

بررسی الزامات ملات قیر - سیمان بکار رفته در خطوط دالخط راه آهن

مرتضی اسماعیلی^۱، محسن پریچه^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی خط و سازه های ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران

m_pariche@rail.iust.ac.ir

چکیده

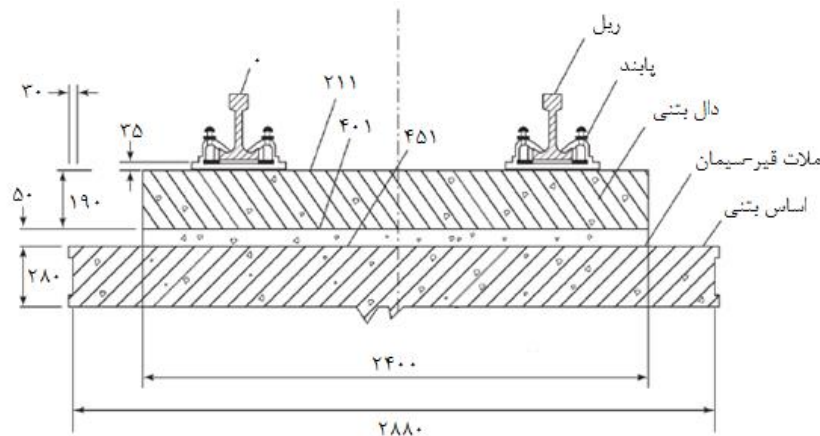
ملات قیر-سیمان از اجزای بسیار مهم سازه دالخط راه آهن سریع السیر می باشد. این ماده به عنوان یک لایه ضربه گیر، بین دال و بستر بتنی تزریق می شود و خصوصیات آن نقش مهمی را در راحتی و ایمنی سفر ایفا می کند. اجزاء تشکیل دهنده ملات قیر-سیمان شامل سیمان، امولسیون قیر، ماسه، آب و افزودنی های شیمیایی می باشد. این ماده عموماً در دالخط هایی که به صورت پیش ساخته اجرا می شوند از جمله خطوط شینکانسن و بوگل، با هدف تنظیم هندسه خط در حین ساخت کاربرد دارد. با توجه به اینکه، این دو نوع خط بیشترین سهم از خطوط صلب ساخته شده در سراسر دنیا را شامل می شوند، بررسی قسمت های مختلف آن نیز امری ضروری می باشد. در این مقاله ابتدا به معرفی ملات قیر-سیمان پرداخته شده است و در ادامه الزامات این نوع ملات در بخش های مختلف از جمله مصالح اولیه و ساخت آن مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ملات قیر-سیمان، دالخط راه آهن، امولسیون قیر، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته

۱- مقدمه

خطوط صلب بدون بالاست یکی از اشکال پیشرفته خطوط ریلی می باشد که در راه آهن سریع السیر بسیاری از کشورها از جمله ژاپن، آلمان و چین به علت مزایای بسیار زیاد آن از قبیل کاهش ارتفاع خط، کاهش تعمیر و نگهداری، افزایش عمر خط و ... به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. خطوط بدون بالاست در شکل های مختلفی از جمله خطوط با تراورس مدفون در بتن، خطوط ریل مدفون، دال های بتنی پیش ساخته و خطوط با رویه آسفالتی ساخته شده اند. تحقیقات آقای میکاس^۱ که بر اساس تاریخچه در دسترس خطوط بدون بالاست ساخته شده در سراسر دنیا می باشد، نشان می دهد که پرفرودارترین سیستم های بدون بالاست در سراسر دنیا خطوط بوگل^۲ آلمان و شینکانسن^۳ ژاپن می باشند. این دو نوع سیستم دالخط پیش ساخته که در ساختار آن از ملات قیر-سیمان استفاده می شود با طول ساخته شده به ترتیب ۴۳۹۱ و ۳۰۴۴ کیلومتر بیشترین کاربرد را در بین سیستم های بدون بالاست را دارا می باشند [۱].

ملات قیر-سیمان، ماده مهندسی برجسته و مهم در سیستم دالخط پیش ساخته از خطوط راه آهن سریع السیر می باشد. این ماده یک ماده مرکب نیمه صلب است که ساختار آن به وسیله هیدراتاسیون سیمان و شکستن امولسیون قیر تشکیل می شود. شکل (۱) مقطع عرضی اسلب ترک بدون بالاست و محل قرارگیری ملات قیر-سیمان را نشان می دهد [۲].



شکل ۱- مقطع عرضی اسلب ترک بدون بالاست (ابعاد به میلی متر) [۳]

ملات قیر-سیمان عموماً شامل سیمان پرتلند، قیر امولسیون، ماسه، آب و افزودنی های شیمیایی است که تاکنون در سیستم دالخط تعداد بسیار زیادی از راه آهن های سریع السیر در کشورهایی از جمله ژاپن، چین، آلمان و فرانسه به کار گرفته شده است [۴]. این ماده به عنوان یک لایه ضربه گیر بین دال و بستر بتنی عمل می کند [۵]. وظایف اصلی ملات قیر-سیمان به عنوان یک لایه ضربه گیر شامل تنظیم و میزان کردن هندسه خط در حین ساخت، استهلاک و کاهش لرزش های خط در هنگام عبور قطار و انتقال نیروهای ایجاد شده در اثر عبور قطار به لایه های زیرین می باشد [۶]. مشخصات ملات قیر-سیمان تأثیر مستقیمی بر روی عملکرد سازه ای سیستم خط دارد و جهت ایمنی، استحکام و میزان راحتی خطوط بدون بالاست بسیار مهم است [۸]. مشخصات مکانیکی ملات قیر-سیمان سخت شده از جمله مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری و خمشی، مشخصات برجسته ای جهت اطمینان از عملکرد مناسب سازه دالخط می باشد [۷]. قیر امولسیون یک مؤلفه مهم و تأثیر گذار در ملات قیر-سیمان است و می توان به کمک مواد پلیمری خواص آن را بهبود بخشید [۹].

آزمایش های انجام شده توسط وانگ و همکاران^۴ بر روی مشخصات ترکیب های قیر-سیمان نشان داد که ملات قیر-سیمان، ترکیبی از مشخصات مخلوط های سیمانی و قیری را با هم داراست. به طور مثال حساسیت کمتر در برابر دما مربوط به بتن و چقرمگی^۵ (سفتی) بیشتر مربوط به بتن آسفالتی را دارا می باشد [۱۰].

^۱ Georgios Michas

^۲ bogl

^۳ shinkansen

^۴ Wang et al

^۵ toughness

مخلوط کردن قیر امولسیون در مخلوط‌های سیمانی، عموماً مقاومت و مدول الاستیسیته آن‌ها را کاهش داده اما قابلیت فرم‌پذیری را بهبود می‌بخشد. وقتی که سیمان پرتلند به مخلوط‌های دارای قیر امولسیون افزوده می‌شود، اثرات سودمندی مانند بهبود خواص مکانیکی و حساسیت در مقابل دما، گزارش شده است [۱۱].

دو کشور ژاپن و آلمان دارای پیشرفته‌ترین خطوط ریلی دنیا هستند و به‌صورت گسترده از ملات قیر-سیمان در خطوط پرسرعت خود بهره می‌برند اما با توجه به سیاست‌های دولت‌هایشان جهت حفظ این تکنولوژی مقاله‌ای را در این راستا به چاپ نرسانده‌اند؛ اما در سال‌های اخیر محققان چینی تحقیقات مختلفی را در زمینه خصوصیات ملات قیر-سیمان از جمله طرح اختلاط، تکنولوژی ساخت، کارپذیری^۱، مقاومت و دوام آن انجام داده‌اند [۱۲]. با توجه به اینکه خصوصیات ملات قیر-سیمان بر عملکرد دال‌خط تأثیر مستقیمی می‌گذارد، نیازمند مطالعات گسترده‌تری در این زمینه می‌باشد. در مقاله حاضر هدف آن است که ضمن معرفی ملات قیر-سیمان، انواع آن و اجزاء تشکیل‌دهنده آن، به بررسی الزامات هر کدام پرداخته شود و در مجموع هدف ایجاد چارچوب اولیه‌ای جهت شروع مطالعات جدی در کشور در زمینه ملات قیر-سیمان می‌باشد.

۲- انواع ملات قیر-سیمان

ملات قیر-سیمان (کوتاه شده به‌صورت ملات CA^۲ که گاهی اوقات به‌صورت CAM^۳ خلاصه می‌شود) یک میان لایه است که در فضای بین دال‌خط و بستر بتنی قرار می‌گیرد و یک جزء کلیدی در سازه خط صلب می‌باشد. در کشورهای مختلف دو نوع ملات قیر-سیمان CAM-I و CAM-II مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الف) ملات CAM-I با مدول الاستیسیته و مقاومت کم که ملات قیر-سیمان «کم مقاومت» نامیده می‌شود و در خطوط شینکانسن ژاپن و همچنین خطوط CRTS-I^۴ چین به ضخامت لایه ۵۰-۷۰ میلی‌متر به کار گرفته می‌شود [۱۳]. مدول الاستیسیته این نوع ملات در بازه ۱۰۰-۳۰۰ مگا پاسکال می‌باشد [۷].

ب) ملات CAM-II با مدول الاستیسیته و مقاومت زیاد که ملات قیر-سیمان «پر مقاومت» نامیده می‌شود و در خطوط بوگل آلمان و همچنین خطوط CRTS-II^۴ چین به ضخامت لایه ۲۰-۴۰ میلی‌متر استفاده می‌شود [۱۳]. مدول الاستیسیته این ملات در بازه ۷-۱۰ گیگا پاسکال است [۷]. شکل (۲) ساختار این دو نوع دال‌خط را نشان می‌دهد. خصوصیات این دو نوع ملات در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات ملات CAM-I و CAM-II [۱۴]

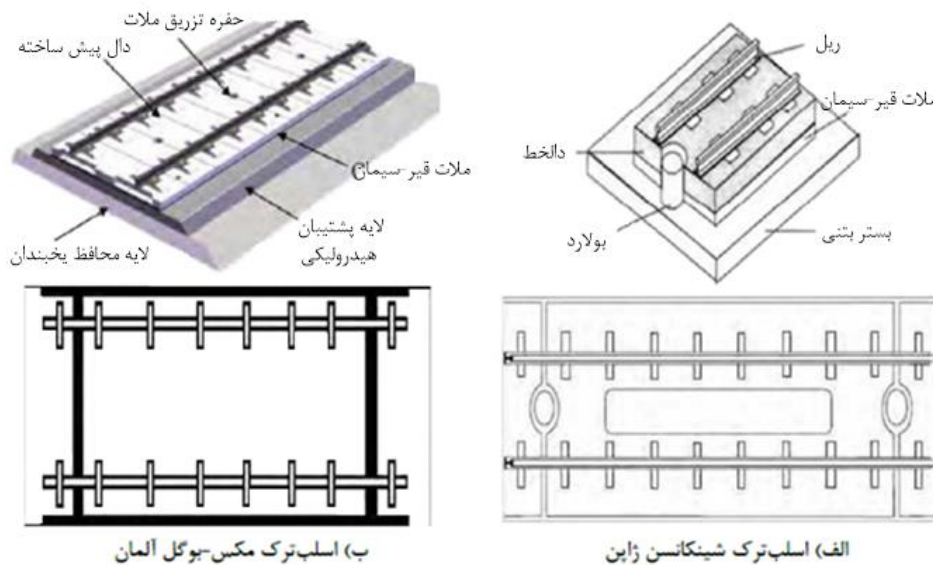
نوع ملات	نوع امولسیون قیر	نسبت قیر به سیمان (A/C)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	مدول الاستیسیته (Mpa)
CAM-I	کاتیونیک	۱٫۴-۱٫۶	> ۱٫۸	۳۰۰-۱۰۰
CAM-II	آنیونیک	۰٫۳-۰٫۴	> ۱۵	۷۰۰۰-۱۰۰۰۰

^۱ workability

^۲ Cement asphalt

^۳ Cement asphalt mortar

^۴ China railway track system



شکل ۲- ساختار فیزیکی دو نوع دالخط شینکانسن و بوگل [۱۴]

۳- اجزای تشکیل دهنده ملات قیر-سیمان و الزامات هر کدام

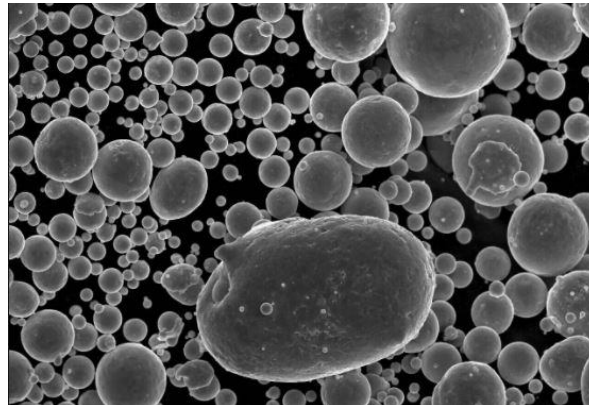
مواد تشکیل دهنده ملات قیر-سیمان با توجه به نوع سیستم دالخط، محل ساخت، در دسترس بودن مصالح، ویژگی‌های موردنیاز ملات و موارد مشابه، می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال نوع سیمان و یا نوع قیر امولسیون و همچنین افزودنی‌های شیمیایی مورد استفاده، می‌تواند با توجه به عوامل بیان شده متغیر باشند. در حالت کلی، در اکثر مقالات و مراجع بررسی شده، مصالحی که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است، در تولید ملات قیر-سیمان استفاده شده‌اند.

۳-۱- سیمان

سیمان ماده‌ای است که گیرش و سخت شدن آن، به واسطه تماس با آب و از طریق واکنشی تحت عنوان هیدراتاسیون صورت می‌گیرد. واکنش هیدراتاسیون که یک فرآیند غیرقابل بازگشت است، در زیر آب نیز می‌تواند انجام شود. این واکنش باعث هیدراته شدن خمیر سیمان و سخت شدن مصالح و به تبع آن مخلوط می‌شود. تقریباً در تمام مراجع، مقالات و مطالعات صورت گرفته، از سیمان پرتلند معمولی برای تهیه ملات قیر-سیمان استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان‌های مورد استفاده تفاوت کمی با هم دارند [۱۵].

۳-۲- امولسیون قیر

قیر امولسیون مخلوطی از قیر، آب و ماده امولسیون ساز است. از آنجایی که قیر در آب حل نمی‌شود، وقتی با هم ترکیب می‌شوند، همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، در فازهای مجزایی در مخلوط قرار دارند. قیر داغ و آب حاوی ماده امولسیون ساز (به عنوان مثال، صابون)، برای اینکه گلبول‌های بسیار ریز (کمتر از ۵-۱۰ میکرون) یا قطرات قیر معلق در آب تولید شود، به وسیله آسیاب کلونیدی تحت فشار قرار می‌گیرند. ماده امولسیون ساز یک بار الکتریکی را در سطح قطرات ایجاد می‌کند که باعث می‌شود یکدیگر را دفع کرده و بنابراین به هم متصل نشوند [۱۶].



شکل ۳- ساختار قیر امولسیون [۱۶]

قیرهای امولسیون به عنوان قیرهای مایع طبقه بندی می شوند، چراکه برخلاف قیر خالص، در دمای محیط مایع هستند [۱۶].
دو نوع از معمول ترین انواع امولسیون قیر که در ASTM^۱ تعریف شده اند، عبارتند از:

- ۱- امولسیون قیر آنیونیک
- ۲- امولسیون قیر کاتیونیک

اگر ماده امولسیون ساز آنیونی باشد، ذرات قیر بار منفی و اگر کاتیونی باشد، ذرات قیر بار مثبت پیدا می کنند. سنگ دانه های معدنی، بار مثبت، منفی و یا ترکیبی از هر دو نوع بار را بر روی سطح دارند. بیشتر سنگدانه های سیلیسی مانند ماسه سنگ، کوارتز، دارای بار منفی هستند؛ بنابراین عموماً قابل ترکیب با قیرهای کاتیونی می باشند. از طرف دیگر، بعضی سنگدانه ها از جمله سنگدانه های آهکی، بار مثبت سطحی دارند و بنابراین عموماً با قیرهای امولسیون آنیونی قابل ترکیب هستند. این موضوع به این دلیل اتفاق می افتد که بارهای غیرهمنام، یکدیگر را جذب می کنند. مقدار ماده امولسیون ساز بسیار کم و در حدود ۰٫۳ تا ۰٫۵ درصد وزنی قیر است. مقدار آب مصرفی این نوع قیر در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد وزن قیر است. ماده امولسیون ساز معمولاً یک نمک قلیایی، اسیدهای آلی یا نمک آمونیوم است که باعث باردار شدن ذرات قیر می شود [۱۶].
در تعیین مشخصات و کنترل کیفی قیرهای امولسیونی از آزمایش های نقطه، کندروانی سی بولت فیورول، شناوری، قابلیت لخته شدن، الک کردن و بار ذره ای استفاده می شود [۱۷].

استفاده از این نوع قیر، باعث کاهش آلاینده گی محیط زیست می شود و چون از نفت یا حلال های قابل اشتعال استفاده نمی شود، خطر اشتعال در حین حمل و نقل قیر کاهش می یابد. از قیر امولسیون برای آسفالت سرد در محیط های مرطوب یا برای عایق کاری نیز استفاده می شود.
امولسیون های قیری از نظر سرعت شکسته شدن به چهار دسته سریع شکن (QS^۲)، زود شکن (RS^۳)، کند شکن (MS^۴) و دیر شکن (SS^۵) طبقه بندی می گردند.

امروزه علاوه بر قیر و مصالح سنگی تشکیل دهنده مخلوط های آسفالتی، از مواد دیگری به نام افزودنی ها و یا اصلاح کننده های قیر استفاده می شود. این ترکیبات که طیف وسیعی از مواد معدنی، آلی، طبیعی و صنعتی را دربرمی گیرد، به منظور اصلاح برخی از خواص قیر و در نتیجه مخلوط های آسفالتی به شرح موارد زیر کاربرد دارند.

- ✓ جلوگیری از عریان شدن سنگدانه های مخلوط های آسفالت
- ✓ جلوگیری از ایجاد ترک های حرارتی و انقباضی در رویه های آسفالتی
- ✓ کاهش پدیده های تغییر شکل و قیرزدگی رویه های آسفالتی

^۱ The American Society for Testing and Materials

^۲ Quick set

^۳ Rapid set

^۴ Medium set

^۵ Slow set

- ✓ تأخیر و جلوگیری از رو آمدن ترک‌های آسفالتی
- ✓ کاهش پدیده سخت شدن و پیر شدن قیر
- ✓ افزایش تاب خستگی آسفالت
- ✓ کاهش حساسیت قیر به درجه حرارت
- ✓ افزایش چسبندگی و افزایش مقاومت کششی

به‌طور کلی افزودنی‌های مصرفی باید با قیرهای خالص یا قیرابه‌های انتخاب‌شده در هر پروژه سازگاری داشته و قیر اصلاح‌شده نیز قبل از مصرف مورد آزمایش قرار گیرد تا مطابقت آن با مشخصات ارزیابی شود. ازجمله این قیرهای اصلاح‌شده می‌توان به قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک، قیرهای اصلاح‌شده با مواد شیمیایی تثبیت‌کننده و قیرابه‌های اصلاح‌شده با پلیمر را نام برد [۱۸].

در جدول (۲) و (۳) نوعی از الزامات لازم برای امولسیون قیر پلیمری اصلاح‌شده نشان داده شده است. ازجمله الزامات مهم برای امولسیون قیر شامل میزان قیر، امتزاج‌پذیری با سیمان، دمای اختلاط، نسبت مخلوط آب، زمان اختلاط و کارپذیری آن می‌باشد [۳].

جدول ۲- الزامات امولسیون قیر اصلاح‌شده پلیمری آنیونیک [۳]

الزامات	روش آزمایش	واحد	نوع آزمایش
< 0.1	ASTM D244 [19]	%	آزمون عبوری از الک ۱۶ (۱.۱۸ mm)
قهوه‌ای، صاف، بدون ناخالصی	-	-	ظاهر
منفی	ASTM D244 [19]	-	بار ذرات
> 20	ASTM D244 [19]	s	ویسکوزیته (سی بولت فیورل، 25°C)
< 1	ASTM D244 [19]	%	پایداری ذخیره‌سازی (۱ روزه، 25°C)
< 5	ASTM D244 [19]	%	پایداری ذخیره‌سازی (۵ روزه، 25°C)
≤ 1000	ASTM D2171 [20]	Mpa s	ویسکوزیته brookfeild (40°C)
pass	ASTM D244 [19]	-	امتزاج‌پذیری
$5-35$	-	$^{\circ}\text{C}$	دمای تخلیه الکتریکی
بدون لخته شدن	ASTM D244 [19]	%	پایداری ذخیره‌سازی دمای پایین (۱ روزه، -5°C)
≤ 7		μm	میانگین اندازه ذرات
≤ 5		μm	مد اندازه ذرات
≥ 60	ASTM D244 [19]	%wt	خصوصیات قیر باقیمانده از تقطیر میزان قیر
$40 - 120$	ASTM D5 [21]	mm	میزان نفوذ (25°C , 100 g, 5s)
≥ 42	ASTM D36 [22]	$^{\circ}\text{C}$	نقطه نرم‌شدگی
≥ 97	ASTM D244 [19]	%	انحلال‌پذیری
≥ 100	ASTM D113 [23]	cm	انعطاف‌پذیری (25°C)
≥ 20	ASTM D113 [23]	cm	انعطاف‌پذیری (5°C)

جدول ۲- الزامات امولسیون قیر اصلاح شده پلیمری کاتیونیک [۲]

نوع آزمایش	واحد	روش آزمایش	الزامات
آزمون عبوری از الک ۱۶ (۱,۱۸ mm)	%	ASTM D244 [19]	< ۰,۱
ظاهر	-	-	قهوه‌ای، صاف، بدون ناخالصی
بار ذرات	-	ASTM D244 [19]	مثبت
ویسکوزیته (انجلا، 25 °C)	s	ASTM D244 [19]	۵-۱۵
پایداری ذخیره‌سازی (۱ روزه، 25 °C)	%	ASTM D244 [19]	< ۱
پایداری ذخیره‌سازی (۵ روزه، 25 °C)	%	ASTM D244 [19]	< ۵
امتزاج‌پذیری	%	ASTM D244 [19]	< ۱
دمای تخلیه الکتریکی	°C	-	۵-۳۵
پایداری ذخیره‌سازی دمای پایین (۱ روزه، -5 °C)	%	ASTM D244 [19]	بدون لخته شدن
خصوصیات قیر باقیمانده از تقطیر	%wt	ASTM D244 [19]	۵۸-۶۳
میزان قیر	mm	ASTM D5 [21]	۶۰-۱۲۰
میزان نفوذ (25 °C, 100 g 5s)	mm	ASTM D5 [21]	۶۰-۱۲۰
نقطه نرم‌شدگی	°C	ASTM D36 [22]	≥ ۴۲
انحلال‌پذیری	%	ASTM D244 [19]	≥ ۹۷
انعطاف‌پذیری (15 °C)	cm	ASTM D113 [23]	≥ ۵۰
انعطاف‌پذیری (5 °C)	cm	ASTM D113 [23]	≥ ۲۰

۳-۳-۳- ماسه

مطابق سیستم طبقه‌بندی AASHTO^۱، ماسه از دانه‌های سنگی کوچکی تشکیل شده که اندازه آن بین ۰,۰۷۵ تا ۲ میلی‌متر (الک‌های شماره ۱۰ تا ۲۰۰) است. ماسه‌ها به صورت طبیعی در رسوبات جابجا شده وجود دارند، به خصوص در محیط‌های دریایی و یا رودخانه‌ای، گرچه بعضی از ماسه‌های درشت‌تر به عنوان محصولات جانبی حاصل از خرد کردن و شکستن سنگ به دست می‌آیند. ماکزیمم اندازه سنگ‌دانه‌های به کار رفته در این نوع ملات ۱,۱۸ میلی‌متر (عبوری از الک شماره ۱۶) است. سنگ‌دانه‌های بکار رفته باید الزامات جدول (۴) را رعایت کنند [۳].

جدول ۴- الزامات سنگدانه بکار رفته در ملات قیر-سیمان [۳]

نوع آزمایش	واحد	روش آزمایش	الزامات
مدول نرمی	-	ASTM C117 [24] ASTM C29 [25]	۱,۴ - ۱,۸
چگالی ظاهری	g/cm ³	-	≥ ۲,۵۵
جذب آب	%	ASTM C127 [26]	< ۳
میزان گرد و غبار	%	-	< ۱
میزان مواد مضر	%	-	< ۲
سنجش رنگ مواد مرکب	-	-	روشن‌تر از استاندارد
مواد مرکب اکسیده	%	-	< ۰,۰۲
میزان سولفید (SO ₃)	%	-	≤ ۰,۵
پتانسیل واکنش‌پذیری قلیایی سنگدانه‌ها	%	ASTM C289 [27]	≤ ۰,۱

^۱ Association of State Highway and Transportation Officials

۳-۴- آب

در ملات قیر-سیمان، آب مورد نیاز مخلوط شامل آب موجود در قیر امولسیون و آب اضافی می باشد. با توجه به کاهش مقاومت ملات قیر-سیمان بر اثر افزایش دمای آب [۲] در همه مراجع، از آب شهری با دمای عادی محیط به عنوان آب اضافی برای ساخت ملات استفاده شده است.

۳-۵- افزودنی های شیمیایی

در مطالعات مختلف از افزودنی های شیمیایی متفاوت با غلظت های متغیر استفاده شده است. از جمله این افزودنی ها می توان انواع مختلف مواد هوازا، کف زدا، پودر آلومینیوم، فوق روان کننده و ماده اصلاح غلظت (VMA)^۱ را نام برد. مواد هوازا به منظور آب بند کردن لایه ملات قیر-سیمان و همچنین افزایش مقاومت در مقابل حمله سولفات ها به ملات اضافه می شود. عامل کف زدای سیلیسی برای برطرف کردن هوای وارد شده به مخلوط ملات یا کم کردن اندازه حباب های آن، مورد استفاده قرار می گیرد. این مواد فقط برای آب و هوای سرد به کار می رود. پودر آلومینیوم جهت بهتر نمودن عملیات پر کردن فضای زیر دال خط با ایجاد امکان انبساط ملات ملات قیر-سیمان قبل از سخت شدن آن به کار می رود [۳]. از افزودنی های فوق روان کننده به منظور افزایش روانی مخلوط به میزان مورد نیاز و از ماده اصلاح غلظت به منظور افزایش روانی و همچنین جلوگیری از جدایش ملات استفاده می شود.

۴- الزامات عملکردی انواع ملات قیر-سیمان

در اکثر مراجع جهت داشتن یک ملات قیر-سیمان موفق الزامات عملکردی تنظیم شده در جداول (۵) و (۶) که به ترتیب برای انواع کاتیونیک (کم مقاومت) و آنیونیک (پر مقاومت) می باشند باید رعایت شود [۳].

جدول ۵- الزامات ملات قیر-سیمان نوع امولسیون کاتیونیک [۳]

شماره	نوع آزمایش	واحد	الزامات
۱	دمای ملات	°C	۵-۴۰
۲	روانی	s	۱۸-۲۶
۳	کارپذیری	دقیقه	≥ ۳۰
۴	میزان هوا	%	۸-۱۲
۵	چگالی ظاهری	Kg/m ³	≥ ۱۳۰۰
۶	مقاومت فشاری (۱ روزه)	Mpa	≥ ۰.۱
	مقاومت فشاری (۷ روزه)		≥ ۰.۷
	مقاومت فشاری (۲۸ روزه)		≥ ۱.۸
۷	مدول الاستیسیته (۲۸ روزه)	Mpa	۱۰۰-۳۰۰
۸	نرخ جدایش	%	≤ ۱
۹	میزان تغییر حجم	%	۱-۳
۱۰	بالا زدگی قیر	%	۰
۱۱	میزان اتلاف دوره ذوب-یخ (۲۸ روزه)	-	پس از ۳۰۰ سیکل ذوب-یخ مدول دینامیکی نسبی $\leq 60\%$ کاهش وزن $> 5\%$
۱۲	آزمایش های هوازدگی (۲۸ روزه)	-	بدون پوسته، ترک نسبت مقاومت فشاری

^۱ Viscosity modifying admixtures

جدول ۶- الزامات ملات قیر-سیمان نوع امولسیون آنیونیک [۲]

شماره	نوع آزمایش	واحد	الزامات
۱	دمای ملات	$^{\circ}\text{C}$	۵-۲۵
۲	گسترش دادن و عبور	-	ASTM D5: $\geq 280 \text{ mm}, T 280 \leq 16 \text{ s}$ ASTM D30: $\geq 280 \text{ mm}, T 280 \leq 22 \text{ s}$
۳	روانی	s	۸۰-۱۲۰
۴	نرخ جداسازی	%	< ۳
۵	میزان هوا	%	< ۱۰
۶	چگالی ظاهری	Kg/m^3	≥ 1800
	میزان تغییر حجم	%	۰-۲
۷	مقاومت خمشی (۱ روزه)	Mpa	≥ 1
	مقاومت خمشی (۷ روزه)		≥ 2
	مقاومت خمشی (۲۸ روزه)		≥ 3
۸	مقاومت فشاری (۱ روزه)	Mpa	≥ 2
	مقاومت فشاری (۷ روزه)		≥ 10
	مقاومت فشاری (۲۸ روزه)		≥ 15
۹	مدول الاستیسیته (۲۸ روزه)	Mpa	۷۰۰۰-۱۰۰۰۰
۱۰	میزان اتلاف دوره ذوب-یخ (۲۸ روزه)	-	بدون شکست در سطح $2000 \text{ g/m}^2 < \text{اتلاف جرم}$ نسبت مدول دینامیکی بزرگتر از ۶۰٪
۱۱	آزمایش خستگی (۲۸ روزه)	-	بدون ترک خوردگی بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل

۵- الزامات مربوط به کنترل کیفیت مواد اولیه

کیفیت مواد اولیه تأثیر زیادی بر عملکرد و کیفیت ساخت ملات قیر-سیمان دارد. برای اطمینان از عملکرد خدمت و پایداری سازه، اقدامات جدی برای کنترل کیفیت مواد اولیه باید صورت گیرد.

۵-۱- الزامات فنی

ملات قیر-سیمان یک ماده چندجزئی و چندفازه بوده که به پایداری و سازگاری خوب مواد اولیه آن نیاز دارد. برای رسیدن به این الزامات، موارد زیر باید در نظر گرفته شود.

(۱) امولسیون قیر با اثرات چسبندگی و سفت شوندگی خوب، جزء اصلی ملات قیر-سیمان است و سازگاری بین امولسیون قیر و سیمان بیشتر باید مورد توجه قرار گیرد.

(۲) مخلوط خشک ملات نقش مهمی در عملکرد کلی آن ایفا می کند. با توجه به انقباض های بزرگ در حین گیرش و سخت شدن، مخلوط خشک باید انبساط ویژه ای را برای ملات قیر-سیمان فراهم کند، بنابراین به منظور اطمینان از پایداری، می بایست به نسبت انبساط، توجه ویژه ای شود. در بسیاری از کاربردهای مهندسی نهایتاً برای رسیدن نسبت انبساط در محدوده ۰.۲-۰ درصد برای ملات قیر-سیمان، نسبت انبساط مخلوط خشک ملات باید به ۱-۳ درصد برسد. همچنین مشاهده شده است که دانه بندی و حداکثر اندازه ی ذرات مخلوط خشک ملات تأثیر زیادی در کارپذیری، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته ملات قیر-سیمان دارد.

(۳) برای تفاوت در ساخت و سازهای فصلی، مواد اولیه ملات، به ویژه مخلوط خشک ملات و روان کننده نیاز است که پیش تر بر طبق الزامات فنی توصیه شده (جدول ۸) تنظیم شود [۲۸].

۵-۲- حمل و ذخیره سازی

کیفیت مواد اولیه به سادگی تحت عواملی نظیر مسافت حمل، مدت زمان ذخیره سازی و شرایط محیطی شامل درجه حرارت و رطوبت، تأثیر می پذیرد. چندین نکته در این رابطه وجود دارد که باید در نظر گرفته شود:

- (۱) مخازن خاصی برای ذخیره سازی امولسیون قیر مناسب هستند. مخازنی که دارای دستگاه همزن و دستگاه کنترل خودکار دما باشد زیرا دما مهم ترین عامل تأثیر گذار بر امولسیون قیر است.
- (۲) علاوه بر دما، عامل مهم دیگر که بر خصوصیات مخلوط خشک ملات تأثیر می گذارد، رطوبت محیط است. در طی حمل و ذخیره سازی مخلوط خشک ملات، باید از خطر رطوبت در امان باشد.
- (۳) مواد اولیه بایستی به صورت جداگانه در دسته های مختلف ذخیره شوند.
- (۴) باید در نظر داشت که درجه حرارت ذخیره سازی مواد اولیه باید در محدوده ۵-۳۰ درجه سانتی گراد کنترل شود [۲۸].

۶- الزامات مربوط به طرح اختلاط ملات قیر-سیمان و تنظیم آن بسته به شرایط دمایی

برای رسیدن به سازه ای با کارایی پرکنندگی مناسب، طراحی نسبت اختلاط ملات قیر-سیمان امری کاملاً ضروری است. پارامترهای توصیه شده نسبت اختلاط در جدول (۷) ذکر شده است.

جدول ۷- طرح اختلاط توصیه شده ($\frac{kg}{m^3}$) [۲۸]

ماده کفزا	روان کننده	آب	مخلوط خشک ملات	امولسیون قیر	اجزا
۱،۲ ≤	۱-۱۰	۱۲۰-۱۶۰	۱۴۶۰-۱۵۰۰	۲۵۰-۲۸۰	مقادیر توصیه شده

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، نسبت اختلاط باید از طریق تغییر نوع و ترکیب مواد اولیه، تکنولوژی و پارامترهای اختلاط که به مواد اولیه وابسته هستند، نوع تجهیزات، شرایط محیط ساخت و غیره تنظیم شود. به علاوه، نتایج نهایی به وسیله تست های فنی و بازرسی ها تعیین خواهند شد. همان طور که ذکر شد، خصوصیات ملات CA نسبت به دما حساس است. در این مورد، پارامترهای نسبت اختلاط و ترکیب مواد باید در زمان های مختلف موازی با تغییرات دمایی محیط، مواد اولیه و ملات تازه اصلاح شود.

روش تنظیم مناسب و محدوده تنظیم در جدول (۸) داده شده است که در آن نوع و مقدار روان کننده، هنگامی که دمای محیط تغییر می کند، تنظیم می شود [۲۸].

جدول ۸- محدوده و روش تنظیم [۲۸]

آب (Kg/m^3)	ماده کفزا (Kg/m^3)	روان کننده (Kg/m^3)	مخلوط خشک ملات	امولسیون قیر (Kg/m^3)	درجه حرارت محیط ($^{\circ}C$)
±۵	۱،۲ - ۰،۶	مقاومت زود	فرمول زمستانی	کاهش ۱۵ - ۱۰	کم ۱۰ - ۵
±۵	۰،۶ - ۰،۴	استاندارد	فرمول معمولی	متوسط	معمولی ۲۵ - ۱۵
±۱۰	۰،۴ - ۰،۲	به تأخیر انداختن مقاومت	فرمول تابستانی	افزایش ۱۵ - ۱۰	زیاد ۴۰ - ۳۰

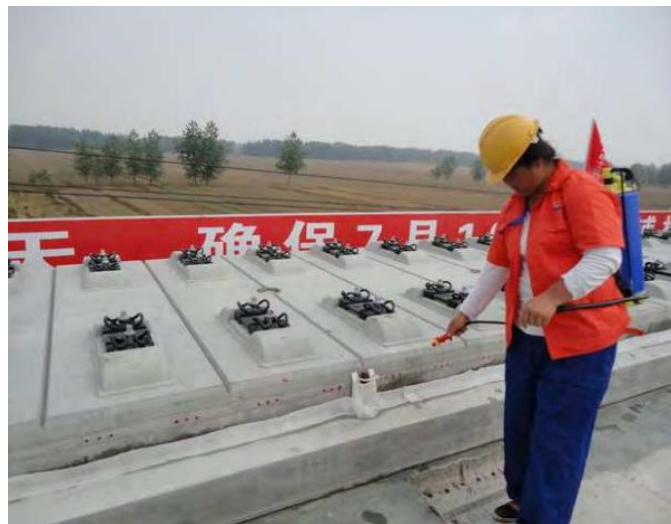
۷- الزامات مربوط به ساخت و اجرای ملات قیر-سیمان

برای به دست آوردن کیفیت پایدار، فرآیند پیشرفته، تجهیزات قابل اعتماد و سازنده‌های حرفه‌ای، نسبت اختلاط، تکنولوژی اختلاط، تکنولوژی تزریق، سازماندهی کارکنان و طرح‌های اضطراری باید از طریق تست‌های فنی قبل از کاربردهای عملی تعیین شوند. اخیراً تجربه نشان داده است که واحدهای ساخت باید اهمیت تست‌های فنی را بدانند (تجربیات حاصل از راه‌آهن سریع‌السیر بیجینگ-شانگهای^۱ و راه‌آهن سریع‌السیر شانگهای-هانگژو^۲).

۷-۱- کنترل تکنولوژی ساخت

هر حلقه از زنجیره ساخت به خصوصیات مکانیکی، دوام و طول عمر ملات قیر-سیمان در درجه‌های مختلف وابسته است. به‌منظور اطمینان از کیفیت ساخت، فرآیند ساخت ملات دائماً باید کنترل شود. به‌طور ویژه، فرآیندهای کلیدی و مهم به نظارت نیاز داشته و باید به‌وسیله کارکنان مخصوص بازرسی شوند.

۱- خیس کردن: خیس کردن لایه تکیه‌گاهی و دال‌خط یکی از فرآیندهای مهم در اجرای ملات قیر-سیمان است. تأکید بیشتر در خیس کردن لایه تکیه‌گاهی به علت تخلخل بالای آن است. تجربیات مهندسی نشان داده‌اند که رایج‌ترین علت کیفیت نامناسب ملات، خیس کردن نامناسب است (شکل‌های ۴ و ۵). فاصله زمانی از خیس کردن تا تزریق در تابستان ۲-۳ ساعت و در زمستان ۳-۵ ساعت است [۲۸].



شکل ۴- خیس کردن به‌وسیله آب‌پاش [۲۸]



شکل ۵- تشخیص کیفیت نامناسب به علت خیس کردن نامناسب [۲۸]

^۱ Beijing-Shanghai high-speed railway

^۲ Shanghai-Hangzhou high-speed railway

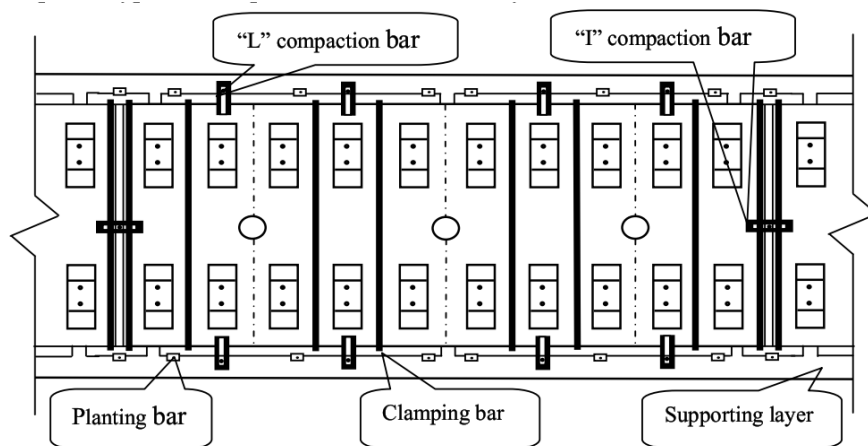
۲- تجهیزات تراکم: عملکرد اصلی تجهیزات تراکم حفظ موقعیت و هندسه دال خط پس از تزریق است. سه نکته مهم که باید روی آن تمرکز شود عبارت‌اند از:

الف) عمق کاشت نوار تراکم

ب) مقدار تراکم

ج) محل تراکم

شکل‌های ۶ و ۷ یکی از انواع بهینه تجهیزات تراکم که معمولاً در اجرای ملات قیر-سیمان در خطوط پرسرعت چین استفاده می‌شود را نشان می‌دهد.



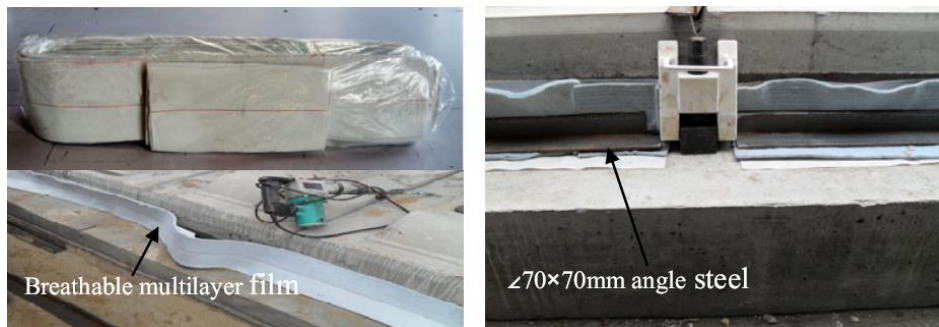
شکل ۶- تجهیزات تراکم [۲۸]



شکل ۷- تجهیزات بسته‌شده برای تنظیم دال در خط CRTS II راه آهن پرسرعت جینگ-هو^۱ [۲۸]

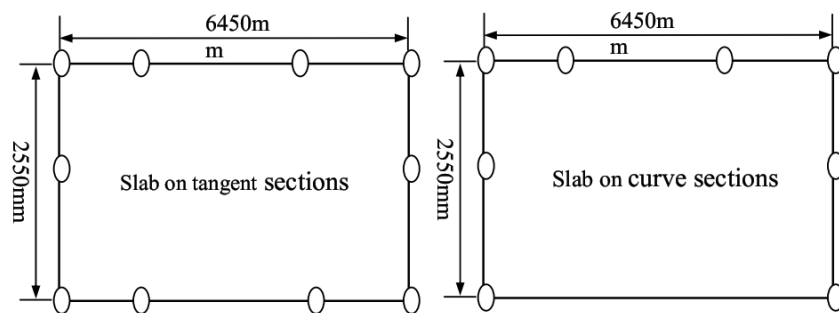
۳- بانداژ کردن لبه‌ها و مرتب کردن درگاه‌های تخلیه هوا: اخیراً روشی جدید با استفاده از فولاد گوشه‌دار و غشاء چندلایه با قابلیت انتقال هوا اجرا شده است که کاربردهای گسترده‌ای در بانداژ لبه‌ها دارد که مزایایی از قبیل راندمان ساخت بالا، خروج خوب گاز و خیس کردن آسان داشته و همچنین تأثیر کمتری روی تنظیم خوب در مقایسه با ملات سیمان و یا قاب‌های چوبی دارد (شکل ۸) [۲۸].

^۱ Jing-Hu high-speed railway



شکل ۸- بانداژ کردن لبه‌ها [۲۸]

آرایش درگاه‌های تخلیه نیز بسیار مهم است. تعداد درگاه‌های تخلیه برای بخش‌های مماسی بیشتر از ۱۰ و برای بخش‌های منحنی بیشتر از ۶ عدد است. زاویه بین درگاه تخلیه و لایه تکیه گاهی حدود ۱۵ درجه است که به‌طور مؤثر مشکل حباب‌های بیش‌ازحد در سطح ملات را حل می‌کند. شکل ۹ آرایش درگاه‌های تخلیه در دو بخش مماسی و منحنی را نشان می‌دهد.



شکل ۹- آرایش درگاه‌های تخلیه [۲۸]

۴- تزریق: در عمل، تزریق فرآیندی بسیار مهم بوده که مسئولیت اصلی کیفیت ملات قیر-سیمان را بر عهده دارد. مدت‌زمان تزریق و سرعت تزریق به‌عنوان دو پارامتر اصلی تأثیرگذار شناخته می‌شوند که الزامات متفاوتی دارند. به‌طور کلی مدت‌زمان تزریق بین ۴-۶ دقیقه در بخش مماسی و ۵-۸ دقیقه در بخش‌های منحنی است. سرعت تزریق نیز باید به‌صورت یک‌نواخت بوده و هرگز نباید فرآیند تزریق تا انتها قطع گردد. شکل ۱۰ یک خروجی خاص و قیف تزریق را نشان می‌دهد که در عملیات مهندسی جهت تزریق ملات بکار می‌رود.

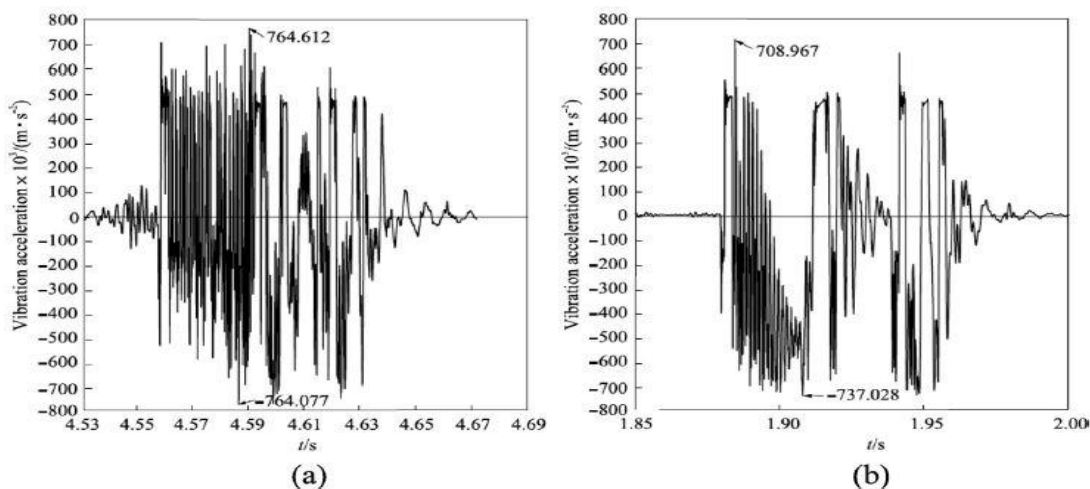


شکل ۱۰- یک اگزوز خاص و قیف تزریق [۲۸]

۵- عمل آوری: همانند عمل آوری بتن، برای اطمینان از رسیدن به عملکرد و عمر مورد انتظار طراحی، عمل آوری مناسب ملات قیر-سیمان خیلی مهم است. به این منظور، محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌ای برای عمل آوری آن بلافاصله بعد از تزریق، نه تنها در دما و رطوبت عمل آوری بلکه در مدت زمان عمل آوری در نظر گرفته می‌شود. عمل آوری سنتی و مرسوم، با استفاده از آب‌پاشی و پوشیدن آن به وسیله گونی انجام می‌شد که به خصوص در تابستان و زمستان زیاد مناسب نبوده و در نتیجه، چنین عمل آوری منجر به کاهش مقاومت ملات می‌شود و حتی ترک‌های انقباضی بزرگی را در بین دالخط و ملات ایجاد می‌کند. غشاء چندلایه باقابلیت انتقال هوا نباید در مدت کمتر از ۷ روز برداشته شود زیرا این غشاء با حفظ درجه حرارت و رطوبت مواد نقش مهمی در عمل آوری ایفا می‌کند [۲۸].

۸- مقایسه بتن معمولی و ملات قیر-سیمان

نمودارهای شکل ۱۱ منحنی تغییرات شتاب-زمان ناشی از ضربه چکش روی نمونه های بتنی و ملات قیر-سیمان را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۱-b مشخص است، ملات قیر-سیمان دارای سه دوره میرایی می باشد که با منحنی شتاب-زمان نمونه های بتنی متفاوت است. در آخرین دوره میرایی، تغییرات شتاب ملات قیر-سیمان سریعاً به صفر تقلیل پیدا می‌کند. از این گذشته، زمان مورد نیاز برای تقلیل شتاب به 0.1g پس از ضربه برای نمونه های بتنی ۰.۰۹۶ ثانیه و برای نمونه های ملات قیر-سیمان ۰.۰۸۴ ثانیه می باشد؛ که این نشان دهنده خصوصیات جذب ارتعاش بهتر ملات قیر-سیمان نسبت به بتن می باشد.



شکل ۱۱- منحنی تغییرات شتاب-زمان تحت اثر ضربه چکش، (a) نمونه بتنی، (b) نمونه ملات قیر-سیمان [۲۹]

علاوه بر خصوصیت جذب ارتعاش بهتر این نوع ملات نسبت بتن، آزمایشات انجام گرفته توسط ژنگ و همکارانش^۱ نشان داده است که مقاومت ملات قیر-سیمان در مقابل ضربه نسبت به بتن بیشتر می باشد. همانطور که از جدول ۹ ملاحظه می شود، بتن گرید C50 تنها ۲ ضربه و بتن C30 تنها یک ضربه را تحمل می کند. این در حالی است که ملات قیر-سیمان با وجود مقاومت فشاری بسیار کمتر (۲.۵ Mpa) نسبت به نمونه های بتنی قادر به تحمل ۵-۷ ضربه می باشد.

جدول ۹- میزان مقاومت در مقابل ضربه نمونه های بتنی و نمونه های ملات قیر-سیمان [۲۹]

شماره	نمونه	تعداد ضربات	انرژی ضربه (ژول)
۱	بتن (C50)	۲	۲۰۴,۳
۲	بتن (C50)	۲	۲۰۴,۳
۳	بتن (C30)	۱	۱۰۲,۲
۴	ملات قیر-سیمان	۵	۵۱۱
۵	ملات قیر-سیمان	۷	۷۱۵,۳

^۱ Zeng X.H. et al

همچنین جذب انرژی توسط نمونه های ملات قیر-سیمان بسیار بیشتر از نمونه های بتنی است. دلیل این موضوع نیز همانطور که از شکل ۱۲ ملاحظه می شود، تغییر شکل ملات قیر-سیمان تحت اثر ضربه می باشد، که این تغییر شکل منجر به جذب انرژی ضربه می شود. در حالی که بتن قادر به تحمل تغییر شکل های بزرگ نبوده و سریعاً می شکند [۲۹].



شکل ۱۲- نمونه ها بعد از ضربه، (a) نمونه بتنی، (b) نمونه ملات قیر-سیمان [۲۹]

در کنار تمام مزایای ذکر شده برای ملات قیر-سیمان جهت استفاده در خطوط دالخط راه آهن، معایبی نیز وجود دارد که البته با اجرای صحیح و انجام مناسب و به موقع عملیات تعمیر و نگهداری قابل رفع می باشد. از معایب اصلی ملات قیر-سیمان می توان به محدودیت های اجرایی آن که مهمترین آن روانی ملات و زمان کارپذیری آن اشاره کرد. از دیگر معایب این نوع ملات حساس بودن خصوصیات مکانیکی و دینامیکی آن به شرایط محیطی محل پروژه (درجه حرارت و چرخه های ذوب و یخ) می باشد. که دلیل اصلی آن نیز وجود قیر در این نوع ملات می باشد. جهت رفع این مشکل می بایست میزان قیر بهینه در ملات، بسته به شرایط محیطی محل پروژه با استفاده از آزمایشات مکانیکی و دینامیکی تعیین شود.

۹- جمع بندی

همانطور که بیان شد ملات قیر-سیمان از اجزاء مهم خطوط دالخط پیش ساخته راه آهن ژاپن، آلمان، چین و بسیاری از کشورهای دیگر می باشد؛ اما با توجه به اینکه در خطوط دالخط راه آهن جمهوری اسلامی ایران بیشتر از طرح های دالخط با تراورس مدفون در بتن همانند طرح های Rheda2000 و Rheda2000 استفاده می شود و طرح های با دال پیش ساخته با وجود مزایای بسیار زیاد آن نسبت به سایر طرح ها به دلیل نبود دانش فنی کافی و همچنین نبود امکانات لازم جهت اجرای آن به کار نمی رود، در نتیجه تلاشی جهت شناخت ملات قیر-سیمان صورت نگرفته است؛ اما با توجه به سیاست های راه آهن جمهوری اسلامی ایران در مورد افزایش حجم ترافیک و سرعت خطوط، ممکن است در سال های آینده طرح های پیش ساخته پیشنهاد شود و لازم است که با توجه به شرایط فعلی کشور و نیاز به استفاده از تکنولوژی های داخلی در رابطه با خصوصیات مختلف ملات قیر-سیمان و تطبیق آن با شرایط اقلیمی ایران تحقیقاتی صورت گیرد. در پژوهش حاضر جهت آشنایی محققان مختلف کشور با این ماده ابتدا به معرفی این نوع ملات، انواع مختلف آن، الزامات هر نوع و همچنین به بیان اجزاء مختلف آن و الزامات مورد نیاز هر کدام از اجزا پرداخته شد و در نهایت نیز در مورد تکنولوژی ساخت و اجرای آن به بیان تعدادی از الزامات مورد نیاز این نوع ملات جهت استفاده در خطوط سریع السیر پرداخته شده است. امید است تا این مطالعه شروع تحقیقات آتی محققان کشورمان در مورد این نوع ملات باشد.

۱۰- مراجع

- [1] Michas, G. (2012). "Slab track systems for high-speed railways".
- [2] Shuguang, H., Z. Yunhua, and W, Fazhou. (2012). "Effect of temperature and pressure on the degradation of cement asphalt mortar exposed to water". Construction and Building Materials, 34: p. 574-570.
- [3] Hunter, R.N., A. Self, and J, Read. (2015). "The shell bitumen handbook". ICE Publishing London.

- [4] Rutherford, T., et al. (2014). "Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar". Construction and Building Materials, 65: p. 76-83.
- [5] Kong, X.-m., et al. (2014). "Influences of temperature on mechanical properties of cement asphalt mortars". Materials and structures, 47(1-2): p. 285-292.
- [6] Fu, Q., et al. (2015). "Temperature sensitivity and model of stress relaxation properties of cement and asphalt mortar". Construction and Building Materials, 84: p. 1-11.
- [7] Qiu, K., et al. (2013). "Thermo-mechanical coupling effect on fatigue behavior of cement asphalt mortar". International Journal of Fatigue, 51: p. 116-120.
- [8] ZHAO, D.-t., et al. (2008). "Configuration and performance of CA mortar for ballastless slab track". Journal of Tianjin University, 7: p. 007.
- [9] Jingqi, Z., J. Qibin, and C. Binfen. (2005). "Experimental study on emulsified asphalt for CA mortar used in slab track". Railway Construction Technology, 2: p. 68-70.
- [10] Wang, Z., et al. (2015). "Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar". Construction and Building Materials, 75: p. 25-30.
- [11] Li, G., et al. (1998). "Experimental Study of Cement-Asphalt Emulsion Composite 1". Cement and Concrete Research, 28(5): p. 635-641.
- [12] Yongliang, L., et al. (2012). "Static and dynamic mechanical properties of cement-asphalt composites". Journal of Materials in Civil Engineering, 25(10): p. 1479-1489.
- [13] Tan, Y., et al. (2013). "Effect of emulsifier on cement hydration in cement asphalt mortar". Construction and building Materials, 47: p. 159-164.
- [14] Wang, F. and Y. Liu. (2012). "The Compatibility and Preparation of the Key Components for Cement and Asphalt Mortar in High-Speed Railway". INTECH Open Access Publisher.
- [15] حسینی، ا.، حسین زاده فحیم، ب.، آقا سلطان، ع. (۱۳۸۹). "کتاب جامع روسازی های بتنی". جلد ۱، چاپ اول، تهران: انتشارات سیمای دانش.
- [16] Roberts, F.L., et al. (1991). "Hot mix asphalt materials, mixture design and construction".
- [17] نیازی، ی. (۱۳۹۰). "مهندسی روسازی؛ اصول طراحی، تعمیر و نگهداری آسفالتی". جلد ۱، چاپ اول، مشهد: انتشارات نما.
- [18] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. (۱۳۹۰). "نشریه ۲۳۴: آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران".
- [19] ASTM D244, (2009). "Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts".
- [20] ASTM D2171, (2010). "Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer".
- [21] ASTM D5, (2005). "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials".
- [22] ASTM D36, (2006). "Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)".
- [23] ASTM D113, Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials 2007".
- [24] ASTM C117, (2017). "Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing".
- [25] ASTM C29, (2009). "Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate".
- [26] ASTM C127, (2015). "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate".
- [27] ASTM C289, (2007). "Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)".

- [28] Zhu, L.L.Y.C.C. and X, Zhong. (2012). “The Key Technology for Construction Quality Control of Cement Emulsified Asphalt Mortar of CRTS Ballastless Slab Track for High-speed Railway”.
- [29] Zeng XH, Xie YJ, Deng DH, Wang P, Qu FL. A study of the dynamic mechanical properties of CRTS I type CA mortar. Construction and Building Materials. 2016 Jun 1; 112:93-9.