بررسي ويژگيهاي مارشال، مدول برجهندگي وکشش غير مستقيم مخلوط­هاي بازيافتي با امولسيون قير حاوي افزودني­هاي سيمان و الياف پلي­پروپيلن

**فرشاد فيروزئي1 ، ابوالفضل محمدزاده مقدم2 ، مرتضي جليلي قاضي­زاده3 ، علي­اصغر صادقي4**

**1- کارشناس ارشد راه و ترابري – دانشگاه آزاد اسلامي زنجان**

**2 و4- دانشجوي دکتري راه و ترابري – دانشگاه فردوسي مشهد**

 **3- دانشجوي دکتري راه و ترابري - دانشگاه تربيت مدرس**

F.Firoozei@yahoo.com

# خلاصه

حجم ضايعات (مانند رشته­هاي مختلف ضايعاتي) در سر­تا­سر جهان و نيز ايران مشكلات زيست­محيطي زيادي دربر­دارد. استفاده از اين مواد جهت ارتقاء خصوصيات رفتاري مواد گوناگون کاربرد داشته است. در سالهاي اخير استفاده از الياف در جهت بهبود خواص رفتاري آسفالتهاي گرم نيز مورد بررسي قرار گرفت که بهبود خواص رفتاري آسفالت گرم را نتيجه داده است ولي همچنان خلاء بررسي­هاي بيشتر در زمينه استفاده الياف در بازيافت آسفالت به روش سرد با امولسيون قير احساس مي­شود. تحقيق حاضر، حاصل بررسي عملکرد الياف در بازيافت آسفالت به روش سرد و ارزيابي نتايج حاصل از آزمايشهاي مارشال، شاخص سختي مارشال، کشش­غير­مستقيم و مدول­برجهندگي مي­باشد. الياف مورد استفاده در اين پژوهش الياف پلي پروپيلن به طول 6 ميليمتر مي­باشد. نتايج نشان داد که الياف پلي­پروپيلن در کنار سيمان باعث بهبود شاخص سختي مارشال نمونه آسفالتي مي­شود که این امر نشان دهنده مقاومت بيشتر مخلوط در برابر تغيير شکل دائم مي­باشد. همچنين کشش­غير­مستقيم و مدول برجهندگي مخلوط به طور قابل توجهي در مقايسه با مخلوط­هاي امولسيوني متداول تغيير مي­کند که استفاده سيمان و الياف در کنار هم نويدبخش بهبود وضعيت مدول برجهندگي در دماي پايين همراه با افزايش کشش غير مستقيم است.

**کلمات کليدي : بازيافت سرد، امولسيون قير، پلي پروپيلن،مدول برجهندگي، کشش غيرمستقيم، شاخص سختي مارشال**

**1. مقدمه**

 هدف اصلي از بازيافت آسفالت، استفاده مجدد از مصالح به منظور ترميم و بهسازي روسازي مي­باشد. مهمترين مزاياي بازيافت، صرفه جويي منابع مالي و مصالح مي­باشد. بازيافت آسفالت به روش سرد در محل يکي از روش­هاي بازيابي روسازي­هاي انعطاف­پذير است که هزينه آن 50 تا 60 درصد هزينه روش­هاي متداول در ترميم و بهسازي و روکش مجدد راه است[1].

 استفاده از مواد افزودني براي بهبود خواص مخلوط­هاي بازيافتي از اوايل دهة هفتاد ميلادي مورد توجه محققين قرار گرفته است. در اين راستا افزودني­هايي مانند سيمان، آهك و خاكستر بادي به منظور بهبود خواص مخلوط­هاي بازيافتي نظير دوام، مقاومت دربرابر ترک خوردگي، تغيير شكل­هاي دائمي و حساسيّت نسبت به رطوبت، مورد استفاده قرار گرفته است [1، 2و3].

در زمينة تأثير افزودني­ها بر خواص آسفالت­هاي بازيافتي تحقيقات انجام شده، براي نمونه در سال 2001 ريتا عيسي و همكارانش تأثير سيمان را بر استحکام مخلوط­هاي بازيافتي ارزيابي نمودند. در اين راستا نمونه­ها را با درصد­هاي مختلف سيمان و عمل­آوري تحت شرايط اشباع و خشک تهيّه کردند. نتايج نشان داد افزايش درصد سيمان برميزان استحکام در حالت اشباع بيشتر از حالت خشک اثر مي­گذارد که اين امر به دليل نقش آب در هيدراسيون سيمان مي­باشد[2]، در تحقيقي ديگر در سال 2008 نيازي و جليلي تأثير سيمان را بر استحکام، تغيير شكل­هاي دائمي و مدول­برجهندگي مخلوط­هاي بازيافتي ارزيابي نمودند و نتايج آن نشان داد که با افزايش درصد سيمان استحکام و مدول برجهندگي افزايش چشمگيري دارد و باعث کاهش تغيير شكل­هاي دائمي نيز مي­شود[4]. مقايسه نتايج آزمايش­هاي تغيير شكل دائم نشان مي­دهد كه سيمان پرتلند در كاهش ميزان شيارشدگي نقش مؤثري دارد زيرا سيمان پرتلند در مخلوط آسفالتي سرد به عنوان يك ماده چسبنده عمل كرده و در حضور آب واكنش­هاي گرمايي ‌(هيدراسيون) آن تسريع شده، واكنش هاي گرمايي سيمان پرتلند باعث افزايش حرارت در مخلوط و در نتيجه باعث افزايش واكنش ميان مصالح سنگي و امولسيون مي­شود كه هر دو عامل منجر به افزايش در نرخ شكستن امولسيون ودر نتيجه زمان عمل آوري كوتاهتر آن مي­شود[4].

