بررسی خصوصیات مکانیکی ترکیبات مختلف از آسفالت و بتن بازیافتی تثبیت شده با سیمان ومسلح شده با الیاف فولادی

حسن طاهرخانی(مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

فرهنگ فرخی، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

امیر شایسته فر، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

E-mail:taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲ /۰۵/۱۶ پذیرش: ۹۳/۰۶/۱۵

چکیده:

یکی از مشکلات ناشی از تخریب ساختمانها و روسازی راهها، آلودگی زیست محیطی ایجاد شده از انباشتن نخاله‌های به دست آمده از آنها است. از نظر اقتصادی و زیست محیطی، بازیافت و استفاده مجدد از نخاله‌های حاصل از تخریب دارای اهمیت است. در صورتی که این مواد خصوصیات لازم را داشته باشند، می‌توان آنها را در ساختار روسازی استفاده کرد. با توجه به این که بتن و آسفالت حجم قابل توجهی از نخاله‌های تخریب ساختمانها و راهها را تشکیل می‌دهند، در این تحقیق، به منظور بررسی قابلیت استفاده از این مواد در ساختار روسازی راه، مشخصات تراکمی‌و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی ترکیبات مختلفی از خرده بتن و آسفالت بازیافتی که با سیمان تثبیت شده و با الیاف فولادی مسلح شده‌اند مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در تمامی‌ترکیبات، با افزایش درصد سیمان، درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک افزایش می‌یابد. همچنین، در تمامی‌ترکیبات مورد مطالعه، مقاومت فشاری و خمشی با افزایش سیمان تا ۹٪ افزایش و پس ازآن کاهش می‌یابد. نشان داده می‌شود که مقاومت فشاری و خمشی با افزودن الیاف تا حد معینی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. آنالیز اقتصادی انجام شده نشان دهنده اقتصادی بودن استفاده از این ضایعات در روسازی به صورت تثبیت شده با سیمان است.

واژه‌های کلیدی: بتن و آسفالت بازیافتی، تثبیت، الیاف فولادی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی

۱. مقدمه

هر ساله، تخریب و نوسازی ساختمانها و راهها حجم زیادی از مواد ضایعاتی را ایجاد می‌کند . این مواد ضایعاتی یکی از عوامل اصلی آلودگی محیط زیست بوده و از طرفی ذخیره و دپوی آنها سطح قابل توجهی از زمینهای با ارزش را اشغال می‌کند. بررسیها نشان می‌دهند که نخاله‌های ساختمانی ۵۰٪ حجم کل مواد ضایعاتی را در دنیا تشکیل می‌دهند و دراتحادیه اروپا، به ازاء هر نفر، درسال ۵۰۰کیلوگرم ضایعات ساختمانی تولید می‌شود [Oikonomou, 2005]. این مواد متشکل از بتن، ملات و آجر هستند که به همراه آنها چوب و مواد پلاستیکی و سایر مواد، از جمله فلزات نیز وجود دارند. اما، بتن یکی از اجزاء غالب ضایعات ساختمانی است. همچنین، با توجه به خرابی‌های ایجاد شده در رویه‌های آسفالتی، در بسیاری موارد، این مصالح از سطح راه تراشیده شده و مجددا استفاده و یا در اطراف راه دپو می‌شود. از طرف دیگر، برای ساخت لایه‌های مختلف روسازی راهها، نیاز به تهیه مصالح مناسب است، که معمولا از منابع طبیعی برداشت شده و بعد از فرآوری استفاده می‌شوند. این کار علاوه بر هزینه زیاد تهیه و حمل برای پروژه‌هایی که مصالح مناسب در نزدیکی پروژه وجود ندارد، خود عامل بر هم زدن محیط و شکل طبیعی زمین می‌شود. بنابراین، در صورتی که بتوان ضایعات ساختمانی و راهسازی را در لایه‌های روسازی بکاربرد، هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی دارای اهمیت خواهد بود. این مواد را می‌توان بعد از شکستن و دانه‌بندی کردن، به صورت تثبیت شده و یا نشده در راهسازی بکاربرد. چندین سال است که در برخی از کشورهای صنعتی از ضایعات ساختمانی و راهسازی، بویژه بتن و آسفالت به عنوان بخشی از سنگدانه‌های بتن و آسفالت جدید استفاده می‌شود. تحقیقات کمی‌در مورد ویژگی نخاله‌های ساختمانی به صورت ترکیبی و تثبیت شده و مسلح شده با الیاف انجام شده است.

به دلیل مسائل زیست محیطی ناشی از تولید حجم زیاد آسفالت ضایعاتی که در سالهای اخیر حجم آن رو به افزایش نهاده است، و بتن ضایعاتی حاصل از تخریب و نوسازی ساختمانها در کشور، هدف این تحقیق، بررسی قابلیت بهره گیری از این مواد به صورت تثبیت شده در لایه‌های روسازی بوده است. با این فرض که از ترکیب این دو ماده نیز می‌توان به مصالحی قابل استفاده در روسازی دست یافت، و یافتن ترکیبی بهینه از اختلاط دو ماده بازیافتی، این تحقیق، به بررسی خصوصیات تراکم و مقاومتی ترکیب بتن و آسفالت ضایعاتی به صورت تثبیت شده در لایه‌های روسازی می‌پردازد. با توجه به اثر مسلح کنندگی الیاف، تأثیر تسلیح این مصالح با الیاف فولادی نیز مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲. پیشینه تحقیقات

صنعت ساخت و ساز حدود ۵۰ درصد از ضایعات را تولید کرده، ۴۰٪ از کل انرژی و۵۰ درصد از منابع طبیعی را مصرف می‌کند[Oikonomou, 2005]. باتوجه به اهمیت یافتن آلودگی محیط زیست و مصرف انرژی درعصرحاضر، بازیافت و استفاده مجدد از مواد ضایعاتی مورد توجه قرارگرفته است. یکی از اصلی ترین مواد ضایعاتی، ضایعات حاصل از تخریب و نوسازی ساختمانها و راهها است. بنابراین در برخی از کشورهای پیشرفته از ضایعات ساختمانی بویژه سنگدانه‌های حاصل از بتن بازیافتی، به عنوان بخشی از مصالح سنگی بتن استفاده می‌شود. برای مثال درانگلستان، ۱۰٪ از حجم کل سنگدانه‌هایی که در این کشور استفاده می‌شود، حاصل از بتن بازیافتی است[Collins, 1994]. همچنین، در هلند سالانه از ۷۸۰۰۰ تن از سنگدانه‌های بتن بازیافتی استفاده می‌شود[de Veries 1996]. معمولا، حد معینی برای میزان استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن مشخص می‌شود [Agrela et al., 2012]. راو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی را در بتن بررسی کردند، و از جنبه‌های مختلف مشکلات مربوط به نخاله‌های ساختمانی، بازیافت آنها و استفاده مجدد از آنها

در بتن را مورد ارزیابی قرار دادند [Rao et al. 2007]. مقیمی‌و برنجیان در سال ۲۰۰۹ اثر استفاده از خرده بتن به عنوان سنگدانه در بتن بازیافتی را مورد بررسی قرار دادند[Moghimi and Beren-jian, 2009]. ملبوچی تأثیر افزودن درصدهای مختلف خرده‌های آجر، ماسه و سیمان را روی مصالح بتنی بازیافت شده مورد ارزیابی قرار داده است [Melbouci, 2009].

یکی دیگر از موارد استفاده از مصالح حاصل از بازیافت ضایعات ساختمانی، در راهسازی است که در آن مواد ضایعاتی به صورت تثبیت شده یا نشده در لایه‌های اساس یا زیراساس بکار می‌روند. به طور مثال در کشورهای آلمان، هلند، بلژیک و نروژ تحقیقات زیادی برای بررسی امکان استفاده از این مصالح در ساختمان راه صورت پذیرفته است[Macarthy, 1989]. مولنار و ون نیکرک اثرات دانه‌بندی، ترکیب و درجه تراکم مصالح سنگی تثبیت نشده متشکل از مصالح باریافتی را درکاربرد آنها در لایه‌های روسازی مورد مطالعه قرار دادند[Molenaar and Van Niekerk, 2002]. ژوان و همکارانش کاربرد ضایعات ساختمانی تثبیت شده را به عنوان اساس روسازی راه مورد مطالعه قرار داده و خصوصیات آنها را بررسی نمودند. آنها ترکیبات مختلفی را متشکل از بتن و خرده آجر، با درصدهای مختلف سیمان تثبیت کرده، و مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته آنها را در درصد تراکم‌های مختلف بررسی کردند و نتیجه گیری کردند که علاوه بر مقدارسیمان و درجه تراکم، نحوه ترکیب این مصالح شامل نسبت خرده آجر به بتن، تأثیر زیادی بر روی خصوصیات مصالح تثبیت شده دارد[Xuan et al. 2010]. آگرلا و همکارانش امکان استفاده از خرده‌های بتن ضایعاتی را در زیراساس تثبیت شده راه بررسی کردند. آنها این مصالح را در دو مقطع از یک راه در مالاگای اسپانیا استفاده کرده و نشان دادند که امکان پذیری در این کاربرد وجود دارد [Agrela et al. 2012].

پون و چان احتمال استفاده از مصالح بتنی بازیافت شده و آجر رسی خرد شده را در زیر اساس راه بررسی کردند[Poon and Chan, 2006]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از ۱۰۰٪ مصالح بتنی بازیافت شده در زیر اساس راه، رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر، در مقایسه با مصالح طبیعی به ترتیب افزایش و کاهش پیدا کردند. علاوه بر این، با جایگزینی مصالح بتنی بازیافتی با آجر رسی خرد شده، منحنی رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش پیدا کرد. آجر رسی خرد شده در مقایسه با مصالح بتنی بازیافت شده از وزن مخصوص ذرات پایین و جذب آب بالایی برخوردار است. مقدار CBR (در حالت اشباع و غیر اشباع) مصالح بتنی بازیافت شده از مصالح طبیعی کمتر بود. مقدار CBR با جایگزینی مصالح بتنی بازیافت شده با آجر رسی خرد شده کمتر شد. در واقع، با افزایش آجر رسی خرد شده مقدار CBR کاهش پیدا می‌کند.

زنجانی و بلوری امکان بازیافت نخاله‌های ساختمانی و بکار بردن آنها به طور مستقیم و یا پس از بهسازی و تثبیت را، در لایه‌های روسازی راه و زیر اساس مورد بررسی قرار دادند[Zanjani and Bolouri, 2000].. نتایج آزمایشها بیانگر قابل استفاده بودن این مصالح در زیر اساس راهها بود. مارادی و لانسیری پتانسیل استفاده از مخلوط خرده‌های بتن که با سیمان تثبیت شده‌اند را، به عنوان مصالح لایه اساس و زیراساس بررسی کردند[Marradi and Lan-cieri, 2008]. نتایج کار آنها نشان داد که سن بتن بازیافتی در کارآیی بتن بازیافتی تثبیت شده با سیمان بسیار تأثیرگذار است. در نهایت آنها به این نتیجه رسیدند که این مواد قابلیت استفاده در لایه‌های اساس و زیراساس را دارند و می‌توان به عنوان مصالح جایگزین از آنها بهره برد. کریمی‌گوغری و همکارانش استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان مصالحی جدید برای جایگزینی مصالح طبیعی در بتن غلتکی را ارزیابی کردند. آنها در تحقیقات خود سنگدانه‌های خرده آسفالت بازیافتی را به عنوان بخشی از سنگدانه مخلوط بتن غلتکی در سه حالت ۱- جایگزینی در ریزدانه و درشت‌دانه ۲- جایگزینی فقط در ریزدانه ۳- جایگزینی فقط در

درشت‌دانه، و با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ استفاده کردند. نتایج آزمایشها نشان داد که استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان بخشی از سنگدانه بتن غلتکی روسازی تاثیری بر روانی، تراکم‌پذیری، مقادیر سیمان و آب مخلوط نداشته است، اما مقاومت فشاری با افزایش هرچه بیشتر درصد استفاده از خرده آسفالت بازیافتی کاهش می‌یابد[Karimi Goghari et al. 2001]

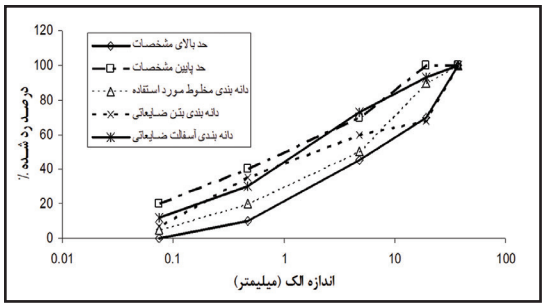
در زمینه استفاده از الیاف در نخاله‌های ساختمانی تثبیت شده می‌توان به تحقیق سبحان و کریزک اشاره کرد ; [Sobhan and Kerizek, 1996]. تحقیقات آنها بر پایه آزمایش فشاری تک‌محوره، آزمایش کششی و خمشی تیر بر روی نمونه‌های ساخته شده از خرده‌های بتن تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با الیاف بود. هدف از تحقیقات آنها ارزیابی استفاده از الیاف و خرده‌های بتن در لایه اساس بود. نتایج نشان میداد که وقتی دانه‌های بتن بازیافتی با مقدار ۴ درصد سیمان و ۴ درصد خاکستربادی تثبیت شوند می‌توان مقاومت لایه اساس را به میزان خوبی بالا برد. علاوه بر این اختلاط خوب با الیاف باعث بهتر شدن مقاومت خمشی و کششی در نمونه‌ها شد. هویوس وهمکارانش با انجام یک سری آزمایشها بر روی سنگدانه‌های آسفالت بازیافتی که با سیمان پرتلند تثبیت شده و با الیاف شیشه مسلح شده بودند نتیجه گیری کردند که آسفالت بازیافتی که مسلح به الیاف است و با سیمان تثبیت شده است از لحاظ زیست‌محیطی و سازه‌ای می‌تواند در لایه‌های اساس و زیراساس استفاده شود[Hoyos et al. 2011]. سبحان و احمد، به منظور ارزیابی استفاده از الیافهای مختلف به عنوان مسلح‌کننده در لایه اساس ساخته شده با خرده‌های بتن بازیافتی و تثبیت شده با سیمان و خاکستربادی، آزمایشات مقاومت کششی و خمشی را انجام دادند[Sobhan and Ahmad, 2004]. در این آزمایشها، سه نوع الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، به علاوه پلیاتیلن با چگالی زیاد که از پلاستیکهای بازیافتی تهیه شده بود به عنوان مسلح‌کننده استفاده شد. مشاهدات اولیه آنها در استفاده از الیاف نشان دهنده بهبود مقاومت کششی، کنترل گسترش ترک و همچنین مشخصات سختی بود.

۳. مواد ومصالح

مواد بکار رفته در این تحقیق، شامل بتن و آسفالت ضایعاتی، سیمان و الیاف فولادی است. خرده بتن با شکستن نخاله‌های نمونه‌های آزمایشگاهی با پتک و سپس خرد کردن توسط سنگ شکن آزمایشگاهی تهیه شد. خرده آسفالت مورد استفاده در این تحقیق نیز از نخاله‌های حاصل از تراشیدن رویه آسفالت آزاد راه قزوین–زنجان به دست آمده است. خرده آسفالت و بتن از الک ۳۷/۵ میلیمتر رد شده و بخش درشت تر، از آن جدا شد. بر روی بتن و آسفالت خرد شده رد شده از الک ۳۷/۵میلیمتر آزمایش دانه‌بندی انجام شد. در شکل ۱ دانه‌بندی بتن و آسفالت خرد شده به همراه محدوده دانه‌بندی توصیه شده توسط مهندسین ارتش آمریکا [US Army, 2003] برای دانه‌بندی مصالح سنگی تثبیت شده برای اساس و زیراساس که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است و دانه‌بندی مخلوط مواد مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

همان گونه که ملاحظه می‌شود خرده بتن و آسفالت به تنهایی دانه‌بندی مشخصات را ارضاء نمی‌کنند. همچنین، بتن دارای دانه‌بندی درشت‌تری است.

اما برای هر ترکیب مقدار مصالح مورد نیاز بین هر دو الک متوالی از آن بخش از خرده بتن و آسفالت تأمین شد. همچنین آزمایش حدود اتربرگ بر روی بخش ریز دانه این مواد انجام گرفت که نشان دهنده غیر خمیری بودن آنها است. وزن مخصوص و جذب آب بخش ریزدانه و درشت دانه بتن و آسفالت نیز اندازه گیری شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق از سیمان نوع ۲ بوده که از کارخانه سیمان همدان تهیه شده است. الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق(شکل ۲) از کارخانه صنایع مفتولی زنجان تهیه شده و مشخصات هندسی و مکانیکی آن در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در تحقیق

جدول ۱. نتایج آزمایشات درصد جذب آب و وزن مخصوص

مشخصات / مصالح	جذب آب٪	وزن مخصوص درشت دانه (gr/cm^3)	وزن مخصوص ریزدانه(gr/cm^3)
خرده آسفالت بازیافتی	۲۸/۱	۳۹/۲	۴/۲
خرده بتن بازیافتی	۸۶/۶	۲۸/۲	۳۳/۲

شکل ۲. الیاف فولادی مورد استفاده

جدول ۲. مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده

نتایج(میانگین)	استاندارد	مشخصات
(mm)00/1	_____	قطر(mm)
(mm)51	_____	طول الیاف
(mm)54	_____	طول گسیختگی الیاف
(N/mm^2)1218	≥۳۴۵(N/mm^2)	مقاومت کششی

۴. کارهای آزمایشگاهی

۴-۱ برنامه آزمایشها

برای بررسی خصوصیات مکانیکی مصالح بازیافتی تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با الیاف، خرده بتن و آسفالت مورد استفاده، در ۵ نسبت با هم مخلوط و هر کدام با ۵ مقدار مختلف سیمان و بدون الیاف فولادی تثبیت شدند. در جدول ۳ اسامی‌ترکیبات مختلف و درصد هر کدام از مواد بازیافتی، که به صورت حجمی‌است، نشان داده شده‌اند. درصدهای سیمان مورد استفاده شامل، ۳، ۵، ۷، ۹ و۱۱٪ است. بر روی این ترکیبات آزمایش تراکم برای تعیین درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک و آزمایش مقاومت فشاری برای تعیین درصد مناسب سیمان برای تثبیت انجام گرفت. سپس، آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی بر روی ۵ ترکیب با سیمان بهینه و درصدهای وزنی مختلف الیاف فولادی شامل ۰/۵ و ۱ و۱/۵درصد انجام شد. در بخش‌های زیر نحوه انجام آزمایشات و نتایج آنها تشریح می‌شوند.

جدول ۳. ترکیبات مورد استفاده در تحقیق

نام ترکیب	درصد حجمی‌بتن ٪	درصد حجمی‌آسفالت
C100	۱۰۰	_
C80-A20	۸۰	۲۰
C50-A50	۵۰	۵۰
C20-A80	۲۰	۸۰
A100	_	۱۰۰

۴-۲ آزمایشهای تراکم

با توجه به این که نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایشهای مقاومت فشاری و خمشی، می‌باید در درصد رطوبت بهینه تراکم ساخته می‌شدند، ابتدا آزمایش تراکم بر روی ترکیبات مختلف با درصدهای مختلف سیمان انجام شد. ترکیبات مختلف از خرده بتن و آسفالت با ۵ نسبت وزنی از سیمان شامل، ۳، ۵، ۷، ۹ و۱۱٪ تثبیت شده و آزمایش تراکم اصلاح شده D برای ترافیک سنگین، مطابق استاندارد ASTM D۱۵۵۷ بر روی هرکدام انجام شد. دراین آزمایش ترکیبات تثبیت شده با مقادیر مختلفی از رطوبت در۵ لایه در قالب ریخته شده و هرکدام با چکش ۴/۵ کیلوگرمی‌که از ارتفاع ۴۵ سانتیمتری سقوط

می‌کرد با ۲۵ضربه متراکم شدند و برای هرحالت، وزن مخصوص خشک اندازه گیری شد. با استفاده از نتایج این آزمایشها، منحنی‌های تراکم، ترسیم و مقدار رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی هرکدام ازترکیبات به دست آمد.

۴-۳ آزمایشهای مقاومت فشاری

مقاومت مصالح تثبیت شده از خصوصیاتی است که برای طراحی و کنترل اجرا مورد نیاز است. پارامترهای مقاومتی که معمولا مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیر مستقیم. اما آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به دلیل سادگی، رایج‌ترین روش ارزیابی مقاومت مصالح تثبیت شده است. مقاومت فشاری به طور مستقیم به سایر خصوصیات مکانیکی از قبیل مقاومت کششی و مدول الاستیسته ارتباط می‌یابد. بنابراین انجام آزمایشهای مقاومت فشاری بر روی ترکیبات مختلف مورد استفاده، در برنامه کار تحقیق قرار گرفت. آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C۱۳۹ بر روی نمونه‌های استوانه ای با قطر۱۰و ارتفاع ۱۱/۷سانتیمتر از ترکیبات مختلف بتن و آسفالت تثبیت شده و مسلح شده با الیاف و عمل آوری شده به مدت ۲۸روز انجام گرفت. جهت ساخت نمونه ها، ابتدا به هرکدام از ترکیبات، درصد سیمان و الیاف مورد نظر اضافه شده و توسط میکسر آزمایشگاهی به خوبی مخلوط شد. سپس در درصد رطوبت بهینه ای که ازنتایج آزمایشهای تراکم به دست آمده بود با انرژی تراکم استاندارد در قالب‌های تراکم کوبیده شدند. نمونه ها بعد از۲۴ ساعت از داخل قالب بیرون آورده شده و به مدت ۲۸ روز در داخل حوضچه آب عمل آوری شدند. بعد از عمل آوری، نمونه ها تحت آزمایش مقاومت فشاری قرارگرفتند که در آن با قراردادن نمونه بین دو فک دستگاه، بارگذاری با سرعت ۱۳ میلیمتر در دقیقه اعمال شد تا گسیخته شود (شکل ۳) و با اندازه‌گیری حداکثر نیروی لازم برای شکستن، مقاومت فشاری نمونه‌ها محاسبه شد.

شکل ۳. آزمایش مقاومت فشاری

۴-۴ آزمایشهای مقاومت خمشی

زیراساس و اساس روسازی، تحت تنشها و کرنشهای کششی تحت بار ترافیک هستند. تکرار این کششها باعث خستگی این مصالح و گسترش ترک می‌شود. بنابراین غالبا از مقاومت کششی مصالح برای اهداف طراحی استفاده می‌شود. محققین مختلف دریافته اند که مقاومت کششی به دست آمده برای یک ماده، بستگی به نوع آزمایش مقاومت کششی مورد استفاده خواهد داشت. اعتقاد بر این است که آزمایش کشش مستقیم اندازه دقیق‌تری از مقاومت کششی را می‌دهد. با این حال، آزمایش استانداردی توسط ASTM جهت اندازه گیری مستقیم مقاومت کششی پذیرفته نشده است، چون ابزار نگهداشتن نمونه ها خود تنشهایی را ایجاد می‌کنند که بر روی نتایج آزمایش تأثیر می‌گذارند. در آزمایش کشش مستقیم، نتایج آزمایش به روش و ابزار مورد استفاده توسط محقق برای نگهداری نمونه ها وابسته است. به همین دلیل، معمولا آزمایش کشش مستقیم برای اهداف طراحی و کنترل اجرا استفاده نمی‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش مقاومت خمشی، دو نوع آزمایشی هستند که برای توصیف مقاومت کششی بکار می‌روند. از مشکلات آزمایش کشش غیرمستقیم، یکی این است که روش آزمایش بر اساس مفروضات غیرواقعی در مورد رفتار مواد تحت بار است، و روش آزمایش شبیه سازی درستی از تنش لایه روسازی تحت بار نیست [Wil-

liams, 1986]. اما، مصالح تثبیت شده در لایه‌های روسازی در معرض کشش ناشی از خمش تحت بارهای ترافیک هستند و مقاومت خمشی، شبیه سازی بهتری از آن است[Arellano and Thampson, 1998, Williams, 1986]. مقاومت خمشی حدود ۱/۵برابر، و در بعضی از موارد بیش از ۲ برابر، مقاومت کششی مستقیم است[Sherwood, 1968; Pretorius and Monismith, 1971; Williams, 1986]. بنابراین، در این تحقیق، به دلیل محدویت دسترسی به دستگاه‌های بارگذاری دینامیکی جهت بررسی رفتار خستگی، انجام آزمایشهای مقاومت خمشی بر روی ترکیبات مختلف مورد توجه قرار گرفت. آزمایش مقاومت خمشی مطابق استاندارد ASTM C۷۸ بر روی نمونه‌های ساخته شده از ترکیبات مختلف از خرده بتن و آسفالت که با ۹٪ سیمان تثبیت شده و با مقادیر مختلف الیاف فولادی مسلح شده و به مدت ۲۸ روز عمل آوری شدند، انجام گرفت. نمونه‌های ساخته شده به صورت تیر مکعب مستطیل با طول ۵۰ سانتیمتر و عرض و ارتفاع ۱۰سانتیمتر ساخته شدند. بعد از ترکیب خرده بتن و آسفالت به نسبت لازم و اضافه کردن سیمان و الیاف مورد نظر به آن، رطوبت بهینه هر ترکیب به آن اضافه شده و در میکسر آزمایشگاهی مخلوط، در سه لایه به داخل قالب ریخته شده و هر لایه توسط یک میله به قطر۱۶میلیمتر با ۸۰ ضربه کوبیده شد. مقدار مصالح ریخته شده در داخل قالب با توجه به حداکثر وزن مخصوص به دست آمده از آزمایش تراکم محاسبه شد. به منظور کنترل یکنواختی تراکم در طول نمونه، یکی از نمونه ها بعد از کوبیدن و عمل آوردن در چهار قسمت مساوی بریده شده و چگالی آنها اندازه گیری شد که نشان داد اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند. نمونه ها بعد از۲۴ساعت از داخل قالب بیرون آورده شده و تا زمان آزمایش داخل حوضچه آب نگهداری شدند. بعد از عمل آوری، نمونه ها بر روی تکیه گاه دستگاه بارگذاری قرارگرفته و بار در دو نقطه به فاصله ۱/۳دهانه از دو تکیه گاه با سرعت ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۲ MPa/s اعمال شد تا نمونه ها شکسته شوند (شکل ۴). با اندازه گیری نیروی لازم برای شکستن نمونه و استفاده از معادله ۱ مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی نمونه ها اندازه گیری شد.

$$F_b = \frac{P}{BH^2} \qquad (۱)$$

که درآن، F_b مقاومت خمشی بر حسب کیلو گرم بر سانتیمتر مربع، P حداکثر بار اعمال شده به نمونه بر حسب کیلو گرم، L فاصله بین تکیه گاه‌ها بر حسب سانتیمتر، B عرض نمونه بر حسب سانتیمتر و H ارتفاع نمونه بر حسب سانتیمترهستند.

شکل ۴: آزمایش مقاومت خمشی

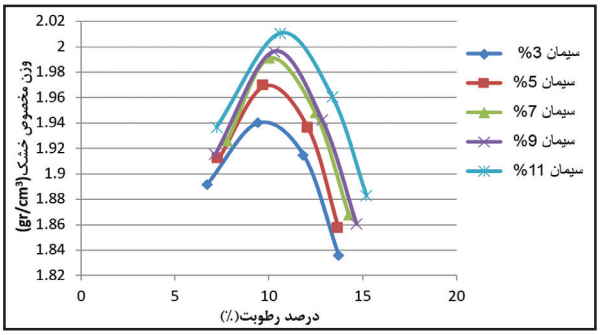
۵- نتایج آزمایشها

۵-۱ نتایج آزمایشهای تراکم

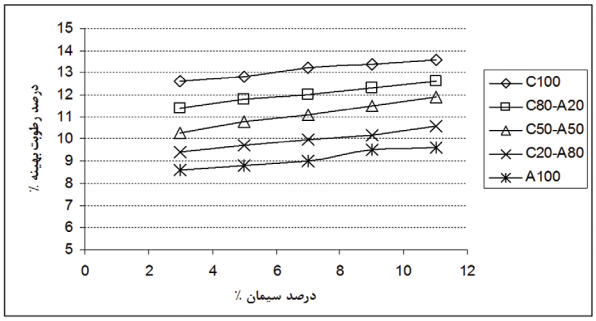
با انجام آزمایشهای تراکم تغییرات وزن مخصوص خشک با درصد رطوبت برای هر کدام از ترکیبات و درصدهای متفاوت سیمان ترسیم شده و حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه هر کدام تعیین شد. در شکل ۵ به طور نمونه، تغییرات وزن مخصوص با درصد رطوبت برای ترکیبC۲۰-A۸۰ و تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود با افزایش درصد سیمان، حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

شکلهای ۶ و۷ به ترتیب تغییرات درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک ترکیبات مختلف را با درصد سیمان نشان می‌دهند. همان گونه که ملاحظه می‌شود مقدار رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان و درصد حجمی‌بتن در مخلوط افزایش می‌یابد. دلیل

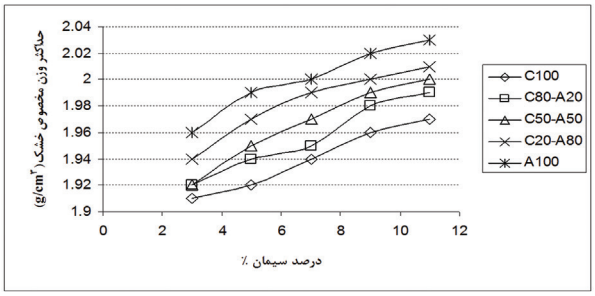
افزایش رطوبت بهینه با درصد سیمان، نیاز به آب بیشتر با افزایش دانه‌های سیمان با سطح مخصوص زیاد است و افزایش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد حجمی‌بتن نیز به دلیل جذب آب بالاتر بتن نسبت به آسفالت بازیافتی است. همچنین همان گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، حداکثر وزن مخصوص خشک ترکیبات با افزایش درصد سیمان و افزایش درصد حجمی‌آسفالت بازیافتی در ترکیب افزایش می‌یابد. بر اساس یافته‌های پیشین انتظار می‌رفت که به دلیل سخت شدگی اولیه در مقابل تراکم حداکثر وزن مخصوص خشک، با افزایش درصد سیمان، کاهش یابد. اما، نتایج این تحقیق خلاف آن را نشان داد. به نظر می‌رسد علت این موضوع تراکم مخلوط بلافاصله بعد از اختلاط با آب در این تحقیق باشد. این کار فرصت سخت شدگی و کاهش وزن مخصوص را می‌گیرد. از سویی، چگالی بیشتر سیمان نیز در افزایش وزن مخصوص موثر بوده است. دلیل افزایش وزن مخصوص با افزایش درصد حجمی‌آسفالت را می‌توان به اصطکاک کم بین دانه‌های آسفالت و امکان تراکم بهتر آن و چگالی بیشتر آسفالت نسبت به بتن نسبت داد.



شکل ۵. وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به ازای ۵ درصد مختلف سیمان برای ۲۰٪ بتن و ۸۰٪ آسفالت



شکل ۶. تغییرات درصد رطوبت بهینه با درصد سیمان



شکل ۷. تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک با درصد سیمان

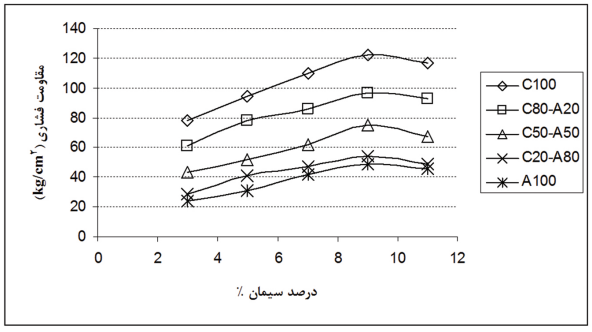
۵-۲ نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری

شکل ۸ تغییرات مقاومت فشاری با درصد سیمان را برای ترکیبات فاقد الیاف نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود برای همه ترکیبات با افزایش درصد سیمان تا ۹٪ مقاومت فشاری افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ترکیبات حاوی درصد حجمی‌بتن بیشتر دارای مقاومت فشاری بیشتری هستند که به دلیل اصطکاک بیشتر بین سنگدانه‌های بتن بازیافتی است. با توجه به این که حداکثر مقاومت فشاری تمامی‌ترکیبات در تثبیت با ۹٪ سیمان حاصل می‌شود نمونه‌های مسلح شده با الیاف با همین مقدار سیمان ساخته شدند. شکل ۹ تغییرات مقاومت فشاری ترکیبات مختلف مسلح شده با الیاف را نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شودبا افزایش درصد الیاف تا مقدار ۱٪، مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. معادلات اساسی مواد کامپوزیت را می‌توان برای تشریح این نتایج به کار برد. بر طبق قانون مخلوطها [Vasiliev and Morozov, 2007]، مقاومت مخلوط مسلح شده با الیاف را می‌توان به صورت معادله ۲ بیان کرد.

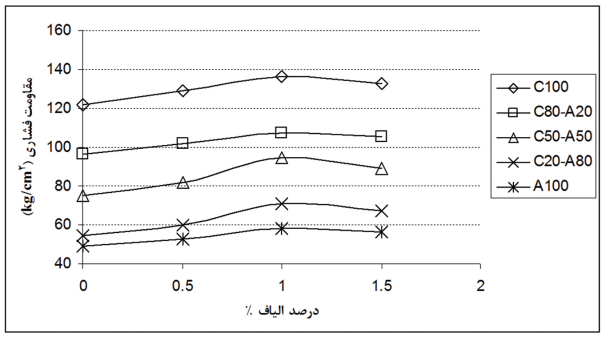
$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \qquad (۲)$$

که در آن، σ و V، به ترتیب، مقاومت نهایی و حجم، و f و m، به ترتیب، الیاف و مخلوط است. این معادله بیانگر این است که با افزایش حجم الیاف که دارای مقاومت بیشتر هستند، مقاومت ماده مرکب از مخلوط و الیاف افزایش می‌یابد. اما نتایج آزمایش نشان می‌دهند که این رابطه تا ۱٪ الیاف صادق است. دلیل کاهش مقاومت بعد از یک مقدار حداکثر را می‌توان به افزایش تخلخل و کاهش

تراکم نمونه‌ها با افزایش بیش از حد الیاف نسبت داد. همچنین، با افزایش بیش از حد الیاف، قفل و بست سنگدانه‌ها کمتر شده که دلیلی بر کاهش مقاومت نمونه است. با توجه به الزامات آئین نامه مهندسین ارتش آمریکا، برای استفاده از مصالح تثبیت شده در لایه اساس و زیراساس روسازی آسفالتی، باید مقاومت فشاری ۷ روزه آنها حداقل به ترتیب، ۵۴ kg/cm^2 و۱۵/۵ باشد. با توجه به بررسی مقاومت ۲۸ روزه ترکیبات مورد استفاده در این تحقیق برای سیمان تیپ ۲ می‌توان مقاومت ۷ روزه را حدود ۶۰درصد مقاومت ۲۸ روزه در نظر گرفت. بنابراین غیر از ترکیب A۱۰۰ که با ۳٪سیمان تثبیت شده، بقیه ترکیبات قابل استفاده به عنوان زیراساس روسازی انعطاف پذیر هستند. همچنین ترکیباتی که دارای مقاومت ۲۸ روزه بیش از حدود ۹۰کیلوگرم بر سانتی متر مربع باشند، قابل استفاده در لایه اساس خواهند بود. با این وجود توصیه می‌شود که در کاربرد واقعی نمونه‌های استوانه ای استاندارد به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر ساخته شده و مقاومت ۷ روزه آنها بررسی و کنترل شود.به منظور بررسی میزان تأثیر الیاف بر روی ترکیبات مختلف، میزان افزایش مقاومت نمونه‌های مسلح شده با۱٪ الیاف نسبت به حالت بدون الیاف محاسبه شده و در جدول ۴ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود افزودن الیاف می‌تواند مقاومت فشاری را تا ۳۰٪ افزایش دهد، اگرچه میزان افزایش در مقاومت در ترکیبات مختلف متفاوت است. در ترکیبات حاوی ۱۰۰٪ و۸۰٪ بتن، کمترین اثر را داشته ودر ترکیب حاوی ۸۰٪ آسفالت و۲۰٪ بتن، بیشترین اثر را دارد.



شکل ۸. تغییرات مقاومت فشاری با درصد سیمان



شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری با درصد الیاف

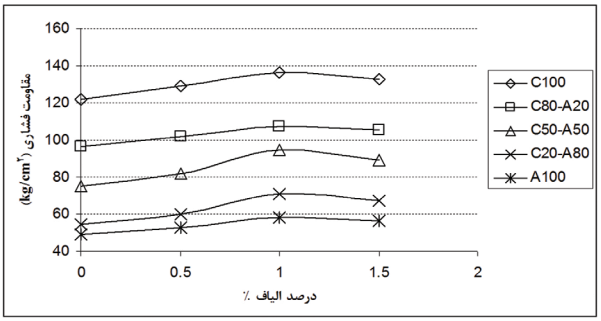
جدول ۴. میزان تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری ترکیبات مختلف

ترکیبات	مقاومت فشاری غیرمسلح (kg/cm^2)	مقاومت فشاری مسلح با ۱درصد الیاف(kg/cm^2)	درصد افزایش مقاومت فشاری با افزودن الیاف ٪
C۱۰۰	۱۲۲	۵/۱۳۶	۹/۱۱
C۸۰-A۲۰	۵/۹۶	۵/۱۰۷	۴/۱۱
C۵۰-A۵۰	۷۵	۹۵	۷/۲۶
C۲۰-A۸۰	۵/۵۴	۷۱	۳/۳۰
A۱۰۰	۴۹	۵۸	۴/۱۸

۵-۳ نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی

نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی ترکیبات مختلف، که با ۹٪ سیمان تثبیت شده و با درصدهای مختلف از ۰ تا ۱/۵٪ الیاف فولادی مسلح شده‌اند، در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مشابه مقاومت فشاری، مقاومت خمشی ترکیبات مختلف نیز با افزایش درصد وزنی الیاف تا ۱٪ افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش مقاومت با افزایش درصد الیاف را می‌توان به قفل و بست و اتصال بهتر بین سنگدانه ها با حضور الیاف نسبت داد. اما زیاد شدن الیاف بیش از حد معین مانع از تراکم بهتر شده و قفل و بست بین سنگدانه ها و مقاومت را کاهش می‌دهد. توضیح ارایه شده برای مقاومت فشاری در بخش قبل، با استفاده از قانون مواد کامپوزیت، در مورد مقاومت خمشی نیز صادق است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ترکیبات با درصد حجمی‌بتن بیشتر دارای

مقاومت خمشی بیشتر هستند، که دلیل آن بیشتر بودن اصطکاک بین سنگدانه ای برای بتن است. میزان افزایش در مقاومت خمشی با افزودن الیاف برای همه ترکیبات یکسان نبوده و جدول ۵ نشان دهنده درصد افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های دارای ۱٪ الیاف نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف است. همان گونه که مشاهده می‌شود استفاده از الیاف در ترکیبات مختلف مقاومت خمشی را از ۲۷ تا ۵۵ درصد افزایش می‌دهد و بیشترین تأثیر مربوط به ترکیب حاوی ۸۰٪ آسفالت و ۲۰٪ بتن و بعد از آن ۱۰۰٪ بتن آسفالتی است. با توجه به کمتر بودن اصطکاک بین دانه‌های آسفالت بازیافتی، تأثیر الیاف در افزایش قفل و بست سنگدانه در ترکیبات با آسفالت بیشتر، مشهودتر است. مطابق انتظار مقایسه این مقادیر با مقادیر ارائه شده در جدول ۴ نشان دهنده تأثیر بیشتر الیاف در افزودن مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری است.



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت خمشی با درصد الیاف

جدول ۵. تأثیر افزایش مقاومت خمشی با استفاده از الیاف

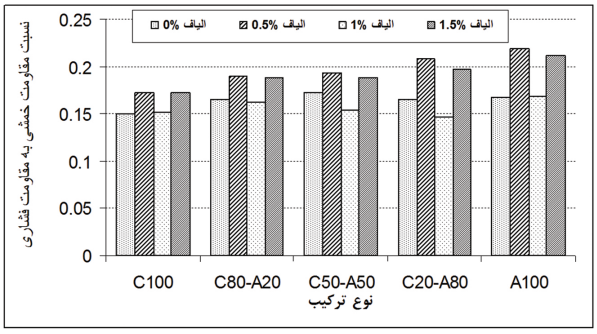
ترکیبات	مقاومت فشاری غیرمسلح (kg/cm۲)	مقاومت فشاری مسلح با ۱درصد الیاف(kg/cm۲)	درصد افزایش مقاومت فشاری با افزودن الیاف ٪
C۱۰۰	۴/۱۸	۶/۲۳	۲/۲۸
C۸۰-A۲۰	۹/۱۵	۲/۲۰	۲۷
C۵۰-A۵۰	۸/۱۲	۸/۱۷	۳۸
C۲۰-A۸۰	۹	۱۴	۵/۵۵
A۱۰۰	۲/۸	۳/۱۲	۵۰

۶. رابطه بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری

همان گونه که در بخشهای قبلی نیز بیان شد، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به دلیل سادگی، رایج ترین روش ارزیابی مقاومت مصالح تثبیت شده است. هر کدام از آزمایشهای مختلف مقاومت فشاری تک محوری، کششی و خمشی، اندازه‌های مختلفی از مقاومت را ارائه می‌کنند. بنابراین، ارائه رابطه ای بین مقادیر مختلف مقاومتها می‌تواند برای به دست آوردن مقاومت مورد نظر در طراحی مفید باشد. محققین مختلفی رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و اندازه‌های مختلف مقاومت خمشی و کشش غیرمستقیم را برای خاک و مصالح سنگی تثبیت شده ارائه کرده اند. بسته به نوع خاک و تثبیت کننده مورد استفاده مقدار نسبت مقاومت خمشی به فشاری در محدوده ۱۳تا ۳۳٪ متغیر است[Arellano and Thompson, 1998].

