

تعیین درصد قیر بهینه در روش طرح اختلاط مارشال  
با استفاده از يك مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

[fakhri@kntu.ac.ir](mailto:fakhri@kntu.ac.ir)

[aghanizadeh@mail.uk.ac.ir](mailto:aghanizadeh@mail.uk.ac.ir)



: طرح اختلاط، روش مارشال، بهینه‌سازی، کمترین مربعات، برنامه‌ریزی غیرخطی

## -1

هدف کلی از طرح مخلوط‌های آسفالت گرم و بتن آسفالتی، انتخاب مناسبترین و با صرفه‌ترین مخلوط مصالح سنگی و قیر است؛ بطوری که ویژگی‌های زیر را برای پوشش‌های آسفالتی تأمین نماید [1]:

الف. قیر کافی داشته باشد تا ثبات و دوام آن را تأمین نماید.

ب. مقاومت آن به اندازه‌ای باشد که بار ناشی از ترافیک را بدون تغییر شکل تحمل نماید.

پ. فضای خالی کافی در آن تأمین شده باشد، تا با افزایش درجه حرارت محیط و تراکم اضافی ناشی از عبور و مرور ترافیک، قیرزدگی و افت مقاومت پیدا نکند و در عین حال این فضای خالی در حدی باشد که موجب نفوذ آب و هوا به جسم آسفالت نگردد.

ت. کارآیی کافی برای پخش و کوبیدن با بافت یکنواخت و همگن را داشته باشد.

ث. بافت سطحی آسفالت رویه و سختی سنگدانه‌های آن بتواند ضریب اصطکاک کافی را در شرایط جوی نامناسب تأمین نماید.

تا کنون روش‌های مختلفی برای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است که مهمترین آنها به شرح زیر هستند [1]:

الف. روش مارشال (ASTM D1559) که هم جهت تهیه طرح اختلاط و هم کنترل عملیات آسفالتی برای سنگدانه‌های با حداکثر اندازه 25 میلیمتر و دانه‌بندی متراکم و پیوسته کاربرد دارد.

ب. روش اصلاح شده مارشال (ASTM D5581) که برای سنگدانه‌های با حداکثر اندازه 50 میلیمتر و با قالب‌های 15 سانتیمتر کاربرد دارد.

پ. روش ویم (ASTM D1560) که مانند روش مارشال برای سنگدانه‌های با حداکثر اندازه 25 میلیمتر، به منظور تهیه طرح و کنترل عملیات کاربرد دارد.

ت. روش طرح اختلاط روسازی ممتاز (Superpave) که یک روش طرح اختلاط عملکرد مبنایی است. این روش بر اساس تحقیقات شارپ توسعه داده شده است و توسط آشتو بصورت استاندارد موقت پذیرفته شده است.

در حال حاضر روش طرح اختلاط مارشال و اصلاح شده مارشال در ایران دارای بیشترین کاربرد می‌باشند و در نشریه مشخصات فنی عمومی راه نیز استفاده از این دو روش برای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است [1]. در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین درصد قیر بهینه در روش مارشال یا روش اصلاح شده مارشال توسعه داده شده است. برای این منظور نخست معادلات مربوط به تغییرات پارامترهای مؤثر در طرح اختلاط (چگالی بتن آسفالتی، استقامت مارشال، روانی، درصد فضای خالی بتن آسفالتی و درصد فضای خالی پر نشده با قیر) نسبت به درصد قیر با استفاده از روش کمترین مربعات و از طریق تقریب با یک چندجمله‌ای درجه دوم به دست می‌آیند و سپس با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفی، درصد قیر بهینه بگونه‌ای تعیین می‌شود که اولاً بتن آسفالتی بدست آمده کلیه شرایط ذکر شده در آیین‌نامه را دارا باشد و ثانیاً دارای بیشترین وزن مخصوص و بیشترین استقامت مارشال باشد.

## -2

روش طرح اختلاط مارشال نخستین بار توسط بروس مارشال (Bruce Marshall) از اداره راه و ترابری می‌سی‌سی‌پی در سال 1939 پیشنهاد شد و سپس بوسیله گروه مهندسين ارتش مورد تجدید نظر قرار گرفت. در حال حاضر روش طرح اختلاط مارشال توسط حدود 40 ایالت مختلف آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. همچنین در حال حاضر طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی گرم در ایران نیز بر اساس روش مارشال استوار است [1]. مراحل طرح اختلاط بتن آسفالتی گرم به روش مارشال را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود [3]:

الف. انتخاب مصالح سنگی درشت، ریز و فیلر.

