strength, overlay modification, thickness, freeze-thaw cycles, nature of bond, fiber reinforcement

NC: normal concrete; HPC: high-performance concrete; UHPC: ultra high-performance concrete; URH-LMC: ultra-rapid hardening latex-modified concrete; URHAPMC: ultra-rapid hardening acrylic polymer-modified concrete; NSM: normal strength mortar; HSM: high strength mortar; HPFRC: ultra high-performance fiberreinforced concrete; OM: ordinary mortar; FRM: fiber reinforced mortar; SC: sand concrete; PCCM: polymer-cement modified mortar; SHCC: strain hardening cement composite.

## ۵- آزمایش های برشی

تنش های برشی در پیوند های مشترک عمدتاً به دلیل نیروهای برشی و انقباض بتن و یا ترکیبی از این دو ایجاد می شود و به همین دلیل داشتن مقاومت برشی در سطح مشترک پیوند ها امری ضروریست. برش خالص بروی پیوند های رابطه بتن و بتن با استفاده از آزمون های پیچش یا برش مستقیم برای تعیین این مقاومت استفاده می شود. با این حال دستیابی به روش خالص در عمل به دلیل وجود گشتاور های خمشی در روش های آمایشی چالش بر انگیز است. آزمایش های بساری تا کنون برای به دست آوردن مقدار برش تحمل شده در اتصال بتن به بتن انجام گردیده است که در ادامه به تشریح آزمایش برش دو سطحی می پردازیم و از نتایج بررسی و مقایسه چهار عدد آزمون ممیز و همکاران (A. Momayez, ۲۰۰۵) استفاده میکنیم.

## ۶- تشریح آزمون Bi-Surface Shera test

در روش برشی Bi-Surface، ماده تعمیری یک سوم نمونه را تشکیل می دهد. به عبارت دیگر، با استفاده از قالب های مکعبی ۱۵۰ میلی متری (۶ اینچ)، مکعبی با اندازه پایه ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی متر (۴ و ۶ اینچ) و ارتفاع ۱۵۰ میلی متر (۶ اینچ) به عنوان بتن قدیمی یا زیرلایه ریخته می شوند (شکل شماره ۴) مواد تعمیری در مکعبی با ابعاد ۵۰ و ۱۵۰ میلیمتر (۶ و ۲ اینچ) و ارتفاع ۱۵۰ میلیمتر (۶ اینچ) ریخته می شوند و به بستر بتنی چسبانده می شوند (شکل ۴). بارگذاری روی این نمونه ها باعث شکست برشی می شود. این شکست در عمل در مقایسه با شکست برشی فشاری که در آزمایش های برشی سبب تولید می شود، رایج تر است.



a) Styrofoam to form block-out

b) Ready to place repair material

شکل شماره (۴): ساخت نمونه های مکعبی برای آزمایش برش دو سطحی: شکل (a) استفاده از استایروفوم برای ساخت نمونه بستر، (b) استفاده از استایروفوم برای ساخت نمونه رویه

ممیز و همکارن (A. Momayez, ۲۰۰۵) به بررسی چهار نوع آزمایش و در دو دسته بندی زبری کم و شدید و با مواد ترمیم مختلف پرداخته اند که در ادامه خلاصه ای از این آزمایش ذکر میشود. آماده سازی نمونه از طرح اختلاط یکسان برای بتن در بخش بستر تمام نمونه ها استفاده شد. نسبت اختلاط بر اساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۵ مگاپاسکال، و درصد آب به سیمان ۰,۴۶، سیمان پرتلند تیپ ۲ یا عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و حداکثر خرد شدگی سنگدانه ۱۶ میلی متر (۰,۶۳ اینچ) می باشد. بتن در آزمایشگاه توسط میکسر ۲۰۰ لیتری ساخته شد و در قالب های فولادی روغن کاری شده قرار گرفت. در صورت لزوم، از استایروفوم برای تشکیل بلوک آوت ها استفاده شد (شکل شماره ۴). نمونه ها ۲۴ ساعت پس از ریخته گری از قالب ها خارج شده و از هرگونه گرد و غبار یا ذرات اضافی پاکسازی شدند. در ۲ روز اول ریخته گری، سطوح ترمیم کننده در یکی از دو دسته زبر شدند: کم یا زیاد. دسته کم زبری با استفاده از سیم فولادی به دست آمد دامنه تخمینی زبری ۳-۴ میلی متر (۰,۱۲-۰,۱۶ اینچ) بود. با استفاده از یک رویکرد مشابه، رده زبری زیاد نیز با دامنه ۷-۸ میلی متر (۰,۲۷-۰,۳۱ اینچ) بدست آمد. شکل شماره (۵).





