

بررسی آزمایشگاهی تسلیح بتن غلتکی با الیاف فلزی و الیاف پلیمری جهت کاهش ترک‌های انعکاسی در روسازی‌های مرکب راه

محمد رضا احدی* (دانشیار)

پژوهشکده حمل‌ونقل، مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی

محبوب امیری (کارشناس ارشد)

مهندسان مشاور سهند ترانسه

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (دوره ۲ - ۳۵، شماره ۴/۲، ص. ۱۱۹-۱۳۰، یادداشت نمی)

یکی از مشکلاتی که عمدتاً در روسازی‌های مرکب (بتنی آسفالتی) رخ می‌دهد، بروز ترک‌های انعکاسی در روکش آسفالت است. در پژوهش حاضر، با استفاده از الیاف فلزی یا الیاف پلیمری به صورت جداگانه نسبت به تقویت بتن غلتکی اقدام شده است. تا با افزایش مقاومت خمشی، کششی و فشاری بتن از ترک‌خوردگی و شکست لایه‌ی بتن و در نتیجه از بروز ترک‌های انعکاسی در روسازی بتن غلتکی جلوگیری شود. در ابتدا طرح اختلاط بتن غلتکی پایه به عنوان شاخص ساخته و آزمایش‌ها بر روی آن انجام شد. در ادامه، از دو نوع الیاف فلزی با میزان مصرف ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن و الیاف پلیمری با میزان مصرف ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی بتن در طرح‌های اختلاط استفاده و الیاف مذکور به طرح اختلاط پایه اضافه شدند و از مخلوط‌های ساخته شده الیاف‌دار، نمونه‌های استوانه‌یی استاندارد $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}$ و نمونه‌های تیر منشوری با ابعاد $15 \times 15 \times 50 \text{ cm}$ ساخته شدند و آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، خمشی و کششی بر روی آنها انجام و در انتها، نتایج ارائه شده است.

واژگان کلیدی: بتن غلتکی، روسازی‌های مرکب، ترک‌های انعکاسی، الیاف، RCC.

۱. مقدمه

برون‌شهری شود. با توجه به این‌که بتن غلتکی، مقاومت و دوام بیشتری نسبت به آسفالت و لایه‌های خاکی دارد، موجب افزایش طول عمر بهره‌برداری از جاده و کاهش خرابی‌هایی می‌شود که در روسازی‌های کنونی، موجب بروز مشکلات و مخاطرات فراوانی در صنعت حمل‌ونقل جاده‌یی شده است.^[۱]

در کشور ما به دلیل نبود تجهیزات مناسب اجرایی در خصوص پرداخت سطح نهایی، حرکت خودروها و سطح تماس لاستیک خودروها بر روی سطح بتنی، دارای نرمی حرکت و روانی ترافیک به مانند رویه‌ی آسفالتی نیست و در زمان تردد خودروها با سرعت بالا بر روی سطح بتنی سر و صدای زیادی تولید می‌شود، که به دلایل مذکور از بتن غلتکی به همراه روکش آسفالتی ۵-۷ سانتی‌متری استفاده می‌شود؛ که روسازی انجام شده جزء گروه روسازی‌های مرکب بتنی و آسفالتی محسوب می‌شود.^[۲]

با توجه به مطالعات صورت گرفته مشخص شد که در روسازی‌های مرکب بتنی و آسفالتی به مرور زمان در لایه‌ی بتنی در اثر حرکات قائم و افقی ناشی از بارگذاری حاصل از بار ترافیک، تغییرات درجه حرارت، جمع شدگی بتن تازه در زمان اجرای بتن و سایر عوامل مؤثر دیگر، ترک‌خوردگی‌هایی ایجاد می‌شوند، که به لایه‌ی روکش

اهمیت توسعه‌ی زیرساخت‌های صنعت حمل‌ونقل، ناشی از وجود ارتباط مستقیم آن با افزایش شاخص‌های توسعه‌یی در کشورهاست. امروزه حمل‌ونقل، یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که در اولویت توسعه‌ی کشورها قرار دارد، که عدم تحقق آن می‌تواند ادامه‌ی حیات سیاسی، اجتماعی و اقتصادی کشورها را دچار خطرهای جدی کند. صنعت حمل‌ونقل جاده‌یی، که یکی از شاخه‌های اصلی صنعت حمل‌ونقل است مانند دیگر صنایع از گذشته تاکنون دستخوش آثار حاصل از پیشرفت فنّاوری شده و طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری از آن به صورت نوین و با استفاده از ماشین‌آلات مدرن و پیشرفته در سراسر جهان در حال انجام است.^[۱]

امروزه از بتن غلتکی، که خواص و شرایط ویژه و متمایزی از سایر بتن‌ها دارد، به عنوان لایه‌ی باربر در روسازی‌های جاده‌ها استفاده می‌شود و لایه‌ی بتنی ذکر شده می‌تواند جایگزین بخشی از بدنه‌ی روسازی متداول در جاده‌های شهری و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۵/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۲۹، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۷

DOI:10.24200/J30.2018.1195.2177

آسفالتی منتقل و موجب ایجاد ترک در رویه‌ی آسفالتی راه می‌شوند، به ترک‌های انعکاسی مشهور هستند. لایه‌ی بتنی در محل ترک‌های ایجاد شده به علت از دست دادن ظرفیت تحمل بار، دچار جابه‌جایی می‌شود و عرض ترک‌ها به مرور زمان بیشتر می‌شود و به علت نفوذ آب از ترک‌های مذکور به لایه‌ی خاکی واقع در زیر لایه‌ی بتنی و همچنین یخبندان ایجاد شده در فصل سرما، منجر به تخریب لایه‌ی روسازی می‌شود، که در نهایت موجب کاهش طول عمر مفید راه و همچنین کاهش کیفیت در زمان بهره‌برداری خواهد شد. بنابراین به جهت افزایش طول عمر و افزایش کیفیت و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی‌های ذکر شده پیشنهاد شد که پژوهشی در خصوص تسلیح لایه‌ی بتنی مشترکاً با الیاف‌های فلزی و پلیمری جهت کاهش ترک‌ها در لایه‌ی بتنی انجام شود. در گذشته، نیز از الیاف فلزی و پلیمری گوناگون در تسلیح آسفالت، بتن‌های معمولی و بتن‌های خودتراکم و الیافی استفاده شده و نتایج مناسبی نیز داشته است.

لذا با فرض مذکور، به بررسی دقیق تسلیح و تقویت بتن غلتکی توسط الیاف پرداخته شده است، تا کمک شایانی به افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن غلتکی شود و در نتیجه افزایش مقاومت‌های خمشی، کششی و فشاری بتن، ترک‌های بتن کاهش یابند و ترک‌های انعکاسی در لایه‌ی روکش آسفالتی نیز کاهش یابند؛ که این امر باعث افزایش عمر راه‌ها و جاده‌هایی می‌شود که در ساخت آن از بتن غلتکی استفاده شده است.

۲. مرور ادبیات

۱.۲. بتن غلتکی (RCC) ^۱

بتن متراکم شده با غلتک، نوعی از فناوری‌های خاص بتن است که به نام بتن غلتکی مشهور شده است. در واقع بتن غلتکی، یک نوع از روش‌های تولید و اجرای بتن است که در آن، بتن با دستگاه پخش آسفالت و یا به وسیله‌ی ماشین‌آلات خاکی پخش و به وسیله‌ی غلتک تثبیت و متراکم می‌شود. ^[۱]

بتن غلتکی ویژه‌ی روسازی راه با مقدار زیادتر سیمان، مقاومت فشاری معمولاً بالاتر از ۳۰ مگاپاسکال و طرح اختلاط با اندازه و دانه‌بندی مصالح کنترل شده در یک محدوده‌ی مشخص است. در روسازی راه، بتن غلتکی می‌تواند به عنوان رویه‌ی اصلی برای تأمین استقامت باربری سازه‌ی روسازی استفاده شود. طرح روسازی بتن غلتکی مشابه پروسه‌ی طراحی روسازی بتنی درزدار غیرمسلح با درزهای انقباضی یا درزهای ساخت بدون داول است. اختلاف اصلی بین بتن غلتکی و بتن معمولی در ارتباط با روش ساخت روسازی و فواصل درزها و ظاهر رویه است. ^[۲]

معمولاً از روسازی بتن غلتکی به عنوان سطح نهایی سواره‌رو استفاده می‌شود. هر چند در موارد معدودی نیز جهت بهبود کیفیت سطح و یا برای به‌سازی بتن غلتکی از یک لایه‌ی رویه‌ی آسفالت گرم استفاده شده است. ^[۳]

۲.۲. کاربرد الیاف در بتن

انواع الیاف طبیعی و گیاهی از زمان‌های قدیم در جهان و همچنین در ایران به عنوان مسلح‌کننده‌ی مصالح ساختمانی، مانند خشت‌وگل به صورت کاه‌گل تولید و مصرف می‌شده است؛ اما به دلایل مختلف و با وجود پشتوانه‌ی تجربی مصرف آن، با روی کار آمدن مصالح جدیدتر، نظیر: آجر و سنگ و غیره در صنعت ساختمان، کم‌کم به فراموشی سپرده شدند. لذا استفاده از الیاف با مصالح بنایی، از جمله خشت و کاه‌گل در ادوار گذشته به جا گذاشته شد و در طول دوره‌های اخیر، بسیاری از پژوهشگران

سعی در شناخت بیشتر کاربرد الیاف، با توجه به علوم و تکنولوژی جدید ساختمان کردند. ^[۵]

اولین مطالعه در خصوص استفاده از الیاف و الیاف شیشه‌ی در بتن به قبل از سال ۱۹۶۰ بر می‌گردد، که در دهه‌ی ۶۰، اولین مطالعات مربوط به بتن الیافی به استفاده از الیاف مصنوعی در بتن است، که در بخش چهارم بولتن CNRN ۱۶۶ با عنوان تعریف بتن تقویت شده با الیاف نوشته شده است. ^[۶]

بر اساس استانداردهای جدید در کشورهای مختلف، از جمله ایران با دلایل و پشتوانه‌ی علمی سعی در مصرف مجدد الیاف کردند. الیاف با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی جدید، امروزه به عنوان یکی از مصالح پرمصرف در سازه‌های بتنی در حال استفاده شدن است. ^[۷]

۳.۲. روسازی مرکب

روسازی‌های مرکب طی سال‌های زیادی مطالعه و بررسی شده‌اند و با ویژگی‌هایی از قبیل روسازی‌های نیمه‌صلب و با عمر و عملکرد بالا و دارای صرفه‌ی اقتصادی شناخته می‌شوند. عمده‌تاً روسازی‌های مرکب راه به روسازی‌هایی اطلاق می‌شود که در آن رویه‌ی راه از ۲ لایه با جنس و ویژگی‌های متفاوت در هر لایه تشکیل شده است و لایه‌های مورد استفاده از نظر ساختار سازه‌ی به ۲ لایه‌ی انعطاف‌پذیر و صلب طبقه‌بندی می‌شوند، مانند اساس تثبیت شده با سیمان، بتن غلتکی و آسفالت. روسازی‌های مرکب به عنوان ساختارهای نیمه‌صلب و به صورت یک ساختار دولایه و چندلایه شناخته می‌شوند، که ترکیبی از ویژگی‌های مختلف هستند و عملکرد گوناگونی دارند. روسازی‌های مرکب در مقایسه با روش‌های سنتی ساخت روسازی‌های نرم و صلب، پتانسیل عملکردی بهتری دارند و از لحاظ اقتصادی نیز، دارای اولویت هستند. ^[۹]

استفاده از مصالح بتنی در نقش لایه‌ی اساس و مصالح آسفالتی در نقش لایه‌ی رویه، گزینه‌ی بی‌عیب است که در صورت خرابی کامل لایه‌ی آسفالتی مقرون به صرفه خواهد بود. با توجه به هزینه‌ی اولیه‌ی بالای اجرای روسازی‌های مرکب، ساخت آنها به طور محدود صورت می‌گیرد و بیشتر برای رفع معایب روسازی‌های بتنی موجود و به منظور ارتقاء کیفیت سطح راه و تأمین سرویس، به صورت روکش آسفالتی بر روی روسازی‌های بتنی موجود به کار می‌روند. در آمریکا روسازی‌های مرکب با استفاده از بتن توانمند و با روکش آسفالت ساخته می‌شوند، که به منظور افزایش ظرفیت سازه‌ی روسازی جهت تحمل ترافیک‌های سنگین است. عملکرد روسازی ممکن است با توجه به عوامل مختلف، از جمله طراحی اساس نیمه‌صلب، انتخاب نوع روکش، و نگهداری از آن متفاوت باشد. ^[۸-۶]

۴.۲. ترک‌های انعکاسی ^۲

ترک‌های انعکاسی به ترک‌هایی اطلاق می‌شود که در سطح روکش آسفالتی و در محل‌هایی که ترک‌هایی در سطح روسازی قدیمی وجود داشته باشد، پدید می‌آیند. ترک‌های انعکاسی در حقیقت انعکاس ترک‌های لایه‌ی زیرین در لایه‌ی روکش آسفالتی است و اغلب در سطح روکش آسفالتی که بر روی روسازی‌های بتنی یا مصالح تحکیم شده با سیمان ساخته شده‌اند، به وجود می‌آیند. علت به وجود آمدن ترک‌های انعکاسی، حرکات افقی و قائم لایه‌ی زیرین واقع در زیر لایه‌ی آسفالت است، که در اثر تغییرات رطوبت و درجه حرارت در مصالح روسازی و همچنین در اثر عبور و مرور وسائط نقلیه‌ی سنگین به وجود می‌آیند. ^[۱۰]

خرابی مذکور فقط در روسازی‌هایی به وقوع می‌پیوندد که از یک رویه‌ی بتن

۴. مقایسه و تحلیل نتایج به دست آمده در قبل و بعد از افزودن الیاف به طرح اختلاط پایه.

۱.۳. مشخصات مصالح

لرزم تأمین مقاومت و دوام در طراحی روسازی، انتخاب مصالح برای مخلوط‌های بتن غلتکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مصالح اساسی مورد استفاده در بتن غلتکی، شامل: آب، مواد سیمانی و سنگ‌دانه‌های ریز و درشت هستند. هر کدام از مصالح مورد استفاده در ساخت بتن باید مشخصات ارائه شده در استانداردهای معتبر داخلی و خارجی را داشته باشند، تا بتوان از آنها در ساخت بتن استفاده کرد. در پژوهش آزمایشگاهی حاضر نیز جهت تأمین الزامات کیفی و فنی از مصالح با کیفیت مناسب و تولید شده مطابق با استانداردهای معتبر استفاده شده است؛ که در ادامه به صورت مجزا، مشخصات و ویژگی‌های هر کدام از مصالح مصرفی به تفکیک شرح و ارائه داده شده است.

۱.۱.۳. سیمان

در پژوهش حاضر، بنا بر توصیه‌ی استاندارد ملی ایران با توجه به حرارت متوسط هیدراتاسیون، سیمان تپ II استفاده شده، که مشخصات آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲.۱.۳. آب

در بتن غلتکی، آب مورد نیاز هیدراتاسیون شیمیایی از دو منبع تأمین می‌شود. قسمتی از آن از طریق آب اضافی (آب آزاد) در ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها تأمین می‌شود و قسمت دیگر آن با اضافه کردن آب به میکسر تأمین می‌شود.

کیفیت آب مصرفی باید الزامات استاندارد $ASTM C 1602$ را داشته باشد. مطابق با توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا)، جهت استفاده از آب آشامیدنی در ساخت بتن، در ساخت کلیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی بتن غلتکی از آب آشامیدنی با منبع واحد استفاده شده است.

۳.۱.۳. سنگ‌دانه‌ها

شن مصرفی دارای بیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی ۱۹ میلی‌متر و ماسه‌ی مصرفی دارای بیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر بوده و مطابق با توصیه‌ی نشریه‌ی ۳۵۴، الزامات عمومی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در ساخت بتن غلتکی باید مطابق با الزامات استاندارد ۳۰۲ ایران و یا $ASTM C 33$ باشد و همچنین محدوده‌ی دانه‌بندی توصیه شده توسط $ACI 325R$ در جدول ۳ ارائه شده است، که مبنای دانه‌بندی طرح اختلاط بتن غلتکی در پژوهش حاضر قرار گرفته است (شکل ۱). به دلیل درصد آب کم بتن غلتکی، خطر جدا شدگی در آن زیاد است. به منظور کمینه‌سازی جدا شدگی طی جابه‌جایی و بتن‌ریزی بتن غلتکی و دست‌یابی به یک سطح صاف، بزرگ‌ترین قطر اسمی درشت‌دانه‌ی مصرفی برای بتن غلتکی ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شن مصرفی دارای چگالی (Kg/m^3) ۲/۵۳ با درصد جذب آب ۲/۰۶ و ماسه‌ی مصرفی با چگالی (Kg/m^3) ۲/۳۴ و درصد جذب آب ۳/۰۴ است.

۴.۱.۳. الیاف

۱.۴.۱.۳. الیاف فولادی

الیاف فولادی مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع دو سر قلاب با نام تجاری $FIBERCEMF \ 1/5$ تولیدی شرکت درجه ۳ کشور ایتالیاست، که مشخصات الیاف مطابق با مشخصات مندرج در جدول ۴ است.^[۱۹]

آسفالتی بر روی دال بتنی ریخته شده است. این دسته از خرابی‌ها، ترک‌خوردگی‌های انعکاسی انواع دیگر لایه‌ی اساس (مثلاً اساس تثبیت شده با سیمان یا آهک) را در بر نمی‌گیرند. این‌گونه ترک‌ها را در زمهری ترک‌های طولی و عرضی قرار می‌دهند و ترک‌خوردگی انعکاسی درز عمده‌تاً در اثر حرکات افقی و قائم دال بتن سیمانی در زیر رویه‌ی بتن آسفالتی ناشی از بارگذاری، تغییرات حرارتی و رطوبتی به وجود می‌آید.^[۱۲،۱۱]

ایجاد ترک‌های انعکاسی در روسازی به دلیل ضعف مقاومت روسازی در برابر عوامل ایجادکننده‌ی تنش‌های برشی و کششی است. به طور کلی بر اساس مطالعات انجام شده در مورد عوامل شروع و گسترش ترک در لایه‌های روسازی مخصوصاً لایه‌ی روکش، می‌توان عوامل جوی، تنش‌های حرارتی، بارهای ترافیکی وارده، نشست در لایه‌های زیرین و یا ترکیبی از این عوارض را در نظر گرفت. جابه‌جایی روسازی، که به دلیل یکی از عوامل مذکور رخ می‌دهد، باعث ایجاد تنش‌های برشی و یا کششی می‌شود. زمانی که این تنش بزرگ‌تر از مقاومت برشی یا کششی لایه‌ی روکش باشد، رشد ترک در روکش جدید آغاز می‌شود. البته تنش‌های مذکور در محل ترک‌های موجود در لایه‌ی قدیمی متمرکز هستند؛ بنابراین ایجاد ترک در روسازی و روکش آسفالتی، ناشی از افت مقاومت بتن آسفالتی تحت اثر پدیده‌ی خستگی و نیز افزایش سطح تنش‌های وارده نسبت به مقاومت نهایی آسفالت است.^[۱۴،۱۳]

۳. روش پژوهش

الف) روش پژوهش کتابخانه‌یی

مطالعه‌ی کتاب‌ها و نوشتارها و نشریات دستورالعمل‌های طراحی و تولید بتن غلتکی، جمع‌آوری مطالب ارائه شده در سمینارهای آموزشی در زمینه‌ی بتن غلتکی و رویه‌های بتنی؛

ب) روش میدانی؛

تحلیل و بررسی‌های میدانی در خصوص مشکلات اجرایی و فنی پروژه‌هایی که از بتن غلتکی در آنها استفاده شده است؛

پ) انجام مطالعه در زمینه‌ی خصوصیات بتن غلتکی و استفاده‌ی آن در روسازی‌های مرکب راه؛

ب) بررسی مکانیزم به وجود آمدن ترک‌های انعکاسی در لایه‌های تشکیل دهنده‌ی روسازی؛

ت) روش مطالعه‌ی آزمایشگاهی.

با استفاده از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بتن غلتکی و تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده در آزمایشگاه.

جزئیات روش پژوهش آزمایشگاهی انجام شده در نوشتار حاضر به این شرح است:

۱. شناسایی و تهیه‌ی مواد و مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط بتن غلتکی، از قبیل: سیمان، مصالح سنگی، الیاف و غیره مطابق با استانداردهای داخلی مانند استاندارد شماره ۳۰۲، استاندارد ملی ایران و آیین‌نامه‌ی بتن ایران.

۲. تدوین یک طرح مخلوط بتن غلتکی پایه مطابق با استانداردهای موجود و ساخت نمونه‌ی آزمایشی و اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن (مقاومت خمشی و فشاری و کششی). مطابق با نشریه‌ی ۳۵۴ و آیین‌نامه‌ی $ACI 325R$.

۳. افزودن الیاف با درصد‌های مختلف به طرح اختلاط پایه و ساخت نمونه‌ی آزمایشی و اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن (مقاومت خمشی و فشاری و کششی).

جدول ۱. مشخصات فیزیکی فنی سیمان.

شرح آزمون	کمیته مجاز استاندارد	نتیجه‌ی آزمون	روش آزمون
۱ مقاومت فشاری N/mm^2	۱۰	۲۳	روزه ۳
	۱۷٫۵	۳۸	روزه ۷
	۳۱٫۵	۴۸	روزه ۲۸
۲ سطح مخصوص cm^2/gr با سوزن ویکات	۲۸۰۰	۲۸۱۰	ISIRI۳۹۰
۳ زمان گیرش اولیه (دقیقه) با سوزن ویکات	۴۵	۱۱۰	ISIRI۳۹۲
۴ زمان گیرش ثانویه (ساعت)	۶	۵٫۵	ISIRI۳۹۲

جدول ۲. مشخصات شیمیایی فنی سیمان

Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CaO	درصد ترکیب‌های شیمیایی سیمان تیب II
۵٫۶	۵٫۸	۲۰٫۵	۶۲	
C_3S	Alkali	SO_2	MgO	
۵۱	۱٫۱	۳	۲٫۶	
--	C_2AF	C_2A	C_2S	
--	۱۳	۷	۲۴	

جدول ۳. محدوده‌ی دانه‌بندی توصیه‌شده توسط دستورالعمل $ACI325/10R$.

ردیف	اندازه‌ی الک (mm)	درصد وزنی رد شده‌ی الک	درصد دانه‌بندی طرح
۱	۲۵٫۴	۱۰۰	۱۰۰
۲	۱۹	۸۳-۱۰۰	۱۰۰
۳	۱۲٫۴	۷۲-۹۳	۸۲
۴	۹٫۵	۶۶-۸۵	۷۲
۵	۴٫۷۵	۵۱-۶۹	۵۳
۶	۲٫۳۸	۳۸-۵۶	۳۹
۷	۱٫۲	۲۸-۴۶	۲۹
۸	۰٫۶	۱۸-۳۶	۲۱
۹	۰٫۳	۱۱-۲۷	۱۵
۱۰	۰٫۱۵	۶-۱۸	۱۱
۱۱	۰٫۰۷۵	۲-۸	۵

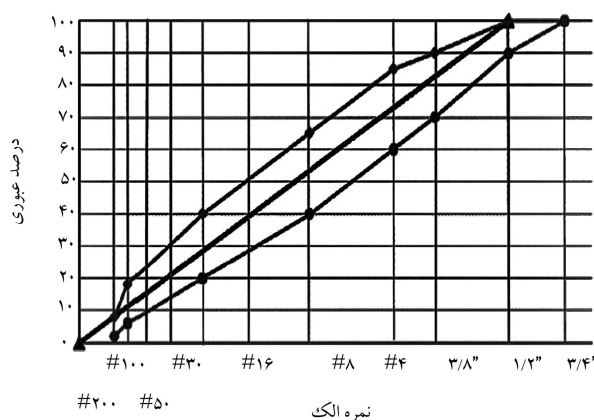
۲.۴.۱.۳. الیاف پلیمری

الیاف پلیمری مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع الیاف ماکرونک‌رشته‌بی^۴ و با شکل سینوسی در طول است، که با نام تجاری $FIBERCEMPL - 50$ تولیدی شرکت دورچم کشور ایتالیاست، که مشخصات الیاف مطابق با مشخصات مندرج در جدول ۵ است.^[۱۵]

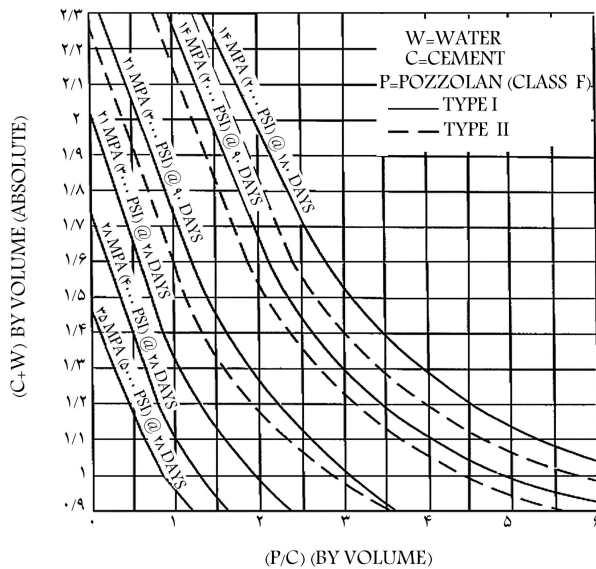
۵.۱.۳. طرح اختلاط: تدوین طرح اختلاط اولیه به روش روانی در ACI

بتنی که برای تراکم با غلتک‌های ارتعاشی مناسب است، از نظر ظاهری نیز با بتن‌های دیگر که اسلامپ قابل اندازه‌گیری دارند، متفاوت است، بتن غلتکی ظاهری خشک دارد و تا قبل از تراکم شدن، خمیر سیمان در آن چندان قابل مشاهده نیست. البته مخلوط‌های بتن غلتکی باید خمیر کافی برای پر کردن حفره‌های بین سنگ‌دانه‌ها داشته باشند.

در پژوهش حاضر، طرح اختلاط اولیه‌ی بتن غلتکی بر اساس روش کلاسیک



شکل ۱. نمودار محدوده‌ی دانه‌بندی توصیه‌شده توسط دستورالعمل $ACI325/10R$.



شکل ۲. رابطه‌ی نسبت حجمی پوزولان به سیمان و آب به مواد سیمانی [۲].

جدول ۷. درصد حجمی درشت‌دانه در واحد حجم بتن.

اندازه‌ی بیشینه‌ی سنگ‌دانه (mm)	۹٫۵	۱۹	۳۸	۷۶
حجم مطلق درشت‌دانه (درصد)	۴۸-۴۲	۴۶-۵۲	۵۲-۵۶	۵۷-۶۱

مقاومت فشاری اولیه‌ی طرح اختلاط، ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و در طرح مذکور از مواد پوزولانی استفاده نشده است. بنابراین، مقادیر نسبت‌های $\frac{P}{C}$ و $\frac{W}{P+C}$ به این شرح تعیین شده است:

$$\frac{P}{C} = 0$$

$$\frac{W}{P+C} = 1/48$$

گام ۲. تعیین میزان نسبت حجم خمیر بدون هوا به حجم ملات بدون هوا P_v با توجه به توصیه‌ی نشریه ۳۴۵ در محدوده‌ی بین ۰٫۳۸- تا ۰٫۴۶ است. بنابراین:

$$P_v = 0/46$$

گام ۳. تعیین حجم درشت‌دانه VCA

مقدار درشت‌دانه باید به گونه‌ی باشد که ضمن کمینه‌سازی مقدار ملات لازم در مخلوط، امکان تراکم مناسب و پر شدن منافذ خالی آن توسط ملات را فراهم آورد. فضای خالی بین ذرات درشت‌دانه و در نتیجه حجم خمیر لازم در بتن غلتکی بستگی به دانه‌بندی، شکل و اندازه‌ی بیشینه‌ی درشت‌دانه دارد. لذا توصیه بر این است که دانه‌بندی درشت‌دانه به سمت تراکم بیشینه تنظیم شود.

در انتخاب مقدار مناسب درشت‌دانه، روش توصیه شده به این شکل است که نسبت‌های مختلف حجمی درشت‌دانه و ملات با یکدیگر ادغام و زمان فراهم آورد. فضای خالی بین ذرات درشت‌دانه و در نتیجه حجم خمیر لازم در بتن غلتکی بستگی به دانه‌بندی، شکل و اندازه‌ی بیشینه‌ی درشت‌دانه دارد. لذا توصیه بر این است که دانه‌بندی درشت‌دانه به سمت تراکم بیشینه تنظیم شود.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی الیاف فولادی مورد استفاده.

مشخصه‌ی فیزیکی	واحد
شکل سطح مقطع	دایره
طول	۵۰ mm
قطر	۱ mm
نسبت طول به قطر	۵۰
وزن مخصوص	۷۸۵۰ Kg/m ^۳
استحکام کششی	۸۰۰ N/mm ^۲
نهایت کشیدگی	٪۱٫۲

جدول ۵. مشخصات فیزیکی الیاف پلیمری مورد استفاده.

مشخصه‌ی فیزیکی	واحد
شکل سطح مقطع	دایره
طول	۵۰ mm
قطر	۰٫۹ mm
نسبت طول به قطر	۵۵
وزن مخصوص	۱۱۰۰ kg/m ^۳
استحکام کششی	۴۵۰ - ۷۰۰ N/mm ^۲
نهایت کشیدگی	٪ ۵
دمای ذوب	۲۰۰ C ^۰
جذب رطوبت	٪ ۱
مدول کشسانی	۳۵۰۰ - ۳۹۰۰ N/mm ^۲

جدول ۶. مشخصات پارامترهای طرح اختلاط.

پارامتر	توضیح
p/c	نسبت حجمی پوزولان به سیمان
PT	مقدار کمینه‌ی خمیر سیمان
PV	نسبت حجم خمیر بدون هوا به حجم ملات بدون هوا
VA	حجم درشت‌دانه
VA	حجم هوای داخل مخلوط
CV	حجم بتن
Vp	حجم خمیر بدون هوا
VFA	حجم ریزدانه
Vw	حجم آب
Vc	حجم سیمان
VF	حجم پوزولان

که روش پرخمیر نامیده می‌شود و با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن، مندرج در نشریه‌های ۳۵۴ و ACI تدوین شده است که شامل گام‌های ۱۰ گانه است، [۱۷] (جدول ۶).

برای سهولت انجام محاسبات طرح اختلاط، در روش گام‌به‌گام انجام شده است تا نسبت‌های اولیه‌ی مواد سازنده‌ی بتن به دست آید.

گام ۱. نسبت حجمی پوزولان به سیمان $\frac{P}{C}$ و آب به مواد سیمانی $(\frac{W}{P+C})$ با توجه به الزامات طرح و به کمک شکل ۲ برای تولید مخلوط‌های بتن انتخاب شده است.

جدول ۸. محاسبه‌ی وزن اولیه‌ی مصالح.

مصالح	سیمان	آب	ریزدانه	درشت‌دانه
حجم در واحد متر مکعب	۰٫۰۸۷	۰٫۱۲۹	۰٫۲۵۴	۰٫۵۲
وزن مخصوص kg/m^3	۳۱۵۰	۱۰۰۰	۲۳۴۰	۲۵۳۰
وزن در هر متر مکعب	۲۷۴	۱۲۹	۵۹۵	۱۳۱۵

گام ۹. تعیین حجم پوزولان

$$V_F = V_C \times \frac{P}{C}$$

بنابراین:

$$V_F = ۰٫۰۸۷ \times ۰ = ۰$$

گام ۱۰. محاسبه‌ی وزن مصالح

با توجه به انجام محاسبات در گام‌های ۹ گانه‌ی اخیر، میزان مواد مصرفی اولیه در طرح اختلاط بتن غلتکی جهت شروع آزمایش‌ها به شرح جداول ۸ و ۹ است.

۱.۳.۳. تعیین کارایی بتن به روش VeBe

بتن غلتکی در حالت تازه باید قابلیت تحمل وزن غلتک را جهت تراکم آن داشته باشد، از این رو بتن غلتکی، بتنی است بسیار سفت و خشک که میزان آب آن بسیار کم‌تر از بتن‌های معمولی است. لذا روش‌های معمول تعیین روانی و کارایی، نظیر آزمایش اسلامپ، برای بتن غلتکی قابل کاربرد نیست. روشی که برای اندازه‌گیری کارایی بتن غلتکی توسعه یافته است، روش تعیین روانی با آزمایش VeBe اصلاح شده است، که در آن از دستگاه VeBe استاندارد همراه با یک سربار به وزن ۲۲٫۷ کیلوگرمی استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM C۱۱۷۰، انجام آزمایش زمان VeBe اصلاح شده در استاندارد ASTM C۱۱۷۰ تشریح شده است.

پس از انجام آزمایش روانی به روش زمان VeBe بر روی مخلوط اولیه‌ی بتن غلتکی، در صورت نیاز باید اصلاحات لازم در نسبت‌های اجزاء بتن صورت پذیرد. در روش‌های طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی، معمولاً کلیه‌ی پارامترهای مخلوط به غیر از یکی از آنها، مانند: مقدار آب، مواد سیمانی، یا مقدار سنگ‌دانه، ثابت نگه داشته می‌شود و با انجام آزمایش‌های مکرر، مقدار ماده‌ی متغیر تعیین می‌شود، تا روانی مناسب و سایر خواص مورد نظر تأمین شود. بدین ترتیب مقدار بهینه‌ی هر یک از اجزاء بتن به منظور دست‌یابی به خواص مورد نظر بتن غلتکی تازه و سخت شده حاصل می‌شود. از آزمایش VeBe در تمام مراحل ساخت نمونه‌های بتن غلتکی بدون الیاف و الیاف‌دار استفاده شده است، تا کارایی نمونه‌های ساخته شده بررسی شود.

در پژوهش حاضر بعد از به دست آوردن نسبت‌های اولیه، مخلوط‌های متعدد آزمایشگاهی ساخته شدند و مقاومت‌های فشاری آنها مورد سنجش قرار گرفت و همچنین با آزمایش سنجش روانی بتن Vebe بررسی شدند و میزان نسبت‌های مختلف مصالح بتن در محدوده‌ی زمانی ۳۰-۴۰ ثانیه مخلوط اصلاح شد. و در نهایت طرح اختلاط B-RCCP به عنوان طرح پایه در ساخت نمونه‌های اولیه‌ی بتن غلتکی بدون الیاف و همچنین طرح مخلوطی که الیاف‌ها به آن افزوده می‌شود، استفاده شده است.

۲.۳.۳. روش‌های ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

به دلیل سفت‌تر بودن بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی، روش ساخت نمونه‌های بتن غلتکی با روش ساخت نمونه‌ی بتن معمولی متفاوت است. روش‌هایی که تاکنون

داده می‌شود. مقدار مناسب درشت‌دانه مقداری است که مخلوطی با زمان VeBe مورد نظر پروژه به دست دهد. در جدول ۷، برای اندازه‌ی بهینه‌ی مختلف درشت‌دانه، محدوده‌های درصد‌های حجمی توصیه شده ارائه شده‌اند، که به عنوان نقطه‌ی شروع می‌توانند در تعیین مقدار بهینه‌ی درشت‌دانه استفاده شوند. [۱۸]

با توجه به این‌که درشت‌ترین دانه‌ی سنگی در بتن غلتکی ۱۹ میلی‌متر است، میزان حجم درشت‌دانه در واحد حجم ۵۲ در نظر گرفته شده است.

$$V_{CA} = ۰/۵۲$$

گام ۴. در محاسبه‌ی مقدار هوای داخل بتن VA، مقدار مذکور بین ۱ تا ۲ درصد حجم کل بتن در نظر گرفته می‌شود و مقدار حجم هوای داخل مخلوط بتن با این رابطه محاسبه می‌شود: $C_v = ۱$

$$V_A = \left(\frac{\text{مقدار هوا}}{۱۰۰} \right) \times C_v = \left(\frac{۱}{۱۰۰} \right) \times ۱ = ۰/۰۱$$

بنابراین:

$$V_A = ۰/۰۱$$

گام ۵. محاسبه‌ی حجم خمیر سیمان V_P

$$V_m = C_v - V_{CA} - V_A$$

$$V_m = ۱ - ۰/۵۲ - ۰/۰۱ = ۰/۴۷$$

$$V_P = V_m \times P_v$$

با توجه به این‌که در گام دوم $P_v = ۰/۴۶$ تعیین شده است، بنابراین:

$$V_P = ۰/۴۷ \times ۰/۴۶ = ۰/۲۱۶$$

گام ۶. تعیین حجم ریزدانه V_{FA}

$$V_{FA} = C_v - V_{CA} - V_P - V_A$$

بنابراین:

$$V_{FA} = ۱ - ۰/۵۲ - ۰/۲۱۶ - ۰/۰۱ = ۰/۲۵۴$$

گام ۷. تعیین حجم آب V_W

$$V_w = \frac{V_p \times \left(\frac{W}{C+P} \right)}{1 + \frac{W}{C+P}}$$

بنابراین:

$$V_W = (۰/۲۱۶ \times ۱/۴۸) / (۱ + ۱/۴۸) = ۰/۱۲۹$$

گام ۸. تعیین حجم سیمان V_C

$$V_C = \frac{V_w}{\frac{W}{C+P} \times (1 + \frac{P}{C})}$$

بنابراین:

$$V_C = ۰/۱۲۹ / ۱/۴۸ = ۰/۰۸۷$$

با سرعت بارگذاری ۰٫۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه، تا زمان گسیخته شدن نمونه ادامه می‌یابد و در انتها، میزان بار اعمال شده ثبت می‌شود.^[۲۳،۲۴]
مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال و از تقسیم بیشینه بار وارد شده بر نمونه بر سطح مقطع آن نمونه به دست می‌آید رابطه‌ی ۱:

$$f_c = \frac{P}{nd^2} \quad (1)$$

که در آن،

f_c : مقاومت فشاری بتن Mpa ؛

P : بیشینه نیروی وارده N ؛

d : قطر نمونه mm .

سن انجام آزمایش که مورد تأیید استانداردهای متفاوت است، ۲۸ روزه است. در پژوهش حاضر، جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌یی بتن غلتکی از یک دستگاه جک بتن‌شکن هیدرولیک و کالیبره شده استفاده شد. دو سر انتهایی نمونه‌ها در زمان ساخت توسط ماله کاملاً صاف شد و در زمان آزمایش نیز با استفاده از سمباده، کاملاً صیقلی شد تا شرایط انتهایی نمونه مطابق با استانداردهای مرتبط باشد.^[۲۹]

۳.۳.۲. آزمایش تعیین مقاومت کششی

آزمایش تعیین مقاومت کششی به آزمایش شکافتن (دونیم شدن) برزیلی معروف است، و مطابق با استاندارد ASTM C ۴۹۶ انجام می‌شود. در آزمایش حاضر نیز مانند آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه‌یی استاندارد به ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر استفاده شد، به نحوی که نمونه‌ها در شرایط خشک به صورت افقی در داخل گیره‌ی مرتبط قرار داده شدند و سپس در زیر جک بتن‌شکن قرار گرفتند و نیروی جک با سرعت بارگذاری ۰٫۱۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر آنها اعمال شد، به نحوی که بعد از اعمال نیرو، در اثر اعمال نیرو به ۲ نیم تقسیم شدند. سپس نیروی اعمال شده ثبت و میزان تنش کششی با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه شد:^[۳۰،۳۱]

$$f_{sp} = \frac{2p}{nLd} \quad (2)$$

که در آن،

f_{sp} : مقاومت کششی Mpa ؛

P : بیشینه نیروی وارده N ؛

d : قطر نمونه mm ؛

L : طول نمونه mm .

۳.۳.۳. آزمایش تعیین مقاومت خمشی

برای آزمایش خمشی سه‌نقطه‌یی بتن غلتکی از نمونه‌های منشوری ۲۸ روزه، به ابعاد $۱۵ \times ۱۵ \times ۵۰$ سانتی‌متری، که از قبل ساخته و عمل‌آوری شده بودند، استفاده شد. آزمایش حاضر با توجه به دستورالعمل استاندارد ASTM C ۷۸ انجام شد و نمونه‌ی مرطوب تیر بتنی در داخل دستگاه بر روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفت و سپس با اعمال نیرو با سرعت بارگذاری ۰٫۱۵ مگاپاسکال بر ثانیه تا زمان ترک‌خوردن نمونه‌ها ادامه یافت شکل ۳. بعد از اتمام آزمایش، نیروی اعمالی بر تیر، ثبت و جهت محاسبه‌ی مدول گسیختگی در رابطه‌ی ۳ قرار داده شد:^[۳۱،۳۲]

$$f_r = \frac{pl}{bd^2} \quad (3)$$

به کار رفته‌اند، شامل ۲ دسته‌ی کلی هستند. در یک روش، نمونه‌ی بتن غلتکی در داخل قالب و روی میز ارتفاعش، تحت وزن سربار و در چند لایه متراکم می‌شود (استاندارد ASTM C ۱۱۷۶ جزئیات روش مذکور را بیان کرده است). در روش دیگر، نمونه‌ها به وسیله‌ی ضربات کوبه در چند لایه مطابق روش ذکر شده و نیز مطابق روش ارائه شده در استاندارد ASTM D ۱۵۵۷ می‌توانند چگالی مشابه نمونه‌های اخذ شده از روسازی را داشته باشند، که البته در این صورت هنگام ساخت نمونه، تعداد ضربات قابل توجهی باید استفاده شود. تعداد ضربات و ارتفاع رهاشدن کوبه برای کلیه‌ی نمونه‌ها باید ثابت باشد، تا نتایج یکنواخت و قابل اتکایی به دست آید.^[۲۵،۲۶]

نمونه‌های استوانه‌یی مانند استوانه به قطر ۱۵ سانتی‌متری جهت تراکم با کوبه مناسب هستند، لیکن برای نمونه‌های خمشی، که سطح قابل توجهی دارند، کاربرد روش تراکم کوبه‌یی عمده‌تاً غیرعملی است و روش‌های تراکم ارتفاعی تحت سربار عملی‌تر هستند.^[۲۷،۲۸]

۳.۳.۳. ساخت نمونه‌های استوانه‌یی ۵

جهت ساخت نمونه‌های استوانه‌یی برای تعیین مقاومت فشاری و کششی (برزیلی) بتن غلتکی، از قالب‌های استوانه‌یی استاندارد با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است.^[۲۷]

با توجه به ماهیت خشک بتن غلتکی جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی باید از سیستم ویریه استفاده شود. جهت تراکم بتن در نمونه‌های مذکور از کوبه‌یی به وزن ۹٫۱ کیلوگرمی استفاده شد، به نحوی که بعد از آماده شدن مخلوط بتن، قالب استوانه‌یی بر روی میز ویریه قرار گرفته و بتن در لایه‌های ۶ سانتی‌متری در داخل قالب ریخته شده و هم‌زمان با روشن شدن دستگاه ویریه، تراکم بتن با استفاده از کوبه نیز آغاز شد، تا زمانی که هر کدام از لایه‌ها به صورت کامل متراکم شدند. و این کار تا زمانی که قالب به طور کامل پر شوند، ادامه یافت.

۳.۳.۴. ساخت نمونه‌های تیر بتنی (منشوری) ۶

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش خمشی بتن غلتکی از قالب‌های منشوری فلزی به ابعاد $۱۵ \times ۱۵ \times ۵۰$ cm و همچنین جهت تراکم بتن در نمونه‌های مذکور از سرباری به وزن ۴۰ کیلوگرمی استفاده شد. به نحوی که بعد از آماده شدن مخلوط بتن، قالب منشوری بر روی میز ویریه قرار داده شد و بتن در لایه‌های ۵ سانتی‌متری در داخل قالب ریخته و هم‌زمان با روشن شدن دستگاه ویریه، سربار نیز بر روی سطح بتن قرار داده شد تا زمانی که هر کدام از لایه‌ها به صورت کامل متراکم شدند.

۳.۳.۵. عمل‌آوری نمونه‌ها

شرایط نگهداری نمونه‌های استوانه‌یی و منشوری بدین ترتیب بود که در محیط آزمایشگاه به منظور جلوگیری از کاهش رطوبت نمونه‌های قالب‌گیری شده، آنها به مدت ۲۴ ساعت بعد از ساخت‌شان در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری و سپس از قالب باز شدند. سپس تا زمان رسیدن به زمان آزمایش، در رطوبت کامل و به صورت کاملاً غوطه‌ور در حوضچه‌های آب نگهداری شدند. شرایط محل و نحوه‌ی نگهداری نمونه مطابق با استاندارد ASTM C ۳۱ انجام شده است.^[۲۸،۳۲]

۳.۳.۶. انجام آزمایش‌ها

۳.۳.۶.۱. آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌یی با نمونه‌های تهیه شده توسط قالب‌های استوانه‌یی استاندارد مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM C ۳۹ انجام می‌شود. در روش مذکور، اعمال بار محوری فشاری به نمونه‌های استوانه‌یی

جدول ۹. نسبت‌های اختلاط مخلوط‌ها.

شماره‌ی مخلوط	کد طرح اختلاط	سیمان kg/m^3	آب kg/m^3	ریزدانه kg/m^3	درشت‌دانه kg/m^3	الیاف فولادی (kg/m^3)	الیاف پلیمری (kg/m^3)	زمان $VeBe/s$
۱	$B - RCCP$	۳۵۰	۱۰۵	۷۵۰	۱۱۶۵	۰	۰	۳۳
۲	$SF - RCCP - ۱$	۳۵۰	۱۰۵	۷۵۰	۱۱۶۵	۳۹٫۲۵	۰	۴۰
۳	$SF - RCCP - ۲$	۳۵۰	۱۰۵	۷۵۰	۱۱۶۵	۷۸٫۵	۰	۴۳
۴	$PF - RCCP - ۱$	۳۵۰	۱۰۵	۷۵۰	۱۱۶۵	۰	۳٫۳	۳۶
۵	$PF - RCCP - ۲$	۳۵۰	۱۰۵	۷۵۰	۱۱۶۵	۰	۶٫۶	۳۷

جدول ۱۰. نتایج آزمون مقاومت فشاری.

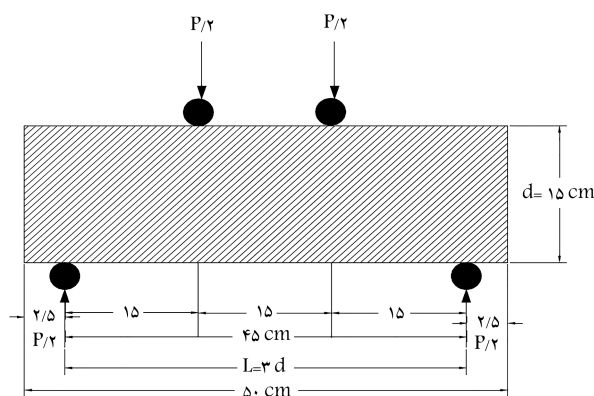
شماره‌ی مخلوط	کد طرح	شماره‌ی نمونه	مقاومت ۲۸ روزه‌ی مگاپاسگال (MPa)	میانگین نتایج
۱	$B - RCCP$	$B - RCCP - ۱$	۳۹	۳۹٫۵
		$B - RCCP - ۲$	۴۰	
۲	$PF - RCCP - ۱$	$PF - RCCP - ۱ - ۱$	۴۲	۴۱٫۵
		$PF - RCCP - ۱ - ۲$	۴۱	
۳	$PF - RCCP - ۲$	$PF - RCCP - ۲ - ۱$	۴۴	۴۲
		$PF - RCCP - ۲ - ۲$	۴۴	
۴	$SF - RCCP - ۱$	$SF - RCCP - ۱ - ۱$	۴۴	۴۳٫۵
		$SF - RCCP - ۱ - ۲$	۴۳	
۵	$SF - RCCP - ۲$	$SF - RCCP - ۲ - ۱$	۴۶	۴۵
		$SF - RCCP - ۲ - ۲$	۴۴	

۴. نتایج و بحث

بعد از اتمام آزمایش‌ها به بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی بتن غلتکی بدون الیاف و نمونه‌های بتن غلتکی الیاف‌دار، که توسط الیاف فولادی و پلیمری تقویت شده بودند، پرداخته شده است. تا میزان تأثیر الیاف فولادی و پلیمری به صورت جداگانه در خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی تعیین شود. مطابق با آزمایش‌های انجام شده، که به طور کامل توضیح داده شدند، نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های استوانه‌یی استاندارد ۱۵×۳۰ سانتی‌متری و آزمایش مقاومت خمشی تیر بتنی مششوری به ابعاد $۱۵ \times ۱۵ \times ۵۰$ سانتی‌متری به صورت جداگانه برای هر طرح اختلاط ثبت شده است.

در ابتدا، نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی بتن غلتکی بدون الیاف، که به عنوان شاخص است و سپس نتایج سایر طرح‌های اختلاط بتن‌های غلتکی الیاف‌دار، که به وسیله‌ی الیاف‌های فولادی و پلیمری تسلیح شده بودند، تعیین شدند.

نحوه‌ی مقایسه بدین صورت بود که نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، و خمشی هر کدام از طرح‌های اختلاط‌ها، که در آنها نوع الیاف و میزان الیاف مصرف شده مشخص بود، تعیین و با نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی که بر روی بتن غلتکی بدون الیاف (شاخص) انجام شده بودند، مقایسه شدند؛ که کلیه‌ی نتایج حاصل به تفکیک و با استفاده از نمودارها و گراف‌های مرتبط در بخش حاضر



شکل ۳. ابعاد موردنظر در آزمایش تعیین مقاومت خمشی.

که در آن،

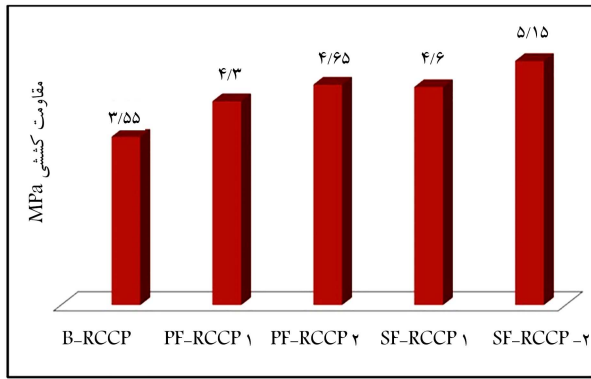
f_r : مدول گسیختگی خمشی Map ؛

P : بیشینه‌ی نیروی وارده N ؛

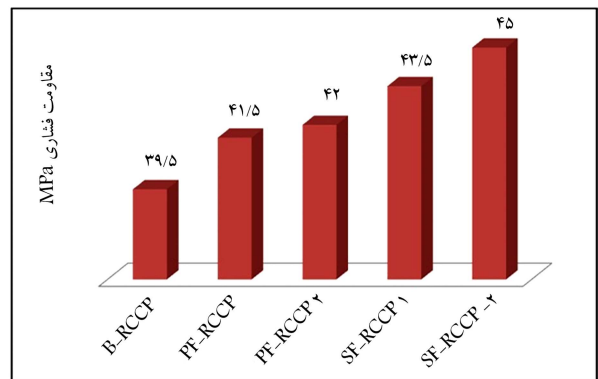
d : ارتفاع نمونه mm ؛

b : عرض نمونه mm ؛

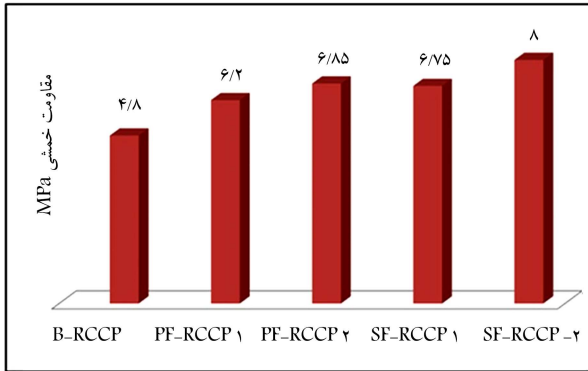
L : طول نمونه mm .



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی.



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری.



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت خمشی.

نمایش داده شده اند. نتایج به دست آمده نشانگر تأثیر هر کدام از الیاف فولادی و پلیمری در خواص مکانیکی بتن غلتکی هستند، که در روسازی‌ها استفاده می‌شوند.

۱.۴. تحلیل نتایج مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری مندرج در جدول ۱۰ بر روی نمونه‌های استوانه‌یی بتن غلتکی بدون الیاف و الیاف‌دار در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به بتن غلتکی در دو مقدار ۰/۵ و ۱ درصد در حجم واحد بتن، به ترتیب باعث افزایش ۱۰/۱ و ۱۳/۹ درصدی مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روزه می‌شود و همچنین افزودن الیاف پلیمری به بتن غلتکی به میزان ۰/۳ و ۰/۶ درصد در حجم واحد بتن به ترتیب باعث افزایش ۵ و ۶/۳ درصدی مقاومت فشاری بتن غلتکی در سن ۲۸ روزه می‌شود (شکل ۴).

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تأثیر الیاف در مقاومت فشاری بتن قابل ملاحظه نیست، اما تأثیر الیاف فولادی بیشتر از الیاف پلیمری مورد استفاده در پژوهش حاضر است. با توجه به این‌که الیاف هیچ‌گونه اثری در ساختار شیمیایی بتن ندارد، لذا تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری ندارد و تأثیر کم الیاف نیز در مقاومت فشاری ناشی از نقش الیاف در دوختن ترک‌ها و جلوگیری از گسیختگی ترد و خرد شدن نمونه‌هاست. در واقع گسیختگی فشاری بتن‌های الیافی با شکل‌پذیری همراه است و نمونه تا هنگام گسیختگی، پیوستگی خود را حفظ می‌کند.

۲.۴. تحلیل نتایج مقاومت کششی

نتایج حاصل از آزمایش کششی برزلی به روش دو نیم کردن (شکافت) در سنین ۲۸ روزه نشان‌گر این است که با افزودن الیاف فولادی به بتن، مقاومت کششی آن افزایش می‌یابد. تأثیر الیاف فولادی بهبود مقاومت کششی مستقیم بتن قابل ملاحظه است، به طوری که در زمان شکست نمونه‌ها در آزمایش برزلی، مقاومت الیاف‌ها داخل بتن از دو نیم شدن ناگهانی نمونه تحت بار وارده جلوگیری کرده و فقط در سطح مقطع نمونه‌های الیاف‌دار، ترک مشهود شده است؛ اما در نمونه‌های استوانه‌یی بتن غلتکی بدون الیاف، شکافت نمونه‌ها در همان لحظه‌ی آزمایش صورت گرفت و نمونه به دو نیم تقسیم شد (شکل ۵).

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت کششی مندرج در جدول ۱۱ بر روی نمونه‌های استوانه‌یی بتن غلتکی بدون الیاف و الیاف‌دار در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به بتن غلتکی در دو مقدار ۰/۵ و ۱ درصد در حجم واحد بتن به ترتیب باعث افزایش ۲۹/۵ و ۴۵ درصدی مقاومت

کششی بتن در سن ۲۸ روزه می‌شود و همچنین، افزودن الیاف پلیمری به بتن غلتکی به میزان ۰/۳ و ۰/۶ درصد در حجم واحد بتن، به ترتیب باعث افزایش ۲۱/۱ و ۳۱ درصدی مقاومت کششی بتن غلتکی در سن ۲۸ روزه می‌شود.

۳.۴. تحلیل نتایج مقاومت خمشی

نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت خمشی مندرج در جدول ۱۲ بر روی نمونه‌های منشوری بتن غلتکی بدون الیاف و الیاف‌دار در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به بتن غلتکی در دو مقدار ۰/۵ و ۱ درصد در حجم واحد بتن، در سن ۷ روزه به ترتیب باعث افزایش ۳۳/۸ و ۵۵ درصدی مقاومت خمشی بتن و در سن ۲۸ روزه نیز به ترتیب باعث افزایش ۴۰/۶ و ۶۶/۵ درصدی مقاومت خمشی بتن می‌شود (شکل ۶).

همچنین افزودن الیاف پلیمری به بتن غلتکی به میزان ۰/۳ و ۰/۶ درصد در حجم واحد بتن، در سن ۷ روزه به ترتیب باعث افزایش ۲۱ و ۳۵ درصدی مقاومت خمشی بتن غلتکی و همچنین در سن ۲۸ روزه به ترتیب باعث افزایش ۲۹/۱ و ۴۲/۷ درصدی مقاومت خمشی بتن می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام گرفته مشخص شد که مهم‌ترین عواملی که در طراحی‌های روسازی‌های جاده‌ها تأثیر دارند، خصوصیات و مشخصات لایه‌های روسازی راه است، که باید در طول عمر مفید روسازی راه، بیشینه‌ی تنش‌های وارده را تحمل کنند.

جدول ۱۱. نتایج آزمون مقاومت کششی.

شماره‌ی مخلوط	کد طرح	شماره‌ی نمونه	مقاومت ۲۸ روزه‌ی مگاپاسگال MPa	میانگین نتایج
۱	$B - RCCP$	$B - RCCP - ۱$	۳٫۷	۳٫۵۵
		$B - RCCP - ۲$	۳٫۴	
۲	$PF - RCCP - ۱$	$PF - RCCP - ۱ - ۱$	۴٫۲	۴٫۳
		$PF - RCCP - ۱ - ۲$	۴٫۴	
۳	$PF - RCCP - ۲$	$PF - RCCP - ۲ - ۱$	۴٫۶	۴٫۶۵
		$PF - RCCP - ۲ - ۲$	۴٫۷	
۴	$SF - RCCP - ۱$	$SF - RCCP - ۱ - ۱$	۴٫۳	۴٫۶
		$SF - RCCP - ۱ - ۲$	۴٫۹	
۵	$SF - RCCP - ۲$	$SF - RCCP - ۲ - ۱$	۵٫۱	۵٫۱۵
		$SF - RCCP - ۲ - ۲$	۵٫۲	

جدول ۱۲. نتایج آزمون مقاومت خمشی.

شماره‌ی مخلوط	کد طرح	شماره‌ی نمونه	مقاومت ۲۸ روزه‌ی مگاپاسگال MPa	میانگین نتایج
۱	$B - RCCP$	$B - RCCP - ۱$	۴٫۶	۴٫۸
		$B - RCCP - ۲$	۵	
۲	$PF - RCCP - ۱$	$PF - RCCP - ۱ - ۱$	۵٫۸	۶٫۲
		$PF - RCCP - ۱ - ۲$	۶٫۴	
۳	$PF - RCCP - ۲$	$PF - RCCP - ۲ - ۱$	۷٫۱	۶٫۸۵
		$PF - RCCP - ۲ - ۲$	۶٫۶	
۴	$SF - RCCP - ۱$	$SF - RCCP - ۱ - ۱$	۶٫۶	۶٫۷۵
		$SF - RCCP - ۱ - ۲$	۶٫۹	
۵	$SF - RCCP - ۲$	$SF - RCCP - ۲ - ۱$	۷٫۸	۸
		$SF - RCCP - ۲ - ۲$	۸٫۲	

سطح راه، ترک‌های انعکاسی به وجود آمده در سطح رویه، باعث افت کیفیت و همچنین تحمیل هزینه‌های بازسازی و تعمیرات زود هنگام بر شبکه‌ی مدیریت راه‌های شهری و برون‌شهری می‌شود. از آنجایی که مقاومت خمشی و کششی لایه‌های روسازی‌های بتنی علی‌الخصوص روسازی‌هایی مرکب، که استفاده از بتن غلتکی با روکش آسفالتی در آنها اهمیت به سزایی دارد، لذا در پژوهش حاضر سعی شده است که در بتن غلتکی با استفاده از الیاف‌های فلزی و پلیمری به طور جداگانه، مقاومت در پارامترهای مکانیکی بتن افزایش پیدا کند، که این موضوع باعث کاهش ترک خوردگی در لایه‌های بتنی روسازی و در نهایت، کاهش ترک‌های انعکاسی در رویه‌ی راه در روسازی‌های مرکب می‌شود. برخی از خواص تسلیح بتن غلتکی به این شرح است:

ترک برداشتن یا ایجاد بازشدگی یا گسترش یک درز در قشر رویه به دلیل انبساط و انقباض و افت و خیزهای ناشی از عبور ترافیک و تغییرات درجه حرارت است. حرکات افقی و قائم روسازی ترک خورده باعث ایجاد و پیشروی ترک در روکش آسفالتی راه می‌شود، که به پدیده‌ی ترک‌های انعکاسی مشهور است. با توجه به این‌که ترک‌های انعکاسی در روسازی مرکب بتنی با روکش آسفالتی بسیار مشهود است و در کشور نیز استفاده از بتن غلتکی رو به افزایش است، و همزمان استفاده از لایه‌ی روکش آسفالتی جهت بهبود کیفیت سطح بر روی بتن غلتکی متداول شده است، اما متأسفانه تیم‌های فنی و اجرایی از مشکلات ترک‌های انعکاسی در زمان بهره‌برداری غافل هستند. علی‌رغم استفاده از بتن در ساخت روسازی جهت افزایش عمر و کیفیت

۱. افزایش مقاومت خمشی، کششی و فشاری بتن غلتکی؛
۲. جلوگیری از ترک خوردگی بتن تحت بارهای واردهی ترافیکی؛
۳. جلوگیری و کنترل از ترک خوردگی بتن ناشی از انقباض و جمع شدگی بتن؛
۴. افزایش مقاومت بتن در برابر ضربه؛
۵. کاهش ترک خوردگی ناشی از شوک‌های حرارتی فصلی؛
۶. کاهش ضخامت لایه بتن در روسازی‌های مرکب با افزایش پارامترهای خمشی و کششی و در نتیجه، کاهش هزینه‌های ساخت پروژه‌های راه‌سازی؛
۷. کاهش انتقال ترک به روکش آسفالتی با توجه به کنترل ترک در لایه‌ی بتنی و جلوگیری از بروز ترک‌های انعکاسی؛
۸. جلوگیری از جدا شدگی کامل قطعات ترک خورده‌ی بتن بعد از بروز ترک خوردگی و امکان تحمل بار واردهی ترافیکی در محل درزها؛
۹. افزایش طول عمر روسازی راه؛
۱۰. کاهش هزینه‌های تعمیر نگهداری در طول عمر سرویس‌دهی؛
۱۱. استفاده از الیاف پلیمری در محل‌های دارای املاح خورنده و مضر به جای الیاف فولادی.

پانویس‌ها

1. roller compacted concrete
2. reflective cracks
3. Durocem
4. monofilament
5. cylindrical samples
6. prismatic samples

منابع (References)

1. Ravanshadnia, M. "Principles, regulations, and procedures for the management of civil projects contract", *Simaye Danesh*, **26** pp.26 (2015).
2. *Guideline for Design and Construction of Rolled Compacted Concrete Pavements*, Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution Systems, 354 (2009).
3. Alikhani, M. and Moghaddasnejad, F. "Properties and performance of roller-compacted concrete pavements in road pavement and its economic evaluation", *2nd National Conference on Applied Civil Engineering Research*, Architecture and urban management (2015).
4. Raees Ghasemi, A.M. "Concrete batching plant designs", Road, Housing and Development Research Center (2014).
5. Shekarchizadeh, M., Chini, M. and Aslanian, Z. "Overview of design principles and features of roller compacted concrete pavement", *The 5th Annual National Concrete Conference of Iran* (2014).
6. Tabatabaei, A.M. "Road Pavement" Nasher Daneshgahi, pp.463 (1999).
7. Gerardo, W. and Flintsch, K. "Composite pavement systems synthesis of design and construction practices", *Virginia Tech. Transportation Institute*, pp.5 (2008).
8. Mostafavi Moghaddam, A.A., Nouri, A. and Moghaddas Nejad, F. "The role of geosynthetics in reducing the cracks of asphalt overlays", *Information Technology Management and Documentation Center of Tehran Studies and Planning, Report*, 251, pp.5 (2015).
9. Mohseni, A.N. "The analysis of properties of coating in preventing reflection cracks in composite pavements", Thesis of Islamic Azad University of Tehran South Branch, pp.4 (2006).
10. Keymanesh, M.R. and Eslami, M. "The investigation of the role and influence of geosynthetics on the control of the reflective cracks in the asphaltic overlay", *International Conference on Civil Engineering and Architecture in Tabriz*, pp.1-2 (2014).
11. Amin Far, M.H. and Ahadi, A.R. "Investigating finite element models for determining the behavior of reflection cracks in asphalt overlays", *The 2nd Congress of Architecture and Urban Development in Tabriz*, pp.3 (2014).
12. Modaraei, A.H. et al., "Laboratory test of tensile strength of concrete for macrosynthetic fortax polymerization, national association of architects of Iran architects", *2nd National Conference on Architecture, Development and Urmia Urban Development*, pp.3 (2016).
13. Maccaferri Co., Technical Manual, "Fibers as Structural Element for the Reinforcement of Concrete", (2014). <http://docshare01.docshare.tips/files/25460/254603048.pdf>.
14. Pramod, K., Kolase, A.K. and Desai, S. "Steel fiber reinforced concrete pavement a review", *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, **1**(10), pp.6 (2015).
15. Baqeri, A.R., Zangeneh, H. and Shah Moradi, M. "Effect of new generation polymeric fibers on fiber reinforced concrete strength resistance", *6th National Congress on Civil Engineering*, Semnan (2012).
16. Angelakopoulos, H., Neocleous, K. and Pilakoutas, K. "Steel fibre reinforced roller compacted concrete roads", *Article No.3, Intersections/Intersecții*, **6**(1), (<http://www.intersections.ro>), pp.16 (2009).
17. Makoto, K. and Toru, S. "A study on mix proportions and properties of steel fiber reinforced roller compacted concrete pavement", *Translation from Proceedings of JSCE*, No. 669/V-50 (2001).
18. Shekarchizadeh, M. "The Guide for Concrete Containing Steel Fibers", Nasher Elmoadab, pp.6 (2015).

19. Hejazi, M., et al., "The effect of steel fibers on the mechanical properties and performance against the heat and freezing of lightweight self-compacting concrete", *Concrete Research Magazine, 6th Year*, No. 1 (2015).
20. Safar Niaye Kapteh, T. "The impact of recycled metal fiber tires on mechanical properties of roller compacted concrete", Master thesis, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil and Environmental (2013).
21. Ahmadi, M. and Hassani, A. "The performance of environmentally friendly fiber concrete in concrete pavement", *Civil Scientific-Research Journal*, **16**(1), pp. 179-188 (2017).
22. ACI Document 207.5R, Report on Roller- Compacted Mass Concrete, Reported by ACI Committee 207 (1999)
23. Rock Concrete Aggregates, "Standard No 302", Iranian National Standard (2016).
24. ASTM Standards C 33, "Specification for Concrete Aggregates", (2001).
25. ACI Document 211, "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete", (2002).
26. ASTM Standards C1170, "Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using Vibrating Table", (1998).
27. ASTM Standards C1176, "Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table", (2013).
28. ASTM Standards C31, "Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field", (1999).
29. ASTM Standards C39, "Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", (1996).
30. ASTM Standards C496, "Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", (1996).
31. ASTM Standards C78, "Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading", (1994).