

## ارزیابی خصوصیات مصالح زائد و بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی

پیمان دارپرنیان\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده شهید یزدان پناه، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان کردستان، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [Payman.d70@gmail.com](mailto:Payman.d70@gmail.com)

دریافت: ۹۶/۱۰/۲۰ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۳۰۸-۲۹۷

### چکیده

امروزه یکی از معیارهای مهم در پروژه‌ها، سازگاری با محیط زیست و اقتصادی بودن آن می‌باشد. کیفیت مواد و مصالح مصرفی در روسازی راه اهمیت بسیار زیادی در طراحی آن و همچنین مشخصات عملکردی راه‌ها دارند. در مواردی که مصالح موردنظر در دسترس نیست یا از محل کارگاه بسیار دور می‌باشد امکان سنجی استفاده از مصالح در دسترس ضروری به نظر می‌رسد. این امر موجب کاهش هزینه‌های حمل و نقل و همچنین استفاده از مواد بازیافتی استفاده نمود گامی در جهت بهبود محیط زیست و اقتصادی کردن خواهد بود. در این تحقیق از درصد‌های مختلف نخاله‌های ساختمانی و خرده بتن بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. آزمایش‌های نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم، مدول برجهندگی و شیارشدگی بر روی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نخاله‌های ساختمانی و خرده بتن بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج استفاده از درصد‌های مختلف نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نسبت به نمونه کنترلی کاهش و مدول برجهندگی و شیارشدگی آن افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول برجهندگی و شیارشدگی مخلوط آسفالتی حاوی ۲۰ درصد نخاله ساختمانی می‌باشد. نتایج استفاده از درصد‌های مختلف نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت در برابر شیارشدگی نسبت به نمونه کنترلی بهبود و مدول برجهندگی آن کاهش می‌یابد. بیشترین نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت در برابر شیارشدگی به ترتیب در مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰٪ و ۷۵٪ خرده بتن بازیافتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نخاله‌های ساختمانی، خرده بتن بازیافتی، مقاومت کششی غیر مستقیم، مدول برجهندگی، شیارشدگی

### ۱- مقدمه

تولید می‌شوند در حال افزایش است و دفع آن‌ها برای کارشناسان محیط‌زیست مشکلاتی را به وجود آورده است. از طرفی مصالح و منابعی که در کره زمین برای ساخت راه‌ها و ساختمان‌ها وجود دارد محدود می‌باشند و در برخی مناطق به دلیل در دسترس نبودن مصالح مرغوب، هزینه‌های زیاد حمل

امروزه آلودگی‌های ناشی از مواد ضایعاتی و بحث در رابطه با فعالیت‌های انسانی در حفاظت، بهسازی و یا تخریب محیط‌زیست به قدری مهم شده است که مورد توجه بسیاری از کارشناسان و دانشمندان قرار گرفته است. میزان محصولاتی که به عنوان مواد زائد و دورریز از قسمت‌های مختلف صنعت

ساختمانی و خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی استفاده شده است. آزمایش های نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم، مدول برجهندگی و شیار شدگی بر روی نمونه های حاوی درصد های مختلف نخاله های ساختمانی و خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی بر روی نمونه ها انجام می شود.

## ۲- معرفی انواع مصالح زائد و بازیافتی مورد

### مطالعه

در این تحقیق به بررسی درصد های مختلف نخاله های ساختمانی و خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی پرداخته شده است.

### ۲-۱- نخاله های ساختمانی

به آن دسته از مواد که در اثر ساخت و ساز یا تخریب و مرمت و یا حفاری و گود برداری حاصل از فعالیتهای عمرانی باقی می ماند، نخاله های ساختمانی نام دارد. رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و افزایش فعالیت های انسانی موجب تولید و تجمع مواد زائد و به دنبال آن آلودگی های محیط زیست را به همراه خواهد داشت و همه ساله درصد قابل توجهی از بودجه، وقت و مدیریت پروژه ها را به خود اختصاص می دهد. در این میان باید مدیریت بر کنترل مواد زائد بر مسائل فنی، اقتصادی و محیط زیست منطبق باشد و هماهنگ با دیگر شرایط عمومی جامعه برنامه ریزی شود. مطالعات زمین شناسی مهندسی می تواند مبتنی بر سه جنبه فوق بوده و در مقابله با تولید مواد زائد و استفاده بهینه از آنها در چرخه بازیافت، نقش اساسی ایفا نماید (دل پور رضایی، ۱۳۸۸). ترکیب و درصد مواد تشکیل دهنده نخاله های ساختمانی در مناطق مختلف دنیا تابع نوع و نحوه زندگی، نوع صنعت ساختمان، ترکیب و بافت جمعیتی و نیز فراوانی منابع قرضه است. عمومی ترین ترکیبات نخاله های ساختمانی شامل آجر، بتن، آسفالت، سنگ ساختمانی، قطعات گچی، چوب، پلاستیک و فلزات هستند. در برخی موارد تا ۹۰ درصد اجزای نخاله ها قابل بازیافت هستند (جعفری و زنجانی

نقل به راهسازان تحمیل می شود. بنابراین استفاده از مصالح و منابع دورریز و غیر قابل استفاده در صنعت راه سازی علاوه بر این که موجب کم شدن مشکلات محیط زیستی می شود، راهسازان را در تامین مصالح مورد نیاز کمک می کند (Ameri Hesami, 2013). مسئله زباله یا به عبارت دیگر مواد زاید، امروزه به یکی از معضلات زیست محیطی برای بشر تبدیل شده است نظر به این که میزان زیادی از مواد زاید جامد را می توان مورد پردازش و بازیافت قرار داد، دفن یا راه سازی این مواد راه و روشی منطقی به نظر نمی رسد. لذا امروزه در کشورهای توسعه یافته بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات مورد توجه خاص قرار گرفته و به یک صنعت تبدیل شده است که این خود نشان دهنده اهمیت بازیافت مواد می باشد (عمرانی و منوری، ۱۳۸۸). تهیه مصالح مورد نیاز برای ساخت راه همواره از مسائل پیش روی شرکت های راه سازی بوده است. از طرفی مصاح جایگزین برای این منظور به وفور در نقاط مختلف جهان یافت می شود میزان این مصالح (از قبیل دوده غبار کوره های سیمان و آهک، انواع سرباره ها، خاکستر سبوس، خاکستر بادی، نخاله های ساختمانی و ...) در جهان به قدری است که دفع آنها از نظر اقتصادی و محیط زیستی کارشناسان را با مشکل مواجه کرده است (Sarker, 2012). برای مقابله با این مشکل مهندسان و کارشناسان تمایل بسیار زیادی به استفاده از مصالح بازیافتی و غیرمرسوم در روسازی دارند تا هم به حفظ منابع ملی کمک کرده باشند و هم مانع آلودگی محیط زیست شوند. مواد و مصالح غیرمرسومی که در روسازی راه ها مورد استفاده قرار می گیرند به دو دسته کلی طبیعی و مصنوعی تقسیم می شوند. مصالح طبیعی عموماً به مصالحی گفته می شود که در طبیعت وجود داشته ولی استفاده خاصی ندارند. مانند ماسه ساحلی. مصالح مصنوعی به آن دسته از مصالح گفته می شود که طی فرآیندهای صنعتی به عنوان ماده فرعی تولید می شوند. عموماً مصالح غیرمرسوم طبیعی قابلیت استفاده در راه ها را ندارند و مطالعات بسیار کمی راجع به آن ها انجام شده است در حالی که بسیاری از مصالح مصنوعی قابلیت استفاده در روسازی راه را دارند و نه تنها اثر منفی در آن ندارند، در برخی موارد موجب بهبود خواص آن نیز می شوند (Kandhal, 1992). در این تحقیق از درصد های مختلف نخاله های

## ۲-۲- خرده بتن بازیافتی

یکی از مصالح ساختمانی که پتانسیل خوبی برای بازیافت دارد بتن می‌باشد. بتن ضایعاتی می‌تواند دوباره خردشده، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده گردد. تحقیقات درباره زمینه استفاده دوباره از بتن تخریب شده و مصالح ساختمانی، به عنوان سنگدانه‌هایی برای بتن جدید، به پایان جنگ جهانی دوم باز می‌گردد. از حدود ۲۰ سال پیش، بتن حاصل از تخریب شاهراه‌ها و ساختمان‌های بتن آرمه در آمریکا و اروپا وارد صنعت بازیافت شده است. بتن بیشترین حجم را در میان زباله‌های ساختمانی دارد در آمریکا ۶۷ درصد کل زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد (Shen and Du, 2004). در جامعه اقتصادی اروپا سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود. حدود ۱۱ میلیون تن بتن در انگلستان و حدود ۶۰ میلیون تن بتن در آمریکا سالانه به محل‌های انباشت نخاله‌های ساختمانی حمل می‌شود. در عین حال، در هر سال در آمریکا می‌توان حدود ۱۰ تا ۱۲ میلیون تن بتن را به نحوی مورد استفاده مجدد قرار داد. در سال ۱۹۹۶، Vezquez و همکارانش به مطالعه اثر رطوبت در سنگدانه بازیافتی، روی خواص بتن تازه سخت شده پرداختند. در این مطالعه اثر جذب رطوبت سنگدانه بازیافتی روی خواص مکانیکی و دوام بتن تازه سخت شده مشخص شد (مقیمی، برنجیان و نعمتی ۱۳۸۴). خرده بتن بازیافتی تولید شده از تخریب سازه‌های بتنی با مصالح بکر از آن جهت تفاوت دارد که دانه‌های حاصل از بازیافت بتن با سیمان هیدراته اندود شده‌اند. این امر باعث می‌شود که دانه‌های بازیافتی بتن متخلخل‌تر با چگالی کمتر باشند. همچنین دانه‌های بتن بازیافتی بسیار متفاوت از نظر کیفیت می‌باشند و جذب آب آنها نیز نسبتاً بالا است (Paranavithana and Mohajerani, 2006). در صنعت راه‌سازی تعداد بسیار زیادی مصالح، تکنولوژی‌های جدید در حال گسترش می‌باشد. یکی از مواردی که پتانسیل استفاده شدن در صنعت راه‌سازی را دارد خرده بتن بازیافتی می‌باشد. خرده بتن به عنوان سنگدانه در لایه‌های اساس و زیر اساس و همچنین در رویه‌های بتنی استفاده شده است. همچنین امکان سنجی استفاده از این ماده بازیافتی روی مخلوط‌های آسفالتی نیز مطالعات فراوانی صورت گرفته است اما هنوز استفاده از

