

وزارت راه و ترابری
معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری
پژوهشکده حمل و نقل

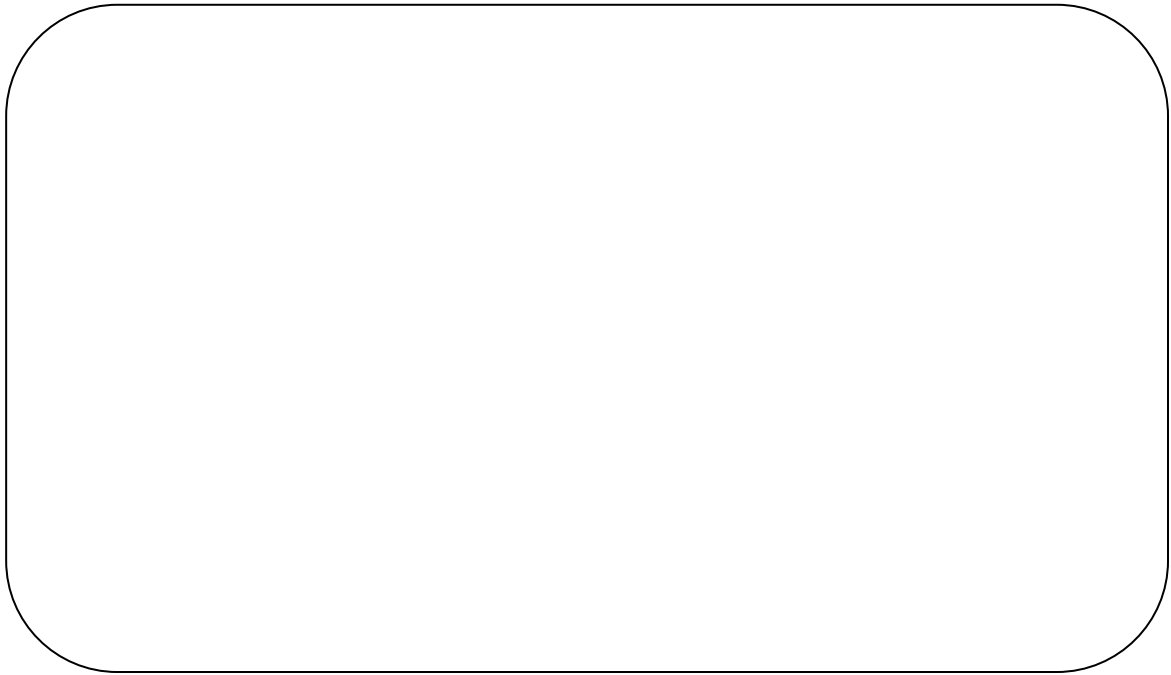
بکارگیری مصالح حاصل از بازیافت رویه‌های آسفالتی و بتن خردشده در خاکریز

مروری بر مطالب گذشته و مشخصه مواد

این مجموعه ترجمه‌ای است از گزارشی تحت عنوان:

RECYCLED ASPHALT PAVEMENT AND
CRUSHED CONCRETE BACKFILL

دفتر مطالعات فناوری و ایمنی



معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری
دفتر مطالعات فناوری و ایمنی - گروه مطالعات تطبیقی

عنوان گزارش	: بکارگیری مصالح حاصل از بازیافت رویه‌های آسفالتی و بتن خرد شده در خاکریز
تهیه و تألیف	: مرکز تحقیقات حمل و نقل - دفتر تحقیقات مهندسی دانشگاه تگزاس
مترجم	: فریده امیرفرهنگی
ویرایش فنی	: محمدمهدی خبیری
ویرایش ادبی	: مهسا مهرپویا
طرح جلد	: لیلا سلوکی
ناشر	: پژوهشکده حمل و نقل
نوبت چاپ	: اول
تاریخ انتشار	: زمستان ۱۳۸۴
کد انتشار	: 84/RRRM/180
شابک	: ۹۶۴-۶۲۹۹-۴۷-۴
تیراژ	: ۱۵۰۰
قیمت	: ۱۰۰۰۰ تومان
لیتوگرافی چاپ و صحافی	: پژمان
نشانی	: میدان آرژانتین - ابتدای بزرگراه آفریقا - اراضی عباس آباد - ساختمان شهید دادمان - وزارت راه و ترابری - طبقه سیزدهم شمالی - واحد اطلاع‌رسانی و نشر پژوهش‌ها
	تلفکس: ۸۲۲۴۴۱۶۴
	وب سایت فروش نشریات
	web:www.rahiran.ir
	http://shop.rahiran.ir

* کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است *

بسمه تعالی

وزارت راه و ترابری به عنوان متولی اصلی صنعت حمل و نقل کشور، نیازمند استفاده از بخش وسیعی از خدمات مهندسی در زمینه طراحی، ساخت، نگهداری و بهره‌برداری از اجزاء سیستم حمل و نقل می‌باشد. از این رو ضروری است که دانش فنی مورد نیاز بطور مستمر در اختیار مدیران و کارشناسان مربوطه قرار گرفته تا نیازهای مطالعاتی و تحقیقاتی آنها مرتفع گردد. معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت راه و ترابری درصدد است ضمن شناسایی نیازهای اساسی بخشهای مختلف وزارت متبوع و انجام تحقیقات علمی - کاربردی در زمینه مسائل فنی حمل و نقل و همچنین استفاده از آخرین دستاوردها و انجام مبادلات علمی با مجامع و سازمانهای علمی و تخصصی ذیربط، به رفع این نیازها بپردازد. در همین راستا این معاونت برآن است تا با تهیه و تدوین مجموعه گزارش‌های تخصصی، دانش فنی مورد نیاز را به شکلی مناسب در اختیار بخشهای مختلف وزارت متبوع و سایر متخصصان قرار دهد. گزارش حاضر تلاشی در راستای نیل به این هدف می‌باشد. محدودیت کاربرد نوع مصالح، باعث افزایش چشمگیری در هزینه انتقال مصالح منتخب به محل احداث پروژه می‌باشد. راه‌حلی که در این زمینه مفید به نظر می‌رسد، استفاده از مواد بازیافت شده مانند آسفالت بازیافت شده برای روسازی (RAP) و بتن با مصالح خرد شده (CC) است که از مناطق محلی تهیه شده و جهت ایجاد خاکریز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این امر نه تنها هزینه انتقال مواد را کاهش می‌دهد، بلکه از هزینه مصرف یا واگذاری مواد زاید نیز می‌کاهد. در این گزارش در مورد کاربرد مصالح حاصل از بازیافت رویه‌های آسفالتی و بتن خرد شده به عنوان خاکریز دیوارهای MSE بحث می‌شود همچنین خصوصیات اولیه مواد RAP و CC نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. امید است که با تلاشهای صورت گرفته در دفتر مطالعات فناوری و ایمنی و همکاری افرادی که در تهیه این گزارش ما را یاری رساندند، گامی مؤثر در جهت ایجاد تحول، نوآوری و ارتقاء عملکردها برداشته شود.