استفاده از الياف مختلف نيز، جهت ارتقاي خصوصيات رفتاري مواد گوناگون يک ايده قديمي مي­باشد ولي استفاده آن در بتن آسفالتي کاري نو و بديع مي­باشد که در دهه­هاي اخير مطالعاتي بر روي آن صورت گرفته است. 4000 سال قبل بشر از الياف بعنوان ماده­اي تقويت­گر در خاک رس استفاده مي­کرده است ولي در دهه­ي 60 ميلادي کاربرد الياف سلولزي و الياف آزبزتوس در بتن آسفالتي مطرح شدند که البته الياف سلولزي به دليل تجزيه شدن درسازه به مرور زمان و الياف آزبزتوس به خاطر سمي بودن و مشکلات محيط زيستي، نامطلوب شناخته شدند[5]. در سال 1983م حليم و همکاران ژئوگريدهاي پلي­پروپيلني را در آسفالت با موفقيت آزمايش کردند و نتايج مناسبي نيز بدست­آوردند. همينطور با آزمايشاتي که براون و همکاران(1990 م) بر روي الياف دربتن آسفالتي انجام دادند به اين نتيجه رسيدند که الياف داراي استحکام کششي بالاتري نسبت به قير هستند و پتانسيل کاربرد در آسفالت و ارتقاي سازه­اي آسفالت را دارند[5، 6و 7]. همچنين مائورر وهمکاران(1989م) به اين نتيجه رسيدند که الياف در مقايسه با پليمرهاي افزودني، بهتر و بيشتر در کاهش فرونشست آسفالت تاثيرگذارند[5و 8].

نقش سيمان در مخلوط‌هاي بازيافت‌شده با قيرامولسيون در مطالعات متعددي مورد بررسي قرار گرفته‌است. افزايش قابل توجه سختي، کاهش حساسيت رطوبتي، کاهش حساسيت حرارتي و کاهش تغييرشکل‌هاي ماندگار از مهم‌ترين نتايج به دست آمده در اين زمينه مي‌باشند ولي کمبود تحقيقات در زمينه استفاده الياف و سيمان در مخلوط­هاي بازيافتي سرد بسيار به چشم مي­خورد[9]. کاربرد الياف نيز در آسفالت تا کنون با هدف بهبود خواصي چون عمرخستگي، استحکام کششي، مقاومت در برابر ترک­هاي انعکاسي و همچنين استفاده از رشته­هاي مختلف ضايعاتي در مخلوط­هاي آسفالتي بوده­است[5، 10و 11]. در اين تحقيق به بررسي آزمايشگاهي تأثير سيمان والياف پلي­پروپيلن بر وزن­مخصوص، استحکام مارشال، سختي مارشال و کشش­غيرمستقيم مخلوطهاي بازيافتي سرد با امولسيون قير پرداخته مي­شود.

**2. مصالح مورد استفاده**

**2-1- تراشه‌هاي ‌آسفالتي**

مصالح خرده آسفالتي در اين تحقيق از باند شرقي کيلومتر 10 جاده مشهد- شانديز تهيه شد. دو نوع امولسيون قير كندشكن (CMS) و ديرشكن (CSS-1h) از کارخانجات راهسازي دامغان تهيّه شد كه مشخصات آنها درجدول 1، و همچنين الياف پلي‌پروپلين نيز تهيه گرديد که مشخصات آن در جدول 2 ارائه شده­است.

اوليّن گام در طرح مخلوط، ارزيابي مصالح مي­باشد[13]. يکي از اهداف مهم اين مرحله مي­تواند تشخيص کمبودهاي آسفالت موجود و تعيين نياز به مصالح سنگي جديد باشد[4و 12]، ولي در اين تحقيق به دلیل مناسب بودن دانه بندی مصالح سنگی بازیافتی ، هيچگونه مصالح سنگی جديد به مصالح افزوده نشد و فقط از مصالح خرده­آسفالتي بازيافتي استفاده گرديد. پس از خردکردن تراشه‌هاي ‌آسفالتي، ابتدا مصالح خرده آسفالتي به چهار قسمت تقسيم شده و از هر قسمت سه نمونه 2 كيلوگرمي تهيه گرديد و از الك 25 ميلي متر عبور داده شد و با استفاده از روشهاي استاندارد ASTM C 136,137 دانه­بندي مصالح تعيين گرديد[14] و دانه‌هاي درشت‌تر از 25 ميليمتر از دانه­بندي خارج شد. در شکل1، نمودار دانه‌بندي اين مصالح در مقايسه با دانه‌بندي متوسط لايه بيندر آورده شده‌است.مقدار قير و رطوبت موجود در مصالح بازيافتي به ترتيب برابر با 2/3 و 3/0 درصد بود.



**شکل 1- دانه‌بندي مصالح بازيافتي (RAP )**

**2-2- انتخاب امولسيون قير**

انتخاب نوع امولسيون قير از نظر سازگاري با مصالح سنگي، حائز اهميت است. براي بررسي سازگاري امولسيون قير با مصالح خرده­آسفالتي، نمونه­هايي با دو نوع امولسيون قير كندشكن و ديرشكن تهيّه گرديد. بدين ترتيب كه سه نمونه با امولسيون قير كندشكن (CMS) و سه نمونه با امولسيون قير دير شكن (CSS-1h) كه مقدار امولسيون قير در هر مورد 5% بود، تهيه شد. انتخاب 5% امولسيون قير صرفاً براي ارزيابي پوشش دانه­هاي سنگي توسط امولسيون قير مي­باشد. سپس در هر مورد كيفيت مخلوط از نظر نحوه پوشش مصالح سنگي با امولسيون قير بطور بصري مورد ارزيابي قرار گرفت كه با توجه به مشاهدات، امولسيون قير دير شكن انتخاب شد كه اين انتخاب با توجه به دانه­بندي توپر مخلوط، با توصيه انستيتو آسفالت مبني بر انتخاب امولسيون قير دير شكن براي مخلوط­هاي با دانه­بندي توپر مطابقت دارد[15]. در صورتي‌که پوشش مناسب بر روي مصالح حاصل نشود، نوع قيرامولسيون بايد تغيير يابد. پوشش مصالح در اين تحقيق حتي براي نمونه‌هاي فاقد سيمان بيشتر از 95 درصد بود که نشان‌دهنده همخواني قيرامولسيون با مصالح است.

**جدول 1-مشخصات فيزيکي قيرامولسيون**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  **مشخصه** | **استاندارد** | **CMS-1** | **CSS-1h** |
| کندرواني سي‌بولت فيورول در 25 درجه (ثانيه) | ASTM D244 | **-** | **40** |
| کندرواني سي‌بولت فيورول در 50 درجه (ثانيه) |  | **200** | **-** |
| قابليت اندود مصالح سنگي | ASTM D244 |  | **خوب** |
| بار ذره‌اي دانه‌هاي قير | ASTM D244 | **-** | **مثبت** |
| مقدار قير خالص (%) | - | **65** | **60** |
| مقدار آب (%) | - | **-** | **35** |
| مقدار امولسيون‌ساز (%) | - | **1** | **1** |
| حلال (نفت) (%) | - | **1** | **5/3** |
| اسيد کلريدريک (%) | - | **-** | **5/0** |

**2-3-الياف پلي­پروپيلن[[1]](#footnote-2)**

پلي‌پروپيلن مانند اتيلن از مشتقات نفت بدست مي‌آيد ولي مقدار آن از اتيلن بيشتر است و از مواد ديگري كه براي پليمريزاسيون الياف مصنوعي استفاده مي‌شود ارزانتر است و به راحتي توسط فشار و حرارت زياد تبديل به الياف پليمري مي‌شود. اين الياف قبل از اينكه كشش روي آن انجام گيرد داراي 33 درصد ساختمان كريستالي مي‌باشد و بعد از كشش درجه كريستالين به 47 درصد مي‌رسد و بعد از عمليات حرارتي درجه كريستالين به 68 درصد مي‌رسد­[16].

استحكام كششي الياف پلي‌پروپلين حدود 5/3 تا 5 گرم بر دنير (به تعداد گِرم­هاي موجود در هر 9000 متر از الياف، يك دنير مي گويند) و ازدياد طول تا حد پارگي آن 7 تا20 درصد مي‌باشد. كشش‌پذيري اين الياف نسبتاً خوب است و در مقابل دو درصد كشش داراي 91 درصد برگشت به حالت اوليه است چگالي اين الياف 9/0 و جذب رطوبت آن صفر است. مقاومت اين الياف در مقابل مواد شيميايي به مراتب بيشتر از پلي‌استر و پلي‌آميدها مي‌باشد و اسيدها و بازها اثر كمي روي اين الياف دارند[16]­.

 در حال حاضر، اختلاط الياف در سازه آسفالتي به دو روش صورت مي­پذيرد: ابتدا مخلوط کردن الياف با مصالح خرده­آسفالتي و سپس افزودن قير به آنها که به روش خشک [[2]](#footnote-3)مرسوم است و در روش دوم که به روش تر [[3]](#footnote-4)مرسوم است، ابتدا الياف با قير مخلوط مي­گردند و مخلوط حاصل به مصالح خرده­آسفالتي اضافه مي­گردد. در اين تحقيق به دليل سهولت اجراي آزمايشگاهي، روش خشک مورد استفاده قرار گرفت.طول الياف نيز با توجه به مرور تحقيقات و مطالعات قبلي 6 ميلي­متر انتخاب گرديد[5و 17].

**جدول 2-مشخصات الياف پلي­پروپيلن مورد استفاده در تحقيق**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **نوع ليف** | **ظرافت (دنير)** | **قطر (ميلي­متر)** | **چگالي (گرم بر سانتي­متر مکعب)** | **طول الياف (ميلي­متر)** |
| پلي­پروپيلن | 3 | **021/0** | **9/0** | **6** |

**3. طرح اختلاط**

براي تهيه نمونه­هاي حاوي سيمان و الياف، ابتدا سيمان و الياف به مصالح خرده آسفالتي اضافه شد سپس آب بهينه افزوده گرديد و توسط مخلوط كن به خوبي مخلوط شد و سرانجام امولسيون قير را كه به مدت يك ساعت در دماي $℃$60 درجه سانتيگراد گذاشته شده بود به مخلوط اضافه گشت. از اين شيوه براي ساخت تمام نمونه­ها در اين تحقيق استفاده شده است.

