

مدلی برای تخمین مدول برجهدگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان

امیرمدرس (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران

امیر کاوسی، دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: amirmodarres2003@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۰۳

چکیده

به دلیل خصوصیات مقاومتی پیشرونده در مخلوطهای بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان، مدول برجهدگی آنها تغییر کرده و اصولاً با گذشت زمان افزایش می‌یابد. بنابراین انتخاب مدول برجهدگی این مخلوطها در طراحی، پیچیده‌تر از مخلوطهای آسفالت گرم است. تخمین مدول برجهدگی در زمانهای مختلف با استفاده از مقدار آن در ابتدای دوره عمل‌آوری امکان کنترل باربری این لایه مطابق با طراحی را فراهم می‌کند. از طرفی به دلیل عدم دسترسی به تجهیزات اندازه‌گیری مدول برجهدگی در محل پروژه، ارائه مدلی که با استفاده از آن بتوان مقدار این پارامتر را با روشی ساده‌تر تخمین زد، برای دستیابی به اهداف فوق مفید است. در این تحقیق با تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایشهای گسترده مدلی ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان با اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) یک نمونه، مدول برجهدگی آن را در شرایط (دما و زمان) یکسان و متفاوتی از شرایط آزمایش کشش تخمین زد. به این منظور نمونه‌های مختلفی حاوی قیرامولسیون بهینه و مقادیر گوناگونی از سیمانهای نوع I و پوزولانی، ساخته شده و پس از عمل‌آوری در شرایط آزمایشگاه به مدت ۲۸، ۷ و ۱۲۰ روز، آزمایشهای ITS و مدول برجهدگی در سه دمای ۲۵، ۵ و ۱۰- درجه سانتیگراد بر روی آنها انجام شد. براساس نتایج به دست آمده، ابتدا مدلی ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان مقدار مدول برجهدگی را در شرایطی یکسان با آزمایش ITS محاسبه کرد. سپس با در نظرگیری تاثیر دو پارامتر دما و زمان بر مدول برجهدگی، مدل فوق برای تخمین مدول برجهدگی در شرایط متفاوتی از شرایط آزمایش ITS اصلاح شد. مقایسه مقادیر به دست آمده از مدلها با نتایج آزمایشها حاکی از همبستگی مناسبی بین این دو دسته از مقادیر بود. همچنین نتایج به دست آمده از مدل برای مطالعات مشابه نیز بررسی شده و با توجه به تحلیلهای انجام شده مدلها برای نمونه‌های بازیافت شده حاوی ۱ تا ۳ درصد سیمان و حداکثر زمان عمل‌آوری ۱۲۰ روز دارای اعتبارند.

واژه‌های کلیدی: بازیافت‌سرد، قیرامولسیون، سیمان، مقاومت کششی، مدول برجهدگی

۱. مقدمه

مطالعات انجام شده در زمینه رفتار مخلوطهای امولسیون تثبیت شده با سیمان حاکی از آن است که این دو افزودنی به صورت مستقل عمل کرده و رفتار مخلوط وابسته به مقدار هر کدام از آنها می تواند متغیر باشد [Montepara and Giuliani, 2001]. در صورتی که سیمان نقش تعیین کننده بیشتری داشته باشد، مخلوط دارای مقاومت مناسب در برابر تغییر شکل ماندگار بوده و انعطاف پذیری کمتری خواهد داشت. در مقابل اگر نقش قیر تعیین کننده باشد، انعطاف پذیری افزایش و مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار کاهش خواهد یافت.

بر اساس مطالعات انجام شده با میکروسکوپ الکترونی، ترکیبات تولید شده در فرآیند گیرش مخلوط بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان بسیار مشابه با محصولات واکنش هیدراتاسیون هستند [Brown and Needham, 2000]. مقایسه عکسهای مختلف نشان می دهد که مخلوط حاوی سیمان (نسبت به مخلوط فاقد سیمان) دارای بافتی ناهموارتر و ساختار بلوری شکل است. علاوه بر این، در سطح نمونه های حاوی سیمان خفراتی مشاهده می شود که نشان دهنده مناطق سیمانی شده است [Brown and Needham, 2000]. همچنین ترکیباتی مانند ایتترین گیت، هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم در مراحل عمل آوری نمونه ها شناسایی شده اند که مشابه با ترکیبات تولید شده در بتن بییمانی هستند [Brown and Needham 2000, Mo -]. [tepara and Giuliani, 2001].

عکسهای گرفته شده از مخلوط حاوی سیمان پوزولانی نشان دهنده وجود تفاوت هایی در روزهای اولیه است. این تفاوت با افزایش نسبت پوزولان در سیمان محسوس تر است [Velosa and Veiga, 2005]. بر اساس مطالعات انجام شده پوزولان تا زمان تولید آهک از واکنش هیدراتاسیون فعالیت چندانی ندارد. اگرچه واکنش پوزولان و آهک در اولین ساعات پس از شروع واکنش هیدراتاسیون آغاز می شود، ولی اثرات آن بسیار کندتر آشکار خواهد شد [Massazza, 1993]. بنابراین انتظار می رود سختی مخلوط حاوی سیمان پوزولانی در روزهای اولیه عمل آوری، کمتر باشد. مطالعات نشان داده اند که در بلندمدت روند افزایش سختی در این

یکی از خصوصیات مخلوطهای بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان، نیاز به عمل آوری برای دستیابی به خصوصیات فیزیکی مناسب است. اگرچه بررسی اندرکنش سیمان-قیرامولسیون حاکی از اثرات قابل توجه سیمان در تسریع فرآیند گیرش در مخلوط و افزایش سختی اولیه است، اما به دلیل ماهیت واکنش هیدراتاسیون و وابستگی پیشرفت این واکنش به زمان، خصوصیات فیزیکی مخلوط حاوی قیرامولسیون و سیمان همچنان وابسته به زمان است [Brown and Needham, 2000]. بر اساس نتایج ارائه شده توسط محققین مختلف سختی مخلوطهای حاوی قیرامولسیون و سیمان بعد از عمل آوری به مدت چهار ماه به دو تا سه برابر مقدار هفت روزه می رسد [Batista, 2004, Tayfur et al, 2007]. همچنین تغییرات سختی با افزایش زمان عمل آوری تا یک سال برای نمونه های فاقد سیمان همچنان قابل توجه بوده و برای نمونه های حاوی سیمان بین ۱۰ تا ۲۰ درصد گزارش شده است [Oruc et al, 2006].

۲. تاریخچه و مروری بر ادبیات فنی

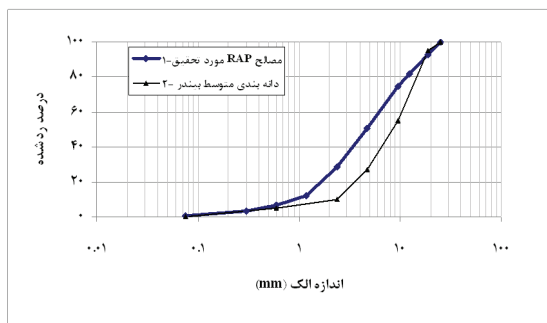
افزودن مواد تثبیت کننده پوزولانی (مانند سیمان)، باعث تشکیل ساختار متبلور پوزولانی در مصالح شده و با افزایش میزان چسبندگی، سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار مخلوط را افزایش می دهد [AASHTO AGC-ARTBA, 1998]. به دلیل طبیعت بلورین اتصال پوزولانی، مصالحی که حتی با مقادیر اندکی از مواد سیمانی تثبیت شده اند، رفتار شکننده ای داشته و مستعد جمع شدگی و ترک خوردگی هستند [Salomon and Newcomb, 2000]. در مقابل، مخلوطهایی که حاوی مواد چسبنده قیری هستند، انعطاف پذیری و چسبندگی مناسبی دارند، اما به دلیل رفتار ویسکوالاستیک و وابسته به دمای مخلوطهای آسفالتی، این مخلوطها در دمای بالا یا سرعت بارگذاری کم، دچار تغییر شکل ماندگار بیش از حد می شوند [Salomon and Newcomb, 2000].

۳- تهیه نمونه های آزمایشگاهی

۳-۱ مصالح سنگی

مصالح RAP، از یکی از دپوهای منطقه غرب تهران تهیه شد. پس از خردکردن کلوخه‌ها، مصالح در آزمایشگاه دانه‌بندی شده و دانه‌های درشت‌تر از ۲۵ میلیمتر، خارج شدند. در شکل ۱، نمودار دانه‌بندی این مصالح در مقایسه با دانه‌بندی متوسط لایه بیندر (مطابق نشریه ۲۳۴) آورده شده‌است.

با توجه به این شکل، دانه‌بندی مصالح مورد تحقیق ریزتر از دانه‌بندی بیندر است. همچنین درصد مصالح درشت‌دانه (شن) و فیلر در مصالح RAP در مقایسه با بیندر کمتر است. به دلیل خردشدگی مصالح در زمان تراش آسفالت، مقدار مصالح درشت‌دانه در مخلوط RAP کاهش یافته‌است. همچنین علت کاهش درصد فیلر در مصالح RAP تجمع مواد ریزدانه و اندودشدن با قیر است.



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح بازیافتی (RAP)

مقدار قیر و رطوبت موجود در مصالح RAP به ترتیب برابر با ۳/۳ و ۰/۳ درصد بود.

۳-۲ قیرامولسیون

قیرامولسیون مورد استفاده از نوع کاتیونی کندشکن (CSS-1h) بوده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده‌است.

۳-۳ سیمان

در این تحقیق از دو نوع سیمان، یکی سیمان نوع I و دیگری سیمان پوزولانی نوع I (PM) استفاده شده‌است. مشخصات

مخلوطها تسریع شده و سختی نهایی آنها در برخی از موارد، بالاتر از سیمان معمولی گزارش شده‌است. این مورد می‌تواند ناشی از تشکیل ساختار متراکم‌تر ناشی از روند تدریجی پیشرفت واکنش هیدراتاسیون باشد [Neville, 1993].

با توجه به اینکه لایه آسفالتی بازیافت‌شده به عنوان یک لایه اصلی در سیستم سازه‌ای روسازی به شمار می‌رود، اطمینان از توان باربری آن بسیار حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر روش‌های طرح روسازی مکانیستیک بر پایه تئوری ارتجاعی جایگزین روش‌های تجربی شده‌اند. در این روش‌ها خصوصیات الاستیک مصالح روسازی به عنوان مشخصات ورودی در نظر گرفته می‌شود [Tayfur et al 2007]. به این منظور مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی که از روش کشش غیرمستقیم (طبق استاندارد ASTM D 4123) اندازه‌گیری می‌شود، به عنوان مدول الاستیسیته این مخلوطها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با مخلوطهای آسفالت گرم برای مخلوطهای بازیافت شده دو مساله اساسی وجود دارد:

۱. در آسفالت گرم، گذشت زمان تاثیر چندانی بر مدول برجهندگی مخلوط نداشته و تنها پارامتر موثر دمای آزمایش است. اما در مخلوطهای بازیافتی، علاوه بر دمای آزمایش، زمان عمل‌آوری نیز بسیار مهم است. بنابراین پیش‌بینی و انتخاب مدول برجهندگی برای طراحی در لایه بازیافت‌شده پیچیده‌تر است.

۲. به منظور کنترل مستقیم توان باربری لایه اجرا شده در زمانهای مختلف، استخراج مغزه‌هایی از لایه مورد نظر و انجام آزمایش مدول برجهندگی ضروری است. به دلیل محدودیت دسترسی به تجهیزات آزمایش مدول برجهندگی، معمولاً انجام این آزمایش در محل اجرای پروژه‌ها امکان‌پذیر نیست. این مورد در ارتباط با تمامی لایه‌های چسبنده مورد استفاده در سیستم روسازی که خصوصیات اولیه آنها تابع زمان عمل‌آوری است صدق می‌کند.

بنابراین، ارائه مدلی که با استفاده از آن بتوان با انجام آزمایشهای ساده‌تر مقدار مدول برجهندگی را در زمانهای مختلف تخمین زد، در طراحی و کنترل لایه اجرا شده کاربرد خواهد داشت.

۶۰ درجه سانتیگراد درون گرمخانه عمل آوری شده و قبل از خروج نمونه‌ها از قالب، ۱۲ ساعت عمل آوری در دمای آزمایشگاه ادامه یافت. پس از خروج نمونه‌ها از درون قالب، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای آزمایشگاه عمل آوری شده و وزن مخصوص حقیقی و حداکثر آنها به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D2726 و ASTM D2041 تعیین و فضای خالی نمونه‌ها محاسبه شد. معیار انتخاب قیرامولسیون بهینه در این روش فضای خالی مخلوط است که بین ۹ تا ۱۴ درصد پیشنهاد شده است [AASHTO AGC- ARTBA 1998]. علاوه بر فضای خالی، استقامت مارشال و وزن مخصوص نمونه‌ها نیز در تعیین مقادیر بهینه قیرامولسیون و رطوبت مورد استفاده قرار گرفت. مقدار قیرامولسیون بهینه برابر با مقداری در نظر گرفته شد که علاوه بر برآورده کردن معیار فضای خالی، استقامت مارشال و وزن مخصوص مخلوط نیز نزدیک به حداکثر مقدار خود باشد. بر این اساس مقدار قیرامولسیون بهینه برابر با ۴ درصد تعیین شد.

در مرحله دوم مقدار رطوبت بهینه در قیرامولسیون بهینه تعیین شد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام شده، مشابه قبل است. در جدول ۲ مقدار رطوبت بهینه برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. مقدار رطوبت بهینه برابر با مقداری انتخاب شده که معادل با حداکثر استقامت مارشال، حداکثر وزن مخصوص و حداقل فضای خالی باشد. در مورد درصد فضای خالی به دلیل آنکه فضای خالی نمونه‌های حاوی سیمان بالاتر از ۱۴ درصد بود، حداقل فضای خالی به عنوان معیار در نظر گرفته شد.

جدول ۲. رطوبت بهینه برای ترکیبات مختلف مورد تحقیق

نوع سیمان	مقدار سیمان (%)	درصد رطوبت بهینه
-	۰	۴/۳
I	۱/۰	۴/۵
I	۲/۰	۵/۰
I	۲/۵	۵/۳
I	۳/۰	۵/۵
P	۱/۰	۴/۴
P	۲/۰	۴/۹
P	۲/۵	۵/۲
P	۳/۰	۵/۳

این سیمانها مطابق دستورالعمل مندرج در استاندارد ملی ایران بوده است. سیمان پوزولانی مورد استفاده شامل ۸۵ درصد کلینکر سیمان معمولی و ۱۵ درصد پوزولان طبیعی است. مقدار سیمان اضافه شده به نمونه‌ها ۱، ۲ و ۳ درصد بوده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیرامولسیون مورد استفاده

مشخصه	استاندارد	مقدار
کندروانی سی‌بالت فیورول در ۲۵ درجه (ثانیه)	ASTM D244	۴۰
قابلیت اندود مصالح سنگی	ASTM D244	خوب
بار ذره‌های دانه‌های قیر	ASTM D244	مثبت
مقدار قیر خالص (%)	-	۶۰
مقدار آب (%)	-	۳۵
مقدار امولسیون‌ساز (%)	-	۱
حلال (نفت) (%)	-	۳/۵
اسید کلریدریک (%)	-	۰/۵

۴. طرح اختلاط

در این تحقیق، از روش طرح اختلاط مارشال اصلاح شده برای تعیین درصد قیر بهینه و رطوبت بهینه استفاده شد. در این روش ابتدا مقدار قیرامولسیون بهینه در حالی که مقدار رطوبت موجود در مخلوط برابر با سه درصد بود، تعیین شد [ARTBA] AASHTO AGC- 1998. مقدار رطوبت برابر با مجموع آب موجود در قیرامولسیون (مطابق جدول ۱ برابر با ۳۵ درصد)، رطوبت موجود در مصالح RAP (برابر با ۰/۳ درصد) و آب اضافی است. مقدار قیرامولسیون افزوده شده در ترکیب‌های مختلف بین ۲/۵ تا ۴/۵ درصد بود. پس از افزودن قیرامولسیون و آب اضافی به مصالح RAP، عملیات اختلاط تادستیابی به یکنواختی کامل ادامه می‌یافت. حداکثر زمان اختلاط دو دقیقه توصیه شده است. در صورتی که بعد از این مدت پوشش مناسب بر روی مصالح حاصل نشود، نوع قیرامولسیون باید تغییر یابد. پوشش مصالح در این تحقیق حتی برای نمونه‌های فاقد سیمان بیشتر از ۹۵ درصد بود که نشان‌دهنده همخوانی قیرامولسیون با مصالح است. نمونه‌ها با استفاده از قالب و متراکم‌کننده مارشال با اعمال ۵۰ ضربه به هر طرف آنها متراکم شدند. پس از این مرحله نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای

۵. مطالعات آزمایشگاهی

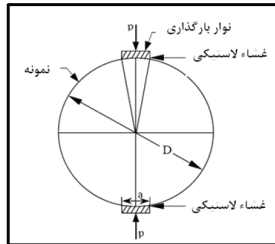
آزمایشهای اصلی انجام شده در این تحقیق شامل آزمایشهای مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مدول برجهندگی هستند. این آزمایشها در سه دمای ۲۵، ۵ و ۱۰- درجه سانتیگراد و به ترتیب با استفاده از استاندارد ASTM C 496 و ASTM D4123-82 انجام شدند.

برای انجام این آزمایشها از دستگاه UTM-14 که دارای محفظه کنترل دماست، استفاده شد. نمونهها با توجه به نتایج طرح اختلاط ساخته شده و پس از عمل آوری به مدت ۷، ۲۸ و ۱۲۰ روز در دمای آزمایشگاه (متوسط ۲۵ درجه سانتیگراد) به منظور رسیدن به دمای مورد نظر درون محفظه دستگاه قرار داده می شدند. دستگاه حاوی یک نمونه شاهد بود که با استفاده از آن دمای پوسته و مغزه نمونه در هر لحظه اندازه گیری و توسط نرم افزار مربوطه ثبت می شد.

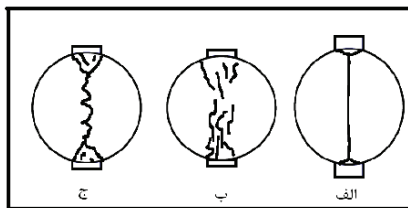
پس از دستیابی به دمای مورد نظر ابتدا مقاومت کششی نمونهها اندازه گیری شده، سپس با در نظرگیری نسبتی از مقاومت کششی به دست آمده (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد) مقدار بار وارده در آزمایش مدول برجهندگی محاسبه شد.

ج: به صورت ترکیبی از دو حالت قبل که در نزدیکی نوارهای بارگذاری تغییر شکل بیش از حد و در نزدیکی مرکز نمونه یک صفحه شکست مشاهده می شود.

در این تحقیق شکست نمونههای فاقد سیمان و حاوی مقادیر اندک سیمان بیشتر به صورت حالت ج و نمونههای حاوی مقادیر بالاتر سیمان بیشتر به صورت حالت الف بوده است.