در پایان از پژوهشکده حمل و نقل، به جهت حمایت از انتشار این مجموعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

محمد جعفر اکرام جعفری

معاون آموزش، تحقیقات و فناوری

بکارگیری مصالح حاصل از بازیافت رویه‌های آسفالتی و بتن خرد شده در خاکریز

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل ۱- مقدمه
۱	۱-۱- پیش‌زمینه تحقیق و اهداف آن.....
۲	۲-۱- تعریف دیوارهای MSE.....
۵	۳-۱- تعریف RAP و CC.....
	فصل ۲- طراحی دیوارهای حائل تثبیت‌شده به روش مکانیکی (MSE)
۷	۱-۲- پایداری خارجی.....
۸	۱-۱-۲- پایداری لغزشی.....
۸	۲-۱-۲- پایداری واژگونی.....
۸	۳-۱-۲- گسیختگی ظرفیت باربری.....
۹	۴-۱-۲- عدم پایداری در عمق (پایداری کلی).....
۹	۲-۲- پایداری داخلی.....
۱۰	۱-۲-۲- گسیختگی کششی.....
۱۱	۲-۲-۲- دررفتگی آرماتور از خاک.....
۱۱	۳-۲- معیارهای بررسی کیفیت خاکریز.....
۱۵	۴-۲- خلاصه.....
	فصل ۳- مسایل مهندسی مربوط به کاربرد RAP و CC به عنوان خاکریز مورد استفاده در دیوارهای MSE
۱۶	۱-۳- مسایل مکانیک خاک (ژئوتکنیک).....
۱۶	۱-۱-۳- دانه‌بندی.....
۱۷	۲-۱-۳- تراکم آزمایشگاهی.....

۱۸	..... ۳-۱-۳- تراکم در محیط کارگاهی
۱۸	..... ۳-۱-۴- نفوذپذیری هیدرولیکی
۲۰	..... ۳-۱-۵- نشست
۲۱	..... ۳-۱-۶- مقاومت برشی
۲۲	..... ۳-۱-۷- خصوصیات رفتار خزشی مصالح
۲۳	..... ۳-۱-۸- آرماتوربندی دیوار MSE
۲۴	..... ۳-۱-۹- میزان مقاومت موجود در برابر دررفتگی آرماتور از خاک
۲۴	..... ۳-۱-۱۰- خلاصه‌ای از آیین‌نامه‌های مربوط به مصالح مورد استفاده در احداث دیوار MSE
۲۵	..... ۳-۲-۲- نکاتی درباره قابلیت پایداری
۲۵	..... ۳-۲-۱- استفاده از آسفالت بازیافتی روسازی‌ها
۲۶	..... ۳-۲-۲- بتن خردشده با مصالح
۲۷	..... ۳-۲-۳- دوام آرماتور در دیوارهای MSE
۲۷	..... ۳-۲-۴- تخریب آرماتورهای پلیمری
۲۸	..... ۳-۲-۵- خوردگی آرماتوربندی‌های فلزی قرارگرفته در خاک
۳۴	..... ۳-۲-۶- پیش‌بینی میزان خوردگی
۳۸	..... ۳-۳- خلاصه

فصل ۴- کاربردهای رایج RAP و CC

۴۰	..... ۴-۱- کاربردهای رایج RAP مرتبط با مکانیک خاک
۴۳	..... ۴-۲- کاربردهای رایج CC مرتبط با مکانیک خاک
۴۸	..... ۴-۳- خلاصه

فصل ۵- مشخصات مصالح مورد استفاده در دیوارهای MSE در تگزاس

۴۹	..... ۵-۱- مقدمه و کلیات
۴۹	..... ۵-۲- نتایج بررسی
۴۹	..... ۵-۲-۱- جداول نتایج بررسی
۵۳	..... ۵-۲-۲- نحوه مطالعه و بررسی

عنوان

صفحه

۵۴	..... ۳-۲-۵- یافته‌های جدید از مطالعات فوق.
	..... ۴-۲-۵- استفاده از نتایج تحقیق جهت انتخاب منابع لازم برای آزمایشهای اولیه مشخصات فنی مصالح
۵۵	..... بازیافتی
۵۶	..... ۳-۵- نتایج آزمایشهای انجام شده در آزمایشگاه
۵۶	..... ۱-۳-۵- مقدمه
۵۶	..... ۲-۳-۵- دانه بندی
۶۰	..... ۳-۳-۵- حدود
۶۲	..... ۴-۳-۵- وزن مخصوص
۶۲	..... ۵-۳-۵- pH
۶۳	..... ۶-۳-۵- مقاومت الکتریکی
۶۴	..... ۷-۳-۵- پیش بینی فعالیت خوردگی
۶۶	..... ۴-۵- عملیات انتخاب مصالح RAP و CC
۶۷	..... ۵-۵- آرماتوربندی
۶۸	..... ۶-۵- توصیه‌ها و پیشنهادها
۶۸	..... ۱-۶-۵- روسازی آسفالتی بازیافت شده
۶۸	..... ۲-۶-۵- بتن خرد شده (CC)
۶۹	..... ۳-۶-۵- مصالح رایج خاکریز
۶۹	..... ۴-۶-۵- آرماتوربندی

فصل ۶- خصوصیات اصلی مصالح مورد استفاده در نمونه‌های حجمی RAP, CC, CFM

۶۹	..... ۱-۶- توزیع مصالح دانه‌ای از نظر ابعاد (دانه بندی)
۶۹	..... ۱-۱-۶- بتن خرد شده (CC)
۷۰	..... ۲-۱-۶- روسازی آسفالتی بازیافتی (RAP)
۷۰	..... ۳-۱-۶- مصالح مرسوم خاکریز (CFM)
۷۲	..... ۴-۱-۶- دانه بندی نهایی پیشنهاد شده
۷۲	..... ۲-۶- وزن مخصوص
۷۴	..... ۳-۶- مشخصات فنی تراکم
۷۷	..... ۴-۶- روش تهیه نمونه

عنوان

صفحه

۷۷ ۵-۶- خلاصه

فصل ۷- خلاصه و نتایج

۷۹ ۱-۷- خلاصه

۷۹ ۲-۷- مروری بر مطالب پیشین

۸۰ ۳-۷- تعیین مشخصات فنی مصالح

۸۱ مراجع

فهرست جداول

صفحه

عنوان

۱۷	۱-۳- مشخصات فنی مخصوص دانه‌بندی خاکریز دیوارهای MSE تهیه‌شده توسط FHWA و TxDOT....
۱۹	۲-۳- روشهای به‌کاررفته از سوی FHWA و TxDOT جهت آزمایش تراکم.....
۲۵	۳-۳- مشخصات خاکریز دیوارهای MSE که توسط FHWA و TxDOT تعیین شده است.....
۲۸	۴-۳- مقاومت پیش‌بینی‌شده پلیمرها در محیطهای خاکی مخصوص.....
۳۰	۵-۳- معیار آزمایش آرماتوربندی فولاد گالوانیزه در کشورهای مختلف.....
۳۷	۶-۳- امتیازبندی براساس روش AWWA - استاندارد C105-72.....
۴۱	۱-۴- پروژه‌های TxPOT با استفاده از RAP به عنوان خاکریز (بعد از ۱۹۹۹، TxDOT).....
۴۲	۲-۴- طبقه‌بندی مصالح ضایعاتی بازیافتی به عنوان مصالح سنگدانه‌ای در احداث اساس راه.....
۴۴	۳-۴- خصوصیات فیزیکی مصالح بتن خردشده (از ACPA ۱۹۹۳).....
۴۶	۴-۴- پروژه‌های TxDOT که از CC به عنوان مصالح خاکریز استفاده می‌کنند.....
۵۰	۱-۵- نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته در نواحی TxDOT.....
۵۱	۲-۵- نتایج حاصل از مطالعات نواحی TxDOT.....
۵۲	۳-۵- نتایج حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته روی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه.....
۵۳	۴-۵- نتایج حاصل از بررسی‌های صورت‌گرفته روی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه.....
۵۷	۵-۵- دانه‌بندی RAP تولیدشده از SCC.....
۵۸	۶-۵- دانه‌بندی RAP تولیدشده در کورپوس کریستی.....
۵۸	۷-۵- دانه‌بندی RAP تولیدشده در ناحیه کورپوس کریستی.....
۵۹	۸-۵- دانه‌بندی RAP به‌دست‌آمده از ناحیه کورپوس کریستی.....
۵۹	۹-۵- دانه‌بندی RAP به‌دست‌آمده از ناحیه کورپوس کریستی.....
۶۰	۱۰-۵- دانه‌بندی CC ارسالی از BC و SCC.....
۶۱	۱۱-۵- خلاصه‌ای از حدود آت‌ریگ.....
۶۲	۱۲-۵- خلاصه‌ای از وزن مخصوص.....
۶۳	۱۳-۵- خلاصه‌ای از نتایج آزمایش pH.....
۶۴	۱۴-۵- خلاصه‌ای از نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی.....

عنوان

صفحه

۶۸	..... ۱۵-۵- انواع آرماتورهای دیوار MSE
۷۵	..... ۱-۶- وزن مخصوص مصالح مورد آزمایش
۷۶	..... ۲-۶- مقدار چگالی خشک و مقدار آب پیشنهادشده برای هر یک از نمونه‌ها

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۳	۱-۱- نمای شماتیک از دیوار خاک مسلح.....
۳	۲-۱- مکانیسم انتقال تنش ذرات خاک هنگام بارگذاری قائم.....
۴	۳-۱- مکانیسم‌های انتقال تنش، توزیع شده در طول آرماتوربندی.....
۵	۴-۱- نوار فولادی آج‌دار شده.....
۷	۱-۲- مکانیسم‌های خرابی در اثر ضعف پایداری خارجی.....
۹	۲-۲- جزئیاتی از نمودار نیروهای وارده برای محاسبه برون‌محوری نیرو.....
۱۰	۳-۲- الف- گسیختگی کششی داخلی و ب) در رفتگی آرماتور از خاک دیوار MSE.....
۱۱	۴-۲- تغییرات میزان تنش در ارتفاع دیوار MSE.....
۱۲	۵-۲- محل سطح گسیختگی برای (الف) آرماتوربندی شکل‌ناپذیر و (ب) آرماتوربندی شکل‌پذیر.....
۲۳	۱-۳- انواع آرماتور.....
۳۱	۲-۳- تأثیر pH بر میزان خوردگی فلزات مختلف.....
۴۶	۱-۴- تأثیر چگالی خشک بر حداکثر زاویه برش اصطکاک.....
۴۶	۲-۴- تأثیر تنش قائم بر حداکثر زاویه برش اصطکاک.....
۵۴	۱-۵- تولید RAP در نواحی مختلف TxDOT.....
۵۵	۲-۵- تولید CC و RAP از سوی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه.....
۶۰	۳-۵- منحنی دانه‌بندی برای نمونه‌های RAP ارسال شده از SCC و کورپوس کریستی.....
۶۱	۴-۵- منحنی دانه‌بندی برای نمونه‌های CC ارسال شده از BC و SCC.....
۶۵	۵-۵- طبقه‌بندی تعیین شده برای CC و RAP.....
۶۵	۶-۵- عمر مفید پیش‌بینی شده برای لوله‌های به‌کاررفته در مصالح CC.....
۶۶	۷-۵- عمر مفید پیش‌بینی شده برای لوله‌های به‌کاررفته در مصالح RAP.....
۷۱	۱-۶- نمودار دانه‌بندی CC.....
۷۲	۲-۶- نمودار دانه‌بندی RAP.....
۷۲	۳-۶- نمودار دانه‌بندی CFM.....
۷۳	۴-۶- دانه‌بندی پیشنهاد شده مرجع برای تمام مصالح مورد آزمایش.....
۷۵	۵-۶- منحنی تراکم برای CC براساس روش آزمایشی Tex-113-E.....
۷۵	۶-۶- منحنی تراکم برای RAP براساس روش آزمایشی Tex-113-E.....

۱- مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه تحقیق و اهداف آن

تاریخ احداث تعداد زیادی از دیوارهای خاکی (MSE)^۱ که به صورت مکانیکی تثبیت می‌شوند، به بیست سال پیش برمی‌گردد. اعتقاد بر این است که دیوارهای MSE در تمام ایالات متحده آمریکا و به ویژه در ایالات تگزاس، جورجیا، فلوریدا، پنسیلوانیا، نیویورک و کالیفرنیا احداث شده‌اند (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶). از جمله مزایای عمده دیوارهای MSE در مقایسه با سایر سازه‌های نگهدارنده و حائل می‌توان به انعطاف‌پذیری، زیبایی ظاهری، سهولت نصب و هزینه‌های پایین آنها اشاره کرد (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹). جهت حصول اطمینان از عدم خرابی دیوار در درازمدت، در سالهای گذشته استفاده از خاکریزهای معمولی که عمدتاً شامل خاکهای دانه‌ای بودند توصیه شده و بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است، اما محدودیت کاربرد نوع مصالح باعث افزایش چشمگیری در هزینه احداث بعضی از پروژه‌ها گردید که بیشتر به دلیل هزینه انتقال مصالح انتخابی به محل احداث پروژه (کارگاه) بود.

ایالت تگزاس یکی از بزرگترین سازنده‌های دیوارهای MSE در سراسر آمریکاست. با این وجود، بسیاری از مناطق تگزاس فاقد مصالح لازم جهت احداث خاکریز بوده و در واقع مصالح موجود در آن ایالت فاقد خصوصیات مورد نیاز اداره حمل‌ونقل تگزاس (TxDOT)^۲ برای احداث دیوارهای MSE می‌باشند. در چنین شرایطی، انتقال مصالح منتخب از سایر نقاط به این شهر امری ضروری به نظر می‌رسد. اما انتقال مصالح مورد نیاز باعث افزایش هزینه احداث دیوار MSE شده و دیوار تمام‌شده از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. راه‌حلی که در این زمینه مفید به نظر می‌رسد، استفاده از مواد بازیافت‌شده مانند آسفالت بازیافت‌شده برای روسازی (RAP)^۳ و بتن با مصالح شکسته (CC)^۴ است که از مناطق محلی تهیه شده و جهت ایجاد خاکریز، جایگزین مواد قبلی می‌شوند. این امر نه تنها هزینه انتقال مواد را کاهش می‌دهد، بلکه از هزینه مصرف یا واگذاری مواد زاید نیز می‌کاهد.

پروژه ۴۱۷۷-۰ اداره حمل‌ونقل تگزاس به ارزیابی قابلیت کاربرد RAP و CC به عنوان مصالح خاکریز در احداث دیوارهای MSE می‌پردازد. آزمایشهای ژئوتکنیکی خاص، آزمایشهای کشش آرماتور از بتن و آزمایشهای خوردگی و سایش نیز به اجرا گذاشته می‌شوند. پروژه حاضر شامل مطالعات وسیع آزمایشگاهی خواهد بود که به بررسی مشخصات کامل RAP و CC پرداخته و تأثیر این مصالح را بر پایایی آرماتوربندی‌های فلزی (ریختن سنگ خردشده روی بستر راه پوشیده‌شده با ماکادام و کوبیدن آنها جهت زیرسازی راه) و به خصوص تحلیل زمین‌شناسی آرماتوربندی‌های مورد استفاده در دیوارهای MSE مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای ایجاد تغییرات مناسب در زمینه تعیین مشخصات فنی مصالح، روشهای انجام آزمایشها و سایر نکات مربوط به طراحی و ساخت مورد استفاده قرار خواهند گرفت تا امکان استفاده از این مصالح به عنوان خاکریز دیوارهای MSE به وجود آید.

1- Mechanically Stabilized Earth
2- Texas Department of Transportation
3- Recycled Asphalt Pavement
4- Crushed Concrete

این گزارش شامل هفت فصل است. بعد از مقدمه و مروری بر مطالعات پیشین که در فصل ۱ آورده شده است، فصل ۲ مروری بر روش طراحی دیوارهای MSE خواهد داشت. فصل ۳ پیرامون نکات مهندسی مربوط به استفاده از RAP و CC به عنوان خاکریز دیوارهای MSE بحث می‌کند و فصل ۴ شامل بررسی مطالعات قبلی در زمینه کاربردهای اخیر RAP و CC در زمینه حمل و نقل می‌باشد. فصل ۵ نتایج به دست آمده از مطالعات مربوط به تولیدکننده‌های RAP و CC در ایالت تگزاس را خلاصه کرده و نتایج بررسی ویژگی‌های فنی نمونه‌های RAP و CC در سراسر تگزاس را بیان می‌کند. شناسایی منابع RAP و CC و نیز روش آرماتوربندی باقی مانده پروژه، در فصل ۵ مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. فصل ۶ نتایج به دست آمده از بررسی ویژگی‌های فنی اولیه مواد مورد استفاده در نمونه‌های حجمی RAP و CC را ارائه می‌دهد. این مواد در تمام مدت انجام پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در فصل ۶ مصالح مرسوم خاکریز و خصوصیات آنها بیان می‌شود. خلاصه مطالب و نتایج در فصل ۷ ارائه می‌گردد.

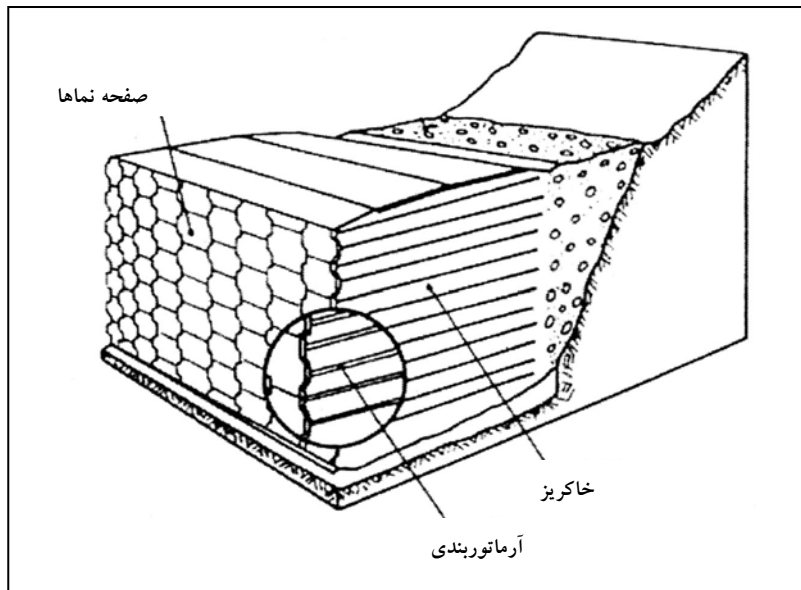
۲-۱- تعریف دیوارهای MSE

دیوار MSE به عنوان سازه قائم یا نسبتاً قائم نگهدارنده خاک یا زمین تعریف می‌شود که شامل سه قسمت اصلی است: دیوار نما، مسلح‌سازی خاک (آرماتوربندی) و خاکریز (شکل ۱-۱). این دیوارها مشابه سیستم خاک مسلح هستند و تنها جزء اضافی آنها دیواره نماست که به منظور زیبایی به کار برده می‌شود. وظیفه دیوار MSE، ایجاد ارتباط بین خاک و مسلح‌سازی زمین است. به محض وارد آمدن تنش عمودی بر خاکریز مثلاً وارد آمدن تنش سربار اعمال شده و وزن خود خاک، فشار افقی لازم در اثر انتقال تنش بین ذرات خاک، به طور همزمان تغییر می‌یابد (شکل ۱-۲). در حالی که خود خاک، مقاومت کششی کافی برای ایستادگی در برابر چنین فشارهای جانبی را ندارد، آرماتورهای مدفون شده می‌توانند ثبات کافی را برای خاک فراهم آورند.

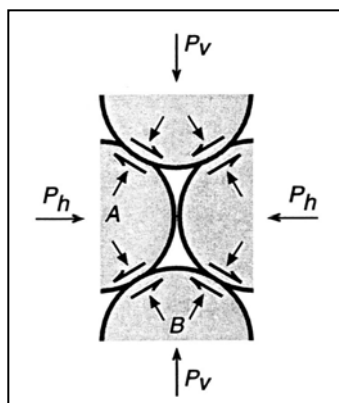
مفهوم خاک مسلح مبتنی بر وجود پیوستگی و درگیر شدن خاک و مصالح در برگیرنده آن می‌باشد (شلوسر و دیلیگ، ۱۹۸۸). در نتیجه، تنش کششی جانبی در خاک به مواد در برگیرنده آن منتقل می‌شود. لذا خاک مسلح به عنوان مصالح کامپوزیت یا مرکب عمل می‌کند که هر دو مؤلفه آن دارای بهترین ویژگی انتقال بار هستند (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹). آرماتوربندی قادر است از طریق مقاومت برشی بین خاک موجود خاکریز و آرماتورها، کرنش جانبی موجود در داخل خاکریز را کاهش دهد. در نتیجه، خاک مسلح طوری عمل می‌کند که گویی محدودیت جانبی اضافی بر آن اعمال شده است که این امر منجر به افزایش مقاومت در منطقه آرماتوربندی شده (مسلح) می‌شود.

شلوسر (۱۹۹۰) از طریق محاسبات میدانی ثابت کرد در آرماتورهایی که در دورترین نقطه از دیوار حائل قرار دارند، تنش کششی کاهش خواهد یافت. این مسأله نشان می‌دهد که تمام تنش‌های کششی موجود در آرماتورها به دیوار نماها منتقل نمی‌شوند. به عبارت دیگر، خود خاک مسلح می‌تواند به صورت عمودی و بدون سیستم نما بایستد. در نتیجه، هدف از طراحی دیوار نماها هدف سازه‌ای نبوده، بلکه به خاطر ایجاد ظاهری مناسب و جلوگیری از فرسایش خاک بین آرماتوربندی‌هاست. در بخش بعدی به بحث و بررسی پیرامون عملکرد اصلی مؤلفه‌های منحصربه‌فرد

دیوارهای حائل پرداخته و مطالعه گسترده‌ای در خصوص انواع متداول هر یک از مؤلفه‌ها و کاربرد رایج آنها انجام می‌شود.



شکل (۱-۱) نمای شماتیک از دیوار خاک مسلح (شلوسر و دیلیگ، ۱۹۸۸)



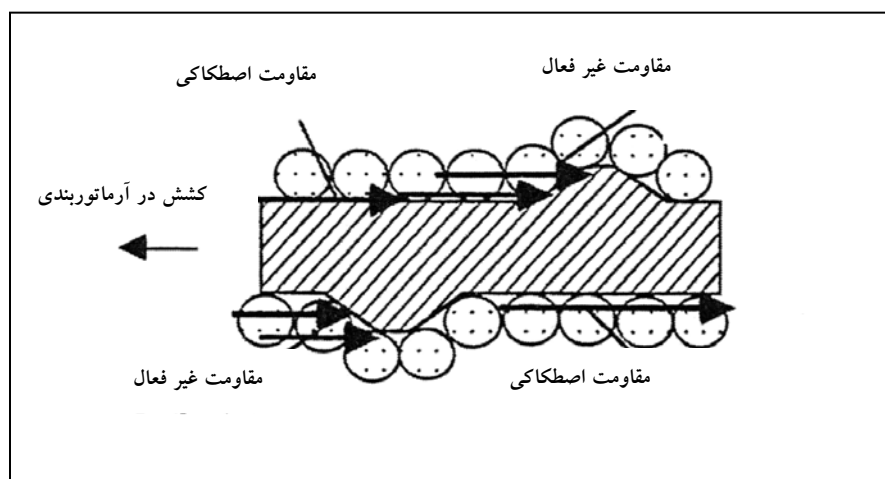
شکل (۲-۱) مکانیسم انتقال تنش ذرات خاک هنگام بارگذاری قائم (لام و وایتمن، ۱۹۶۹)

دیوار نما- اغلب اوقات قطعات بتنی پیش‌ساخته به خاطر داشتن ظاهری زیبا و سهولت نصب در دیوارهای MSE استفاده می‌شوند. هر قطعه با قطعات مجاور خود قفل و بست می‌شود تا دیواری با نمای یک‌دست و انعطاف‌پذیر تشکیل دهد. واحدهای مجاور عمودی با پین یا اتصالات برشی به هم متصل می‌شوند. به علاوه، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، صفحه نماها به منظور پشتیبانی سازه‌ای طراحی نشده‌اند. در واقع، وظیفه اصلی آنها جلوگیری از فرسایش خاکریز و در بعضی موارد ایجاد مسیر زهکشی در سراسر دیوار است. معمولاً در محل اتصالات از نوارهای ژئوتکستایل استفاده می‌شود تا از آبستگی خاکریز بین صفحات مجاور در این نقطه جلوگیری شود.

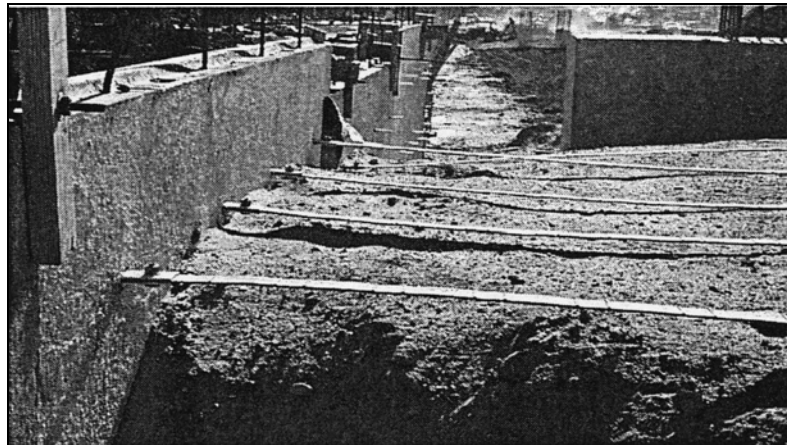
مسلح نمودن - وظیفه اصلی آرماتور، بهبود خصوصیات مکانیکی خاکریز است. در حال حاضر، آرماتورها به دو صورت فلزی (به خصوص فولاد نرمه) یا غیر فلزی (معمولاً پلیمری) طبقه‌بندی می‌شوند. آرماتورها براساس قابلیت انعطاف‌پذیری نیز قابل طبقه‌بندی هستند. آرماتور غیر انعطاف‌پذیر، آرماتوری است که تغییر شکل آن در هنگام گسیختگی به مراتب کمتر از تغییر شکل خاک می‌باشد، در حالی که قابلیت تغییر شکل آرماتوربندی انعطاف‌پذیر در هنگام گسیختگی بیشتر از قابلیت تغییر شکل خاک است.

مکانیسم‌های انتقال تنش بین آرماتور و خاک به دو شکل دیده می‌شوند. نوع اول، انتقال تنش با مقاومت اصطکاکی است. این مقاومت در محلی که کرنش برشی و تنش برشی یکنواخت، بین خاک و سطح آرماتور وجود دارد، دیده می‌شود (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶). نوع دوم، مقاومت کم اثر یا غیر فعال است که تنها از طریق تحمل انواع تنش‌ها روی سطوح جانبی آرماتوربندی که با مسیر حرکت هم‌جهت هستند، افزایش می‌یابد. شکل (۳-۱) هر دو مکانیسم برشی را نشان می‌دهد. متداول‌ترین آرماتوربندی در تگزاس از نوع نوارهای فولادی گالوانیزه‌شده که تلفیقی از دو مکانیسم انتقال تنش محسوب می‌شود، می‌باشد (شکل ۴-۱).

خاکریز - هزینه مصالح مورد استفاده در خاکریز از کل هزینه احداث دیوار MSE بیشتر است. الیاس و کریستوفر (۱۹۹۶) معتقدند استفاده از خاکی که در منطقه احداث پروژه موجود است می‌تواند تا میزان زیادی از کل هزینه احداث دیوار بکاهد و در مقایسه با دیوارهای مرسوم، ۲۰ تا ۶۰ درصد از مجموع هزینه‌ها کاسته می‌شود. وظیفه اصلی خاکریز، ایجاد وزن، مقاومت فشاری و مقاومت برشی است تا از پایداری دیوار حائل یقین حاصل گردد (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹). همچنین از لحاظ ویژگی‌های فیزیکی باید ماده‌ای برای خاکریز انتخاب شود که زهکش بوده و مقاومت اصطکاکی بالایی داشته باشد. جزئیات بیشتری در مورد مصالح مورد استفاده در خاکریز و مشخصات اصلی آن در فصل ۳ خواهد آمد.



شکل (۳-۱) مکانیسم‌های انتقال تنش، توزیع شده در طول آرماتوربندی (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹)



شکل (۱-۴) نوار فولادی آج‌دار شده

اجرای دیوار MSE در IH-35 و US290 شهر آستین (Austin) تگزاس

۳-۱- تعریف RAP و CC

RAP به مصالح روسازی لایه‌برداری شده و یا بازیافت شده که حاوی قیر و مصالح سنگی است، گفته می‌شود. مصالح مورد استفاده در روسازی آسفالتی معمولاً از طریق خرد کردن مواد سنگدانه یا لایه‌برداری عمقی از آسفالت قدیمی به دست می‌آیند. خرد کردن مواد مستلزم برداشتن لایه آسفالتی از سطح روسازی است که به وسیله دستگاه خردکن صورت می‌گیرد. این ماشین می‌تواند با یک بار عبور از روی روسازی بیش از ۲ اینچ (۵ سانتی‌متر) از سطح آن را بردارد. لایه‌برداری کاملاً عمقی معمولاً از طریق سنگ‌شکن پنوماتیک روسازی یا بولدوزر صورت می‌گیرد. مصالح شکسته شده برای یک سری پردازشهای بازیافتی از جمله سنگ‌شکنی و سرندزنی، انتقال و انبار کردن، به کارخانه مرکزی انتقال داده می‌شوند. همچنین می‌توان روسازی آسفالتی را در محل اجرای پروژه خرد کرده، نرم ساخته و با استفاده از ماشین پودرسازی چرخان با مواد دانه‌ای یا مواد آماده شده مخلوط کرد (FHWA، ۲۰۰۰). بازیافت مواد در محل اجرای پروژه باعث کاهش هزینه انتقال مجدد مواد به کارخانه آماده‌سازی مصالح و انتقال مصالح آماده شده به محل احداث پروژه می‌شود.

CC از طریق خرد کردن اجزای بتنی سیمان پرتلند که از راهها، باند فرودگاه‌ها و سازه‌های بتنی به دست آمده، تولید می‌شود. بتن با مصالح شکسته معمولاً به وسیله بیل مکانیکی^۱ یا لودر^۲ لایه‌برداری شده و برای انتقال از کارگاه (محل احداث پروژه) در کامیونهای کمپرسی بارگیری می‌شود. در مواردی که بتن خرد شده از روسازی‌های تخریب شده تأمین می‌شود، انتظار می‌رود مواد خاک‌برداری شده شامل خاک و مقادیر کمی از بتن قیراندود باشند. مصالح بتنی لایه‌برداری شده به کارخانه مرکزی آماده‌سازی مصالح منتقل می‌شوند تا کار سنگ‌شکنی، سرندزنی و بازیافت فلزات آهنی قبل از انبار نمودن مصالح آماده شده، انجام گیرد. با این حال، بازیافت و پردازش در محل کارگاه می‌تواند در کارخانه‌های سیار صورت گیرد. در کارخانه مرکزی، مصالح لایه‌برداری شده وارد سنگ‌شکن‌های اولیه و ثانویه می‌شوند.

1- Backhoe
2- Payloader

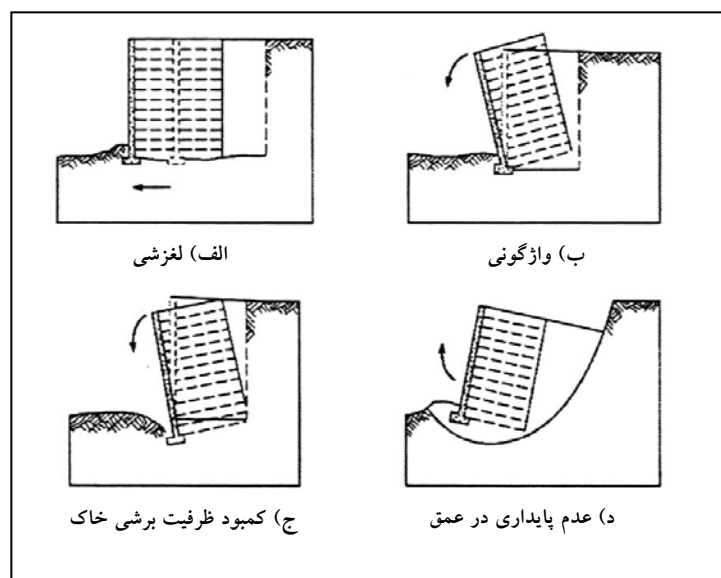
سنگ شکن اولیه عناصر آرماتوربندی موجود در نخاله‌های بتنی را شکسته و لاشه سنگها را به قطعات ۳ تا ۴ اینچی (۷ تا ۱۰ سانتی متر) خرد می کند. برداشتن فولاد مسلح به وسیله جداکننده الکترومغناطیسی و در حین انتقال مواد به سنگ شکن ثانویه صورت می گیرد. سنگ شکن ثانویه ذرات را به اندازه‌های مورد نظر می شکند. بعد از جداسازی ذرات ریز و درشت از یکدیگر که به منظور جلوگیری از اختلاط مواد صورت می گیرد، مواد آماده شده انبار می شوند.

۲- طراحی دیوارهای حائل تثبیت‌شده به روش مکانیکی (MSE)

این فصل به توصیف روشهای طراحی دیوارهای MSE براساس دستورالعمل‌های اجرایی FHWA پرداخته (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶) و پیرامون ویژگی‌های بحرانی خاکریز جهت طراحی و اجرای بهینه دیوار MSE بحث می‌کند. دستورالعمل‌های FHWA برای دیوارهایی با دیواره‌های نسبتاً عمودی و آرماتورهای با طول مشخص کاربرد دارند. طراحی دیوارهای حائل شامل تعیین ابعاد و آرماتورهاست که مانع از خرابی داخلی و خارجی دیوار MSE می‌شود. پایداری داخلی و خارجی دیوار با استفاده از روشهای تعادل نیرو در تحلیلها مورد توجه قرار می‌گیرد. بخشهای ذیل به بررسی روشهای طراحی مشخصات خاکریز دیوارهای MSE می‌پردازند.

۲-۱- پایداری خارجی

پایداری خارجی دیوار MSE به ابعاد کل سیستم دیوار بستگی دارد. همان طور که در شکل (۱-۲) نشان داده می‌شود، در مجموع، چهار مکانیسم خرابی بالقوه موجود می‌باشد که با پایداری خارجی ارتباط دارند: (۱) لغزش، (۲) واژگونی، (۳) کمبود ظرفیت برشی و (۴) عدم پایداری در عمق. طول اولیه آرماتوربندی $H/7$ یا $2/5$ m انتخاب می‌شود (هر کدام بزرگتر باشد)، منظور از H همان ارتفاع دیوار است. بعد از انتخاب ابعاد اولیه کل سیستم دیوار، بررسی پایداری خارجی آغاز می‌شود. میزان پایداری خارجی هر مورد گسیختگی در قالب ضریب ایمنی (FS) نشان داده می‌شود. قسمتهای فرعی زیر به توصیف روشهای طراحی و بررسی پایداری با توجه به مکانیسم‌های منحصربه‌فرد گسیختگی می‌پردازند.