- ب. انتخاب حدود دانه‌بندی مطلوب.
- ت. تعیین نسبت درصدهایی که مصالح درشت، ریز و فیلر باید با یکدیگر مخلوط شوند.
- ث. تعیین چگالی مصالح سنگی درشت، ریز و فیلر و چگالی قیر.
- ج. تهیه نمونه‌های بتن آسفالتی با استفاده از مصالح سنگی و درصد‌های مختلف قیر.
- ح. تعیین چگالی نمونه‌های بتن آسفالتی تهیه شده.
- خ. انجام آزمایش استقامت مارشال.
- د. محاسبه درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی نمونه‌های بتن آسفالتی
- ذ. رسم نمودارهای تغییرات وزن مخصوص بتن آسفالتی، استقامت مارشال، درصد فضای خالی بتن آسفالتی، درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر، فضای خالی مصالح سنگی و روانی بتن آسفالتی به ازاء درصد‌های مختلف قیر.
- ر. تعیین درصد قیر بهینه.
- ز. کنترل درصد قیر بهینه.
- درصد قیر مناسب بتن آسفالتی با استفاده از منحنی‌های آزمایش مارشال تعیین می‌شود. از آنجا که درصد قیری که سبب بیشترین مقدار استقامت مارشال می‌شود، ممکن است همان درصد قیری نباشد که بیشترین وزن مخصوص را سبب می‌شود و یا به ازاء آن مقدار فضای خالی بتن آسفالتی مناسبترین نباشد، لذا بر اساس روش معمول مقدار قیری که برای ساختن بتن آسفالتی بکار می‌رود میانگین مقادیری است که بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسبترین مقدار فضای خالی را در بتن آسفالتی سبب می‌شود. همچنین میزان قیر باید طوری باشد که مشخصات فنی بتن آسفالتی بدست آمده در حدود مشخصات فنی آیین نامه مورد استفاده باشد. حدود این مشخصات بر اساس مشخصات فنی عمومی راه (نشریه 101) برای مخلوط‌های بتن آسفالتی گرم و ماسه آسفالت در جداول (1) الی (4) داده شده است.

جدول 1- مشخصات فیزیکی و مقاومتی مخلوط‌های بتن آسفالتی گرم با روش مارشال D1559 [1].

$10^4 \geq EAL$		$10^6 \geq EAL \geq 10^4$		$EAL \geq 10^6$		
35	35	50	50	75	75	تعداد ضربه‌ها در دو طرف نمونه
-	350	-	550	-	800	مقاومت مخلوط بر حسب کیلوگرم
4/5	2	4	2	3/5	2	روانی بر حسب میلیمتر
5	3	5	3	5	3	درصد فضای خالی آسفالت قشر رویه
6	3	6	3	6	3	درصد فضای خالی آسفالت آستر
8	3	8	3	8	3	درصد فضای خالی آسفالت اساس آسفالتی
80	70	78	65	75	65	درصد فضای خالی پر شده با قیر
به جدول (4) مراجعه شود						حداقل فضای خالی سنگدانه‌ها

جدول 2- مشخصات فیزیکی و مقاومتی مخلوطهای بتن آسفالتی گرم با روش مارشال D5581 [1].

$10^4 \geq EAL$		$10^6 \geq EAL \geq 10^4$		$EAL \geq 10^6$		
53	53	75	75	112	112	تعداد ضربه‌ها در دو طرف نمونه
-	790	-	1240	-	1800	مقاومت مخلوط بر حسب کیلوگرم
6/8	3	6	3	5/3	3	روانی بر حسب میلیمتر
5	3	5	3	5	3	درصد فضای خالی آسفالت قشر رویه
6	3	6	3	6	3	درصد فضای خالی آسفالت آستر
8	3	8	3	8	3	درصد فضای خالی آسفالت اساس آسفالتی
80	70	78	65	75	65	درصد فضای خالی پر شده با قیر
به جدول (4) مراجعه شود						حداقل فضای خالی سنگدانه‌ها

جدول 3- مشخصات فنی ماسه آسفالت [1].

مقاومت با 50 ضربه	حداقل 80 کیلوگرم
روانی بر حسب میلیمتر	حداکثر 5
فضای خالی	حداقل 3 و حداکثر 18 درصد
فضای خالی مصالح سنگی	به جدول (4) مراجعه شود

جدول 4- فضای خالی مصالح سنگی [1].

	5	4	2	
الک 63 میلیمتر	11	10	9	
الک 50 میلیمتر	11/5	10/5	9/5	
الک 27/5 میلیمتر	12	11	10	
الک 25 میلیمتر	13	12	11	
الک 19 میلیمتر	14	13	12	
الک 12/5 میلیمتر	15	14	13	
الک 9/5 میلیمتر	16	15	14	
الک 4/75 میلیمتر	18	17	16	
الک 2/36 میلیمتر	21	20	19	
الک 1/18 میلیمتر	23/5	22/5	21/5	

رابطه کلی جدول (4) برای بدست آوردن حداقل مقدار درصد فضای خالی مصالح سنگی با توجه به مقادیر مختلف فضای خالی بتن آسفالتی را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\min VMA = VMA_{AV=2} + 0.5(AV - 2) \quad (1)$$

که در این رابطه:

$\min VMA$ : حداقل درصد فضای خالی مصالح سنگی

$AV$ : درصد فضای خالی بتن آسفالتی

$VMA_{AV=2}$ : حداقل درصد فضای خالی مصالح سنگی به ازاء 2 درصد فضای خالی بتن آسفالتی. این مقدار از جدول (4) بدست می آید. برای مثال زمانی که حداکثر اندازه اسمی مصالح برابر با 25 میلیمتر باشد، مقدار  $VMA_{AV=2}$  برابر با 11 خواهد بود.

### -3

استفاده از میانگین مقادیر درصد قیری که بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسبترین مقدار فضای خالی را در بتن آسفالتی سبب می شود، لزوماً بهینه ترین درصد قیر را به دست نمی دهد. در ادامه با استفاده از یک روند سیستماتیک و با استفاده از یک مدل برنامه ریزی غیر خطی چند هدفی، نحوه تعیین بهینه ترین درصد قیر شرح داده می شود.

مراحل تعیین درصد قیر بهینه در شکل (1) نشان داده شده است. در ادامه هر یک از این مراحل به تفصیل بیان می شوند:

1- وارد کردن نتایج آزمایش. این نتایج شامل هفت بردار یک بعدی می باشند که عبارتند از بردار  $\{BC\}$  که حاوی درصد های قیری است که نمونه های مخلوط آسفالتی با آنها ساخته شده اند، بردار  $\{AV\}$  که نشان دهنده فضای خالی بتن آسفالتی در درصد های مختلف قیر است، بردار  $\{F\}$  که نشان دهنده روانی بتن آسفالتی در درصد های مختلف قیر است، بردار  $\{S\}$  که نشان دهنده استقامت مارشال بتن آسفالتی در درصد های مختلف قیر است، بردار  $\{D\}$  که نشان دهنده چگالی بتن آسفالتی در درصد های مختلف قیر است، بردار  $\{VMA\}$  که نشان دهنده درصد فضای خالی مصالح سنگی در درصد های مختلف قیر است و بردار  $\{VFA\}$  که نشان دهنده درصد فضای خالی بتن آسفالتی پر شده با قیر در درصد های مختلف قیر است. ابعاد کلیه این بردارها یکسان است و عناصر بردار  $\{BC\}$  به صورت یک به یک با عناصر سایر بردارها رابطه دارند.

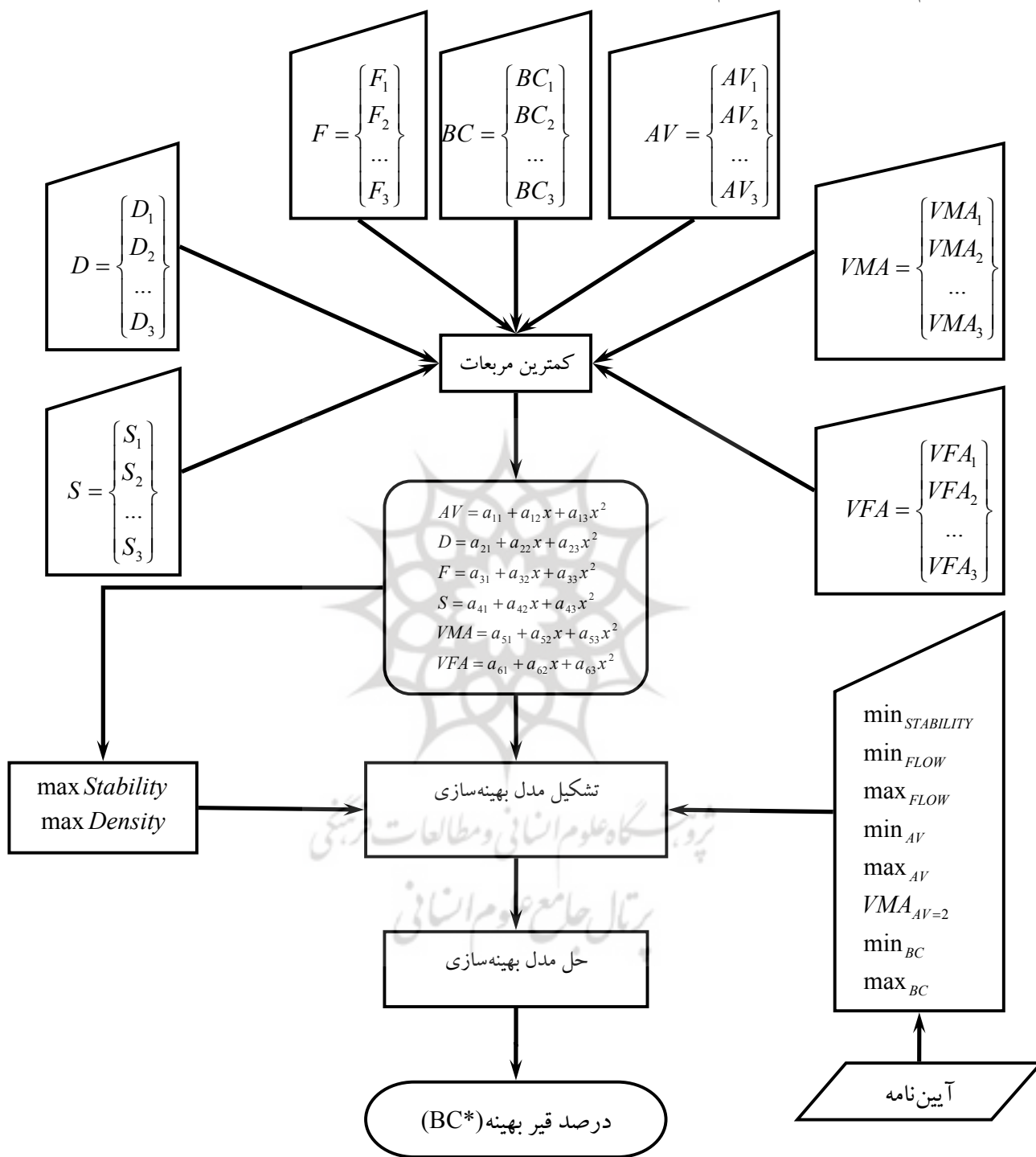
2- تعیین رابطه بین درصد قیر و پارامترهای مختلف طرح اختلاط با استفاده از روش کمترین مربعات. در این مرحله رابطه بین درصد قیر و پارامترهای مختلف طرح اختلاط بصورت یک چند جمله ای درجه 2 و با استفاده از روش کمترین مربعات تعیین می شود. در صورتی که مقدار پارامتر  $y$  در درصد قیر  $x_i$  برابر با  $y_i$  باشد، می توانیم به ازاء تعداد  $n$  درصد قیر مورد استفاده در آزمایش،  $n$  معادله بنویسیم. شکل ماتریسی این معادلات را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این رابطه:

$a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$ : ضرایب چند جمله ای درجه 2 به شکل  $y = a_1 + a_2x + a_3x^2$ .

$x_i$ : درصد قیر آم. این مقدار برابر با عنصر آم بردار  $\{BC\}$  است.



شکل 1- فرآیند تعیین درصد قیر بهینه بر اساس مدل بهینه سازی.

$y_i$ : کمیت پارامتر  $\gamma$  در درصد قیر  $x_i$ . این مقدار برابر با عنصر  $i$ ام یکی از بردارهای  $\{AV\}, \{F\}, \{S\}, \{D\}, \{VMA\}$  یا  $\{VFA\}$  می باشد. رابطه (2) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\{Y\} = \{X\} \times \{A\} \quad (3)$$

به منظور تعیین ضرایب مجهول چند جمله ای بر اساس روش کمترین مربعات می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$A = (X' \times X)^{-1} \times (X' \times Y) \quad (4)$$

در این رابطه  $X'$  عبارت از ترانزاده ماتریس  $X$  و  $(X' \times X)^{-1}$  عبارت از معکوس حاصل ضرب دو ماتریس  $X$  و  $X'$  است. بنابراین با تشکیل ماتریس  $Y$  برای هر یک از پارامترهای طرح اختلاط و استفاده از رابطه (4) می توان ضرایب مربوط به چند جمله ای درجه دوم را برای آن پارامتر تعیین نمود.

3- تعیین حداکثر وزن مخصوص و حداکثر استقامت مارشال برای مخلوط آسفالتی. برای این منظور از روابط برازش داده شده در مرحله قبل استفاده می شود. بدین صورت که مشتق معادله مربوط به وزن مخصوص و استقامت مارشال برابر با صفر قرار داده می شوند تا حداکثر مقدار این دو تابع به دست آید. این مقادیر با  $\max STABILITY$  و  $\max DENSITY$  مشخص می شوند.

4- تشکیل مدل برنامه ریزی غیرخطی مسئله. مدل بهینه سازی مسئله تعیین درصد قیر بهینه را می توان بصورت یک مدل برنامه ریزی غیر خطی چند هدفی نوشت. با توجه به طبیعت مسئله روش معیار سراسری (Global criterion method) برای نوشتن تابع هدف کل مورد استفاده قرار گرفت [4]. زیرا در این جا مطلوبترین مقدار هر یک از توابع هدف جزء ( $\max STABILITY$  و  $\max DENSITY$ ) مشخص است. بنابراین شکل تابع هدف کل بصورت زیر نوشته می شود.

$$\min f(x) = \left[ \frac{\max STABILITY - a_{41} - a_{42}x - a_{43}x^2}{\max STABILITY} \right]^2 + \left[ \frac{\max DENSITY - a_{21} - a_{22}x - a_{23}x^2}{\max DENSITY} \right]^2 \quad (5)$$

همچنین محدودیتهای موجود را می توان بصورت زیر نوشت:

محدودیت حداقل فضای خالی:

$$a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 \geq \min_{AV} \quad (6)$$

محدودیت حداکثر فضای خالی:

$$a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 \leq \max_{AV} \quad (7)$$

محدودیت حداقل روانی:

$$a_{31} + a_{32}x + a_{33}x^2 \geq \min_{FLOW} \quad (8)$$

محدودیت حداکثر روانی:

$$a_{31} + a_{32}x + a_{33}x^2 \leq \max_{FLOW} \quad (9)$$

محدودیت حداقل استقامت مارشال:

$$a_{41} + a_{42}x + a_{43}x^2 \geq \min_{STABILITY} \quad (10)$$

محدودیت حداقل درصد فضای خالی مصالح سنگی:

$$a_{51} + a_{52}x + a_{53}x^2 \geq [VMA_{AV=2} + 0.5(a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 - 2)] \quad (11)$$

محدودیت حداقل درصد فضای خالی پر شده با قیر:

$$a_{61} + a_{62}x + a_{63}x^2 \geq \min_{VFA} \quad (12)$$

محدودیت حداقل درصد فضای خالی پر شده با قیر:

$$a_{61} + a_{62}x + a_{63}x^2 \leq \max_{VFA} \quad (13)$$

محدودیت حدود تغییرات درصد قیر:

$$\max_{BC} \geq x \geq \min_{BC} \quad (14)$$

معادله (14) محدودیت بزرگتر از صفر بودن متغیر تصمیم یا همان درصد قیر را نیز در بردارد.

در معادلات 5 الی 14 داریم:

$a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}$ : ضرایب چند جمله‌ای  $\lambda$  که از طریق روش کمترین مربعات بدست آمده‌اند. مقدار  $\lambda$  برای فضای خالی مخلوط آسفالتی برابر با 1، برای وزن مخصوص مخلوط آسفالتی برابر با 2، برای روانی مخلوط آسفالتی برابر با 3، برای استقامت مارشال مخلوط آسفالتی برابر با 4، برای فضای خالی مصالح سنگی برابر با 5 و برای فضای خالی پر شده با قیر برابر با 6 است.

$\min_{BC}$  و  $\max_{BC}$ : حداقل و حداکثر درصد قیر مورد استفاده در آزمایش.

$\min_{AV}$  و  $\max_{AV}$ : حداقل و حداکثر فضای خالی قابل قبول. این مقادیر بسته به مورد از جدول (1) یا (2) یا (3) بدست می‌آید.

$\min_{FLOW}$  و  $\max_{FLOW}$ : حداقل و حداکثر روانی قابل قبول. این مقادیر بسته به مورد از جدول (1) یا (2) یا (3) بدست می‌آید.

$\min_{STABILITY}$ : حداقل استقامت مارشال قابل قبول. این مقدار بسته به مورد از جدول (1) یا (2) یا (3) بدست می‌آید.

$\min_{VFA}$  و  $\max_{VFA}$ : حداقل و حداکثر قابل قبول فضای خالی پر شده با قیر. این مقادیر بسته به مورد از جدول (1) یا (2) بدست می‌آید.

سایر پارامترها قبلاً تشریح گردیدند. بدین ترتیب می‌توان مدل بهینه‌سازی مسئله را بصورت زیر نوشت.

$$\min f(x) = \left[ \frac{\max_{STABILITY} - a_{41} - a_{42}x - a_{43}x^2}{\max_{STABILITY}} \right]^2 + \left[ \frac{\max_{DENSITY} - a_{21} - a_{22}x - a_{23}x^2}{\max_{DENSITY}} \right]^2$$

subject to:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 \geq \min_{AV} \\ a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 \leq \max_{AV} \\ a_{31} + a_{32}x + a_{33}x^2 \geq \min_{FLOW} \\ a_{31} + a_{32}x + a_{33}x^2 \leq \max_{FLOW} \\ a_{41} + a_{42}x + a_{43}x^2 \geq \min_{STABILITY} \\ a_{51} + a_{52}x + a_{53}x^2 \geq VMA_{AV=2} + 0.5(a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 - 2) \\ a_{61} + a_{62}x + a_{63}x^2 \geq \min_{VFA} \\ a_{61} + a_{62}x + a_{63}x^2 \leq \max_{VFA} \\ x \geq \min_{BC} \\ x \leq \max_{BC} \end{array} \right.$$

این مدل تنها یک متغیر تصمیم دارد که عبارتست از  $x$  یا همان درصد قیر.



#### -4

از آنجا که مقدار درصد قیر بهینه بطور قطع در محدوده حداقل و حداکثر درصد قیر مورد استفاده در آزمایش (حدود 4الی 7 درصد) قرار دارد، می توان نخست مجموعه جوابهای موجه (درصدهای قیری که در کلیه محدودیتهای مدل صدق می کنند) را تعیین کرد و سپس با ارزیابی تابع هدف در هر یک از این جوابهای موجه، بهینه ترین مقدار تابع هدف و همچنین درصد قیر بهینه را تعیین کرد. با توجه به اینکه معمولاً دقت تعیین درصد قیر بهینه در حد یک رقم اعشار می باشد، می توان کد زیر را برای تعیین جواب بهینه مورد استفاده قرار داد.

```

j = 0
For i = minAC to maxAC step 0.1
If (i satisfy all of constraints) then
j = j + 1
Add i to Allowed_AC Vector
Calculate the jth element of Allowed_Objective_Function vector
End if
Next

```

در این کد، minAC و maxAC به ترتیب کمترین و بیشترین درصد قیر بکار رفته در آزمایش مارشال هستند. خروجی این کد، دو بردار یک بعدی Allowed\_AC و Allowed\_Objective\_Function می باشند. بردار Allowed\_AC شامل درصدهای قیری است که به ازاء آنها کلیه محدودیت های مدل مسئله بر آورده می شوند و بردار Allowed\_Objective\_Function شامل مقادیر تابع هدف مسئله به ازاء عناصر مختلف بردار Allowed\_AC می باشد که با جایگذاری عناصر بردار درصد قیرهای مجاز (Allowed\_AC) در تابع هدف مسئله بدست می آید. با تعیین حداقل عنصر بردار Allowed\_Objective\_Function و سپس یافتن درصد قیر نظیر آن در بردار Allowed\_AC می توان درصد قیر بهینه را مشخص نمود. استفاده از این کد با نمو (Step) برابر با 0/1، درصد قیر بهینه را با دقت یک رقم اعشار بدست می دهد. همچنین در صورت نیاز می توان با کاهش نمو، دقت را افزایش داد.

#### -5

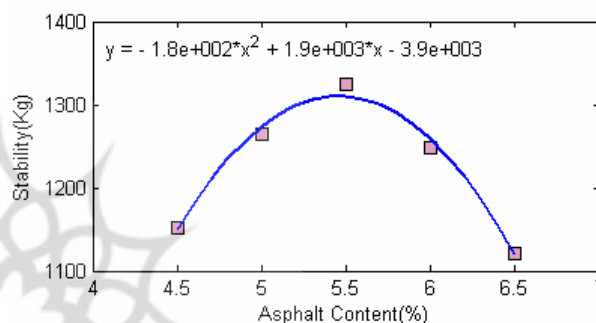
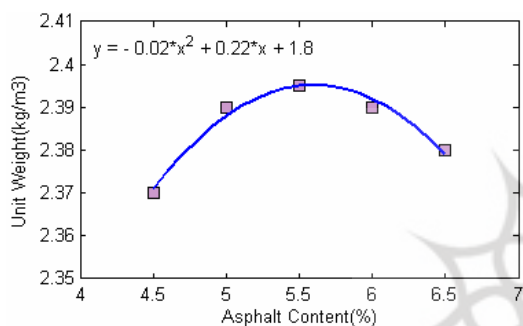
به منظور ارزیابی مدل ارائه شده برنامه ای در محیط MATLAB نوشته شد و سپس بر اساس نتایج حاصل از یک آزمایش طرح اختلاط به روش مارشال و با بهره گیری از مدل ذکر شده درصد قیر بهینه تعیین گردید [5]. آسفالت فوق باید در لایه رویه مورد استفاده قرار می گرفت و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه های آن برابر با 19 میلیمتر در نظر گرفته شد. سایر مشخصات طرح اختلاط بتن آسفالتی در جدول (5) داده شده است.

جدول 5- مشخصات طرح اختلاط بتن آسفالتی.

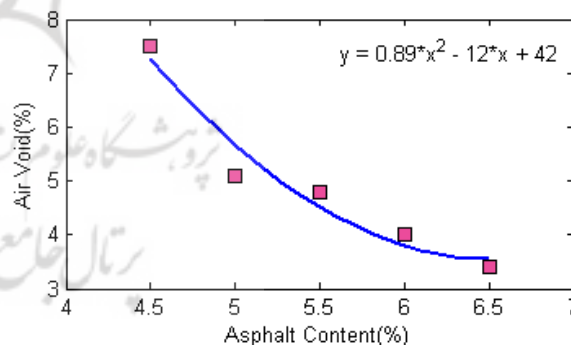
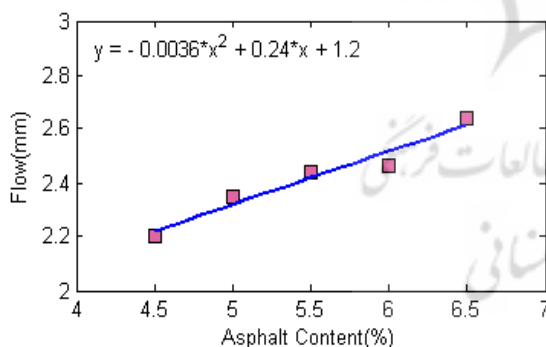
2	حداقل روانی (mm)	800	حداقل مقاومت مارشال (Kg)
3/5	حداکثر روانی (mm)	3	حداقل فضای خالی بتن آسفالتی (%)
65	حداقل فضای خالی پر شده با قیر (%)	5	حداکثر فضای خالی بتن آسفالتی (%)
75	حداکثر فضای خالی پر شده با قیر (%)	9	$VMA_{AV=2}$

نمودار تغییرات هر یک از پارامترهای طرح اختلاط نسبت به درصدهای مختلف قیر به همراه معادله منحنی چند جمله‌ای درجه دوم تعیین شده با استفاده از روش کمترین مربعات برای هر یک از این پارامترها در شکل‌های (2) الی (7) نشان داده شده است.

شکل (8) مقدار تابع هدف را در درصدهای مختلف قیر نشان می‌دهد. شکل (9) مقدار تابع هدف را در درصدهای قیر موجه (درصدهای قیری که کلیه محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی غیر خطی را پاسخگو هستند) نشان می‌دهد. برای ترسیم این نمودار ابتدا درصدهای قیر موجه مشخص شدند (عناصر بردار Allowed\_AC) و سپس با جایگذاری عناصر این بردار در تابع هدف مسئله، مقدار تابع هدف مسئله به ازاء این درصدهای قیر بدست آمد و در بردار Allowed\_Objective\_Function ذخیره گردید. همانگونه که شکل (9) نشان می‌دهد، تغییرات تابع هدف مسئله نسبت به درصد قیر موجه، یک تابع اکیداً صعودی است و از همین رو بهینه‌ترین درصد قیر برابر با 6 درصد است، زیرا تابع هدف مسئله به ازاء 6 درصد قیر، حداقل مقدار را دارد. همچنین آسفالت ساخته شده با 6 درصد قیر، ضمن آنکه کلیه مشخصات فنی لازم برای مخلوط آسفالتی را در حدود آیین نامه حفظ می‌کند، دارای بهینه‌ترین مشخصات فنی از نظر ترکیب وزن مخصوص و استقامت مارشال است.

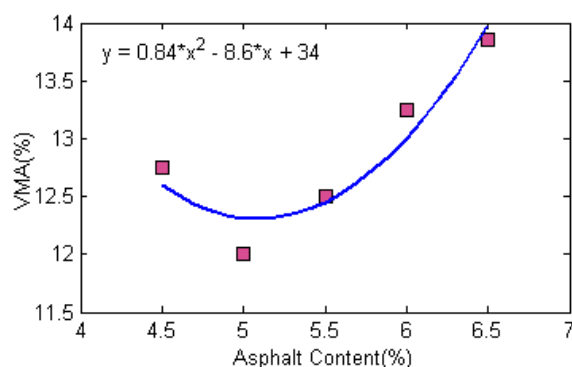
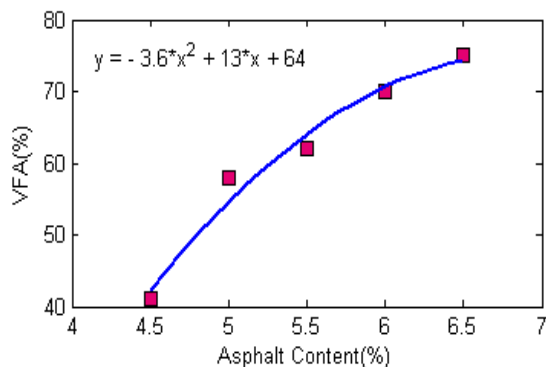


شکل 2- نمودار تغییرات استقامت مارشال نسبت به درصد قیر. شکل 3- نمودار تغییرات وزن مخصوص نسبت به درصد قیر.

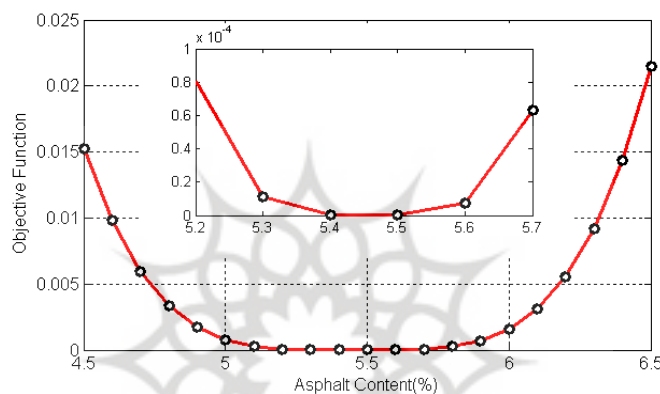


شکل 5- نمودار روانی نسبت به درصد قیر.

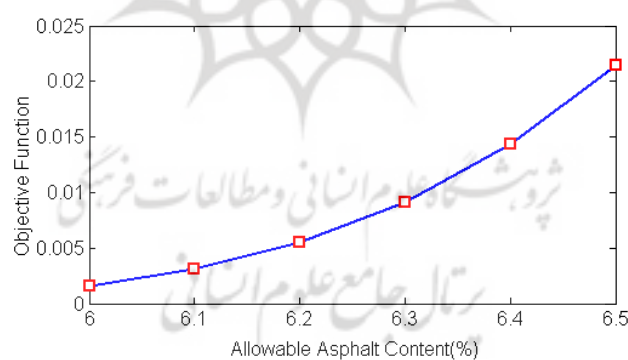
شکل 4- نمودار تغییرات فضای خالی بتن آسفالتی نسبت به درصد قیر.



شکل 6- نمودار تغییرات فضای خالی مصالح سنگی نسبت به درصد قیر. شکل 7- نمودار فضای خالی پر شده با قیر نسبت به درصد قیر.



شکل 8- نمودار تغییرات تابع هدف مسئله نسبت به درصد قیر.



شکل 9- نمودار تغییرات تابع هدف مسئله نسبت به درصد قیر موجه.

## 5-

روشهای مختلفی برای طرح اختلاط مخلوطهای آسفالت گرم و بتن آسفالتی گرم وجود دارد. از جمله روشهای طرح اختلاط مخلوطهای آسفالت گرم روش مارشال و روش مارشال اصلاح شده است که در حال حاضر طرح اختلاط مخلوطهای آسفالتی گرم در ایران، بر اساس این دو روش انجام می‌شود. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای یافتن درصد قیر بهینه در روش مارشال یا مارشال اصلاح شده، توسعه داده شده است. برای این منظور نخست نمودار تغییرات هر یک از پارامترهای طرح اختلاط نسبت به درصد قیر با استفاده از یک تابع درجه دوم

و با استفاده از روش کمترین مربعات تقریب زده می‌شود و سپس با بهره‌گیری از یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی، درصد قیر بهینه تعیین می‌شود. حل مدل برنامه‌ریزی غیر خطی این مسئله و تعیین درصد قیر بهینه با توجه به این که درصد قیر بهینه به طور قطع بین حداقل و حداکثر درصد قیر مورد استفاده در آزمایش مارشال قرار دارد، کار ساده‌ای است. برای تعیین جواب بهینه نخست با تعریف یک نمو برای درصد قیر، درصد‌های قیر موجه تعیین می‌شوند و سپس مقدار تابع هدف در هر یک از این درصد‌های قیر موجه محاسبه می‌گردد. درصد قیر بهینه، درصد قیر موجهی است که مقدار تابع هدف را حداقل نماید. بر خلاف روش معمول تعیین درصد قیر بهینه که تنها با استفاده از شکل کلی نمودارهای طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه تعیین می‌شود؛ در روش توسعه داده شده در این مقاله از یک روند سیستماتیک برای تعیین درصد قیر استفاده شده است. استفاده از این روش سبب می‌شود تا بتن آسفالتی بدست آمده کلیه شرایط لحاظ شده در آیین نامه را دارا باشد، ضمن آنکه دارای بیشترین وزن مخصوص و بیشترین استقامت مارشال است.

-7

1- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. معاونت امور فنی. دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی (1382) "، نشریه شماره 101، تهران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

2- White, T.D. "Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures". Asphalt Paving Technology: Proceedings, vol. 54. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, 11-13 February 1985. San Antonio, TX. pp. 265-284 .

3- طباطبائی، امیر محمد (1383) "، تهران، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی.

4- شهیدی پور. سیدمحمد مهدی (1373) "، اس.اس. رانو، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی.

5- The MathWorks, Inc.(2000) "User's Guide".

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی