

# بررسی آزمایشگاهی عملکرد مخلوط آسفالت ماسه‌ای برای پوشش سیل‌بندها

آرش رضایی  
دانشجوی دکترای

نادر طباطبایی  
دانشیار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## چکیده

آسفالت ماسه‌ای یکی از انواع مخلوط‌های آسفالتی است که در ساخت پوشش منابع ذخیره آب و سیل‌بندها کاربرد دارد. هدف این پژوهش، بررسی عملکرد این مخلوط با روشهای آزمایشگاهی است. نتایج آزمایش مارشال نشان داد این مخلوط با ۵/۵ درصد قیر و ۶ درصد فیلر با تراکم متداول آن، دارای حداکثر پایداری است. نتایج آزمایش تیرچه خمشی نشان می‌دهد مدول سختی این مخلوط با کاهش مقدار قیر و فیلر، افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نشان می‌دهد که این مخلوط با ۲ درصد فیلر و ۵/۵ درصد قیر بیشترین مقاومت کششی را دارد همچنین مشخص می‌سازد که این مخلوط به شدت در برابر سرما حساس است. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهد که این مخلوط نفوذپذیری زیادی دارد و ضریب نفوذپذیری آن در حدود  $10^{-2}$  cm/s تا  $10^{-3}$  cm/s است.

## کلمات کلیدی

پوشش آسفالتی، مخلوط آسفالت ماسه‌ای، پایداری، دوام، مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری.

## The Laboratory Performance of Lean Sand Asphalt as a Dike Revetment

N. Tabatabaee  
Associate Professor

A. Rezaei  
Ph.D. Candidate

Department of Civil Engineering,  
Sharif University of Technology

### Abstract

*Lean sand asphalt (LSA) is a type of asphalt mixture used as a revetment in dikes and reservoirs. This research was conducted to investigate the performance of lean sand asphalt by practical methods. Marshall, bending beam, indirect tensile and permeability tests were performed on laboratory prepared samples.*

*Results of the Marshall test show that an asphalt mixture with 5.5 percent asphalt and 6 percent filler content has the highest stability. In the bending beam test, when filler and bitumen content decrease, the stiffness of mixture increases. The indirect tension test shows that a mixture with 2 percent filler and 5.5 percent asphalt content has the highest indirect tensile strength and is very sensitive to moisture. Permeability tests have shown that this mixture has a high coefficient of permeability of between  $10^{-2}$  to  $10^{-3}$  cm/s, making it suitable for surfacing of dikes.*

## مقدمه

استفاده از پوشش آسفالتی برای مخازن آب و سیل‌بندها از جمله موارد کاربرد آسفالت است که در چند دهه اخیر به علت ارزانی و سهولت اجرا مورد توجه قرار گرفته است. انعطاف‌پذیری نسبتاً بالای مخلوط آسفالتی به این گونه پوشش‌ها توانایی تطبیق با نشست‌های پیش‌بینی نشده را می‌دهد. از سوی دیگر به علت ویژگی خود ترمیمی<sup>۱</sup>، ترمیم خرابی مخلوط آسفالتی نیز ساده‌تر است [۱].

پوشش آسفالتی سیل‌بندها و منابع ذخیره آب به طور مداوم تحت بارگذاری امواج و تحت شرایط مختلف جوی قرار می‌گیرد. در طرح مخلوط این گونه پوشش‌ها باید نکاتی مانند نوع دانه‌بندی، پایداری مخلوط روی شیب، و دوام مخلوط مورد توجه قرار گیرد. بررسی ویژگی‌های مخلوط آسفالت ماسه‌ای<sup>۲</sup> به عنوان نوع خاصی از این پوشش‌ها و شبیه‌سازی آن در آزمایشگاه و مطالعه عملکرد این نوع آسفالت در کاربردهای هیدرولیکی، هدف کلی این پژوهش بود که به عنوان یک تحقیق تجربی در آزمایشگاه تکنولوژی آسفالت دانشگاه صنعتی شریف اجرا شد.

## تاریخچه

مخلوط آسفالت ماسه‌ای ترکیبی از ماسه و قیر، با یا بدون یا با فیلر است. افزودن فیلر به این مخلوط باعث می‌شود که قیر زیادتری جذب کند و مخلوط متراکم‌تر و پایدارتری به وجود آورد [۲]. این مخلوط می‌تواند به تنهایی و یا به همراه سایر انواع مخلوط‌های آسفالتی به عنوان پوشش به کار رود. در ایالات متحده آمریکا این مخلوط برای حفاظت سواحل رودخانه می‌سی‌سی‌پی توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا<sup>۳</sup> به کار گرفته شده است. در هلند از این مخلوط فراوانی در ساخت دیواره‌های مقاوم در برابر آب استفاده شده است. ضخامت لایه مورد استفاده تا ۲۰ سانتیمتر متغیر است که معمولاً توسط یک لایه بتن آسفالتی پوشانده می‌شود [۲].

## طرح آزمایشها

همان گونه که اشاره شد خصوصیات اصلی مخلوط آسفالت ماسه‌ای که در ساخت پوشش‌های منابع ذخیره آب به کار می‌رود عبارتند از: مشخصات مکانیکی، پایداری، دوام، و نفوذپذیری [۳ و ۲]. برای بررسی خصوصیات مخلوط آسفالتی ماسه‌ای، آزمایش‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- آزمایش تیرچه خمشی برای بررسی مشخصات مکانیکی

- آزمایش کششی غیرمستقیم برای بررسی دوام مخلوط آسفالتی در مجاورت آب

- آزمایش مارشال برای بررسی پایداری مخلوط آسفالتی

- آزمایش نفوذپذیری برای تعیین نفوذپذیری مخلوط آسفالتی

قیر، فیلر و میزان تراکم اعمال شده از پارامترهای مهم در طراحی مخلوط‌های آسفالتی است که تأثیر آن بر این پژوهش بررسی شده است. عامل مقدار تراکم تنها در آزمایش مارشال با در نظر گرفتن ۳ مقدار تراکم ۵، ۱۵، و ۳۵ ضربه چکش لحاظ شد. از آن جایی که در هنگام اجرا روی سطح شیب‌دار سیل‌بند اعمال تراکم زیاد ممکن نیست، سایر آزمایش‌ها بر اساس ۱۵ ضربه تراکم در آزمایش مارشال طراحی و اجرا شد.

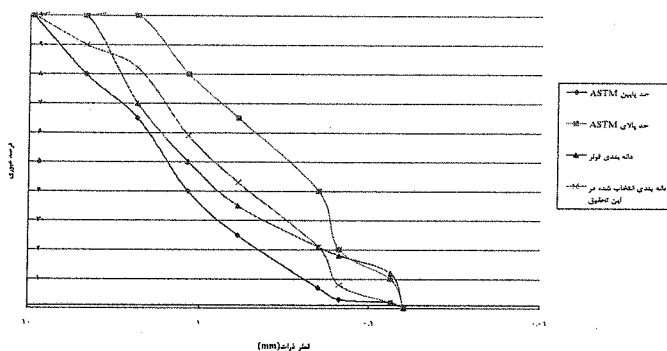
## مصالح مصرفی

سنگدانه و فیلر مصرفی در آزمایشگاه‌های از نوع سنگ آهک بود که از معدن میل نادر در استان سیستان و بلوچستان تهیه شد. دانه‌بندی مخلوط آسفالت ماسه‌ای در نظر گرفته شده بر اساس میانگین حدود ذکر شده در استاندارد ASTM D3515 برای



ماسه است [۴]. مقدار فیلر در منحنی دانه‌بندی مورد اشاره برابر ۲ درصد در نظر گرفته شد.

شکل (۱) منحنی دانه‌بندی فولر، حدود پیشنهادی ASTM و دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای تهیه نمونه‌های بتن آسفالتی از قیر نوع ۶۰-۷۰ تولیدی پالایشگاه اصفهان استفاده شد. برای تعیین خصوصیات مصالح مصرفی آزمایش‌های اولیه روی مصالح سنگی و قیر اجرا شد، که نتایج آن در جدول‌های (۱) و (۲) آمده است. جدول (۳) انواع آزمایش و شرایط هر یک را نشان می‌دهد. جزئیات انجام آزمایشها در مرجع شماره [۵] آمده است.



شکل (۱) منحنی‌های دانه‌بندی پیشنهادی برای مخلوط آسفالت ماسه‌ای.

جدول (۱) نتایج آزمایش‌ها بر روی مصالح سنگی.

استاندارد بکار رفته	دما (°C)	چگالی واقعی	سنگدانه
ASTM C127	۲۵	۲/۴۰۳	مصالح درشت‌دانه عبوری از الک ۱۹/۰mm و مانده روی الک #۴
ASTM C128	۲۵	۲/۵۹۲	مصالح ریزدانه (عبوری از الک #۴ و مانده روی الک #۲۰۰)
ASTM D854	۲۵	۲/۷۳۹	مصالح فیلتر (عبوری از الک #۲۰۰)

جدول (۲) نتایج آزمایش‌ها بر روی قیر.

چگالی	شکل پذیری (cm)	نقطه نرمی (°C)	درجه نفوذ (°/1mm)	مشخصه فیزیکی
۱/۰۲۰	بیشتر از ۱۰۰	۵۰/۴	۷۸	قیر خالص

جدول (۳) آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط آسفالتی.

تعداد کل حالات	تعداد تکرار	متغیر	نوع آزمایش
۳۶۰	۳	قیر با درصدهای ۳، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۸ فیلر با درصدهای صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ تعداد ضربات ۵ و ۱۵ و ۳۵	مارشال
۹۰	۲	قیر با درصدهای ۴/۵، ۵ و ۵/۵ فیلر با درصدهای صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸	تیرچه خمشی
۹۰	۶	قیر با درصدهای ۴/۵، ۵ و ۵/۵ فیلر با درصدهای صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸	کشش غیرمستقیم
۱۵	۱	قیر با درصدهای ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ فیلر با درصدهای صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸	نفوذپذیری

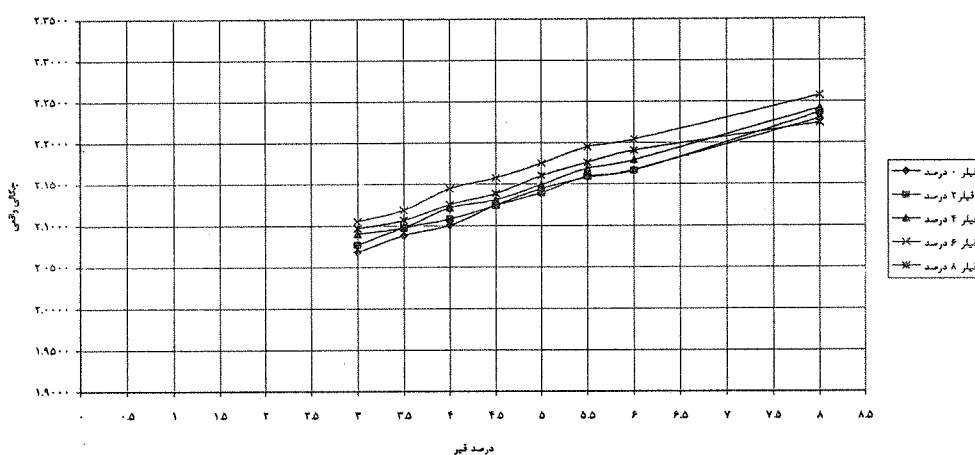
## آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال

برای بررسی اثر قیر و فیلر بر پایداری مخلوط ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ درصد قیر و صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد فیلر نسبت به وزن کل مخلوط در نظر گرفته شد. برای بررسی اثر مقدار تراکم بر خصوصیات مخلوط آسفالتی برای هر نمونه ۵ و ۱۵ و ۳۵ ضربه چکش مارشال اعمال شد که به ترتیب مقادیر تراکم کم، متوسط و زیاد را مشخص می‌سازد. از هر درصد فیلر و قیر ۳ نمونه ساخته شد. برای دقت بیشتر یک تکرار درباره نتایج مشاهداتی که به نظر می‌رسید با مقدار پیش‌بینی شده اختلاف دارند و یک تکرار هم درباره درصد‌های بیشینه صورت گرفت. جمعاً ۳۶۰ نمونه مارشال برای بررسی رفتار مخلوط، ساخته و آزمایش شد. بعد از تهیه نمونه‌ها در هر سری، آزمایش‌های مربوط به تعیین چگالی، درصد هوا و سپس آزمایش روانی و استقامت مارشال بر روی آنها اجرا شد. نمودارهای مربوط به چگالی واقعی، روانی مارشال، استقامت مارشال و درصد هوا و تأثیر تعداد ضربات در شکل‌های (۲) تا (۱۶) آمده است.

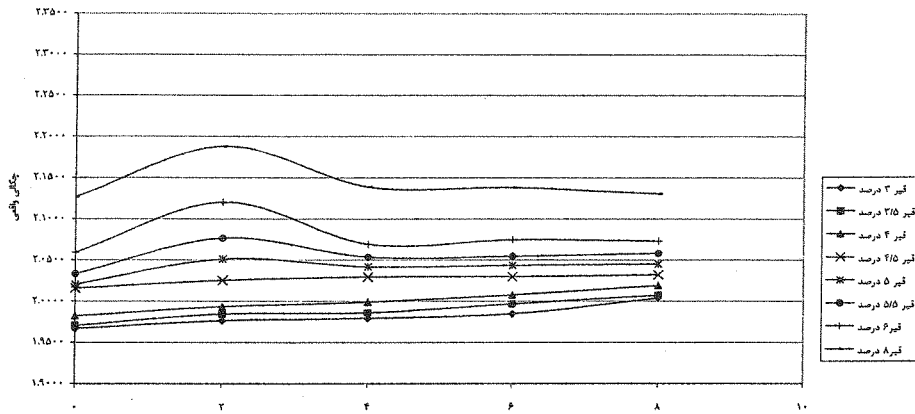
شکل‌های (۲) تا (۵) تغییرات چگالی واقعی با درصد قیر و درصد فیلر را نشان می‌دهد. این شکل‌ها نشان می‌دهند که چگالی واقعی مخلوط آسفالتی دارای بیشینه مشخصی نیست و با افزایش درصد قیر افزایش می‌یابد. این روند صعودی برای هر سه میزان تراکم دیده می‌شود.

شکل (۳) رابطه چگالی با درصد فیلر را برای ۵ ضربه تراکم نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که چگالی مخلوط آسفالتی برای قیرهای بالاتر از ۴/۵ درصد دارای یک نقطه حداکثر است و با افزودن ۲ درصد فیلر به مخلوط می‌توان حداکثر چگالی را نتیجه گرفت. نقش فیلر در تراکم ۵ ضربه‌ای آنچنان قابل توجه نیست زیرا در این حالت دانه‌های فیلر توزیع اتفاقی بین دانه‌ها دارند و فضای خالی بین دانه‌ها را پر نکرده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که اثر فیلر در تراکم‌های زیادتر مشهودتر است و فیلر در تراکم زیاد به وضوح باعث افزایش چگالی مخلوط آسفالتی می‌شود.

