

## ارزیابی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی پلی تک با استفاده از آزمایش‌های لاتمن اصلاح‌شده و چسبندگی Pull-off

میکائیل ناصری یالقوز آفاج\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی،

سلماس

مهدی ملاولی، کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر

بابک گلچین، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

رامین مشک‌آبادی، استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

Email: mi.ny1356@iaau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

### چکیده

خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی عموماً به علت جدا شدن قیر از سطح مصالح سنگی و وجود آب رخ می‌دهد. این نوع خرابی سبب عریان‌شدگی و خرابی‌های زودرس می‌شود. بررسی عوامل مؤثر بر وقوع این نوع خرابی، می‌تواند در بهبود روند طراحی و تولید مخلوط‌های آسفالتی مفید باشد. در سال‌های گذشته، پژوهش‌ها و تلاش‌های قابل توجهی برای کاهش این نوع خرابی‌ها انجام شده است. در این مقاله، اثر افزودنی Polytec 505، به عنوان یک ماده جدید با آمین‌های پیچیده، که ویژگی اسیدی قیر را کاهش می‌دهند، بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده است. بدین منظور، از دو نوع مصالح گرانیته و آهکی و قیر ۶۰-۷۰ استفاده گردیده است. برای بررسی خرابی‌های رطوبتی از آزمایش لاتمن اصلاح‌شده و برای ارزیابی خصوصیات پیوستگی قیر و نیز چسبندگی قیر به سنگدانه از آزمایش‌های Pull-off استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این افزودنی موجب افزایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های با مصالح گرانیته و نیز مصالح آهکی شده و در نتیجه عملکرد این نمونه‌ها در برابر خرابی‌های رطوبتی افزایش می‌یابد. این بهبود، با افزایش میزان استفاده از این افزودنی، بیشتر افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش Pull-off نشان می‌دهد که استفاده از این افزودنی، مقاومت پیوستگی و چسبندگی Pull-off را بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت، خرابی رطوبتی، پیوستگی و چسبندگی، Polytec 505، آزمایش Pull-off.

## ۱. مقدمه

کاهش مقاومت و دوام در مخلوط‌های آسفالتی بر اثر رطوبت را خرابی رطوبتی می‌نامند. خرابی رطوبتی به دو فرآیند از دست دادن چسبندگی و از دست دادن پیوستگی تقسیم می‌شود (نایدو و همکاران، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای درک بهتر پدیده خرابی رطوبتی در ترکیبات مخلوط آسفالتی انجام شده است. در این راستا، تغییرات بسیاری در مواد و تکنولوژی‌های موجود اعمال شده تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نسبت به رطوبت بهبود یابد. تلاش برای تغییر جنس مصالح سنگی در تولید مخلوط‌های آسفالتی و استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در طرح اختلاط آسفالت، از مهم‌ترین روش‌هایی است که در این زمینه استفاده می‌شود. تغییر جنس مصالح سبب افزایش فاصله حمل و در نتیجه موجب افزایش هزینه‌های اقتصادی طرح می‌شود. از این‌رو، افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مناسب‌ترین روش در بهبود رفتار مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت به نظر می‌رسند. این افزودنی‌ها به دو گروه اضافه شونده به قیر و اضافه شونده به سنگدانه‌ها تقسیم می‌شوند. استفاده از افزودنی‌هایی که به قیر اضافه می‌شوند، مورد توجه بیشتری در صنعت آسفالت است. در این تحقیق، اثر یک افزودنی شیمیایی به نام Polytec 505 که به قیر اضافه می‌شود، بر وقوع خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده است.

در سال‌های گذشته، پژوهش‌های مختلفی در زمینه استفاده از افزودنی‌ها، برای بهبود رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، صورت گرفته است. عطازاده و گلچین (۲۰۱۸) اثر نانولوله کربنی را در بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گزارش کردند. عبدالواحد و همکاران (۲۰۲۲) اثر مثبت اضافه کردن ۳ تا ۴ درصد نانوسیلیس و نانورس به قیر را در کاهش آسیب‌های رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر، سینگ و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر زایکوترم بر

پایداری مارشال حفظ شده و نسبت استحکام کششی بررسی شد. این افزودنی موجب افزایش مقاومت مخلوط در مقابل خرابی‌های رطوبتی گردید. بیرامی و همکاران (۲۰۱۸) گزارش نمودند که نانواکسید آلومینیوم و آهن می‌تواند مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مواد بازیافتی شیشه‌ای را بهبود دهد. فخری (۲۰۲۱) اثر مناسب اختلاط نانواکسید روی و نانواکسید گرافن را در قیر بر نتایج آزمون کشش غیرمستقیم، خمش نیم‌دایره‌ای و Pull-off ارائه نمود. حامدی و همکاران (۲۰۲۱)، از نظریه انرژی آزاد سطحی در پیوستگی قیر و چسبندگی قیر به سنگدانه در حضور دو ماده کاپلیمر قطبی و کاپلیمر اتیلن با قیر معدنی استفاده کردند. در پژوهشی دیگر توسط حامدی و همکاران (۲۰۲۱)، پلی-بوتیلن، استحکام مخلوط آسفالتی را در برابر آسیب رطوبتی بهبود داد. در یک مطالعه توسط ونگ و همکاران (۲۰۲۰)، اثر عوامل ضد عریان‌شدگی توسط روش انرژی آزاد سطحی بر آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب چند عامل ضد عریان‌شدگی با هم می‌تواند پایداری رطوبتی آسفالتی را بهبود دهد. سعیدی و همکاران (۲۰۲۰)، اثر نانوآهک هیدراته و نانوکربنات کلسیم را بر حساسیت رطوبتی گلسفالت (آسفالت شیشه‌ای) در آزمون AASHTO T283 و نیز روش انرژی آزاد سطحی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از هر دو نوع نانو مواد به طور قابل توجهی مقاومت رطوبتی را بهبود می‌بخشد. ناتادامادجا و همکاران (۲۰۲۰) تحقیقی با هدف ارائه تحلیل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت گرم با افزودن مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی Wetbond، Wetfix-BE، SP و آهک هیدراته انجام دادند. مشخص شد که نمونه‌هایی که با استفاده از آهک هیدراته تهیه شده‌اند، در مقایسه با نمونه‌هایی که با استفاده از سایر مواد افزودنی تهیه شده‌اند، عملکرد مطلوب‌تری دارند.

به نام چسبندگی و پیوستگی Pull-off جهت بررسی مکانیسم‌های چسبندگی قیر- سنگدانه و پیوستگی قیر به همراه یک آزمایش مکانیکی متداول به نام آزمایش لاتمن اصلاح‌شده در حضور درصد‌های مختلف افزودنی ضد عریان‌شدگی مایع Polytec 505 استفاده شده است تا اثر استفاده از این افزودنی بر خصوصیات پیوستگی و چسبندگی قیر و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مطالعه شود.

