

# ارزیابی تأثیر فیلرهای آهکی در کاهش آثار تخریبی رطوبت و یخبندان با استفاده از آزمایش‌های کشش غیر مستقیم و مقاومت فشاری در مخلوط‌های آسفالتی

رضا علی نسب<sup>۱</sup>، امیر کاووسی<sup>۲\*</sup>، امین احمدی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

reza.alinasab@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۴/۲۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۳/۱۶]

**چکیده-** هدف این پژوهش بررسی تأثیر دو نوع فیلر آهکی (پودر سنگ آهک و آهک هیدراته) بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی به خصوص در برابر عریان‌شدگی است. عریان‌شدگی یکی از انواع خرابی‌های مخلوط آسفالتی است که به دلیل کاهش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و جدا شدن آن‌ها بروز می‌کند. این پدیده در شرایط استفاده از سنگدانه‌های اسیدی و سیلیسی که دارای بارالکتریکی سطحی منفی است شدید می‌شود. در این پژوهش مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مصالح سنگی معادن شرق و غرب تهران و با درصدهای مختلف فیلر آهکی و آهک هیدراته تهیه شدند و طرح اختلاط بهینه آنها به روش مارشال به دست آمد. ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت و یخبندان با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده و آزمایش مقاومت فشاری با مقایسه مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط اشباع و خشک انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن حدود ۴ درصد فیلر آهکی و مقادیر ۱ تا ۱/۵ درصد آهک هیدراته به ترکیب سنگدانه‌ها نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک افزایش یافته و میزان عریان‌شدگی سنگدانه‌ها در مخلوط به شکل چشم‌گیری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بیش‌تر فیلر آهکی و آهک هیدراته، مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت، به دلیل سخت‌شدن مخلوط آسفالتی، کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** عریان‌شدگی، فیلر آهکی، آهک هیدراته، مقاومت کششی غیر مستقیم، مقاومت فشاری

## ۱- مقدمه

خرابی‌های ناشی از رطوبت شامل عریان‌شدگی<sup>۱</sup> (که پس از آن به شن‌زدگی خواهد شد) از جمله خرابی‌های شایع به ویژه در نقاط مرطوب و تحت شرایط یخبندان است که منجر به کاهش عمر روسازی‌های کشور می‌شوند [۱]. عریان‌شدگی

۱. Stripping

عبارت است از شکسته‌شدن پیوند بین سطح مصالح سنگی و قیر [۲]. جدا شدن قیر از سنگدانه‌ها موجب کاهش مقاومت و انسجام لایه آسفالتی شده که این امر نیز منجر به از بین رفتن لایه‌های آسفالتی می‌شود. عریان‌شدگی مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی نه تنها خود به عنوان یک خرابی مستقل محسوب می‌شود بلکه می‌تواند مقدمه‌ای برای ایجاد خرابی‌های دیگر از قبیل ترک‌خوردگی‌های طولی و

کربن سیاه و انواع پلیمر برای کاهش عریان‌شدگی با موفقیت استفاده شده است [۸].

## ۲- عوامل مؤثر در بروز پدیده عریان‌شدگی

مشخصات مصالح سنگی و خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها از قبیل جنس مصالح، تخلخل سنگدانه‌ها، قابلیت جذب آب و مشخصات فیزیکی فیلر و دانه‌بندی آن از عواملی است که بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار است [۹ و ۱۰]. سنگدانه‌های سیلیسی (دارای بار سطحی منفی-الکترونگاتیو) که به سنگدانه‌های آب دوست موسوم‌اند، بیشتر از سنگدانه‌های آهکی (دارای بار سطحی مثبت-الکتروپزیتیو) که به سنگدانه‌های آب گریز موسوم‌اند، دچار عریان‌شدگی می‌شوند [۱۱]. انتخاب نوع و میزان قیر با توجه به شرایط جوی منطقه، ترافیک، جنس مصالح سنگی، نوع و ضخامت روسازی و نحوه اجرای آن صورت می‌گیرد. نوع منبع قیر، فرآیند پالایش، ویسکوزیته قیر، ضخامت فیلم قیر و بسیاری از خصوصیات قیر در حساسیت عریان‌شدگی مصالح مؤثر است اما تأثیر آن‌ها نسبت به نوع سنگدانه از اهمیت کمتری برخوردار است. برای ایجاد بیشترین تماس بین قیر و سطح مصالح سنگی، قیر باید دارای ویسکوزیته مناسب باشد تا بتواند سطح سنگدانه را به خوبی بپوشاند. توانایی قیر ذوب شده برای ایجاد تماس با سطح سنگدانه، قدرت پوشش مصالح سنگی نامیده می‌شود که به ویسکوزیته قیر وابسته است. هر اندازه ویسکوزیته قیر کمتر باشد قدرت پوشش آن بیشتر خواهد بود [۹]. از طرف دیگر هر قدر ویسکوزیته قیر مورد استفاده (البته پس از چسبیدن به سطح سنگدانه‌ها نه قبل از تماس قیر با سطح سنگدانه‌ها) بیشتر باشد مخلوط آسفالتی مقاومت بیشتری در مقابل عریان‌شدگی از خود نشان خواهد داد [۱۲].