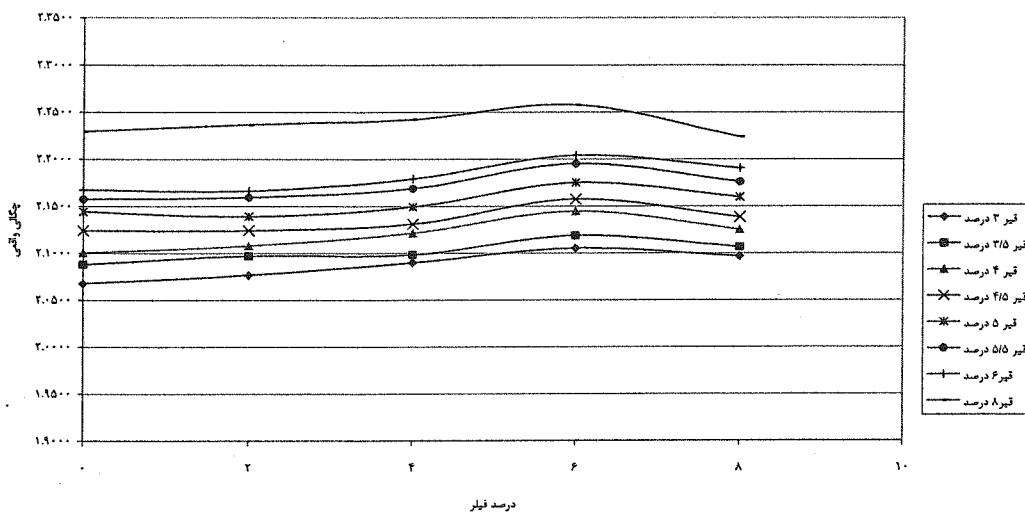
شکل‌های مربوط به تراکم ۱۵ و ۳۵ ضربه‌ای در فیلر ۶ درصد دارای نقطه حداکثر هستند. در این درصد فیلر توزیع ذرات فیلر بین سنگدانه‌ها و تشکیل ماستیک آسفالتی به گونه‌ای است که جسم توپر و همگنی را ایجاد و منافذ مخلوط را به خوبی پر می‌کند، بنابراین چگالی آن را افزایش می‌دهد. افزایش فیلر بیش از این مقدار نه تنها چگالی مخلوط را بالا نمی‌برد، بلکه از آن می‌کاهد. علت کاهش چگالی تبدیل سیستم منسجم قیر و سنگدانه به سیستم سنگدانه‌ای سست است که در این حالت فیلر اضافی باعث افزایش فاصله بین سنگدانه‌ها می‌شود. فیلر اضافی در این حالت قسمت اعظم قیر را جذب می‌کند و مانع از تأثیر قیر به عنوان چسباننده و تولید یک جسم همگن و توپر می‌شود و در نتیجه در این حالت چگالی کاهش می‌یابد.



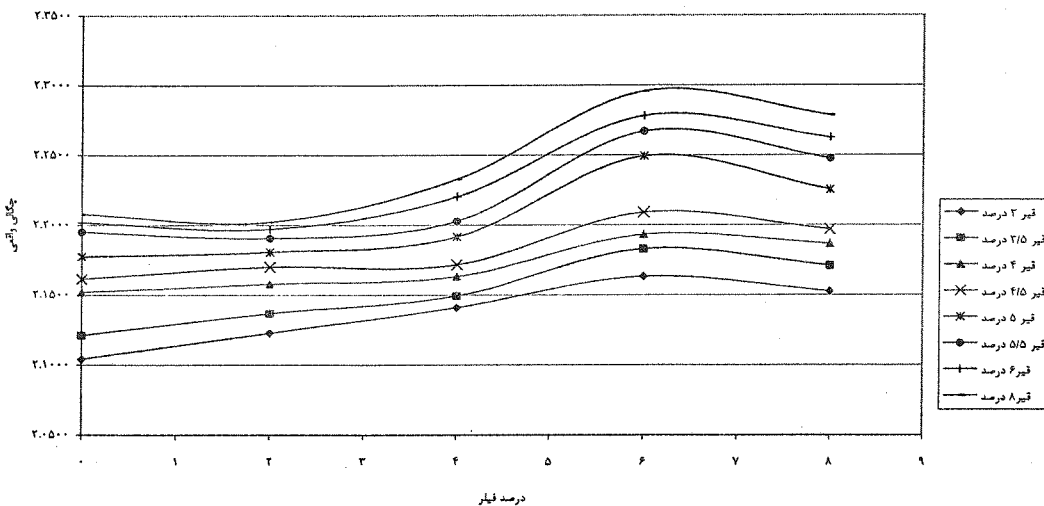
شکل (۲) تأثیر درصد قیر روی چگالی واقعی برای درصد فیلرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۳) تأثیر درصد فیبر روی چگالی واقعی برای درصد قیرهای مختلف و ۵ ضربه تراکم.



شکل (۴) تأثیر درصد فیبر روی چگالی واقعی برای درصد قیرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۵) تأثیر درصد فیبر بر چگالی واقعی برای درصد قیرهای مختلف و ۳۵ ضربه تراکم.



شکل (۶) تغییرات چگالی با مقدار تراکم را برای قیر ۵/۵ درصد نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رود با افزایش مقدار تراکم چگالی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد زیرا انرژی تراکم، بیشتر باعث افزایش قفل و بست بین دانه‌ها می‌شود.

شکل (۷) تغییرات روانی مارشال را برای قیر ۵/۵ درصد و تراکم‌های ۵ ضربه‌ای، ۱۵ ضربه‌ای و ۳۵ ضربه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش تراکم، قفل بست و بهتری به دانه می‌بخشد و در نتیجه، روانی مارشال با افزایش تعداد ضربات کاهش می‌یابد.

از مقایسه شکل‌های (۸) تا (۱۰) می‌توان دریافت که افزودن مقدار کمی فیلر (تا ۲ درصد) موجب جذب قیر مخلوط و در نتیجه کاهش روانی می‌شود. ولی افزودن فیلر زیادتر همراه با قیر بیشتر باعث تولید ماستیک آسفالتی می‌شود که نقش لغزنده کننده<sup>۴</sup> دارد و روانی را افزایش می‌دهد.

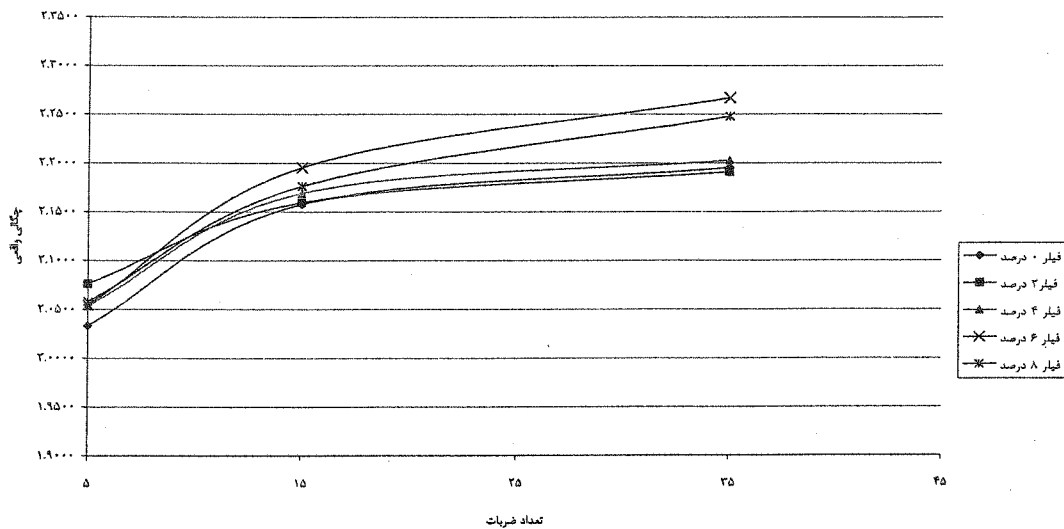
شکل (۱۱) میزان روانی مارشال را برای قیر ۵/۵ درصد و تراکم‌های ۵ ضربه‌ای، ۱۵ ضربه‌ای و ۳۵ ضربه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش تراکم، قفل و بست بهتری به دانه‌ها می‌بخشد و در نتیجه روانی مارشال با افزایش تعداد ضربات کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) تغییرات پایداری مارشال با درصد قیر، درصد فیلر و میزان تراکم ۱۵ ضربه‌ای را نشان می‌دهند. همانگونه که در شکل‌ها دیده می‌شود همه نمودارها دارای نقطه حداکثر مشخصی هستند. شکل (۱۳) نشان می‌دهد با افزایش درصد فیلر تا جایی که ماستیک آسفالتی حاصل نشود و فیلر نقش خود را به عنوان افزاینده کندروانی قیر و چسباننده شروع نکند، پایداری کاهش می‌یابد. این نقش در محدوده فیلر ۶ درصد ایجاد می‌شود. در منحنی‌های مربوط به تراکم ۱۵ و ۳۵ ضربه‌ای مشاهده می‌شود که افزایش فیلر ۶ درصد سبب ایجاد حداکثر استقامت مارشال شده است که باعث ایجاد حداکثر در مقادیر چگالی نیز شده بود. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود درصد قیری که بیشترین استقامت را ایجاد می‌کند با افزایش درصد فیلر افزایش می‌یابد. علت آن است که چون فیلر مصرفی (پودر سنگ) دارای بار سطحی مخالف قیر است افزودن فیلر میزان قیر مناسب برای حداکثر استقامت را افزایش می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود این درصد برای فیلر صفر، ۴/۵ درصد و برای فیلر ۲ درصد، ۵ درصد و برای فیلرهای ۴، ۶ و ۸ درصد، ۵/۵ درصد است.

