

کد F

410-2F

مروری بر مبانی طراحی و ویژگی‌های روسازی بتن غلتکی

دکتر محمد شکرچی‌زاده

سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

دکتر مهدی چینی

کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

زهرا اصلانیان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، مؤسسه آموزش عالی روزبهان*

*zahraaslanian@yahoo.com

چکیده:

پس از استفاده موفقیت آمیز بتن غلتکی در کارهای سازه‌ای حجیم مانند سدسازی و با توجه به ویژگی این بتن در کسب مقاومت زیاد به‌ویژه در سنین کم، توجه کارشناسان به سوی استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی معطوف گردید. روسازی‌های بتن غلتکی (RCCP) ترکیبی از جنبه‌های مختلف مصالح روسازی بتنی به همراه برخی از وجوه ساخت و اجرای روسازی‌های آسفالتی است. ویژگی اصلی روسازی بتن غلتکی، کیفیت و خواص بسیار بهتر آن نسبت به رویه آسفالتی و صرفه‌جویی‌های اقتصادی‌ای می‌باشد که در اثر استفاده از آن ایجاد می‌شود. بعلاوه، RCCP نیازی به قالب‌بندی و پرداخت ندارد و می‌توان در آن از میلگرد اتصال، میل‌مهارها و آرماتورگذاری استفاده نکرد.

در این مقاله به بررسی اجمالی مبانی تعیین طرح مخلوط بتن غلتکی و ویژگی‌های مهم آن پرداخته شده و نتایج بدست آمده از تحقیقاتی که تاکنون در دنیا برای اصلاح و بهبود خواص بتن غلتکی انجام گردیده، ارائه می‌شود. همچنین، با توجه به نتایج محققان و تجربیات بدست آمده در کشور، راهکارهایی برای رفع چالش‌هایی که در کشور برای تولید و اجرای این نوع روسازی با آن مواجه هستیم ارائه می‌گردد.

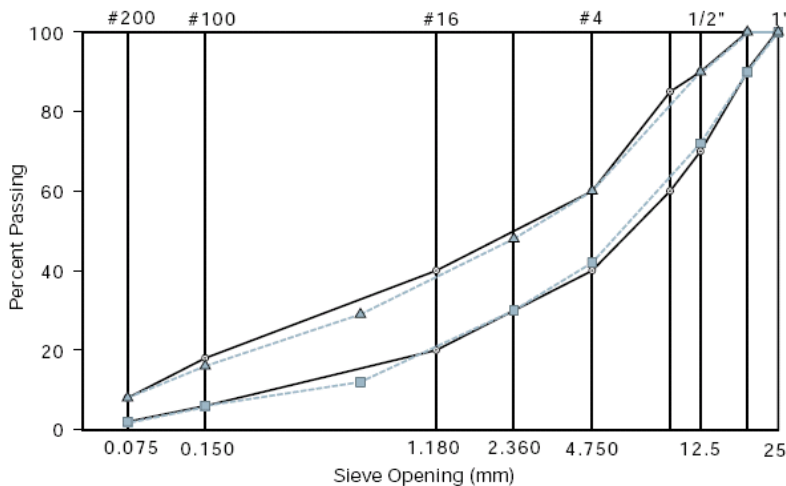
واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، طرح مخلوط، ویژگی‌ها

۱- مقدمه

علت نامگذاری بتن غلتکی^۱ (RCC) بدلیل غلتک‌های فولادی لرزنده بزرگ^۲ و غلتک‌های چرخ‌لاستیکی^۳ است که برای تراکم آنها استفاده می‌شود. خواص مقاومتی و اجزای اصلی بتن غلتکی (سنگدانه‌های خوب دانه‌بندی شده، مصالح سیمانی و آب) مشابه بتن معمولی است ولی طرح اختلاط آن با بتن معمولی متفاوت است. بتن غلتکی تازه، خشک‌تر از بتن معمولی با اسلامپ صفر است. بتن غلتکی باید به‌حدی سفت و خشک باشد که بتواند وزن غلتک‌ها را تحمل کند و به‌اندازه‌ای مرطوب باشد که به‌خوبی مخلوط شود و خمیر آن بین سنگدانه‌ها، به‌طور یکنواخت و بدون جداشدگی سنگدانه‌ها^۴ پراکنده شود. بتن غلتکی معمولاً توسط دستگاه‌های متداول آسفالتی (فینیشر)^۵ پخش و پس از آن توسط غلتک و بیره‌ای کوبیده و متراکم می‌گردد. برخلاف روسازی بتنی معمولی، روسازی بتن غلتکی بدون نیاز قالب‌بندی ساخته می‌شود و می‌توان در آن از میلگرد اتصال^۶ یا آرماتورهای مسلح‌کننده استفاده نکرد. روسازی‌های بتن غلتکی ترکیبی از جنبه‌های مختلف مصالح روسازی بتنی به همراه برخی از وجوه ساخت و اجرای روسازی‌های آسفالتی است که بطور اجمالی در جدول ۱ به آنها اشاره شده است. با وجود اینکه روش تراکم و دانه‌بندی سنگدانه‌های روسازی‌های بتن غلتکی (شکل ۱)، مشابه روسازی‌های آسفالتی است، ویژگی‌های مصالح و عملکرد سازه‌ای آن مشابه روسازی بتن معمولی است [۱].

جدول ۱- وجوه مشترک بتن غلتکی با روسازی بتنی و روسازی آسفالتی

| روسازی آسفالتی | روسازی بتنی معمولی |
|--------------------------|-----------------------------------|
| دارای دانه‌بندی مشابه | مصالح یکسان با نسبت اختلاط متفاوت |
| عملیات پخش و تراکم مشابه | الزامات عمل‌آوری مشابه |



شکل ۱- دانه‌بندی ویژه برای بتن غلتکی (خط توپر) مشابه دانه‌بندی لایه میانی آسفالت (خط چین) [۱]

¹ Roller-compacted concrete
² heavy vibratory steel drum
³ rubber-tired rollers
⁴ segregation
⁵ asphalt-type paver
⁶ dowels

۲- کاربردهای روسازی بتن غلتکی [۱]

روسازی بتن غلتکی یک انتخاب اقتصادی به همراه امکان ساخت سریع برای بسیاری از کاربردها محسوب می‌شود. از موارد کاربرد آن می‌توان به جاده‌های دسترسی به کارخانه‌های صنعتی و پارکینگ‌ها، محوطه‌های کشتیرانی، بندرگاهها و محوطه‌های باراندازها، ترمینال‌های کامیونها و باربری‌ها، محوطه‌های انبار اجسام سنگین، جاده‌های شهری با ترافیک کم و جاده‌های روستایی، محوطه‌های پارک هواپیماها، محوطه‌های نگهداری از وسایل نقلیه یا محوطه‌های زباله‌ها، پارکینگ‌های تجاری بزرگ، سواره‌روهای پارکینگ‌های عمومی، شانه‌های بزرگراهها، خطوط عبور موقتی که باید سریع برای عبور و مرور وسایل نقلیه ساخته شوند و اتوبانها در صورت استفاده ترکیبی با لایه رویی آسفالتی اشاره کرد.

اصلی‌ترین مزیت بتن غلتکی آن است که دارای قابلیت ساخت سریع‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر از روسازی‌های بتن معمولی و آسفالتی چندلایه است. صرفه‌جویی‌های اقتصادی‌ای که در اثر استفاده از بتن غلتکی در مقایسه با رویه بتنی معمولی ایجاد می‌شود عمدتاً می‌توان به کاهش درصد سیمان، کاهش هزینه‌های قالب‌بندی و بتن‌ریزی و کاهش زمان ساخت اشاره کرد. بعلاوه، در بتن غلتکی می‌توان از میلگرد اتصال، میل‌مهارها و آرماتورگذاری استفاده نکرد. همچنین درصد خمیر کمتر بتن غلتکی باعث جمع‌شدگی کمتر شده و ترک‌خوردگی‌های ناشی از تنش‌های جمع‌شدگی را کاهش می‌دهد. بعلاوه، روسازی بتن غلتکی را می‌توان طوری طراحی کرد که دارای مقاومت‌های خمشی، فشاری و برشی بیشتری باشد که به آن امکان تحمل بارهای بزرگتر تکرار شونده را می‌دهد، بدون آنکه دچار گسیختگی گردد. همچنین دلیل نفوذپذیری کم آن، روسازی بتن غلتکی دوام بسیار خوبی داشته و در برابر حملات شیمیایی و محیطی مانند شرایط ذوب و انجماد مقاومت می‌کند. داشتن چنین ویژگی‌هایی باعث می‌گردد که روسازی بتن غلتکی در محوطه‌های صنعتی که در آنها بارگذاری نقطه‌ای ناشی از پشت‌گیرهای تریلرها مدنظر می‌باشند، دارای مقاومت در برابر چرخش خوبی باشد. مقاومت سایشی روسازی بتن غلتکی حتی تحت بارگذاری‌های سنگین و حجم زیاد ترافیک مشابه روسازی بتن معمولی است. دلیل رنگ روشن سطح روسازی‌های بتن غلتکی، الزامات روشنی سطح پارکینگ‌ها و انبارها را تأمین می‌کند. وسایل نقلیه‌ی سبک مانند ماشین‌ها و کامیون‌های سبک می‌توانند با سرعت پایین روی روسازی‌های بتن غلتکی به‌محض تمام شدن عملیات ساخت آن بدون ایجاد خرابی رفت و آمد کنند. بتن غلتکی حتی بدون استفاده از افزودنی حباب‌زا، دوام زیادی در برابر شرایط ذوب و انجماد دارد.

از مهمترین محدودیت‌های روسازی بتن غلتکی آن است که بدون استفاده از الماسه سنگ‌زنی^۷ و پرداخت سطح روسازی بتن غلتکی^۸، نمی‌توان از آن برای روسازی‌های حامل ترافیک‌های با سرعت زیاد استفاده کرد. در هنگام اجرا برای اطمینان از ایجاد چسبندگی کافی بین لیفت‌های افقی چندگانه و دالهای مجاور باید طی یک ساعت عملیات بتن‌ریزی انجام شوند، در غیر اینصورت درزهای سرد تشکیل می‌شوند. همچنین، دلیل درصد آب نسبتاً کم، ساخت روسازی بتن غلتکی تحت شرایط آب و هوایی گرم به مراقبت بیشتری نیاز دارد تا از تبخیر آب جلوگیری شود.

۳- طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی

همانقدر که انتخاب مصالح مناسب برای داشتن یک مخلوط بتن غلتکی باکیفیت ضروری است، تعیین یک نسبت اختلاط مناسب نیز ضروری می‌باشد. روش طرح اختلاط نباید با استفاده از روش آزمایش و خطا بدست آید، بلکه باید به این منظور یک رویکرد علمی و سیستماتیک را در پیش گرفت که خواص مهندسی، الزامات ساخت و اقتصادی مطلوب را لحاظ می‌کند. روش‌هایی که

⁷ diamond grinding

⁸ RCC's profile and smoothness

به منظور تعیین نسبت‌های طرح اختلاط بتن غلتکی گسترش یافته‌اند با توجه به دیدگاه بکار رفته در تعیین نسبت اختلاط توسط آنها، به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱- روش تراکم خاک^۹: تعیین نسبت‌های طرح اختلاط با استفاده از روش خاکی (دیدگاه خاکی).

۲- روش روانی و کارایی^{۱۰}: تعیین نسبت‌های طرح اختلاط با استفاده از روش تعیین کارایی (دیدگاه بتنی). [۳]

صرفنظر از روش بکار رفته، اهداف اصلی تولید مخلوط بتن غلتکی نخست آن است که دارای حجم کافی خمیر برای پوشاندن سنگدانه‌ها و پرکردن حفرات بین آنها باشد؛ دوم آنکه قادر به تولید مقاومت مکانیکی^{۱۱} و خواص الاستیکی^{۱۲} مورد نظر باشد؛ سوم آنکه مشخصات کارایی آن به گونه‌ای باشد که رسیدن به چگالی مورد نیاز را راحت و ممکن سازد و چهارم آنکه دارای دوام کافی برای تحمل شرایط محیطی موجود باشد [۱].

۳-۱- الزامات مصالح در تعیین نسبت اختلاط بتن غلتکی

مصالح اصلی موجود در طرح اختلاط بتن غلتکی مشابه سایر بتن‌ها، سنگدانه‌ها (شن و ماسه)، مصالح چسبنده (سیمان و مواد جایگزین آن) و آب می‌باشد. گاهی اوقات بر حسب شرایط از افزودنی‌ها نیز استفاده می‌شود. به طور کلی انتخاب و استفاده از این مصالح بر اساس مقاومت مکانیکی و دوام مورد نیاز بتن غلتکی صورت می‌گیرد [۳]. در ضمن، نوع بتن غلتکی نیز محدودیت‌هایی برای مصالح مصرفی از جمله در بزرگترین بعد سنگدانه مصرفی ایجاد می‌کند. نکته قابل توجه این است که از بتن معمولی حتی در صورت تغییر طرح اختلاط آن به صورت تغییر در مقدار سیمان و ریزدانه‌ها و درشت‌دانه، کاهش میزان آب، تغییر در نسبت آب به سیمان و افزایش سنگدانه‌های نرم، نمی‌توان به عنوان بتن غلتکی استفاده کرد [۱]. در ادامه ویژگی‌های مورد نیاز برای هرکدام از این مصالح به منظور استفاده در بتن غلتکی بیان شده است.

۳-۱-۱- سنگدانه‌ها

برای ساخت بتن غلتکی باید از سنگدانه‌های خوب دانه‌بندی شده استفاده شود تا درصد خمیر مورد نیاز را بهینه کند، فضای حفرات را به حداقل برساند، جاداشدگی را کاهش دهد و سطحی متراکم، صاف و محکم از بتن غلتکی را ایجاد کند. معمولاً مخلوط‌های بتن غلتکی مطابق شکل ۲ نسبت به بتن معمولی به درصد‌های بیشتری از ریزدانه نسبت به درشت‌دانه‌ها نیاز دارند. سنگدانه‌های بتن غلتکی باید الزامات کیفیت سنگدانه‌های اشاره شده در استاندارد ASTM C33 را برآورده کنند [۲ و ۱]. سنگدانه مصرفی در بتن غلتکی به طور کلی بیشترین (حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد) فضا را در بتن به خود اختصاص می‌دهد. از این رو مشخصات آن باعث تغییرات بسیار زیادی در خصوصیات بتن چه قبل و چه بعد از گیرش آن می‌شود [۳]. تحقیقات نشان می‌دهند که امکان استفاده از سنگدانه‌های نشسته در مخلوط‌های RCCP با رعایت برخی محدودیت‌ها وجود دارد. همچنین به کمک فیلرهای طبیعی می‌توان خواص مکانیکی RCCP را بهبود بخشید [۳۶].

⁹ Soil compaction approach

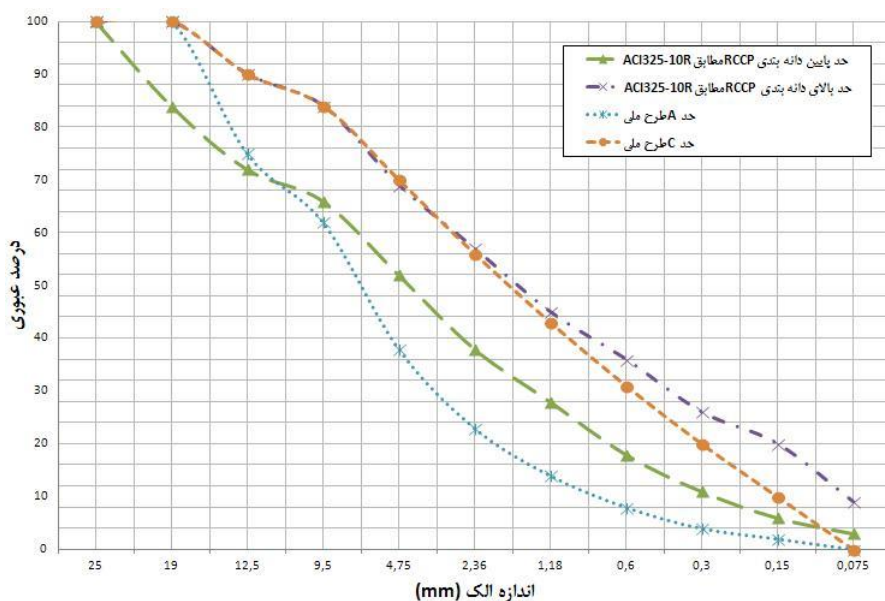
¹⁰ Consistency or workability approach

¹¹ mechanical strength

¹² elastic properties

الف- درشت‌دانه: بدلیل درصد آب کم بتن غلتکی، خطر جداسدگی در آن زیاد است. به‌منظور به حداقل رساندن جداسدگی طی جابجایی و بتن‌ریزی بتن غلتکی و دستیابی به یک سطح صاف، بزرگترین قطر اسمی درشت‌دانه مصرفی برای بتن غلتکی ۱۹ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود [۴].

ب- ریزدانه: چنانچه درصد ریزدانه از میزان توصیه شده برای بتن‌های معمولی بیشتر شود احتمال وقوع جداسدگی طی جابجایی و بتن‌ریزی کاهش می‌یابد [۱]. افزایش نسبت ریزدانه در مخلوط منجر به نیاز به آب بیشتر برای حفظ روانی می‌گردد که طبق گزارش‌های موجود، افزایش درصد آب روی مقاومت فشاری، در درصد مصالح سیمانی ثابت، تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد [۷و۶]



شکل ۲- مقایسه محدوده دانه‌بندی ویژه RCCP مطابق ACI325.10R و بتن معمولی مطابق طرح ملی بتن ایران

این‌طور به نظر می‌رسد که بدلیل نسبت بسیار کم آب به مصالح سیمانی و درصد تراکم زیاد، صرفنظر از درصد مصالح سیمانی، با افزایش درصد ریزدانه‌های غیرخمیری، مقاومت مکانیکی بتن غلتکی افزایش می‌یابد. طبق نتایج تحقیقات برخی محققین، سنگدانه‌های حاشیه‌ای^{۱۳} (مانند شیل، گری راک، ماسه بادی، سیلت و رس) در مقایسه با سنگدانه‌های استاندارد به درصد مصالح سیمانی بیشتری برای رسیدن به مقدار مقاومت مشخص نیاز دارند [۸].

پ- دانه‌بندی: میزان ملات (خمیر) سیمان موردنیاز در طرح اختلاط نیز تحت تأثیر دانه‌بندی و شکل سنگدانه‌ها می‌باشد. محدوده دانه‌بندی توصیه شده توسط ACI 325.10R در جدول ۲ آمده است [۳].

جدول ۲- محدوده دانه‌بندی توصیه شده برای استفاده در طرح اختلاط روسازی‌های بتن غلتکی

| اندازه الک (mm) | | ۰/۰۷۵ | ۰/۱۵ | ۰/۳۰ | ۰/۶۰ | ۱/۱۸ | ۲/۳۶ | ۴/۷۵ | ۹/۵ | ۱۲/۵ | ۱۹ | ۲۵ |
|-----------------|----------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|
| درصد | حد پایین | ۲ | ۶ | ۱۱ | ۱۸ | ۲۸ | ۳۸ | ۵۱ | ۶۶ | ۷۲ | ۸۳ | ۱۰۰ |
| | حد بالا | ۸ | ۱۸ | ۲۷ | ۳۶ | ۴۶ | ۵۶ | ۶۹ | ۸۵ | ۹۳ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |

¹³ marginal aggregates

دانه‌بندی سنگدانه‌ای را می‌توان با انتخاب مناسب نسبت درشت‌دانه‌ها و ریزانه‌ها تأمین کرد. بعلاوه، استفاده از سنگدانه‌های ریزتر از الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر) در صورت غیرپلاستیک بودن، در جهت کاهش فضاهای خالی بین سنگدانه‌های مناسب است.

۳-۱-۲- مصالح سیمانی

مصالح سیمانی بکار رفته باید الزامات مقاومت و دوام را برآورده کنند. مصالح چسبنده‌ای که در ساخت روسازی‌های بتن غلتکی بکار می‌روند عبارتند از سیمان پرتلند معمولی یا سیمان هیدرولیکی مخلوط شده^{۱۴}، روبراه‌های بدست آمده از کوره‌های آهن‌گدازی^{۱۵}، پوزولان‌های طبیعی و پوزولان‌های مصنوعی. انتخاب نوع سیمان بر اساس مقاومت طرح و سنی که این مقاومت باید تأمین شود، انجام می‌گیرد [۳]. در مواقعی که خاک بستر دارای سولفات باشد، می‌توان از سیمان ضدسولفات در طرح اختلاط استفاده کرد. آنچه به‌عنوان پوزولان در اینجا نام برده می‌شود همان پوزولان‌های طبیعی هستند که در استاندارد ASTM C618 در طبقه‌بندی N قرار می‌گیرند [۵]. خاکسترهای آتشفشانی، پومیس‌ها، توف‌ها، خاک‌های دیاتومه و در مواردی مواد طبیعی فرآوری شده مانند رس‌ها و شیل‌های کلسیته شده، جزو این دسته از پوزولان‌ها می‌باشند. نکته‌ای که در انتخاب پوزولان باید به آن توجه داشت، نقش پوزولان در بتن و دسترسی محلی به آن می‌باشد. از طرفی دیگر، استفاده از پوزولان در بتن باید منطبق با استانداردها و مشخصات اجرایی باشد [۳ و ۸]. لازم به ذکر است، در مکان‌هایی که دسترسی به پوزولان راحت و امکان‌پذیر است، می‌توان از پوزولان به‌عنوان بخشی از ریزدانه‌ها که در جهت کاهش فضاهای خالی بین سنگدانه‌های مناسب است استفاده کرد.

علاوه بر پوزولان‌ها، سرباره (روباره) کوره‌های آهن‌گدازی دانه‌ای آسیاب‌شده که از فرآورده‌های جانبی صنایع تولید آهن می‌باشد نیز در پروژه‌های بتن غلتکی کاربرد دارد. این ماده دارای مواد سیلیسی، آهنی و آلومینی بوده و علاوه بر خواص پوزولانی دارای خواص چسبندگی نیز می‌باشد و به همین دلیل از آن می‌توان به‌جای بخشی از سیمان در طرح اختلاط استفاده کرد.

خاکستریادی، معمولاً در صورت استفاده از ۱۵ تا ۲۰ درصد مجموع مصالح چسبنده را در بر می‌گیرد [۸]. خاکستر بادی بر خواص بتن قبل و بعد از گیرش اثرگذار است. بطوری‌که کارایی، مقاومت و افت بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آنها را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این خاکستر بادی دمای هیدراته شدن، نفوذپذیری و تخلخل بتن را کاهش داده و مقاومت خوردگی بتن را افزایش می‌دهد [۱۲]. همچنین استفاده از خاکستر بادی روش مناسبی برای افزایش ریزدانه‌ها به‌منظور کمک به تراکم آن‌دسته طرح اختلاط‌هایی که به دانه‌بندی استاندارد ریزدانه‌ای نیاز دارند می‌باشد [۹ و ۸]. برخی محققین دریافته‌اند که با افزایش میزان خاکستر بادی در بتن غلتکی، مقاومت بتن به همراه مقاومت ویژه آن در سنین پایین کاهش می‌یابد؛ اما به تدریج با افزایش سن عمل‌آوری، مقاومت بتن و مقاومت ویژه آن افزایش می‌یابد. بطوری‌که، اثر خاکستر بادی روی بتن غلتکی بعد از ۷ روز، مثبت بوده و به تدریج افزایش می‌یافت؛ بطوریکه سهم آن روی مقاومت ۹۰ روزه حداقل به ۵۰ درصد می‌رسید. این موضوع بر مقاومت خمشی در مقایسه با مقاومت فشاری مشهودتر بود. از طرفی دیگر میزان زیاد خاکستر بادی در جهت کاهش فضاهای خالی داخل بتن، بویژه فضاهای خالی مضر می‌باشد [۱۰]. مخلوط‌هایی که در آنها خاکستر بادی جایگزین سیمان می‌گردد، افزایش درصد خاکستر بادی باعث کاهش مقادیر مقاومت فشاری، کششی دو نیم شدن و خمشی در تمامی سنین تا ۱۸۰ روزه می‌گردد. از طرف دیگر، هنگامی که خاکستر بادی جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها می‌گردد، با افزایش درصد خاکستر بادی مقادیر مقاومت‌های مخلوط‌ها در تمامی سنین نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. [۱۱]

در ایران خاکستر بادی تولید نمی‌گردد، اما پوزولان طبیعی بصورت خاکستر آتشفشانی، پومیس، توف و خاک دیاتومه در نواحی مختلف کشور یافت می‌شود. بررسی‌های انجام شده روی خواص این پوزولان‌ها در بسیاری از موارد حاکی از قابل قبول بودن این

¹⁴ Blended Hydraulic Cement

¹⁵ Ground Granulated Blast Furnace

پوزولان‌ها به منظور استفاده در طرح اختلاط می‌باشد. بطوری که طی بررسی‌های برخی محققین، استفاده از دوده سیلیس کارایی را کاهش می‌دهد، ولی استفاده از پومیس کارایی بتن غلتکی را افزایش می‌دهد. در مقابل، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر یخبندان را کاهش می‌دهد. [۱۲] بر اساس نتایج تحقیقات انجام گرفته، افزودن ژل میکروسیلیس باعث افزایش آب مخلوط برای حفظ روانی می‌گردد؛ همچنین نفوذپذیری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس پس از ۹۰ روز بهبود می‌یابد که دلیل آن پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون است [۱۳]. همچنین محققین دریافتند که افزودن ژل میکروسیلیس بطور قابل ملاحظه‌ای موجب اصلاح مشخصات مکانیکی RCCP گردیده و موجب سهولت رسیدن به شرایط مورد نیازی که استاندارد ACI325.10R برای روسای‌های بتن غلتکی ملزم ساخته، می‌گردد [۳۵ و ۳۷].

۳-۱-۳- افزودنی‌های شیمیایی

از افزودنی‌های شیمیایی مختلفی مانند کاهنده‌های آب^{۱۶}، کندگیرکننده‌ها^{۱۷}، تندگیرکننده‌ها^{۱۸} و فوق روان کننده‌ها^{۱۹} می‌توان در مخلوط بتن غلتکی به منظور بهبود چسبندگی مخلوط و سرعت تخلیه بتن استفاده کرد. بدلیل طبیعت خشک مخلوط بتن غلتکی، مقدار مصرف افزودنی‌های شیمیایی در مخلوط‌های بتن غلتکی بطور کلی بیشتر از مخلوط‌های بتنی معمولی است [۱].

۳-۱-۴- الیاف‌ها

طرح استفاده از الیاف در بتن به حدود چهل سال پیش بر می‌گردد و طی این سال‌ها موارد استفاده از آن افزایش یافته است و کاربرد آن در بتن غلتکی که به خاطر انجام عملیات تراکم به وسیله‌ی غلتک، امکان میلگرد گذاری در آن وجود ندارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در همین راستا، تأثیر الیاف فولادی روی روسازی بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است که بر اساس آن اثر الیاف فولادی روی افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته فراتر از حد انتظار بود، بگونه‌ای که مقاومت کششی و خمشی بتن‌های الیافی مورد آزمایش حتی بعد از اولین ترک خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از الیاف در افزایش قابلیت شکل‌پذیری تأثیر بسزایی دارد. به طور کلی الیاف دخالتی در تراکم بدست آمده ندارد. علاوه بر این با استفاده از الیاف، مقاومت نهایی در مقایسه با مقاومت مربوط به اولین ترک خوردگی به وضوح افزایش یافت [۹]. همچنین طبق یافته‌های محققین، تأثیر الیاف فلزی بر افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن بیشتر می‌باشد. با افزایش الیاف فولادی، شاخص‌های طاقت نیز افزایش می‌یابد، چرا که با افزایش الیاف ضمن افزایش شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد [۱۴ و ۱۵].

۴- خواص بتن غلتکی

در حال حاضر، به جز روش ساخت نمونه‌های استوانه‌ای فشاری که در استاندارد ASTM C 1176 توضیح داده شده است [۳۷]، روش استاندارد مشخصی برای ساخت و آزمایش نمونه‌های بتن غلتکی در آزمایشگاه، مانند روش مشخصی جهت ساخت نمونه‌های خمشی بتن غلتکی و یا روش مشخصی برای انجام آزمایش‌های مربوط به دوام بتن غلتکی، وجود ندارد و محققین تا به اکنون از روش‌های مختلفی برای این کار استفاده کرده‌اند. از طرف دیگر، این موضوع که نمونه‌های بتن غلتکی بدون در نظر گرفتن روش بکار رفته برای ساخت آنها با یکدیگر مقایسه گردند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. با این وجود، معمولاً اطلاعات بدست آمده

¹⁶ water reducers

¹⁷ retarders

¹⁸ accelerators

¹⁹ superplasticizers

در زمینه خواص مکانیکی بتن غلتکی، بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش بر روی مغزه‌های^{۲۰} گرفته شده از روسازی‌های ساخته شده و یا نتایج بدست آمده از آزمایش مقاطع ساخته شده در مقیاس کامل^{۲۱} که در آزمایشگاه انجام شده است استوار است [۳]. اجرای بتن غلتکی از سرعت زیادی برخوردار است و بر حسب تعریف، لایه‌های اجرا شده بتن غلتکی پیش از گیرش کامل، توسط لایه‌های جدید پوشیده می‌شوند بنابراین، هیچگاه زمان کافی برای کنترل مشخصات مکانیکی بتن غلتکی در حین اجرا وجود ندارد. پس باید برای تمامی مراحل اجرا آزمایشهای متناسبی پیش‌بینی کرد [۳۳]. در ادامه، به بیان خواص مکانیکی و دوام مربوط به روسازی‌های بتن غلتکی بر اساس اطلاعات بدست آمده از پروژه‌های مختلف می‌پردازیم.

۴-۱- مقاومت فشاری^{۲۲}

جدول ۳ مقاومت فشاری نمونه‌های مغزه‌گیری شده از پروژه‌های اجرا شده در کانادا که چند سال از تاریخ ساخت آنها می‌گذرد را نشان می‌دهد. این اطلاعات مبتنی بر نتایج بدست آمده از تعداد محدودی نمونه می‌باشد که از هر پروژه مغزه‌گیری شده است [۳]. با توجه به آن، ملاحظه می‌شود که مقاومت‌های فشاری قابل قبولی با استفاده از بتن غلتکی می‌توان بدست آورد. بعلاوه، در مقایسه با بتن معمولی، برای میزان سیمان یکسان، تراز مقاومت فشاری بدست آمده در اینجا زیادتر می‌باشد [۳]. نکته‌ای که در خصوص بتن غلتکی باید در نظر داشت این است که مقاومت بتن غلتکی همانند بتن‌های معمولی به پارامتر نسبت آب به سیمان (W/C) نیز بستگی دارد. با کاهش W/C مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. البته موضوع اخیر با فرض کافی بودن درصد رطوبت جهت تراکم مطلوب بتن غلتکی است.

جدول ۳ - مقاومت فشاری مغزه‌های گرفته شده از پروژه‌های اجرا شده در کانادا

| پروژه | سن مغزه‌ها (سال) | درصد سیمان مصرفی | مقاومت فشاری (kg/cm^2) |
|--|------------------|---------------------|----------------------------|
| انبار درختان قطع شده کایسیوس (Caycuse) | ۴ | ۱ ^۱ و ۱۳ | ۲۹۶ |
| انبار درختان قطع شده کایسیوس | ۸ | ۱۳ | ۴۱۳ |
| بندر بارگیری لینترم (Lynterm) | ۳ | ۸ | ۳۳۰ |
| انبار درختان قطع شده در فراسرمیلز (Fraser Mills) | ۱ | ۱۳ | ۳۳۰ |
| معدن ذغال سنگ بالموس (Bullmoose) | ۱ | ۱۴ ^۲ | ۱۵۵ |
| اسکله شهر فراسر | ۱ | ۱۲ | ۳۲۱ |

۱- روسازی مذکور در دولایه ساخته شده است.. لایه فوقانی به ضخامت ۱۵۲ میلیمتر و دارای ۱۳ درصد سیمان بوده و لایه زیرین به ضخامت ۲۰۳ میلیمتر و دارای ۸ درصد سیمان می‌باشد.

۲- ۵۰ درصد میزان سیمان فوق شامل پوزولان طبیعی می‌باشد.

۴-۲- مقاومت خمشی^{۲۳}

از آنجایی که بریدن نمونه‌ها بصورت تیر از پروژه‌های روسازی ساخته شده با بتن غلتکی دشوار است، لذا اطلاعات زیادی در مورد مقاومت خمشی بتن غلتکی جاده‌ای در دسترس نمی‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های تیر مغزه‌گیری شده از چند روسازی که با استفاده از بتن غلتکی ساخته شده‌اند در جدول ۴ نشان داده شده است [۱۷]. این اطلاعات بر اساس تعداد محدودی

²⁰ Core

²¹ Full-Scale

²² Compressive strength

²³ Flexural strength

نمونه تیر می‌باشد که از هر پروژه مغزه‌گیری شده است. با توجه به تیرها و مغزه‌های بدست آمده از مقاطع مختلف، ملاحظه می‌شود که رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری در بتن غلتکی مشابه رابطه بین مدول گسیختگی و مقاومت فشاری در بتن معمولی می‌باشد [۱۶].

۴-۳- مقاومت کششی دو نیم شدن^{۲۴}

مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های مغزه‌گیری شده از پروژه‌های روسازی بتن غلتکی، با توجه به میزان مصالح چسبیده بکار رفته در طرح اختلاط آنها، در محدوده‌ای بین ۴۱٫۸-۲۸٫۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع قرار دارد. اندازه‌گیری مقاومت کششی با انجام آزمایش مقاومت کششی روی مغزه‌ها راحت‌تر و قابل اعتمادتر از اندازه‌گیری آن با استفاده از انجام آزمایش خمش روی تیرهای بریده شده می‌باشد. در جدول ۴ علاوه بر مقاومت خمشی تیرهای بریده شده، مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های مغزه‌گیری شده نیز آمده است [۱۸].

جدول ۴: مقاومت خمشی و مقاومت کششی بدست آمده از پروژه‌های ساخته شده با بتن غلتکی در امریکا [۱۷]

| پروژه | سن آزمایش (روز) | میانگین مدول گسیختگی (kg/cm^2) | میانگین مقاومت کششی (kg/cm^2) |
|--------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| پادگان استوارت (Ft. Stewart) | ۹۰ | ۷۱/۱ | - |
| پادگان هود (Ft. Hood) | ۷ | ۴۶/۵ | - |
| | ۲۸ | ۵۸/۴ | - |
| پادگان هاروی (Harvey Barracks) | ۷ | - | ۲۳/۸ |
| | ۲۸ | ۵۵/۱ | ۲۸/۲ |
| پادگان کمپیل (Ft. Campbel) | ۷ | ۴۵/۵ | ۲۸ |
| | ۲۸ | - | - |
| بندر آبردین (Aberdeen) | ۷ | ۳۹ | ۲۶/۷ |
| | ۲۸ | ۴۴/۲ | ۳۱/۸ |

۴-۴- مدول الاستیسیته

آزمایش تعیین مدول الاستیسیته عموماً روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده از پروژه‌های بتن غلتکی انجام نمی‌شود. آزمایش‌های محدود به نمونه‌های مغزه‌گیری شده از مقاطع آزمایشی که در مقیاس کامل ساخته شده‌اند نشان می‌دهند که مدول الاستیسیته بتن غلتکی با مدول الاستیسیته بتن معمولی، با میزان سیمان یکسان، برابری کرده با اندکی بیشتر است [۳].

۴-۵- پدیده خستگی

خستگی، یک پروسه در حال پیشرفت و دائمی تغییرات در داخل مصالح تحت تکرار تنش توسط نیروهای خارجی و یا تغییرات دما است. آزمایش‌هایی که به منظور بررسی اثر خستگی روی بتن غلتکی انجام شده‌اند محدود می‌باشند. تحقیقات گسترده‌ای که در برزیل در خصوص رفتار خستگی روسازی بتن غلتکی انجام گرفت، نشان دادند که این روسازی، دارای رفتار خستگی شبیه به روسازی بتنی است. البته می‌توان انتظار داشت که برای مقادیر درصد سیمان مشابه، روسازی RCCP دارای مقاومت بیشتر در

²⁴ Splitting tensile strength

برابر خستگی باشد؛ زیرا نسبت آب به سیمان در اینگونه مخلوطها بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. همچنین این تحقیقات نشان داده است که دانه‌بندی سنگدانه نقش نسبتاً مهمی در رفتار خستگی دارد. بطوری که مخلوط‌های با درصد درشت‌دانه بیشتر دارای مقاومت بهتری در برابر رشد ترکها نسبت به مخلوط‌های با سنگدانه ریزترمی‌باشد؛ بطوریکه شروع آن در حدود ۶۵٪ عمر خستگی است. همچنین با داشتن سیمان مشابه، تراکم مخلوط نقش مهمی روی رفتار خستگی بتن دارد و باید در هنگام اجرا به‌خوبی کنترل گردد تا عمر خستگی مورد نظر در پروژه حاصل شود. [۱۹ و ۲۰ و ۳۴]

۴-۶- مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای

یکی از خواص مهم بتن غلتکی، مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای آن می‌باشد. مقاومت چسبندگی مشخص می‌کند که آیا روسازی ساخته شده با بتن معمولی در چند لایه را می‌توان بصورت یک لایه منفرد در نظر گرفت یا اینکه بتن مذکور بصورت لایه‌هایی با چسبندگی جزئی یا بدون چسبندگی عمل می‌کند. آنچه مسلم است این است که ظرفیت انتقال بار لایه‌های دارای چسبندگی کم یا بدون چسبندگی، مشخصاً کمتر از ظرفیت انتقال بار مربوط به زمانی است که در اثر چسبندگی خوب بین لایه‌ای، لایه‌ها به‌صورت یک لایه واحد عمل می‌کنند. در محل درزهای سرد، مقاومت چسبندگی ایجاد شده کم می‌باشد. در بهترین حالت، مقاومت چسبندگی بتن در محل درز بین لایه‌ها باید حداقل ۵۰ درصد مقاومت بتن غلتکی مربوط به قسمت‌های اصلی لایه‌های موردنظر باشد، چرا که ساخت آنها بر اساس دستیابی به خواص مکانیکی دقیق انجام گرفته است [۸]. مطابق نتایج بررسی‌های برخی از محققین، استفاده از دوغاب سیمانی بین لایه‌ای در بتن غلتکی، زمینه‌ساز افزایش مقاومت بین‌لایه‌ای نسبت به حالت بدون دوغاب بوده و در صورت بکارگیری آن، با افزایش نسبت آب به سیمان دوغاب، مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات شرایط بین لایه‌ای، تأثیر محسوسی بر نتایج تغییر مکان برشی ندارد، در حالی که افزایش فشار نرمال میزان تغییر مکان برشی حداکثر را افزایش می‌دهد [۲۱].

۴-۷- دوام

با توجه به روش ساخت و بتن‌ریزی مربوط به بتن غلتکی، امکان وجود هوای زیاد در داخل طرح اختلاط بتن غلتکی در پروژه‌های اجرایی وجود ندارد. نمونه‌های بتن غلتکی مغزه‌گیری شده از پروژه‌های روسازی، وقتی تحت آزمایش یخ زدن و ذوب شدن قرار می‌گیرند، دوام خوبی را از خود نشان نمی‌دهند. اما این بدین معنی نیست که بتن غلتکی در محل کارگاه نیز دوام خوبی از خود نشان نمی‌دهند. بهترین روش برای ارزیابی دوام بتن غلتکی، بررسی آن تحت تأثیر چرخه‌های یخ زدن و ذوب شدن در عمل می‌باشد [۸]؛ اما با این وجود، تاریخ طولانی استفاده از این بتن در کانادا و در نواحی شمالی امریکا نشان از رضایت‌بخش بودن دوام این بتن دارد [۲۲]. برای انجام آزمایش ذوب و انجماد طبق برخی نتایج بدست آمده، روش B استاندارد ASTM C666 نسبت به روش A استاندارد ASTM C666، احتمالاً مقاومت در برابر ذوب و انجماد روسازی بتن غلتکی را با دقت بیشتری برآورد می‌کند. [۲۹]

محققین دریافته‌اند که عدم عمل‌آوری مناسب، افت مقاومت در حدود ۴۵ درصد و استفاده از ترکیبات عمل‌آوری افت مقاومت ۳۵ درصدی نسبت به عمل‌آوری مرطوب را به همراه دارد. همچنین، نحوه عمل‌آوری بر مقاومت خمشی بتن غلتکی نسبت به مقاومت فشاری تأثیر بیشتری دارد. تأثیر عمل‌آوری بر خصوصیات دوام بتن غلتکی از قبیل مقدار تخلخل، جذب آب و نفوذپذیری هم مشابه خصوصیات مکانیکی می‌باشد و عمل‌آوری مرطوب برای بتن غلتکی روسازی راه پیشنهاد شده است [۲۴ و ۲۵]. همچنین مطالعات برخی محققین نشانگر آن است که با کاربرد سیمان نوع V (ضد سولفات)، بتن‌های غلتکی روسازی دوام مناسبی در برابر محیط‌های سولفاتی خواهند داشت [۲۳ و ۲۶]. برخی محققین طی مطالعات خود دریافته‌اند که می‌توان در بتن غلتکی حباب هوا ایجاد کرد. منافذ هوای ایجاد شده مقاومت در برابر انجماد-ذوب را بهبود زیادی می‌بخشد. لازم به ذکر است که ایجاد حباب

هوا در مخلوط‌های کم‌سیمان نسبت به مخلوط‌های پرسیمان بدلیل درصد سنگدانه‌های بیشتر این نوع مخلوط‌ها بسیار سخت‌تر است. [۲۷ و ۲۸].

۴-۸- خواص سطحی بتن غلتکی جاده‌ای

بتن غلتکی دارای سطحی خشن و ناصاف می‌باشد. خواص سطحی باید از نقطه‌نظر بافت سطح^{۲۵}، همواری سطح^{۲۶} و نفوذپذیری در برابر آب^{۲۷} بررسی شود [۲۲].

۴-۸-۱- بافت سطح: اندازه و نوع سنگدانه‌های موجود در بتن در شکل بافت سطحی ایجاد شده نقش اصلی را ایفا می‌کند. هر چه اندازه بزرگترین سنگدانه کوچکتر انتخاب شود، سطح بدست آمده دارای بافتی ریزتر و یکنواخت‌تر خواهد بود. [۳۰].

۴-۸-۲- همواری سطح: استفاده از ماشین‌های راه‌سازی، که در تراکم آسفالت با چگالی زیاد بکار می‌روند، به ایجاد سطحی هموار برای روسازی‌های بتن غلتکی کمک می‌کنند. بتن غلتکی قابلیت استفاده برای هر نوع شرایط حمل و نقلی را دارد؛ اما به علت نقش آن در کاهش سرعت عبور و مرور تا حدود ۶۴-۵۶ کیلومتر بر ساعت، از آن در ساخت روسازی‌های مربوط به اتوبان‌های اصلی استفاده نمی‌گردد. اما با استفاده از روکش آسفالت می‌توان سطحی همواره برای جاده موردنظر ایجاد کرد؛ که در این صورت می‌توان سرعت حمل و نقل را نیز افزایش داد [۳۰ و ۳۱].

۴-۸-۳- نفوذپذیری در برابر آب: بافت غیریکدست سطح روسازی ساخته شده با بتن غلتکی، میزان نفوذپذیری آب به داخل بتن را افزایش می‌دهد؛ در اثر نفوذ آب به داخل بتن، سازوکارهای مربوط به یخ‌زدن و ذوب شدن و دیگر خسارت‌های ناشی از ورود آب به سطح روسازی شروع به فعالیت می‌کنند. با توجه به نتایج بدست آمده نفوذپذیری آب به داخل روسازی‌های بتن غلتکی از روسازی‌های بتن معمولی بیشتر می‌باشد. یکی از راه‌حل‌ها برای کاهش نفوذپذیری، استفاده از افزودنی مانند دوده سیلیس^{۲۸} می‌باشد. اما با وجود آنچه گفته شد بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد نفوذپذیری اثری روی روسازی‌های بتن غلتکی ندارد. به‌ویژه اینکه هیچ گزارشی مبنی بر تخریب این بتن تحت اثر یخ‌زدن و ذوب شدن، حتی پس از گذشت چند دهه از ساخت آن در مناطق سردسیر مانند کانادا وجود ندارد [۳۲].

۵- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن مزایایی که بدان اشاره شد و با افزایش دانش فنی و کسب مهارت در زمینه مراحل ساخت و اجرا و در نظر گرفتن تمهیدات اجرایی مورد نیاز که خود موجب غلبه بر محدودیت‌های موجود در این زمینه می‌گردد، می‌توان از روسازی بتن غلتکی در پروژه‌های کشور به‌طور مؤثری بهره برد. البته آگاهی و توجه به نکات اجرایی می‌تواند موجب افزایش کیفیت و کارایی بتن غلتکی تولیدی گردد.

منابع

- [1] "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements", Portland Cement Association (PCA), August 2010
- [2] ASTM C33-03 "Standard Specification for Concrete Aggregates", Standard Designation C33-03, July 2003.

²⁵ Texture

²⁶ Smoothness

²⁷ Water Permeability

²⁸ Silica fume

- [3] ACI 325.10R-95, "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements", American Concrete Institute (ACI), 2001.
- [4] ACI 309.5R-99, "Compaction of Roller Compacted Concrete Pavements", ACI manual of concrete practice, Author, USA, 15p., 2004.
- [5] ASTM C618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", Standard Designation C618-05, 2005
- [6] Schweizer, E. and G.W. Raba, "Roller Compacted Concrete with Marginal Aggregates," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, Calif., 1988, pp. 419-428
- [7] Marchand, J., Gagne, R., Ouellet, E., and Lepage, S., "Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete—A Review", Advances in Concrete Technology, Editor: V. M. Malhotra, ACI Special Publication, SP-171, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, Auckland, New Zealand, 1997, pp. 457-486.
- [8] ACI 320.10R-95, "State of the-art report on roller compacted concrete pavement", American Concrete Institute (ACI), 200.
- [9] ACI 211.3R, "Standard Practice for Selecting Proportion for No-Slump Concrete", (1992)
- [10] Cao, C., Sun, W., and Qin, H., "The Analysis on Strength and Fly Ash Effect of Roller Compacted Concrete with High Volume Fly Ash", Cement and Concrete Research, V. 30, Issue 1, PP. 71-75, 2000.
- [11] Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K., "Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method", Construction and Building Materials, Vol. 38, January 2013, PP. 356-364
- [12] Vahedifard, F., Nili, M., Meehan, C.L., "Assessing the Effects of Supplementary Cementitious Materials on the Performance of Low-Cement Roller Compacted Concrete Pavement", Construction and Building Materials, USA, Vol. 24, Issue 12, PP. 2528-2535, 2010.
- [13] Najimi M., Sobhani J., Pourkhorshidi A.R., "A comprehensive study on no-slump concrete: From laboratory towards manufactory" Construction and Building Materials, Volume 30, May 2012, Pages 529-536
- [۱۴] عزیز خوانی، ر.، "بررسی رفتار مکانیکی روسازی بتن غلتکی مسلح شده با الیاف فلزی و پلی پروپیلن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
- [15] Madhkhani M., Azizkhani R, Torki Harchegani M.E., "Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements", Construction and Building Materials, Volume 26, Issue 1, Pages 102-112, January 2012
- [16] Tayabgi, S.D. et al., "Evaluation of Heavily Loaded Stabilized Roadways", Transportation Research Record, 839, Transportation Research Board, 1982.
- [17] Rollings, R.S., "Design of Roller Compacted Concrete Pavements", Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, Calif., PP. 454-466, 1988.
- [18] Tayabgi, S.D. and P.A. Okamoto, "Engineering Properties of Roller Compacted Concrete", Transportation Research Record, No. 1136, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 33-45, 1987.
- [19] Tricbes, G., "The Fatigue Behavior of Rolled Compacted Concrete", 8th International Symposium on Concrete Roads, Theme II, Portugal, 1998.
- [20] Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z., and Qian, M., "Fatigue Performance and Equations of Roller Compacted Concrete with Fly Ash", Cement and Concrete Research, V. 28, No. 2, PP. 309-315, 1998.
- [۲۱] مدح خوان، م.، آرسته، ع.، "بررسی مقاومت لایه بندی بتن غلتکی با استفاده از دوغاب سیمانی"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۱، شماره ۶، صفحه ۸۱۸-۸۰۹، دی ماه ۱۳۸۶
- [22] Delatte, N., Amer, N., and Storey, C., "Improved Management of RCC Pavement Technology", UTCA Report 01231, University Transportation Center for Alabama (UTCA), 54 p., January, 2003.
- [۲۳] مستوفی نژاد، د.، نظری منفرد، ح.، "افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام آن در محیط سولفاتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۵.
- [۲۴] باقری، ع.، محمودیان، م.، فخری، م.، "تأثیر عمل آوری بر خواص بتن های غلتکی روسازی راه، با و بدون سیلیس"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره سوم، پاییز ۱۳۸۵.
- [25] Nanni, A. "Curing of Roller Compacted Concrete: Strength Development", Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, No. 6, 1988.
- [26] Ghafoori, N., Zhang, Z., "Sulfate Resistance of Roller Compacted Concrete", ACI Materials Journals, PP. 347-355, July-August, 1998.
- [27] Hazaree, Ch., Ceylan, H., Wang, K., "Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC", Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 1, PP. 313-319, 2011

[28] Hazaree Ch., Gopalakrishnan K., Ceylan H., "Can Air be Entrained in Roller-Compacted Concrete Mixes?", Proceedings of the 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2009

[29] Tarun R. Naik, Yoon-Moon Chun, Rudolph N. Kraus, "Strength and Durability of Roller-Compacted HVFA Concrete Pavements", Practice Periodical on Structural Design and Construction, Volume 6, Issue 4, Pages 154-165, November 2001

[30] Piggott, R.W., "Roller Compacted Concrete Pavements-A Study of Long Term Performance", Portland Cement Concrete Research & Development RP, 366.01P, 1999.

[31] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), "Roller compacted Concrete Pavement Design and Construction", Engineer Technical Letter 1110-3-475, Department of the army, Washington, D.C., 1995.

[32] Banthia, N., Pigeon, M., Marchand, J., and Boisvert, J., "Permeability of Roller Compacted Concrete", Journal of Material in Civil Engineering, V. 4, pp. 27-40, 1992.

[۳۳] شکرچی‌زاده، م.، قاسمی، ه.، "بتن غلتکی در سدسازی"، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۳۰، ۱۳۸۴.

[۳۴] نشریه شماره ۳۵۴، "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور"، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸.

[35] Shekarchi M., Sharifi M., "Use of Silica Fume in Roller Compacted Concrete Pavement", The 6th International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, PP. 153-162, 21-24 October 2002.

[36] Hassani A., Shekarchizade M., Akbarnejad S., "Properties of Roller Compacted Concrete Containing a high-volume and low-volume non-plastic aggregates for pavements", TRB 88th Annual Meeting, 88 pages, 13-17 January, 2008.

[۳۷] شریفی، ر.، "اثر دوده سیلیسی در ارتقای خواص بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.

[37] ASTM C 1176, "Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table"