تثبیت لایه اساس با استفاده از تکنولوژی نوین سیمان و امولسیون (مطالعه موردی احداث راه اصلی دوغارون- هرات افغانستان)*

سید مرتضی مرندی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
پروین صفاپور، عضو هیئت علمی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
E-mail: marandi@mail.uk.ac.ir

چکیده:

پروژه راه اصلی دوغارون- هرات به طول ۱۲۲ کیلومتر به عنوان بخشی از کمک های نظام جمهوری اسلامی ایران به افغانستان اجرا گردیده است. با توجه به وضعیت خاص منطقه، کمبود مصالح مرغوب و بارگیری بیش از حد کامیونهای افغانی (حدود ۷۰ تن در هر تریلر)، این جاده به صورت ویژه طراحی شده و به مرحله اجرا درآمد. در روسازی جاده مزبور از روش پیشرفته تثبیت لایه اساس با استفاده از سیمان و قیر امولسیون و همچنین ماشین‌آلات ویژه بهره‌گیری شده است. در طراحی این جاده از روش شل و نرم افزارهای PAVERS *و* PADS [1] *استفاده شده است. استفاده از ماشین آلات مخصوص جهت اجرای این جاده و بکارگیری از فناوری نوین تثبیت و کنترل کیفیت با دستگاه خیز سنج دینامیکی[1] نشان می‌دهد که ظرفیت باربری لایه تثبیت شده بیش از دو برابر روشهای سنتی بوده و افزون بر این سرعت اجرای عملیات به گونه‌ای محسوس هزینه های اجرایی را کاهش داده است.*

واژه‌های کلیدی: سیمان و امولسیون قیر، خیز سنج دینامیکی، روش Shell، تثبیت

۱. مقدمه

امروزه اهمیت راهها، بزرگراهها و آزاد راهها در توسعه جوامع بشری بر کسی پوشیده نیست. نقش بسیار مهم راهها در ارتباط بین روستاها، شهرها و کشورها و نیز جابه‌جایی انسان و کالا، غیرقابل انکار است و به جرأت می توان گفت که میزان راههای موجود در هر کشوری از مظاهر توسعه یافتگی آن کشور به شمار می رود. به این علت در کشورهای مختلف سرمایه گذاری زیادی در توسعه و ساخت راهها و نیز نگهداری راههای موجود انجام می‌شود. آمارها نشان می دهند که در طول ۵۰ سال گذشته بیشترین سرمایه گذاری در مقایسه با سایر بخشهای زیربنایی عمومی، جهت احداث راهها انجام شده است [2].

با توسعه و پیشرفت فناوری، انواع وسایل نقلیه عمومی و هواپیماهای غول پیکر به شبکه حمل و نقل اضافه شده است و علاوه بر این بر تعداد و وزن وسایل نقلیه سنگین نیز افزوده می گردد. در چنین وضعیتی راهها و باندهای فرودگاهها از نظر کمیت و کیفیت پاسخگو نخواهند بود. بنابراین اولاً بایستی راههای جدید به تعداد کافی ساخته شوند تا تقاضای کمی حاصل از افزایش وسایل نقلیه پاسخ داده شود و ثانیاً در ساخت راهها و باندهای جدید و ترمیم و مرمت آنها، افزایش وزن وسایل نقلیه در نظر گرفته شود.

* تاریخ دریافت: ۸٤/۵/۱۷ – تاریخ پذیرش:۸٤/۱۲/۱۷

Archive of SID

برای ساخت راهها و باند های با ظرفیت باربری بیشتر و در نتیجه عمر مفید بیشتر و نیز قابلیت تحمل بارهای سنگین‌تر، روشهای گوناگونی پیشنهاد شده است. روشهایی چون افزایش کیفیت مصالح روسازی، افزایش ضخامت لایه های روسازی و تثبیت، بهسازی و بازیافت روسازی با استفاده از مصالحی مثل سیمان، قیر، آهک و ... در این راستا به کار گرفته شده اند [3و4].

امولسیون قیر با دارا بودن خواص منحصر به فرد، با انواع مصالح از مصالح مرغوب گرفته تا مصالح با خاصیت خمیری زیاد قابل استفاده است. علاوه بر این یکی از مهم‌ترین کاربردهای امولسیون قیر، استفاده از آن در بازیافت است. سرعت اجرای زیاد، آسان بودن کار با تجهیزات تولید امولسیون قیر، تراکم آسان و سریع لایه حاصل، قابل استفاده بودن لایه ساخته شده بلافاصله بعد از ساخت و مزایای اقتصادی و زیست محیطی، همه و همه باعث جذابیت استفاده از این روش نزد دست اندرکاران و پیمانکاران راهسازی شده است.

همان‌طور که گفته شد با افزایش وزن وسایل نقلیه عمومی و نیز ورود هواپیماهای غول پیکر به شبکه حمل و نقل، راهها و باند های قبلی –که با روشهای سنتی ساخته شده اند– دیگر پاسخگوی این حجم عظیم بار نیستند و علاوه بر این راهها و باندهای قبلی نیز زودتر از آنچه که از عمر طراحی آنها انتظار می رفت به خرابی می‌رسند. بنابراین بایستی راهکاری اتخاذ شود که راهها و باند فرودگاه‌های جدید و راهها و باندهای موجود که بهسازی و ترمیم میشوند، قابلیت تحمل افزایش بار را داشته باشند.

تثبیت مصالح موجود با استفاده از امولسیون قیر و سیمان، روش جدیدی است که می تواند به عنوان یک راه حل مناسب به این مشکل پاسخ دهد. تجربه نشان می دهد که استفاده از امولسیون قیر در راستای افزایش ظرفیت باربری بسیار موفقیت آمیز است.

تحقیق حاضر در راستای معرفی روش تثبیت با استفاده از امولسیون قیر و سیمان، مطالعه موردی طراحی و اجرای عملیات، و کنترل کیفیت ۱۲۲ کیلومتر جاده ترانزیتی هرات – دوغارون افغانستان، محاسن این روش، چگونگی انجام طرح اختلاط و آزمایشهای مربوطه و طراحی روسازی تثبیت شده با این روش، انجام شده است.

نتایج نشان می‌دهد که نه تنها ظرفیت باربری در مقایسه با روشهای سنتی افزایش یافته است بلکه زمان اجرای عملیات نیز کاهش چشمگیری داشته است.

۲. تجهیزات اجرای عملیات تثبیت

در اجرای عملیات تثبیت یک سری ماشین آلات مورد استفاده قرار گرفتند که بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه تثبیت‌کننده، دستگاهی است که به لوازم تزریق امولسیون قیر و آب و کنترل هر یک مجهز شده است. این دستگاه دارای وزن ۲۰ تن، قدرت برق موتور برابر با ۳۰۰ کیلووات، عرض مفید ۲/۵ متر، حداکثر عمق عملیاتی ۳۰ سانتیمتر، محور گردان عقب و محرک تمام چرخهای عقب، کنترل اتوماتیک و..... است. قسمت گردونه (روتور) دارای ۲۱۰ دندانه جهت آسیاب است و در خلاف جهت کار قادر به دوران است. تعداد دوران ها می‌تواند در ۱۱ موقعیت بین ۱۰۰ تا ۱۷۰ دور در دقیقه و یا مطابق نیازهای محل تنظیم شود.

محفظه آسیاب کننده این ماشین‌ها دارای تجهیزات ویژهٔ برش روسازی هستند. همان گونه که در شکل ۲ دیده می شود، تیغه‌های مخصوص برش این دستگاه می‌چرخند و مصالح سطح روسازی موجود را برش داده و آسیاب می‌کنند.

زمانی که عمل آسیاب انجام می‌شود، آب از مخزن متصل به بازیافت کننده، توسط یک شیلنگ خارج شده، روی مخلوط پاشیده می‌شود. آب که مقدار آن به دقت توسط یک سیستم پمپ و کنترل کننده اندازه‌گیری می‌شود، روی مخلوط ریخته شده و به خوبی با مصالح آسیاب شده مخلوط می‌شود، تا زمانی که مخلوط به درصد رطوبت بهینه تراکم برسد.

مواد تثبیت کننده مانند دوغاب سیمان، امولسیون قیر و آب، چه به تنهایی و یا با هم نیز به همان روش می‌توانند وارد محفظه آسیاب کننده شوند. افزون بر اینها کف قیر نیز ممکن است به مخلوط درون آسیاب کننده توسط اسپری کننده مخصوص، تزریق شود.

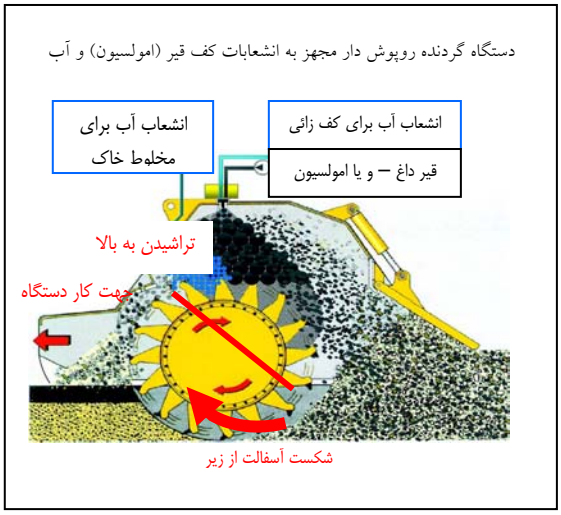
مواد تثبیت کننده، از قبیل سیمان پرتلند به طور معمولی روی سطح جاده موجود و جلو دستگاه بازیافت کننده مطابق شکل ۳ پاشیده می‌شوند. ماده بازیافت کننده از روی این پودر عبور کرده و آنرا با آب مخلوط می‌کند و در همان حال با مصالح زیرین نیز مخلوط می شود.