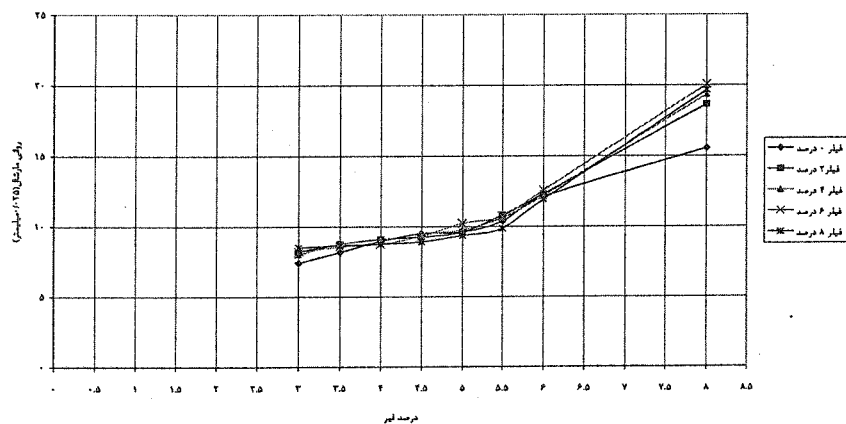
شکل (۱۴) تغییرات استقامت مارشال را برای درصدهای مختلف فیلر و ۵/۵ درصد قیر و تراکم‌های ۵، ۱۵ و ۳۵ ضربه‌ای نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود افزایش تراکم و قفل و بست بین دانه‌ها و چسبندگی زیادتر موجب افزایش استقامت مارشال می‌شود. سرعت افزایش استقامت برای فیلرهای کم (صفر، ۲ و ۴ درصد) کمتر از فیلرهای زیاد (۶ و ۸ درصد) است. برای سایر درصد قیرها نیز مشابه حالت فوق است.

جدول (۴) نشان می‌دهد ضریب تغییرات مقادیر مختلف استقامت مارشال به ترتیب در تراکم ۵، ۱۵ و ۳۵ ضربه‌ای کاهش می‌یابد. به علت پخش غیر یکنواخت دانه‌های فیلر ناشی از عدم اعمال انرژی تراکمی کافی، پراکندگی نتایج مربوط به استقامت مارشال برای حالت ۵ ضربه تراکم از سایر تراکم‌ها بیشتر است.

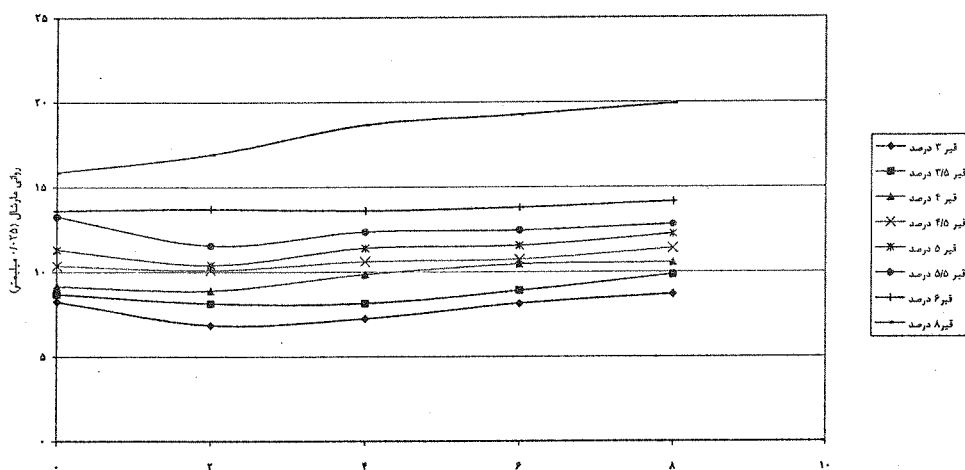
شکل‌های (۱۵) تا (۱۶) تغییرات درصد هوا را برای درصد قیر، درصد فیلر و مقدار تراکم ۱۵ ضربه نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل‌ها پیداست افزایش درصد قیر، باعث کاهش درصد هوای مخلوط آسفالتی می‌شود. این روند در هر سه نوع تراکم قابل مشاهده است زیرا در این حالت، قیر فضای خالی بین ذرات پر را می‌کند. در شکل (۱۶) مشخص است که منحنی دارای یک نقطه حداقل است و کمترین درصد هوای مخلوط در فیلر ۶ درصد است. در همین درصد فیلر مخلوط دارای بالاترین پایداری نیز هست. همین واقعیت در شکل مربوط به ۳۵ ضربه تراکم نیز مشاهده می‌شود. مقدار هوا در این منحنی برای ۶ درصد فیلر کمینه است. افزایش فیلر، اضافه بر این مقدار سبب افزایش درصد هوا می‌شود. زیرا فیلر اضافی در این حالت نه تنها اصطکاک بین دانه‌ها را افزایش نمی‌دهد بلکه سبب افزایش فاصله بین دانه‌ها می‌شود و از استقامت مخلوط می‌کاهد و بر منافذ آن می‌افزاید.



شکل (۶) تأثیر تعداد ضربات بر چگالی واقعی برای درصد فیبرهای مختلف و ۵/۵ درصد قیر.

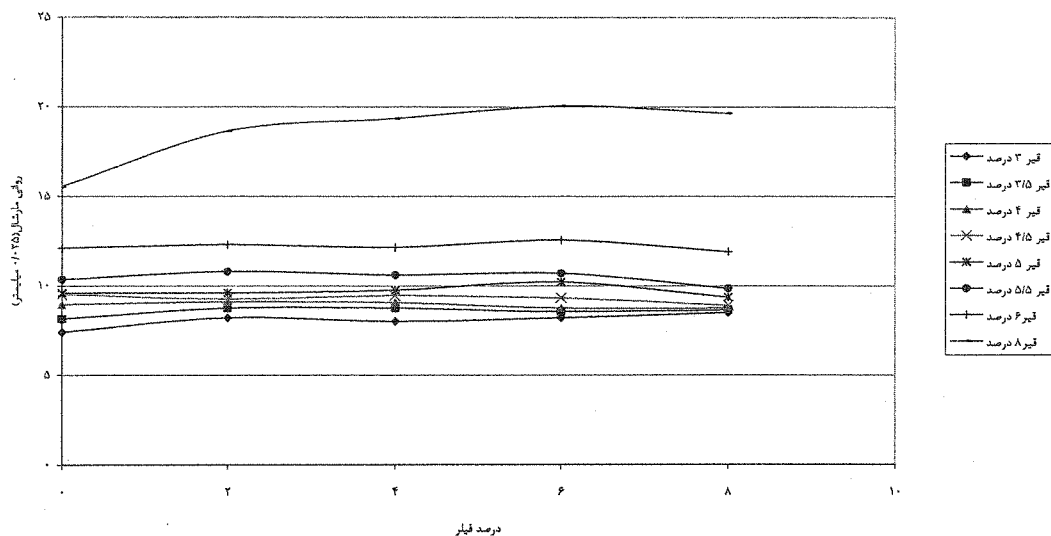


شکل (۷) تأثیر درصد قیر بر روانی مارشال برای درصد فیبرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

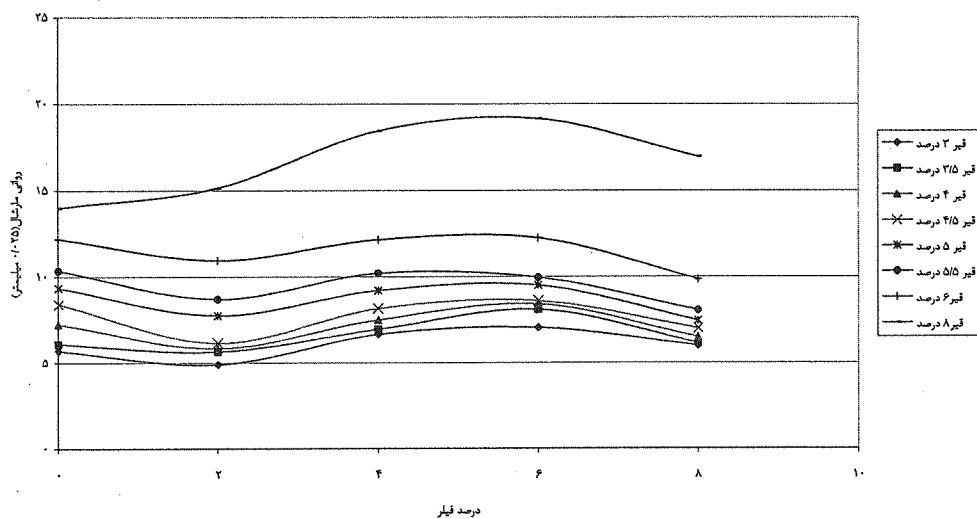


شکل (۸) تأثیر درصد فیبر روی روانی مارشال برای درصد قیرهای مختلف و ۵ ضربه تراکم.

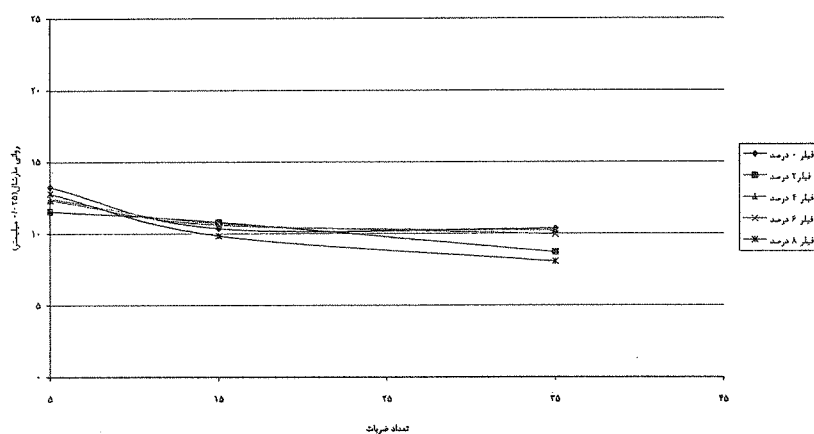




شکل (۹) تأثیر درصد فیبر بر روانی مارشال برای درصد قیرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

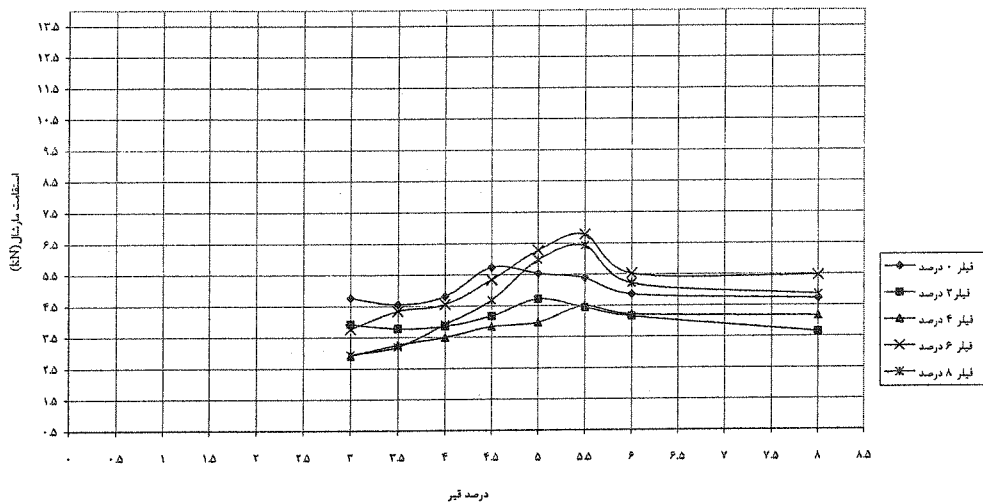


شکل (۱۰) تأثیر درصد فیبر بر روانی مارشال برای درصد قیرهای مختلف و ۳۵ ضربه تراکم.

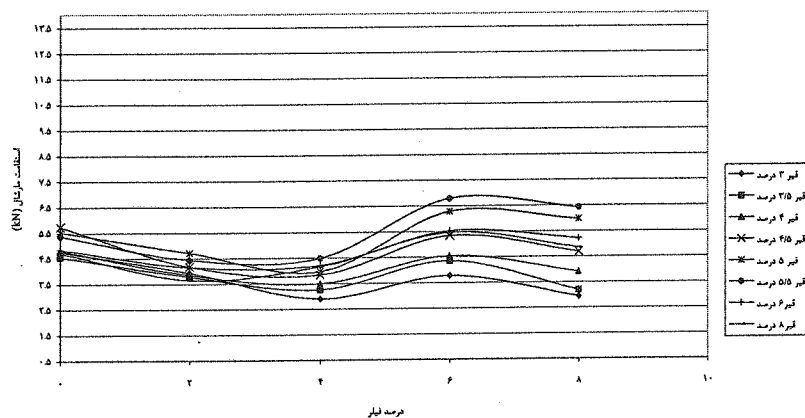


شکل (۱۱) تأثیر تعداد ضربات بر روانی مارشال برای درصد فیبرهای مختلف و ۵/۵ درصد قیر.

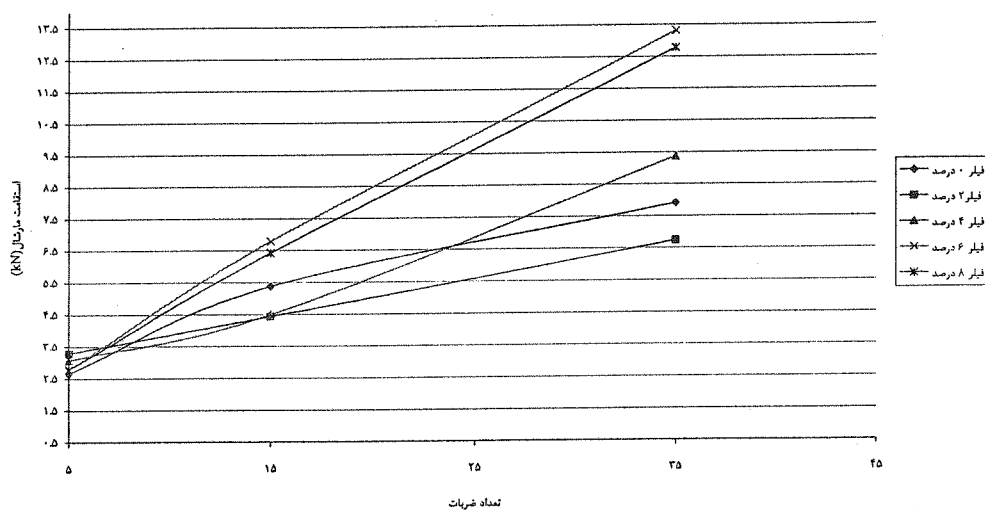




شکل (۱۲) تأثیر درصد فیبر بر استقامت مارشال برای درصد فیبرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۱۳) تأثیر درصد فیبر بر استقامت مارشال برای درصد فیبرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