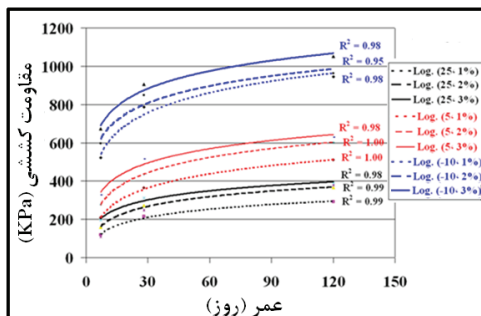
شکل ۲. نحوه بارگذاری در آزمایش کشش غیرمستقیم



شکل ۳: نحوه شکست نمونهها در آزمایش کشش غیرمستقیم

[Sunarjono, 2007]

در شکلهای ۴ و ۵، روند تغییرات مقاومت کششی نمونههای حاوی سیمان نوع ۱ و سیمان پوزولانی با افزایش زمان عمل آوری نشان داده شده است. با توجه به نتایج، افزایش مقاومت کششی نمونهها در روزهای اولیه قابل توجه بوده و نرخ افزایش مقاومت با افزایش زمان عمل آوری کاهش یافته است.



شکل ۴. تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت کششی نمونههای حاوی در سدهای مختلف سیمان نوع ۱

۵-۱ مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

در این آزمایش مطابق شکل ۲ نمونه استوانه ای تحت بارگذاری قطری قرار گرفته و در اثر تنش کششی یکنواخت ایجاد شده راستای عمود بر بارگذاری ترک می خورد.

مقاومت کششی نمونه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$ITS = \frac{2000P_{max}}{\pi td} \quad (1)$$

در این رابطه:

P_{max} : بار نهایی اعمال شده (نیوتن)، t : ارتفاع نمونه (میلیمتر)،

d : قطر نمونه (میلیمتر)، ITS: مقاومت کششی (کیلوپاسکال)

شکست نمونه مطابق شکل ۳ به صورت یکی از سه حالت زیر می باشد [Sunarjono 2007]:

الف: شکست آشکار نمونه در راستای قطر که گاهی با قطعات مثلی در نزدیکی نوار بارگذاری همراه است.

ب: وقوع تغییر شکل بیش از حد در نمونه که مانع از تشکیل یک صفحه شکست آشکار می شود.

بوده و به صورت مکرر اعمال شود، تغییرشکل ایجاد شده در هر سیکل بارگذاری تقریباً به طور کامل برگشت پذیر بوده و در این شرایط می توان ماده را الاستیک فرض کرد [Huang, 1993].

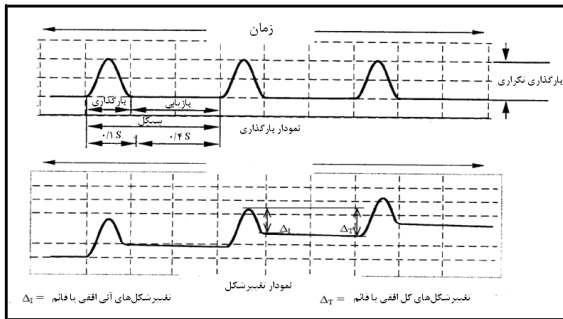
در این آزمایش نمونه استوانه‌ای معمولاً تحت ۵۰ تا ۲۰۰ بارگذاری قطری (مطابق آزمایش کشش غیرمستقیم) قرار گرفته و نمودار تغییرشکل نمونه در هر سیکل رسم می شود. مطابق شکل ۷، در هر سیکل بخشی از تغییرشکل برگشت پذیر بوده و بخشی از آن ماندگار است. تغییرشکل برگشت پذیر خود شامل دو بخش آبی و وابسته به زمان (ویسکوز) است [ASTM D4123-82, 2003].

برای یک بار دینامیکی با حداکثر اندازه P که تغییرشکل‌های افقی ناشی از آن اندازه گیری شده‌اند، مدول برجهندگی کل با استفاده از رابطه (۲) به دست می آید [ASTM D4123-82]:

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.27)}{t \delta_h} \quad (2)$$

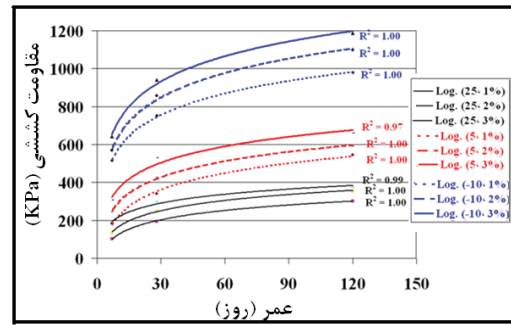
در این رابطه:

M_r : مدول برجهندگی (MPa)، P: حداکثر بار دینامیکی (N)، μ : ضریب پواسن (۰/۳۵)، t: طول نمونه (mm)، δ_h : تغییرشکل افقی برگشت پذیر کل (mm)



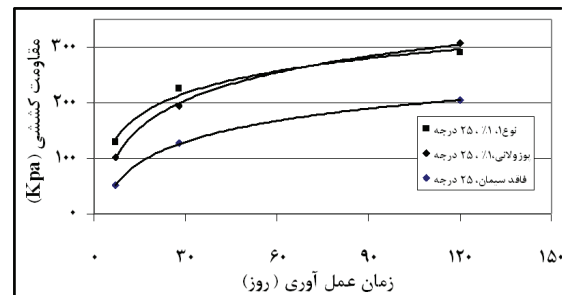
شکل ۷. نمودارهای بارگذاری و تغییرشکل در آزمایش مدول برجهندگی [ASTM D4123-82]

در این تحقیق تعداد سیکل‌های بارگذاری برابر با ۱۰۰ سیکل در نظر گرفته شده و آزمایش برای هر نمونه در دو سطح تنش (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد مقاومت کششی در شرایط دمایی و عمر مشابه) انجام شد. همچنین برای هر نمونه مشابه، آزمایش دو بار تکرار شده و از میانگین نتایج در محاسبات استفاده شده است. نحوه قرارگیری نمونه در قاب بارگذاری در شکل ۸ ارائه شده است. با



شکل ۵. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت کششی نمونه‌های حاوی درصد های مختلف سیمان پوزولانی

به منظور مقایسه بهتر نتایج حاصل از دو نوع سیمان، نمونه‌ای از نتایج به دست در شکل ۶ جداگانه ارائه شده است. اکثر نتایج بدست آمده حاکی از مقاومت اولیه بالاتر نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ (بین ۱۰ تا ۲۰ درصد) هستند. در برخی از موارد مانند شکل ۶، مقاومت ۱۲۰ روزه نمونه‌های حاوی سیمان پوزولانی اندکی بالاتر از سیمان نوع ۱ به دست آمد که با توجه به توضیحات ارائه شده در بند ۴ مطابق انتظار است.



شکل ۶. مقایسه تاثیر زمان عمل‌آوری در ۲۵ درجه ساتیگراد

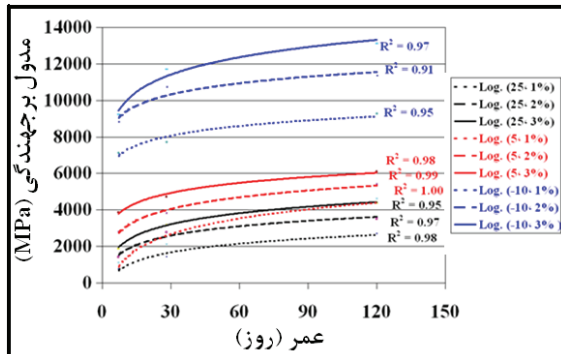
۲-۵ مدول برجهندگی

مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی که طبق استاندارد AS MD4123 به روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود، یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین نمودار تنش-کرنش برای ارزیابی خصوصیات الاستیک مصالح است [Tayfur et al, 2007]. اکثر مصالح مورد استفاده در روسازی راه‌ها دارای خاصیت الاستیک نیستند و در اثر اعمال بار دچار تغییرشکل‌های ماندگار می‌شوند. اما در صورتی که بار اعمالی در مقایسه با مقاومت ماده کوچک

مدلی برای تخمین مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان

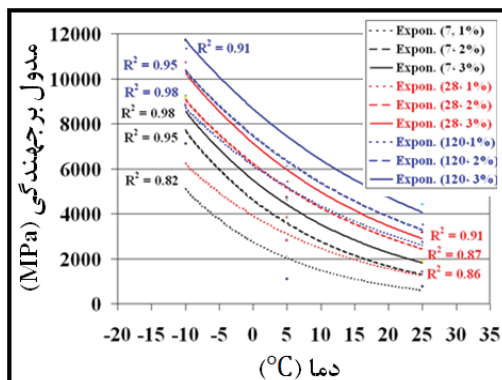
اکثر نمودارها بیشتر از ۰/۹۵ و در تمامی موارد بیشتر از ۰/۹ بود. این نتایج نشان می‌دهند که تاثیرات دما بر مقدار مدول برجهنگی در مقایسه با زمان عمل‌آوری بیشتر است.

همچنین مطابق با نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی، مدول برجهنگی نمونه‌های حاوی سیمان پوزولانی در ابتدای دوره عمل‌آوری کمتر بوده و با افزایش زمان عمل‌آوری اختلاف نتایج کاهش یافته است.



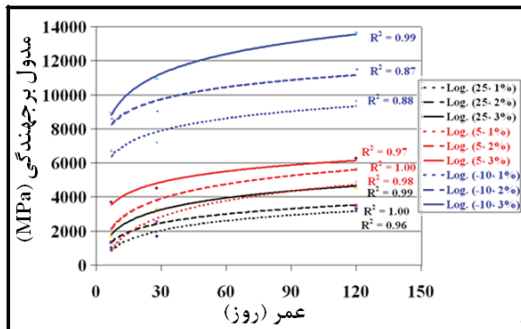
شکل ۱۰. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول برجهنگی نمونه‌های حاوی در

صد های مختلف سیمان نوع ۱



شکل ۱۱. تاثیر دما بر مدول برجهنگی نمونه‌های حاوی در صد های

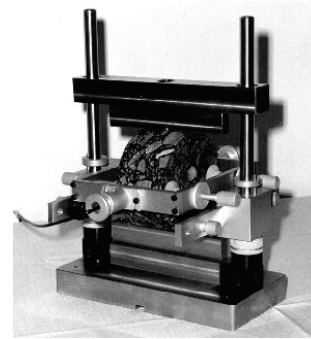
مختلف سیمان نوع ۱



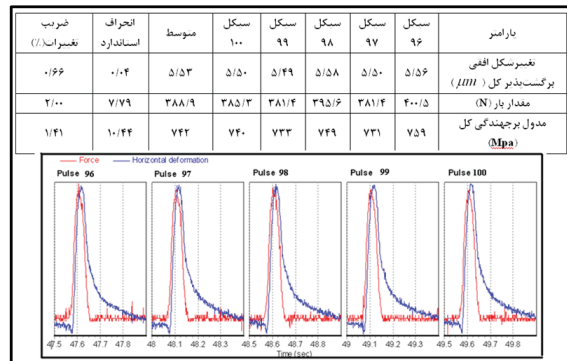
شکل ۱۲: تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول برجهنگی نمونه‌های حاوی در

صد های مختلف سیمان پوزولانی

توجه به این شکل تغییر شکل افقی توسط دو LVDT ثبت می‌شود.



شکل ۸. نحوه قرارگیری نمونه‌ها در قاب بارگذاری آزمایش مدول برجهنگی در شکل ۹، نمونه‌ای از خروجی‌های نرم‌افزار آزمایش مدول برجهنگی مشاهده می‌شود. برای هر نمونه نمودار بارگذاری و تغییر شکل در سیکل‌های ۹۵ تا ۱۰۰، مقدار بار اعمالی، تغییر شکل برگشت‌پذیر کل، مدول برجهنگی کل، متوسط، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات هر کدام از پارامترها توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

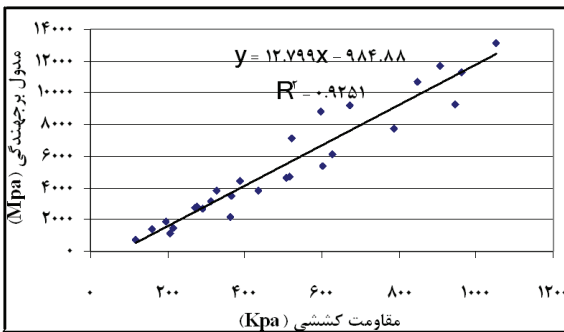


شکل ۹. نمونه‌ای از نتایج آزمایش مدول برجهنگی (نمونه ۲۸ روزه حاوی

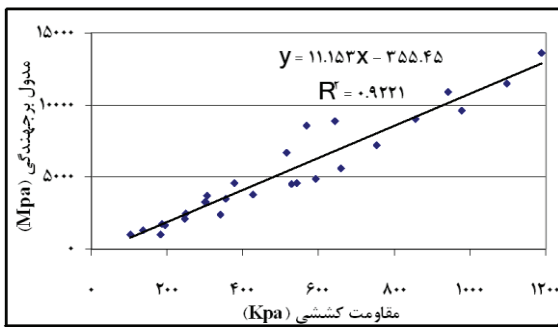
۱٪ سیمان نوع ۱)

در شکلهای ۱۰ تا ۱۳ تاثیر زمان عمل‌آوری و دما بر مدول برجهنگی نمونه‌های حاوی هر کدام از سیمان‌های مورد استفاده ارائه شده است. در شکلهای ۱۰ و ۱۲، اعداد اول نوشته شده در راهنمای شکل دما و اعداد دوم مقدار سیمان هستند. همچنین در شکلهای ۱۱ و ۱۳ این اعداد به ترتیب زمان عمل‌آوری و مقدار سیمان هستند. با توجه به این نتایج روند تغییرات مدول برجهنگی با افزایش زمان و دما برای هر دو نوع سیمان نسبتاً مشابه هستند. جهت مشاهده بهتر روند تغییرات اثرات زمان عمل‌آوری و دما به ترتیب با نمودارهای لگاریتمی و نمایی برازش شد. ضرایب همبستگی در

روز عمل‌آوری در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شود، با استفاده از رابطه (۴) می‌توان مقدار مدول برجهندگی را در همین شرایط تخمین زد. جهت امکان تخمین مدول برجهندگی در شرایط مختلف (مثلاً مدول برجهندگی نمونه ۱۲۰ روزه با استفاده از مدول برجهندگی نمونه ۲۸ روزه) لازم است ارتباط مدول برجهندگی با دما و زمان عمل‌آوری تعیین شده و روابط (۳) و (۴) با استفاده از این رابطه اصلاح شوند.



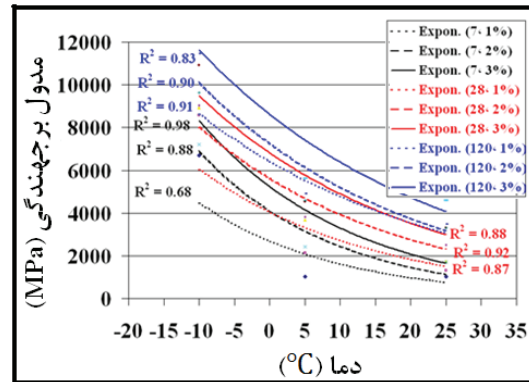
شکل ۱۴. رابطه مقاومت کششی و مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ در شرایط مشابه



شکل ۱۵. رابطه مقاومت کششی و مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی سیمان پوزولانی در شرایط یکسان

۲-۶ رابطه مدول برجهندگی با زمان

نتایج به دست آمده از آزمایش مدول برجهندگی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۲ حاکی از آن است که تغییرات مدول برجهندگی با زمان را می‌توان با یک تابع لگاریتمی تعیین کرد. به عنوان نمونه ارتباط مدول برجهندگی با زمان عمل‌آوری برای نمونه حاوی دو درصد سیمان نوع ۱ در ۵



شکل ۱۳. تاثیر دما بر مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی در صد های مختلف سیمان پوزولانی

۶. مدل تخمین مدول برجهندگی

۱-۶ رابطه مقاومت کششی با مدول برجهندگی در شرایط یکسان به منظور تعیین مدل، ابتدا رابطه‌ای بین نتایج دو آزمایش در شرایط یکسان (دما و زمان عمل‌آوری) با استفاده از نرم‌افزار SPSS برازش شده سپس این رابطه برای دو پارامتر زمان و دما اصلاح شد.

مقایسه رابطه‌های مختلف توسط نرم‌افزار نشان داد که برازش خطی بین دو متغیر مقاومت کششی و مدول برجهندگی دارای بالاترین همبستگی است. این برازش در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب برای نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ و سیمان پوزولانی نشان داده شده‌است.

مدلهای خطی به دست آمده در رابطه‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شوند.

$$M_r = 12.8ITS - 984.9, R^2 = 0.93 \quad (۳) \text{ سیمان نوع ۱}$$

$$M_r = 11.2ITS - 355.5, R^2 = 0.92 \quad (۴) \text{ سیمان پوزولانی}$$

در روابط فوق :

M_r : مدول برجهندگی (MPa)، ITS: مقاومت کششی غیرمستقیم (KPa)

روابط (۳) و (۴) نشان‌دهنده رابطه مقاومت کششی و مدول برجهندگی در شرایط یکسان هستند. به عنوان مثال در صورتی که مقاومت کششی یک نمونه حاوی سیمان پوزولانی پس از ۲۸

درجه سانتیگراد به صورت رابطه (۵) است:

$$M_r = 916.74 \ln D + 943.81, R^2 = 0.99 \quad (5)$$

که در آن:

D: زمان عمل آوری (روز)

محاسبه انجام شده نشان می‌دهد که شیب نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ تقریباً یکسان بوده و اختلاف منحنی‌های برازش شده ناشی از مقادیر ثابت توابع لگاریتمی است. بنابراین با صرف نظر کردن از مقادیر ثابت، متوسط ضرایب محاسبه شده و تابع تغییرات مدول برجهندگی با زمان تعیین شد.

این توابع برای سیمان‌های نوع ۱ و پوزولانی به ترتیب در روابط (۶) و (۷) ارائه شده‌اند:

$$M_r = 918 \ln(D) + A_1 \quad (6) \text{ سیمان نوع ۱}$$

$$M_r = 1088 \ln(D) + A_2 \quad (7) \text{ سیمان پوزولانی}$$

که در آنها:

A_1 و A_2 : مقادیر ثابت اند.

۳-۶ رابطه مدول برجهندگی با دما

براساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۳، تغییرات مدول برجهندگی با دما را می‌توان با یک تابع نمایی تخمین زد. به عنوان نمونه ارتباط مدول برجهندگی با دما برای نمونه حاوی سه درصد سیمان پوزولانی پس از ۷ روز عمل آوری به صورت رابطه (۸) است:

$$M_r = 5237.3e^{-0.0464T}, R^2 = 0.98 \quad (8)$$

که در آن:

T: دما (درجه سانتیگراد)

مشابه با توضیح ارائه شده در بند ۶-۲ از متوسط ضرایب تاثیرگذار در شیب منحنی‌ها در تعیین تابع تغییرات مدول برجهندگی با دما استفاده شد. این توابع برای سیمان‌های نوع ۱ و پوزولانی به ترتیب در روابط (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند:

$$M_r = 6535e^{-0.03817T} \quad (9) \text{ سیمان نوع ۱}$$

$$M_r = 6011e^{-0.0375T} \quad (10) \text{ سیمان پوزولانی}$$

۴-۶ مدل اصلاح شده

با توجه به روابط به دست آمده بین مدول برجهندگی - زمان و مدول برجهندگی - دما، جهت تخمین مدول برجهندگی در دمای T_2 براساس مقدار تخمین زده شده در دمای T_1 ، همچنین تخمین مدول برجهندگی در زمان D_2 براساس نتیجه تخمین زده شده در زمان D_1 ، با قرار دادن این مقادیر در روابط (۶) و (۹) و اضافه نمودن رابطه (۳) برای سیمان نوع ۱ و به طور مشابه در روابط (۷) و (۱۰) و افزودن رابطه (۴) برای سیمان پوزولانی مدل‌های اصلاح شده برای هر کدام از سیمانها به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند.

$$M_r = 12.8ITS + \quad (11) \text{ سیمان نوع ۱}$$

$$6535(e^{-0.03817T_2} - e^{-0.03817T_1}) + 918 \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) - 984.9$$

$$M_r = 11.2ITS + \quad (12) \text{ سیمان پوزولانی}$$

$$6011(e^{-0.0375T_2} - e^{-0.0375T_1}) + 1088 \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) - 355.5$$

در روابط فوق:

T_1 و T_2 : به ترتیب دماهای ثانویه و اولیه (درجه سانتیگراد)

D_1 و D_2 : مدت‌های عمل آوری ثانویه و اولیه (روز)

به عنوان مثال در صورتی که مقاومت کششی یک نمونه حاوی سیمان نوع ۱ بعد از ۷ روز عمل آوری ($D_1=7$) در دمای ۵ درجه سانتیگراد ($T_1=5$) برابر با ۲۲۰ کیلوپاسکال باشد، مدول برجهندگی آن در همین دما و همین مدت ($T_2=5$ و $D_2=7$) با استفاده از رابطه (۱۱) برابر با ۱۸۳۱ مگاپاسکال است. همچنین مدول برجهندگی پس از ۱۲۰ روز در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد ($T_2=-10$ و $D_2=120$) برابر با ۸۵۹۹ مگاپاسکال به دست می‌آید.

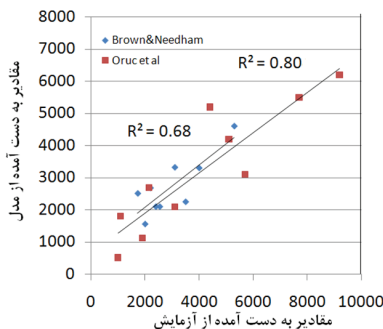
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، برای نمونه‌های حاوی سیمان‌های نوع ۱ و پوزولانی نتایج به دست آمده از روابط (۱۱) و (۱۲) با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که همبستگی مناسبی بین نتایج محاسبه شده با مدل و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها وجود داشته و ضریب همبستگی به دست آمده از هر دو مدل بالاتر از ۰/۹ است.

برای مطالعه Oruc و همکاران وجود دارد. بنابراین مدل ارائه شده می‌تواند با درصد اطمینان مناسبی جهت برآورد مدول برجهندگی مخلوط حاوی سیمان و قیرامولسیون مورد استفاده قرار گیرد.

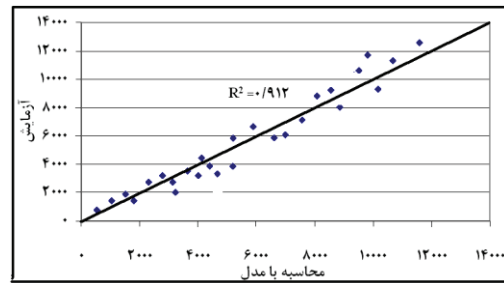
در مطالعات انجام شده توسط Oruc و همکاران مقدار سیمان تا ۶ درصد افزایش و عمل‌آوری نمونه‌ها تا یک سال ادامه یافت. همچنین در مطالعه Brown و Needham نیز عمل‌آوری نمونه‌ها تا یک سال ادامه یافت. براساس نتایج حاصل شده از اکثر تحقیقات، اگرچه مقدار مدول برجهندگی با افزایش مقدار سیمان به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، نرخ تغییرات مدول برجهندگی مخلوط بازیافت شده با افزایش زمان عمل‌آوری کاهش یافته و مدول برجهندگی نمونه‌ها معمولاً پس از گذشت ۳ تا ۴ ماه از زمان عمل‌آوری تغییرات چندانی محسوس ندارد. با وجود این، به دلیل آنکه محدوده مورد تحقیق در مطالعه حاضر شامل مقادیر ۱ تا ۳ درصد سیمان و عمل‌آوری حداکثر به مدت ۱۲۰ روز بود، با توجه به شکل ۱۹ همبستگی نتایج به دست آمده از مدل با نتایج تحقیقات در محدوده خارج از مقادیر سیمان و زمان عمل‌آوری مورد استفاده در این تحقیق مناسب نبوده و در هر دو تحقیق مورد بررسی پارامتر R^2 حدود ۰/۵ به دست آمد که حاکی از عدم اطمینان نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده است. بنابراین براساس تحلیلها و بررسیهای فوق مدل‌های ارائه شده در محدوده مشخصات زیر قابل استفاده اند.

۱- مقدار سیمان بین ۱ تا ۳ درصد

۲- عمل‌آوری در شرایط آزمایشگاه در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه حداکثر تا ۱۲۰ روز

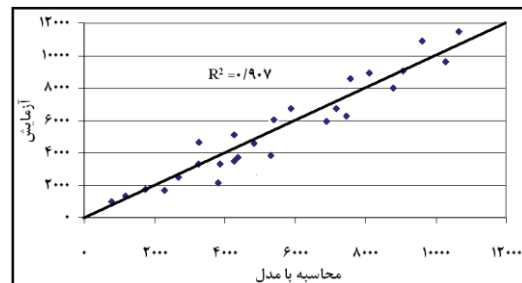


شکل ۱۸. مقایسه نتایج مدل با نتایج محققین دیگر در محدوده ۱ تا ۳ درصد سیمان و حداکثر عمر ۱۲۰ روز



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۱) و مقادیر

به دست آمده از آزمایش



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۲) و مقادیر

به دست آمده از آزمایش

۷. اعتبارسنجی و تعیین محدوده کاربرد مدل‌ها

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده در این تحقیق، دقت مقادیر به دست آمده از این مدل برای نتایج ارائه شده توسط سایر محققین مورد بررسی و کنترل قرار گرفت. در بین مطالعات انجام شده، مطالعه Oruc و همکاران [Oruc et al, 2006] و مطالعه [Brown and Needham, 2000] به دلیل در نظرگیری تاثیرات دمای آزمایش و زمان عمل‌آوری مورد استفاده و مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به آنکه مقدار سیمان مورد استفاده در این تحقیق بین ۱ تا ۳ درصد و حداکثر مدت زمان عمل‌آوری ۱۲۰ روز بود، نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده در دو محدوده مختلف شامل محدوده درصد سیمان و زمان عمل‌آوری فوق و محدوده خارج از این مقادیر مقایسه شد. در شکل ۱۸ نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از این مقایسه برای محدوده درصد سیمان ۱ تا ۳ درصد و زمان عمل‌آوری تا ۱۲۰ روز ارائه شده است. مطابق شکل همبستگی مناسبی بین نتایج به دست آمده از مدل و نتایج آزمایشهای بخصوص

مدلی برای تخمین مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان

نمایی و لگاریتمی برازش شدند.

۴- مدل نهایی شامل رابطه خطی اولیه و دو جمله اصلاحی برای دما و زمان عمل‌آوری است. کاربرد این مدل شامل امکان تخمین مدول برجهندگی با استفاده از ITS نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه برای تعیین ضریب لایه بازیافت شده در طرح روکش است. همچنین پس از اجرای لایه بازیافتی می‌توان در زمان‌های مختلف با انجام آزمایش ITS و تخمین مدول برجهندگی میزان باربری لایه و صحت اجرا را کنترل کرد.

۹. مراجع

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۹۰) "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، نشریه ۲۳۴، ویرایش اول، تهران، سازمان مدیریت و برنامه ریزی.

AASHTO AGC-ARTBA Joint Committee, Task Force No.38. (1998), "Report of cold recycling of asphalt pavements", Interim Report, AASHTO, Washington, D.C., USA.

ASTM D4123-82 (2003) "Indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures", ASTM Book of Standards, Vol. 04.03, USA.

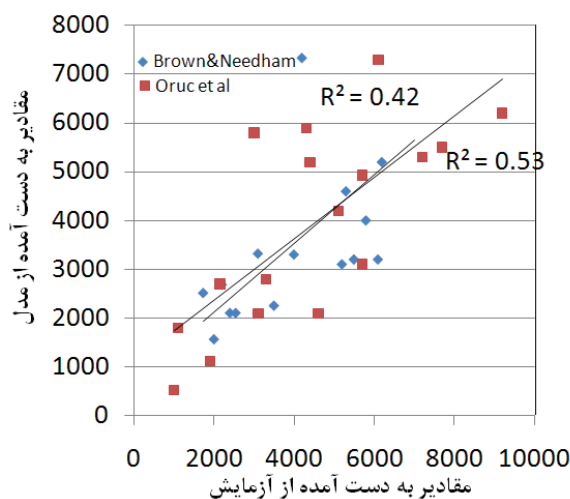
Batista, F.A. (2004) "Asphalt cold mixtures for pavement rehabilitation overlays and recycling", Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal.

Brown, F.S. and Needham, D. (2000) "A study of cement modified bitumen emulsion mixtures", Proc of AAPT, 69.

Huang, Y. H. (1993) "Pavement analysis and design", New Jersey: Prentice Hall.

Massazza, F. (1993) "Pozzolanic cements", Cement and Concrete Composites, Vol. 15, pp.185-214.

Montepara, A. and Giuliani, F. (2001) "The role of cement in the recycling of asphalt pavement cold-stabilized with bituminous emulsions", 2nd. International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Ala-



شکل ۱۹. مقایسه نتایج مدل با نتایج محققین دیگر برای مقادیر مختلف سیمان تا ۶ درصد و حداکثر عمر یک سال

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشهای ITS و مدول برجهندگی در شرایط دما و زمانهای عمل‌آوری مختلف، مدلی برای تخمین مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیرامولسیون و سیمان ارائه شده است. مهم‌ترین نتایج حاصله به شرح زیرند.

۱- با افزایش زمان عمل‌آوری و کاهش دما، ITS و مدول برجهندگی نمونه‌ها افزایش یافته و در هر دو آزمایش تاثیر دما بیشتر از زمان است.

۲- ITS و مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ در ابتدای دوره عمل‌آوری حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان پوزولانی بود. با افزایش زمان عمل‌آوری این اختلاف کاهش یافته و در برخی از موارد نمونه‌های حاوی سیمان پوزولانی با گذشت ۱۲۰ روز، ITS و مدول برجهندگی بالاتری داشتند.

۳- مقایسه روابط مختلف بین مدول برجهندگی و ITS در شرایط دما و زمان عمل‌آوری یکسان نشان داد که رابطه خطی دارای بالاترین ضریب همبستگی است. همچنین روابط مدول برجهندگی- دما و مدول برجهندگی- زمان به ترتیب به صورت

Salomon, A. and Newcomb, E. (2000) "Cold in-place recycling literature review and preliminary mixture design pProcedure", Minnesota Department of Transportation, Office of Research Services, Minnesota, USA.

Sunarjono, S. (2007) "Tensile strength and stiffness modulus of foamed asphalt applied a grinding representative of Indonesian Road Recycled Pavement Materials", *Dinamika TEKNIK SIPIL*, Volume 7, No.1, pp. 1 – 10.

Tayfur, S., Ozen, H., and Aksoy, A. (2007) "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers". *Construction and Building Materials*, :pp. 321–328.

Velosa, A.L. and Veiga, M.R. (2005) "Pozzolanic materials: Evaluation of mechanical properties", *International Building Lime Symposium*, Orlando, Florida, March 9-11.

bama, USA, July 29 – August 1.

Neville, A. M. (1993) "Properties of concrete", Longman Scientific and Technical, Singapore.

Oruc, S., Celik, F. and Akpınar, M.V. (2006) "Effect of cement on emulsified asphalt mixtures", *Journal of Material Engineering and Performance*, Vol. 16(5), October, pp.578- 583.

Oulahna, D., Zizi, Z. and Benhassaine, A. (1996) "Emulsion de bitume –ciment: Reactive hydraulique et rupture de emulsion", *Proceeding of Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Strasbourg, France.

Rita, I., Zaman, M., and Miller, A. (2001) "Characteristics of cold processed asphalt millings and cement –emulsion composite", *Transportation Research Board 80th Annual Meeting* Washington, DC, USA, January 7-11.