

## مقایسه روش های پول آف، پوش اوت و منشور شکافت برای تعیین چسبندگی بتن خودتراکم الیافی به عنوان لایه تعمیری بر بستر بتنی

علی صدر ممتازی<sup>۱\*</sup>، اویس قدوسیان<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۲- دانشجوی دکتری- سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

### چکیده

با توجه به امکان استفاده از بتن خودتراکم - به علت عدم نیاز این نوع بتن به تراکم و جاری شدن تحت وزن خود - در شرایطی که تراکم به سختی قابل انجام است، این نوع بتن گزینه بسیار مناسبی برای استفاده به عنوان لایه تعمیری در سازه های بتنی و ترمیم و مرمت آنها است. در این میان کیفیت چسبندگی این لایه به بتن بستر از مهمترین عوامل دوام و عملکرد مناسب عملیات تعمیر انجام شده می باشد. بر این اساس در این مطالعه به بررسی چند عامل تاثیر گذار بر چسبندگی بین دو لایه یعنی حجم خمیره، نسبت آب به مصالح سیمانی و مقدار الیاف و تاثیر آنها اولاً بر ویژگی های رئولوژیکی بتن خود تراکم تعمیری و دوم بر ویژگی های مکانیکی این بتن شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و جمع شدگی آن و سوم بر کیفیت چسبندگی بین این بتن و بتن بستر پرداخته شده است. به منظور تعیین چسبندگی بین دو لایه بتنی از روش های پول-آف، پوش-اوت و منشور شکافت بهره گرفته شده است. نتایج نشان دادند که به دلیل تاثیر زیاد مقدار جمع شدگی بر چسبندگی دو لایه، عوامل کاهش جمع شدگی یعنی کاهش حجم خمیره، کاهش نسبت آب به مصالح سیمانی و وجود الیاف، منجر به افزایش چسبندگی می شوند. در این ارتباط مقدار دقیق تاثیر هر یک از این پارامترها بر مقدار چسبندگی دو لایه و نیز مقدار بهینه هر یک تعیین گردید. همچنین ارتباط بین روش های مختلف تعیین چسبندگی دو لایه و مقدار کارامدی و دقت هر یک به دست آمد.

کلمات کلیدی: پول آف، پوش اوت، منشور شکافت، چسبندگی، بتن خودتراکم

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

doi:	10.22065/jsce.2018.106322.1388	1398/10/01	1397/03/21	1397/03/21	1396/01/03	1396/08/29	سابقه مقاله:		
							دریافت	بازنگری	پذیرش
	10.22065/jsce.2018.106322.1388	1398/10/01	1397/03/21	1397/03/21	1396/01/03	1396/08/29	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش
	https://10.22065/jsce.2018.106322.1388	1398/10/01	1397/03/21	1397/03/21	1396/01/03	1396/08/29			

علی صدر ممتازی

\*نویسنده مسئول:

alisadrmtomtazi@yahoo.com

پست الکترونیکی:

# Comparison of pull-off, push-out and splitting prism tests for assessment of bonding between fiber-reinforced self-compacting concrete as a repair layer and concrete substrate

Ali Sadrmomtazi<sup>1\*</sup>, Oveys Ghodousian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>- Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>2</sup>- Phd Candidate, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

## ABSTRACT

Considering using self-compacting concrete – because of no need to vibration and flow ability of this kind of concrete under its weight – under challenging situation for consolidation, it would be a very suitable option for using as repair layer in repairing and retrofitting of concrete structures. In this issue, quality of bonding between the repair layer and concrete substrate is one of the most important factors in durability and suitable performance of repairing works. On this base, in this research, some effective factors on bonding between two layers i.e. volume paste, water to cementitious materials and fiber dosages and their effects on rheological properties of repair self-compacting concrete firstly, on mechanical properties of it including compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity and shrinkage secondly and on bonding quality between the self-compacting repair layer and concrete substrate finally have been assessed. For assessment of bonding between two concrete layers, three methods including pull-off, push-out and splitting prism have been used. The results show that because of highly effects of shrinkage on bonding, the factors that reduce shrinkage, i.e. volume paste, water to cementitious materials and fiber dosages will increase the bonding of the two concrete layers. In this issue, the exact effect of each of these parameters on bonding between the two concrete layers and the optimum value of them have been assessed. Also, the correlation between all three methods of assessment of bonding between self-compacting concrete as a repair layer and concrete substrate and preciseness of the methods have been found.

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 20 November 2017

**Revise Date:** 23 March 2018

**Accept Date:** 11 June 2018

### Keywords:

Pull-off

Push-out

Splitting prism

Bonding

Self-compacting concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.106322.1388

\*Corresponding author: Ali Sadrmomtazi

Email address: alisadrmomtazi@yahoo.com

## ۱- مقدمه

بتن خودتراکم نخست در سال ۱۹۸۶ توسط اوکامورا<sup>۱</sup> در ژاپن پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ در کارگاه ساخته شد و نتایج قابل قبولی را از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ارائه داد [۱ و ۲]. برای تشریح کامل ویژگی های جریانی این نوع بتن، ویسکوزیته پلاستیک نیز باید مشخص شود. دیگر ویژگی های مهم بتن از قبیل مقاومت، سختی، دوام و ... برای بتن خودتراکم نیز مشابه بتن سنتی تعیین می شود [۳]. انتخاب، طراحی و کنترل کیفیت مصالح برای دستیابی به یک لایه تعمیر مناسب، پر دوام و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. چسبندگی بالا بین لایه تعمیری و بتن بستر و عدم ترک خوردگی لایه تعمیری از مشخصه های اصلی برای حصول یک لایه تعمیری بادوام است [۴]. ترک خوردگی در لایه تعمیری به شدت روی عملکرد سازه ای آن شامل مقاومت کششی، سختی برشی و خمشی، ظرفیت جذب انرژی، دوام، چسبندگی به بتن بستر و مقاومت در برابر خوردگی آرماتورها تأثیر می گذارد [۵].

ترک خوردگی لایه تعمیری نه فقط باعث دسترسی آسان مواد مضر به سطح مشترک بستر و لایه تعمیری می شود، بلکه اجازه اشباع زود هنگام لایه تعمیری را نیز می دهد که این خود باعث آسیب های ناشی از یخ زدگی و ذوب یخ، تغییر رنگ، خرابی های ناشی از نفوذ نمک و جداسازی نهایی می گردد [۶]. یکی از عوامل مهم ترک خوردگی لایه تعمیری بتنی، جمع شدگی آن است.

تحقیقات زیادی در زمینه جمع شدگی مصالح تعمیری صورت گرفته است. هانسن<sup>۲</sup> و همکاران [۷] اثر جمع شدگی ناشی از خشک شدن خمیره، مقدار سنگدانه و نسبت مدول سنگدانه ها و سیمان هیدراته را روی جمع شدگی نهایی ناشی از خشک شدن بتن بررسی کردند. چلال<sup>۳</sup> و همکاران [۸] نتایج آزمایشگاهی کرنش های جمع شدگی ناشی از خشک شدن را با مقادیر تخمینی براساس توصیه های ACI [۹] و CEB [۱۰] مقایسه کردند. بیسونت<sup>۴</sup> و همکاران [۱۱] نیز آزمایش جمع شدگی را روی نمونه های خمیر سیمان، ملات و بتن انجام دادند و اثر پارامترهای کلیدی مختلف روی جمع شدگی مانند اندازه نمونه و رطوبت نسبی را بررسی کردند. باروقل<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲] انتقال و تعادل رطوبت را در مصالح سیمانی توانمند بررسی کرده و با بتن معمولی مقایسه نمودند. جمع شدگی ناشی از خشک شدن لایه تعمیری اثر قابل توجهی بر روی رفتار سازه مقاوم سازی شده دارد. به ویژه، کرنش های جمع شدگی که در روزها و هفته های اول اعمال لایه تعمیری اتفاق می افتند در چسبندگی لایه تعمیری به بتن بستر نقش مهمی دارند. بولندر<sup>۶</sup> و همکاران [۱۳] شبیه سازی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی در لایه تعمیری سیمانی را انجام دادند. نتایج مدلسازی آنها بیانگر اهمیت ویژگی های سطح مشترک دو لایه در تعیین مکانیزم شکست نهایی است؛ جدا شدن لایه تعمیری از بتن بستر یا شکست در عمق لایه تعمیری. همچنین بنشوسن<sup>۷</sup> و همکاران [۱۴] مکانیزم های شکست چسبندگی لایه تعمیری به بتن بستر تحت جمع شدگی را مورد بحث قرار دادند. روزبیر<sup>۸</sup> و همکاران [۱۵] به بررسی اثر حجم خمیره روی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی بتن خود تراکم پرداختند. همان طور که انتظار می رفت، آنها یافتند که با افزایش حجم خمیره، مقدار جمع شدگی و به تبع آن مقدار ترک خوردگی در بتن خود تراکم افزایش می یابد. همچنین آنها یافتند که این افزایش جمع شدگی و ترک خوردگی به ترکیب خمیره مانند نسبت آب به پودر و درصد جایگزینی پرکننده های به جای سیمان نیز بستگی دارد. در میان راه های ارائه شده برای کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی، یکی از امیدبخش ترین راه ها، استفاده از الیاف فولادی، کربنی، پلی پروپیلنی و غیره به صورت توزیع اتفاقی در بتن است که با ایجاد نیروی پلی در عرض ترک از رشد آن جلوگیری می کند. وجود الیاف هم روی عرض و هم روی طول ترک های جمع شدگی تأثیر می گذارد و آسیب در سطح مشترک لایه تعمیری و بتن بستر را کاهش می دهد و لذا باعث افزایش چسبندگی این سطح می گردد. به علاوه، الیاف باعث بهبود عملکرد مکانیکی، دوام، چقرمگی، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر خستگی لایه تعمیری نیز می شود که برای یک لایه تعمیری بسیار مطلوب است [۱۶].

1- Okamura

2- Hansen

3- Chaallal

4- Bissonnette

5- Baroghel

6- Bolander

7- Benshausen

8- Roziere

جداشدگی به علت ایجاد یک ترک در کل ضخامت لایه تعمیر و در نتیجه عدم انتقال تنش در لایه تعمیر ایجاد می گردد. ایمنز و همکاران<sup>۹</sup> [۱۷] و برنارد<sup>۱۰</sup> [۱۸] نیز به نقش مهم ترک در مکانیزم جداشدگی اشاره کرده اند. در محل ترک، تنش های نوک ترک به سطح مشترک توسعه یافته و منجر به جداشدگی می شوند [۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲].

آرماورها نیروهای بسیار بزرگتری را نسبت به الیاف می توانند منتقل کنند. ولی میلگردها فقط زمانی قابل استفاده هستند که ضخامت لایه تعمیر زیاد باشد (با توجه به نیاز میلگرد ها به پوشش بتنی مناسب). حسن دیگر الیاف، کاهش خطر خوردگی است. وقتی لایه تعمیر مصالح سیمانی است، به خاطر ضخامت قابل توجه (اغلب بیش از ۲۵ میلی متر)، حداکثر تنش برشی و حداکثر تنش کششی دارای مقادیر مشابهی هستند. مشخص شده است که مقاومت کششی سطح مشترک بین مصالح سیمانی حدود ۵۰ درصد مقاومت برشی آن است [۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۶]. مشخص شده است که جداشدگی همیشه در ابتدا با کشش عمود بر سطح مشترک آغاز می گردد [۲۳، ۲۷، ۲۸ و ۲۹]. ورامدگی ناشی از جمع شدگی غیریکنواخت در ضخامت لایه تعمیر است [۳۰، ۳۱ و ۳۲]. همچنین گزارش شده است که الیاف اثر مناسبی بر کاهش گسترش ترک ها در لایه تعمیر داشته اند [۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۳۷]. در فرانسه طی ده سال مطالعه روی ارتباط بین جمع شدگی و جداشدگی لایه تعمیر از بتن بستر، اثر مثبت لایه تعمیر مسلح به الیاف تایید شد [۳۳، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱ و ۴۲]. همچنین گزارش شده است که لایه تعمیر سیمانی میانی نسبت لایه تعمیر سیمانی بدون الیاف اثر کمتری از خستگی می پذیرد [۴۳ و ۴۴]. مقاومت فشاری مصالح تعمیر معمولاً روی چسبندگی آن تاثیر زیادی نمیگذارد. با این حال مقاومت کششی تاثیر زیادی روی چسبندگی دارد. زیرا روی توسعه ترک و لذا تغییر مرز دو لایه تاثیر می گذارد. دلالت و همکاران<sup>۱۱</sup> [۴۵] دریافتند که افزایش مقاومت سنین اولیه بتن منجر به افزایش قابل توجه مقاومت کششی و مقاومت چسبندگی برشی لایه تعمیر خواهد شد. پیگن و همکاران<sup>۱۲</sup> [۴۶] بیان می کنند که مرز مشترک بین لایه بتن جدید و بتن قدیم بسیار مشابه چسبندگی بین سنگدانه و خمیر سیمان است قبلاً تصور می شد که زبری سطح تاثیر بسیار زیادی بر چسبندگی دو لایه دارد ولی اکنون اعتقاد بر این است که این اثر چندان زیاد نیست [۴۷]. نادری و همکاران<sup>۱۳</sup> [۴۸] نشان دادند که یک لایه دوغاب در صورتی که لایه تعمیر پیش از خشک شدن آن ریخته شود باعث افزایش چسبندگی دو لایه خواهد شد ولی در صورتی که پس از خشک شدن دوغاب، ریخته شود، باعث افت شدید چسبندگی می شود. دمای بتن بستر نیز بر چسبندگی دو لایه تاثیر گذار است. بتن بستر سرد (۴°C) منجر به کاهش چسبندگی اولیه ولی افزایش چسبندگی بلند مدت می شود [۴۹].

اگر بتن بستر بسیار خشک باشد باعث می شود که آب لایه تعمیر جذب شده و کیفیت آن پایین آمده و چسبندگی خوبی ایجاد نمی شود. همچنین در صورت وجود آب سطحی روی بتن بستر، چسبندگی به طور کامل ناپود خواهد شد. یکی از بهترین حالات می تواند بستر اشباع با سطح خشک باشد [۴۸ و ۵۰]. جمع شدگی در سنین اولیه می تواند منجر به ترک خوردگی لایه تعمیر شود که این خود می تواند باعث جداشدگی از لایه بستر گردد. لذا عمل آوری یکی از مهمترین عوامل کاهش جمع شدگی لایه تعمیر و تنش های در سطح مشترک است. عمل آوری از افت رطوبت جلوگیری می کند و در نتیجه جمع شدگی سنین اولیه را کاهش می دهد. همزمان مزایای دیگری نیز خواهد داشت، کاهش خطر ترک خوردگی پلاستیک، مقاومت بالاتر، بهبود دوام و مقاومت سایشی بهتر. پالسون و همکاران<sup>۱۴</sup> [۵۱] توصیه می کند که حداقل ۵ روز عمل آوری انجام شود. همچنین مشخص شده است که تابش مستقیم آفتاب بر چسبندگی تاثیر منفی می گذارد [۴۵]. ممیز و همکاران<sup>۱۵</sup> چهار روش مختلف تعیین چسبندگی دو لایه بتنی به یکدیگر را ارزیابی و مقایسه نمودند. این چهار روش عبارتند از روش pull-off، روش splitting Prism، روش Birect Shear (Bi-Surface) و روش Slant Shear. آن ها به این

<sup>9</sup>- Emmons, et. all

<sup>10</sup>- Bernard

<sup>11</sup>- Delatte, et. all

<sup>12</sup>- Pigeon, et. all

<sup>13</sup>- Naderi, et. all

<sup>14</sup>- Paulsson, et. all

<sup>15</sup>- Momayez, et. all

نتیجه رسیدند که ضریب تغییرات در تمامی روش ها مقدار مناسبی است و مقدار چسبندگی بین دو لایه به ترتیب زیر بسته به روش مورد استفاده کاهش می یابد: Splitting Prism, Bi-Surface Shear, Slant Shear و pull-off [۵۲]. نادری و همکاران<sup>۱۶</sup> به بررسی تعیین چسبندگی بتن و ملات خودتراکم به بسترهای مختلف بتنی با استفاده از روش انتقال اصطکاک و پیچش و پیش بینی نتایج به کمک منطق فازی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش انتقال اصطکاک روش بسیار مناسب برای چسبندگی دو لایه بتنی به یکدیگر می باشد. [۴۸].

## ۲- عملیات آزمایشگاهی

در مطالعه حاضر سه پارامتر مهم در بتن خودتراکم الیافی که می تواند روی ویژگی های رئولوژیکی و مکانیکی آن تاثیر بگذارد یعنی نسبت حجم خمیره به حجم کل بتن، نسبت آب به مجموع سیمان و پوزولان و مقدار الیاف پلی پروپیلن مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر تغییر در این سه پارامتر روی ویژگی های رئولوژیکی بتن از طریق آزمون های جریان اسلامپ، قیف ۷، جعبه L و T50 سنجیده شد. سپس با ساخت نمونه های مکعبی ۱۵ سانتی، آزمون مقاومت فشاری، با ساخت نمونه های استاندارد، تست برزلی و محاسبه مدول الاستیسیته و با ساخت نمونه های منشوری، آزمون جمع شدگی انجام شد. برای تعیین پیوستگی بتن خودتراکم به عنوان لایه تعمیری به بتن بستر، از روش های پول آف ۱۷، پوش اوت ۱۸ و آزمون منشور شکافت ۱۹ استفاده گردید. برای استفاده از روش پول آف، ابتدا بتن های معمولی با مقاومت بالا (بالتر از ۵۰ مگاپاسکال) در نمونه های مکعبی ۱۵ سانتی ساخته شد تا این اطمینان حاصل گردد که در هنگام انجام آزمون تعیین پیوستگی دو لایه بتنی، گسیختگی از بتن بستر اتفاق نمی افتد. این بتن ها با استفاده از آره بتن بر به سه بخش مساوی با ضخامت ۵ سانتی متر تقسیم شدند. پس از گذشت ۶ ماه از ساخت این بتن ها (این ۶ ماه برای این بود که بتن های بستر جمع شدگی خود را انجام دهند و لذا در آزمایش ها ایجاد خطا نکنند)، لایه های تعمیری خودتراکم با ضخامت ۲ سانتی متر روی این بتن ها ریخته شدند. پس از ۲۸ روز عمل آوری این نمونه ها در آب و انجام مغزه گیری، با استفاده از دستگاه پول آف پیوستگی لایه تعمیری و بستر به یکدیگر تعیین شد.

برای تعیین پیوستگی بین دو لایه به کمک روش پوش اوت و منشور شکافت از جک و همین بتن های معمولی به عنوان بستر استفاده شد. شن مصرفی رودخانه ای بوده و ماکزیمم اندازه دانه های آن ۱۲/۵ میلیمتر و دارای وزن مخصوص ظاهری ۲/۶۴ گرم بر سانتی متر مکعب و جذب آب ۱/۵ درصد می باشد. ماسه ی مورد استفاده رودخانه ای و گرد گوشه بوده و دارای وزن مخصوص ظاهری ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب و جذب آب ۲/۵ درصد است. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان هگمتان استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی سیمان در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات سیمان مصرفی

ترکیبات	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	CL %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	LOI %
مقدار	۲۱/۱۹	۵/۰۹	۳/۹۴	۶۳/۰۴	۱/۴۷	۲/۳۵	۰/۰۲۹	۰/۷۲	۰/۵۱	۲/۱۷

میکروسیلیس مصرفی تولید کارخانه فروسیلیس ایران است که دارای وزن مخصوص  $2200 \text{ Kg/m}^3$  می باشد. این افزودنی بدون حل کردن در آب به حالت خشک و به صورت درصدی از وزن سیمان به مخلوط بتن اضافه شده است. الیاف پلی پروپیلن مصرفی به طول ۶ میلی متر می باشند و از شرکت شیمی ساختمان تهیه شده اند. فوق روان کننده ی مورد استفاده با نام تجاری FARCO PLAST P10-3R محصول شرکت شیمی ساختمان و بر پایه ی پلی کربوکسیلات های اصلاح شده می باشد. طرح های ساخته شده و نسبت های مهم طرح در جدول ۲ مشاهده می شود.

16- Naderi, et. all  
17- Pull-Off  
18- Push-Out  
19 - Splitting Prist Test

جدول ۲: ۲۷ طرح اختلاط ساخته شده به عنوان لایه تعمیری

نام طرح	C (Kg/m <sup>3</sup> )	G (Kg/m <sup>3</sup> )	S (Kg/m <sup>3</sup> )	LS (Kg/m <sup>3</sup> )	MS (Kg/m <sup>3</sup> )	W (Kg/m <sup>3</sup> )	PP %	S.P %	W/(C+MS)	V <sub>p</sub> /V <sub>t</sub>	PP %
V1W1P0	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۹۹/۵	۴۵	۱۴۴	۰	۱/۵	۰/۳۲	۰/۴	۰
V1W2P0	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۵۰	۴۵	۱۶۲	۰	۱/۳	۰/۳۶	۰/۴۴	۰
V1W3P0	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۰۰/۵	۴۵	۱۸۰	۰	۱	۰/۴۰	۰/۴۸	۰
V2W1P0	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۳۳۲/۵	۴۹/۲	۱۵۷	۰	۱/۵	۰/۳۲	۰/۴	۰
V2W2P0	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۲۷۷/۵	۴۹/۲	۱۷۷	۰	۱/۲	۰/۳۶	۰/۴۴	۰
V2W3P0	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۲۲۳/۸۷	۴۹/۲	۱۹۶/۵	۰	۰/۹	۰/۴۰	۰/۴۸	۰
V3W1P0	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۳۵۷/۷	۵۴	۱۷۳	۰	۱/۱	۰/۳۲	۰/۴	۰
V3W2P0	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۳۰۰	۵۴	۱۹۴	۰	۰/۸	۰/۳۶	۰/۴۴	۰
V3W3P0	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۲۳۹/۵	۵۴	۲۱۶	۰	۰/۶	۰/۴۰	۰/۴۸	۰
V1W1P1	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۹۹/۵	۴۵	۱۴۴	۰/۱	۱/۵	۰/۳۲	۰/۴	۰/۱
V1W2P1	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۵۰	۴۵	۱۶۲	۰/۱	۱/۳	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۱
V1W3P1	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۰۰/۵	۴۵	۱۸۰	۰/۱	۱	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۱
V2W1P1	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۳۳۲/۵	۴۹/۲	۱۵۷	۰/۱	۱/۵	۰/۳۲	۰/۴	۰/۱
V2W2P1	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۲۷۷/۵	۴۹/۲	۱۷۷	۰/۱	۱/۲	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۱
V2W3P1	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۲۲۳/۸۷	۴۹/۲	۱۹۶/۵	۰/۱	۰/۹	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۱
V3W1P1	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۳۵۷/۷	۵۴	۱۷۳	۰/۱	۱/۱	۰/۳۲	۰/۴	۰/۱
V3W2P1	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۳۰۰	۵۴	۱۹۴	۰/۱	۰/۸	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۱
V3W3P1	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۲۳۹/۵	۵۴	۲۱۶	۰/۱	۰/۶	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۱
V1W1P2	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۹۹/۵	۴۵	۱۴۴	۰/۲	۱/۵	۰/۳۲	۰/۴	۰/۲
V1W2P2	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۵۰	۴۵	۱۶۲	۰/۲	۱/۳	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۲
V1W3P2	۴۰۵	۷۴۰	۸۵۰	۲۰۰/۵	۴۵	۱۸۰	۰/۲	۱	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۲
V2W1P2	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۳۳۲/۵	۴۹/۲	۱۵۷	۰/۲	۱/۵	۰/۳۲	۰/۴	۰/۲
V2W2P2	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۲۷۷/۵	۴۹/۲	۱۷۷	۰/۲	۱/۲	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۲
V2W3P2	۴۴۲	۶۹۱	۷۹۳	۲۲۳/۸۷	۴۹/۲	۱۹۶/۵	۰/۲	۰/۹	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۲
V3W1P2	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۳۵۷/۷	۵۴	۱۷۳	۰/۲	۱/۱	۰/۳۲	۰/۴	۰/۲
V3W2P2	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۳۰۰	۵۴	۱۹۴	۰/۲	۰/۸	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۲
V3W3P2	۴۸۶	۶۳۶	۷۲۹	۲۳۹/۵	۵۴	۲۱۶	۰/۲	۰/۶	۰/۴۰	۰/۴۸	۰/۲

C: سیمان، G: شن، S: ماسه، LS: پودر سنگ، MS: میکروسیلیس، W: آب، PP: الیاف پلی پروپیلن، SP: فوق روان کننده، V<sub>p</sub>: حجم خمیره (شامل حجم سیمان، میکروسیلیس و آب)، V<sub>t</sub>: حجم کل بتن

در شکل ۱ انجام این آزمایش روی بتن های ساخته شده مطابق با پیشنهاد EFNARC [۵۳] مشاهده می گردد.



شکل ۱: آزمون جریان اسلامپ و T50 برای برخی بتن های ساخته شده

آزمایش جمع شدگی بر روی نمونه های منشوری  $28 \times 7 \times 7$  سانتیمتری انجام شد. نمونه های جمع شدگی در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. قرائت ها در سن ۲۸ روزه توسط گیج مخصوصی که داری دقتی معادل ۲ میکرومتر می باشد انجام شد. برای تعیین مقاومت پیوستگی بین بتن بستر و بتن خودتراکم به عنوان لایه تعمیری، ۲۷ طرح اختلاط ساخته شده خودتراکم با ضخامت ۲ سانتی متر روی بتن های بستر با ضخامت ۵ سانتی متر و طول و عرض ۱۵ سانتی متر اعمال شد و سپس نمونه های ترکیبی به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری در آب قرار گرفتند. پس از ۲۸ روز از آب خارج شده و نیم مغزه هایی با ارتفاع  $2/5$  سانتی متر بر روی آنها انجام شد، به طوری که کل ضخامت لایه خودتراکمی و نیم سانتی متر از لایه بستر در این نیم مغزه حضور داشته باشند.

پس از انجام مغزه گیری، تعیین مقاومت پیوستگی بین لایه تعمیری خودتراکم و بتن بستر به کمک روش پول آف و با استفاده از استوانه های فلزی به قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع  $2/5$  سانتی متر مطابق با استاندارد ASTM [۵۸] انجام شد.

تنها در صورتی این آزمون موفق به تعیین چسبندگی دو لایه خواهد شد که شکست در مرز اتفاق بیفتد. به همین دلیل آزمون هایی که شکست در جایی به غیر از مرز باشد موفق تلقی نمی گردند و نتایج آنها حذف خواهد شد. در شکل ۲ با استفاده از دستگاه پول آف برای تعیین مقاومت پیوستگی دو لایه بتنی و نیز نحوه گسیختگی نمونه ها مشاهده می گردد.



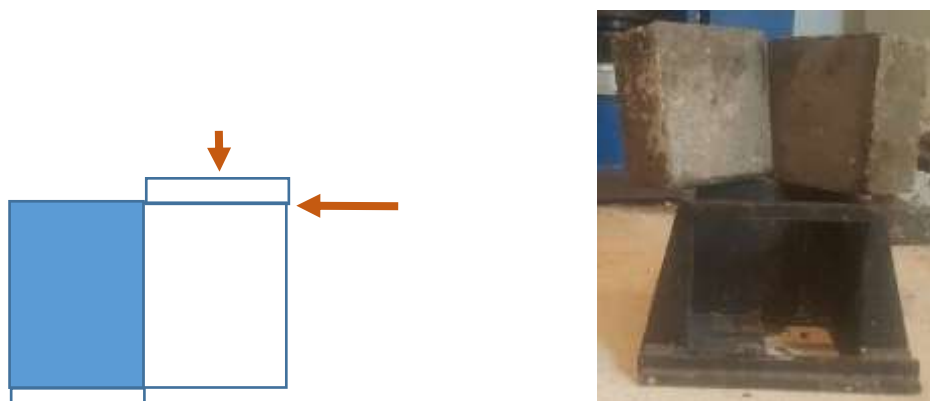
شکل ۲: نحوه شکست نمونه ها: از چسب، از مرز و از بتن بستر

به منظور مقایسه بین نتایج حاصل از پول آف در تعیین چسبندگی بین دو لایه بتنی با روشی دیگر، از روش پوش اوت استفاده شد. در این روش دو قطعه بتنی از بتن بستر در دو طرف قالب مکعبی ۱۵ سانتی قرار داده می شود و بین این دو قطعه، بتن تعمیری ریخته خواهد شد که ضخامت آن ۵ سانتی متر خواهد بود. لذا لایه تعمیری از هر دو طرف به بتن بستر پیوستگی خواهد داشت. در این روش گسیختگی در یک طرف اتفاق خواهد افتاد زیرا به هر حال پیوستگی در یک طرف کمی ضعیفتر خواهد بود و در طرف ضعیفتر جداشدگی سریعتر ایجاد می شود. با توجه به اینکه در این روش همواره گسیختگی از مرز اتفاق می افتد - به ویژه در مواردی که مقایسه پیوستگی دو لایه مد نظر است (مانند مطالعه حاضر) - نتایج به دست آمده همگی قابل استفاده می باشند و لذا این روش، برای تعیین پیوستگی دو لایه بتنی بسیار مناسب خواهد بود. در ادامه تصاویر این آزمایش در شکل ۳ مشاهده می گردد.



شکل ۳: نحوه گسیختگی نمونه ها در روش پوش اوت

روش سوم مورد استفاده برای تعیین مقاومت پیوستگی بین دو لایه در این مطالعه، روش منشور شکافت<sup>۲۰</sup> می باشد. در این روش، یک قطعه بتنی از بتن بستر با عرض نصف قالب ۱۵ سانتی در یک طرف قالب قرار داده می شود و در نصفه دیگر قالب، لایه تعمیری بتن ریخته می شود. در این روش نیز، گسیختگی همواره از مرز اتفاق می افتاد و لذا صد در صد آزمون ها مورد قبول بودند. این آزمون در این مطالعه با روشی متفاوت و با قالبی که به مین منظور طراحی شده بود که در شکل ۴ مشاهده می گردد اجرا شد. در این روش نیرو به لایه تعمیری وارد می شود و دیواره قالب مانند یک نقطه اتکا عمل می کند. نحوه اجرای این آزمون به طور شماتیک در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: نحوه گسیختگی نمونه ها در روش منشور شکافت

### ۳- تحلیل نتایج

نتایج آزمایش های تعیین ویژگی های رئولوژیکی و ویژگی های بتن سخت شده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: نتایج آزمایش های تعیین ویژگی های رئولوژیکی و بتن سخت شده ۲۷ طرح ساخته شده

نام طرح	جریان اسلامپ (mm)	T50 (sec)	جعبه L (mm/mm)	قیف V (sec)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	جمع شدگی ( $\times 10^6$ )	مقاومت پیوستگی (پول آف-تنش کششی) (MPa)	مقاومت پیوستگی (پوش اوت-تنش برشی) (MPa)	مقاومت پیوستگی (منشور شکافت-تنش برشی) (MPa)
V1W1P0	۶۷۰	۵/۳۰	۱	۱۲/۲۲	۵۶/۱	۴/۸۶	۳۴/۳	۴۷۰	۳/۴۷	۱۲/۷	۲۶/۲
V1W2P0	۶۳۰	۳/۸۵	۱	۱۱/۲۰	۵۵/۲	۴/۷۷	۳۳/۱	۶۰۰	۳/۲۷	۱۱/۸	۲۲/۵
V1W3P0	۶۰۰	۳/۶۷	۱	۷/۸۹	۵۳/۴	۴/۴۲	۳۱/۸	۶۹۰	۳/۰۳	۱۰/۷	۲۳/۳
V2W1P0	۷۳۰	۳/۵۰	۱	۸/۰۵	۵۳/۵	۴/۶۷	۳۳/۴	۵۲۰	۳/۲۷	۱۱/۶	۲۲/۸
V2W2P0	۶۸۰	۳/۲۴	۱	۶/۵۴	۵۲/۰	۴/۵۳	۳۲/۶	۶۲۰	۲/۹۷	۱۰/۲	۲۱/۷۲
V2W3P0	۶۵۰	۲/۸۶	۱	۴/۶۵	۴۷/۳	۴/۰۲	۳۰/۷	۷۶۰	۲/۶۳	۸/۵	۱۸/۹
V3W1P0	۶۷۰	۳/۰۳	۱	۵/۳۱	۴۹/۱	۴/۱۵	۳۲/۷	۵۹۰	۲/۹۷	۱۰/۵	۲۲/۲



V3W2P0	۵۵۰	۲/۶۷	۱	۳/۸۷	۴۶/۲	۳/۹۳	۳۱/۴	۷۴۰	۲/۴۳	۸/۷	۱۷/۶
V3W3P0	۵۲۰	۴/۹۹	۱	۲/۹۸	۳۸/۹	۳/۳۸	۲۹/۹	۸۵۰	۲/۰۳	۶/۹	۱۴/۸
V1W1P1	۶۵۰	۵/۸۰	۱	۱۳/۴۰	۵۷/۹	۵/۴۷	۳۷/۷	۴۵۰	۴/۶۰	۱۷/۰	۳۵/۲
V1W2P1	۶۰۰	۴/۲۰	۱	۱۲/۱۰	۵۶/۴	۵/۳۰	۳۶/۳	۵۷۰	۴/۳۳	۱۶/۲	۳۴/۱
V1W3P1	۵۶۰	۴/۰۰	۱	۸/۶۶	۵۲/۸	۵/۰۴	۳۴/۸	۶۶۰	۳/۸۷	۱۳/۶	۲۸/۴
V2W1P1	۷۱۰	۴/۱۰	۰/۹۵	۹/۰۰	۵۴/۷	۵/۳۳	۳۶/۸	۵۰۰	۴/۳۰	۱۵/۰	۲۹/۷
V2W2P1	۶۶۰	۴/۰۰	۰/۹۰	۷/۶۳	۵۱/۴	۵/۱۱	۳۵/۵	۵۹۵	۴/۱۳	۱۴/۱	۳۰/۱
V2W3P1	۶۲۰	۲/۹۹	۰/۹۰	۵/۷۸	۴۸/۷	۴/۶۰	۳۳/۹	۷۳۵	۳/۸۷	۱۲/۶	۲۷/۲
V3W1P1	۶۶۰	۳/۶۰	۰/۸۵	۶/۰۰	۴۹/۵	۴/۷۶	۳۵/۶	۵۶۰	۴/۲۰	۱۳/۲	۲۶/۴
V3W2P1	۵۴۰	۲/۹۸	۰/۸۵	۴/۲۰	۴۵/۴	۴/۴۳	۳۴/۸	۷۰۰	۳/۱۳	۱۱/۰	۲۱/۷
V3W3P1	۵۰۰	۸/۰۰	۰/۷۰	۳/۳۰	۳۷/۲	۴/۲۰	۳۱/۹	۷۹۰	۲/۸۷	۹/۲	۲۰/۵
V1W1P2	۶۴۰	۶/۰۰	۰/۹۵	۱۵/۰۰	۵۶	۵/۱۱	۳۷/۸	۴۵۵	۳/۷۳	۱۳/۳	۲۷/۸
V1W2P2	۵۷۰	۴/۵۰	۰/۹۵	۱۴/۱۰	۵۴/۸	۵/۰۴	۳۵/۴	۵۸۰	۳/۶۳	۱۳/۶	۲۸
V1W3P2	۵۴۰	۴/۳۰	۰/۹۰	۱۰/۲۰	۵۳	۴/۸۷	۳۴/۳	۶۷۵	۳/۳۰	۱۰/۷	۲۱/۵
V2W1P2	۶۸۰	۴/۶۰	۰/۸۵	۱۰/۶۰	۵۲/۸	۵/۱۴	۳۶/۳	۵۱۵	۳/۶۷	۱۳/۴	۲۷/۳
V2W2P2	۶۴۰	۴/۴۰	۰/۸۰	۹/۸۰	۵۲/۳	۴/۹۴	۳۴/۷	۶۱۵	۴/۱۳	۱۳/۲	۲۶
V2W3P2	۶۰۰	۳/۲۶	۰/۸۰	۶/۹۰	۴۶/۶	۴/۳۲	۳۳/۱	۷۵۰	۳/۷۰	۱۱/۹	۲۶/۲
V3W1P2	۶۳۰	۴/۱۰	۰/۷۰	۷/۲۳	۴۹/۵	۴/۴۲	۳۴/۹	۵۷۰	۳/۴۳	۱۲/۷	۲۵/۳
V3W2P2	۵۳۰	۳/۵۰	۰/۷۰	۵/۱۰	۴۵/۷	۴/۱۳	۳۳/۴	۷۱۰	۲/۸۷	۹/۵	۱۹/۹
V3W3P2	۴۸۰	۸/۳۲	۰/۶۵	۳/۹۸	۳۸/۳	۳/۵۸	۳۰/۷	۸۲۰	۲/۳۳	۹/۰	۱۷/۴

اولین نتیجه ای که استنباط می شود این است که در حالت بدون الیاف مقدار جریان اسلامپ و زمان T50 تمامی طرح ها در محدوده مناسب قرار دارد. مشاهده می گردد که با اضافه کردن و افزایش مقدار الیاف، جریان اسلامپ و سرعت جریان یافتن بتن که در آزمایش T50 متبلور است کاهش می یابد. همچنین با افزایش مقدار خمیره و آب طرح -همانگونه که از نتایج آزمون T50 قابل مشاهده است- بتن با سرعت بیشتری حرکت می کند. در هیچ یک از طرح ها هیچگونه جداشدگی مشاهده نشد و همه طرح ها در محدوده مناسب مقدار جریان اسلامپ بودند به جز طرح آخر که مقدار جریان اسلامپ به مقدار استاندارد مورد نظر به ویژه در حالت الیاف دار نرسید که علت آن را می توان جاماندن حدودی سنگدانه ها و لذا کند شدن حرکت بتن دانست.

با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۰/۱ درصد و از ۰/۱ درصد به ۰/۲ درصد، مقدار جریان اسلامپ کاهش و زمان آزمون T50 افزایش می یابد. علت آنرا می توان به درگیر شدن و کاهش روانی بتن در اثر افزودن الیاف به آن دانست. با تغییر مقدار الیاف از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، میزان کاهش جریان اسلامپ و افزایش زمان T50 حدوداً دو برابر می شود (برای جریان اسلامپ ۱/۹۴ و برای زمان T50 ۱/۸۰ برابر). افزایش خمیره در بتن خودتراکم، باعث افت کمتر جریان اسلامپ و افزایش بیشتر زمان T50 با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن می شود.

لذا در حالی که افزایش خمیره در بتن خودتراکم الیافی، تاثیر مثبتی روی جریان اسلامپ دارد و با افزایش آن، جریان اسلامپ افت کمتری را با افزودن الیاف تجربه می کند، روی زمان T50 تاثیر منفی گذارده و با افزایش مقدار الیاف، افزایش زمان T50 بیشتری را به دست می دهد که نشان دهنده غلبه اثر کاهش سرعت حرکت بتن بر اثر مسافت طی شده بتن توسط الیاف پلی پروپیلن است. لذا در استفاده از بتن خودتراکم الیافی این نکته باید مدنظر قرار گیرد که اثر منفی الیاف پلی پروپیلن بر سرعت جریان یافتن بتن بیشتر از اثر منفی این الیاف بر فاصله ای است که بتن خودتراکم می تواند تحت وزن خود جاری شود و طی کند.

با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۰/۱ درصد و از ۰/۱ درصد به ۰/۲ درصد، زمان تخلیه قیف V افزایش می یابد. با تغییر مقدار الیاف از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، میزان افزایش زمان تخلیه قیف V حدوداً سه برابر می شود (۲/۷۷ برابر).

با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۰/۱ درصد و از ۰/۱ درصد به ۰/۲ درصد، نسبت انسداد کاهش می یابد. علت آنرا می توان به درگیر شده و کاهش روانی بتن در اثر افزودن الیاف به آن دانست. با تغییر مقدار الیاف از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، میزان کاهش نسبت انسداد حدوداً دو برابر می شود (۲/۰۱ برابر).

مقاومت فشاری با افزودن الیاف تغییر محسوسی نمی کند، به طوری که حضور ۰/۱ درصد الیاف باعث رشد بسیار کم و حضور ۰/۲ درصد الیاف باعث کاهش بسیار کم مقاومت فشاری می شود. در مجموع می توان اینگونه گفت که حضور الیاف تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ندارد.

مقاومت کششی با افزودن الیاف به میزان ۰/۱ درصد، افزایش می یابد اما با افزایش مقدار الیاف به ۰/۲ درصد، مقاومت کششی کاهش دارد ولی باز هم از مقدار بدون الیاف بیشتر خواهد بود. روند تغییرات مقاومت کششی با تغییر نسبت خمیره و مقدار آب نیز مانند مقاومت فشاری می باشد. به طوری که افزایش مقدار خمیره و افزایش مقدار آب مخلوط باعث کاهش مقاومت کششی می شوند. در ابتدا و با اضافه کردن ۰/۱ درصد الیاف پلی پروپیلن، مقاومت کششی افزایش می یابد. ولی با افزودن مقدار الیاف و رساندن آن به ۰/۲ درصد، مقاومت کششی نسبت به حالت ۰/۱ درصد الیاف کاهش می یابد هرچند نسبت به حالت بدون الیاف هنوز مقاومت کششی بالاتری ارائه می دهد. مدول الاستیسیته با افزودن الیاف افزایش خواهد یافت. به طور کلی این افزایش زمانی که مقدار الیاف ۰/۱ درصد است بیشتر از زمانی است که مقدار الیاف ۰/۲ درصد می باشد.

با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن، جمع شدگی کاهش می یابد. همچنین مطابق انتظار، با افزایش مقدار خمیره و آب طرح، جمع شدگی افزایش خواهد داشت که علت آن را می توان به حفرات خالی بیشتر در اثر تبخیر مقدار بیشتر آب و هیدراسیون بیشتر سیمان که منجر به مصرف شدن آب بیشتر می شود نسبت داد. با افزودن الیاف، مقدار جمع شدگی کاهش می یابد که علت آن را می توان اثر مثبت الیاف بر کنترل ترک ها و تنش های کششی ایجاد شده در بتن در اثر تبخیر آب و ایجاد حفرات مویینه دانست. هرچند وجود خود الیاف باعث تجمع حباب های هوا در اطراف آن ها می گردد. این موضوع در مورد نمونه های حاوی ۰/۲ درصد الیاف به خوبی نمایان است. با وجود اثر کنترل کننده الیاف نمونه های دارای ۰/۲ درصد الیاف، شاهد کاهش کمتر جمع شدگی نسبت به حالت ۰/۱ درصد الیاف هستیم. علت آن را می توان به غلبه اثر ایجاد حباب های هوا و کاهش ویژگی های خودتراکمی بتن به واسطه حضور الیاف بر اثر کنترل کنندگی ترک ها توسط الیاف دانست. با تغییر مقدار الیاف از ۰/۱ به ۰/۲ درصد، میزان کاهش جمع شدگی کمتر می شود. این میزان برای طرح های حاوی ۰/۱ درصد الیاف پلی پروپیلن ۴/۷۰- درصد و برای طرح های حاوی ۰/۲ درصد الیاف پلی پروپیلن برابر ۲/۵۳- درصد می باشد.

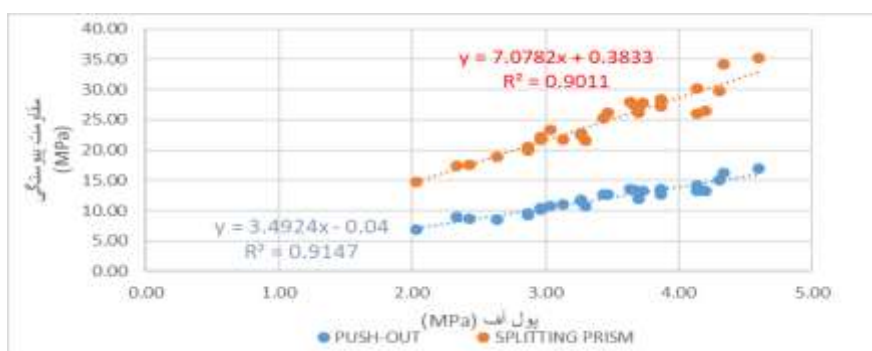
برای تعیین پیوستگی بین دو لایه تعمیر و بستر، از روش های پول آف که مبتنی بر ایجاد تنش کششی است، روش پوش اوت و روش منشور شکافت که بر اساس ایجاد تنش برشی در مرز دو لایه هستند، استفاده گردید. در جدول ۳ نتایج مربوط به هر یک از این آزمون ها آورده شده است.

مشاهده می گردد که بیشترین مقاومت پیوستگی برای طرح V1W1P1 و کمترین مقدار برای طرح V3W3P0 به دست آمده است. طرح V1W1 با توجه به کمترین مقدار خمیره و نسبت آب به مصالح سیمانی که داشت، کمترین جمع شدگی را نیز داشت. همچنین مقدار الیاف ۰/۱ درصد، بهینه ترین درصد برای افزایش مقاومت کششی و کاهش جمع شدگی به دست آمده بود. لذا این طرح دارای بهترین مقاومت پیوستگی شده است. علت پایین بودن مقاومت پیوستگی طرح V3W3 را نیز می توان اینگونه توضیح داد که اولاً این طرح بدون الیاف است و همانگونه که مشاهده کردیم، طرح های بدون الیاف جمع شدگی بیشتری دارند. دوم اینکه این طرح دارای بیشترین

حجم خمیره و نسبت آب به مصالح سیمانی است که این خود باعث بیشینه بودن مقدار جمع شدگی شده است. و نهایتاً اینکه این طرح در آستانه از دست دادن ویژگی های خودتراکمی خود بوده است. همین موضوع نیز می تواند باعث پیوستگی نامناسب آن به بتن بستر و ایجاد حباب های هوا در مرز گردد. بنابه مجموعه این علل، این طرح کمترین پیوستگی را از خود نشان داده است.

به طور میانگین با افزودن ۰/۱ درصد الیاف، مقاومت پیوستگی ۳۵/۷۷٪ و با افزودن ۰/۲ درصد الیاف، مقاومت پیوستگی ۱۴/۹۹٪ افزایش داشته است. علت این افزایش را می توان به کاهش جمع شدگی لایه تعمیریه نسبت داد. زیرا جمع شدگی لایه تعمیریه، چون این لایه به بتن بستر چسبیده است، باعث ایجاد ریز ترک هایی در این لایه و مرز دو لایه می شود که منجر به ضعف مقاومت پیوستگی دو لایه می گردد. لذا با کاهش جمع شدگی شاهد افزایش مقاومت پیوستگی هستیم.

با اضافه کردن الیاف به مقدار ۰/۱ درصد افزایش مقاومت پیوستگی اتفاق می افتد و اضافه کردن الیاف تا مقدار ۰/۲ درصد، از این افزایش کمی کاسته خواهد شد. حسن بزرگ این دو روش نسبت به آزمون پول آف این بود که در تمامی موارد همواره گسیختگی از مرز و به طور کامل اتفاق می افتاد. در حالی که در آزمون پول آف در بسیاری از موارد، گسیختگی از لایه تعمیریه و یا از بتن پایه رخ می داد. به همین منظور برای روش پول آف، نمونه های بسیار بیشتری ساخته شد تا با حذف مواردی که گسیختگی از مرز اتفاق نمی افتاد، آزمون های کافی در اختیار باشد. حسن دیگر این دو روش، ضریب تغییرات کم بود. به طوری که نتایج این روش برای هر طرح بسیار نزدیک به هم بودند و پراکندگی نتایج در این آزمون ها بسیار کم است. با توجه به تعیین مقاومت پیوستگی بین لایه تعمیریه و بتن بستر از سه روش پول آف، پوش اوت و منشور شکافت در اینجا مقایسه ای بین این سه روش که اولی بر مبنای ایجاد تنش کششی در مرز دو لایه و دومی، سومی بر مبنای ایجاد تنش برشی برای گسیختگی و تعیین مقاومت پیوستگی دو لایه است، انجام می پذیرد. در شکل ۵ این ارتباط نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه مقاومت پیوستگی حاصل از روش پول آف و روش پوش اوت

همانطور که می توان از نمودار مشاهده کرد، ارتباط مناسبی بین روش ها وجود دارد. علاوه بر آن، آنچنان که پیشتر گفته شد، در روش های تعیین مقاومت پیوستگی به کمک روش های برشی، گسیختگی همواره از مرز اتفاق می افتد. لذا با توجه به ارتباط مناسب این روش ها با روش پول آف ( $R^2=0/9011$  و  $R^2=0/9147$ ) به عنوان روش معتبر در تعیین پیوستگی دو لایه بتنی و گسیختگی از مرز در این روش در ۱۰۰ درصد موارد، می توان این روش ها را روش هایی مناسب برای تخمین چسبندگی دانست.

به عنوان مقایسه می توان به مطالعه Silfwerbrand و همکاران [۴۷] که روی تاثیر زبری سطح بتن بستر بر چسبندگی بتن تعمیریه به بتن بستر با استفاده از پول آف اشاره نمود. چسبندگی لایه تعمیریه معمولی (بتن معمولی ویبره شده) بر بستر مهیا شده با واتر جت بین ۲ تا ۳ مگاپاسکال و چسبندگی بر بستر آماده شده به کمک سند بلاست بتن ۱/۵ تا ۲ مگاپاسکال به دست آمده است. همچنین Silfwerbrand و همکاران [۵۱] روی چسبندگی بلند مدت لایه تعمیریه بتنی روی چند پل بتنی کشور سوئد با استفاده از پول آف کار کرده اند. نتایج حاصله بیانگر مقاومت چسبندگی ۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال بوده است. در مطالعه حاضر به دلیل مقاومت فشاری بالاتر نمونه ها و وجود الیاف، چسبندگی بالاتری مطابق انتظار مشاهده می گردد.

با استفاده از نرم افزار SPSS و رگرسیون خطی، این بار رابطه ای برای پیش بینی مقاومت پیوستگی بتن خودتراکم تعمیری به بتن بستر که هدف اصلی این مطالعه نیز هست به دست آمد. پارامترهای موثر بر مقاومت پیوستگی به این صورت در نظر گرفته شدند: حجم خمیره به کل بتن، نسبت آب به سیمان، درصد حجمی الیاف، مقدار جمع شدگی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی.

دقت مناسب رابطه به دست آمده ( $R^2=0/871$ ) بیانگر درست انتخاب کردن این پارامترها است. علاوه بر این، با انجام چندین رگرسیون خطی و هر بار با حذف کردن یکی از این پارامترها، مشخص شد که بهترین برازش زمانی اتفاق می افتد که این پارامترها همگی حضور داشته باشند. از خروجی نرم افزار در حالتی که کل پارامترهای فوق در نظر گرفته شده اند، رابطه زیر حاصل شد:

$$BS = -11/955 + 13/001 (PV) + 13/500 (WTOC) + 0/477 (F) - 0/004 (SH) + 0/028 (CS) + 1/209(TS) \quad (1)$$

که در این رابطه؛ BS: مقاومت پیوستگی بتن خودتراکم تعمیری به بتن بستر بر حسب مگاپاسکال، PV: نسبت حجم خمیره به حجم کل بتن، WTOC: نسبت آب به مصالح سیمانی، F: درصد حجمی الیاف، SH: مقدار جمع شدگی ضربدر  $10^6$ ، CS: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی ۱۵ سانتی بر حسب مگاپاسکال و TS: نتیجه حاصل از تست برزیلی استوانه استاندارد در سن ۲۸ روزه بر حسب مگاپاسکال می باشند.

#### ۴- نتیجه گیری

۱. به طور میانگین، افزودن ۰/۱٪ الیاف به بتن ها، جریان اسلامپ ۳/۵۴٪ کاهش و زمان T50، ۱۸/۱۶٪ افزایش داشته است. افزودن ۰/۲٪ الیاف نیز باعث کاهش جریان اسلامپ به مقدار ۶/۸۶٪ و افزایش زمان T50 به مقدار ۳۲/۷۶٪ شده است. لذا می توان اینگونه نتیجه گیری کرد که با افزایش مقدار الیاف از ۰/۱٪ به ۰/۲٪، کاهش جریان اسلامپ ۱/۹۴ برابر و افزایش زمان T50، ۱/۸۰ برابر شده است.
۲. با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۰/۱٪ و از ۰/۱٪ به ۰/۲٪، زمان تخلیه قیف V افزایش می یابد. با تغییر مقدار الیاف از ۰/۱٪ به ۰/۲٪، میزان افزایش زمان تخلیه قیف V، ۲/۷۷ برابر می شود.
۳. با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۰/۱٪ و از ۰/۱٪ به ۰/۲٪، نسبت انسداد کاهش می یابد. با تغییر الیاف از ۰/۱٪ به ۰/۲٪ درصد میزان کاهش نسبت انسداد در آزمون جعبه L، ۲/۰۱ برابر می شود.
۴. افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده است. به طور میانگین با افزودن ۰/۱٪ الیاف ۱۴/۵۳٪ افزایش و با افزودن ۰/۲٪ الیاف، شاهد ۷/۲۴٪ افزایش در مقاومت کششی بوده ایم.
۵. افزودن الیاف باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن می شود. این افزایش برای ۰/۱٪ الیاف برابر ۹/۴۳٪ و برای ۰/۲٪ الیاف برابر ۷/۶۵٪ می باشد که نشانگر نتایج بهتر نمونه های حاوی ۰/۱٪ الیاف می باشد.
۶. با افزودن الیاف، مقدار جمع شدگی کاهش می یابد. به طور میانگین افزودن ۰/۱٪ الیاف باعث کاهش جمع شدگی به میزان ۴/۷۰٪ و افزودن ۰/۲٪ الیاف باعث کاهش جمع شدگی به میزان ۲/۵۳٪ شده است.
۷. با افزودن ۰/۱٪ الیاف، مقاومت پیوستگی ۳۵/۷۷٪ و با افزودن ۰/۲٪ الیاف، مقاومت پیوستگی ۱۴/۹۹٪ افزایش داشته است.
۸. با افزایش نسبت آب به مصالح سیمانی و نیز افزایش حجم خمیره، کاهش مقاومت پیوستگی لایه تعمیری به بتن بستر اتفاق می افتد.
۹. نتایج حاصل از روش پوش اوت، ارتباط بسیار مناسبی با روش پول آف را نشان می دهد. با توجه به این ارتباط و اینکه در آزمون پوش اوت، همواره گسیختگی از مرز اتفاق می افتد (بر خلاف روش پول آف که در بسیاری از موارد گسیختگی در لایه تعمیری با بتن بستر ایجاد می شود)، این آزمون، روشی بسیار مناسب برای تعیین پیوستگی دو لایه بتنی به یکدیگر خواهد بود.

۱۰. با توجه به ارتباط مناسب بین روش منشور شکافت با روش پوش آف در تعیین مقاومت پیوستگی و همچنین اینکه در کلیه آزمون ها، گسیختگی نه از بتن پایه و لایه تعمیراتی بلکه همواره از مرز اتفاق می افتاد، این روش نیز روش بسیار مناسب برای انجام این آزمون می باشد.

## مراجع

- [۱] Bartos, P. J. M. and Grauers, M., "Self-compacting concrete", Concrete, Vo. 33, No. 4, pp. 9-14, 1999.
- [۲] Ramchandani, V. S., "Superplasticizers in concrete", Canadian Building Digest, NRC. CBD-203, pp. 1-7, 1999.
- [۳] Danish Technological Institute, Clans Pade, Lars Nyholm Thrane, Claus V. Nielsen, "Guidelines for mix design of SCC", May 2008.
- [۴] M. A. Issa, R.Z. Alrousan, "High performance bonded concrete overlays", ICCBT, 2008
- [۵] Dawei Zhang, Tamon Ueda, Hitoshi Furuuchi, "Average crack spacing of overlay-strengthened RC beams", Journal of materials in civil engineering, ASCE, October 2011
- [۶] N. Banthia, R. Gupta, S. Mindess, "Development of fiber reinforced concrete repair materials", Can. J. Civ. Eng., 33, 2006, 126-133
- [۷] W.Hansen, J.A. Almudaiheem, "Ultimate drying shrinkage of concrete – influence of major parameters", ACI Mater. J., 84, 1987, 217-223
- [۸] O. Challal, B. Benmokrane, G. Ballavy, "Drying shrinkage strains: experimental versus codes", ACI Mater. J., 89, 1992, 263-266
- [۹] ACI committee 209, "Prediction of creep, Shrinkage and temperature effects in concrete structures, designing for creep and shrinkage in concrete structures", SP-76, American concrete institute, Detroit, 1982, 193-300
- [۱۰] Euro-Internationale du beton, "Model code for concrete structures", Paris, 1978
- [۱۱] B. Bissonnette, P. Pierre, M. Pigeon, "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials", cement and concrete research, 29, 1999, 1655-1662
- [۱۲] V. Baroghel-Bouny, M. Mainguy, T. Lassabaterre, O. Coussy, "Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials", Cement and concrete research, 29, 1999, 1225-1238
- [۱۳] John E. Bolander Jr., Stefano Berton, "Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays", Cement and concrete research, 26, 2004, 861-871
- [۱۴] H. Beushausen, M.G. Alexander, "Failure mechanisms and tensile relaxation of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage", Cement and concrete research, 36, 2006, 1908-1914
- [۱۵] E. Roziere, S. Granger, Ph. Turcry, A. Loukili, "Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete", Cement and concrete research, 29, 2007, 626-636
- [۱۶] N. Banthia, R. Gupta, S. Mindess, "Development of fiber reinforced concrete repair materials", Can. J. Civ. Eng., 33, 2006, 126-133
- [۱۷] Emmons, P.H., Vaysburd, A.M. and Czarnecki, L., "Durability of repair materials: Current practice and challenges", in Brittle Matrix Composites 6, Proceedings of an International Symposium, Warsaw, pp. 263–274, 2000.
- [۱۸] Bernard, O., *Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents*, PhD Thesis No. 2283, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 189 pp., 2000.
- [۱۹] Bigwood, D.A. and Grocombe, A.D., *Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints*, International Journal of Adhesion and Adhesive, 9, 229–242, 1989.
- [۲۰] Fowler, D.W., Wheat, D.L., Choi, D.U. and Zalatimo, J., *Stresses in PC overlays due to thermal changes*, in Industrial Floors'03, Proceedings of an International colloquium, Esslingen, January, P. Seidler (Ed.), pp. 29–36, 2003.
- [۲۱] Naciri, T., Ehrlacher, A. and Chabot, A., *Interlaminar stress analysis with a new multiparticle modelisation of multilayered materials (M4)*, Composites Sciences and Technology, 58(3), 337–343, 1998.
- [۲۲] Caron, J.F., Diaz Diaz, A., Carreira, R.P., Chabot, A. and Ehrlacher, A., *Multi-particle modelling for prediction of delamination in multi-layered materials*, Composites Sciences and Technology, 66(6), 755–765, 2006.
- [۲۳] Chausson, H. and Granju J.-L., *Optimized design of fiber reinforcement thin bonded overlays*, in Brittle Matrix Composites 5, Proceedings of an International Symposium, Warsaw, October, Woodhead Publishing, pp. 133–142, 1997.
- [۲۴] Silfwerbrand, J., *Shear Bond Strength in repaired concrete structures*, Materials and Structures, 36(260), 419–424, 2003.
- [۲۵] Sabathier, V., *Rechargements minces adhérents à base cimentaire renforcés de fibres métalliques. Conditions de leur durabilité, modélisation et calcul*, PhD Thesis, Université Toulouse III, 190 pp., 2004.
- [۲۶] Julio, E.N.B.S, Branco, F.A.B. and Silva, V.D., *Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of substrate surface*, Construction and Building Materials, 18(9), 675–681, 2004.

- [۲۷] Granju, J.-L., *Thin bonded overlays: About the role of fiber reinforcement on the limitation of their debonding*, Advanced Cement Based Materials, 4(1), 21–27, 1997.
- [۲۸] Turatsinze, A., Farhat, H. and Granju, J.-L., *Durability of metal-fibre reinforced concrete repairs: Drying shrinkage effects*, in *Proceedings of an International Symposium, Warsaw, October*, Woodhead Publishing, pp. 296–305, 2000.
- [۲۹] Granju, J.L., Sabathier, V., Turatsinze, A. and Toumi, A., *Interface between an old concrete and a bonded overlay: Debonding mechanism*, Interface Science Journal, 12(4), 381–388, 2004.
- [۳۰] Mailvaganam, N., Springfield, J., Repette, W. and Taylor, D., *Curling of concrete slabs on grade*, Construction Technology Update, 44, 1–6, 2000.
- [۳۱] Suprenant, B.A. and Malisch, R.W., *Repairing curled slabs*, Concrete Construction, 9, 58–65, 1999.
- [۳۲] Suprenant, B.A., *A look at the curling mechanism and the effect of moisture and shrinkage gradients on the amount of curling*, Concrete International, 24(3), 56–61, 2002.
- [۳۳] Tran, Q.T., Toumi, A. and Turatsinze, A., *Thin bonded cement-based overlays: Numerical analysis of factors influencing their debonding under fatigue loading*, Materials and Structures, 41(5), 951–967, 2008.
- [۳۴] Lupien, C., Chanvillard, G. Aïtcin, P-C. and Gagné, R., *Réhabilitation d'une chaussée par resurfaçage mince adhérent en béton renforcé de fibres d'acier*, in *Proceedings of AIPCR, Comité C-7, Montréal, Canada*, pp. 246–250, 1995.
- [۳۵] Lupien, C., Chanvillard, G. Aïtcin, P-C. and Gagné R., *Réhabilitation d'une chaussée en béton avec une chape mince en béton renforcé de fibres d'acier*, in *Les techniques de transport au service de la qualité de vie, Exposé des communications du 25<sup>e</sup> congrès annuel de l'AQTR*, Montréal, April, pp. 108-122, 1990.
- [۳۶] Chanvillard, G., Aïtcin, P.C. and Lupien, C., *Field evaluation of steel-fibre reinforced concrete overlays with bonding mechanism*, in *Transportation Research Record 1226, TRB, Washington*, pp. 48–56, 1990.
- [۳۷] Chanvillard, G. and Aïtcin, P.C., *Thin bonded overlays of fiber-reinforced concrete as a method of rehabilitation of concrete roads*, Canadian Journal of Civil Engineering, 17(4), 521–527, 1990.
- [۳۸] Farhat, H., *Durabilité des réparations en béton de fibres: Effets du retrait et de la fatigue*, PhD Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 178 pp., 1999 [in French].
- [۳۹] Granju, J.-L. and Chausson, H., *Serviceability of fiber reinforced thin overlays relation between cracking and debonding*, in *ConChem, Proceedings of an International exhibition & Conference, Brussels, November*, Verlag für chemische industrie, pp. 133–142, 1995.
- [۴۰] Granju, J.-L. and Chausson, H., *Fiber reinforced thin bonded overlays: The mechanism of their debonding in relation with their cracking*, in *Concrete repair, rehabilitation and protection*, in *Proceedings of an International Congress, Dundee, June*, E. & FN. Spon, pp. 583–590, 1996.
- [۴۱] Chausson, H., *Durabilité des rechargements minces en béton: Relation entre leur décollement, leur fissuration et leur renforcement par des fibres*, PhD Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 198 pp., 1997 [in French].
- [۴۲] Turatsinze, A., Granju, J.L., Sabathier, V. and Farhat, H., *Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fibre reinforcement*, Materials and Structures, 38(277), 321–327, 2005.
- [۴۳] Zhang, J., Stang, H. and Li, V.C., *Crack bridging model for fibre reinforced concrete under fatigue tension*, International Journal of Fatigue, 23(8), 655–670, 2001.
- [۴۴] Rossi, P. (sous la direction de), *Le développement industriel des bétons de fibres métalliques, conclusions et reconclusions*, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [۴۵] Delatte, N.J., Williamson, M.S., and Fowler, D.W., *Bond strength development of high-early strength bonded concrete overlays*, ACI Materials Journal, 97-M27, 201–207, March–April 2000.
- [۴۶] Pigeon, M. and Saucier, F., *Durability of repaired concrete structures*. In *Proceedings, International Symposium on Advances in Concrete Technology, Athens, 11–12 May*, pp. 741–773, 1992.
- [۴۷] Silfwerbrand, J., *Improving concrete bond in repaired bridge decks*, Concrete International, 12(9), 61–66, September 1990.
- [۴۸] Naderi, Mahmood, Ghodousian, Oveys, “*Adhesion of Self-Compacting Overlays Applied to Different Concrete Substrates and Its Prediction by Fuzzy Logic*”, The Journal of Adhesion **Volume 88, Issue 10**, 2012.
- [۴۹] Delatte, N.J., Wade, D.M., and Fowler, D.W., *Laboratory and field testing of concrete bond development for expedited bonded concrete overlays*, ACI Materials Journal, 97-M33, 272–280, May–June 2000.
- [۵۰] Saucier, F. and Pigeon, M., *Durability of new-to-old concrete bondings*. In *Proceedings of ACI International Conference on Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design, Hong Kong, December (ACI SP-128)*, pp. 689–705, 1991.
- [۵۱] Silfwerbrand, J. and Paulsson, J., *The Swedish experience: Better bonding of bridge deck overlays*, Concrete International, 20(10), 56–61, 1998.
- [۵۲] Momayez, A. Ehsani, M.R. Ramezani pour, A.A. Rajaie, H., “*Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials*” Cement and Concrete Research Volume 35, Issue 4, April 2005, Pages 748–757