وجود گرد و غبار روی سنگدانه‌ها، فضای خالی زیاد مخلوط آسفالتی، ترک‌های اجرایی و تراکم ناکافی نیز تأثیر زیادی بر وقوع پدیده عریان‌شدگی دارند. بر اساس مطالعات انجام گرفته فیلر به دو طریق «مکانیکی» و «فیزیکی - شیمیایی» باعث بهبود

عرضی، شیارافتادگی مسیر چرخ، شن‌زدگی، ایجاد چاله و ترک‌های پوست سوسماری باشد. حضور آب در روسازی اگر با سیکل‌های یخبندان و ذوب همراه باشد، آثار تخریبی آن بیشتر می‌شود [۳]. علت اصلی عریان‌شدگی به طور کلی به دو مکانیزم شکست چسبندگی<sup>۱</sup> و شکست پیوستگی<sup>۲</sup> تفکیک می‌شود. در غیاب آب چسبندگی قیر به مصالح سنگی بدون مشکل است، اما در حضور آب مصالح سنگی تمایل بیشتری برای آغشته شدن با آب دارند، پس حضور آب باعث ضعیف شدن یا از بین رفتن اتصال قیر-سنگدانه (چسبندگی) می‌شود. کاهش پیوستگی در اثر نرم شدن قیر در مخلوط آسفالتی اتفاق می‌افتد که در این حالت شکست پیوند میان اجزاء مخلوط آسفالتی از سطح روسازی شروع شده و باعث جدا شدن سنگدانه‌ها از سطح روسازی و تشدید نفوذ آب به بدنه روسازی شود. در برخی موارد اثر هم‌زمان این دو مکانیزم در روسازی منجر به بروز عریان‌شدگی زود هنگام در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود [۱۳ و ۱۴]. شرایط محیطی، نوع و کاربرد مخلوط آسفالتی، مصالح سنگی نامرغوب، نوع قیر و ویسکوزیته زیاد، وجود گرد و غبار در سطح سنگدانه‌ها، عملیات اجرایی نامناسب و تراکم ناکافی مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی زیاد، بارگذاری شدید ترافیکی و ... بر وقوع پدیده عریان‌شدگی تأثیرگذار است [۱۴ و ۱۷]. با این وجود اصلی‌ترین عامل وقوع این پدیده، ایجاد فشار آب حفره‌ای در مخلوط آسفالتی اشباع شده در اثر عبور بار ترافیکی، و حضور طولانی مدت آب در لایه آسفالتی است [۳].

عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی در اثر رطوبت را می‌توان با انتخاب مصالح مرغوب، طرح اختلاط مناسب، افزایش ضخامت لایه آسفالتی، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی، اجراء و نظارت فنی دقیق، تراکم مناسب و زهکشی مطلوب، تا حد زیادی کنترل نموده و کاهش داد. تاکنون از برخی مواد افزودنی از قبیل آهک هیدراته، سولفور، آنتی‌اکسیدان‌ها، مواد ضد عریان‌شدگی مایع، لاستیک،

