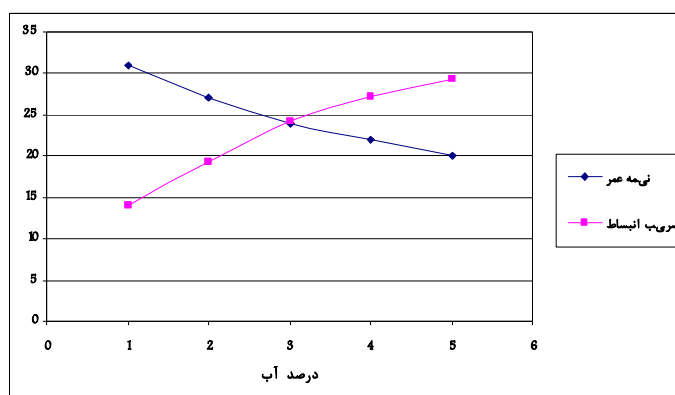




به اینکه ضریب انبساط و نیمه عمر با یکدیگر رابطه عکس دارند و با افزایش یکی دیگری کاهش می یابد، لذا جهت بهینه سازی این پارامترها از نمودار ضریب انبساط - نیمه عمر، استفاده شد. [6]  
 نتایج اندازه گیری ضریب انبساط و نیمه عمر در 5 درصد مختلف آب برای قیر با دمای 170°C در جدول 1 نشان داده شده است که با این نتایج می-توان نمودار بهینه سازی درصد آب، ضریب انبساط - نیمه عمر را ترسیم کرد.

جدول ۱: ضریب انبساط و نیمه عمر کف قیر در دمای 170 درجه

دمای قیر = 170 °C		
درصد آب	ضریب انبساط	نیمه عمر (ثانیه)
1	14	31
2	19	27
3	24	24
4	27	22
5	29	20



شکل 1: تغییرات ضریب انبساط و نیمه عمر در درصد های مختلف آب

همانطور که در شکل 1 مشاهده می شود، برای قیر با دمای 170 درجه سانتی گراد، کف قیر تولید شده با 3% آب، بهینه ضریب انبساط و نیمه عمر را معادل 13 و 16 ثانیه بدست می دهد.

جدول 2: مشخصات کف قیر مورد استفاده در تحقیق

3	درصد آب (%)
170	دمای قیر (درجه سانتی گراد)
23	ضریب انبساط
24	نیمه عمر (ثانیه)
8	فشار آب (اتمسف)
7	فشار هوا (اتمسف)

برای تولید کف قیر در مقیاس آزمایشگاهی جهت ساخت مخلوطهای آسفالتی کف قیر از دستگاه WLB10 شرکت آلمانی ویرتگن استفاده شد. کف قیر حاصل از این دستگاه مشابه کف قیر تولید شده در سیستم تولید کف قیر نصب شده در دستگاهها و ماشینآلات بازیافت سرد مانند WR2500 می-باشد.

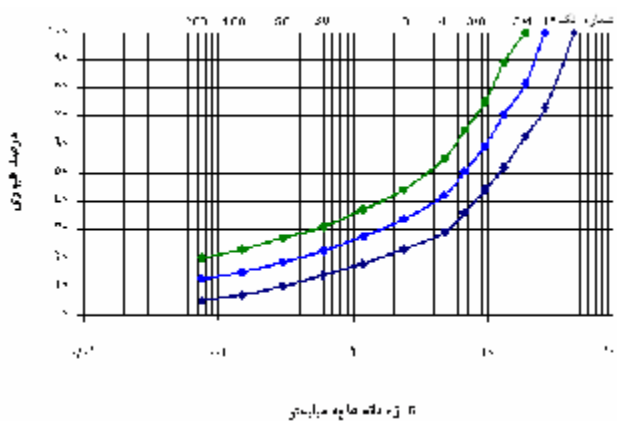
تصویر دستگاه تولید کف قیر آزمایشگاهی WLB10 در شکل 2 نشان داده شده است. [6]



