

**S. Abdollahi**

Department of Civil  
Engineering, Ahar Branch,  
Islamic Azad University, Ahar,  
Iran.

**e-mail:**

Sajadabdollahi6879@gmail.com

**GH. H. Hamedi**

Department of Civil  
Engineering, Guilan University,  
Rasht, Iran.

**e-mail:** hamedi@guilan.ac.ir

**B. Golchin**\*

Department of Engineering,  
University of Mohaghegh  
Ardabili, Ardabil, Iran.

**e-mail:** b.golchin@uma.ac.ir

**R. Meshkabadi**

Department of Advanced  
Technologies, University of  
Mohaghegh Ardabili, Namin,  
Iran.

**e-mail:**

r\_meshkabadi@uma.ac.ir

## **The Effect of High Density Polyethylene Additives on the Mix Design Parameters of Asphalt Mixtures**

*In previous studies, the effect of different types of polyethylene on the performance of asphalt mixtures has been investigated. In this research, the mixing design of asphalt mixtures containing high density polyethylene has been analyzed and modeled based on the conventional and the response surface methods for limestone and granite aggregates. For this purpose, the volumetric and strength behavior of laboratory-made samples have been measured and statistically analyzed. In the optimization process, the optimal amount of binder and polyethylene has been extracted according to the criteria of the asphalt pavement regulations for Iranian roads and with the desirability approach. Experimental results show that the optimal conditions for limestone aggregate are 6.1% binder and 4% polyethylene with a desirability of 0.909. However, these values for granite aggregate are 5.9% binder, 4% polyethylene with a desirability of 0.962. The polyethylene additive increases the Marshall Strength and specific weight of the samples for both materials. The higher percentage of additive has the greater effect on these parameters. Analysis of variance shows that polyethylene percentage has a significant effect on Marshall Flow. By increasing the amount of additive from zero to four percent, the flow value decreases.*

**Keywords:** High Density Polyethylene, Mixing Design, Optimization, Analysis of Variance .

---

\* Corresponding author

Received 28 August 2021, Revised 11 November 2021, Accepted 12 November 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7292.1291

## تأثیر افزودنی پلی‌اتیلن با چگالی بالا بر پارامترهای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی

در تحقیقات گذشته، اثر پلی‌اتیلن‌های مختلف، بر تعدادی از رفتارهای مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلی‌اتیلن با چگالی بالا به روش متداول و نیز به روش سطح پاسخ برای مصالح سنگ آهک و گرانیات تحلیل و مدل‌سازی شده است. بدین منظور، رفتار حجمی و مقاومتی نمونه‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و مورد تحلیل آماری قرار گرفته‌اند. در فرآیند بهینه‌سازی، مقدار بهینه قیر و پلی‌اتیلن لازم مطابق با معیارهای آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران و با رویکرد تابع مطلوبیت استخراج شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، مخلوط آسفالتی بهینه برای مصالح آهکی با قیر ۶/۱ و پلی‌اتیلن ۴ درصد و در مطلوبیت ۰/۹۰۹ تولید می‌شود، در حالی که این مقدار برای مصالح گرانیاتی با قیر ۵/۹ و پلی‌اتیلن ۴ درصد و در مطلوبیت ۰/۹۶۲ تعیین می‌گردد. افزودنی پلی‌اتیلن استقامت مارشال و وزن مخصوص نمونه‌ها را برای هر دو مصالح سنگی افزایش می‌دهد. درصد افزودنی بیشتر، اثر افزایشی بیشتری بر این پارامترها دارد. تحلیل واریانس نشان می‌دهد پلی‌اتیلن، اثر معنی‌دار بر روانی مارشال داشته و افزایش آن از صفر به چهار درصد، مقدار روانی مارشال را کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: پلی‌اتیلن با چگالی بالا، طرح اختلاط، بهینه‌سازی، تحلیل واریانس.

سجاد عبدالمهدی

کارشناس ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

پست الکترونیک:

sajadabdollahi6879@gmail.com

غلام‌حسین حامدی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، گیلان.

پست الکترونیک:

hamedi@guilan.ac.ir

بابک گلچین\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پست الکترونیک:

b.golchin@uma.ac.ir

رامین مشک‌آبادی

استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پست الکترونیک:

r\_meshkabadi@uma.ac.ir

### ۱- مقدمه

بوتادن - استایرن، اتیلن - ونیل - استات، استایرن - بوتادن - رابر و پلی‌پروپیلن نمونه از مواد پلیمری است که امروزه در اصلاح رفتار قیرها و مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند. جدیداً بررسی اثر مشتقات پلی‌اتیلن بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

حامدی و همکاران، اثر پلیمر پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا را بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی بررسی کردند. داده‌های تحقیقاتی آنها نشان داد این افزودنی در دو و چهار درصد وزنی قیر می‌تواند

مطالعات آزمایشگاهی در سال‌های گذشته نشان داده است که تعدادی از افزودنی‌های پلیمری عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهند [۱]. استایرن -

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱.

DOI: 10.22091/cer.2021.7292.1291 شناسه دیجیتال

کردند. نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی به روش روسازی ممتاز (روش عملکردی) نشان داد که رفتار خستگی قیرها در دمای میانی و رفتار شیارشدگی قیرها در دمای بالا بهبود می‌یابد. ایشان اثر منفی این افزودنی در دماهای پایین آزمایش را مشاهده نکردند [۷]. در پژوهشی دیگر، اثر این افزودنی با آزمایش رئومتر تیرچه خمشی در دماهای پایین بررسی شد. نتایج این آزمایش، بهبود رفتار قیرها را نمایش داد [۴].

مجموعه تحقیقات اشاره‌شده، اثر مثبت افزودنی پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا را بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی و قیر گزارش کرده است. با توجه به تأثیر مثبت این افزودنی‌ها در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، تعیین مقادیر مناسبی از این افزودنی و سایر پارامترهای مؤثر در تولید مخلوط‌های آسفالتی در صنعت راه‌سازی دارای اهمیت هست. مخلوط‌های آسفالتی برای اینکه بتوانند در صنعت راه‌سازی مورد قبول واقع شوند، بایستی مشخصات فنی درج‌شده در آیین‌نامه‌های روسازی راه‌های آسفالتی ایران را برآورده نمایند. برای پاسخ به این سؤال، مخلوط‌های مختلف آسفالتی با درصد‌های متفاوت قیر و افزودنی پلی‌اتیلن با چگالی بالا<sup>۲</sup> تهیه شدند و مشخصات حجمی و مقاومتی آنها با توجه به این آیین‌نامه اندازه‌گیری شدند. آنگاه نتایج آزمایشگاهی به روش متداول و نیز توسط روش سطح پاسخ<sup>۳</sup> و با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۴</sup> مورد تحلیل قرار گرفتند. همچنین رفتار حجمی و مقاومتی آنها در نمودارهایی نمایش داده شدند. سپس با روش بهینه‌سازی، مناسب‌ترین ترکیب برای این مخلوط شناسایی گردید.

امروزه روش سطح پاسخ به‌عنوان روشی برای کاستن تعداد آزمایش‌ها، در تحلیل و بهینه‌سازی رفتار مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. حمزه و همکاران از روش سطح پاسخ در تحلیل رفتار مخلوط‌های آسفالتی

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را به‌صورت قابل‌توجهی اصلاح کند [۲]. دلیل تأثیر مثبت این افزودنی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، خصوصیات بازی آن است که استفاده از آن می‌تواند خصوصیات اسیدی قیر را کاهش دهد و چسبندگی بهتری با سنگ‌دانه‌های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند، ایجاد کند.

در تحقیقات دیگر، تأثیر مثبت پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا بر رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی نیز گزارش شده است. حسینی امیرآباد و همکاران، اثر این افزودنی را بر روی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش خزش دینامیکی بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که استفاده از این افزودنی موجب کاهش شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. این تفاوت در دماهای بالاتر محسوس بود [۳]. یالقوز آقاج<sup>۱</sup> و همکاران، اثر این افزودنی را در آزمایش خمشی نیم‌دایره در دمای پایین بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که این افزودنی ویژگی‌های حرارتی مخلوط‌های آسفالتی را در دمای پایین بهبود می‌دهد [۴]. در تحقیقی دیگر، از ضایعات پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا برای افزودن به قیر و ساخت آسفالت استفاده شد. در این تحقیق، مخلوط‌های آسفالتی از دو مصالح سنگی گرانیت و سنگ‌آهک و قیر مورد استفاده PG64-16 ساخته شدند [۵]. نتایج آزمایش‌های خستگی نشان داد که ضایعات این افزودنی، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهد. همچنین استفاده از پلی‌اتیلن با چگالی بالا، رفتار خستگی و شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با شیشه بازیافتی را نیز بهبود می‌دهد [۶].

در آزمایش‌های قیر نیز اثر مثبت پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا مشاهده شده است. حامدی و رنجبر، اثر این افزودنی را در حضور نانو رس بر روی قیر بررسی

<sup>2</sup> - High Density Poly Ethylene (HDPE)

<sup>3</sup> - Response Surface Method

<sup>4</sup> - Design Expert

<sup>1</sup> - Yalghouzaghaj

## ۲-۱- خصوصیات مصالح مصرفی

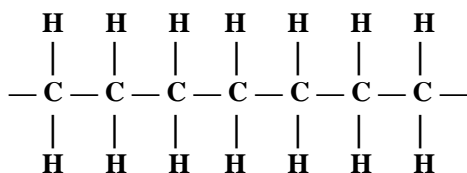
در این پژوهش دو نوع سنگ‌دانه (سنگ‌آهک و گرانیت) و یک نوع قیر پایه ۱۰۰-۸۵ به‌عنوان قیر متداول در شرایط اقلیمی منطقه آذربایجان استفاده گردید. دانه‌بندی شماره چهار از نشریه ۲۳۴ برای مصالح رویه با اندازه حداکثر سنگ‌دانه‌ها برابر ۱۹ و اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر انتخاب شد. مصالح آهکی دارای حداکثر سایش لس‌آنجلس ۲۵ درصد، وزن مخصوص ظاهری درشت‌دانه ۲/۶۵۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب و درصد جذب آب ۰/۷ درصد بودند. درحالی‌که مصالح گرانیتی دارای حداکثر سایش لس‌آنجلس ۱۹ درصد، وزن مخصوص ظاهری درشت‌دانه ۲/۶۸۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب و درصد جذب آب ۱/۲ درصد بودند.

از ماده افزودنی پلی‌اتیلن با چگالی بالا در دو درصد مختلف (دو و چهار درصد وزن قیر) استفاده شد. این ماده دارای مقاومت بالا در برابر سایش، ضربه و ترک بوده، در برابر واکنش‌های شیمیایی مقاومت نموده و درصد جذب آب کمی دارد [۲]. این افزودنی از ماده پلی‌اتیلن استحصال می‌شود. پلی‌اتیلن یکی از موادی است که در صنعت پلاستیک به صورت گسترده استفاده می‌شود. پلی‌اتیلن نوعی پلیمر یا پلاستیک است که از زنجیره‌های بلند و طولانی مونومری با نام اتیلن ساخته شده است. پلی‌اتیلن با چگالی بالا در مقایسه با پلی‌اتیلن با چگالی پایین دارای انعطاف‌پذیری کمتر و دارای مقاومت بیشتر در برابر اشعه فرابنفش است. در این تحقیق، ابتدا قیر تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا به حد روانی قابل قبولی برسد. سپس از دستگاه میکسر با سرعت دورانی ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه برای اختلاط قیر با این افزودنی استفاده شد. این افزودنی به آرامی و به تدریج و بدون گرم شدن به قیر داغ اضافه شد. برای جلوگیری از کاهش دمای قیر در کنار ظرف قیر، از گرم‌کن احاطه‌کننده ظرف قیر استفاده گردید. این کار به صورت مجزا برای درصدهای مختلف انجام گردید. شکل ۱

حاوی یک افزودنی گرم شیمیایی به نام ردیست استفاده کردند [۸]. عبدالله و همکاران از روش سطح پاسخ برای شناسایی مناسب‌ترین پارامتر دما و زمان برای پیرشدگی کوتاه‌مدت قیرها در شرایط آزمایشگاهی استفاده کردند. ایشان توانستند با آزمایش‌های متعدد بر روی انواع قیرها، یک روش جدید برای شناسایی شرایط پیرشدگی کوتاه مدت ارائه دهند [۹]. گلچین و ربی از روش سطح پاسخ برای شناسایی نقطه بهینه در تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی خرده آسفالت و افزودنی ساسوبیت بهره گرفتند. نوآوری این روش، کاهش تعداد نمونه‌های آسفالتی در ارائه طرح اختلاط برای مخلوط‌های آسفالتی در فرآیند بازیافت گرم بود [۱۰]. لاپیان<sup>۵</sup> و همکاران، امکان استفاده از روش سطح پاسخ را در بررسی رفتار حجمی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر سنگ و خرده پلاستیک بازیافتی به‌کار بردند. نتایج تحقیق نشان داد که این مصالح پتانسیل استفاده در مخلوط‌های آسفالتی را دارا می‌باشند [۱۱]. پژوهشگران از روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی فرآیند تولید مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با مواد نانوسلیکا استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌ها بیان کرد که هم مقدار نانوسلیکا و هم مقدار قیر بر روی رفتار مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارد [۱۲]. حمزه و همکاران از یک افزودنی وکس در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت به‌وسیله روش سطح پاسخ استفاده کردند. ایشان بدین‌وسیله تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی را در تحقیق خود کاهش دادند [۱۳]. طاهرخانی و نوریان، اثر روغن سوخته را به عنوان یک ماده جوانساز بر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت گرم بازیافتی بررسی نمودند. ایشان بدین روش نشان دادند که تغییرشکل ماندگار در مخلوط آسفالتی با افزایش مقدار تراشه کاهش می‌یابد [۱۴].

## ۲- مواد و روش‌ها

<sup>۵</sup>- Lapian



شکل ۲- ساختار مولکولی پلی اتیلن با چگالی بالا

## ۲-۲- طراحی آزمایش

در این تحقیق در گام نخست، شش ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی مطابق جدول ۱ تعریف شدند. بدین منظور، مطابق روش متداول طرح اختلاط برای هر ترکیب فوق الذکر، ۱۵ نمونه ساخته شد. برای هر ترکیب، درصدهای قیر ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ به کار گرفته شد. سپس مشخصات حجمی و مقاومتی نمونه‌ها تعیین گردید.

جدول ۱- ترکیبات مختلف مخلوطهای ساخته شده

شماره ترکیب	ترکیب آزمایش
۱	سنگدانه گرانیت + قیر پایه
۲	سنگدانه گرانیتی + قیر پایه + ۲ درصد افزودنی
۳	سنگدانه گرانیتی + قیر پایه + ۴ درصد افزودنی
۴	سنگدانه سنگ آهک + قیر پایه
۵	سنگدانه سنگ آهکی + قیر پایه + ۲ درصد افزودنی
۶	سنگدانه سنگ آهکی + قیر پایه + ۲ درصد افزودنی

نشان می‌دهد.

## ۲-۳- روش تحلیل سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضیات کاربردی براساس ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در روش سطح پاسخ، بهینه نمودن پاسخ (متغیر خروجی) است که از چند متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) تأثیر می‌گیرد. هر آزمایش از یک سری آزمون‌ها تشکیل یافته و تغییر در متغیرهای ورودی برای تعیین متغیر پاسخ به کار می‌رود. بهینه‌سازی در روش سطح پاسخ به منظور کاهش هزینه‌ها است. در این روش، همگرایی به سمت نقطه بهینه صورت می‌گیرد. هدف از طرح آزمایش، شناسایی نمودن و تحلیل تأثیر متغیرهای

نمایی از همزن مربوطه را نشان می‌دهد. شکل ۲، ساختار مولکولی پلی اتیلن با چگالی بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۱- دستگاه همزن برای اختلاط قیر با افزودنی

این مشخصات شامل پارامترهای استقامت مارشال، روانی مارشال، وزن مخصوص، درصد فضای خالی آسفالت<sup>۶</sup>، درصد فضای خالی مصالح سنگی<sup>۷</sup> و درصد فضای خالی پر شده با قیر<sup>۸</sup> بودند. در گام دوم، طرح آزمایش دیگری با استفاده از روش سطح پاسخ بر مبنای طرح ترکیب مرکزی<sup>۹</sup> ارائه شده و مشخصات حجمی و مقاومتی آنها نیز تعیین گردید. روش سطح پاسخ از این داده‌ها می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار حجمی و مقاومتی استفاده کند. جدول شماره ۲ طرح آزمایش مذکور را

<sup>۶</sup>- Air Void

<sup>۷</sup>- Voids in the mineral aggregate (VMA)

<sup>۸</sup>- Voids Filled with Asphalt (VFA)

<sup>۹</sup>- Central Composite Design (CCD)

ارزیابی مدل و دست‌یابی به مقادیر بهینه برای هر متغیر است [۱۵]. در جدول ۳، پارامترهای مورد بررسی و سطوح مختلف آنها نشان داده شده است.

مؤثر بر روی خروجی‌ها با تعداد کمتر آزمایش است. برخی مراحل این روش شامل انتخاب متغیرهای غیروابسته از طریق آزمایش و مشخص کردن محدوده مناسب آنها، برآزش یک تابع چندجمله‌ای از طریق اطلاعات تجربی،

جدول ۲- طرح آزمایش به روش سطح پاسخ

نوع مصالح	درصد افزودنی	درصد قیر	نمونه	نوع مصالح	درصد افزودنی	درصد قیر	نمونه
آهک	صفر	۴/۵	۱۲	گرانیت	صفر	۴/۵	۱
آهک	صفر	۵/۵	۱۳	گرانیت	صفر	۵/۵	۲
آهک	صفر	۶/۵	۱۴	گرانیت	صفر	۶/۵	۳
آهک	۲	۴/۵	۱۵	گرانیت	۲	۴/۵	۴
آهک	۲	۵/۵	۱۶	گرانیت	۲	۵/۵	۵
آهک	۲	۵/۵	۱۷	گرانیت	۲	۵/۵	۶
آهک	۲	۵/۵	۱۸	گرانیت	۲	۵/۵	۷
آهک	۲	۶/۵	۱۹	گرانیت	۲	۶/۵	۸
آهک	۴	۴/۵	۲۰	گرانیت	۴	۴/۵	۹
آهک	۴	۵/۵	۲۱	گرانیت	۴	۵/۵	۱۰
آهک	۴	۶/۵	۲۲	گرانیت	۴	۶/۵	۱۱

جدول ۳- پارامترهای ورودی و سطوح آنها در مدل‌سازی به روش سطح پاسخ

سطح			پارامتر
۶/۵	۵/۵	۴/۵	قیر (درصد)
۴	۲	صفر	افزودنی پلی‌اتیلن (درصد)
آهک		گرانیت	نوع مصالح سنگی

### ۳-۱- بررسی رفتار مخلوط آسفالتی به روش متداول

هدف این تحقیق، بهینه‌سازی طرح اختلاط آسفالت به روش سطح پاسخ است، ولی در گام نخست، نمونه‌های آزمایشگاهی به روش متداول با درصدهای قیر ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ مورد آزمایش قرار گرفته و مقدار استقامت و روانی مارشال، وزن مخصوص، درصد فضای خالی آسفالت، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر مطابق شکل‌های ۳ و ۴ برای مصالح گرانیتی و آهکی تعیین گردیدند.

تغییرات استقامت نمونه‌های آسفالتی به‌ازای درصدهای مختلف پلی‌اتیلن برای مصالح گرانیتی در شکل

### ۳-۲- آزمایش‌های به‌کار رفته

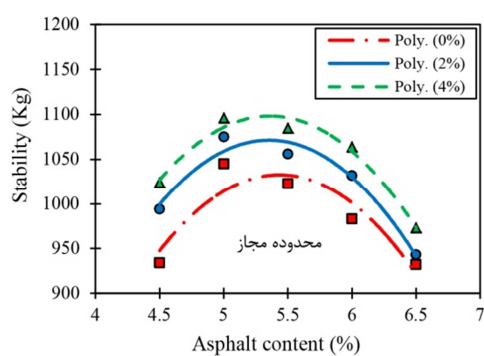
آزمایش‌های به‌کار رفته در این تحقیق در دو گروه آزمایش‌های حجمی و مقاومتی بودند. ابتدا پارامترهای حجمی نمونه‌ها شامل وزن مخصوص، درصد فضای خالی آسفالت، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر اندازه‌گیری شدند. بدین‌منظور از استانداردهای AASHTO T275، AASHTO T269 و AASHTO T209 استفاده شد. سپس پارامترهای مقاومتی شامل استقامت و روانی مارشال براساس AASHTO T245 به‌دست آمدند.

### ۳- نتایج و بحث

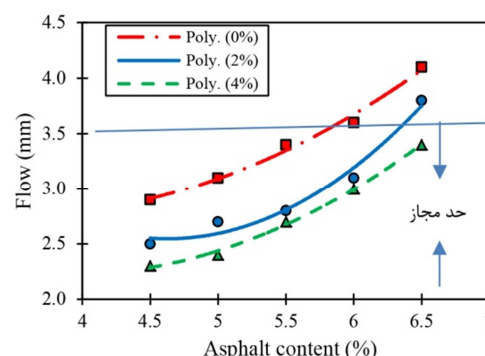
است. این نشان می‌دهد این افزودنی روانی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. مقدس‌نژاد و همکاران بهبود رفتار شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده از مصالح گرانیتی را در حضور پلی اتیلن با چگالی بالا در دماهای بالا مشاهده کردند. این نتیجه به صورت غیرمستقیم می‌تواند نتیجه این بخش تحقیق را تأیید کند [۱۷]. نمودار وزن مخصوص در شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار بیشترین وزن مخصوص در افزودنی چهار درصد برابر مقدار ۲۳۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب است که معادل درصد قیر ۵/۷ است.

۳ نشان می‌دهد که افزودن این ماده به مخلوط آسفالتی باعث افزایش استقامت مارشال نمونه‌ها می‌شود. موتسیم و همکاران نیز افزایش استقامت مارشال در حضور این افزودنی را گزارش کردند [۱۶]. بیشترین میزان استقامت مارشال در نمونه‌های چهار درصد افزودنی، مربوط به مقدار ۱۰۷۵ کیلوگرم مشاهده می‌شود.

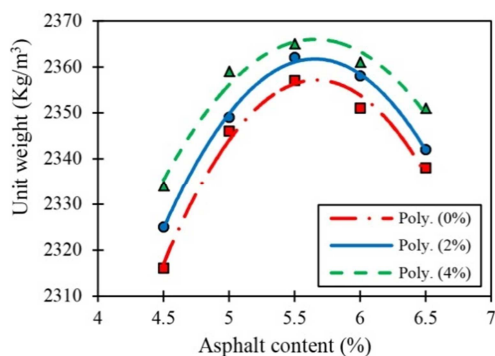
با بررسی نمودار روانی مارشال در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد قیر روانی مارشال، افزایش یافته و نقطه بیشینه‌ای مشاهده نمی‌گردد. بیشترین روانی مربوط به مخلوط آسفالتی بدون افزودنی است، درحالی‌که، کمترین روانی مربوط به نمونه دارای چهار درصد افزودنی



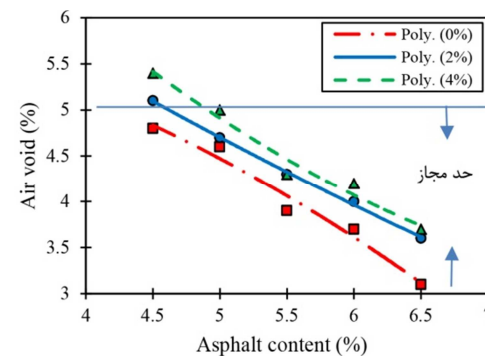
(ب) استقامت مارشال



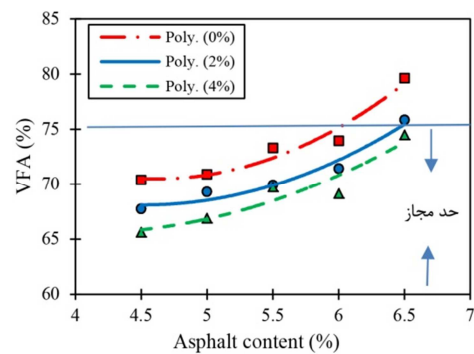
(الف) روانی مارشال



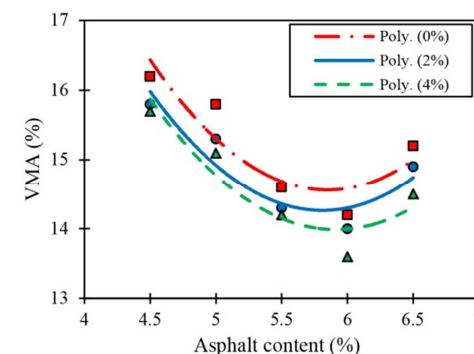
(ت) وزن مخصوص



(پ) درصد فضای خالی آسفالت



(ج) VFA



(ث) VMA

شکل ۳- نتایج متغیرهای خروجی نسبت به درصد قیر برای نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه گرانیتی با درصدهای افزودنی مختلف

نمودار روانی مارشال در شکل ۴، با افزایش درصد افزودنی، روانی مارشال کاهش می‌یابد. این یافته با نتیجه تحقیق هینسلی‌اوگلو و آگار<sup>۱۰</sup> برای مصالح آهکی همخوانی دارد [۱۹]. مخلوط‌های دارای چهار درصد افزودنی دارای کمترین روانی و مخلوط‌های بدون افزودنی دارای بیشترین روانی است. در نمودار تغییرات وزن مخصوص در شکل ۴، میزان قیر لازم برای بیشترین وزن مخصوص به ازای افزودنی چهار درصد، معادل ۵/۸ درصد است. مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد افزودنی، میزان درصد فضاهای خالی داخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. برای افزودنی همچنین با افزایش درصد قیر میزان VFA افزایش می‌یابد و مقدار VMA به ازای افزودنی چهار درصد و قیر ۵/۸ درصد معادل ۱۴/۳ درصد است.

میزان درصد قیر متناظر با ۴ درصد فضای خالی، از شکل ۴، برای سنگدانه‌های آهکی قابل استخراج است. به عنوان مثال، درصد قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی حاوی ۲ درصد پلی‌اتیلین با چگالی بالا برابر ۶/۳ درصد است. انتخاب این درصد، مقدار مجازی را برای سایر پارامترها مطابق با آیین‌نامه روسازی تأمین می‌کند.

### ۳-۲- بررسی رفتار مخلوط آسفالت به روش سطح پاسخ

جداول ۴ و ۵ مدل‌های پیشنهادی را به روش سطح پاسخ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل خطی درجه دو برای کلیه پارامترها به‌جز روانی مارشال در پیش‌بینی رفتار مقاومتی و حجمی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد می‌گردد. مدل پیشنهادی برای روانی مارشال خطی است. تحلیل واریانس در این جداول نشان می‌دهد مقدار قیر، مقدار افزودنی و نوع سنگدانه‌ها متغیرهای معنی‌دار در پیش‌بینی رفتارهای حجمی و مقاومتی برای مخلوط‌های آسفالتی هستند.

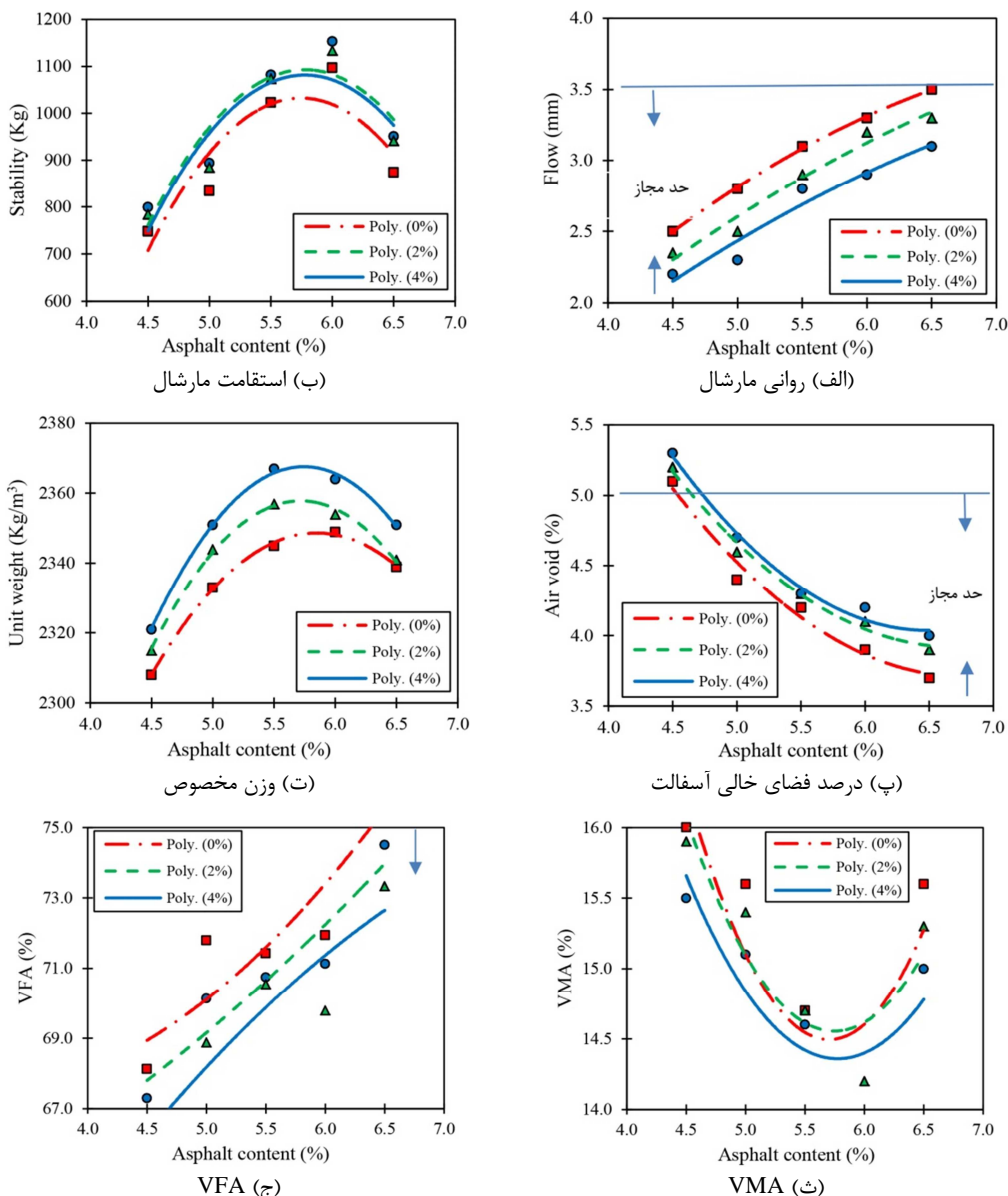
کمترین وزن مخصوص نیز برای نمونه‌های بدون افزودنی مشاهده می‌گردد. با بررسی نمودار درصد فضای خالی آسفالت در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که افزایش مقدار افزودنی درصد فضای خالی را بیشتر افزایش می‌دهد. از طرفی، با بررسی نمودار VFA در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار افزودنی، پارامتر VFA به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. همچنین کمترین مقدار پارامتر VMA در قیر ۵/۹ درصد به ازای افزودنی چهار درصد حاصل می‌شود.

اگر مقدار قیر بهینه، معادل درصدی از قیر باشد که در آن درصد، فضای خالی آسفالت برابر ۴ درصد باشد، در این حالت، درصد قیر بهینه برای نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتهی و با افزودنی چهار، دو و صفر درصد، مقداری برابر ۶/۱، ۶ و ۵/۱ درصد قیر خواهد بود. انتخاب چنین درصدی، مقدار استقامت مارشال، روانی مارشال، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پرشده با قیر را در دامنه مجاز بین‌نامه روسازی قرار می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور افزودنی، مقدار قیر بهینه را افزایش می‌دهد.

پس از بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی با سنگدانه‌های گرانیتهی، این رفتار برای سنگدانه‌های آهکی نیز بررسی شد. نتایج به‌دست آمده برای نمونه‌های حاوی دو و چهار درصد افزودنی و بدون افزودنی در شکل ۴ نشان داده شده است. با بررسی شکل ۴، برای استقامت مارشال مشاهده می‌شود که این افزودنی استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. این نتیجه، سازگار با نتیجه تحقیق حمید و همکاران در بررسی استقامت مارشال مصالح آهکی در حضور این افزودنی است [۱۸]. از طرفی، مقدار بیشینه‌ای در نمونه‌های حاوی دو درصد افزودنی مشاهده می‌شود. بیشترین استقامت، مقداری نظیر ۱۰۹۰ کیلوگرم در درصد قیر ۵/۸ و در افزودنی دو درصد است. استقامت مارشال نمونه‌های دارای چهار درصد افزودنی خیلی نزدیک نمونه دو درصد است. در

<sup>10</sup>- Himsloglu and Agar





شکل ۴- نتایج متغیرهای خروجی نسبت به درصد قیر برای نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه آهکی با درصدهای افزودنی مختلف

افزودنی است. این پارامتر با داشتن p-value برابر ۰/۸۹۵۲ پارامتر معنی‌دار در پیش‌بینی رفتار استقامت مارشال نمی‌باشد. همین مفهوم برای اندرکنش BC در استقامت مارشال نیز مشاهده می‌شود. چنین تحلیل‌هایی را می‌توان برای سایر پارامترها انجام داد. به‌عنوان مثال، هر سه متغیر مقدار قیر، مقدار افزودنی و نوع سنگ‌دانه، متغیرهای معنی‌دار در پیش‌بینی رفتار روانی مارشال هستند، اما این متغیرها به‌صورت خطی رفتار روانی مارشال را پیش‌بینی نمی‌نمایند.

شکل ۵، اثر قیر و افزودنی را بر پارامترهای مقاومتی و حجمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگ‌دانه‌های

مقدار p-value کم‌تر از ۰/۰۵ معنی‌دار بودن پارامترها را نشان می‌دهد. گاهی مشاهده می‌شود که دو مقدار قیر و مقدار افزودنی پارامترهای معنی‌دار در پیش‌بینی رفتارهای مقاومتی و حجمی نیستند، چراکه p-value آنها بیشتر از ۰/۰۵ است. این پارامترها می‌توانند در فرآیند مدل‌سازی از معادلات ریاضی حذف شوند. به‌عنوان مثال، برای توان دوم مقدار افزودنی در پیش‌بینی مقدار استقامت مارشال عدد ۰/۳۵۵۳ بوده و متغیر معنی‌دار به حساب نمی‌آید. از طرفی، اندرکنش متغیرها نیز پارامترهای معنی‌داری نیستند. در جدول ۴، مقدار AB، اندرکنش بین متغیر مقدار قیر و مقدار

گرانیتی نشان می‌دهد. شکل ۶ نیز مربوط به مصالح آهکی است.

جدول ۴- تحلیل واریانس برای پارامترهای مقاومتی (استقامت و روانی مارشال)

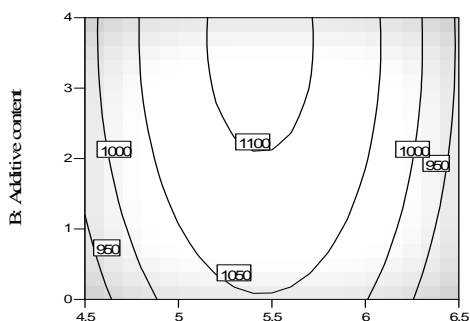
P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	فاکتور
استقامت مارشال (رابطه غیرخطی درجه دو)					
۰/۰۵۱۷	۴/۵۹	۹۱۸۵/۳۳	۱	۹۱۸۵/۳۳	A
۰/۰۴۲۸	۵/۰۴	۱۰۰۹۲/۰۰	۱	۱۰۰۹۲/۰۰	B
۰/۰۱۰۰	۹/۰۷	۱۸۱۵۵/۶۴	۱	۱۸۱۵۵/۶۴	C
<۰/۰۰۰۱	۵۵/۸۶	۱/۱۱۸e+۰۰۵	۱	۱/۱۱۸e+۰۰۵	A <sup>2</sup>
۰/۳۵۵۳	۰/۹۲	۱۸۳۹/۲۱	۱	۱۸۳۹/۲۱	B <sup>2</sup>
۰/۸۹۵۲	۰/۰۱۸	۳۶/۱۳	۱	۳۶/۱۳	AB
۰/۰۰۴۰	۱۲/۱۴	۲۴۳۰۰/۰۰	۱	۲۴۳۰۰/۰۰	AC
۰/۸۱۰۱	۰/۰۶۰	۱۲۰/۳۳	۱	۱۲۰/۳۳	BC
روانی مارشال (رابطه خطی)					
<۰/۰۰۰۱	۱۲۵/۵۴	۳/۴۱	۱	۳/۴۱	A
<۰/۰۰۰۱	۲۷/۵۹	۰/۷۵	۱	۰/۷۵	B
۰/۰۱۴۲	۷/۳۷	۰/۲۰	۱	۰/۲۰	C
A: مقدار قیر، B: مقدار افزودنی و C: نوع مصالح سنگی					

جدول ۵- تحلیل واریانس برای پارامترهای حجمی (وزن مخصوص، درصد فضای خالی آسفالت، VMA و VFA)

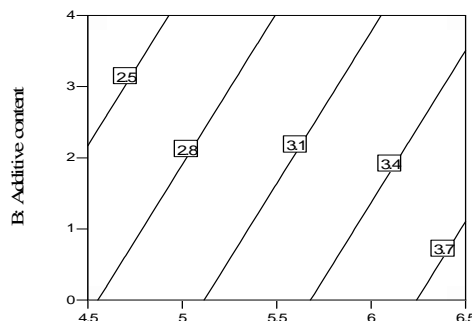
P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	فاکتور
وزن مخصوص (رابطه غیرخطی درجه دو)					
<۰/۰۰۰۱	۲۱۴/۸۰	۱۷۰۴/۰۸	۱	۱۷۰۴/۰۸	A
<۰/۰۰۰۱	۷۷/۶۹	۶۱۶/۳۳	۱	۶۱۶/۳۳	B
۰/۰۰۱۳	۱۶/۷۱	۱۳۲/۵۵	۱	۱۳۲/۵۵	C
<۰/۰۰۰۱	۴۷۵/۱۵	۳۷۶۹/۵۹	۱	۳۷۶۹/۵۹	A <sup>2</sup>
۰/۷۱۱۱	۰/۱۴	۱/۱۴	۱	۱/۱۴	B <sup>2</sup>
۰/۴۶۴۸	۰/۵۷	۴/۵۰	۱	۴/۵۰	AB
۰/۰۰۷۳	۱۰/۰۹	۸۰/۰۸	۱	۸۰/۰۸	AC
۰/۴۲۷۰	۰/۶۷	۵/۳۳	۱	۵/۳۳	BC
درصد فضای خالی آسفالت (رابطه غیرخطی درجه دو)					
<۰/۰۰۰۱	۳۶۲/۲۳	۶/۶۰	۱	۶/۶۰	A
۰/۰۰۰۴	۲۲/۱۳	۰/۴۰	۱	۰/۴۰	B
۰/۰۱۰۲	۹/۰۰	۰/۱۶	۱	۰/۱۶	C
۰/۰۱۹۸	۷/۰۵	۰/۱۳	۱	۰/۱۳	A <sup>2</sup>
۰/۰۷۵۶	۳/۷۳	۰/۰۶۸	۱	۰/۰۶۸	B <sup>2</sup>
۰/۷۹۷۵	۰/۰۶۹	۱/۲۵۰e-۰۰۳	۱	۱/۲۵۰e-۰۰۳	AB
۰/۰۷۶۴	۳/۷۰	۰/۰۶۸	۱	۰/۰۶۸	AC
۰/۰۵۲۰	۴/۵۷	۰/۰۸۳	۱	۰/۰۸۳	BC
VFA (رابطه غیرخطی درجه دو)					
<۰/۰۰۰۱	۲۴۴/۸۰	۲۰۰/۹۰	۱	۲۰۰/۹۰	A
<۰/۰۰۰۱	۳۹/۴۱	۳۲/۳۴	۱	۳۲/۳۴	B
۰/۱۰۱۰	۳/۱۲	۲/۵۶	۱	۲/۵۶	C
۰/۰۴۹۹	۴/۶۷	۳/۸۳	۱	۳/۸۳	A <sup>2</sup>
۰/۰۷۸۱	۳/۶۶	۳/۰۰	۱	۳/۰۰	B <sup>2</sup>

جدول ۵- ادامه

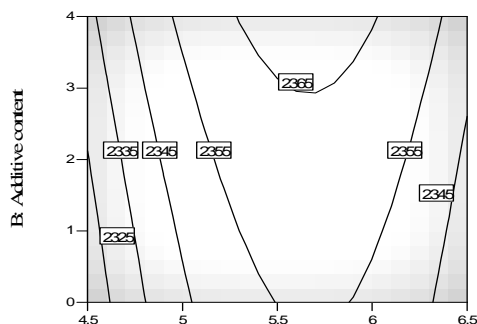
۰/۷۰۲۷	۰/۱۵	۰/۱۲	۱	۰/۱۲	AB
۰/۳۱۲۲	۱/۱۱	۰/۹۱	۱	۰/۹۱	AC
۰/۰۳۶۸	۵/۴۱	۴/۴۴	۱	۴/۴۴	BC
VMA (رابطه غیرخطی درجه دو)					
<۰/۰۰۰۱	۴۷/۳۷	۱/۷۶	۱	۱/۷۶	A
۰/۰۰۱۱	۱۷/۵۵	۰/۶۵	۱	۰/۶۵	B
۰/۰۱۳۱	۸/۲۵	۰/۳۱	۱	۰/۳۱	C
<۰/۰۰۰۱	۱۲۶/۲۶	۴/۷۰	۱	۴/۷۰	A <sup>2</sup>
۰/۸۸۰۴	۰/۰۲۴	۸/۷۷۲e-۰۰۴	۱	۸/۷۷۲e-۰۰۴	B <sup>2</sup>
۰/۵۹۱۸	۰/۳۰	۰/۰۱۱	۱	۰/۰۱۱	AB
۰/۰۳۲۵	۵/۷۳	۰/۲۱	۱	۰/۲۱	AC
۰/۵۵۹۸	۰/۳۶	۰/۰۱۳	۱	۰/۰۱۳	BC
A: مقدار قیر، B: مقدار افزودنی و C: نوع مصالح سنگی					



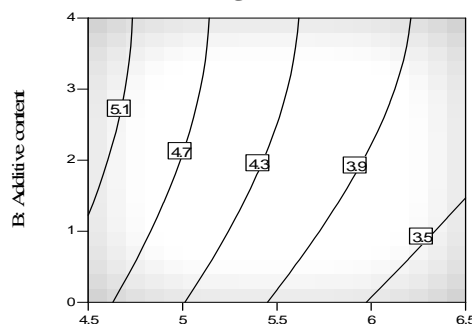
(ب) استقامت مارشال



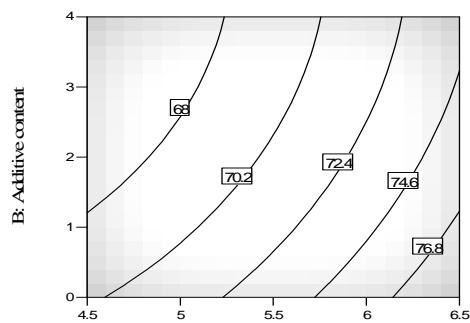
(الف) روانی مارشال



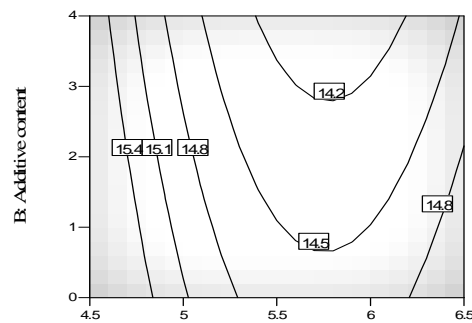
(ت) وزن مخصوص



(پ) درصد فضای خالی آسفالت

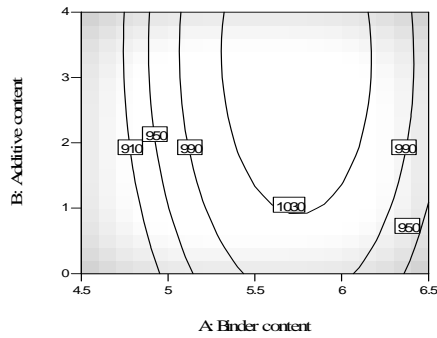


VFA (ج)

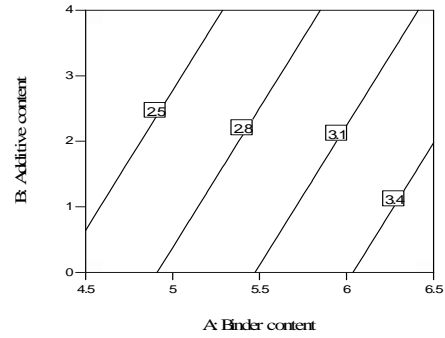


VMA (ث)

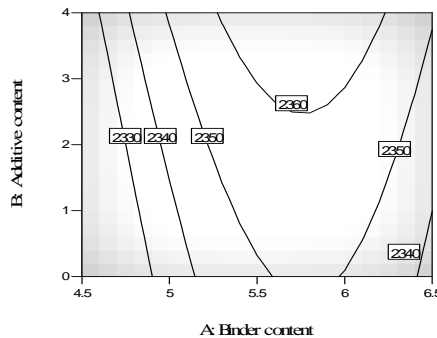
شکل ۵- پارامترهای مقاومتی و حجمی برای مخلوطهای آسفالتی حاوی سنگدانه‌های گرانیتی



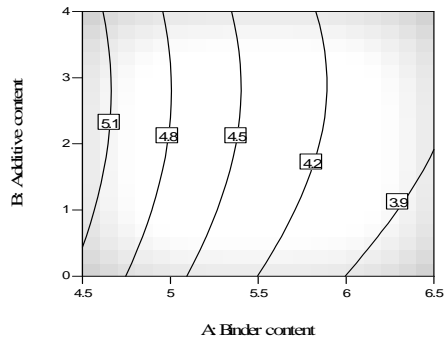
(ب) استقامت مارشال



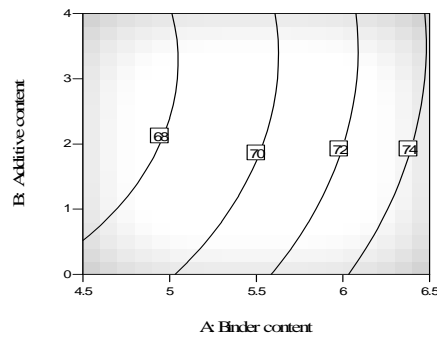
(الف) روانی مارشال



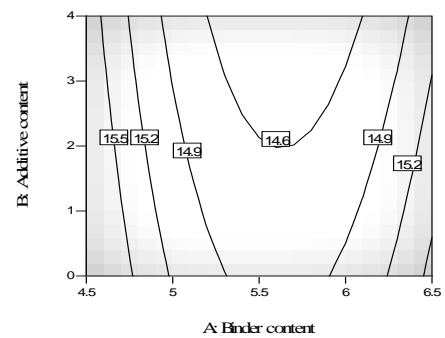
(ت) وزن مخصوص



(پ) درصد فضای خالی آسفالت



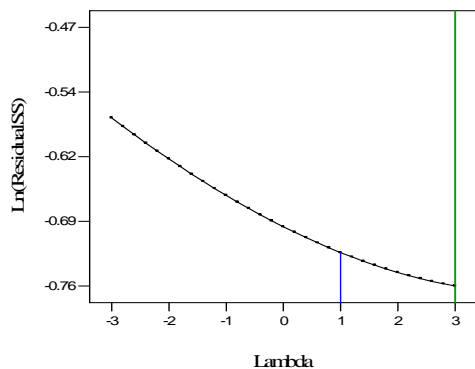
(ج) VFA



(ث) VMA

شکل ۶- پارامترهای مقاومتی و حجمی برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی سنگ‌دانه‌های آهکی

مقدار VMA را افزایش می‌دهد و بیشترین مقدار VFA برای مخلوط آسفالتی با قیر ۶/۵ درصد و بدون افزودنی مشاهده می‌شود. شکل ۷ نمودار box-cox را برای فضای خالی مصالح سنگی نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار box-cox برای فضای خالی مصالح سنگی

شکل ۵ نشان می‌دهد افزایش افزودنی از صفر تا چهار درصد مقدار استقامت مارشال را افزایش می‌دهد، اما افزایش قیر تا حد مشخصی موجب افزایش استقامت مارشال می‌شود. پس از آن حد مشخص، مقدار استقامت مارشال کاهش می‌یابد. همین رفتار برای وزن مخصوص آسفالت نیز مشاهده می‌شود. بررسی اثر قیر و افزودنی بر روانی مارشال نشان می‌دهد که با افزایش درصد افزودنی و کاهش مقدار قیر، روانی مارشال به صورت خطی کاهش می‌یابد؛ اما این تغییر (افزایش در درصد افزودنی و کاهش در درصد قیر) برای درصد فضای خالی آسفالت به صورت غیرخطی بوده و افزایشی است. افزایش مقدار افزودنی

## ۳-۳- تعیین ترکیب بهینه برای تولید مخلوط آسفالتی

حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلیمتر به روش مارشال (آشتو T245) نشان می‌دهد.

مطابق این معیارها، مخلوطی برای طراحی، مناسب می‌باشد که دارای بیشترین استقامت و وزن مخصوص باشد، فضای خالی آن بین سه الی پنج درصد و ترجیحاً نظیر چهار درصد بوده و روانی، VFA و VMA آن در حد رواداری باشد.

جدول ۶، تعدادی از معیارهای آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران را برای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی در ترافیک سنگین برای مصالح با دانه‌بندی

جدول ۶- معیارهای آیین‌نامه روسازی آسفالتی در طرح اختلاط برای ترافیک سنگین

شماره	معیار	الزامات
۱	فضای خالی نمونه مارشال بعد از تراکم ترافیکی	سه الی پنج درصد
۲	استقامت نمونه مارشال	بیشترین
۳	وزن مخصوص نمونه مارشال	بیشترین
۴	روانی نمونه مارشال	۲ الی ۳/۵
۵	فضای خالی پرشده با قیر در نمونه مارشال	۶۰ الی ۷۵
۶	فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال	۱۳ الی ۱۵

ترسیم گردید. در این شکل مطلوبیت صفر ترکیب مخلوط‌های آسفالتی با قیر و افزودنی‌های مختلف را نشان می‌دهد که به‌هیچ‌عنوان توسط آیین‌نامه مجاز به استفاده نیستند. در این حالت احتمالاً یکی از رواداری‌های لازم تأمین نشده است. مخلوط آسفالتی که دارای بیشترین مطلوبیت باشد به‌عنوان مخلوط آسفالتی بهینه معرفی می‌شود.

جدول شماره ۷ ترکیب مخلوط‌های آسفالتی بهینه را برای مصالح گرانیته و آهکی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار قیر و درصد افزودنی بهینه برای مصالح سنگی گرانیته به ترتیب ۵/۹ و ۴ درصد و برای مصالح آهکی برابر ۶/۱ و ۴ درصد است. در این جدول برای این ترکیبات، مقدار مطلوبیت به ترتیب ۰/۹۶۲ و ۰/۹۰۹ است. همچنین مشخصات حجمی و مقاومتی آنها در حد مجاز آیین‌نامه قرار دارد و درصد فضای خالی آنها چهار درصد است. در فرآیند بهینه‌سازی فوق، مقدار فضای خالی آسفالت بین ۳ الی ۵ درصد و برای حالت تراکم بعد از عبور ترافیک تعریف شده است. در گام دیگر، این محدودیت بین ۵ الی ۶ درصد و برای

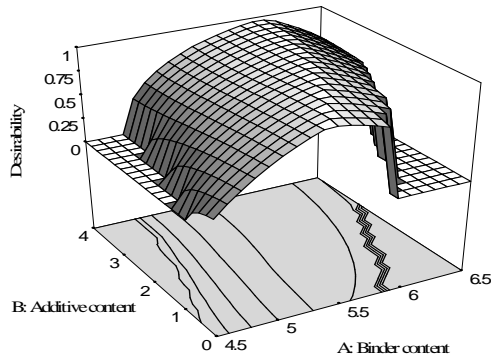
این معیارها در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به‌صورت توابع مطلوبیت<sup>۱۱</sup> برای مخلوط‌های آسفالتی که با مقدار قیر، مقدار افزودنی و مصالح سنگی متفاوت تهیه شده بودند تعریف گردیدند. به‌عنوان مثال، مقدار مطلوبیت مخلوط‌های آسفالتی که دارای روانی، VFA و VMA مجاز بودند، برابر عدد یک و مقادیر غیرمجاز، عدد صفر تعریف شدند. بیشترین استقامت و وزن مخصوص نمونه‌ها، عدد یک و کمترین آنها عدد صفر تعریف شدند.

مطلوبیت برای نمونه‌های آسفالتی که بین بیشترین و کمترین استقامت و وزن مخصوص قرار داشتند، بین یک و صفر درون‌یابی شدند. فضای خالی آسفالت دارای چهار درصد با مطلوبیت یک و فضای خالی آسفالت سه و پنج درصد با مطلوبیت صفر معرفی شدند. اعداد مابین سه و چهار درصد و نیز پنج و چهار درصد درون‌یابی شدند. آنگاه ریشه  $m$  حاصل ضرب مطلوبیت‌های فوق به‌عنوان میانگین هندسی برای تک‌تک نمونه‌ها تعریف و مدل ریاضی آنها استخراج شد. این فرآیند توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد تا در نهایت مدل مطلوبیت مشابه شکل ۸

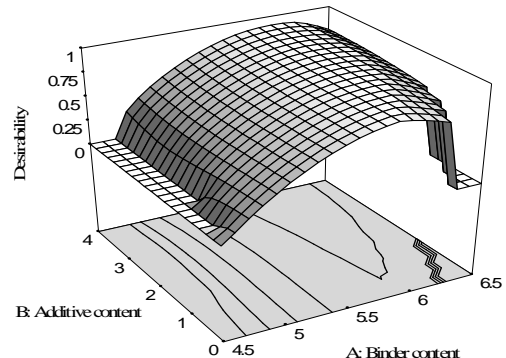
<sup>11</sup>- Desirability function

بهینه‌سازی صورت گرفت.

کنترل قیرزدگی در نظر گرفته شد و مجدداً فرآیند



(ب) مصالح گرانیتی



(الف) مصالح آهکی

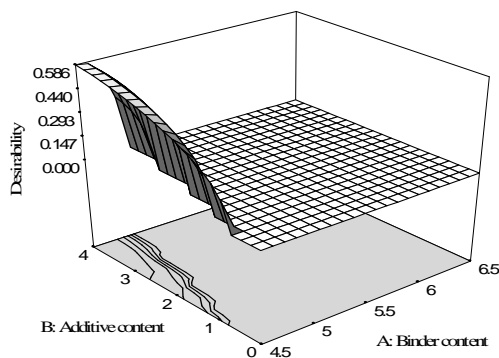
شکل ۸- مقدار مطلوبیت به ازای درصدهای مختلف قیر و افزودنی (فضای خالی آسفالت بین ۳ الی ۵ درصد)

جدول ۷- ترکیب بهینه پیشنهادی برای تولید مخلوط آسفالتی حاوی پلی اتیلن با چگالی بالا

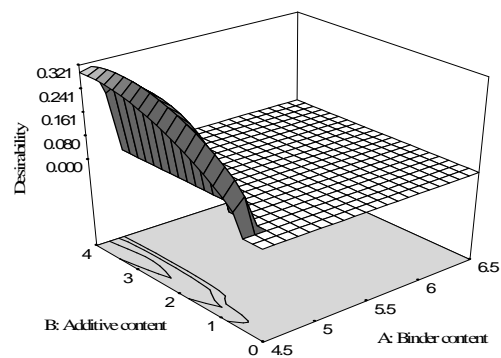
مطلوبیت	فضای خالی مصالح	وزن مخصوص	فضای خالی	فضای خالی پر شده با قیر	روانی	استحکام	درصد قیر	درصد افزودنی	نوع مصالح سنگی
۰/۹۶۲	۱۴/۱	۲۳۶۷	۴	۷۱/۷	۳/۰	۱۰۷۴	۵/۹	۴	گرانیت
۰/۹۰۹	۱۴/۵	۲۳۶۴	۴	۷۱/۷	۲/۹	۱۰۴۴	۶/۱	۴	آهک

و در مطلوبیت ۰/۵۸۸ تعریف می‌شود. شکل ۹ مقدار مطلوبیت را به ازای درصدهای مختلف قیر و افزودنی در فضای خالی آسفالت بین ۵ الی ۶ درصد نشان می‌دهد.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد مخلوط آسفالتی بهینه در این شرایط برای مصالح آهکی، قیر ۴/۶ و پلی اتیلین ۳/۴ درصد و در مطلوبیت ۰/۳۲۲ است، در حالی که این مقدار برای مصالح گرانیتی با قیر ۴/۵ و پلی اتیلن ۴ درصد



(ب) مصالح گرانیتی



(الف) مصالح آهکی

شکل ۹- مقدار مطلوبیت به ازای درصدهای مختلف قیر و افزودنی (فضای خالی آسفالت بین ۵ الی ۶ درصد)

(الف) استفاده از پلی اتیلن با چگالی بالا در قیر به کار

رفته در مخلوط‌های آسفالتی باعث ایجاد تغییر در پارامترهای طرح اختلاط می‌شود. این امر، موجب تغییر در مقدار درصد قیر بهینه می‌شود. استفاده از این افزودنی مقدار قیر بهینه لازم را

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش متداول و سطح پاسخ برای تعیین ترکیب بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلی اتیلن با چگالی بالا استفاده شد. نتایج زیر از این تحقیق حاصل شد:

(ت) نوع مصالح سنگی بر مقدار قیر بهینه اثر می‌گذارد. پلی اتیلن با چگالی بالا، کلیه پارامترهای حجمی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی را تغییر می‌دهد. مصالح سنگ آهکی به درصد قیر بهینه بیشتری نسبت به مصالح گرانیته در حضور این افزودنی نیاز دارد.

(ث) تحلیل واریانس نشان می‌دهد که مقدار این افزودنی در کنار مقدار قیر، متغیرهای معنی‌دار در پیش‌بینی رفتار حجمی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی است. افزایش افزودنی از صفر تا چهار درصد به صورت تدریجی استقامت مارشال را افزایش و روانی مارشال را کاهش می‌دهد. این افزودنی درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی را نیز افزایش می‌دهد.

برای هر دو مصالح سنگی گرانیته و آهکی افزایش می‌دهد.

(ب) استفاده از روش متداول در تعیین قیر بهینه نشان می‌دهد ۴ درصد افزودنی پلی اتیلن با چگالی بالا مقدار قیر بهینه را برای مصالح سنگی گرانیته بدون افزودنی از ۵/۱ درصد به ۶/۱ درصد افزایش می‌دهد.

(پ) روش سطح پاسخ، تعداد نمونه‌های ساخته شده برای طرح اختلاط را کاهش می‌دهد. کاهش تعداد نمونه‌ها، موجب صرفه‌جویی در وقت و مصالح مصرفی می‌شود. بهینه‌سازی در روش سطح پاسخ، مقدار قیر بهینه را در درصد فضای خالی ۴ درصد ارائه داده است.

## مراجع

- [1] Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). "A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility", *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.
- [2] Hamed, G. H., Shamami, K. G., & Pakenari, M. M. (2020). "Effect of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene on the Performance Characteristics of Hot Mix Asphalt", *Construction and Building Materials*, 258, 119729.
- [3] Amirabad, F. H., Divandari, H., & Hamed, G. H. (2018). "Evaluation of the effect of UHMWPE on the Rutting Potential of Asphalt Mixtures", *First National Conference of Highway and Transportation*, Rasht, Iran.
- [4] Yalghouzaghaj, M. N., Sarkar, A., Hamed, G. H., & Hayati, P. (2021). "Evaluation of the Effect of UHMWPE on the Low-Temperature Cracking of Hot-Mix Asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(3), 04020488.
- [5] Hamed, G. H., Pirbasti, M. H., & Pirbasti, Z. R. (2020). "Investigating the Effect of Using Waste Ultra-high-molecular-weight Polyethylene on the Fatigue Life of Asphalt Mixture", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), 1170-1180.
- [6] Hamed, G. H., & Borhani, A. R. (2020). "Evaluation of the High Density Polyethylene on Performance of Glass Asphalt", *Third International Conference on Civil, Architecture and Urban Development Management in Iran*, Tehran, Iran.
- [7] Hamed, G. H., & Ranjbar Pirbasti, Z. (2020). "The Effects of UHMWPE/nanoclay on Rheological Properties of Modified Asphalt Binder. *Petroleum Science and Technology*, 38(4), 309-315.
- [8] Hamzah, M. O., Golchin, B., & Tye, C. T. (2013). "Determination of the Optimum Binder Content of Warm Mix Asphalt Incorporating Rediset using Response Surface Method", *Construction and Building Materials*, 47, 1328-1336.
- [9] Abdullah, N. H., Hamzah, M. O., Golchin, B., & Hasan, M. R. M. (2018). "An Alternative Protocol to Artificially Simulate Short-term Ageing of Binders for Selected Regional Condition", *Construction and Building Materials*, 161, 654-664.
- [10] Golchin, B., & Rabbi, M. (2020). "Evaluation of the Technical Properties of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Sasobit", *Journal of Transportation Research*, 17(2), 187-198.
- [11] Lapian, F. E. P., Ramli, M. I., Pasra, M., & Arsyad, A. (2020). "Opportunity Applying Response Surface Methodology (RSM) for Optimization of Performing Butonic Asphalt Mixture Using Plastic Waste Modifier: a Preliminary Study", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 419(1), 012-032.

- [12] Bala, N., Napiyah M., & Kamaruddin, I. (2020). "Nanosilica Composite Asphalt Mixtures Performance-Based Design and Optimisation Using Response Surface Methodology", *International Journal of Pavement Engineering*, 21(1), 29-40.
- [13] Hamzah, M. O., Gungat, L., & Golchin, B. (2017). "Estimation of Optimum Binder Content of Recycled Asphalt Incorporating a Wax Warm Additive Using Response Surface Method", *International Journal of Pavement Engineering*, 18(8), 682-92
- [14] Taherkhani, H., Noorian, F. (2021). "Investigating Permanent Deformation of Recycled Asphalt Concrete Containing Waste Oils as Rejuvenator Using Response Surface Methodology (RSM)", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(3), 1989-2001.
- [15] Jensen, W. A. (2017). "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", *Journal of Quality Technology*, 49(2), 186-188.
- [16] Moatasim, A., Cheng, P. F., & Al-Hadidy, A. I. (2011). "Laboratory Evaluation of HMA with High Density Polyethylene as A Modifier", *Journal of Construction and Building Materials*, 25, 2764-2770
- [17] Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., & Hamedy, G. H. (2014). "Effect of High Density Polyethylene on the Fatigue and Rutting Performance of Hot Mix Asphalt-A Laboratory Study", *Road Materials and Pavement Design*, 15(3), 746-756.
- [18] Hamid, B., Hossein, H. G., Vahid, N. M. G., & Mohammad, N. (2019). "Improving the Moisture Performance of Hot Mix Glass Asphalt by High-Density Polyethylene as an Asphalt Binder Modifier", *International journal of sustainable Building Technology and Urban Development*, 184-193.
- [19] Himsloglu, S., & Agar, E. (2004). "Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix", *Journal of Materials Letters*, 58, 267-271.