۱. Adhesion

۲. Cohesion

رس و کلسیم در آهک، تبادل یونی و واکنش پوزولانی انجام می‌شود [۱۵ و ۱۴]. همچنین تصور می‌شود که آهک با اسید کربوکسیلیک قیر واکنش شدیدی انجام داده و اسیدهای کمتری به وسیله سنگدانه جذب می‌شود پس چسبندگی بین قیر و سطح سنگدانه قوی‌تر می‌شود. همچنین آهک خواص شیمیایی و قطبیت سطح سنگدانه را تغییر داده و چسبندگی قوی‌تری با قیر ایجاد می‌کند [۱۵]. مطالعات نشان داده است که مقدار آهک هیدراته مورد نیاز برای بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت بین حدود ۱ تا ۲ درصد وزنی مصالح سنگی است، برخی از مخلوط‌ها به مقدار بیشتری (حدود ۲/۵ درصد) آهک برای دستیابی به خصوصیت مطلوب نیاز دارند. هرچه مقدار ریزدانه در دانه‌بندی مصالح سنگی بیشتر باشد به دلیل افزایش سطح مخصوص سنگدانه‌ها، به مقدار بیشتری آهک برای بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی نیاز است [۱۶ و ۱۷]. مطالعات نشان داده است که آب در سطح سنگدانه PH بالایی دارد و به همین دلیل مواد ضد عریان‌شدگی مایع که در سطح می‌مانند در آب با PH بالا محلول هستند. آهک هیدراته یک اتصال قوی بین قیر و سنگدانه ایجاد می‌کند که در مقابل عریان‌شدگی در همه سطوح PH مقاومت می‌کند [۱۸].

#### ۴- مصالح مصرفی در پژوهش

در این پژوهش از دو نوع قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه‌های تهران و اصفهان استفاده شد. مصالح سنگی نیز از دو منطقه شرق و غرب تهران تهیه شدند. در تهیه و ساخت مخلوط‌ها از دو نوع فیلر شامل فیلر سنگ آهک و آهک هیدراته استفاده شد که مشخصات آن‌ها در جداول ۱ و ۲ ملاحظه می‌شود. مشخصات فیزیکی و مکانیکی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش نیز در جداول ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود.

جدول ۱ - نتایج آزمایشات شیمیایی آهک هیدراته

کربنات‌ها (CO <sub>۳</sub> ) (%)	افت وزنی در اثر حرارت (L.O.I) (%)	سولفات‌ها (SO <sub>۳</sub> ) (%)	درصد اکسید				
			منیزیم (MgO)	کلسیم (CaO)	آهن (Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> )	آلومینیوم (Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub> )	سیلیسیم (SiO <sub>۲</sub> )
۳/۸۲	۲۴/۷۵	۰/۶۷	<۰/۰۱	۷۲/۲	۰/۵	۰/۴	۱/۲۶

چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها می‌شود. از لحاظ مکانیکی فیلر باعث افزایش ویسکوزیته قیر شده و چسبندگی قیر و سنگدانه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر برخی فیلرها در سطح تماس قیر با سنگدانه واکنش‌های فیزیکی - شیمیایی ایجاد می‌نمایند؛ به خصوص وقتی که فیلر از جنس مصالح بازی مثل پودر سنگ آهک یا پودر آهک هیدراته باشد که این واکنش شدیدتر و عمیق‌تر است [۱۳].

#### ۳- مکانیزم کاهش حساسیت رطوبتی

از آنجا که پدیده عریان‌شدگی بیشتر به خاصیت چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی بستگی دارد پس برای اصلاح و ترمیم این خرابی، باید خواص چسبندگی قیر و سنگدانه بهبود یابد. برای بهبود بخشیدن و محکم‌تر شدن اتصالات بین قیر و مصالح سنگی می‌توان از مواد افزودنی استفاده کرد که به صورت فیلر یا مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۸]. امروز افزودنی‌های زیادی برای کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌روند که آهک هیدراته پرکاربردترین آن‌هاست. همچنین آهک هیدراته به دلیل اکسید شونده بودن می‌تواند سرعت سخت شدن آسفالت را کاهش دهد. از دیگر مواد افزودنی برای کاهش عریان‌شدگی می‌توان از مواد افزودنی مایع (آمین‌ها و دی‌آمین‌ها)، مواد پلیمری، سیمان و ... نام برد [۱].

