



بسمه تعالی

درس : روسازی راه‌ها

موضوع : طرح اختلاط آسفالت (Asphalt Mix Design)

ارائه دهنده: فاروق ذبیحی

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری

ترم ۴۰۴۲

سرفصل اصلی ارائه

- (۱) مقدمه
- (۲) آشنایی با مخلوط آسفالتی
- (۳) مفهوم طرح اختلاط آسفالت
- (۴) روش مارشال
- (۵) روش ژیراتوری
- (۶) مقایسه روش مارشال و ژیراتوری

❖ اهمیت روسازی آسفالتی و نقش طرح اختلاط

- روسازی آسفالتی رایج‌ترین نوع روسازی راه‌ها در جهان (حدود ۹۰ درصد از راه‌های جهان آسفالتی است)
- تأثیر مستقیم کیفیت روسازی بر:

✓ ایمنی

✓ دوام

✓ هزینه‌های نگهداری

- عملکرد مناسب روسازی وابسته به کیفیت مخلوط آسفالتی است

- طرح اختلاط، تعیین‌کننده:

✓ درصد بهینه قیر

✓ دانه‌بندی مناسب

✓ ویژگی‌های حجمی و مکانیکی مخلوط

- طرح اختلاط صحیح = افزایش عمر مفید روسازی + کاهش خرابی‌ها



❖ هدف از طرح اختلاط آسفالت

- دستیابی به مخلوط آسفالتی با عملکرد مطلوب در شرایط بهره‌برداری
- چند هدفه بودن طراحی:
 - ✓ پایداری: مقاومت در برابر تغییر شکل دائم (شیارشده‌گی)
 - ✓ دوام: مقاومت در برابر ترک‌خوردگی (ناشی از خستگی و حرارت)
 - ✓ انعطاف‌پذیری: توانایی سازگاری با تغییرات دما و تنش‌ها
 - ✓ مقاومت در برابر آب: جلوگیری از تخریب ناشی از نفوذ آب
 - ✓ کارایی: سهولت در اجرا و تراکم
- تعیین درصد بهینه قیر
- تعیین دانه‌بندی مصالح سنگی
- دستیابی به ترکیب حجمی ایده‌آل



❖ جایگاه روش‌های طراحی مخلوط در عملکرد روسازی



○ طرح اختلاط: قلب طراحی روسازی آسفالتی

○ اهمیت حیاتی:

✓ تضمین عملکرد بلندمدت روسازی

✓ کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر

✓ افزایش عمر مفید روسازی

✓ بهبود ایمنی و راحتی تردد

○ روش‌های طراحی (مانند مارشال و ژیراتوری):

✓ ابزارهای عملیاتی برای رسیدن به طرح اختلاط مطلوب

✓ شبیه‌سازی رفتار مخلوط تحت شرایط بارگذاری و تراکم

✓ تعیین پارامترهای کلیدی: درصد قیر، دانه‌بندی، فضاهاى خالی

○ رابطه مستقیم: طرح اختلاط (نتیجه روش طراحی) ← کیفیت مخلوط آسفالتی ← عملکرد نهایی روسازی

❖ تعریف مخلوط آسفالتی



- مخلوط آسفالتی: ترکیبی مهندسی شده از:
 - ✓ مصالح سنگی: شن، ماسه، فیلر (مواد معدنی)
 - ✓ ماده چسباننده: قیر (به عنوان ماده اصلی چسباننده)
 - ✓ مواد افزودنی (اختیاری): برای بهبود خواص خاص
- هدف: ایجاد یک لایه روسازی یکپارچه، سخت و بادوام
- نقش اجزا:
 - ✓ مصالح سنگی: اسکلت اصلی مخلوط، تحمل کننده بار
 - ✓ قیر: پوشش دهنده دانه های سنگی، چسباندن آن ها به هم، ایجاد انعطاف پذیری و مقاومت در برابر آب
- ماهیت: مخلوطی ویسکوالاستیک (رفتاری بین جامد و مایع، وابسته به دما و زمان)

❖ اجزای تشکیل دهنده

□ مصالح سنگی (Aggregate)

○ نقش

- ✓ تأمین استخوان بندی و سختی مخلوط
- ✓ تحمل عمده بارهای ترافیکی
- ✓ کنترل فضای خالی و نفوذپذیری

○ انواع

- ✓ درشت دانه (Coarse Aggregate): شن (از الک نمره ۴.۷۵ تا ۲۵ میلیمتر)
- ✓ ریزدانه (Fine Aggregate): ماسه (بین الک نمره ۰.۰۷۵ تا ۴.۷۵ میلیمتر)

○ خصوصیات مهم

- ✓ شکل و بافت: زاویه دار بودن و زبری سطح باعث درگیری بهتر با قیر و افزایش مقاومت
- ✓ مقاومت و سختی: مقاومت در برابر خردایش، سایش و ضربه
- ✓ پایداری حجمی: مقاومت در برابر تورم ناشی از رطوبت
- ✓ تمیزی: عاری بودن از مواد آلی، گرد و غبار زیاد و رس



❖ اجزای تشکیل دهنده

□ قیر (Asphalt Binder)

○ نقش

- ✓ چسباندن دانه‌های مصالح سنگی به یکدیگر
- ✓ ایجاد انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی
- ✓ آب‌بندی مخلوط و جلوگیری از نفوذ آب

○ انواع

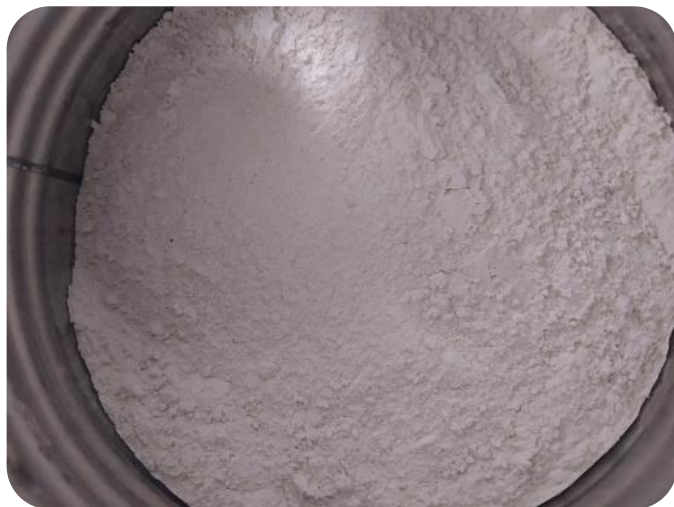


○ خصوصیات مهم

- ✓ درجه نفوذ (Penetration Grade): معیاری از سختی قیر در دمای مشخص (نفوذ کمتر = قیر سخت‌تر)
- ✓ ویسکوزیته (Viscosity): معیاری از مقاومت جریان قیر (مهم برای پمپ شدن و پوشش‌دهی)
- ✓ نقطه نرمی (Softening Point): دمایی که قیر در آن شروع به نرم شدن می‌کند (معیاری از مقاومت حرارتی)
- ✓ پایداری برشی: مقاومت در برابر تغییر شکل تحت تنش

❖ اجزای تشکیل دهنده

□ فیلر (Filler)



○ نقش

- ✓ پر کردن فضاهای خالی بین ریزدانه‌ها
- ✓ افزایش سطح تماس و چسبندگی قیر به مصالح سنگی
- ✓ افزایش ویسکوزیته مخلوط قیر-فیلر (و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط نهایی)
- ✓ افزایش سختی و مقاومت مخلوط در دماهای بالا

○ انواع

- ✓ گرد سنگ (Rock Dust) از فرآیند خردایش مصالح سنگی
- ✓ سیمان پرتلند: گاهی به عنوان فیلر یا برای بهبود چسبندگی استفاده می‌شود
- ✓ گرد آهک (Lime Dust)
- ✓ خاکستر بادی (Fly Ash)

○ خصوصیات مهم

- ✓ اندازه ذرات: باید بسیار ریز باشد تا بتواند فضاهای خالی را پر کند
- ✓ شیمیایی: خصوصیات شیمیایی می‌تواند بر چسبندگی قیر تأثیر بگذارد (مانند آهک)
- ✓ نرمی و جذب قیر: توانایی فیلر در جذب قیر

❖ ویژگی‌های مورد انتظار از مخلوط آسفالتی

□ پایداری (Stability)

- **تعریف:** توانایی مخلوط در مقاومت در برابر تغییر شکل‌ها تحت اثر بارهای وارده.
- **اهمیت:** جلوگیری از ناهمواری‌ها و ناکارآمدی‌های زودرس روسازی.
- **معیارهای سنجش (در روش مارشال):**
 - ✓ مقاومت فشاری (Marshall Stability): حداکثر بار قابل تحمل قبل از شکست.
 - ✓ روانی (Flow): میزان تغییر شکل مخلوط در زمان اعمال حداکثر بار.
- **عوامل مؤثر:**
 - ✓ درصد قیر: مقدار کم قیر، پایداری را کاهش می‌دهد.
 - ✓ دانه‌بندی مصالح سنگی: ایجاد حداکثر درگیری بین دانه‌ها (interlocking)
 - ✓ مقدار فیلر: افزایش آن می‌تواند تا حدی پایداری را بالا ببرد.

سنگین		متوسط		سبک		طبقه بندی ترافیک
۷۵		۵۰		۲۵		تراکم، تعداد ضربه به هر سمت
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	پایداری مارشال (N)
-	۸۰۰۰	-	۵۲۲۲	-	۲۲۲۲	
۱۴	۸	۱۶	۸	۱۸	۸	روانی مارشال (in/۰.۰۰۱)
۵	۳	۵	۳	۵	۳	درصد فضای خالی
۸۰	۷۰	۷۸	۶۵	۷۵	۶۵	درصد فضای خالی پر شده با قیر

❖ ویژگی‌های مورد انتظار از مخلوط آسفالتی

□ دوام (Durability)

- **تعریف:** توانایی مخلوط در حفظ خواص اولیه خود در طول عمر روسازی، علی‌رغم مواجهه با عوامل محیطی و ترافیکی.
- **اهمیت:** طول عمر روسازی و کاهش نیاز به تعمیرات.

○ عوامل مخرب:

- ✓ اکسیداسیون قیر: ناشی از مجاورت با هوا و نور خورشید (باعث سخت و شکننده شدن قیر می‌شود).
- ✓ نفوذ آب: باعث شسته شدن قیر و تخریب چسبندگی قیر به سنگ می‌شود.
- ✓ تنش‌های ترافیکی: خستگی ناشی از تکرار بار.
- ✓ تغییرات دما: انبساط و انقباض.

○ روش‌های بهبود:

- ✓ ○ استفاده از قیرهای با کیفیت و مناسب.
- ✓ ○ طرح اختلاط مناسب برای کاهش نفوذپذیری.
- ✓ ○ استفاده از مصالح سنگی مقاوم.

❖ ویژگی‌های مورد انتظار از مخلوط آسفالتی

□ انعطاف‌پذیری (Flexibility)

- **تعریف:** توانایی مخلوط در تحمل تغییر شکل‌ها بدون ایجاد ترک، به ویژه در پاسخ به تنش‌های ناشی از بار ترافیکی و تغییرات دما.
- **اهمیت:** جلوگیری از ترک‌خوردگی (به خصوص ترک‌های خستگی و حرارتی).
- **عوامل مؤثر:**
 - ✓ درصد و نوع قیر: قیر نرم‌تر و درصد مناسب قیر، انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد.
 - ✓ دمای محیط: مخلوط در دماهای پایین‌تر، شکننده‌تر و انعطاف‌پذیری کمتری دارد.
 - ✓ دانه‌بندی مصالح سنگی: دانه‌بندی پیوسته با فضای خالی کمتر، معمولاً انعطاف‌پذیرتر است.
- **نکته:** تعادل بین پایداری و انعطاف‌پذیری بسیار مهم است.

❖ ویژگی‌های مورد انتظار از مخلوط آسفالتی

□ مقاومت در برابر تغییر شکل دائم (Resistance to Permanent Deformation)

○ **تعریف:** توانایی مخلوط در مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی مانند شیارشدگی (Rutting) در سطح روسازی، به ویژه در شرایط آب و هوایی گرم و تحت بارهای سنگین.

○ **اهمیت:** حفظ صافی سطح و جلوگیری از جمع شدن آب در شیارها.

○ دلایل اصلی وقوع:

- ✓ قیر بیش از حد نرم یا درصد قیر بالا.
- ✓ دانه‌بندی نامناسب مصالح سنگی (عدم درگیری کافی دانه‌ها).
- ✓ دمای بالای محیط.
- ✓ تراکم ناکافی مخلوط در حین اجرا

○ روش‌های کنترل:

- ✓ انتخاب قیر مناسب (سخت‌تر یا اصلاح شده).
- ✓ طراحی دانه‌بندی مصالح سنگی برای حداکثر درگیری.
- ✓ کنترل دقیق درصد قیر.
- ✓ اجرای صحیح و متراکم کردن مخلوط.



❖ ویژگی‌های مورد انتظار از مخلوط آسفالتی

□ مقاومت در برابر رطوبت (Moisture Resistance)

○ تعریف: توانایی مخلوط در مقاومت در برابر اثرات مخرب آب (مانند نفوذ آب، شسته شدن قیر و کاهش چسبندگی بین قیر و سنگ)

○ اهمیت: جلوگیری از تخریب زودرس لایه‌های روسازی

○ مکانیسم‌های تخریب:

- ✓ شستشو (Stripping): جدا شدن لایه نازک قیر از سطح مصالح سنگی به دلیل وجود آب
- ✓ تخریب چسبندگی (Adhesion Loss): کاهش قدرت پیوند بین قیر و سنگ
- ✓ تخریب یخ‌زدگی: اگر آب به داخل مخلوط نفوذ کند و یخ بزند، می‌تواند باعث انبساط و تخریب شود

○ روش‌های بهبود:

- ✓ استفاده از مصالح سنگی تمیز و با کیفیت
- ✓ استفاده از قیرهای اصلاح‌شده یا مواد افزودنی ضد آب (Anti-stripping agents)
- ✓ طرح اختلاط با نفوذپذیری کم (فضای خالی کم)
- ✓ اطمینان از اجرای صحیح و تراکم کافی



❖ **تعریف طرح اختلاط**

□ **تعریف:**

طرح اختلاط فرآیندی سیستماتیک و علمی برای تعیین نسبت‌های بهینه اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی (قیر، مصالح سنگی ریز و درشت، فیلر و افزودنی‌ها) است.

□ **هدف اصلی:**

دستیابی به مخلوطی که تمام ویژگی‌های مورد انتظار (پایداری، دوام، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر تغییر شکل دائم و مقاومت در برابر رطوبت) را در شرایط ترافیکی و محیطی مورد نظر برآورده کند.

□ **مفهوم کلیدی:**

یافتن “بهترین تعادل” بین خواص مختلف مخلوط.

❖ اهداف کلیدی طرح اختلاط

□ تأمین خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب

- ✓ مقاومت کافی در برابر بارهای وارده.
- ✓ دوام در طول عمر روسازی.
- ✓ انعطاف‌پذیری لازم برای جلوگیری از ترک‌خوردگی.
- ✓ مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی (مانند شیارشدگی).
- ✓ مقاومت در برابر رطوبت.

□ اقتصادی بودن

- ✓ استفاده بهینه از مصالح موجود.
- ✓ کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری.

□ قابلیت اجرا

- ✓ مخلوط باید در کارخانه آسفالت قابل تولید و در محل پروژه قابل اجرا و متراکم شدن باشد.
- ✓ سازگاری با شرایط محیطی و ترافیکی:
- ✓ انتخاب طرح اختلاط مناسب با توجه به اقلیم منطقه (گرم، سرد، مرطوب) و حجم و نوع ترافیک.



❖ پارامترهای موثر بر طرح اختلاط

□ الف) دانه بندی (Gradation)

- ✓ تعریف: توزیع اندازه ذرات مصالح سنگی در مخلوط.
- ✓ اهمیت: یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین پایداری، فضای خالی، تراکم‌پذیری و دوام مخلوط.
- ✓ اثر دانه‌بندی:

 - دانه‌بندی پیوسته و مناسب < درگیری بهتر دانه‌ها و پایداری بیشتر
 - دانه‌بندی نامناسب < افزایش فضای خالی یا کاهش مقاومت

- ✓ نکته: دانه‌بندی بر مقدار قیر مورد نیاز نیز اثر مستقیم دارد.

۳) مفهوم طرح اختلاط آسفالت

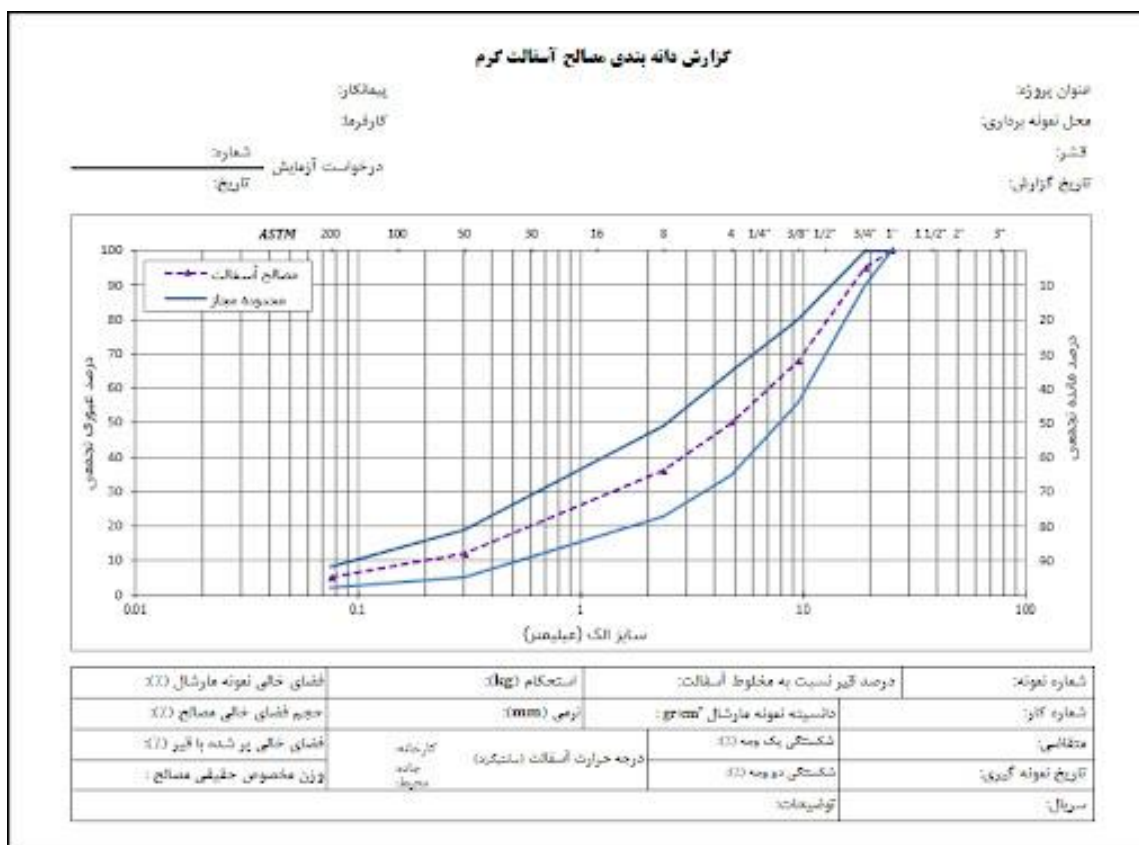
❖ پارامترهای موثر بر طرح اختلاط

□ الف) دانه بندی (Gradation)

درصد وزنی رد شده از هر الک							اندازه الک
۷*	۶*	۵	۴	۳	۲	۱	
رویه	رویه	رویه	آستر و رویه	اساس قیری و آستر	اساس قیری و آستر	اساس قیری	
-	-	-	-	-	-	۱۰۰	۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)
-	-	-	-	-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۳۷/۵ میلیمتر ($1\frac{1}{2}$ اینچ)
-	-	-	-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	-	۲۵ میلیمتر (۱ اینچ)
-	-	-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	-	۵۶-۸۰	۱۹ میلیمتر ($\frac{3}{4}$ اینچ)
-	-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	-	۵۶-۸۰	-	۱۲/۵ میلیمتر ($1\frac{1}{2}$ اینچ)
-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	-	۵۶-۸۰	-	-	۹/۵ میلیمتر ($\frac{3}{8}$ اینچ)
۱۰۰	۸۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۴۴-۷۴	۳۵-۶۵	۳۹-۵۹	۲۳-۵۳	۴/۷۵ میلیمتر (شماره ۴)
۹۵-۱۰۰	۶۵-۱۰۰	۳۲-۶۷	۲۸-۵۸	۲۳-۴۹	۱۹-۴۵	۱۵-۴۱	۲/۳۶ میلیمتر (شماره ۸)
۸۵-۱۰۰	۴۰-۸۰	-	-	-	-	-	۱/۱۸ میلیمتر (شماره ۱۶)
۷۰-۹۵	۲۵-۶۵	-	-	-	-	-	۰/۶ میلیمتر (شماره ۳۰)
۴۵-۷۵	۷-۴۰	۷-۲۳	۵-۲۱	۵-۱۹	۵-۱۷	۴-۱۶	۰/۳ میلیمتر (شماره ۵۰)
۲۰-۴۰	۳-۲۰	-	-	-	-	-	۰/۱۵ میلیمتر (شماره ۱۰۰)
۹-۲۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۸	۱-۷	۰-۶	۰/۰۷۵ میلیمتر (شماره ۲۰۰)

* Sand Asphalt

† Sheet Asphalt



❖ پارامترهای موثر بر طرح اختلاط

□ (ب) درصد قیر (Bitumen Content)

- ✓ تعریف: مقدار قیر موجود در کل مخلوط آسفالتی، معمولاً بر حسب درصد وزنی.
- ✓ اهمیت: نقش کلیدی در چسبندگی، دوام، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر رطوبت دارد.
- ✓ اثر درصد قیر:
 - کم بودن قیر < کاهش دوام و افزایش ترک‌خوردگی
 - زیاد بودن قیر < کاهش پایداری و افزایش شیارشدگی
- ✓ نکته: تعیین درصد بهینه قیر، یکی از مهم‌ترین اهداف طرح اختلاط است.

❖ پارامترهای موثر بر طرح اختلاط

□ ج) نوع قیر (Bitumen Type)

- ✓ تعریف: مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیر مورد استفاده در مخلوط.
- ✓ اهمیت: نوع قیر بر سختی، نرمی، مقاومت حرارتی و انعطاف‌پذیری تأثیر دارد.
- ✓ اثر نوع قیر:
 - قیر سخت‌تر < مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی، اما احتمال ترک‌خوردگی بیشتر
 - قیر نرم‌تر < انعطاف‌پذیری بیشتر، اما مقاومت کمتر در برابر تغییر شکل دائم
- ✓ نکته: انتخاب نوع قیر باید متناسب با ترافیک و اقلیم باشد.

❖ پارامترهای موثر بر طرح اختلاط

□ (د) ترافیک (Traffic)

- ✓ تعریف: حجم، نوع و شدت بارهای عبوری از روی روسازی.
- ✓ اهمیت: ترافیک یکی از اصلی‌ترین معیارها در تعیین میزان مقاومت مورد نیاز مخلوط است.
- ✓ اثر ترافیک :
 - ترافیک سنگین < نیاز به مخلوط مقاوم‌تر در برابر شیارشدگی و خستگی
 - ترافیک سبک < الزامات مقاومتی کمتر
- ✓ نکته: تعداد تکرار بار، وزن محورها و سرعت وسایل نقلیه در طرح اختلاط اثرگذار هستند.



❖ پارامترهای موثر بر طرح اختلاط

□ ه) شرایط اقلیمی (Climatic Conditions)

✓ تعریف: شرایط آب‌وهوایی منطقه مانند دما، بارندگی و تغییرات فصلی.

✓ اهمیت: اقلیم بر رفتار قیر و عملکرد مخلوط تأثیر مستقیم دارد.

✓ اثر شرایط اقلیمی:

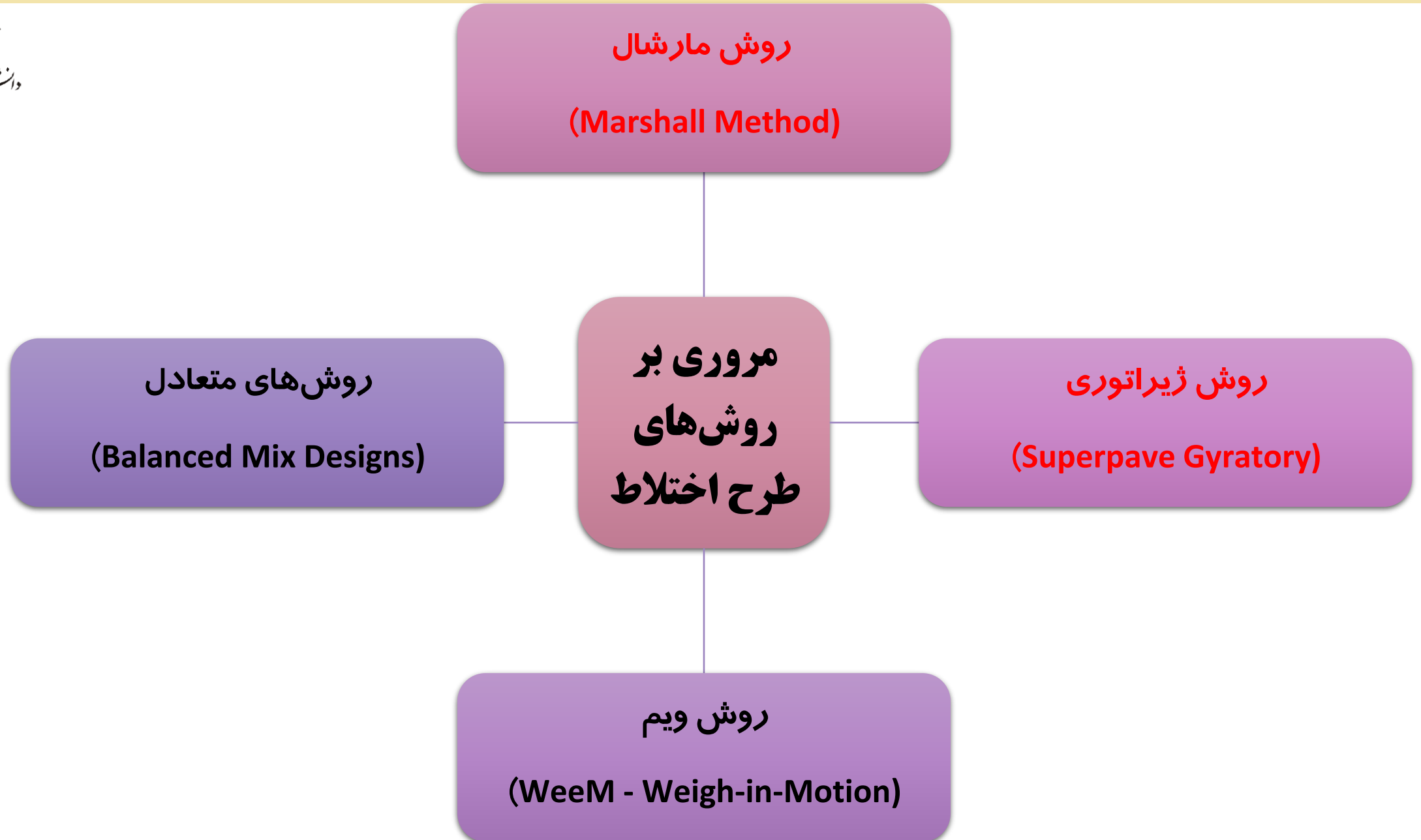
▪ ۰ هوای گرم < افزایش احتمال شیارشدگی

▪ ۰ هوای سرد < افزایش احتمال ترک‌خوردگی حرارتی

▪ ۰ رطوبت بالا < افزایش خطر جداشدگی قیر از مصالح (Stripping)

✓ نکته: طرح اختلاط باید بر اساس اقلیم محل اجرا تنظیم شود.





❖ تاریخچه و فلسفه روش مارشال

□ تاریخچه:

- ✓ در دهه ۱۹۳۰ توسط بروس مارشال (Bruce Marshall) مهندس آزمایشگاه راه های ایالت میسیسیپی آمریکا ابداع شد.
- ✓ در جنگ جهانی دوم توسط مهندسان ارتش ایالات متحده اصلاح و استانداردسازی شد.
- ✓ به دلیل سادگی، سرعت و هزینه پایین به یکی از پرکاربردترین روش های طرح اختلاط در جهان تبدیل شد.
- ✓ در ایران نیز روش استاندارد ملی برای طرح اختلاط آسفالت گرم است (مطابق آیین نامه ۲۳۴).

□ فلسفه روش

- ✓ هدف از روش مارشال تعیین درصد بهینه قیر با در نظر گرفتن پایداری (Stability) و شاخص روانی (Flow) است.
- ✓ اساس کار بر مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای در دمای مشخص (۶۰ درجه سانتی گراد) استوار است.
- ✓ نمونه ها با تعداد ضربات مشخص (۲۵، ۵۰ یا ۷۵ ضربه در هر طرف) متراکم می شوند تا شرایط بارگذاری ترافیک شبیه سازی شود.
- ✓ پارامترهای اصلی اندازه گیری شده:
 - پایداری مارشال (Stability): حداکثر بار قابل تحمل نمونه (بر حسب کیلو گرم یا نیوتن)
 - شاخص روانی (Flow): میزان تغییر شکل نمونه تا لحظه گسیختگی (بر حسب میلیمتر یا ۰.۲۵ اینچ)

مزایا:

- ساده و سریع
- هزینه تجهیزات نسبتاً پایین
- تجربه و داده‌های گسترده در ایران و جهان

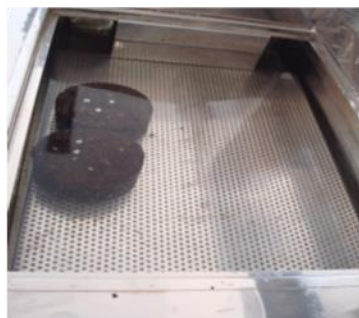
معایب:

- شبیه‌سازی کامل شرایط واقعی روسازی نیست
- برای ترافیک‌های بسیار سنگین و دمای بالا دقت کافی ندارد
- به اندازه روش‌های جدید (ماندوئالد، سوپریو) جامع نیست



تجهیزات و نمونه سازی در روش مارشال
تجهیزات اصلی آزمایش مارشال

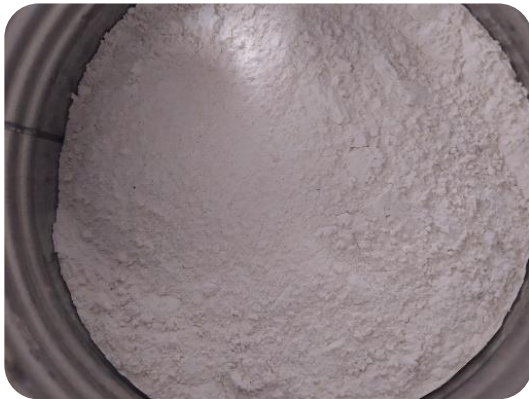
توضیح	تجهیز
قطر داخلی ۴ اینچ (۱۰۱.۶ میلی متر)، ارتفاع ۷۵ میلی متر، همراه با کف قاب و حلقه ی گشادکننده	قالب استوانه ای
وزن ۴.۵۳۶ کیلوگرم (۱۰ پوند)، ارتفاع سقوط آزاد ۴۵۷.۲ میلی متر (۱۸ اینچ)	چکش تراکم (Hammer)
صفحه فلزی به ابعاد ۳۰×۳۰×۲.۵ سانتی متر از جنس فولاد سخت	سطح تراکم (Base Plate)
جک دستی یا هیدرولیکی برای خارج کردن نمونه از قالب	اکسترودر (Extruder)
با کنترل دما در $1^{\circ} \pm 60^{\circ}C$ برای گرم کردن نمونه ها	حمام آب (Water Bath)
مجهز به حلقه بار (Proving Ring) یا سلول بار، با سرعت بارگذاری ۰.۸ میلی متر بر دقیقه (۲ اینچ/دقیقه)	دستگاه بارگذاری مارشال (Testing Machine)
برای اندازه گیری شاخص روانی نمونه در لحظه گسیختگی	کسری (Flow Meter)
با دقت ۰.۱ گرم	ترازوی دیجیتال
برای گرم کردن مصالح و قیر تا دمای اختلاط	گرمخانه یا آون (Oven)
برای مخلوط کردن مصالح و قیر (ترجیحاً مکانیکی)	میکسر



□ مراحل ساخت نمونه

➤ مرحله ۱ - آماده‌سازی مصالح سنگی

- خشک کردن مصالح در آون در دمای $105 \pm 5^\circ \text{C}$ تا رسیدن به وزن ثابت
- الک کردن و تفکیک بر اساس اندازه‌ها
- ترکیب سنگ‌دانه‌ها به نسبت دانه‌بندی طرح اختلاط (حدود ۱۲۰۰ گرم برای هر نمونه)



□ مراحل ساخت نمونه

➤ مرحله ۲ - تعیین دمای اختلاط و تراکم

- تعیین دمای اختلاط بر اساس نوع قیر و درجه نفوذ (معمولاً 165°C - 145°C برای قیر ۶۰/۷۰)
- دمای تراکم حدود 155°C - 135°C

➤ مرحله ۳ - اختلاط

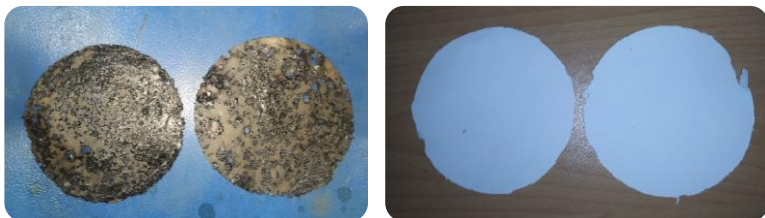
- گرم کردن مصالح و قیر جداگانه تا دمای اختلاط (حدود ۲ ساعت)
- اضافه کردن قیر به مصالح و مخلوط کردن کامل (حداقل ۲ دقیقه یا تا پوشش کامل دانه‌ها)



□ مراحل ساخت نمونه

➤ مرحله ۴ - تراکم

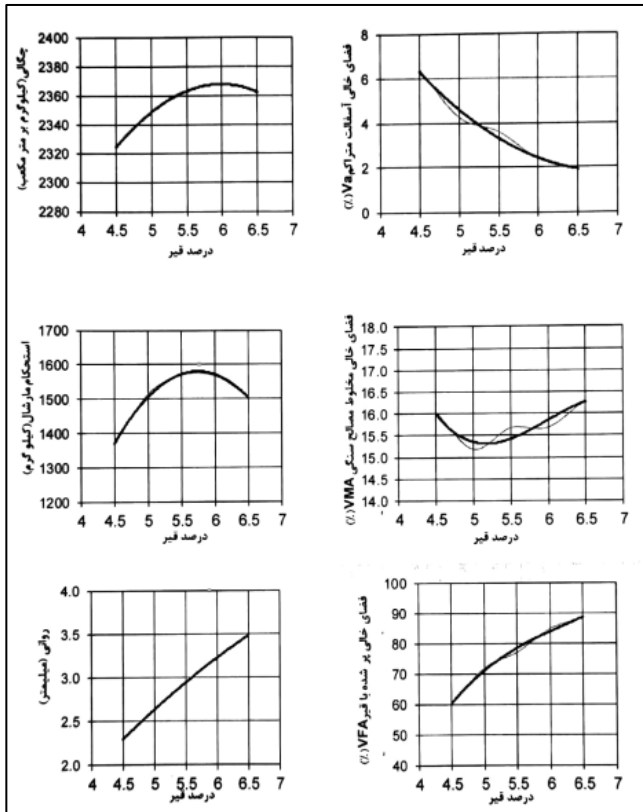
- ✓ قرار دادن کاغذ صافی در کف قالب
- ✓ ریختن مخلوط در قالب و صاف کردن سطح
- ✓ ضربه زدن با چکش استاندارد تعداد مشخص (۲۵، ۵۰ یا ۷۵ ضربه) در هر دو طرف نمونه
- ✓ قالب‌شکنی و خارج کردن نمونه با اکسترودر



□ مراحل ساخت نمونه

➤ مرحله ۵ - تعیین ویژگی‌های فیزیکی

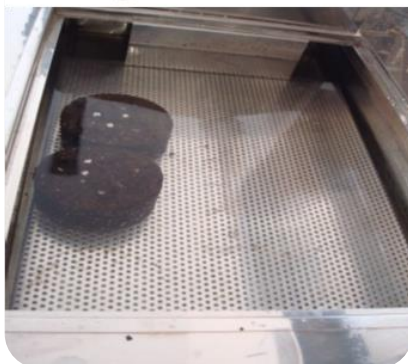
- ✓ اندازه‌گیری وزن در هوا، وزن در آب و وزن اشباع با سطح خشک (SSD)
- ✓ محاسبه: چگالی حداکثر، چگالی حقیقی، درصد فضای خالی (Air Voids)، درصد فضای خالی مصالح (VMA) و درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA)



□ مراحل ساخت نمونه

➤ مرحله ۶ - آزمایش پایداری و روانی

- ✓ قرار دادن نمونه در حمام آب 60°C به مدت ۳۰-۴۰ دقیقه
- ✓ قرار دادن نمونه در دستگاه بارگذاری و اعمال بار با نرخ ۵۰.۸ میلی‌متر/دقیقه
- ✓ ثبت حداکثر بار (پایداری) و تغییر شکل (روانی)



❑ مراحل انجام طرح اختلاط مارشال

۱. تعیین مشخصات مصالح و شرایط پروژه

- ✓ شناسایی نوع مصالح سنگی، نوع قیر، شرایط ترافیکی و اقلیمی
- ✓ بررسی مشخصات استاندارد و الزامات آیین‌نامه‌ای

۲. انتخاب و آماده‌سازی دانه‌بندی اولیه

- ✓ انتخاب چند ترکیب دانه‌بندی مناسب
- ✓ بررسی انطباق با حدود مجاز استاندارد

۳. تعیین درصد‌های مختلف قیر

- ✓ معمولاً ۴ تا ۵ درصد قیر در بازه‌های مختلف آزمایش می‌شود
- ✓ برای هر درصد قیر، چند نمونه ساخته می‌شود

۴. ساخت نمونه‌های مارشال

- ✓ مخلوط کردن مصالح و قیر در دمای مناسب
- ✓ تراکم نمونه‌ها با تعداد ضربات استاندارد

Bitumen content (%)	Solve method	
4	$\frac{x}{1200 + x} \times 100 = 4$	$100x = 4(1200 + x) \rightarrow x \cong 50\text{gr}$
4.5	$\frac{x}{1200 + x} \times 100 = 4.5$	$100x = 4.5(1200 + x) \rightarrow x \cong 57\text{gr}$
5	$\frac{x}{1200 + x} \times 100 = 5$	$100x = 5(1200 + x) \rightarrow x \cong 63\text{gr}$
5.5	$\frac{x}{1200 + x} \times 100 = 5.5$	$100x = 5.5(1200 + x) \rightarrow x \cong 70\text{gr}$
6	$\frac{x}{1200 + x} \times 100 = 6$	$100x = 6(1200 + x) \rightarrow x \cong 77\text{gr}$
6.5	$\frac{x}{1200 + x} \times 100 = 6.5$	$100x = 6.5(1200 + x) \rightarrow x \cong 83\text{gr}$

□ مراحل انجام طرح اختلاط مارشال

۵. انجام آزمایش‌های لازم

- ✓ اندازه‌گیری چگالی، فضای خالی، VMA و VFA
- ✓ انجام آزمایش پایداری و روانی مارشال

۶. ترسیم نمودارها

- ✓ رسم نمودارهای:
 - پایداری در برابر درصد قیر
 - روانی در برابر درصد قیر
 - وزن مخصوص در برابر درصد قیر
 - فضای خالی در برابر درصد قیر

۷. تعیین درصد قیر بهینه

- ✓ انتخاب درصدی که هم‌زمان بیشترین انطباق با معیارهای آیین‌نامه‌ای را داشته باشد
- ✓ معمولاً بر اساس ترکیب چند معیار:
 - بیشترین پایداری
 - فضای خالی مطلوب
 - روانی مناسب
 - VMA و VFA در محدوده مجاز

□ پارامترهای اصلی در روش مارشال

۱. وزن مخصوص (Bulk Specific Gravity)

- تعریف: نسبت وزن مصالح خشک شده در هوا به وزن حجمی معادل آن (با احتساب فضاهای خالی قابل نفوذ).
- اهمیت: مبنای محاسبه سایر پارامترها مانند فضای خالی و درصد قیر.

۲. درصد فضای خالی هوا (Air Voids - V_a)

- تعریف: نسبت حجم هوای موجود در نمونه متراکم شده به حجم کل نمونه (بر حسب درصد).
- فرمول:

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100$$

➤ اهمیت:

- فضای خالی کم: نشان‌دهنده تراکم زیاد و احتمال شیارشدگی (Rutting) در هوای گرم.
- فضای خالی زیاد: نشان‌دهنده نفوذپذیری بالا، مقاومت کم در برابر آب و جداشدگی قیر (Stripping).
- محدوده مطلوب: معمولاً بین ۳٪ تا ۵٪ (بسته به نوع لایه و آیین‌نامه).

۳. فضای خالی مصالح (Voids in Mineral Aggregate - VMA)

- تعریف: حجم فضاهای خالی بین دانه‌های مصالح سنگی در مخلوط نهایی، شامل فضای خالی هوا و فضایی که قیر اشغال می‌کند (بر حسب درصد).
- فرمول:

$$VMA = 100 - Gmb \times \frac{Pa}{Gsa}$$

➤ اهمیت:

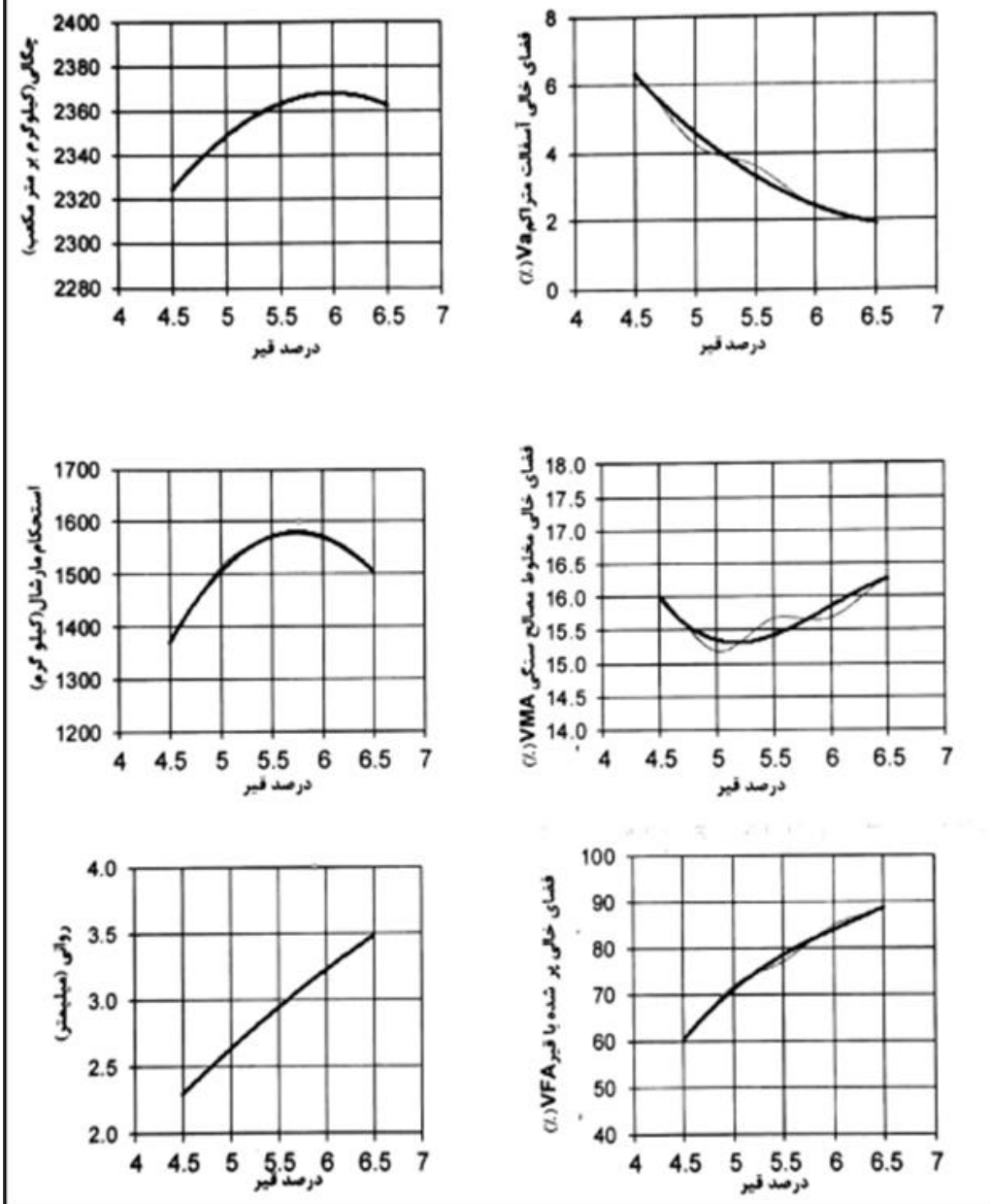
- VMA بالا: امکان ایجاد فضای خالی هوای کافی و همچنین پوشش مناسب قیر را فراهم می‌کند.
- VMA پایین: محدودیت در ایجاد فضای خالی هوا و فضای کافی برای قیر، که می‌تواند منجر به مخلوط بیش از حد متراکم و مستعد شیارشدگی شود.
- محدوده مطلوب: وابسته به حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (NMAS) و بر اساس آیین‌نامه‌ها تعیین می‌شود.

۵. پایداری مارشال (Marshall Stability)

- تعریف: حداکثر بار (بر حسب پوند یا کیلو گرم) که نمونه مخلوط آسفالتی قبل از گسیختگی تحمل می کند.
- اهمیت: نشان دهنده مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی (شیارشده گی) تحت بار ترافیکی در دمای بالای ۶۰ درجه سانتی گراد.
- محدوده مطلوب: بر اساس آیین نامه ها و سطح ترافیک تعیین می شود (مثلاً حداقل ۲۰۰۰ پوند یا ۹ کیلو گرم برای ترافیک متوسط).

۶. روانی (Flow)

- تعریف: میزان تغییر شکل (بر حسب اینچ یا میلی متر) نمونه مخلوط آسفالتی از لحظه اعمال بار تا لحظه گسیختگی.
- اهمیت: نشان دهنده انعطاف پذیری مخلوط.
- روانی کم: مخلوط شکننده و مستعد ترک خوردگی.
- روانی زیاد: احتمال شیارشده گی و تغییر شکل دائمی.
- محدوده مطلوب: مطابق نشریه ۲۳۴ بین ۲ الی ۳.۵ میلی متر.





(۴) روش مارشال

□ تعیین درصد قیر بهینه در روش مارشال

➤ **تعریف :** درصد قیری است که مخلوط آسفالتی را از نظر پایداری، روانی، وزن مخصوص، Air Voids، VMA و VFA در بهترین وضعیت قرار دهد.

➤ روش تعیین

- برای درصدهای مختلف قیر، نمونه‌های مارشال ساخته و آزمایش می‌شوند.
- نتایج به صورت نمودار رسم می‌گردند.
- درصد قیر بهینه از روی تقاطع یا هم‌پوشانی معیارهای آیین‌نامه‌ای انتخاب می‌شود.

➤ معیارهای اصلی انتخاب

- بیشترین پایداری مارشال
- بیشترین وزن مخصوص
- درصد فضای خالی هوا در محدوده مطلوب (معمولاً حدود ۳ تا ۵ درصد)
- VMA در محدوده آیین‌نامه
- VFA در محدوده آیین‌نامه
- روانی مناسب، (۲ الی ۳.۵ میلی متر)

➤ **نکته مهم :** درصد قیر بهینه فقط بر اساس یک پارامتر انتخاب نمی‌شود، بلکه نتیجه‌ی برآورده شدن هم‌زمان چند معیار عملکردی است.

□ مزایا و محدودیت‌های روش مارشال

➤ مزایای روش مارشال

- سادگی و سهولت اجرا: تجهیزات مورد نیاز نسبتاً ساده و فرآیند آزمایش سریع است.
- اقتصاد: هزینه انجام آزمایش‌ها در مقایسه با روش‌های نوین (مانند Superpave) بسیار کمتر است.
- تجربه گسترده: به دلیل قدمت بالای این روش، داده‌های عملکردی فراوانی از آن در دسترس است و مهندسان شناخت کاملی از رفتارهای آن دارند.
- قابلیت کاربرد: مناسب برای کنترل کیفیت کارگاهی و ارزیابی‌های اولیه در بسیاری از پروژه‌های راهسازی.

➤ محدودیت‌ها و معایب

- شبیه‌سازی محدود: روش تراکم با ضربه (Impact)، لزوماً مشابه فرآیند تراکم واقعی توسط غلتک‌ها در محل پروژه نیست.
- عدم دقت در ترافیک‌های سنگین: در برابر بارگذاری‌های ترافیکی فوق‌سنگین و دماهای بسیار بالا، دقت کافی برای پیش‌بینی شیارشدگی ندارد.
- اطلاعات رئولوژیکی ناکافی: پارامترهای حاصل (پایداری و روانی) لزوماً بیانگر تمام ویژگی‌های عملکردی مخلوط در درازمدت نیستند.
- جامعیت کمتر: نسبت به روش‌های پیشرفته (مانند Superpave) که بر اساس خواص عملکردی قیر و دانه‌بندی دقیق‌تر است)، کمتر با شرایط اقلیمی و بارگذاری‌های مختلف سازگار است.

❑ معرفی روش ژیراتوری (روش طرح اختلاط روسازی ممتاز یا SuperPave)

- یکی از روش‌های نوین طرح اختلاط آسفالتی است.
- بر پایه تراکم چرخشی (ژیراتوری) نمونه‌ها طراحی شده است.
- در این روش، نمونه آسفالتی تحت فشار قائم همراه با حرکت زاویه‌ای (غلتشی) قرار می‌گیرد.

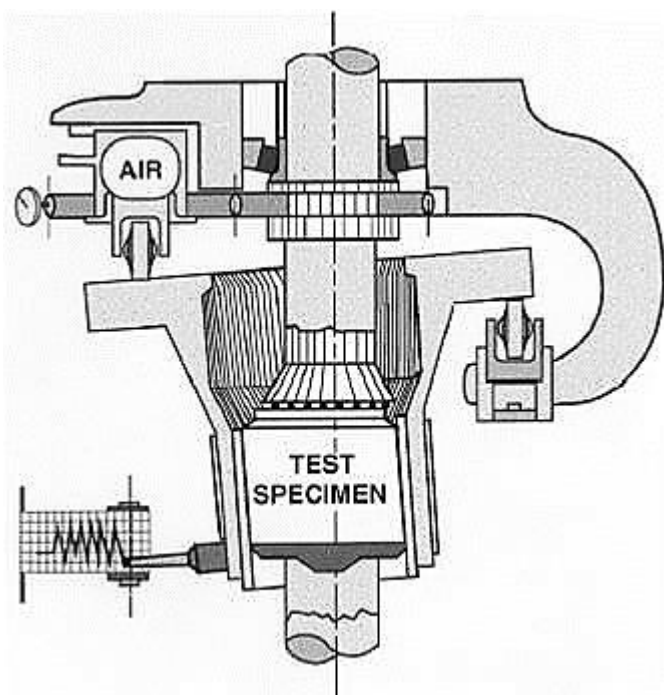
❑ فلسفه روش

- شبیه‌سازی واقعی‌تر شرایط تراکم در محل نسبت به روش مارشال
- ایجاد حالتی نزدیک‌تر به عبور غلتک‌های راهسازی و بارهای ترافیکی واقعی
- تمرکز بر دستیابی به مخلوطی با:

- دوام بیشتر
- مقاومت بهتر در برابر شیارشدگی
- عملکرد مناسب‌تر در شرایط ترافیک سنگین

❑ مزیت اصلی فلسفه این روش

- به جای تکیه صرف بر پایداری و روانی، رفتار تراکمی و عملکرد بلندمدت مخلوط را بهتر بازتاب می‌دهد.

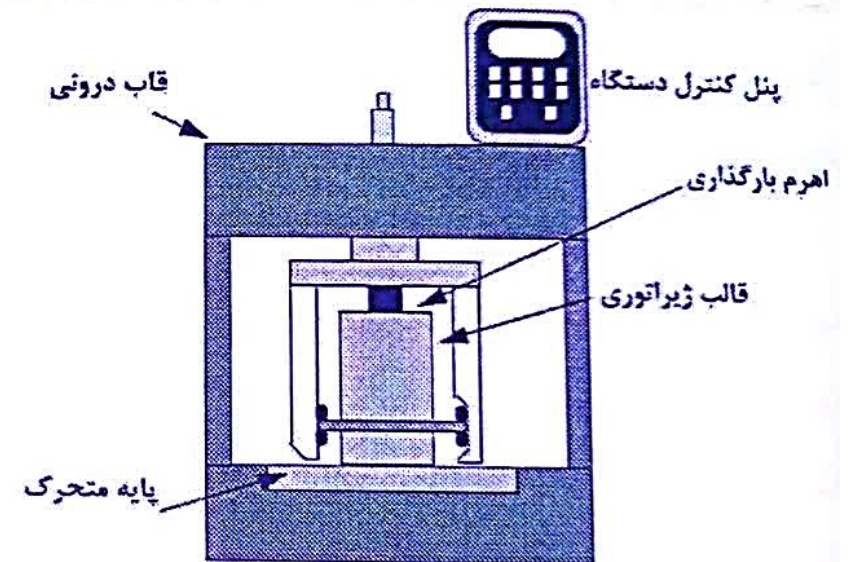
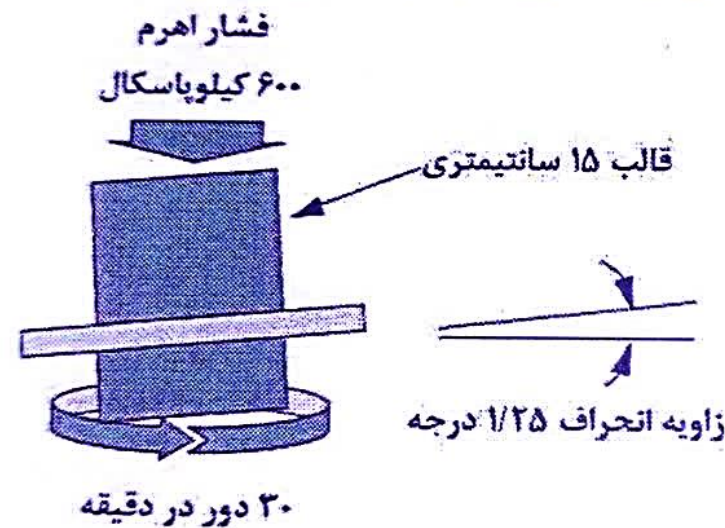
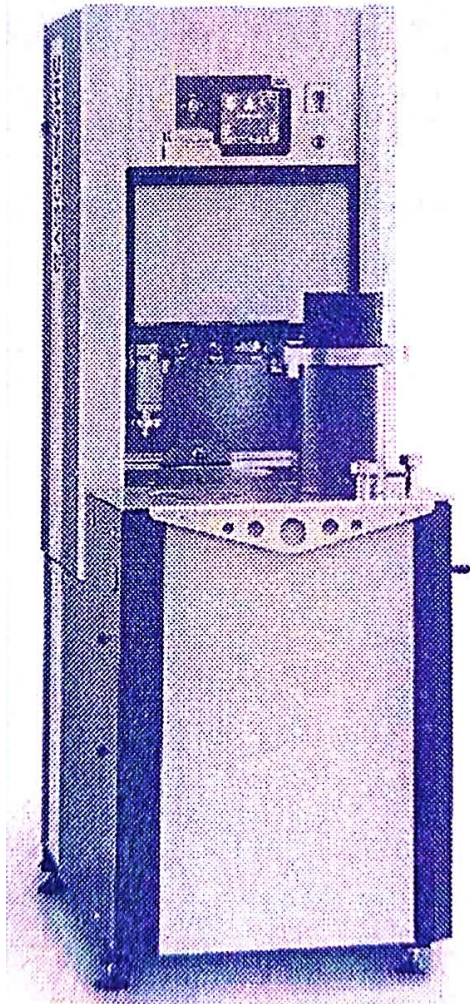


□ تفاوت تراکم ژیراتوری با ضربه‌ای

ویژگی	تراکم ضربه‌ای (مارشال)	تراکم ژیراتوری (Superpave)
مکانیسم	اعمال ضربه توسط چکش وزنه	فشار قائم + حرکت چرخشی (غلتشی)
شبیه‌سازی	شبیه‌سازی تقریبی و تجربی	شبیه‌سازی دقیق شرایط واقعی
رفتار مصالح	تمایل به خرد شدن سنگدانه‌ها	جابه‌جایی و قفل و بست بهتر سنگدانه‌ها
کنترل	بر اساس تعداد ضربه	بر اساس تعداد چرخش (Gyrations)
دقت	کمتر در ترافیک‌های سنگین	بسیار بالا در ترافیک‌های سنگین
داده خروجی	پایداری و روانی	نمودار تغییرات چگالی در حین تراکم

□ تجهیزات اصلی (دستگاه تراکم ژیراتوری - SGC)

- قالب استوانه‌ای: قطر ۱۵۰ میلی‌متر (معمولاً)
- واحد فشار قائم: اعمال فشار مشخص (معمولاً ۶۰۰ کیلوپاسکال)
- مکانیزم زاویه‌دهی: اعمال زاویه چرخش (معمولاً ۱.۲۵ درجه)
- سیستم ثبت داده: نمایش لحظه‌ای ارتفاع نمونه در هر چرخش
- تجهیزات جانبی: گرمخانه، ترازوی دیجیتال، میکسر آزمایشگاهی، اکسترودر



□ مراحل ساخت نمونه

۱. **آماده‌سازی:** تعیین و وزن کردن مصالح سنگی و قیر (بر اساس طرح اختلاط)
۲. **اختلاط:** ترکیب مصالح و قیر در دمای معین
۳. **تثبیت دما:** قرار دادن مخلوط در گرمخانه برای رسیدن به دمای تراکم
۴. **تراکم:** ریختن مخلوط در قالب گرم شده و اعمال تعداد چرخ‌های مشخص (Ndesign)
۵. **سرد کردن و خروج:** خروج نمونه از قالب (پس از سرد شدن)

□ **مراحل انجام طرح اختلاط ژیراتوری (Superpave)**

۱. **انتخاب مواد:** انتخاب مصالح سنگی، نوع قیر و مواد افزودنی
۲. **تعیین دانه بندی:** انتخاب ساختار سنگی بر اساس حداکثر اندازه اسمی
۳. **تعیین سطح ترافیک طراحی:** مشخص کردن تعداد چرخش‌های تراکم ($N_{initial}$, N_{design} , N_{max})
۴. **ساخت نمونه‌های اولیه:** ساخت نمونه با درصد‌های مختلف قیر
۵. **تراکم و اندازه گیری:** تراکم نمونه‌ها با دستگاه ژیراتوری و ثبت داده‌های ارتفاع
۶. **تجزیه و تحلیل نتایج:**
 - محاسبه پارامترهای حجمی (AV , VMA , VFA)
 - بررسی نمودار تراکم (نمودار چگالی بر حسب تعداد چرخش)
۷. **انتخاب درصد قیر بهینه:** بر اساس برآورده شدن معیارهای Superpave در تعداد چرخش طراحی (N_{design})

□ مراحل انجام طرح اختلاط ژیراتوری (Superpave)

تعداد چرخش استاندارد ژیراتوری جهت تراکم نمونه ها

تعداد تلاش تراکم (تعداد چرخش)			ترافیک طرح (۲۰ ساله)
Nmax	Ndes	Nini	
۷۵	۵۰	۶	≤ 30000
۱۱۵	۷۵	۷	$30000 - 40000$
۱۶۰	۱۰۰	۸	$40000 - 50000$
۲۰۵	۱۲۵	۹	≥ 50000

۱. سطوح تراکم (تعداد دور چرخش - Gyration Levels)

- در روش Superpave، تراکم در سه سطح کنترل می‌شود تا رفتار مخلوط در مراحل مختلف عمر روسازی پیش‌بینی شود:
- Ninitial (اولیه): کنترل عملکرد در حین حمل‌ونقل و پخش اولیه (جلوگیری از تراکم بیش از حد در هنگام اجرا).
- Ndesign (طراحی): سطح اصلی تراکم برای تعیین درصد قیر بهینه (شبیه‌سازی شرایط بهره‌برداری).
- Nmax (حداکثر): کنترل نهایی برای اطمینان از عدم شیارشدگی در ترافیک‌های بسیار سنگین.

۲. پارامترهای حجمی و چگالی

- درصد فضای خالی (Va): در سطح Ndesign باید دقیقاً ۴٪ باشد. این استاندارد طلایی برای ایجاد تعادل بین انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر شیارشدگی است.
- چگالی (Density): بررسی میزان فشردگی مخلوط با افزایش تعداد دور چرخش؛ ارائه دهنده تصویر روشنی از پایداری ساختاری است.

۳. رفتار مخلوط (عملکرد ترافیکی)

- شیب تراکم (Compaction Slope): نشان‌دهنده سرعت تراکم‌پذیری مخلوط؛ هرچه شیب ملایم‌تر باشد، مخلوط در برابر بارهای ترافیکی مقاوم‌تر است.
- تغییرات حجمی: پیش‌بینی میزان قفل‌وبست سنگدانه‌ها تحت ترافیک واقعی.

□ مزایا و محدودیت‌های روش ژیراتوری

➤ مزایا

- شبیه‌سازی بهتر شرایط واقعی ترافیک نسبت به روش مارشال
- دقت بالاتر در پیش‌بینی عملکرد مخلوط در برابر شیارشدگی و تراکم
- مناسب برای ترافیک سنگین و خیلی سنگین
- امکان ثبت تغییرات تراکم در حین آزمایش
- ارزیابی دقیق‌تر پارامترهای حجمی مانند V_a ، VMA و VFA
- کاهش وابستگی به تجربه شخصی در مقایسه با روش‌های قدیمی‌تر

➤ محدودیت‌ها

- نیاز به تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت
- اجرای آزمایش پیچیده‌تر از روش مارشال
- نیاز به نیروی متخصص و آموزش‌دیده
- حساسیت به دما، رطوبت و شرایط آماده‌سازی نمونه
- زمان‌بر بودن تحلیل نتایج
- هزینه بالاتر در مقایسه با روش‌های سنتی

جدول مقایسه‌ای طرح اختلاط به روش مارشال و ژیراتوری (SuperPave)

ویژگی	روش مارشال	روش ژیراتوری (Superpave)
مبنای طراحی	تجربی (پایداری و روانی)	عملکردی (شبیه‌سازی رفتار تراکمی و تنش-کرنش)
نحوه تراکم	ضربه‌ای (سقوط چکش)	چرخشی/ژیراتوری (فشار قائم + حرکت زاویه‌ای)
دقت و شبیه‌سازی	تقریبی، شبیه‌سازی ضعیف ترافیک سنگین	بالا، شبیه‌سازی بهتر شرایط واقعی و ترافیک سنگین
تجهیزات	ساده‌تر، ارزان‌تر (دستگاه مارشال، قالب)	پیشرفته‌تر، گران‌تر (دستگاه SGC، سنسورها)
هزینه و زمان	کم‌هزینه‌تر، سریع‌تر	پرهزینه‌تر، زمان‌برتر
خروجی آزمایش	پایداری، روانی، درصد هوای مخلوط	نمودار تراکم، درصد هوا، VMA، VFA، شبیه‌سازی بلندمدت
کاربرد	ترافیک کم تا متوسط، جاده‌های فرعی	ترافیک سنگین و خیلی سنگین، بزرگراه‌ها، باند فرودگاه
مزیت اصلی	سادگی و هزینه کم	دقت بالا و پیش‌بینی عملکرد بهتر
محدودیت اصلی	عدم دقت کافی برای ترافیک سنگین	پیچیدگی، هزینه بالا، نیاز به تخصص

سپاسی از حُسن توجه شما