ساختمان پوشش روتور با یک دریچه متغیر عقب، امکان اختلاط مصالح، امولسیون قیر و سیمان و ذرات آب و حتی تسطیح سطح لایه تثبیت را فراهم می کند. استفاده از سیستم اندازه گیری دستی نیز برای کنترل میزان پخش شدن امکان پذیر است. نازل‌ها می‌توانند به صورت دوگانه کنترل شوند. بنابراین جهت همپوشانی

Archive of SID

و ساخت در شانه‌های راه، عرض کاری می‌تواند متغیر باشد. یک میله جداگانه پخش آب با سیستم اندازه گیری مستقل سرعت، میزان رطوبت بهینه را برای مصالح لایه مربوطه تامین می کند. یک تانکر ده هزار لیتری امولسیون قیر در قسمت جلوی دستگاه تثبیت خاک و یک تانکر ۷۰۰۰ لیتری آب در قسمت عقب، دستگاه تثبیت کننده را با آب و امولسیون قیر تغذیه می‌کنند. نمای شماتیک دستگاه تثبیت کننده در اشکال ۱ و ۲ نشان داده شده است.

شکل ۱. نمائی از عملیات تثبیت خاک با قیر و سیمان بروش مخلوط در محل



شکل ۲. نمائی از پوشش گردونه، لوله های پخش امولسیون قیر و آب در دستگاه تثبیت کننده

شکل ۳. دستگاه پخش کننده سیمان با ظرفیت بالا

جهت پخش دقیق سیمان مورد نیاز برای عملیات تثبیت، از دستگاه پخش کننده سیمان که در کامیون ۳ محوره سوار شده است استفاده می‌شود. این پخش کننده دارای ظرفیت ۱۰ متر مکعب با کنترل برقی است، به طوری که قادر به پخش کردن دقیق سیمان بوده و سرعت پخش مستقلی را امکان پذیر می سازد. پخش کننده، با مته های پخش کننده و زنجیرهای حفره‌ای امکان قرار گرفتن سیمان در عرض مفیدی برابر ۲/۵ متر را فراهم می‌سازد. جهت ایجاد شانه‌های راه و نوارهای میانی، می‌توان عرض مفید را به ۱/۷ و یا ۰/۸ متر کاهش داد. نمایی از دستگاه پخش کننده در شکل ۳ نشان داده شده است.

جهت تراکم اصلی لایه های تثبیت شده از غلتک ۱۹ تنی مجهز به دستگاه VARICONTROL استفاده شد تا تراکم پیش بینی شده در طرح تثبیت خاک – سیمان و امولسیون قیر تضمین شود. این غلتک‌ها جهت کنترل تراکم سطح به سیستم اندازه‌گیری مجهز شده‌اند.

دستگاه VARICONTROL وسیله است که در درام غلتک نصب شده و در هر موقعیتی انرژی تراکمی بیشینه را به صورت خودکار اعمال می‌کند. سیستم VARICONTROL ، سختی بین مصالح و درام را تحلیل کرده و ارتعاش مورد نیاز را در هر زاویه ای بین جهت افق و جهت قائم تولید می کند و قادر است دامنه‌هایی تا ۲/۵ میلیمتر و نیروی گریز از مرکزی معادل 500KN را ایجاد کند.

۳. مشخصات فنی مصالح تثبیت

جهت طراحی روسازی جاده اصلی هرات– دوغارون افغانستان از فناوری نوین تثبیت خاک با امولسیون قیر و سیمان به جای روش سنتی استفاده شد. دلایل انتخاب این روش وجود ترافیک سنگین و بارهای معادل غیر مجاز، مشکل تهیه مصالح مورد نیاز

Archive of SID

لایه‌های اساس و رویه آسفالتی به علت ریز بودن مصالح و دارا بودن لوس آنجلس معادل ۱۷، وجود کانی های زیاد سیلیسی در مصالح و فقدان چسبندگی کافی بین قیر و مصالح و افت نسبت مقاومت مارشال اشباع ٢٤ ساعته به ۳۰ دقیقه به عدد کمتر از ۰/۷۵، و از همه مهم‌تر زمان اجرای کوتاه پروژه به دلائل خاص اقتصادی و سیاسی منطقه بوده است. در اجرای عملیات لایه‌های تثبیت با استفاده از امولسیون قیر و سیمان از استاندارد فنی اتریش استفاده شد. مشخصات فنی این آئین نامه (RVS 8S.05.13) در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی آئین نامه RVS 8S.05.13

زمان آزمایش	روش آزمایش	الزامات و رواداری ها			تعریف
در شروع ساخت بعدا در صورت شک داشتن	بر اساس بند 6.4	≥85%			تاثیر مخلوط
برای هر مقطع آزمایش دو مکان روزانه	تور مربعی 4 میلیمتری الک(0.063 mm) تور سیمی 32 میلیمتر یا 63 میلیمتر الک مربع کامل	4 mm > دانه ها (0.063 mm)[1]همانند طرح مخلوط 20% Rel.-%[2]± بجز دانه های درشت			اساس دانه بندی مصالح مخلوط
هفتگی روزانه	بازرسی امکانات اندازه گیری مصرف	بر اساس طرح مخلوط 10 ± درصد در هر مخلوط- در هر سایت 3± درصد متوسط روزانه			میزان مواد چسبنده (سیمان، آب و قیر)
برای هر مقطع آزمایش دو نقطه دائمی	بر اساس آئین نامه ONORM B 3304 و یا ONORM B 3326 ظاهری	درصد رطوبت بهینه $(\omega_{opt}-2.0)<\omega<(\omega_{opt}+1.0)$			درصد رطوبت (ω%)
		ST -B	ST -BZ	ST –Z ST -T	
		میزان هر واحد			
برای هر مقطع آزمایش حد اقل دو مکان	بر اساس بند 7.1.5	–	≥ 1.5	≥ 2.5[5]	مقاومت فشاری (B_{D7} N/mm^2)
برای هر مقطع آزمایش حد اقل دو مکان	بر اساس بند 7.1.5	–	≥ 0.2	–	مقاومت کششی غیر مستقیم (B_{SZ7} N/mm^2)
برای هر مقطع آزمایش حد اقل دو مکان	بر اساس بند 7.1.6	≥ 0.4	≥ 0.1	–	اتساع عرضی (ε_{sz7} ٪)
برای هر مقطع آزمایش حد اقل دو مکان و یا هشت مکان در صورت استفاده از روش یکسان	بر اساس آئین نامه ONORM B 4418[4] و یا RVS 11.063	≥ 97 % برای هر مکان بطور متوسط برای آزمایش سایت بزرگتر از 100 درصد دانسیته خشک مرجع، برای ارزیابی آماری ضریب تغییرات بایستی کوچکتر از 2 درصد باشد			دانسیته خشک (kg/m^3) درجه تراکم (٪)
حد اقل در هر 1000 متر مربع	حفاری مغزه بر اساس آئین نامه RVS 11.063	انحراف از ضخامت مرجع بزرگتر یا مساوی 10 درصد باشد			ضخامت لایه
دائما	شمشه اندازه گیری	15 میلیمتر برای شمشه اندازه گیری 4 متری			هموار بودن
روزانه	تراز نمودن با روش آبی	انحراف از کسری ارتفاع کمتر یا مساوی 20 میلیمتر			ارتفاع

۱- برای مصالح با بیش از 20 ٪ ریزتر از 0.063 میلیمتر.
۲ - در صورت انحراف بیشتر، بایستی فورا مخلوط جدید طراحی گردد.
۳ - برای روش مخلوط در کارخانه و وجود بادهای شدید بایستی سیمان با صفحه فولادی آزمایش (به ابعاد 0.5 در 1 متر) قبل از مخلوط نمودن وزن گردد.
٤ - برای روش چاله ماسه و بالن آب، چاله آزمایشی بایستی 4 ساعت بعد از تراکم و بلافاصله پس از سفت شدن سیمان انجام پذیرد. آزمایش به هر حال نبایستی بیش از 24 ساعت بعد از تراکم انجام پذیرد.
۵ - معتبر برای HRB22.5 و CEM 32.5 N، برای CEM 32.5 معتبر است برای β_{D7}>3.0 N/mm^2 برای CEM 42.5 N β_{D7} >3.0 N/mm^2..

Archive of SID

از آنجا که از مصالح سنگدانه‌ای گرد گوشه جهت ساخت لایه تثبیت استفاده می‌شد، می‌بایست پس از تائید مناسب بودن آنها، از ٦ محل متفاوت، حفاری می‌شدند. برای هر یک از محل‌های حفاری، طرح اختلاطی تهیه و اجرا شد. علاوه بر مشخصات استاندارد RVS 8S.05.13، از دستورالعمل فنی « بازیافت سرد در محل در ساخت روسازی راه » مربوط به گروه تحقیقات راهها و ترافیک (FVSG)، نیز استفاده شد، زیرا این دستورالعمل، در برگیرنده مشخصات لازم در ارتباط با کسب اطمینان از کیفیت ساخت لایه‌های تثبیت شده است. در این دستورالعمل، به ویژه در ارتباط با مشخصات لازم در مورد محدوده های پراکندگی اندازه ذرات مصالح سنگدانه گرد گوشه که باید از آنها استفاده شود و همچنین تعیین حاشیه درصد حفره ها اشاره شده است.

جهت استفاده از فناوری تثبیت، در ابتدا مطالعات آزمایشگاهی لازم بر روی مصالح تشکیل دهنده لایه تثبیت شامل: دانه بندی، خصوصیات خمیری، تراکم و رطوبت بهینه، مشخصات قیر مصرفی، مشخصات مواد تشکیل دهنده امولسیون قیر انجام شد و نتایج در جداول ۲، ۳، ٤ و ٥ نشان داده شده است.

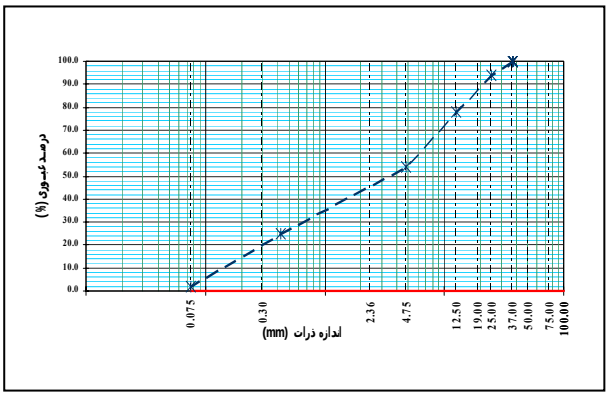
مصالح مصرفی به عنوان قشر اساس، مصالح رودخانه ای با مشخصات داده شده در جدول (۲) بوده و منحنی دانه بندی آن در شکل ٤ نشان داده شده است. سیمان مصرفی جهت انجام آزمایش‌های سیمان تیپ ۲ و امولسیون مصرفی از نوع پایدار کاتیونیک با pH=2.5 بوده است. مشخصات فنی مصالح و امولسیون مصرفی در جداول (۲)، (۳) و (٤) نشان داده شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات فنی مصالح مصرفی

مشخصات فنی خاک	طبقه بندی unified	خواص خمیری	ارزش ماسه‌ای (%)	D_{60} mm	D_{30} mm	D_{10} mm	C_C	C_U
	SP	NPI	52	6	0.63	0.14	0.47	43

جدول ۳. مشخصات دانه بندی خاک

شماره الک	$1\frac{1}{2}$"	1"	$\frac{1}{2}$"	No. 4	No. 40	No. 200
درصد مانده روی الک	0	6	16	24	29	23
درصد عبوری	100	96	78	54	25	2



شکل ٤. منحنی دانه بندی مصالح مصرفی در آزمایشات

جدول٤. مشخصات مواد تشکیل دهنده امولسیون مصرفی

مشخصات امولسیون قیر	قیر ٦٠-٧٠	آب	امولسیون ساز	نفت	اسید Hcl
درجه حرارت هنگام ساخت	١٤٠	٣٠	٣٠-٤٠	٤٠- ١٠	٤٠- ٣٠
وزن واحد حجم هنگام ساخت (g/cm^3)	٠/٩٥	١/٠	١/٠٧	٠/٨٠	١/١٥
درصد وزنی اجزاء تشکیل دهنده	٥٧/٧١	٣٩/٥٢	٠/٧١	٢/٠٤	٠/٠٢

جدول ٥. مشخصات قیر مصرفی برای ساخت امولسیون

وزن واحد حجم در $25^{\circ}C$	درجه نفوذ در $25^{\circ}C$	نقطه نرمی $^{\circ}C$	درجه اشتعال $^{\circ}C$	نشانه نفوذ در ٢٥° و نقطه نرمی قیر
١/٠١٢	٦٠	٥٢	٣٢٠	-٠/٢٧

٤. امولسیون قیر

امولسیون یعنی پخش ذرات کوچک یک مایع در مایع دیگر. امولسیون می‌تواند به وسیلهٔ هر دو مایع محلول نشدنی ایجاد شود، اما در اغلب امولسیون‌ها یکی از فازها آب است. امولسیون روغن در آب O/W شامل فاز پیوسته آب و فاز پخش شده یا ذرات روغن غیرقابل حل در آب است. همچنین امولسیون آب در روغن W/O شامل یک فاز پیوسته روغن و فاز پخش شده آب است. به امولسیون W/O امولسیون معکوس هم گفته می‌شود.

امولسیون‌های چندگانه (با چند فاز) به گونه‌ای که فاز پخش شده خود شامل ذرات کوچکتری از فاز سوم که معمولا همان مایع فاز پیوسته است نیز تشکیل می شوند. چنانچه روغن و آب با یکدیگر

Archive of SID

مخلوط شوند ممکن است امولسیونی را به وجود آورند، اما هنگامی که عمل اختلاط متوقف شود سریعا از هم جدا می‌شوند. امولسیون شامل یک جزء سوم به نام امولگاتور[۲] (امولسیون ساز) است که مانع جدایی فازهای امولسیون از هم شده و یا آن را به تأخیر می‌اندازد.

امولسیون های قیر معمولاً از نوع O/W هستند هرچند که امولسیون‌های معکوس که از قیر محلول تشکیل شده اند نیز کاربری‌های به خصوصی دارند. ثابت شده است که قیر می‌تواند امولسیون چندگانه W/O/W را هم به وجود آورد.

امولسیون از ٤٠ تا ٨٠ درصد قیر تشکیل شده و مایعی به رنگ قهوه‌ای است که میزان غلظت آن از غلظت مایعی مثل شیر تا غلظت کرم های خیلی غلیظ متغیر است. قطر ذرات یا ذرات تشکیل شده از ۰/۱ تا ۲۰ میکرون است [5].

با توجه به بار ذرات معلق در امولسیون، دو نوع امولسیون قابل تعریف است، امولسیون قیر آنیونی که ذرات قیر در آن دارای بار منفی و امولسیون قیر کاتیونی که ذرات قیر در آن دارای بار مثبت هستند. هر دو نوع امولسیون قیر در سه نوع تولید می شوند، نوع تند گیر [۳](RS) نوع کند گیر [٤](MS) و نوع دیرگیر [٥](SS). تنها انواع کند گیر و دیرگیر برای استفاده در پروژه های تثبیت مناسب‌اند.

اغلب کارخانه ها، همه انواع و اقسام امولسیونهای قیری را تولید می کنند. چون امولسیونهای نوع مشابه از کارخانه های مختلف در یک نوع خاک ممکن است تأثیر متفاوتی داشته باشند، لازم است که امولسیون ابتدا در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گیرد.

قیر امولسیون معمولاً در درجه نفوذ قیر ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه که برای خاکهای با درصد ریزتر از الک 75µm بین صفر تا ۱۰ درصد مناسب اند، ساخته می شوند. برای خاکهای با درصد ریز دانه های بیشتر (۱۵ تا ۲۵ درصد گذشته از الک 75µm) ممکن است به علت مشکلات پخش مصالح از قیری با درجه نرمی بالاتر استفاده شود. در شرایط بحرانی، امولسیون حاوی روغن نیز میتواند مورد استفاده قرار گیرد.

در صورتی که اطلاعات زیادی در دسترس نباشد مقدار امولسیون قیر مورد نیاز برای تشکیل چسبندگی لازم بین ذرات مصالح از فرمول زیر استفاده می‌شود.

(۱) $0.75(0.05A+0.10B+0.50C)$ = درصد وزنی امولسیون قیر

که در این رابطه:

A = درصد مانده روی الک شماره ۸ ،

B = درصد گذشته از الک شماره ۸ و

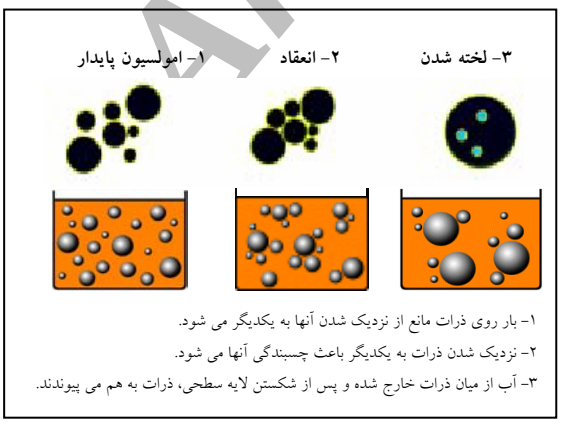
C = درصد گذشته از الک شماره ۲۰۰ است.

درصد رطوبت خاک درچگونگی اختلاط امولسیون و پخش آن در خاک تأثیر می گذارد. در خاک خشک، پیوندهای امولسیون قبل از موعد مقرر به صورت زود هنگام می‌شکنند که این عمل باعث تشکیل قطره‌های قیر و عدم پخش یکنواخت قیر در تمام نقاط می‌شود.

سطح تماس ذرات قیر در امولسیون به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. یک لیتر امولسیون قیر ممکن است سطح تماسی به اندازه ۵۰۰۰ متر مربع داشته باشد.

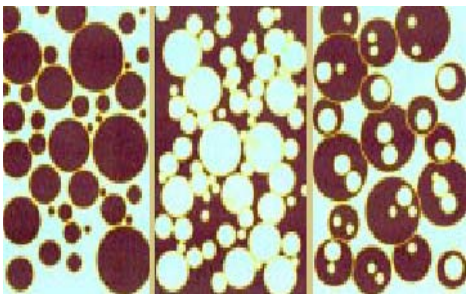
برای ایجاد این سطح تماس به انرژی زیادی نیاز خواهد بود که با استفاده از امولگاتور این انرژی کاهش می یابد. نوع امولگاتور براندازه ذرات به دست آمده تأثیر گذاشته و مقدار غلظت بیشتر امولگاتور اندازه کوچک‌تر ذرات امولسیون را موجب می‌شود.

زمانی که ذرات شکل گرفتند بایستی در برابر انعقاد مجدد در آسیاب کلوئیدی و بعد از آن پایدار شوند. این انعقاد می‌تواند زمانی که ذرات خیلی به هم نزدیک می‌شوند اتفاق افتد. امولگاتور جذب شده روی سطح ذرات دافعه الکتریکی بین ذرات ایجاد می‌کند که مانع از نزدیک شدن زیاد ذرات به هم می شود. حتی اگر این نیروی دافعه از بین برود و ذرات به هم بچسبند لایه نازک امولگاتور روی سطح ذرات می‌تواند مانع از انعقاد شود. انعقاد و به هم چسبیدگی ذرات بر اثر نشست یا ماندگاری طولانی، نیروهای برشی، و جوشیدن و یا یخ زدن امولسیون، لخته شدن و انعقاد با تماس امولسیون با گرد و خاک نیز ایجاد می شود.

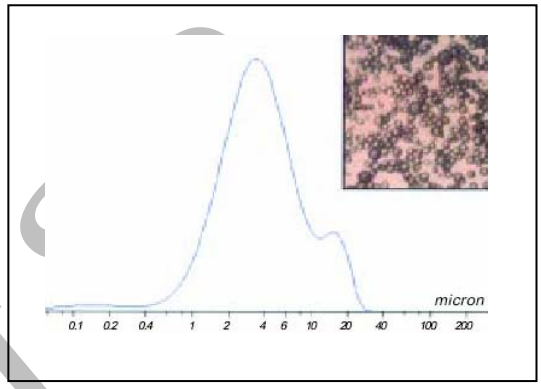


شکل ۵. چگونگی انعقاد و لخته شدن امولسیون پایدار [5]

Archive of SID



شکل ٦. تشکیل امولسیون



شکل ۷. نحوه توزیع اندازه ذرات امولسیون قیر

به طورکلی مقدار بیشتری امولگاتور برای ایجاد پایداری مناسب و خصوصیات اجرایی خوب نسبت به مقداری که برای ایجاد سطح تماس لازم است، مورد نیاز خواهد بود. پس امولسیون قیر شامل مقداری امولگاتور آزاد در محلول است که نقش ذخیره امولگاتور برای جلوگیری از انعقاد حین امولسیون سازی، ذخیره و حمل و نقل را ایفا می کند [5].

۵. طرح اختلاط

پس از انتخاب معدن مناسب و تعیین دانه بندی، مقدار بهینهٔ آب، بیشینه دانسیته خشک و خصوصیات لازم خاک و انتخاب سیمان و امولسیون مناسب، درصد سیمان و امولسیون قیر بهینه تعیین گردیدند. برای تعیین میزان درصد سیمان و امولسیون قیر مناسب، جمعا تعداد ٢٤ طرح مخلوط مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تعداد ١٦ طرح اختلاط با ترکیب امولسیون قیر و سیمان با مقادیر ٢، ٣، ٤ و ٥ درصد، ٤ طرح اختلاط از سیمان با مقادیر ٢ تا ٥ درصد و ٤ طرح اختلاط از امولسیون قیر با مقادیر ٢ تا ٥ درصد است. طرح اختلاط های استفاده شده در جدول (٦) ارائه گردیده است. هر طرح شامل ٣ نمونه ٧ روزه و ٣ نمونه ٢٨ روزه جهت آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) و ٣ نمونه ٢٨ روزه جهت آزمایشات فشاری محدود نشده (UCS) بوده است.

ساخت نمونه ها در قالب های با ارتفاع و قطر ١٥ سانتیمتر انجام شد. برای ساخت، عمل آوری و آزمایش نمونه ها از استاندارد اتریش در زمینه عملیات تثبیت استفاده شده است. ساخت هر طرح شامل اختلاط آب، امولسیون قیر، سیمان و مصالح اساس با مقدار مشخص، ریختن درون قالب و تراکم بوسیله سیلندر فشار بوده است. برای هر قالب ابتدا مصالح گزیده به مدت ١ دقیقه با آب و سیمان طرح مخلوط شده و سپس امولسیون مورد نیاز به آن اضافه گردیده و به مدت ٢ دقیقه با مخلوط کن هم زده می‌شدند. پس از اختلاط، مصالح را داخل قالب ریخته و با جک مخصوص، تحت فشاری معادل 200KN تا لحظه ای که عقربه فشار بر روی عدد 200KN ثابت می‌شد متراکم می‌کردند.

تحقیقات انجام شده نشان می دهد در شرایطی که درصد مجموع روان کننده‌ها (قیر + آب) در حدود میزان رطوبت بهینه باشد، تراکم بهترین وضعیت را خواهد داشت. بنابراین در گام اول رطوبت بهینه مصالح به روش آشتوی اصلاح شده به دست آمد ($\gamma d_{\max} = 2.24 \, gr/cm^3$ ، $\omega_{opt} = 6.3\%$). پس از ساخت نمونه‌ها برای عمل آوری، مراحل زیر اجرا می‌گردید:

١- نمونه های آماده شده در قالب به مدت ٢٤ ساعت در دمای محیط نگهداری می شدند

٢- پس از خارج کردن نمونه ها از قالب، آنها را با دقت ١ گرم تدوین کرده و ارتفاع نمونه ها نیز با دقت ١ میلی متر اندازه-گیری و یادداشت می‌شد.

٣- برای آزمایش‌های ٧ روزه نمونه ها به مدت ٥ روز در دمای ٢ ± ٢٠ درجه سانتیگراد و ٩٥ درصد رطوبت نسبی نگهداری می‌شدند. برای تأمین ٩٥ درصد رطوبت نسبی، نمونه‌ها درون‌کیسه پلاستیکی قرارمی‌گرفتند. برای نمونه‌های ٢٨ روزه نمونه ها به مدت ٢٦ روز در دمای موردنظر نگهداری می‌شد.

٤- برای شکستن نمونه ها، آن ها را به مدت ٢٤ ساعت قبل از آزمایش، درون یخچال با دمای ٥ درجه سانتیگراد نگهداری می‌کردند.

پس از عمل آوری و انجام آزمایش‌های کششی غیر مستقیم و فشاری بر روی نمونه ها منحنی تنش- کرنش هر نمونه رسم شده و اطلاعات مورد نیاز هر نمونه شامل تنش حداکثر کششی یا فشاری، مدول E در آزمایش کششی یا فشاری تعیین می‌شد.

Archive of SID

جدول ٦. برنامه و شماره طرح اختلاط های آزمایشات

سیمان	٪۲	٪۳	٪٤	٪٥		سیمان	شماره طرح		امولسیون	شماره طرح
امولسیون										
٪۲	N1	N5	N9	N13		٪۲	N17		٪۲	N21
٪۳	N2	N6	N10	N14		٪۳	N18		٪۳	N22
٪٤	N3	N7	N11	N15		٪٤	N19		٪٤	N23
٪٥	N4	N8	N12	N16		٪٥	N20		٪٥	N24

۵-۱ آزمایش‌های مقاومت

به هنگام تهیه یک طرح اختلاط جامع، بهینه سازی متغیر هایی چون میزان امولسیون قیر، سیمان و رطوبت، نیازمند انجام آزمایش‌های مکانیکی مناسب بر روی نمونه های تهیه شده است. انعطاف پذیری و مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی از جمله خصوصیات مهم در تعیین عملکرد لایه تثبیت شده با مواد افزودنی است که افزایش هر یک کاهش دیگری را در پی دارد. از این رو مناسب است تا در مرحله طرح اختلاط خواص کششی و مقاومت برشی مصالح تثبیت شده به عنوان معیارهایی از انعطاف پذیری و مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی اندازه‌گیری شود.

برخی از آزمایش های مکانیکی مورد استفاده در تهیه طرح اختلاط مصالح تثبیت شده در جدول (۷) ارائه شده است. اما در سال های اخیر آزمایش کششی غیر مستقیم (ITS) با فراهم نمودن معیاری از مقاومت مخلوط در برابر ترک های خستگی جایگزین سایر روش ها شده است و معمولا آزمایش پایداری مارشال و یا آزمایش مقاومت فشاری (UCS) نیز در کنار آن انجام می شود [7, 8, 9].

۵-۲ تعیین مقاومت فشاری نامحدود

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، یک روش غیرمستقیم برای اندازه گیری مقاومت برشی و به ویژه چسبندگی مصالح است. جزئیات و نحوه انجام آزمایش در استاندارد های آزمایشگاهی نظیر ASTM D1074، AS 1141.51 استرالیا و A14 of TMH1 آفریقای جنوبی به تفصیل بیان شده است. برای این منظور نمونه استوانه ای تحت بار فشاری قرار داده می شود و فشار نهایی که منجر به گسیختگی نمونه می شود به عنوان مقاومت UCS گزارش می‌شود. برای محاسبه مقاومت UCS رابطه زیر به کار گرفته می شود.

$$UCS = \frac{4P}{\pi D^2} \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

UCS= مقاومت فشاری محدود نشده (kPa)،

P= بار نهایی (kN) و

D= قطر نمونه (m).

جدول ۷. برخی از آزمایش های مکانیکی مورد استفاده در تهیه طرح اختلاط مصالح تثبیت شده

نام آزمایش	برخی از کشورهای استفاده کننده
Hveen	استرالیا، آفریقای جنوبی، زلاندنو
Resilient Modulus	استرالیا، آفریقای جنوبی، امریکا، تایلند
Marshall	آلمان، انگلیس، ژاپن، تایلند
Vane Shear	آفریقای جنوبی
CBR	استرالیا، زلاندنو
UCS	استرالیا، آفریقای جنوبی، آلمان، اتریش
ITS	استرالیا، آفریقای جنوبی، آلمان، اتریش،

مقاومت فشاری نامحدود (UCS)[۵] مصالح تثبیت شده با امولسیون، نیرویی است بر حسب کیلو پاسکال که لازم است نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳ ± ۱۵۰ میلی متر، به شکست برسد. سرعت وارد شدن بار برابر با ۱٤۰ کیلو پاسکال در ثانیه است. برای به دست آوردن مقاومت فشاری نامحدود از وسائل زیر استفاده شده است:

- کوره با قابلیت کنترل ترموستاتیک و اندازه‌گیری تا دمای C ۱°± ٤۰ و نیز نایلون‌های معمولی برای نگهداری نمونه ها.
- دستگاه آزمایش فشاری با ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن و با دقت ۰/۱ کیلو نیوتن و با سرعت اعمال نیروی ۱٤۰ کیلوپاسکال در ثانیه.

نمونه های ساخته شده در پلاستیک نگهداری و به مدت سه روز در دمای ٤۰ درجه سانتیگراد در کوره قرار داده شده اند. بعد از سه روز نمونه‌ها از کوره خارج شده و پلاستیک از روی آنها جدا شده است. دقت لازم به عمل آمده تا آب چسبیده به پلاستیک باعث مرطوب شدن نمونه‌ها نشود و پلاستیک ها با پلاستیک خشک جایگزین شدند. سپس نمونه ها را در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده تا در مدت ٤ ساعت به این دما برسند.

Archive of SID

نمونه‌ها در دستگاه آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و تا هنگام شکست نهایی تحت بارگذاری قرار گرفتند. به این ترتیب با تعیین بیشینهٔ بار در لحظه شکست و استفاده از سطح مقطع نمونه، مقاومت فشاری نامحدود به دست آمده است.

۵-۳ تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم

مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط مصالح با سیمان و امولسیون، با اندازه‌گیری مقاومت در برابر شکست یک نمونه استوانه ای آماده شده و یا کرگیری شده در محل بدست می‌آید. بارگذاری بر روی سطح جانبی و قسمت انحنادار استوانه و به‌شرح ذیل انجام می‌گیرد:

نمونه ها با جدا سازی دانه های درشت‌تر از ۱۹ میلی متر تهیه می‌گردند. تراکم ۱۰۰ درصد طبق آئین نامه آشتو اصلاح شده و با استفاده از قالب های دو نیم شونده باید تهیه گردند. ارتفاع نمونه ها بایستی ۳ ± ۱۵۰ میلیمتر باشد. نمونه ها به مدت سه روز در دمای ٤٠ درجه سانتیگراد در اون مناسب و در داخل پلاستیک، مشابه آنچه در مورد آزمایش مقاومت فشاری نامحدود گفته شد آماده و در دستگاه آزمایش کشش غیر مستقیم قرار می‌گیرد.

بعد از نگهداری، نمونه در فک بارگذاری پائین قرار داده شده و فک بالا بصورت قطری روی آن قرار میگیرد. سپس صفحه انتقال بار روی فک بارگذاری بالا و در وسط آن قرار داده میشود. در این حالت این صفحه بایستی درست در زیر صفحه وارد کننده بار دستگاه قرار گیرد. نیرویی برابر با ۰/۱ کیلو نیوتن جهت استقرار نمونه در محل و برقراری تعادل به نمونه وارد میگردد. نیرو را بدون هیچگونه شوک به نمونه و با سرعت ٤٠ کیلو نیوتن در دقیقه تا زمان شکست وارد نموده و حداکثر نیروی وارده را با دقت ۰/۱ کیلو نیوتن در زمان شکست یاداشت مینمائیم.

جزئیات و نحوه انجام این آزمایش در استاندارد های آزمایشگاهی نظیر AASHTO T283، ASTM D4123، AS 2891.13.1 استرالیا، A16T of TMH1 آفریقای جنوبی و RVS 8S.05.13 اتریش به تفصیل بیان شده است. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردیده‌اند:

$$ITS = \frac{2P}{\pi \times l \times d} \qquad (۳)$$

که در این رابطه:

ITS = مقاومت کششی غیرمستقیم (kPa)،

P = حد اکثر بار وارده (kN)،

l = طول نمونه (m) و

d = قطر نمونه (m).

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها برای هر درصد قیر با دقت ۱ کیلو پاسکال همراه با اطلاعات دانسیته حداکثر، درصد قیر، درصد رطوبت بهینه، دانسیته میانگین و درجه نسبی تراکم تهیه شده اند.

٦. طراحی براساس خیز

روشهای طراحی بهسازی بر اساس خیز، در حقیقت مبتنی تحلیل پاسخ هستند که در آنها حداکثر میزان خیز در سطح روسازی تحت اثر یک بار اعمالی اندازه‌گیری شده و سپس با پارامترهای عملکردی روسازی ارتباط می‌یابد.

دو نوع روش بر اساس خیز وجود دارد. روش اول بر اساس اندازه‌گیری خیز سطحی و دومی روشی است که بر اساس اندازه‌گیری کاسه خیز استوار است. زمانی که روسازی تحت اثر بار چرخ قرار می‌گیرد، به سمت پایین خیز برمی‌دارد، به نحوی که گودی کاسه مانندی را که کاسه خیز نامیده می‌شود، تشکیل می‌دهد.

اطلاعات مربوط به کاسه خیز را می‌توان در روش آنالیز بازگشتی (محاسبات معکوس) جهت تخمین مدول الاستیک لایه‌های روسازی در محل به کار برد. در این روش (آنالیز بازگشتی) که معمولاً توسط برنامه‌های کامپیوتری نظیر PAVERS، Modulus، Elomod و یا Bowler انجام می‌گیرد، خیزهای تئوریک تحت بار اعمالی با استفاده از مدول فرضی برای هر یک از لایه روسازی محاسبه می‌شود. این مقادیر خیز تئوریک با مقادیر خیز اندازه‌گیری شده در کاسه خیز مقایسه می‌شوند. سپس توسط یک فرآیند تکراری مدولهای فرضی اصلاح می‌شوند تا مقادیر خیز تئوریک با خیز اندازه‌گیری شده از کاسه خیز، یکسان شوند. قابل قبول است که بپذیریم مقادیر مدول استخراج شده از این روش با مقادیر مدول لایه‌های روسازی در محل یکی بوده و آنها را می‌توان به همراه ضخامت لایه روسازی در آنالیز مورد استفاده قرار داد.

از جمله روشهایی که مقادیر اندازه‌گیری شده خیز سطحی را مورد استفاده قرار می‌دهند، روشهای انستیتو آسفالت و TRRL می‌باشند. روش ارائه شده توسط انستیتو آسفالت بر اساس رابطه بین خیز ارتجاعی متوسط (RRD) و تکرار بار ترافیکی است.

Archive of SID

درحالیکه روش TRRL براساس رابطه بین خیز استاندارد و ترافیک تجمعی است. در هر دو روش، میزان گودی مسیر چرخ ۱۰ میلیمتر به عنوان شرایط بحرانی برای روسازی است [4].

این روشهای طراحی، بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بر روی روسازی هایی که خرابی آنها در اصل به دلیل شرایط ضعف خاک بستر هستند، می‌باشد. بنابراین، این روشها را می‌توان فقط در محل هایی که خرابی روسازی بر اثر شرایط ضعف خاک بستر به وجود آمده و دلیل آن به علت ضعف لایه‌های روسازی نیست، با اطمینان به کار برد [6].

٦-١ خیزسنج[٧] FWD

امروزه استفاده از دستگاه FWD به عنوان یک دستگاه معمول تعیین ظرفیت باربری انواع روسازی رو به گسترش است. از این دستگاه می توان برای تعیین ظرفیت باربری انواع راهها، باند فرودگاهها و محوطه های صنعتی در زمان ساخت (در لایه‌های مختلف) و نیز پس از ساخت استفاده کرد.

در دستگاه FWD با انداختن وزنه ای بر روی یک سیستم فنر میرا که بر روی یک صفحه بارگذاری سوار شده است، تولید پالس بار می‌شود. جرم وزنه، سیستم فنر و ارتفاع سقوط هر کدام می توانند تصحیح شوند تا بار ضربه ای مورد نظر به روسازی وارد شود. حداکثر تغییر شکل قائم در مرکز صفحه بارگذاری و نیز در چندین نقطه شعاعی با حسگرهای تغییر شکل اندازه گیری می شوند. بار ضربه‌ای وارد شده بر روسازی باعث ایجاد تغییر شکل در سطح زیرین صفحه بار و در اطراف مرکز بار می شود. نیروی ضربه ای بیشتیع و حداکثر تغییر شکل‌های زیر صفحه در چند فاصله شعاعی مرکز بار اندازه‌گیری می شود. این تغییر شکل ها با توجه به بار وارده نشانه ای از مقاومت سازه‌ای روسازی است. در طول اندازه گیری های FWD، معمولاً مقادیر حداکثر بار و تغییر شکلها ضبط می شود. همچنین ممکن است تعداد دفعات وارد کردن بار و تعداد تغییر شکلها نیز ضبط شوند. این مقادیر برای کالیبراسیون FWD و به دست آوردن ضرایب تصحیح و یا تحلیل‌های دینامیکی لازم می شوند [6].

طراحی FWD با توجه به کارخانه سازنده ممکن است در جزئیات متفاوت است. بنابراین اغلب شکل پالس بار[٨] از یک نوع دستگاه به نوع دیگر فرق می کند. سختی لایه های آسفالتی (و بعضی لایه های دیگر) به سرعت بارگذاری بستگی دارد. بنابراین نوع عکس العمل روسازی بستگی به شکل پالس بار وارد شده دارد. اگر پالس بار می بایستی حرکت وسیله نقلیه را شبیه سازی کند، باید زمان خیز دستگاه تقریباً برابر با زمان خیز بار چرخ در حال حرکت باشد. اکثر FWD ها زمان خیز باری بین ۵ تا ۳۰ میلی ثانیه و زمان کل باری برابر با ۲۰ تا ٦٠ میلی ثانیه دارند.

دستگاه‌های FWD باید به تعداد کافی حسگر تغییر شکل داشته باشند تا شکل منحنی تغییر شکل به درستی تعیین شود. اغلب دو نوع حسگر تغییر شکل در FWD ها استفاده می شوند؛ ژئوفونها و سیزمومترها. نوع حسگر مورد استفاده به ساخت FWD بستگی دارد. برای روسازی با لایه های آسفالتی نازک، حسگرهای تغییر شکل، باید به مرکز بار نزدیک‌تر باشند [6].

باید اذعان کرد که داده های صحیح و دقیق از ملزومات تفسیر و تشریح مناسب می باشند. بنابراین رعایت دقیق مشخصات پالس بار، صفحه بارگذاری، حسگرهای تغییر شکل و سلول بار[٩] از اهمیت خاص برخوردار است. این مشخصات و ملزومات کیفیت تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده را تضمین می کنند. با رعایت موارد زیر و فاصله حسگرهای تغییر شکل استاندارد و نیز استفاده از پالس بار استاندارد، قابلیت استفاده از داده های FWD افزایش می‌یابد.

١- حداکثر بار وارده ۵۰±۵ kN است. بار غیر از ۵۰ کیلو نیوتنی برای تطابق با بار چرخ استاندارد مورد نظر طراحی و یا دلایل دیگر میتواند مورد استفاده قرار گیرد.

٢- زمان وارد شدن بار از شروع پالس بار تا نقطه اوج پالس بار باید بین ۵ تا ۳۰ میلی ثانیه.

٣- زمان پایه پالس بار باید بین ٢٠ تا ٦٠ میلی ثانیه باشد.

٤- وقتی حسگرهای تغییر شکل با حداکثر قابلیت اندازه گیری ۲۰۰۰ µm به عنوان سنسورهای تغییر شکل استفاده می شوند، تغییر شکل های بزرگتر از آن طبیعتاً نمی تواند به دقت اندازه گیری شود. در چنین موردی مقدار بار باید به ۱۰ kN تقلیل داده شوند تا تغییر شکل ایجاد شده از ۲۰۰۰ µm بیشتر نشود. مقدار بار وارده تا حد امکان باید به ۵۰ kN نزدیک بوده و در طی زمان آزمایش ثابت بماند.

٥- برای هر پروژه (مقطع راه)، یک سطح بار باید استفاده شود.

٦- در موارد ویژه، مثلاً در تحقیقات غیر خطی بودن رفتار لایه های دانه ای غیر پیوسته، بیش از یک سطح بار در هر نقطه آزمایش میتواند استفاده شود. یکی از این بارها، باید بار ۵۰ kN باشد.

Archive of SID

علاوه بر این که لازم است که داده های FWD به درستی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد، همچنین بسیار مهم است که داده ها نه تنها از نظر مقدار بار وارده در هنگام اندازه گیری، دمای روسازی در هنگام اندازه گیری و محل اندازه گیری نیز مناسب باشد.

٦-٢ اجرای عملیات تثبیت و تعیین مدول ارتجاعی بعد از عمل آوری

در مطالعه موردی انجام گرفته، حمل مصالح مخلوط شن و ماسه‌ای برای ساخت لایه تثبیت و پخش مصالح با گریدر با ضخامت تعیین شده لایه تثبیت یعنی ۲۵ سانتیمتر و ۱۸ سانتیمتر صورت گرفته است. پیش تراکم مصالح تا حد کوبیدگی با استفاده از غلتک‌های ترکیبی تا حدود ۹۵٪ و تا آنجائی که دستگاه تثبیت کننده از شرایط تحمل بهینه برخوردار گردد، صورت گرفته است. در این پروژه پس از آماده سازی لایه تثبیت مراحل ذیل انجام گرفته است:

- مرطوب سازی سطح لایه متراکم شده با آب بگونه ای که مصالح در سطح به سرعت خشک نشود. همچنین مرطوب کردن صحیح سیمان پخش شده در صورت وزش باد های شدید به نحوی که امکان جدا شدن سیمان از سطح جاده میسر نگردد.
- پخش سیمان با استفاده از دستگاه سیمان پخش‌کن و اندازه‌گیری میزان واقعی سیمان پخش شده در هر ۵۰۰ مترمربع سطح.
- مخلوط کردن سیمان با مصالح شن و ماسه‌ای در ضخامت لایه مشخص تثبیت (۲۵ سانتیمتر و ۱۸ سانتیمتر)، همزمان با تعیین مقدار امولسیون قیر و میزان آب لازم جهت دستیابی به حد رطوبت بهینه جهت اجرای لایه تثبیت با عرض ۱۱/۵ متر در پنج خط تولید.
- پیش تراکم لایه تثبیت شده با استفاده از غلطک ۱۹ تنی، رگلاژ کردن با استفاده از گریدر و تکمیل مرحله تراکم با استفاده غلطک ۱۹ تنی و اجرای محافظ سطح با کمک غلطک چرخ لاستیکی.
- عملیات آبدهی مستمر سطح لایه تثبیت شده تا حدی که خشکی غیر قابل قبول برای لایه ایجاد نگردد. پس از آن، لایه تثبیت متراکم شده، با استفاده از یک لایه قیر پوشش داده می‌شود. بعد از چند روز، درصورت نیاز به عبور و مرور وسایل نقلیه بر روی لایه تثبیت و متراکم شده، بایستی در سطح جاده سنگریزه‌های بسیار نرم و ریز (fine Chipping) پخش شود.
- محدودیت طول خطوط اجرا ۱۵۰ متر در هر لاین می‌باشد. در شکل ۱، نحوه اجرای عملیات تثبیت و اتمام عملیات نشان داده شده است.

تغییر شکل های اندازه گیری شده توسط FWD می تواند برای تعیین مدول ارتجاعی لایه های خاک بستر- اساس و زیر اساس، لایه های آسفالتی- اساس و زیر اساس و لایه بتنی- رویه، اساس و زیر اساس مورد استفاده قرار گیرد.

محاسبات برگشتی که برای تعیین مدول ارتجاعی استفاده می شوند باید با قضاوت مهندسی همراه باشد. اگر تعداد لایه ها زیاد باشد و یا اینکه ضخامت لایه ها اندک باشد به دست آوردن دقیق مدول ارتجاعی با استفاده از روش برگشتی بسیار مشکل خواهد بود. همچنین وقتی که لایه نرم در روسازی وجود داشته باشد اینکار مشکل خواهد بود. مدول ارتجاعی بدست آمده از محاسبات برگشتی اندازه‌گیری‌های FWD می تواند برای موارد زیر استفاده شود:

- ارزیابی اینکه آیا لایه های با مصالح پیوسته و ناپیوسته در مقاومت روسازی مؤثرند یا نه.
- برای اطلاع از مناطق ضعیف که نیاز به جایگزین کردن مصالح و یا ملاحظات ویژه دارند.
- برای تعیین کیفیت سازه ای لایه بحرانی.
- برای محاسبه تنش و کرنش لایه های روسازی در اثر بار.
- برای محاسبه عمر روسازی (با استفاده از تنش و کرنش های محاسبه شده و استفاده از منحنی خستگی یا ضابطه تغییر شکل و نیز تاریخچه ترافیک.
- برای محاسبه عمر باقیمانده روسازی با استفاده از کل عمر روسازی و تخمین ترافیک در آینده.
- برای محاسبه ضخامت پوشش؛ اگر عمر باقیمانده روسازی کوتاه‌تر از عمر طراحی لازم باشد.

۷. کنترل کیفیت عملیات تثبیت با سیمان وامولسیون

در خلال انجام عملیات تثبیت و در هر مرحله از اجراء، آزمایشات متعدد مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، دانسیته‌های در محل و آزمایشگاه،کنترل رطوبت، سیمان و امولسیون قیر در مراحل آزمایشگاه و اجرا انجام گرفته است و همگی حاکی از نتایج مطلوب بوده و در مواردی نتایج مقاومت‌های به دست‌آمده

Archive of SID

بیش از ارقام پیش‌بینی شده است. مشخصات دو نمونه آزمایشگاهی در جدول (۸) نشان داده شده است.

جهت کنترل کیفیت قطعات اجرا شده، و برای تعیین ظرفیت باربری لایه تثبیت شده (تعیین مدول ارتجاعی جاده)، از دستگاه FWD استفاده گردید.

با استفاده از دستگاه مزبور و در فواصل ۵۰ متری در دو مسیر رفت و برگشت مدول‌های ارتجاعی اندازه‌گیری شد. نتایج محاسبات مدول ارتجاعی مقاطع کیلومترهای صفر تا ۲۳ ، ۲۳ تا ۳۲/۳ و ۳۵/۳ تا ٤٤/٤ جاده دوغارون- هرات در جداول ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که به طور میانگین مدول های اندازه گیری شده بیش از دو برابر عددی است که در طراحی پیش‌بینی شده بود (در طراحی مدول ارتجاعی 1500 N/mm^2 در نظر گرفته شده است). این امر نشانگر استحکام فوق‌العاده سازه‌ای قطعات اجرا شده بوده و با توجه به بارگذاری بیش از حد در منطقه، بالا بودن مدول از اهمیت بالایی برخوردار است. همان گونه که در جدول (۹) نشان داده شده است ضخامت لایه اول مربوط به ٦ سانتیمتر آسفالت و لایه دوم مربوط به ۲۵ سانتیمتر لایه تثبیت شده با سیمان و قیر است.

۸. تحلیل نتایج

تغییرات مقاومت های فشاری نا محدود ۲۸ روزه با درصد های مختلف سیمان و امولسیون در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به آئین نامه اتریش (جدول ۱)، و این که بایستی مقدار مقاومت های فشاری نا محدود حداقل 2.5 N/mm^2 باشد، و با توجه به این که ازدیاد درصد امولسیون بیشتر از ۳٪ مخصوصا در درصد بالای سیمان (٤٪) باعث افت مقاومت فشاری می‌شود، نتایج نشان میدهد که استفاده از امولسیون و سیمان هر کدام به مقدار ۳ درصد مطلوب است.

اگر مقدار سیمان از حد ۳ درصد پائین تر باشد، مقاومت فشاری و کششی آن پائین آمده و مدول الاستیسیته آن کمتر از حد مشخصات خواهد شد. باتوجه به این که سیمان نقش تعیین کننده‌ای در مقاومت و سفتی لایه تثبیت شده دارد، بایستی مورد توجه خاص قرار گیرد.

نقش امولسیون قیر ایجاد فنریت در لایه تثبیت است. افزایش درصد سیمان نقش امولسیون قیر را کاهش داده و در نتیجه ترکهای انقباضی درروی لایه ساخته شده ایجاد خواهد شد.

یکی دیگر از مزایای تثبیت خاک با سیمان و امولسیون قیر کاهش ضریب نفوذپذیری است. این موضوع در مسدود کردن نشت آب به داخل سازه راه و عدم خمیری شدن بستر راه تاثیر بسزائی داشته و طول خدمت راه را افزایش می‌دهد. در اشکال شماره ۹ و ۱۱، مقاومت کششی غیرمستقیم ۷ و ۲۸ روزه نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از امولسیون و سیمان هر کدام به مقدار ۳ درصد میتواند حداقل ITS = 0.2 N/mm^2 ارائه شده در آئین نامه را تامین کند. البته همان گونه که شکل ۱۱ نشان می‌دهد که استفاده از ۲٪ سیمان نیز امکان پذیر بوده با این تفاوت که دارای ضریب اطمینان مرزی خواهد بود و بهتر است از ۳٪ سیمان استفاده شود.

با توجه به این که جهت احداث جاده اصلی دوغارون - هرات مدول ارتجایی در نظر گرفته شده در طرح حداقل E = 1500 N/mm^2 بوده است نتایج مدول های اندازه گیری شده با درصد های مختلف امولسیون و سیمان در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که عملا استفاده از ۲٪ سیمان نمی‌تواند مقدار مورد نظر را ارضاء کند. بنابراین با در نظر گرفتن جمیع پارامترها به نظر میرسد استفاده از ۳٪ سیمان بهترین گزینه است.

جدول ۸. مشخصات دو نمونه آزمایشگاهی

پروژه: دوغارون – هرات		مقطع راه: از کیلومتر ۱۲ تا کیلومتر ۳۲	
مرجع مصالح: قرضه کیلومتر ۲۶/٦ و کیلومتر ۲/۸		تاریخ: ۱۳۸۲/٤/۱۸	
شماره نمونه	A	واحد	B	واحد
مقدار امولسیون	3.0	٪ وزنی	4.0	٪ وزنی
مقدار سیمان	3.0	٪ وزنی	3.0	٪ وزنی
مقدار آب	6.3	٪ وزنی	6.3	٪ وزنی

ادامه جدول ۸. نتایج آزمایشات در آزمایشگاه

نمونه آزمایشگاهی	واحد	A	B	الزامات
توزیع دانه بندی				
ذرات بزرگتر از 32 میلیمتر	٪ وزنی	12.0	12.0	0-10
ذرات بزرگتر از 2 میلیمتر	٪ وزنی	36.8	36.8	18-40
ذرات کوچکتر از 0.063 میلیمتر	٪ وزنی	5.5	5.5	0-7
مشخصات نمونه				
درصد رطوبت	٪ وزنی	6.3	6.3	
دانسیته کل	g/cm^3	2.32	2.28	
درصد حفره	٪ حجمی	13.6	12.9	8-15
مقاومت کششی غیر مستقیم				
ITS بعد از 28 روز	N/mm^2	0.58	0.72	0.2
مقاومت فشاری				
UCS بعد از 28 روز	N/mm^2	4.14	1.25	1.5

Archive of SID

جدول شماره ۹. نتایج آزمایش FWD در مقطع کیلومتر ۰ تا کیلومتر ۲۳

Recalculation of E-Module values for the statistic deflection profiles total measuring line		E-module				Layer thickness			Lack of Fit %
		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	t_1	t_2	t_3	
		MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
50% - Profile		3271	7200	200	423	60	250	600	3.7
60% - Profile		3146	7000	200	380	60	250	600	3.0
70% - Profile		3062	6700	198	350	60	250	600	2.6
85% - Profile		2852	6500	190	305	60	250	600	2.7
90% - Profile		2726	6200	185	291	60	250	600	3.5
Recalculation of E-Module values for the statistic deflection profiles		E-module				Layer thickness			Lack of Fit %
		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	t_1	t_2	t_3	
		MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
average : km 0.000 – 1,500	85% Profile	4483	5500	108	267	60	250	600	3.3
average : km 1,500 – 3,300	85% Profile	3958	6000	150	316	60	250	600	2.1
average : km 3.300 – 4,550	85% Profile	3479	8250	280	216	60	250	600	2.2
average : km 4,550 – 7,400	85% Profile	4270	5500	195	284	60	250	600	3.1
average : km 7,400 – 10,850	85% Profile	3541	6500	200	420	60	250	600	3.8
average : km 10,850 – 12,250	85% Profile	3240	4850	324	576	60	250	600	1.7
average : km 12,250 – 13,950	85% Profile	3751	6500	224	420	60	250	600	2.5
average : km 13,950 – 14,650	85% Profile	3315	5600	245	560	60	250	600	4.6
average : km 14,650 – 15,650	85% Profile	3581	3600	150	550	60	250	600	5.4
average : km 15,650 – 18,050	85% Profile	3342	5400	187	365	60	250	600	3.5
average : km 18,050 – 20,450	85% Profile	2451	4500	170	335	60	250	600	6.0
average : km 20,450 – 22,450	85% Profile	3605	4500	182	320	60	250	600	2.5
average : km 22,450 – 23,000	85% Profile	3028	8600	147	340	60	250	600	2.9

جدول شماره ۱۰. نتایج آزمایش FWD در مقطع کیلومتر ۲۳ تا کیلومتر ۳۲/۳

Recalculation of E-Module values for the statistic deflection profiles total measuring line		E-module				Layer thickness			Lack of Fit %
		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	t_1	t_2	t_3	
		MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
50% - Profile		3492	6500	155	410	50	250	600	3.8
60% - Profile		3201	6300	150	390	50	250	600	3.0
70% - Profile		2765	6100	150	370	50	250	600	3.4
85% - Profile		2619	5300	150	330	50	250	600	3.5
90% - Profile		2328	4700	150	322	50	250	600	3.7
Recalculation of E-Module values for the statistic deflection profiles		E-module				Layer thickness			Lack of Fit %
		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	t_1	t_2	t_3	
		MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
average : km 23,000 – 23,650	85% Profile	2933	4648	155	291	50	250	600	5.9
average : km 23,650 – 24,725	85% Profile	4306	7856	118	362	50	250	600	3.4
average : km 24,725 – 24,950	85% Profile	2784	5000	110	330	50	250	600	1.9
average : km 24,950 – 25,750	85% Profile	3376	7100	165	310	50	250	600	4.5
average : km 25,750 – 26,030	85% Profile	3840	6700	70	355	50	250	600	4.9
average : km 26,030 – 27,250	85% Profile	3840	5800	165	335	50	250	600	2.3
average : km 27,250 – 29,450	85% Profile	4160	6600	145	415	50	250	600	1.9
average : km 29,450 – 30,150	85% Profile	3310	6618	115	440	50	250	600	4.5
average : km 30,150 – 30,250	85% Profile	3585	1600	105	400	50	250	600	4.1
average : km 30,250 – 30,750	85% Profile	2896	4100	135	395	50	250	600	7.0
average : km 30,750 – 31,850	85% Profile	3379	6000	160	445	50	250	600	4.1
average : km 31,850 – 32,150	85% Profile	1517	1500	200	300	50	250	600	7.2
average : km 32,150 – 32,300	85% Profile	3034	4200	150	475	50	250	600	4.2

Archive of SID

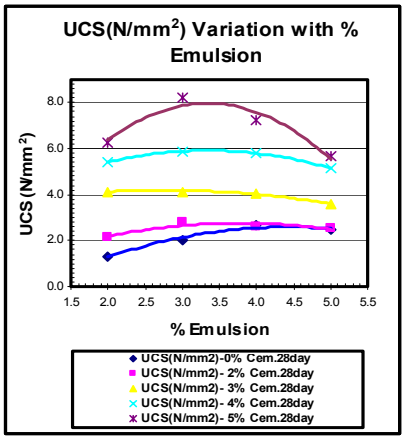
معمولا در طرح استفاده از سیمان و قیر در عملیات تثبیت، سیمان نقش بالا بردن سختی و مقاومت را داشته در حالی که نقش قیر ایجاد فنریت در لایه روسازی است. بنابراین جهت استفاده از قیر حداقل هائی بایستی در نظر گرفته شود که بنظر میرسد با توجه به نتایج بدست آمده ۳٪ امولسیون مناسب خواهد بود.

یکی دیگر از مزایای تثبیت خاک با سیمان و امولسیون این است که ضریب نفوذ پذیری خاک به شدت کاهش پیدا میکند. این موضوع در مسدود نمودن نشت آب به داخل سازه راه و عدم خمیری شدن بستر راه از عوامل مؤثر بوده و در نتیجه طول خدمت راه افزایش می یابد.

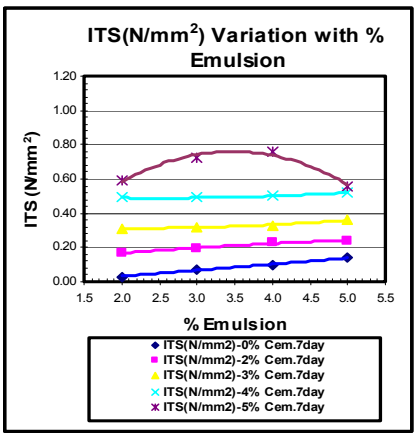
جدول شماره ۱۱. نتایج آزمایش FWD در مقطع کیلومتر ۳۵/۳ تا کیلومتر ٤٤/٤

Recalculation of E-Module values for the statistic deflection profiles total measuring line		E-module				Layer thickness			Lack of Fit %
		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	t_1	t_2	t_3	
		MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
50% - Profile		3783	6400	195	333	60	250	600	2.1
60% - Profile		3486	5928	203	306	60	250	600	2.2
70% - Profile		3201	5750	203	285	60	250	600	2.0
85% - Profile		2910	5200	203	255	60	250	600	1.9
90% - Profile		2765	5050	200	243	60	250	600	2.1
Recalculation of E-Module values for the statistic deflection profiles		E-module				Layer thickness			Lack of Fit %
		Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	t_1	t_2	t_3	
		MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
average : km 35,300 – 35,950	85% Profile	3840	5150	290	278	60	250	600	3.4
average : km 35,950 – 36,650	85% Profile	4160	5900	190	240	60	250	600	2.3
average : km 36,650 – 36,950	85% Profile	4320	3800	96	230	60	250	600	3.6
average : km 36,950 – 37,450	85% Profile	3680	6250	195	295	60	250	600	4.7
average : km 37,450 – 38,350	85% Profile	3984	3950	230	181	60	250	600	0.9
average : km 38,350 – 39,850	85% Profile	3520	3400	270	272	60	250	600	3.4
average : km 39,850 – 42,850	85% Profile	3448	7500	150	348	60	250	600	3.2
average : km 42,850 – 43,250	85% Profile	2896	5500	160	280	60	250	600	3.9
average : km 43,250 – 43,950	85% Profile	2896	5500	240	345	60	250	600	4.7
average : km 43,950 – 44,400	85% Profile	2896	3800	180	318	60	250	600	3.2

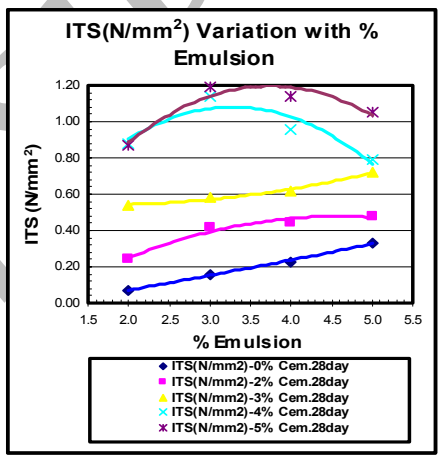
Archive of SID



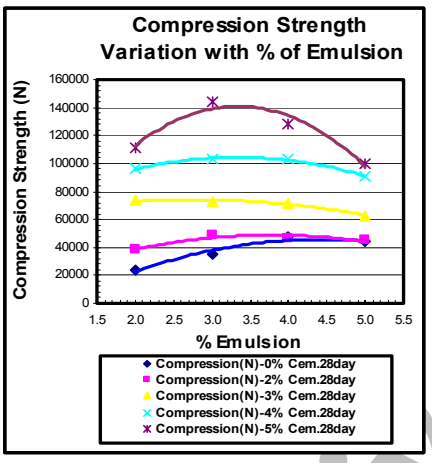
شکل ۸. تغییرات مقاومت محدود نشده فشاری برروی نمونه ها در مقابل درصد تغییرات امولسیون



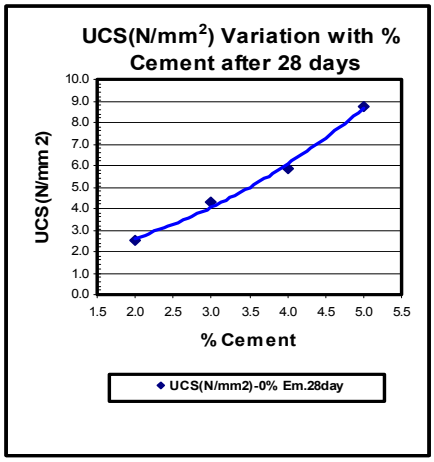
شکل۱۱. تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم برروی سطح جانبی نمونه ها در مقابل درصد تغییرات امولسیون



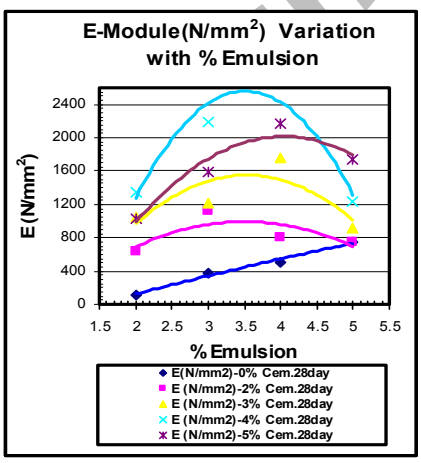
شکل۹. تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم برروی سطح جانبی نمونه ها در مقابل درصد تغییرات امولسیون



شکل۱۲. تغییرات مقاومت فشاری حاصل از بارگذاری برروی نمونه ها در مقابل درصد تغییرات امولسیون



شکل۱۰. تغییرات مقاومت محدود نشده فشاری برروی نمونه ها در مقابل درصد تغییرات سیمان



شکل۱۳. تغییرات مدول ارتجاعی حاصل از بارگذاری بر روی سطح جانبی نمونه ها در مقابل درصد تغییرات امولسیون

Archive of SID

۹. نتایج

در این تحقیق خلاصه‌ای از اجرای تکنولوژی جدید تثبیت خاک با سیمان و امولسیون مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

۱- استفاده از فناوری تثبیت با امولسیون و سیمان از ظرفیت باربری بسیار زیادی برخوردار بوده و پاسخگوی بارگذاری های بیش ار حد در منطقه است.

۲ – با توجه به مصالح موجود در منطقه نتایج نشان میدهد که طراحی استفاده از سیمان و امولسیون هر کدام به مقدار ۳٪ نتیجه مطلوبی را در بر داشته است.

۳- با اجرای فناوری تثبیت خاک با امولسیون و سیمان می‌توان زمان انجام عملیات را بطور مؤثری کاهش داد.

٤- اجرای عملیات تثبیت خاک با امولسیون و سیمان در کاهش ضریب نفوذپذیری و در نتیجه افزایش طول عمر جاده می‌تواند نقش بسزائی ایفا نماید.

۵- کنترل کیفیت با دستگاه پیشرفته FWD نشان می‌دهد که مقاومت های حاصل شده پس از انجام عملیات تثبیت بیش از دو برابر رقم های پیش بینی شده در طرح است.

۱۰. مراجع

1. Theyse, H. and Muthen, M. (2000) "Pavement analysis and design software (PADS) based on the South African mechanistic-empirical design method" Transportation Infrastructure, South African Transport Conference, Pretoria, Paper 3c75.

2. Hicks, Gary R. (2002) "Soil stabilization design guide", State of Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, Fairbanks.

3. Theyse, H.L. (2002) "Overview of the South African mechanistic pavement design method", South African Transport Conference.

4. Asphalt Institute (1986) "Asphalt cold - mix recycling", The Asphalt Institute Manual Series No. 21 (MS-21), 2nd Edition.

5. Nobel, Akzo (2000) "Bitumen emulsion", Technical Bulletin, Stockholm, Sweden.

6. European Commission (2000) "Falling weight deflectometer", Final report of the action, Transport Research, COST 336, Directorate General Transport.

7. Josteine, M. (2000) "The use of cold bitumen stabilized base course in Norway", Norwegian Public Rods Administration, Akershus, Norway.

8. Kendhal, P. S. and R. B., Mallick, R.B. (1997) "Pavement recycling guidelines for state and local governments", U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-98-042.

9. Milton, L. J. and Earland, M.G. (1999) "Design guide and specification for structural maintenance of highway pavement by cold in-situ recycling, prepared for C. S. S., Cols Limited and the Pavement Engineering Group, Highways Agency, TRL Report 386.

پانویس ها:

1- Falling weight deflectometer
2- Emulsifier
3- Rapid setting
4- Medium setting
5- Slow setting
6- Unconfined compression strength
7- Falling weight deflectometer
8- Load pulse
9- Load cell

Archive of SID