

## بررسی تأثیر درصد و نوع افزودنی‌ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوطهای بازیافت سرد با کف قیر

غلامعلی شفافبخش<sup>\*</sup>، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
محمدرضا رضائیان، دانش آموخته دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
E-mail: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir  
تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۲۸ - پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۱۰

### چکیده

امروزه فناوری بازیافت در اکثر شاخه های علوم از جمله روسازی استفاده می شود. مزایای اقتصادی، زیست محیطی و فنی قابل توجه بازیافت باعث شده است تا پژوهشگران، آزمایشهای متعددی برای بهینه سازی کاربرد آن انجام دهند. در این راستا و در این مقاله، با ساخت ۱۶۲ نمونه ۱۲۰۰ گرمی از مخلوط های بازیافتی به روش سرد و در جا با استفاده از مصالح خرده آسفالتی که در اثر برداشتن یک لایه آسفالت ایجاد شده بود، به بررسی آزمایشگاهی میزان مقاومت، مدول برجهندگی و توانایی تحمل کشش غیر مستقیم این مخلوط ها از لحاظ فیزیکی پرداخته شد. به این ترتیب که با استفاده از امکانات آزمایشگاه مکانیک خاک وزارت راه و ترابری در تهران، پس از ساخت و عمل آوری نمونه های مارشال، این نمونه ها تحت آزمایشهای مختلفی چون تعیین مدول برجهندگی با دستگاه  $UTM14^1$ ، آزمایش مقاومت مارشال و آزمایش کشش غیر مستقیم خشک و اشباع، قرار گرفتند. تفاوت نمونه ها در میزان درصد کف قیر (۲، ۳ و ۴ درصد)، درصد و نوع افزودنی یا فیلر فعال به کار رفته در آن هاست که شامل ۱ و ۲ درصد از هر نوع افزودنی همچون سیمان پرتلند تیپ II، آهک مرده، آهک زنده، پوزولان، سرباره کوره و پودر لاستیکاست که این حجم از افزودنی تا کنون به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. نهایتاً، بر اساس نتایج، با استفاده از نرم افزار SPSS، MATLAB و شبکه های عصبی مصنوعی RBF، مدلسازی برای پیش بینی نتایج انجام شد، همچنین می توان با دقت مناسب، تأثیر هر یک از افزودنی های یادشده را در صد قیر مشخص بر روی پارامترهای مقاومتی مخلوط های بازیافتی سرد با کف قیر به دست آورد.

واژه های کلیدی: بازیافت سرد آسفالت، پایداری مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، درصد بهینه کف قیر، مدول برجهندگی، افزودنی یا فیلر فعال

### ۱. مقدمه

انحرافی، کوتاه شدن زمان اجرایی پروژه، اصلاح ناپایداری لایه های سنگدانه ای، کوتاه بودن زمان بین اختلاط و تراکم لایه بازیافتی، امکان کنترل خرابی ها و ترک های روسازی و تأمین اهداف بهسازی، امکان اصلاح سطح رویه راه بدون افزایش ضخامت لایه ها، افزایش مقاومت سیستم روسازی در مقابل یخبندان و رطوبت، کاهش مخارج بهره برداری و نگهداری راه [نشریه ۳۳۹-۱۳۸۵] و کاهش مصرف سوخت تا ۱۴٪ برای هر  $10^6$  کاهش دما [Olson and Eller, March 2008]. البته این روش بازیافت خود دارای معایبی است که زمان عمل آوری طولانی، مقاومت اولیه کم، ترک های حرارتی مشکلات

استفاده از روش بازیافت سرد آسفالت به صورت درجا، هم اکنون به عنوان یک روش اقتصادی برای بهسازی جاده هایی که پوشش آنها دچار فرسودگی شده، گسترش زیادی پیدا کرده است. در سال ۲۰۰۶، در قاره اروپا، ۴۹,۳۸۹,۴۰۰ تن مصالح خرده آسفالتی ( $RAP^1$ ) موجود بوده است که بیش از ۴۰ درصد آن در بازیافت گرم، حدود ۲۵ درصد در بازیافت سرد و حدود ۲۵ درصد نیز در مخلوط های گرم آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است [EAPA (2008)]. مزیت های بازیافت سرد درجا عبارتند از: کاهش هزینه های اجرایی نسبت به روش های سنتی، سازگاری روش اجرا با ترافیک عبوری از راه و عدم نیاز به احداث راه دسترسی و

است [Munthen, 1999]. Nataatmadja در سال ۲۰۰۱ نتیجه گرفت که درصد آب لازم برای تولید کف قیر به طور کلی باید در محدوده ۲٪ و ۲/۵٪ باشد [Nataatmadja, 2001].

Mohammad و همکاران در سال ۲۰۰۳ درصد آب بهینه برای قیرهای PG58-28 و دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد را معادل ۲/۷۵٪ به دست آوردند [Mohammad, 2003]. Marquis و همکاران در سال ۲۰۰۳ درصد آب بهینه بیشتری پیشنهاد کردند که معادل ۳٪ برای قیر PG64-28 بود و منجر به ضریب انبساط ۱۱ و نیمه عمر ۸/۵ ثانیه برای قیر در دمای ۱۶۰°C می شد [Marquis, 2003]. اضافه کردن ۳ درصد آب در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد به قیر AC-10 (ساخته شده توسط شرکت Chinese Petroleum Company) تولید کف قیری با نسبت انبساط ۱۱ و نیمه عمر بیشتر از ۸ می کند [Chiu (et al.), 2003]. Brennen و همکاران در سال ۱۹۸۳ پیشنهاد کردند که برای حصول بیشینه استقامت، درصد قیر بهینه برای پروژه های اصلاح عمیق لایه روسازی، بین ۰/۵٪ تا ۱٪ باشد. در تحقیق ایشان قیر AC-20 (درجه نفوذ ۴) و AP-4 (درجه نفوذ ۶۹) بیشترین ضریب انبساط و طولانی ترین نیمه عمر را با ۲٪ آب در دمای ۱۶۰°C از خود نشان کردند [Brennen, 1983]. Wood و Castedo در سال ۱۹۸۳، Wood و Tia در سال ۱۹۸۳، Roberts و همکاران در سال ۱۹۸۴ نیز درصد قیر بهینه را در محدوده ۰/۵٪ تا ۱٪ به دست آوردند [Roberts, (et al.), 1984]. Hicks و Akeroyd در سال ۱۹۸۸ استفاده از رابطه نسبی بین قیر و ریزدانه را برای تعیین درصد قیر بهینه در تهیه مخلوط کف قیر پیشنهاد دادند، که از ۳/۵٪ قیر به ۵٪ ریزدانه تا ۵٪ قیر به ۲۰٪ ریزدانه متغیر بود [Akeroyd, and Hicks, 1988]. Nataatmadja در سال ۲۰۰۱ نتیجه گرفت که درصد قیر بهینه بطور کلی در محدوده ۳٪ تا ۴٪ است [Nataatmadja, 2001]. Mohammad و همکاران در سال ۲۰۰۳، ۲٪ قیر و ۱/۵٪ سیمان پرتلند را برای حصول بیشینه نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک که در تحقیق آنان معادل ۱۰۸٪ بود پیشنهاد کردند [Mohammad (et al.), 2003]. Marquis و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای مصالحی که شامل ۶۰٪ مصالح آسفالت تراشیده شده بود، درصد قیر بهینه را با حضور ۱/۵٪ سیمان پرتلند معادل ۲/۵٪ تعیین کردند [Marquis(et al.), 2003]. در تحقیقی دیگر، مقدار درصد قیر بهینه برای مخلوطها برابر ۳/۵ درصد و برای مخلوطهای حاوی ۸۰ درصد مصالح خرد شده آسفالتی ۲٪ تعیین شد [Chiu, and Huang, 2003]. Wood و Castedo در سال ۱۹۸۳ دریافتند که مخلوطهای

موجود در تراکم [Thomas and Karmas, 2003]، محدودیت در حجم ترافیک روزانه (کمتر از ۵۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت) [Scholz (et al.), 1991]، دوام کمتر نسبت به روسازی های جدید با آسفالت گرم (بحث نوسازی راه) [روش های بازیافت سرد و گرم آسفالت و امکان سنجی اقتصادی آن در ایران، ۱۳۸۵] از جمله آن است.

مصالح خرد شده آسفالتی و سنگی استفاده شده برای تهیه مخلوطهای بازیافتی حاوی کف قیر، می بایستی دارای مقدار کافی فیلر باشند (حداقل مقدار فیلر ۵ درصد وزن کل مصالح باشد). کمبود در مقدار فیلر باعث کاهش مقاومت کششی و استقامت می شود، زیرا زمانی که کف قیر به مصالح افزوده می شود در تماس با فیلر موجود در مصالح، تولید یک ترکیب ماستیکی (فیلر، قیر و آب) می کند که وظیفه آن چسباندن سنگدانه های درشت تر به یکدیگر است و چنان که این مخلوط به طور کافی تولید نشود مقاومت مخلوط کاهش می یابد. کاهش میزان فیلر را می توان با افزودن سیمان، آهک و یا مصالح رد شده از الک نمره ۲۰۰ جبران کرد [Chiu, and Huang, 2003]. تحقیقات مختلفی بر روی تأثیر افزودن سیمان پرتلند بر روی خواص مکانیکی مخلوطهای آسفالتی گرم انجام شده است. در تمامی این موارد، مخلوط حاصل افزایش قابل ملاحظه ای را از نظر مقاومت اولیه، استقامت و مقاومت در برابر رطوبت، نشان داده است. همچنین حساسیت حرارتی بالای بتن آسفالتی را کاهش داده که بهبود این عوامل دلیل اصلی کاهش ترک های عرضی در روسازی های انعطاف پذیر است [Wirtgen Group, 2004].

دمای تولید کف قیر هر چه بیشتر باشد، منجر به ضریب انبساط بیشتر و نیمه عمر کمتر می شود، درصد آب زیاد نیز اثر مشابهی مانند دما دارد ولی شدت آن متفاوت است. Brennen و همکاران در سال ۱۹۸۳ شرایط تولید کف قیر را برای حصول ضریب انبساط و نیمه عمر بهینه، دمای ۱۶۰°C و درصد آب ۲٪ پیشنهاد کردند [Brennen (et al.), 1983]. Maccarrone و همکاران در سال ۱۹۹۴ نشان دادند که ۲/۶٪ آب و ۰/۷٪ افزودنی برای افزایش کف کنندگی، بهترین حالت برای حصول ضریب انبساط و نیمه عمر بهینه است [Maccarrone (et al.), 1994]. Ruckel و همکاران در سالهای ۱۹۸۰ و ۱۹۸۲ پیشنهاد کردند برای رسیدن به درصد آب بهینه، ضریب انبساط باید بین ۸-۱۵ محدود شده و زمان نیمه عمر حداقلی معادل ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شود [Ruckel (et al.), 1982]. موسسه CSIR در آفریقای جنوبی در سال ۱۹۹۹ محدوده کمتری شامل ضریب انبساط ۱۰ و نیمه عمر ۱۲ ثانیه را پیشنهاد کرده

همان طور که در تحقیقات گذشته مشاهده شد، در این میان، متغیرهای مختلفی را می توان در نظر گرفت که عبارتند از: نوع آسفالت، نوع و درصد دانه بندی، نوع و درصد قیر، نوع و درصد افزودنی، روش ساخت و تراکم نمونه، دما و روش نگهداری و نهایتاً انجام آزمایش‌های مختلف بر روی آن. بنابراین، این تحقیق تلاش دارد تا با ثابت فرض کردن دانه‌بندی و با استفاده از فناوری نوین بازیافت سرد کف قیر، نمونه‌هایی را با تنوع درصد کف قیر، نوع و درصد‌های مختلفی از افزودنی‌ها، تهیه کرده و اثر هر یک از متغیرهای مذکور را بر روی پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها، تبیین کند. در تحقیقات انجام گرفته تاکنون، بر خلاف تحقیق حاضر، تنها بعضی از افزودنی‌های بکار رفته در این تحقیق، به صورت مستقل و با فراوانی محدود مورد استفاده و آزمایش قرار گرفته است.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱ ارزیابی مصالح خرده آسفالتی

برای ارزیابی مصالح خرده آسفالتی و تعیین خصوصیات آنها آزمایش‌های تعیین درصد رطوبت و دانه بندی مصالح خرده آسفالتی و بررسی نیاز به افزودن مصالح سنگی جدید، استخراج قیر و تعیین درصد قیر مصالح خرده آسفالتی، تعیین وزن مخصوص مخلوط مصالح، ضروری است. قیر مصالح خرده آسفالتی، نسبت به قیر اولیه به طور قابل ملاحظه ای سخت شده است و این قیر که با اکسیژن هوا واکنش داده باعث سخت‌تر شدن کل مخلوط (شامل قیر جدید) می شود و مقادیر مقاومت مارشال و مقاومت کشش غیر مستقیم را افزایش می‌دهد [عامری، تقی نژاد-۱۳۸۷]. انتخاب نوع قیر نیز خود مستلزم انجام آزمایشهایی چون درجه نفوذ، نقطه اشتعال، نقطه نرمی، کندروانی کینماتیکی و وزن مخصوص قیر مصرفی است. مصالح مورد استفاده در این تحقیق با هماهنگی معاونت اجرایی سازمان مهندسی عمران شهرداری تهران مربوط به دپوی خرده آسفالتی شهرداری واقع در غرب تهران ( تقاطع غیرهمسطح بزرگراه یادگار امام با بزرگراه جلال آل احمد) است. پس از تعیین و رسم نمودار دانه بندی مصالح خرده آسفالتی موجود [رضائیان، ۱۳۸۸] و تطابق آن با محدوده دانه بندی مورد تایید نشریه ۳۳۹، می توان تشخیص داد که کدام قسمت از دانه بندی را و به چه میزان، می بایست تغییر داد. همچنین مطابق آئین نامه مذکور، می توان تا ۲۵٪ مصالح جدید نیز به مصالح RAP افزود ( شکل ۱)، [ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، نشریه ۳۳۹-۱۳۸۵].

آسفالت کف قیر شدیداً متأثر از نفوذ رطوبت هستند به طوری که در تحقیق آنان، مقاومت نمونه‌های اشباع به طور چشمگیری از نمونه‌های خشک عمل آوری شده کمتر بود، البته نمونه‌های ساخته شده با درصد قیر بیشتر مقاومت زیادتری در برابر رطوبت از خود نشان دادند. [Castedo, Humberto and Wood, Bowering. 1983]. همکاران در سال ۱۹۸۰ مقاومت کششی نمونه‌های آسفالت کف قیر را در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵۰ مگاپاسکال بسته به شرایط رطوبتی مخلوط تخمین زدند [Ruckel, Scott, and Bowering. 1980]. Maccarrone در سال ۱۹۹۴ حداقل مقاومت کششی مخلوطهای کف قیر عمل آوری شده را برای تضمین عملکرد مناسب، معادل ۱۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های عمل‌آوری شده اشباع و ۲۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های خشک عمل‌آوری شده پیشنهاد کرد [Maccarrone, Holleran and 1994]. در تحقیقی دیگر، مشخص شد که بیشینه مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالت کف قیر (اشباع و خشک) در درصد قیر ۲/۵٪ است و در درصد قیر بیش از ۲/۵٪، کاهش چشمگیری در مقادیر مقاومتی این مخلوطها ایجاد می کند [Lee, and Kim, 2003]. همچنین در تحقیقات آزمایشگاهی مشابهی که در سال ۱۹۹۸، توسط Muthen در آفریقای جنوبی انجام شد مشخص شد که به طور کلی مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اشباع از مقاومت نمونه های خشک کمتر بود. همچنین، مقاومت نمونه‌ها افزایش اندکی در حالت اشباع از خود نشان دادند که علت آن می تواند واکنش هیدراسیون افزودنیهای اصلاح کننده آهک و خاکستر بادی که به مصالح افزوده شده بودند، باشد [Muthen , 1998]. در تحقیق دیگری، نمونه‌های آسفالت کف قیر ساخته شده با استفاده از سرباره کوره آهن به عنوان فیلر، مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی خاکستر بادی به عنوان فیلر، از خود نشان دادند [Chiu, and Huang, 2003]. در پروژه تحقیقاتی دیگری از ۲٪ آهک به عنوان فیلر فعال استفاده شد و نمونه های کف قیر ساخته شده با تراکم مارشال، بیشینه مقادیر مدول برجهندگی خود را برای حالت عمل‌آوری نشده در درصد قیری معادل ۲/۲٪ نشان دادند. همچنین، مدول برجهندگی نمونه‌های خشک عمل آوری شده (۳ روز در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد)، ۵ تا ۲۸ برابر نمونه‌های عمل‌آوری نشده بود. برای نمونه‌هایی که با درصد قیر بیشتر و تراکم بیشتری ساخته شده بودند، این افزایش مدول برجهندگی، بیشتر بود [Nataatmadja, 2001]. ساخت مخلوط های آسفالتی آزمایشگاهی، یکی از کارآمدترین روش ها برای رسیدن به یک روسازی مناسب است.

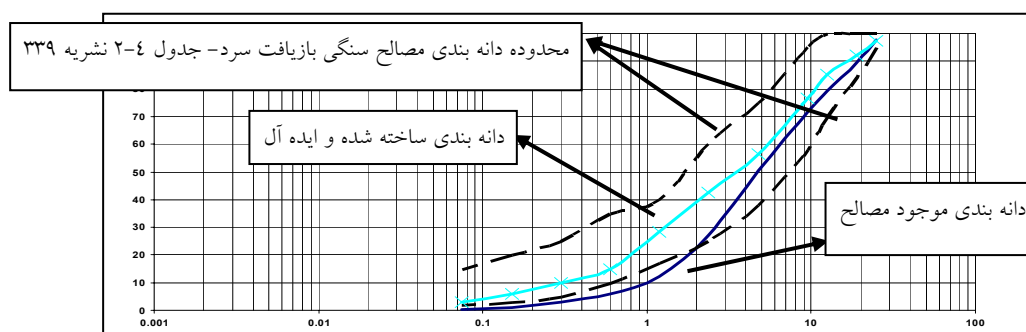
## ۲-۲ دستگاه و مشخصات تولید کف قیر

قیر با دمای  $180^{\circ}\text{C}$ ، کف قیر تولید شده با ۲/۵٪ آب، بهینه ضریب انبساط و نیمه عمر را به ترتیب برابر ۱۳ و ۱۶ ثانیه به دست می‌دهد. حال باید کنترل شود که آیا این مقادیر، حداقل‌های آئین‌نامه‌ای را تأمین می‌کنند یا خیر. حداقل ضریب انبساط و نیمه عمر، طبق پیشنهاد آئین‌نامه طرح اختلاط مخلوط‌های کف قیر آفریقای جنوبی، به ترتیب برابر ۱۰ و ۱۲ ثانیه [Muthen, 1998] و طبق پیشنهاد نشریه ۳۳۹ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور به ترتیب برابر ۸ و ۱۰ ثانیه است که در نمودار شکل ۳، مشخص شده است [نشریه ۳۳۹ - ۱۳۸۵].

## ۳-۲ کالیبره کردن دستگاه تولید کف قیر

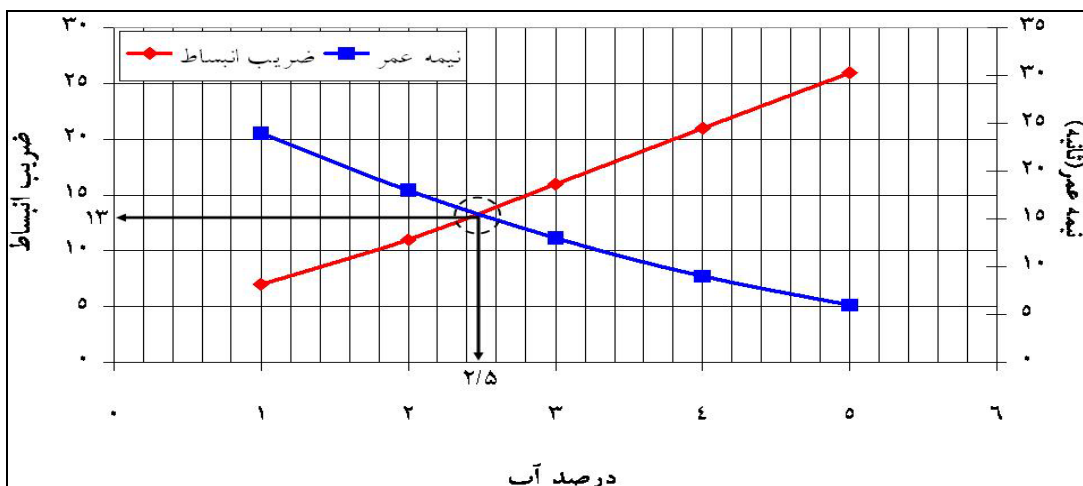
کالیبره کردن دستگاه به نوعی، بهینه سازی عملکرد آن است، به‌ویژه در بحث تولید کف قیر اندکی سهل انگاری در این قسمت موجب تفاوت قابل توجه در نتایج آزمایشگاهی خواهد شد. کالیبره کردن دستگاه به کمک چهار معیار دبی خروجی آب بدون هوا، دبی خروجی آب به همراه هوا، دبی خروجی کف قیر و تطابق مقادیر فشار قرائت شده در فشار سنجها با یکدیگر است، سپس می‌توان آزمایش‌های مربوط به بهینه‌سازی تولید کف قیر در دمای ۱۶۰، ۱۷۰ و ۱۸۰ درجه سانتیگراد را مطابق دستورالعمل دستگاه WLB10 [Wirtgen Group, 2004]، مورد بررسی قرار داد. به عنوان نمونه ضریب انبساط و نیمه عمر کف قیر در دمای ۱۸۰ مرتبط با تحقیق حاضر، در جدول ۳ نشان داده شده است. نحوه محاسبه نسبت انبساط، نیمه عمر و شاخص کف در قسمت ۲-۲ تشریح شد. کمبود رطوبت مصالح و درصد رطوبت افزوده شده در حین اسپری کردن کف قیر مانع توزیع کافی و کامل قیر، کاهش تراکم پذیری آن و مقدار بیش از اندازه آن موجب افزایش دوره عمل آوری، کاهش وزن مخصوص و کاهش مقاومت مخلوط کوبیده شده می‌شود و بنابراین مقدار آن باید بهینه باشد [Nataatmadja, 2001]. نهایتاً مشخصات کف قیر تولید شده توسط دستگاه WLB10 برای ساخت ۱۶۲ نمونه مارشال در جدول ۴ ارایه شده است.

در این تحقیق، به منظور بررسی خواص کف قیر و نیز تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی بازیافتی آسفالت کف قیر، از دستگاه تولید کف قیر در مقیاس آزمایشگاهی WLB10 استفاده شده است. کف قیر را می‌توان قیر حجم شده‌ای نامید که تولید آن با تزریق آب و هوا در دمای معمولی، به درون قیر داغ حاصل می‌شود [سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، نشریه ۳۳۹ - ۱۳۸۵]. از کف قیر می‌توان برای تولید مخلوط جدید به منظور نوسازی و بهسازی راهها استفاده کرد. کیفیت این فنآوری نیز مثل سایر انواع روش‌های راهسازی، به متغیرهای زیادی وابسته است. از آن جمله می‌توان به نوع قیر، دمای قیر، و عوامل دیگر مثل نوع کارخانه آسفالت سازنده کف قیر و رطوبت ترکیب اشاره کرد که هر کدام باید به طور جداگانه مورد بررسی و توجه قرار گیرند [Muthen, 1998]. در حال حاضر، سه مشخصه مهم کف قیر که عبارتند از نسبت انبساط<sup>۱</sup>، نیمه عمر<sup>۲</sup> و شاخص کف<sup>۳</sup> را به صورت زیر می‌توان تعریف کرد [Jenkins, 2004]. نسبت انبساط: نسبت حجم حداکثر کف قیر به حجم اولیه قیر. نیمه عمر: زمان رسیدن حجم کف بر حسب ثانیه به نصف حجم حداکثر است که از آزمایش حاصل شده است (معرف پایداری کف قیر و سرعت محو شدن آن در مدت اختلاط قیر و مصالح سنگی است. شاخص کف: سطح زیر نمودار از بین رفتن کف (نمودار نسبت انبساط - زمان) و در واقع توانایی ترکیب شدن کف با مصالح است. دو مشخصه نسبت انبساط و نیمه عمر به نوع و درجه نفوذ قیر، مقدار آب تزریق شده به قیر داغ و درجه حرارت قیر هنگام تولید کف قیر بستگی دارد. در آزمایشگاه، پس از داغ کردن قیر و تبدیل آن به کف، درون محفظه انبساط، دو نقطه مهم اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند که عبارتند از: بیشینه حجم کف<sup>۴</sup> ( $ER_m$ ) و نیمه عمر<sup>۵</sup> ( $t_2$ ). با افزایش میزان حجم آب سازنده کف قیر، برای دمای ثابت قیر، نسبت انبساط و نیمه عمر به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. نحوه محاسبه مشخصه‌های مذکور در فصل ۴ از نشریه ۳۳۹ آمده است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود برای

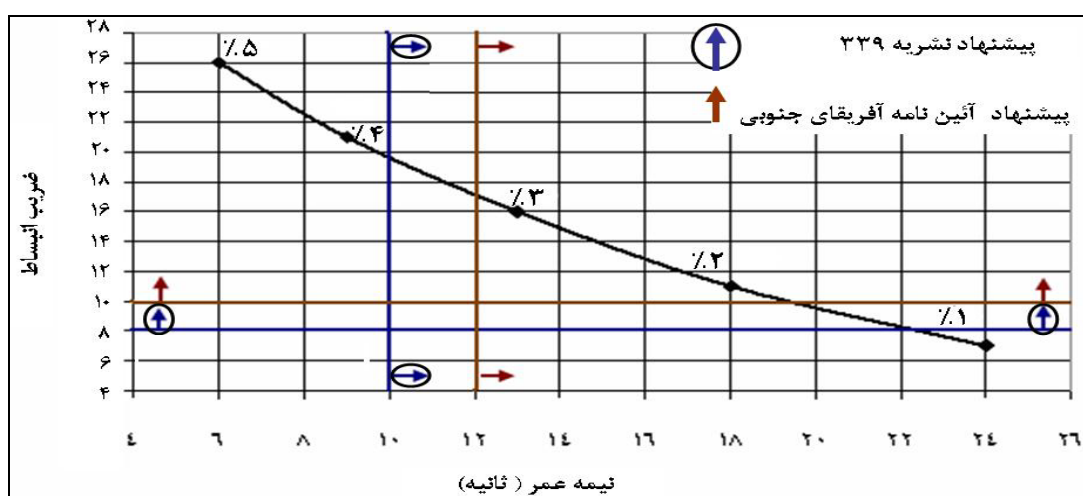


شکل ۱. دانه بندی مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در تحقیق و ایده آل سازی آن

بررسی تأثیر درصد و نوع افزودنی‌ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوطهای بازیافت سرد با کف قیر



شکل ۲. درصد آب بهینه کف قیر در دمای  $180^{\circ}\text{C}$



شکل ۳. نمودار ضریب انبساط- نیمه عمر کف قیر در دمای  $180^{\circ}\text{C}$  مورد استفاده در تحقیق

جدول ۳. ضریب انبساط و نیمه عمر کف قیر در دمای  $180^{\circ}\text{C}$  مورد استفاده در تحقیق

| $180^{\circ}\text{C}$ دمای قیر = |                  |             | درصد آب |
|----------------------------------|------------------|-------------|---------|
| شاخص کف (FI)                     | نیمه عمر (تایمه) | نسبت انبساط |         |
| ۹۲                               | ۲۴               | ۷           | ۱       |
| ۱۶۸                              | ۱۸               | ۱۱          | ۲       |
| ۲۰۸                              | ۱۳               | ۱۶          | ۳       |
| ۱۸۹                              | ۹                | ۲۱          | ۴       |
| ۱۵۶                              | ۶                | ۲۶          | ۵       |

جدول ۴. مشخصات کف قیر مورد استفاده در تحقیق

| درصد آب (%) | دمای قیر (درجه سانتی گراد) | نسبت انبساط | نیمه عمر (تایمه) | فشار آب (اتمسفر) | فشار هوا (اتمسفر) |
|-------------|----------------------------|-------------|------------------|------------------|-------------------|
| ۲/۵         | ۱۸۰                        | ۱۳          | ۱۶               | ۸                | ۷                 |

## ۲-۴ انتخاب افزودنی یا فیلر فعال

می شود. تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز برای اندازه گیری مدول برجهندگی مخلوطهای آسفالتی، بر خلاف مقاومت کششی غیرمستقیم آنها، پیچیده و گرانیقیمت بوده و تنها در معدودی از آزمایشگاهها در دسترس است. بنابراین برای پروژه های بزرگ، می توان با استفاده از یک بسته از آزمایش های پایلوت، به کمک شبکه های عصبی مصنوعی، ارتباطی را بین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم برقرار کرد و پس از آن با انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم با دقتی قابل قبول (بسته به برآزش مناسب شبکه)، مدول برجهندگی را پیش بینی کرد.

## ۲-۵ ساخت نمونه ها

در این مرحله به ازای درصد کف قیر ۲، ۳ و ۴، نمونه های استوانه ای شکل به روش مارشال مطابق دستورالعمل ASTM-D1559-89، تهیه شد. با توجه به وضعیت کنونی ترافیک کلان شهرهایی همچون تهران و مشهد، بازیافت به دلیل اجرای سریع، همیشه به عنوان یک گزینه مناسب در بهسازی راه های پر رفت و آمد می تواند مطرح باشد، بنابراین در ساخت نمونه ها، ترافیک عبوری سنگین (بیش از ۵۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت اوج) در نظر گرفته شده و تعداد ۷۵ ضربه در هر طرف انتخاب شده است. لازم به یادآوری است که در این تحقیق، آزمایش های مقاومت مارشال، ITS<sup>۸</sup> خشک و اشباع (برای به دست آوردن TSR<sup>۹</sup> و تعیین میزان حساسیت مخلوط به رطوبت) و مدول برجهندگی، برای افزودنی های متفاوت و با درصدهای وزنی متفاوت انجام گرفت (جدول ۵). بر این اساس، پس از دانه بندی دپوی مصالح خرده آسفالتی، با توجه به اینکه متغیرهای طرح در هر سه نمونه یک بار تغییر می کرد، بسته های سه تایی از نمونه ها بر اساس دانه بندی مورد نیاز تهیه شد که با فرض هر نمونه مارشال در حدود ۱۲۰۰ گرم، با احتساب پرت مصالح وزن هر بسته ۴۵۰۰ گرم در نظر گرفته شد. با توجه به تعداد کل نمونه ها که ۱۶۲ عدد است، ۵۴ بسته از نمونه ها تهیه شد. با انجام آزمایش استخراج<sup>۱</sup>، درصد قیر مصالح دانه ای خرده آسفالتی معادل ۵/۵٪ به دست آمد. محاسبات مربوط به میزان جرم آب لازم برای درصدهای متفاوت افزودنی و وزن کف قیر مورد نیاز با توجه به جرم افزودنی، درصد قیر و جرم خشک مصالح (۴/۵ کیلوگرم) محاسبه و به ترتیب در جدول ۶ و ۷ نشان داده شده است. زمان تخلیه یا اسپری شدن کف قیر نیز با توجه به درصد قیر و خروجی دستگاه در هر تائیه محاسبه و تعیین شد. منظور از Woc در جدول ۶، درصد رطوبت بهینه برای حصول تراکم و کارایی مناسب است.

فیلر یکی از مهم ترین اجزای تشکیل دهنده مخلوط های آسفالتی است که با پر کردن فضاهای خالی به دلیل نرمی، خصوصیات سطحی و ترکیب شیمیایی، نقش یک ماده فعال را ایفا می کند، به این ترتیب که فیلر فعال بلافاصله بعد از تماس با سطح مصالح سنگی مرطوب شروع به واکنش می کند. در واقع، رفتار مخلوطهای آسفالتی از لحاظ مهندسی، تابع نوع و میزان فیلر است [غفارپور جهرمی و خدایی، ۱۳۸۸]. استفاده از سیمان پرتلند و آهک، به عنوان فیلر، در مخلوط های بتن آسفالتی قدمت بسیار دارد و در دهه های اخیر در مخلوط های بازیافتی حاوی کف قیر نیز مقدار ثابتی سیمان، آهک یا هردوی آن ها، در نظر گرفته می شود. با وجود اینکه استفاده از سیمان در مخلوط های کف قیر دارای مزایایی از قبیل بهبود چسبندگی قیر به مصالح، افزایش مقاومت نهایی لایه بازیافتی و کاهش حساسیت لایه بازیافت در مقابل رطوبت است، اما مصرف بیش از اندازه آن سبب افزایش صلبیت و کاهش عمر خستگی لایه بازیافتی می شود [Nataatmadja, 2001]. تحقیقات انجام شده و همچنین نشریه ۳۳۹، حداکثر سیمان مصرفی را به حدود ۲ درصد وزن نمونه محدود کرده و افزودن ۱ تا ۲ درصد سیمان را به عنوان درصدهای مطلوب توصیه می کند [سازمان مدیریت و برنامه ریزی - نشریه ۳۳۹ - ۱۳۸۵]. از دیگر مواردی که در این پژوهش به عنوان کاندید فیلر فعال یا افزودنی مورد توجه قرار گرفتند، خاکستر بادی، آهک شکفته، سرباره کوره، پوزولان، شیل، پودر سنگ، سنگ آهک، سنگ آهن و پودر لاستیک است. با توجه به تحقیقات گذشته، نظر کارشناسان امر، فراوانی در ایران و همچنین محدودیت در تهیه آن به عنوان افزودنی، نهایتاً، سیمان، سنگ آهک، آهک شکفته، سرباره کوره، پوزولان و پودر لاستیک تا حداکثر ۲ درصد وزن کل نمونه، مورد توجه قرار گرفت. قابل تأکید است که با توجه به تحقیقات نگارنده، روش کار، نوع و درصد افزودنی ها در این پروژه، تا کنون رایج نشده است. در حال حاضر روند طرح مخلوط های حاوی کف قیر و انتخاب درصد کف قیر بهینه براساس انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم صورت می پذیرد [Chiu and Huang, 2003]. بنابراین در این تحقیق با توجه به متداول بودن این روش، مقبولیت جهانی و اقتصادی بودن انجام آن، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح مخلوط مورد استفاده قرار می گیرد. در عین حال برای تعیین سختی نمونه ها، از آزمایش مدول برجهندگی، و برای تعیین بیشترین باری که نمونه ها بدون گسیختگی می توانند تحمل کنند، از آزمایش مارشال بهره گیری

بررسی تأثیر درصد و نوع افزودنی ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوطهای بازیافت سرد با کف قیر

عمل آوری به صورت بالا، یک نمونه برای عمل آوری اشباع به مدت ۲۴ ساعت در آب  $25^{\circ}\text{C}$  غرقاب می شود. آزمایش مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم خشک و اشباع به ترتیب بر اساس دستورالعمل ASTM-D1559-89 و AASHTO-T283، بر روی نمونه ها انجام گرفت. آزمایش مدول برجهنگی نیز، با توجه به مشخصات مندرج در جدول ۸ صورت پذیرفت.

با توجه به جرم مصالح مورد نیاز برای ساخت نمونه های مارشال ۴ اینچی (حدود ۱۲۰۰ گرم) و جرم کل مخلوط که معادل ۴/۵ کیلوگرم است، از هر طرح حدود ۳ نمونه به دست می آید و با ۷۵ ضربه به هر طرف قالب برای تداعی ترافیک سنگین متراکم می شوند. سپس، هر یک از ۳ نمونه متراکم شده با تعداد ضربات مشخص، تحت عمل آوری به مدت سه روز (۷۲ ساعت) در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  در گرمخانه قرار می گیرد. همچنین از هر سه نمونه

جدول ۵. تبیین متغیرهای تحقیق

| دانه بندی         | درصد کف قیر | نوع افزودنی             | درصد افزودنی | تعداد ضربات مارشال | مدت و دمای عمل آوری             | نوع و تعداد آزمایشات                 |
|-------------------|-------------|-------------------------|--------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| ثابت              | ۲ و ۳ و ۴   | سیمان                   | ۰ و ۱ و ۲    | ۷۵                 | $40^{\circ}\text{C}$<br>۷۲ ساعت | مدول برجهنگی                         |
|                   |             | پودر آهک                |              |                    |                                 |                                      |
|                   |             | آهک شکفته               |              |                    |                                 |                                      |
|                   |             | پوزولان                 |              |                    |                                 |                                      |
|                   |             | سرباره کوره خرده لاستیک |              |                    |                                 |                                      |
| تعداد کل نمونه ها |             |                         |              |                    |                                 | $3 \times 3 \times 6 \times 3 = 162$ |

جدول ۶. جرم آب لازم برای درصدهای متفاوت افزودنی در تحقیق حاضر

| دانه بندی | درصد افزودنی (%) | $M_{\text{cement}}$ (گرم) | $W_{\text{occ}}$ (%) | $M_{\text{water}}$ (گرم) |
|-----------|------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| ثابت      | ۰                | ۰                         | ۴/۲                  | ۱۶۶/۵                    |
|           | ۱                | ۴۵                        | ۴/۲                  | ۱۶۸                      |
|           | ۲                | ۹۰                        | ۴/۲                  | ۱۷۰                      |

جدول ۷. وزن کف قیر محاسبه شده بر اساس وزن افزودنی و درصد قیر مورد استفاده در تحقیق

| درصد قیر (%) | درصد افزودنی (%) | وزن افزودنی (گرم) | وزن کف قیر (گرم) |
|--------------|------------------|-------------------|------------------|
| ۲            | ۰                | ۰                 | ۹۰               |
|              | ۱                | ۴۵                | ۹۰/۹             |
|              | ۲                | ۹۰                | ۹۱/۸             |
| ۳            | ۰                | ۰                 | ۱۳۵              |
|              | ۱                | ۴۵                | ۱۳۶/۳۵           |
|              | ۲                | ۹۰                | ۱۳۷/۷            |
| ۴            | ۰                | ۰                 | ۱۸۰              |
|              | ۱                | ۴۵                | ۱۸۱/۸            |
|              | ۲                | ۹۰                | ۱۸۳/۶            |

جدول ۸. مشخصات مربوط به آزمایش مدول برجهنگی با دستگاه UTM14

| استاندارد مورد استفاده | شکل بارگذاری | زمان بارگذاری (ثانیه) | دوره بارگذاری (میلی ثانیه) | تعداد پیش بارگذاری | تعداد بارگذاری | دمای نمونه (سانتی گراد) | بار اعمال شده (نیوتون) | نسبت پواسون (U) |
|------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|----------------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| ASTM D4123-82          | زنگوله ای    | ۰/۱                   | ۲۰۰۰                       | ۶۰                 | ۱۰             | ۲۵                      | ۳۵۰                    | ۰/۳۵            |

### ۳. تحلیل نتایج آزمایش

#### ۳-۱ بررسی رفتار مخلوطهای بازیافتی با تغییر درصد

##### کف قیر از ۲ تا ۴ درصد

مدول برجهنگی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در محدوده ۱۹۷ تا ۲۹۰۰ مگاپاسکال است. مرز پائین آن مربوط به نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و درصد کف قیر ۴ و مرز بالای آن مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان است. متوسط مدول برجهنگی نمونه‌ها، معادل ۱۱۴۱ مگاپاسکال است. به طور کلی، با افزایش درصد قیر از ۲٪ به ۴٪، مدول برجهنگی نمونه‌ها کاهش و مقاومت کششی غیرمستقیم خشک نمونه‌ها افزایش یافته و مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع نمونه‌ها، دارای یک نقطه بیشینه در ۳ درصد کف قیر و مقاومت مارشال نمونه‌ها، دارای یک نقطه بیشینه در ۲ درصد کف قیر بوده و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، تغییر خاصی پیدا نمی‌کند. به طور طبیعی انتظار می‌رود با افزایش درصد قیر به علت خاصیت ارتجاعی و خمیری آن و تأثیر این خواص بر مخلوط، مدول برجهنگی کاهش یابد. در عین حال خاصیت چسبندگی قیر نیز دلیل دیگری است که با افزایش آن، مقاومت کششی غیر مستقیم خشک مخلوط، افزایش می‌یابد. اما، به طور کلی، به نظر می‌رسد که افزودنی‌های مخلوطهای آسفالتی در تماس با رطوبت، واکنش داده و تا حدودی باعث افزایش  $ITS_{Sat}$  می‌شود. ولی با افزایش درصد قیر با توجه به اینکه نقش عایق بودن قیر پر رنگ تر شده و نفوذ رطوبت محدودتر می‌شود و همچنین فضای خالی بیشتری در مخلوطها توسط قیر پر می‌شود، بنابراین، این موارد با افزایش قیر از ۳ به ۴ درصد، فرآیند غالب بوده و سبب کاهش  $ITS_{Sat}$  می‌شود. همچنین واکنش هیدراسیون افزودنی‌هایی مانند آهک و خاکستر بادی، مقاومت در حالت اشباع نسبت به خشک را نشان می‌دهد.

بر اساس مقادیر TSR بیشینه و کمینه به دست آمده از آزمایش، می‌توان دریافت که بیشینه TSR در ۲٪ کف قیر ایجاد می‌شود و با افزایش درصد کف قیر از ۲٪ به ۴٪، TSR کاهش می‌یابد. بیش از ۲۰۰ نمودار و جدول مختلف مبین نتایج این تحقیق است.

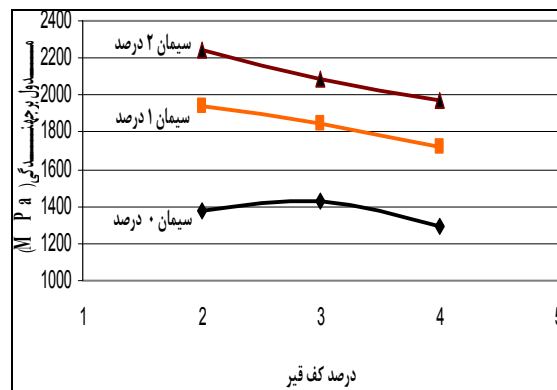
که تنها نمونه‌ای از نمودارهای مربوط به این تغییرات در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودار، تغییرات مدول برجهنگی در مقابل درصد کف قیر را برای افزودنی سیمان نشان می‌دهد. مدول برجهنگی نمونه‌های ساخته شده با ۱٪ و ۲٪ سیمان، آهک، آهک شکفته، سرباره کوره و پودر لاستیک در محدوده قیر ۲٪، بیشینه و با افزایش درصد قیر، کاهش می‌یابد. در حالت مدول برجهنگی نمونه‌های فاقد افزودنی‌های بالا، در محدوده قیر ۳٪، بیشینه و با افزایش یا کاهش درصد قیر، اندکی کاهش می‌یابد. این مسئله مبین آن است که مثلاً افزودن سیمان باعث کاهش درصد قیر متناظر با بیشینه مدول برجهنگی می‌شود، به این معنی که اگرچه مصرف سیمان باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود، اما از طرف دیگر باعث کاهش مصرف قیر تا حدود نیم درصد می‌شود. نتایج مربوط به مخلوطهای حاوی سیمان، آهک و آهک شکفته، تا حدود زیادی مطابق تحقیقات گذشته است. بهتر بودن پارامترهای مقاومتی مخلوطهای حاوی سیمان به دلیل نقش دوگانه سیمان است، یکی آنکه سیمان خود یک چسبنده طبیعی است و دیگر آنکه واکنش هیدراته سیمان با آب گرمازا است و این گرما در مخلوط باعث تسریع سایر واکنش‌های مصالح با کف قیر می‌شود.

$ITS_{Dry}$  نمونه‌های ساخته شده با ۱٪ و ۲٪ سیمان، آهک، آهک شکفته، سرباره کوره و پودر لاستیک، در محدوده قیر ۲٪، کمینه و با افزایش درصد قیر، افزایش می‌یابد. در حالت  $ITS_{Dry}$  نمونه‌های فاقد آهک (۰٪ آهک)، در محدوده قیر ۲٪، بیشینه و با افزایش درصد قیر، کاهش می‌یابد. همچنین،  $ITS_{Dry}$  نمونه‌های ساخته شده با ۱٪، ۲٪ و ۴٪ پوزولان (نمونه‌های حاوی پوزولان) در محدوده قیر ۲٪، بیشینه و با افزایش درصد قیر، کاهش می‌یابد. یعنی، باعث کاهش  $ITS_{Dry}$  بیشینه می‌شود.  $ITS_{Sat}$  نمونه‌های حاوی سیمان، آهک، آهک شکفته و پودر لاستیک با افزایش درصد قیر، سیر صعودی دارد، ولی در مورد  $ITS_{Sat}$  نمونه‌های حاوی سرباره کوره با افزایش درصد قیر، کاهش می‌یابد.  $ITS_{Sat}$  نمونه‌های حاوی پوزولان نیز از روند مشخصی تبعیت نمی‌کند. همچنین  $ITS_{Sat}$  نمونه‌های بدون افزودنی نیز با افزایش درصد قیر سیر نزولی دارند.



می‌شود. افزودن آهک تا ۲ درصد، باعث کاهش درصد قیر متناظر با بیشینه مدول برجهندگی می‌شود. همچنین، نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد سرباره کوره در درصد کف قیر ۲، ۳ و ۴، مدول برجهندگی تقریباً یکسانی را دارند. افزودن پودر لاستیک، اگرچه باعث کاهش شدید مدول برجهندگی بیشینه می‌شود ولی همچنین باعث کاهش درصد قیر متناظر با بیشینه مدول برجهندگی نیز می‌شود. همچنین تفاوت قابل توجهی در افزودن پودر لاستیک تا ۲ درصد در مدول برجهندگی مشاهده نمی‌شود. به طور کلی و بدون توجه به درصد کف قیر، با افزایش درصد سیمان از ۰٪ به ۲٪، مدول برجهندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد، با افزایش درصد آهک از ۰٪ به ۲٪، مدول برجهندگی نمونه‌ها دارای نقطه کمینه است، با افزایش درصد آهک شکفته، سرباره کوره و پودر لاستیک، از ۰٪ به ۲٪، مدول برجهندگی نمونه‌ها دارای دو بخش با شیب نزولی و تقریباً ثابت است، با افزایش درصد پوزولان از ۰٪ به ۲٪، مدول برجهندگی نمونه‌ها دارای دو بخش با شیب نزولی و صعودی یا تقریباً ثابت است.

در نمونه‌های مارشال حاوی آهک شکفته،  $ITS_{Dry}$  به طور کلی، پوزولان، سرباره کوره و پودر لاستیک، با افزایش افزودنی از ۱٪ در نمونه‌های  $ITS_{Dry}$  به ۲٪، سیر نزولی دارد، ولی در مورد مارشال حاوی آهک و سیمان، با افزایش افزودنی از ۱٪ به ۲٪، سیر صعودی دارد. همچنین، پس از اضافه شدن افزودنی رفتار مخلوط نیز منظم می‌شود. همچنین، به طور کلی با افزایش درصد نمونه‌ها  $ITS_{Sat}$  افزودنی‌های سیمان و آهک از ۱٪ به ۲٪، افزایش می‌یابد، ولی با افزایش درصد آهک شکفته، از ۱٪ به ۲٪، نمونه  $ITS_{Sat}$  نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در مورد  $ITS_{Sat}$  های حاوی پودر لاستیک و سرباره کوره، کاهش محسوس با  $ITS_{Sat}$  تغییر درصد افزودنی از ۱٪ به ۲٪ دیده نمی‌شود. بیشترین نمونه‌های حاوی سیمان، آهک، آهک شکفته و پودر لاستیک، نمونه‌های حاوی  $ITS_{Sat}$  مربوط به ۴٪ کف قیر است و کمترین پوزولان و سرباره کوره مربوط به ۴٪ کف قیر است. با افزایش نمونه‌ها تغییر محسوس و  $ITS_{Sat}$  درصد افزودنی از ۱٪ به ۲٪، معنی داری ندارد و حداکثر در حدود ۱۰٪ افزایش و یا کاهش نمونه‌های حاوی سیمان،  $ITS_{Sat}$  می‌یابد. به طور کلی، بیشترین آهک و سرباره کوره، مربوط به ۲٪ کف قیر است و بیشترین نمونه‌های حاوی پوزولان و پودر لاستیک مربوط به ۴٪  $ITS_{Sat}$  کف قیر است. به طور کلی با افزایش درصد افزودنی از ۱٪ به ۲٪، مقاومت مارشال نمونه‌ها تغییر محسوس و معنی داری ندارد



شکل ۴. تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌های با دانه بندی ثابت، تراکم ۷۵ ضربه مارشال و سه درصد سیمان (۰٪، ۱٪ و ۲٪) بر حسب تغییر درصد قیر

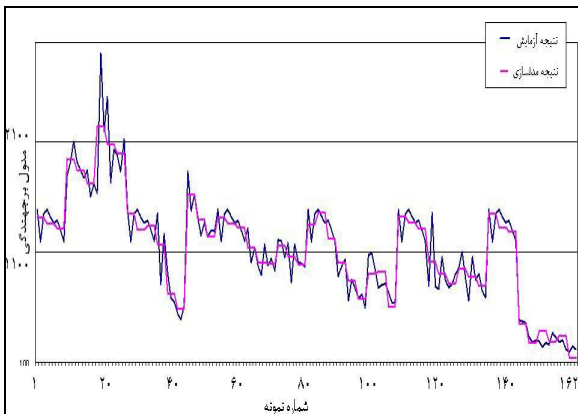
نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی سیمان، آهک، آهک شکفته و سرباره کوره با افزایش درصد قیر، سیر نزولی دارد ولی در مورد TSR نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و پوزولان، با افزایش درصد قیر، افزایش می‌یابد. همچنین،  $ITS_{Dry}$  های حاوی آهک، آهک شکفته و سیمان، نسبت به  $ITS_{Dry}$  در نمونه‌های بدون هر یک از افزودنی‌های بالا، کمتر است و در سایر افزودنی‌ها این نسبت بیشتر است. قابل یادآوری است که کلیه تفاوت‌ها در این مرحله حداکثر در حدود ۱۰٪ است. مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی آهک، آهک شکفته و سرباره کوره، پوزولان، پودر لاستیک با افزایش درصد قیر از ۲٪ تا ۴٪، سیر نزولی دارد، ولی در مورد مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی سیمان، با افزایش درصد قیر، یک نقطه بیشینه در ۳٪ کف قیر دارد. همچنین بیشترین مقادیر مقاومت مارشال به جز در مورد پودر لاستیک، مربوط به نمونه‌های حاوی ۲٪ افزودنی است. در مورد نمونه‌های حاوی سیمان، پوزولان و سرباره کوره، با افزایش درصد کف قیر، بیشترین مقاومت مارشال به ترتیب مربوط به نمونه‌های با ۲٪، ۱٪ و بدون افزودنی است. در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک، با افزایش درصد کف قیر، کمترین مقاومت مارشال به ترتیب مربوط به نمونه‌های با ۲٪، ۱٪ و بدون افزودنی است.

### ۲-۳ بررسی رفتار مخلوطهای بازیافتی با تغییر درصد افزودنی از ۰ تا ۲ درصد

در بخش ۱-۳ رفتار مخلوطهای بازیافتی با تغییر درصد کف قیر از ۲ تا ۴ درصد تشریح شد. اما در این قسمت رفتار مخلوطهای بازیافتی با تغییر درصد افزودنی از ۰ تا ۲ درصد، ارایه و تحلیل

باقر-۱۳۷۷]. از نرم افزار آماری SPSS برای مدل سازی و پیش بینی مدول برجهندگی استفاده می شود، به طوری که در آن رگرسیون خطی فرض شده و آنالیز انجام می پذیرد. برای مدل سازی و به دست آوردن مدول برجهندگی که در این نرم افزار آن را متغیر مستقل فرض کرده و برای هر نوع افزودنی مشخص، درصد افزودنی، درصد قیر، نتایج آزمایش مقاومت مارشال، کشش غیر مستقیم خشک و اشباع را متغیر وابسته فرض می شود.

نکته قابل توجه آنکه متوسط خطا یا میزان دقت نتایج حاصل از مدل سازی در نرم افزار SPSS نسبت به نتایج حاصل از آزمایش، ۱۰/۴ درصد است و نمایانگر آن است که مدل سازی انجام شده توسط SPSS برازش نسبتاً خوبی بر روی داده ها داشته است (شکل ۶). همچنین، بر اساس رسم نمودار با تابع های رگرسیون مختلف در نرم افزار Excel، بهترین برازش را تابع توانی ارائه می دهد.

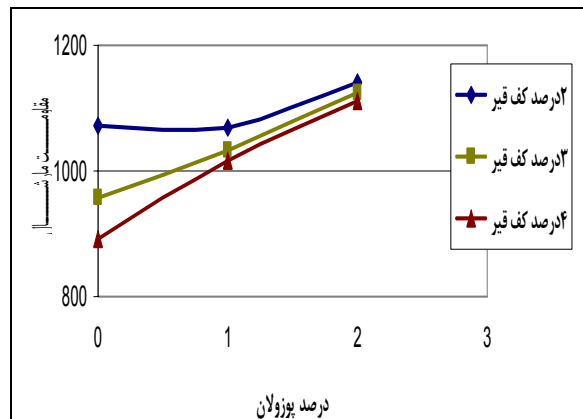


شکل ۶. بررسی شماتیک میزان خطا برای نتایج حاصل از آزمایش و نتایج حاصل از مدل سازی با SPSS

نتایج آزمایش بروی مخلوط های بازیافتی سرد با کف قیر، اعدادی قطعی نیستند. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت مارشال، بر روی نمونه های کاملاً مشابه نشان داد که هیچگاه نمی توان به یک عدد مشخص رسید اگرچه نتایج بسیار نزدیک به هم و پراکندگی آن در حدود ۵ درصد است. بنابراین برای مدل سازی دقیق تر نیاز به استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی است و معمولاً از نرم افزار MATLAB استفاده می شود که توضیح بیشتر در مورد آن از حوصله این مقاله خارج است.

برای مدل سازی و پیش بینی نتایج مدول برجهندگی، از مجموع ۱۶۲ نمونه، ۱۲۸ نمونه برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار می گیرد و ۳۴ نمونه باقی مانده نیز به عنوان تست استفاده می شود. در هریک از مدل های ساخته شده از لحاظ درصد خطا و به دست آمدن یک ضریب همبستگی مناسب، نتایج خوبی

و حداکثر در حدود ۱۰٪ افزایش و یا کاهش می یابد. به طور کلی، بیشترین نسبت مقاومت مارشال نمونه های حاوی آهک، آهک شکفته، سرباره کوره، پوزولان و پودر لاستیک مربوط به ۲٪ کف قیر است و با افزایش درصد کف قیر این مقدار کاهش می یابد، به طوری که کمترین نسبت مقاومت مارشال نمونه های حاوی آهک، آهک شکفته، سرباره کوره، پوزولان و پودر لاستیک مربوط به ۴٪ کف قیر است. بیشترین مقاومت مارشال نمونه های حاوی سیمان مربوط به ۴٪ کف قیر است و با کاهش درصد کف قیر، این مقدار افزایش می یابد. نهایتاً می توان گفت به طور کلی، مقدار مقاومت مارشال در نمونه های کلیه افزودنی ها بجز پودر لاستیک، با افزایش درصد افزودنی افزایش می یابد. به عنوان مثال شکل ۵، نشان دهنده مقاومت مارشال نمونه های حاوی ۰، ۱ و ۲ درصد پوزولان است که برای درصد کف قیر ۲، ۳ و ۴ درصد ترسیم شده است.



شکل ۵. تغییرات مقاومت مارشال نمونه های با دانه بندی ثابت، تراکم ۷۵ ضربه مارشال و سه درصد کف قیر (۰٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪) بر حسب تغییر درصد پوزولان (۰٪، ۱٪ و ۲٪)

#### ۴. مدل سازی با استفاده از SPSS و شبکه های

##### عصبی مصنوعی<sup>۱۳</sup> RBF

به طور کلی بر اساس علم آمار و برای یافتن رابطه ای بین متغیرهای مختلف و همچنین میزان وزن هر یک از متغیرها بر خروجی ها، از نرم افزارهای آماری از جمله SPSS استفاده می شود. در مواردی که آزمایش با متغیرهای زیاد و همچنین فراوانی بالا انجام گیرد و هیچ کدام از جواب ها یا نتایج قطعی نباشند، برای مدل سازی و درک بهتر، از شبکه های عصبی مصنوعی و یا شبکه های عصبی فازی استفاده می شود که از مهم ترین دستاوردهای آن کاهش هزینه پروژه های اجرایی با پیش بینی نتایج است [مردی و همکاران-۱۳۸۶ و منهج، محمد

## ۵. نتیجه‌گیری

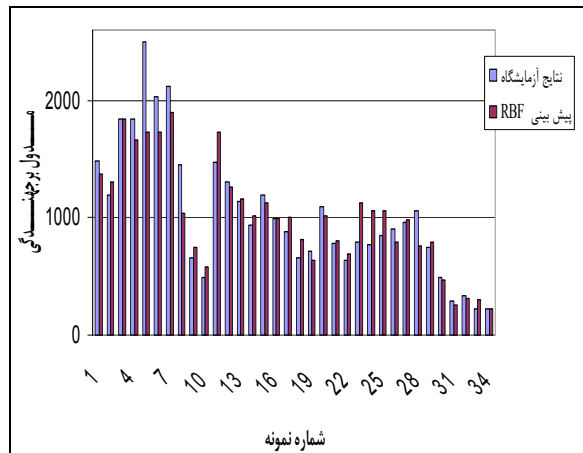
با توجه به مطالعات نویسندگان تا کنون در تحقیقات گذشته نتایج آزمایش مارشال و ITS خشک و اشباع، برای انواع مختلف افزودنی‌ها، در طرح مخلوطهای حاوی کف قیر بکار گرفته نشده است و این خود یکی از دلایل انتخاب موضوع این پژوهش است. بنابراین پس از تهیه ۱۶۲ نمونه مارشال از مخلوطهای آسفالتی با استفاده از بازیافت سرد کف قیر با بررسی ۶۰ نمودار مربوط به مدول برجهنگی،  $ITS_{Dry}$ ،  $ITS_{Sat}$ ، TSR و مقاومت مارشال در مقابل درصد کف قیر و درصد افزودنی نتایج زیر با توجه به خطای نسبی آزمایش حاصل شد.

روند حاکم بر نتایج مقاومت مارشال و شاخص سختی مارشال به گونه‌ای است که می‌توان گفت حداقل درصد قیر (۲ درصد)، حداکثر مقاومت را در برابر تغییر شکل‌های دائم نتیجه می‌دهد. شاخص سختی مارشال نسبت مقاومت مارشال به روانی نمونه‌ها است. این در حالی است که میزان TSR به طور کلی مقداری تقریباً ثابت (در حدود ۷۰) است که با توجه به جدول ۴-۴ نشریه ۳۳۹، نشان دهنده مقاومت خوب مخلوط‌های بازیافتی با کف قیر، در مقابل رطوبت است (حداقل میزان TSR، ۵۰ است). همچنین برای راه‌های با ترافیک سنگین  $ITS_{Dry}$  بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال پیشنهاد شده که مقادیر به دست آمده به طور متوسط در حدود ۳۰۰ کیلو پاسکال است. همچنین حداقل  $ITS_{Sat}$  نیز ۲۰۰ است که نتایج آزمایش به طور متوسط در این محدوده قرار دارد. البته آزمایش ITS می‌تواند نتایج گوناگون و نامطلوبی داشته باشد، ولی مطابق نشریه ۳۳۹، در صورتی که ضریب پراکندگی نتایج در این مورد بیش از ۱۵٪ باشد، تعداد آزمایشهای ITS، می‌بایست افزایش یابد.

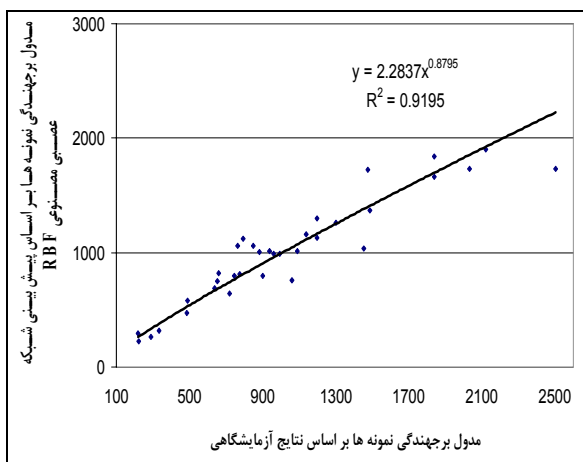
نتایج استقامت، شاخص سختی مارشال و ضریب برجهنگی نمونه‌ها، به طور کلی، روند یکسانی داشته به نحوی که حداکثر استقامت مارشال، شاخص سختی مارشال و ضریب برجهنگی مربوط به ۲ درصد کف قیر است.

بر اساس نتایج آزمایش‌ها، نمی‌توان استفاده از درصد مشخصی افزودنی را برای مخلوطهای بازیافتی پیشنهاد کرد، بلکه شایسته است برای هر پروژه، آزمایش‌های مخصوص آن با استفاده از در محل، افزودنی‌های متفاوت و درصد مشخصی از RAP مصالح افزودنی و قیر، همچنین انتظاری که از سطح روسازی می‌رود و نوع منطقه از لحاظ رطوبت و ترافیک، طرح اختلاط مناسب اتخاذ شود. در عین حال می‌توان گفت که استفاده از سیمان، آهک

حاصل شدند که تطابق بسیار خوب نتایج حاصل از مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی RBF با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۷ به صورت شماتیک مشهود است. طبیعی است که به علت مشابه بودن پارامترهای مقاومتی در بعضی افزودنی‌ها، نتیجه حاصل به‌خصوص برای پیش بینی مقاومت مارشال و  $ITS_{Dry}$ ، دقت مطلوب را نخواهد داشت. البته هر چند آموزش شبکه عصبی مصنوعی با داده‌هایی انجام می‌گیرد که خود دارای خطا هستند، اما تأثیر این خطاها در برابر هزینه‌های انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بسیار ناچیز و قابل اغماض است [Jam and Fanelli, 2000]. نمودار شکل ۸ برآزش مناسب نتایج مدول برجهنگی در آزمونهای آزمایشگاهی و مدول برجهنگی حاصل از مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی RBF را ارائه می‌کند ( $R^2 \cong 0.92$ ). نتایج و جداول کامل مربوط به آزمایشهای فوق، در مرجع شماره ۲۵ در اختیار محققین، قرار گرفته است.



شکل ۷. مقایسه شماتیک مدول برجهنگی نمونه‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۸. برآزش مدول برجهنگی آزمایشگاهی و مدول برجهنگی حاصل از مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی RBF

شبکه های عصبی مصنوعی، متناسب با تعداد نمونه‌ها، معمولاً نتایج بسیار نزدیک به واقعیت به دست آمدند که علاوه بر کاربرد مستقیم از این مدل در تعیین مدول برجهدگی مخلوطها، می توان از آن نیز برای کنترل آزمون های آزمایشگاهی استفاده کرد. با توجه به نتایج، در صورتی که حداکثر خطای نسبی به دست آمده برابر یا کمتر از ۱۰ درصد باشد، می توان پارامترهای مقاومتی یک روسازی را با دقت زیاد با استفاده از نمونه‌گیری حین اجرا پیش‌بینی کرد و در صورت ارضاء نشدن مقاومت‌های مورد نظر، اقدام به تقویت روسازی و یا اجرای مجدد آن با استفاده از روش های متداول کرد.

## ۶. پانویس‌ها

1. Universal Testing Machine
2. Wirtgen Group
3. Reclaimed asphalt pavement
4. Expansion ratio
5. Half-life
6. Foam index
7. Maximum of expansion ratio
8. Indirect tensial stress
9. Tensile stress ratio
10. Extraction
11. Mass of cement
12. Mass of water
13. Artificial neural networks

## ۷. مراجع

- Akeroyd, F. M., and Hicks, B. J. (1988) "Foamed bitumen road recycling", Highways, Vol. 56, No.1993, pp. 42-45.
- Brennen, M., Tia, M. Altschaeffl, A. and Wood, L. E. (1983) "Laboratory investigation of the use of foamed asphalt for recycled bituminous pavements", Washington, DC:TRB, National Research Council, pp. 80-87.
- Castedo F, Humberto, L. and Wood. L. E (1983) "Stabilization with foamed asphalt of aggregates commonly used in low-volume roads", Washington, DC: TRB, National Research Council, pp. 297-302.
- Chiu, Chui-Te, and Huang, M. Y. (2003) "A study on properties of foamed asphalt treated mixes", Proc., 82<sup>nd</sup>. Annual Transportation Research Board Meeting (CD-Rom), Transportation Research Council, Washington, D.C.
- EAPA (2008) "Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling", EAPA (European Asphalt Pavement Association), Position paper, May 2008.

و آهک شکفته نتایج مناسبی در اختیار می‌گذارد که درصد آن با آزمایش قطعی می‌شود. رفتار مربوط به مخلوطهای بازیافتی حاوی پودر لاستیک نیز از روند حاکم بر افزودنی‌های فوق تبعیت می‌کند، ولی نتایج مربوط به مدول برجهدگی و مقاومت مارشال آن، بسیار ضعیف تر است. سایر نتایج نیز به تفصیل در بخش ۳ آورده شده است.

برای تحلیل علت بسیاری از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته، با توجه به نوع افزودنی بکار رفته، نیاز به انجام آزمایش‌های شیمیایی و کانی‌شناسی است که در این تحقیق به آن پرداخته نشده است. در عین حال اگر بتوان بر اساس فرمول شیمیایی یک افزودنی رفتار آن را پیش‌بینی یا توجیه کرد، دیگر نیازی به انجام آزمایش نخواهد بود و به دلیل همین ناآگاهی ما نسبت به رفتار افزودنی‌ها، انجام آزمایش‌ها گریزناپذیر است.

با توجه به نشریه ۳۳۹ و نتایج حاصل از آزمایش‌ها، به نظر می‌رسد طرح مخلوطهای بازیافتی با کف قیر، تنها بر اساس آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، واقع بینانه نبوده و پیشنهاد می‌شود که در روش طرح این گونه مخلوطها، پارامترهای استقامت مارشال و ضریب برجهدگی نیز مد نظر قرار گیرد.

نظر به اینکه شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند بازتولید اطلاعات رفتاری مواد را بدون احتیاج به دانستن سابقه رفتاری آنها انجام دهد، این روش می‌تواند برای ساخت مدل‌های ساده رفتاری مواد استفاده شود و منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری از منابع و اطلاعات موجود در یک پروژه شود. در این تحقیق، نتایج آزمایش‌های مخلوطهای بازیافت سرد با کف قیر، دارای خطای انسانی، محیطی و ابزاری هستند و بنابراین همواره صد در صد قابل اعتماد نبوده و عموماً دقت در این داده‌ها نیز اندک است که منجر به در نظر گرفتن ضرایب اطمینان زیاد در طراحی‌های روسازی می‌شوند. بنابراین، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و استفاده از بانک‌های اطلاعاتی قوی در یک پروژه خاص مانند این تحقیق، پشتوانه‌ای برای افزایش دقت عملیات و کاهش عوامل خطا است و در مدلسازی، تصمیم‌گیری و تعریف پارامترهای روسازی نیز بسیار سودمند است.

مقدار مقاومت مارشال در نمونه‌های ساخته شده با کلیه افزودنی‌ها بجز پودر لاستیک، با افزایش درصد افزودنی افزایش می‌یابد. همچنین یک همبستگی بین مدول برجهدگی و پارامترهای مختلف تشکیل دهنده نمونه‌ها همچون درصد افزودنی، درصد قیر و سایر پارامترهای مقاومتی نمونه‌های مارشال وجود دارد. با مدل کردن این پارامترها به زبان ریاضی و به کمک

volume roads ", TRR, Fifth International Conference on Low-Volume Roads, Raleigh, North Carolina, Volume 2, No 1291, p 239-252.

- Tia, M., and Wood, L.E. (1983) "Use of asphalt emulsion and foamed asphalt in cold-recycled asphalt paving mixtures", Transportation Research Record 898. Washington,DC: TRB, National Research Council, pp. 315-321.

- Todd, Thomas, Karmas, Arlis (2003) "Performance-related tests and specifications for cold in-place recycling; Lab and field experience" TRB annual meeting , p.2.

- Wirtgen Group (2004) "Wirtgen cold recycling manual", 2<sup>nd</sup>. edition , Germany.

- رضائیان، محمدرضا (۱۳۸۸) "بررسی تأثیر درصد و نوع افزودنی ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوطهای بازیافت سرد با کف قیر و مدلسازی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان.

- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۵) "مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت" نشریه ۳۳۹، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، وزارت راه و ترابری.

- عامری، محمود (۱۳۸۷) "بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراشه های خرده آسفالت بر روی خصوصیات قیر و مخلوطهای آسفالتی گرم"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۷، ص ۱۵۷.

- غفاریپور جهرمی، سعید (۱۳۸۸) "تأثیر خصوصیات فیزیکی-هندسی فیلرهای نوین و سنتی بر مشخصات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، شماره اول، بهار ۱۳۸۸، ص ۴۱ - ۵۰.

- مردی، صفاریپور، باقری پور، قاسمی (۱۳۸۶) "شبکه عصبی فازی و بهینه یابی هزینه ها توسط الگوریتم ژنتیک در مدل سازی مقاومت مارشال در تثبیت خاک با امولسیون و سیمان"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۸۶، ص ۵۷.

- منهاج، محمد باقر (۱۳۷۷) "مبانی شبکه های عصبی مصنوعی (جلد اول)"، مرکز نشر پروفیسور حسابی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۷، ص ۳۵-۴۵.

- وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری (۱۳۸۵) "روشهای بازیافت سرد و گرم آسفالت و امکان سنجی اقتصادی آن در ایران"، تهران، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل و نقل.

- Jam, L., Fanelli, A.M (2000) "Recent advances in artificial neural networks: design and applications", CRC Press; 1 edition.

-Jenkins, K. J. (2004) "Characterisation of foamed bitumen", 7th Conference on asphalt pavement for Southern Africa.

- Lee, H. and Kim, Y. (2003) "Development of a mix design process for cold in-place rehabilitation using foamed asphalt", Final Report, Iowa Highway Research Board, Iowa Department of Transportation.

- Maccarrone, S., Holleran, G. and Ky, A. (1994) "Cold asphalt systems as an alternative to hot mix", 9th AAPA International Asphalt Conference.

- Marquis, B. [et.al] (2003) "Design, construction and early performance of foamed asphalt full depth reclaimed (FDR) pavement in Maine", Washington. DC: CD-ROM of TRB 82th Annual Meeting.

- Mohammad, L.N., Abu-Farsakh, M.Y., Wu,Z., and Abadie, C. (2003) "Louisiana experience with foamed recycled asphalt pavement base materials", Washington. DC: CD-ROM of TRB 82th Annual Meeting.

- Muthen, K.M. (1998) "Foamed asphalt mixes: mix design procedure", Research Report (CR-98/077), CSIR Transportek, South Africa.

Munthen, K.M. (1999) "Foamed Asphalt Mixes – Mix Design Procedure." Contract Report CR-98/077. - South Africa: CSIR Transportek.

-Nataatmadja, A. (2001) "Some characteristics of foamed bitumen mixes", Transportation Research Record, 1767, Washington, DC: TRB, National Research Council, pp. 120-125.

- Roberts, F.L., Engelbrecht, J.C. and Kennedy, T.W. (1984) "Evaluation of recycled mixtures using foamed asphalt", Transportation Research Record, 968, Washington, DC: TRB, National Research Council, pp. 78-85.

- Olson, Roger and Eller, Andrew (2008) "Road rehabilitation using foamed asphalt" CRC.press; Ch5; Office of Materials & Road Research, March 2008, Minnesota Department of Transportation.

- Ruckel, P. J.[ et.al] (1982) "Foamix asphalt advances", Asphalt pavement construction: New Materials and Techniques. ASTM STP 724, pp. 93-109.

- Ruckel, P.J., Scott, S.M. and Bowering, R.H. (1980) "Foamed - asphalt paving mixtures: Preparation of design mixes and treatment of test specimens", Transportation Research Record, 911.Washington, DC: TRB, National Research Council, pp. 88-95.

- Scholz, T.V. Hicks, R.G., Rogge, D.F. and Dale, A. (1991) "Use of cold in-place recycling on low-