شکل شماره (۵): شکل سمت چپ بیانگر سطح تماس با زیری کم و شکل سمت راست بیانگر سطح تماس با زیری زیاد است

Specimen group	Repair material	f <sub>t</sub>	Roughness	Pull-off (2 samples)		Splitting prism (4 samples)			Bi-surface shear (4 samples)			Slant shear (4 samples)		
				$\sigma$	N	$\sigma$	COV	N	$\sigma$	COV	N	$\sigma$	COV	N
RL	Reference	36	L	1.18	2	1.19	7.3	4	2.4	9.9	4	8.12	15.8	4
RH	(0% SF)		H	1.32	2	1.36	8.4	4	3.00	10.8	4	11.13	9.8	4
5L	5% SF	37	L	1.25	2	1.27	6.4	4	2.66	7.6	4	9.18	9.8	4
5H			H	1.38	2	1.44	7.2	4	3.29	10.4	4	11.9	8.4	4
7L	7% SF	41	L	1.37	2	1.38	10.4	4	2.98	6.5	4	10.32	9.4	3
7H			H	1.50	2	1.62	9.2	4	3.63	9.1	4	13.2	4.7	2
10L	10% SF	43	L	1.38	2	1.39	9.8	4	3.00	11.8	4	10.16	11.6	3
10H			H	1.53	2	1.64	11.2	4	3.66	13.3	4	13.02	7.3	2
KL	Modified	35	L	1.82	2	1.95	10.6	4	3.41	10.8	4	11.59	10.8	3
KL	by K100		H	1.95	2	2.14	10.9	4	3.82	7.2	4	13.56	6.1	2
SL	Modified	38	L	2.38	2	2.69	9.7	4	3.82	11.1	4	12.19	12.2	2
SH	by SBR		H	2.50	2	2.90	9.6	4	4.16	12.2	2	13.53	7.7	2
C	Continuous	36	-	3.18	-	3.97	-	-	4.50	-	-	14.11	-	-

$\sigma$  = Mean bond strength (MPa), N = number of samples failed in bond, SF = silica fume, K100 = K100 polymer adhesive, SBR = styrene butadiene resin, COV = coefficient of variation (%).

شکل شماره (۶): خلاصه ای از آزمایش های انجام شده توسط ممیز و همکاران (A. Momayez, ۲۰۰۵)

استحکام باند کوتاه مدت ۱۶۴ عدد نمونه ساخته شده با شش ماده مختلف تعمیرگذارش شده است. نمونه ها تحت چهار رویکرد مورد آزمایش قرار گرفتند که هر یک وضعیت تنش متفاوتی را نشان میدهند. اطلاعات استخراج شده از آزمایش ممیز و همکاران (A. Momayez, ۲۰۰۵). به این شرح میباشد. استحکام باند تا حد زیادی به روش آزمایش مورد استفاده بستگی دارد، در حالی که COV برای هر نوع آزمایش قابل قبول بود ولی استحکام پیوند آزمایش Bi-Surface Shear تا هشت برابر بیشتر از موارد دیگر بود. با توجه به این موضوع بهتر است نوع آزمایش بگونه ای تعیین شود که شبیه ساز شرایط واقعی و محیطی باشد تا نتایج بدست آمده قابلیت استناد را دارا باشند (A. Momayez, ۲۰۰۵). استحکام پیوند با روش آزمایش بترتیب



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

۲۹۸۰-۷۷۸۶ISSN

کاهش میابد: برش مایل، برش دوسطحی، شکافتن و کشش. (۲۷) آماده سازی سطح ناهموار منجر به استحکام پیوند بالاتری می شود (A. Momayez, ۲۰۰۵). آزمایش برشی Bi-Surface دارای سهولت بیشتر است و نتایج با ثبات تری را ارائه میدهد.

## ۷- خلاصه نتیجه گیری

در طول سه دهه گذشته، ترکیب های بتن به بتن در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گرفته اند. ادبیات گسترده منتشر شده در این دوره اهمیت تکنیک های تعمیر را نشان می دهد، اما ممکن است نتایج گیج کننده و حتی متناقضی را نیز ارائه دهد. هدف این مقاله ارائه یک تجزیه و تحلیل قابل دسترس از ادبیات از طریق (۱) خلاصه ای جامع از روش های آزمایشی مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد ترکیب های بتن به بتن و (۲) بررسی سیستماتیک عوامل مؤثر بر این خصوصیات. یافته های اصلی را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- آزمایش های مکانیکی برای مشخص کردن کامپوزیت های بتن به بتن شامل آزمایش های برش مایل، آزمایش های برش مستقیم، آزمایش های برش دو سطحی، آزمایش های کشش، آزمایش های کشش شکافتن، آزمایش های خمش سه نقطه‌ای، آزمایش های شکاف گوه، و رویکرد پوشش شکست. اخیراً، آزمایش های غیرمخرب نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از ترکیبی از روش های آزمای، به جای یک آزمون واحد، برای به دست آوردن قدرت پیوند روش قابل اعتماد تری است تا استخراج نتایج از یک روش آزمایش.

- حالت شکست در ترکیب های بتن به بتن، بسته به محل، به دو دسته شکست در محل اتصال بتن به بتن و یا شکست در هر یک از لایه های بستر و یا رویه دسته بندی نمود..

- عوامل زیادی بر عملکرد ترکیب بتن به بتن تأثیر می گذارد. از جمله نوع روش آزمایش میزان زبری، عدم تطابق در خواص/رفتار لایه های بتن (از جمله جمع شدگی)، نوع بتن (LWAC, SCC, RAC, ECC, UHPC).



## مراجع

۱. A. Behnood, A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties, *J. Clean. Prod.* ۲۵۹ (۲۰۲۰), ۱۲۰۸۱۷. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120817>
۲. A. Behnood, Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review, *J. Clean. Prod.* ۲۳۱ (۲۰۱۹) ۱۷۱-۱۸۲, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>.
۳. A. Goyal, I. Palaia, K. Ioannidou, F.J. Ulm, H. van Damme, R.J.M. Pellenq, E. Trizac, E. Del Gado, The physics of cement cohesion, *Sci. Adv.* ۷ (۲۰۲۱) ۱-۱۲, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg5882>.
۴. A. Mallat, A. Alliche, Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system, *Constr. Build. Mater.* ۲۵ (۲۰۱۱) ۱۵۸۷-۱۵۹۵ <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.017>
۵. A. Momayez, A.A. Ramezaniapour, H. Rajaie, M.R. Ehsani, Bi-surface shear test for evaluating bond between existing and new concrete, *ACI Mater. J.* ۱۰۱ (۲۰۰۴) ۹۹-۱۰۶. <https://doi.org/10.14359/13.045>.
۶. A. Momayez, M.R. Ehsani, A.A. Ramezaniapour, H. Rajaie, Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cem. Concr. Res.* ۳۵ (۲۰۰۵) ۷۴۸-۷۵۷, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.027>.
۷. A. Valikhani, A.J. Jahromi, I.M. Mantawy, A. Azizinamini, Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application, *Constr. Build. Mater.* ۲۳۸ (۲۰۲۰), ۱۱۷۷۵۳, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117753>
۸. A.A. Semendary, W.K. Hamid, E.P. Steinberg, I. Khoury, Shear friction performance between high strength concrete (HSC) and ultra high performance concrete (UHPC) for bridge connection applications, *Eng. Struct.* ۲۰۵ (۲۰۲۰), ۱۱۰۱۲۲, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110122>
۹. A.D. Espeche, J. Leon, Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test, *Constr. Build. Mater.* ۲۵ (۲۰۱۱) ۱۲۲۲-۱۲۳۵, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.032>
۱۰. A.M. Diab, A.E.M. Abd Elmoaty, M.R. Tag Eldin, Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete, *Constr. Build. Mater.* ۱۳۰ (۲۰۱۷) ۷۳-۸۲, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.023>
۱۱. A.R. Akisanya, N.A. Fleck, Fracture of Adhesive Joints, *Int. J. Fract.* ۵۸ (۱۹۹۲) ۹۳-۱۱۴
۱۲. B. Chmielewska, G. Adamczewski, R. Wang, Z.H. Yang, P. Wang, Application of Wedge Splitting Test for Evaluation of the Bond Strength in Repair System Alumina Cement Concrete vs. PCC Mortar, *Adv. Mater. Res.* ۱۱۲۹ (۲۰۱۵) ۴۰۱-۴۰۸. <https://doi.org/10.4۰۲۸/www.scientific.net/amr.1129.401>
۱۳. B. Mather, J. Warner, Why do Concrete Repairs Fail (۲۰۰۳). <http://aec.engr.wisc.edu/resources/rsrc.۰۷.html>.
۱۴. B.A. Tayeh, B.H. Abu Bakar, M.A. Megat Johari, Y.L. Voo, Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay, *Constr. Build. Mater.* ۳۶ (۲۰۱۲) ۵۳۸-۵۴۸, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013>
۱۵. C. Zanotti, N. Banthia, G. Plizzari, A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs, *Cem. Concr. Res.* ۶۳ (۲۰۱۴) ۱۱۷-۱۲۶, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.008>.
۱۶. C. Zanotti, N. Banthia, Modified slant shear cylinder test for inherent characterization of bond in concrete repairs, *Indian Concr. J.* ۹۰ (۲۰۱۶) ۳۲-۴۰.
۱۷. C. Zanotti, N. Randl, Are concrete-concrete bond tests comparable? *Cem. Concr. Compos.* ۹۹ (۲۰۱۹) ۸۰-۸۸, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.012>
۱۸. D. Daneshvar, K. Deix, A. Robisson, Effect of casting and curing temperature on the interfacial bond strength of epoxy bonded concretes, *Constr. Build. Mater.* ۳۰۷ (۲۰۲۱), ۱۲۴۳۲۸, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124328>