در رابطه با چرایی و چگونگی تاثیرگذاری آهک بر مخلوط آسفالتی نظریات مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- ۱) آهک پیوند بین کلسیم و سیلیکات در سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد.
- ۲) خاصیت بازی آهک منجر به چسبندگی بهتر آن با قیر که خاصیت اسیدی دارد می‌شود.
- ۳) در سنگدانه‌هایی پوشیده شده با رس، بین سیلیکات

جدول ۲ - نتایج آزمایشات فیزیکی آهک هیدراته

وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	مانده روی الک شماره ۲۰۰ (%)	مانده روی الک شماره ۳۰ (%)	رطوبت آزاد (%)	اکسید کلسیم هیدراته نشده (%)	دی اکسید کربن (%)	اکسید کلسیم در نمونه (%)
۲/۱۲	۰/۵	۰/۱۳	۰/۸۸	۵/۳۴	۳/۸۲	۹۵/۹۵

جدول ۳ - نتایج آزمایش قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران

درجه نفوذ بعد از TFO (mm)	ویسکوزیته بعد از TFO (cSt)	داکتیلیته بعد از TFO (cm)	افت وزنی (%)	ویسکوزیته سینماتیکی (cSt)	داکتیلیته (cm)	نقطه نرمی (C°)	درجه نفوذ (۰/۱ mm)
۰/۱	۳۷۱	+۱۰۰	۰/۰۲	۲۹۲	+۱۰۰	۴۹	۶۰

جدول ۴ - نتایج آزمایش قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه اصفهان

درجه نفوذ بعد از TFO (۰/۱ mm)	ویسکوزیته بعد از TFO cSt	داکتیلیته بعد از TFO cm	درصد افت وزنی (%)	ویسکوزیته سینماتیکی (cSt)	داکتیلیته (cm)	نقطه نرمی (C°)	درجه نفوذ (۰/۱ mm)
۰/۱	۳۸۴	+۱۰۰	۰/۰۲	۳۱۰	۱۵۰	۴۹	۶۰

بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت، دو نوع فیلر شامل فیلر سنگ آهک و آهک هیدراته به عنوان افزودنی ضد عریان‌شدگی در ترکیب سنگدانه‌ها استفاده شدند. سپس مخلوط‌هایی با درصدهای مختلف فیلر سنگ آهک (۲، ۴ و ۶ درصد) و آهک هیدراته (۱، ۱/۵ و ۲ درصد) تهیه شدند. حساسیت رطوبتی نمونه‌های تهیه شده، با استفاده از آزمایش‌های کشش غیر مستقیم و مقاومت فشاری مورد ارزیابی قرار گرفتند.

### ۶- نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم مطابق با استاندارد AASHTO T-۲۸۳ انجام شد که در شکل‌های ۱ و ۲ نتایج نمونه‌های حاوی آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک به ترتیب در شرایط خشک و اشباع ملاحظه می‌شوند.

### ۵- روش آزمایش

در این پژوهش، با توجه به اینکه نوع و جنس مصالح سنگی تأثیر زیادی بر پدیده عریان‌شدگی دارد، دو نوع مصالح پر کاربرد در عملیات آسفالتی در استان تهران با جنس متفاوت انتخاب شد؛ و با دو نوع قیر پالایشگاه‌های تهران و اصفهان مخلوط آسفالتی تهیه و آزمایش‌های لازم روی آنها انجام شد. سپس با استفاده از روش مارشال مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های آسفالتی به دست آمد. به این منظور مصالح سنگی شرق تهران با قیر پالایشگاه تهران و مصالح سنگی غرب تهران با قیر پالایشگاه اصفهان مخلوط شدند. با توجه به نتایج مارشال، درصد قیر بهینه برای مصالح شرق و غرب تهران به ترتیب ۶ و ۶/۲ درصد به دست آمد. از آنجا که هر دو نوع مصالح سنگی سیلیسی بوده و در مقابل پدیده عریان‌شدگی مقاوم نبودند برای

همان‌گونه که ملاحظه شد با افزودن نسبت‌های مختلف آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک به نمونه‌ها، مقدار TSR ابتدا افزایش می‌یابد. اما با استفاده بیش از ۱/۵ درصد آهک هیدراته و ۴ درصد فیلر سنگ آهک نتیجه برعکس شده و مقدار TSR کاهش می‌یابد. علت این امر سختی بیش از حد ماستیک قیر و فیلر و مستعد شدن نمونه‌ها در برابر ترک خوردگی است که مقدار TSR برای این مقادیر آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک کاهش می‌یابد. بنابر نتایج این پژوهش، استفاده از آهک هیدراته به میزان بیش از ۱/۵ درصد وزن مصالح سنگی در مخلوط و فیلر سنگ آهک به میزان بیش از ۴ درصد وزن مصالح سنگی توصیه نمی‌شود زیرا علاوه بر اینکه استفاده بیش از حد از فیلرهای آهکی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست، از نظر فنی نیز منجر به افزایش سختی مخلوط شده و با کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط، کاهش مقاومت در برابر عریان‌شدگی نیز مشاهده می‌شود.