شکل ۲: تصویر دستگاه تولید آزمایشگاهی کف قیر

نوع و دانه‌بندی مصالح

برای ساخت و تراکم نمونه‌های آزمایشگاهی از قالبهای مارشال 4 و یا 6 اینچی استفاده می‌شود. بنا به توصیه مراجع موجود از جمله راهنمای دستگاه تولید کف قیر آزمایشگاهی ویرتگن (WLB10) [7]، مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت (نشریه 339 سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور) [8] و آئین‌نامه طرح اختلاط مخلوطهای کف قیر آفریقای جنوبی [3] و با توجه به محدودیت تأمین مصالح سنگدانه‌ای برای ساخت تعداد مورد نیاز نمونه‌های آزمایشگاهی، در این پروژه برای ساخت نمونه‌ها از قالبهای مارشال 4 اینچی استفاده شد. جهت انتخاب محدوده دانه‌بندی مناسب برای ساخت نمونه‌ها با توجه به محدودیت حداکثر اندازه اسمی 25 میلی‌متر برای سنگدانه‌ها جهت تراکم در قالب مارشال 4 اینچی، از محدوده دانه‌بندی توصیه شده در آئین‌نامه طرح اختلاط مخلوطهای کف قیر آفریقای جنوبی [3] که محدودیت ابعاد سنگدانه‌ها برای ساخت نمونه آزمایشگاهی در آن لحاظ شده بود استفاده شد. جهت بررسی تأثیر دانه‌بندی بر استحکام مارشال و مدول برجهندگی مخلوطهای کف قیر، دو نوع دانه‌بندی با دانه‌بندی‌های ریز و متوسط که به ترتیب منطبق بر مرز بالائی و مرز میانی محدوده پیشنهادی آئین‌نامه آفریقای جنوبی بودند مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل ۳: محدوده دانه بندی های مورد استفاده در این تحقیق

درصد رطوبت بهینه مصالح

رطوبت بهینه مصالح آسفالتی با دانه بندی ریز و متوسط در آزمایشگاه به روش پروکتور اصلاح شده (AASHTO T180) طبقه D انجام شد. که رطوبت بهینه مصالح با دانه بندی ریز، برابر 6/6 و برای مصالح با دانه بندی متوسط برابر 6/25 بدست آمد.

## انتخاب قیر

با توجه به اینکه عمده قیر تولید شده توسط پالایشگاه های کشور، قیر با درجه نفوذ 60/70 می باشد و به علت کثرت استفاده این قیر در پروژه های راهسازی، برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی در این پروژه جهت مطابقت شرایط با واقعیت و پروژه های اجرایی، قیر 60/70 پالایشگاه تهران استفاده شد. درجه نفوذ، کندروانی، درجه اشتعال، خاصیت شکل پذیری و نقطه نرمی قیر مورد استفاده، آزمایش شد که نتایج آن در جدول 3 خلاصه شده است. [7]

جدول ۳: نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی قیر مصرفی در این تحقیق

67	درجه نفوذ
800 سانتی استوکس @120 430 سانتی استوکس @135 140 سانتی استوکس @160	کندروانی
215 درجه سانتی گراد	درجه اشتعال
بیشتر از 100	خاصیت انگمی
48/5 درجه سانتی گراد	درجه نرمی

## فیلر فعال

در این تحقیق سیمان تیپ 2 به عنوان فیلر فعال استفاده شد و تاثیر افزودن درصد های مختلف آن بر استحکام مارشال و مدول برجهندگی نمونه های آسفالت کف قیر مورد بررسی قرار گرفت. [5]

## تراکم و عمل آوری نمونه ها

با توجه به جرم مصالح مورد نیاز برای ساخت نمونه های مارشال (حدود 1200 گرم) و جرم کل مخلوط که معادل 10 کیلوگرم است، از هر طرح حدود هشت نمونه بدست می آید که به دو گروه هر کدام شامل چهار نمونه برای اعمال دو تیپ تراکم تقسیم می شوند، یک گروه با 50 ضربه و گروه دیگر با 75 ضربه متراکم می شوند، پس از اتمام تراکم نمونه ها، هر یک از چهار نمونه متراکم شده با تعداد ضربات مشخص، بطور جداگانه تحت شرایط عمل-آوری به مدت سه روز (72 ساعت) در دمای 40°C در گرمخانه قرار می گیرند.

## آزمایش های مکانیکی

### آزمایش مدول بر جهندگی

آزمایش مدول برجهندگی تحت شرایط عمل آوری به مدت سه روز (72 ساعت) در دمای 40°C در گرمخانه و با استفاده از دستگاه UTM14 به روش ASTM D-4123 بر روی نمونه ها انجام شد. از آنجا که آزمایش مدول برجهندگی غیر مخرب است، می توان آزمایش استحکام مارشال را نیز بلافاصله پس از انجام این آزمایش انجام داد. مشخصات مربوط به آزمایش مدول برجهندگی در جدول 4 نشان داده شده است. [3]