در اين تحقيق از روش طرح اختلاط مارشال اصلاح شده براي تعيين درصد قير بهينه و رطوبت بهينه استفاده شد. همچنین برای تراکم مناسبتر نمونه­های مارشال از دستگاه متراکم کننده چرخشي روسازي ممتاز[[4]](#footnote-5) (مطابق شکل2) جهت ساخت و تراکم استفاده شد. استفاده از دستگاه ژيراتوري به جهت مشابهت آن با عملكرد تراكم غلتكها در شرايط واقعي است[4]. تعداد چرخش دستگاه 60 دور و با فشار قائم 600 کيلو پاسکال و زاويه چرخش25/1 درجه انتخاب گرديد. انتخاب این اعداد به این خاطر می­باشد که بعد از تقريباً 60 دور چرخش برای تمام درصد­های امولسيون، وزن مخصوص به مقدار ثابتی می­رسد. آزمايشات نشان داده است که با 10 دور چرخش، وزن مخصوص به مقدار 85 تا 90 درصد وزن مخصوص تئوريک حداکثر که با استفاده از روش ASTM D 2041 تعيين می­شود، می­رسد و پس از 60 دور چرخش، دانسيته بين 90 تا 95 درصد وزن مخصوص حداکثر خواهد رسيد[18]. فشارسنج مقدار فشار را كه بايد در حين متراكم نمودن ثابت بماند، مشخص مي­نمايد. اندازه­گيري ارتفاع نمونه از ويژگيهاي مهم دستگاه متراكم كننده چرخشي روسازي ممتاز مي­باشد. با اين اندازه­گيري و مشخص بودن وزن نمونه­ها در قالب و نيز ابعاد داخل قالب، دانسيته نمونه و ميزان تراكم در طول مدت تراكم تخمين زده مي­شود و دانسيته مخلوط آسفالتي با افزايش تعداد چرخش افزايش مي­يابد. به اين ترتيب مشخصات تراكمي نمونه در حين تراكم معين مي­شود[4]. براي طرح نيز از روشي مشابه روش اصلاح شده مارشال استفاده گرديد. در اين روش ابتدا مقدار قيرامولسيون بهينه در حالي‌که مقدار رطوبت موجود در مخلوط برابر با سه درصد بود، تعيين شد. مقدار رطوبت برابر با مجموع آب موجود در قيرامولسيون (مطابق جدول 1 برابر با 35 درصد)، رطوبت موجود در مصالح خرده­آسفالتي (برابر با 3/0 درصد) و آب اضافي مي‌باشد. مقدار قيرامولسيون افزوده شده در ترکيب‌هاي مختلف بين 5/2 تا 5/4 درصد بود. پس از اين مرحله نمونه‌ها به مدت 6 ساعت در دماي 40 درجه سانتيگراد درون گرمخانه عمل‌آوري شده و قبل از خروج نمونه‌ها از قالب، 24 ساعت عمل‌آوري در دماي آزمايشگاه ادامه يافت. پس از خروج نمونه‌ها از درون قالب، نمونه‌ها به مدت 48 ساعت در دماي آزمايشگاه عمل‌آوري شده و وزن‌مخصوص حقيقي و حداکثر آنها به ترتيب طبق استانداردهاي ASTM D2726 و ASTM D2041 تعيين و فضاي خالي نمونه‌ها محاسبه شد. معيار انتخاب قيرامولسيون بهينه در اين روش فضاي خالي مخلوط مي‌باشد که بين 9 تا 14 درصد پيشنهاد شده‌است[9و18]. علاوه بر فضاي خالي، استحکام مارشال و وزن‌مخصوص نمونه‌ها نيز در تعيين مقادير بهينه قيرامولسيون و رطوبت مورد استفاده قرار گرفت. مقدار قيرامولسيون بهينه برابر با مقداري در نظر گرفته شد که علاوه بر برآورده نمودن معيار فضاي خالي، استحکام مارشال و وزن‌مخصوص مخلوط نيز نزديک به حداکثر مقدار خود باشد. بر اين اساس مقدار قيرامولسيون بهينه برابر با 4/3 درصد تعيين شد.



**شكل 2- دستگاه متراكم كننده چرخشي روسازي ممتاز**

در مرحله دوم مقدار رطوبت بهينه در قيرامولسيون بهينه تعيين شد. نحوه آماده‌سازي نمونه‌ها و آزمايش‌هاي انجام شده مشابه قبل مي‌باشد. در جدول 3 مقدار رطوبت بهينه براي نمونه‌هاي مختلف ارائه شده‌است. مقدار رطوبت بهينه برابر با مقداري انتخاب شده که معادل با حداکثر استحکام مارشال وحداکثر وزن‌مخصوص باشد و براساس در صد بدست آمده، فضاي خالي بين 9 تا 14درصد تامین شود[9و18]. براي تعيين درصد امولسيون قير بهينه 12 نمونه و براي تعيين درصد آب اختلاط نيز 24 نمونه با استفاده از دستگاه متراکم کننده چرخشي روسازي ممتاز تهيه شد.

**جدول 3-رطوبت بهينه براي ترکيبات مختلف مورد تحقيق**

|  |  |
| --- | --- |
| **مقدار سيمان(%)** | **درصد رطوبت بهينه** |
|
| 0 | 7/3 |
| 0/1 | 4 |
| 0/2 | 5/4 |
| 0/3 | 5 |
| **مقدار سيمان (%) و 3/0% الياف** |  |
| 0 | 9/3 |
| 0/1 | 2/4 |
| 0/2 | 7/4 |
| 0/3 | 2/5 |

**4. بررسي آزمايشگاهي تأثير سيمان والياف پلي­پروپيلن**

آزمايش‌هاي اصلي انجام شده دراين تحقيق شامل آزمايش‌ مارشال،آزمايش کشش­غيرمستقيم، مدول برجهندگي و خزش ديناميکي مي‌باشند. آزمايش‌ مارشال با استفاده از استاندارد ASTM D 1559، آزمايش کشش­غيرمستقيم[[5]](#footnote-6) در دماي 20 درجه سانتيگراد و با استفاده از استاندارد ASTM D4123-04 و آزمايش مدول برجهندگي با استفاده از استاندارد ASTM D4123 انجام شدند[9و 5].

جهت انجام آزمايش مارشال از دستگاه مارشال و جهت انجام آزمايش‌ کشش­غيرمستقيم و مدول برجهندگي از دستگاه UTM-14P[[6]](#footnote-7) که داراي محفظه کنترل دما مي‌باشد، استفاده شد. نمونه‌ها با توجه به نتايج طرح اختلاط ساخته شده و به منظور رسيدن به دماي مورد نظر درون محفظه دستگاه قرار داده مي‌شدند. دستگاه حاوي يک نمونه شاهد بود که با استفاده از آن دماي پوسته و مغزه نمونه‌ در هر لحظه اندازه‌گيري و توسط نرم‌افزار مربوطه ثبت مي‌شد.

نمونه­هاي تمامي آزمايشها با استفاده از دستگاه متراكم كننده چرخشي روسازي ممتاز، متراكم شد. تمامي نمونه­ها مدت 6 ساعت در دماي 40 درجه سانتيگراد درون گرمخانه عمل‌آوري شده و قبل از خروج نمونه‌ها از قالب، 24 ساعت عمل‌آوري در دماي آزمايشگاه ادامه يافت. پس از خروج نمونه‌ها از درون قالب، نمونه‌ها به مدت 48 ساعت در دماي آزمايشگاه عمل‌آوري شده و وزن‌مخصوص حقيقي و حداکثر آنها محاسبه شد.