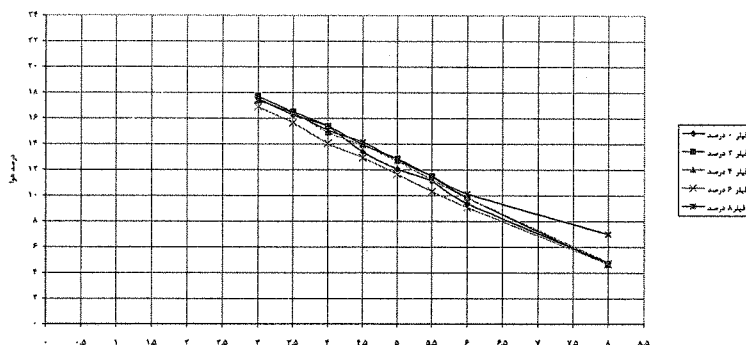


شکل (۱۴) تأثیر تعداد ضربات بر استقامت مارشال برای درصد فیبرهای مختلف و ۵/۵ درصد فیبر.

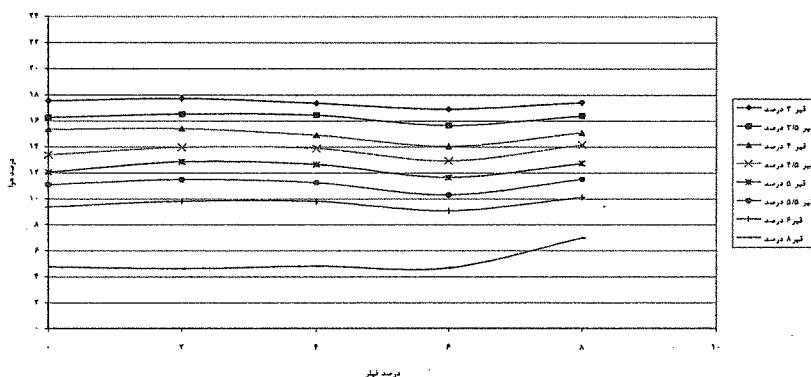


جدول (۴). ضریب تغییرات (C.O.V) استقامت مارشال برای حالت‌های مختلف تراکم و درصد فیلر.

درصد فیلر	ضربه ۵	ضربه ۱۵	ضربه ۳۵
۰	۱۱/۰۹	۵/۶۲	۴/۹۴
۲	۱۵/۴۲	۷/۱۴	۴/۶۵
۴	۱۱/۵۰	۹/۳۴	۸/۵۴
۶	۱۲/۴۵	۲/۲۷	۵/۳۳
۸	۱۴/۱۰	۸/۸۹	۵/۴۵



شکل (۱۵) تأثیر درصد قیر بر درصد هوا برای درصد فیلرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۱۶) تأثیر درصد فیلر بر درصد هوا برای درصد قیرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

## آزمایش تیرچه خمشی

در این آزمایش از تیرچه به ابعاد  $381 \times 76 \times 76$  میلی متر و مقدار قیر مناسب به دست آمده از آزمایش مارشال استفاده شد. از آن جایی که مقدار قیر مناسب برای حداکثر پایداری برای درصد‌های مختلف فیلر بین  $4/5$  تا  $5/5$  درصد است، میزان قیر تیرچه‌ها  $4/5$ ،  $5$  و  $5/5$  درصد و طبق توصیه مهندسين اروپایی [۳] میزان تراکم تیرچه‌ها تقریباً معادل میزان تراکم ۱۵ ضربه در آزمایش مارشال انتخاب شد. شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) منحنی نیرو- تغییر مکان و منحنی (۲۰) شکل تغییرات سختی مخلوط آسفالتی با درصد قیر را نشان می‌دهد.

منحنی (۱۷) نشان می‌دهد که در درصد فیلر کم، با افزایش درصد قیر، حداکثر نیروی قابل تحمل، کاهش می‌یابد. زیرا افزایش درصد قیر عملاً قفل و بست بین دانه‌ها را در مخلوط کاهش می‌دهد و سبب افزایش شکل‌پذیری می‌شود. همان گونه که دیده می‌شود تغییر شکل رخ داده برای قیر زیادتر ( $5/5$  درصد)، بیشتر از سایر درصد قیرهاست. با افزایش فیلر، مقدار قیر اضافی توسط فیلر جذب می‌شود و اثر قیر بر شکل‌پذیر نمودن مخلوط کاهش می‌یابد همین امر باعث شده است برای فیلر ۲ درصد بیشترین

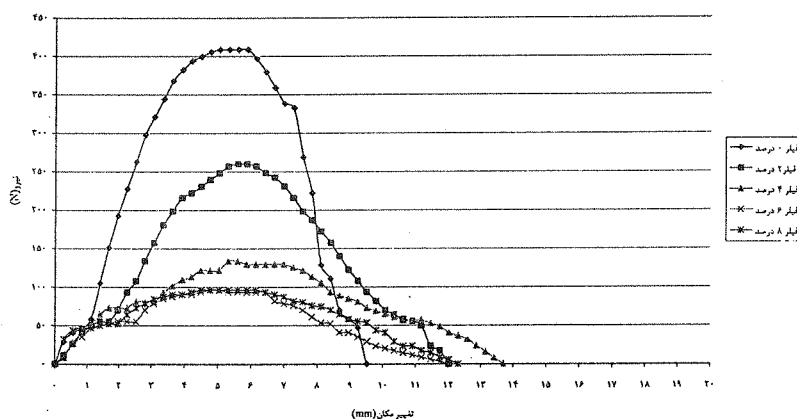
نیروی قابل تحمل برای قیر ۵ درصد باشد. این روند به خوبی دنبال می‌شود و با افزایش فیلر، قیر مورد نیاز برای احاطه کردن فیلر اضافی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای درصد قیر پایین، عملاً فیلر اضافی باعث کاهش چسبندگی و قفل و بست بین دانه‌ها می‌شود و نیروی قابل تحمل را کاهش می‌دهد. زیرا فاصله دانه‌ها را افزایش می‌دهد و از اصطکاک داخلی آنها می‌کاهد. به همین علت برای فیلرهای ۶ و ۸ درصد بیشترین نیروی گسیختگی مربوط به قیر ۵/۵ درصد است.

این شکل‌ها همچنین نشان می‌دهند که با افزایش فیلر تا ۴ درصد مخلوط، انعطاف‌پذیرتر می‌شود و تغییر شکل زیادتری رخ می‌دهد. ولی پس از آن با افزایش فیلر مخلوط تقریباً وارد فاز دانه‌ای می‌شود و از مقدار تغییر شکل نهایی آن کاسته خواهد شد. همچنین با افزایش فیلر به علت کمی قیر، از نیروی نهایی قابل تحمل کاسته می‌شود.

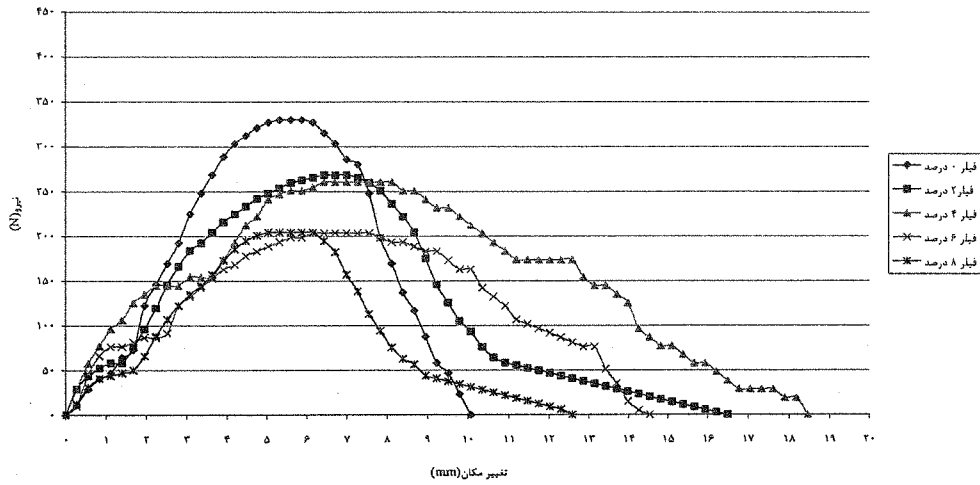
از شکل (۱۸) برای قیر ۵ درصد مشخص است که با افزایش فیلر، اختلاف نیروی نهایی صفر درصد با ۲ و ۴ درصد فیلر کم شده است. زیرا به علت جذب قیر و تولید ماستیک آسفالتی، مقاومت مخلوط‌های فیلردار رو به افزایش است. در این منحنی مشخص است که با افزایش فیلر تغییر شکل نهایی تا مقدار ۴ درصد فیلر زیادتر می‌شود، ولی برای فیلر ۶ درصد مخلوط به فاز دانه‌ای وارد شده و با کاهش پیوند دانه‌ها و افزایش فاصله آنها تغییر شکل نهایی کم شده است. از شکل (۱۹) برای قیر ۵/۵ درصد می‌توان فهمید که در این حالت چون قیر مخلوط نسبتاً زیاد است مخلوط آسفالتی وارد فاز دانه‌ای نشده و کل قیر و فیلر یک ماستیک غلیظ و چسبنده را تشکیل داده است. بنابراین، بار نهایی برای فیلر ۸ درصد از همه فیلرها زیادتر است. تغییر شکل نهایی نیز برای این درصد قیر به علت شکل‌پذیری زیاد ماستیک از سایر درصد فیلرها زیادتر است و کاهش نیروی نهایی به علت افزایش فاصله بین دانه‌ها رخ نداده است. شکل (۲۰) رابطه سختی مخلوط آسفالتی را با درصد فیلر نشان می‌دهد. برای درصد قیر کم، سختی مخلوط با افزایش فیلر کاهش می‌یابد. ولی در درصد قیرهای زیاد افزایش فیلر، مدول الاستیک مخلوط را افزایش می‌دهد (۵/۵ درصد قیر).

## آزمایش کشش غیرمستقیم

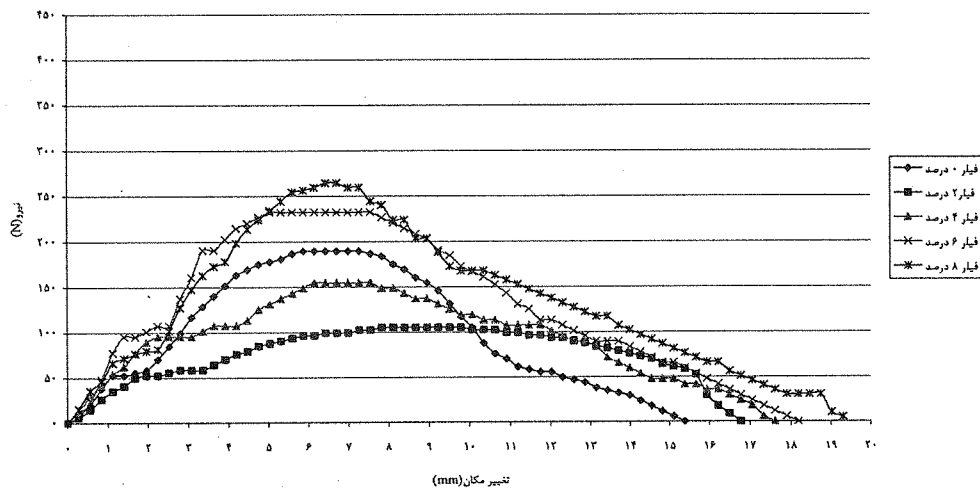
این آزمایش با روشی مشابه شرایط مندرج در AASHTO T283 انجام یافته است با این اختلاف که درصد هوای نمونه‌ها ۷ درصد است تا شرایط واقعی محل شبیه‌سازی شود. آزمایش در هر نوبت به صورت مقایسه‌ای بین دو گروه که یکی در معرض رطوبت قرار گرفته انجام می‌شود. از آن جایی که در این پژوهش سعی بر این بود که شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی محل شبیه‌سازی شود درصد فضای خالی هر دسته از نمونه‌های آزمایش مطابق با تراکم توصیه شده برای این گونه مخلوط‌های آسفالتی انتخاب شد. شکل (۲۱) نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های خشک را نشان می‌دهد. با افزایش درصد قیر بار گسیختگی زیادتر می‌شود. افزایش مقدار قیر باعث افزایش چسبندگی بین دانه‌ها می‌شود و در نتیجه بار گسیختگی افزایش می‌یابد. زیرا عامل مقاوم در برابر نیروی کششی، چسبندگی بین دانه‌هاست. افزایش ۲ درصد فیلر به مخلوط آسفالتی، چسبندگی مصالح را افزایش



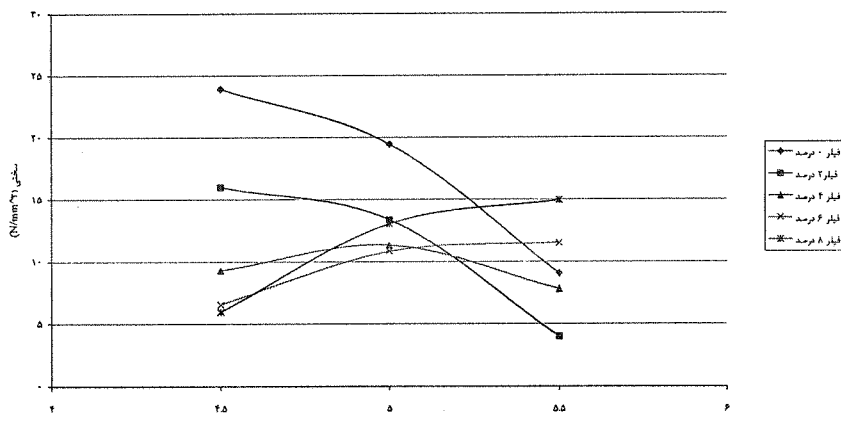
شکل (۱۷) تأثیر درصد فیلر بر منحنی نیرو - تغییر مکان برای قیر ۴/۵ درصد و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۱۸) تأثیر درصد فیبر بر منحنی نیرو - تغییر مکان برای قیر ۵ درصد و ۱۵ ضربه تراکم.



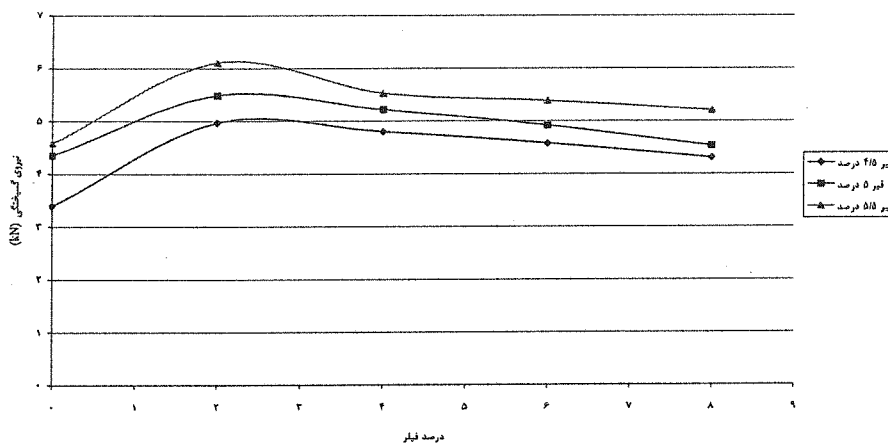
شکل (۱۹) تأثیر درصد فیبر بر منحنی نیرو - تغییر مکان برای قیر ۵/۵ درصد و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۲۰) تأثیر درصد قیر بر سختی برای درصد فیبرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

داده و بار گسیختگی بیشتری را سبب شده است. باید دقت داشت که این نکته در تناقض با نتایج بدست آمده از آزمایش تیرچه خمشی نیست زیرا اثر فیلر در آزمایش تیرچه خمشی علاوه بر ایجاد چسبندگی افزایش زاویه اصطکاک داخلی به علت تولید ماستیک آسفالتی نیز هست.

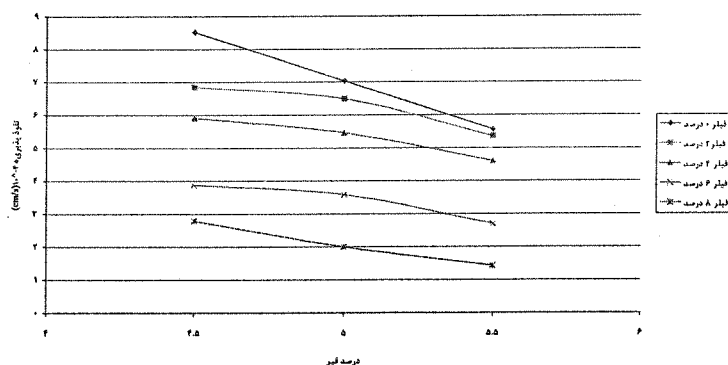
بعد از دوره عمل‌آوری نمونه‌های مربوط و پس از خارج کردن این نمونه‌ها از آب  $60^{\circ}\text{C}$  مشاهده شد که هیچ یک از نمونه‌ها نتوانستند شکل طبیعی خود را حفظ کنند و خودبخود متلاشی شدند. از لحاظ ظاهری نمونه‌های با صفر درصد فیلر و  $4/5$  درصد قیر، و همچنین  $8$  درصد فیلر و  $4/5$  و  $5$  درصد قیر کاملاً متلاشی شدند. بقیه نمونه‌ها نیز دارای ترک‌های ریزی در سطح بودند که امکان آزمایش کشش غیر مستقیم را منتفی ساخت. همچنین مشاهده شد نمونه‌های با فیلر  $2$  درصد و قیر  $5$  و  $5/5$  درصد نسبت به سایر نمونه‌ها کیفیت ظاهری بهتری داشتند. از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که این مخلوط آسفالتی به دلیل منافذ زیاد به شدت در برابر رطوبت و سرما حساس است. البته باید در نظر داشت این آزمایش برای بررسی خصوصیات این مخلوط، آزمایش محافظه کارانه‌ای است.



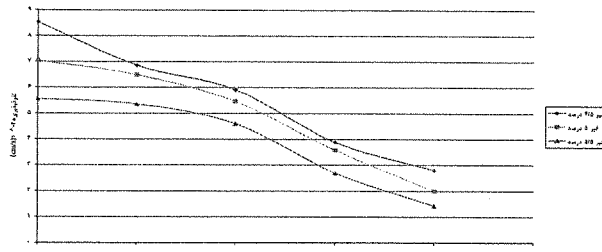
شکل (۲۱) تأثیر درصد قیر بر نیروی گسیختگی در آزمایش کشش غیر مستقیم برای درصد فیلرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

## آزمایش نفوذپذیری

شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نتایج آزمایش نفوذپذیری را نشان می‌دهد. شکل (۲۲) نشان می‌دهد که با افزایش درصد قیر از  $4/5$  به  $5/5$  درصد نفوذپذیری برای هر یک از درصد فیلرهای مصرفی کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش با توجه به درصد قیر از حدود ۲۲ تا ۴۹ درصد در تغییر است. شکل (۲۳) نشان می‌دهد که برای هر یک از درصدهای قیر، افزایش فیلر از صفر تا  $8$  درصد باعث کاهش نفوذپذیری در حدود ۷۰ درصد می‌شود. همچنین مقدار ضریب نفوذپذیری این مخلوط از  $10^{-3}$   $\text{cm/s}$  تا  $10^{-2}$   $\text{cm/s}$  متغیر است و با توجه به ضریب نفوذپذیری بالا، می‌تواند به عنوان لایه زهکش به کار رود.



شکل (۲۲) تأثیر درصد قیر بر نفوذپذیری برای درصد فیلرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.



شکل (۲۳) تأثیر درصد فیلر بر نفوذپذیری برای درصد قیرهای مختلف و ۱۵ ضربه تراکم.

## جمع‌بندی یافته‌ها

- از بررسی آزمایش‌هایی که روی مصالح موجود صورت گرفت با توجه به تعداد محدود مشاهدات نتایج زیر را می‌توان ارائه کرد:
- با آزمایش مارشال مشخص شد که با افزایش درصد فیلر، مقدار قیر مناسب برای تأمین بیشترین پایداری افزایش می‌یابد؛ یعنی، با افزایش فیلر از صفر به ۸، درصد قیر مناسب از ۴/۵ به ۵/۵ درصد افزایش می‌یابد.
- نتایج آزمایش مارشال نشان می‌دهد که مخلوط آسفالت ماسه‌ای با ۵/۵ درصد قیر بالاترین پایداری را داراست.
- از نتایج آزمایش مارشال می‌توان دریافت که فیلر مناسب برای دستیابی به بالاترین پایداری مقدار ۶ درصد است که در این درصد فیلر تراکم‌پذیری مخلوط نیز مناسب است.
- آزمایش تیرچه خمشی نشان می‌دهد که با کاهش درصد قیر و فیلر سختی مخلوط بالاتر می‌رود و به رفتار الاستیک نزدیک می‌شود.
- اضافه کردن ۶ درصد فیلر و ۵/۵ درصد قیر شکل‌پذیری مخلوط را خصوصاً برای تحمل بارهای دینامیکی بالا می‌برد.
- آزمایش کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد که مخلوط آسفالت ماسه‌ای با تراکم معادل ۱۵ ضربه چکش مارشال در برابر رطوبت و یخبندان مقاوم نیست.
- افزایش بیش از ۲ درصد فیلر باعث کاهش بار گسیختگی در آزمایش کشش غیر مستقیم می‌شود و در این درصد فیلر مخلوط آسفالتی دارای بیشترین مقاومت کششی است.
- نفوذپذیری این نوع مخلوط آسفالتی با افزایش قیر و فیلر کاهش می‌یابد و با توجه به ضریب نفوذپذیری بالای آن می‌تواند به عنوان لایه زهکش بکار رود.
- با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، مخلوط آسفالت ماسه‌ای متشکل از ۵/۵ درصد قیر و ۶ درصد فیلر نسبت به وزن کل مخلوط با ۱۵ ضربه تراکم عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر مخلوطها از خود نشان داد.

## زیر نویس‌ها

- |                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| 1- Self-healing            | 3- U.S. Army Corps of Engineers |
| 2- Lean Sand Asphalt (LSA) | 4- Lubricant                    |

## مراجع

- [1] Greegan, J. and Monosmith, L. (1996) *Asphalt Concrete Water Barriers for Embankment Dams*. ASCE Press, New York, N.Y
- [2] TACWD (1985) *Recommendation for the Use of Asphalt in Hydraulic Engineering*, Technical Advisory Committee on Water Defenses, No 37.
- [3] AI (1976) *Asphalt in Hydraulics*, the Asphalt Institute, MS-12.
- [4] ASTM (1997) *Road and Paving Materials; Paving Management Technologies. Annual Book of Standards*, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.03.
- [5] رضایی، آرش، (۱۳۷۷) "بررسی عملکرد پوشش‌های ساخته شده از آسفالت در برابر آب" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران.