



Laboratory investigation on the use of recycled fillers in improving the performance of Stone Mastic Asphalt (SMA)

A. Baseri Azghandi¹, M. Pourabbas Bilondi^{2*}, D. Moazami¹

¹ Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

² Department of Civil Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

ABSTRACT: The present research was conducted with the aim of investigating the effect of the type of filler on the mechanical properties of the stone mastic asphalt (SMA). For this purpose, five types of fillers, including silica filler (SF) as the base filler in the control sample, Portland cement (OPC) and limestone powder (LSP) as common fillers, and recycled glass powder (RGP) and calcium carbide waste (CCR) as recycled fillers, were used in their pure form or combined with each other. In order to investigate the resistance of the samples against rutting, the Marshall test was used to obtain the Marshall strength (MS) and especially the Marshall coefficient (MQ). Also, resistance to cracking and moisture sensitivity was also evaluated by performing the Indirect Tensile Strength (ITS) test in dry and saturated conditions and obtaining the Tensile Strength Ratio (TSR). The results have shown that the samples containing recycled fillers had the best performance in improving the properties of SMA asphalt. Such that the use of the combination of recycled fillers, in addition to improving the properties of SMA compared to samples containing silica fillers, The values of MS, MQ, ITS, and TSR have increased by 36, 19, 24, and 31%, respectively, compared to the best results obtained using common fillers (OPC or LSP). Therefore, the use of RGP and CCR compounds as fillers in SMA asphalt, in addition to helping to protect the environment, and natural resources, and economic savings, can also be technically very effective in improving the service life of asphalt mixtures.

Review History:

Received: Nov. 06, 2022

Revised: Oct. 06, 2023

Accepted: Nov. 14, 2023

Available Online: Jan. 19, 2024

Keywords:

Stone mastic asphalt
calcium carbide residue
waste glass powder
asphalt rutting
moisture sensitivity

1- Introduction

Due to high annual costs in producing asphalt mixtures, pavement maintenance, and rehabilitation, as well as the inability of produced binders to fulfill durability, ductility, resistance to rutting, fatigue cracks and freeze and thaw cycles, moisture and other requirements; pavement engineers aim to improve the engineering properties of asphalt mixtures using various additives. Up to this time besides the common fillers like limestone and siliceous powder as well as lime and cement; the application of recycled fillers such as glass powder [1-3], hydrated lime[4], rice husk ash[2, 5], recycled brick powder [6], carbide lime[1-3], Nanomaterial[7], waste copper mines[2], fly ash[5], have been addressed. Recycled Glass Powder (RGP) and Calcium Carbide Residue (CCR) have positive impacts in improving the mechanical properties of asphalt mixtures. In this research, the Indirect Tensile Strength (ITS) and moisture susceptibility of Stone Mastic Asphalt (SMA) were studied. Various common fillers such as siliceous filler (SF), Limestone powder (LSF), Ordinary Portland Cement (OPC), and recycled fillers including RGP and CCR were investigated.

The aim of this research was to consider the possibility of utilizing these recycled fillers and introducing a new

combination to improve the properties of SMA mixtures, besides the economic and environmental aspects. In this regard, Marshall Stability, flow, and ITS tests in dry and saturated conditions were done.

2- Test materials and methods

Materials used in this study were: limestone aggregates, 60-70 bitumen from Isfahan, Iran, various fillers including siliceous and Limestone powder, Portland cement, RGP, and CCR.

SMA Marshall Samples were constructed according to ASTM D6926 and they were compacted using 56 blows of Marshall Hammer based on heavy traffic requirements. Table 1 shows filler combinations in different control and modified samples and optimum asphalt content.

3- Results and Discussion

The obtained results are summarized in Table 2.

These results were the average of three prepared samples for each filler combination. As it can be seen from Table 2, the highest Marshall stability and Marshall Coefficient (stability divided by flow) belong to samples with recycled fillers. Based on the obtained results in Table 2; the incorporation 40% RGP

*Corresponding author's email: mpoorabbas64@gmail.com



Table 1. Nomenclature details and contents of samples

Tests	Optimum Bitumen Content (%)	Amount of filler (%)	Type and percentage of fillers mixing (%)					sample code	Sample name
			RGP	CCR	OPC	LSP	SF		
MS, ITS _{uncond} *, ITS _{cond} **	6%	9%	0	0	0	0	100	1	control
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	0	0	0	100	0	1	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	0	0	100	0	0	2	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	0	50	50	0	0	111	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	0	50	0	50	0	112	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	50	0	50	0	0	113	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	50	0	0	50	0	114	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	20	80	0	0	0	115	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	25	25	50	0	0	116	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	40	60	0	0	0	117	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	25	25	0	50	0	118	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	60	40	0	0	0	119	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	80	20	0	0	0	120	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	100	0	0	0	0	121	main
MS, ITS _{uncond} , ITS _{cond}	6%	9%	0	100	0	0	0	122	main

*Unconditioned Indirect tensile strength (in dry state).

**Conditioned Indirect tensile strength (in saturated state).

Table 2. The results of th tests

Sample name	Code	Filler composition (%)	MS (kgf)	MQ (kgf/mm)	ITS _{uncond} * (KPa)	TSR
Control	1	100SF	590	144	1493	0.56
Improved	1	100LSP	708	148	1789	0.64
Improved	2	100OPC	723	150	1718	0.62
Improved	111	50OPC+50CCR	761	146	1886	0.7
Improved	112	50LSP+50CCR	762	156	1881	0.73
Improved	113	50OPC+50RGP	705	144	1941	0.65
Improved	114	50LSP+50RGP	706	139	1846	0.76
Improved	115	80CCR+20RGP	832	179	1741	0.8
Improved	116	50OPC+25CCR+25RGP	807	150	1782	0.76
Improved	117	60CCR+40RGP	863	204	1904	0.84
Improved	118	50LSP+25CCR+25RGP	779	164	1884	0.78
Improved	119	40CCR+60RGP	737	176	1920	0.77
Improved	120	20CCR+80RGP	747	166	2216	0.73
Improved	121	100RGP	742	149	1928	0.69
Improved	122	100CCR	820	146	1867	0.7

*Unconditioned

and 60% CCR (60CCR+40RGP), leads to maximum Marshall Stability and Marshall Coefficient. RGP has angular particles compared to other fillers which produce better internal friction and interlocks [1, 2]. Increased stability in CCR samples is related to both physical and chemical properties. From the physical point of view, CCR has a textured surface which leads to better adhesion to bitumen and increases the consistency of the mastic. From the chemical point of view, due to the high PH of CCR and the relatively acidic property of binder, these materials bind well together and contribute to asphalt mixture stiffness [1-3].

Due to the different properties of these two fillers, the combination of these materials provides both the particle shape and surface texture properties. In addition, the highest dry and saturated ITS values and the resulting TSR belong to recycled

fillers. Replacing LSP and OPC by RGP and CCR leads to considerably increased ITS and TSR values. The highest dry and saturated ITS values were seen in 20CCR+80RGP and the highest TSR was seen 60CCR+40RGP. The improved performance of CCR (compared to RGP) in the presence of water, is related to the presence of insoluble minerals such as Pentlandite, Calcite, and dolomite [1, 2].

Furthermore, the textured surface of CCR and better adhesion of the binder results in improved performance against moisture [8]. Therefore, according to the above, some proportions of CCR (60 to 80 percent) and 20 to 40 percent of RGP can be used as the optimum combinations to illustrate the superior performance in terms of MQ, ITS, and TSR characteristics.

4- Conclusion

Incorporating recycled fillers increases the Marshall Stability, Marshall Coefficient (MQ), indirect tensile strength (in both dry and saturated conditions) as well as TSR values compared to control samples. Improved TSR values indicated reduced temperature susceptibility which in turn results in increased operational life and durability.

Samples with the combined effect of CCR and RGP (60-80% CCR); exhibit the best performance in terms of Marshall Stability, MQ, ITS, and TSR. Incorporating these recycled fillers helps in improving the mechanical properties of asphalt mixtures as well as reducing environmental damage and protecting non-renewable natural resources.

References

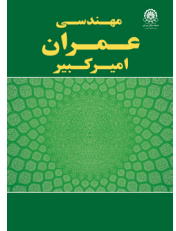
- [1] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Analysis and comparison of asphalt mixes containing waste fillers using a novel ranking methodology, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5) (2020) 04020064.
- [2] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Application of waste materials as fillers in bituminous mixes, *Waste Management*, 78 (2018) 417-425.
- [3] A. Gedik, An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction, *Construction and Building Materials*, 300 (2021) 123980.
- [4] M.H. Al-Sayed, I.M. Madany, W. Al-Khaja, A. Darwish, Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste, *Waste management & research*, 10(2) (1992) 183-194.
- [5] A. Ameli, R. Babagoli, N. Norouzi, F. Jalali, F.P. Mamaghani, Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117557.
- [6] H. Taherkhani, R. Bayat, Investigating the properties of asphalt concrete containing recycled brick powder as filler, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(8) (2022) 3583-3593.
- [7] M. Fakhri, The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA), *Case Studies in Construction Materials*, 15 (2021) e00655.
- [8] A. Dulaimi, H.K. Shanbara, H. Jafer, M. Sadique, An evaluation of the performance of hot mix asphalt containing calcium carbide residue as a filler, *Construction and Building Materials*, 261 (2020) 119918.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Baseri Azghandi, M. Pourabbas Bilondi, D. Moazami, *Laboratory investigation on the use of recycled fillers in improving the performance of Stone Mastic Asphalt (SMA)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(1) (2024) 11-14.

DOI: 10.22060/ceej.2024.21909.7850





بررسی آزمایشگاهی استفاده از فیلرهای بازیافتی در بهبود عملکرد مخلوط آسفالت سنگدانه‌ای

احمد باصری ازغندی^۱، میثم پورعباس بیلندی^{۲*}، دانیال معظمی^۱

۱ - گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
۲ - گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

آسفالت سنگدانه‌ای
کاربید کلسیم پسماند
پودر شیشه بازیافتی
شیار شدگی
حساسیت رطوبتی

خلاصه: تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر نوع فیلر بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA^۱) انجام گرفته است. بدین منظور، پنج نوع فیلر، شامل فیلر سیلیسی (SF^۱) بعنوان فیلر پایه در نمونه شاهد، سیمان پرتلند (OPC^۲) و پودر سنگ (LSP^۳) بعنوان فیلرهای رایج، همچنین پودر شیشه بازیافتی (RGP^۴) و پسماند کاربید کلسیم (CCR^۵) بعنوان فیلرهای بازیافتی، بصورت خالص یا ترکیب شده با یکدیگر مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور بررسی استقامت مارشال (MS^۶) و ضریب مارشال (MQ^۷) که یکی از پارامترهای رایج اثر گذار در طراحی روسازی می باشد، از آزمایش تعیین مقاومت مارشال استفاده شده است. همچنین مقاومت در برابر ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی آسفالت با انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS^۸) در حالت خشک و اشباع و نیز بدست آوردن نسبت مقاومت کششی (TSR^۹) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داده‌اند که نمونه های حاوی ترکیب فیلرهای بازیافتی، بهترین عملکرد را در ارتقای خصوصیات آسفالت SMA داشته‌اند. بگونه ای که استفاده از ترکیب فیلرهای بازیافتی، سبب بهبود بخشیدن خواص مقاومتی و کاهش حساسیت رطوبتی آسفالت نسبت به نمونه های حاوی فیلر سیلیسی گردیده و مقادیر ITS، MQ، MS، و TSR را بترتیب بمیزان ۳۶، ۱۹، ۲۴ و ۳۱ درصد نسبت به بهترین نتایج متناظر بدست آمده با استفاده از فیلرهای رایج (OPC و یا LSP) افزایش داده‌اند. بنابر این، استفاده از ترکیبات RGP و CCR بعنوان فیلر در آسفالت SMA، علاوه بر کمک به حفاظت از محیط زیست، حفظ منابع طبیعی و صرفه جویی اقتصادی، از نظر فنی نیز می تواند در بهبود پارامترهای مقاومتی و عمر سرویس مخلوطهای آسفالتی و همچنین کاهش حساسیت رطوبتی آسفالت بسیار موثر واقع گردد.

۱- مقدمه

مخلوط آسفالتی یک ماده کامپوزیت ویسکوالاستیک است که از قیر، مصالح سنگی درشت دانه و ریزدانه و فیلر در نسبتهای معین تشکیل می گردد [۱]، که آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA) یکی از انواع متداول آن می باشد. این نوع از آسفالت، در اواسط دهه ۱۹۶۰ توسط یک مدیر و مهندس آلمانی به نام دکتر زیخنر (Zichner) معرفی گردید [۲]. ایده اولیه SMA بر اساس تشکیل یک اسکلت مستحکم سنگی جهت مقاومت در برابر بارهای وارده و سایش، و مقدار زیادی از ماستیک (ترکیب قیر، ماسه، فیلر و در برخی موارد الیاف) جهت پر نمودن فضاهای خالی و افزایش عمر

سرویس آسفالت با دانه بندی گسسته و توپر بوده است [۳]. با توجه به هزینه های هنگفت سالانه کشورها و بخصوص ایران، در تولید مخلوطهای آسفالتی و مرمت و نگهداری راه ها و نیز عدم توانایی قیرهای تولیدی در تامین برخی خصوصیات مطلوب مخلوطهای آسفالتی از جمله دوام، انعطاف پذیری، مقاومت در برابر شیارزدگی، ترک خوردگی ناشی از خستگی، دوره های انجماد و ذوب، رطوبت و غیره، لزوم توجه بیشتر مهندسين راهسازی به مقوله اصلاح مخلوطهای آسفالتی بویژه از طریق استفاده از افزودنیهای مختلف جهت بهبود خواص قیر، امری اجتناب ناپذیر می باشد. در سالهای اخیر، روشهایی شامل افزودن مواد پلیمری [۴-۱۲] و یا افزودن مواد پسماند بعنوان فیلرهای معدنی به آسفالت [۱۲-۲۰] مورد استفاده قرار گرفته اند که

- 1 Stone Mastic Asphalt
- 2 Silica filler
- 3 Ordinary Portland Cement
- 4 Limestone powder
- 5 Recycled Glass Powder

- 6 Calcium Carbide Residue
- 7 Marshall Stability
- 8 Marshall Quotient
- 9 Indirect Tensile Strength
- 10 Tensile Strength Ratio

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mpoorabbas64@gmail.com



به پودر سنگ آهک، در کاهش تغییر شکل دائمی آسفالت بخصوص با قیر اصلاح نشده داشته است [۲۵]. طاهر خانی (۱۳۹۴) به بررسی رفتار بتن های آسفالتی حاوی فیلر های پودر شیشه و پودر آجر پرداخت. به طور کلی نتایج پژوهش این محقق نشان دهنده تاثیرات مناسب تر استفاده از فیلر پودر آجر نسبت به فیلر پودر شیشه بوده، اما با این حال خصوصیات آسفالت های اصلاح شده با هر دو نوع فیلر ذکر شده نسبت به آسفالت اصلاح نشده بهبود قابل توجهی نشان داده است [۵۳]. چادری و همکاران (۲۰۱۸) از CCR بعنوان یک فیلر در ماکادام با دانه بندی پیوسته، به همراه چند نوع دیگر از فیلرها استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده تاثیر مثبت این فیلر در بهبود خصوصیات مانند حساسیت به رطوبت، مقاومت در برابر ترک خوردگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، و چسبندگی فعال و مقاوم آسفالت گردیده است [۲۱]. در مورد تاثیر فیلر بر خصوصیات مهندسی SMA می توان به مطالعه انجام شده توسط حبیب نژاد و همکاران (۲۰۲۰) اشاره نمود که از پودر کربن آمورف بعنوان فیلر جایگزین آهک در SMA استفاده نموده، و آزمایشاتی مانند مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی در حالت های خشک و اشباع، جوشش آب، خزش دینامیکی، و ویلتراک را روی نمونه ها انجام دادند. نتایج نشان دهنده بهبود چشمگیر در خصوصیات آسفالت با افزودن کربن بعنوان فیلر می باشد که مقدار بهینه آن ۵۰٪ بدست آمده بود [۳۹]. عاملی و همکاران (۲۰۲۰) نیز از خاکستر پوسته برنج (RHA) و خاکستر زغال (CWA) بعنوان فیلر جایگزین آهک در SMA استفاده نمودند. آنها با استفاده از آزمایشاتی مانند بازیابی خزش-تنش چندگانه (MSCR) و دامنه خطی رفت و برگشتی (LAS)، شیارشدگی و خستگی مخلوط های آسفالتی را مورد ارزیابی قرار دادند. علاوه بر آن، آزمایشات استحکام مارشال، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیرمستقیم، و حساسیت رطوبتی بمنظور ارزیابی رفتار مکانیکی آسفالت انجام گرفته است. نتایج نشان دادند که افزودن RHA برعکس CWA، سبب افزایش مقاومت در برابر شیارزدگی، استحکام مارشال، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و مقاومت کششی آسفالت گردیده، و CWA فقط در بهبود خستگی ماستیک و نیز حساسیت رطوبتی آسفالت تاثیر قابل قبولی داشته است [۳۵]. در مطالعه ای دیگر، باب الغیث و همکاران (۲۰۲۰) از کلینکر نخل روغنی (POC) بعنوان فیلر در SMA استفاده، و آزمایشات مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیرمستقیم، ویلتراک، و دوام کانتابرو را بر روی نمونه های آسفالت انجام دادند. برآیند نتایج نشان دهنده بهبود خصوصیات آسفالت با افزودن POC بوده است. بگونه ای که حتی می توان ۱۰٪ فیلر را با

توانسته اند موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام مخلوط های آسفالتی گردند. استفاده از مواد پسماند بعنوان فیلر، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی آسفالت، موجب کاهش آلودگی محیط زیست از طریق کاهش حجم زباله، کاهش استفاده از منابع طبیعی تجدیدناپذیر از طریق کاهش مصرف مصالح معدنی، سیمان پرتلند و آهک بعنوان فیلر، و نیز افزایش صرفه جویی اقتصادی بدلیل فراوانی بالا و قیمت پایین این مواد می گردد. تا کنون در تحقیقات و تولید مخلوط های آسفالتی علاوه بر فیلر های رایج مانند فیلر های معدنی (پودر سنگ های آهکی و سیلیسی)، آهک و سیمان پرتلند، از فیلر های پسماند نظیر پودر شیشه [۱۶، ۱۸، ۲۱-۲۷]، لای قرمز (red mud) [۱۶، ۲۱، ۲۸، ۲۹]، پسماند آهک هیدراته و انواع سنگها [۲۱، ۲۴، ۳۰-۳۳]، خاکستر پوسته و کاه برنج [۱۴، ۱۶، ۲۱، ۲۷، ۳۴، ۳۵]، پودر آجر بازیافتی [۱۷، ۲۱، ۲۴، ۲۷، ۳۶]، پسماند کاربید کلسیم [۱۶، ۲۱، ۳۷]، نانو مواد [۳۸]، سرباره کوره های ذوب فلزات [۲۶، ۳۱]، گرافن و تورمالین [۱۵]، پسماندهای معادن مس [۱۶، ۲۰، ۲۱]، انواع کربن شامل کربن سیاه، کربن فعال، گرافیت [۳۹، ۴۰]، پودر بتن بازیافتی [۲۴، ۴۱]، انواع خاکستر بادی و خاکستر زغال [۱۹، ۲۹، ۳۵، ۴۲-۴۴] زغال سنگ ضایعاتی [۴۵]، پودر لاستیک خودرو [۴۶]، خاکستر لاستیک خودرو [۴۷]، پسماند لنت ترمز خودرو [۴۸]، ضدیخ بر پایه سدیم کلراید [۴۹]، رس های سفیدکننده (هیدروسلیکات های آلومینیوم) [۵۰]، زیرکونیوم تنگستات [۵۱] و پوسته صدف دریایی [۵۲] نیز استفاده گردیده است. از میان مواد پسماند مورد استفاده بعنوان فیلر در مخلوط های آسفالتی، دو ماده پودر شیشه بازیافتی (RGP) و پسماند کاربید کلسیم (CCR) تاثیرات مثبتی در بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی و دوام آسفالت داشته اند. عربانی و همکاران (۲۰۱۶) از پودر شیشه بازیافتی و چند نوع مصالح دیگر بعنوان فیلر در آسفالت HMA استفاده نموده و آزمایشاتی مانند استحکام مارشال، مدول سختی کششی غیرمستقیم (ITSM)، و خستگی کششی غیرمستقیم (ITF) را بر روی نمونه های آسفالتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که فیلر پودر شیشه نسبت به سایر انواع فیلر تاثیر بیشتری در افزایش مدول سختی کششی، ضریب مارشال و عمر خستگی مخلوط آسفالتی داشته که به تبع آن، کرنش نهایی مخلوط آسفالتی حاوی فیلر پودر شیشه، نسبت به سایر فیلرها کمتر بوده است [۲۷]. سیمن و همکاران (۲۰۱۷) تاثیرات جایگزینی فیلر پودر شیشه بازیافتی را با پودر سنگ آهک در مخلوط آسفالتی بازیافتی با دانه بندی توپر (dense graded) با استفاده از آزمایشاتی مانند مقاومت کششی غیرمستقیم و تغییر شکل دائمی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان دادند که پودر شیشه عملکرد بهتری نسبت

حداکثری از ظرفیت این فیلرها و معرفی ترکیب جدیدی از آنها جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام SMA بوده است که در این راستا، آزمایشات استحکام مارشال، تعیین نرمی و ITS در دو حالت خشک و اشباع بر روی نمونه های ساخته شده انجام گرفته است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- مصالح سنگی

سنگدانه های مورد استفاده، از کارخانه آسفالت شماره ۲ مجیدیه، واقع در حومه شهر مشهد تهیه شده است. لازم به ذکر است که به منظور حصول دقت در نتایج تحقیق، در ابتدا فیلر معدنی مخلوط با مصالح سنگی تهیه شده، توسط الک از شن و ماسه جدا گردید تا طبق مقدار از پیش تعیین شده به نمونه شاهد اضافه گردد. جدولهای ۱ و ۲ و شکل ۱، بترتیب خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی، دانه بندی و همینطور محدوده مجاز دانه بندی SMA بر اساس پیشنهاد FHWA TWG، و منحنی دانه بندی SMA را نشان می دهند.

POC جایگزین نمود [۴۴]. منصوریان و مولایی (۱۳۹۴) از ذرات پودر شیشه و خرده لاستیک به منظور بهبود مقاومت شیارشدگی آسفالت استفاده نموده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ذرات شیشه به خوبی می تواند مقاومت آسفالت در برابر شیارشدگی را افزایش دهد [۵۴]. همچنین در پژوهش دیگر بیرامی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثر توام استفاده از پودر شیشه ضایعاتی و نانو ذرات اکسید های فلزی بر پدیده عریان شدگی آسفالت پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر تاثیرات مثبت و قابل توجه استفاده از افزودنی های ذکر شده بر اصلاح خواص قیر و افزایش مقاومت آسفالت در مقابل پدیده عریان شدگی و کاهش حساسیت رطوبتی آسفالت بوده است [۵۵]. در این تحقیق، مقاومت غیر مستقیم آسفالت SMA در برابر شیارشدگی (Rutting)، ترک خوردگی و حساسیت رطوبت، با استفاده از ترکیب فیلهای رایج مانند فیلر سیلیسی معدنی (SF)، پودر سنگ (LSP)، سیمان پرتلند (OPC)، و فیلهای بازیافتی مانند پودر شیشه (RGP) و پسماند کاربید کلسیم (CCR) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، علاوه بر منافع اقتصادی و زیست محیطی، بررسی امکان استفاده

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی.

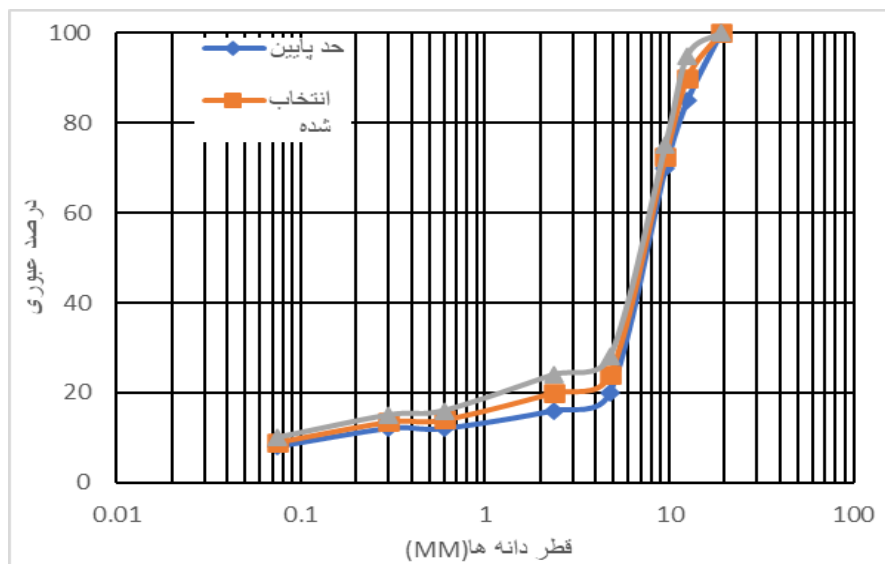
Table 1. Physical properties of stone materials

مشخصه	روش	درشت دانه	ریزدانه (ماسه ۰-۶)
افت وزنی در مقابل سایش با روش لس آنجلس (%)	AASHTO-T96	24	-
ارزش ماسه ای	AASHTO-T176	-	۶۰
حدود اتربرگ (%)	AASHTO-T89,90	-	غیر خمیری
		-	-
		-	غیر قابل تعیین
شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (%)	ASTM D5821	-	-
		۷۶	-
A(%) گوشه داری مصالح ریزدانه بروس	ASTM C1252	۴۳	-
تطویل و تورق (%)	BS-812	۱۳	-
		۱۱	-
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (%)	AASHTO-T104	-	۱
		۱	-
تأثیر آب جوش بر پوشش قیری مصالح	ASTM D3625	-	پوشش قیری < ۰.۹۵%

جدول ۲. توزیع اندازه دانه های SMA.

Table 1. Grain size distribution of the SMA

محدوده مجاز (%)	درصد عبوری	اندازه چشمه الک (mm)
۱۰۰	۱۰۰	۱۹
۸۵-۹۵	۹۰	۱۲/۵
۷۵ \geq	۷۲/۵	۹/۵
۲۰-۲۸	۲۴	۴/۷۵
۱۶-۲۴	۲۰	۲/۳۶
۱۲-۱۶	۱۴	۰/۶
۱۲-۱۵	۱۳/۵	۰/۳
۸-۱۰	۹	۰/۰۷۵



شکل ۱. منحنی دانه بندی SMA.

Fig. 1. Grain size distribution curve of SMA.

جدول ۳. مشخصات فنی قیر مصرفی.

Table 3. Technical specifications of the bitumen used.

واحد	مقدار	روش		مشخصه
		AASHTO	ASTM	
	۱,۰۱۹	T228	D70	وزن مخصوص در 25°C
dmm	۶۳	T49	D5	درجه نفوذ در 25°C
°C	۵۰,۸	T53	D36	نقطه نرمی (گلوله-حلقه)
cm	۱۰۰<	T51	D113	مقدار کشیدگی در 25°C
	-	T44	D2042	حلالیت در تری کلرور اتیلن
°C	۲۳۲	T48	D92	درجه اشتعال (ظرف روباز-کلوند)
cSt	۵۹۴	T201	D2170	ویسکوزیته کینماتیک در 120°C
cSt	۳۸۴	T201	D2170	ویسکوزیته کینماتیک در 135°C
cSt	۱۶۶	T201	D2170	ویسکوزیته کینماتیک در 160°C
%	۰,۱			افت حرارتی
dmm	۴۵			درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی
%	۷۱,۴			نسبت درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی به درجه نفوذ اولیه
cm	۵۰<			مقدار کشش قیر بعد از آزمایش افت حرارتی در 25°C
	-۰,۵۹			PI برحسب درجه نفوذ در 25°C و نقطه نرمی قیر
	-۰,۷۸			PVN برحسب درجه نفوذ در 25°C و ویسکوزیته برحسب سانتی استوکس در 135°C
	-			PVN برحسب درجه نفوذ در 25°C و ویسکوزیته برحسب پواز در 60°C

عبور داده و در گرمخانه بمدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار گرفته بود تا رطوبت آن بطور کامل تبخیر گردد. سیمان پرتلند مصرف شده در آسفالت نیز بعنوان یکی دیگر از فیلرهای رایج، از نوع سیمان تیپ ۲ تولید شده در شرکت سیمان شرق بوده که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۴ آورده شده است. یکی از فیلرهای جایگزین یا بازیافتی، پودر شیشه ضایعاتی بوده که از کارخانه بازیافت پسماند شهری در شهرستان اراک - استان مرکزی تهیه گردیده و پس از عبور داده شدن از الک شماره ۲۰۰، بعنوان فیلر در مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۴، ترکیبات شیمیایی پودر شیشه را نشان داده است. فیلر جایگزین دیگر، پسماند کاربید کلسیم (CCR) بوده است که یک محصول فرعی از کارخانجات تولید گاز استیلن بوده و طی واکنش شیمیایی ذیل بدست می آید [۵۶، ۵۷]:

۲-۱-۲- قیر

قیر انتخابی جهت انجام این تحقیق، با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ تولید شده در پالایشگاه اصفهان بوده است. برخی از مشخصات قیر مصرفی، در جدول ۳ نشان داده شده است.

۲-۱-۳- فیلرها

فیلر اصلی مورد استفاده، فیلر سیلیسی (SF) بوده که از معدن سنگدانه های مصرفی تهیه، و به نمونه شاهد اضافه گردیده است. این فیلر از جنس مصالح سنگی مصرفی بوده است. پودر سنگ (LSP) مورد استفاده بعنوان یکی از فیلرهای رایج، از نوع مصالح متداول مورد استفاده در کارهای ساختمانی، و دارای منشا آهکی بوده است. لازم بذکر است که قبل از استفاده از پودر سنگ بعنوان فیلر، این مصالح از الک شماره ۲۰۰

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی فیلرهای مورد استفاده

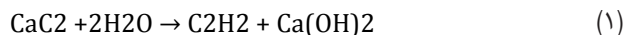
Table 4. Chemical composition of fillers.

ترکیبات شیمیایی %	کاربید کلسیم پسماند (CCR)	پودر شیشه (RGP)	سیمان پرتلند (OPC)
SiO ₂	۶/۵	۷۲/۶	۲۱/۶
Al ₂ O ₃	۲/۶	۱/۶	۴/۴
Fe ₂ O ₃	۳/۲	۰/۴	۳/۸
CaO	۷۰/۸	۱۱/۲	۶۲/۵
MgO	۰/۶۸	۱/۲۲	۲/۹
SO ₃	۰/۶۶	۰/۰۷	۲
Na ₂ O	ND*	۱۲/۵	۰/۵
K ₂ O	۷/۹	۰/۵۳	۰/۴۵
LOI	۳۰/۷	۰/۲۶	۱/۳

*Not detected

۲-۲- آماده سازی نمونه ها

ساخت نمونه های SMA طبق روش مارشال (ASTM D6926) انجام گرفته است. در این مرحله، ابتدا مقدار قیر مورد نیاز را توسط یک هیتر تا دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس گرم شده، سپس سنگدانه های وزن شده که تا ۱۷۰ درجه سلسیوس گرم شده اند، از گرمخانه خارج شده و به قیر اضافه شده اند و عمل اختلاط را در دمای بین ۱۴۰ تا ۱۶۳ درجه سلسیوس تا جایی ادامه می یابد تا تمامی سطوح سنگدانه ها قیراندود گردد. پس از آن مقدار مورد نیاز از فیلر که دمای آن قبلاً به ۱۷۰ درجه سلسیوس رسیده، به آسفالت اضافه شده و مخلوط گردید. زمان تقریبی برای انجام اختلاط کامل، ۱۰ تا ۱۵ دقیقه بوده که طی این زمان، برای تامین دمای لازم، ظرف محتوی نمونه آسفالتی روی یک هیتر داغ قرار گرفته و دمای مخلوط مرتباً توسط یک دماسنج دیجیتال کنترل شده است. لازم بذکر می باشد که مقدار قیر بهینه برابر با ۰/۶٪ وزنی مصالح خشک برای هر نمونه در نظر گرفته شده است. بلافاصله پس از اتمام عمل اختلاط، مخلوط آسفالتی به درون قالب مارشالی که از قبل بخوبی گرم و چرب شده، ریخته شده و توسط چکش مارشال متراکم شده است. نحوه تراکم بدین صورت بوده که تعداد ۷۵ ضربه به هر دو انتهای نمونه وارد شده است. این تعداد ضربه بمنظور شبیه سازی



در معادله ۱، آب و سنگ کاربید با یکدیگر ترکیب می شوند که محصول اصلی آن گاز استیلن (C₂H₂)، و پسماند یا محصول فرعی آن هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) می باشد. CCR بصورت یک خمیر آبدار خاکستری رنگ بوده که برای استفاده باید خشک، خرد و الک گردد که پس از عبور از الک شماره ۴۰، دارای چگالی ۲،۴۲-۲،۳۵ و شاخص شکل پذیری ۹۲٪ می باشد. در این تحقیق، CCR مورد استفاده از کارخانه توس استیلن، در شهرک صنعتی کلات، واقع در اطراف مشهد تهیه شده که پس از خشک شدن در هوای آزاد و خرد شدن کلوخه ها توسط کمپکتور، توسط دستگاه سایش لس آنجلس و آسیاب سیاره ای بصورت پودر درآمده است. سپس این پودر از الک شماره ۲۰۰ عبور داده، و بمدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در گرمخانه قرار گرفت تا تبخیر رطوبت بطور کامل صورت گرفته و CCR آماده استفاده بعنوان فیلر گردد. ترکیبات شیمیایی CCR نیز در جدول ۴ به نمایش درآمده است.

جدول ۵. جزئیات نامگذاری و محتویات نمونه های SMA.

Table 5. Nomenclature details and contents of samples

نام نمونه	کد	نوع و نسبت ترکیب فیلر (%)					مقدار فیلر (%)	مقدار قیر بهینه (%)
		RGP	CCR	OPC	LSP	SF		
شاهد	۱	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۲	۰	۰	۱۰۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۱	۰	۵۰	۵۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۲	۰	۵۰	۰	۵۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۳	۵۰	۰	۵۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۴	۵۰	۰	۰	۵۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۵	۲۰	۸۰	۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۶	۲۵	۲۵	۵۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۷	۴۰	۶۰	۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۸	۲۵	۲۵	۰	۵۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۱۹	۶۰	۴۰	۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۲۰	۸۰	۲۰	۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۲۱	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	٪۹	٪۶
اصلی	۱۲۲	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	٪۹	٪۶

دستگاه دیجیتالی و دارای سه سنسور بوده که یک سنسور، میزان بار وارده، و دو سنسور دیگر، تغییر شکل‌های نمونه را ثبت کرده اند و نمودار اعمال بار در لحظه، توسط کامپیوتر متصل به دستگاه، ترسیم شده است.

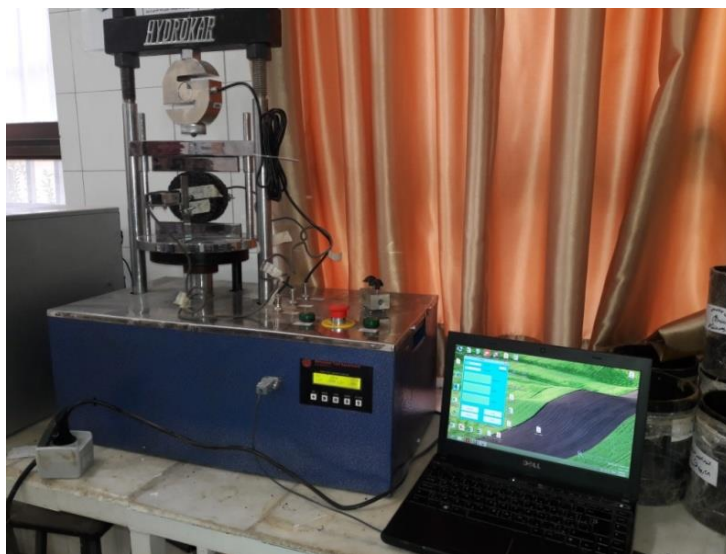
آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS)، برای ارزیابی میزان مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی بوده [۱۶، ۲۱، ۲۴] و طبق دستورالعمل ASTM D6931، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گرفته است. در این آزمایش نمونه مارشال بصورت قطری بین دو تیغه دستگاه قرار گرفته، و نیروی فشاری با نرخ ثابت ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، در راستای قطر نمونه توسط فکها وارد می گردد تا زمانیکه گسیختگی در نمونه رخ دهد. در این حالت، نیروی کششی بصورت عمود بر راستای بارگذاری بر نمونه وارد، و موجب گسیختگی می گردد. شکل ۲ دستگاه مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش ITS را نشان می دهد.

آزمایش ITS در دو حالت خشک و اشباع انجام گرفته که در حالت دوم، نمونه ها طبق استاندارد AASHTO T283 برای ارزیابی مقاومت در

ترافیک سنگین در نظر گرفته شده است. بدلیل ایجاد یکنواختی در توزیع ضربه در اوایل عملیات تراکم، نمونه ها بتدریج چرخانده شدند. پس از انجام عمل تراکم و سرد شدن نسبی، نمونه ها توسط یک جک نمونه گیر از قالبها خارج، و برای انجام هر آزمایش علامتگذاری شدند. جدول ۵، نامگذاری، ترکیبات فیلر، مقدار قیر بهینه و آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های مختلف SMA را ارائه نموده است.

۲-۳- فرایند انجام آزمایشات

بمنظور تعیین استحکام مارشال نمونه های آسفالتی که طبق استاندارد ASTM D1559 انجام گرفته است، نمونه ها ۷۲ ساعت قبل از انجام آزمایش ساخته شدند تا با دمای محیط به تعادل برسند. نمونه ها حداقل ۳۰ دقیقه قبل از انجام آزمایش، در حمام مارشال مجهز به ترموستات، در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته اند تا شبیه سازی متناسبی با دمای بیشینه تابستانی صورت گیرد. پس از آن نمونه ها از حمام خارج شده و در دستگاه سنجش مقاومت مارشال مورد آزمایش قرار گرفته اند. این دستگاه، یک



شکل ۲. دستگاه مورد استفاده برای تست ITS.

Fig. 2. The device used for ITS test

نمودار نتایج نمونه آسفالت حاوی فیلر سیلیسی (100SF) که بعنوان نمونه شاهد جهت مقایسه در تمامی نمودارها ترسیم شده است، سایر نمودارهای این شکل بر اساس نتایج حاصل از حضور ثابت درصدی از پودر سنگ (LSP) بعنوان فیلر اصلی، و تغییر مقادیر فیلرهای بازیافتی (CCR و RGP) بعنوان فیلرهای جایگزین ترسیم گردیده اند. همین روش، در ترسیم نمودارهای شکل ۴-b با فیلر اصلی سیمان پرتلند (OPC) بکار گرفته شده است. شکل ۴-c، نتایج بدست آمده از نمونه های فاقد فیلر ترکیبی را برای مقایسه به نمایش گذاشته و شکل ۴-d، نتایج نمونه های تماما حاوی فیلرهای جایگزین را نشان داده است. جدول ۶ نیز نتایج آزمایشات انجام شده بر روی تمامی نمونه را نشان می دهد. لازم به ذکر است اعداد ارائه شده در جدول ۶ برگرفته شده از میانگین نتایج سه نمونه یکسان برای هر طرح اختلاط می باشد.

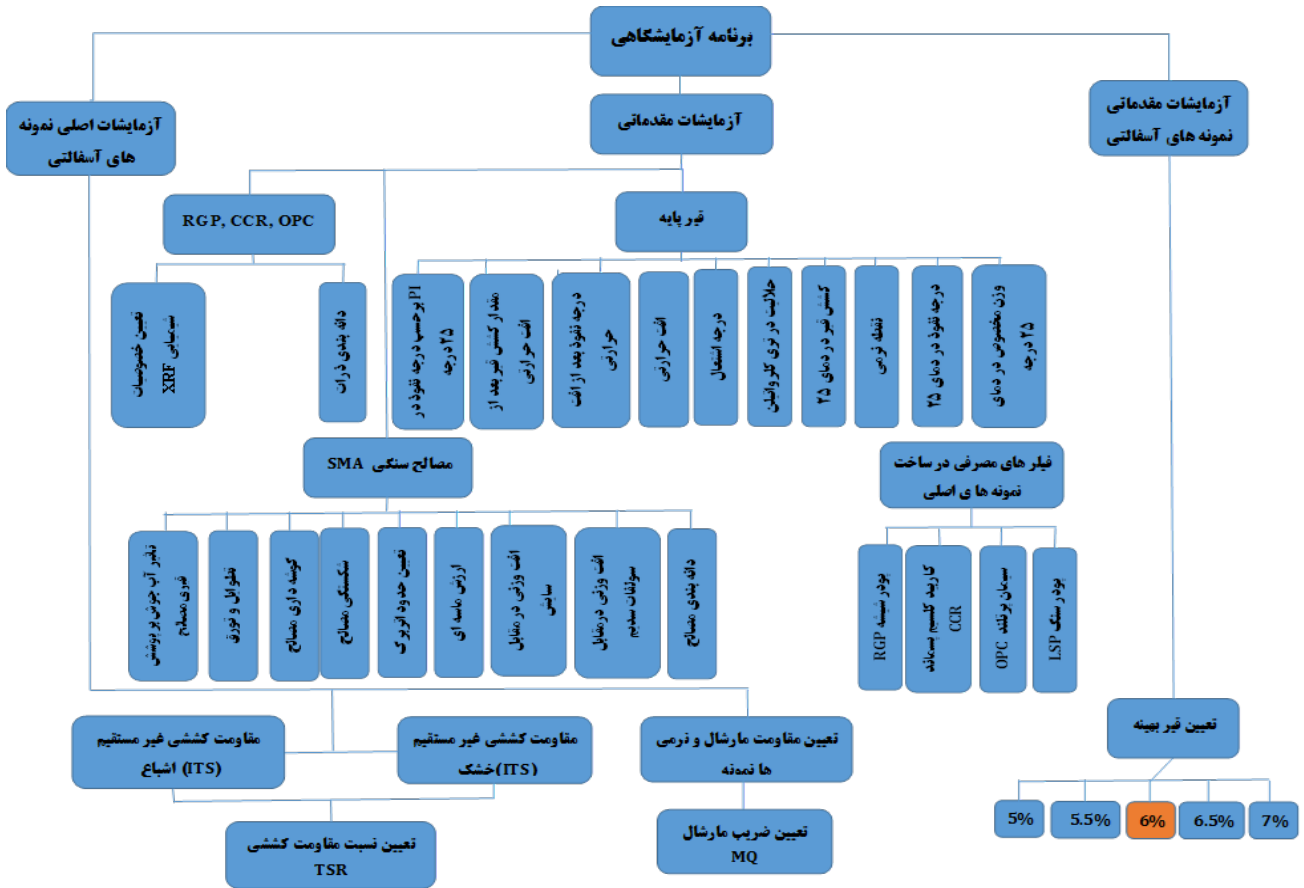
همانطور که در شکل ۴-a مشاهده می گردد، با جایگزین نمودن فیلرهای بازیافتی بجای LSP، مقاومت مارشال و ضریب مارشال (Marshall quotient) یا باختصار MQ در نمونه ها بجز نمونه 50LSP+50RGP افزایش یافته که بیشترین افزایش متعلق به نمونه 50LSP+25CCR+25RGP با کد ۱۱۸ بوده است. این نمونه بترتیب

برابر رطوبت (حساسیت رطوبتی) آماده انجام آزمایش شده، و با بدست آوردن نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک (TSR)، حساسیت رطوبتی نمونه های آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفته است. بمنظور آماده کردن نمونه های اشباع، نمونه های مارشال با استفاده از آب اشباع شده و پس از آن، بمدت ۱۶ ساعت در فریزر و در دمای 18 ± 5 - درجه سلسیوس قرار گرفته اند. پس از آن، هر یک از نمونه ها با کیسه پلاستیکی پوشیده شده و بمدت ۲۴ ساعت در حمام مارشال و در دمای 60 - درجه سلسیوس قرار گرفته اند. در انتها، نمونه ها از حمام آب خارج شده و بمدت ۲ ساعت قبل از انجام آزمایش ITS، در دمای محیط که حدود ۲۵ درجه سلسیوس بوده است، قرار داده شدند. سپس مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های اشباع و غیر اشباع اندازه گیری و مقدار نسبت مقاومت کششی (TSR) اندازه گیری شد. برنامه آزمایشات انجام شده در شکل ۳ به اختصار نمایش داده شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- مقاومت و ضریب مارشال

شکل ۴ (a-d) نتایج آزمایش مارشال بر روی نمونه های مختلف را نشان می دهد. لازم بذکر است که دسته بندی این نمودارها بر اساس نوع فیلر اصلی (رایج) بکار رفته می باشد. بعنوان مثال، در شکل ۴-a، علاوه بر



شکل ۲. برنامه تست های انجام شده.

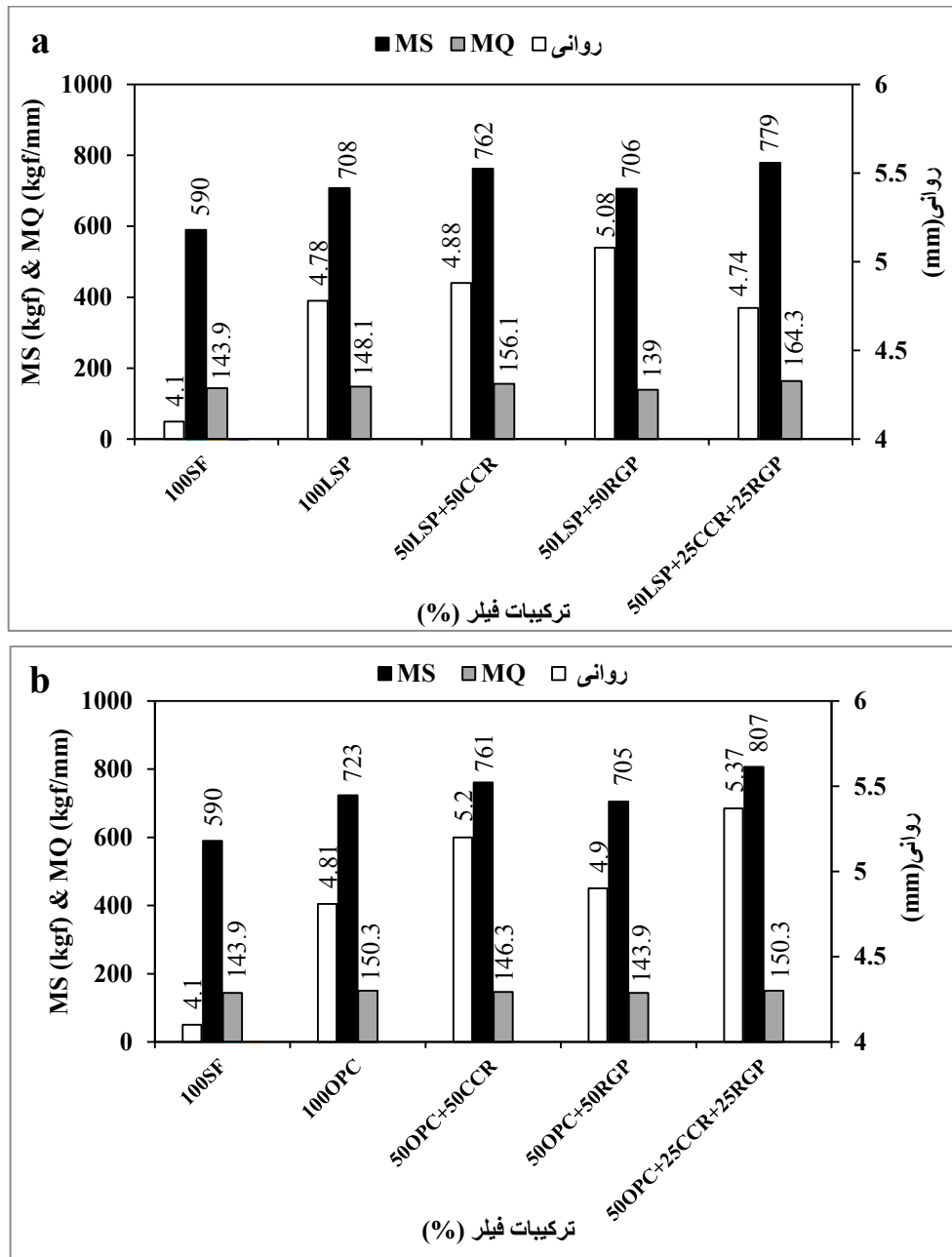
Fig. 2. Testing program

جدول ۶. نتایج آزمایشات انجام شده.

Table 6. The results of the tests

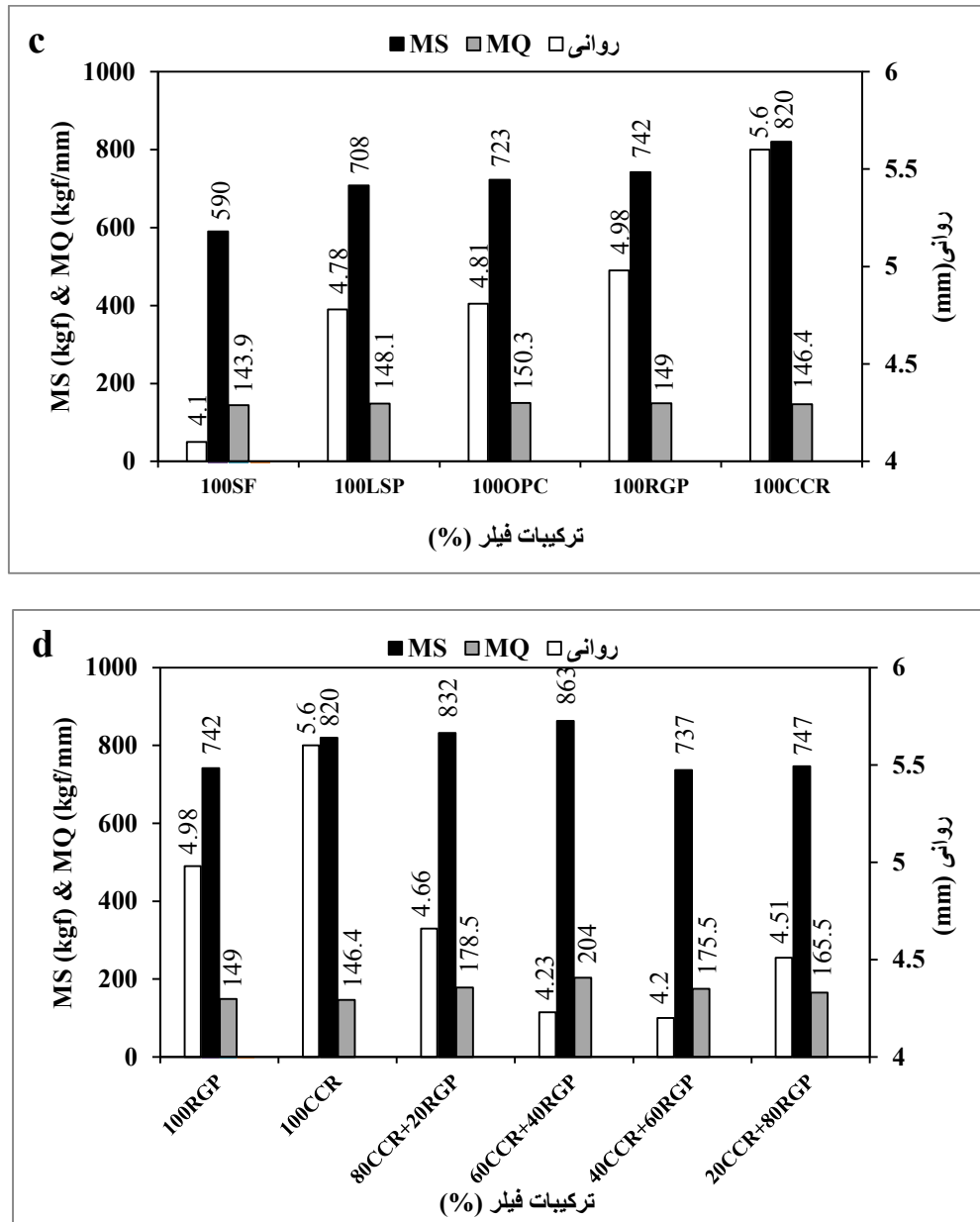
TSR	ITS uncond* (KPa)	MQ (kgf/mm)	MS (kgf)	ترکیبات فیور ها (%)	مشخصه نمونه	عنوان نمونه
۰/۵۶	۱۴۹۳	۱۴۴	۵۹۰	100SF	۱	نمونه شاهد
۰/۶۴	۱۷۸۹	۱۴۸	۷۰۸	100LSP	۱	نمونه اصلاح شده
۰/۶۲	۱۷۱۸	۱۵۰	۷۲۳	100OPC	۲	نمونه اصلاح شده
۰/۷	۱۸۸۶	۱۴۶	۷۶۱	50OPC+50CCR	۱۱۱	نمونه اصلاح شده
۰/۷۳	۱۸۸۱	۱۵۶	۷۶۲	50LSP+50CCR	۱۱۲	نمونه اصلاح شده
۰/۶۵	۱۹۴۱	۱۴۴	۷۰۵	50OPC+50RGP	۱۱۳	نمونه اصلاح شده
۰/۷۶	۱۸۴۶	۱۳۹	۷۰۶	50LSP+50RGP	۱۱۴	نمونه اصلاح شده
۰/۸	۱۷۴۱	۱۷۹	۸۳۲	80CCR+20RGP	۱۱۵	نمونه اصلاح شده
۰/۷۶	۱۷۸۲	۱۵۰	۸۰۷	50OPC+25CCR+25RGP	۱۱۶	نمونه اصلاح شده
۰/۸۴	۱۹۰۴	۲۰۴	۸۶۳	60CCR+40RGP	۱۱۷	نمونه اصلاح شده
۰/۷۸	۱۸۸۴	۱۶۴	۷۷۹	50LSP+25CCR+25RGP	۱۱۸	نمونه اصلاح شده
۰/۷۷	۱۹۲۰	۱۷۶	۷۳۷	40CCR+60RGP	۱۱۹	نمونه اصلاح شده
۰/۷۳	۲۲۱۶	۱۶۶	۷۴۷	20CCR+80RGP	۱۲۰	نمونه اصلاح شده
۰/۶۹	۱۹۲۸	۱۴۹	۷۴۲	100RGP	۱۲۱	نمونه اصلاح شده
۰/۷	۱۸۶۷	۱۴۶	۸۲۰	100CCR	۱۲۲	نمونه اصلاح شده

*Unconditioned



شکل ۴. نتایج آزمایش مارشال (a) بر پایه فیلر LSP (b) بر پایه فیلر OPC (c) فاقد فیلر ترکیبی (d) بر پایه فیلرهای بازیافتی. (ادامه دارد)

Fig. 4. Marshall test results a) Based on LSP filler b) Based on OPC filler c) Non combined filler d) Based on recycled fillers (Continued)



شکل ۴. نتایج آزمایش مارشال (a) بر پایه فیلر LSP (b) بر پایه فیلر OPC (c) فاقد فیلر ترکیبی (d) بر پایه فیلرهای بازیافتی.

Fig. 4. Marshall test results a) Based on LSP filler b) Based on OPC filler c) Non combined filler d) Based on recycled fillers.

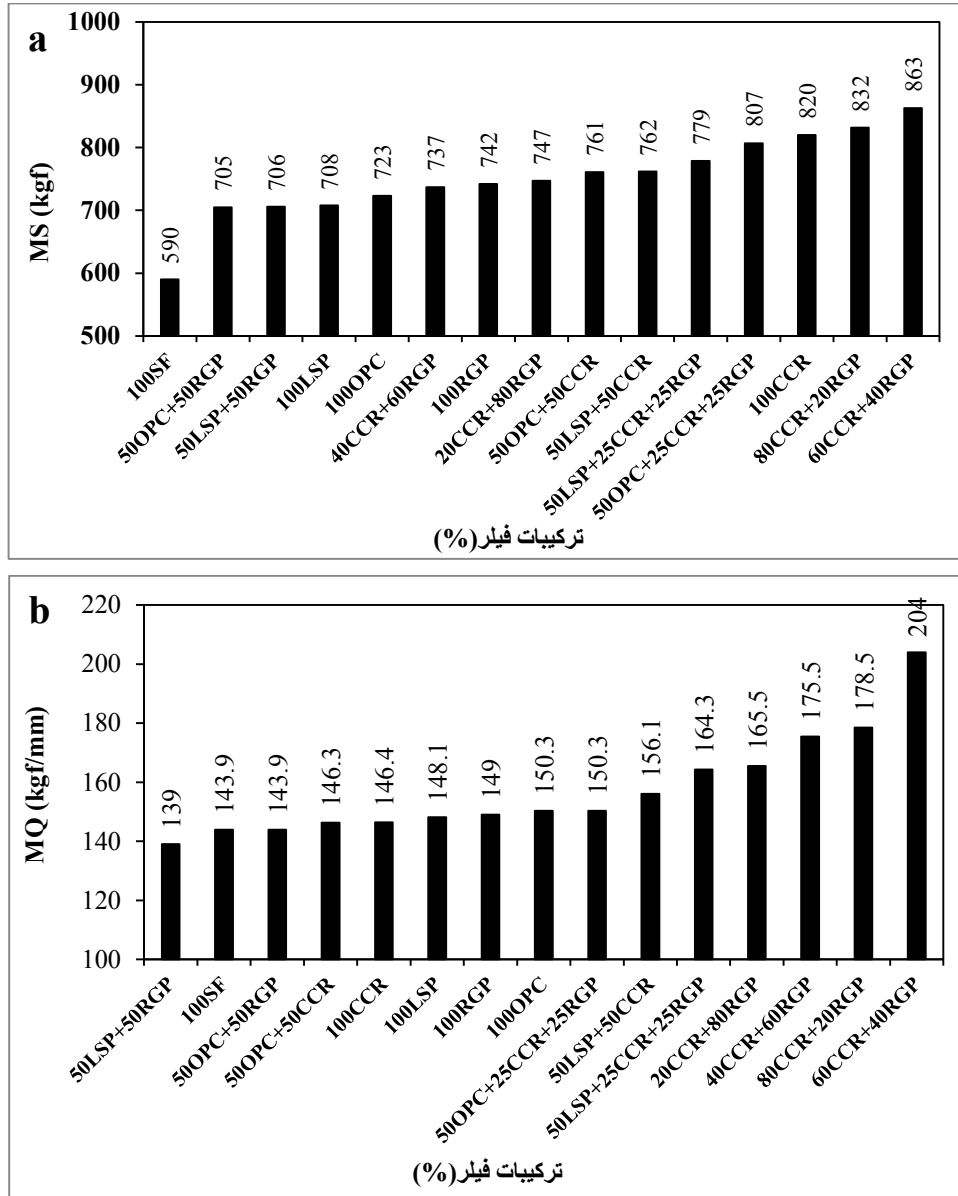
دارای ۳۲ و ۱۰ درصد مقاومت مارشال، و نیز ۱۴ و ۱۱ درصد ضریب مارشال بالاتر نسبت به نمونه حاوی فیلر سیلیسی (100SF) و فیلر پودر سنگ (100LSP) بوده است. این نشان دهنده کارایی ترکیب فیلهای بازیافتی در بهبود مقاومت و ضریب مارشال آسفالت می باشد. وضعیت تقریباً مشابهی را می توان در شکل ۴-b، با فیلر اصلی OPC نیز مشاهده نمود. در شکل ۴-c نیز مشاهده می گردد که نمونه های حاوی ۱۰۰٪ فیلر بازیافتی، دارای مقاومت مارشال و نرمی بالاتری نسبت به نمونه های حاوی فیلهای رایج می باشند. اما مقادیر MQ در این نمونه ها تفاوتی اندکی با یکدیگر داشته اند. با دقت در شکل ۴-d و مقایسه مقادیر خصوصیات مختلف آن با شکلهای ۴-a تا ۴-c می توان دریافت که بیشترین استحکام مارشال و MQ در نمونه های حاوی ترکیبی از فیلهای بازیافتی بدست آمده اند. بگونه ای که بیشترین مقادیر استحکام مارشال و MQ بترتیب برابر با ۸۶۳ kgf/mm² و ۲۰۴ و متعلق به نمونه 60CCR+40RGP با کد ۱۱۷ بوده اند.

در ادامه این بخش، به بررسی علل حصول این نتایج پرداخته شده است. در ابتدای بحث باید عنوان نمود که ضریب مارشال (MQ) معیاری برای ارزیابی مقاومت آسفالت در مقابل شیارزدگی (Rutting) یا عبارتی دیگر، تغییر شکل دائمی (Permanent deformation) می باشد. بدین صورت که هرچه مقدار MQ بیشتر باشد، سختی، قابلیت توزیع یکنواخت تر بار و مقاومت در برابر شیارزدگی آسفالت بیشتر خواهد بود [۱۶، ۲۱، ۲۷] از اینرو، توجه به مقادیر این ضریب، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. شکلهای ۵-a و ۵-b بترتیب مقادیر MS (مقاومت مارشال) و MQ نمونه های حاوی فیلهای مختلف را از مقادیر کمتر تا بیشتر نشان می دهند.

همانطور که در شکلهای فوق مشاهده می گردد، بیشترین مقادیر مقاومت مارشال و MQ عمدتاً متعلق به نمونه های حاوی ترکیبی از فیلهای بازیافتی بوده است که در ادامه بحث، به بررسی بیشتر این مهم، پرداخته خواهد شد. در ابتدا باید عنوان نمود که ضریب مارشال (Mar-shall quotient) یا MQ، نسبت مقاومت مارشال به نرمی بوده، و نرمی بیشتر نیز نشانگر شکل پذیری بالاتر آسفالت می باشد اما نمی توان صرفاً با در نظر گرفتن مقادیر نرمی، نقش مهم MQ را نادیده گرفت و در مورد مناسب بودن یا نبودن یک طرح اختلاط آسفالت اظهار نظر نمود. نرمی تابعی از دمای آسفالت، مقدار قیر بهینه، ویسکوزیته، نوع دانه بندی، مقدار و درصد شکستگی مصالح سنگی می باشد. در شرایط یکسانی مانند شرایط در نظر گرفته شده در این تحقیق، تنها تغییر نمونه های آسفالتی نسبت به

یکدیگر فقط در نوع فیلر مصرفی می باشد. بنابراین، آگاهی از خصوصیات فیزیکی فیلهای نقش مهمی در بررسی خصوصیات مکانیکی آسفالت دارد. در حالت کلی می توان عنوان نمود که هرچه ذرات فیلر ریزتر باشند، توانایی نشان دادن واکنش و نیز توزیع آنها در قیر افزایش می یابد که این مهم می تواند موجب بهبود خصوصیات مهندسی مخلوطهای آسفالتی گردد [۳۷]. پودر شیشه (RGP) ذرات تیز گوشه تر و بافت سطحی صافتری نسبت به سایر فیلهای دارد. این ویژگی می تواند موجب جذب قیر کمتر و نیز درهم قفل شدگی و اصطکاک داخلی بهتر این ذرات شده [۱۶، ۲۲]، و دلیلی برای کاهش نرمی با افزایش مقدار RGP بعنوان جایگزین CCR در شکل ۴-d باشد. همچنین قیر حاوی RGP یک ساختار کلونیدی منظم را بوجود می آورد که می تواند سنگدانه ها را بخوبی به یکدیگر متصل نماید. در حالیکه این ساختار در نمونه هایی با فیلهای رایج مثل LSP و OPC مشاهده نمی گردد [۲۲]. بنابر این آسفالت حاوی RGP می تواند دارای مقدار MQ بالا و مقاومت قابل قبول در برابر شیارزدگی باشد [۱۶، ۲۲]. از سویی دیگر، افزایش سختی و مقاومت در برابر شیارزدگی در نمونه های حاوی فیلر CCR را می توان در دو عامل فیزیکی و شیمیایی جستجو نمود. از نظر فیزیکی، CCR دارای بافت سطحی متخلخل و نامنظم می باشد که همین موضوع موجب جذب بهتر قیر شده و انسجام ماستیک را افزایش می دهد. از نظر شیمیایی نیز می توان عنوان نمود که بعلاوه مقدار pH بالای CCR و نیز خاصیت نسبتاً اسیدی قیر، واکنش بهتری می تواند بین این دو ماده صورت گرفته، و موجب افزایش سختی آسفالت گردد [۱۶، ۲۱، ۲۲]. بدلیل اینکه هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر استفاده از فیلهای بازیافتی بعنوان جایگزین فیلهای رایج در آسفالت SMA می باشد، عمدتاً سعی بر تشریح بیشتر و بهتر نحوه عملکرد این فیلهای بوده است. بر این اساس، اشکال ۶-a و ۶-b بترتیب تغییرات MQ را براساس تغییر مقادیر RGP و CCR در نمونه های مختلف نشان می دهند.

همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، با افزایش مقادیر RGP و CCR بترتیب تا میزان ۴۰ و ۶۰ درصد (60CCR+40RGP)، حداکثر مقدار MQ بدست آمده است. همانطور که پیشتر عنوان شد، بیشترین مقادیر MQ متعلق به نمونه های حاوی ترکیبی از فیلهای بازیافتی بوده و بیشتر نمونه های حاوی درصدهایی از فیلهای بازیافتی، مقادیر MQ بالاتری نسبت به نمونه های حاوی فیلر اصلی داشته اند (به خطچین های معیار توجه گردد). اما با پیشروی بسمت خلوص بیشتر فیلر از یک نوع، حتی بازیافتی، مانند نمونه های 100RGP و 100CCR، مقادیر MQ با



شکل ۵. چیدمان نمونه ها بر اساس (a) مقادیر MS و (b) مقادیر MQ.

Fig. 5. Arrangement of samples based on a) MS values b) MQ values

دارای کمترین ITS بوده است. بدین ترتیب رشد مقاومت نمونه بهینه نسبت به نمونه شاهد برابر ۴۹ درصد بوده است. دلیل مقدار ITS بالای نمونه های حاوی ترکیب فیلهای بازیافتی را در تیزگوشه بودن و در هم قفل شدگی ذرات RGP [۲۷، ۲۲] و نیز تشکیل یک ساختار منسجم از طریق واکنش بین ذرات قلیایی CCR با قیر نسبتا اسیدی [۳۷، ۲۱] و همکاری این دو برای بهبود خواص مکانیکی آسفالت جستجو نمود. لازم به ذکر است برای همین نمونه رشد TSR نسبت به نمونه شاهد برابر با ۳۱ درصد بوده است.

در شکل ۱۰ نیز می‌توان مشاهده نمود که تمامی نمونه های حاوی فیلهای بازیافتی، TSR بالاتری نسبت به نمونه شاهد و نمونه های اصلی حاوی LSP و OPC داشته اند. این بدین معناست که حساسیت رطوبتی نمونه های حاوی فیلهای بازیافتی نسبت به نمونه های شاهد به شکل موثری کاهش یافته است. بطوریکه بیشترین مقادیر TSR متعلق به نمونه های 60CCR+40RGP و 80CCR+20RGP، و بترتیب برابر با ۰.۸۴ و ۰.۸ بوده است و با افزایش مقادیر CCR از ۶۰ و RGP از ۴۰ درصد، TSR با شیب تندی رو به کاهش گذارده است. تمامی نمونه های حاوی فیله بازیافتی، TSR بالاتری نسبت به نمونه های شاهد و اصلی داشته اند و بجز نمونه 50OPC+50RGP با کد ۱۱۳، توانسته اند حداقل میزان TSR قابل قبول توسط آیین نامه های آسفالت (خطوط ممتد مشخص شده در نمودار) را بدست آوردند که این خود دلیلی بر مثر واقع شدن استفاده از فیلهای بازیافتی و بخصوص ترکیب آنها خواهد بود.

همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده می باشد، ترکیب RGP و CCR بهترین نتایج را در مقاومت مارشال، MQ، ITS و بخصوص TSR داشته است. در قسمت های قبل در خصوص سازوکار تاثیر این دو ماده و دلیل افزایش مقادیر مقاومت مارشال، MQ و ITS توضیح داده شده است. در ادامه نیز نحوه ارتقای حساسیت رطوبتی آسفالت با استفاده از RGP و CCR بیان شده است. بطور کلی، نمونه های حاوی مصالح پایه سیلیسی مثل RGP، حساسیت رطوبتی بالاتری نسبت به نمونه های حاوی مصالح پایه کلسیمی مثل CCR داشته [۱۶، ۲۱]، و در مقابل، بدلیل تیزگوشه تر بودن، درهم قفل شدگی بیشتر و ایجاد ساختار کلئیدی منظم در قیر، موجب افزایش اصطکاک داخلی آسفالت، و در نتیجه، افزایش مقاومت مکانیکی آسفالت می گردند [۱۶، ۲۲]. دلیل عملکرد بهتر CCR نسبت به RGP در مقابل آب را می توان به حضور کانیهای غیرقابل انحلال مانند پرتلندیت، کلسیت و دولومیت در ترکیب آن مربوط دانست [۱۶، ۲۱، ۲۴]. همچنین سطح زبرتر CCR نسبت به RGP نیز، بدلیل جذب بهتر قیر،

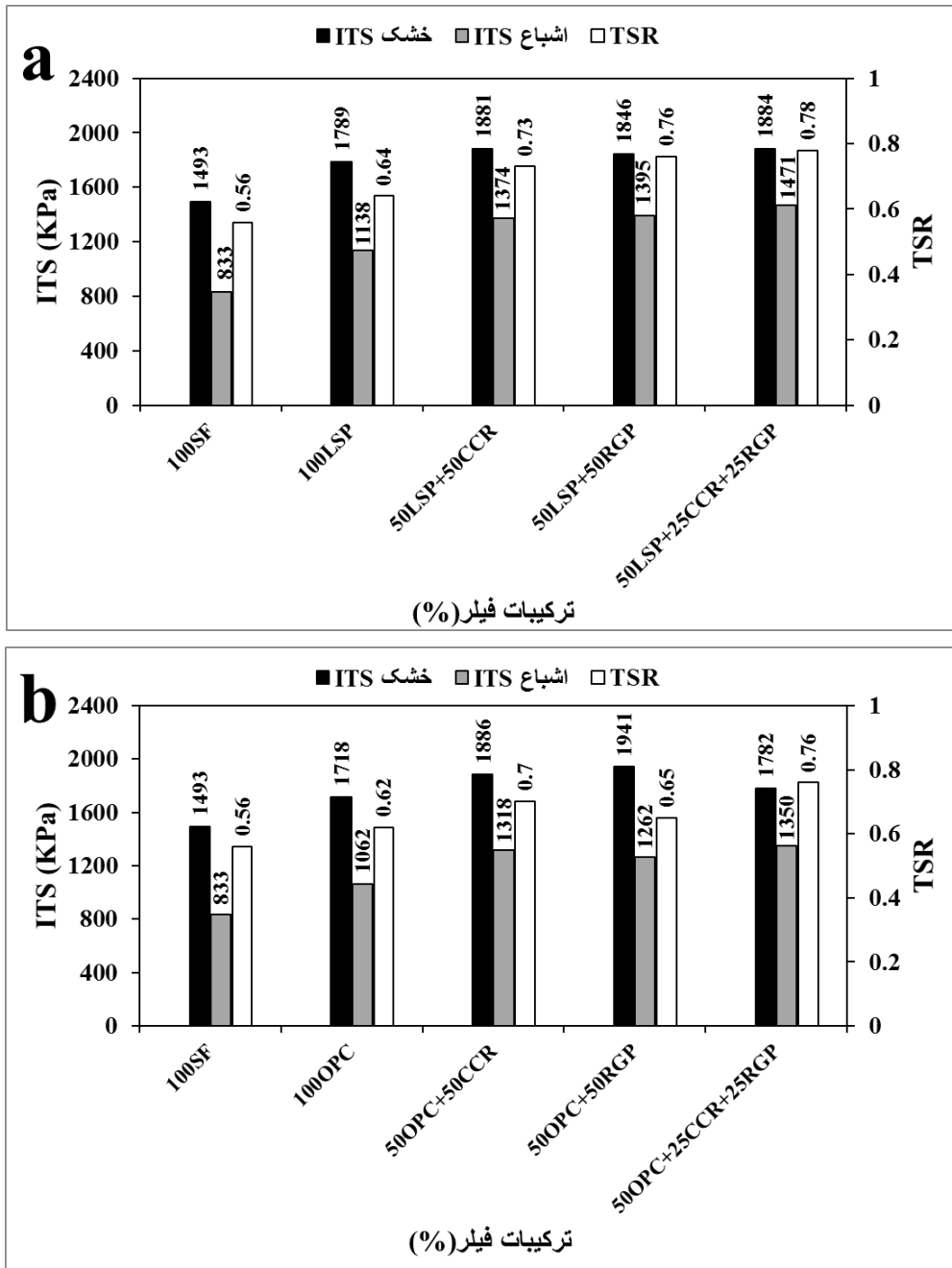
شیب تندی رو به کاهش گذاشته اند. در پاسخ به این مسئله، می توان بدین صورت اظهار نظر نمود که با توجه به تاثیرات بعضا متفاوت RGP و CCR بر خواص آسفالت که پیشتر ذکر گردید، استفاده از ترکیب این دو ماده می تواند با پوشش نقایص احتمالی، و استفاده از تمامی ظرفیت تاثیرگذاری هر دو ماده یعنی اصلاح شکل ذرات و بافت سطحی، بهترین کارایی را جهت بهبود هرچه بیشتر خصوصیات آسفالت داشته باشد.

۳-۲- مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و نسبت مقاومت کششی (TSR)

شکل ۷-(a-d)، نتایج آزمایش ITS خشک (Unconditioned)، اشباع (Conditioned)، و نسبت مقاومت کششی (TSR) بر روی نمونه های مختلف را نشان می دهد. لازم بذکر است که دسته بندی این نمودارها مانند شکل ۴-(a-d) بر اساس نوع فیله اصلی (رایج) بکار رفته می باشد. همانطور که در شکل‌های ۷-a و ۷-b مشاهده می گردد، با جایگزین نمودن RGP و CCR بجای فیلهای اصلی (OPC و LSP)، مقاومت کششی در حالت‌های خشک و اشباع، و نیز TSR بشکل قابل توجهی افزایش داشته است. همینطور در شکل ۷-c مشاهده می گردد که بیشترین TSR و ITS خشک و اشباع متعلق به نمونه های 100RGP و 100CCR بوده است. این موضوع نشان دهنده تاثیر مثبت فیلهای بازیافتی در بهبود مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی و نیز حساسیت رطوبتی آن می باشد. از سویی دیگر در شکل ۷-d قابل رویت است که استفاده از ترکیب دو فیله جایگزین، موجب حصول نتایج بمراتب بهتری نسبت به استفاده از یک فیله گردیده است که در ادامه، توضیحات بیشتری در مورد دلایل این موضوع ارائه شده است. شکل ۸-(a,b)، بترتیب اولویت بندی نمونه های مختلف آسفالت بر اساس ITS خشک و TSR را نشان می دهند.

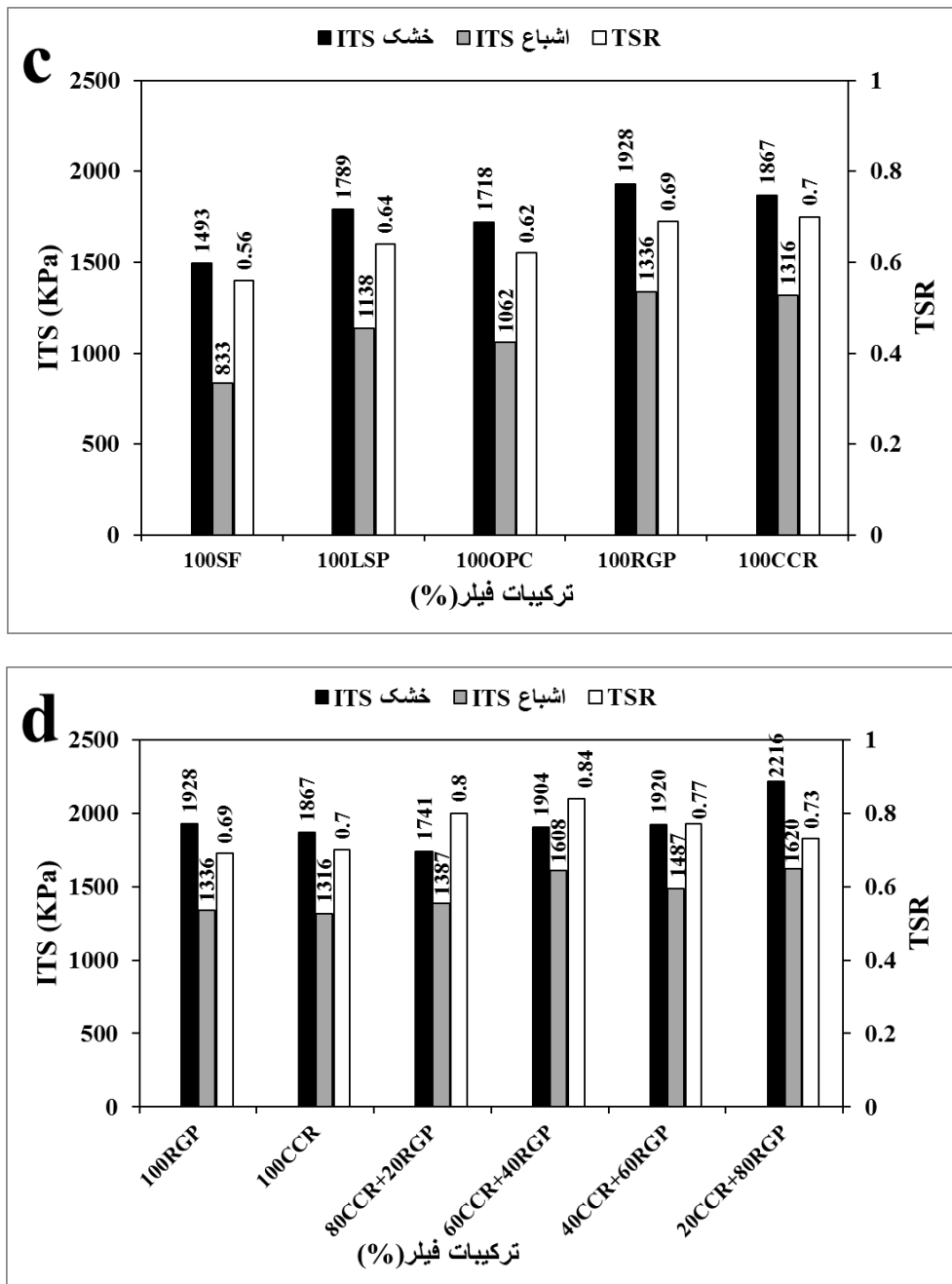
همانطور که در اشکال ۸-a و ۸-b قابل مشاهده است، بیشترین مقادیر ITS خشک و TSR عمدتا متعلق به نمونه های حاوی ترکیب فیلهای بازیافتی بوده است. تاثیر تغییرات مقادیر RGP و CCR بر ITS خشک و TSR نمونه های مختلف، بترتیب در شکل‌های ۹-a,b و ۱۰-a,b به نمایش گذاشته شده است.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می گردد، میزان ITS خشک تمامی نمونه های حاوی فیلهای بازیافتی، بالاتر و یا بسیار نزدیک به این میزان برای نمونه های حاوی فیله اصلی بوده (به خطچین‌ها توجه شود) که بیشترین آن برابر با ۲۲۱۶ کیلوپاسکال و مربوط به نمونه 20CCR+80RGP با کد ۱۲۰ بوده است. در حالی که نمونه شاهد (100SF) با ۱۴۹۳ کیلوپاسکال،