**5. آزمايش مارشال**

دو ويژگي در اين آزمايش تعيين مي شود كه عبارتند از بيشترين باري كه نمونه بدون گسيختگي مي­تواند تحمل كند (استحکام مارشال) و ميزان تغيير شكلي كه در نمونه در لحظه شكست رخ مي­دهد (رواني مارشال). يك مفهوم ديگر كه بعضي از مواقع براي ارزيابي مخلوطهاي آسفالتي بكار مي­رود، شاخص سختي مارشال مي­باشد كه عبارتست از نسبت استحکام مارشال به رواني آن كه مقداري تجربي براي سختي مخلوطهاي آسفالتي مي­باشد. مقادير بالاتر شاخص سختي مارشال نشان دهنده مخلوط سخت­تر بوده و حاكي از آن است كه احتمالاً مخلوط داراي مقاومت بيشتري در برابر تغيير شكل دائم مي باشد [4، 5و 9].

براي انجام آزمايش مارشال 24 نمونه با درصد آب بهينه و امولسيون قير بهينه هر افزودني که در جدول 1 و 3 آمده­است تهيه گرديد. سپس نمونه­ها تحت آزمايش مارشال قرارگرفتند. نتايج آزمايش مارشال در جدول 4 و شاخص سختي مارشال در شكل3 ارائه شده است.

**جدول4. نتايج آزمايش مارشال مخلوطهاي بازيافتي**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **نوع افزودني** | **مقدار سيمان(%)** | **مقدار الياف(%)** | **وزن مخصوص** | **درصد فضاي خالي** | **استحکام مارشال (KN)** | **رواني (mm)** |
| سيمان | 0 | 0 | 129/2 | 716/12 | 92/9 | 9/2 |
| سيمان | 1 | 0 | 136/2 | 924/11 | 57/10 | 77/2 |
| سيمان | 2 | 0 | 142/2 | 456/11 | 31/13 | 4/2 |
| سيمان | 3 | 0 | 147/2 | 974/10 | 87/14 | 25/2 |
| الياف | 0 | 3/0 | 121/2 | 164/13 | 82/9 | 81/2 |
| سيمان و الياف | 1 | 3/0 | 132/2 | 674/12 | 83/10 | 61/2 |
| سيمان و الياف | 2 | 3/0 | 143/2 | 794/11 | 78/13 | 31/2 |
| سيمان و الياف | 3 | 3/0 | 148/2 | 047/11 | 17/15 | 11/2 |

همانطور كه در جدول 4 مشاهده مي­شود با افزودن سيمان وزن مخصوص نمونه­ها افزايش يافته از طرفي با افزودن الياف وزن­مخصوص ابتدا داراي کمترين مقدار مي­باشد که با افزودن سيمان و الياف با­هم، وزن مخصوص افزايش قابل توجهي دارد كه اين مطلب را مي­توان با پر شدن فضاهاي خالي مخلوط توسط افزودني­ سيمان، توجيه نمود و اين نشان دهنده كاهش درصد فضاي خالي نمونه­ها مي­باشد كه نتايج آزمايش درصد فضاي خالي نمونه­ها نيز مؤيد اين مطلب مي­باشد.

**شكل3. شاخص سختي مارشال نمونه­هاي بازيافتي**

نتايج آزمايش مارشال نشان مي دهد كه استحکام مارشال نمونه ها با افزودن سيمان افزايش مي­يابد اما اين افزايش در مورد نمونه­هاي داراي الياف محسوس­تر است، براي مثال با افزودن 2 و 3 درصد سيمان به مخلوط به ترتيب 34% و 9/49% استحکام مارشال نمونه­ها نسبت به نمونه­هاي بدون افزودني افزايش مي­يابد در حالي كه اين افزايش براي نمونه حاوي 2و 3 درصد سيمان و 3/0 درصد الياف پلي­پروپيلن به 9/38 % و 9/52% مي­رسد. نتايج اين آزمايش همچنين نشان مي­دهد كه با افزودن سيمان و الياف به مخلوط، رواني نمونه­ها كاهش مي­يابد. بالا بودن استحکام و كمتر بودن رواني در شرايط استفاده از مصالح يكسان نشان دهنده استحكام بيشتر در برابر تنش و مقاومت بيشتر در برابر تغيير شكل مي­باشد.

با توجه به نتايج مي­توان دريافت که با افزودن الياف پلي­پروپيلن، در ابتدا استحکام مارشال کمتر از نمونه بدون افزودني مي­باشد، که البته با توجه به رواني کمتر اين نمونه­ نسبت به نمونه بدون افزودني، نمونه داراي الياف پلي­پروپيلن داراي شاخص سختي مارشال بالاتري نسبت به نمونه بدون افزودني مي­باشد.

نسبت استحکام مارشال به رواني نمونه­ها (شاخص سختي مارشال) نيز نشان مي­دهد كه با افزودن الياف و سيمان اين نسبت افزايش يافته به طوري كه شاخص سختي مارشال نمونه­هاي حاوي سيمان و الياف نسبت به شاخص سختي مارشال نمونه­هاي بدون افزودني و داراي سيمان افزايش يافته است كه اين مطلب مي­تواند نشان دهنده مقاومت اوليه بالاي نمونه­هاي حاوي سيمان و الياف و درنتيجه كاهش تغيير شكل­هاي دائمي نمونه­ها باشد.

**6. مقاومت کششي غيرمستقيم(ITS)**

آزمايش کشش­غيرمستقيم براي تعيين خصوصيات کششي بتن­آسفالتي که مي­تواند منجربه شناخت خصوصيات ترک خوردگي روسازي شود، استفاده مي­شود[4و9].

