

رفتار سازه‌های کانال‌های درون‌شهری پر شده با انواع مخلوط CLSM حاوی مصالح بازیافتی*

محمد کاظم شربتدار^(۱)

چکیده مخلوط‌های کم‌مقاومت روان (CLSM) بدون نیاز به تراکم در محل‌های مورد نیاز به‌عنوان پرکننده در پرکردن کانال‌های حفاری شده برای لوله‌های تأسیسات شهری استفاده می‌شوند. در این مقاله کارهای آزمایشگاهی آزمونه‌های مکعبی کوچک و کانال بزرگ ساخته شده با مخلوط بتن روان کم‌مقاومت انجام شد که نتایج مقاومت فشاری ۱۲ طرح نشان دهنده‌ی تولید بتن‌هایی بسیار روان است با نسبت آب به سیمان بالای ۲ با مقاومت‌های متفاوت که برای جایگزینی با خاکریزهایی با تراکم نامناسب و کاهش نشست آسفالت متناسب است. کانال‌های بزرگ آزمایشگاهی و خیابانی، بارهای متمرکزی بین ۳/۵ تا ۷ تن را که در حدود بار چرخ کامیون ۴۵ تنی آئین‌نامه‌های طراحی جاده‌ها و پل‌ها است که بعد از دو ماه با نشست بسیار اندک همراه بودند و رفتار سازه‌ای مناسب داشت.

واژه‌های کلیدی بتن (CLSM)، خاکستر بادی، کانال لوله‌ها، طرح اختلاط بهینه، نشست، مقاومت فشاری، رفتار سازه‌ای، طراحی روکش.

Structural Behavior of in-city canals filled with different CLSM containing Recycled Aggregated

M.K. Sharbatdar

Abstract Compacted Low strength material (CLSM) made with material such as fly ash and recycled aggregates is used as filler at city infrastructure canals without compaction need. Experimental small specimens and large canals were casted with this concrete and tested to give several results. Test results of compression strengths on 12 different designs shows that this concrete with high workability and w/c ratio over 2 can be replaced with low compacted filled soils and can reduce asphalt settlement over city pavements. Large CLSM canals inside and outside of laboratory tolerated concentrated loads from 3.5 to 7 ton about standard 45-ton Truck (at Bridge and pavement design codes) with low settlement after two months and showed acceptable structural behavior.

Keywords CLSM concrete, Fly ash, Canals, concrete design, settlement, compression strength, pavement design.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۶/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۱۴ می‌باشد.

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مقدمه

مصالح با مقاومت کم کنترل شده یک ماده سیمانی خود متراکم است که به عنوان یک ماده‌ی پرکننده در محل پرکننده‌های متراکم استفاده می‌شود و به صورت خاکریز روان، پرکننده با چگالی تنظیم شده، ملات روان، مخلوط سیمانی خاکی خمیری، و عبارات‌های دیگر بیان می‌شود و اطلاعاتی درباره کاربردها، خصوصیات مصالح، نسبت‌ها، ساخت و اجرا و مراحل کنترل کیفیت آن توسط مراجع معتبر علمی جهانی و بعضی از شرکت‌های اجرائی جهانی با نگرش مراحل اجرائی و کاربردها و نیز به وسیله‌ی محققان و پژوهشگران ارائه شده‌اند [1-3]. بعضی از این بتن‌ها دارای مقاومت فشاری $8/3$ مگاپاسکال یا کمترند بوده تا امکان حفاری این بتن در آینده وجود داشته باشد و فقط انتظار تحمل بارهای پیاده یا خودروی سبک از آن‌ها می‌باشد و به تراکم (تحکیم)، عمل‌آوری برای حصول مقاومت مورد نظر نیاز ندارد. این بتن به صورت آماده در یک ترانشه، یا حفاری‌ها به عنوان پرکننده‌ها ریخته می‌شود و با وجود سیال بودن در هنگام اجرا، بعد از ۲ یا ۳ ساعت می‌تواند وزن یک شخص را تحمل کند. اگرچه در مقایسه با خاکریز معمولی دارای قیمت بالاتری می‌باشد، خیلی از فواید آن باعث کاهش هزینه‌ها در محل می‌شود [4-6]. ماده‌ی مناسب برای کف‌سازی کانال‌های تلفن، برق، لوله و غیره است تا حفره‌های کف کانال را پر کند و تکیه‌گاه یکنواختی فراهم آورد [7,8].

مخلوط‌های معمولی CLSM معمولاً شامل آب، سیمان پرتلند، خاکستر بادی یا تولیدات مشابه، دانه‌های ریز یا درشت یا هر دو می‌باشند. اگرچه مواد استفاده شده در این مخلوط‌ها مقررات ASTM و دیگر استانداردها را رعایت می‌کنند، همیشه استفاده از مواد کاملاً استاندارد لازم نیست. انتخاب مواد باید براساس موجود بودن، هزینه، کاربرد خاص و خصوصیات ضروری مخلوط شامل روانی، مقاومت، قابلیت حفاری و چگالی باشد. خاکستر بادی ناشی از سوخت ذغال در بعضی اوقات برای بهبود روانی استفاده می‌شود تا

باعث افزایش مقاومت و کاهش آب انداختن، و هم‌چنین کاهش آب‌رفتگی و نفوذپذیری گردد. مصرف کمتر آب در آن باعث کاهش ترک‌های آب‌رفتگی و جمع‌شدگی و ترک‌های ناشی از آن می‌گردد و بعد از خشک شدن دارای افت می‌شود که در اجرا باید به این موارد دقت شود [9-11]. مصالح غیر استاندارد موجود مانند ماسه‌ی مازاد ریخته‌گری، خرده شیشه در شیشه‌گری، و بتن‌های خردشده و پساب‌های صنعتی متناسب با مقررات پروژه در مخلوط‌های CLSM استفاده می‌شوند [12-14]. خواص CLSM بین خواص خاک و بتن می‌باشند. این مخلوط مشابه موادی که در بتن استفاده می‌شود ساخته می‌شود و مشابه بتن نیز ریخته می‌شود و در حال استفاده نیز خواصی مشابه خاک را از خود نشان می‌دهد. جریان‌پذیری، خاصیتی است که CLSM را از دیگر مواد پرکننده متمایز می‌کند و ماده را قادر می‌سازد که خودبه‌خود هموار گردد، به داخل یک حفره برود و آنجا را پر کند و بدون نیاز به تجهیزات سنتی ریختن بتن و تراکم، متراکم گردد. میزان آب مصرفی مورد نیاز برای این نوع بتن به پارامترهای مختلفی مانند نوع و میزان سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان، مواد افزودنی و خاکستر بادی و دانه‌های نرم غیر چسبیده تا حدود ۲۰٪ وزن کل دانه‌ها و غیره بستگی دارد [15]. ماسه‌های استفاده شده‌ی کوره‌های ریخته‌گری فلزی و غیر فلزی پتانسیل خوبی برای اضافه شدن به بتن CLSM و اصلاح خواص آن دارند [16]. در سال‌های اخیر تحقیقات قابل توجهی برای استفاده از ضایعات صنعتی و غیره در ساخت و به‌کارگیری بتن‌های کم مقاومت و به‌صورت خاکریز روان با خصوصیتی جدید انجام شده است تا ضمن اقتصادی بودن، باعث بهبود خواص CLSM برای کاربردهای جدید باشد و در مواردی می‌توان از سرباره‌ی مانده در فیلترهای کارخانجات سیمان تا حدود ۱۵ درصد برای بهبود خواص بتن CLSM به خصوص جریان‌پذیری و مقاومت استفاده و جایگزین سیمان اصلی نمود [17,18]. اخیراً تحقیقاتی در خصوص استفاده از پسماندهای کارخانجات سنگبری

ظرفیت بالا با میزان بازشدگی مناسب در این مقاله ارائه می‌گردد.

آزمونه‌های آزمایشگاهی

مصالح مصرفی. خاکستر بادی (وارداتی از کشور آفریقای جنوبی)، میکروسیلیس (کارخانه‌ی فروسیلیس سمنان) به‌عنوان مواد مکمل به‌همراه سیمان پرتلند تیپ ۲ و خرده آجر (به‌صورت اشباع با سطح خشک) با دانه‌بندی بین ۱۲/۵ تا ۲۰ میلی‌متر، آب، و ماسه یا شن برای ساخت انواع طرح اختلاط مخلوط بتنی خاص کم‌مقاومت روان به‌کار رفت تا چند طرح اختلاط بهینه برای پرکردن کانال‌های لوله‌ها به‌دست آید. خاکستر بادی در کشورهایی مانند آفریقای جنوبی و در نیروگاه‌های ذغال سنگی با قیمت بسیار پائین تولید می‌شود و برای مصرف احجام زیاد در ایران، حمل و نقل پرهزینه‌ای دارد. ضمناً منشأ طبیعی این مواد در کشور ایران یافت شده است که به‌زودی قابل بهره‌برداری با قیمت مناسب خواهد بود. استفاده از خرده آجر در بسیاری از کارخانجات و پروژه‌های عمرانی، کمکی به حفظ محیط زیست می‌باشد. البته امکان استفاده از پودر سنگ به‌عنوان بخشی از مواد جایگزین خاکستر بادی جهت افزایش روانی با اثرات مثبت و منفی نیز وجود دارد که در این طرح مورد بررسی قرار نگرفته است.

مشخصات طرح‌های اختلاط آزمونه‌های مکعبی

۶۰ آزمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری در چهار نوع طرح اختلاط D1 تا D4 با خصوصیات جریان اسلامپ مناسب و بسیار روان مطابق با استاندارد BS 1881-83 ساخته شدند و در قالب‌های مکعبی ریخته و در دو حالت متفاوت عمل‌آوری گردید تا تأثیر عمل‌آوری بر بتن‌های کم‌مقاوم حاوی خاکستر بادی بررسی گردد. مقادیر آب، سیمان، ماسه و خاکستر بادی و همچنین نسبت‌های آب به سیمان و نسبت آب به مجموع سیمان و خاکستر بادی و هم‌چنین وزن

در ساخت بتن‌های روان توسط آقای دکتر کاشی در انستیتوی مصالح ساختمانی دانشگاه تهران انجام شده است.

نشست همراه با کاهش حجم CLSM به‌محض آزاد کردن آب یا هوای محبوس از طریق متراکم کردن مخلوط می‌باشد. آب مصرفی برای جریان‌پذیری معمولاً بیش‌تر از آب مورد نیاز برای هیدراسیون می‌باشد و معمولاً به‌وسیله‌ی خاک اطراف کانال‌ها جذب می‌گردد و یا از طریق سطح به‌صورت آب انداختن آزاد می‌گردد. خاکریزهای متراکم شده حتی وقتی شرایط تحکیم را مراعات کنند نشست می‌کنند ولی CLSM بعد از سخت شدن هیچ نشستی ندارد. CLSM با مصالح پلی‌اتیلن که عموماً به‌عنوان محافظ برای وسایل زیر خاکی و یا لوله‌های گاز یا آب استفاده می‌شوند سازگار است. برای هر نوع ماده‌ی پرکننده یا خاکریز، دقت لازم باید مبذول داشت تا آسیبی به روکش محافظ خطوط لوله‌های مدفون وارد نشود. دانه‌بندی ریزدانه CLSMها می‌تواند باعث تقلیل خراشیدن و ضربه زدن به این سطوح پلی‌اتیلنی شود. مخلوط‌های بتنی خاکریز روان برای پرکردن فضای خالی زیر و اطراف و بالای لوله‌های گاز یا آب یا فاضلاب نصب شده‌ی درون یا برون شهری در کانال‌های حفاری شده قابل استفاده می‌باشند. ضمن جلوگیری از نشست و احتمال خمیدگی در لوله‌ها، از دسترسی و آسیب‌های احتمالی لوله‌های پلی‌اتیلن توسط حشرات موذی جلوگیری می‌کند. تاکنون آزمایش‌های متعددی انجام گرفته است تا ضمن به‌دست آوردن طرح اختلاط‌های مختلفی برای تولید و اجرای بتن CLSM، آزمایش‌های متعدد سازه‌ای بر روی کانال‌های حفاری شده‌ای که لوله‌های پلی‌اتیلن در آن قرار دارد و با این بتن‌ها پر شده‌است انجام شود. پارامترهای آزمایشگاهی زیادی برای کاربرد این بتن در این مورد خاص مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مراحل طراحی و ساخت آزمونه‌های مکعبی استاندارد فشاری ۱۵۰ میلی‌متری و کانال‌های بتنی تحت جک‌ها با

ولی در مواردی علاوه بر بتن روان به مقاومت مناسب نیز به دلیل تردد سنگین نیاز است که مصرف بالاتر سیمان یا میکروسیلیس باید مدنظر باشد که در هر دو حالت استفاده یا عدم استفاده از خرده آجر می‌تواند هم نقش مقاومتی و هم مزیت اقتصادی به‌عنوان مصالح بازیافتی جایگزین سنگدانه‌های معمولی گردند. چنانچه از خرده آجر خشک استفاده شود باید آب را به میزان درصد جذب در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، آب اضافه کرد تا کارایی و روانی مناسب برای تولید بتن روان حاصل گردد.

مخصوص برای یک متر مکعب در جدول شماره‌ی (۱) ارائه شده است.

در آزمایش‌های مرحله‌ی بعد نیز مخلوط‌هایی برای شرایط خاص با استفاده از ترکیب خاکستر بادی و میکروسیلیس و متناسب با نیاز مقاومتی مورد نیاز، با و بدون استفاده از خرده آجر، چهار نوع طرح اختلاط DC1 تا DC4 برای یک متر مکعب مطابق جدول (۲) ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند تا در پر کردن کانال‌های واقعی استفاده شوند. در بعضی موارد نیاز به مقاومت بالا نیست و بتن بسیار روان با مصرف کم سیمان و مصرف بالای خاکستر بادی تولید می‌شود

جدول ۱ طرح اختلاط بتن روان آزمون‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری

مؤلفه‌های بتن	مخلوط D1	مخلوط D2	مخلوط D3	مخلوط D4
سیمان (کیلوگرم)	۲۲۰	۱۱۰	۱۱۰	۷۵
خاکستر بادی (کیلوگرم)	۰	۱۱۰	۲۲۰	۲۲۵
ماسه (کیلوگرم)	۱۳۳۰	۱۳۳۰	۱۳۳۰	۱۳۳۰
آب (کیلوگرم)	۲۲۰	۲۲۰	۳۳۰	۳۰۰
وزن مخصوص ($\frac{kg}{m^3}$)	۱۷۷۰	۱۷۷۰	۱۹۹۰	۱۹۳۰
$\frac{W}{C}$	۱	۲	۳	۴
$\frac{W}{C+F}$	۱	۱	۱	۱

جدول ۲ طرح‌های اختلاط مخلوط بتنی ساخته شده برای پرکردن کانال‌های حفاری شده

اجزاء تشکیل دهنده بتن	مخلوط DC1	مخلوط DC2	مخلوط DC3	مخلوط DC4
سیمان (کیلوگرم)	۵۸	۵۰	۱۲۰	۱۱۰
خاکستر بادی (کیلوگرم)	۱۱۷	۱۰۰	۱۲۰	۲۲۰
میکروسیلیس (کیلوگرم)	۰	۱۳	۰	۰
آب مصرفی (کیلوگرم)	۱۷۵	۱۵۰	۲۴۰	۲۷۵
$\frac{W}{C}$	۳	۳	۲	۲/۵
$\frac{W}{C+F}$	۱	۱	۱	۰/۸
ماسه (کیلوگرم)	۷۰۰	۷۰۰	۱۴۸۰	۱۳۲۰
خرده آجر اشباع (کیلوگرم)	۹۰۰	۹۰۰	۰	۰
وزن مخصوص ($\frac{kg}{m^3}$)	۱۹۵۰	۱۹۱۳	۱۹۶۰	۱۹۲۵

مخلوط DC4 پر شده‌اند. در بسیاری موارد می‌توان لوله‌ی فلزی یا پلی‌اتیلن در قالب قرار داد و بتن بر روی آن ریخت اما در مواردی مانند لوله‌های گاز باید طوری باشد که مشکلی برای کنترل کیفیت جوش‌های لوله‌های پلی‌اتیلن بعد از عبور گاز داخل آن‌ها به وجود نیاید، لذا دو نوع بتن‌ریزی در قالب‌ها در نظر گرفته شدند. در حالت اول، یک غلاف پلیکای سبک مطابق شکل (۲-الف) در اطراف لوله‌ی اصلی گاز قرار گرفت و سپس بتن روان بر روی این غلاف ریخته شد که در نتیجه هیچ تماسی بین بتن و لوله‌ی اصلی وجود نداشت و در حالت دوم، بر روی لوله‌ی اصلی تا عمق مشخصی مطابق شکل (۲-ب)، خاک ریخته شد و به‌طور مناسب کوبیده شد. سپس یک لایه بتن روان بر روی لایه‌ی خاک کوبیده شده ریخته شد که هیچ تماسی بین بتن و لوله‌ی اصلی وجود نداشت. در همه‌ی قالب‌ها، ابتدا به‌اندازه‌ی ۲ سانتی‌متر خاک نرمه ریخته شد و لوله روی آن قرار گرفت. در چهار قالب A, B, C و D شکل (۲-الف) با عمق کل ۲۸ سانتی‌متر، ابتدا غلافی نیم‌دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر بر روی لوله اصلی پلی‌اتیلن به قطر ۶ سانتی‌متر قرار داده شد تا بتن با لوله اصلی در تماس نباشد سپس بتن با عمق ۱۵ سانتی‌متر مستقیماً بر بالای غلاف پلیکایی و هم‌چنین در اطراف آن ریخته شد. در دو قالب E و F شکل (۲-ب) با عمق کل ۳۸ سانتی‌متر، ابتدا لوله بر روی خاک نرمه با ضخامت ۲ سانتی‌متر قرار گرفت و سپس لایه‌ی خاک مخلوط ریزدانه با عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر در بالای لوله‌ی اصلی و اطراف آن ریخته و به‌صورت دستی کوبیده شد و سپس با لایه‌ی مخلوط بتن روان با عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر به‌طور کامل پر گردید.

قالب‌های مکعبی آزمایشگاهی با مخلوط روان بدون نیاز به ویبره، پر می‌شوند و ملاک روانی نیز محاسبه‌ی قطر بتن پخش شده‌ی یکنواخت در آزمایش جریان اسلامپ مطابق ASTM C143-90 و شکل (۱) بود که در حقیقت یکی از آزمایش‌های بتن خود متراکم (SCC) است که برای بتن‌های CLSM هم کاربرد دارد. اگرچه از سوزن و یکات برای اندازه‌گیری زمان گیرش ملات بتنی استفاده نشده است ولی با مشاهده در محل، زمان گیرش اولیه‌ی بتن در فضای داخل آزمایشگاه حدود ۹۰ دقیقه و زمان گیرش نهایی بسته به نوع مواد بین ۶ تا ۹ ساعت متغیر بود. آزمون‌ها بعد از مدت زمان مورد نظر تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرند. از محاسن بتن‌هایی با مقاومت فشاری پائین، امکان حفاری مجدد بعد از مدت‌ها و هم‌چنین قابلیت میخ‌کوبی برای کارهای خاص می‌باشد که در این پروژه بررسی گردید.

مشخصات آزمون‌های قالب‌های کانال‌مانند

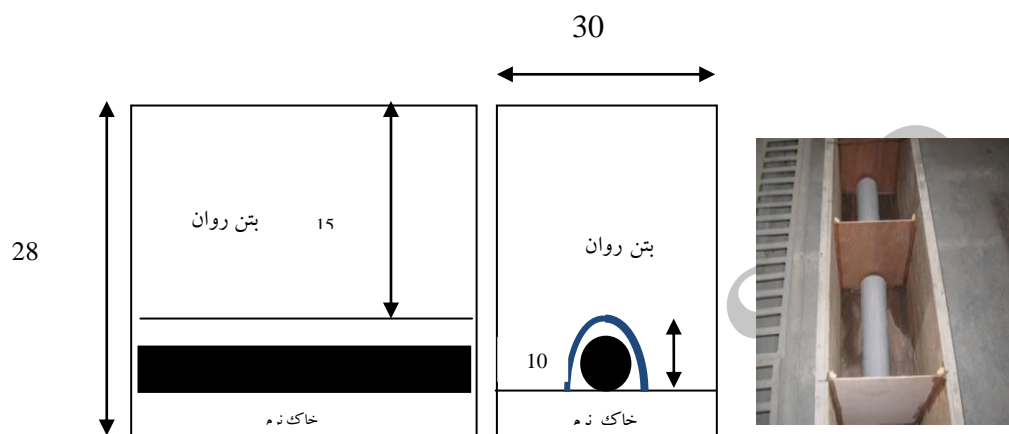
سازه‌ی آزمایشگاهی

شش قالب مشابه کانال در آزمایشگاه و شش کانال مورد نظر با ابعاد و شرایط مشابه نیز در خیابان‌ها در نظر گرفته شده‌اند. همه‌ی قالب‌ها دارای ابعادی به طول ۴۰ سانتی‌متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر چهار قالب دارای عمق ۲۸ و دو قالب دارای عمق ۳۸ سانتی‌متر بودند. بدنه‌های این قالب‌های چوبی نسبتاً محکم و سخت است و نسبتاً شبیه بدنه‌های اطراف کانال‌های طبیعی خاکی می‌باشد. این قالب‌ها از A تا F نام‌گذاری شده‌اند که مجموعاً چهار نوع مخلوط در داخل آن‌ها قرار می‌گیرد.

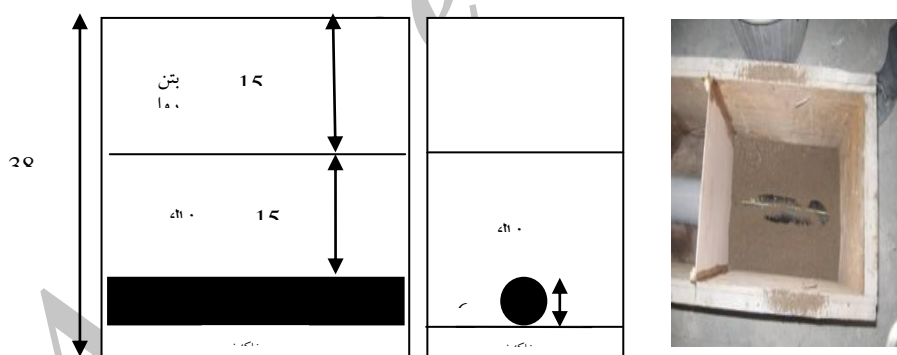
قالب‌های A و E با مخلوط DC1، قالب‌های C و F با مخلوط DC3، قالب B با مخلوط DC2، قالب D با



شکل ۱ آزمایش جریان اسلامپ و اندازه‌گیری میزان روانی مخلوط



الف- حالت اول - غلافها بر روی لوله‌ی اصلی



ب- حالت دوم - لوله‌ی اصلی و لایه خاک کوبیده شده روی آن
شکل ۲ مقطع لوله‌های داخل کانال‌های آزمایشگاهی



شکل ۳ کلیه قالب‌های پر شده

بر روی چرخ‌ها طبق آئین‌نامه‌ها، در نظر گرفته شود. در این شرایط بار متمرکز مجاز در زیر هر چرخ بین ۳ تا ۴/۵ تن متغیر است. عرض چرخ طبق آئین‌نامه‌ی بارگذاری جاده‌ها و پل‌ها برابر ۱۰ سانتی‌متر و طول آن حدود ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. برای شبیه‌سازی بار وارد بر کانال‌ها مشابه لاستیک کامیون، تکیه گاهی فلزی مشابه شکل (۵) با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر عرض و حدود ۱۹ سانتی‌متر طول ساخته شد تا بار سنگین از طریق آن به کانال منتقل گردد و از تمرکز بار بر روی بتن جلوگیری شود. کانال‌ها در زیر جک فشاری قرار می‌گیرند و بار سنج مطابق شکل (۶) بر روی آن قرار داده می‌شود تا بار وارد را اندازه‌گیری کند. ضمناً کمی خاک در زیر قالب چوبی شبیه‌سازی شده ریخته می‌شود تا شبیه کف کانال طبیعی خاکی باشد و دارای کف فلزی سخت مشابه کف آزمایشگاه نباشد. مطابق شکل (۷)، از دو نوع تغییر مکان‌سنج برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های قائم بر روی سطح بتن و هم‌چنین بر روی کف کانال چوبی استفاده شده‌اند.

شش قالب داخل آزمایشگاه و شش کانال حفاری شده در خیابان آسفالتی با چهار نوع طرح اختلاط که تقریباً همه دارای خصوصیات اسلامپ ریزشی بیش از حد متعارف در بتن‌های معمولی بودند مطابق شکل (۳) به‌راحتی پر شدند و ۱۶ آزمونه‌ی مکعب ۱۵ سانتی‌متری نیز برای اندازه‌گیری مقاومت تهیه شدند.

مشخصات آزمونه‌های کانال‌های حفاری شده

سازه‌ی خیابانی

شش کانال مورد نظر در خیابان‌ها (از A تا F) نیز با ابعاد و شرایط مشابه شش قالب داخل آزمایشگاه در نظر گرفته شدند و به‌طور مجزا با بدنه‌های کاملاً طبیعی خاکی حفر گردیدند و لوله‌ها به دو صورت با و بدون غلاف قرار گرفتند و با چهار نوع طرح اختلاط DC1 تا DC4 پر شدند. نمای جزئی و کلی هر چهار کانال A، B، C، و D با عمق کل ۲۸ سانتی‌متر و دو کانال E و F با عمق کل ۳۸ سانتی‌متر، قبل از بتن‌ریزی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

مراحل بارگذاری کانال‌های داخل آزمایشگاه

کانال‌ها باید تحت شرایط بارگذاری بسیار مشابه به عبور کامیون ۱۰ چرخ ۴۵ تنی به‌عنوان سنگین‌ترین بار



شکل ۴ آماده کردن کلیه‌ی کانال‌های خیابانی



شکل ۶ نصب جک و بارسنج و ریختن خاک در زیر قالب



شکل ۵ تکیه‌گاه فازی منتقل‌کننده‌ی بار



شکل ۷ نصب تغییر مکان سنج برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های قائم قالب‌ها

در جدول (۳) و نسبت مقاومت ۲۸ به ۷ روزه‌ی آزمونه‌ها نیز در جدول (۴) داده شده‌اند که a_1 مقاومت فشاری نمونه با عمل‌آوری مناسب و a_2 بدون عمل‌آوری ۲۸ روزه بوده است و $k_1 = \frac{a_1}{a_2}$ نسبت این دو عدد می‌باشد در حالی که a_3 مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه بدون عمل‌آوری است و k_2 نسبت مقاومت‌های ۲۸ به ۷ روزه بدون عمل‌آوری می‌باشد. مقاومت این آزمونه‌ها متناسب با طرح‌های مختلف اختلاط و میزان مصرف مؤلفه‌های بتن از ۴ تا ۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متغیر بودند که بر حسب نیاز از یکی از این طرح‌ها در مراحل بعدی استفاده گردید. زمان گیرش اولیه و نهایی آزمونه‌ها متناسب با میزان مصرف سیمان و مصرف خاکستر بادی و شرایط جوی و آب و هوایی، متغیر می‌باشد و اگر نیاز به تردد سریع افراد و به‌خصوص وسایل نقلیه می‌باشد باید با استفاده از موادی مانند میکروسیلیس سعی شود مقاومت اولیه‌ی بالاتری در زمان کوتاه‌تر به‌دست آید.

مراحل بارگذاری و تردد خودروها بر روی کانال‌های خیابان

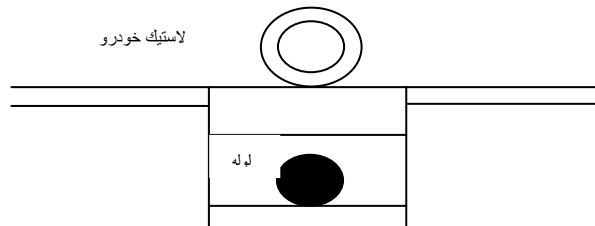
کانال‌های خیابان پس از سه روز ترافیک سبک خودروی سواری و پس از شش روز ترافیک سنگین کامیون‌ها و اتوبوس‌ها باز شد. شکل (۸) آماده بودن کانال‌ها پس از تکمیل بتن‌ریزی و جمع کردن موانع اطراف آن را نشان می‌دهد که آماده‌ی تردد وسایل نقلیه سبک می‌باشد. شکل (۹) تردد و عبور خودروی سبک سواری و کامیون سنگین حدود ۲۰ تن که از روی همه کانال‌ها می‌گذرند را نشان می‌دهند.

نتایج آزمایش‌ها

آزمونه‌های مکعبی. نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه‌ی آزمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (مطابق بند ۶-۱ استاندارد ۶۰۴۸ ایران) بدون عمل‌آوری شدن (در هوای آزاد آزمایشگاه) و آزمونه‌های عمل‌آوری شده به‌صورت مرطوب و درصد افزایش مقاومت آزمونه‌های عمل‌آوری شده نسبت به عمل‌آوری نشده



ب- کانال ساخته شده آماده



الف- مقطع شمانیک کانال خیابانی و چرخ لاستیک خودرو

شکل ۸ آماده بودن کانال‌های خیابانی برای بارگذاری



شکل ۹ تردد و عبور خودرو سبک و کامیون بر روی کانال‌های خیابانی

جدول ۳ نتایج مقاومت‌های فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$) ۲۸ روزهی آزمون‌های مخلوط‌های متفاوت با مقایسه‌ی اثر عمل‌آوری

مخلوط											نوع عمل‌آوری	
D4			D3			D2			D1			
متوسط	نمونه ۲	نمونه ۱	متوسط	نمونه ۲	نمونه ۱	متوسط	نمونه ۲	نمونه ۱	متوسط	نمونه ۲	نمونه ۱	
۲۴/۹	۲۴/۱۲	۲۵/۶۷	۳۳/۳	۳۵/۹۶	۳۰/۷۰	۴۸/۷	۴۸/۸۰	۴۸/۵۷	۸۰/۸	۸۵/۸۳	۷۵/۷۶	$a_1 =$ با
۱۴/۳۵	۱۵/۰۱	۱۳/۶۹	۱۳/۳	۱۱/۸۴	۱۴/۷۷	۲۶/۷	۲۸/۶۷	۲۸/۶۷	۷۷/۱۱	۷۵/۵۶	۷۸/۶۷	= بدون
۱/۷۳	۱/۶	۱/۸۷	۲/۵	۳/۰۴	۲/۰۸	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۰۵	۱/۱۴	۰/۹۶	$k_1 = \frac{a_1}{a_2}$

جدول ۴ نتایج مقاومت فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$) آزمون‌ها بدون عمل‌آوری مخلوط‌های متفاوت با مقایسه‌ی عمر آزمون‌ها

مخلوط											مدت زمان (روز)	
D4			D3			D2			D1			
متوسط	نمونه	نمونه	متوسط	نمونه	نمونه	متوسط	نمونه	نمونه	متوسط	نمونه	نمونه	
۱۴/۳۵	۱۵/۰۱	۱۳/۶۹	۱۳/۳	۱۱/۸۴	۱۴/۷۷	۲۶/۷	۲۸/۶۷	۲۸/۶۷	۷۷/۱۱	۷۵/۵۶	۷۸/۶۷	$a_2 = 28$
۲۴/۲	۲۴/۷	۲۳/۷	۷/۹	۷/۶	۸/۲	۱۹/۱۴	۱۸/۹	۱۹/۳	۶۵/۷۹	۶۴/۴۷	۶۷/۱۱	$a_3 = 7$
۲/۵۵	۲/۴	۲/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۸	۱/۳۹	۱/۴	۱/۳۸	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	$k_2 = \frac{a_2}{a_3}$

جدول ۵ نتایج مقاومت‌های ۹۰ روزه (سه ماهه) آزمون‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری بدون عمل‌آوری شدن

نسبت مقاومت ۹۰ به ۷ روزه	مقاومت فشاری ۹۰ روزه $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	مقاومت فشاری ۷ روزه $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	طرح اختلاط
۱/۸	۱۳/۵	۷/۵	DC1
۱/۸۲	۱۵/۵	۸/۵	DC2
۲	۳۷/۷	۱۸/۵	DC3
۲/۱	۴۳/۵	۲۱	DC4

بتن و نشست در کانال‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. در کانال‌های A و B با مخلوط‌های DC1 و DC2 دارای خرده آجر، بتن مستقیماً بر روی غلاف پلیکا ریخته شد و به دلیل عدم وجود خاک بر روی لوله‌ها و زیر بتن ریخته شده، میزان نشست نهایی بسیار ناچیز بود. کانال‌های A و B به ترتیب بارهای ۳/۷ و ۳/۸۵ تن را تحمل کردند که در حدود بار نهایی از طرف چرخ کامیون می‌باشد. ترک‌ها به صورت شعاعی در اطراف صفحه‌ی فلزی که مشابه چرخ لاستیک است اتفاق افتاد. کانال B با مخلوط DC2 دارای درصدی میکروسیلیس بود که باعث افزایش نسبی و مصرف کم‌تر سیمان شد.

در قالب‌های C و D با مخلوط‌های روان‌تر و نرم‌تر DC3 و DC4 (بدون خرده آجر)، بتن مستقیماً بر روی غلاف‌های پلیکا ریخته شد و تماسی با لوله‌های اصلی پلی اتیلن نداشت و میزان نشست نهایی در هر دو قالب بسیار ناچیز بود و به ترتیب باری معادل ۶ و ۵ تن، تقریباً دو و یک و نیم برابر بار ماکزیمم مجاز کامیون‌های سنگین در جاده‌ها تحمل کرد و ترک‌ها هم به صورت شعاعی در اطراف صفحه‌ی فلزی تا شکست نهایی ادامه یافت و رفتار مناسب‌تری نسبت به قالب‌های دارای خرده آجر نشان داد. در قالب E به دلیل خاک روی لوله‌ها و زیر بتن، نشست اولیه حائز توجه بود ولی نشست نهایی بعد از تراکم خاک، بسیار ناچیز بود. با داشتن مخلوط DC1 و مقدار قابل توجه خرده آجر و باری معادل ۳/۵ تن مشابه کانال‌های A با مخلوط مشابه و کانال B با مخلوط DC2، بار در قالب

برای حصول مقاومت کوتاه‌مدت و به نیت بهره برداری سریع از کانال بتن‌ریزی شده و اجازه‌ی تردد، آزمون‌های کانال‌های ساخته شده در خیابان، بعد از سه روز در معرض تردد خودروها قرار گرفتند و در حقیقت آزمایش مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام شد. مقاومت فشاری متوسط ۷ و ۹۰ روزه‌ی آزمون‌های مکعبی بتنی (با سیمان پرتلند تیپ ۲) طرح‌های اختلاط DC1 تا DC4 در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. نتایج سه ماهه رشدی حدود ۱۰۰٪ در مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی نسبت به مقاومت فشاری متوسط ۷ روزه را نشان داد که به طور افزایشی قابل توجه است. باید توجه کرد که کلیه‌ی آزمون‌ها در فضای باز آزمایشگاه و بدون هر گونه عمل‌آوری خاص نگه داشته شده‌اند. بنابراین بر خلاف بتن‌های معمولی که عدم عمل‌آوری مناسب باعث جلوگیری از افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری می‌شود، بتن‌های حاوی خاکستر بادی با عمل‌آوری کم‌تر یا ناچیز هم می‌توانند افزایش مقاومت فشاری داشته باشند. قطر بتن ریزشی در آزمایش اسلامپ به عنوان معیاری برای روانی نسبی بتن ساخته شده می‌باشد. قطر متوسط بتن ریزشی در آزمایش‌ها طرح اختلاط یک، دو، سه و چهار به ترتیب برابر ۶۱، ۵۴، ۷۸ و ۶۹ سانتی‌متر و همگی به صورت ریزشی بود.

مشاهدات و نتایج سازه‌ای کانال‌های

آزمایشگاهی

مراحل مختلف بارگذاری توسط جک‌های فشاری پس از ۱۴ روز بعد از بتن ریزی و شکست تدریجی سطح

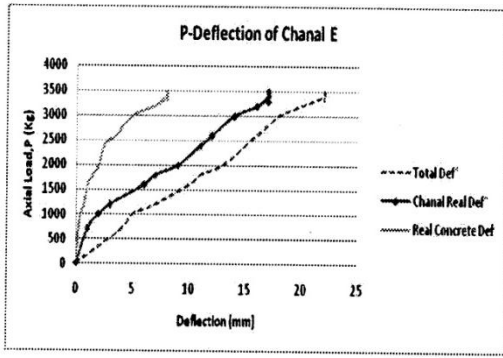
نهایی محاسبه شده که بر اساس تغییر مکان واقعی بتن و ارتفاع متوسط بتن ریزی در نظر گرفته شده است برابر ۲ درصد و تنش نهایی برابر با ۱۹/۹۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد.

قالب های آزمایشگاهی متناسب با نوع بتن مصرفی و وجود یا عدم وجود خرده آجر و یا میکروسیلیس و خاکستر بادی دارای نشست و باربری متفاوت بودند. قالب B به دلیل مخلوط سخت تر حاوی خرده آجر و میکروسیلیس، دارای نشست نهایی کم تر ولی باربری بیش تر نسبت به قالب A بود. قالب E با نسبت آب به سیمان بالا و مقدار قابل توجه خرده آجر و یک لایه خاک کوبیده شده، رفتاری مشابه قالب A با بار نهایی حدود ۹۰٪ بار نهایی کانال B داشت. قالب F دارای مخلوطی مشابه کانال C ولی دارای یک لایه خاک کوبیده شده بر روی لوله ها و زیر بتن بود، از این رو، نشست اولیه ای قابل توجه داشت ولی میزان نشست نهایی آن بسیار ناچیز بود و بار نهایی آن به ترتیب ۲۵٪ و ۵۰٪ بیش از بار تحمل شده ی قالب های C و D بود. نشست قابل توجه در این قالب به دلیل نوع بتن نرم و انعطاف پذیری بود که دارای درشت دانه و خرده آجر نبود و در کنار مقاومت فشاری قابل توجه، دارای تغییر مکان قائم قابل توجه هم بود. منحنی های تنش - کرنش بتن شش قالب در شکل (۱۲) نشان داده شده اند.

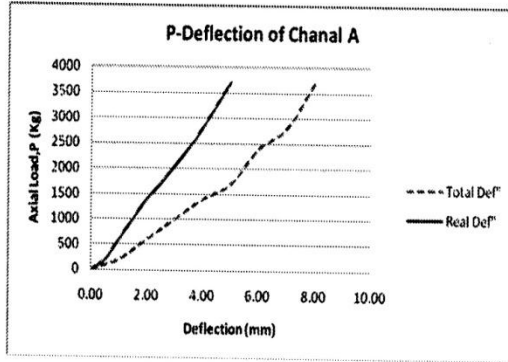
B به دلیل استفاده از میکروسیلیس حدود ۱۲٪ بیشتر بود. در قالب F با مخلوط DC3 و بدون استفاده از خرده آجر، خاک کوبیده بین لوله ی اصلی پلی اتیلن و بتن روان قرار گرفت لذا نشست اولیه ای ناشی از تراکم خاک مشاهده شد ولی نشست نهایی آن ناچیز بود و باری برابر ۷/۵ تن معادل دو برابر بار بیشینه ی مجاز کامیون های سنگین در جاده ها، قبل از خرابی نهایی را تحمل کرد. تنش در هر مرحله بر روی بتن قالب ها برابر بار وارد در آن مرحله تقسیم بر مساحت تکیه گاه فلزی (۱۹۰ سانتی متر مربع) می باشد. اختلاف بین تغییر مکان قائم کل (Total Displacement) زیر بار وارد و تغییر مکان قائم کف قالب چوبی ناشی از تراکم خاک برابر با تغییر مکان واقعی (Real Displacement) بتن در زیر بار وارد خواهد شد. نتایج اولیه ای که از آزمایش ها به دست آمد شامل مقدار بار P و تغییر مکان های کل در سطح بتن (در مجاورت صفحه ی فولادی) و تغییر مکان بر روی کف چوبی قالب بودند لذا منحنی های بار - تغییر مکان کل و بار - تغییر مکان واقعی و تنش - کرنش بتن داخل قالب ترسیم گردید که کرنش حاصل تقسیم تغییر مکان واقعی سطح بتن بر ارتفاع بلوک و قالب بتنی (ارتفاع متوسط) می باشد. نمونه ای از منحنی بار فشاری - تغییر مکان کانال های A و E در شکل (۱۱) نشان داده شده است که تغییر مکان کل قرائت شده توسط یکی از تغییر مکان سنج ها را و همچنین اختلاف قرائت تغییر مکان سنج دوم و اول را به عنوان تغییر مکان واقعی نشان می دهد. کرنش



شکل ۱۰ مراحل بارگذاری تدریجی و شکست نهایی قالب کانالی B با ترک های شعاع

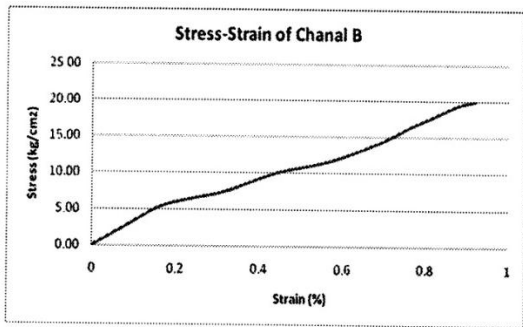


ب- قالب E

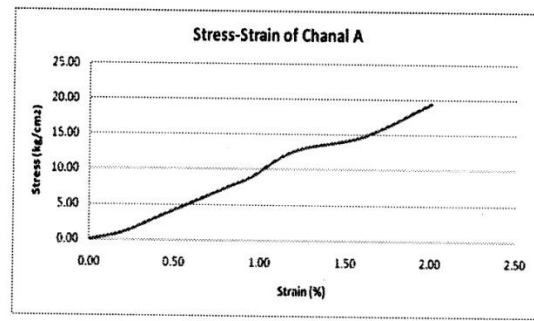


الف - قالب A

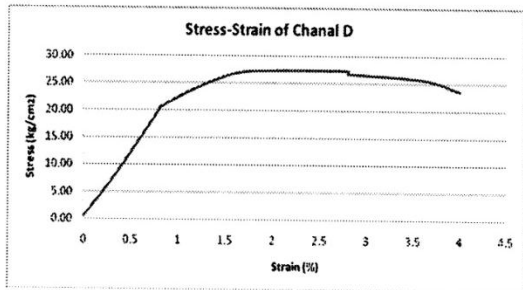
شکل ۱۱ منحنی‌های نیرو - تغییر مکان‌های کل و واقعی بتن قالب‌ها



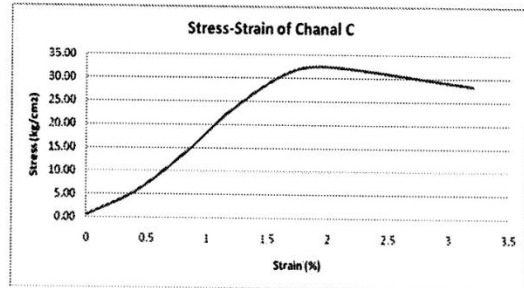
ب - قالب A الف - قالب



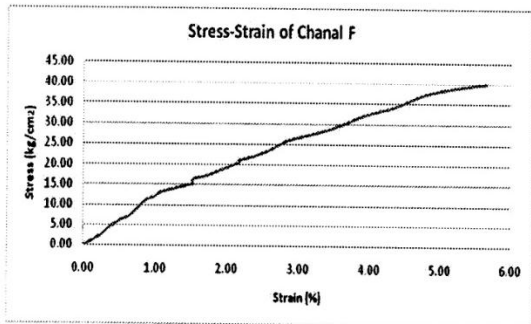
B



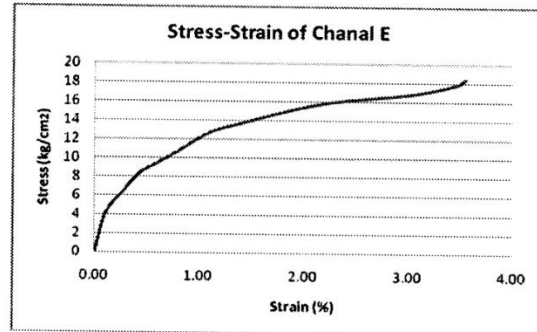
د - قالب C ج - قالب



D



و - قالب E ه - قالب



F

شکل ۱۲ منحنی‌های تنش - کرنش بتن در قالب‌ها

نتایج سازه‌ای کانال‌های خیابانی

ولی کانال‌های C و D و F دارای مخلوط‌های بتنی حاوی خاکستر بادی و بدون خرده آجر به صورت نرم و با سطحی صیقلی و صاف بودند لذا سایش سطحی کم‌تری داشتند. میزان نشست در کانال‌ها بسیار اندک بود، به طریقی که به صورت چشمی قابل تشخیص نبود. میزان نشست سطح بتن در کانال‌های مختلف خیابانی نسبت به سطح آسفالت مجاور اندازه‌گیری شد که میزان متوسط نشست در کانال‌های C و D و F پس از سه ماه به ترتیب برابر $1/5$ ، $1/5$ ، و 1 میلی‌متر بود. میزان متوسط نشست مقادیر برجسته نسبت به سطح آسفالت کم‌تر از $1/5$ میلی‌متر و میزان متوسط فرورفتگی در سطوح زیر برابر 5 میلی‌متر بود. لذا مشاهدات رفتار کانال‌های بتنی با و بدون خرده آجر تحت تردد خودروها نشان داد که این کانال‌ها می‌توانند متناسب با نیاز مقاومتی و کیفیت سطح روکش راه، در خیابان‌های اصلی یا فرعی و یا شهری و روستایی استفاده گردند.

تجزیه و تحلیل نتایج

پارامترهای مختلفی برای بررسی نتایج حاصل مدنظر بودند که عبارتند از عمل‌آوری مرطوب یا عدم عمل‌آوری، عمر آزمون‌ها، میزان نسبت $\frac{W}{C}$ مصرف خاکستر بادی برای افزایش کارایی در قالب نسبت $\frac{W}{C+F}$ و تعداد آزمون‌ها برای هر مخلوط. در پایان اثر پارامترهای مختلف مقایسه شدند.

کانال‌های خیابانی پس از بتن‌ریزی و جمع‌آوری موانع پس از حدود سه روز در معرض عبور و مرور وسایل نقلیه‌ی سبک و بعد از حدود ۵ روز در معرض وسایل نقلیه سنگین مانند اتوبوس و کامیون باز شدند و وضعیت ظاهری سطح کانال‌ها به‌طور متوسط هر هفته به‌طور دقیق بررسی شد. شرایط اطراف کانال‌های خیابانی به دلیل طبیعی و سخت‌تر بودن، مناسب‌تر از شرایط کانال‌های آزمایشگاهی بودند لذا انتظار رفتار بهتری از این کانال‌های خیابانی نسبت به کانال‌های آزمایشگاهی بوده است لذا اثر نشست یا ترک یا آسیب دیگری مشاهده نشد و این کانال‌ها توانستند بار متمرکزی بین 3500 تا حدود 7000 کیلوگرم (مشابه بار انتقالی از چرخ خودروهای سبک و سنگین) را تحمل کنند. بتن‌های حاوی خاکستر بادی حتی بدون عمل‌آوری ویژه و بعد از حدود سه ماه، بیش از 80% افزایش مقاومت از خود نشان دادند لذا دارای محاسنی نسبت به آسفالت به‌خصوص در لکه‌گیری می‌باشند. نشست کانال‌های خیابانی پس از حدود سه ماه پس از بتن‌ریزی و تردد خودروهای سبک و سنگین مطابق شکل (۱۳) اندازه‌گیری شدند که نشان داد که ظاهر کانال‌های خیابانی، قبل از بارگذاری و بعد از تردد خودروها کاملاً مشابه بودند.

کانال‌های A و B و E دارای مخلوط‌های بتنی حاوی خرده آجر و سطح اولیه‌ی زیر و خشن بودند



شکل ۱۳ ابزار و روش اندازه‌گیری نشست کانال‌های خیابانی پس از سه ماه

خرده آجر تا حدود ۴۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌توانند تحمل مقاومت فشاری داشته باشد که عدد بسیار مناسبی می‌باشد.

مقایسه‌ی نتایج تنش - کرنش کانال‌ها با مخلوط‌های مختلف در شکل (۱۲) بیانگر این است که کانال‌هایی که دارای مخلوط‌های حاوی خرده آجر بودند رفتاری نسبتاً خطی داشتند به‌خصوص در دو کانال A و B که عمق کمتری داشتند و بتن مستقیماً روی لوله‌ی مدفون ریخته شده بود. ضمن این‌که کانال B که دارای میکروسیلیس بود با ظرفیت تقریباً یکسان، تغییر مکان و کرنش کم‌تری حدود ۵۰٪ از خود نشان داد در حالی که کانال E با مخلوط مشابه بتن سفت بر روی یک لایه خاک کوبیده ریخته شد که با ظرفیت تقریباً برابر دو کانال دیگر، رفتار کمی غیر خطی همراه با کرنش بیش‌تری حدود ۵۰٪ به‌دلیل داشتن بستر منعطف‌تر از خود نشان داد که می‌تواند میزان ترک‌های احتمالی را کاهش دهد. ولی کانال‌های C و D و F که بدون خرده آجر بودند و مقادیر متفاوت خاکستر بادی داشتند رفتار متفاوتی با کانال‌های حاوی خرده آجر نشان دادند. هر سه کانال دارای رفتار غیر خطی با کرنشی بیش از ۲ تا ۳ برابر و مقاومت بالاتری بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد بودند. کانال حاوی خاکستر و آب بیش‌تر دارای مقاومت کم‌تری بود و کانالی که در آن بتن بر روی خاک کوبیده ریخته شده بود دارای افزایش مقاومت قابل توجه نسبت به کانال با بتن روی لوله بود که دلیل آن نرم‌تر بودن بتن حاوی خاکستر بادی و تأخیر در شکست آن بود.

مقایسه‌ی مطلق هزینه‌ی اولیه و مصالح، تنها گزینه برای شناخت اهمیت بتن‌های روان یا یک نوع خاص از طرح‌های اختلاط به‌کار رفته در این مقاله نمی‌باشد و پارامترهای مختلفی باید مدنظر باشند که نشان دهنده‌ی امکان استفاده از هر یک از طرح‌های به‌کار رفته در این پروژه‌ی تحقیقاتی باشد و هر کدام متناسب با شرایط

از بررسی نتایج مقاومت‌های فشاری آزمون‌های هر مخلوط برای یک حالت خاص مشاهده می‌گردد که اختلاف متوسط مقاومت‌ها و مقاومت تک تک آزمون‌ها بسیار ناچیز است و نتیجه می‌شود که تعداد دو آزمون تقریباً مناسب می‌باشد. نتایج نشان دادند که مقاومت آزمون‌های دارای سیمان نسبتاً کم بود و بدون خاکستر بادی، اختلاف ناچیزی در حالت عمل‌آوری شده و نشده داشت ولی این اختلاف در نمونه‌های دارای خاکستر بادی، قابل توجه بود لذا اگر آزمون‌های دارای خاکستر بادی به‌طور مناسب عمل‌آوری شوند، به‌طور متوسط تا ۸۰ درصد افزایش مقاومت خواهند داشت. هم‌چنین افزایش خاکستر بادی باعث افزایش روانی و کارایی ولی کاهش قابل توجه مقاومت بتن می‌شود.

نسبت مقاومت ۲۸ به ۳ و ۷ روزه‌ی آزمون‌های بدون خاکستر بادی به ترتیب حدود ۱/۶ و ۱/۱۷ می‌باشد ولی این نسبت در آزمون‌های حاوی خاکستر بادی حدود سه است بنابراین افزایش عمر باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت بتن روان می‌شود. نتایج آزمایش جریان اسلامپ مخروط ناقص آزمون‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری که با بتن روان مطابق جدول (۲) از پنج نوع طرح اختلاط ساخته شدند نشان دهنده‌ی وجود اسلامپ ریزشی و قطر پخش‌شدگی قابل قبول بود و به‌راحتی ساخته و در داخل قالب‌ها ریخته شد. آزمون‌های هر مخلوط در هوای آزاد آزمایشگاه قرار داده شدند و از هیچ روشی که برای آزمون‌های بتن معمولی متداول است در عمل‌آوری مرطوب آزمون‌ها استفاده نشد ولی افزایش مقاومت در خیلی از بتن‌ها مشاهده شد. از بررسی نتایج مقاومت‌های فشاری آزمون‌های مخلوط‌ها مشاهده گردید که تعداد دو آزمون در هر مرحله تقریباً مناسب می‌باشد و مقاومت ۲۸ روزه‌ی این آزمون‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بتن‌های حاوی

نکته‌ی دیگر، اهمیت خط لوله و محل اجرا می‌باشد که امکان استفاده از یکی از طرح‌های پیشنهادی بالا را به جای اجرای سنتی خاک‌ریزی و کوبیدن زمان‌بر با معایب بعدی در خصوص نشست و غیره فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تجربیات ارزنده‌ای در خصوص کاربرد آزمایشگاهی مخلوط‌های کم مقاومت و به کار گرفتن مصالح جدید برای اهداف خاص حاصل گردید. نتایج به دست آمده اختصاراً به صورت زیر ارائه می‌شود:

۱- به دلیل محدودیت اطلاعات درباره کاربردها، خصوصیات مصالح، نسبت‌ها، ساخت و اجرا و مراحل کنترل کیفیت این بتن، اجرای پروژه تحقیقاتی آزمایشگاهی بزرگ حاضر سهمی در زمینه‌ی ساخت بتن‌های جدید داشته است.

۲- انتخاب مواد مخلوط باید براساس موجود بودن، هزینه، کاربرد خاص و خصوصیات ضروری شامل روانی و مقاومت باشد و معمولاً شامل آب، سیمان پرتلند، خاکستر بادی و دانه‌های ریز یا درشت با مواد کاملاً بازیافتی مانند خرده آجر است تا خواص معینی مانند مقاومت فشاری یا قابلیت حفاری و کم هزینه بودن به دست آیند.

۳- مقاومت‌های فشاری آزمون‌های مکعب ۱۵ سانتی‌متری بسیار روان با متغیرهای خاکستر بادی، نسبت آب به سیمان، عمر آزمون‌ها و شرایط عمل‌آوری و تعداد آزمون‌ها، بین ۴ تا ۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بودند. آزمون‌هایی با عیار پایین سیمان اختلاف ناچیزی در مقاومت برای حالت عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده داشتند در حالی که آزمون‌های دارای خاکستر بادی اختلاف قابل توجه، تا ۸۰ درصد،

ویژه‌ی خود، قابل به‌کارگیری باشند. معمولاً قیمت تمام شده‌ی ساخت و حمل و در قالب ریختن و متراکم شدن یک متر مکعب بتن معمولی با وزن ۲۳۰۰ کیلوگرم و هزینه‌ی نیروی انسانی و تجهیزات و عمل‌آوری در مناطق غیر شهری بین ۷۰ تا ۸۰ هزار تومان می‌باشد. قیمت تمام شده‌ی این بتن‌ها خیلی کم‌تر از بتن‌های معمولی است زیرا وزن مخصوص تقریبی آزمون‌های بتن روان بین ۱۸۰۰ تا ۱۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است، قیمت اولیه‌ی متوسط خاکستر بادی و میکروسیلیس زیاد نیست، خرده آجر به کار رفته در آن در زمره‌ی ضایعات می‌باشد و سیمان نیز به مقدار خیلی کم استفاده می‌شود. بتن‌های دارای خرده آجر مقاومت کم‌تری با سطح کمی زبر دارند ولی با قیمت کم‌تری نیز قابل تولید می‌باشند، در حالی که بتن‌های بدون خرده آجر و با خاکستر بادی بیش‌تر دارای روانی بسیار مناسب، سهولت ساخت و اجرا و سرعت بالای اجرا و مقاومتی قابل قبول از خود نشان می‌دهند و با کم‌ترین عمل‌آوری دارای افزایش مقاومت نیز می‌شوند. سرعت عمل و عدم نشست از مزایای برجسته‌ی بتن‌های روان می‌باشد که به راحتی نمی‌توان بر آن قیمت گذاشت. رفع نشست‌های ناهمگون قابل توجه در جاده‌ها و خیابان‌ها در اثر پر کردن کانال‌ها با خاک معمولی (با فرض کوبیدن استاندارد) و کاهش احتمال نفوذ و آسیب رساندن حیوانات موذی به لوله‌های پلی‌اتیلن و هم‌چنین کاهش آسیب‌های شیمیایی انواع خاک‌ها یا آب‌های مجاور، از مزایای دیگر این نوع بتن‌ها با هزینه‌ی اولیه‌ی پائین می‌باشد. سرعت عمل و امکان بهره‌برداری سریع، پارامتر مهم دیگری است که حتماً در بعضی شرایط باید مدنظر باشد تا ترافیک به حداقل برسد و آسیب‌های روحی و روانی بر رانندگان و ساکنان اطراف محل اجرای این نوع کانال‌ها نیز تشدید نیابد.

خاکستر بادی بین ۲/۵ تا ۸ میلی‌متر بود که در بسیاری موارد قابل اغماض هستند.

۹- هیچ اثر تخریب یا نشست قابل توجه در کانال‌های خیابانی پس از سه روز ترافیک سبک و پس از شش روز ترافیک سنگین کامیون‌ها و اتوبوس‌ها مشاهده نشد.

۱۰- عوامل مختلفی مانند قیمت تمام شده‌ی مصالح اولیه و ساخت، هزینه اجرا و عمل‌آوری، امکان تعمیرات و حفاری‌های بعدی و هزینه‌های نگهداری، باید برای توجیه اقتصادی کاربرد بتن‌های روان خاص برای پرکردن کانال‌ها در مقایسه با روش سنتی پر کردن در نظر گرفته شوند لذا به‌طور مطلق امکان مقایسه‌ی مستقیم دو طرح با هم به‌دلیل طیف گسترده با پارامترهای مختلف وجود ندارد زیرا هر کدام برای خود محاسن یا معایب مجزایی دارند.

قدردانی

کار تحقیقاتی حاضر با حمایت مالی شرکت گاز استان سمنان و معاونت پژوهشی دانشگاه سمنان انجام شد که از آنان و هم‌چنین کلیه‌ی کارشناسان و همکاران آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه سمنان برای کمک در انجام آزمایش‌های متعدد بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

در مقاومت فشاری آزمون‌های عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده از خود نشان دادند.

۴- مقاومت ۲۸ روزه به ۳ و ۷ روزه در آزمون‌های بدون خاکستر بادی در شرایط عمل‌آوری مرطوب به ترتیب حدود ۱/۶ و ۱/۱۷ برابر ولی در آزمون‌های حاوی خاکستر بادی حدود سه و ۱/۵ برابر بودند.

۵- مقاومت فشاری آزمون‌های سه ماهه نسبت به ۷ روزه، رشد حدود ۱۰۰٪ داشت بنابراین بر خلاف بتن‌های معمولی، بتن‌های حاوی خاکستر بادی در شرایط عمل‌آوری کم یا ناچیز هم می‌توانند افزایش مقاومت فشاری داشته باشند.

۶- شش قالب چوبی بزرگ در داخل آزمایشگاه و حفاری شش کانال طبیعی با ابعاد مشابه در خیابان آسفالت شده برای شبیه‌سازی رفتار بتن‌ها در کانال‌های بزرگ خیابانی با و بدون غلاف، در نظر گرفته شدند.

۷- کانال‌های دارای خرده آجر و بدون خرده آجر دارای خاکستر بادی به ترتیب بار متمرکز حدود ۳/۶ و ۷ تن در آزمایشگاه تحمل کردند که به ترتیب در حدود دو برابر بار بیشینه‌ی مجاز کامیون‌های سنگین در جاده‌ها بودند.

۸- بیشینه تغییر مکان واقعی بتن در بار نهایی در کانال‌های آزمایشگاهی با و بدون خرده آجر حاوی

مراجع

1. Adaska W.S., " Controlled Low Strength Materials", SP-150, ACI ,(1999).
2. ACI Committee 229, "Controlled Low Strength Materials", ACI 229R-99 ,(1999).
3. Amster K.,Jennifer L., "The Design and Application of Controlled Low Strength Materials (Flowable Fill)", STP 1331, ASTM, Hitch ,(1998).
4. Thaha W., Lachemi, M., "Development of Controlled Low Strength Materials Using Cement Kiln Dust", MS Thesis, Dep. of Civil Eng., Ryerson University, Toronto, Canada ,(2005).
5. Green B.H. and Schmitz, D., "Development of Soil-based Controlled Low Strength Materials", MS

- Thesis, Dep. of Geo-sciences, Mississippi State University, USA ,(1999).
6. Lianxiang D. and Folliard K., "Laboratory Investigations of Controlled Low-Strength Material", Ph.D Thesis, Dep. of Civil Engineering, Texas at Austin University, USA ,(2001).
 7. Balasubramanyam P. and Puppala A., "Experimental Investigations on Followable Fills for Trench/Road Maintenance". MS Thesis, Dep. of Civil Eng., Texas University, USA ,(2004).
 8. Hemachandar M. and Siriwardane H., "Numerical Modeling of Buried Pipes with Followable Fill as a Backfill Material". MS Thesis, College of Eng. and Mineral Resources, West Virginia University, USA ,(2005).
 9. Naik T. R., Kraus R.N., Siddique R. and Chun Y.M., "Properties of Controlled Low-Strength Materials Made with Wood Fly Ash", Journal of ASTM Int., June 2004, Vol. 1, No. 6 ,(2004).
 10. Horiguchi T., Fujita R. and Shimura K., "Applicability of Controlled Low-Strength Materials with Incinerated Sewage Sludge Ash and Crushed-Stone Powder", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 23, Issue 6 ,(2011).
 11. Gabr M. A. and Bowders J.J., "Controlled low-strength material using fly ash and AMD sludge", Journal of Hazardous Materials, Vol. 76, Issues 2-3, 2000, Pages 251-263 ,(2000).
 12. Katz A. and Kovler K., "Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM)", Journal of Waste Management 24,501-512 ,(2004).
 13. Tahaa R.A., Alnuaimia A.S., Al-Jabri K.S., and Al-Harthya A.S., "Evaluation of controlled low strength materials containing industrial by-products", Journal of Building and Environment, Volume 42, Issue 9, 2007, Pages 3366-3372 ,(2007).
 14. Naganathan S., Abdul Razak H., and Abdul Hamid S.N., "Properties of controlled low-strength material made using industrial waste incineration bottom ash and quarry dust", Journal of Materials & Design, Volume 33, 2012, Pages 56-63 ,(2011).
 15. Lianxiang D., Folliard K.J., and Trejo D., "Effects of Constituent Materials and Quantities on Water Demand and Compressive Strength of Controlled Low-Strength Material", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 14, Issue 6 ,(2002).
 16. Siddiqueand R., Noumowe A., "Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete", Journal of Resources, Conservation and Recycling, Volume 53, Issues 1-2, 2008, Pages 27-35 ,(2008).
 17. Bouzalakos S., Dudeney A.W.L. and Cheeseman C.R., "Controlled low-strength materials containing waste precipitates from mineral processing", Journal of Minerals Engineering Volume 21, Issue 4, Pages 252-263, (2008).

18. Lachemi M., Hossain K M.A, Shehata M. and Thaha W., "Characteristics of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust", Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34:(4) 485-495, (2007).

Archive of SID