۱۹. D. Guan, J. Liu, C. Jiang, Z. Chen, Z. Guo, Shear behaviour of the UHPC-NSC interface with castellated keys: Effects of castellated key dimension and dowel rebar, *Structures*. ۳۱ (۲۰۲۱) ۱۷۲-۱۸۱, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.088>.
۲۰. D. Harrington, D. DeGraaf, R. Riley, R.O. Rasmussen, J. Grove, J. Mack, *Guide to Concrete Overlay Solutions*, ۲۰۰۷
۲۱. D. Tranfield, D. Denyer, P. Smart, Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review, *Br. J. Manag.* ۱۴ (۲۰۰۳) ۲۰۷-۲۲۲, <https://doi.org/10.1111/1467-8851.00375>.
۲۲. D.S. Santos, P.M.D. Santos, D. Dias-Da-Costa, Effect of surface preparation and bonding agent on the concrete-to-concrete interface strength, *Constr. Build. Mater.* ۳۷ (۲۰۱۲) ۱۰۲-۱۱۰, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.028>
۲۳. E. Bonaldo, J.A.O. Barros, P.B. Lourenço, Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing, *Int. J. Adhes. Adhes.* ۲۵ (۲۰۰۵) ۴۶۳-۴۷۴, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.01.002>
۲۴. E.K. Tschegg, K.T. Fendt, C. Manhart, H. Harmuth, Uniaxial and biaxial fracture behaviour of refractory materials, *Eng. Fract. Mech.* ۷۶ (۲۰۰۹) ۲۲۴۹-۲۲۵۹, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.07.011>
۲۵. E.K. Tschegg, M. Ingruber, C.H. Surber, F. Monger, Factors influencing fracture behavior of old-new concrete bonds, *ACI Struct. J.* ۹۷ (۲۰۰۰) ۴۴۷-۴۵۳. <https://doi.org/10.14359/14409>.
۲۶. E.N.B.S. Júlio, F.A.B. Branco, V.D. Silva, J.F. Lourenço, Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate, *Build. Environ.* ۴۱ (۲۰۰۶) ۱۹۳۴-۱۹۳۹, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.023>
۲۷. F. Saucier, M. Pigeon, Durability of New-to-Old Concrete Bondings, in: *Proc. ACI Int. Conf. Eval. Rehabil. Concr. Struct. Innov. Des.*, Hong Kong, ۱۹۹۱: pp. ۶۸۹-۷۰۶.
۲۸. FIB, *fib Model Code for Concrete Structures ۲۰۱۰*, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, ۲۰۱۳
۲۹. H. Al-musawi, H. Huang, M. Di Benedetti, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Effect of shrinkage on rapid hardening plain and recycled steel fibre concrete overlays, *Cem. Concr. Compos.* ۱۲۵ (۲۰۲۲), ۱۰۴۲۴۶, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104246>
۳۰. H. Do Yun, Flexural behavior and crack-damage mitigation of plain concrete beam with a strain-hardening cement composite (SHCC) layer at tensile region, *Compos. Part B Eng.* ۴۵ (۲۰۱۳) ۳۷۷-۳۸۷, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.053>
۳۱. H. Fernandes, V. Lúcio, A. Ramos, Strengthening of RC slabs with reinforced concrete overlay on the tensile face, *Eng. Struct.* ۱۳۲ (۲۰۱۷) ۵۴۰-۵۵۰, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.011>
۳۲. H.O. Jang, H.S. Lee, K. Cho, J. Kim, Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC), *Constr. Build. Mater.* ۱۵۲ (۲۰۱۷) ۱۶-۲۳, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.156>.
۳۳. I. Ray, J.F. Davalos, S. Luo, Interface evaluations of overlay-concrete bi-layer composites by a direct shear test method, *Cem. Concr. Compos.* ۲۷ (۲۰۰۵) ۳۳۹-۳۴۷, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.048>
۳۴. Infrastructure Report CARD, A comprehensive assessment of America's infrastructure, ASCE. (۲۰۲۱).
۳۵. J. Gross, D. Harrington, *Guide for the Development of Concrete Overlay Construction Documents*, ۲۰۱۸.
۳۶. J. Liu, Z. Chen, D. Guan, Z. Lin, Z. Guo, Experimental study on interfacial shear behaviour between ultra-high performance concrete and normal strength concrete in precast composite members, *Constr. Build. Mater.* ۲۶۱ (۲۰۲۰), ۱۲۰۰۰۸, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120008>.



۳۷. J. Silfwerbrand, Shear Bond Strength in Repaired Concrete Structures, *Mater. Struct.* ۳۶ (۶) (۲۰۰۳) ۴۱۹-۴۲۴
۳۸. J.C. Walraven, H.W. Reinhardt, Theory and Experiments on the Mechanical Behaviour of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading, Heron. Delft Univ. Technol. ۲۶ (۱۹۸۱)
۳۹. K. Gadri, A. Guettala, Evaluation of bond strength between sand concrete as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect), *Constr. Build. Mater.* ۱۵۷ (۲۰۱۷) ۱۱۳۳-۱۱۴۴, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.183>
۴۰. K. Zilch, R. Reinecke, Capacity of Shear Joints Between High-Strength Precast Elements and Normal-Strength Cast-in-Place Decks, in: *PCI/FHWA/FIB Int. Symp. High Perform. Concr. Concr. Institute Federal Highw. Adm. Int. Du Bet.*, ۲۰۰۰: pp. ۵۵۱-۵۶۰
۴۱. K.A. Harries, G. Zeno, B. Shahrooz, D. Wang, X. Lu, Toward an improved understanding of shear-friction behavior, *ACI Struct. J.* ۱۱۰ (۲۰۱۳) ۸۸۸-۸۹۰.
۴۲. K.C. Brady, M. O'Reilly, L. Bevc, A. Znidarič, E. O'Brien, R. Jordan, COST۳۴۵: Procedures Required for the Assessment of Highway Structures (Final Report), ۲۰۱۵
۴۳. M. Farzad, M. Shafieifar, A. Azizinamini, Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and Ultra High-Performance Concrete (UHPC), *Eng. Struct.* ۱۸۶ (۲۰۱۹) ۲۹۷-۳۰۵, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.030>
۴۴. M. Rith, Y.K. Kim, S.W. Lee, J.Y. Park, S.H. Han, Analysis of in situ bond strength of bonded concrete overlay, *Constr. Build. Mater.* ۱۱۱ (۲۰۱۶) ۱۱۱-۱۱۸, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.062>
۴۵. M. Roy, I. Ray, J.F. Davalos, High-Performance Fiber-Reinforced Concrete: Development and Evaluation as a Repairing Material, *J. Mater. Civ. Eng.* ۲۶ (۲۰۱۴) ۰۴۰۱۴۰۷۴, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000980](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000980)
۴۶. M. Safdar, T. Matsumoto, K. Kakuma, Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Compos. Struct.* ۱۵۷ (۲۰۱۶) ۴۴۸-۴۶۰, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.010>
۴۷. M. Valipour, K.H. Khayat, Debonding test method to evaluate bond strength between UHPC and concrete substrate, *Mater. Struct. Constr.* ۵۳ (۲۰۲۰) ۱-۱۰, <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1446-6>
۴۸. M.E. Mohamad, I.S. Ibrahim, R. Abdullah, A.B. Abd, A.B.H. Rahman, J.U. Kueh, Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond, *Cem. Concr. Compos.* ۵۶ (۲۰۱۵) ۱-۱۴, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.003>
۴۹. N. Randl, Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code, *Struct. Concr.* ۱۴ (۲۰۱۳) (۲۰۱۰) ۲۳۰-۲۴۱, <https://doi.org/10.1002/suco.201300003>
۵۰. N. Randl, Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness, University of Innsbruck, ۱۹۹۹. PhD thesis
۵۱. P. Ganesh, A. Ramachandra Murthy, Simulation of surface preparations to predict the bond behaviour between normal strength concrete and ultra-high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* ۲۵۰ (۲۰۲۰), ۱۱۸۸۷۱, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118871>
۵۲. P.H. Emmons, *Concrete Repair and Maintenance Illustrated*, R. S. Means Company, MA, ۱۹۹۴
۵۳. P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces, *Constr. Build. Mater.* ۳۸ (۲۰۱۳) ۹۱۲-۹۲۳, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.045>
۵۴. P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, A state-of-the-art review on shear-friction, *Eng. Struct.* ۴۵ (۲۰۱۲) ۴۳۵-۴۴۸, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.036>
۵۵. P.M.D. Santos, E.N.B.S. Júlio, Development of a laser roughness analyser to predict in situ the bond strength of concrete-to-concrete interfaces, *Mag. Concr. Res.* ۶۰ (۲۰۰۸) ۳۲۹-۳۳۷, <https://doi.org/10.1680/macr.2007.00024>



۵۶. P.M.D. Santos, E.N.B.S. Julio, Factors affecting bond between new and old concrete, *ACI Mater. J.* ۱۰۸ (۲۰۱۱) ۴۴۹-۴۵۶. <https://doi.org/10.14359/51683118>
۵۷. P.W. Birkeland, H.W. Birkeland, Connections in Precast Concrete Construction, *J. Am. Concr. Institute, ACI, Proc.* ۶۳ (۱۹۶۶) ۳۴۵-۳۶۸.
۵۸. R. Saldanha, E. Júlio, D. Dias-Da-Costa, P. Santos, A modified slant shear test designed to enforce adhesive failure, *Constr. Build. Mater.* ۴۱ (۲۰۱۳) ۶۷۳-۶۸۰, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.053>.
۵۹. S. Feng, H. Xiao, J. Geng, Bond strength between concrete substrate and repair mortar: Effect of fibre stiffness and substrate surface roughness, *Cem. Concr. Compos.* ۱۱۴ (۲۰۲۰), ۱۰۳۷۴۶, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103746>.
۶۰. X. Wang, M. Petrù, Freeze-thaw resistance of epoxy/concrete interface evaluated by a novel wedge splitting test, *Constr. Build. Mater.* ۲۱۰ (۲۰۱۹) ۴۳۴-۴۴۱, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.139>.
۶۱. Y. He, X. Zhang, R.D. Hooton, X. Zhang, Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding, *Constr. Build. Mater.* ۱۵۱ (۲۰۱۷) ۵۸۲-۵۹۰, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.049>.
۶۲. Y. Ju, T. Shen, D. Wang, Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete, *Constr. Build. Mater.* ۲۴۲ (۲۰۲۰), ۱۱۸-۲۴, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118024>
۶۳. Y. Zhang, C. Zhang, Y. Zhu, J. Cao, X. Shao, An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC, *Constr. Build. Mater.* ۲۳۶ (۲۰۲۰), ۱۱۷۴۸۰, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117480>.
۶۴. Y.S. Wang, K. Di Peng, Y. Alrefaei, J.G. Dai, The bond between geopolymer repair mortars and OPC concrete substrate: Strength and microscopic interactions, *Cem. Concr. Compos.* ۱۱۹ (۲۰۲۱), ۱۰۳۹۹۱, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103991>