

# بررسی عملکرد روغن سوخته به عنوان ماده رها ساز در مقایسه با روغن

## مخصوص قالب به لحاظ کیفیت سطح بتن



دانیال قاسمی

کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
عضو انجمن بتن ایران



علیرضا باقری

دانشیار دانشکده مهندسی عمران  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
نایب رئیس هیات مدیره انجمن بتن ایران

### چکیده

امروزه به علت مزایای بسیار زیاد بتن نمایان کاربرد آن در صنعت ساختمان افزایش یافته است. بتن نمایان باید به گونه‌ای ساخته شوند که بافت و پوشش قابل قبولی برای مشاهده دائمی ایجاد کنند. از جمله مهم‌ترین شاخص‌هایی که کیفیت سطح بتن نمایان را با آن می‌سنجند، میزان حفرات ناخواسته است. از این رو؛ برای استفاده از بتن نمایان باید حفرات سطحی را به حداقل مقدار ممکن کاهش داد. در این تحقیق تأثیر دو نوع ماده رها ساز قالب پایه معدنی شامل؛ روغن سوخته و روغن مخصوص قالب، روی حفرات سطحی و همچنین میزان لکه‌گذاری بر سطح بتن و توزیع ابعادی حفرات مورد بررسی قرار گرفت. بررسی انجام شده نشان‌دهنده این است که؛ روغن سوخته حفرات بیشتر با توزیع ابعادی بزرگ‌تر ایجاد می‌کند. در هر دو نوع روغن قالب با افزایش میزان مصرف از حداقل تا بیش از حد، درصد حفرات ناخواسته، لکه‌گذاری و توزیع ابعادی حفرات افزایش می‌یابد. نتایج نشانگر این است که؛ روغن سوخته در تمام مقادیر مصرف سبب لکه‌گذاری بر روی سطح بتن می‌شود همچنین روغن مخصوص قالب نیز به جز در حداقل مقدار مصرف، در سایر مقادیر باعث لکه‌گذاری روی سطح بتن شده است. با توجه به ویژگی‌های بیان شده، روغن سوخته نباید در بتن‌های معماری مورد استفاده قرار گیرد و روغن مخصوص قالب هم اگر امکان کنترل دقیق روی مقدار مصرف آن وجود داشته باشد، می‌توان در مقادیر مصرف کم، از آن در بتن معماری استفاده کرد.

کلمات کلیدی: حفرات سطحی ناخواسته، مواد رها ساز قالب، روغن سوخته، روغن مخصوص قالب، توزیع ابعادی حفرات

### ۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت صنعت ساخت و ساز و مزایای استفاده از بتن نمایان<sup>۱</sup>، کاربرد آن در کارهای عمرانی افزایش یافته است. طبق تعریف انجمن بتن آمریکا<sup>۲</sup> [۱] بتن

نمایان به بتنی گفته می‌شود که؛ سطوح آن که پس از ساخت، پوششی روی آن‌ها نخواهد آمد و در معرض دید خواهند بود. لذا باید به گونه‌ای ساخته شوند که بافت و پوشش قابل قبولی برای مشاهده دائمی ایجاد کنند. از جمله

<sup>1</sup> exposed concrete

<sup>2</sup> American Concrete Institute(ACI)

مناسب و به صورت یکنواخت به سطح اعمال شوند. برخی کارگران برای راحتی کار، تمایل به استفاده‌ی بیش از حد مواد رهاساز دارند. این موضوع علاوه بر افزایش هزینه، سبب می‌شود مواد رهاساز اضافه به صورت قطره در جداره‌ی قالب جمع شوند و حفرات کوچک سطح را تشکیل دهند [۷]. دجال<sup>۳</sup> و همکاران [۵] نیز این موضوع را مطرح کردند که؛ مصرف بیش از حد روغن قالب از کیفیت سطوح بتنی می‌کاهد. مواد رهاساز توسط قلم‌مو یا توسط افشانک‌هایی مانند شکل ۱ بر روی سطح قالب پاشیده می‌شوند [۸].



شکل ۱- اسپری کردن ماده رهاساز بر سطح قالب [۸]

روغن موتور مصرف‌شده اتومبیل‌ها که "روغن سوخته" نامیده می‌شود، دارای پایه معدنی است و از دیرباز به عنوان ماده رهاساز قالب به کار می‌رفته است. با توجه به اینکه روغن سوخته باعث لکه‌گذاری روی سطوح بتن قالب‌گیری شده می‌شود استفاده از آن به عنوان ماده رهاساز قالب در ویرایش جدید آیین‌نامه بتن ایران [۱۴] منع شده است.

مهم‌ترین شاخص‌هایی که کیفیت سطح بتن نمایان را با آن می‌سنجند، میزان حفرات ناخواسته است. از این رو؛ استفاده از بتن نمایان مستلزم به حداقل رساندن حفرات سطحی در بتن و دستیابی به کیفیت ظاهری مناسب آن می‌باشد. مواد رهاساز قالب از جمله عوامل تأثیرگذار بر حفرات ناخواسته و کیفیت سطوح بتنی هستند.

هوا و آب محبوس در پشت قالب‌ها در صورتی می‌توانند به راحتی آزاد شوند که اصطکاک آن‌ها با جداره‌ی قالب کم باشد. بسته به نوع و مقدار مصرف مواد رهاساز قالب، این مواد می‌توانند باعث کاهش چسبندگی بین قالب و بتن تازه شده و خروج هوا و آب محبوس را تسهیل کنند [۲]. قابل ذکر است که؛ دلیل اصلی استفاده از مواد رهاساز، جداسازی راحت قالب از بتن می‌باشد، به نحوی که در جداسازی علاوه بر سطح بتن، قالب نیز آسیبی نبیند [۳ و ۴]. به طور کلی مواد رهاساز قالب به دو گروه مواد جداکننده<sup>۱</sup> بین سطح قالب و بتن و مواد فعال شیمیایی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. مواد جداکننده، سطح قالب را پوشانده و از تماس بتن تازه با آن جلوگیری می‌کنند. مواد جداکننده عمدتاً بر پایه روغن‌های معدنی که از مشتقات نفتی هستند می‌باشند. این مواد یک‌لایه‌ی آب‌گریز روی سطح قالب تشکیل می‌دهند و مانع چسبیدن بتن به قالب می‌شوند. مواد رهاساز جداکننده شامل موادی نظیر روغن‌های نفتی و موم پارافین می‌شوند [۵].

میزان مصرف و روش اعمال مواد رهاساز در ظاهر نهایی بتن بسیار تأثیرگذار است [۶]. این مواد باید به میزان

<sup>1</sup> barrier type

<sup>2</sup> chemically active

<sup>3</sup> C. Djelal

استفاده شده است. همچنین سنگ‌دانه‌های مورد استفاده شامل شن و ماسه نیمه شکسته با خواص منطبق بر الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ [۱۱] بوده‌اند. مقدار مواد کوچک‌تر از لک شماره ۲۰۰ برای ماسه و شن به ترتیب برابر ۲/۰۰ و ۰/۲۴ درصد می‌باشد. شن به کاررفته با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر، جذب آب ۲/۸ درصد و جرم حجمی ۲۵۲۰ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. مقادیر متناظر برای ماسه ۳/۹ درصد و ۲۴۹۰ کیلوگرم در مترمکعب بوده است.

برای آغشته سازی سطوح قالب‌ها از روغن سوخته و روغن مخصوص قالب که هردو دارای پایه معدنی هستند استفاده شد (شکل ۲). روغن سوخته و روغن مخصوص قالب دارای مکانیزم عملکرد یکسان می‌باشند به نحوی که؛ هردو با ایجاد یک لایه مانع از چسبیدن قالب به بتن جلوگیری می‌کنند. مشخصات مواد رها ساز در جدول ۱ آمده است.



روغن سوخته



روغن مخصوص قالب (پایه معدنی)

شکل ۲. مواد رها ساز

علازم این موضوع، هزینه پایین این ماده باعث شده تا کماکان در بسیاری پروژه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی روی عملکرد روغن سوخته به لحاظ حفرات سطحی بتن گزارش نشده است در تحقیق حاضر به این موضوع پرداخته شده است. از آنجایی که؛ در حال حاضر روغن‌های پایه معدنی پرکاربردترین نوع روغن رها ساز می‌باشند، در این تحقیق به مقایسه عملکرد روغن سوخته با یک نوع روغن پایه معدنی مخصوص قالب به لحاظ مقدار و توزیع ابعادی حفرات سطحی و همچنین میزان لکه‌گذاری روی سطح بتن پرداخته شده است.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

هدف از تحقیق حاضر بررسی و مقایسه تأثیر روغن سوخته و روغن مخصوص قالب روی کیفیت سطح بتن بوده است. روغن‌ها در مقادیر حداقل، حداکثر و بیش از حد مورد استفاده قرار گرفتند. در ساخت نمونه‌های آزمایشی از قالب فولادی و بتن با اسلامپ ۷ سانتی‌متر استفاده شد. قالب در نظر گرفته شده دارای مقطع ۲۵×۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بوده است. انرژی ثابت تراکم به همه نمونه‌ها اعمال گردید و پس از قالب برداری، سطوح بتنی به لحاظ مقدار حفرات و توزیع ابعادی آن‌ها و لکه‌گذاری، مورد بررسی قرار گرفتند. تمام مراحل ساخت و بررسی نمونه‌ها در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی خواجه نصیر صورت گرفته است.

## ۱.۲. مصالح

برای ساخت بتن از سیمان پرتلند نوع دو که ویژگی‌های آن طبق استاندارد ۳۸۹ ایران [۹] و استاندارد ASTM<sup>1</sup> C-150 [۱۰] بوده

<sup>1</sup> American Society for Testing and Materials

جدول ۱. مشخصات روغن

روغن سوخته	روغن مخصوص قالب (پایه معدنی)	ماده رهاساز
۴۱/۸۳	۱۳۵۸	ویسکوزیته (میلی پاسکال ثانیه)
غیرفعال - مانع	غیرفعال - مانع	عملکرد
سیاه	کرم	رنگ
۰/۸۹	۰/۹۵	وزن مخصوص

مواد در مقادیر حداقل، حداکثر و بیش از حد مورد آزمایش قرار گرفتند. منظور از حداقل مقدار روغن، کمترین مقدار روغنی است که توانایی پوشش کامل سطح را داشته باشد. مقدار حداکثر نیز با آغشته کردن سطح قالب تا حدی که روغن بر روی سطح شره نکند، مشخص شد. برای مقدار بیش از حد نیز، مقدار حداکثر به دو برابر افزایش یافت. مقادیر مورد استفاده از مواد رهاساز در جدول ۳ آورده شده است.

## ۲.۲. طرح مخلوط و آماده سازی نمونه ها

در این تحقیق از بتن با اسلامپ هفت سانتی متر استفاده شده است. تعیین مقادیر اجزا با استفاده از روش ملی طرح مخلوط بتن انجام گردید که در جدول ۲ قابل مشاهده می باشد. قابل ذکر است؛ پس از ساخت بتن، مطابق الزامات استاندارد ASTM C143 [۱۲] آزمایش اسلامپ بر روی مخلوط بتن تازه صورت گرفته است.

جدول ۲. طرح مخلوط بتن اسلامپ هفت سانتی متر

مقادیر اجزای بتن (کیلوگرم)				مقدار روانی بتن (اسلامپ) متر
شن	ماسه	سیمان	آب	
۱۰۲۴	۷۰۰	۳۷۰	۱۸۵	هفت سانتی متر

بتن ریزی در شرایط یکسان در قالب فلزی با سطح مقطع مربع به ابعاد ۲۵ سانتی متر انجام شد. ارتفاع بتن ریخته شده در قالب برابر ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. تصویر قالب فولادی در شکل ۳ ارائه شده است. همان طور که مشخص است قالب فولادی مورد استفاده از نوع پانلی به ارتفاع ۱ متر بود. لیکن بتن به ضخامت ۵۰ سانتی متر در آن ریخته و متراکم گردید. قابل ذکر است به منظور جلوگیری از خروج شیره ی بتن قالب های فولادی توسط نوارهای لاستیکی درزبندی شدند.

جهت بررسی تأثیر مقدار استفاده از مواد رهاساز روی حفرات سطحی بتن و میزان لکه گذاری روی سطوح، این



قالب فولادی  
شکل ۳. قالب مورد استفاده

شکل ۵ از شابلون استفاده شده است. حدوداً هجده ساعت بعد ارتعاش، قالب برداری از نمونه‌ها انجام شد.



شکل ۴. ویبراتور درونی بتن

جدول ۴. مشخصات ویبراتور

شعاع عمل (mm)	فرکانس (Hz)	دامنه در هوای (mm)	طول (mm)	قطر (mm)
۱۵۰	۱۰۰	۲/۵	۵۰۰	۳۸

جدول ۳. مقادیر ماده رها ساز آغشته شده در قالب فولادی

روغن سوخته			روغن مخصوص قالب (پایه معدنی)			نوع روغن
بیش از حد	حداکثر	حداقل	بیش از حد	حداکثر	حداقل	مقدار مصرف (گرم بر مترمربع)
۷۱/۷	۳۵/۸	۱۰/۱	۱۱۰/۹	۵۵/۴	۱۲	

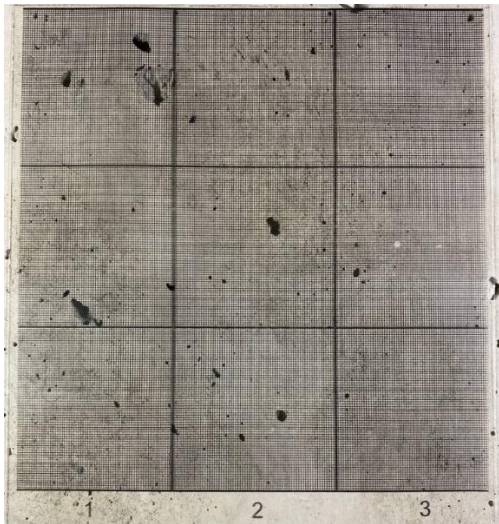
برای متراکم کردن بتن از ویبراتور درونی با موتور برقی استفاده شد که تصویر ویبراتور مورد استفاده در شکل ۴ و مشخصات آن در جدول ۴ ذکر شده است. مدت زمان ویبره که به همه نمونه‌ها به طور یکسان اعمال گردید و به نحوی در نظر گرفته شد که تمایز در وضعیت حفرات سطحی ناشی از پارامترهای مورد مطالعه را فراهم آورد. بر این اساس تراکم اعمال شده به همه نمونه‌ها به این صورت بود که ویبراتور ۳۰ ثانیه در بتن به طور کامل مدفون بوده و طی ۱۰ ثانیه از آن خارج گردید. برای این که ویبراتور حین ارتعاش بتن دقیقاً در مرکز قالب قرار داشته باشد مطابق



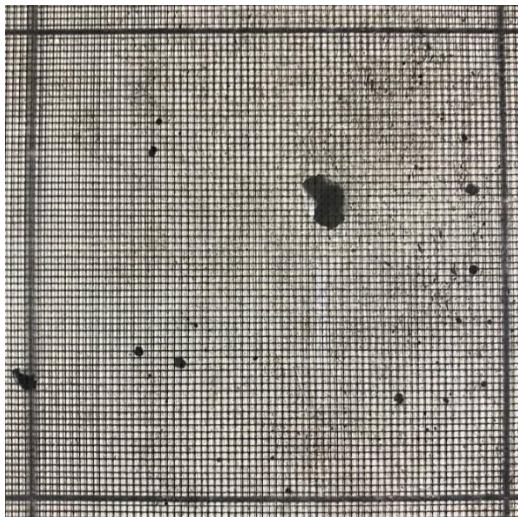
شکل ۵. شابلون قالب فولادی

## ۲.۳. نحوه‌ی ارزیابی سطوح

برای ارزیابی سطوح، پس از قالب برداری به مدت بیست و چهار ساعت فرصت داده شد تا هم سطح بتن‌ها خشک شوند و هم به مقاومت مناسبی برسند تا در حین جابجایی آسیب نبینند. هر نمونه‌ی بتنی سخت شده دارای چهار وجه می‌باشد که هر وجه ۲۵ سانتی‌متر عرض و به‌طور میانگین حدود ۴۶ سانتی‌متر ارتفاع دارد. در تمام سطوح، حاشیه‌ای ۲ سانتی‌متری از طرفین، بالا و پایین کنار گذاشته شد و در نهایت سطح با ابعاد ۲۱ در ۴۲ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. بررسی سطوح برای حفرات سطحی در چارچوب روش دستی مشخص شده توسط انجمن بتن آمریکا [۱۳] انجام شد. برای بررسی وجوه مذکور و اندازه‌گیری حفرات سطح بتن به روش دستی از اشلی با جنس تلق شفاف استفاده شد. مطابق شکل ۶ تلق به خانه‌های مربع شکل به ابعاد یک‌دربیک میلی‌متر تقسیم شده که در مجموع این خانه‌ها یک صفحه‌ی ۲۱ در ۲۱ سانتی‌متری مشبک را تشکیل دادند. ارزیابی هر وجه نمونه‌ها با استفاده از تلق مشبک در دو مرحله، یکی در بخش پایین نمونه و دیگری در بخش بالای نمونه انجام شد. پس از قرارگیری تلق مشبک روی سطح بتن، تعداد خانه‌های ۱ در ۱ میلی‌متر روی هر حفره شمرده و یادداشت می‌شوند. حفرات کوچک‌تر از یک خانه‌ی ۱ در ۱ میلی‌متر در دسته حفرات کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر مربع قرار می‌گیرند. شایان توجه است که از حفرات با قطر کمتر از نیم میلی‌متر چشم‌پوشی گردید. شکل ۷ نحوه‌ی ارزیابی حفرات نشان می‌دهد.



شکل ۶. تلق مشبک



شکل ۷. ارزیابی حفرات ناخواسته‌ی سطح

## ۳. نتایج و تفسیر آن‌ها

### ۳.۱. درصد حفرات ناخواسته‌ی سطح بتن

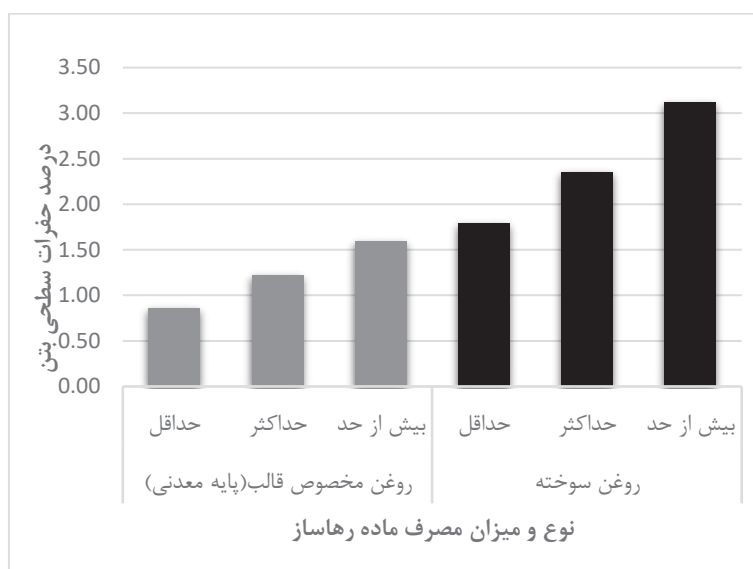
در فصل حاضر نتایج بررسی آزمایشگاهی انجام شده روی تأثیر نوع و مقدار مصرف مواد رها ساز پایه معدنی بر حفرات سطحی بتن، لکه‌گذاری سطوح و توزیع ابعادی ارائه شده است. نتایج حاصل از ارزیابی سطوح بتنی در جدول ۵ و شکل ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است؛ روغن سوخته از نظر حفرات سطحی عملکرد بدتری نسبت به روغن مخصوص قالب داشته به‌نحوی که؛ در مقادیر مصرف یکسان، درصد حفرات ایجاد شده توسط روغن سوخته دو

میزان مصرف مواد رها ساز از حداقل به حداکثر و از حداکثر به بیش از حد، ۳۰ درصد به میزان حفرات ناخواسته اضافه شده است.

برابر روغن مخصوص قالب می باشد. به لحاظ تأثیر مقدار مصرف مواد رها ساز روی حفرات سطحی نیز، نتایج ارائه شده نشانگر این است که؛ برای هر دو نوع روغن قالب، با افزایش میزان مصرف از حداقل تا بیش از حد، درصد حفرات ناخواسته افزایش یافته است. در هر مرحله از افزایش

جدول ۵. درصد حفرات ناخواسته در سطوح ساخته شده با بتن اسلامپ هفت سانتی متر در قالب های فولادی با انواع و مقادیر مختلف مصرف مواد رها ساز

نوع ماده رها ساز	میزان استفاده	قالب فلزی
روغن مخصوص قالب (پایه معدنی)	حداقل	۰/۸۶
	حداکثر	۱/۲۲
	بیش از حد	۱/۵۹
روغن سوخته	حداقل	۱/۸۰
	حداکثر	۲/۳۵
	بیش از حد	۳/۱۳



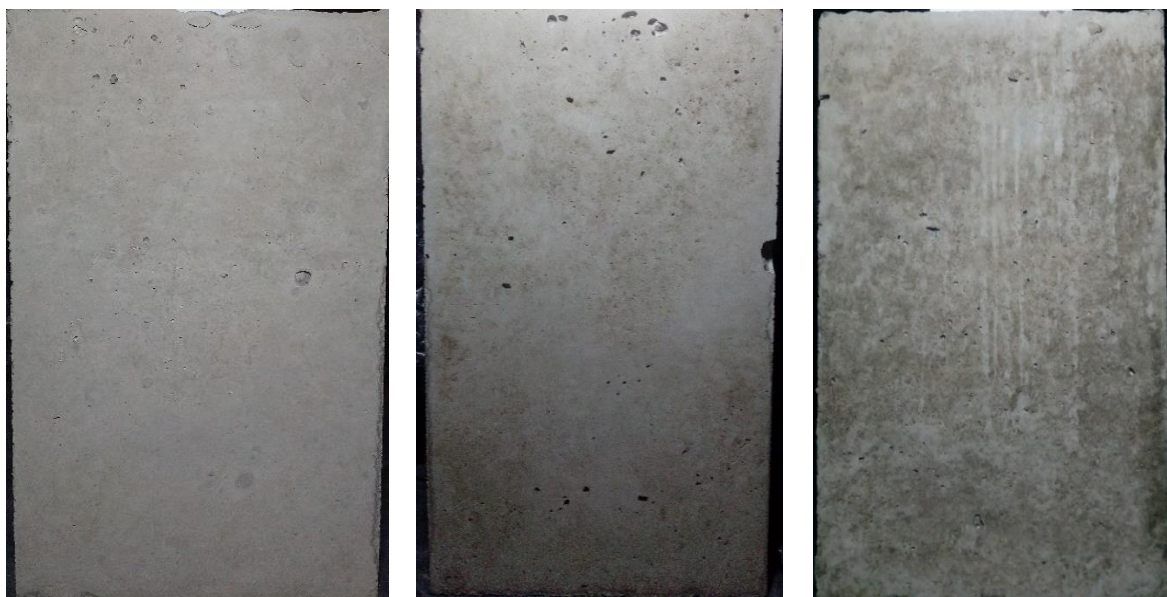
شکل ۸. درصد حفرات ناخواسته در سطوح ساخته شده با بتن اسلامپ هفت سانتی متر در قالب های فولادی با انواع و مقادیر مختلف مصرف مواد رها ساز

لکه گذاری نشده است ولی در مقدار کاربرد زیاد، لکه گذاری صورت گرفته و با افزایش مقدار مصرف شدت لکه گذاری بیشتر شده است. شکل ۱۰ سطوح بتنی قالب گیری شده آغشته به مقادیر مختلف روغن سوخته نشان داده شده است. قابل مشاهده است که؛ روغن سوخته در تمام مقدار مصرف سبب لکه گذاری سطح بتن می گردد و با افزایش

مورد دیگری که بایستی به لحاظ عملکرد مواد رها ساز در نظر گرفته شود بحث امکان لکه گذاری آن ها روی سطح بتن می باشد. در شکل ۹ سطوح بتنی قالب گیری شده آغشته به مقادیر مختلف روغن مخصوص قالب (پایه معدنی) نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود هر چند در حداقل مقدار مصرف، روغن مخصوص قالب منجر به

نمی‌باشد. همان‌طور که بیان شد؛ روغن مخصوص قالب در مقادیر زیاد ایجاد لکه‌گذاری می‌کند و تنها در صورتی که امکان کنترل روی مقدار مصرف روغن وجود داشته باشد، استفاده از آن می‌تواند برای بتن‌های نمایان و معماری در نظر گرفته شود.

میزان مصرف، لکه‌گذاری نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این نکته که؛ روغن سوخته در تمام مقادیر ایجاد لکه‌گذاری می‌کند و لذا جدای از بیشتر بودن مقدار حفرات سطحی مربوط به آن در مقایسه با روغن مخصوص قالب، به لحاظ لکه‌گذاری، امکان استفاده از آن در بتن نمایان

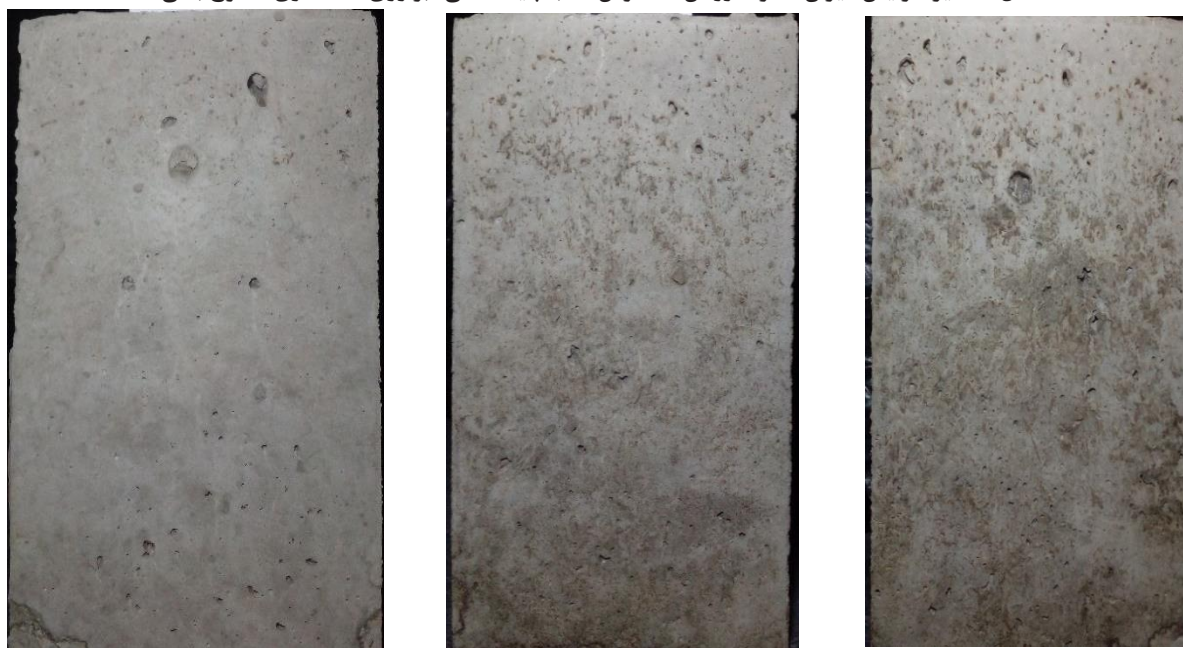


حداقل

حداکثر

بیش از حد

شکل ۹. تأثیر افزایش میزان مصرف روغن مخصوص قالب (پایه معدنی) بر روی لکه‌گذاری سطوح بتنی



حداقل

حداکثر

بیش از حد

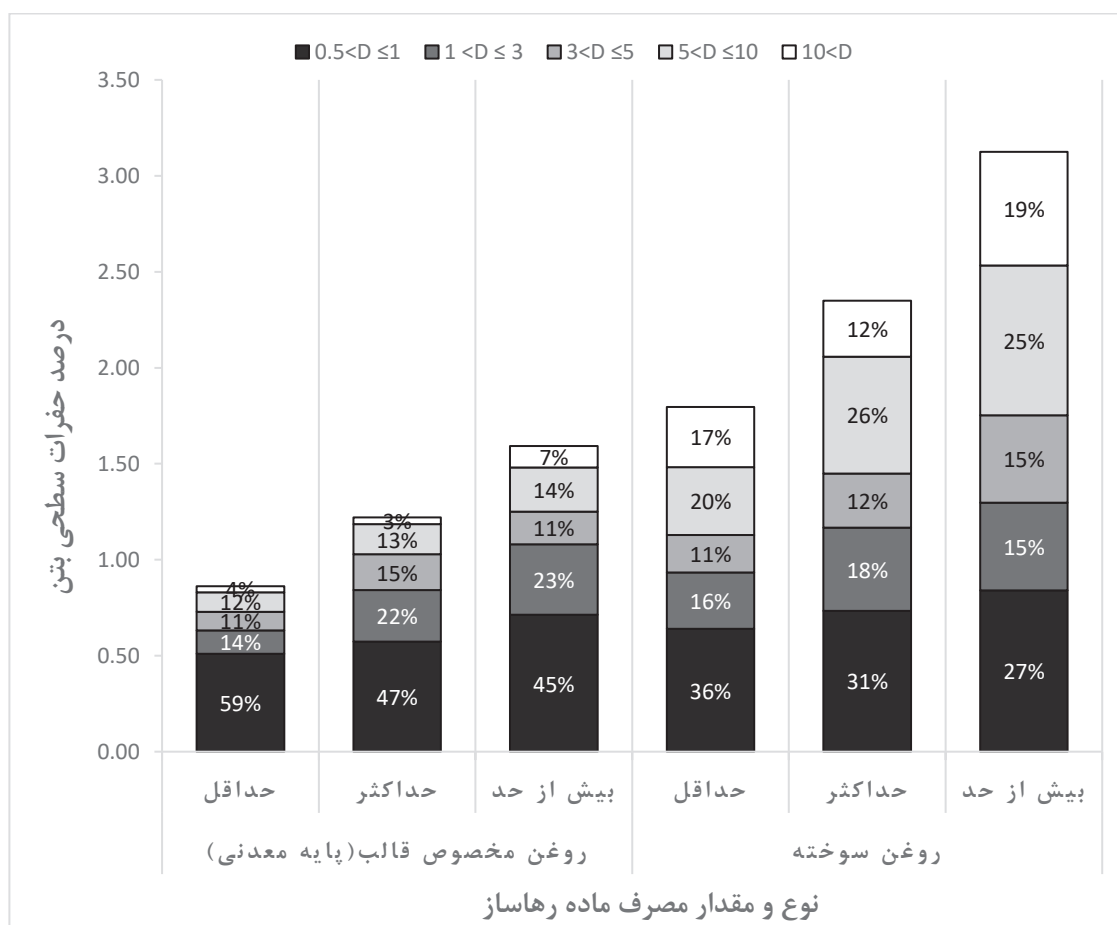
شکل ۱۰. تأثیر افزایش میزان مصرف روغن سوخته بر روی لکه‌گذاری سطوح بتنی



## ۲.۳. توزیع ابعادی حفرات ناخواسته‌ی سطح بتن

ارزیابی و شمارش حفرات ناخواسته به نحوی صورت گرفته که علاوه بر تعیین درصد کل حفرات در سطح بتن، امکان بررسی توزیع ابعادی حفرات نیز وجود دارد. از آنجایی که حفرات ناخواسته غالباً دارای اشکال نسبتاً نامنظم می‌باشند، با در اختیار داشتن مساحت هر حفره، قطر معادل آن‌ها محاسبه شده و ملاک ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی توزیع ابعادی حفرات ناخواسته برای نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۱۱ و برحسب درصد سطح

حفرات هر بازه به سطح کل حفرات به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که مشخص است؛ روغن سوخته نه تنها نسبت به روغن مخصوص قالب، حفرات سطحی بیشتری ایجاد می‌کند، بلکه ابعاد حفرات ایجاد شده نیز بزرگ‌تر هستند که تأثیر منفی روی کیفیت سطحی بتن را به مراتب بیش‌تر می‌کند. همچنین برای هر دو نوع روغن مورد استفاده، با افزایش مقدار مصرف ماده رها ساز، توزیع ابعادی از حفرات ریز به سمت حفرات درشت‌تر میل می‌کند.



شکل ۱۱. تأثیر نوع ماده رها ساز و میزان مصرف آن بر توزیع ابعادی حفرات ناخواسته سطوح بتنی

#### ۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر عملکرد روغن سوخته به عنوان ماده رها ساز قالب، با روغن مخصوص قالب در مقادیر مختلف مصرف مقایسه شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل مقدار حفرات و توزیع ابعادی آن‌ها و همچنین لکه گذاری روی سطح بتن بوده است. بر اساس نتایج حاصله نتیجه گیری‌های زیر قابل ارائه می‌باشند:

نتایج نشانگر عملکرد ضعیف تر روغن سوخته نسبت به روغن مخصوص قالب است و استفاده از آن حفرات بیشتری ایجاد می‌کند. در مقادیر مصرف یکسان، درصد حفرات ایجاد شده توسط روغن سوخته ۲ برابر روغن مخصوص قالب می‌باشد.

با افزایش میزان مصرف از حداقل تا بیش از حد، برای هر دو نوع روغن قالب، درصد حفرات ناخواسته افزایش می‌یابد. به طوری که در هر مرحله از افزایش میزان مصرف مواد رها ساز، از حداقل به حداکثر و از حداکثر به بیش از حد، ۳۰ درصد به میزان حفرات ناخواسته افزوده شده است.

بررسی‌های انجام شده نشانگر این است که هر چند روغن مخصوص قالب در حداقل مقدار مصرف، لکه گذاری نداشته، اما مقادیر مصرف زیاد آن باعث لکه گذاری روی سطح بتن شده است. روغن سوخته در تمامی مقادیر مصرف سبب لکه گذاری سطوح بتنی شده است. در هر دو نوع روغن قالب با افزایش میزان مصرف، لکه گذاری نیز افزایش می‌یابد.

در بین دو نوع ماده رها ساز بررسی شده، روغن سوخته دارای لزجت کمتری در مقایسه با روغن مخصوص قالب بوده و لذا در مقدار مصرف یکسان، سطح بیشتری را می‌تواند پوشش دهد.

روغن سوخته حفرات بزرگ بیشتری نسبت به روغن مخصوص قالب ایجاد می‌کند. با افزایش میزان مصرف ماده رها ساز، توزیع ابعادی حفرات از حفرات ریز به سمت حفرات درشت تر میل می‌کند.

به صورت کلی عملکرد روغن مخصوص قالب به لحاظ مقدار و همچنین ابعاد حفرات سطحی بسیار بهتر از روغن سوخته است. همچنین لکه گذاری ایجاد شده توسط روغن سوخته در تمامی مقادیر مصرف مشاهده شد و این ماده به عنوان روغن قالب خصوصاً برای بتن‌های نمایان مناسب نمی‌باشد. در عین حال توجه شود که استفاده از روغن پایه معدنی در مقادیر زیاد منجر به قدری لکه گذاری می‌شود و لذا در بتن‌های معماری بایستی به مقدار مصرف ماده رها ساز قالب پایه معدنی توجه ویژه نمود.

#### ۵. قدردانی

نویسندگان این مقاله از مدرس آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی آقای مهندس زنگانه و تکنسین آزمایشگاه بتن آقای محمد زاده جهت مساعدت در مراحل مختلف این پژوهش و همچنین از شرکت سازه گستر مدحت برای تأمین قالب‌های بتن، تشکر می‌نمایند.

[1] ACI 303, (2012). "Guide to Cast-in-Place Architectural Concrete Practice". American Concrete Institute, American Concrete Institute, no. ACI 303R-12.

[۲] یگانه، ب.، ابراهیمی، م.، ناصح‌زاده، ش. (۱۳۹۷). "بررسی کاربرد بتن در طرح‌های معماری به لحاظ زیبا سازی و مقاومت". کنفرانس ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران- معماری- محیط زیست.

[3] Da Silva, W., Lucena, D., Štemberk, P., Prudêncio Jr, L. (2014). "Evaluation of the effect of concrete compositional changes and the use of ethyl-alcohol and biodegradable-oil-based release agents on the final surface appearance of self-compacting concrete precast elements" *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 202-208.

[4] Shyha, I., Richardson, A., Coventry, K., Ponton, H. (2016). "Mould release technologies with regard to concrete surface finish". *Magazine of Concrete Research*, vol. 68, no. 2, pp. 87-98.

[5] Djelal, C., De Caro, P., Libessart, L., Dubois, I., Pébère, N. (2008). "Comprehension of demoulding mechanisms at the formwork/oil/concrete interface". *Materials and structures*, vol. 41, no. 3, pp. 571-581.

[۶] زند بابارئسی، ا.، قاسمی تبار، ا. (۱۳۹۸). "ارائه روش‌های اجرای مناسب برای بهبود کیفیت و حذف عیوب سطحی بتن". یازدهمین کنفرانس ملی بتن.

[7] ACI 309. (2015). "Guide to Identification and Control of Visible Surface Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces". American Concrete Institute, no. ACI 309.2R-15.

[8] Djelal, C., Vanhove, Y., Chambellan, D., Brisset, P. (2010). "Influence of the application method of release agents on thickness of mould oils". *Materials and structures*, vol. 43, no. 5, pp. 687-698.

[۹] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. "ویژگی‌های سیمان پرتلند". شماره. ۳۸۹.

[10] ASTM C150/C150M-20. (2020). "Standard specification for Portland cement". ASTM International, West Conshohocken, PA.

[۱۱] سازمان ملی استاندارد ایران. "سنگدانه‌های بتن-ویژگی‌ها". شماره. ۳۰۲.

[12] ASTM c143. (2012). "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete". ASTM International.

[13] ACI 347. (2014). "Guide to Formed Concrete Surfaces". American Concrete Institute, no. 347.3R-13.

[۱۴] آبا. (۱۴۰۰). "آیین‌نامه بتن ایران". وزارت راه و شهرسازی.

## مقایسه تأثیر نمونه‌گیری به روش‌های منفرد و مرکب بر نتایج مقاومت فشاری



محسن فرخی

شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب



محمدجواد محمدی

شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن

عضو انجمن بتن ایران



امیرهمایون ثابتی مطلق

شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن



فرهاد عوافی هویدا

شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن



بابک احمدی

استادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

عضو انجمن بتن ایران



بابک فروتن مهر

شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن

عضو انجمن بتن ایران



ابوالفضل وثوقی

شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن

### چکیده

اهمیت بتن به عنوان پر مصرف‌ترین ماده جهان پس از آب، باعث لزوم توجه به فرآیند کنترل کیفیت این محصول در کنار تولید آن می‌شود. در صنعت بتن آماده به‌منظور کنترل کیفیت بتن از نظر خواص بتن تازه و سخت‌شده معیارهایی در نظر گرفته می‌شود. از جمله معیارهای رایج برای ارزیابی مشخصات بتن تازه، آزمایش روانی بتن (به روش اسلامپ) و اندازه‌گیری دمای بتن تازه و برای بتن سخت‌شده، آزمایش مقاومت فشاری است. یکی از دغدغه‌های مربوط به ارزیابی کیفیت بتن، نحوه نمونه‌گیری از مخلوط بتن است. مطابق استاندارد ملی ۶۰۴۴ و آیین‌نامه بتن ایران، روش نمونه‌گیری در کارگاه برای کنترل روانی و دمای بتن تازه می‌تواند به روش منفرد و مرکب و برای آزمون‌های مقاومت فشاری باید به‌صورت مرکب باشد. با این وجود، در بسیاری از پروژه‌ها تمایل به نمونه‌گیری به روش نقطه‌ای به‌دلیل صرف زمان و انرژی کمتر و همچنین کاهش زمان توقف کامیون‌های حمل بتن برای نمونه‌گیری وجود دارد.

در این تحقیق، با بررسی و نمونه‌گیری‌های انجام‌شده در پروژه‌های مختلف در شهر تهران، نتایج خواص بتن تازه و سخت‌شده در دو روش نمونه‌گیری منفرد و مرکب مقایسه گردید. تغییرات مقاومت فشاری، روانی و دمای بتن با انجام سه مرحله نمونه‌گیری بعد از تخلیه حدود ۱۵ (ابتدای بار)، ۵۰ (وسط بار) و ۸۵ درصد (انتهای بار) از حجم بتن موجود در کامیون حمل بتن در سه رده مقاومت فشاری C25، C30 و C35 بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، نمونه‌گیری منفرد نسبت به مرکب، تغییرات مقاومت فشاری قابل توجهی نداشته است. همچنین در نمونه‌گیری منفرد در ابتدا، وسط و انتهای بار، دمای بتن تازه میانگین ۰/۴ درجه سلسیوس افزایش و میزان روانی به روش اسلامپ میانگین ۱۶ درصد کاهش پیدا کرد.

کلمات کلیدی: نمونه‌گیری منفرد و مرکب، بتن آماده، خواص بتن تازه و سخت‌شده

با توجه به اهمیت بتن به عنوان پر مصرف‌ترین ماده جهان پس از آب و مهمترین مصالح مصرفی در صنعت ساختمان، فرآیند کنترل کیفیت این محصول در کنار تولید آن یکی از دغدغه‌های مهم مهندسی عمران به شمار می‌آید. برای استانداردسازی این فرآیند، دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های متعددی برای بررسی و کنترل ویژگی‌های مختلف بتن در سراسر جهان توسط نهادهای مختلفی تدوین شده است. در این راستا در ایران نیز سازمان ملی استاندارد، به عنوان مرجع قانونی تدوین این دستورالعمل‌ها، در زمینه کنترل کیفیت بتن، استانداردهایی را مشخص کرده است. استاندارد ملی شماره ۶۰۴۴ [۱] به عنوان مرجع تولید و مصرف بتن آماده در زمینه نمونه‌گیری از بتن، در آخرین ویرایش (سال ۱۳۹۷)، برای نمونه‌برداری از بتن تازه، روش نمونه‌برداری را به استاندارد ملی شماره ۳۲۰۱ [۲] ارجاع داده است. در این استاندارد، روش نمونه‌برداری به دو صورت منفرد (نقطه‌ای) و مرکب توضیح داده شده است. نمونه‌گیری منفرد به نمونه‌های بتن که از یک جریان در حال حرکت و یا از یک توده بتنی در یک نقطه خاص نمونه‌برداری می‌شود، گفته می‌شود در حالی که نمونه مرکب، توسط یک سری از برداشت‌ها از نقاط مختلف پیمانان یا توده بتن است که به‌طور کامل مخلوط و همگن می‌شوند [۲]. استاندارد ملی شماره ۶۰۴۴ [۱] از بین این دو روش، روش مرکب را به عنوان روش مورد نظر برای آزمایش مقاومت فشاری انتخاب نموده است. همچنین در آیین‌نامه بتن ایران (نشریه شماره ۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه) [۳] نمونه‌برداری از کامیون حمل بتن را صرفاً به روش مرکب را مجاز دانسته است اما در شرایطی که ناظر

نیاز به نمونه‌گیری اضافی را برای برطرف کردن ابهام در موارد خاص مربوط به بتن تازه را احساس کند، نمونه‌گیری به روش نقطه‌ای یا منفرد مجاز اعلام شده است.

با وجود تأکید آیین‌نامه بتن ایران [۳] و استاندارد ملی شماره ۶۰۴۴ [۱] مبنی بر لزوم نمونه‌گیری به روش مرکب، با توجه به وجود دو روش منفرد مندرج در استاندارد ۳۲۰۱ [۲] برای نمونه‌برداری بتن از کامیون‌های حمل بتن، در بسیاری از پروژه‌ها و آزمایشگاه‌ها تمایل به نمونه‌گیری به روش نقطه‌ای وجود دارد. در روش نمونه‌گیری منفرد نسبت به روش مرکب، معمولاً زمان و انرژی کمتری صرف می‌شود و آسان‌تر انجام می‌شود. علاوه‌براین، زمان موردنیاز متوقف‌کردن بتن‌ریزی برای انجام نمونه‌گیری کاهش می‌یابد. ذکر این نکته ضروری است که مطابق استاندارد ملی شماره ۶۰۴۴ [۱]، علاوه بر ضرورت توجه به حقوق مصرف‌کننده، نمونه‌گیری مرکب، کنترلی برای حفظ یکنواختی مخلوط بتن در مدت زمان بتن‌ریزی است. بدین منظور که در بسیاری از موارد، احتمال تغییر مخلوط بتن با افزودن آب و مصالح مختلف توسط افراد حاضر در بتن‌ریزی (راننده کامیون حمل بتن، راننده پمپ) وجود دارد که با استفاده از نمونه‌گیری مرکب، می‌توان این یکنواختی مخلوط بتن را کنترل کرد.

در این تحقیق، با نظارت بر عدم تغییر در مخلوط بتن، تفاوت‌های مشخصات بتن تازه و سخت‌شده دو روش نمونه‌گیری منفرد و مرکب موجود در استاندارد ملی ۳۲۰۱ [۲] در شرکت فهاب بتن بررسی شد. بدین منظور، نمونه‌گیری‌هایی به دو روش موجود در بتن‌ریزی‌های مختلف در شهر تهران انجام شد. با بررسی خواص بتن تازه از نظر روانی اسلامپ و دما در مدت زمان بتن‌ریزی و همچنین

خواص بتن سخت‌شده شامل مقاومت فشاری، تفاوت‌های احتمالی دو روش نمونه‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفت. با ارزیابی نتایج این تحقیق، می‌توان نگرانی‌های احتمالی دستگاه نظارت برای ایجاد خطا در نتایج مقاومت فشاری نمونه‌گیری منفرد برطرف کرد و همچنین امکان نمونه‌گیری منفرد برای فرآیند کنترل کیفیت تولیدکننده را فراهم کند.

## ۲. روش تحقیق

برای رسیدن به اهداف تحقیق، در ۱۶ مورد بتن‌ریزی مختلف در نقاط مختلف شهر تهران، نمونه‌گیری منفرد و مرکب انجام شد. در مدت زمان بتن‌ریزی، اسلامپ و دمای بتن تازه نیز در هر قسمت از نمونه‌برداری بعد از تخلیه حدود ۱۵ (ابتدای بار)، ۵۰ (وسط بار) و ۸۵ درصد (انتهای بار) از حجم بتن موجود در کامیون حمل بتن، ثبت گردید. از هر نمونه، ۳ عدد آزمون مکعبی ۱۵ سانتی‌متری برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری استاندارد در آب و آهک اشباع نیز تهیه شد. مراحل انجام نمونه‌گیری بدین ترتیب بود که در ابتدا، بعد از برداشت اول (حدود ۱۵ درصد حجم اولیه بتن موجود در

کامیون حمل بتن) نمونه‌گیری منفرد برای بررسی اسلامپ، دمای بتن تازه و مقاومت فشاری انجام شد. برای بررسی تفاوت مقاومت فشاری دو روش نمونه‌گیری، نمونه‌گیری مرکب بر اساس محدودیت موجود در استاندارد ملی ۶۰۴۴ [۱]، ۳۲۰۱ [۲] و آیین‌نامه بتن ایران [۳]، از ترکیب برداشت اول نمونه‌گیری مرکب بعد از تخلیه ۱۵ درصد از حجم بتن موجود در کامیون حمل بتن، تخلیه حدود ۵۰ درصد از بتن و برداشت قبل از رسیدن به ۱۵ درصد انتهایی حجم بتن موجود در کامیون حمل بتن (حدود ۸۵ درصد از حجم بتن)، بخش کافی از برداشت‌ها ترکیب شد و آزمون‌های مقاومت فشاری برای نمونه‌گیری مرکب تهیه گردید. در مدت زمان برداشت‌های دوم (وسط بار) و سوم (انتهای بار)، اسلامپ و دمای بتن تازه به‌صورت نمونه‌گیری منفرد ثبت گردید تا روند تغییرات آن‌ها در مدت زمان بتن‌ریزی و محل نمونه‌گیری به‌دست آید. انجام نمونه‌گیری از بتن مطابق با استاندارد ۳۲۰۱ [۲] توسط افراد با تجربه در واحد کنترل کیفیت شرکت فهاب بتن صورت گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه‌گیری بتن تازه از کامیون حمل بتن

سال، به منظور کنترل دمای بتن در محدوده مجاز ۳۲ درجه سلسیوس، در برخی از موارد، از یخ قالبی در کامیون‌های حمل بتن استفاده شد. در جدول ۱، اطلاعات استفاده از مواد افزودنی فوق روان کننده در بتن‌ساز مرکزی (با کاربرد کاهنده آب)، مصرف مجدد افزودنی در محل پروژه در هنگام تخلیه و استفاده از یخ در پروژه‌های مختلف نشان داده شده است.

در این تحقیق، به صورت تصادفی پروژه‌های مختلف با رده‌های مختلف مقاومتی در نظر گرفته شدند. همچنین، با توجه به نیاز برخی از پروژه‌ها برای دستیابی به روانی بیشتر، از روان کننده در بتن‌ساز مرکزی<sup>۱</sup> و محل پروژه استفاده شد؛ ولی به منظور یکسان‌سازی داده‌های تحقیق، از هر یک از رده‌های پرتکرار C25، C30 و C35، پنج مورد انتخاب گردید. با توجه به انجام تحقیق در ۶ ماه ابتدای

جدول ۱- اطلاعات استفاده از یخ و افزودنی فوق روان کننده در پروژه‌ها

ردمقاومتی	شماره	موقعیت پروژه	استفاده از یخ		استفاده از فوق روان کننده		استفاده از فوق روان کننده در محل پروژه
			بله	خیر	بله	خیر	
C25	۱	رشیدی جهان	*	*	*	*	*
	۲	قزوین	*	*	*	*	*
	۳	کریم خان	*	*	*	*	*
	۴	یافت آباد	*	*	*	*	*
	۵	یافت آباد	*	*	*	*	*
C30	۱	خیام	*	*	*	*	*
	۲	شهرک بروجردی	*	*	*	*	*
	۳	بیمارستان امام خمینی	*	*	*	*	*
	۴	یوسف آباد	*	*	*	*	*
	۵	مرزداران	*	*	*	*	*
C35	۱	سیمون بولیوار	*	*	*	*	*
	۲	سیمون بولیوار	*	*	*	*	*
	۳	سیمون بولیوار	*	*	*	*	*
	۴	سیمون بولیوار	*	*	*	*	*
	۵	سیمون بولیوار	*	*	*	*	*

### ۳. آزمایش‌ها

در این تحقیق، برای نمونه‌گیری‌های منفرد آزمایش‌های بتن تازه به صورت مجزا برای قسمت‌های ۱۵ درصد ابتدایی حجم بتن موجود در کامیون حمل بتن (ابتدای بار)، پس از تخلیه حدود ۵۰ درصد از بتن (وسط بار) و بعد از تخلیه ۸۵ درصد از حجم بتن (انتهای بار) انجام شد. بدین ترتیب، روانی بتن به روش اسلامپ مطابق استاندارد ملی شماره ۲-۳۲۰۳ [۴] انجام شد. همچنین، دمای بتن تازه مطابق با استاندارد ملی شماره ۱۱۲۶۸ [۵] با دماسنج میله‌ای دیجیتال با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که در برخی موارد، به دلیل موانع اجرایی در پروژه، امکان ثبت دمای بتن تازه وجود نداشت.

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌گیری‌های منفرد و مرکب، مطابق استاندارد ملی شماره ۳-۱۶۰۸ [۶]، سه عدد آزمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری برای سن ۲۸ روز عمل‌آوری استاندارد در آب و آهک اشباع با دمای ۲۳ درجه سلسیوس، در نظر گرفته شد. در تمام نمونه‌گیری‌ها از قالب‌های پلاستیکی یک تکه با رواداری ناهمواری و ناگونمایی قابل قبول مطابق با رواداری‌های استاندارد ملی شماره ۱-۱۶۰۸ [۷] استفاده شد تا تأثیر منفی کیفیت نازل قالب بر مقاومت فشاری کمتر گردد [۸]. همچنین برای برقراری شرایط یکسان در آزمایش مقاومت فشاری، از یک جک بتن شکن با سرعت بارگذاری ثابت برای انجام آزمایش مقاومت فشاری آزمونه‌ها استفاده شد.

### ۴. نتایج

نتایج به‌دست آمده خواص بتن تازه از نظر اسلامپ و دمای بتن بر اساس رده‌های مقاومتی C25، C30 و C35 در جدول ۱ گزارش شده است. اختلاف دمای بتن تازه و

اسلامپ در برداشت‌هایی که تقریباً از ۱۵ و ۸۵ درصد بتن داخل کامیون حمل بتن تخلیه شده است، در جدول ۲ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که حداکثر فاصله زمانی ۱۵ دقیقه بین نمونه‌گیری‌های انجام شده در ابتدا و انتهای کامیون حمل بتن، در تمامی نمونه‌گیری‌ها رعایت شده است.

مطابق نتایج جدول ۲، به طور کلی در مدت زمان تخلیه از کامیون حمل بتن، اسلامپ کاهش و دمای بتن تازه افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند گذشت زمان در طول زمان نمونه‌گیری از ماشین حمل بتن باشد. بنابراین لازم است تا مصرف‌کننده بتن، دستگاه نظارت و افراد مسئول در بتن-ریزی در این مورد توجه شوند و با در نظر گرفتن تمهیدات لازم، از بروز مشکلات احتمالی مانند افت زیاد اسلامپ، افزایش دمای بتن تازه از حدکثر دمای مجاز و ... جلوگیری شود.

در استاندارد ملی شماره ۶۰۴۴ [۱]، برای کنترل اولیه و پذیرش بتن، اینطور بیان شده است که از نمونه منفرد ابتدای بار برای کنترل ویژگی‌هایی مانند جریان اسلامپ، دما، چگالی و درصد هوای بتن تازه باید استفاده شود. مطابق نتایج جدول ۲ و تغییرات اندک بین ابتدا و انتهای بار می‌توان در برداشت‌های وسط بار خواص بتن تازه کنترل گردد. البته ناظر پروژه می‌تواند برای کنترل یکنواختی بتن، به‌منظور مقایسه در کامیون‌های حمل بتن مختلف درخواست انجام نمونه‌گیری منفرد در قسمت‌های مختلف تخلیه بتن داشته باشد. همچنین، مطابق آیین نامه بتن ایران [۳]، ناظر می‌تواند در هنگام بروز شک یا ایجاد تغییرات ظاهری در بتن نیز درخواست نمونه‌گیری منفرد را پس از تخلیه حدود ۰/۳ مترمکعب از بتن داخل کامیون حمل بتن داشته باشد.



جدول ۲- نتایج دما و اسلامپ برداشت‌های بتن در نمونه‌گیری منفرد

درصد تفاوت اسلامپ*	مقدار تفاوت دما*	دمای بتن تازه (درجه سلسیوس)			اسلامپ (سانتی‌متر)			شماره	موقعیت پروژه	رده مقاومتی
		انتهای بار	وسط بار	ابتدای بار	انتهای بار	وسط بار	ابتدای بار			
۳۱	۱/۳	۳۴	۳۳/۸	۳۲/۷	۹	۱۱	۱۳	رشیدی جهان	۱	
۱۰	-	-	-	-	۹	۱۰	۱۰	قزوین	۲	
۱۰	۰/۴	۳۱/۷	۳۱/۳	۳۱/۳	۱۸	۱۹	۲۰	کریم خان	۳	
۱۰	۲	۲۹/۳	۳۰/۷	۳۱/۳	۱۹	۲۰	۲۱	یافت آباد	۴	
۲۹	۰/۵	۳۴/۳	۳۴/۲	۳۳/۸	۱۲	۱۴	۱۷	یافت آباد	۵	
۵۰	-	-	-	-	۷	۹	۱۴	خیام	۱	
۲۲	-	-	-	-	۷	۸	۹	شهرک بروجردی	۲	
۱۳	۰/۵	۲۹/۶	۲۹/۳	۲۹/۱	۱۴	۱۵	۱۶	بیمارستان امام خمینی	۳	
۱۳	۰/۴	۳۵	۳۴/۳	۳۴/۶	۲۰	۲۱	۲۳	یوسف آباد	۴	
۲۸	۱/۲	۳۳/۲	۳۲/۲	۳۲	۱۳	۱۵	۱۸	مرزداران	۵	
۵	۰/۴	۳۲/۲	۳۲/۱	۳۱/۸	۱۹	۲۰	۲۰	سیمون بولیوار	۱	
۶	۰/۳	۳۰/۶	۳۰/۴	۳۰/۳	۱۷	۱۷	۱۸	سیمون بولیوار	۲	
۵	۰/۳	۳۱/۸	۳۱/۶	۳۱/۵	۱۹	۱۹	۲۰	سیمون بولیوار	۳	
۵	۰/۱	۳۰/۲	۳۰/۳	۳۰/۱	۲۰	۲۱	۲۱	سیمون بولیوار	۴	
۵	۰/۸	۳۲/۸	۳۲/۶	۳۲	۲۱	۲۲	۲۲	سیمون بولیوار	۵	

\* منظور از تفاوت، مقدار تفاوت بین انتها و ابتدای مخلوط بتن موجود در کامیون حمل بتن (معرف حدود ۱۵ درصد ابتدایی و انتهایی) است.

که در شکل ۲ نشان داده شده است. رابطه خطی به‌دست- آمده نشان‌دهنده اختلاف اندک بین نتایج مقاومت فشاری در حالت‌های منفرد و مرکب است. به‌طور کلی، نتایج مقاومت فشاری با در نظر گرفتن انحراف معیار نتایج نمونه منفرد تفاوت معناداری با حالت نمونه مرکب ندارد و بسیار ناچیز است. مطابق نتایج، حدود ۲۴ درصد نتایج مقاومت فشاری نمونه مرکب بیشتر از نمونه منفرد است.

نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مرکب و منفرد پروژه‌های مختلف در جدول ۳ گزارش شده است. با بررسی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش شده و محاسبه میانگین آن‌ها، می‌توان اختلاف بین مقاومت فشاری نمونه‌های منفرد و مرکب را بدست آورد که در جدول ۳ نشان داده شده است. به منظور بررسی ارتباط بین نتایج مقاومت فشاری در حالت‌های نمونه‌گیری منفرد (FS) و مرکب (FT)، رابطه ریاضی بین آن‌ها به‌دست آمد

جدول ۳- نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه تبدیل شده به استوانه‌ای

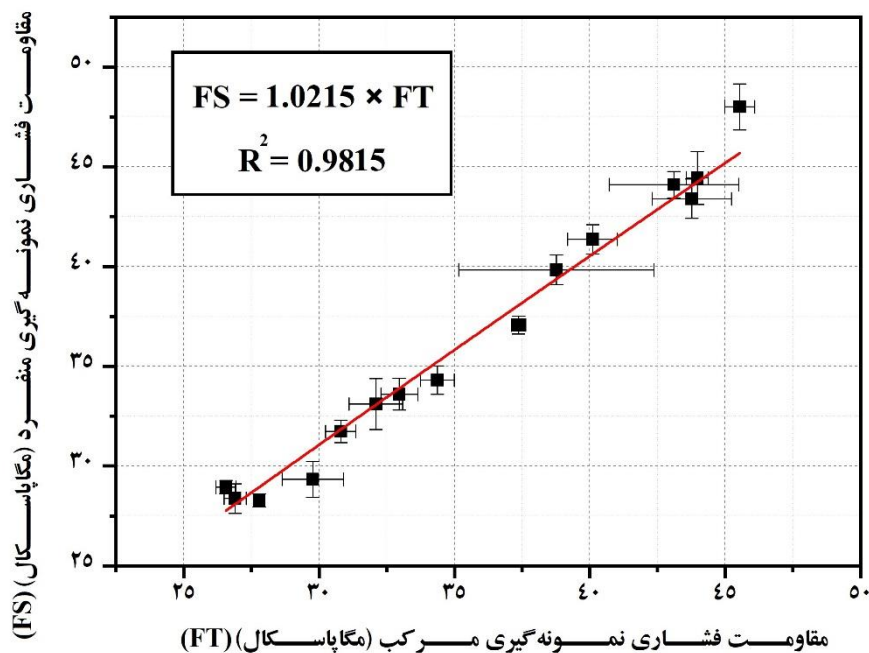
درصد تفاوت میانگین*	مقاومت فشاری		مقاومت فشاری		شماره	موقعیت پروژه	رده مقاومتی
	نمونه‌گیری مرکب از ترکیب برداشت‌ها (مگاپاسکال)		نمونه‌گیری منفرد از ۱۵ درصد ابتدای بار (مگاپاسکال)				
	انحراف معیار	میانگین آزمون‌ها	انحراف معیار	میانگین آزمون‌ها			
+ ۵/۴۵	۰/۴	۲۶/۹	۰/۷	۲۸/۴	۱	رشیدی جهان	C25
+ ۸/۹۱	۰/۴	۲۶/۶	۰/۳	۲۸/۹	۲	قزوین	
+ ۱/۶۸	۰	۲۷/۸	۰/۳	۲۸/۳	۳	کریم خان	
- ۱/۴۶	۱/۱	۲۹/۸	۰/۹	۲۹/۳	۴	یافت آباد	
+ ۱/۹۲	۰/۷	۳۳	۰/۸	۳۳/۶	۵	یافت آباد	
+ ۲/۷۵	۳/۶	۳۸/۸	۰/۷	۳۹/۸	۱	خیام	C30
- ۰/۸	۰/۳	۳۷/۴	۰/۴	۳۷/۱	۲	شهرک بروجردی	
+ ۳/۱۲	۱	۳۲/۱	۱/۳	۳۳/۱	۳	بیمارستان امام خمینی	
+ ۳/۰۳	۰/۶	۳۰/۸	۰/۶	۳۱/۷	۴	یوسف آباد	
- ۰/۱۹	۰/۶	۳۴/۴	۰/۷	۳۴/۳	۵	مرزداران	
+ ۳/۱۶	۰/۹	۴۰/۱	۰/۷	۴۱/۴	۱	سیمون بولیوار	C35
+ ۵/۴۲	۰/۶	۴۵/۵	۱/۲	۴۸	۲	سیمون بولیوار	
+ ۱/۰۶	۰/۴	۴۴	۱/۳	۴۴/۴	۳	سیمون بولیوار	
- ۰/۸۴	۱/۵	۴۳/۸	۱	۴۳/۴	۴	سیمون بولیوار	
+ ۲/۳۲	۲/۴	۴۳/۱	۰/۷	۴۴/۱	۵	سیمون بولیوار	

\* منظور از تفاوت، درصد نتایج مقاومت فشاری نمونه منفرد نسبت به مرکب است.

\* علامت‌های + و - به ترتیب نشان‌دهنده افزایش یا کاهش می‌باشد.

بررسی ضوابط پذیرش توسط دستگاه نظارت، نمونه‌گیری مرکب انجام پذیرد.

نتایج نشان می‌دهد که برای کنترل کیفیت توسط تولیدکننده می‌توان به جای نمونه‌گیری مرکب از منفرد استفاده کرد. لازم به ذکر است که در هر صورت باید برای



شکل ۲- رابطه بین نتایج مقاومت فشاری آزمون‌های نمونه‌گیری منفرد و مرکب

صورت اطمینان از حفظ یکنواختی نسبی بار در کل کامیون حمل بتن اجرا کرد.

- دستگاه نظارت و نماینده تولیدکننده بتن باید در مورد مقررات نمونه‌گیری منفرد و مرکب و موارد استفاده از آن آگاه باشند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، به‌منظور کنترل کیفیت توسط تولیدکننده می‌توان به جای نمونه‌گیری مرکب از منفرد استفاده کرد که باعث ایجاد سهولت در بتن‌ریزی و جلوگیری از ایجاد وقفه‌های طولانی در روند بتن‌ریزی می‌شود. لازم به ذکر است که در هر صورت باید برای بررسی ضوابط پذیرش توسط دستگاه نظارت، نمونه‌گیری مرکب انجام پذیرد. نمونه‌گیری مرکب که جزئی از حقوق مصرف‌کننده است، می‌تواند عاملی برای کنترل یکنواختی مخلوط بتن در کامیون حمل بتن و عدم اضافه کردن آب اضافی به مخلوط بتن باشد.

#### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- دمای بتن در ابتدا و انتهای حجم بتن در حال تخلیه از کامیون حمل بتن تفاوت چندانی نداشته و به‌طور میانگین ۰/۴ درجه سلسیوس اختلاف دارد. اسلامپ بتن به عنوان شاخص روانی، در حین بتن‌ریزی تغییراتی با میانگین کاهش ۱۶ درصدی دارد که دلیل آن می‌تواند طولانی‌شدن مدت زمان بتن‌ریزی، در معرض آفتاب قرار گرفتن بیشتر و نزدیکی به موتور عقب کامیون حمل بتن انتهای بار نسبت به ابتدای بار باشد.

- با بررسی میانگین نتایج مقاومت فشاری آزمون‌های نمونه‌گیری مرکب و منفرد، می‌توان مشاهده کرد که اختلاف مقاومت فشاری عدد ناچیزی است. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از نمونه‌گیری منفرد را می‌توان در

## ۵. قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود نسبت به حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و شرکت تولیدکننده بتن آماده فهاب بتن اعلام می‌دارند.

## ۶. مراجع

- [۱] استاندارد ملی ایران، شماره ۶۰۴۴، (۱۳۹۷) "بتن آماده- ویژگی‌ها"، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده های ساختمانی.
- [۲] استاندارد ملی ایران، شماره ۱-۳۲۰۱، (۱۳۹۱) "روش نمونه برداری از بتن تازه"، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده های ساختمانی.
- [۳] سازمان برنامه و بودجه کشور، آیین نامه بتن ایران، (۱۴۰۰) "جلد دوم- مصالح و اجرا"، ضابطه شماره ۲-۱۲.
- [۴] استاندارد ملی ایران، شماره ۲-۳۲۰۳، (۱۳۸۶) "بتن تازه- تعیین روانی به روش اسلامپ- روش آزمون"، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده های ساختمانی.
- [۵] استاندارد ملی ایران، شماره ۱۱۲۶۸، (۱۳۸۷) "بتن- تعیین دمای بتن حاوی سیمان هیدرولیکی تازه مخلوط شده- روش آزمون"، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده های ساختمانی.
- [۶] استاندارد ملی ایران، شماره ۳-۱۶۰۸، (۱۳۹۳) "تعیین مقاومت فشاری آزمون‌ها: روش آزمون"، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده های ساختمانی.
- [۷] استاندارد ملی ایران، شماره ۱-۱۶۰۸، (۱۳۹۳) "شکل، ابعاد و سایر الزامات قالب و آزمون‌ها"، کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده های ساختمانی.
- [۸] ذوالقدری. ع و همکاران، (۱۳۹۸) "بررسی تأثیر کیفیت قالب مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر بر نتایج مقاومت فشاری بتن"، یازدهمین کنفرانس ملی بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

# بررسی آزمایشگاهی تعیین ملات ماسه-سیمان بهینه به منظور تزریق درون بالاست راه آهن به روش پیش آکنده



محسن تدین  
استادیار دانشکده مهندسی عمران  
دانشگاه بوعلی سینا، همدان  
بازرس انجمن بتن ایران



مرتضی اسمعیلی  
استاد دانشکده مهندسی راه آهن  
دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران



میلااد حسین اصفهانی  
دانشجوی دکتری مهندسی راه آهن  
دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
عضو انجمن بتن ایران

## چکیده

بتن پیش آکنده به بتنی اطلاق می گردد که مصالح درشت دانه از قبل درون قالب بتنی جایگذاری شده و ملات ماسه-سیمان با فشار از پایین نمونه به داخل مجموعه اضافه می گردد. به منظور بررسی رفتار مکانیکی این بتن، لازم است ابتدا رفتار مکانیکی ملات این بتن از طریق استانداردها و روش های آزمایش موجود در آیین نامه های معتبر مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد. از آنجا که در ادبیات موضوع، رفتار این ملات برای کاربرد در مهندسی راه آهن بطور دقیق تبیین نشده است، در پژوهش حاضر سعی شده است تا بهره گیری از پارامترهای موردنیاز برای کاربرد این بتن در زیرسازی راه آهن و تبدیل برجای خط بالاستی به داخل ملات بهینه از منظر دستیابی به مقاومت فشاری بیشتر، زمان گیرش کمتر به دلیل احتراز از زمان زیاد مسدودی خط و تزریق پذیر بودن این ملات از طریق وسایل متداول تزریق، مقایسه و تعیین گردد. در این راستا، در مقاله حاضر با تعریف روش تحقیق و مصالح موردنیاز، آزمایشات انجام گرفته بر روی ۱۰۰۰ نمونه ملات با طرح-های مخلوط مختلف از جمله زمان روانی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، زمان گیرش به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است و با تحلیل آماری انجام شده در هر بخش، تأثیر هر یک از پارامترها بر روی آنها مشخص گردیده است. در انتها با بهینه یابی چندعاملی و با ارائه رابطه غیرخطی، طرح مخلوط بهینه ملات و همچنین پیش بینی مقاومت ملات در حضور پارامترهای مختلف توسعه داده شده است.

کلمات کلیدی: بتن پیش آکنده، ملات، دالخط، بهینه یابی

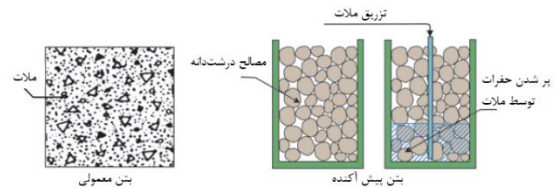
## ۱- مقدمه

روش در بتن ریزی های حجیم مثل ساخت سدها، پایه پلها و ... استفاده می شود، همچنین برای تعمیر سازه های بتنی که قسمتی از آنها تخریب شده از این روش استفاده می گردد. یکی دیگر از موارد استفاده این روش در تبدیل خطوط بالاستی به دالخط می باشد، چرا که در خطوط ریلی

بتن پیش آکنده<sup>۱</sup> به بتنی اطلاق می شود که ابتدا سنگدانه در محل بتن ریزی جاگذاری می شود و سپس با تزریق دوغاب یا ملات با فشار هوا، ملات به درون فضای خالی بین سنگدانه ها رفته و تبدیل به بتن پیش آکنده می شود. از این

<sup>1</sup> Preplaced Aggregate Concrete (Also Prepacked Concrete, Two Stage Concrete)

بالاستی مرحله اولیه این روش که همان جاگذاری سنگدانه هاست انجام شده و فقط با عملیات تزریق می‌توان این خطوط را به داخل تبدیل کرد. شمایی کلی از تفاوت بین بتن معمول و بتن پیش‌آکنده در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- تفاوت بتن معمولی و بتن پیش‌آکنده

جهت سیر ایمن ناوگان در خطوط ریلی، این خطوط همواره باید طی عملیات تعمیر و نگهداری مورد بررسی قرار گیرند تا از سالم بودن اجزای روسازی و زیرسازی خطوط ریلی اطمینان حاصل شود. این امر به وسیله بازدیدهای روزانه‌ی مأمورین خط صورت گرفته و در صورت بروز مشکل در اجزای خط بایستی عملیات تعمیر صورت گیرد. به عنوان یک اصل کلی، عملیات تعمیر و نگهداری در خطوط ریلی بالاستی از اهمیت بیشتری نسبت خطوط بدون بالاست برخوردار است، چرا که این خطوط به سبب غیر صلب بودن، مستعد تجاوز از پارامترهای هندسی خط همچون نشست‌های نامتقارن، پیچش و اعوجاج هستند. بنابراین بخش مهمی از هزینه چرخه‌ی عمر خطوط ریلی بالاستی صرف تعمیر و نگهداری این نوع خطوط می‌شود. از طرفی افزایش ترافیک عبوری و زمان سیر قطارها در بعضی خطوط باعث به وجود آمدن مشکلاتی مثل نبود زمان کافی برای تعمیرات جزئی و عدم امکان مسدودی خط برای زمان طولانی جهت بهسازی و نوسازی خطوط بالاستی می‌شود. به دلیل حجم بالای ترافیک عبوری، مسدودی خط حتی در یک روز باعث خسارات قابل توجه مادی و نارضایتی مسافران این مسیرها خواهد شد. تمام این عوامل باعث شده که ساخت خطوط ریلی بدون بالاست توجیه فنی و اقتصادی پیدا کرده و در خطوطی که دارای ترافیک دائمی می‌باشند استفاده از سیستم‌های بدون بالاست دارای

مزیت‌های ویژه‌ای باشد. از آنجا که جزئیات فنی و روش‌های اجرایی این روش در ادبیات فنی به‌طور کامل تبیین نشده است، لذا انجام بررسی‌های آزمایشگاهی جهت استخراج دانش فنی مربوطه مطابق با شرایط خطوط راه- آهن جمهوری اسلامی ایران الزامی به‌نظر می‌رسد. علاوه بر این مسائل، به دلیل اجرای این روش در خطوط بالاستی موجود، دستیابی به حداقل مقاومت کوتاه‌مدت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو، استفاده از افزودنی‌های بتن، جزء اجتناب‌ناپذیر در طرح مخلوط این نوع بتن است. در همین راستا، در پژوهش حاضر از سه نوع افزودنی به منظور دستیابی توأمان به حداقل زمان روانی ملات و حداکثر مقاومت فشاری بهره‌گیری شده است.

به منظور بررسی رفتار بتن پیش‌آکنده، در ابتدا لازم است طرح مخلوط ملات آن مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا، مروری بر ادبیات فنی در حوزه ملات بتن پیش‌آکنده ضروری می‌باشد. عبدالقادر و همکاران در پژوهشی به بررسی ملات مناسب با افزودنی‌های مختلف برای روانی و مقاومت مطلوب بتن پیش‌آکنده می‌باشد [۱]. برای انجام این پژوهش از ماسه طبیعی ساحلی معدن Zlietn (واقع در ۱۵۰ کیلومتری شرق شهر Tripoli کشور لیبی) استفاده شده با وزن مخصوص این ماسه ۲۶۳ تن بر مترمکعب و حداکثر اندازه ۱.۱۸ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین برای ساخت نمونه‌های بتنی از دو نوع افزودنی فوق‌روان‌کننده نفتالن فرم‌آلدهید با نام تجاری Sikament به میزان ۲ درصد وزنی سیمان و منبسط‌کننده پودری شکل برپایه آلومینیوم با نام تجاری Intraplast Z استفاده شده است. چسباننده‌ی بتن در این پژوهش نیز سیمان پرتلند تیپ I معمولی با مقاومت ۲۸ روزه ۴۱ مگاپاسکال و ریزی ۳۵۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های بتنی از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر جهت تست مقاومت

فشاری استفاده شده است. پس از ساخت نمونه‌ها، آنها به -  
 مدت ۷ روز داخل حوضچه آب نگهداری شدند و پس از آن  
 تا رسیدن به سن ۲۸ روز، در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند.  
 در جدول ۱- طرح‌های مخلوط مختلف ملات برای ساخت  
 بتن، روانی‌های نظیر آنها و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی  
 ساخته شده ارائه شده است.

جدول ۱- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن

مقاومت فشاری از رابطه ۱ (MPa)	مقاومت فشاری اسمی (MPa)	نوع افزودنی	c/s	w/c	
۱۳/۱۶	۱۵/۵۹	فوق روان کننده	۱/۰/۵	۰/۳۸	
۳۳/۱۷	۱۷/۳۹		۱/۱		
۵۵/۱۸	۱۸/۵۳		۱/۱/۵		
۳۱/۱۵	۱۵/۲۶	منبسط کننده	۱/۰/۵		
۶۳/۱۶	۱۶/۵۴		۱/۱		
۹۴/۱۷	۱۸/۰۱		۱/۱/۵		
۵۵/۱۸	۱۸/۶۸	فوق روان کننده + منبسط کننده	۱/۰/۵		
۴۹/۱۹	۱۸/۹۶		۱/۱		
۴۳/۲۰	۱۹/۴۷		۱/۱/۵		
۸۸/۱۵	۱۵/۶۵	بدون افزودنی	۱/۰/۵		۰/۵۵
۷۴/۱۷	۱۷/۵۷		۱/۱		
۵۸/۱۹	۲۰/۴۹		۱/۱/۵		
۲۸/۱۸	۱۸/۱۹	فوق روان کننده	۱/۰/۵		
۴۹/۱۹	۱۹/۴۹		۱/۱		
۷۰/۲۰	۲۰/۵۹		۱/۱/۵		
۷۷/۱۶	۱۶/۵۶	منبسط کننده	۱/۰/۵		
۱۰/۱۸	۱۸/۰۱		۱/۱		
۴۰/۱۹	۱۹/۶۷		۱/۱/۵		
۸۹/۱۹	۱۹/۰۶	فوق روان کننده + منبسط کننده	۱/۰/۵		
۸۳/۲۰	۱۹/۷۵		۱/۱		
۷۶/۲۱	۲۲/۷۲		۱/۱/۵		
۴/۱۳	۱۳/۶۹	بدون افزودنی	۱/۰/۵	۰/۸	
۸۹/۱۴	۱۵/۰۷		۱/۱		
۷۴/۱۶	۱۶/۰۱		۱/۱/۵		
۳۱/۱۴	۱۴/۳۹	فوق روان کننده	۱/۰/۵		
۵۲/۱۵	۱۵/۷۹		۱/۱		
۷۳/۱۶	۱۶/۳۱		۱/۱/۵		
۷۸/۱۶	۱۷/۰۶	منبسط کننده	۱/۰/۵		
۹/۱۸	۱۸/۰۸		۱/۱		
۴۱/۱۹	۱۹/۱۰		۱/۱/۵		
۹۴/۱۷	۱۸/۱۶	فوق روان کننده + منبسط کننده	۱/۰/۵		
۸۸/۱۸	۱۸/۷۵		۱/۱		
۸۲/۱۹	۱۹/۳۷		۱/۱/۵		

زیر را برای مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده برحسب مگاپاسکال تعمیم داده است.

$$f'_c = A + B\left(\frac{W}{C}\right) + C\left(\frac{W}{C}\right)^D + E\left(\frac{C}{S}\right) \quad (1)$$

که در رابطه بالا،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال،  $W/C$  نسبت آب به سیمان و  $C/S$ ، نسبت سیمان به ماسه طرح می‌باشد. ثوابت رابطه فوق، در شرایط افزودنی‌های مختلف متفاوت می‌باشد که هر یک به تفکیک در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ثابت‌های رابطه ۱

نوع افزودنی	A	B	C	D	E	ضریب تصحیح
بدون افزودنی	-۳/۶۷	۱۱/۲۰	۳/۹۶	-۱/۷۹	۳/۷۰	۰/۸۸۳
فوق روان کننده	۴۳/۹۰	-۳۲/۵۵	-۳/۲۷	-۱/۶۸	۲/۴۲	۰/۹۴۴
منبسط کننده	-۱۴/۳۱	-۳۹/۸۳	۶۸/۴۵	۰/۴۷	۲/۶۳	۰/۸۹۱
فوق روان کننده + منبسط کننده	-۲۵/۷۰	-۸۷/۷۰	۱۲۶/۷۵	۰/۵۲	۱/۸۸	۰/۶۶۰

۲/۶۸، عدد سایش آن ۲۳/۸۱ درصد و جذب آب ۱/۶۶ درصد می‌باشد. همچنین از ماسه ساحلی با وزن مخصوص ۲/۶۸ و حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر به عنوان مصالح ریزدانه استفاده شده است. از آب معمولی موجود در آزمایشگاه و سیمان پرتلند تیپ I که استانداردهای موجود در [۴] را داراست، بعنوان اجزای اصلی ایجاد چسبندگی ملات بهره گرفته شد. همچنین از فوق‌روان کننده بر پایه‌ی Viscocrete به عنوان افزودنی شیمیایی که تشکیل شده از زنجیره‌های نفتالن فرمالدهید می‌باشد، به میزان ۲ درصد وزنی سیمان استفاده شد. در این راستا به منظور کسب مقاومت بیشتر، از میکرومیکروسیلیس با سطح ویژه ۲۰۰۰۰ مترمربع در هر کیلوگرم و خلوص ۹۷ درصد، به عنوان افزودنی معدنی به میزان ۶ درصد وزنی سیمان در ملات استفاده گردید. اهم نتایج ملات ساخته شده در شکل ۲۲ نمایش داده شده است.

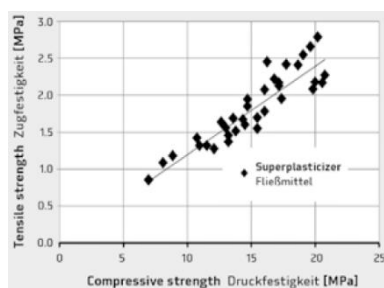
از بررسی نتایج ارائه شده می‌توان دریافت که هر دو پارامتر  $W/C$  (نسبت آب به سیمان) و  $C/S$  (نسبت سیمان به ماسه) در ساخت نمونه‌های بتنی حائز اهمیت است چون روانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌گردد که مقاومت فشاری نمونه‌های بدون فوق‌روان کننده کمتر از نمونه‌های دارای فوق‌روان کننده می‌باشد. با بررسی بیشتر این نتایج می‌توان دریافت که با افزایش میزان روانی، مقاومت نظیر آن افزایش نمی‌یابد. به منظور دستیابی به مقاومت‌هایی با نسبت‌های دیگر  $W/C$  و  $C/S$ ، نویسنده رابطه

با بررسی نتایج فوق می‌توان دریافت که استفاده از منبسط کننده، مقاومت فشاری را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. دلیل این امر، انبساط ملات در واحد حجم خود و در نتیجه چسبیدن بهتر به ذرات درشت دانه می‌باشد. منبسط کننده به خودی خود موجب کاهش آب‌انداختگی و نشست ملات می‌گردد و روانی ملات را بهبود می‌بخشد. در پژوهش دیگری عبدالقادر و همکاران تلاش نمودند تا تأثیر فوق‌روان کننده و میکروسیلیس بر مقاومت بتن پیش‌آکنده را در نسبت‌های  $W/C$  و  $C/S$ های مختلف ارزیابی کنند در همین راستا، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر جهت آزمایش مقاومت فشاری و کششی مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای مطابق [۲] و برای ارزیابی مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای مطابق [۳] رفتار شده است. در این پژوهش از سنگدانه آهکی دولومیتی شکسته به عنوان مصالح درشت‌دانه استفاده شد. وزن مخصوص این سنگدانه

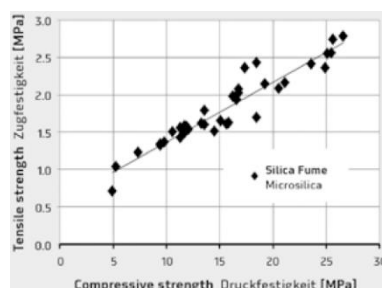


خود قرار گیرد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش سن نمونه‌های بتنی، مقاومت فشاری بتن به صورت تدریجی افزایش خواهد یافت. مطابق مقاومت فشاری، نسبت‌های آب به سیمان پایین، مقاومت کششی بیشتری را بدست می‌دهند. استفاده‌ی توأمان از فوق‌روان‌کننده و میکروسیلیس، افزایش مقاومت بیشتری را نسبت به استفاده جداگانه هر کدام دارد و در صورت عدم استفاده از افزودنی، کمترین مقاومت کششی بدست خواهد آمد. به-طور متوسط می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان ماسه، مقاومت کششی نمونه‌های بتنی کاهش خواهد یافت.

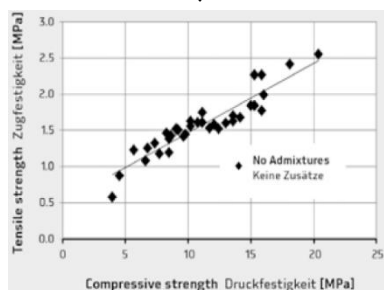
با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که در  $w/c=0.45$  بیشترین مقاومت در مقایسه با نسبت‌های بالاتر اخذ شده است. لذا همانطور که انتظار می‌رود، افزایش نسبت آب به سیمان، کاهش در مقاومت را به همراه دارد. همچنین استفاده‌ی توأمان از فوق‌روان‌کننده و میکروسیلیس، افزایش مقاومت بیشتری را نسبت به استفاده جداگانه هر کدام دارد. شایان ذکر است که عدم استفاده از افزودنی، کمترین مقاومت را به همراه داشته است. افزایش تدریجی میزان ماسه، مقاومت فشاری نظیر هر سن را کاهش می‌دهد. لذا انتظار می‌رود بیشترین مقاومت زمانی بدست آید که نسبت  $C/S$  در حداقل مقدار



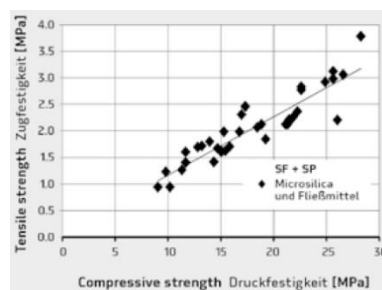
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲- نمودار مقاومت کششی هر نمونه در مقابل مقاومت فشاری نظیر آن (الف) در حضور میکروسیلیس (ب) در حضور فوق‌روان‌کننده (ج) در

حضور توأمان میکروسیلیس و فوق‌روان‌کننده (د) بدون حضور افزودنی

دقیقه و اولترامیکسر با سرعت چرخش ۳۰۰۰ دور در دقیقه برای ساخت ملات‌هایی در حضور افزودنی‌های مختلف استفاده شده است. برای ساخت ملات از سیمان پرتلند I-425 به عنوان چسباننده استفاده شد. مصالح ریزدانه از معدن Borowiec (واقع

در یک تحقیق دیگر، بکارگیری اولترامیکسر<sup>۱</sup>هایی با سرعت چرخش ۳۰۰۰ دور در دقیقه برای اختلاط بهتر مصالح و دستیابی به ملاتی با کیفیت و یکنواخت بکار گرفته شد [۱۵]. برای این پژوهش از یک میکسر معمولی با سرعت چرخش ۱۴۰ دور در

در نزدیکی شهر Gdonsk کشور لهستان) لاستخراج گردید و پیش از انجام آزمایش شسته شد و سطح آن تمیز گردید. از میکروسیلیس به میزان ۶ درصد و خاکستر بادی به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان استفاده شد. از سه نوع فوق روان کننده Viscocrete 3، Muraplast FK و Chrysofluid Optima هر کدام به میزان ۰.۷ درصد وزنی سیمان به منظور دستیابی به سیالیت مطلوب بهره گرفته شد. برای ساختن نمونه های بتنی جهت آزمایش مقاومت فشاری از مکعب های به ضلع ۲۰ سانتی متر

استفاده شد. نتایج نشان می دهد که اثر افزودنی تابع نوع و میزان استفاده از آن است. در حضور میکروسیلیس، اثر هر دو نوع فوق روان کننده مثبت بوده و در نسبت  $c/s=1$ ، میزان آب انداختگی بین ۱ تا ۳ درصد اندازه گیری شده است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که استفاده از Viscocrete روانی مطلوب تری را نسبت به Chrysofluid بدست می دهد. در جدول ۲ روانی، آب انداختگی و مقاومت فشاری ملات نظیر هر طرح مخلوط در حضور افزودنی های مختلف ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج روانی، آب انداختگی و مقاومت فشاری ملات های ساخته شده با میکسر معمولی

کد	w/c	c/s	نوع و میزان افزودنی	آب انداختگی (%)	روانی (cm)	مقاومت فشاری ملات (MPa)
۱	۰/۴۵	۱/۱	۱۰٪ میکروسیلیس + Chrysofluid	۳/۹	۲۵	۵۶/۸
۲			۱۵٪ میکروسیلیس + Chrysofluid	۴/۴	۲۶	۵۱/۵
۳			۲۰٪ میکروسیلیس + Chrysofluid	۵	۲۴	۴۷/۴
۴			۲۵٪ میکروسیلیس + Chrysofluid	۴/۴	۲۵	۴۶
۵			۱۰٪ میکروسیلیس + Viscocrete	۵/۶	۳۳	-
۶			۱۵٪ میکروسیلیس + Viscocrete	۷/۲	۳۱	-
۷			۲۰٪ میکروسیلیس + Viscocrete	۳/۹	-	-
۸			۲۵٪ میکروسیلیس + Viscocrete	-	-	-
۹	۰/۴	۱/۱	میکروسیلیس + ۰/۷ Viscocrete	۱/۱	۲۰	۷۳/۱
۱۰			میکروسیلیس + ۰/۱ Viscocrete	۰	۲۶	۷۳/۳
۱۱			خاکستر بادی + ۰/۷ Chrysofluid	۰	۱۹	۴۵/۳
۱۲			خاکستر بادی + ۰/۱ Chrysofluid	۴/۴	۲۳	۵۹/۹

از جدول بالا می توان نتیجه گرفت که افزودن میکروسیلیس، تأثیر بهتری در افزایش مقاومت فشاری ملات نسبت به خاکستر بادی دارد. همچنین در نسبت های آب به سیمان زیر ۰/۴، روانی ملات معمولا از ۲۰ سانتی متر تجاوز نمی کند. در هر طرحی که اندکی روانی آن افزایش یافته است، آب انداختگی و افت مقاومت شدیدی دیده می شود. در صورت افزایش ۱ درصدی فوق روان کننده Viscocrete، روانی به میزان ۴۰ درصد در صورت افزایش ۱

درصدی فوق روان کننده Chrysofluid، روانی به میزان ۳۰ درصد افزایش می یابد. لذا استفاده از Viscocrete در ساخت نمونه های بتنی پیش آکنده توصیه می گردد. در صورت استفاده از اولترامیکسر، می توان به نتایج بهتری در خصوص ویژگی های ملات تازه دست یافت. برای انجام آزمایش در حضور این میکسر، از روان کننده Betoplast نیز استفاده شده است. جدول ۳ نشان دهنده این نتایج می باشد.

جدول ۳- نتایج روانی، آب‌انداختگی و مقاومت فشاری ملات‌های ساخته شده با اولترامیکسر

کد	w/c	c/s	نوع و میزان افزودنی	آب‌انداختگی (%)	روانی (cm)	مقاومت فشاری ملات (MPa)
۱	۰/۴	۱/۱	Betoplast ۲٪	۱/۲۳	۲۰/۶	۵۰/۳
۲			Chrysofluid + خاکستر بادی	۰	۲۲	۵۹/۲
۳			Viscocrete + خاکستر بادی	۵	۲۷	۵۳/۹
۴			Viscocrete + ۱٪ میکروسیلیس	۰	۲۶	۷۳/۳
۵	۰/۴۵	۱/۱	Betoplast ۲٪	۱/۸	۲۷/۱	۴۴/۱
۶			Viscocrete + میکروسیلیس	۰	۲۸	۶۲
۷	۰/۵	۱/۱	Betoplast ۲٪	۲/۸۳	۲۹/۳	۳۷/۵
۸			Chrysofluid + میکروسیلیس	۱/۱	۲۵	۳۸/۵
۹			Viscocrete + میکروسیلیس	۵	۲۸	۵۰
۱۰	۰/۴	۱/۱	Betoplast ۲٪	۰/۴۵	۹/۴	۴۹/۱
۱۱			Viscocrete + خاکستر بادی	۲/۸	۲۵	۶۴/۵
۱۲	۰/۴۵	۱/۱/۵	Betoplast ۲٪	۱/۰۹	۲۰/۷	۴۲/۷
۱۳			Viscocrete + خاکستر بادی	۲/۲	۲۵	۵۲
۱۴			Viscocrete + میکروسیلیس	۰	۲۱	۵۹/۱
۱۵	۰/۵	۱/۱/۵	Betoplast ۲٪	۲/۳	۲۲	۳۷/۵
۱۶			Chrysofluid + میکروسیلیس	۱/۷	۲۲	۴۵/۲
۱۷			Chrysofluid + خاکستر بادی	۳/۳	۲۵	۴۶/۴

خطوط ریلی بالاستی می‌باشد. برای تحقق این هدف، نزدیک به هزار نمونه فشاری و خمشی با طرح مخلوط‌هایی که در بندهای بعد ارائه خواهند شد، در آزمایشگاه ساخته شدند که نزدیک به ششصد عدد از آنها مورد تأیید واقع شدند. پارامترهای نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، درصد استفاده‌ی میکروسیلیس، درصد استفاده‌ی منبسط-کننده به‌عنوان متغیرهای این آزمایش‌ها فرض شدند. میزان درصد مصرف بهینه فوق‌روان‌کننده برای هر طرح مخلوط، مقاومت فشاری نمونه‌های ملات در سه سن ۱، ۳ و ۲۸ روز، زمان گیرش و بهینه‌یابی غیرخطی برای هر طرح مخلوط به‌عنوان خروجی‌های موردنظر، اندازه‌گیری شدند. همچنین برای طرح مخلوط‌های برتر به لحاظ کمترین زمان روانی و بیشترین مقاومت فشاری، زمان گیرش و تحلیل تصاویر SEM نیز انجام گرفت. برای انجام پروژه‌ی

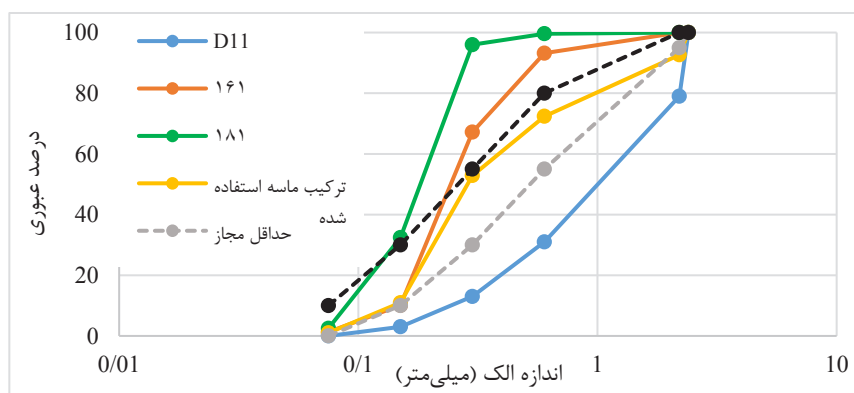
با مقایسه‌ی جدول‌های فوق می‌توان دریافت که در طرح مخلوط‌های یکسان، مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با اولترامیکسر بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با میکسر معمولی است. همچنین روانی نمونه‌هایی که با اولترامیکسر ساخته شده اند، کمی بهتر از نمونه‌های ساخته شده با میکسر معمولی می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان اختلاط همگن‌تر و یکنواختی بیشتر ملات‌های ساخته شده با اولترامیکسر دانست اما در ابعاد وسیع، اثر استفاده از اولترامیکسر قابل اغماض می‌باشد.

## ۲- متدولوژی

هدف این بند، معرفی آزمایش‌های مربوط به ملات بتن پیش‌آکنده و نتایج حاصل از آنها به منظور معرفی برترین طرح مخلوط مطابق با مصالح موجود در کشور به لحاظ روانی کمتر و مقاومت فشاری بالاتر برای اجرای آن در

حاضر از سیمان پرتلند تیپ I-425 تهیه شده از کارخانه سیمان تهران که الزامات مربوط به استاندارد ASTM C150 [۴] را برآورده می‌کند، استفاده شده است. ماسه‌ی مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع ماسه سیلیسی کارخانه ماسه ریخته‌گری فیروزکوه می‌باشد. با توجه به وجود تنوع در دانه‌بندی ماسه‌ها، باید محدوده‌ای از ماسه‌ها اختیار گردد تا از حداقل و حداکثر محدوده‌ی دانه‌بندی توصیه شده در آیین‌نامه ACI 304 1.R [۶] تجاوز نکند. به همین منظور، منحنی دانه‌بندی ماسه‌های تهیه شده، ترکیب ماسه‌ی اختیار شده و محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه ACI در شکل ۳ ارائه شده است. ترکیب ماسه‌ی اختیار شده شامل ۳۵ درصد ماسه D11، ۵۰ درصد ماسه‌ی 161 و ۱۵ درصد ماسه‌ی 181 است تا دانه‌بندی این ترکیب در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه‌ی ACI قرار گیرد. همچنین در این پژوهش از آب معمولی شهری با PH برابر ۷ و حداکثر درجه حرارت ۲۳ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM D1193 [۷] استفاده شده است. میکروسلیس

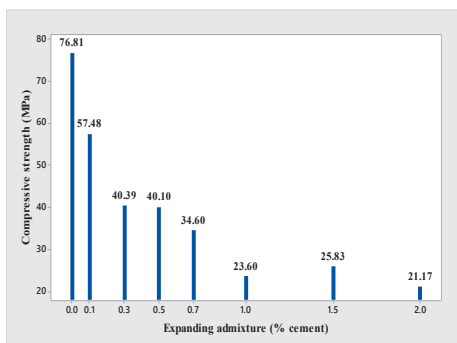
استفاده شده در پژوهش حاضر که محصول جانبی کارخانه فروسیسیسیم فروآلیاژ است، دارای ساختاری آمورف با وزن مخصوص ۲/۲۱ تن بر متر مکعب، ریزی ۲۰۰۵۳ مترمربع بر کیلوگرم و حداکثر اندازه ۲/۳۸ میکرومتر می‌باشد که الزامات آیین‌نامه‌ی ACI 234R و ASTM C1240 [۸] را ارضا می‌کند. علاوه بر آن، فوق‌روان‌کننده به‌عنوان یک افزودنی شیمیایی به‌منظور تأمین سطح مناسبی از روانی ملات برای تسهیل عملیات تزریق به‌کار گرفته شد. در این راستا در پژوهش حاضر، از فوق‌روان‌کننده زودگیر بر پایه پلی‌کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۱ کیلوگرم در مترمکعب و PH برابر با ۷ استفاده گردید. منبسط‌کننده موجود در این پژوهش بر پایه‌ی آلومینیوم بوده و به‌منظور کاهش ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه با سازوکار افزایش حجم خمیر سیمان در واحد وزن استفاده شده است تا مسیر گسیختگی حداقل‌امکان از داخل خمیر رد نشود.



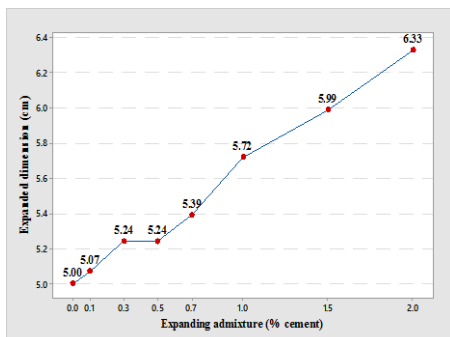
شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ماسه‌های استفاده شده در این پژوهش

در این پژوهش، حدود هزار نمونه فشاری و خمشی مطابق با استاندارد ASTM C183 [۱۰] با استفاده از رابطه‌ی حجم مطلق ملات طرح و نمونه‌برداری شدند که حدود ششصد عدد از آنها مورد تأیید بودند و مابقی به دلایلی از جمله عدم عمل‌آوری مناسب، شکستگی کامل یا لب-پریدگی آنها، عدم محاسبه‌ی درست طرح مخلوط به‌دلیل

خطای انسانی، خرابی موقت دستگاه‌ها و غیره مردود شدند. اختلاط اجزای تشکیل دهنده‌ی ملات برای تهیه‌ی نمونه‌های فشاری مکعبی ۵ سانتی‌متری و تیرهای خمشی ۴\*۴\*۱۶ سانتی‌متری با استفاده از دستورالعمل موجود در [۱۱] انجام شد و بعد از آن، مطابق توصیه‌های گفته شده در [۱۲] عمل‌آوری شدند بدین‌طوری که نتایج ارائه شده



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- اثر منبسط کننده: (الف) روند کاهش مقاومت فشاری (ب) مقدار عددی بعد منبسط شده (ج) نمونه های سالم و منبسط شده

همانطور که از نمودارهای بالا پیداست، هرچه میزان مصرف منبسط کننده بالا می‌رود، مقاومت فشاری به‌اندازه‌ی زیادی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به درصد انبساط بعد منبسط شده و همچنین نگاهی به میزان مجاز مقدار انبساط در آیین‌نامه، واضح است که نباید بیشتر از ۰/۵ درصد وزنی سیمان از این ماده استفاده کرد. به همین جهت، در ادامه برای ساخت نمونه‌های ملات، از صفر و ۰/۵ درصد منبسط کننده به ترتیب به دلیل دارا بودن بیشترین مقاومت فشاری و قرار داشتن در مرز میزان مجاز انبساط بهره‌گیری شده است.

مربوط به میانگین سه نمونه در هر سن و در هر طرح مخلوط مجزا می‌باشد. متغیرهای ساخت ملات با طرح مخلوط‌های مختلف و میزان فرض شده‌ی آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- متغیرهای ساخت ملات و مقادیر آنها

مقادیر آزمایش شده			متغیرها
۲۸	۳	۱	سن (روز)
۰/۴		۰/۳۵	نسبت آب به سیمان (W/C)
۸۵۰	۸۰۰	۷۵۰	عیار سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۰	۷/۵	۵	میکروسیلیس (% وزنی سیمان)
۰/۵	۰		منبسط کننده (% وزنی سیمان)

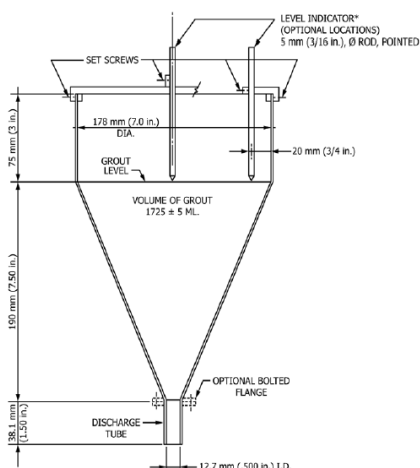
### ۳- نتیجه و بحث

#### ۳-۱- تعیین میزان مصرف منبسط کننده

بعد انبساط یافته‌ی نمونه‌های ملات که در واقع بعد آزاد (بعد بدون محصورشدگی توسط قالب) می‌باشد، یک عامل مهم در تعیین میزان مصرف منبسط کننده است که مطابق با توصیه‌های [۱۳] اندازه‌گیری می‌گردد. در آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، میزان حداکثر بعد منبسط شده‌ی مجاز برابر با ۵ درصد توصیه شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی نیز به‌عنوان عامل تأثیرگذار دیگر برای تعیین میزان مصرف منبسط کننده در نظر گرفته می‌شود زیرا برای اجرای این پروژه در خط راه‌آهن، حداکثر میزان مقاومت فشاری برای بتن به‌منظور تحمل هرچه بالاتر بار محوری عبوری قطار نیاز است. برای تحقق این هدف، از هشت درصد مصرف مختلف منبسط کننده درحالی استفاده شده است که سایر متغیرها ثابت مانده اند تا اثر منبسط کننده دیده شود. شکل ۴ مبین مقاومت فشاری و میزان انبساط بعد آزاد نمونه‌ها می‌باشد.

### ۲-۳- زمان روانی

اگر پس از دو آزمایش متوالی مجدد، تفاوت زمان‌ها بیشتر از ۲/۴۹ ثانیه باشد، آزمایش غیرقابل قبول بوده و باید سنجش روانی را از ابتدا آغاز کرد. برای ملات بتن حجم و بتن‌ریزی زیر آب، زمان روانی از ۱۸ تا ۲۶ ثانیه می‌باشد. در بتن‌های پر مقاومت این زمان ممکن است به ۳۵ تا ۴۰ ثانیه برسد. برای ملات‌هایی با ماسه‌های درشت‌تر از ۲/۵ میلی‌متر به جای استفاده از قیف، مخروط و میز رولنی (فلو) بکار برده می‌شود. شکل ۵، شکل شماتیک مخروط جریان را نمایش داده است [۱۴] و شکل ۶ نشان دهنده مخروط روانی ساخته شده در آزمایشگاه می‌باشد.



شکل ۵- مخروط سنجش روانی استاندارد شده توسط ASTM C939

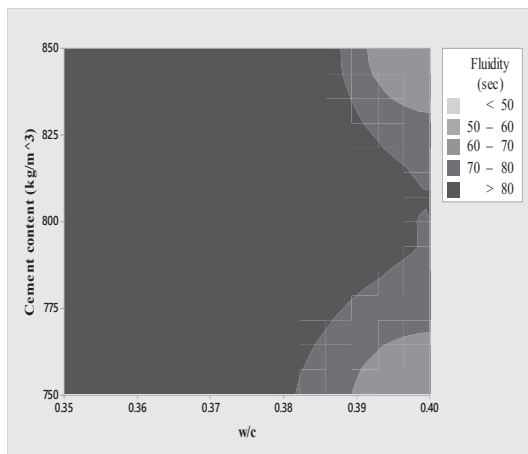


شکل ۶- مخروط سنجش روانی ساخته شده در آزمایشگاه

توصیه‌ی استاندارد ASTM این است که معمولاً ملات تزریقی بلید مثل یک خامه تازه در دمای معمولی باشد تا روان بوده و به خوبی پمپ شود و در فضای خالی‌ها تزریق گردد. برای سنجش روانی ملات، استاندارد ASTM مخروط جریان از جنس استیل ضدزنگ، آلومینیوم cast شده یا هر ماده ضدزنگ دیگر را مطابق شکل زیر پیشنهاد کرده است که حداقل ظرفیت آن ۲۰۰۰ میلی‌لیتر می‌باشد. قطر دهانه‌ی بالایی مخروط ۱۷۸ میلی‌متر و قطر دهانه‌ی پایینی آن ۱۲/۷ میلی‌متر و ارتفاع کلی ۳۰۳/۱ میلی‌متر می‌باشد. این مخروط دارای دو نشانگر سطح ملات است که با ابعاد مشخص شده در شکل، جانمایی آن تعیین شده است. لوله‌ی خروج ملات به صورت متحرک پیشنهاد شده است بدین مفهوم که می‌توان برای شست و شوی مخروط، آن را به راحتی خارج کرد. میزان نمونه باید از ۱۷۲۵ میلی‌لیتر و نماینده‌ی کل ساختار ملات باشد، دمای محیط آزمایشگاه لازم است بین ۲۰-۲۳ درجه سانتی‌گراد باشد. برای کالیبره کردن مخروط باید کل مخروط از آب پر شود، آب باید در  $8 \pm 0.2$  ثانیه تخلیه گردد. روند اندازه‌گیری روانی بدین صورت است که داخل مخروط با آب خیس می‌شود و یک دقیقه قبل از ورود ملات آب داخل آن تخلیه می‌گردد. درپوش خروج بسته‌شده و ملات داخل مخروط ریخته می‌شود. پس از استقرار کامل ملات داخل مخروط و رسیدن سطح آن تا نشانگرها، درپوش خروج برداشته می‌شود و کرنومتر (زمان‌سنج) توسط اپراتور زده می‌شود. اگر پس از تخلیه ملات، نور محیط از دریچه دیده شد، زمان کرنومتر همان زمان جریان است اما اگر نور را دیده نشد (به دلیل مسدود شدن دریچه خروج توسط سنگدانه‌ها)، آزمایش سنجش روانی باید مجدداً انجام گیرد.

### ۳-۲-۱- نمونه‌های ملات مرجع

مرجع که به میزان ذکر شده در بند قبل به آنها فوق‌روان-کننده اضافه شده است، در شکل ۷ ارائه شده است. از این نمودارها می‌توان استنباط کرد که تنها نمونه‌های مرجع با نسبت آب به سیمان ۰/۴ تزریق پذیر هستند. برای تزریق نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر باید از میکروسیلیس استفاده کرد تا امکان استفاده از مقادیر بالاتر فوق‌روان‌کننده فراهم شود.

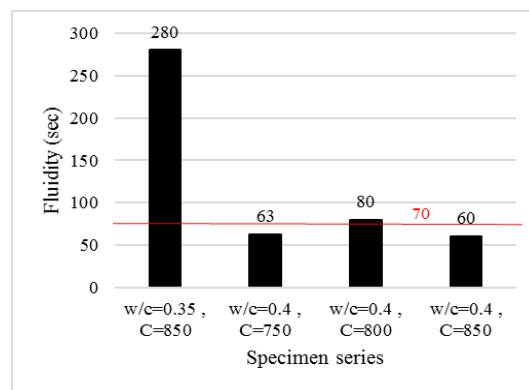


(ب)

شکل ۷- روانی نمونه‌های مرجع: الف) مقادیر ب) منحنی خط تراز

انتظار می‌رود که طرح مخلوط بهینه دارای بیشترین درصد مصرف میکروسیلیس باشد. مقایسه‌ی منحنی‌های خط تراز نشان می‌دهد که در درصد‌های بالای میکروسیلیس، زمان روانی بیشتر در نسبت آب به سیمان کمتر و عیار سیمان کمتر اتفاق می‌افتد، درحالی‌که در طرح‌های دارای میکروسیلیس به میزان ۵ درصد وزنی سیمان، این اتفاق در عیار بالای سیمان رخ می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌گردد که عیار سیمان ۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، عیار مناسبی برای تزریق نمی‌باشد، لذا باید حداقل عیار سیمان برای تزریق را ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفت.

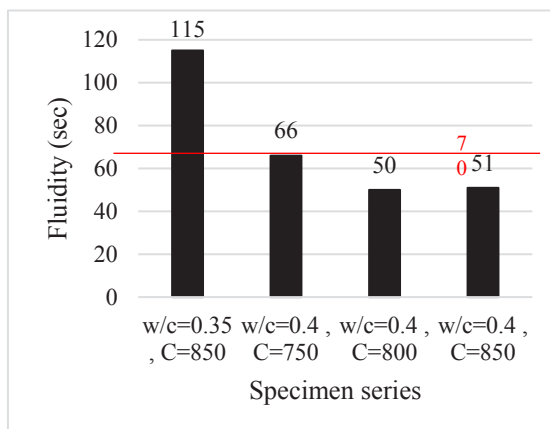
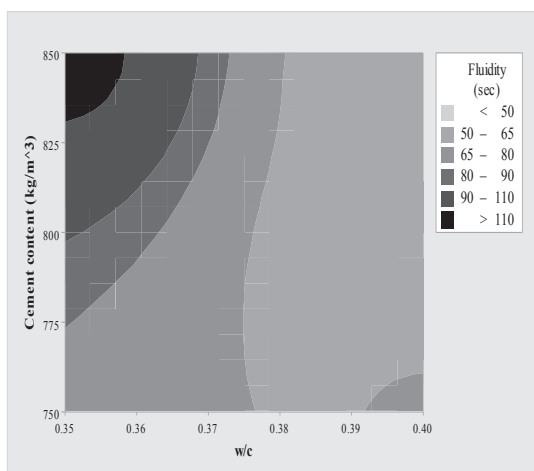
روانی ملات، یک عامل تعیین‌کننده برای تزریق آن به شمار می‌رود که مانند اسلامپ در بتن، معرف خاصیت ملات تازه می‌باشد. اگر ملاتی مقاومت فشاری بالایی داشته باشد اما از روانی مطلوبی برخوردار نباشد، آن طرح در پژوهش حاضر مردود تلقی می‌شود. با آزمون و خطای آزمایشگاهی، ملات قابل تزریق، ملاتی است که دارای حداقل زمان روانی ۷۰ ثانیه باشد. نتایج حاصل از سنجش روانی نمونه‌های



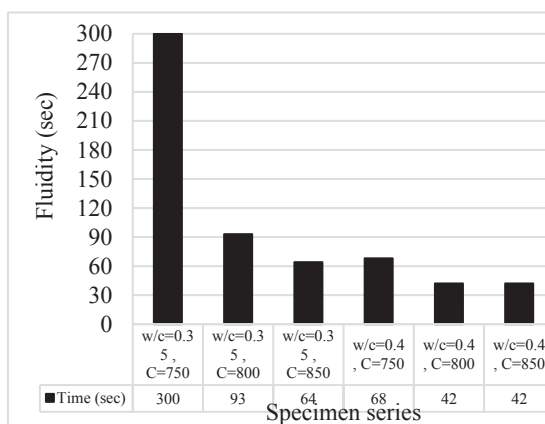
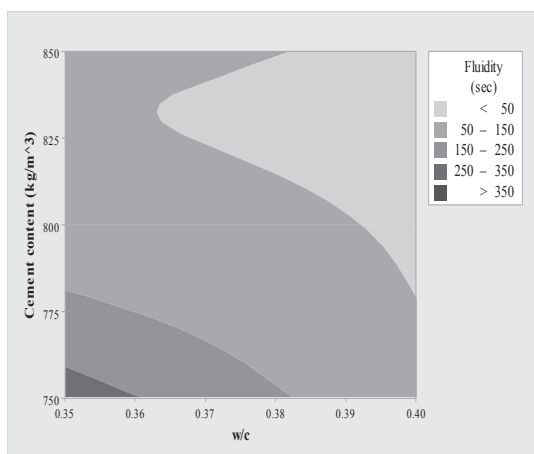
(الف)

### ۳-۲-۲- نمونه‌های ملات مرجع

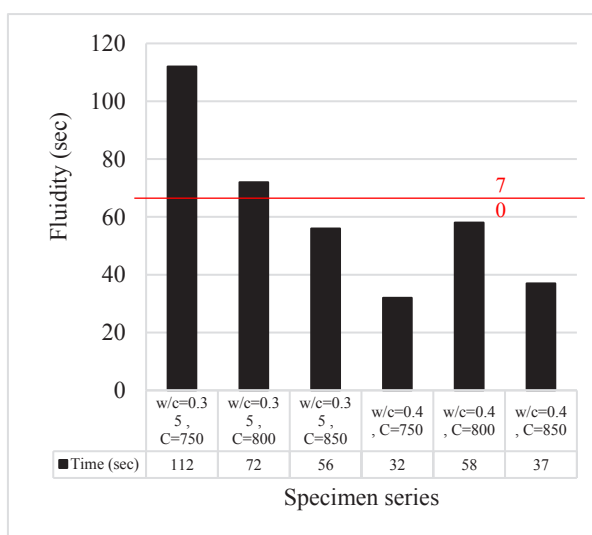
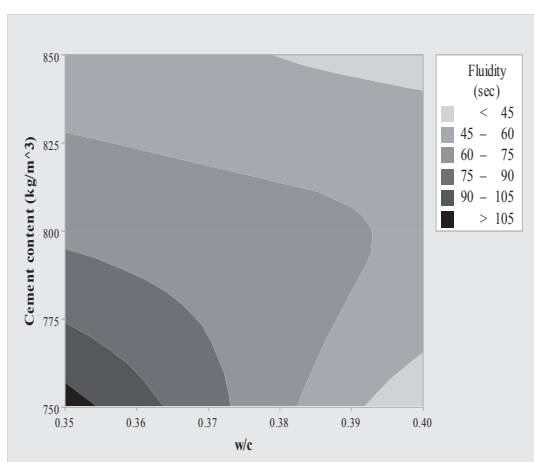
زمان روانی در نمونه‌های دارای میکروسیلیس، کمتر از نمونه‌های مرجع می‌باشد. نتایج مربوط به آنها به همراه منحنی‌های خط تراز در شکل ۸ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در نسبت‌های پایین آب به سیمان به دلیل وجود لزجت و سفت بودن ساختار ملات، زمان روانی بالا است. همچنین با مقایسه‌ی این سه نمودار می‌توان نتیجه گرفت که هرچه میزان مصرف میکروسیلیس در طرح مخلوط افزایش می‌یابد، به دلیل امکان مصرف بیشتر فوق‌روان‌کننده، زمان روانی مطلوب‌تر است. به بیان دیگر



(الف)



(ب)



(ج)

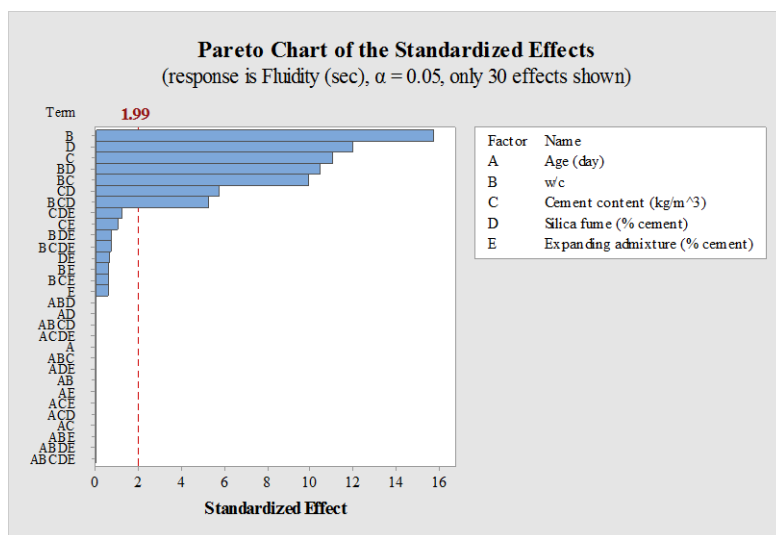
شکل ۸- زمان روانی در نمونه های دارای میکروسیلیس: الف) ۵ درصد ب) ۷/۵ درصد ج) ۱۰ درصد



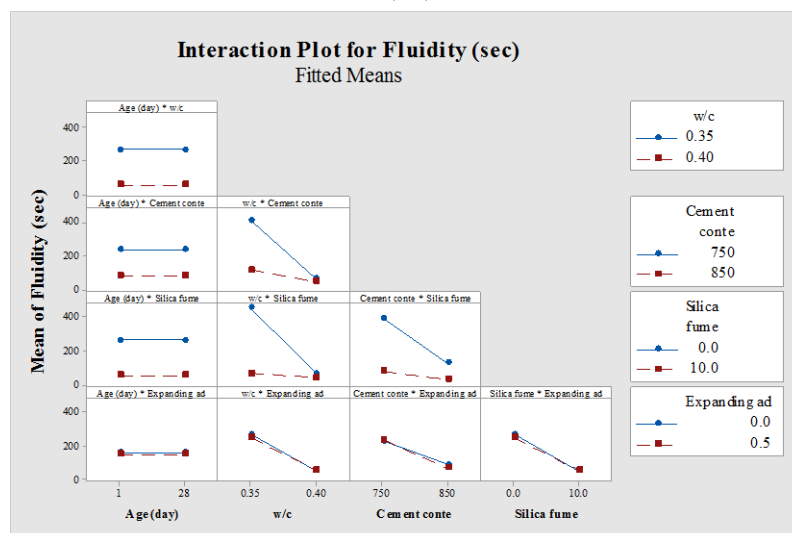
### ۳-۲-۳- تحلیل آماری

میکروسیلیس موجب کاهش شدید زمان روانی می‌گردد زیرا شیب نمودار شدت اثر برای این متغیرها تا حد زیادی بالا می‌باشد. برای توجیه این نتیجه‌گیری می‌توان گفت که افزایش نسبت آب به سیمان موجب سیالیت بیشتر ملات و طبعاً روان‌تر شدن آن می‌گردد. افزایش عیار سیمان با سازوکار کاهش حجم سنگدانه در واحد حجم ملات موجب افزایش کارپذیری آن می‌گردد و افزایش درصد مصرف میکروسیلیس نیز به دلیل افزایش تمایل ملات به پذیرش فوق‌روان‌کننده و جلوگیری از ته‌نشینی ذرات جامد، زمان روانی را افزایش می‌دهد.

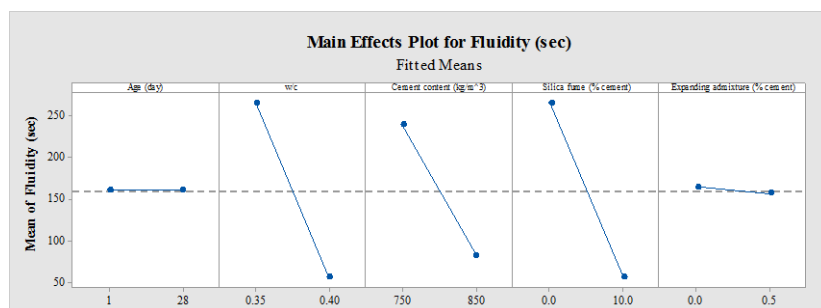
تحلیل آماری نرم‌افزار Minitab گواه آن است که به ترتیب نسبت آب به سیمان، درصد مصرف میکروسیلیس، عیار سیمان و اندرکنش دوبه‌دو و حتی سه‌تایی آنها در زمان روانی موثر است. بدیهی است که تحلیل متغیرهای سن و میزان مصرف منبسط‌کننده در زمان روانی بی‌معناست چرا که زمان روانی، یکی از ویژگی‌های ملات تازه می‌باشد و این دو متغیر بر روی آن اثری ندارند. این گفته در شکل ۹ (ب) و (ج) به وضوح نمایان است. همچنین ملاحظه می‌گردد که افزایش نسبت آب به سیمان، عیار سیمان و درصد مصرف



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹- تحلیل آماری داده های زمان روانی: الف) نمودار پارتو ب) نمودار اندرکنش ماتریسی ج) نمودار شدت اثر

### ۳-۳- مقاومت فشاری

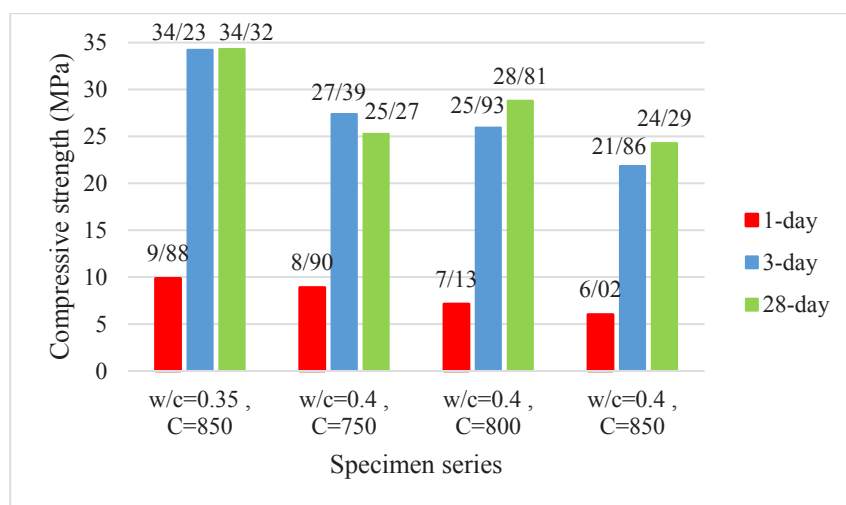
مقاومت فشاری ملات به عنوان عاملی بسیار تأثیرگذار در انتخاب و تحلیل بهترین طرح مخلوط ایفای نقش می کند. از نمونه های مکعبی ۵\*۵\*۵ سانتی متری مطابق با [۱۵] برای این آزمایش استفاده شده است که نتایج ارائه شده، میانگین سه نمونه در هر سن و هر طرح مخلوط می باشند. مقاومت فشاری نمونه های مکعبی از رابطه ی زیر قابل محاسبه است.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (۲)$$

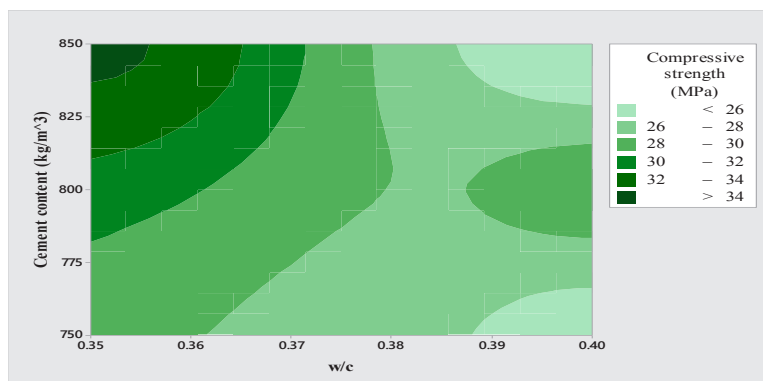
که در آن  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)،  $F$  نیروی وارده بر سطح نمونه (نیوتن) و  $A$  سطح بارگذاری نمونه (میلی متر مربع) است.

### ۳-۳-۱- نمونه های ملات مرجع

در نمونه های مرجع، در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ برای عیار سیمان ۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، اختلاط ملات عملاً امکان پذیر نبود که به همین دلیل از ارائه ی نتایج آن صرف نظر شده است. شکل ۱۰ نشان دهنده ی میزان مقاومت فشاری هر طرح مخلوط می باشد.



(الف)



(ب)

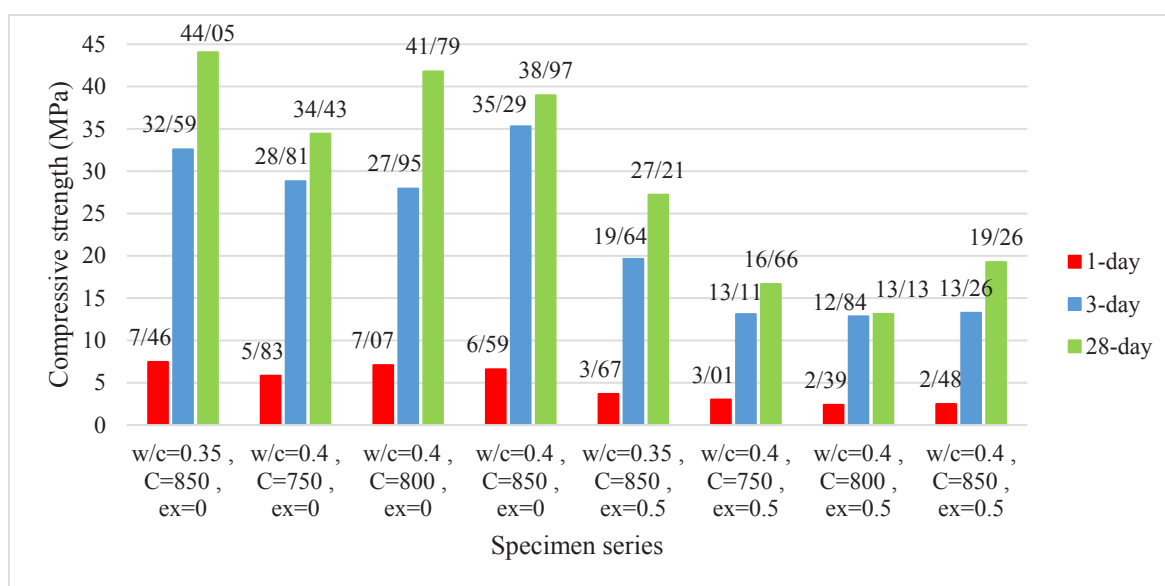
شکل ۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات مرجع: الف) مقادیر مقاومت فشاری در سه سن (ب) منحنی خط تراز در سن ۲۸ روزه

هستند زیرا این ماده به خوبی می‌تواند ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه را پر نماید و همگنی خوبی به ساختار کلی ملات بدهد. نمودارهای زیر، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ملات دارای میکروسیلیس به میزان ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان را برای هر طرح مخلوط نشان می‌دهد. شایان ذکر است که برای طرح مخلوط دارای ۵ درصد میکروسیلیس، در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و عیار سیمان ۷۵۰ و ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، اختلاط انجام شدنی نبود.

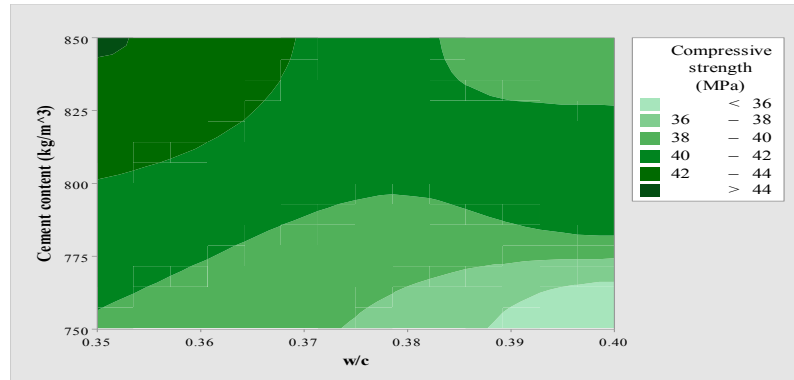
همانطور که از نتایج پیداست، ملات‌های مرجع در سن ۳ روزه، حداقل به ۸۰ درصد مقاومت نهایی خود دست پیدا می‌کنند. همچنین واضح است که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است و در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری بیشتر در عیار سیمان بیشتر و نسبت آب به سیمان کمتر اتفاق افتاده است.

### ۳-۳-۲- نمونه‌های دارای میکروسیلیس

نمونه‌های دارای میکروسیلیس به‌طور متوسط دارای مقاومت فشاری بیشتری از نمونه‌های بدون میکروسیلیس



(الف)

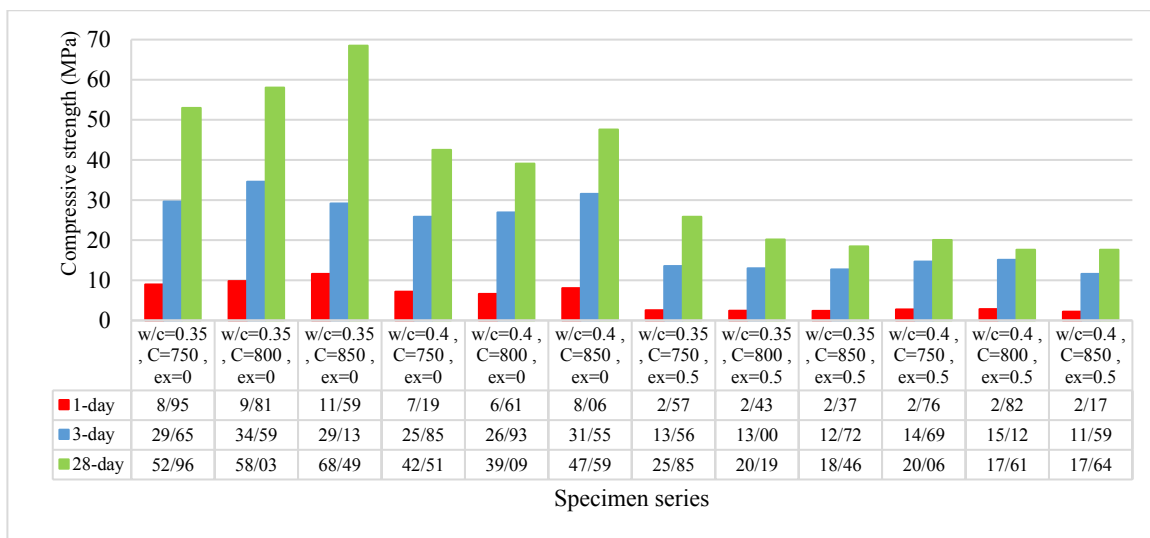


(ب)

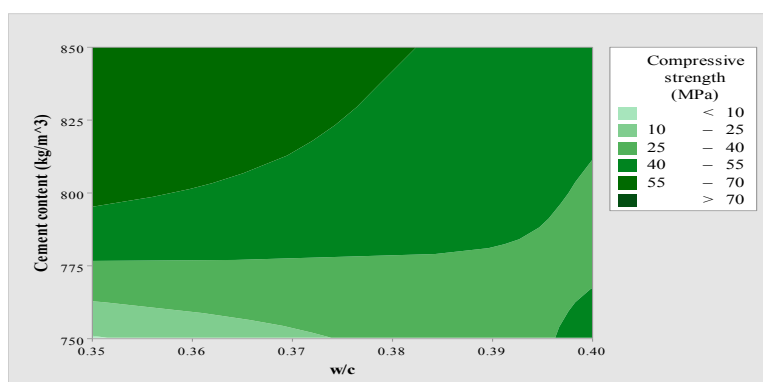
شکل ۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات دارای ۵ درصد میکروسیلیس: الف) مقادیر مقاومت فشاری در سه سن (ب) منحنی خط تراز در سن ۲۸ روزه بدون حضور منبسط کننده

عیار سیمان شده است. از منحنی خط تراز می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین مقاومت فشاری برای ۵ درصد میکروسیلیس، در نسبت‌های پایین آب به سیمان و عیارهای بالای سیمان اتفاق می‌افتد.

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان اشاره کرد که افزایش مقاومت فشاری از ۳ روز به ۲۸ روز، در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، بیشتر محسوس است. همچنین ملاحظه می‌گردد که منبسط‌کننده باعث کاهش شدید مقاومت فشاری در هر سن، نسبت آب به سیمان و



(الف)

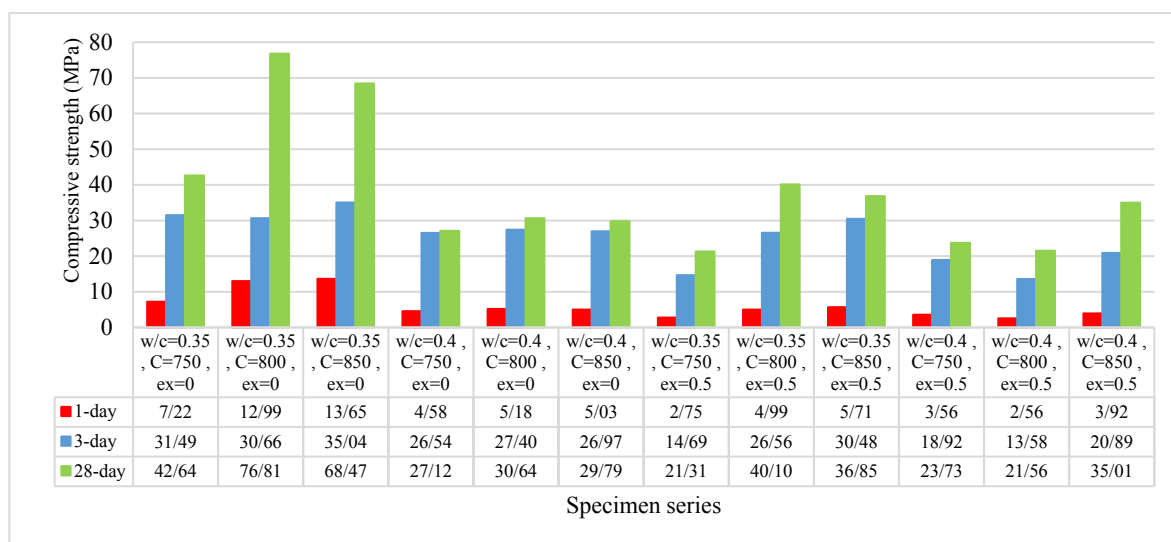


(ب)

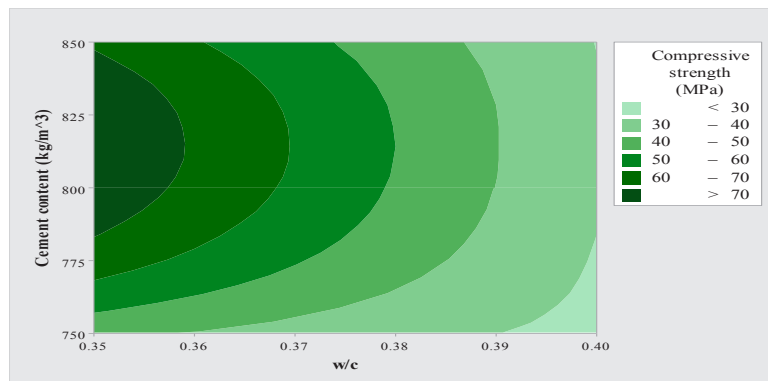
شکل ۱۲- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات دارای ۷/۵ درصد میکروسیلیس: الف) مقادیر مقاومت فشاری در سه سن ب) منحنی خط تراز در سن ۲۸ روزه بدون حضور منبسط کننده

همچنین ملاحظه می‌گردد که بیشترین مقاومت فشاری برای ۷/۵ درصد میکروسیلیس نیز در نسبت‌های پایین آب به سیمان و عیارهای بالای سیمان اتفاق می‌افتد.

مشابه روند قبل، در این درصد مصرف میکروسیلیس نیز ملاحظه می‌گردد که مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد منبسط کننده بین ۲ تا ۳ برابر بیشتر از طرح مشابه خود با منبسط کننده هستند که دلیل آن قبلاً تشریح شد.



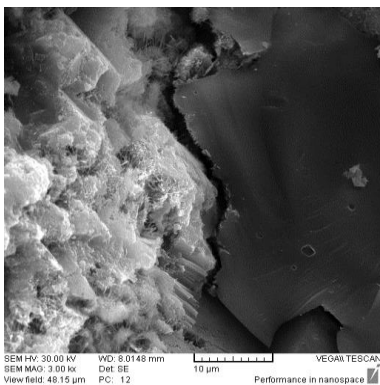
(الف)



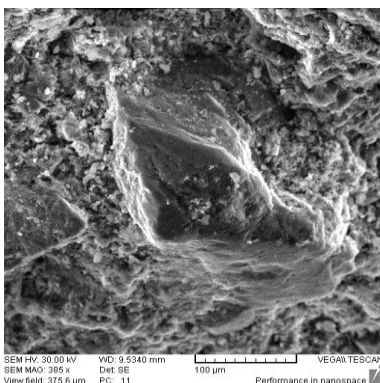
(ب)

شکل ۱۳- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس: الف) مقادیر مقاومت فشاری در سه سن (ب) منحنی خط تراز در سن ۲۸ روزه بدون حضور منبسط کننده

میکروسیلیس اضافه شده است، ملاحظه می‌گردد که همگنی فوق‌العاده‌ای در ساختار ملات اتفاق افتاده است و نواحی انتقال به خوبی پر شده‌اند. همین امر کمک می‌کند که مسیر گسیختگی از داخل سنگدانه عبور نماید و مقاومت فشاری بیشتری حاصل شود [۱۶].



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- تصویر SEM: الف) ملات مرجع (ب) ملات با طرح مخلوطی مشابه و دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس

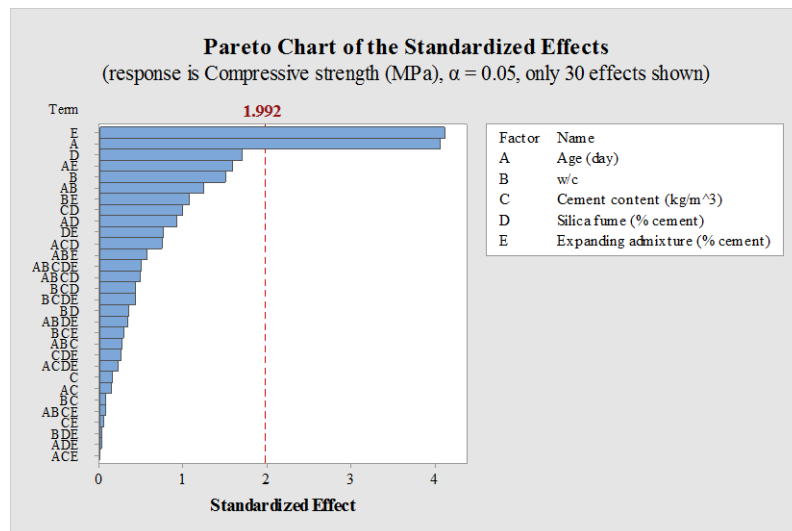
استفاده از میکروسیلیس به میزان بیشتر از ۱۰ درصد وزنی سیمان، خواص مکانیکی و دوامی بتن را بهبود نمی‌بخشد [۸]، به همین جهت در پروژه‌ی حاضر، بیشترین مقدار مصرف میکروسیلیس به ۱۰ درصد محدود شده است. همانطور که از شکل ۱۳ پیداست، بیشترین مقاومت فشاری ملات در طرح‌هایی با ۱۰ درصد میکروسیلیس اتفاق افتاده است و افزایش مقاومت فشاری از سن ۳ به ۲۸ روز در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ بیشتر از آن روند در نسبت آب به سیمان ۰/۴ می‌باشد. همچنین مشابه نمودارهای بالا، منبسط کننده موجب کاهش ناگهانی مقاومت فشاری در تمامی طرح‌ها شده است. از منحنی خط تراز می‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین عیار برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری، ۸۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ می‌باشد.

دلیل افزایش مقاومت فشاری در طرح‌های دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس به وضوح در شکل زیر مشخص است. همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، در طرح بدون میکروسیلیس، ناحیه‌ی انتقال بین خمیر و سنگدانه به وضوح دیده می‌شود که مسیر گسیختگی حین بارگذاری تمایل دارد از این ناحیه‌ی ضعیف عبور کند، اما در طرح مخلوطی مشابه که به آن ۱۰ درصد وزنی سیمان

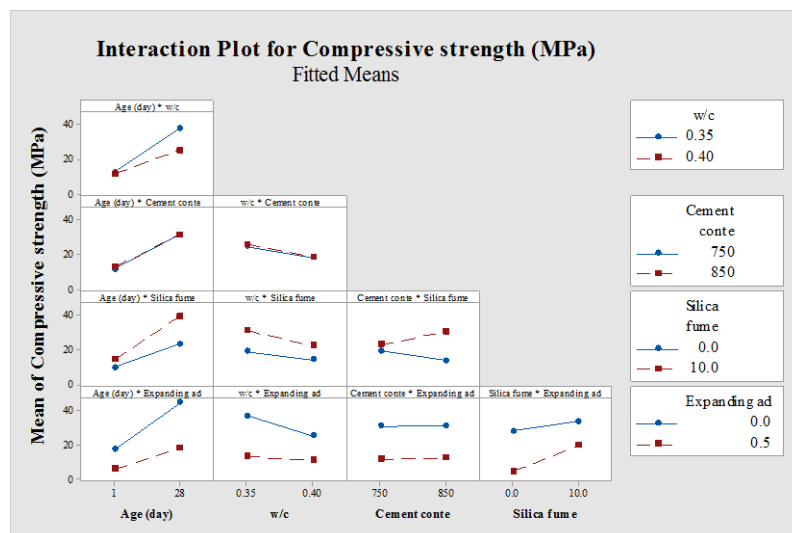
### ۳-۳-۳- تحلیل آماری

افزایش می‌یابد اما عیار سیمان اثر قابل توجهی روی آن ندارد. شدت تأثیر این متغیرها در نمودار شکل ۱۵ (ج) نمایان‌تر است، بطوریکه هرچی شیب بیشتر باشد بیانگر شدت تأثیر بیشتر آن متغیر بر روی مقاومت فشاری است. بدیهی است که شیب مثبت یا منفی به ترتیب نشان‌دهنده اثرگذاری مستقیم یا معکوس بر روی مقاومت فشاری است.

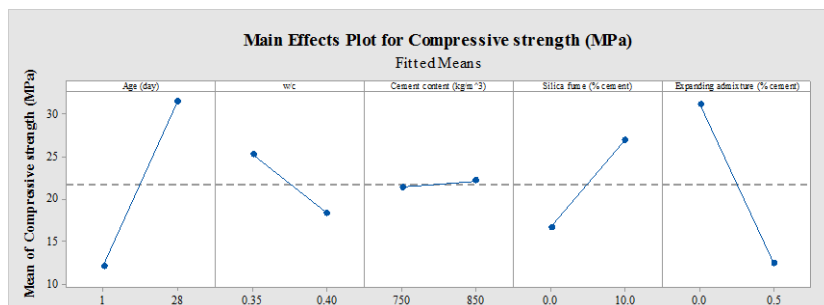
تحلیل آماری داده‌های مربوط به نمونه‌های فشاری در شکل‌های زیر ارائه شده است. همانطور که از شکل ۱۵ (الف) پیداست، مقاومت فشاری ارتباط زیادی با سن نمونه و میزان مصرف منبسط‌کننده دارد زیرا از مرز اثر استاندارد پیش‌روی نموده‌اند. شکل ۱۵ (ب) نشان‌گر آن است که مقاومت فشاری متوسط تمامی نمونه‌ها با افزایش سن، کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش میزان مصرف میکروسیلیس و کاهش میزان مصرف منبسط‌کننده،



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵- تحلیل آماری داده‌های مقاومت فشاری: الف) نمودار پارتو ب) نمودار اندرکنش ماتریسی ج) نمودار شدت اثر

$$f_f = \frac{MC}{l} = \frac{3Fl}{2bd^2} \quad (3)$$

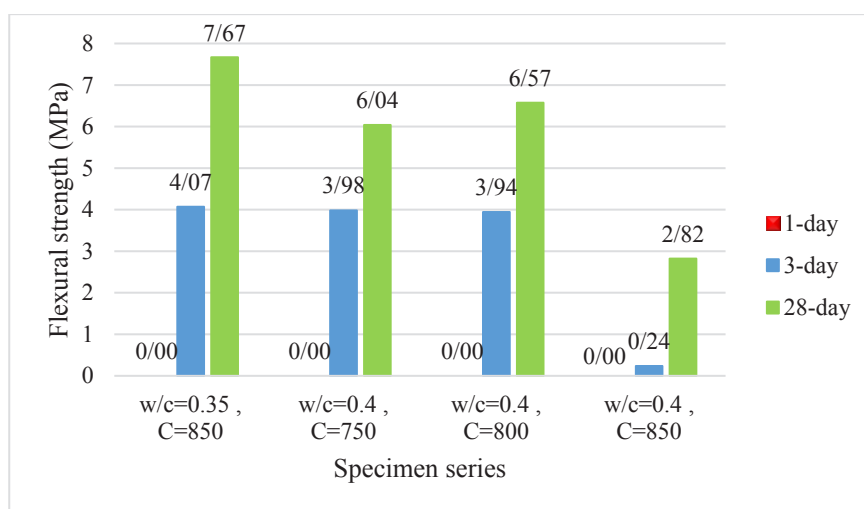
که در آن  $f_f$  مقاومت خمشی نمونه (مگاپاسکال)،  $F$  بار وارده بر وسط دهانه‌ی تیر (نیوتن)،  $l$  فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه (۱۰۰ میلی‌متر)،  $b$  و  $d$  به ترتیب عرض و ارتفاع مقطع (۴ میلی‌متر) می‌باشد.

### ۳-۴-۱- نمونه‌های ملات مرجع

نظیر نمونه‌های فشاری، نتایج مقاومت خمشی طرح‌های بدون میکروسیلیس و منبسط‌کننده در شکل ۱۶ ارائه شده است.

### ۳-۴-۲- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی می‌تواند تا حدی نشان‌دهنده‌ی مقاومت کششی ملات باشد. برای انجام این آزمایش، از نمونه‌های ۱۶\*۴\*۴ سانتی‌متری استفاده شده است که توسط استاندارد ASTM توصیه شده است [۱۷، ۱۸]. نتایج ارائه شده، میانگین سه نمونه در هر سن و هر طرح مخلوط می‌باشند. مقاومت خمشی سه نقطه‌ای این نمونه‌ها از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد.



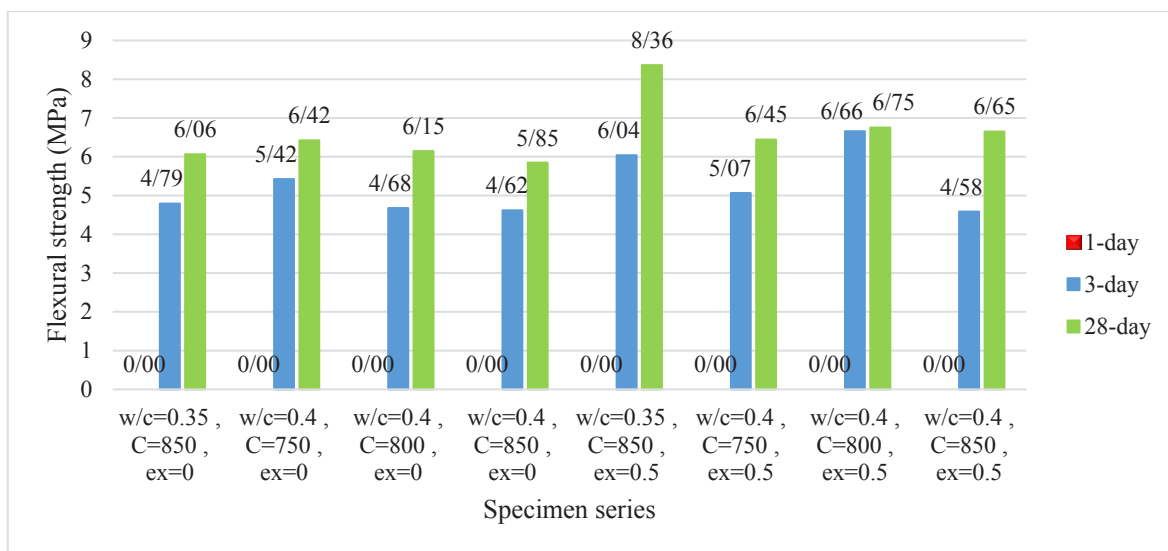
شکل ۱۶- مقاومت خمشی نمونه‌های مرجع



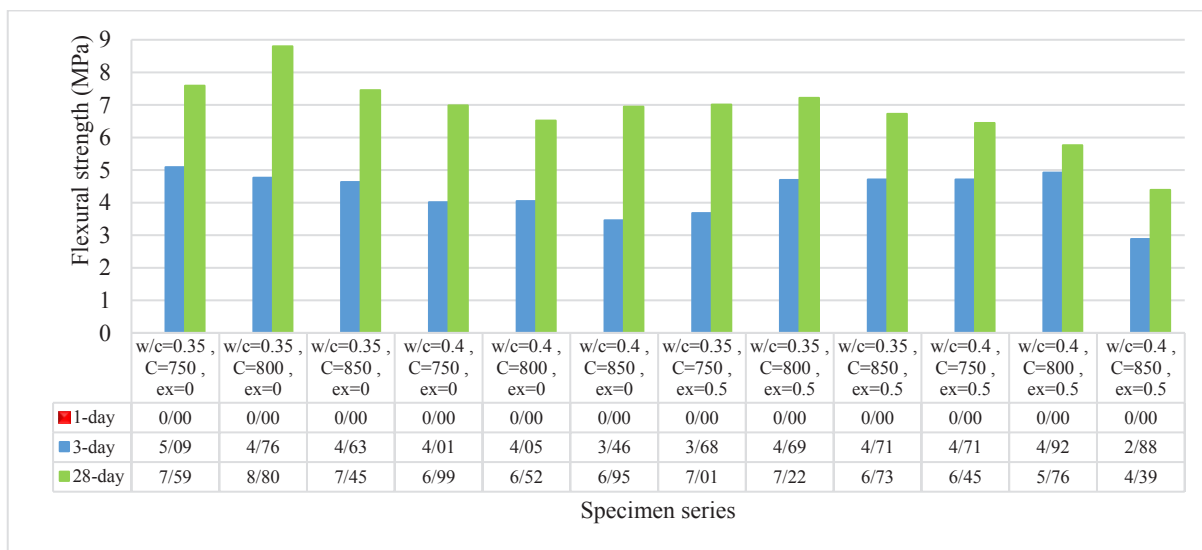
### ۳-۴-۲- نمونه‌های دارای میکروسیلیس

میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های مرجع می‌باشد. نتایج مربوط به آنها در شکل ۱۷ ارائه شده است.

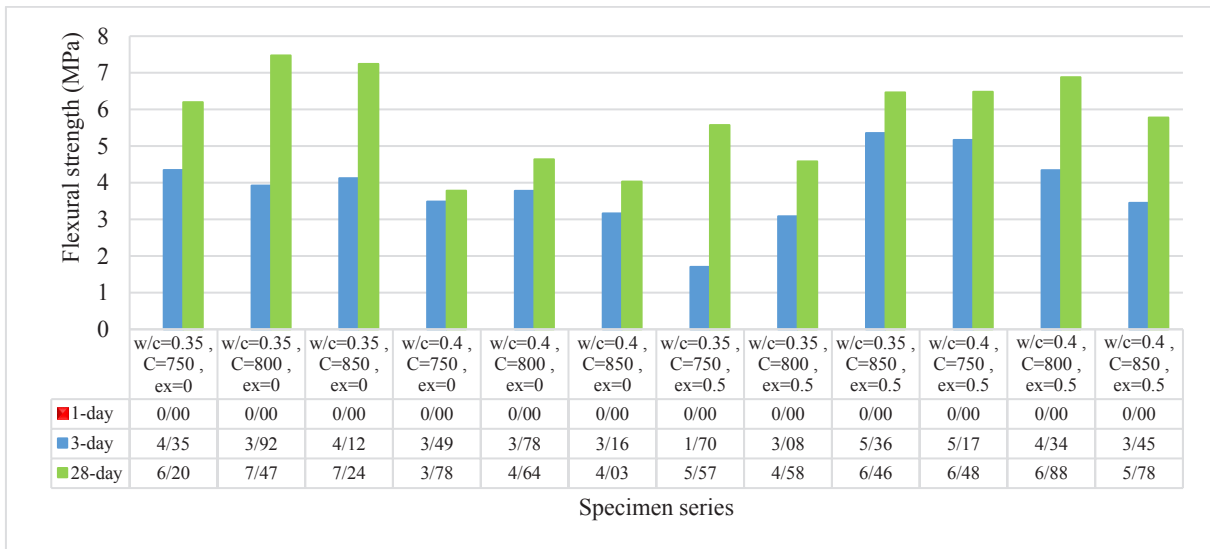
همانطور که انتظار می‌رفت، بیشترین مقاومت فشاری در نسبت آب به سیمان پایین‌تر اتفاق افتاده است. همچنین به‌علت اندک بودن مقاومت خمشی در سن ۱ روز، مقدار آن برای تمامی طرح‌ها برابر با صفر در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های دارای میکروسیلیس: الف) ۵ درصد ب) ۷/۵ درصد ج) ۱۰ درصد

۶۰ درصد مقاومت خمشی خود را در سه روز ابتدایی سن خود کسب می‌کنند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اثر نسبت آب به سیمان در افزایش مقاومت خمشی ملات در درصد‌های بالای میکروسیلیس محسوس است. به طریق دیگر می‌توان اذعان کرد که در یک نسبت آب به سیمان ثابت، مصرف میکروسیلیس تا ۵ درصد وزنی سیمان، افزایش مقاومت خمشی را به شکل قابل ملاحظه‌ای در پی نخواهد داشت. برای تحلیل دقیق‌تر رفتار خمشی نمونه‌های ملات، تحلیل آماری در بند بعد ارائه شده است.

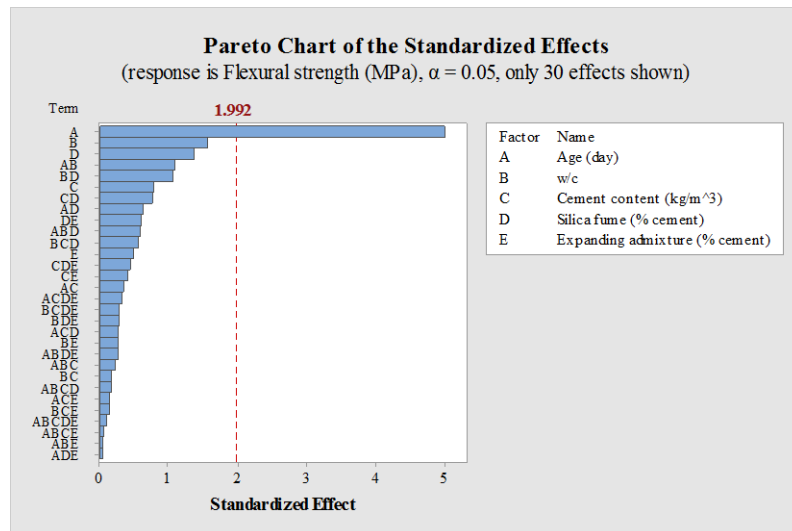
### ۳-۴-۳- تحلیل آماری

همانطور که از شکل ۱۸ الف) پیداست، سن نمونه‌های خمشی اثرگذارترین عامل در افزایش مقاومت آنها می‌باشد. بارزترین نتیجه از نمودار تحلیل ماتریسی این است که در روند کاهش مقاومت خمشی هنگام افزایش نسبت آب به سیمان، در نمونه‌های با عیار سیمان بالاتر و درصد میکروسیلیس کمتر، واضح‌تر دیده می‌شود. همچنین عیار سیمان عامل مهمی در تعیین مقاومت خمشی سیمان به شمار نمی‌رود. شدت اثر متغیرها در شکل ۱۸ ج) بیانگر تأثیر شدید مستقیم سن نمونه در افزایش مقاومت خمشی و همچنین تأثیر اندک افزایش درصد مصرف منبسط‌کننده

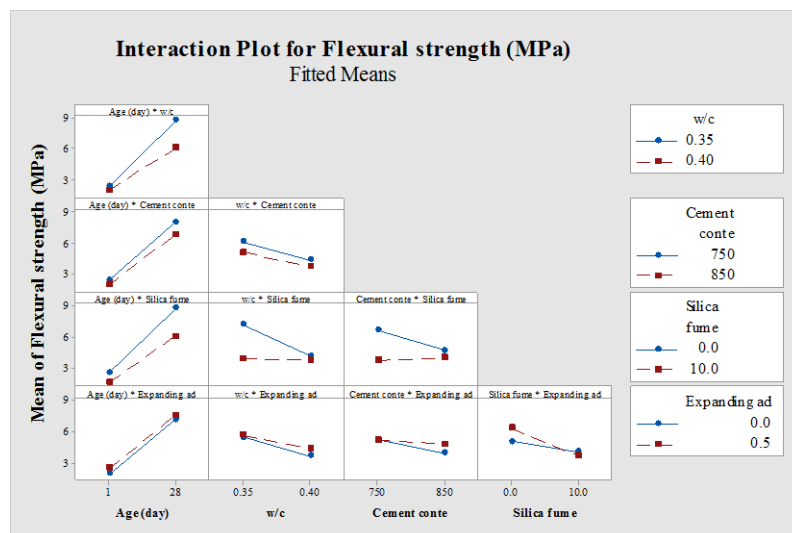
برعکس آنچه در مقاومت فشاری اتفاق افتاد، با افزایش درصد مصرف منبسط‌کننده، مقاومت خمشی یا دستخوش تغییرات نمی‌گردد یا گاه موجب افزایش مقاومت خمشی در مقایسه با طرح مخلوطی مشابه و بدون منبسط‌کننده می‌شود. دلیل این امر می‌تواند اثر تأمین چسبندگی در تار کششی ملات با افزایش منبسط‌کننده باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که با افزایش میکروسیلیس از ۵ به ۷/۵ درصد، مقاومت خمشی متوسط نمونه‌ها افزایش یافته است اما با افزایش آن به ۱۰ درصد، عملاً افزایش مقاومت خمشی ملاحظه نمی‌گردد. این بدان معناست که مقاومت خمشی هر طرح مخلوط تا اندازه‌ی معینی افزایش پیدا می‌کند که این اندازه قطعاً تابع نسبت آب به سیمان و بالطبع مقاومت فشاری آن طرح مخلوط است [۱۹]. از سوی دیگر می‌توان نتیجه گرفت که درصد بالای استفاده از میکروسیلیس در بهبود خاصیت کششی ملات بی‌تأثیر است. از شکل ۱۷ همچنین می‌توان نتیجه گرفت که عیار سیمان، تأثیر چندانی بر مقاومت خمشی ملات ندارد چرا که افزایش چسبندگی بیشتر، لزوماً دلیل بر افزایش مقاومت ملات در کشش نیست. همچنین بطور متوسط دیده می‌شود که ملات‌های دارای میکروسیلیس، حداقل

جای مشخصی، مقاومت خمشی را زیاد می‌کند و از آن به بعد، اثر معکوس روی این پارامتر دارد.

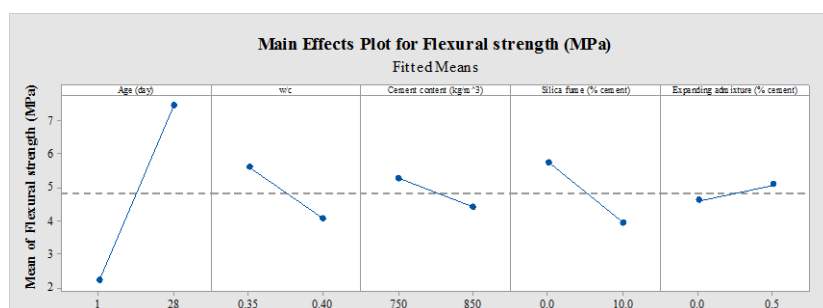
در افزایش آن می‌باشد. از این نمودار همچنین می‌توان برداشت کرد که در حالت کلی، عیار سیمان بالا موجب کاهش مقاومت خمشی می‌گردد یعنی این عامل تا یک



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۸- تحلیل آماری داده‌های مقاومت خمشی: (الف) نمودار پارتو (ب) نمودار اندرکنش ماتریسی (ج) نمودار شدت اثر

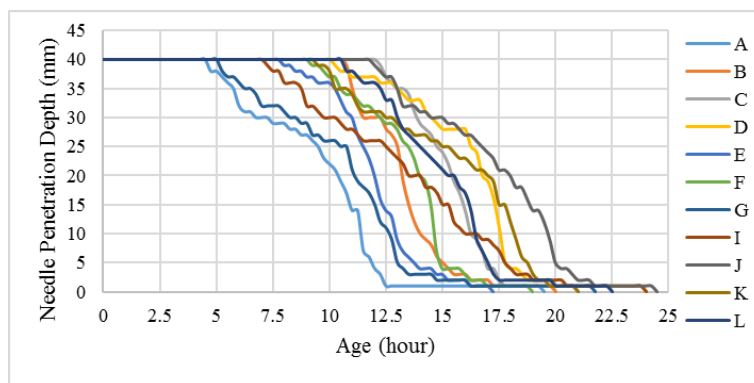
### ۳-۵- زمان گیرش

ساخت نمونه‌های بتنی نیز هستند زیرا از مطلوبیت لازم برای حداقل‌های عمل تزریق برخوردار می‌باشند. در تزریق ملات، باید طرحی انتخاب شود که اولاً سهولت لازم برای عمل تزریق را دارا باشد، یعنی از کارپذیری بالایی برخوردار باشد، ثانیاً بتواند مقاومت فشاری مطلوبی ارائه دهد. در غیر اینصورت، اندازه‌گیری زمان گیرش امری غیر علمی به‌نظر می‌رسد. اندازه‌گیری زمان گیرش می‌تواند چشم‌انداز خوبی از زمان مسدودی خط هنگام اجرای این نوع بتن را در اختیار محقق بگذارد. جدول ۵، طرح‌های مخلوط برتر و زمان گیرش نظیر هریک را نشان می‌دهد. همچنین منحنی عمق نفوذ سوزن در طول زمان نیز در شکل ۱۹ ارائه شده است.

به‌منظور سنجش زمان گیرش ملات، آزمایش سقوط سوزن ویکات<sup>۱</sup> توسط استاندارد ASTM C191 پیشنهاد شده است [۲۰، ۲۱]. برای انجام این آزمایش، ملات داخل ظرف آزمایش ریخته می‌شود و ارتفاع سقوط سوزن هر ۱۵ دقیق قرائت می‌گردد. زمان سپری شده برای نفوذ سوزن به مقدار ۲۵ میلی‌متر به‌عنوان زمان گیرش اولیه شناخته می‌شود و زمانی که در آن، سوزن داخل ملات فرو نمی‌رود به‌عنوان زمان گیرش نهایی شناخته می‌شود. پیش از انجام آزمایش زمان گیرش، لازم است برای صرفه-جویی در وقت و هزینه، ابتدا طرح‌های مخلوطی که دارای بیشترین مقاومت فشاری و کمترین زمان روانی هستند انتخاب شوند. این طرح‌ها به‌طور قطع طرح‌های برتر برای

جدول ۵- طرح‌های مخلوط برتر

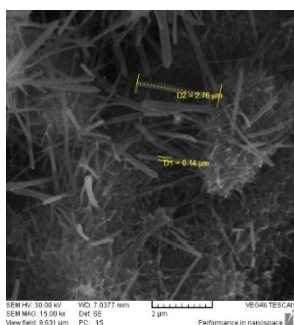
زمان گیرش (hh:mm)		طرح مخلوط				کد
نهایی	اولیه	Ex	SF	C	w/c	
۱۹:۳۰	۹:۳۰	Ex=0	SF=7.5%	C=800	w/c=0.35	A
۲۰	۱۳	Ex=0	SF=7.5%	C=850	w/c=0.35	B
۲۱	۱۴:۴۵	Ex=0	SF=10%	C=800	w/c=0.4	C
۲۴	۱۶:۱۵	Ex=0	SF=10%	C=850	w/c=0.4	D
۱۷:۱۵	۱۱:۳۰	Ex=0	SF=10%	C=800	w/c=0.35	E
۱۹	۱۳:۳۰	Ex=0	SF=10%	C=850	w/c=0.35	F
۲۱:۴۵	۱۰:۳۰	Ex=0.5	SF=7.5%	C=800	w/c=0.35	G
۲۳	۱۱:۳۰	Ex=0.5	SF=7.5%	C=850	w/c=0.35	H
۲۴	۱۲:۳۰	Ex=0.5	SF=10%	C=800	w/c=0.4	I
۲۴:۳۰	۱۶:۴۵	Ex=0.5	SF=10%	C=850	w/c=0.4	J
۲۱	۱۵	Ex=0.5	SF=10%	C=800	w/c=0.35	K
۲۲:۳۰	۱۴	Ex=0.5	SF=10%	C=850	w/c=0.35	L



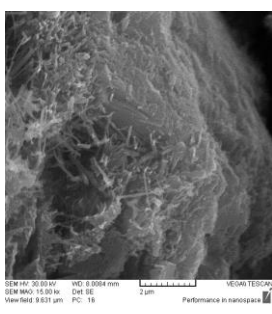
شکل ۱۹- منحنی عمق نفوذ سوزن در طول زمان برای طرح‌های مخلوط برتر

### ۳-۶- یافته‌های ریزساختاری

ذرات  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  که به شکل شش‌ضلعی منتظم بوده و ذرات اترینگایت که دارای شکل سوزنی به طول حدود  $2/8$  و قطر  $0/15$  میکرومتر هستند در شکل ۲۰ زیر به تصویر کشیده شده‌اند. با تحلیل تصاویر SEM این نتیجه حاصل شد که تجمع اترینگایت ثانویه و  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  در ناحیه‌ی انتقال بین خمیر و سنگدانه بیشتر از سایر نواحی است [۲۲]. همچنین نمونه‌هایی که دارای عیار سیمان بالاتری هستند، به‌طور متوسط میزان اترینگایت و  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  تولید شده در نواحی انتقال آنها بیشتر است [۱۶]. بطور کلی با تحلیل تصاویر SEM مشخص گردید که ژل C-S-H حدود ۷۰ درصد کل حجم ملات را تشکیل می‌دهد.



(ب)



(الف)

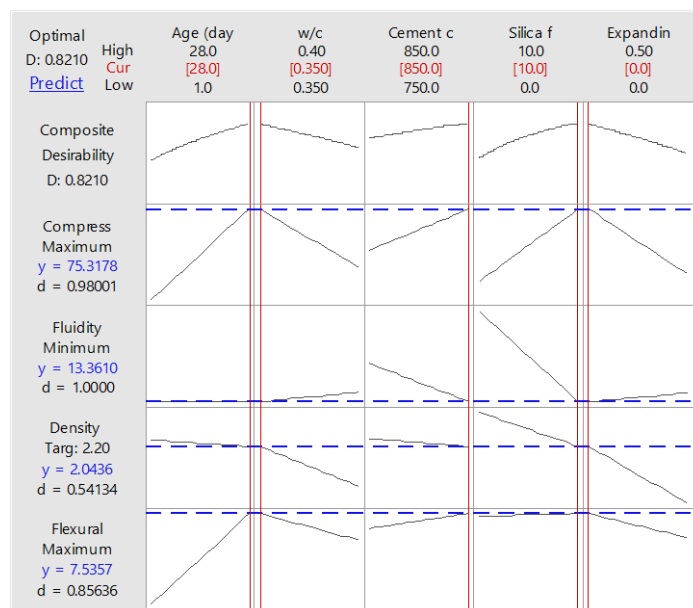
شکل ۲۰- تصاویر SEM در مقیاس ۲ میکرومتر: (الف) کلسیم هیدروکسید (ب) ذرات اترینگایت

همانطور که ملاحظه می‌شود، طرح‌های مخلوطی که دارای نسبت آب به سیمان بالاتری هستند، زمان گیرش بیشتری را نسبت به دیگر طرح‌های مخلوط به خود اختصاص می‌دهند زیرا آب اولیه‌ی موجود در حجم ملات زیاد بوده و ساختار ملات از ویسکوزیته‌ی کمتری برخوردار است، لذا زمان بیشتری طول می‌کشد تا به گیرش خود برسد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که زمان گیرش در طرح‌های با عیار سیمان بالاتر نسبت به طرح‌های مشابه و با عیار سیمان کمتر همواره به تعویق می‌افتد. دلیل این امر را می‌توان جایگزینی سیمان افزوده شده با ماسه که عامل بازدارنده‌ی نفوذ سوزن است، دانست. افزایش عیار سیمان با کاهش ماسه‌ی ملات همراه است تا مجموع حجم‌ها در رابطه‌ی حجم مطلق برابر واحد گردد. هرچه ماسه کمتر باشد، سوزن با اصطکاک کمتری روبرو می‌شود، لذا راحت‌تر نفوذ کرده و بالطبع زمان گیرش به تعویق می‌افتد. طرح‌های مخلوط دارای منبسط‌کننده زمان گیرش بیشتری نسبت به طرح‌های فاقد این افزودنی دارند زیرا این ماده موجب افزایش حجم ملات در واحد وزن آن با سازوکار متخلخل کردن ملات می‌گردد. این یعنی سوزن به راحتی قادر است از داخل حفرات ایجاد شده بدون عامل اصطکاکی بازدارنده عبود نماید و زمان گیرش را طولانی‌تر کند.

### ۳-۷- طرح مخلوط بهینه

با تحلیل حساسیت چندعاملی تمامی متغیرها بر روی تمامی ملات‌های ساخته شده با هدف دستیابی به طرح مخلوط بهینه برای رسیدن به حداکثر مقادیر مقاومت فشاری و خمشی، حداقل زمان روانی و وزن مخصوص برابر ۲/۲ تن بر مترمکعب به‌عنوان یک وزن مخصوص متعارف [۱۹]، نرم‌افزار Minitab گراف شکل ۲۱ را ارائه داد که در آن اعداد قرمز رنگ مبین مقادیر بهینه‌ی متغیرها هستند. همچنین فاکتور مطلوبیت<sup>۱</sup> (d) که برای تمامی پارامترهای

هدف محاسبه شده است، هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد معرف آن است که برای رسیدن به آن هدف، طرح مخلوط بهینه‌ی پیشنهاد شده تا چه حد مطلوب می‌باشد. این تحلیل حساسیت طوری انجام شده است که متغیرهای طرح مخلوط در بازه‌ای پیوسته در نظر گرفته شوند و نرم-افزار به انتخاب مقادیر بهینه بپردازد. ملاحظه می‌گردد که فاکتور مطلوبیت کلی (D) برابر با ۰/۸۲ بدست آمده است که گویای صحت طرح مخلوط پیشنهادی برای رسیدن به مقادیر هدف ارائه شده با دقت بالا می‌باشد.



شکل ۲۱- بهینه‌یابی چندعاملی

به‌منظور استفاده‌ی محققین از مقادیر دیگر عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و درصد مصرف میکروسیلیس برای تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات، رابطه‌ی زیر با دقت رگرسیونی ۸۴ درصد پیشنهاد می‌گردد.

$$f_c = \frac{12.77 \left(\frac{W}{C}\right)^{-24.8} e^{0.19SF}}{C^4 + 37.1} \quad (4)$$

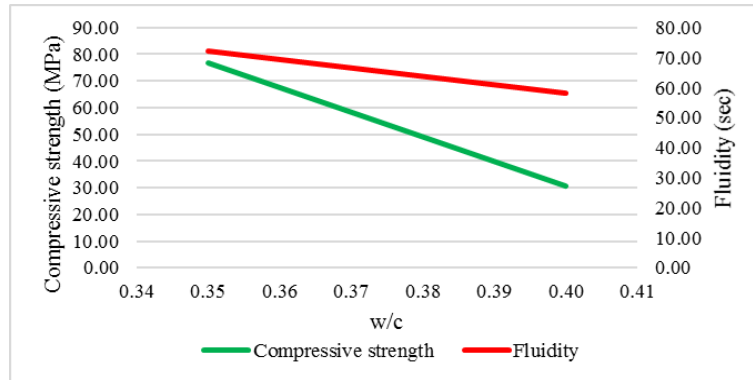
که در آن  $f_c$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات (مگاپاسکال)،  $w/c$  نسبت آب به سیمان، SF میزان میکروسیلیس مصرفی (درصد وزنی سیمان) و C عیار سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب) می‌باشد.

از سوی دیگر با رسم داده‌های نظیر مقاومت فشاری و روانی در مقابل یکدیگر، این نتیجه گرفته می‌شود که طرح مخلوط بهینه برای ملات، آن طرحی است که در عین دارا

<sup>1</sup> Desirability Factor

نسبت آب به سیمان بهینه انجام گرفته است. مشاهده می-شود که با این روش نیز، عدد ۰/۳۵ به عنوان نسبت آب به سیمان بهینه برای ملات بدست می-آید. بدیهی است که با محاسبه مقدار سایر متغیرهای ملات از طریق رابطه‌ی حجم مطلق، می‌توان به طرح مخلوط کلی دست یافت.

بودن بیشترین مقاومت فشاری، کمترین زمان روانی را به خود اختصاص دهد. به بیان دیگر هرگاه منحنی این دو با یکدیگر برخورد داشته و یا گرایش به یک نقطه داشته باشند، عدد نظیر محور افقی آن نقطه را می‌توان به عنوان عدد بهینه دانست. این روند در شکل ۲۲ برای تعیین



شکل ۲۲- بهینه‌یابی تقاطعی نسبت آب به سیمان

## نتایج

- زمان روانی ملات تابع نسبت آب به سیمان، عیار سیمان و میزان مصرف فوق‌روان‌کننده می‌باشد. در طرح مخلوط-های دارای میکروسیلیس به‌علت امکان استفاده از فوق-روان‌کننده‌ی بیشتر نسبت به نمونه‌های مرجع، زمان روانی کاهش و بالطبع تزریق‌پذیری ملات افزایش می‌یابد. ناگفته نماند که طرح‌های با نسبت آب به سیمان بالا و همچنین عیار سیمان بالا، دارای زمان روانی کمتری هستند؛
- مقاومت فشاری ملات با کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش درصد مصرف میکروسیلیس و کاهش درصد مصرف منبسط‌کننده، افزایش می‌یابد. تحلیل آماری در این زمینه نشان داد که عیار سیمان اثر چندانی بر روی مقاومت فشاری نمی‌گذارد. بدیهی است که هرچه از سن نمونه می‌گذرد، واکنش هیدراته شدن آب و سیمان کامل‌تر شده و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بالاترین مقاومت فشاری ملات برای طرح مخلوطی با

- در این پژوهش، مهم‌ترین دستاوردهای آزمایشگاهی در خصوص ملات و بتن پیش‌آکنده‌ی بالاستی به شرح زیر است.
- بر اساس مصالح به‌کار رفته، حداکثر میزان مصرف منبسط‌کننده برابر با ۰/۵ درصد وزنی سیمان می‌باشد زیرا مقادیر بالاتر از این عدد، موجب تجاوز بعد نمونه از میزان مجاز خود می‌گردد. به‌طور کلی افزودن این ماده موجب کاهش شدید مقاومت فشاری ملات در تمامی طرح‌های مخلوط می‌گردد؛
- هرچه میزان مصرف میکروسیلیس بیشتر باشد، این امکان وجود دارد تا میزان فوق‌روان‌کننده‌ی بیشتری در ملات اضافه گردد تا به روانی مطلوب برسد زیرا میکروسیلیس به‌علت خاصیت ذاتی خود در جذب آب، موجب کنترل آب‌انداختگی و ته‌نشینی ملات در درصدهای بالای مصرف فوق‌روان‌کننده می‌گردد؛

فشاری قابل قبول برای تحمل بار راه آهن، یک روز می- باشد؛

- در ابعاد میکرون، مشاهدات حاکی از آن است که تجمع اترینگایت ثانویه و کلسیم هیدروکسید در نواحی انتقال بین خمیر و سنگدانه بیشتر از سایر نواحی است؛
- برای مطالعات وسیع تر، رابطه‌ای برای تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ملات برحسب متغیرهای نسبت آب به سیمان، عیار سیمان و درصد مصرف میکروسیلیس استخراج شده است. همچنین با تحلیل حساسیت چندعاملی همزمان، طرح مخلوط بهینه‌ی ملات برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری و خمشی، حداقل زمان روانی و وزن مخصوص برابر با ۲/۲ توسط نرم افزار Minitab برابر با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، عیار سیمان ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مصرف میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان و عدم مصرف منبسط کننده پیشنهاد شده است.

نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و میکروسیلیس ۱۰ درصد با عیار سیمان ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ثبت شد؛

- رفتار خمشی نمونه‌های ملات نیز مانند نمونه‌های فشاری است بجز در مورد مصرف منبسط کننده که هرچه میزان مصرف این ماده افزایش پیدا می کند، کاهش چشمگیری در مقاومت خمشی اتفاق نمی افتد و چه بسا مقاومت خمشی افزایش می یابد. دلیل این امر را می توان خاصیت تقویتی منبسط کننده در ناحیه‌ی کششی نمونه‌ها عنوان کرد. نمونه‌های یک روزه برای تمامی طرح‌های مخلوط، فاقد مقاومت خمشی هستند؛
- زمان گیرش نمونه‌های ملات در این پژوهش بیشتر از ملات سیمان معمولی است. دلیل آن را می توان استفاده‌ی بالای عیار سیمان و همچنین بهره‌گیری از فوق روان کننده دانست. از نتایج زمان گیرش می توان دریافت که حداقل زمان لازم برای مسدودی خط برای رسیدن به مقاومت

## منابع

- [۱] H. S. Abdelgader and A. Elgalhud, "Effect of grout proportions on strength of two-stage concrete," *Structural concrete*, 2008.
- [۲] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds," ed. United States, 2015.
- [۳] ASTM, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ed. United States, 2011.
- [۴] ASTM C150, "Standard Specification for Portland Cement," ed. United States, 2015.
- [۵] J. Gorski and H. S. Abdelgader, "Effect of admixtures on fresh grout and two-stage (pre-placed aggregate) concrete," *Structural Concrete*, January 2007, 2007.
- [۶] ACI 304 1.R, "Guide for the Use of Pre Placed Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications," ed. American Concrete Institute, 1997.
- [۷] ASTM D1193, "Standard Specification for Reagent Water," ed. United States, 2011.
- [۸] ACI 234R, "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete," ed. United States, 2006.
- [۹] ASTM C1240, "Standard Specification for Silica Fume in Cementitious Mixtures," ed. United States, 2015.
- [۱۰] ASTM C183, "Standard Practice for Sampling and Amount of Testing of Hydraulic Cement," ed. United States, 2016.
- [۱۱] ASTM C305, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", ed. United States, 2014.
- [۱۲] ASTM C511, "Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes," ed. United States, 2013.



- [١٣] ASTM C1090, "Standard Test Method for Measuring Changes in Height of Cylindrical Specimens of Hydraulic-cement Grout," ed. United States, 2015.
- [١٤] ASTM C939, "Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)," ed. United States, 2016.
- [١٥] ASTM C109, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars," ed. United States, 2013.
- [١٦] A. A. Ramezani pour, *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*. London: Springer, 2014.
- [١٧] ASTM C78, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," ed. United States, ASTM.
- [١٨] ASTM C348, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars," ed. United States, 2014.
- [١٩] A. M. Neville, *Properties of Concrete PDF eBook: PoC PDF eBook\_o5*. Pearson Education, 2012.
- [٢٠] ASTM C953, "Standard Test Method for Time of Setting of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory," ed. United States, 2010.
- [٢١] ASTM C191, "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle," ed. United States, 2013.
- [٢٢] P. K. Mehta and D. J. M. Monteiro, *Concrete (Microstructure, Properties, and Materials) (Advanced Concrete Technology)*. California, 2004.

## پایش آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی بتن



مهدی چینی

استادیار مرکز تحقیقات وزارت راه، مسکن و شهرسازی  
عضو هیات مدیره انجمن بتن ایران



علی اکبر کفاش بازاری

رئیس مرکز تحقیق و توسعه مجتمع صنعتی سیمان تهران  
عضو انجمن بتن ایران

### چکیده

روش‌های رایج کنترل گیرش، سخت‌شدگی، روند کسب مقاومت بتن، آزمایش‌های تعیین زمان گیرش ملات ISIRI 392 و بتن ISIRI 6046 و تعیین مقاومت فشاری بتن ISIRI 3206 می‌باشد. با توجه به اینکه این روش‌های فیزیکی و مکانیکی با چارچوب عملی معین و قراردادی، بطور کامل رفتار بتن و روند تغییرات حالات فازها طی فرآیند هیدراته شدن را نمایش نمی‌دهد و همچنین زمان‌بر و هزینه‌بر هستند، استفاده از روش مقاومت الکتریکی بتن، امکان این پایش را میسر کرده است. از این‌رو در این مطالعه با طراحی یک عملیات آزمایشگاهی گسترده، رفتار الکتریکی بتن مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول ۱۱ نمونه سیمان تهیه شدند که مقادیر فازهای آنها تنوع داشتند، اما به واسطه سیمان‌سازی آزمایشگاهی، نرمی و دانه‌بندی آنها شرایط تقریباً یکسانی داشت. آنالیز فیزیکی و شیمیائی نمونه‌های سیمان صورت گرفت. در مرحله بعد ۲۲ مخلوط بتنی با ۱۱ نمونه سیمان تهیه گردید، بطوریکه ۱۱ مخلوط با عنوان شاهد (فاقد افزودنی) و ۱۱ مخلوط با مقدار ثابت افزودنی فوق روان کننده (بر پایه پلی کربوکسیلات) بودند. بر روی مخلوط‌های بتنی آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. همچنین آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی انجام شد که از زمان تماس سیمان با آب تا ۳۱ روز بعد بطور مرتب قرائت‌ها صورت گرفت. نتایج حاصله، نشان داد که حداقل سه پیک ۸، ۱۶ و ۲۳ روز در منحنی مقاومت الکتریکی طی مرور زمان آزمایش دیده می‌شود. تقریباً در همه نمونه‌ها مقاومت الکتریکی تا حدود ۳ ساعت کاهش یافته است که زمان گیرش بتن را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این مطالعه، روابطی ارائه شد. واژه‌های کلیدی: مقاومت الکتریکی، سیمان، بتن، افزودنی.

### مقدمه

مشخصات عملکرد ذکر شده است. روش‌های الکتروشیمیایی شامل اندازه‌گیری رسانایی و مقاومت آن به عنوان روش‌هایی برای ارزیابی خواص انتقالی و همچنین تغییرات در محلول‌های منافذ و ریزساختارها در مواد پایه

پایش‌های مقاومت الکتریکی بتن با هدف ارائه اطلاعات سریع‌تر و آسان‌تر توسعه یافته‌اند. برخی از این روش‌ها استاندارد شده‌اند و حداکثر مقادیر نتایج آزمون در

سیمانی پیشنهاد شده‌اند [۱-۲]. این روش‌ها علاوه بر سرعت زیاد، اجازه ادامه آزمایش همان آزمون را حین کار و بدون ایجاد اختلال در آن را به ما می‌دهد. استفاده از روش مقاومت الکتریکی توسط محقق ژاپنی شیمیزو (۱۹۲۸) آغاز شد که سیمان پرتلند را با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آن مورد مطالعه قرار داد [۳]. این روش در علم بتن مدرن برای تعیین میزان آب در بتن [۴] نسبت آب به سیمان [۵]، تحقیق در مراحل اولیه گیرش خمیر سیمان و سفت شدن ملات [۶-۱۰]، تعیین زمان گیرش خمیر سیمان و بتن [۱۰-۱۴]، تحقیق و ارزیابی خواص ساختاری مختلف بتن‌ها از جمله ویژگی‌های نفوذپذیری آنها [۱۹-۱۵] و بررسی الگوهای مقاوم‌سازی [۲۰-۲۳] توسعه یافته است. مطالعات مونفور (۱۹۷۰) نیز در مورد خصوصیات الکتریکی بتن، به دو صورت  $DC^1$  و  $AC^2$  جهت بررسی تاثیر عمل‌آوری بتن بر مقاومت الکتریکی بتن بوده است [۲۴].

مایکل و همکاران (۲۰۰۶) مخلوط‌های بتنی مختلف با کارایی زیاد ( $HPC^3$ )، نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ حاوی، میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره و نیز مخلوط بتنی معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۶۹ و سیمان پرتلند تهیه نمودند. آنها آزمون‌ها را در سه حالت اشباع، خشک و اشباع با سطح خشک (SSD) با نوار الکتریکی وینیل بسته‌بندی کردند. آزمون‌ها طی ۷ روز اول در دستگاه آزمایش استاندارد تعیین مقاومت الکتریکی بتن در برابر نفوذ یون کلرید (ASTM C1202) نگهداری شدند [۲۵] و سپس در اندازه‌گیری‌های بعدی در آب اشباع از آهک عمل‌آوری شدند. آزمایش دو آزمون مشابه در سنین مختلف ادامه

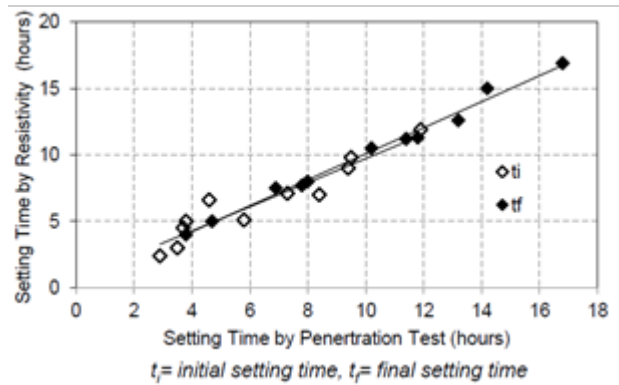
داشت. هدایت الکتریکی با استفاده از تجهیزات این آزمایش اندازه‌گیری شد، اما چندین انحراف از روش آزمون استاندارد وجود داشته است. با توجه به رسانایی زیاد در سنین اولیه و حداکثر جریان مجاز ۵۰۰ میلی آمپر برای تجهیزات مورد استفاده، ۳۰ ولت به جای ۶۰ ولت معمول استفاده شد. محلول هیدروکسید سدیم ۰/۳ نرمال در هر دو محفظه آزمایش مصرف شده بود. این محققان یک روش خودکار برای جمع‌آوری داده‌ها در فواصل ۳ ساعته طی هفته اول و سپس در فواصل هفتگی تا رسیدن آزمون‌ها به سن ۲۸ روز استفاده کردند. در هر بازه آزمایش، ۳۰ ولت قبل از ثبت اندازه‌گیری مورد استفاده برای محاسبه رسانایی و ۱۵ دقیقه روی آزمون‌ها اعمال شده است. روش خودکار به کاربر اجازه می‌دهد که طی مدت زمان استفاده از ولتاژ مدنظر برای هر آزمایش، فاصله زمانی بین چرخه‌ها، تعداد چرخه‌ها و تعداد آزمون‌ها اعمال شود. در این مطالعه، تفاوت معنی‌داری میان اندازه‌گیری‌های انجام شده در ۵ و ۱۵ دقیقه وجود نداشته است. تاثیرات نسبت  $w/c$  و مواد مکمل سیمانی به وضوح در نتایج این مطالعه دیده شده است. بیشترین کاهش هدایت در هفته اول پس از عمل‌آوری رخ داده است. آنها با توجه به نتایج رابطه‌ای ارائه نمودند [۲۶].

لی و همکاران (۲۰۰۷) نتایج دو آزمایش زمان گیرش اولیه و نهائی بتن تازه [۲۷] و تعیین مقاومت الکتریکی بتن را با هم مقایسه کردند که نشان داد ارتباط مستقیم و واضحی دارد (شکل ۱) [۲۸-۲۹].

1- Direct current (DC)

2- Alternating current (AC)

3- High-performance concrete (HPC)



شکل ۱: ارتباط زمان گیرش بتن و مقاومت الکتریکی آن [۲۸]

الکتریکی مطالعه نمودند. سپس نقش دمای آزمون و اهمیت عمل‌آوری (میزان هیدراته شدن و میزان اشباع) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که هر دو مقاومت محلول منافذ و اندازه‌گیری مقاومت آزمون از رابطه آرنیوس با انرژی فعال‌سازی مختلف هدایت (EA-Cond) پیروی می‌کند. همچنین آنها مشاهده کردند که وقتی آزمون‌های سخت شده در محلول‌های مختلف با حجم‌های مختلف عمل‌آوری می‌شوند، نتایج ناسازگار به دست می‌آید که به زعم آنها مربوط به رقیق شدن محلول منافذ است و به نظر می‌رسد که طیف فرکانس اندازه‌گیری شده را تغییر می‌دهد. به این ترتیب، آزمایش در فرکانس‌های متغیر، توانایی کاهش این اثرات را دارد، اما برای آزمایش در فرکانس ثابت حجم محلول اطراف آزمون باید به شدت کنترل شود [۳۱].

لیاسی و همکاران (۲۰۱۵) اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به دو روش تک محوره و ونر ارزیابی نمودند. بر این اساس، در حالی که روش تک‌محوری برای آزمون‌های بتنی یا مغزه‌های حفاری شده مناسب است، روش ونر انتخاب بهتری برای ارزیابی در محل است. رابطه غیرخطی بین مقاومت الکتریکی و مقادیر  $RCP^1$  تا حد زیادی نتیجه تغییرات در دما و خواص محلول منافذ در طول آزمایش  $RCP$  می‌باشد. رابطه بین مقاومت الکتریکی و ضریب نفوذ برای تعیین معیارهای مورد نیاز برای کنترل کیفیت بتن بر اساس دوام به ویژه معیارهای مورد نیاز برای طبقه بندی نفوذپذیری کلرید بتن مناسب تر است [۳۲].

سنگول و جرو (۲۰۰۷) مقاومت الکتریکی برای کنترل کیفیت بتن حین ساخت و دوام آن را مطالعه نمودند. برنامه آزمایشگاهی این محققان عمدتاً بر اساس آزمایش الکتروود (ونر) مقاومت الکتریکی با فواصل پراب‌های مختلف و هندسه متفاوت آزمون‌ها بود. نتایج آنها نشان داد که برای شرایط آزمایش‌ها، مقاومت الکتریکی حاصل از روش ونر متفاوت از مقاومت کسب شده در روش دو الکتروود است. لذا نتیجه گرفتند که برای نوع خاصی از آزمون بتن با شرایط رطوبت و دما، روش ونر، یک روش آزمایشی مناسب و قابل اطمینان برای کنترل کیفیت مقاومت الکتریکی بر اساس عملکرد و در نتیجه دوام بتن است [۳۰].

اسپرگ و همکاران (۲۰۱۲) عوامل موثر بر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در سیستم‌های سیمانی را بررسی نمودند. به زعم آنها چندین عامل کلیدی وجود دارد که می‌توانند نتایج مقاومت الکتریکی بتن را تحت تأثیر قرار دهند: هندسه، دما و عمل‌آوری آزمون. بنابراین آنها ابتدا با استفاده از سه هندسه متداول: الکتروودهای سطحی، تک محوری و جاسازی شده، نقش هندسه آزمون را بر مقاومت

### 1 Rapid Chloride Penetration test (RCPT)

هیز و همکاران (۲۰۱۵) یک روش بهبود یافته برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن معرفی کردند که مشکلات ناشی از اثرات قطبی شدن و واکنش خازنی را برطرف می‌کند. نتایج بتن تازه و سخت شده حاصله با روش پیشنهادی نیز ارائه شد و با نتایج با استفاده از روش‌های مرسوم تر مقایسه گردید که مطلوب بوده است [۳۳].

آذرسرا و گوپتا (۲۰۱۷) مقاومت الکتریکی بتن برای ارزیابی دوام را بطور مفصل بررسی نمودند. با توجه به نتایج مختلف و مقالات تحلیل شده، این محققان موارد زیر را تاکید نمودند: الف-تأثیر وجود میلگرد در بتن برای این ارزیابی؛ ب-وجود ترک و شواهد آن؛ ج-وضعیت رطوبت و دمای بتن [۲۲ و ۳۴] (حالت SSD توصیه شده است)؛ د- نحوه اتصال مناسب الکترودها ب بتن؛ ه-اثر نوع سنگدانه در نتایج؛ و- اثر فرآیند کربناته شدن؛ ز-اثر یون کلر (که با مقاومت رابطه معکوس دارد و همبستگی و رابطه مستقیم نتایج مقاومت الکتریکی بتن و میزان خوردگی‌ها)؛ ح- ارتباط مستقیم مقاومت فشاری بتن، مقاومت الکتریکی و تخلخل بتن [۳۵]؛ ط-نحوه آرایش هندسی قرارگیری الکترودها جهت اندازه‌گیری [۳۶-۳۷]؛ شرایط محیطی [۳۸].

میناگوا و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت الکتریکی بتن برای طراحی روش‌های ضد خوردگی الکتروشیمیایی یا شاخص دوام سازه‌های بتن مسلح را مطالعه کردند. در این مطالعه، مکانیسم وابستگی فاصله پراب‌ها به مقاومت الکتریکی ظاهری بتن با گرادیان رطوبت در جهت عمق بررسی شد.

آنها مشاهده کردند که مقاومت الکتریکی ظاهری بتن با مقدار آب، عمق اندازه‌گیری و فواصل پراب‌ها ارتباط مستقیمی دارد [۳۹].

اوبلا و همکاران (۲۰۱۷) ارتباط مقاومت الکتریکی بتن تازه را با نسبت‌های مخلوط بتن ارزیابی نمودند. آنها مقاومت الکتریکی هر مخلوط را با یک قالب بتن تازه استوانه‌ای بررسی کردند. لذا نحوه تأثیر نسبت‌های مختلف مخلوط بتن (مقادیر مختلف سیمان و آب) بر مقاومت الکتریکی بتن ارزیابی شد. سیمان با تولید یون‌ها (عمدتا  $K^+$ ،  $Na^+$  و  $OH^-$ ) که منبع اصلی هدایت الکتریکی می‌باشد و آب با ایجاد مجاری رسا نا این اثر را می‌گذارد. در یازده مخلوط بتنی مذکور مقادیر  $W/C$ ، مقدار خمیر، میزان هوا، مقدار خاکستر بادی، میزان مصرف کننده کاهنده آب و مقدار قلیایی سیمان، متفاوت بود. به زعم آنها فقط اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن می‌تواند میزان عملکرد خمیر مخلوط یا محصول را پیش‌بینی کند [۴۰].

استاکلمبرگ و همکاران (۲۰۱۸) خواص ترکیبات سیمانی-بتنی ( $CCC^1$ ) را با استفاده از روش مقاومت الکتریکی بررسی نمودند. این ترکیبات طی فرآیند سخت شدن مداوم در حال تغییر هستند؛ بطوریکه در مراحل اولیه سخت شدن، خواص پلاستیکی چسبناک داشته، حال آنکه در ساختار نهایی، سنگ مصنوعی غالباً دارای خواص الاستیک است. پارامترهای فنی (نسبت  $W/C$ ، اسلامپ، زمان گیرش، مقاومت و غیره) نیز عمدتاً با یکدیگر ناسازگاری دارند. این امر، اجرای عملی و نظارت  $CCC$  را پیچیده می‌کند. در این مطالعه، از حسگرهای اندازه‌گیری مختلفی

(سنسورهای الکتروود دوگانه نوع تستر [۹ و ۱۲]، سیستم‌های پیچیده بدون تماس [۶ و ۲۲] و چند الکتروود [۴۱] استفاده شده است [۴۲].

اوبلا و همکاران (۲۰۲۰) طی یک مطالعه مفصل بر روی مقاومت الکتریکی بتن، نتایج زیر را اعلام نمودند: ۱. طبقه‌بندی مخلوط‌های بتنی برای نفوذپذیری کلرید تا زمانی که از یک روش عمل‌آوری واحد استفاده شود، معتبر است؛ ۲. بسته به روش عمل‌آوری مورد استفاده و مقاومت اندازه‌گیری شده، مخلوط یکسان را می‌توان بر اساس معیارهای مربوطه در دو گروه مختلف برای نفوذپذیری کلرید طبقه‌بندی کرد؛ ۳. نتایج مقاومت سطحی حدود ۱۰-۲۰٪ کمتر از مقاومت اندازه‌گیری شده حجمی در آزمون‌های بتن در این مطالعه بود. در نتیجه، موارد متعددی وجود داشت که طبقه‌بندی نفوذپذیری کلرید بر اساس  $SR^1$  یک سطح از طبقه‌بندی بر اساس  $BR^2$  اندازه‌گیری شده را کاهش داد؛ ۴. نتایج رسانایی با نتایج RCP ارتباط خوبی دارد؛ ۵. درجه اشباع<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شده مخلوط‌های بتنی هوازائی شده به طور متوسط ۲۰٪ کمتر از مخلوط‌های معادل بتنی هوازائی نشده است. مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های بتنی هوازائی شده ۲۵٪ بیشتر و نتایج RCP<sup>۴</sup> در مقایسه با مخلوط‌های معادل بتن هوازائی نشده ۲۰٪ کمتر بود. برای یک مخلوط بتنی هوازائی شده، افزایش ۲-۳٪ میزان هوا، درجه اشباع

را کمی کاهش داده و بر مقاومت تأثیر نمی‌گذارد؛ ۶. برای همه مخلوط‌های بتنی مورد ارزیابی، خشک شدن آزمون اشباع، مقاومت را افزایش می‌دهد؛ ۷. برای مخلوط‌های مختلف ارزیابی شده، آزمون‌هایی که تحت شرایط یکسان عمل‌آوری شود، دارای ارزش درجه اشباع متفاوتی در پایان دوره عمل‌آوری بودند؛ ۸. دقت آزمون BR به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از RCPT و تا حدی بهتر از آزمون  $SR^5$  است [۴۳].

کسلی و همکاران (۲۰۲۰) روش‌های پیشرفته اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی (و در نتیجه مقاومت الکتریکی) ملات و بتن را تجزیه و تحلیل نمودند. این محققان با بررسی بیش از بیست مطالعه دیگر، انواع روش‌های مختلف را شرح دادند که مزایا و معایب آنها با توجه به عملکرد، قابلیت اطمینان و میزان بلوغ آنها مشخص می‌شود. هر دو روش نظارت و بازرسی با استفاده از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی امکان‌پذیر است. مقاومت الکتریکی یک شاخص مهم برای وضعیت سلامتی ملات با بتن است، زیرا هر زمان که پدیده‌هایی باعث تغییر در رسانایی ملات با بتن می‌شود، تغییر کند، این روش به عنوان راهنما عمل می‌نماید. این محققان برای بکارگیری روش مقاومت الکتریکی بتن توصیه‌هایی (مانند توجه به رطوبت سطح اندازه‌گیری، دمای هوا و بتن، نحوه قرارگیری میلگرد،

1 The Surface Resistivity (SR) Test

2 bulk resistivity (BR)

3 degree of saturation (DOS)

4 Chloride penetrability (RCP)

5 surface resistivity (SR)

حداکثر اندازه سنگدانه‌های بتن، میزان فرکانس مورد استفاده و غیره) ارائه کردند [۴۴].

هدف از این مطالعه، بررسی بومی روش پایش مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از سیمان‌های متنوعی است که آنالیز شیمیائی دارند. از این روش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن سخت شده مدنظر نبود.

### برنامه آزمایشگاهی

در مرحله اول ۱۱ نمونه کلینکر از کارخانه سیمان تهران نمونه‌گیری شد که مقادیر فازهای آنها تنوع داشتند. یک نمونه گچ تهیه و آنالیز شیمیائی شد. با استفاده از این کلینکرها و یک آسیاب آزمایشگاهی، سیمان‌سازی آزمایشگاهی صورت گرفت که ترکیبی از ۹۶٪ کلینکر و ۴٪ گچ با ملاک دستیابی به شاخص بلین  $3000 \pm 50$  سانتی متر مربع بر گرم بود. نرمی و دانه‌بندی نمونه‌های سیمان شرایط تقریباً یکسانی داشتند. آنالیز فیزیکی و شیمیائی

نمونه‌های سیمان صورت گرفت (شکل ۲). یک نمونه افزودنی فوق‌روان‌کننده پر مصرف در تهران نیز تهیه گردید. فوق‌روان‌کننده مذکور بر پایه پلی کربوکسیلات اثر بود. در مرحله بعد ۲۲ مخلوط بتنی با ۱۱ نمونه سیمان تهیه گردید. ۱۱ مخلوط با عنوان شاهد (فاقد افزودنی) با هدف دستیابی به اسلامپ  $8 \pm 0.5$  سانتی‌متر ساخته شد و ۱۱ مخلوط با عنوان دارای افزودنی نیز در شروع با هدف دستیابی به اسلامپ  $8 \pm 0.5$  سانتی‌متر تهیه گردید؛ سپس به مقدار ۰/۳٪ وزنی سیمان از افزودنی فوق‌روان‌کننده (کاهنده آب) به مخلوط بتن اضافه شد تا اسلامپ بتن در محدوده S3 یعنی اسلامپ ۱۵۰-۱۰۰ میلی‌متر گردد (BS8500-2003). بر روی مخلوط‌های بتنی آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. همچنین آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی انجام شد که از زمان تماس سیمان با آب تا ۳۱ روز بعد بطور مرتب قرائت‌ها صورت گرفت.

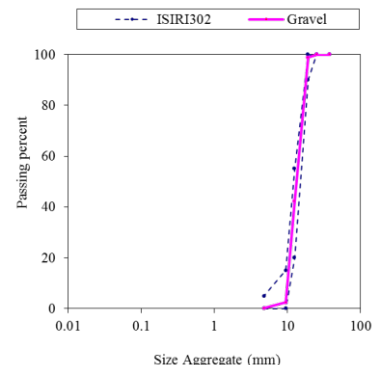
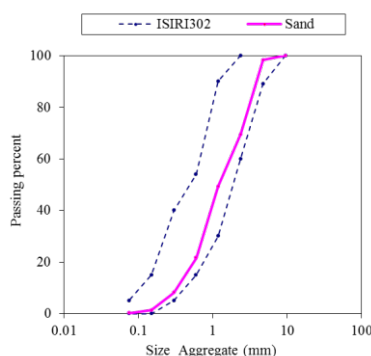
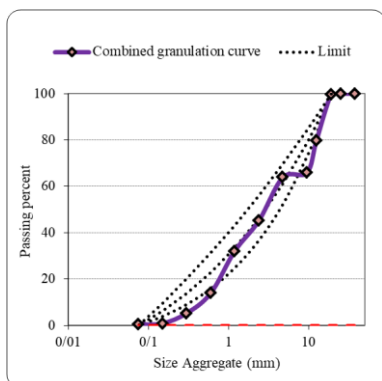


شکل ۲ سیمان‌سازی آزمایشگاهی و تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها

شکل ۳ و جدول ۱ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از غرب تهران (منطقه شهریار) می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	حداکثر اندازه سنگدانه (MSA)	مدول نرمی (FM)	جذب آب (%)	چگالی (SSD)	شکستگی (%)	عبوری از الک ۲۰۰ (%)
شن نیمه شکسته (بادامی)	۱۹	*	۲/۶	۲/۵۳	۷۹	۰/۱
ماسه طبیعی	*	۳/۵	۳/۹	۲/۵۴	*	۰/۲



شکل ۳ نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

مقاومت فشاری بتن سخت شده ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه همه مخلوط‌های بتنی اندازه‌گیری شدند (شکل ۴). اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با تنظیمات معرفی شده در مقاله NIST<sup>1</sup> توسط K. Obla بود [۸] که روشی جدید برای بتن تازه می‌باشد. از هر مخلوط بتنی ۲ قالب استوانه‌ای با طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر (۸×۴ اینچ) تهیه شد. قالب‌ها به صورت یکبار مصرف و مخصوص این پروژه طراحی و ساخته شدند، بطوریکه دو عدد پین فلزی (استیل) با فاصله ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در بتن مدفون شدند. جریان بین دو الکترود وارد شده در نمونه اعمال گردید و ولتاژ به طور همزمان اندازه‌گیری شد. مقاومت الکتریکی از نسبت ولتاژ اندازه‌گیری شده به جریان اعمالی محاسبه و مستقیماً توسط دستگاه گزارش می‌شود. در مجموع ۴۴ قالب و ۸۸ پین تهیه شد که قرائت‌ها در سنین ۰، ۱، ۲، ۳، ۶، ۲۴، ۳۰، ۴۸، ۵۴، ۵۴، ... و ۷۷۴ ساعت (۳۲ روز) انجام گردید. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نیز متناسب با کار طراحی و تهیه شد.

در کلیه مخلوط‌ها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمون‌ها و شرایط عمل‌آوری تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر فازهای کلینکر مصرف شده در سیمان مصرفی باشد (شکل ۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها نیز  $350 \text{ kg/m}^3$  بود. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون اصلاح شده با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود ۰/۳۵ در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد. برای تهیه این مخلوط ۶۵٪ ماسه با ۳۵٪ شن درشت استفاده شد (نمودار شکل ۳ و جدول ۲).

جدول ۲: مشخصات کلی طرح‌های مخلوط بتنی

مقدار افزودنی	نسبت آب به سیمان	مقدار وزنی در یک مترمکعب بتن (بر حسب کیلوگرم)			
		افزودنی	آب	سیمان	شن (SSD)
سیمان (%)					ماسه (SSD)
۰/۳	۰/۴۷	۱/۰۲۷	۱۶۶	۳۵۰	۶۱۷
					۱۱۶۲





شکل ۴ تهیه مخلوطهای بتنی و آزمایش‌های مربوطه

بین دو الکتروود اندازه‌گیری گردید. رابطه ۲ ضریب هندسی مورد استفاده در این روش را نشان می‌دهد که  $A$  سطح مقطع نمونه و  $L$  ارتفاع نمونه استوانه‌ای بتنی است.

$$K=A/L \quad (1)$$

نکات مهم در نحوه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن بدین صورت بود:

- محل قرارگیری دستگاه به گونه‌ای بوده تا طی کل فرآیند آزمایشگاهی و برای قرائت‌ها نمونه‌ها نیاز به جابجایی دستگاه وجود نداشته باشد؛
- مقدار  $K$  (که یک ضریب ثابت در محاسبات مقاومت می‌باشد) را در همه قرائت‌ها عدد ثابت ۱۰ در نظر گرفته شد؛
- در هر مرحله از قرائت‌ها، مقدار  $Z$  (مقاومت الکتریکی نمایشگر دستگاه) با اعداد قبلی و آزمون‌های مشابه کنترل شد؛
- در صورتیکه دستگاه عدد نامرتب نشان می‌داد، مقادیر  $K$  و  $\varphi$  (زاویه مابین دو الکتروود دستگاه حین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی) کنترل می‌شد. با توجه به اینکه پراب و کابل‌های دستگاه به دو پین مدفون در بتن نصب می‌شدند و موازی

مقاومت یا امپدانس الکتریکی ( $Z$ )، مقاومتی است که تحت یک اختلاف پتانسیل متناوب در برابر جریان الکتریکی متناوب ظاهر می‌شود و واحد SI آن اهم ( $\Omega$ ) است. عواملی همچون سطح مقطع رسانا، نحوه قرارگیری آنها، دما و مقاومت الکتریکی ویژه بر مقاومت الکتریکی موثرند. از این رو با موازی قرار دادن صفحات رسانا،  $\varphi$  (زاویه مابین دو الکتروود دستگاه حین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی) تثبیت گردید، همواره از دو صفحه رسانای ثابت (با مقاومت الکتریکی ویژه مشخص) در دمای نسبتاً ثابت آزمایشگاهی بهره‌گیری شد. مقاومت ویژه بتن مشخصه ذاتی آن بوده که مستقل از شکل هندسی نمونه است و معمولاً آن را با  $\rho$  نشان می‌دهند (رابطه ۱).

$$\rho=k.R \quad (1)$$

در روش تعیین مقاومت الکتریکی حجمی بتن، آزمون بتنی بین دو الکتروود قرار می‌گیرد. برای اطمینان از اتصال مناسب نمونه و الکتروود از دو اسفنج مرطوب استفاده شد. یک جریان متناوب به نمونه اعمال شده و اختلاف پتانسیل

### نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل

جدول ۳ آنالیز شیمیایی نمونه‌های کلینکر مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله که مقادیر C3S حدود ۶۱/۴-۴۹/۶٪ و C3A حدود ۷/۴-۳/۷٪ می‌باشند. بنابراین کلینکرهای متنوعی برای سیمان‌سازی وجود دارند.

یکدیگر بودند، مقدار  $\phi$  باید صفر باشد تا مقدار Z صحت داشته باشد؛

- در هر مرحله از قرائت‌ها، تکرارپذیری حداقل یک قرائت کنترل شده است.
- ضریب مقدار قرائت شده ۰/۱۴۵ به عنوان مقاومت الکتریکی اعمال شد.

جدول ۳: آنالیز شیمیایی نمونه‌های کلینکر مورد استفاده در سیمان‌سازی آزمایشگاهی (به روش شیمی تر)

Free CaO	C4AF	C3A	C2S	C3S	AlM	SiM	LSF	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	Sample Code
0.70	14.0	6.0	25.8	49.6	1.13	2.25	89.7	63.5	4.6	5.2	22.02	5263
1.01	12.8	5.0	26.5	50.0	1.09	2.56	89.1	63.12	4.2	4.56	22.4	5159
0.84	11.7	4.5	21.6	56.3	1.08	2.79	91.2	63.72	3.84	4.16	22.32	5154
0.39	12.1	3.7	16.5	61.4	0.99	2.77	93.2	63.88	3.96	3.94	21.9	5155
0.48	13.6	5.8	28.0	48.1	1.13	2.35	88.8	63.54	4.48	5.04	22.4	5162
0.70	12.5	6.1	35.7	41.5	1.19	2.58	85.8	63.34	4.12	4.92	23.34	5156
0.56	11.9	6.1	25.1	51.2	1.23	2.54	90.0	63.36	3.92	4.82	22.2	5158
0.39	11.9	6.0	25.8	51.3	1.22	2.60	89.8	63.86	3.9	4.76	22.5	5157
0.42	12.3	7.4	23.5	51.9	1.33	2.32	91.0	63.84	4.04	5.38	21.84	5153
0.45	11.8	5.6	19.4	57.8	1.19	2.59	92.4	64.16	3.88	4.6	21.96	5160
0.42	12.2	5.7	26.3	50.4	1.18	2.57	89.4	63.48	4	4.72	22.44	5161

آنالیز گچ مصرفی برای سیمان‌سازی آزمایشگاهی به صورت جدول ۴ می‌باشد. این آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که گچ مصرفی کیفیت مرغوبی دارد.

جدول ۴: آنالیز شیمیایی گچ مورد استفاده در سیمان‌سازی آزمایشگاهی (به روش شیمی تر)

Molecular water	CaSO4	SO3	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2
18.42	70.6	41.54	0.78	31.8	0.22	0.78	1.84

در جدول ۵ نتایج آنالیز فیزیکی و مکانیکی سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی آمده است. نتایج دانه‌بندی سیمان بیانگر شباهت در نرمی آنها بود.

جدول ۵: نتایج آنالیز فیزیکی و مکانیکی سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

Code	Compressive Strength-Mortar (kg/cm2)			Setting Time (min)		Normal Consistency (%)	Retained on sieve (%)		Blaine (cm2/gr)
	2 Days	7 Days	28 Days	Initial	Final		90 $\mu$	45 $\mu$	
5153	180	316	472	230	310	23.5	1.34	12.04	2951
5154	176	291	430	230	300	23.5	1.32	11.36	3052
5155	172	303	343	240	315	24.0	1.30	11.46	3052
5156	132	286	466	230	310	23.5	1.18	12.26	2951
5157	206	335	492	215	290	24.0	1.78	13.64	2985
5158	163	321	493	240	315	23.5	1.24	12.84	2951
5159	146	286	466	215	295	23.5	1.34	15.42	2985
5160	222	307	514	190	265	23.5	0.88	10.22	2985
5161	167	308	494	240	315	23.5	1.24	12.34	3019
5162	150	311	534	240	320	24.0	1.20	12.22	2951
5163	169	296	446	250	325	23.5	2.08	14.20	3019

جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج بتن تازه و سخت شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶: نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های بتنی ساخته شده با سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

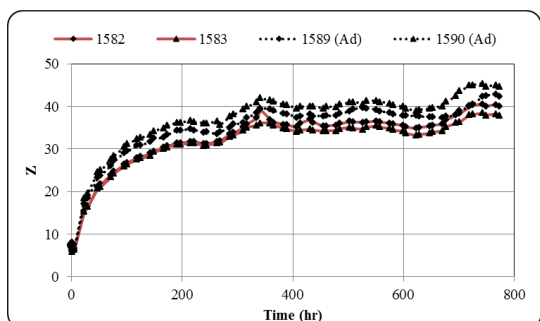
Code	Without Admixture (Normal)					With Admixture				
	Fresh Concrete		Compressive Strength- Concrete (kg/cm <sup>2</sup> )			Fresh Concrete		Compressive Strength Concrete (kg/cm <sup>2</sup> )		
	Slump (mm)	w/c	7 Days	28 Days	90 Days	Slump (mm)	w/c	7 Days	28 Days	90 Days
5153	80	0.55	247	397	488	80	0.47	250	411	479
5154	90	0.54	248	392	427	85	0.48	286	458	438
5155	80	0.59	219	377	433	80	0.54	236	373	468
5156	80	0.56	209	392	499	80	0.51	225	389	479
5157	80	0.53	246	440	545	80	0.48	272	429	438
5158	80	0.57	239	382	490	80	0.52	254	401	425
5159	80	0.54	278	439	582	80	0.50	272	436	564
5160	80	0.54	284	428	451	80	0.48	328	443	505
5161	80	0.51	274	453	496	80	0.46	299	462	463
5162	85	0.56	251	366	500	85	0.51	277	399	464
5163	80	0.54	271	390	470	80	0.50	272	363	463

نمودار نتایج مقاومت الکتریکی آزمون‌ها در شکل ۵ دیده می‌شود. - تقریباً سه پیک در همه آزمون‌ها مشاهده شد:

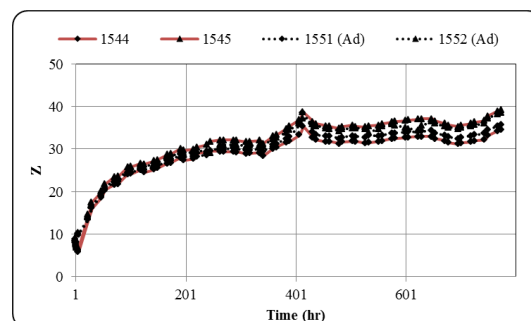
✓ پیک اول حدود ۲۰۰ ساعت (۸ روز)  $\rho \approx 30 \Omega m$  ...

✓ پیک دوم حدود ۴۰۰ ساعت (۱۶ روز)  $\rho \approx 36 \Omega m$  ...

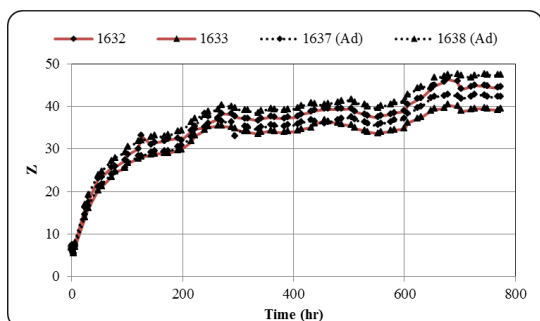
✓ پیک سوم حدود ۵۶۰ ساعت (۲۳ روز)  $\rho \approx 39 \Omega m$  ...



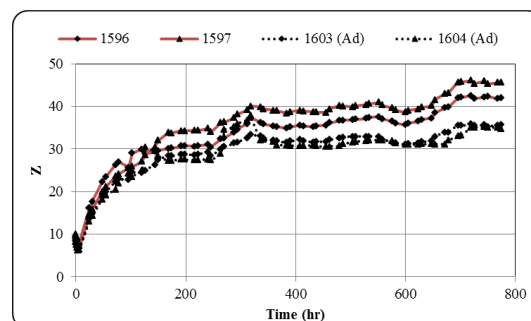
۵۱۵۴



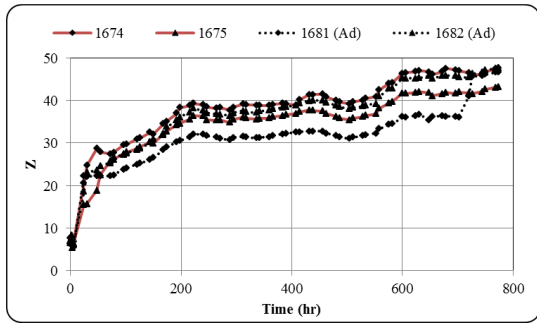
۵۱۶۲



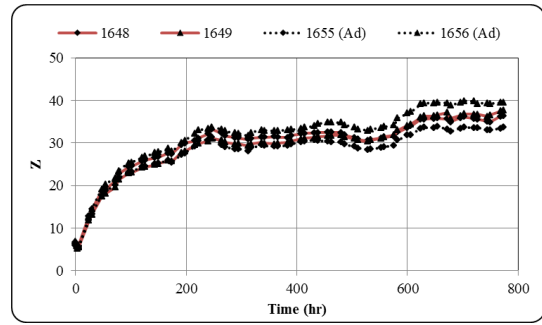
۵۱۵۳



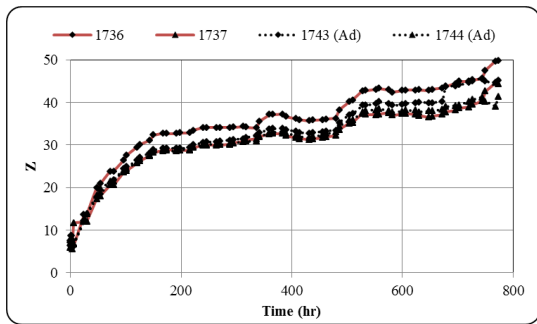
۵۱۶۳



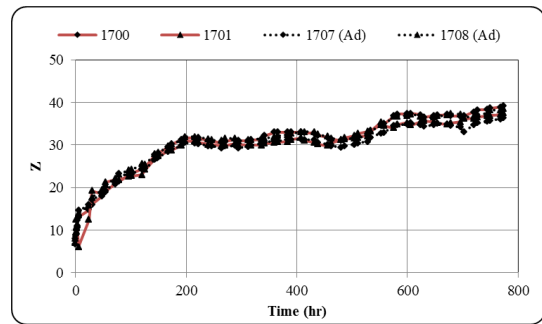
۵۱۵۵



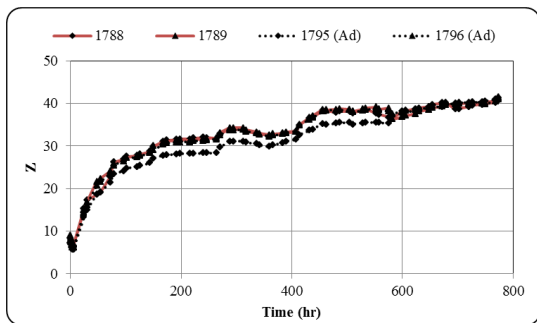
۵۱۶۰



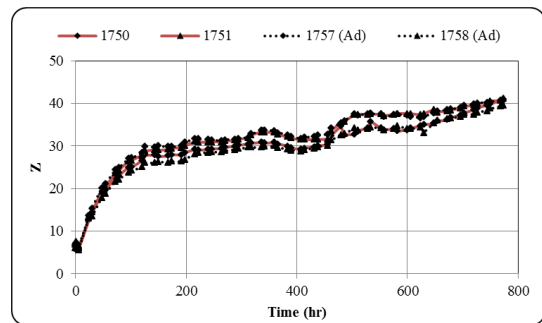
۵۱۵۹



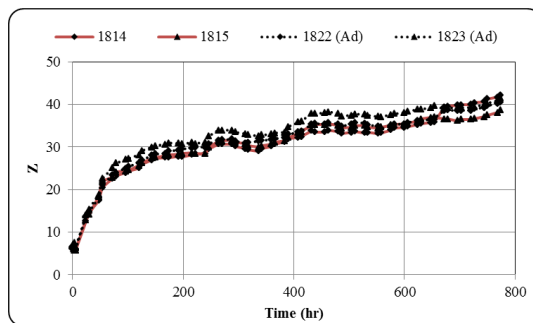
۵۱۶۱



۵۱۵۷



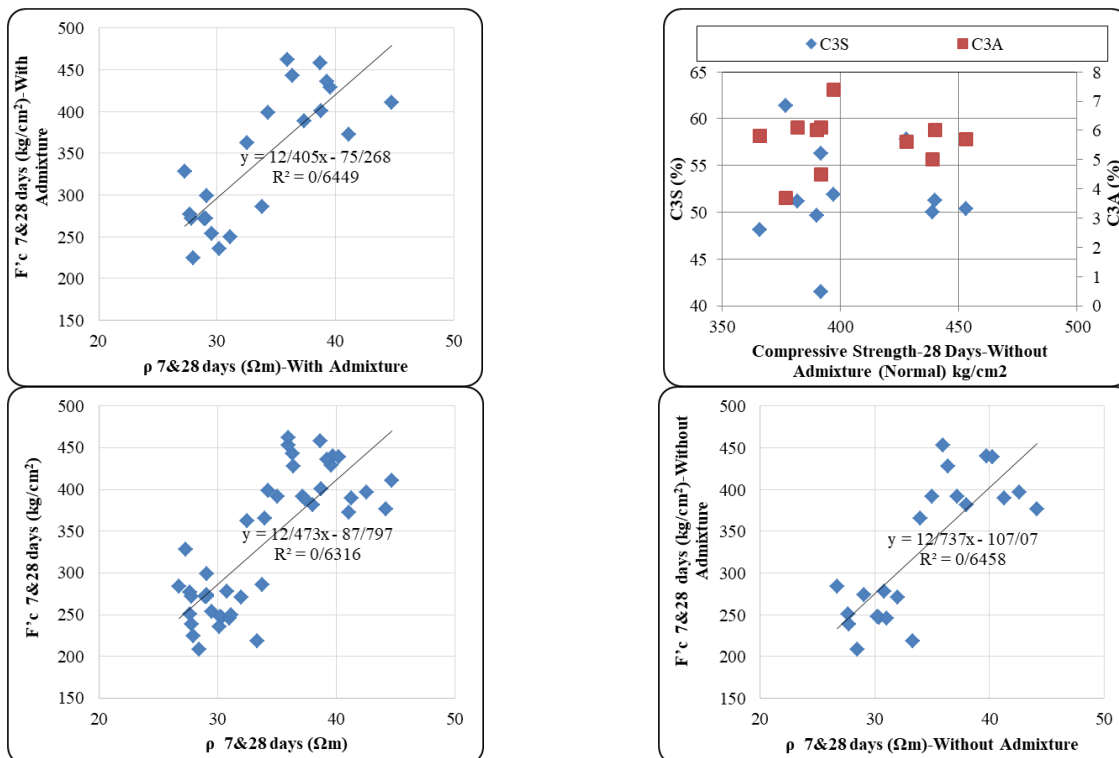
۵۱۵۶



۵۱۵۸

شکل ۵: منحنی‌های مقاومت الکتریکی طی مرور زمان برای ۲۲ مخلوط بتنی (۴۴ نمونه)

جهت بررسی ارتباط مقاومت فشاری، الکتریکی و فازهای سیمان نمودارهای شکل ۶ ترسیم شد.



شکل ۶ نمودارهای ارتباط مقاومت فشاری با فازهای سیمان و مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری (۷ و ۲۸ روزه) در مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی

می‌شود. در برخی پروژه‌ها، شرط اجرای مرحله بعدی، کسب حداقل مقاومت بتنی است. بطور مثال برای قالب‌برداری در یک پروژه، دستیابی به مقاومت حداقل ۱۰ مگاپاسکال و برای اعمال تنش کششی بر روی کابل‌های پیش تنیده که با گروت محصور شده‌اند، حداقل مقاومت ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. جهت این پیش‌ها نیاز است که آزمون‌هائی تهیه شوند و در فواصل زمانی مختلف تعیین مقاومت گردند. اما با روش مقاومت الکتریکی و رابطه فوق براحتی می‌توان از کسب مقاومت مدنظر، اطمینان حاصل نمود.

با توجه به اینکه در این مطالعه خاص، روش پیش مقاومت الکتریکی با اغلب مطالعات کمی تفاوت داشت و فقط مشابه تحقیقات اوبلا و همکاران (۲۰۱۸) بود، لذا امکان مقایسه دقیق وجود ندارد. البته روند تغییرات مقاومت الکتریکی

از نتایج و نمودارهای اشکال ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که:

- ✓ تقریباً در همه آزمون‌ها، مقاومت الکتریکی تا ۳ ساعت کاهش دارد که بیانگر زمان گیرش بتن است؛
- ✓ بین  $W/C$  و  $\rho$  رابطه ای وجود ندارد؛
- ✓ رابطه واضحی بین  $C3A$  و  $C3S$  با مقاومت فشاری بتن وجود ندارد؛
- ✓ رابطه مقاومت الکتریکی با مقاومت فشاری بتن به صورت زیر است (با همبستگی:  $R^2 = 0.63$ ):

$$F'c \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 12.5 \rho \text{ (}\Omega\text{m)} - 88 \quad (1)$$

باید توجه نمود که هدف از این ارزیابی و ارائه رابطه، حصول اطمینان از دستیابی به مقاومت فشاری به کمک روش مقاومت الکتریکی است و تخمین مقاومت فشاری در سنین مختلف نمی‌باشد. جهت تبیین بهتر مثالی ارائه

طی زمان در این مطالعه مشابه مطالعات نیلی و تدین (۱۳۹۰) و لی و همکاران (۲۰۰۷) بود. این محققان به کمک آزمایش مقاومت الکتریکی، روند گیرش بتن را پایش نمودند و در این تحقیق روند سخت شدن و کسب مقاومت فشاری به کمک آزمایش مقاومت الکتریکی ارزیابی گردید. در این مطالعه مشابه تحقیقات سنگول و جرو (۲۰۰۷) و هیز و همکاران (۲۰۱۵) نتیجه گیری می شود که روش اندازه گیری مقاومت الکتریکی، پایشی مناسب و قابل اطمینان برای کنترل کیفیت بر اساس عملکرد و در نتیجه دوام بتن است.

#### جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه، روابط معناداری مابین نتایج آزمایش های مقاومت الکتریکی و برخی پارامترهای بتن مشاهده گردید که بر روی برخی مطالعات مشابه صحت گذاری شد. بر اساس نتایج این پروژه:

۱- تقریباً در همه آزمون ها، مقاومت الکتریکی تا ۳ ساعت کاهش یافته است که زمان گیرش را نمایش می دهد؛

#### مراجع

- [1] Stackelberg D, Wilge B, Boiko S, Martauz P, Strigac J (2011) "Monitoring the strength properties of cement clinker on the basis of measurements of electrical resistivity. XIII". *International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid* 7: 8.
- [2] Goldman FA, Shtakelberg DI, Gadaev NR, Steinbuk G (2015) "Monitoring of hardening of aerated concrete as measured by electrical resistance." *Jour/Concrete Technology* 3-4: 32-35.
- [3] Shimizu Y (1928) "The science reports of the Tohoku Imperial University", 1st Series, Shendai, Japan 17(1): 423-429.
- [4] Brameshuber W, Raupach M, Schröder P, Dauberschmidt C (2003) "Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode. Part. I: Aspects of concrete technology". *International Symposium NDT-CE, Stuttgart* 2: 41.
- [5] Mancio M, Moore JR, Brooks Z, Monteiro PJM, Glaser SD (2010) "Instantaneous in-situ determination of water-cement ratio of fresh concrete." *ACI Materials Journal* 107(6): 586-592.
- [6] Wei X, Li Z (2006) "Early hydration process of Portland cement paste by electrical measurement." *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(1): 99-105.
- [7] Li Z, Wei X, Li W (2003) "Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurement." *ACI Materials Journal* 100(3): 253-257.

۲- می توان گفت که سه قله در همه آزمون های مقاومت الکتریکی مشاهده می شود: ۲۰۰ ساعت (۸ روز) با مقاومت الکتریکی حدود  $30 \Omega m$ ؛  $\rho \approx 30$ ؛ حدود ۴۰۰ ساعت (۱۶ روز) با مقاومت الکتریکی حدود  $36 \Omega m$ ؛  $\rho \approx 36$ ؛ حدود ۵۶۰ ساعت (۲۳ روز) با مقاومت الکتریکی حدود  $39 \Omega m$ ؛  $\rho \approx 39$

۳- بین  $W/C$  و  $\rho$  رابطه ای دیده نشد؛

۴- رابطه واضحی بین  $C3S$  و  $C3A$  با مقاومت فشاری بتن وجود ندارد؛

۵- بر اساس نتایج این مطالعه، رابطه مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری به صورت زیر است:

$$F'c \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 12.5 \rho \text{ (}\Omega m\text{)} - 88$$

#### قدردانی

از مدیران، کارشناسان و تکنسین های محترم شرکت سیمان تهران بابت همکاری های صورت گرفته بسیار سپاسگذاریم. از شرکت های البرز شیمی و نوین رضی آباد بابت تامین مواد اولیه این پروژه متشکریم.

- [8] Obla K, Hong R, Sherman S, Bentz DP, Jones SZ (2018) "Relating the electrical resistance of fresh concrete to mixture proportions". *NIST, Advance Civil Engineer Materials* 7(1): 71-86.
- [9] Xiao L, Li Z (2008) "Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement." *Cement and Concrete Research* 38: 312-319.
- [10] Li Z, Xiao L, Wei X (2007) "Determination of concrete setting time using electrical resistivity measurement." *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(5): 423-427.
- [11] Andrade C, Rebolledo N (2011) "Setting and hydration evolution by resistivity and ultrasonic velocity." 13 Interns. *Congress on the Chemistry of Cement, Abstracts and Proceedings, Madrid* 7:8.
- [12] Bentz DP (2014) "Activation energies of high-volume fly ash ternary blends: hydration and setting". *Cement and Concrete Composites* 53: 214-223.
- [13] Bentz DP, Snyder KA, Ahmed A (2015) "Anticipating the setting time of high-volume fly ash concretes using electrical measurements: feasibility studies using pastes." *J Mater Civ Eng* 27(3): 1-6.
- [14] McCarter WJ, Curran PN (1984) "The electrical response characteristics of setting cement paste." *Magazine of Concrete Research* 36(126): 42.
- [15] Hope BB, Ip AK, Manning, DG (1985) "Corrosion and electrical impedance in concrete." *Cement and Concrete Research* 15(3): 525-534.
- [16] Xinying Lu (1997) "Application of the Nernst-Einstein equation to concrete." *Cement and concrete research* 27(2): 293-302.
- [17] Sengul O, Gjörv OE (2008) "Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction." *ACI Materials Journal* 105(6): 541-547.
- [18] Monfore GE (1968) "The electrical resistivity of Concrete." *Journal of PCA*, pp. 35-48.
- [19] Lio Y, Presuel Moreno FJ (2014) "Normalization of temperature effect on concrete resistivity by method using arrenius law." *ACI Materials Journal* 3(4): 433-442.
- [20] Trimbak PV, Jolicoeur C, Khayat KH (2002) "Multi-probe conductivity method for monitoring time-depended processes in fresh cementations and other slurry systems." *Canada Patent: CA 2322931*.
- [21] Lubeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, Siqueira HC (2012) "Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag." *Cement & Concrete Composites* 34(3): 392-399.
- [22] Wei X, Xiao L (2012) "Effect of temperature on the electrical resistivity of Portland cement pastes." *Advances in Cement Research* 24(2): 69-76.
- [23] Backe KR, Lile OB, Lomov SK (2001) "Characterizing curing cements slurries by electrical conductivity." *SPE Drilling & Completion*, pp. 201-207.
- [24] Monfore, G E (1970). "THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE". *PCA, Portland Cement Assoc R & D Lab Bull*
- [25] ASTM C1202 (2019). "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".
- [26] Michelle R. Nokken & R. Doug Hooton (2006). "Electrical Conductivity Testing". *PCA R&D Serial No. 3002*.
- [27] ASTM C403 (2016). "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance".
- [28] Li, Z., Xiao, L., and Wei, X. (2007), "Determination of Concrete Setting Time Using Electrical Resistivity Measurement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, pp. 423-427.
- [29] Andrade C, Rebolledo N (2011) "Setting and hydration evolution by resistivity and ultrasonic velocity." 13 Intern. *Congress on the Chemistry of Cement, Abstracts and Proceedings, Madrid* 7:8.

- [30] Ozkan Sengul & O.E. Gjorv (2007). "Electrical Resistivity Measurements for Quality Control during Concrete Construction". November 2008 *ACI Materials Journal* 105(6):541-547.
- [31] Robert Spragg & Chiara Villani & Ken Snyder & Dale Bentz & Jeffrey W. Bullard & Jason Weiss. (2012). "Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems: Observations of Factors that Influence the Measurements". *TRB 2013 Annual Meeting*.
- [32] Hamed Layssi & Pouria Ghods & Aali R. Alizadeh, & Mustafa Salehi (2015). "Electrical Resistivity of Concrete". *Concrete international*, MAY 2015, 37(5), page 41-46.
- [33] B. P. Hughes & A. K. O. Soleit & R. W. Brierley (2015). "New technique for determining the electrical resistivity of concrete". *Magazine of Concrete Research*, Volume 37, Issue 133, December 1985, pp. 243-248
- [34] Ozyildirim, C., "Effects of Temperature on the Development of Low Permeability in Concretes," *VTRC R98-14*, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA 1998.
- [35] Qiao, C., Moradillo, M.K., Hall, H., Ley, M.T., and Weiss, J.W., (2019), "Electrical Resistivity and Formation Factor of Air-Entrained Concrete". *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 3, May, pp. 85-93.
- [36] Pejman Azarsa & Rishi Gupta. (2017). "Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review". *Advances in Materials Science and Engineering*, May 2017
- [37] Spragg, R., Villani, C., Snyder, K., Bentz, D. P., Bullard, J. W., and Weiss, J., "Factors that Influence Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, Vol. 2342, 2013, pp. 90-98.
- [38] Spragg, R., Villani, C., and Weiss, J., "Electrical Properties of Cementitious Systems: Formation Factor Determination and the Influence of Conditioning Procedures," *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 5, No. 1, 2016, pp. 124-148.
- [39] Hiroshi Minagawa, Shintaro Miyamoto, Makoto Hisada. (2017). "Relationship of Apparent Electrical Resistivity Measured by Four-Probe Method with Water Content Distribution in Concrete". *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 15 (2017), Issue 6.
- [40] Obla, K. H.; Hong, R., Sherman, S., Bentz, D.P., and Jones, S.Z., 2018, "Relating the Electrical Resistance of Fresh Concrete to Mixture Proportions," *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 7, No. 1, 2018, pp. 71-86.
- [41] McCarter WJ, Chrisp TM, Staars G, Basheer M, Blewett J (2005) "Field monitoring of electrical conductivity of cover-zone concrete." *Cement and Concrete Composites* 27(7-8): 809-817.
- [42] Stackelberg DI & Vilge BI & Boiko SV (2018). "Technological Monitoring for Hardening and Strengthening of Cement-concrete Compositions". *Advancements in Civil Engineering & Technology*, Volume 2 Issue 5.
- [43] Karthik Obla & Colin L. Lobo & Rongjin Hong & Stuart Sherman. (August 2020). "Improving the Reliability of Resistivity Tests of Concrete". *National Ready Mixed Concrete Association*.
- [44] Gloria Cosoli & Alessandra Mobili & Francesca Tittarelli & Gian Marco Revel & Paolo Chiariotti. (2020). "Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review". *Appl. Sci.* 2020, 10, 9152.