براي انجام آزمايش کشش­غيرمستقيم 24 نمونه با درصد آب و امولسيون قير بهينه تهيه گرديد. نحوه ساخت نمونه­ها مطابق ساخت نمونه­هاي آزمايش مارشال توسط دستگاه متراکم کننده چرخشي روسازي ممتاز انجام گرفت. آزمايش کشش­غيرمستقيم با استفاده از دستگاه UTM-14P انجام شد. براي انجام آزمايش ابتدا نمونه­ها به مدّت 40 دقيقه در دماي $℃$60 درجه سانتيگراد قرار داده شدند و به نحوي زير جک دستگاه آزمايش قرار مي­دهيم که نيرو در امتداد قطر عمودي به آن وارد شود. بارگذاري با نرخ ثابتcm/mm $^{cm}/\_{min}$5 روي نمونه­ها صورت مي­گيرد. حداکثر مقاومت فشاري ثبت شده توسط ماشين را يادداشت کرده و بارگذاري را تا مشاهده اولين ترک طولي و شکستن نمونه در امتداد ترک ادامه مي­دهيم. سپس به محاسبه مقاومت کششي غير­مستقيم مي­پردازيم[4و 9]. نتايج آزمايش کشش­غيرمستقيم در جدول 5 ارائه شده است.

در اين آزمايش مطابق شکل 4 نمونه استوانه‌اي تحت بارگذاري قطري قرار گرفته و در اثر تنش کششي يکنواخت ايجاد شده راستاي عمود بر بارگذاري ترک مي‌خورد[9].



 **شکل 4- نحوه بارگذاري در آزمايش کشش غيرمستقيم[9]**

مقاومت کششي نمونه‌ با استفاده از رابطه (1) محاسبه مي‌شود[4و9]:

|  |  |
| --- | --- |
| 1.
 |  |

در اين رابطه:

Pmax: بار نهايي اعمال شده (نيوتن)

t: ارتفاع نمونه (ميليمتر)

d: قطر نمونه (ميليمتر)

St: مقاومت کششي (کيلوپاسکال)

شکست نمونه به صورت يکي از سه حالت زير مي‌باشد:

الف: شکست آشکار نمونه در راستاي قطر که گاهي با قطعات مثلثي در نزديکي نوار بارگذاري همراه است.

ب: وقوع تغييرشکل بيش از حد در نمونه که مانع از تشکيل يک صفحه شکست آشکار مي‌شود.

ج: به صورت ترکيبي از دو حالت قبل که در نزديکي نوارهاي بارگذاري تغييرشکل بيش از حد و در نزديکي مرکز نمونه يک صفحه شکست مشاهده مي‌شود[9].

در اين تحقيق شکست نمونه‌هاي فاقد سيمان و حاوي مقادير اندک سيمان و الياف بيشتر به صورت حالت ج و نمونه‌هاي حاوي مقادير بالاتر سيمان و الياف بيشتر به صورت حالت الف و ب بوده‌است.

نتايج اين آزمايش همنطورکه در جدول5 مشاهده مي­شود، نشان مي­دهد كه نمونه­هاي داراي افزودني سيمان در قياس با نمونه­هاي بدون افزودني، کشش­غيرمستقيم بيشتري دارند. افزايش کشش­غيرمستقيم نمونه­هاي حاوي سيمان و الياف نسبت به نمونه­هاي داراي سيمان و نمونه­هاي بدون افزودني قابل توجه مي­باشد.

**جدول5- نتايج آزمايش کشش­غيرمستقيم مخلوطهاي بازيافتي**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **نوع افزودني** | **مقدار سيمان(%)** | **مقدار الياف(%)** | مقاومت کششي غير مستقيم(kpa) |
| سيمان | 0 |  | 2/208 |
| سيمان | 1 |  | 6/219 |
| سيمان | 2 |  | 1/247 |
| سيمان | 3 |  | 5/284 |
| الياف |  | 3/0 | 1/211 |
| سيمان و الياف | 1 | 3/0 | 8/229 |
| سيمان و الياف | 2 | 3/0 | 6/280 |
| سيمان و الياف | 3 | 3/0 | 8/338 |

در شکل5 نيز، روند تغييرات مقاومت کششي نمونه‌هاي حاوي سيمان، بدون­افزودني و نمونه‌هاي حاوي سيمان والياف نشان داده شده‌است. با توجه به نتايج، افزايش مقاومت کششي نمونه‌ها داراي سيمان و الياف در برابر نمونه­هاي داراي سيمان و نمونه­هاي بدون­افزودني قابل توجه بوده واگرچه در ابتدا با افزودن الياف پلي­پروپيلن و همينطور سيمان نرخ افزايش کم است ولي در درصدهاي بالاتر سيمان و الياف نرخ افزايش کاملأ محسوس است و مقاومت کششي با افزايش سيمان در نمونه­هاي داراي الياف افزايش قابل قبولي داشته‌است.

**شکل 5- مقاومت کششي نمونه‌هاي حاوي سيمان، سيمان والياف و نمونه­هاي بدون­افزودني**

**7. آزمايش مدول برجهندگي**

مدول برجهندگي مخلوط‌هاي آسفالتي که طبق استاندارد ASTM D4123 به روش کشش غيرمستقيم اندازه­گيري مي­شود، يکي از رايج‌ترين روش‌هاي تعيين نمودار تنش-کرنش جهت ارزيابي خصوصيات الاستيک مصالح است[18]. برا ي انجام آزمايش مدول برجهندگي 24 نمونه با درصد آب و امولسيون قير بهينه تهيه گرديد. نحوه ساخت نمونه­ها مطابق ساخت نمونه­هاي مارشال، توسط دستگاه متراکم کننده چرخشي روسازي ممتاز انجام گرفت.

براي يک بار ديناميکي با حداکثر اندازه P که تغييرشکل‌هاي افقي ناشي از آن اندازه‌گيري شده‌اند، مدول برجهندگي کل با استفاده از رابطه (2) به دست مي‌آيد[20]:

|  |  |
| --- | --- |
| (2)  |   |

در اين رابطه:

Mr: مدول برجهندگي (MPa)

P: حداکثر بار دينامکي (N)

$μ$: ضريب پواسن(35/0)

t: طول نمونه (mm)

h**δ**: تغييرشکل افقي برگشت‌پذير کل (mm)

مي‌باشند.

نحوه قرارگيري نمونه در قاب بارگذاري در شکل 6 ارائه شده‌است. با توجه به اين شکل تغييرشکل افقي توسط دو LVDT ثبت مي‌شود.



**شکل6- نحوه قرارگيري نمونه‌ها در قاب بارگذاري آزمايش مدول برجهندگي**

آزمايش مدول برجهندگي با استفاده از دستگاه UTM-14P انجام شد. شكل بارگذاري نيمه سينوسي، مدّت اعمال بار 1/0 ثانيه، زمان استراحت 9/0 ثانيه، تعداد پيش بارگذاري 200 سيكل، آزمايش براي هر نمونه در يک سطح تنش (30 درصد مقاومت کششي در شرايط دمايي و عمر مشابه) انجام شد. همچنين براي هر نمونه مشابه، آزمايش دو بار تکرار شده و از ميانگين نتايج در محاسبات استفاده شده‌است. ضريب پواسون 35/0 انتخاب گرديد و آزمايش در دماي $℃$20 انجام گرفت. اين اعداد بر اساس توصيه پروتكل SHRP P07 انتخاب شده است[21]. در جدول6 نتايج آزمايش مدول برجهندگي آورده شده است.

با توجه به نمودار1 مشاهده مي­شود که با افزايش درصد سيمان مدول برجهندگي مخلوط بازيافتي افزايش دارد که در نمونه داراي 3درصد سيمان به حدود 3500 Mpa مي­رسد. همچنين با افزودن الياف و سيمان نيز با افزايش مقدار سيمان مدول برجهندگي افزايش دارد، هرچند مقادير مدول برجهندگي از نمونه­هاي داراي فقط سيمان کمتر است.

با توجه به تحقيقات گذشته[4، 9] با افزايش سيمان، در دماهاي پايين به شدت باعث افزايش مدول برجهندگي مخلوطهاي امولسيوني حاوي سيمان شده، که عملکرد مقادير بالاي سيمان را با مشکل مواجه مي­کند. اما با توجه به نمودار حاصله مي­توان دريافت که افزايش الياف باعث کاهش شيب نمودار مدول برجهندگي\_کشش غيرمستقيم در مقايسه با حالت نمونه­هاي فقط داراي سيمان مي­شود، بنابراين مي­توان اميد داشت که افزودن الياف بتواند باعث بهبود عملکرد مدول برجهندگي اين مخلوط در دماي پايين­تر شود و همچنان از استحکام کششي مناسب برخوردار باشد.

 **نمودار1- رابطه مقاومت کششي و مدول برجهندگي**

**7. نتيجه‌گيري**

در اين تحقيق مجموعاً 84 نمونه با ابعاد نمونه­هاي مارشال براي آزمايشهاي مارشال و کشش­غيرمستقيم مورد استفاده قرار گرفت. خلاصه نتايج آزمايش­ها در ذيل ارائه شده است:

1- نتايج آزمايش مارشال نشان مي­دهد كه با افزودن سيمان و الياف، استحکام مارشال افزايش يافته و رواني كاهش مي­يابد. اين نتايج نشان مي­دهد كه افزودن سيمان و الياف پلي­پروپيلن با هم به مخلوط آسفالتي بازيافتي سرد در درصدهای سیمان پایین می­تواند افزودني موثری در استحکام مارشال مي­باشد. اگرچه اختلاف استحکام مارشال نمونه­های حاوی 3درصد سيمان و 3/0 درصد الياف نسبت به نمونه­هاي 3درصد سیمان ناچیز مي­باشد.

2- بالا بودن استحکام و كمتر بودن رواني در شرايط استفاده از مصالح يكسان نشان دهنده استحكام بيشتر در برابر تنش و مقاومت بيشتر در برابر تغيير شكل مي باشد. شاخص سختي مارشال نمونه­هاي بازيافتي حاوي افزودني سيمان و الياف نسبت به نمونه­هاي بدون افزودني افزايش يافته است كه نشان­دهنده مقاومت بيشتر در برابر تغيير شكل دائمي مي­باشد. به­طوريكه افزودن 3 درصد سيمان و 3/0 درصد الياف پلي­پروپيلن منجر­به افزايش سختي مارشال تا (KN/mm) 19/7 مي­شود که اين امر باعث استحكام بيشتر در برابر تنش و مقاومت بيشتر در برابر تغيير شكل مي باشد.

3-نتايج آزمايش کشش­غيرمستقيم نشان مي­دهد كه با افزودن سيمان و الياف، مقاومت مخلوط در برابر کشش­غيرمستقيم نسبت به نمونه­هاي داراي افزودني سيمان و نمونه­هاي بدون­افزودني افزايش پيدا مي­کند. همچنين با افزايش درصد سيمان در نمونه­هاي داراي الياف، استحکام در برابر کشش­غيرمستقيم داراي افزايش محسوسي مي­باشد. به­طوريكه افزودن 2درصد سيمان و3/0 درصد الياف و همچنين افزودن 3درصد سيمان و 3/0 درصد الياف پلي­پروپيلن به ترتيب منجر­به افزايش کشش­غيرمستقيم تا 281 و 339 کيلو­پاسکال مي­شود.

4- نتايج تمامي آزمايش­هاي مورد بررسي در اين پژوهش نشان مي­دهند كه تغيير شكل­هاي مخلوط­هاي بازيافتي بدون افزودني بسيار زياد است و بنابراين استفاده از افزودني­هايي نظير سيمان، سيمان و الياف براي افزايش استحکام وكاهش تغيير شكل­هاي دائمي، توصيه مي­شود در اين ميان نقش سيمان والياف پلي­پروپيلن با توجه به آزمايش­هاي انجام شده در اين تحقيق پررنگ­تراست.

5-با توجه به نتايج مشاهده مي­شود که الياف به تنهايي نميتواند تاثير قابل توجهي در ويژگي­هاي کششي و مدول برجهندگي داشته باشد. ولي از طرف ديگر با توجه به افزودني سيمان، سيمان و الياف مشاهده مي­شود که با افزايش درصد سيمان و همچنين ويژگي­هاي الياف اين دو ويژگي به طور قابل توجهي افزايش مي­يابد که نشان دهنده عملکرد مناسب اين افزودني در مخلوطهاي سرد امولسيوني است.

**8. قدرداني**

از همکاري آزمايشگاه روسازي دانشگاه فردوسي مشهد و نيز جناب آقايان حاجي­نژاد و فنودی سپاسگزاريم. همچنين ازهمکاري شرکت کارخانجات راهسازي محمديان دامغان و شرکت ژيکاوا جهت تهيه قير امولسيون و الياف پلي­پروپيلن کمال تشکر را داريم.

**Investigation of Marshall, resilient modulus and indirect tensile strength of cold recycled asphalt mixture with Asphalt emulsion containing cement and fiber (polypropylene) as additives**

**Farshad Firouzei1, Abolfazl Mohammadzade Moghadam2,Morteza Jalili Qazizade3, Aliasghar Sadeghi4**

**1- M.S.c, Azad university, Zanjan, Iran**

**2, 4-Ph.D student, Department of Civil engineering, Ferdowsi university, Mashhad, Iran**

**3- Ph.D. student, Civil and environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University of Tehran, Iran**

F.Firoozei@yahoo.com

**Abstract**

The high volume of waste materials (such as waste fibers) in the world are accumulated and involve a lot of environmental problems. The use of this material for several years to promote the behavioral characteristics of various materials has been investigated. Through years, Usage of fiber to improve the properties of the hot mix asphalt were also evaluated, that improve behavioral characteristics of the Hot Mix Asphalt, but the lack of fiber investigation in cold recycled asphalt with bitumen emulsion is still felt.

 This study is surveying the performance of fiber in cold recycled asphalt and evaluates the results of Marshall tests, Marshall stiffness index, indirect tensile strength and resilient modulus. Fibers used in this study is Polypropylene fiber with length of 6 mm. Experiments showed that polypropylene fibers can improve Marshall Stiffness index, and more resistance of mixture against permanent deformation. Also indirect tensile strength of mixture and resilient modulus significantly changes compared with the conventional emulsion mixtures. Strategies for further study in the future are suggested.

**Keywords:** cold recycling- bituminous emulsion- resilient modulus- Indirect Tensile strength- Marshall stiffness index

**9. مراجع**

]1 [Stephen A. Cross and David A. Young (1997) "Evaluation of Type C Fly Ash in Cold In – Place Recycling" TRR 1583, pp 82-90

]2[ Rita Issa, Musharraf M. Zaman, Gerald A. Miller, Lawrence J. Senkowski (2001) "Characteristics of Cold Processed Asphalt Millings and Cement-Emulsion Composite" 80th Annual Meeting of TRB

[3 [Michael D. O’Leary and Robert D. Williams (1992) "In Situ Cold Recycling of Bituminous Pavements With Polymer-Modified High Float Emulsions" TRR 1342, pp 20-25

[4[Niazi, Y. & Jalili Q. M. (2009). Effect of Portland Cement and Lime Additives on Properties of Cold In-Place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion. Construction and Building Materials 23, pp 1338-1343

 [5]حجازي س.م، شيخ­زاده م، ابطحي س.م، سمناني د "بررسي کاربرد مواد نساجي گوناگون جهت تسليح مکانيکي بتن آسفالتي و تحليل نتايج حاصل با استفاده از يک شبکه عصبي مصنوعي"، چهارمين کنگره ملي مهندسي عمران، ارديبهشت 1387

[6[Komatsu, T.,Kikuta, H.,Tuji, Y. and Muramastsu, E. (1998) Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete, Geotextiles and Geomembranes, 16(5),257-271

[7[Brown, S.F., Rowlett, R.D. and Boucher, J.L.(1990) Asphalt Modification. Proceedings of the conference on the United States Strategic Highway Research Program: Sharing the Benefits. London, Thomas Telford (pub).p. 181-203

[8]Maurer, Dean, A., Malasheskie (1989) Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking,Transportation Research Record, 1248, 13-23

[9] Amir Kavussi, Amir Modarres (2010). A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. Construction and Building Materials 24, pp 2252-2259

[10] Huang, Y., Bird, N. and Heidrich, O., (2007) A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, Resources, Conservation and Recycling 52 (2007) 58–73

[11[MAHREZ, A., KARIM, M. and Katman, H., (2005) Fatigue and Deformation Properties of Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixes. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, 997-1007

]12[ Daniel T. Murphy and John J.Emery (1996) "Modified Cold In-Place Asphalt Recycling" TRR 1545, pp 143-150

[13[T.V. Scholz, R.G. Hicks, D.F. Rogge and Dale Allen (1991) "Use of Cold In-Place Recycling on Low-Volume Roads", TRR 1291, pp 239-252

[14[Annual Book of ASTM Standards (1997), vol.04.03, vol.04.02

]15[the Asphalt Institute Series No.21 (MS-21) (1983)"Asphalt Cold – Mix Recycling", First Edition

[16] E.P.G. Gohl , L.D. Vilensky “Textile Science “ second edition CBS Publisher and Distributor , 1987

[17] Serkan Tapkin (2007) The effect of polypropylene fibers on asphalt performance, Building and Environment, Volume 43, Issue 6, June 2008, Pages 1065-1071

[18] Saloman,A., And D.E. Newcomb "Cold In-Place Recycling Literature Review and Preliminary Mixture Design Procedure", Minnesota Department of Transportation, 2000

[19] Tayfur, S., Ozen, H., and Aksoy, A., “Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers”. Constr Build Materail, 2007:pp 321–328

[20] ASTM D4123-82, “Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures”, ASTM Book of Standards, Vol. 04.03, USA, 2003

]21 [Katicha, Samer , (2003) "Development of laboratory to filed shift factors for Hot-mix asphalt resilient modulus", M.S. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University

1. -pp [↑](#footnote-ref-2)
2. - Dry Procedure [↑](#footnote-ref-3)
3. - Wet Procedure [↑](#footnote-ref-4)
4. - Superpave Gyratory Compactor [↑](#footnote-ref-5)
5. -Indirect Tensile Strength [↑](#footnote-ref-6)
6. - Universal Testing Machine [↑](#footnote-ref-7)