در ادبیات فنی موضوع، رابطه ای بین مقاومت خمشی و فشاری برای مصالح سنگی بازیافتی تثبیت شده با سیمان مسلح شده یا نشده با الیاف یافت نشد. در این تحقیق، با توجه به داده‌های موجود از نتایج آزمایشهای مقاومت خمشی و فشاری تک محوری، سعی در ارایه رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری برای آنها است. شکل ۱۱ مقدار نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری تک محوری مخلوطهای مختلف مورد استفاده در ترکیب را نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار این نسبت با افزایش درصد آسفالت ضایعاتی، افزایش می‌یابد، اگر چه مقاومت خمشی با افزایش درصد حجمی‌آسفالت ضایعاتی کاهش می‌یابد. اما کمتر بودن مقاومت فشاری و عملکرد بهتر مخلوط آسفالتی در کشش حاصل از خمش، به علت وجود قیر در سطح آنها و ایجاد مقاومت بیشتر در مقابل کشش را می‌توان دلیل زیادتر شدن نسبت مقاومت خمشی به فشاری با افزایش درصد حجمی‌آسفالت در مخلوط دانست. همچنین، ملاحظه می‌شود که روند معینی از تغییرات این نسبت با درصد الیاف مشاهده نمی‌شود. با این وجود مخلوطهای حاوی الیاف دارای نسبت مقاومت خمشی به فشاری بزرگ تری نسبت به مخلوطهای بدون الیاف هستند. مقدار نسبت مقاومت خمشی به فشاری متوسط برای تمامی‌ترکیبات بدون الیاف۱۶/۴٪ و برای ترکیبات حاوی الیاف به

طور متوسط ۱۸/۱٪ است. مقادیر به دست آمده با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد.



شکل ۱۱. نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری

۷. تحلیل اقتصادی

به منظور ارزیابی اقتصادی استفاده از ترکیبات مورد مطالعه در این تحقیق در لایه‌های روسازی راه، استفاده از آنها به عنوان لایه اساس، با اساس شن و ماسه ای تثبیت نشده مقایسه می‌شود. این تحلیل فقط برای ترکیباتی که با ۹٪ سیمان تثبیت شده‌اند، در دو حالت بدون الیاف و با ۱٪ الیاف، انجام شده است. مشابه این تحلیل را می‌توان برای سایر ترکیبات نیز انجام داد. این کار بر اساس قیمت هر واحد عدد سازه ای (SN)، که در روش طراحی روسازی در نشریه ۲۳۴ (معاونت برنامه‌ریزی، ۱۳۹۰) استفاده می‌شود، انجام شده است. [Manaement & Planning org, Iran ,2011] برای هر ترکیب، قیمت اجزاء آن برای هر متر مربع سطح و ضخامت ۱ سانتیمتر محاسبه شده، و از تقسیم آن به ضریب قشر، قیمت به ازای یک واحد عدد سازه ای محاسبه شده است. ترکیب دارای قیمت به ازای واحد عدد سازه ای کمتر از مصالح اساس شن وماسه ای که به عنوان مبنای مقایسه استفاده می‌شود، اقتصادی خواهد بود. ضریب قشر ترکیبات تثبیت شده با سیمان با استفاده از مقادیر مقاومت فشاری آنها و با استفاده از نمودارهای موجود در نشریه ۲۳۴ تعیین شده‌اند. تجربه کشورهای دیگر نشان می‌دهد که هزینه بازیافت و حمل مواد ضایعاتی مثل بتن به مراتب کمتر از هزینه حمل و دفن یا دپوی آنهاست[Joodaki, 2009] . بنابراین، در این محاسبات از قیمت بازیافت بتن و آسفالت صرف نظر شده و فقط قیمت سیمان و الیاف در محاسبه قیمت ترکیبات مختلف در نظر گرفته شده‌اند. قیمت هر تن شن و ماسه ۱۰۰۰۰تومان، هر تن سیمان ۸۰۰۰۰ و هر کیلو الیاف فولادی ۲۰۰۰تومان در نظر گرفته شده است. در جدول ۵ مقادیر قیمت هر واحد عدد سازه ای برای ترکیبات مختلف بدون الیاف و با ۱٪ الیاف نشان داده شده‌اند. در محاسبه قیمتها از وزن مخصوص هر ترکیب بر اساس آزمایشهای تراکم استفاده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، تمامی‌ترکیبات تثبیت شده با ۹٪ سیمان و بدون الیاف فولادی اقتصادی تر از اساس شن و ماسه ای تثبیت نشده هستند. حتی در صورتی که برای هرتن مصالح بازیافتی قیمتی معادل هر تن شن و ماسه در نظر گرفته شود، دو ترکیب C۱۰۰و C۸۰–A۲۰ اقتصادی تر از شن و ماسه خواهند بود. اما ملاحظه می‌شود که علیرغم تأثیر الیاف فولادی در افزایش مقاومت، هزینه اجرای چنین اساسی گران تر از ترکیبات بدون الیاف و شن وماسه تثبیت نشده است. با این حال می‌توان اثر الیافهای با قیمت پایین تر، مثل الیاف بازیافتی را مورد بررسی قرار داد.

جدول ۶. آنالیز قیمت ترکیبات مختلف

نحوه تسلیح	نام ترکیب	ضریب قشر	قیمت در هر متر مربع سطح و هر سانتیمتر ضخامت (تومان)	قیمت برای هر واحد عدد سازه‌ای(تومان)
بدون الیاف	اساس شن و ماسه ای	۰/۱۳	۲۲۰	۱۶۹۲
	C۱۰۰	۰/۲۵	۱۴۵/۴۴	۵۸۱
	C۸۰–A۲۰	۰/۲۳	۱۴۴	۶۲۶/۰۸
	C۵۰–A۵۰	۰/۲	۱۴۳/۲۸	۷۱۶/۴
	C۲۰–A۸۰	۰/۱۷	۱۴۲/۵۶	۸۳۸/۶
	A۱۰۰	۰/۱۶	۱۴۱/۱۲	۸۸۲
۱٪ الیاف	C100	۰/۲۷	۵۴۹/۱۸	۲۰۳۴/۹
	C80-A20	۰/۲۴	۵۴۳/۸	۲۲۶۶/۶۷
	C50-A50	۰/۲۲	۵۴۱/۲	۲۴۶۰
	C20-A80	۰/۱۹	۵۳۸/۴۶	۲۸۳۴
	A100	۰/۱۷	۵۳۳/۱۲	۳۱۳۶

۸. جمع بندی ونتیجه گیری

در این تحقیق، خرده بتن و آسفالت بازیافتی در نسبت‌های مختلف با هم ترکیب شده و با مقادیر مختلف سیمان تثبیت و با مقادیر مختلف الیاف فولادی مسلح شده و خصوصیات تراکم و مکانیکی آنها بررسی شده است. نتایج این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

* درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان و افزایش درصد حجمی‌بتن در ترکیبات مورد تحقیق افزایش می‌یابد.

* حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش درصد سیمان وافزایش درصد حجمی‌آسفالت بازیافتی افزایش می‌یابد.

* مقاومت فشاری ترکیبات مورد استفاده در این تحقیق، با افزایش سیمان تا ۹٪ افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.

* مقاومت فشاری ترکیبات تثبیت شده با افزایش درصد حجمی‌بتن افزایش می‌یابد.

* افزایش الیاف فولادی تا ۱٪ مقاومت فشاری ترکیبات را افزایش و پس ازآن کاهش می‌دهد.

* مقاومت خمشی با افزایش الیاف تا ۱٪ وزنی افزایش و پس از ان کاهش می‌یابد.

* تأثیر الیاف در افزودن مقاومت خمشی بیشتر از افزودن مقاومت فشاری است.

* مقاومت خمشی ترکیبات بدون الیاف حدود ۱۶/۴٪ مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ترکیبات مسلح شده با الیاف حدود ۱۸/٪ مقاومت فشاری تک محوری است.

* ارزیابی اقتصادی نشان داد که تمامی‌ترکیبات به دست آمده از آسفالت و بتن ضایعاتی که با ۹٪ سیمان تثبیت شده و فاقد الیاف هستند، اقتصادی تر از اساس شن و ماسه ای تثبیت نشده هستند. اما، استفاده از ترکیباتی که با ۱٪ الیاف فولادی مسلح شده‌اند غیراقتصادی است.

۹. مراجع

– کریمی‌گوغری، م.، حسنی الف.، احمدی، الف. و عرب عامری، ح. (۱۳۹۰) "امکان‌سنجی آزمایشگاهی استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی"، مجله مهندسی حمل و نقل، شماره، ۳ پیاپی، ۹، ص. ۷۹-۶۹.

– بلوری بزاز، ج. و زنجانی، م. م.، (۱۳۸۹) "بررسی مقاومت مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی" پژوهشنامه حمل ونقل، سال هفتم، شماره ۴.

– جودکی، هادی (۱۳۸۸) "مدیریت و بازیافت نخاله‌های ساختمانی"، سومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، ایران.

– معاونت برنامه‌ریزی و نظارت رهبردی رئیس جمهور (۱۳۹۰) "آیین نامه طرح روسازی آسفالتی راههای ایران، نشریه ۲۳۴"، تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور.

– مقیمی، م؛ نعمتی، ک و برنجیان، ج (۱۳۸۴) "بررسی خواص مکانیکی بتن بازیافتی با استفاده از خرده بتن" دومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

- Agrela, F., Ramirez, A., Barbrado, A. and Galvin, A. P. (2012) “Real application of cement treated mixed recycled aggregates on road based in Malaga” Transportation Research Board Annual Meeting.

- Arellano, D. and Thompson, M. R. (1998) “Stabilized base properties (strength, modulus, fatigue) for mecha-

Construction, Jones R.H. & Dawson A.R. edited Butterworths Pub. , Proceeding of The 3rd International Simposium on Unbound Aggregates in Roads(UNBAR 3) Nottingham, United Kingdom, 11-13, June, 1989

- Malhotra, V. M. and Neville, A. (1995) "Symposium on Concrete Technology in the Use of Demolition Waste in Concrete", BYWAIN Wright, PJ26, pp. 179-197.

- Marradi, A. and Lancieri, F. (2008) "Performance of cement stabilized recycled crushed concrete", First International Conference on Transport Infrastructure, Beijing, China, pp. 1-10.

- Melbouci, B. (2009) "Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates", Elsevier, Construction and Building Materials, 23: pp. 2723-2730.

- Molenaar, A. A. A., Xuan, D. X., Houben, L. J. M. and Shui, Z. (2011) "Prediction of the mechanical characteristics of cement treated demolition waste for road bases and sub-bases", Proceedings of 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, KwaZulu-Natal, South Africa.

- Molenaar, A.A.A. and Van Niekerk, A. A. (2002) "Effects of gradation, composition and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials." Transportation Research Record, No. nistic-based airport pavement design" Technical Report of Research, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois, US.

- Collins R. J. (1994) "Reuse of demolition materials in relation to specifications in the UK. Demolition and reuse of concrete and masonry: guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry", Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete Masonry, Odense, Denmark, pp. 49-56.

- Frondistion, K. and Yannas, S. (1980) "Economics of concrete recycling in the United States" Advanced Research Institute Problems in the Recycling Concrete, France.

- Hansen, T. C. (1992) "Recycling of demolished concrete and masonry", RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, reports.

- Hoyos, L., Puppala, A. and Ordonez, C. (2011) "Characterization of cement-fiber treated reclaimed asphalt pavement aggregates", Journal of Materials in Civil Engineering, 23 (7), pp. 997-989.

- Macarthy, R.A. (1989) "General Report: Waste Alternative Materials", Unbound Aggregates in Road

1787, pp. 73-82.

- Oikonomou, N. D. (2005) "Recycled concrete aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, pp. 315-318.

- Poon, C. S. and Chan, D. (2005) "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base" Construction and Building Materials, Vol. 20, pp. 578-585.

- Pretorius, P. C. and Monismith, C. L. (1971) "The prediction of shrinkage stresses in pavements containing soil cement bases", Paper presented at the Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington D. C.

- Sherwood, P. T. (1968) "The properties of cement-stabilized materials", RRL Report LR 205, Road Research Laboratory, England.

- Sobhan, K. and Kerizek, R. J. (1996) "Fiber-reinforced recycled crushed concrete as a stabilized base course for highway pavement", First International Conference on Composites in Infrastructure, Tucson, Arizona, pp. 996-1011.

- Sobhan, K. and Ahmad, T. (2004) "Use of discrete fibers for tensile reinforcement of an alternative pavement foundation with recycled aggregates", Journal of Cement, Concrete and Aggregates, vol. 25, pp. 7-15.

- Vasiliev, V. and Mozorov, V. "Advanced mechanics of composite materials" Elsevier, UK, 2007, pp. 57-100.

-Williams, R. I. T. (1986) "Cement-treated pavements: materials, design and construction" London, Elsevier Applied Science Publishers LTD.

- Xuan, D. X., Hoube, L. J. M., Molenaar, A. A. A. and Shui, Z. (2012) "Investigation of combined effect of mixture variables on mechanical properties of cement treated demolition waste", Engineering Journal, Vol. 16 (4), pp. 107-116.