جدول ۴: مشخصات مربوط به آزمایش مدول برجهندگی

ASTM D4123-82	استاندارد مورد استفاده
زنگوله ای	شکل بارگذاری
0/1	زمان بارگذاری (ثانیه)
2000	دوره بارگذاری (میلی ثانیه)
150	تعداد پیش بارگذاری
5	تعداد بارگذاری
25	دمای نمونه (سانتی گراد)
500	بار اعمال شده (نیوتون)
0/35	نسبت پواسون

## آزمایش استحکام مارشال

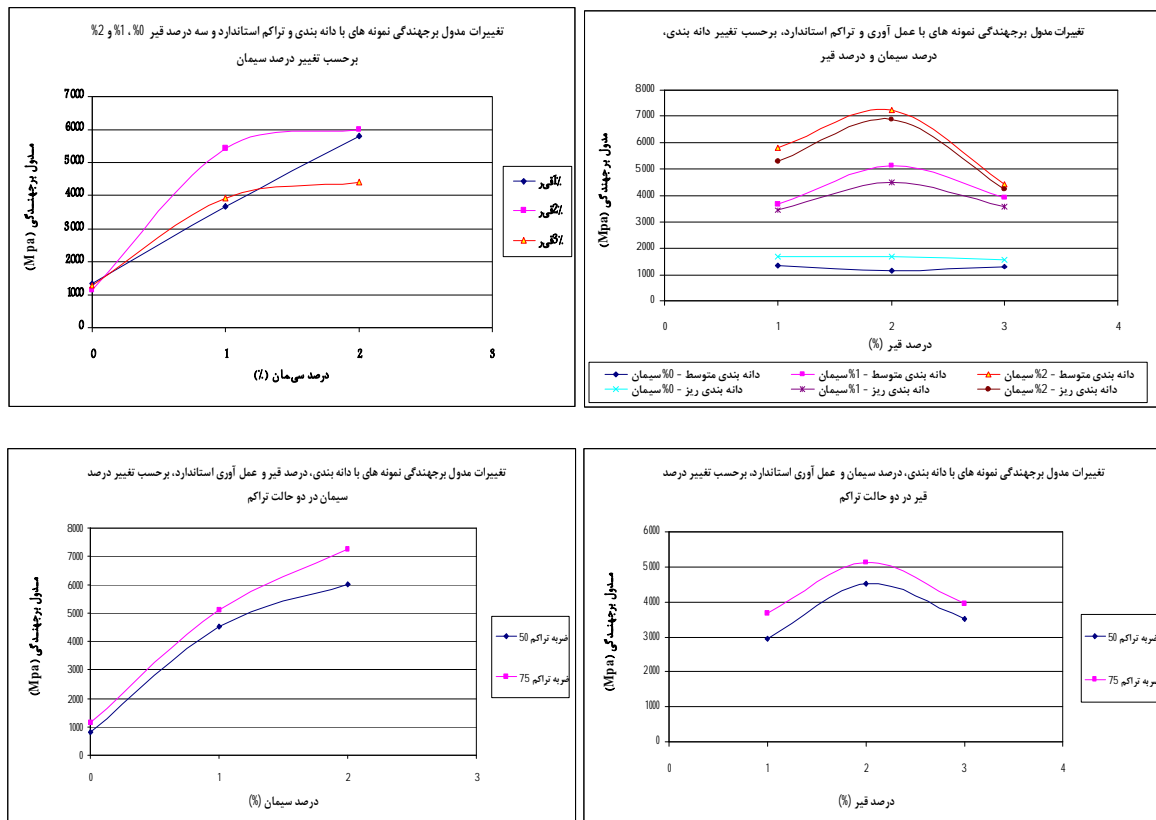
آزمایش استحکام مارشال تحت شرایط عمل آوری به مدت سه روز (72 ساعت) در دمای 40°C در گرمخانه و با استفاده از دستگاه مارشال به روش ASTM D-1559 بر روی نمونه‌ها انجام شد. [1]

## ارائه و تفسیر نتایج آزمایش

یادآوری می‌شود که در این تحقیق تاثیر دو نوع دانه‌بندی (متوسط و ریز)، سه درصد قیر (1، 2 و 3 درصد)، سه درصد سیمان (0، 1 و 2 درصد)، دو حالت تراکم (50 و 75 ضربه) و یک حالت عمل آوری (عمل آوری خشک در دمای 40°C) مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت ارائه نتایج قابل مقایسه و همچنین جلوگیری از پراکندگی آنها، مخلوطی با شرایط دانه بندی متوسط، درصد قیر 2%، درصد سیمان 1%، تعداد ضربات تراکم 75 و عمل آوری شده در مدت 72 ساعت در دمای 40°C، به عنوان مخلوط با شرایط استاندارد تعریف و در ارائه نتایج تغییرات عوامل مختلف، بر آن به عنوان نمونه، بررسی شده است. [7]

## بررسی مدول برجهندگی نمونه‌های کف قیر

مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در محدوده 792 تا 7241 مگاپاسکال می‌باشد، که مرز پایین آن مربوط به نمونه‌های فاقد سیمان و مرز بالای آن مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان می‌باشد. متوسط مدول برجهندگی نمونه‌ها، معادل 3000 مگاپاسکال می‌باشد. [4]

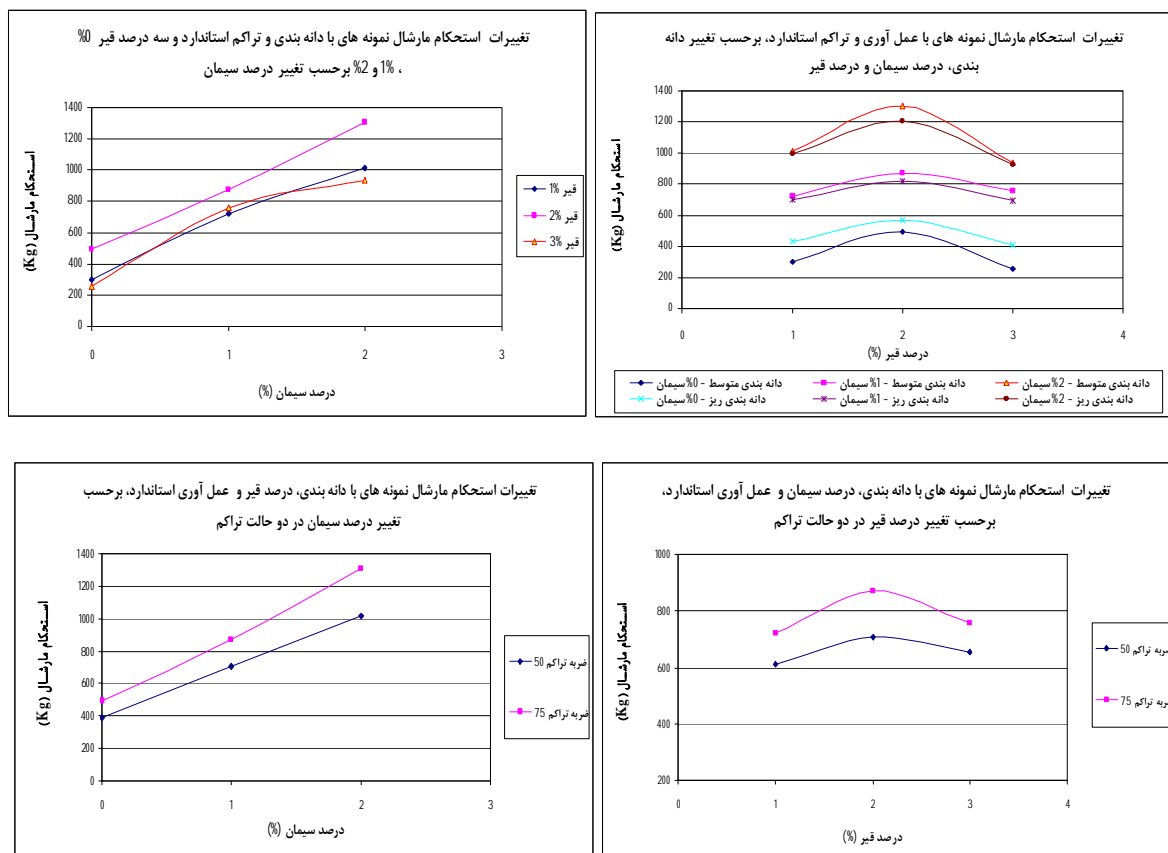


شکل 4: تغییرات مدول برجهندگی به ازای تغییر پارامترهای اختلاط

در شکل 4 مقدار مدول برجهندگی به ازای درصدهای مختلف قیر و سیمان و دانه‌بندی‌های ریز و متوسط نشان داده شده است. برای هر دو تیپ دانه‌بندی (دانه‌بندی ریز و متوسط) بالاترین مدول برجهندگی در درصد قیر 2% بدست آمد. همچنین با افزایش تعداد ضربات تراکم و افزایش درصد سیمان میزان استحکام مارشال نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش در تغییر درصد سیمان از 0% به 1%، معادل 390% و در افزایش درصد سیمان از 1% به 2%، معادل 22% می‌باشد.

## بررسی استحکام مارشال نمونه‌های کف قیر

استحکام مارشال نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در محدوده 3 تا 13 کیلونیوتن می‌باشد. که مرز پایین آن مربوط به نمونه‌های فاقد سیمان و مرز بالای آن مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان می‌باشد. متوسط استحکام مارشال نمونه‌ها، معادل 7 کیلونیوتن می‌باشد. [4] ، [7]



شکل 5: تغییرات استحکام مارشال به ازای تغییر پارامترهای اختلاط

در شکل 5 مقدار استحکام مارشال به ازای درصدهای مختلف قیر و سیمان و دانه‌بندی‌های ریز و متوسط نشان داده شده است. برای هر دو تیپ دانه-بندی (دانه‌بندی ریز و متوسط) بالاترین استحکام مارشال در درصد قیر 2% بدست آمد. همچنین با افزایش تعداد ضربات تراکم و افزایش درصد سیمان میزان استحکام مارشال نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش در تغییر درصد سیمان از 0% به 1% ، معادل 118% و در افزایش درصد سیمان از 1% به 2% ، معادل 41% می‌باشد.

## جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا دستگاه تولید آزمایشگاهی کف قیر راه‌اندازی و دقت عملکرد آن کنترل گردید. سپس با استفاده از مصالح تراشیده شده از سطح بزرگراه خاوران واقع در جنوب شرقی تهران و تفکیک آنها بر حسب اندازه دانه و سپس باز ترکیب آنها بر حسب اوزان مناسب جهت حصول دانه‌بندی مورد نظر، نمونه‌های آسفالتی کف قیر با دو نوع دانه‌بندی ریز و متوسط، سه درصد مختلف قیر، سه درصد متفاوت سیمان و دو حالت تراکم ساخته شد و هر کدام از این نمونه‌ها بصورت خشک عمل‌آوری گردید. نتایج حاصل از آزمایشهای استحکام مارشال و مدول برجهندگی انجام شده بر روی 36 نمونه فوق را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود.

- به طور کلی بالاترین استحکام مارشال و مدول برجهندگی در درصد قیر 2% بدست می‌آید. همچنین مدول برجهندگی نسبت به استحکام مارشال حساسیت بیشتری به میزان قیر از خود نشان داد.

- دانه‌بندی متوسط، استحکام مارشال و مدول برجهندگی بیشتری را نسبت به دانه‌بندی ریز نشان می‌دهد.
- تاثیر افزودن سیمان بسیار چشمگیر بوده است. با افزودن 1% سیمان و افزایش آن از 0% به 1% و 1% به 2%، متوسط مدول برجهندگی نمونه‌ها به ترتیب حدود 390% و 22% و میانگین استحکام مارشال به ترتیب حدود 118% و 41%، افزایش یافت.
- با کاهش انرژی تراکم (تعداد ضربات چکش تراکم مارشال) از 75 به 50 ضربه، مقادیر میانگین مدول برجهندگی و استحکام مارشال به ترتیب حدود 18% و 16% کاهش یافت.

## مراجع

- 1- 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.
- 2- AIPCR and PIARC. (2002). "Cold in-place recycling of pavements with emulsion or foamed bitumen", Association Mondiale de la Route (AIPCR) and World Road Association (PIARC) Draft Report, Version 3,1A.
- 3- Muthen KM., (1998) "Foamed asphalt mixes: mix design procedure", Research. Report (CR-98/077), CSIR Transportek, South Africa.
- 4- Chiu, Chui-Te, and Huang, M. Y., (2003). "A study on properties of foamed asphalt treated mixes" Proc., 82nd Annual Transportation Research Board Meeting (CD-Rom), Transportation Research Council, Washington, D.C.
- 5- Hodgkinson A. and Visser A.T. (2004). "The role of fillers and cementitious binders when recycling with foamed bitumen or bitumen emulsion" 8<sup>th</sup> conference on Asphalt pavements for Southern Africa (CAPSA'04).
- 6- Wirtgen GMBH., (2001). "Wirtgen cold recycling manual", 2nd edition, Germany, Windhagen.
- 7- Wirtgen GmbH. (2001). "Foamed bitumen mix design procedure using the wirtgen WLB". Germany, Windhagen

8- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (1385). "مشخصات فنی و اجرایی بازیافت سرد آسفالت"، نشریه شماره 339.