

بررسی اثر مشخصات سنگدانه‌ها در خواص بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه

صادق اکبرنژاد، کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

ابوالفضل حسینی، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد شکرچی‌زاده، استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: hassani@modares.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی راه‌ها با استقبال فراوانی همراه بوده است. این امر را می‌توان به دلیل توجیحات فنی و اقتصادی این روش نوین ساخت دانست. رویه بتن غلتکی در واقع بتن متراکم شده‌ای است که دارای خصوصیات بارزی چون دوام زیاد، هزینه‌های ساخت کم و تعمیرات و نگهداری در سطوح کم است.

هدف کلی این تحقیق آزمایشگاهی کاربردی‌تر کردن استفاده از بتن غلتکی در صنعت راه‌سازی کشور بوده و امکان مصرف مصالح غیر شسته در رویه‌های بتن غلتکی بررسی شده است. به این منظور ابتدا درصد بهینه‌ای از مصالح ریزدانه (فیلر طبیعی) تعیین شد. این مصالح در درصد‌های ۰، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۸ و ۲۵ مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از تعیین مقدار بهینه فیلر طبیعی، برای بررسی شستگی و غیر شستگی مصالح مخلوط‌هایی با درصد‌های ۲/۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ از مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در دو عیار 250 Kg/m^3 و 300 Kg/m^3 تهیه شد. سپس در راستای ارائه راه حل برای مصالح غیر شسته تأثیر مواد افزودنی در بتن‌های غلتکی در درصد‌های ۱۰، ۱/۵ و ۲ مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمایش مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب از نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتری و برای آزمایش مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری $15 \times 15 \times 65$ سانتیمتری استفاده شد.

فیلر طبیعی به عنوان بخشی از مصالح ریزدانه در درصد بهینه ۷/۵ سبب بهبود خواص مقاومتی شد و همچنین مصالح با خاصیت غیر خمیری، در صورتی که مقدار مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ آنها کمتر از حد بیشینه ۷/۵٪ باشند، می‌توانند در مخلوط‌های بتن غلتکی بدون شستشو مصرف شوند که در این حالت دارای مشخصات مکانیکی و دوام قابل قبولی هستند. مواد فوق روان‌کننده نیز تأثیرات قابل توجهی در روانی و مقاومت فشاری مخلوط‌ها با مصالح غیر شسته داشتند.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، روسازی راه، R.C.C.P، مصالح شسته، مصالح غیر شسته، دستگاه وب اصلاح شده، زمان وب

۱. مقدمه

چون اجرای سریع و آسان، هزینه‌های اجرایی کم، مصرف کمتر سیمان و مقاومت زیاد آن در شرایط آب و هوایی سرد یا گرم

بتن غلتکی، بتنی است با اسلامپ صفر که برای ساخت رویه راه‌ها کاربرد دارد. مزایای عمده این نوع روسازی‌ها که سبب برتری آن نسبت به روسازی‌های آسفالتی و بتنی معمولی شده است، مواردی

در شرایط آب و هوایی گرم (آسفالت دچار جافافتادگی چرخ، جمع‌شدگی و ... می‌شود) و آب و هوای سرد (آسفالت دچار ترک خوردگی می‌شود) باشد [۴]. همچنین یکی از نیازهای اولیه صنعت در اختیار داشتن روسازی با صرفه اقتصادی است که ماشین‌آلات بسیار سنگین (با بارهای غالباً دینامیکی) قادر به عبور و توقف دراز مدت بر روی آن باشند. مهم‌ترین کاربردهای بتن غلتکی در سال‌های اخیر شامل مواردی چون راه‌ها با ترافیک سنگین با شرایط آب و هوایی نامساعد، محوطه‌های صنعتی، اسکله‌ها و بنادر است [۴].

دو روش کلی آزمون‌های روانی و تراکم خاک برای طرح اختلاط بتن غلتکی در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از پوزولان‌ها خصوصاً دوده سیلیس برای ارتقاء کیفی روسازی بتنی با استفاده از بتن غلتکی مناسب خواهد بود [۵]. همچنین بتن غلتکی مخلوطی با اسلامپ صفر است، که در آن استفاده از مصالح سنگی بسیار ریز (ریزتر از الک ۲۰۰) در صورتی که خاصیت خمیری نداشته باشند مفید است [۶]. عموماً در بتن‌های معمولی، به دلایل زیر استفاده از مصالح سنگی بسیار ریز محدود شده است.

- ۱- کاهش کارپذیری
 - ۲- جلوگیری از چسبندگی کافی میان سنگدانه‌ها و خمیر سیمان
 - ۳- کاهش مقاومت فشاری و خمشی
 - ۴- افزایش احتمال ترک خوردگی
- از طرفی جلوگیری از تولید مصالح سنگی بسیار ریز در کارخانه‌های تولید مصالح سنگی امری بسیار مشکل است و همچنین شستشوی مصالح در مناطق گرم و خشک برای محدود کردن مقدار مصالح سنگی بسیار ریز باعث افزایش هزینه‌های پروژه می‌شود. انباشته شدن مصالح سنگی بسیار ریز نیز در بسیاری از کشورها در آینده نزدیک می‌تواند اثرات زیانبار زیست‌محیطی داشته باشد [۷].

از آنجا که رفتارهای سازه‌ای بتن غلتکی مشابه با روسازی‌ها با بتن معمولی است روش‌های طراحی ضخامت که در مورد رویه بتن معمولی کاربرد دارد در اینجا نیز استفاده می‌شود. اساس طراحی رویه‌های بتنی نگه داشتن تنش‌های خمشی و خرابی‌های ناشی از خستگی در محدوده مجاز است. همین اصل کلی نیز در مورد بتن‌های غلتکی استفاده می‌شود. در رویه‌های راه، تنش‌های خمشی و خرابی‌های ناشی از خستگی از بار چرخ‌ها اثر می‌پذیرند که این تأثیر در لبه‌ها و محل درزها شدت بیشتر و در

است [۱]. این نوع بتن را برای کاربرد آن در روسازی راه به این شکل تعریف می‌کنند: "بتنی که در حالت تازه شرایطی دارد که امکان عبور غلتک از روی آن فراهم می‌آید و به این ترتیب در نهایت بتن سخت و متراکم شده‌ای که وسیله تراکم آن غلتک بوده حاصل می‌شود" [۱]. برای سالیان متمادی از RCC در ساخت سدها استفاده می‌شد، اما در سال‌های اخیر از بتن غلتکی به عنوان یک روش نوین در ساخت رویه راه‌ها استفاده شده است. البته به این نکته نیز باید توجه شود که کاربرد RCC در سد و روسازی راه تفاوت‌هایی در نوع و دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مقدار سیمان مصرفی، نسبت $\frac{W}{C}$ و روش اجرا دارند [۲]. همچنین در بتن‌های غلتکی بخش عمده مخلوط را مصالح سنگی ریزدانه تشکیل می‌دهند، بنابراین حساسیت رفتاری زیادی به میزان مصرف این مصالح وجود دارد و تعیین نسبت صحیح مصرف می‌تواند در شرایط اقتصادی پروژه تأثیرگذار باشد [۳].

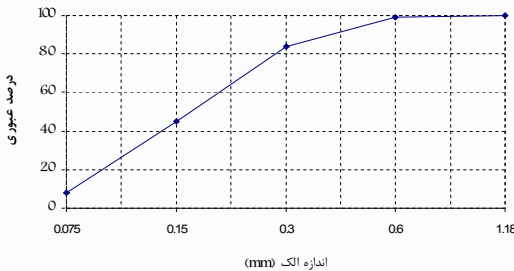
۲. مروری بر ادبیات فنی

تفاوت عمده میان بتن غلتکی و بتن معمولی اسلامپ صفر در بتن‌های غلتکی است. در طی سالیان گذشته روندی صعودی در استفاده از بتن غلتکی گزارش شده است. سی سال پیش که مهندسان از RCC به عنوان یک لایه روسازی استفاده می‌کردند شاید هرگز تصور نمی‌شد که این روش به یکی از بادوام‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های اجرای رویه راه تبدیل شود [۴]. RCC تاریخچه چندان طولانی برای کاربرد در روسازی‌های راه ندارد. شاید بتوان گفت اولین استفاده از آن در ساخت رویه راه سال ۱۹۳۰ توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا در ساخت کف‌های صنعتی بود. بعد از آن این گروه از RCC برای ساخت باند پرواز در فرودگاه واشنگتن در سال ۱۹۴۲ استفاده کردند. از دیگر موارد کاربرد بتن غلتکی در مقیاس بزرگ در یک محوطه صنعتی در ونکوور کانادا در سال ۱۹۷۶ بود [۱].

در حال حاضر در کانادا و شمال آمریکا و بعضی از کشورهای اروپایی این مصالح برای ساخت رویه راه، رویه‌های صنعتی با ترافیک بسیار سنگین در شرایط آب و هوایی نامساعد همچون سرما و یخبندان شدید بسیار کاربرد دارند [۴].

دلیل اصلی استفاده از RCC به عنوان رویه راه، قابلیت باربری فوق‌العاده زیاد آن در شرایط آب و هوایی بسیار سخت است [۴]. تحقیقات نشان داده‌اند که RCC می‌تواند جایگزینی برای آسفالت

قبلی تشخیص داده شده بود که میزان مصرف فیلر طبیعی (نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است) می‌تواند تا حد زیادی تأثیرگذار باشد [۸]. مخلوط‌هایی با ۰، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۸ و ۲۵ درصد وزنی (ریزدانه مصرفی) از مصالح فیلر طبیعی تهیه شد.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی فیلر طبیعی

با در اختیار داشتن درصد بهینه فیلر طبیعی، با توجه به توصیه مرجع [۵] برای تعیین مقدار بهینه مصرف سیمان دو عبار مصرفی 250 Kg/m^3 و 300 Kg/m^3 کنترل شد. سپس با مشخص شدن تمامی این عوامل تأثیرگذار مشخصات مکانیکی مخلوط‌هایی با ۲/۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ بررسی شد. در پایان کار نیز در راستای ارائه راه حل برای مصالح غیر شسته تأثیر فوق روان کننده در یک مخلوط مشابه با ۰، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد (وزنی سیمان) مورد مطالعه قرار گرفت. توضیح آن که تجربیات پیشین اجرایی در کشور نشان داده بود مواد روان کننده در مخلوط‌های بتن غلتکی به دلیل کمی رطوبت این مخلوط‌ها کارساز نیستند [۹]. به همین دلیل تأثیر مواد فوق روان کننده در این تحقیق بررسی شد.

۲-۱ مواد و مصالح بکار رفته

مصالح مورد استفاده در بتن غلتکی در این کار آزمایشگاهی شامل سیمان، شن، ماسه، آب و فوق روان کننده بوده است. بخش درشت دانه از دو نوع شن بادامی و نخودی و بخش ریزدانه نیز از ماسه شکسته و فیلر طبیعی تشکیل یافته بود. نتایج آزمایش‌های تعیین چگالی و جذب آب در جدول ۱ آمده است. آب مصرفی آب شرب شهری و سیمان مصرفی نیز تیپ ۲ تهران بوده است. مشخصات شیمیایی و مکانیکی سیمان مصرفی در جدول ۲ و ۳ آورده شده است. سیمان تیپ ۲ یا سیمان تیپ ۱ اصلاح شده یکی از محصولات رایج کارخانه‌های سیمان در کشور است و با توجه به ویژگی‌های مناسب آن در اکثر پروژه‌های بتنی مورد

ناحیه‌های داخلی اثر کمتری دارد [۱،۲]. روش‌های طراحی ضخامت رویه‌های بتن غلتکی در موسسه سیمان پرتلند (PCA) و گروه مهندسی ارتش آمریکا بسط و توسعه یافته است. روش PCA اساساً برای روسازی‌های فرودگاهی و صنعتی کاربرد دارد، اما در زمینه راه‌سازی نیز کاربردهایی داشته است. اساس این روش قرار گیری بار در ناحیه داخلی است و در آن از رابطه خستگی برای مصالح استفاده می‌شود. روش طرح براساس گروه مهندسی ارتش آمریکا مشابه روش طرح برای رویه بتن معمولی بوده و فرض براین است که در محل درزها تنش انتقال داده نمی‌شود و براساس بار ترافیک عبوری ضخامت تعیین می‌شود [۱،۲].

با توجه به آنکه در کشور ما شرایط آب و هوایی گرم و سرد متداول است و در بسیاری از مناطق اختلاف شدید دما در طول شبانه روز مشاهد می‌شود، در اغلب مناطق، روسازی‌های آسفالتی از کیفیت نامناسبی برخوردارند و نیاز به دوره‌های کوتاه مدت تعمیر و نگهداری دارند. بنابراین تلاش شد با انجام این تحقیق آزمایشگاهی عوامل تأثیرگذار در خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی بررسی شوند و برای هر یک، مقادیر بهینه‌ای توصیه شود تا رویه‌ای که مناسب‌ترین خصوصیات مکانیکی را دارند حاصل شود و بستری فراهم آید که رویه‌های بتن غلتکی در عین حفظ مشخصات فنی، بیش از پیش اقتصادی شوند. در این رابطه منظور از مقادیر بهینه مقادیری است که به ازای آنها مشخصه‌های مقاومتی و دوام در محدوده‌های توصیه شده قرار گیرند. در صورت استفاده از این روش ساخت امکان کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های ساخت و سرمایه‌گذاری در ساخت راه و افزایش ایمنی راه‌ها (به دلیل بهبود کیفیت روسازی) و کاهش خسارات جانی ناشی از تصادفات به علت کیفیت نامناسب رویه میسر خواهد شد.

۳. روش تحقیق

در این تحقیق از شن نخودی و بادامی به عنوان درشت دانه با حداکثر بُعد ۱۹ میلیمتر و از فیلر طبیعی و ماسه شکسته به عنوان ریزدانه استفاده شد. با انجام آزمایش‌های زمان گیرش، نرمی و مقاومت فشاری ملات کیفیت سیمان انتخابی بررسی شد. نمونه‌های مقاومت فشاری در دو عمر ۷ و ۲۸ روزه (تعدادی نیز با عمر ۱ روزه) و نمونه‌های مقاومت خمشی با عمر ۷ روزه تهیه شدند. در این تحقیق برای تعیین میزان آب بهینه، رطوبت نمونه‌ای با روانی کافی ملاک عمل قرار گرفت. از آنجایی که در تجربه‌های

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیبات شیمیایی	مقدار (درصد)
CaO	۶۳
SiO ₂	۲۱
Al ₂ O ₃	۵/۵
Fe ₂ O ₃	۳/۱
MgO	۲/۷
SO ₃	۱/۹
K ₂ O	۰/۶۵
Na ₂ O	۰/۲۵

۲-۲ تعیین نسبت‌های اختلاط

برای بتن‌های غلتکی دو روش طرح اختلاط وجود دارد. روش اول به نام تراکم خاک بر مبنای رطوبت بهینه و تراکم نیز براساس پروکتور اصلاح شده است و روش دوم به نام روش روانی و بر اساس روانی مطلوب مخلوط است. در این تحقیق از روش دوم که بر اساس تعیین روانی و تأمین تراکم با دستگاه وب اصلاح شده است، مطابق با جزئیات ارائه شده در مرجع [۱۰]، استفاده شد. در این روش در نهایت وزن مصرفی مصالح درشت دانه و ریزدانه با توجه به وزن مخصوص مربوطه تعیین می‌شود.

در این تحقیق ابتدا با انجام سعی و خطا مقدار بهینه هر یک از عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات مکانیکی رویه‌های بتن غلتکی انتخاب شد. سپس با ثابت نگه داشتن کلیه این عوامل در حد بهینه، پارامترهای مورد تحقیق (شامل درصد سیمان مصرفی، مقدار مصرف مصالح سنگی فیلر طبیعی، مقدار مصرف مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ و تأثیر مواد فوق روان کننده) بررسی شد. میزان آب مصرفی نیز براساس دستیابی به روانی مناسب (زمان وب ۲۵ ثانیه) تعیین شد. عیار مصرفی سیمان نیز با ساخت دو مخلوط با طرح اختلاط مشابه و عیار متفاوت ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب کنترل شد. برای تعیین درصد بهینه فیلر طبیعی که در مخلوط‌هایی با درصدهای مختلف از این مصالح استفاده شده بود از ۲ نمونه مکعبی ۷ روزه و ۲ نمونه مکعبی ۲۸ روزه برای تعیین مقاومت فشاری و یک نمونه برای تعیین زمان وب استفاده شد. در ادامه برای بررسی تأثیر مصالح ریزتراز الک ۲۰۰ که در درصدهای مختلف کنترل شد، علاوه بر نمونه‌های

جدول ۱. مشخصات مکانیکی سنگدانه‌های مصرفی

نوع سنگدانه	مشخصات	نتایج
درشت دانه: بادامی	وزن مخصوص	۲/۲۳۷ gr/cm ³
	وزن مخصوص ظاهری	gr/cm ³ ۲/۳۳۵
	جذب آب ۲۴ ساعته	٪۱
درشت دانه: نخودی	وزن مخصوص	۲/۳۲۵ gr/cm ³
	وزن مخصوص ظاهری	۲/۳۳۷ gr/cm ³
	جذب آب ۲۴ ساعته	٪۱
ریزدانه: ماسه شکسته	وزن مخصوص	۲/۱۴۹ gr/cm ³
	وزن مخصوص ظاهری	۲/۱۵۵ gr/cm ³
	جذب آب ۲۴ ساعته	٪۳/۱
ریزدانه: فیلر طبیعی	وزن مخصوص	۲/۰۷۰ gr/cm ³
	وزن مخصوص ظاهری	۲/۱۰۰ gr/cm ³
	جذب آب ۲۴ ساعته	٪۳

جدول ۲. نتایج آزمایشهای مکانیکی سیمان تپ ۲ تهران

وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۱۱
سطح مخصوص (cm ² /gr)	۳۸۵۳
مقاومت فشاری ۷ روزه با ماسه استاندارد (Kg/cm ²)	۲۷۰
مقاومت فشاری ۲۸ روزه با ماسه استاندارد (Kg/cm ²)	۳۷۲
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۸۵
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۴۰

توپر فولادی به وزن ۲۲ کیلوگرم استفاده شد. این مجموعه بروی یک صفحه فولادی یکپارچه قرار گرفت به نحوی که همان وزن کل سربار تأمین شود. به دلیل وزن سنگین قالب به همراه بتن و سربار، کنترل صورت پذیرفت که دستگاه با فرکانس استاندارد ۵۰-۶۰ Hz ارتعاش کند و همچنین این نکته مد نظر بود که زمان تراکم برای این نمونه‌ها بیشتر از نمونه‌های مکعبی خواهد بود.

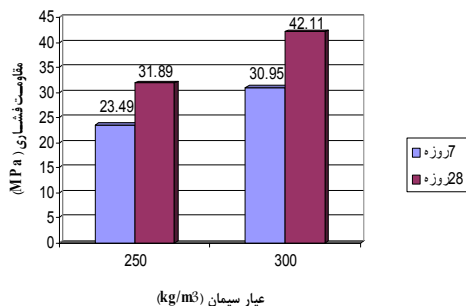
۲-۵ آزمایش نفوذپذیری

خصیصه نفوذپذیری می‌تواند یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های دوام روسازی‌ها باشد. این آزمایش برای نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ cm و براساس DIN1048 انجام پذیرفت. اساس آزمایش، عمق نفوذ آب تحت فشار پس از گذشت زمان مشخص است. متوسط عمق نفوذ پس از شکستن نمونه‌ها به صورت قطری اندازه‌گیری شده و با حدود مشخص شده در آیین‌نامه کنترل شد.

۳ نتایج آزمایش‌ها

۳-۱ تعیین عیار مصرفی سیمان

از متغیرهایی که در مقاومت فشاری و کارایی بتن معمولی تأثیرگذار است و در مورد بتن غلتکی نیز کنترل شد عیار سیمان بود [۱]. ابتدا بنابر توصیه‌های اجرایی در دیگر کشورها [۴] و توصیه ACI211 عیار سیمان ۲۵۰ kg/m³ انتخاب شد. از آنجا که تجربه‌های قبلی اجرای رویه‌های صنعتی و راه‌های دسترسی محلی به روش بتن غلتکی در کشور اکثراً با عیارهای بیشتر از ۲۵۰ kg/m³ بود، این امکان بررسی شد که آیا با انتخاب صحیح درصد مصالح مختلف و نسبت‌های اختلاط می‌توان عیار سیمان را به میزان قابل قبولی کاهش داد. به همین دلیل نمونه‌هایی با طرح اختلاط‌های مشابه و مقادیر مختلف سیمانی اعم از ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بررسی شد. شکل ۳ مقایسه مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده را نشان می‌دهد و شکل ۴ مقایسه میان زمان vebe این دو مخلوط است.



شکل ۳. مقایسه میان مقاومت فشاری با عیارهای متفاوت سیمان پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۷

مقاومت فشاری و زمان وب یک نمونه خمشی و یک نمونه نفوذپذیری نیز تهیه شد. ضمناً برای بررسی تأثیر فوق روان‌کننده‌ها از نمونه‌های فشاری ۷ روزه در مخلوطی که روانی و مقاومت فشاری در حد قابل قبول آیین‌نامه‌ای نداشت، استفاده شد. در این پروژه برای اختلاط از میکسر با ظرفیت ۳۰۰ لیتر و برای تراکم از میز وب اصلاح شده استفاده شد. چگونگی ساخت نمونه توسط این دستگاه در مرجع [۱۰] بیان شده است.

۲-۳ ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها به میزان ۳۰۰ کیلوگرم از هریک از مصالح سنگی تهیه شد. سیمان نیز به میزان ۳۰۰ کیلوگرم تیپ ۲ تهران در محل حفاظت شده نگهداری شد. قبل از ساخت هر مخلوط نیز رطوبت موجود در سنگدانه‌ها تعیین و سپس مصالح بر اساس طرح اختلاط توزین می‌شدند. قابل ذکر است که رطوبت در حالت اشباع با سطح خشک (S.S.D) تعیین و در طرح اختلاط مورد نظر قرار گرفت. بتن در داخل قالبی که به میز ویبره کاملاً محکم بسته شده بود، در سه لایه حدوداً ۵ سانتیمتری برای نمونه‌های فشاری و دو لایه حدوداً ۷ سانتیمتری برای نمونه‌های خمشی ریخته شده و تا تشکیل حلقه ملات در اطراف سربار عمل تراکم ادامه می‌یافت. شرح روش ساخت در مرجع [۱۰] آمده است. پس از اتمام ساخت، سطح نمونه با یک مال‌ه فلزی صاف شده و سپس به همراه قالب برای ۲۴ ساعت در اتاق عمل‌آوری با سطح پوشیده شده‌ای از پلاستیک قرار می‌گرفت. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و وزن و ابعاد آن ثبت می‌شد و برای ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در داخل تانک‌های آب مخصوص قرار داده می‌شد.

۲-۴ آزمایش مقاومت فشاری و خمشی

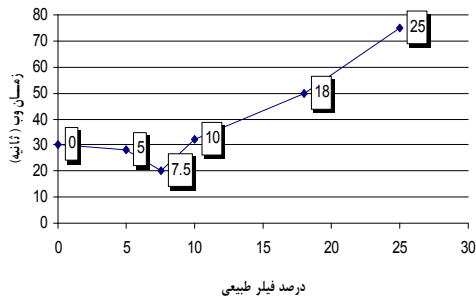
در آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ cm به دلیل شبیه‌سازی بهتر با رویه‌های بتنی استفاده شد [۸] و این آزمایش براساس استاندارد BS 1881part 116;1983 انجام پذیرفت.

برای ساخت نمونه‌های مقاومت خمشی از قالب منشوری ۱۵×۱۵×۶۵ سانتیمتری استفاده شد. برای این منظور نسبت سربار به سطح مشابه نمونه استوانه‌ای انتخاب شد و با توجه به سطح نمونه، وزن کل سربار برابر با ۴۵/۱۳ کیلوگرم به دست آمد. این سربار به دو قسمت تقسیم شده و برای هر قسمت از یک استوانه

با انجام آزمایش حدود اتربرگ مطابق مرجع [۱۳] مشخص شد که این مصالح دارای خاصیت غیر خمیری هستند. پس از بررسی کلیه نسبت ها، مناسب ترین روانی و بیشترین مقاومت فشاری به عنوان بهینه ترین درصد مصرف انتخاب شد. این مطلب در شکل های ۶ و ۷ نمایش داده شده است.

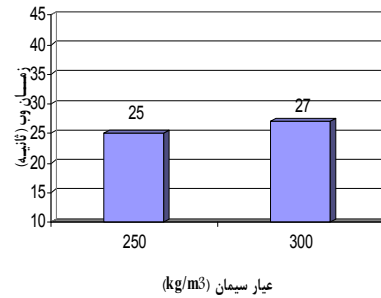


شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بر حسب درصد فیلر طبیعی مصرفی



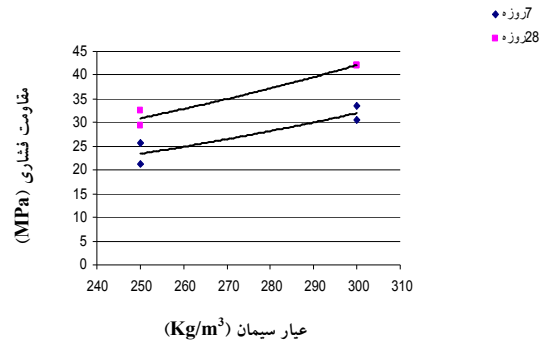
شکل ۷. تغییرات روانی بر حسب درصد مصرف فیلر طبیعی

مشاهده شد که بهینه درصد مصرف ریزدانه های غیر خمیری طبیعی (فیلر طبیعی) ۷/۵٪ بود. استفاده از ۷/۵٪ فیلر طبیعی سبب خروج به مقدار کمی از محدوده ارائه شده برای دانه بندی توسط مرجع [۱۰] خواهد شد (شکل ۸) و از طرفی افزایش مصرف فیلر طبیعی (مطابقت بیشتر با محدوده توصیه شده) از این مقدار سبب کاهش شدید مقاومت فشاری خواهد شد. همچنین مشاهده شد که ریزدانه های فیلر طبیعی در صورت کاربرد در درصد های مناسب سبب افزایش روانی (کاهش زمان vebe) می شوند. همچنین مخلوط های ساخته شده با درصد بهینه نیز یک مخلوط با ماتریس منسجم تری بوده و رویه نمونه های ساخته شده نیز حداقل تخلخل و خلل و فرج را دارا بود. آهنگ تغییرات دو مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مشابه است (شکل ۹).



شکل ۴. مقایسه میان زمان وب با عیارهای متفاوت سیمان

در شکل ۵ روند افزایش مقاومت برای دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه برای عیارهای مختلف سیمان نشان داده شده است.



شکل ۵. روند کسب مقاومت برای عیارهای متفاوت سیمان

مشاهده شد که افزایش عیار سیمان تأثیری بر زمان وب ندارد و همچنین افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت های فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه دیده نشد. بنابراین، این امکان وجود دارد که با انجام تراکم صحیح که خود حاصل عوامل مختلفی از جمله استفاده از درصد مناسب مصالح است، بتوان مخلوط هایی با عیارهای کم سیمان و مقاومت های زیاد ساخت. باید توجه شود که کاهش در میزان مصرف سیمان می تواند تأثیر به سزایی در بهبود شرایط اقتصادی پروژه داشته باشد [۳].

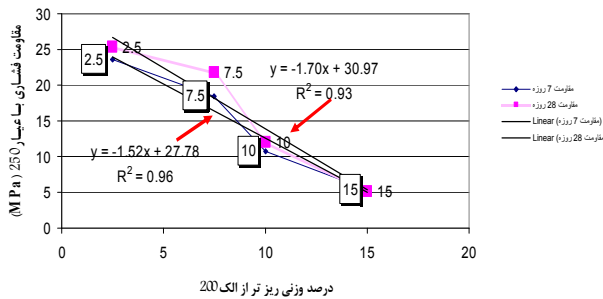
۲-۳ تعیین نسبت های بهینه فیلر طبیعی

بتن غلتکی به نسبت و نوع مصالح مصرفی حساس است و تغییر جزئی در مقدار مصرف مصالح می تواند سبب تغییرات در مشخصات این نوع بتن شود. به همین منظور ابتدا فیلر طبیعی در درصد های ۰، ۵، ۱۰ و ۲۵ وزنی کل مصالح سنگی در مخلوط بتن غلتکی بکار گرفته شد. سپس برای دستیابی به مقدار بهینه مصرف در درصد های ۷/۵ و ۱۸ درصد نیز ساخته شد.

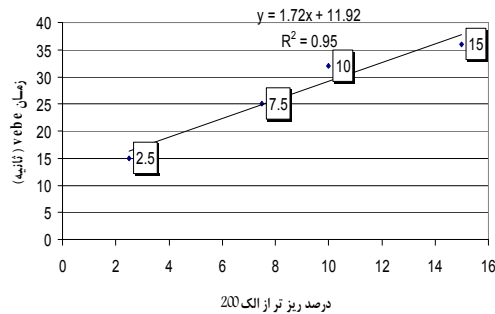
۳-۳ تعیین نسبت‌های بهینه مصالح ریزتر از الک ۲۰۰

۳-۳-۱ بررسی تأثیر مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در زمان وب و مقاومت فشاری

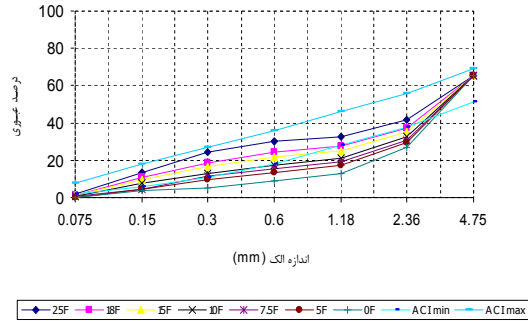
در این تحقیق برای بررسی تمیزی مصالح از معیار مقادیر سنگدانه‌های ریزتر از الک ۲۰۰ استفاده شد. مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ به طور عمده از مصالح سنگی بسیار ریز که بعضاً به دانه‌های درشت‌تر ماسه متصل هستند تشکیل یافته است. البته در این مصالح ذرات ریز رس نیز به چشم می‌خورد. کانی‌های رسی به علت ساختمان بلوری دارای نیروهای سطحی زیادی هستند و به علت همین نیرو، جذب آب زیادی دارند [۱۴]. بنابراین تعیین میزان خمیری بودن مصالح نیز ضروری به نظر رسید که پس از انجام آزمایش حدود اتر برگ در پروژه حاضر مشخص شد این مصالح دارای خاصیت غیر خمیری بودند. سپس مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در مخلوط‌هایی با ۷/۱۰/۲۰/۵/۵ و ۱۵ درصد وزنی مصالح ریزدانه با عیار 250 Kg/m^3 و 300 Kg/m^3 بکار گرفته شد. همان طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شود با افزایش درصد مصرف ریزدانه‌های ریزتر از الک ۲۰۰ روانی و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه کاهش می‌یابد.



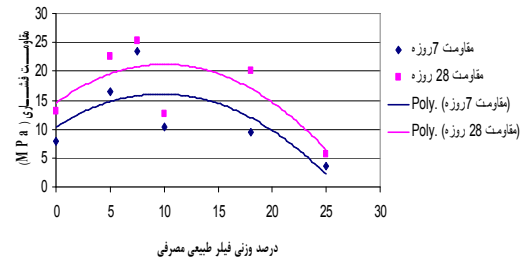
شکل ۱۰. تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برحسب درصدهای مختلف ریزتر از الک ۲۰۰ (عیار 250 Kg/m^3)



شکل ۱۱. تغییرات زمان وب برحسب درصدهای مختلف ریزتر از الک ۲۰۰



شکل ۸. مقایسه نمودار دانه‌بندی مخلوط‌های مختلف و نمودار استاندارد



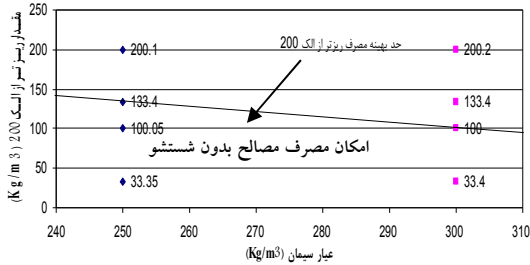
شکل ۹. تغییرات مقاومت ۷ و ۲۸ روزه برحسب درصد وزنی فیلر طبیعی

یکی از پارامترهایی که می‌تواند معیاری برای سنجش میزان تراکم انجام یافته باشد، وزن مخصوص نمونه‌هاست که در جدول ۴ ارائه شده است. با مقایسه دیده می‌شود که بیشترین وزن مخصوص در ۷/۵ درصد فیلر طبیعی حاصل شده است. مدل‌های اقتصادی تهیه شده در خصوص بتن‌های غلتکی نشان می‌دهد تعیین درصد مصرف صحیح فیلر در هزینه‌های ساخت و اجرای رویه‌های بتن غلتکی تأثیرگذار است [۳].

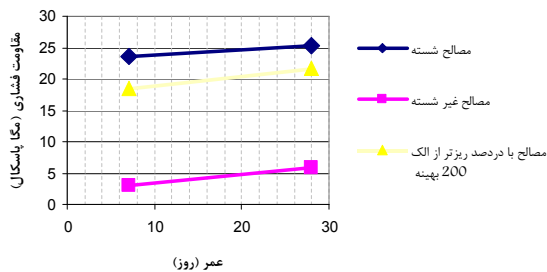
جدول ۴. وزن مخصوص در برابر تغییرات درصد فیلر طبیعی

درصد فیلر طبیعی	وزن نمونه (Kg)	وزن مخصوص (kg/m^3)
۲۵	۶/۸۰۶۸	۲۰۷۱/۶۱
۱۸	۷/۲۸۵۲	۲۲۱۷/۲۱
۱۵	۷/۱۹۶۸	۲۱۹۰/۳۱
۱۰	۷/۴۸۸	۲۲۷۸/۹۳
۷/۵	۸/۳۹۲۸	۲۵۵۴/۳۰
۵	۸/۱۱۲	۲۴۶۸/۸۴
۰	۷/۹۰۴	۲۴۰۵/۵۴

بدون شستشو مصرف کرد. شکل ۱۴ تفاوت میان مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها با مصالح کاملاً شسته و غیرشسته و با درصد فیلر بهینه را نشان می‌دهد. تحلیل‌های اقتصادی انجام شده نشان می‌دهد در صورت امکان مصرف مصالح غیرشسته در مخلوط‌های بتن غلتکی هزینه‌های تمام شده کار به خصوص در مناطق گرم و خشک به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۳،۹].

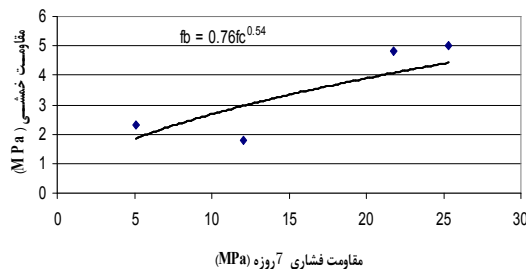


شکل ۱۳. تخمین فیلر بهینه برای عیارهای ۲۵۰ و ۳۰۰



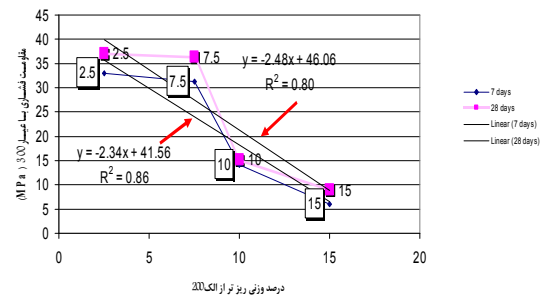
شکل ۱۴. تفاوت مقاومت فشاری میان نمونه با مصالح کاملاً شسته و غیر شسته و با درصد فیلر بهینه

۳-۲-۳ بررسی تأثیر مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در مقاومت خمشی درباره مقاومت خمشی نیز همان‌طور که در شکل ۱۵ آورده شده است بیشترین میزان‌های مقاومت مربوط به همان محدوده درصد‌های بهینه است. شکل ۱۶ نیز ارتباط متقابل مقاومت خمشی و مقاومت فشاری ۷ روزه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. نتایج مقاومت خمشی برحسب درصد‌های ریزتر از الک ۲۰۰

به نظر می‌رسد دلیل عمده کاهش مقاومت با افزایش ریزدانه‌های ریزتر از الک ۲۰۰، این مطلب است که سطح مخصوص سنگدانه‌ها و تمایل به جذب آب آنها افزایش می‌یابد که این امر سبب کاهش روانی مخلوط‌ها می‌شود، در نتیجه به دلیل عدم تراکم کافی (که ناشی از روانی نامناسب است) مقاومت کاهش خواهد یافت. همچنین توجه شود که در این حالت افزایش رطوبت مخلوط سبب افزایش در مقاومت نخواهد شد (به دلیل افزایش نسبت آب به سیمان و عدم تراکم کافی). شکل ۱۲ تغییرات مقاومت فشاری با عیار ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب را در مقابل تغییرات درصد مصرف مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. تغییرات مقاومت فشاری با عیار 300 Kg/m^3 برحسب مصرف مصالح ریزتر از الک ۲۰۰

مشاهده شد که روند تغییرات مقاومت در دو عیار 250 Kg/m^3 و 300 مشابه بوده و به گونه‌ای است که زمانی که مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در محدوده ۷/۵-۲/۵٪ باشند، بیشترین مقاومت حاصل می‌شود. نکته دیگری که در روند آزمایش‌ها مشاهده شد آن بود که در عیار 300 Kg/m^3 کاهش مقاومت از ۲/۵ تا ۷/۵ درصد آهنگ کمتری دارد و بعد از ۷/۵ درصد افت مقاومت شدت بیشتری پیدا می‌کند (به شیب خط‌ها توجه شود). دلیل این امر را می‌توان به این شکل بیان کرد که در این حالت بیشتر فضاهای خالی توسط دانه‌های بسیار ریزسیمان پر می‌شوند که این مطلب باعث می‌شود محدوده بهینه (۷/۵-۲/۵٪) مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ کوچک‌تر باشد و این به این معناست که با کاهش عیار سیمان می‌توان درصد ریزتر از الک ۲۰۰ و میزان غیر شستگی مصالح را افزایش داد.

در شکل ۱۳ محدوده دقیق‌تری برای شستگی و غیرشستگی مصالح مشخص شده است. به این ترتیب که در صورتی که مقدار مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در پایین حد بهینه قرار گیرد، می‌توان آنها را

۳-۳-۳ بررسی تأثیر مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در شکل

ظاهری رویه

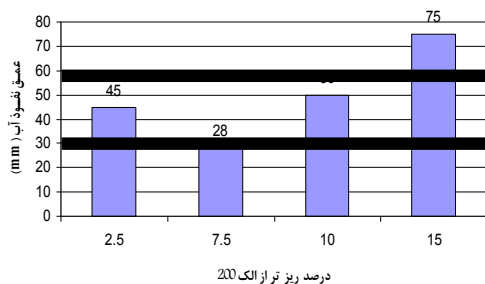
شکل ظاهری و سطح رویه نمونه‌ها در مواردی که تا حد بهینه ۷/۵٪ از مواد ریزدانه ریزتر از الک ۲۰۰ استفاده شده بود یک سطح هموار با حداقل فرورفتگی‌ها و خلل و فرج بوده و از زیبایی بیشتری برخوردار است (شکل ۱۷). این مطلب در کیفیت روسازی‌ها اهمیت شایانی دارد.



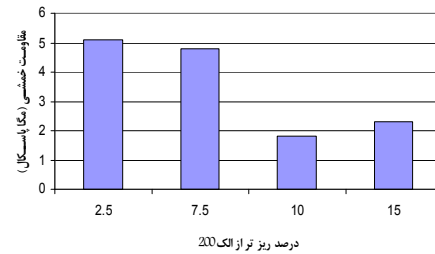
شکل ۱۷. شکل ظاهری نمونه‌ها

۳-۳-۴ بررسی تأثیر مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در نفوذپذیری

آزمایش نفوذپذیری آب مطابق استاندارد آلمان (DIN 1048) انجام پذیرفت که نتایج این آزمایش براساس عمق نفوذ آب برحسب میلیمتر گزارش می‌شود. شکل ۱۸ نتایج این آزمایش را برای درصدهای مختلف ریزتر از الک ۲۰۰ نشان می‌دهد. دو نوار مشکی محدوده مجاز طبق استاندارد آلمان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸. عمق نفوذ آب برحسب درصدهای مختلف ریزتر از الک ۲۰۰



شکل ۱۶. رابطه مقاومت خمشی و مقاومت فشاری ۷ روزه

روند تغییرات مقاومت فشاری و خمشی در مقابل تغییرات در درصد مصرف مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ حاکی از آن است که با افزایش ریزدانه ریزتر از الک ۲۰۰ تا یک حد بهینه ۷/۵٪، ماتریسی حاصل می‌شود که می‌توان بیشترین تراکم ممکن را به دست آورد. به همین سبب مقاومت‌های حاصل نیز مقاومت‌های قابل قبولی هستند. سپس با افزایش ریزدانه ریزتر از الک ۲۰۰ از این حد بهینه شاهد کاهش مقاومت‌های فشاری و خمشی هستیم که کمتر از حد توصیه شده (۱۵ مگاپاسکال) است. بنابراین در صورتی که با آزمایش دانه‌بندی و آزمایش عبوری از الک ۷۵ میکرون مشخص شد که مقدار مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ در محدوده ۲/۵ تا ۷/۵ درصد قرار دارد در آن صورت می‌توان از شستشوی مصالح صرف نظر کرد و انتظار داشت به مقاومت‌های قابل قبولی دست یابیم، البته باید میزان خمیری بودن مصالح نیز کنترل شود.

در آیین‌نامه ACI رابطه‌ای برای مقاومت خمشی (f_b) برحسب مقاومت فشاری (f_c) که در دسترس‌ترین و کاربردترین پارامترهای مشخصه بتن هستند ارائه شده است. این رابطه به شکل زیر است:

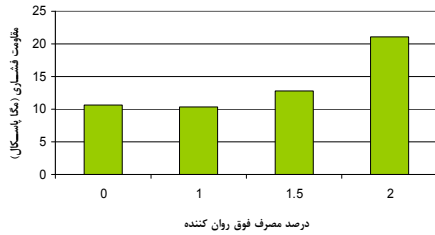
$$f_b = C(f_c)^{0.5} \quad C = 0.75 - 0.91 \quad (1)$$

همان‌طور که از شکل ۱۶ مشاهده می‌شود رابطه به دست آمده $f_b = 0.76(f_c)^{0.54}$ تطابق خوبی با رابطه پیشنهاد شده دارد.

جدول ۵ نیز نمایش‌دهنده میزان آب بکار رفته در ساخته سه نوع متفاوت مخلوط است، که این مطلب در مناطق گرم و خشک کشور اهمیت بسزایی دارد [۱۵].

جدول ۵. میزان آب بکار رفته در ساخت سه نوع مخلوط متفاوت

مصالح غیر شسته	مصالح با درصد ریزتر از الک ۲۰۰ بهینه	مصالح شسته	آب لازم برای یک متر مکعب بتن
۲۰۳	۱۶۳	۱۷۰	میزان آب مصرفی (Kg)



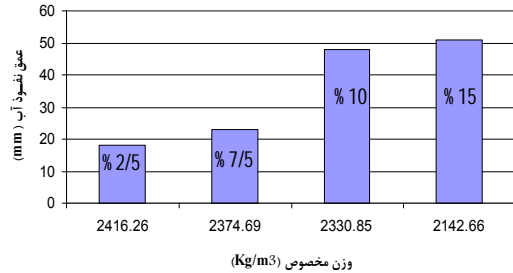
شکل ۲۱. روند تغییرات مقاومت فشاری با مصرف فوق روان کننده مشاهده شد که در اغلب موارد خارج ساختن نمونه‌ها علی‌رغم انجام روغن کاری قالب با سختی همراه بود، ولی در خصوص نمونه‌های ساخته شده با فوق روان کننده خارج کردن نمونه‌ها از قالب ساده تر انجام شد، که این مطلب می‌تواند در زمان اجرا و عدم ایجاد چسبندگی با کف تراک و یا بدنه تراک میکسر و یا تجهیزات نازک‌کاری با اهمیت باشد.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به حساسیت رفتاری بتن غلتکی به نسبت‌های اجزای تشکیل دهنده و در راستای فراهم آوردن بستری مناسب برای هر چه بیشتر اقتصادی کردن رویه‌های بتن غلتکی با حفظ مشخصات فنی، تحقیقاتی بر روی نسبت‌های بهینه مصالح تشکیل دهنده و افزودنی‌ها و همچنین بررسی امکان غیرشستگی آنها صورت گرفت که براساس بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده نتایج زیر قابل ارائه است:

۱. با انتخاب نسبت‌های صحیح از مصالح می‌توان از افزایش عیار سیمان جلوگیری کرد و با عیار در حد ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب نتایج قابل قبولی در محدوده آیین‌نامه‌ای گرفت.
۲. افزودن فیلر طبیعی، تأثیرات قابل توجهی بر مشخصات کارایی و مقاومتی بتن دارد و درصد مصرفی بهینه این مصالح در پروژه حاضر ۷/۵٪ وزنی مصالح ریزدانه است و حضور بیش از این مقدار سبب افت روانی و مقاومتی خواهد شد. آشکار است در پروژه‌های دیگر باید درصد بهینه به دست آید.
۳. میزان مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ تأثیر مستقیمی بر مشخصات بتن تازه (میزان روانی) و بتن سخت شده (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و نفوذپذیری و سطح رویه) دارد.
۴. در پروژه تحقیقاتی حاضر مشخص شد در صورتی که مقدار مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ بین ۷/۵-۲/۵٪ باشد، مصالح سنگی بدون شستشو در بتن غلتکی قابل مصرف است، البته به شرط آن که مصالح ریزدانه با خاصیت غیرخمیری باشند. این مطلب با کنترل شرایط کارگاهی در ساخت رویه‌های راه قابل کاربرد است.

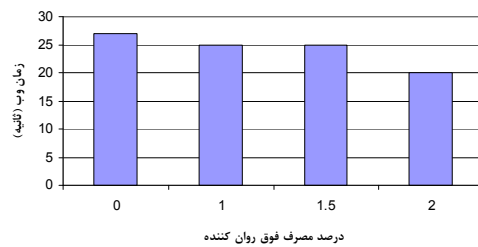
مشاهده شد که کمترین عمق نفوذ مربوط به درصد بهینه ریزدانه است و با افزایش مصرف ریزدانه ریزتر از الک ۲۰۰ به دلیل عدم امکان تراکم مناسب و ایجاد فضاهای خالی نفوذپذیری افزایش می‌یابد. از دیگر موارد قابل توجه ارتباط وزن مخصوص و عمق نفوذ است که این مطلب در شکل ۱۹ نشان داده شده است. به طور کلی مشاهده شد با افزایش وزن مخصوص که خود ناشی از تراکم مناسب‌تر است هم مقاومت فشاری، خمشی و هم نفوذپذیری بهبود می‌یابد.



شکل ۱۹. تغییرات وزن مخصوص و نفوذپذیری برحسب درصدهای مختلف ریزتر از الک ۲۰۰

۳-۴ بررسی تأثیر فوق روان کننده

همواره این سؤال مطرح بود که در بتن‌ها با اسلامپ صفر به دلیل رطوبت کم آیا مواد فوق روان کننده کاربرد دارد. به همین منظور در چهار درصد متفاوت (۱، ۵/۱ و ۲ درصد وزنی سیمان) از این ماده استفاده شد. در زمان ساخت مشاهده شد چنان که از روان کننده استفاده نشود، بتن در داخل مخلوط کن به دیواره و پرها و در پاره‌ای موارد به صورت توده به هم می‌چسبد، ولی در حالتی که از فوق روان کننده استفاده شود، بتن به صورت یکنواخت در داخل مخلوط کن به هم می‌خورد. همچنین با استفاده از فوق روان کننده زمان وب به دست آمده کاهش می‌یابد (شکل ۲۰). در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود با افزایش مصرف فوق روان کننده مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش روانی و بهبود تراکم نمونه‌ها است.



شکل ۲۰. روند تغییرات زمان وب با درصد فوق روان کننده

۵. شریفی، سید محسن، شکرچی‌زاده، محمد و فاخر، علی (۱۳۷۴) " اثر دوده سیلیس در ارتقای خواص بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه، " مجله بین‌المللی دانشگاه علم و صنعت، ص ۶۵-۷۳.

6. Hasani, A., Shekarchizadeh, M. and Akbarnejad, S. (2008) "Properties of roller compacted concrete containing a high-volume and low-volume non-plastic aggregates for pavements", TRB Annual Conference.

7. Katz, Amon and Baum, Hadassa (2006) "Effect of high levels of fines content on concrete properties", ACI Materials Journal 06, Nov.– Dec. 2006, pp. 474– 476.

۸. صدری، محمدرضا (۱۳۸۳) "بررسی برخی عوامل مؤثر بر طرح اختلاط بتن غلتکی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

۹. انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران (۱۳۸۵) " مطالعات امکان‌سنجی استفاده از رویه‌های بتن غلتکی در شرایط جزیره کیش " ص. ۱-۵۰.

10. ACI Committee 211 (1997) "Guide for selecting proportions for No-ump concrete", ACI 211.3R-97.

11. ASTM C1176-92 "Standard practice for making roller compacted concrete in cylinder molds using vibrating table "

۱۲. رمضانپور، علی‌اکبر [و همکاران] (۱۳۸۳) "زیر ساختار و خواص اجزای بتن (تکنولوژی پیشرفته بتن)"، تهران: انتشارات دانشگاه امیر کبیر.

13. ASTM D 4318-95a "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils"

14. Schmertmann, J.H. (1953) " Undisturbed consolidation behavior of clays," Transportation, American Society of Civil Engineers, Vol. 120, p.556

15. PCA (2004) "Guide specification for construction of roller compacted concrete pavements", Portland Cement Association, June 2004,17p.

پانویس

1- Portland Cement Association

۵. با افزایش عیار سیمان، دانه‌های ریز سیمان جایگزین مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ می‌شوند و بنابراین در عیارهای کم سیمان امکان استفاده از درصد بیشتر از مصالح غیر شسته بیشتر است. به این ترتیب که در عیارهای کمتر از ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب محدوده بهینه ۷/۵-۲/۵٪ از مصالح ریزتر از الک ۲۰۰ افزایش می‌یابد.

۶. می‌توان با استفاده از درصد بهینه مصالح، مقدار آب مصرفی را تا حد قابل توجهی کاهش داد. این امر در کارگاه‌های مناطق گرم اهمیت دارد.

۷. فوق روان‌کننده‌ها در مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی بیش از درصد بهینه ریزتر از الک ۲۰۰، سبب بهبود مشخصات بتن تازه و سخت شده شد که این مطلب می‌تواند به عنوان راه‌حلی برای مصالح غیر شسته، با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی باشد.

۸. محدودیت‌های مراجع در زمینه مقاومت فشاری و خمشی برای مخلوط‌های حاوی ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب ارضا شد و ارتباط به دست آمده بین مقاومت فشاری و خمشی با رابطه ارائه شده ACI تطابق دارد.

۵. سپاسگزاری

از مدیران مجتمع تولیدی تحقیقاتی ایران فریمکو، به ویژه آقایان کیهانی و مهندس خطیبی به دلیل حمایت از این تحقیق و همچنین کمک‌های انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

۶. مراجع

1. ACI Committee 325 (1995) "Report on roller compacted concrete pavements", ACI, 325.10R-95.

2. USACE (1994) "Roller compacted concrete" Technical Engineering and Design Guides as adapted from the U.S Army Corps of Engineers, No5.

۳. اکبرنژاد، صادق (۱۳۸۶) "مطالعه رفتار مکانیکی بتن غلتکی با مصالح ریزدانه غیرخمیری برای کاربرد در روسازی‌های بتنی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش راه و ترابری، نگارش: صادق اکبرنژاد، راهنما: ابوالفضل حسینی، مشاور: محمد شکرچی‌زاده، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۱۳۸۶.

4. Ville De Montréal (2002) "Béton compacte au rouleau (BCR)" Service de l'Environnement, DE LA Division Des Laboratoires. June 2002. p15.