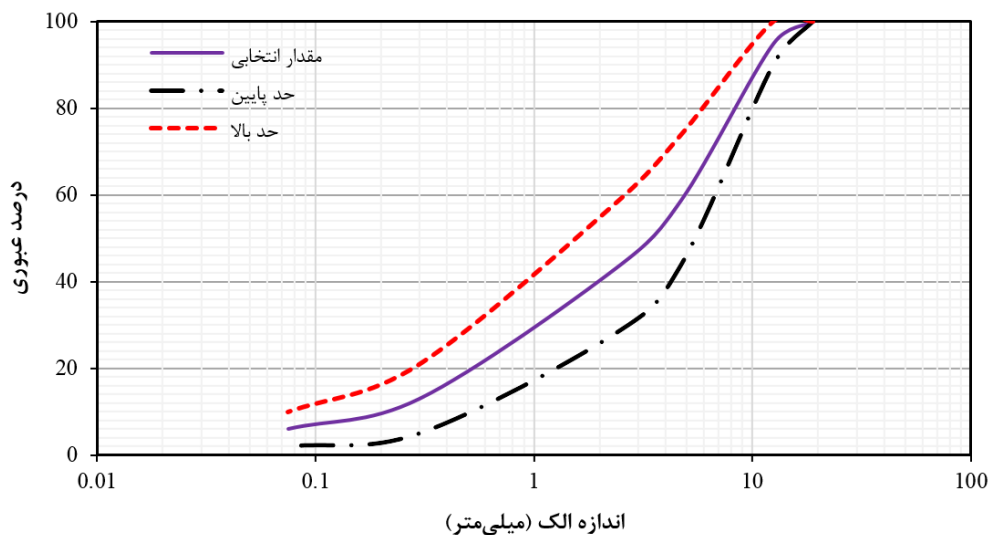
## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. مصالح مصرفی

در این مطالعه، از دو نوع سنگ با پتانسیل خرابی رطوبتی متفاوت شامل مصالح بازی (سنگ آهک) و مصالح اسیدی (سنگ گرانیت) در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی آسفالت استفاده گردید. کانی سنگ آهک به‌کار رفته در این تحقیق دارای ۶۲/۶ درصد اکسید کلسیم و ۴/۸ درصد دی‌اکسید سیلیسیم می‌باشد. در حالی که کانی سنگ گرانیت دارای ۴/۷ درصد اکسید کلسیم و ۵۴/۱ درصد دی‌اکسید سیلیسیم می‌باشد. دلیل انتخاب این دو نوع سنگدانه، خصوصیات زمین‌شناختی متفاوت آنها و مشخصات اسیدی و بازی آنها در مقابل قیر با خصوصیات نسبتاً اسیدی است. سنگ آهک معمولاً به‌عنوان یک سنگ مقاوم در برابر آسیب‌های رطوبتی و سنگ گرانیت به‌عنوان یک مصالح آب‌دوست با حساسیت زیاد در برابر این خرابی‌ها شناخته می‌شوند. شکل ۱، نمودار دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

از دیگر مطالعات انجام شده، می‌توان به تأثیر نانواهک هیدراته در افزایش مقاومت رطوبتی و خستگی با استفاده از مواد یخ‌زدا توسط بهبهانی و همکاران (۲۰۲۰)، مقایسه اثر آهک هیدراته و نانوسیلیس بر خواص بتن‌های آسفالتی توسط طاهرخانی و تاجدینی (۲۰۱۹)، مطالعه استحکام رطوبتی و پیرشدگی دو نوع مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیرهای حاوی نانورس و نانواهن توسط لویز موترو و همکاران (۲۰۱۸)، بررسی اثر نانومواد فلزی بر پیوستگی و چسبندگی قیرها و مصالح سنگی توسط گلچین و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر افزودن ماده ضد عریان‌شدگی و پلیمر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، قبل و بعد از شرایط رطوبتی، توسط عابد و همکاران (۲۰۱۹)، بررسی اثر استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی بر رفتار حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم توسط حامدی و تهامی (۲۰۱۸)، تأثیر افزودن نانوآکسید کلسیم و نانوکربنات کلسیم بر رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ توسط محمدی و همکاران (۲۰۲۲) و بررسی اثر تیزگوشه‌گی مصالح ریزدانه بر آسیب‌های رطوبتی توسط صالحی و دهقان بنادکی (۲۰۲۲) اشاره کرد.

معمولاً، آزمایش‌های به‌کار رفته در تعیین حساسیت رطوبتی برای مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مقایسه مشخصات مکانیکی این مخلوط‌ها در شرایط مرطوب و خشک است. با اینکه این آزمایش‌ها به صورت گسترده استفاده می‌شوند، لیکن، استفاده از آنها دارای مشکلاتی است. در این روش‌ها، خصوصیات بنیادین مواد، دلایل رفتارها و مکانیزم‌های خرابی به صورت مناسب تشریح نمی‌شود. از این‌رو، در این پژوهش، از یک آزمایش دیگر



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی و حدود آیین‌نامه‌ای

16 از شرکت پاسارگاد تهیه گردید. مشخصات این قیر در جدول ۱ آورده شده است.

در این پژوهش، از قیر ۶۰-۷۰ که یک نوع رایج از قیرهای مورد استفاده در ایران است، استفاده شد. این قیر از لحاظ طبقه‌بندی عملکردی به صورت یک قیر-PG64

جدول ۱. مشخصات قیرهای به کار رفته در آزمایش

روش آزمایش	محدوده استاندارد	نتیجه آزمایش	نوع آزمایش
ASTM D70-76	-	۱/۰۲	چگالی در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D5-73	۶۰-۷۰	۶۵	درجه نفوذ
ASTM D36-76	۴۹-۵۶	۵۲	نقطه نرمی
ASTM D113-79	حداقل ۱۰۰	۱۱۴	شکل‌پذیری
ASTM D92-78	حداقل ۲۳۲	۲۶۰	درجه اشتعال
ASTM D1754-78	-	۰/۷۵	افت وزنی
ASDM D2042-76	-	۹۹/۷	درجه خلوص
ASTM D2170	-	۰/۷۷۶	ویسکوزیته

می‌شود. این افزودنی، محصول کارخانه اکزونوبل<sup>۱</sup> سوئد است که خصوصیات آن در جدول ۲ آورده شده است (آکسوی و همکاران، ۲۰۰۵).

ماده افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، یک افزودنی ضد عریان‌شدگی به نام Polytec 505 می‌باشد. این ماده باعث بهبود خاصیت چسبندگی بین سنگدانه‌ها و قیر شده و بین ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزن قیر استفاده

<sup>۱</sup>- AkzoNobel

جدول ۲. مشخصات Polytec 505 مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی ماده	Polytec 505
ظاهر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس	مایع قهوه‌ای رنگ
چگالی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس (kg/m <sup>3</sup> )	۹۶۱
دمای اشتعال، درجه سلسیوس	۱۸۰≤
ویسکوزیته در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، cP	۱۷۰۰
ویسکوزیته در دمای ۱۵ درجه سلسیوس، cP	۱۳۰۰
ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، cP	۱۰۰۰

۲-۲. اصلاح قیر

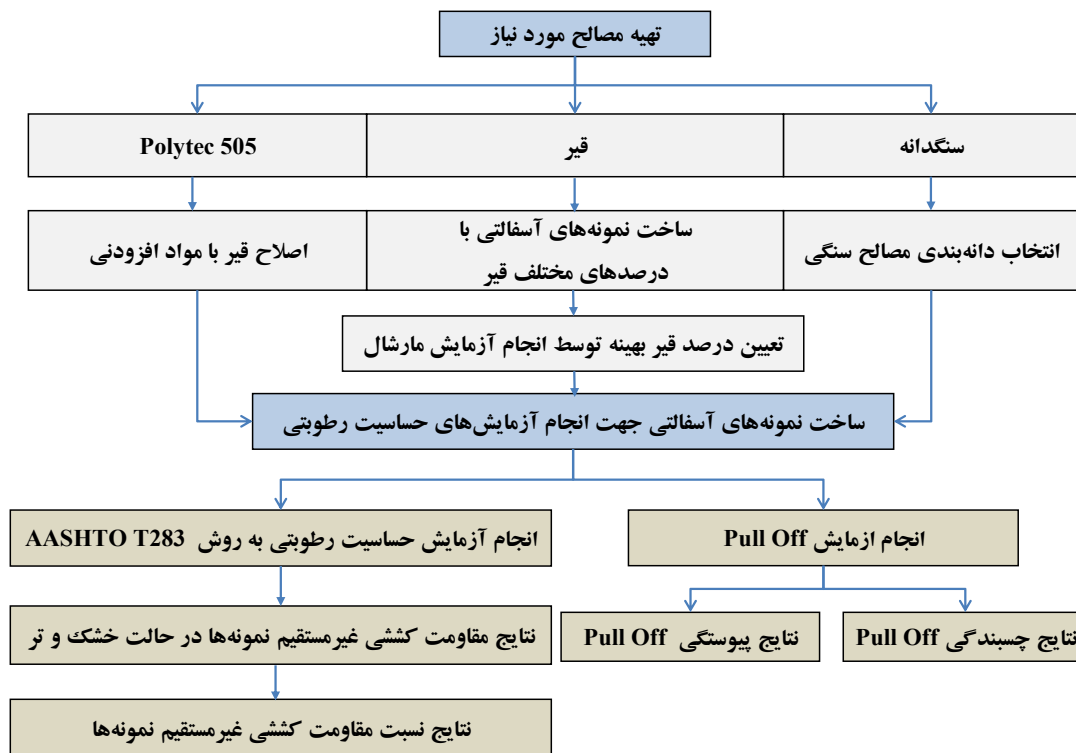
مختلف تهیه شدند. مقدار قیر بهینه برای مصالح گرانیتی ۵/۷ درصد و مصالح آهکی ۵/۹ درصد تعیین شد. همانطور که معلوم شد، درصد قیر بهینه در نمونه‌های با مصالح آهکی بیشتر از نمونه‌های با مصالح گرانیتی است. دلیل آن، سطح صاف و با تخلخل کمتر در مصالح گرانیتی در مقایسه با مصالح آهکی است. در گام بعدی، نمونه‌های لازم با و بدون افزودنی در دو حالت مرطوب و خشک مطابق با شرایط استاندارد T283 تهیه شدند. برای حالت مرطوب از یک، دو و سه سیکل ذوب و انجماد استفاده گردید. سپس، از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای بررسی رفتار رطوبتی مخلوط آسفالتی و از آزمایش Pull-off برای تشخیص مکانیزم چسبندگی قیر استفاده گردید. فلوجارت روش تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این پژوهش، ماده Polytec 505 به مقدار ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزن قیر، برای اصلاح قیر استفاده شد. برای اختلاط این ماده در قیر از یک دستگاه همزن با دور زیاد استفاده گردید. توانایی چرخش این دستگاه برابر ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه است. جهت اختلاط افزودنی با قیر، ابتدا قیر به دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس رسانیده شد. سپس، افزودنی به آرامی به قیر اضافه گردید. اختلاط به مدت ۵ دقیقه در ۲۰۰۰ دور در دقیقه صورت گرفت تا ترکیب کامل شود. آنگاه، از قیر اصلاح شده در ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. لازم به ذکر است که برای کاهش دمای قیر در هنگام اختلاط، در کنار ظرف قیر از یک گرم‌کن احاطه‌کننده برای ظرف قیر استفاده شد.

۳-۲. برنامه آزمایشگاهی، ساخت نمونه‌ها و

آزمایش‌های صورت گرفته

در گام نخست، نمونه‌های آزمایشگاهی لازم برای تعیین قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی



شکل ۲. فلوجارت روش تحقیق

آسفالتی (میلی‌متر) و  $d$  قطر نمونه آسفالتی (میلی‌متر) می‌باشند. میانگین مقاومت برای کشش غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک برای سه نمونه و حالت مرطوب برای سه نمونه محاسبه شده و مقدار حساسیت رطوبتی با تقسیم این دو عدد برحسب درصد مطابق رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$TSR = \left( \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن، TSR نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (درصد)،  $ITS_{wet}$  میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت مرطوب (کیلوپاسکال) و  $ITS_{dry}$  میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک (کیلوپاسکال) می‌باشند. حداقل مجاز برای نسبت فوق‌الذکر، ۷۰ درصد است. این مقدار در بعضی آیین‌نامه‌ها برای شرایط آب‌وهوایی سخت رطوبتی، ۸۰ درصد تعریف می‌شود (هیگس و همکاران، ۲۰۰۳).

در آزمایش تعیین حساسیت رطوبتی با استفاده از روش لاتمن اصلاح‌شده، برای هر مخلوط تعداد سه نمونه در شرایط خشک و سه نمونه در شرایط مرطوب ساخته می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌ها با میزان هوای  $0.5 \pm 0.5$  درصد ساخته شدند. تراکم نمونه‌ها با دستگاه چکش مارشال صورت گرفت. نمونه‌ها پس از تحمل شرایط ذوب و انجماد، تحت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم قرار گرفتند. در این آزمایش، بارگذاری با نرخ  $0.8/5$  سانتی‌متر بر دقیقه تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود، اعمال می‌شود. رابطه (۱) مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد.

$$ITS = \frac{2000F}{\pi d} \quad (1)$$

که در آن  $ITS$  مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال)،  $F$  نیروی لحظه گسیختگی (نیوتن)،  $t$  ضخامت نمونه

این تحقیق ۰/۶۶ مگاپاسکال بر ثانیه بود. عدد مقاومت چسبندگی در آزمایش Pull-off، حداکثر تنش است که نمونه تا لحظه گسیختگی تحمل می‌کند. این عدد از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (AASHTO Tp-91، ۲۰۱۵).

$$POTS = \frac{(BP \times A_G) - C}{A_{PS}} \quad (3)$$

که در آن، POTS مقدار مقاومت کششی Pull-off (کیلوپاسکال)، BP فشار در لحظه شکست (کیلوپاسکال)،  $A_G$  مساحت تماس واشر با صفحه عکس‌العمل (میلی متر مربع)، C ثابت پیستون تهیه شده توسط سازنده و  $A_{PS}$  مساحت استاب می‌باشند.

دستگاه و نمونه‌های آزمایش Pull-off در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در این پژوهش، با توجه به هدف تحقیق و به منظور بررسی مشخصات پیوستگی قیر و نیز بررسی مشخصات چسبندگی در سطح قیر و سنگدانه، از یک غشای قیری به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر برای بررسی گسیختگی چسبندگی و از یک غشای قیر به ضخامت یک میلی‌متر برای بررسی گسیختگی پیوستگی استفاده شده است. این ضخامت‌ها با سعی و خطا به دست آمدند و در استانداردها تعریف نشده‌اند.

در این تحقیق، آزمایش Pull-off نیز استفاده شده است. در این آزمایش، نمونه‌های قیری تحت شرایط کشش مستقیم برای اندازه‌گیری مقدار چسبندگی قیر به سنگدانه و اندازه‌گیری پیوستگی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا، از دستگاه Pose test AT-A استفاده شد. همچنین، استاندارد AASHTO TP-91 (۲۰۱۵) و ASTM D4541 (۲۰۱۷) برای آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش استفاده گردید. نمونه‌ها تحت شرایط چند سیکل ذوب و انجماد قرار گرفتند. در آزمایش Pull-off، استاب‌هایی استفاده می‌گردد که قیر از یک سو به انتهای استاب می‌چسبد و از طرف دیگر به سطح سنگدانه می‌چسبد. در ادامه، نرخ کشش برای اندازه‌گیری مقدار مقاومت چسبندگی در دستگاه تنظیم می‌شود و فک دستگاه روی استاب قرار می‌گیرد. سپس، نمونه بدون اعمال پیچش و با استفاده از نیروی کششی، تحت تنش قرار می‌گیرد تا گسیختگی صورت پذیرد. نرخ افزایش نیرو باید طوری تنظیم شود که یک حرکت پیوسته ایجاد گردد و گسیختگی در مدت کمتر از ۱۰۰ ثانیه رخ دهد. این نرخ باید کمتر از یک مگاپاسکال بر ثانیه باشد (ASTM D4541، ۲۰۱۷). نرخ افزایش نیرو در



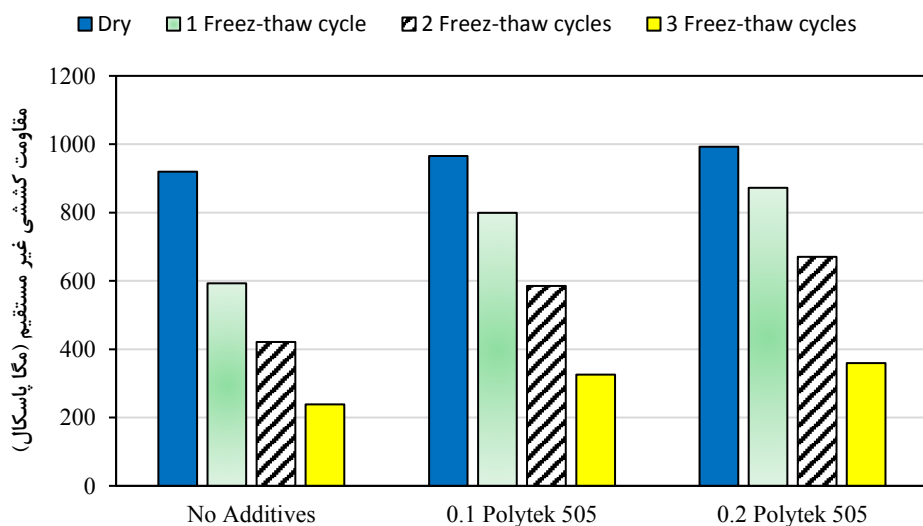
شکل ۳. قرارگیری نمونه‌ها در آزمایش Pull Off

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. مقاومت کششی غیرمستقیم

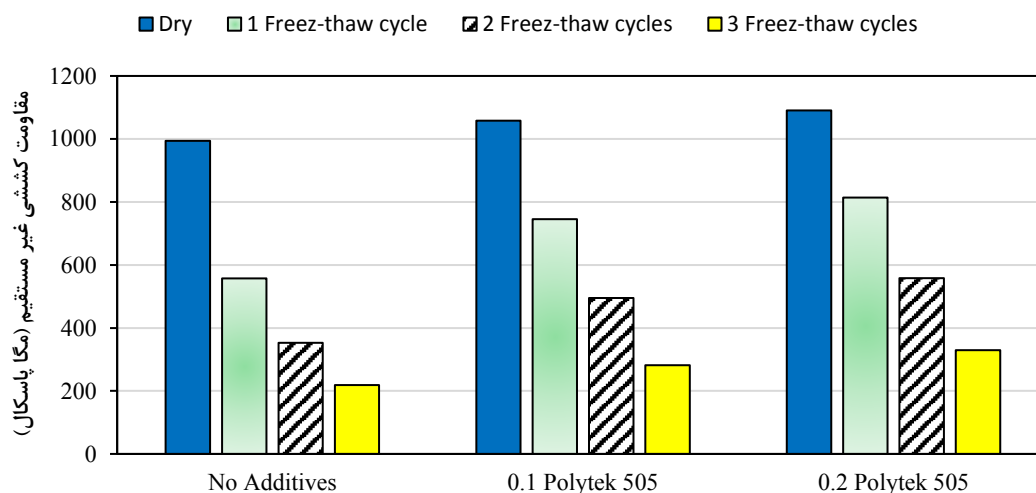
شکل‌های ۴ و ۵، نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم را در حالت خشک و مرطوب برای نمونه‌های با سنگدانه‌های آهکی و گرانیتی نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک برای نمونه‌های گرانیتی، در مقایسه با نمونه‌های آهکی، بیشتر است. همچنین، مشاهده می‌گردد که این مقاومت با قرارگیری نمونه‌ها در سیکل‌های ذوب و انجماد کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که استفاده از این افزودنی در هر دو نمونه ساخته‌شده با سنگ آهک و سنگ گرانیتی، موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط خشک و مرطوب می‌گردد. چنین به نظر می‌رسد که استفاده از این

افزودنی موجب افزایش کندروانی قیر و افزایش سختی قیر شده و در نتیجه مقاومت آن در برابر کشش غیرمستقیم افزایش یافته است. این بهبود در مقاومت نمونه‌ها، با افزایش مقدار استفاده از افزودنی، افزایش یافته است. همچنین، با توجه به داده‌های موجود در این دو شکل می‌توان گفت که نمونه‌های با سنگ آهک دارای مقاومت بیشتری در برابر خرابی رطوبتی در مقایسه با نمونه‌های متناظر با سنگ گرانیت هستند. این موضوع، با توجه به ساختار کانی‌های موجود در سنگدانه‌ها قابل توجیه است، زیرا قسمت عمده کانی‌های سنگدانه‌های گرانیتی، دی‌اکسید سیلیسیم با ویژگی‌های اسیدی است و این امر موجب می‌شود تا آب‌دوستی این سنگدانه‌ها بیشتر گردد. در نتیجه، هنگامی که در شرایط آسیب‌های رطوبتی قرار می‌گیرند، پیوند قیر و سنگدانه شکسته شده و مقاومت کاهش می‌یابد.



شکل ۴. مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با مصالح آهکی



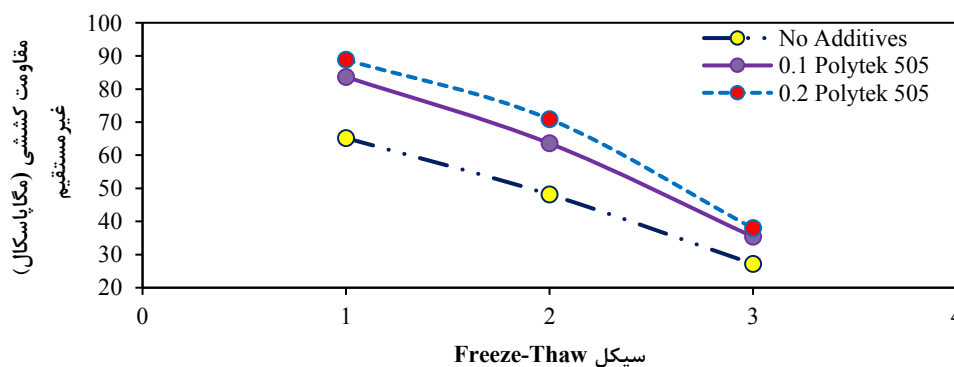


شکل ۵. مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با مصالح گرانیتی

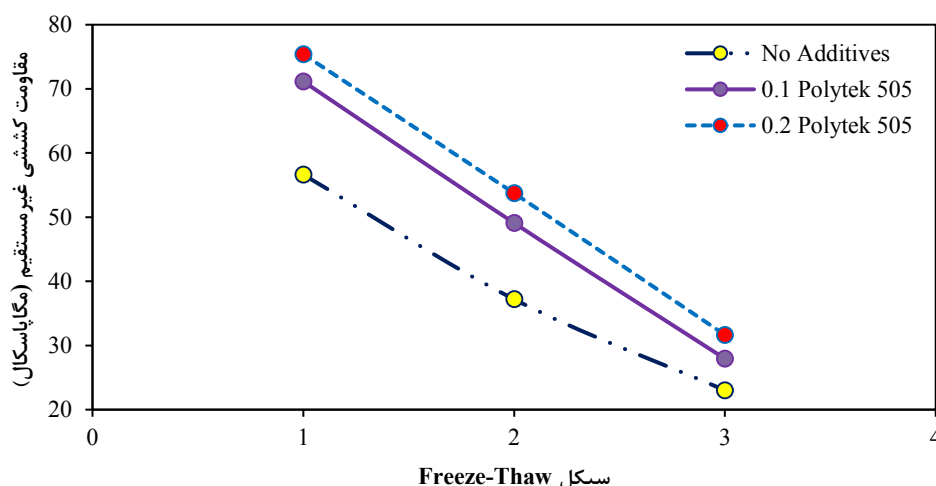
کاملاً آشکار است. مصالح آهکی به نسبت مصالح گرانیتی مقاومت بیشتری را در برابر خرابی رطوبتی دارند. مهم‌ترین عامل در مقاومت سنگدانه‌ها در خرابی رطوبتی، ساختار کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه مورد استفاده است. مصالح گرانیتی دارای مقدار زیادی کانی‌های  $SiO_2$  بوده و دارای خصوصیات آب‌دوستی هستند. در حالی که مصالح آهکی دارای ویژگی آبگریزی هستند (پیترسون و همکاران، ۱۹۷۴). به علاوه، استفاده از افزودنی Polytec 505 باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت و بهبود نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود. این بهبود در نسبت مقاومت کششی با افزایش در میزان استفاده از افزودنی، افزایش یافته است.

### ۳-۲. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های آهکی و گرانیتی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با قرارگیری نمونه‌ها در سیکل‌های انجماد و ذوب، مقاومت نمونه‌های مرطوب نسبت به نمونه‌های خشک کاهش می‌یابد و در نتیجه این نسبت همواره کمتر از ۱۰۰ درصد خواهد بود. علت کاهش نسبت مقاومت کششی، کاهش چسبندگی قیر و سنگدانه و یا پیوستگی قیر در حضور رطوبت است. از داده‌های شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان گفت که اثر استفاده از سنگدانه‌ها و درصد افزودنی بر وقوع خرابی رطوبتی



شکل ۶. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با مصالح آهکی



شکل ۷. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با مصالح گرانی

گروه از مخلوط‌ها سبب افزایش ۳۰ و ۴۰ درصدی پارامتر TSR شده است. در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانی، این اعداد به ترتیب برابر با ۲۱ و ۳۷ درصد مشاهده شد. با توجه به میزان استفاده از افزودنی ذکر شده، مشهود است که استفاده بیشتر از Polytec 505، تأثیر بیشتری در افزایش نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های مورد آزمایش، و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی آن‌ها داشته است. به علاوه، مشاهده می‌شود که به طور کلی، تأثیر استفاده از افزودنی در سیکل‌های بیشتر انجماد-ذوب بیشتر بوده است. این موضوع به دلیل افزایش چسبندگی قیر با سنگدانه‌ها و در نتیجه پیوند قوی‌تر بین آنهاست که گسیختگی در سیکل‌های انجماد-ذوب را سخت و حساسیت رطوبتی را کمتر می‌کند.

تغییر در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در اثر استفاده از این افزودنی در مقادیر مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. در سیکل اول انجماد-ذوب، استفاده از ۰/۱ و ۰/۲ درصد Polytec 505 در این گروه از مخلوط‌ها سبب افزایش ۲۸ و ۳۶ درصدی پارامتر TSR شده است. در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانی، این اعداد به ترتیب برابر با ۲۶ و ۳۳ درصد بود. در سیکل دوم انجماد-ذوب، در گروه سنگدانه‌های آهکی، استفاده از ۰/۱ و ۰/۲ درصد Polytec 505 در این گروه از مخلوط‌ها سبب افزایش ۳۲ و ۴۷ درصدی پارامتر TSR شده است. در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانی، این اعداد به ترتیب برابر با ۳۲ و ۴۴ درصد مشاهده شد. در سیکل سوم انجماد-ذوب، در گروه سنگدانه‌های آهکی، استفاده از ۰/۱ و ۰/۲ درصد Polytec 505 در این

جدول ۳. تغییرات در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم بر اثر استفاده از افزودنی Polytec 505

مقدار افزودنی (درصد)		سنگدانه آهکی			سنگدانه گرانی	
۱ سیکل	۲ سیکل	۳ سیکل	۱ سیکل	۲ سیکل	۳ سیکل	
۲۸	۳۲	۳۰	۲۶	۳۲	۲۱	۰/۱
۳۶	۴۷	۴۰	۳۳	۴۴	۳۷	۰/۲

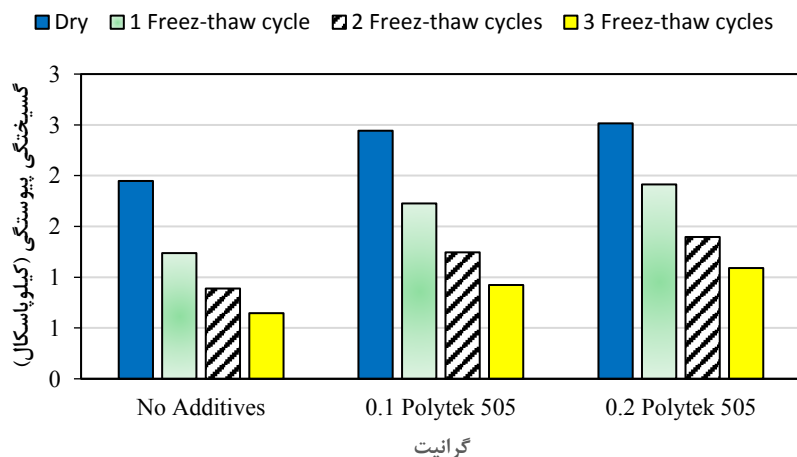
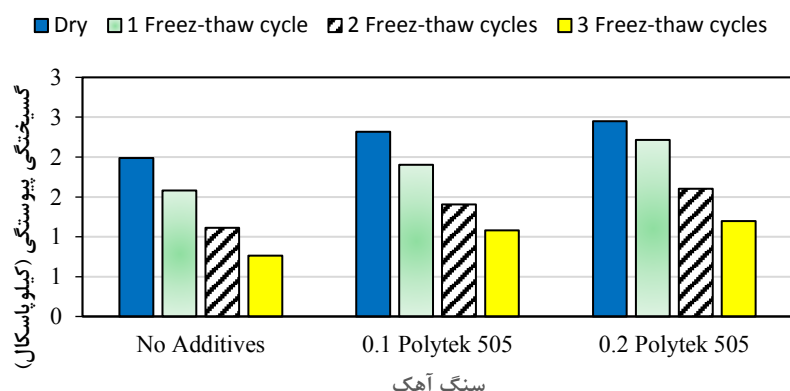
### ۳-۳. آزمایش Pull-off

در این پژوهش، آزمایش Pull-off در دو حالت خشک و تر و با ضخامت کم و زیاد قیر انجام شده است. ضخامت زیاد قیر، معادل با گسیختگی در غشای قیر یا گسیختگی پیوستگی و حالت ضخامت کم قیر، معادل با گسیختگی سطح تماس قیر- سنگدانه یا گسیختگی چسبندگی است.

#### ۳-۳-۱. گسیختگی پیوستگی

نتایج آزمایش پیوستگی Pull-off در شکل ۸ نمایش داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط خشک، عموماً تأثیر نوع سنگدانه بر مقاومت پیوستگی نسبت به

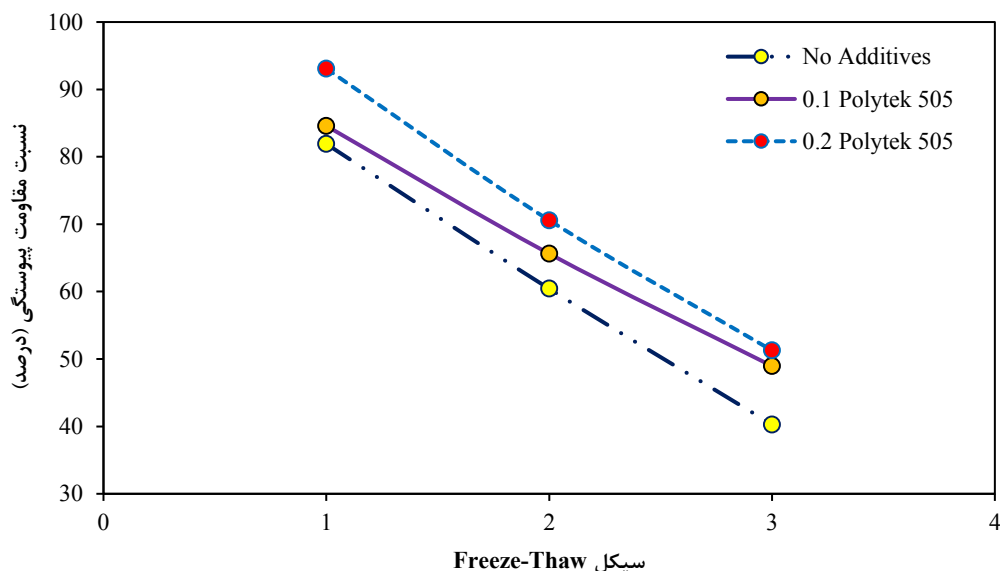
تأثیر مقدار افزودنی در قیر کمتر است. دلیل این مطلب را می‌توان به ضخامت غشای قیر نسبت داد. ضخامت زیاد غشای قیر موجب می‌شود تا گسیختگی در غشای قیر صورت گرفته و در سطح تماس قیر و سنگدانه ایجاد نشود. این عامل باعث می‌گردد تا خصوصیات قیر اصلاح شده تأثیر زیادی نسبت به نوع مصالح سنگی داشته باشد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که هم در سنگدانه‌های آهکی و هم در سنگدانه‌های گرانیتی، استفاده از افزودنی Polytec 505، سبب افزایش مقاومت پیوستگی نمونه‌های خشک و نیز نمونه‌های تحت شرایط سیکل‌های انجماد- ذوب شده است. استفاده از این افزودنی، همراه با افزایش کندروانی و سفتی قیر و نیز افزایش مقاومت پیوستگی بوده است.



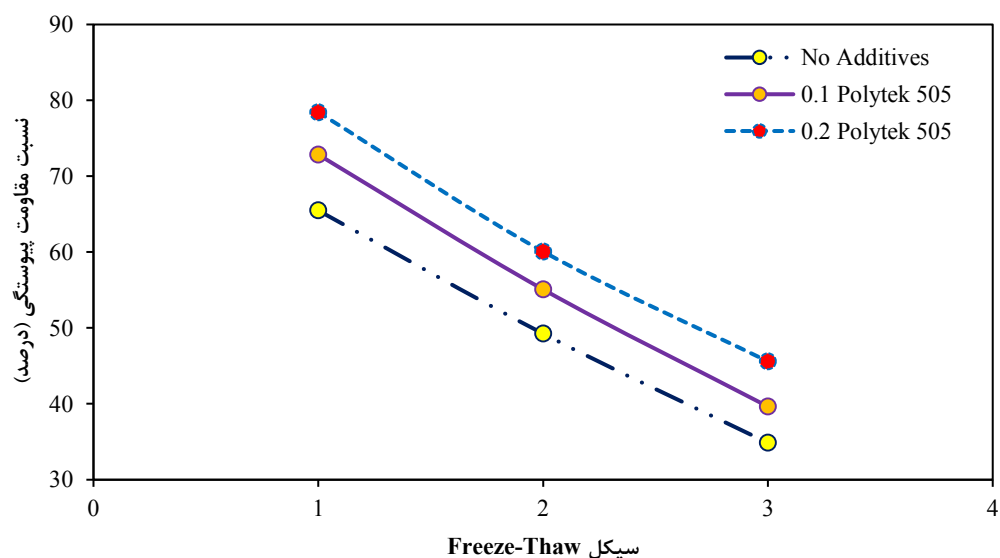
شکل ۸. گسیختگی پیوستگی در آزمایش Pull-off

درصد 505 Polytec است. به‌علاوه، در استفاده از درصدهای مشابه از این دو نوع افزودنی، نسبت مقاومت پیوستگی در سیکل‌های بیشتر انجماد و ذوب، کاهش یافته است.

نسبت مقاومت پیوستگی در نمونه‌های آهکی و گرانیتهی به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های شکل‌ها مشخص است، می‌توان مشاهده کرد که بهترین عملکرد مربوط به استفاده از ۰/۲



شکل ۹. نسبت مقاومت پیوستگی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه آهکی آزمایش Pull-off



شکل ۱۰. نسبت مقاومت پیوستگی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتهی آزمایش Pull-off

افزودنی نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان گفت که استفاده از این افزودنی موجب شده است تا

جدول ۴، مقدار تغییرات در نسبت مقاومت پیوستگی را برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مقادیر مختلف

دلیل اصلی این موضوع را می‌توان به افزایش کندروانی و سفتی قیر نسبت داد که موجب افزایش در مقاومت پیوستگی قیر شده و امکان گسیختگی در غشای قیر را نمی‌دهد. به این ترتیب، مقاومت نمونه‌ها در برابر خرابی رطوبتی افزایش می‌یابد.

مقدار مقاومت Pull-off در نمونه‌های حاوی افزودنی نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی بهبود چشمگیری داشته باشد. میزان این بهبود، با افزایش در مقدار استفاده از افزودنی، افزایش یافته است. به‌علاوه، مشاهده می‌شود که در سیکل‌های انجماد-ذوب بیشتر، درصد بهبود مقاومت پیوستگی نمونه‌ها در اکثر موارد بهتر بوده است.

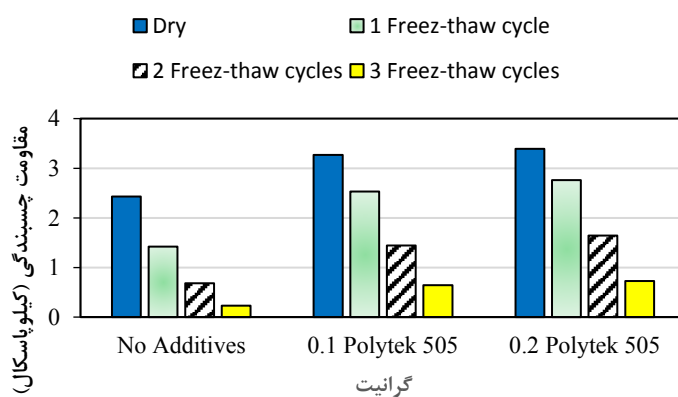
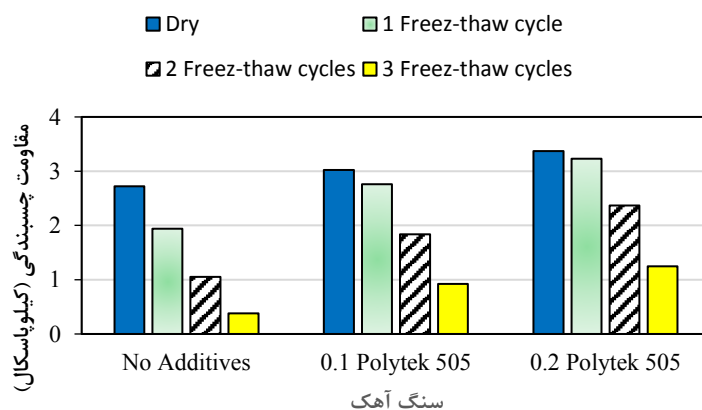
جدول ۴. تغییرات در نسبت مقاومت پیوستگی بر اثر افزودنی Polytec 505

سنگدانه گرانیتی			سنگدانه آهکی			مقدار افزودنی (درصد)
سیکل ۳	سیکل ۲	سیکل ۱	سیکل ۳	سیکل ۲	سیکل ۱	
۱۴	۱۲	۱۱	۲۲	۹	۳	۰/۱
۳۱	۲۲	۲۰	۲۷	۱۷	۱۴	۰/۲

در نمونه‌های با مصالح آهکی و هم در نمونه‌های با مصالح گرانیتی، استفاده از افزودنی Polytec 505، موجب افزایش مقاومت چسبندگی Pull-off در نمونه‌های خشک و نمونه‌های تحت شرایط دوره‌های انجماد-ذوب شده است. در حالت پایه، نمونه ساخته شده از سنگ آهک دارای چسبندگی بیشتر نسبت به نمونه سنگ گرانیتی بوده است. دلیل این امر می‌تواند به مشخصات سطح و ماهیت سنگدانه‌های آهکی مربوط باشد که دارای تخلخل و خصوصیات بازی بیشتر هستند. این ویژگی موجب چسبندگی قوی‌تر سنگدانه به قیر می‌گردد. اما در حالت نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح‌شده، مشاهده می‌شود که سنگدانه‌های گرانیتی عملکرد چسبندگی بهتری از خود نشان داده‌اند.

### ۳-۲-۳. گسیختگی چسبندگی

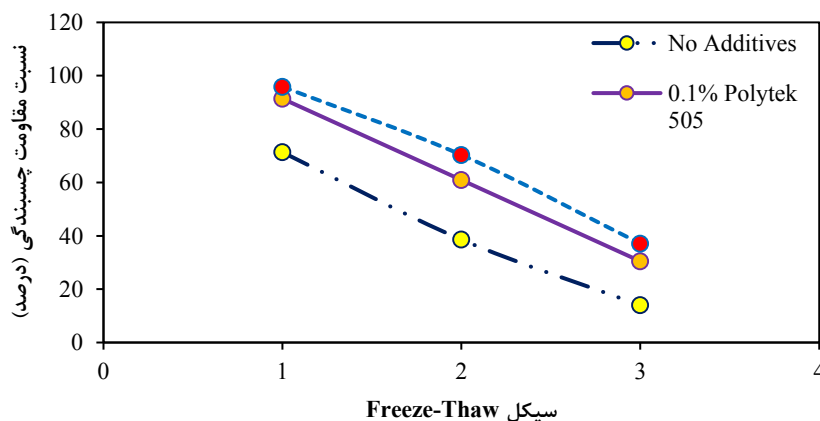
نتایج مربوط به آزمایش Pull-off در خصوص مقاومت کششی مستقیم برای ارزیابی گسیختگی چسبندگی در نمونه‌های با مصالح آهکی و گرانیتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، علاوه بر نوع قیر، نوع سنگدانه نیز عامل مهمی در مقاومت چسبندگی Pull-off است. مشاهده می‌شود که مشابه با پیوستگی Pull-off، مقاومت چسبندگی نمونه‌های قرار گرفته در معرض سیکل‌های انجماد-ذوب نیز کاهش یافته است. این کاهش، با افزایش تعداد سیکل‌ها و متعاقباً با افزایش قرارگیری نمونه‌ها در معرض رطوبت افزایش یافته است. همچنین، مشاهده می‌شود که



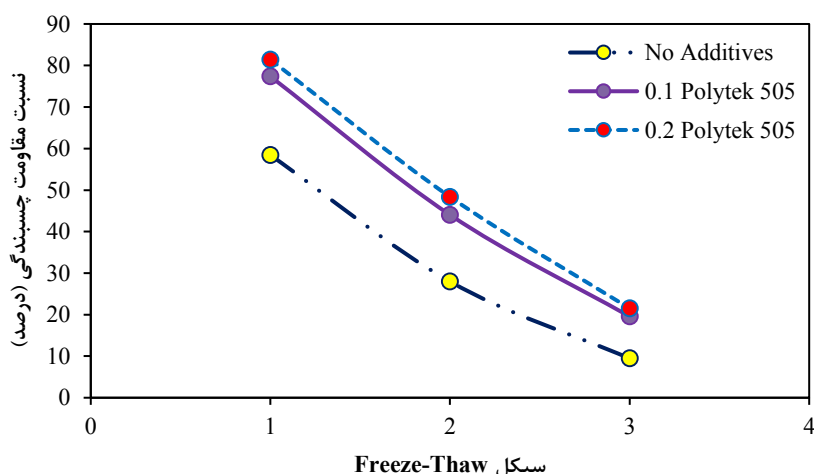
شکل ۱۱. مقاومت چسبندگی در آزمایش Pull-off

همان‌گونه که از این داده‌ها مشخص است، می‌توان مشاهده کرد که به طور کلی، Polytec 505 نسبت به آهک هیدراته تأثیر بیشتری در افزایش نسبت مقاومت چسبندگی نمونه‌های مورد آزمایش داشته است.

نسبت مقاومت چسبندگی در نمونه‌های آهکی و گرانیتی به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. پیش از این نیز اشاره شد که مقاومت چسبندگی نمونه‌ها، در اثر استفاده از افزودنی، افزایش یافته است، اما



شکل ۱۲. نسبت مقاومت چسبندگی در آزمایش Pull-off برای نمونه‌های با سنگدانه آهکی



شکل ۱۳. نسبت مقاومت چسبندگی در آزمایش Pull-off برای نمونه‌های با سنگدانه گرانیتی

سیکل‌های انجماد-ذوب بیشتر، درصد بهبود مقاومت چسبندگی نمونه‌ها بیشتر بوده است. دلیل این موضوع را می‌توان به تغییرات مشخصات شیمیایی قیر بر اثر افزودنی نسبت داد که سبب افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه شده و اجازه گسیختگی از نوع چسبندگی را نمی‌دهد. به این ترتیب، مقاومت نمونه‌ها در برابر خرابی رطوبتی افزایش می‌یابد.

جدول ۵، مقدار تغییرات در نسبت مقاومت چسبندگی را برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مقادیر مختلف افزودنی نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات این جدول، می‌توان گفت که این افزودنی سبب بهبود چشمگیر در مقاومت Pull-off برای نمونه‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نمونه‌های کنترل شده است. میزان این بهبود، با افزایش در مقدار استفاده از افزودنی، افزایش یافته است. به‌علاوه، مشاهده می‌شود که در

جدول ۵. تغییرات در نسبت مقاومت چسبندگی بر اثر افزودنی Polytec 505

سنگدانه گرانیتی			سنگدانه آهکی			مقدار افزودنی (درصد)
سیکل ۳	سیکل ۲	سیکل ۱	سیکل ۳	سیکل ۲	سیکل ۱	
۱۰۶	۵۷	۳۲	۱۱۸	۵۸	۲۸	۰/۱
۱۲۷	۷۳	۳۹	۱۶۵	۸۲	۳۴	۰/۲

#### ۴. نتیجه‌گیری

خشک و مرطوب، شده است. همچنین، مشاهده شد که با افزایش درصد استفاده از این افزودنی، افزایش در میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نیز افزایش یافته است.

۳. نتایج شاخص TSR بیان می‌کند که استفاده از این افزودنی موجب افزایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با مصالح گرانیته و نیز آهکی شده است. با افزایش درصد استفاده از این افزودنی، مقاومت در برابر خرابی رطوبتی نمونه‌ها افزایش یافته است.

۴. نتایج آزمایش پیوستگی Pull-off نشان می‌دهد که در نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع سنگدانه، استفاده از افزودنی Polytec 505 منجر به افزایش مقاومت پیوستگی در نمونه‌های خشک و نیز در نمونه‌های تحت شرایط سیکل‌های انجماد و ذوب گردیده است.

۵. نتایج آزمایش چسبندگی Pull-off نشان می‌دهد که مقاومت چسبندگی نمونه‌ها در اثر استفاده از این افزودنی افزایش یافته است.

خرابی‌های ناشی از حضور رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی به‌عنوان یکی از دلایل اصلی زوال زودرسِ روسازی‌های آسفالتی انعطاف‌پذیر شناخته می‌شوند. در این پژوهش، اثر Polytec 505 در کاهش میزان خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی شده است. مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های ساخته شده از مصالح گرانیته بهتر از نمونه‌های ساخته شده از مصالح آهکی در حالت خشک است. اما در شرایط مرطوب، با افزایش دوره‌های انجماد و ذوب، مصالح آهکی عملکرد بهتری نسبت به مصالح گرانیته از خود نشان می‌دهند.

۲. استفاده از افزودنی Polytec 505 در نمونه‌های با مصالح سنگ آهک و هم در نمونه‌های با مصالح گرانیته، موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم، در شرایط

#### ۵. مراجع

- Abdel-Wahed, T., Abdel-Raheem, A. and Moussa, G. 2022. "Performance evaluation of asphalt mixtures modified with nanomaterials". *Mansoura Eng. J.*, 47(1): 1-16.
- Abed, A. H., Qasim, Z. I., Al-Mosawe, H. and Norri, H. H. 2019. "The effect of hybrid anti-stripping agent with polymer on the moisture resistance of hot-mix asphalt mixtures". *Cogent Eng.*, 6(1): 1659125.
- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S. and Özen, H. 2005. "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 19(1): 11-18.
- ASTM, D. 2017. "Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Atazadeh, F. and Golchin, B. 2018. "Evaluation of moisture sensitivity of asphalt mixtures incorporating carbon nanotube". *J. Civ. Environ. Eng.*, 48(91): 47-57.
- Behbahani, H., Hamed, G. H. and Gilani, V. N. M. 2020. "Predictive model of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime to increase resistance to moisture and fatigue damages by the use of deicing agents". *Constr. Build. Mater.*, 265: 120353.
- Beyrami, R., Hamed, G. and Golchin, B. 2018. "Evaluation the effect of glass wastes and metal oxides nanoparticles on the stripping strength of asphalt mixtures". *J. Transport. Res.*, 15(4): 97-112.
- Fakhri, M. 2021. "The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA)". *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00655.
- Golchin, B., Hekmat, A. and Hamed, G. H. 2021. "Effects of metallic nano materials on the cohesion and adhesion properties of asphalt binders and aggregates using surface free energy method". *J. Civ. Environ. Eng.* 52(3): 117-126.
- Hamed, G. H., Asadi, M., Moghadas Nejad, F. and Esmaeeli, M. R. 2021. "Applying asphalt binder modifier in reducing moisture-induced damage of asphalt mixtures". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 25(11): 2039-2056.



- Hamed, G. H., Sahraei, A. and Esmaeeli, M. R. 2021. "Investigate the effect of using polymeric anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 25(1) :90-103.
- Hamed, G.H. and Tahami, S. A. 2018. "The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt". *Int. J. Adhes. Adhes.* 81: 90-97.
- Hicks, R., Santucci, L. and Aschenbrenner, T. 2003. "Moisture sensitivity of asphalt pavements: A national seminar". San Diego, California, pp. 2-21.
- López-Montero, T., Crucho, J., Picado-Santos, L. and Miró, R. 2018. "Effect of nanomaterials on ageing and moisture damage using the indirect tensile strength test". *Constr. Build. Mater.*, 168: 31-40.
- Mohammadi, M., Shafabakhsh, G. A. and Sadeghnejad, M. 2022. "Application of nano CaO and nano CaCO<sub>3</sub> in HMA in order to improve the strength against cracking and moisture susceptibility- an experimental study". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, doi: 10.22075/jtie.2022.28376.1613
- Naidoo, P., Logaraj, S. and James, A. D. 2013. "Adhesion and cohesion modifiers for asphalt". Google Patents.
- Nataadmadja, A., Prahara, E., Setyandito, O. and Ananditha, R. 2020. "Analysis of moisture susceptibility of hot mix asphalt with waterproofing additives". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Petersen, J., Ensley, E. and Barbour, F. 1974. "Molecular interactions of asphalt in the asphalt-aggregate interface region". *Transport. Res. Record*.
- Saedi, D., Shirmohammadi, H., Hamed, G. H. and Azarion, Y. 2020. "The effect of nanomaterials as anti-stripping additives on the moisture sensitivity of glassphalt". *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 22(5): 1602-1613.
- Salehi, S. R. and Dehghanbanadaki, A. 2022. "The effect of fine aggregate angularity on moisture sensitivity and fracture resistance of hot mix asphalt". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 8(1): 95-118. doi: 10.22075/jtie.2021.24622.1556
- Singh, B., Prasad, D., Kumar, A. and Yadav, B. 2022. "Use of nano-materials to enhance the properties of asphalt mixes". *Materials Today: Proceedings*.
- Taherkhani, H. and Tajdini, M. 2019. "Comparing the effects of nano-silica and hydrated lime on the properties of asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 218: 308-315.
- TP91, A. 2015. "Standard method of test for determining asphalt binder bond strength by means of the binder bond strength (BBS) test". *AASHTO*, pp. 1-14.
- Wang, W., Shen, A., Yang, X., Guo, Y. and Zhao, T. 2020. "Surface free energy method for evaluating the effects of anti-stripping agents on the moisture damage to asphalt mixtures". *J. Adhes. Sci. Technol.*, 34(18): 1947-1970.