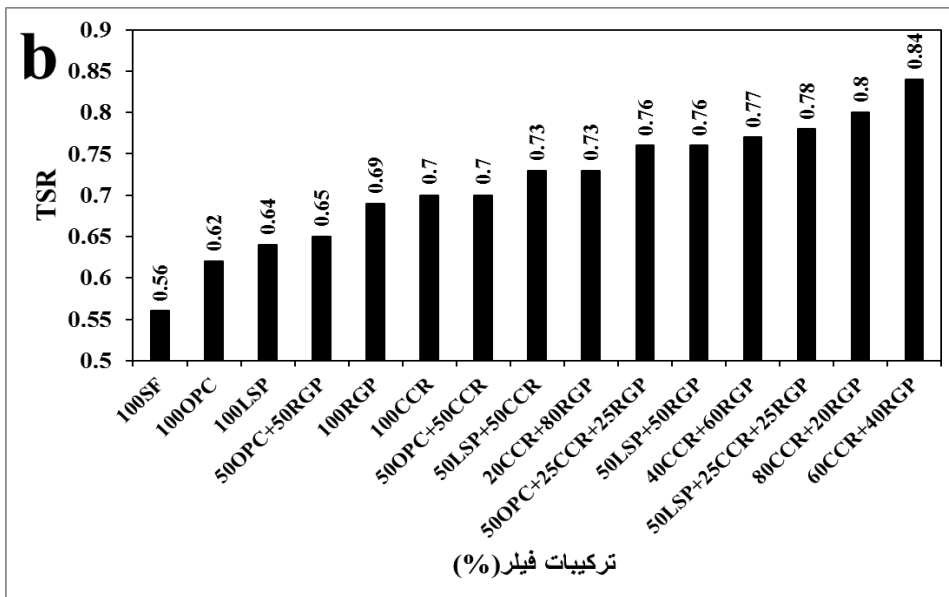
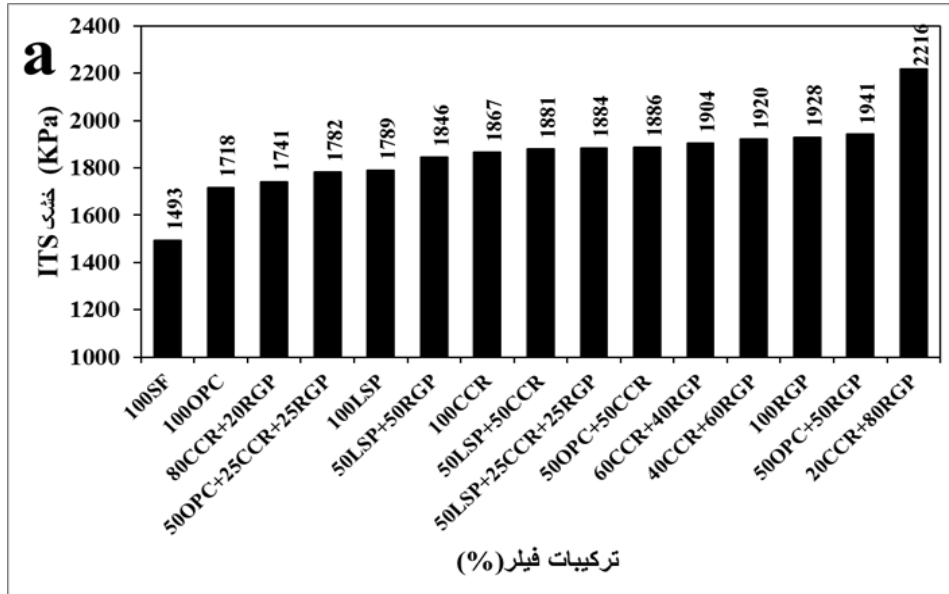
شکل ۷. نتایج آزمایش ITS (a) بر پایه فیلر LSP (b) بر پایه فیلر OPC (c) فاقد فیلر ترکیبی (d) بر پایه فیلرهای بازیافتی. (ادامه دارد)

Fig. 7. ITS results a) Based on LSP filler b) Based on OPC filler c) Non combined filler d) Based on recycled fillers(Continued)



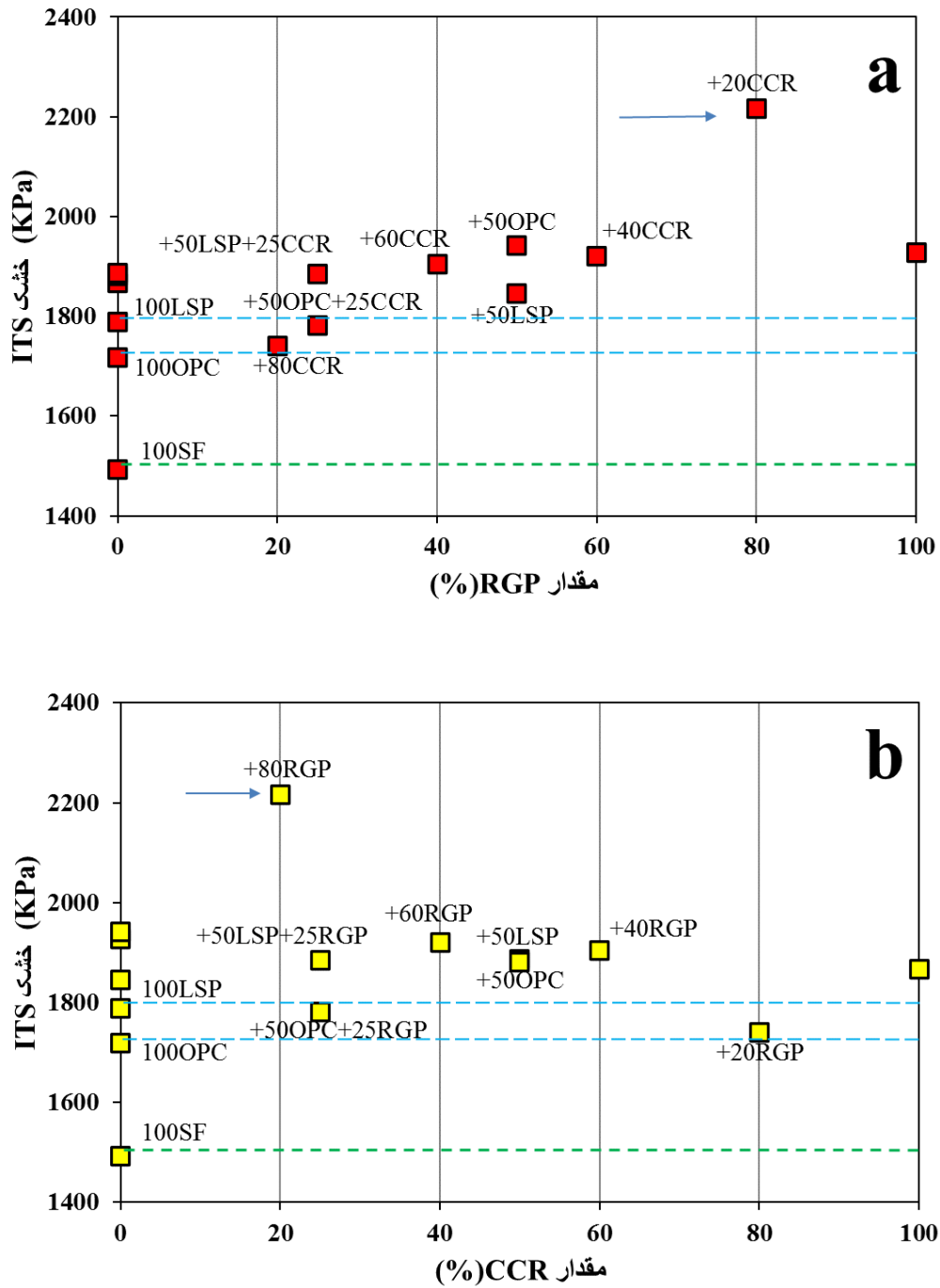
شکل ۷. نتایج آزمایش ITS (a) بر پایه فیلر LSP (b) بر پایه فیلر OPC (c) فاقد فیلر ترکیبی (d) بر پایه فیلرهای بازیافتی.

Fig. 7. ITS results a) Based on LSP filler b) Based on OPC filler c) Non combined filler d) Based on recycled fillers.



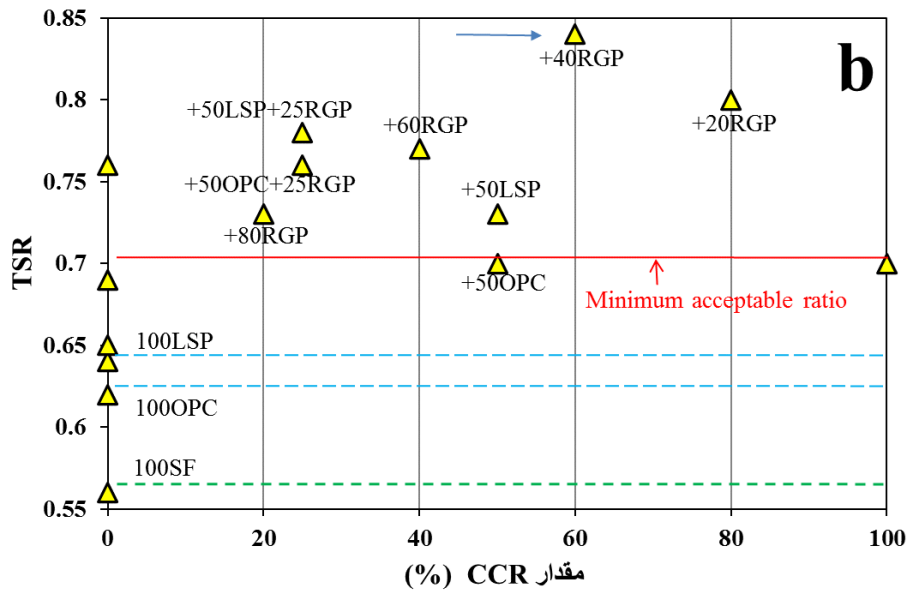
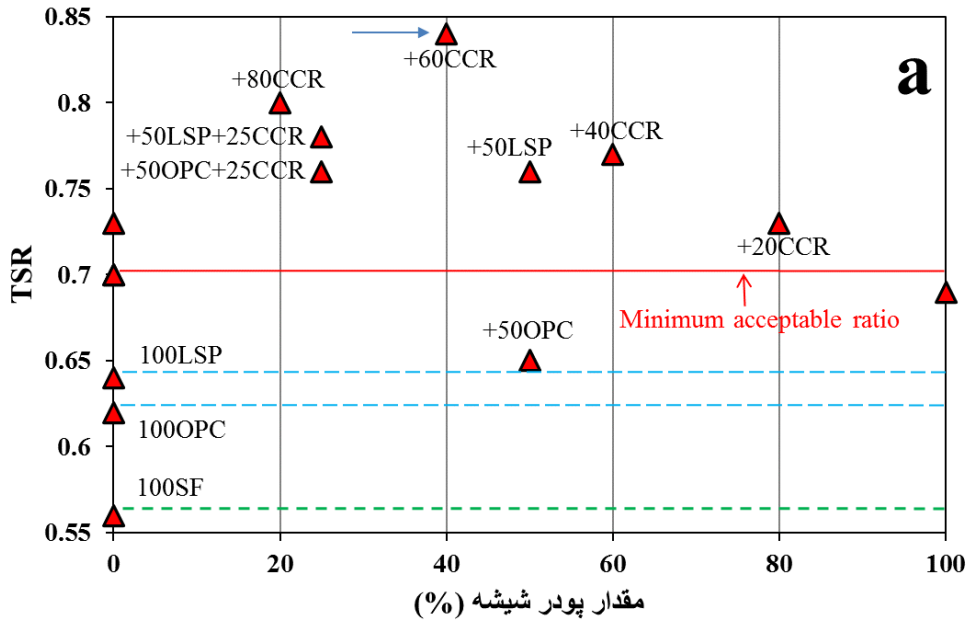
شکل ۸. چیدمان نمونه ها بر اساس (a) مقادیر ITS خشک (b) مقادیر TSR .

Fig. 8. Arrangement of samples based on a) ITSdry values b) TSR values



شکل ۹. تغییرات ITS خشک در برابر مقادیر RGP (a) و CCR (b).

Fig. 9. ITSdry changes against values a) RGP b) CCR



شکل ۱۰. تغییرات TSR در برابر مقادیر RGP (a) و CCR (b).

Fig. 10. TSR changes against values a) RGP b) CCR

فیلرهای بازیافتی CCR و RGP با غالبیت CCR (۶۰ تا ۸۰ درصد)، بهترین نتیجه را در ارتقای مقاومت مارشال، MQ، ITS، و TSR داشته است. بنابراین، این ترکیب فیلر را بعنوان ترکیب بهینه در نظر گرفت.

• استفاده از فیلر بهینه پسماند حاصل از ترکیب CCR و RGP، بعنوان جایگزین فیلرهای رایج، علاوه بر بهبود خواص مهندسی آسفالت، موجب صرفه جویی اقتصادی قابل توجه، کاهش آسیب‌های زیست محیطی، و حفاظت از منابع طبیعی تجدیدناپذیر می‌گردد.

منابع

- [1] W. Wu, W. Jiang, D. Yuan, R. Lu, J. Shan, J. Xiao, A.W. Ogbon, A review of asphalt-filler interaction: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors, *Construction and Building Materials*, 299 (2021) 124279.
- [2] A. Nikolaidis, *Highway engineering: Pavements, materials and control of quality*, CRC Press, 2014.
- [3] K. Blazejowski, *Stone matrix asphalt: Theory and practice*, CRC Press, 2016.
- [4] G.H. Hamed, K.G. Shamami, M.M. Pakenari, Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 258 (2020) 119729.
- [5] R. Zhai, L. Ge, Y. Li, The effect of nano-CaCO₃/styrene-butadiene rubber (SBR) on fundamental characteristic of hot mix asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 21(4) (2020) 1006-1026.
- [6] P. Hao, R. Zhai, Z. Zhang, X. Cao, Investigation on performance of polyphosphoric acid (PPA)/SBR compound-modified asphalt mixture at high and low temperatures, *Road Materials and Pavement Design*, 20(6) (2019) 1376-1390.
- [7] M. Gong, B. Yang, H. Zhang, Q. Sun, Comparative study on durability of different composite modified asphalt mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 22(6) (2021) 1369-1388.
- [8] A. Khodaii, A. Mehrara, Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Construction and Building Materials*, 23(7) (2009) 2586-2592.

می‌تواند موجب مقاومت بهتر نمونه‌های حاوی CCR در برابر آب باشد [۳۷]. با در نظر داشتن دلایل فوق، می‌توان ترکیبی از CCR با مقادیر بیشتر (۶۰ تا ۸۰ درصد) و RGP با مقادیر کمتر (۲۰ تا ۴۰ درصد) را بعنوان ترکیب فیلر بهینه در راستای بهبود سه فاکتور بسیار مهم مانند MQ، ITS و TSR معرفی نمود.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، نمونه‌های آسفالت با استخوانبندی سنگدانه ای (SMA)، با مقدار بهینه ۶٪ قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و مقدار ثابت ۹٪ از پنج نوع فیلر متفاوت ساخته شده‌اند که فیلر سیلیسی معدنی (SF) در نمونه شاهد، پودر سنگ (LSP) و سیمان پرتلند (OPC) بعنوان فیلرهای رایج یا اصلی، و پودر شیشه بازیافتی (RGP) و پسماند کاربید کلسیم (CCR) بعنوان فیلرهای جایگزین یا پسماند، بصورت خالص و یا ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند. بمنظور بررسی تاثیر فیلرهای مختلف بر خواص مکانیکی و دوام آسفالت، آزمایشات مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم و نسبت مقاومت کششی برای تعیین حساسیت رطوبتی، بر روی نمونه‌ها انجام شده است که خلاصه نتایج حاصله، بشرح ذیل آورده شده است:

- تمامی فیلرهای مورد استفاده در مقایسه با فیلر سیلیسی معدنی (SF)، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام آسفالت گردیده‌اند.
- با افزودن فیلرهای بازیافتی بعنوان جایگزین بخشی از فیلرهای رایج، مقاومت مارشال، شکل پذیری و ضریب مارشال (MQ)، بطور چشمگیری افزایش یافته‌اند.
- با افزایش مقادیر MQ برای نمونه‌های اصلاح شده می‌توان انتظار داشت مقاومت آسفالت در برابر شیار شدگی افزایش یابد.
- همچنین با افزودن فیلرهای بازیافتی مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) در دو حالت خشک و اشباع، و نسبت مقاومت کششی (TSR) نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش قابل توجهی داشته‌اند.
- رشد مقادیر نسبت مقاومت کششی (TSR) در نمونه‌های حاوی افزودنی‌های بازیافتی نشان دهنده کاهش حساسیت رطوبتی این نمونه‌ها می‌باشد، که نتیجه این امر خود می‌تواند به افزایش عمر بهره‌وری و دوام آسفالت‌ها کمک شایانی نماید.
- نمونه‌های حاوی فیلرهای تماماً بازیافتی، بهترین عملکرد را در بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی و دوام آسفالت داشته‌اند.
- تجزیه و تحلیل نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ترکیب

- materials: Preparation and characterization, *Journal of Cleaner Production*, 314 (2021) 127949.
- [19] K. Yıldız, M. Atakan, Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler, *Construction and Building Materials*, 262 (2020) 120448.
- [20] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Performance evaluation of asphalt concrete mixes having copper industry waste as filler, *Transportation Research Procedia*, 48 (2020) 3656-3667.
- [21] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Application of waste materials as fillers in bituminous mixes, *Waste management*, 78 (2018) 417-425.
- [22] A. Gedik, An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction, *Construction and Building Materials*, 300 (2021) 123980.
- [23] M. Ghasemi, S.M. Marandi, Laboratory investigation of the properties of stone matrix asphalt mixtures modified with rgp-sbs, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 6(4) (2011) 1823-1834.
- [24] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Potential utilization of construction wastes in asphalt pavements as fillers using ranking framework, *Construction and Building Materials*, 277 (2021) 122262.
- [25] A. Simone, F. Mazzotta, S. Eskandarsefat, C. Sangiorgi, V. Vignali, C. Lantieri, G. Dondi, Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 20(3) (2019) 592-607.
- [26] Y. Chen, S. Xu, G. Tebaldi, E. Romeo, Role of mineral filler in asphalt mixture, *Road materials and pavement design*, 23(2) (2022) 247-286.
- [27] M. Arabani, S.A. Tahami, M. Taghipoor, Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials, *Road Materials and Pavement Design*, 18(3) (2017) 713-729.
- [28] M.S. Lima, L.P. Thives, Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures, *Construction*
- [9] G.L. Baumgardner, J.R. Hardee, I.I. Negulescu, E.R. Williams, I.L. Howard, R.C.S. John, Quantitative analysis of functional polymer in recycled tyre rubber used in modified asphalt binders, *Road materials and pavement design*, 15(sup1) (2014) 263-278.
- [10] M. Ameri, S. Yeganeh, P.E. Valipour, Experimental evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures containing waste elastomeric polymers, *Construction and Building Materials*, 198 (2019) 638-649.
- [11] S. Ren, M. Liang, W. Fan, Y. Zhang, C. Qian, Y. He, J. Shi, Investigating the effects of SBR on the properties of gilsonite modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 1103-1116.
- [12] M. Vamegh, M. Ameri, S.F.C. Naeni, Experimental investigation of effect of PP/SBR polymer blends on the moisture resistance and rutting performance of asphalt mixtures, *Construction and building materials*, 253 (2020) 119197.
- [13] J. Wilanowicz, W. Grabowski, M. Andrzejczak, A. Chromiec, Assessment of the suitability of baghouse dusts from a dust extractor as fillers for hot-mix asphalt, *Procedia Engineering*, 57 (2013) 1269-1277.
- [14] Ş. Sargin, M. Saltan, N. Morova, S. Serin, S. Terzi, Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 390-397.
- [15] Q. Chen, C. Wang, Z. Qiao, T. Guo, Graphene/tourmaline composites as a filler of hot mix asphalt mixture: Preparation and properties, *Construction and Building Materials*, 239 (2020) 117859.
- [16] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Analysis and comparison of asphalt mixes containing waste fillers using a novel ranking methodology, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5) (2020) 04020064.
- [17] M.-z. Chen, J.-t. Lin, S.-p. Wu, C.-h. Liu, Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 1532-1536.
- [18] D. Jin, J. Wang, L. You, D. Ge, C. Liu, H. Liu, Z. You, Waste cathode-ray-tube glass powder modified asphalt

- nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA), *Case Studies in Construction Materials*, 15 (2021) e00655.
- [39] A.H. Korayem, H. Ziari, M. Hajiloo, M. Abarghoie, P. Karimi, Laboratory evaluation of stone mastic asphalt containing amorphous carbon powder as filler material, *Construction and Building Materials*, 243 (2020) 118280.
- [40] B.V. Kök, M. Yilmaz, Y. Erkus, Effects of graphite on mechanical properties of stone mastic asphalt pavement, *Journal of civil engineering and management*, 23(8) (2017) 1013-1020.
- [41] M. Chen, J. Lin, S. Wu, Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture, *Construction and building materials*, 25(10) (2011) 3909-3914.
- [42] A. Wozuk, L. Bandura, W. Franus, Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt, *Journal of Cleaner Production*, 235 (2019) 493-502.
- [43] Y. Cheng, J. Tao, Y. Jiao, G. Tan, Q. Guo, S. Wang, P. Ni, Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic, *Construction and Building Materials*, 118 (2016) 268-275.
- [44] A.M. Babalghaith, S. Koting, N.H.R. Sulong, M.R. Karim, B.M. AlMashjary, Performance evaluation of stone mastic asphalt (SMA) mixtures with palm oil clinker (POC) as fine aggregate replacement, *Construction and building materials*, 262 (2020) 120546.
- [45] A. Modarres, M. Rahmanzadeh, Effect of Coal-waste Filler and its Ash on Strength and Durability of Hot-mix Asphalt in Comparison to Limestone Powder, *Transportation Infrastructure Engineering*, 1(1) (2015) 55-65. (in Persian).
- [46] M. Chen, J. Zheng, F. Li, S. Wu, J. Lin, L. Wan, Thermal performances of asphalt mixtures using recycled tyre rubber as mineral filler, *Road Materials and Pavement Design*, 16(2) (2015) 379-391.
- [47] M.J. Choi, Y.J. Kim, H.J. Kim, J.J. Lee, Performance and Building Materials, 260 (2020) 119894.
- [29] H. Zhang, H. Li, A. Abdelhady, N. Xie, W. Li, J. Liu, X. Liang, B. Yang, Fine solid wastes as a resource-conserving filler and their influence on the performance of asphalt materials, *Journal of Cleaner Production*, 252 (2020) 119929.
- [30] M.H. Al-Sayed, I.M. Madany, W. Al-Khaja, A. Darwish, Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste, *Waste management & research*, 10(2) (1992) 183-194.
- [31] A.M. Awed, E.W. Tarbay, S.M. El-Badawy, A.M. Azam, Performance characteristics of asphalt mixtures with industrial waste/by-product materials as mineral fillers under static and cyclic loading, *Road Materials and Pavement Design*, 23(2) (2022) 335-357.
- [32] A. Kuity, A. Das, Effect of filler gradation on creep response of asphalt mix, *Road Materials and Pavement Design*, 18(4) (2017) 913-928.
- [33] A. Karakuş, Investigating on possible use of Diyarbakir basalt waste in Stone Mastic Asphalt, *Construction and Building Materials*, 25(8) (2011) 3502-3507.
- [34] A. Al-Hdabi, Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 544-551.
- [35] A. Ameli, R. Babagoli, N. Norouzi, F. Jalali, F.P. Mamaghani, Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117557.
- [36] H. Taherkhani, R. Bayat, Investigating the properties of asphalt concrete containing recycled brick powder as filler, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(8) (2022) 3583-3593.
- [37] A. Dulaimi, H.K. Shanbara, H. Jafer, M. Sadique, An evaluation of the performance of hot mix asphalt containing calcium carbide residue as a filler, *Construction and Building Materials*, 261 (2020) 119918.
- [38] M. Fakhri, The effects of nano zinc oxide (ZnO) and

- Engineering, 16(6) (2015) 502-509.
- [53] H. Taherkhani, Evaluation and Comparison of the Properties of Asphalt Concrete Containing Recycled Brick and Glass Powder as Filler, *Journal of Transportation Research*, 12(2) (2015) 157. (in Persian).
- [54] A. Mansourian, M. Molaee, Evaluation of Rutting Resistance of Stone Mastic Asphalt Containing Crumb Rubber and Glass Cullet, *Transportation Infrastructure Engineering*, 1(2) (2015) 77-86. (in Persian).
- [55] R. Beyrami, G.H. Hamed, B. Golchin, Evaluation the Effect of Glass Wastes and Metal Oxides Nanoparticles on the Stripping Strength of Asphalt Mixtures, *Transportation Research Procedia*, 15(4) (2018) 97-112. (in Persian).
- [56] M.P. Bilondi, M.M. Toufigh, V. Toufigh, Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer, *Construction and Building Materials*, 183 (2018) 417-428.
- [57] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul, T. Laosamathikul, Effects of calcium carbide residue-fly ash binder on mechanical properties of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(11) (2010) 1164-1170.
- evaluation of the use of tire-derived fuel fly ash as mineral filler in hot mix asphalt concrete, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2) (2020) 249-258.
- [48] X. Hu, N. Wang, P. Pan, T. Bai, Performance evaluation of asphalt mixture using brake pad waste as mineral filler, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 410-417.
- [49] F. Giuliani, F. Merusi, G. Polacco, S. Filippi, M. Paci, Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 174-179.
- [50] C. Sangiorgi, P. Tataranni, A. Simone, V. Vignali, C. Lantieri, G. Dondi, Assessment of waste bleaching clay as alternative filler for the production of porous asphalts, *Construction and Building Materials*, 109 (2016) 1-7.
- [51] J. Yi, Y. Cao, D. Feng, Y. Huang, Characterization of zirconium tungstate filler and performance investigation on asphalt mastic made with zirconium tungstate filler, *Construction and Building Materials*, 125 (2016) 387-397.
- [52] M. Arabani, S. Babamohammadi, A. Azarhoosh, Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt, *International Journal of Pavement*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Baseri Azghandi, M. Pourabbas Bilondi, D. Moazami, *Laboratory investigation on the use of recycled fillers in improving the performance of Stone Mastic Asphalt (SMA)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(1) (2024) 51-74.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128