(۱۳۸۹). حجم نخاله‌های ساختمانی در کشور آمریکا برای تعمیرات و بازسازی راه‌ها حدود ۹۱ میلیون تن است و همچنین در ایالت کالیفرنیا آمریکا حدود ۱۲٪ از حجم محل‌های تدفین را نخاله‌ها تشکیل می‌دهند که معادن ۲۵٪ حجم کلی آنها می‌باشد. میانگین تولید نخاله‌های ساختمانی در این ایالت بیش از ۴ میلیون تن در سال است، وزن نخاله‌های ساختمانی از کشور اروپایی فنلاند که جزء کشورهای توسعه یافته است، حدود یک میلیون تن در سال می‌باشد. در زلزله بم بیش از ۱۶ میلیون تن آوار ساختمانی تولید شده است. در تهران نیز روزانه ۱۹ هزار تن نخاله ساختمانی تولید می‌شود. همچنین عمر مفید ساختمان‌ها در کشورهای جهان حدود ۴۰ سال است لیکن در ایران ۳۰ سال برآورده می‌گردد و نیز ۲۵٪ بافت شهری فرسوده است و با افزودن بلایای طبیعی چون سیل، طوفان و زلزله هر ساله حجم بسیار بالایی نخاله ساختمانی و یا آوار در شهرها و آبادی‌های کشورها تولید می‌شود که سرمایه مالی و انسانی زیادی را تلف خواهد کرد (دل پور رضایی، ۱۳۸۸). مهمترین عوامل موثر در کاربرد نخاله‌ها عبارت‌اند از: حجم نخاله‌های تولید شده، ترکیب اجزای نخاله، نوع ماشین آلات بازیافت، میزان و نوع تقاضا، کیفیت مصالح بازیافت شده، میزان نیازمندی پروژه‌های ژئوتکنیکی به نوع مصالح و هزینه مواد خام اولیه در پروژه‌ها. مصالح بازیافتی را می‌توان در بخش‌های مختلف ساختمان‌های عمرانی نظیر طراحی پارک‌ها، تسطیح شیب‌ها، محوطه‌سازی، راه‌سازی و تهیه بتن و به‌عنوان مصالح پرکننده زهکشی و زیرسازی راه‌ها به‌کار برد. لیکن بیشترین استفاده برای تهیه بتن و تکمیل بدنه راه می‌باشد (Ahmed, Othman and Mahmoud, 2006). سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه را می‌توان همانند سنگدانه‌های درشت‌دانه معمول دانه‌بندی نمود اما ریزدانه‌ها می‌توانند با دانه‌بندی که دارند، به‌کار روند. در هر حال نسبت استفاده از آنها در طرح اختلاط تعیین می‌گردد. سنگدانه‌های بازیافتی باید پیش از استفاده و ترکیب با سیمان، به مدت حداقل ۵ دقیقه در آب خیسانده شوند که شامل زمان اختلاط بتن نیز می‌شود. کمترین زمان تماس آب و سنگدانه پیش از اضافه کردن سیمان نباید کمتر از ۲ دقیقه باشد (Pérez, Pasandín and Medina, 2012).

نیست (Lee, Du and Shen, 2012)

- نمونه‌های ساخته شده با نخاله‌های ساختمانی مقاومت کمی در برابر رطوبت از خود نشان دادند و این قضیه می‌تواند ضعف این نمونه‌ها باشد (Pérez, Pasandín and Medina, 2012). جیکینگ زو و همکارانش در سال ۲۰۱۲ روی خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نخاله‌های ساختمانی کار کردند. از آنجایی که آنها ضعف این مخلوط‌ها را در برابر آب می‌دانستند از سیلیکون مایع به عنوان ماده ضدعریان شدگی در این مخلوط استفاده کردند و نتایج را به صورت زیر منتشر کردند.

- استفاده از نخاله ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی مقاومت این مخلوط‌ها را در برابر آب را کاهش می‌دهد.

- استفاده از نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی سختی این مخلوط‌ها را در دمای پایین به شدت کاهش داده و باعث خستگی مخلوط می‌شوند.

- استفاده از ماده ضدعریان شدگی سیلیکون مایع ضعف این مخلوط‌ها را در برابر رطوبت جبران می‌کند.

- با استفاده از مواد ضدعریان کنندگی در مخلوط‌های حاوی نخاله‌های ساختمانی تغییر شکل ماندگار آنها افزایش می‌یابد با این حال کمتر از نمونه شاهد (بدون نخاله ساختمانی) می‌باشد

(Zhu et al., 2012). شاپینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ مطالعه‌ای را در زمینه خواص عملکردی آسفالت حاوی نخاله ساختمانی به عنوان سنگدانه انجام دادند. آنها نخاله‌های ساختمانی را هم به عنوان ریزدانه و هم به عنوان درشت‌دانه جایگزین سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی کردند آنها آزمایش‌های حساسیت رطوبتی به دو روش یخ زدن نمونه و غرق کردند نمونه در آب، مارشال، تیر خستگی و شیارشدگی را روی نمونه‌ها انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد مخلوط‌هایی که دارای مصالح بازیافتی درشت‌دانه هستند قیر بهینه و مقاومت شیارشدگی بیشتری نسبت به مخلوط‌های دیگر دارند. آسفالت‌های ساخته شده با مصالح بازیافتی درشت مقاومت بیشتری در مقابل ترک‌های حرارتی در دمای پایین از خود نشان دادند همچنین مخلوط‌های ساخته شده از مصالح بازیافتی درشت در مقابل رطوبت عملکرد بهتری از خود نشان دادند. با

این اصل در بتن آسفالتی به دلیل محدود بودن اطلاعات رایج

### ۳- ارزیابی استفاده از مصالح زائد و بازیافتی

#### در روسازی راه

#### ۳-۱- کاربرد نخاله‌های ساختمان در راهسازی

نخاله‌های ساختمانی به آن دسته از مواد و مصالح اطلاق می‌شود که در حین ساختن یک پروژه عمرانی یا خراب کردن آن به وجود می‌آید. این مواد به عنوان ضایعات شناخته شده هستند و برای دفع به حاشیه شهرها برده می‌شوند. وجود این مواد در محیط خطر خاصی برای محیط زیست ندارد ولی از نظر دیداری منظره بدی را به وجود می‌آورد. مدیران شهری همواره دنبال راهی هستند تا از این مواد بتوانند بهترین و اقتصادی‌ترین استفاده را بکنند. استفاده این مواد در صنعت راهسازی به عنوان سنگدانه می‌تواند یکی از گزینه‌های پیش رو باشد. شن در سال ۲۰۰۴ نشان داد استفاده از نخاله‌های ساختمانی در آسفالت باعث افزایش مقاومت لغزشی و کاهش تغییر شکل پایدار نمونه می‌شود. وی در ادامه نشان داد سختی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نخاله ساختمانی نیز بیشتر است با این حال مطالعات بیشتری را در زمینه خستگی این مخلوط‌ها توصیه کرد (Shen and Du, 2004). الجاسار و همکارانش در سال ۲۰۰۵ در کشور کویت مطالعات دیگری روی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی نخاله ساختمانی انجام داد و تصریح کرد نمونه‌های ساخته شده از این مواد بازیافتی تمام معیارها از قبیل مارشال، تغییر شکل پایدار و حساسیت رطوبتی را ارضا می‌کنند (Aljassar, Fadala and Ali, 2005).

پرز در سال ۲۰۱۲ با افزودن ۰ تا ۶۰ درصد مصالح سنگی، نخاله ساختمانی بر مخلوط‌های آسفالتی مطالعاتی در این زمینه انجام داد. وی آزمایش‌های مارشال، شیارشدگی و حساسیت رطوبتی را روی این نمونه‌ها انجام داد و نتایج آزمایش‌های خود را به صورت زیر منتشر کرد.

- آسفالت ساخته شده با نخاله‌های ساختمانی معیارهای مارشال را ارضا می‌کند و مقاومت خوبی در برابر شیار شدگی از خود نشان می‌دهد.

پایین و خستگی آسیب پذیر به نظر می‌رسند و باید این خصوصیات نیز روی آنها آزمایش شود (Beale et al., 2010). در سال ۲۰۱۲ چنگ لی و همکاران در تایوان برای جبران ضعف خرده بتن بازیافتی در آسفالت تصمیم به اندود کردن آنها با سیمان گرفتند.

آنها عقیده داشتند جذب آب بالای این سنگدانه‌ها به دلیل وجود خلل و فرج و حفرات بسیار در سطح آنهاست. نتایج آزمایش به صورت زیر گزارش شده است.

- سطح خرده بتن بازیافتی دارای خلل و فرج بسیار است که با اندود کردن آن با سیمان می‌توان این خلل و فرج را پوشاند و به بهتر چسبیدن آن به قیر کمک کرد.

- مقاومت سنگدانه‌ها در برابر خوردگی با اندود کردن آنها افزایش می‌یابد با این حال نباید بیش از حد نمونه‌ها را اندود کرد چرا که باعث می‌شود مقاومت فشاری آن کاهش یابد.

- میزان مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش میزان خرده بتن در مخلوط افزایش می‌یابد.

- تمامی مقادیر TSR در محدوده مجاز می‌باشند با این حال مقدار این پارامتر با افزایش میزان خرده بتن اندود شده کاهش می‌یابد.

- پارامتر شیار شدگی با افزایش میزان خرده بتن در مخلوط بهبود می‌یابد (Lee et al., 2012).

شن و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعه‌ای روی پودر خرده بتن بازیافتی به عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی گرم انجام دادند. آنها انواع آزمایش‌های مارشال، مدول دینامیکی، شیارشدگی، ترک خوردگی در دمای پایین، و خستگی را روی این مخلوط‌ها انجام دادند و گزارش کردند استفاده از پودر بتن پارامترهایی از قبیل حساسیت رطوبتی و خستگی را بهبود می‌بخشد با این حال این نمونه‌ها در برابر ترک خوردگی در دمای پایین کمی ضعف دارند. همچنین آنها با عبور دادن اشعه X از این پودر آن را عاری از هرگونه مواد مضر برای مخلوط آسفالتی گزارش کردند (Chen et al., 2011).

این حال تمام نمونه‌ها دارای معیارهای مورد نظر بودند و قابل قبول برای استفاده در راه‌ها می‌باشند (Wu et al., 2013)

## ۲-۳- کاربرد خرده بتن بازیافتی در راهسازی

خرده بتن بازیافتی ماده‌ای است که مهندسان معتقدند می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای مصالح بکر باشد. از طرفی سرعت تخریب و ساختن ساختمان‌های جدید در جهان بسیار زیاد است و مقادیر قابل توجهی خرده بتن روزانه در شهرهای بزرگ تولید می‌شود. گرچه قبلاً از این ماده در ساخت ساختمان‌های بتنی و به عنوان سنگدانه در لایه‌های اساس و زیر اساس استفاده می‌شد. در سال ۲۰۰۶ مهاجرانی و همکارانش طی مطالعات خود روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده بتن بازیافتی نشان دادند که افزایش خرده بتن خصوصیات حجمی، مدول دینامیکی و خزش در نمونه کاهش می‌یابد (Mohajerani et al., 2006). در سال ۲۰۱۰ بیل و همکارانش مطالعه جامعی را در مورد استفاده از بتن بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی انجام دادند. آنها آزمایش‌های حساسیت رطوبتی و مدول دینامیکی و همچنین یک مدل سازی برای شیار شدگی را انجام دادند. در گزارش‌های آنها آمده است مدول دینامیکی مخلوط با افزایش میزان خرده بتن بازیافتی در آن کاهش می‌یابد و نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نیز با افزایش میزان خرده بتن در مخلوط کاهش می‌یابد با این حال میزان مجاز استفاده از خرده بتن را در مخلوط‌های آسفالتی ۵۰ درصد اعلام کردند.

آنها در ادامه اعلام کردند کارایی مخلوط نیز با افزایش میزان خرده بتن بازیافتی کاهش می‌یابد در نتیجه برای ساخت مخلوط آسفالتی به انرژی بیشتری نیاز پیدا خواهیم کرد. همچنین با افزایش میزان خرده بتن مخلوط سخت‌تری خواهیم داشت و متعاقباً مخلوط مقاوم‌تری در برابر شیارشدگی خواهیم داشت. با این حال مخلوط‌های حاوی خرده بتن در برابر ترک‌های دمای

## ۴- آزمایشات انجام شده

### ۴-۱- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمون مقاومت کششی غیر کششی مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌شود. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی بوسیله مقاومت پیوستگی قیر مخلوط و مقاومت ناشی از پیوند بین سطح سنگدانه و قیر به وجود می‌آید. مقاومت کششی بوسیله حداکثر باری که نمونه قبل از گسیختگی می‌تواند تحمل کند، محاسبه می‌شود. تاثیر آب در کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی به عنوان یکی از نگرانی‌های اصلی مطرح است که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در این تحقیق آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از استاندارد ASTM D4867 انجام شده است. بار اعمالی در این آزمایش یک تغییر شکل کششی عمود بر جهت بارگذاری را ایجاد می‌کند که منجر به شکست کششی می‌شود، با ثبت بار نهایی و مشخص بودن ابعاد نمونه مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$ITS = \frac{2P}{\pi.D.t} \quad (1)$$

در این رابطه، ITS مقاومت کششی (برحسب کیلو پاسکال)، P بیشینه بار (برحسب نیوتن)، D قطر نمونه (برحسب میلی متر)، t ضخامت نمونه (برحسب میلی متر) است.

شش نمونه برای هر مخلوط (خشک و اشباع) تهیه و متراکم شد. نمونه‌های متراکم شده باید دارای فضای خالی ۶ تا ۸ درصد باشند. نمونه‌های خشک باید قبل از شکستن حداقل به مدت ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی گراد قرار گیرند تا به دمای تعادل برسند. برای اعمال شرایط رطوبتی طبق استاندارد ASTM D4867 نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب  $1 \pm 60$  درجه سانتی گراد قرار داده شدند. سپس در آب با دمای  $1 \pm 25$  درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت قرار گرفتند. نمونه‌ها به طور قائم بین دو فک دستگاه آزمایش کشش غیر مستقیم که فلزی است قرار داده شدند. بار قطری با سرعت  $50 \text{ mm/min}$  بر نمونه اعمال شد تا بار به بیشینه مقدار خود برسد و نمونه بشکند. بعد از آنکه متوسط مقاومت کششی برای هر گروه از نمونه‌ها تعیین شد، نسبت مقاومت کششی از رابطه ۲ محاسبه

می‌شود. طبق بند ۹-۷-۶ قسمت ب در آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) با عنوان دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب معیار حداقل ۷۵ درصد، برای نسبت مقاومت کششی مطرح شده است.

$$TSR = \frac{\text{مقاومت کششی مخلوط در حالت اشباع}}{\text{مقاومت کششی مخلوط در حالت خشک}} \quad (2)$$

### ۴-۲- آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق مدول برجهندگی با استفاده از فریم آزمایش کشش غیرمستقیم در دستگاه UTM5 طبق استاندارد ASTM D4123 در دمای ۲۵ درجه مورد آزمایش قرار گرفت. استاندارد دستگاه آزمایش به صورت زیر بوده است.

- شکل بارگذاری: زنگوله‌ای
- زمان دوره بارگذاری: ۰/۱۵ ثانیه
- دوره بارگذاری: ۲ ثانیه
- تعداد سیکل پیش بارگذاری: ۵۰ سیکل
- تعداد سیکل بارگذاری اصلی: ۵ سیکل
- بار اعمال شده: ۴۵۰ نیوتون
- بار اعمال شده: ۴۵۰ نیوتون
- ضریب پواسون فرض شده اولیه: ۰/۳۵

### ۴-۳- آزمایش خزش دینامیکی

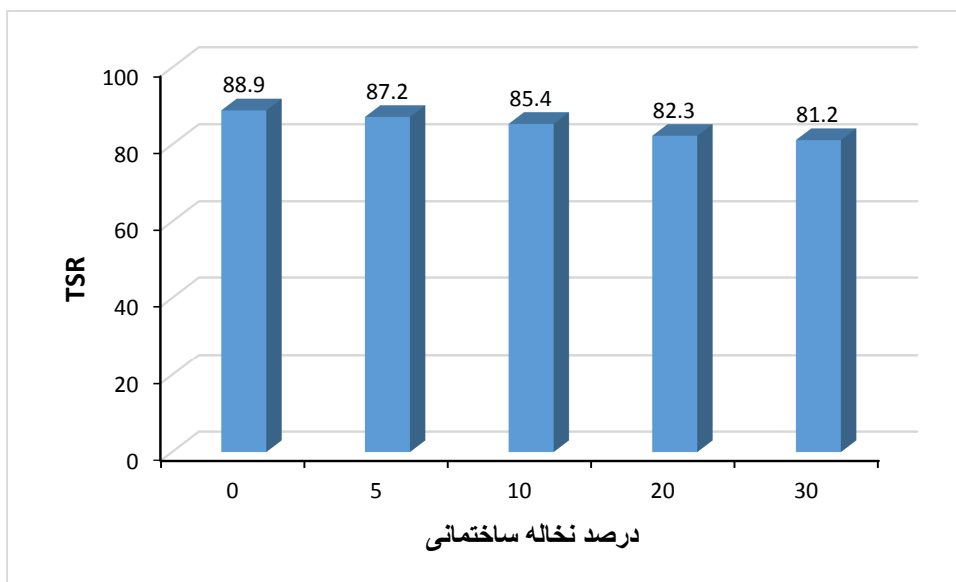
هدف از انجام این آزمایش، مطالعه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌باشد. مهمترین پارامتر به دست آمده از آزمایش خزش، نمودار تغییر شکل دائمی می‌باشد که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی بستگی دارد. این آزمایش بر اساس استاندارد Australian: AS2891-12-1 و با استفاده از دستگاه UTM5 انجام شده است. از هر درصد افزودنی بر اساس درصد قیر بهینه، ۳ عدد نمونه ساخته شده و به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار می‌گیرد. طبق استاندارد فوق، اعمال بار به شکل مربعی با زمان بارگذاری ۵۰۰ ms و زمان استراحت ۱۵۰۰ ms و تنش تماسی اولیه kpa

۱-۵- نتایج استفاده از نخاله‌های ساختمانی در مخلوط آسفالتی

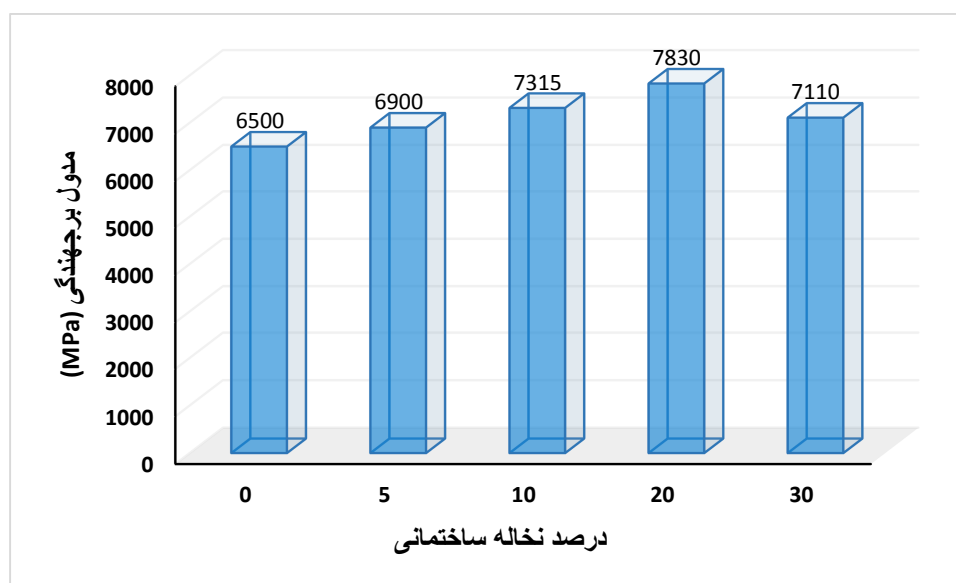
شکل های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نخاله‌های ساختمان را نشان می‌دهد.

۱۰ و تنش در مرحله بارگذاری برابر ۴۵۰ کیلوپاسکال می باشد. این تست برای هر نمونه تا زمان ۴۰۰۰۰ سیکل بارگذاری و یا رسیدن به کرنش micro-strain ۳۰۰۰۰ ادامه می‌یابد.

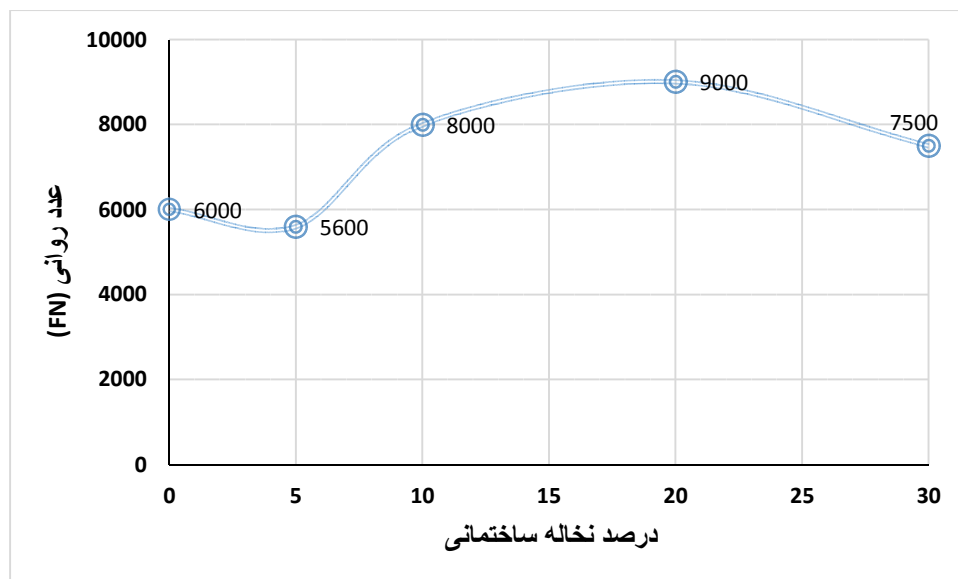
۵- نتایج



شکل ۱. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم درصد‌های مختلف نخاله های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۲. مدول برجهندگی درصد‌های مختلف نخاله های ساختمانی در مخلوط های آسفالتی



شکل ۳. شیار شدگی درصدهای مختلف نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی

نشان می‌دهد که بجز مخلوط دارای ۵٪، مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف نخاله‌های ساختمانی دارای مقاومت شیارشدگی بیشتری از نمونه کنترلی می‌باشند. با افزایش درصد نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی تا ۲۰٪ مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مقاومت در برابر شیارشدگی مربوط به نمونه حاوی ۲۰٪ نخاله ساختمانی می‌باشد که در آن عدد روانی افزایشی در حدود ۵۰ نسبت به نمونه کنترلی را دارا می‌باشد.

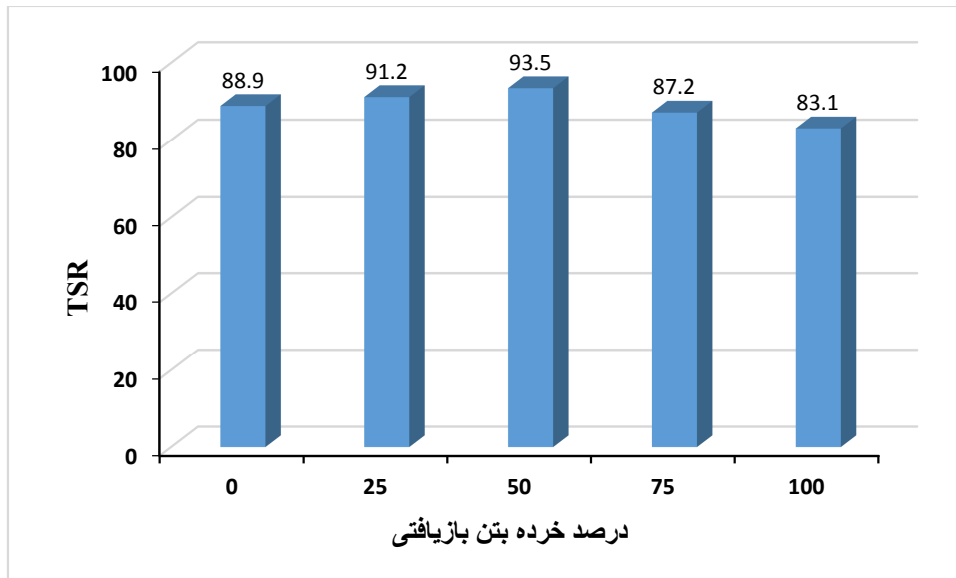
#### ۲-۵- نتایج استفاده از خرده بتن بازیافتی در مخلوط

##### آسفالتی

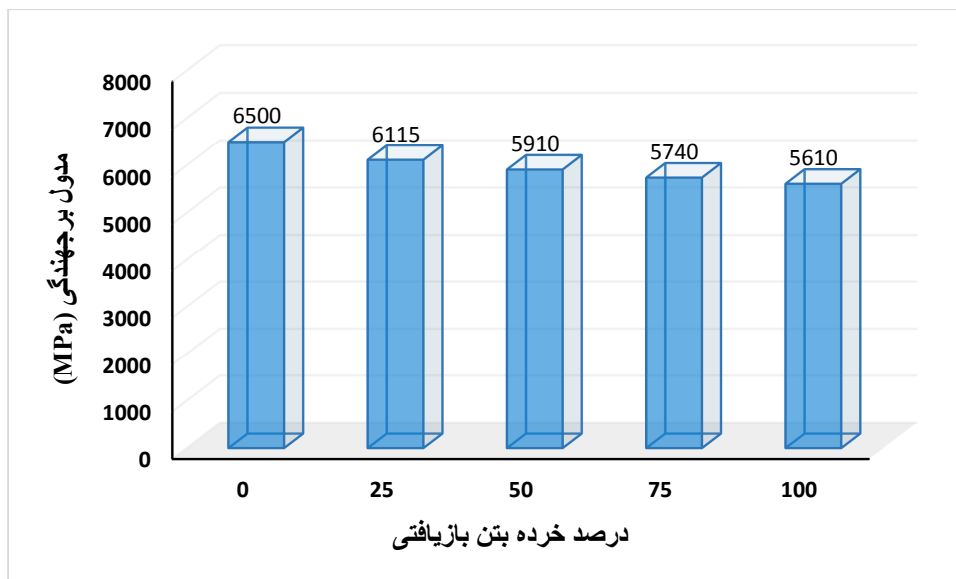
در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم، مدول برجهندگی و شیار شدگی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده بتن بازیافتی را نشان می‌دهد.

شکل ۱ نتایج نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت مرطوب به حالت خشک را نشان می‌دهد که برای مخلوط‌های حاوی درصد های ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ نخاله ساختمانی در مخلوط آسفالتی به ترتیب کاهشی در حدود ۱/۹، ۳/۹، ۷/۴، ۸/۶ نسبت به نمونه کنترلی دارد، که این امر نشان دهنده‌ی ضعف این نمونه در مقابل اثرات مخرب رطوبت می‌باشد. با توجه به اینکه در آیین نامه حد مجاز مقدار TSR، ۸۰٪ مشخص شده است و با توجه به نتایج این تحقیق در رابطه با آزمایش نسبت کششی غیر مستقیم (TSR)، تمامی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف نخاله‌های ساختمانی در محدوده مجاز آیین نامه‌ای می‌باشد. نتایج مدول بر جهندگی مخلوط‌های حاوی نخاله‌های ساختمانی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط‌های حاوی نخاله‌های ساختمانی دارای مدول برجهندگی بیشتری از نمونه کنترلی می‌باشند. همچنین ترکیبی که در آن ۲۰٪ از نخاله‌های ساختمانی به جای مصالح متداول استفاده شده است دارای بیشترین مدول برجهندگی می‌باشد. تحلیل نتایج در شکل ۳

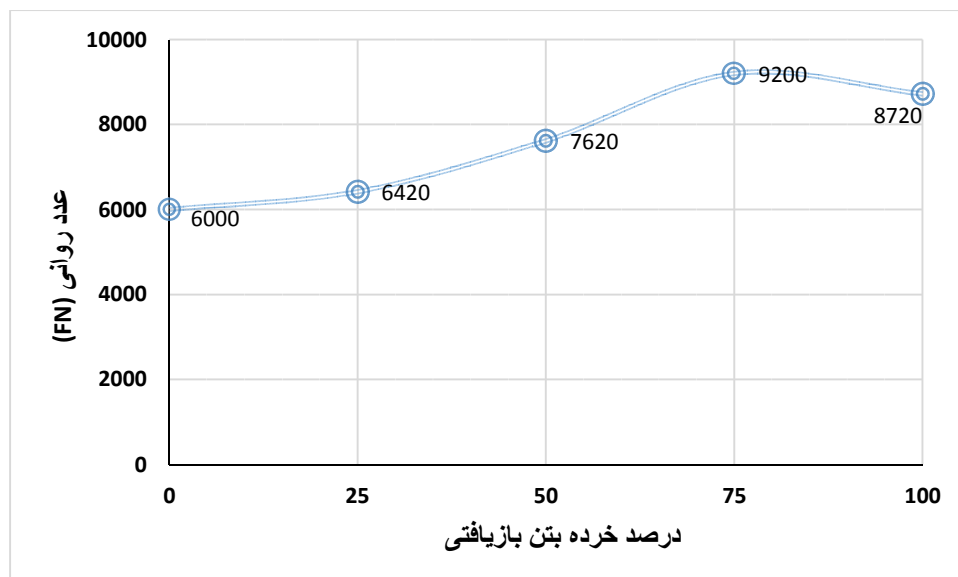




شکل ۴. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم درصدهای مختلف خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی



شکل ۵. مدول برجهنگی درصدهای مختلف خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی



شکل ۶. شیار شدگی درصدهای مختلف خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی

برجهندگی مربوط به نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده بتن بازیافتی در مخلوط آسفالتی می باشد که در آن مدول برجهندگی برابر با ۶۱۱۵ می باشد. تحلیل نتایج در شکل ۶ نشان می دهد که درصدهای مختلف خرده بتن بازیافتی در مخلوط آسفالتی دارای مقاومت شیار شدگی بیشتری نسبت به نمونه کنترلی می باشند. با افزایش درصد خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی تا ۷۵٪، مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش و سپس کاهش می یابد. بیشترین مقدار مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط به نمونه حاوی ۷۵ درصد خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی می باشد که در آن افزایشی در حدود ۵۳٪ نسبت به نمونه کنترلی را دارا می باشد.

#### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق از درصدهای مختلف نخاله های ساختمانی و خرده بتن بازیافتی در مخلوط آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفت و خصوصیات نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول

شکل ۴ نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت مرطوب به حالت خشک را برای مخلوط های حاوی درصد های ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ خرده بتن بازیافتی در مخلوط آسفالتی نسبت به نمونه کنترلی نشان می دهد. با توجه به اینکه در آیین نامه حد مجاز مقدار TSR، ۸۰٪ مشخص شده است و با توجه به نتایج این تحقیق در رابطه با آزمایش نسبت کششی غیر مستقیم (TSR)، تمامی نمونه های ساخته شده با درصدهای مختلف خرده بتن بازیافتی در محدوده مجاز آیین نامه ای می باشد. همچنین ترکیبی که در آن ۵۰٪ از خرده بتن بازیافتی به جای مصالح متداول استفاده شده است دارای بیشترین مقدار TSR می باشد که افزایشی حدود ۵/۲ درصد نسبت به نمونه کنترلی دارد.

نتایج آزمون در شکل ۵ نشان می دهد که مدول بر جهندگی با افزایش درصد افزودنی خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی کاهش می یابد. مدول برجهندگی حاوی درصدهای مختلف ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ خرده بتن بازیافتی در مخلوط های آسفالتی به ترتیب کاهشی در حدود ۶٪، ۹٪، ۱۱٪/۶ و ۱۳/۵٪ نسبت به نمونه کنترلی دارد. بیشترین مدول

س. رضایی، (۱۳۸۸)، "ویژگی‌های ژئوتکنیکی نخاله‌های ساختمانی و کاربرد آنها در پروژه‌های عمرانی، "ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

ب. جعفری، س. زنجانی، (۱۳۸۹)، "بررسی مقاومت مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی جهت استفاده در لایه های روسازی"، پژوهشنامه حمل و نقل. سال دوازدهم، تهران.

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

A. H. Aljassar, K. B. Al-Fadala, and M. A. Ali, (2005), "Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: a case study in Kuwait," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 7, pp. 112-115.

C.-H. Lee, J.-C. Du, and D.-H. Shen, (2012), "Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt," *Construction and Building Materials*, Vol. 28, pp. 66-71.

D.-H. Shen and J.-c. Du., (2004), "Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation," *Construction and building materials*, Vol. 18, pp. 391-397.

H. Y. Ahmed, A. M. Othman, and A. A. Mahmoud, (2006), "Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt," *Ass. Univ. Bull. Environ. Res*, Vol. 9, pp. 51-60.

I. Pérez, A. Pasandín, and L. Medina, (2012), "Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates," *Materials & Design*, Vol. 36, pp. 840-846.

J. Mills-Beale and Z. You, (2010), "The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 230-235.

برجهندگی و شیار شدگی مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه نتایج در ادامه آمده است.

- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم حاوی درصد‌های مختلف نخاله‌های ساختمانی در مخلوط آسفالتی نسبت به نمونه کنترلی کاهش یافت.

- مخلوط‌های حاوی نخاله‌های ساختمانی دارای مدول برجهندگی بیشتری از نمونه کنترلی می باشند. همچنین ترکیبی که در آن ۲۰٪ از نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است دارای بیشترین مدول برجهندگی می باشد.

- با افزایش درصد نخاله‌های ساختمانی در مخلوط‌های آسفالتی تا ۲۰٪ مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش می یابد. بیشترین مقدار مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط به نمونه حاوی ۲۰٪ نخاله ساختمانی می باشد که در آن عدد روانی افزایشی در حدود ۵۰٪ نسبت به نمونه کنترلی را دارا می باشد.

- نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم با افزودن درصد‌های مختلف خرده بتن بازیافتی در مخلوط آسفالتی نسبت به نمونه کنترلی بهبود می یابد.

- مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده بتن بازیافتی با افزایش درصد افزودنی مقدار آن نسبت به نمونه کنترلی کاهش می یابد.

- مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف خرده بتن بازیافتی دارای مقاومت شیار شدگی بیشتری نسبت به نمونه کنترلی می باشند. بیشترین مقدار مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط به نمونه حاوی ۷۵٪ خرده بتن بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی می باشد که در آن افزایشی در حدود ۵۳٪ نسبت به نمونه کنترلی را دارا می باشد.

## ۶-مراجع

ق. عمرانی، م. منوری، (۱۳۸۸)، "مدیریت بازیافت شیشه در شهر تهران،" نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره یازدهم، شماره چهار، زمستان.

-S. Paranavithana and A. Mohajerani, (2006), "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete," *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 48, pp. 1-12.

-S. Wu, J. Zhong, J. Zhu, and D. Wang, (2013), "Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture," *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, pp. 679-688.

-J. Zhu, S. Wu, J. Zhong, and D. Wang, (2012), "Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings," *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 466-475.

-M. Ameri, S. Hesami, and H. Goli, (2013), "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag," *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 611-617.

-P. S. Kandhal, (1992), "Waste Materials in Hot Mix Asphalt: An Overview," National Center.