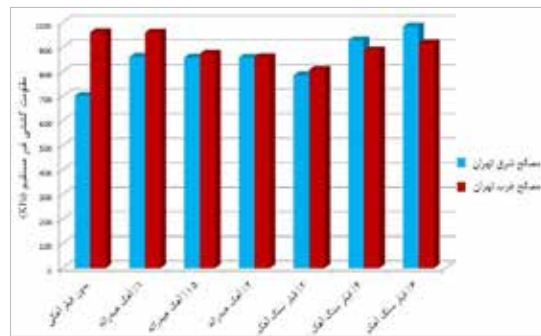
پس نتیجه این‌گونه شد که افزایش مقاومت کششی نمونه‌های اشباع نیز با افزودن هر دو فیلر آهکی بیشتر از افزایش مقاومت نمونه‌های خشک است.



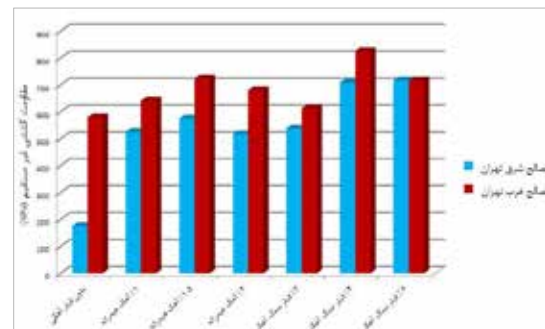
شکل ۴: طریقه ساخت و شکست نمونه‌ی آزمایش مقاومت فشاری

## ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نیز روی نمونه‌های تهیه شده با درصدهای مختلف فیلر آهکی انجام شد. در این آزمایش نمونه‌ها به روش استاندارد ASTM D1074 ساخته شدند. تراکم نمونه‌ها با اعمال فشار استاتیکی از دوطرف نمونه صورت گرفت و شکست نمونه‌ها به روش استاندارد ASTM D1075 و با سرعت بارگذاری  $0.05 \text{ mm}/(\text{min} \cdot \text{mm})$  ارتفاع نمونه  $50.8 \text{ min}$  (اینچ) صورت گرفت. طریقه اعمال بار بای تراکم نمونه‌ها و



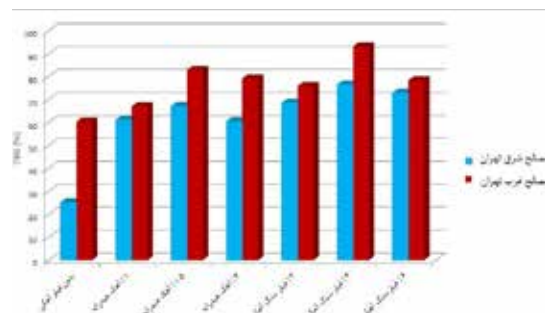
شکل ۱: نتایج مقاومت کششی نمونه‌های خشک



شکل ۲: نتایج مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده

شاخص TSR معیاری از میزان حساسیت رطوبتی نمونه‌ها است که از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده بر مقاومت کششی نمونه‌های خشک به دست می‌آید. شاخص TSR نمونه‌های آسفالتی شاهد و نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف فیلرهای سنگ آهک و آهک هیدراته در شکل ۳ آورده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده در تمامی موارد ملاحظه شد که نمونه‌های تهیه شده با مصالح سنگی غرب تهران نسبت به نمونه‌های تهیه شده با مصالح سنگی شرق تهران مقاومت بهتری در برابر رطوبت از خود نشان داده‌اند.

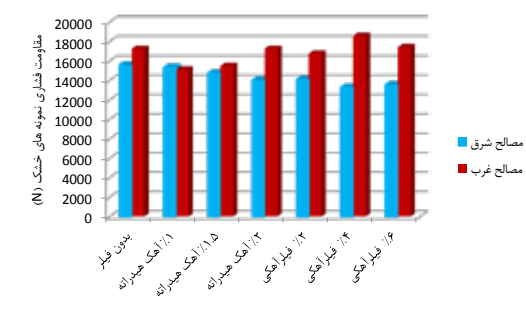


شکل ۳: نتایج TSR نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف فیلر

برای ارزیابی حساسیت رطوبتی در این آزمایش و بر اساس استاندارد ASTM D1075 از شاخص نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک (شاخص مقاومت باقیمانده<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزودن آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک به مخلوط‌های آسفالتی این نسبت افزایش یافته است. اما نکته قابل توجه در این آزمایش آن است که با افزایش مقادیر آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک در مخلوط آسفالتی، مقاومت باقیمانده به خصوص در نمونه‌های A در حال افزایش است. برخلاف آزمایش کشش غیر مستقیم این مقدار به جز در مورد استفاده از آهک در نمونه‌های B کاهش نیافته است که این مسئله می‌تواند به دلیل وجود فشار حفره‌ای آب در نمونه‌های اشباع شده باشد که موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط اشباع می‌شود بدون آنکه مقاومت نمونه در برابر حساسیت رطوبتی افزایش یابد.

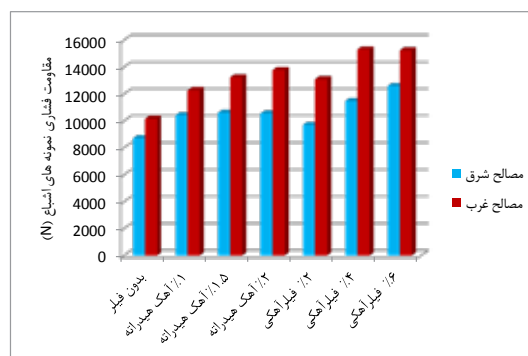
با دقت در نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌توان به مزایای فیلهای آهکی پی برد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با توجه به اینکه بر اساس نشریه ۲۳۴، نسبت مقاومت فشاری اشباع به مقاومت خشک نمونه‌ها نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد، نمونه‌هایی که بدون فیلر آهکی تهیه شده‌اند. در مقابل پدیده عریان‌شدگی مقاوم نیست اما با استفاده از آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک مقاومت نمونه‌ها در برابر پدیده عریان‌شدگی افزایش چشم‌گیری داشته است. نکته قابل تأمل در آن آزمایش‌ها این است که با افزودن این فیلهای در ابتدا مقاومت نمونه در برابر عریان‌شدگی افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد اما با افزایش مقادیر آهک هیدراته و فیلر آهکی به ترتیب به میزان ۲ و ۶ درصد افزایش چندانی حاصل نمی‌شود. از نظر اقتصادی نیز کاربرد بیش از ۱ یا ۱/۵ درصد آهک هیدراته و بیش از ۴ درصد فیلر آهکی در مخلوط مقرون به صرفه نیست.

شکست نمونه‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های خشک

همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داد، که در بسیاری موارد مقاومت فشاری نمونه‌های آسفالتی حاوی فیلهای سنگ آهک و آهک هیدراته در حالت خشک نسبت به نمونه‌های شاهد کمتر است. با بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع شده (شکل ۶) می‌توان به مزایای استفاده از فیلر آهکی در مخلوط آسفالتی پی برد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزودن فیلهای سنگ آهک و آهک هیدراته به مخلوط‌های آسفالتی، مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع در هر دو مورد افزایش یافته است که بیانگر مزایای کاربرد آهک در مخلوط آسفالتی و بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت است.

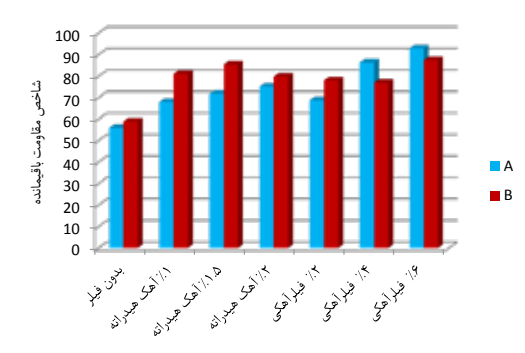


شکل ۶ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های اشباع

۱. Index of Retained Strength



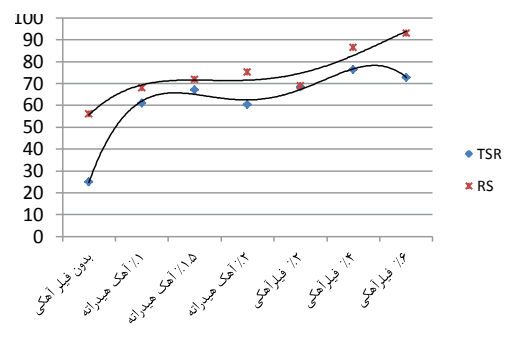
شکل ۹ مقایسه نتایج TSR و RS نمونه های تهیه شده با مصالح سنگی غرب تهران



شکل ۷ نسبت مقاومت فشاری نمونه های اشباع به نمونه های خشک

## ۸- تحلیل نتایج

با مقایسه مقادیر مقاومت نمونه های اشباع به نمونه های خشک، مشاهده می شود که نسبت TSR در مخلوط های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته و ۶ درصد فیلر سنگ آهک دچار افت شده است؛ در صورتی که در آزمایش مقاومت فشاری، RS تنها برای استفاده از ۲ درصد آهک هیدراته در مصالح سنگی غرب تهران دچار افت شده است. این مسئله می تواند به دلیل به وجود آمدن فشار آب حفره های در نمونه های اشباع باشد که با وجود کاهش مقاومت کششی نمونه ها در شرایط اشباع، مقاومت فشاری نمونه ها اشباع شده افزایش یافته و موجب افزایش پارامتر RS شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که گرچه آزمایش مقاومت فشاری نیز می تواند معیاری برای ارزیابی پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی باشد اما آزمایش کشش غیر مستقیم برای ارزیابی پتانسیل عریان شدگی مخلوط های آسفالتی نتایج منطقی تری به دست می دهد.



شکل ۸ مقایسه نتایج TSR و RS نمونه های تهیه شده با مصالح سنگی شرق تهران

در شکل های ۹ و ۱۰ مقادیر TSR و RS برای نمونه های تهیه شده با یکدیگر مقایسه شده اند. همان گونه که مشاهده می شود روند تغییرات هر دو شاخص با هم یکسان است اما در مواردی که از ۲٪ آهک هیدراته و ۴٪ فیلر آهکی استفاده شده است مقادیر RS روند افزایشی نشان می دهند در صورتی که مقادیر TSR در این مقادیر کاهش یافته اند.

## ۹- نتیجه گیری

در این پژوهش که از دو نوع مصالح سنگی تهیه شده از کارخانه های شرق و غرب تهران و دو نوع قیر پالایشگاه های تهران و اصفهان برای تهیه مخلوط آسفالتی استفاده شد نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- با افزودن جداگانه درصدهای مختلف آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک به نمونه ها، پارامتر TSR حاصل از آزمایش کشش غیر مستقیم ابتدا افزایش نشان داد اما با استفاده بیش از ۱/۵ درصد آهک هیدراته و ۴ درصد فیلر سنگ آهک نتیجه برعکس شده و مقدار TSR کاهش یافت. بنابراین بر اساس نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم، استفاده از آهک هیدراته به میزان بیش از ۱/۵ درصد وزن مصالح سنگی و فیلر سنگ آهک به میزان بیش از ۴ درصد وزن مصالح سنگی توصیه نمی شود، زیرا نه تنها استفاده بیش از حد از فیلرهای آهکی از نظر اقتصادی توجیه پذیر نیست بلکه موجب سخت شدگی بیشتر و در نتیجه افت مقاومت مخلوط آسفالتی می شود.
- ۲- بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری با

[۳] دهناد محمدحسین، «بررسی تأثیر تناوب بارگذاری و تغییر دما بر پدیده برهنگی مخلوطهای آسفالتی» پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰

[4] Epps J.A., Sebaaly J.P., Maher M.R., McCann M.B., "Comptability of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design" NCHRP Report, 2000.

[۵] فخری منصور، توسطی خیری پژوهان «ارائه یک مدل جهت بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف بر پدیده عریان‌شدگی مخلوطهای آسفالتی گرم» هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸

[6] Solaimanian M, Harvey J, Tahmoressi M, Tandon V, "Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Pavements." Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements, a National Seminar, San Diego, California, February 4-6, 2003.

[7] Brown, E.R., Kandhal, P.S., and Zhang, J. "Performance Testing for Hot Mix Asphalt." National Center for Asphalt Technology (NCAT), Report 2001-05, Alabama, 2001.

[8] Subrata K.D., "Evaluation of AsphLT-Aggregate Bond and Stripping Potential" A Thesis in Civil Engineering, Texas Tech University, 2004.

[9] Sengoz B., Agar E., "Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot Mix Asphalt", Journal of Building and Environment 4, 23621 – 3628, 2007.

[10] Ghaffarpour G.J., "Estimation of Resistance to Moisture Destruction in Asphalt Mixtures" Construction and Building Materials 23, 2324–2331, 2008.

[11] Airey G.D., Collop A.C., Zoorob S.E., Elliot R.C., "The Influence of Aggregate, Filler and Bitumen on Asphalt Mixture Moisture Damage" Construction and Building Materials 22, 2015–2024, 2008.

[12] Maupin G.W., "Additional Asphalt to Increase the Durability of Virginia's Superpave Surface Mix-

افزودن جداگانه هر دو فیلسنگ آهک و آهک هیدراته به مخلوطهای آسفالتی، هم مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده افزایش می‌یابد این امر بیانگر مزایای کاربرد آهک در مخلوطهای آسفالتی و بهبود مقاومت مخلوط در برابر رطوبت است.

۳- با افزودن مقادیر آهک هیدراته و فیلسنگ آهک به مخلوط آسفالتی، مقاومت باقیمانده در آزمایش مقاومت فشاری مرتب در حال افزایش بود، برخلاف آزمایش کشش غیر مستقیم، این مقدار به جز در مورد استفاده از آهک هیدراته در نمونه‌های تهیه شده با مصالح سنگی غرب تهران کاهش نیافته است. این مسئله می‌تواند به دلیل وجود فشارهای حفره‌ای آب در نمونه‌های اشباع شده باشد که موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط اشباع می‌شود.

۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نیز نشان داد که با افزودن فیلسنگ آهک و آهک هیدراته در ابتدا مقاومت نمونه‌ها در برابر عریان‌شدگی را افزایش می‌دهد اما با افزایش مقادیر آهک هیدراته و فیلسنگ آهکی به ۲ و ۶ درصد در نمونه‌های تهیه شده، این افزایش زیاد نبود. پس شاید استفاده بیش از ۱ یا ۱/۵ درصد آهک هیدراته و بیش از ۴ درصد فیلسنگ آهکی از نظر اقتصادی و فنی مناسب نیست.

۵- آهک هیدراته نسبت به فیلسنگ آهک ریزدانه‌تر و دارای دانه بندی یکنواخت‌تری بود، پس سطح ویژه آن نیز بیشتر از سطح ویژه فیلسنگ آهک است بنابراین بهتر می‌تواند سطح سنگدانه را پوشش دهد، با مصرف آهک هیدراته کمتر، می‌توان به نتیجه بهتری دست یافت.

## ۹- مراجع

[1] Atakan A, Samlioglu K, Tayfur S, Ozen H, "Effects of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials 19, 11–18, 2005.

[2] Patrick Lavin, "A Comparison of Liquid Antistrip Additives and Hydrated Lime Using AASHTO T283" Construction Chemical Technical Director ARR-MAZ Products.



ture Susceptibility of Asphalt Mixes” Department Civil and Architectural Engineering University of Wyoming P.O. Box 3295, 2002.

[17] Baha V.K., Mehmet Y., “The Effects of Using Lime and Styrene-Butadiene-Styrene on Moisture Sensitivity Resistance of Hot Mix Asphalt” Construction and Building Materials 23, 1999-2006, 2008.

[18] Tarrer R., “Use of Hydrated Lime to Reduce Hardening and Striping in Asphalt Mixes” Auburn University.

es” Virginia Transportation Research Council, 2003.

[۱۳] عبدی علی، «ارائه یک رویکرد طرح مخلوط برای جلوگیری از عریان شدگی مصالح سنگی» پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.

[14] Little D.N., Epps J.A., Updated By: Peter E. Sebaaly, “The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt” National Lime Association, 2006.

[15] National Lime Association, “Hydrated Lime - A Solution for High Performance Hot Mix”, 2001.

[16] Hunter E.R., Ksaibati Kh., “Evaluating Mois-