تحقیقات بتن
سال سیزدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۹۹
ص ۱۰۵ – ۹۳
تاریخ دریافت: ۹۸/۹/۱۵
تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۲

مطالعه تأثیر نوع و مقدار پوزولان بر چسبندگی بتن خودتراکم سبک حاوی لیکا با استفاده از روش پوش اوت

سید مهدی موسوی
گروه مهندسی عمران ، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی ، قزوین، ایران.
علی دلنواز *
گروه مهندسی عمران ، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی ، قزوین، ایران.
سید امیر حسین هاشمی
گروه مهندسی عمران ، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی ، قزوین، ایران.

چکیده

امروزه استفاده از بتن سبک سازه‌ای به منظور سبک سازی سازه‌ها که منجر به عملکرد مناسب تر در برابر زلزله می‌گردد بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لذا به کارگیری بتن خودتراکم سبک که هم نیاز به تراکم ندارد و می‌تواند تمامی فضای قالب را پر کند و هم وزن کمتر، در ترمیم و مرمت سازه ها گزینه ای منطقی و مناسب است. در این پژوهش ١٦ طرح مخلوط بتن خودتراکم سبک به کار گرفته شده است. از پنج پوزولان متاکائولن، سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و زئولیت به میزان ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان و سبکدانه لیکا در مخلوط ها استفاده شده است. مدول الاستیسیته، جمع شدگی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی برای تعیین ویژگی های مکانیکی، روش پوش اوت برای تعیین چسبندگی و آزمون های جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L و T50 برای تعیین ویژگی های رئولوژیکی مخلوط ها مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج نشان دادند که بیشترین افزایش چسبندگی مربوط به نمونه حاوی دارای ۵ درصد متاکائولن (با حدود ٦٨ درصد افزایش نسبت به نمونه بدون پوزولان) و بیشترین کاهش مربوط به نمونه دارای ۱۰ درصد زئولیت می باشد (با حدود ۱۳ درصد کاهش نسبت به نمونه بدون پوزولان). همچنین بهترین ویژگی‌های رئولوژیکی با افزودن متاکائولن و ضعیف‌ترین آن با افزودن زئولیت به‌دست آمده است. افزودن پوزولان‌ها در تمامی موارد باعث افزایش ویژگی های مکانیکی مخلوط ها شد.

واژه‌های کلیدی: **پوزولان، لیکا، بتن خودتراکم سبک، چسبندگی.**

* نویسنده مسئول: A.Delnavaz@qiau.ac.ir

۱- مقدمه

در سالهای اخیر استفاده از بتن خودتراکم به میزان چشمگیری افزایش‌یافته است. روانی و کارایی بالا و همچنین عدم نیاز به هرگونه لرزاندن مکانیکی جهت تراکم، عامل اصلی محبوبیت این نوع بتن می‌باشد. همچنین سبک‌سازی یکی از مباحث نوین در علم ساختمان است که روز به روز در حال گسترش و پیشرفت می‌باشد. محققان و پژوهشگران برای دست یافتن به دوام مناسب بتن‌ها، در صدد جایگزین کردن سیمان با مواد افزودنی معدنی برآمده اند تا خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیده و همچنین به توسعه پایدار صنعت سیمان و بتن نیز کمک کرده باشند. انتخاب، طراحی و کنترل کیفیت مصالح برای دستیابی به بتن مناسب، پردوام و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. همچنین ترک‌خوردگی در بتن به شدت روی عملکرد سازه‌ای آن شامل مقاومت کششی، سختی برشی و خمشی، ظرفیت جذب انرژی، دوام، چسبندگی به بتن بستر و مقاومت در برابر خوردگی آرماتورها تأثیر می‌گذارد[۱]. ترک خوردگی لایه بتن نه فقط باعث دسترسی آسان مواد مضر به سطح مشترک بستر و لایه تعمیری می‌شود، بلکه اجازه اشباع زود هنگام لایه بتن را نیز می‌دهد که این خود باعث آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی و ذوب یخ، تغییر رنگ، خرابی‌های ناشی از نفوذ نمک و جداشدگی نهایی می‌گردد[۲]. یکی از عوامل مهم ترک خوردگی لایه بتنی، جمع شدگی آن است. جمع شدگی ناشی از خشک شدن یک تغییر حجم(کاهش حجم) وابسته به زمان است که ناشی از انتقال رطوبت به محیط می‌باشد و به خاطر تغییر در رطوبت نسبی ایجاد می‌گردد. برای بتن با مقاومت معمولی، جمع شدگی ناشی از خشک شدن مهمترین علت تغییر حجم بتن می‌باشد [۳].

تحقیقات زیادی در زمینه جمع شدگی، ترک خوردگی و چسبندگی مصالح بتنی صورت گرفته است. لارنش و همکاران[1] [۴] معتقدند که ضخامت تاثیری در مقاومت چسبندگی ندارد. باید دقت داشت که مقاومت چسبندگی یکسان به معنای احتمال یکسان گسیختگی مرز دو لایه نیست. احتمال گسیختگی به دو عامل مقاومت چسبندگی و تنش چسبندگی وابسته است. ضخامت روی تنش چسبندگی تأثیرگذار است. زیرا روی استرس‌های ناشی از جمع شدگی تأثیر می گذارد. نادری و همکاران نیز مطالعاتی با عنوان تعیین چسبندگی بتن و ملات تعمیری خود متراکم بر بسترهای مختلف بتنی با به کارگیری روش های "پیچش"، "انتقال اصطکاک" و تخمین آن با روش "منطق فازی" داشتند و نشان دادند که با افزایش مقاومت فشاری بتن و ملات خود متراکم به‌عنوان لایه تعمیری، چسبندگی این لایه به بتن بستر بیشتر می گردد. با افزایش نسبت سنگدانه به خمیره در لایه تعمیری خود متراکم، چسبندگی این لایه به بستر بتنی افزایش می یابد. چسبندگی بتن خود متراکم به بتن بستر به مقدار بسیار کمی بیشتر از ملات خود متراکم است. براساس نتایج به دست آمده، به ترتیب بیشترین مقدار چسبندگی برای حالت بستر اشباع با سطح دوغابی، سپس بستر خشک با سطح دوغابی، بستر اشباع با سطح خشک، بستر خشک با سطح خشک و کمترین چسبندگی را بستر اشباع با سطح خیس تولید نمودند. ابن ترتیب نشان دهنده تأثیر مثبت زیاد سطح دوغابی و تأثیر منفی زیاد سطح خیس بر چسبندگی می باشد[۵]. همچنین در سال ۲۰۱۱ پدرو و همکاران عوامل مؤثر بر چسبندگی بین بتن جدید و بتن قدیم مطالعاتی انجام دادند، که دو شرایط عمل‌آوری، در داخل و خارج آزمایشگاه انجام گرفت؛ اندازه گیری های تجربی برای هر دو شرایط عمل آوری، به طور قابل توجهی متفاوت بود، عمدتا به دلیل نوسانات روزانه و رطوبت نسبی و درجه حرارت و همچنین به قرار گرفتن در معرض مستقیم نمونه بتن به باران و باد در بیرون از آزمایشگاه نتیجه مقاومت برشی به نظر می رسد برای هر دو نامناسب است[۶]. هانسن[2] و همکاران [۷] اثر جمع‌شدگی 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[3] و همکاران[۸] نتایج آزمایشگاهی کرنش‌های جمع شدگی ناشی از خشک شدن را با مقادیر تخمینی براساس توصیه‌های ACI[۹] و CEB[۱۰] مقایسه کردند. بیسونت[4] و همکاران[۱۱] نیز آزمایش جمع شدگی را روی نمونه‌های 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[5] و همکاران

[1]- Laurence, et. all
[2]- Hansen
[3]- Chaallal
[4]- Bissonnette
[5]- Baroghel

[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 مقاوم‌سازی شده دارد. به ویژه، کرنش‌های جمع‌شدگی که در روزها و هفته‌های اول اعمال لایه تعمیری اتفاق می‌افتند در چسبندگی لایه تعمیری به بتن بستر نقش مهمی دارند.

پژوهش های بسیاری هم در زمینه مقاومت چسبندگی بر روی بتن انجام گرفته است که به چندی از آنها اشاره می گردد؛ در سال ۲۰۱۸ تیانکسون[1] و همکارانش به ارزیابی مقاومت چسبندگی بتن تازه به‌عنوان لایه تعمیری بر روی آسفالت پرداختند آنها در این تحقیق از آزمون های برش مستقیم ، مقاومت کششی و آزمایش سیکل ذوب و یخ استفاده کردند و عامل زبری سطح و سن خرابی سطح و حالت های لغزش و شکست را بر روی بتن و لایه تعمیری بررسی نمودند[۱۳]. آسکیون[2] و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به مدلسازی رفتار چسبندگی و مقاومت فشاری بتن تقویت شده با فولاد پلیمری SRP پرداختند[۱۴]. تاثیر خصوصیات سطح بر مقاومت چسبندگی بتن تعمیری را نیز لوک[3] و همکارانش در سال ۲۰۱۴ انجام دادند. آنها اشاره کردند که کارایی و دوام یک سیستم تعمیر شده بستگی به بستر بتن و مواد تعمیری دارد. افزایش سطح زبری بستر بتن می‌تواند باعث ارتقاء چسبندگی بین لایه تعمیری و بتن بستر شود. در این تحقیق مقاومت کششی و چسبندگی به روش PULL-OFF انجام شده است[۱۵].ارزیابی مقاومت چسبندگی کششی بین مواد تعمیری UHTCC و بستر بتن توسط بینگ[4] و همکارانش در سال ۲۰۱۶ انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش زبری سطح بتن قدیمی می‌تواند مقاومت بتن را بهبود بخشد؛ ولی زبری بیش از حد می‌تواند سطح را تضعیف کند و زبری مناسب دارای مقدار محدودی است. خاکستر بادی و دود سیلیکا و SBR لاتکس می‌تواند مواد چسبندگی را بهبود بخشد و مقاومت را افزایش دهد[۱۶]. همچنین ابو صباح[5] و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به بررسی رابطه بین مقاومت چسبندگی بتن تعمیری با بستر بتنی معمولی و بستر بتنی با پوشش GUSMRC پرداختند. در این تحقیق مقاومت چسبندگی به روش اسلنت شیر، منشور شکافت و کشیدن از سطح در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفت[۱۷].

بنابراین باتوجه تحقیقات انجام گرفته و موارد عنوان شده، موضوع چسبندگی بین بتن و لایه تعمیری حائز اهمیت می باشد و در این مقاله تاثیر استفاده از پوزولان‌های متاکائولن، سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و زئولیت و سبکدانه لیکا بر روی پارامترهای موثر بر بتن خودتراکم سبک شامل مدول الاستیسیته، جمع شدگی، مقاومت چسبندگی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بررسی شده است.

۲- مشخصات مصالح مصرفی در ساخت بتن خودتراکم سبک

۲-۱- ریزدانه و درشتدانه

ریزدانه و درشتدانه مصرفی رودخانه‌ای بوده و حداکثر اندازه درشتدانه ۱۲/۵ میلی متر است. وزن مخصوص ریزدانه و درشتدانه نیز به ترتیب برابر ۲/۷۰ و ۲/۶۴ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. دانه بندی نیز براساس استاندارد ASTM C33 [18] انجام شده است.

۲-۲- رس منبسط شده (لیکا)

چگالی لیکای مصرفی با اندازه‌ی دانه‌های ۴/۷۵ الی ۱۲/۵میلی‌متر برابر ۱۳۵۰ Kg/m^3 می‌باشد. جذب آب ۲۴ ساعته‌ی لیکا ٪۱۰ و جذب آب نیم ساعته‌ی آن ٪۵ بدست آمد. دانه‌بندی سبکدانه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C330 [19] می‌باشد.

۲-۳-پودر سنگ آهک

برای کاهش مدول نرمی ماسه و افزایش کارایی آن از پودر سنگ آهک استفاده شده است. چگالی پودر سنگ آهک مصرفی ۲/۷ gr/cm^3 می‌باشد.

۲-٤-سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ استفاده شده است. زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان به ترتیب برابر۹۰و۲۴۰ دقیقه بوده و عدد بلین آن برابر ۳۴۰ m^2/kg می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول (۱) آورده شده است.

1- Tianxiong Guo
2- Ascione
3- Luc Courard
4- Bing Wang
5- S.H. Abo Sabah

جدول ۱- مشخصات سیمان مصرفی

ترکیبات	LOI	Na2O	K2O	CL	SO3	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2
مقدار	۲/۱۷	۰/۵۱	۰/۷۲	۰/۰۲۹	۲/۳۵	۱/۴۷	۶۳/۰۴	۳/۹۴	۵/۰۹	۲۱/۱۹

۲-۵- آب

کیفیت آب از آن جهت حائز اهمیت است که ناخالصی‌های موجود در آن ممکن است درگیرش سیمان تاثیر گذاشته و اختلالاتی به وجود آورند. در اکثر استانداردها، آب مناسب برای ملات و بتن آبی است که برای آشامیدن مناسب باشد. آب مصرفی در این پروژه آب شرب می باشد.

۲-٦- فوق‌روان کننده

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. این محصول با خاصیت حفظ اسلامپ بتن در زمان‌های طولانی تولید گردیده است. بتن اصلاح شده با این نوع فوق روان کننده کارایی خود را در حدود ۱ تا ۲ ساعت در دمای ۲۰ °C (دمای داخلی بتن) در مقادیر مصرف متوسط حفظ می نماید. مشخصات فوق روان کننده مصرفی در جدول (۲) قابل ملاحظه است.

جدول ۲- مشخصات فوق روان کننده مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید
طبیعت یونی	آنیونی
رنگ	سبز تیره
حالت فیزیکی	مایع
pH	۷± ۱
وزن مخصوص kg/Lit	۱/۱ ± ۰/۰۲ ۲۰ °C
کلراید	500 Max

۲-۷- پوزولان مصرفی

پوزولان‌های مصرفی متاکائولن، سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و زئولیت به میزان ۵ ، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان می‌باشد. سرباره مصرفی دارای چگالی مخصوص ۲۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح مخصوص ۴۴۵ متر مربع بر کیلوگرم است. پوسته برنج تا درجه حرارت ۶۰۰ درجه سانتی گراد حرارت داده می‌شود تا به خاکستر تبدیل شود.

خاکستر حاصله دارای وزن مخصوص ۲ گرم بر سانتی متر مکعب و سطح مخصوص ۹۵۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم می‌باشد و جایگزین درصدی از وزن سیمان می گردد.

زئولیت مورد استفاده در این تحقیق با وزن مخصوص آن ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. خاکستر بادی از نوع کلاس F با سطح مخصوص ۴۰۰۰ گرم بر سانتی متر مربع و وزن مخصوص ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. پوزولان متاکائولن به کار رفته در این تحقیق به رنگ سفید با چگالی ویژه ۲/۶ و سطح مخصوص ۱۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مربع است. آنالیز شیمیایی هریک از پوزولان‌ها به‌صورت مجزا در جدول (۳) جمع آوری شده است.

۳- انتخاب طرح مخلوط های مورد نظر و ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش ۱۶ طرح مخلوط بتن خودتراکم سبک به کار گرفته شده است. پوزولان مصرفی متاکائولن، سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و زئولیت به میزان ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان می‌باشد. طرح های ساخته شده در جدول (۴) مشاهده می‌شود.

٤- آزمایش‌های بتن تازه

تفاوت عمده‌ی بتن خودتراکم سبک با بتن معمولی در آزمایشات حالت تازه می‌باشد، لذا کنترل کارایی آن امری ضروری است. بنابراین سعی برآن شد تا ابتدا کارایی بتن مورد ارزیابی قرارگیرد بطوری‌که از حداقل کیفیت مورد نظر به جهت دارا بودن قابلیت‌های خودتراکمی اطمینان حاصل گردد. نتایج آزمایش‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم در جدول (۵) ارائه گردیده است.

جدول ۳- آنالیز شیمیایی پوزولان‌ها

ترکیبات	CaO	SiO_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	L.O.I
زئولیت	۱/۶۸	۶۷/۷۹	۱۳/۶۶	۱/۴۴	۱/۲۰	۱/۴۲	۲/۰۴	۰/۵	۱۰/۲۳
خاکستر پوسته برنج	۰/۸	۹۰/۹	۰/۸۳	۰/۶	۰/۵۶	–	–	–	–
سرباره	۴۰/۷	۳۳/۱	۱۳/۸	۳/۱۲	۸/۷۰	–	–	۰/۶۰	–
خاکستر بادی	۸/۶	۵۹/۳	۲۳/۴	۴/۸	۰/۶	–	۳/۲	۰/۱	–
متاکائولن	۰/۰۹	۵۴–۵۲	۴۶–۴۴	۱/۲–۰/۶	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱	–	۱/۵–۰/۵

جدول ۴- طرح اختلاط ۱۶ مخلوط ساخته شده

نام طرح	سیمان	مقدار سبکدانه	ماسه	پودر سنگ آهک	نوع پوزولان	درصد پوزولان	مقدار پوزولان	آب	فوق روان کننده	W/(C+AP)
	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3		درصد وزنی سیمان	Kg/m^3	Kg/m^3	درصد حجمی بتن	
CTRL-LICA	500	330	740	330	–	0	0	180	1.3	0.36
LICA-FA5	475	330	740	330	FA	5	25	180	1.3	0.36
LICA-FA7	465	330	740	330	FA	7	35	180	1.3	0.36
LICA-FA10	450	330	740	330	FA	10	50	180	1.3	0.36
LICA-MT5	475	330	740	330	MT	5	25	180	1.3	0.36
LICA-MT7	465	330	740	330	MT	7	35	180	1.3	0.36
LICA-MT10	450	330	740	330	MT	10	50	180	1.3	0.36
LICA-ZE5	475	330	740	330	ZE	5	25	180	1.3	0.36
LICA-ZE7	465	330	740	330	ZE	7	35	180	1.3	0.36
LICA-ZE10	450	330	740	330	ZE	10	50	180	1.3	0.36
LICA-SL5	475	330	740	330	SL	5	25	180	1.3	0.36
LICA-SL7	465	330	740	330	SL	7	35	180	1.3	0.36
LICA-SL10	450	330	740	330	SL	10	50	180	1.3	0.36
LICA-RHA5	475	330	740	330	RHA	5	25	180	1.3	0.36
LICA-RHA7	465	330	740	330	RHA	7	35	180	1.3	0.36
LICA-RHA10	450	330	740	330	RHA	10	50	180	1.3	0.36

٤-١- تحلیل نتایج آزمایش بتن تازه

آزمایش جریان اسلامپ آزمون سنجش روانی و آزمایش T50 در واقع بیانگر سرعت جریان یافتن افقی بتن خود تراکم می باشد. وجود لیکا در بتن خودتراکم باعث افزایش جریان اسلامپ و کاهش مدت زمان جاری شدن افقی می‌شود. مشاهده می‌گردد که با اضافه کردن پوزولان متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره و خاکستر پوسته برنج، جریان اسلامپ و سرعت جریان یافتن بتن که در آزمایش T50 متبلور است افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، واکنش پذیری کمتر این پوزولان‌ها نسبت به سیمان است که حجم قید شیمیایی و آب جذب شده کاهش می‌یابد و موجب آب آزاد بیشتر و سطح بیشتر روانی می‌گردد. اما افزودن زئولیت منجر به کاهش جریان اسلامپ و سرعت جریان یافتن بتن در آزمایش T50 می‌شود. زئولیت پوزولانی است با تخلخل بسیار زیاد، همچنین دارای ذرات با ابعاد متفاوت می باشد. شکل دانه‌های زئولیت به‌صورت منشوری و زاویه دار است.

همچنین کاملا واضح است که زئولیت مصرفی بسیار ریزدانه است و سطح ویژه بالایی دارد. با افزایش درصد مصرفی پوزولان‌های سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، زئولیت و سرباره، بتن با سرعت کمتری و به مقدار کمتری حرکت می‌کند به طوری که جریان اسلامپ کاهش و مدت زمان T50 افزایش

می‌یابد. این رفتار می‌تواند به دانه های ریز پوزولان در مقایسه با ذرات سیمان نسبت داد که با فراهم نمودن سطح بیشتر، اصطکاک بین ذرات بیشتر می‌شود. با افزایش درصد جایگزینی آن، منافذ در بتن خودتراکم سبک پر گردیده و حجم خمیرسیمان افزایش می-یابد بر این اساس میزان روانی نمونه کاهش یافته و مقدار جربان اسلامپ افت می کند. در واقع از پوزولان‌های نامبرده به جز زئولیت می‌توان به‌عنوان اصلاح کننده لزجت بتن استفاده کرد. همچنین در حالت بتن تازه باعث کاهش آب انداختگی و جداشدگی شده و همچنین باعث بهبود اساسی کارایی بتن می گردد.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های رئولوژیکی ۳۲ طرح ساخته شده

V-FUNNEL (Sec)	L-BOX	T50 (Sec)	SF (Cm)	MIX PROP.
11	1	3.51	64	CTRL-LICA
8.9	1	2.99	65.7	LICA-FA5
10.6	0.97	3.3	64.2	LICA-FA7
11.55	0.95	3.5	62.8	LICA-FA10
8.4	1	2.86	67.4	LICA-MT5
9.6	0.98	3.03	65.9	LICA-MT7
10.4	0.95	3.24	64.6	LICA-MT10
11.5	0.97	3.7	62.7	LICA-ZE5
12.4	0.94	4	61	LICA-ZE7
13.6	0.92	4.5	59.3	LICA-ZE10
9.9	1	3.2	65	LICA-SL5
11.2	0.96	3.67	63.6	LICA-SL7
12	0.94	3.89	62.2	LICA-SL10
10.5	0.98	3.46	64.1	LICA-RHA5
11.8	0.96	3.92	62	LICA-RHA7
12.6	0.92	4.1	60.3	LICA-RHA10

بیشترین مقدار جریان اسلامپ برای طرح LICA-MT5 برابر با ۶۷/۴ سانتی متر و کمترین آن برای طرح LICA -ZE10 برابر با ۶۷/۴ سانتی متر به دست آمده است. در آزمون T50 نیز، کمترین زمان مربوط به طرح LICA-MT5 با مقدار ۲/۸۶ ثانیه و بیشترین زمان مربوط به طرح LICA -ZE10 با مقادیر ۴/۵ ثانیه است.

مدت زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه گیری شده و به‌عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این آزمایش می‌تواند به‌عنوان معیاری برای تعیین جداشدگی بتن مورد استفاده قرار گیرد. زمان مناسب تخلیه بتن از دستگاه قیف V برای بتن خودتراکم حدود ۶ تا ۱۲ ثانیه می‌باشد [۲۰]. با این وجود این پارامتر به تنهایی تعیین کننده نیست. البته بررسی های انجام گرفته نشان می‌دهد که بتن های خود تراکم با زمان تخلیه کاملاً متفاوت در محدوده کمتر از ۶ ثانیه یا بیش از ۱۲ ثانیه نیز با موفقیت به کار برده شده اند. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر لزجت خمیری زیاد است. زمان تخلیه عمودی مخلوط از قیف v شکل در تمامی طرح ها بجز مخلوط های دارای ۷ و ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰ درصد خاکستر پوسته برنج در محدوده مناسب (۶ تا ۱۲ ثانیه) قرار دارند. وجود لیکا در بتن خودتراکم سبک باعث کاهش لزوجت، کاهش تنش تسلیم و افزایش آب در مخلوط می‌گردد و افزایش روانی بتن را به همراه دارد بنابراین به افزایش سرعت حرکت بتن و کاهش مدت زمان جاری شدن بتن به‌صورت عمودی کمک می‌کند. با اضافه کردن پوزولان متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره و خاکستر پوسته برنج سرعت جریان یافتن عمودی بتن در آزمایش قیف v شکل افزایش می‌یابد مدت زمان اندازه گیری شده کاهش می‌یابد. اما افزودن زئولیت منجر به کاهش سرعت جریان یافتن بتن در آزمایش قیف v می‌شود که دلیل کاهش سرعت جریان یافتن بتن نسبت به دیگر پوزولان‌ها در اثر ریزی زیاد، تخلخل بالا و شکل ذرات آن می باشد. با افزایش درصد مصرفی پوزولان‌های سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن زئولیت و سرباره همانگونه که از نتایج آزمون قابل مشاهده است بتن با سرعت کمتری و به مقدار کمتری حرکت می‌کند به طوری که مدت زمان خروج بتن از قیف افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد پوزولان، بتن نیاز به آب بیشتری دارد تا به کارایی مطلوبی برسد. کمترین مدت زمان خروج بتن از قیف V شکل برای طرح LICA-MT5 برابر با ۸/۴ ثانیه و بیشترین آن برای طرح LICA -ZE10 برابر با ۱۳/۶ ثانیه به دست آمده است. از دیگر پارمترهای خصصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم نسبت انسداد در جعبه L شکل می باشد و بیانگر قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خود تراکم می‌باشد. محدوده مجاز برای این آزمایش نسبت بزرگتر از ۰/۸ تعیین شده است. نسبت انسداد در تمامی طرح ها در محدوده مناسب قرار دارد. وجود لیکا در بتن خودتراکم به دلیل درصد جذب آب بالا، باعث کاهش روانی و نسبت انسداد در بتن می‌گردد. با اضافه کردن پوزولان متاکائولن،

خاکستر بادی و سرباره نسبت انسداد همچنان یک می باشد. اما افزودن زئولیت و خاکستر پوسته برنج منجر به کاهش نسبت انسداد می‌شود. با افزایش درصد مصرفی پوزولان‌های سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، زئولیت و سرباره همانگونه که از نتایج آزمون قابل مشاهده است نسبت انسداد کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان کاهش همگنی مخلوط دانست. زیرا دانه های پوزولان سطح مخصوص بیشتری نسبت به دانه های سیمان دارند و درنتیجه آب بیشتری صرف هیدراسیون خواهد شد که این خود باعث کاهش آب آزاد در دسترس برای روان شدن بتن می‌گردد و لذا مخلوط خشن تر شده و روانی کاهش می‌یابد. اما همچنان بتن با این طرح مخلوط می‌تواند به خوبی جریان یابد و از میان میلگردها عبور کند. کمترین آن برای طرح LICA -ZE10 برابر با ۰/۹۲ به دست آمده است.

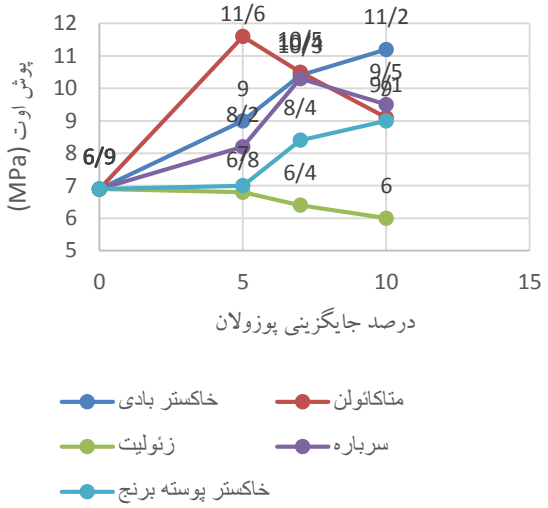
۵- آزمایش‌های بتن سخت شده

پس از بررسی بتن در حالت تازه بتن در قالب های مورد نظر ریخته و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری در آب قرا می گیرند و سپس تمامی نمونه‌ها تحت آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و جمع شدگی قرار گرفتند. این آزمایش بر روی نمونه‌های منشوری ۷*۷*۲۸ سانتی متری انجام شده است. قرائت در سن ۲۸ روزه توسط گیج مخصوصی که دارای دقتی معادل ۲ میکرومتر است انجام شده است. برای تعیین مقاومت چسبندگی از روش پوش اوت استفاده شده است. در روش پوش اوت دو قطعه بتنی از بتن در دو طرف قالب مکعبی ۱۵ سانتی قرار داده می‌شود و بین این دو قطعه، بتن جدید ریخته خواهد شد که ضخامت آن ۵ سانتی متر خواهد بود. دو قطعه کناری بتن معمولی با مقاومت فشاری بالای ۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شدند تا این اطمینان حاصل گردد که شکست در آنها اتفاق نخواهد افتاد. در شکل (۱) نحوه قرارگیری و شکست نمونه‌ها قابل مشاهده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و جمع شدگی در جدول (۶) آورده شده است. همچنین نتیج حاصل از آزمون پوش اوت برای تعیین چسبندگی بین دو لایه بتنی در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۱- نحوه انجام آزمایش در روش پوش اوت

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی ۳۲ طرح ساخته شده

MIX PROP.	مقاومت فشاری MPa	مقاومت کششی MPa	مدول الاستیسیته GPa	10^{-6} × جمع شدگی
CTRL-LICA	35.60	2.95	19.23	340.00
LICA-FA5	45.62	3.81	23.22	580.00
LICA-FA7	47.41	3.98	24.34	500.00
LICA-FA10	49.88	4.20	25.64	440.00
LICA-MT5	41.20	3.44	22.90	650.00
LICA-MT7	38.98	3.27	21.79	570.00
LICA-MT10	36.87	3.11	22.04	500.00
LICA-ZE5	39.10	3.37	22.00	440.00
LICA-ZE7	38.47	3.23	21.56	390.00
LICA-ZE10	36.81	3.09	20.31	350.00
LICA-SL5	44.05	3.70	22.35	540.00
LICA-SL7	49.68	4.17	24.15	480.00
LICA-SL10	46.57	3.90	23.68	410.00
LICA-RHA5	35.90	3.00	19.35	500.00
LICA-RHA7	37.61	3.16	20.10	430.00
LICA-RHA10	40.02	3.36	20.80	380.00



شکل ۲- نتایج آزمون پوش اوت برای تعیین چسبندگی مخلوط‌ها به بتن بستر

۵-۱- تحلیل نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

همان‌طور که می‌دانیم در نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی لیکا مقدار آب در مخلوط بیشتر از نمونه‌های خودتراکم معمولی است. در نمونه‌های لیکا، مقدار زیادی آب به ازای هر واحد وزن سیمان در مخلوط سیمان در مخلوط بتن وجود دارد؛ بنابراین اگر یک حجم ثابت از بتن به‌صورت یک مکعب بتن‌ریزی شود، تعداد زیادی حفره آب در مکعب بتنی وجود خواهد داشت، بنابراین هنگامی‌که واکنش هیدراتاسیون در سطح ذرات سیمان شروع می‌شود، فرآورده‌های ژل مانند هیدراسیون در آب به دور از سطح ذرات سیمان رسوب می‌کنند. ازآنجایی‌که یک فضای بزرگی برای فرآورده‌های خارجی هیدراتاسیون وجود دارد، فرآورده‌های خارجی هیدراتاسیون ابعاد بزرگی دارند. از قانون اثر اندازه می‌دانیم که ذرات بزرگ‌تر مقاومت پایین‌تری در مقایسه با ذرات با اندازه کوچک‌تر دارند. همچنین با توجه به مقدار زیاد آب موجود در مخلوط، مقداری آب همچنان زمانی که بتن به سخت شدگی رسید و آماده استفاده شد باقی می‌ماند. این آب محسوس شده به‌تدریج تبخیر می‌شود و فضاهای خالی را در بلوک بتنی برجای می‌گذارد. حضور این حفره‌ها منجر به پایین بودن مقاومت فشاری می‌شود. پس اگر لیکا در نمونه‌ها افزوده شود نوع شکست و گسیختگی آن‌ها تغییر می‌کند به‌طوری‌که نمونه‌های لیکا ترد و مخرب‌تر نسبت به نمونه‌های بتن خودتراکم معمولی هستند.

از نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری دیده می‌شود که با افزودن پوزولان (متاکائولن، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، زئولیت و سرباره) مقاومت فشاری افزایش‌یافته است. زیرا پوزولان‌ها به علت ریزتر بودن نسبت به سیمان، به‌عنوان فیلر نیز عمل کرده و منافذ ریزتر را پر نموده و مخلوط چگال تری ایجاد می‌کند. لذا بتن حاوی پوزولان مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالاتری نسبت به نمونه شاهد دارد. به‌نوعی پوزولان‌ها با مصرف آب‌آهک موجود در بتن این ژل سیلیکاتی را افزایش می‌دهند، درنتیجه از تخلخل مود در بتن کاسته می‌شود و نمونه‌های بتنی متراکم‌تر می‌شود و به‌مرور زمان، سرعت انجام واکنش‌ها(هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی) در بتن کاهش می‌یابد و این امر موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. چنین به نظر می‌رسد که افزودن پوزولان‌ها (۵ پوزولان مصرفی) با مصرف بلورهای پرتلندایت و تشکیل محصولات ژل مانند و محصولات کریستال ثانویه، ساختار ناحیه انتقال را به‌طور اساسی بهبود بخشیده است. بنابراین با افزودن پوزولان‌ها (۵ پوزولان مصرفی) تراکم ناحیه انتقال بیشتر شده و از میزان حفرات و ترک‌های کویین کاشته شده است و کاهش هوای موجود در مخلوط را به همراه خواهد داشت و بنابراین مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این امر ناشی از انجام واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی در اثر افزودن پوزولان‌ها (۵ پوزولان مصرفی) است. افزایش میزان مصرف پوزولان به‌عنوان جایگزین سیمان به علت واکنش پوزولان با هیدروکسید کلسیم طی هیدراتاسیون سیمان، هیدرات سیلیکات کلسیم تشکیل می‌شود باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. بالاترین مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، زئولیت، خاکستری بادی و سرباره به ترتیب در درصدهای ۱۰، ۵، ۵، ۱۰ و ۷ درصد جایگزینی سیمان اتفاق می‌افتد. با افزایش میزان پوزولان خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و سرباره‌ی جایگزینی سیمان، مقاومت فشاری بیشتری به دست می‌دهند. اما افزایش درصد مصرفی متاکائولن و زئولیت تا ۷ درصد و ۱۰ درصد باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود و این کاهش در نمونه‌های دارای زئولیت بیشتر از متاکائولن است. این کاهش مقاومت بتن را می‌توان به علت توده شدن پوزولان‌ها در ساختار بتن، ایجاد نقطه‌های ضعیف مستعد شروع ترک و همچنین کاهش مقدار سیمان در ساختار ملات دانست. یکی از علل آن را می‌توان تأخیر هیدراسیون و یا

عدم انجام هیدراسیون بخشی از دانه‌های سیمان به دلیل احاطه شدن دانه‌های سیمان توسط این نوع پوزولان که در ساختار مخلوط استفاده‌شده است در نظر گرفت.

بالاترین مقاومت فشاری را به ترتیب نمونه‌های خاکستر بادی، سرباره، متاکائولن، زئولیت و خاکستر پوسته برنج کسب نموده‌اند. اگرچه خاکستر پوسته برنج عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های شاهد از خود نشان داده است ولی نسبت به دیگر پوزولان‌ها عملکرد ضعیف‌تری داشته است که این می‌تواند مربوط به خصوصیات پوسته برنج به‌کاررفته و یا مراحل فرآوری آن ازجمله دمای احتراق و مدت‌زمان سوزاندن و مدت‌زمان سرد کردن و سایر عواملی باشد که در تهیه این پوزولان نقش بسزایی دارند. اما همچنان به‌واسطه حضور خاکستر پوسته برنج بالاتر از طرح‌های شاهد است. همچنین خاکستر بادی به دلیل داشتن سیلیکات و آلومینو سیلیکات کلسیم مقاومت بیشتری نسبت به دیگر پوزولان‌ها به دست می‌دهد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری برای طرح LICA -FA10 برابر با ۴۹/۸۸ مگاپاسکال و کمترین آن برای طرح LICA-RHA5 برابر با ۳۵/۹ مگاپاسکال به‌دست‌آمده است.

نتایج مقاومت کششی نیز از مقاومت فشاری تبعیت می‌کند. اگر لیکا در بتن خودتراکم افزوده شود نوع شکست و گسیختگی آن‌ها تغییر می‌کند به‌طوری‌که نمونه‌های لیکا ترد و مخرب‌تر نسبت به نمونه‌های خودتراکم معمولی هستند.

همانند آنچه در مقاومت فشاری دیده شد، با افزودن پوزولان (متاکائولن، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، زئولیت و سرباره) مقاومت کششی افزایش‌یافته است. بنابراین با افزودن پوزولان‌ها (۵ پوزولان مصرفی) تراکم ناحیه انتقال بیشتر شده و می‌تواند با ساختار و همگنی بهتر بتن خودتراکم سبک مرتبط باشد، زیرا منافذ بتن خودتراکم سبک نسبت به بتن سبک معمولی دارای ابعاد کوچک‌تری است و به‌طور محدودتری در داخل بتن پخش‌شده‌اند بنابراین مقاومت کششی افزایش می‌یابد. به ترتیب بیشترین تا کمترین تغییرات متعلق به نمونه‌های دارای خاکستر بادی، سرباره، متاکائولن، زئولیت و خاکستر پوسته برنج هست. همچنین مشخص است که خاکستر بادی و سرباره نسبت به دیگر پوزولان‌ها می‌تواند ظرفیت کرنش، مقاومت در برابر ضربه، میزان جذب انرژی، مقاومت سایشی و مقاومت کششی ملات را افزایش دهد. نرخ کسب مقاومت کششی در نمونه‌های خاکستر پوسته برنج کمتر از دیگر نمونه‌ها است که آن‌هم به دلیل تفاوت در ساختار شیمیایی این پوزولان است.

با افزایش میزان پوزولان خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و سرباره‌ی جایگزینی سیمان، مقاومت کششی بیشتری به دست می‌دهند. زیرا وجود این پوزولان باعث بهبود ناحیه انتقال و تغییر در محصولات خمیر سیمان و به تأخیر افتادن رشد ریزترک‌ها در بتن می‌گردد که درنتیجه باعث افزایش مقاومت و کرنش تحت بار حداکثر خواهد شد. چراکه در مقاومت کششی، کیفیت منطقه تماس و میزان تحمل کشش خمیر سیمان اهمیت دارد. اما افزایش درصد مصرفی متاکائولن و زئولیت تا ۷ درصد و ۱۰ درصد باعث کاهش مقاومت کششی می‌شود و این کاهش در نمونه‌های دارای زئولیت بیشتر از متاکائولن است. کاهش مقاومت کششی را می‌توان به علت کاهش مقدار سیمان در ساختار ملات دانست. بیشترین مقدار مقاومت کششی برای طرح LICA -FA10 برابر با ۴/۲۰ مگاپاسکال و کمترین آن برای طرح LICA-RHA5 برابر با ۳ مگاپاسکال به‌دست‌آمده است.

ازآنجاکه، مدول الاستیسیته با مقاومت فشاری رابطه مستقیم دارد بنابراین افزایش مقاومت فشاری منجر به افزایش مدول الاستیسیته خواهد شد. در نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی لیکا مقدار آب در مخلوط بیشتر از نمونه‌های خودتراکم معمولی است پس مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته پایین‌تری را به دست می‌آورند. از نتایج آزمایش‌های مدول الاستیسیته دیده می‌شود که با افزودن پوزولان (متاکائولن، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، زئولیت و سرباره) مدول الاستیسیته افزایش‌یافته است و افزایش میزان پوزولان خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج و سرباره‌ی جایگزینی سیمان، مدول الاستیسیته بالاتری به دست می‌آید. اما افزایش درصد مصرفی متاکائولن و زئولیت باعث کاهش مدول الاستیسیته می‌شود و این کاهش در نمونه‌های دارای زئولیت بیشتر از متاکائولن است. بیشترین مدول الاستیسیته را به ترتیب نمونه‌های خاکستر بادی، سرباره، متاکائولن، زئولیت و خاکستر پوسته برنج کسب نموده‌اند. اگرچه خاکستر پوسته برنج عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های شاهد از خود نشان داده است. بیشترین مقدار مدول الاستیسیته برای طرح LICA -FA10 برابر با ۲۵/۶۴ گیگا پاسکال و کمترین آن

برای طرح LICA-RHA5 برابر با ۱۹/۳۵گیگا پاسکال به‌دست‌آمده است.

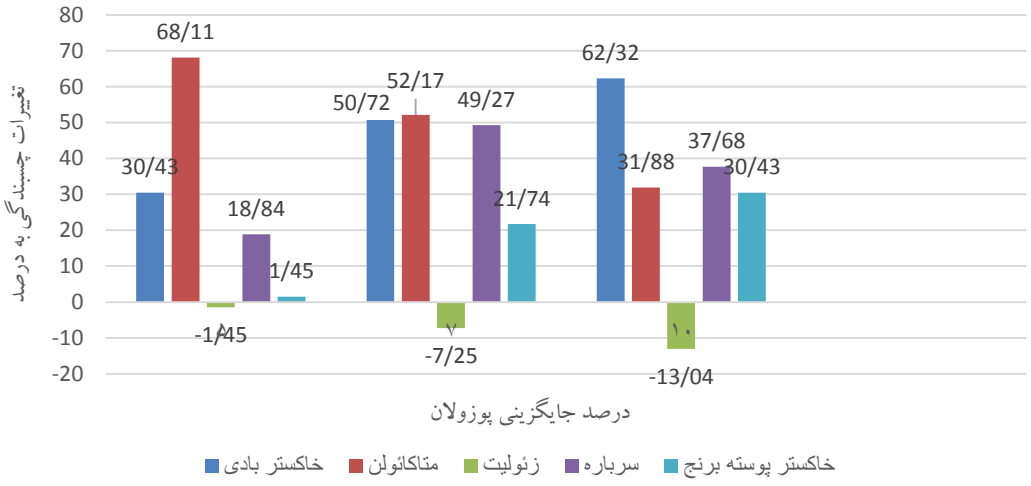
در اثر از دست رفتن آب بتن، تنش‌های کششی ایجاد می‌شود که منجر به انقباض یا جمع شدگی بتن می‌گردد. نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی لیکا دارای کرنش و جمع شدگی بالاتری تری نسبت به نمونه‌های بتن خودتراکم معمولی هستند چراکه طرحی که دارای آب بیشتری باشد از جمع شدگی بیشتری نیز برخوردار است. با اضافه کردن پوزولان متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره و خاکستر پوسته برنج کرنش جمع شدگی کاهش می‌یابد. زیرا پوزولان‌ها به علت ریزتر بودن نسبت به سیمان، به‌عنوان فیلر نیز عمل کرده و منافذ ریزتر را پر نموده و مخلوط چگال تری ایجاد می‌کند. لذا بتن حاوی پوزولان کرنش جمع شدگی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارد. به‌نوعی پوزولان‌ها با مصرف آب‌آهک موجود در بتن این ژل سیلیکاتی را افزایش می‌دهند، درنتیجه از تخلخل مواد در بتن کاسته می‌شود و نمونه‌های بتنی متراکم‌تر می‌شود و این امر موجب کاهش کرنش جمع شدگی نمونه‌ها می‌شود. اما افزودن زئولیت به دلیل واکنش‌های شیمیایی که دارد باعث افزایش کرنش و میزان جمع شدگی می‌شود.

با افزایش درصد مصرفی پوزولان‌های سرباره، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، زئولیت و سرباره، میزان کرنش جمع شدگی کاهش می‌یابد. درواقع طرحی که پوزولان بیشتری دارد، سیمان کمتری را نیز دارا می‌باشد. به دنبال آن طرح‌های که سیمان کمتری دارند جمع شدگی در آن‌ها کمتر خواهد بود. این رفتار می‌تواند به دانه‌های ریز پوزولان در مقایسه با ذرات سیمان نسبت داد که با فراهم نمودن سطح بیشتر، اصطکاک بین ذرات بیشتر می‌شود. همچنین پوزولان‌ها به‌صورت پودری است، و با افزایش درصد جایگزینی آن، منافذ در بتن خودتراکم سبک پر گردیده و حجم خمیرسیمان افزایش می‌یابد بر این اساس میزان کرنش جمع شدگی افت می‌کند. به‌نوعی می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که کرنش جمع شدگی ناشی از خشک شدن تحت تأثیر روانی و کارایی بتن تازه و نتایج مقاومت فشاری بتن و تراکم آن می‌باشد بنابراین کمترین کرنش جمع شدگی را به ترتیب نمونه‌های متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره، خاکستر پوسته برنج و زئولیت کسب نموده‌اند. کمترین مقدار کرنش جمع شدگی برای طرح LICA -MT5 برابر با ($10^6 \times$) ۶۵۰ و بیشترین آن برای طرح LICA-ZE10 برابر با ($10^6 \times$) ۶۹۰ به دست آمده است. تغییرات افزودن پوزولان‌های متاکائولن، زئولیت، سرباره، خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی بجز زئولیت ۵ درصد، تاثیر مثبت بر کاهش کرنش جمع شدگی دارد. پوزولان در محدوده کردن عرض ترک وارد عمل شده و با تشکیل ریزترک‌های زیاد قابلیت بهره برداری بتن را افزایش می‌دهند. در حد بسیار مطلوبی نیز از شکست ترد بتن جلوگیری می‌کند و باعث بهبود شکل پذیری و کاهش کرنش جمع شدگی می‌شود.

به طور کلی لایه بتنی میل به جمع شدگی دارد و چون بتن بستر اجازه این جمع شدگی و انقباض را به بتن رویی نمی دهد ریزترک هایی در لایه بتنی ایجاد خواهد شد که اجتناب ناپذیر است. ریزترک‌هایی در این لایه ایجاد می‌گردد که این خود موجب کاهش شدید چسبندگی لایه بتنی به بتن بستر خواهد شد. لذا هر عاملی که موجب کاهش جمع شدگی لایه بتنی شود باعث افزایش چسبندگی خواهد شد. درنتیجه سه عامل مهم در چسبندگی لایه بتنی به بتن بستر جمع شدگی، مقاومت فشاری (که نشان دهنده کیفیت لایه بتنی است) و مشخصات رئولوژیکی بتن جدید وابسته می باشد. میزان مقادیر پیوستگی در نمونه‌های بتن خودتراکم معمولی و دارای لیکا چندان تفاوتی با یکدیگر ندارند اما با مقداری تفاوت ناچیز نمونه‌های بتن خودتراکم معمولی تحت تاثیر مقاومت فشاری و میزان جمع شدگی، دارای مقاومت پیوستگی بالاتری نسبت به نمونه‌های لیکا هستند.

با افزودن پوزولان خاکستر پوسته برنج، خاکستر بادی، سرباره و متاکائولن چسبندگی لایه جدید به بتن بستر افزایش پیدا کرده است. اما افزودن زئولیت منجر به کاهش مقاومت چسبندگی شده است. باوجوداینکه یکی از موارد مهم تأثیرگذار در مقاومت چسبندگی، مقاومت فشاری لایه تعمیری است اما موارد دیگری نیز در این مورد تأثیرگذارند. همان‌طور که از نتایج دیده می‌شود، علی‌رغم کمتر بودن مقاومت فشاری نمونه‌های دارای متاکائولن نسبت به نمونه‌های دیگر، به علت ویژگی‌های رئولوژیکی بهتر و همچنین جمع شدگی کمتر، این بتن‌ها چسبندگی بهتری به لایه بتنی را تجربه کرده‌اند. زیرا به‌واسطه رئولوژی بهتر، منافذ کمتری در مرز دولایه تعمیری و بستر شکل‌گرفته و به علت جمع شدگی کمتر، ریزترک‌های کمتری در لایه تعمیری حاوی متاکائولن ایجادشده است. همچنین باوجوداینکه خاکستر بادی و سرباره

منجر به مقاومت‌های فشاری بالاتری برای نمونه‌ها شده بود اما مقاومت چسبندگی کمتری نسبت به متاکائولن به دست داده است. ضعیف‌ترین چسبندگی نیز برای نمونه‌های حاوی زئولیت به‌دست‌آمده است. بالاترین چسبندگی در نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، زئولیت، خاکستری بادی و سرباره به ترتیب در درصدهای ۱۰، ۵، ۵، ۱۰ و ۷ درصد جایگزینی سیمان اتفاق می‌افتد. در شکل (۳) تغییرات چسبندگی مخلوط‌ها به بتن بستر نسبت به نمونه بدون پوزولان برحسب درصد نشان داده‌شده است. نمونه‌هایی که در آن‌ها به ترتیب از پوزولان‌های متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره، خاکستر پوسته برنج و زئولیت استفاده‌شده است بالاترین به پایین‌ترین مقاومت چسبندگی را کسب نموده‌اند. بیشترین مقدار چسبندگی برای طرح LICA -MT5 برابر با ۱۱/۶ مگاپاسکال می‌باشد و کمترین آن برای طرح LICA-ZE10 برابر با ۶ مگاپاسکال به‌دست‌آمده است.



شکل ۳- تغییرات چسبندگی به بتن بستر با افزودن پوزولان نسبت به نمونه بدون پوزولان

٦- نتیجه‌گیری

۱) افزودن متاکائولن، سرباره، خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج منجر به بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی و اضافه کردن زئولیت باعث افت این ویژگی‌ها شد.

۲) افزودن هر یک از پوزولان‌ها باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته شد، ولی با افزایش درصد جایگزینی دو پوزولان متاکائولن و زئولیت، این افزایش، کاهش نشان می‌دهد.

۳) کرنش جمع شدگی با اضافه کردن پوزولان‌ها به‌جز زئولیت به مخلوط‌ها کاهش می‌یابد.

۴) افزودن تمامی پوزولان‌ها به‌غیراز زئولیت، افزایش چسبندگی را به دنبال داشته است. در این میان، بالاترین چسبندگی مربوط به طرح دارای ۵ درصد متاکائولن و کمترین چسبندگی مربوط به طرح حاوی ۱۰ درصد زئولیت بود.

۷- منابع

[۱] Dawei Zhang, Tamon Ueda, Hitoshi Furuuchi, (2011), “Avereage crack spacing of overlay-strengthened RC beams”, Journal of materials in civil engineering, ASCE, October .

[۲] N. Banthia, R. Gupta, S. Mindess, (2006), “Development of fiber reinforced concrete repair materials”, Can. J. Civ. Eng., 33, 126-133

[۳] Y. Theiner, G. Hofstetter, (2012), “Evaluation of the effects of drying shrinkage on the behavior of concrete structures strengthened by overlays”, Cem. and Conc. Res., 42, 1286-1297

[۴] Laurence, O., Bissonnette, B., Pigeon, M., and Rossi, P., (2000), “Effect of steel macro fibres on cracking of thin concrete repairs". In Proceedings, 5th International RILEM Symposium on FibreReinforced Concretes (BEFIB 2000), Lyon, France, pp. 213–222.

[۵] Naderi, M., Ghodousian, O., (2010), “Assessing the Adhesion of Self-Compacting Concrete and Mortar Applied to Different Concrete surfaces, using twist-off and Friction-Transfer Methods, and its Estimation By Fuzzy Logic”, Journal of Civil

Engineering, Ferdowsi Mashhad, Vol 23 NO 1.[In Persian]
[۶] Pedro Miguel Duarte Santos and Eduardo Nuno Brito Santos Júlio., (2011), "Factors Affecting Bond between New and Old Concrete" ACI Materials Journal/July-August .
[۷] W.Hansen, J.A. Almudaiheem, (1987), "Ultimate drying shrinkage of concrete – influence of major parameters", ACI Mater. J., 84, 217-223
[۸] O. Challal, B. Benmokrane, G. Ballavy, (1992), "Drying shrinkage strains: experimental versus codes, ACI Mater. J., 89, 263-266
[۹] ACI committee 2۰9, (1982), "Pridiction of creep, Shrinkage and temperature effects in concrete structures, designing for creep and shrinkage in concrete structures", SP-76, American concrete institute, Detroit, 193-300
[۱۰] Euro-Internatioinale du beton, (1978), "Model code for concrete structures", Paris.
[۱۱] B. Bissonnette, P. Pierre, M. Pigeon, (1999), " Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials", cement and concrete research, 29, 1655-1662
[۱۲] V. Baroghel-Bouny, M. Mainguy, T. Lassabatere, O. Coussy, (1999), "Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials", Cement and concrete research, 29, 1225-1238
[۱۳] Tianxiong Guo, Yuchen Xie, Xingzhong Weng, (2018) "Evaluation of the bond strength of a novel concrete for rapid patch repair of pavements", Construction and Building Materials, 186 ,790–800.
[۱۴] F. Ascione, M. Lamberti, A. Napoli, A.G. Razaqpur , R. Realfonzo, (2019), "Modeling SRP-concrete interfacial bond behavior and strength", Engineering Structures 187 , 220–230.
[۱۵] Luc Courard , Tomasz Piotrowski, Andrzej Garbacz, (2014), "Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair", Cement & Concrete Composites 46 , 73–80.
[۱۶] Bing Wang, Shilang Xu , Fei Liu , (2016), "Evaluation of tensile bonding strength between UHTCC repair materials and concrete substrate", Construction and Building Materials 112 , 595–606.
[۱۷] S.H. Abo Sabah, M.H. Hassan, N. Muhamad Bunnori, M.A. Megat Johari , (2019) , "Bond strength of the interface between normal concrete substrate and GUSMRC repair material overlay" , Construction and Building Materials 216 , 261–271.
[۱۸] ASTM C33, (2005), Srandard Specification for Concrete Aggregates.
[۱۹] ASTM C330, (2004), "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02;.
[۲۰] EFNARC, "The European guidelines for self-compacting concrete, specification, production and use", May 2005.

Studying the Effect of Various Pozzolans in Different Percentages on the Bond Strength of Lightweight Self-compacting Concrete

Seyed Mahdi Mousavi
Department of civil engineering, Qazvin branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
Ali Delnavaz *
Assisstant Professor, Chemical Engineering Department, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.
Seyed Amir Hossein Hashemi
Civil engineering department of Qazvin azad university .

Abstract

One of the most suitable materials for using in construction is self-compacting concrete. This type of concrete, not only due to the lack of the need for vibration but also because of lesser weight resulting from using lightweight aggregate instead of gravel, could be a proper option to be utilized in earthquake-prone areas. Especially in cases where the existing structure, including the building, needs to be retrofitted and repaired, the presence of lightweight concrete with no need to compaction can be auspicious. Thus, in this study, 32 mix designs of self-compacting concrete were used as research. In these mix designs, the type of lightweight aggregate, both type and amount of pozzolan were changed to evaluate the effect of each one on the bond strength properties of concrete. The concretes were placed in acidic environments, and then the bond strength was assessed using push-out and splitting-prism methods. From the results, it is shown that pozzolan containing 5% of metakaolin and 10% of zeolite has the best and worst rheological properties, respectively. The rate of reduction and changes in the bond strength in sulfuric acid are lower than those of hydrochloric acid. Specimens containing scoria show higher bond strength values. Furthermore, by exposure to acidic environments, after 7 days the specimens containing scoria and after passing 28 and 60 days, the specimens containing lica experienced the least reduction of bond strength.

Keywords: Lightweight Self-compacting Concrete, Bond Strength, Various Pozzolans.

* Corresponding Author: A.Delnavaz@qiau.ac.ir