شکل (۱-۲) مکانیسم‌های خرابی در اثر ضعف پایداری خارجی (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶)

۲-۱-۱- پایداری لغزشی

ضریب ایمنی در مقابل لغزش (FS) عبارت است از نسبت کل نیروی مقاومت افقی تقسیم بر کل نیروی رانش افقی که روی دیوار اعمال می‌شود. به طور کلی، حداقل نیروی مقاومت برشی در امتداد پایه دیوار بوده یا ضعیف‌ترین لایه نزدیک پایه دیوار محسوب می‌شود. نیروی رانش عبارت است از مؤلفه افقی فشار فعال زمین از خاک حائل که پشت منطقه آرماتوربندی شده قرار دارد. خاکریزهای با زاویه‌های اصطکاک داخلی بالا که در پایه دیوار احداث می‌شوند، باعث افزایش نیروی مقاومت شده و لذا در هزینه آرماتوربندی صرفه‌جویی می‌شود. FHWA تأکید می‌کند که ضریب ایمنی در مقابل لغزش باید بزرگتر از ۱/۵ باشد. اگر ضریب ایمنی کمتر از ۱/۵ باشد، باید طول آرماتوربندی افزایش یافته و پایداری لغزشی مجدداً محاسبه شود. افزایش در طول آرماتورها به علت افزایش مساحت لغزش موجب ازدیاد نیروی مقاومت می‌شود. فراهم آوردن شرایط لازم برای ایجاد پایداری خارجی در برابر لغزش مهمتر از تغییر در ابعاد کلی دیوار حائل است (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۵).

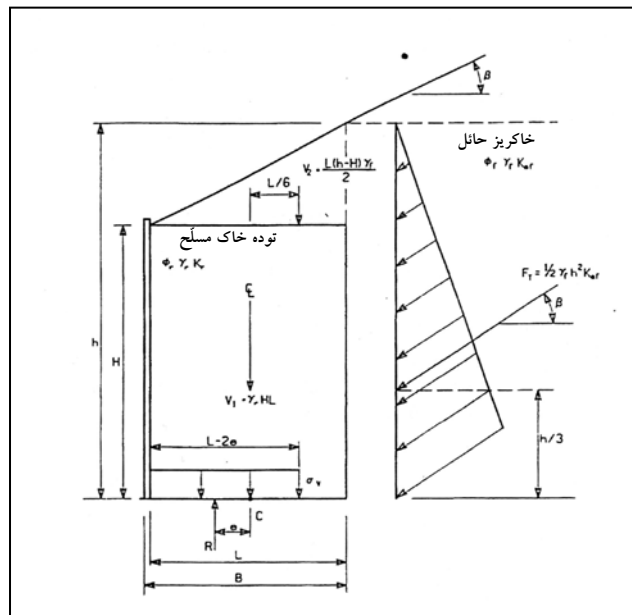
۲-۱-۲- پایداری واژگونی

در روشهای طراحی FHWA، پایداری در برابر واژگونی دیوار MSE، با توجه به حداکثر نیروی مؤثر خارج از محور تعیین می‌شود. نیروی مؤثر مجموعه‌ای از نیروهای قائم است که بر خاکریز مسلح اعمال می‌شوند. به عنوان مثال در شکل (۲-۲)، نیروی مؤثر شامل وزن خود خاکریز (V_1+V_2) به علاوه مؤلفه عمودی فشار خاک پشت دیواره حائل $(\beta F_T \sin)$ می‌باشد. نیروی خارج از محور (e) از تقسیم مجموع گشتاورهای کل مقطع خاک مسلح حول خط مرکزی کل مقطع بر R محاسبه می‌شود. FHWA توصیه می‌کند برای فونداسیون خاک، حداکثر میزان خروج از محوریت $L/6$ و برای فونداسیون سنگ این مقدار $L/4$ باشد ($L =$ طول آرماتوربندی). برای عملیات کلی، در صورتی که مقدار برون‌محوری از مقدار کمی توصیه شده FHWA بیشتر باشد، طول آرماتوربندی نیز باید افزایش یابد. انعطاف‌پذیری دیوارهای MSE سبب می‌شود پتانسیل واژگونی کاملاً ناچیز باشد (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶).

۲-۱-۳- گسیختگی ظرفیت باربری

گسیختگی ظرفیت باربری در طراحی سازه‌های حائل مرسوم اهمیت زیادی دارد. به طور کلی، در طراحی دیوار MSE دو حالت گسیختگی ظرفیت باربری مورد بررسی قرار می‌گیرد: گسیختگی برشی کلی و گسیختگی برشی موضعی. ضریب ایمنی در برابر گسیختگی برشی از نسبت ظرفیت باربری نهایی (qult) که از تئوری ظرفیت باربری به دست آمده و تنش عمودی (σ_v) که روی مساحت مفید پایه دیوار $(L - 2e)$ اعمال می‌شود، قابل محاسبه است. FHWA حداقل مقدار ضریب ایمنی برای گسیختگی ظرفیت باربری را ۲/۵ تعیین می‌کند. در مواردی که پی دیوار روی خاک نرم ساخته می‌شود، راهنمای FHWA توصیه می‌کند از محاسبه پایداری در برابر گسیختگی برشی موضعی صرف نظر شود. در واقع، اگر تنش عمودی واردآمده از طرف خاکریز (γH) ، سه برابر کمتر از چسبندگی

خاک در زیر پی (3c) باشد، می‌توان از مقاومت مذکور چشم‌پوشی کرد، در غیر این صورت باید خاک زیر فونداسیون اصلاح شود تا مقاومت برشی نیز بهبود یابد.



شکل (۲-۲) جزئیاتی از نمودار نیروهای وارده برای محاسبه برون‌محوری نیرو (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶)

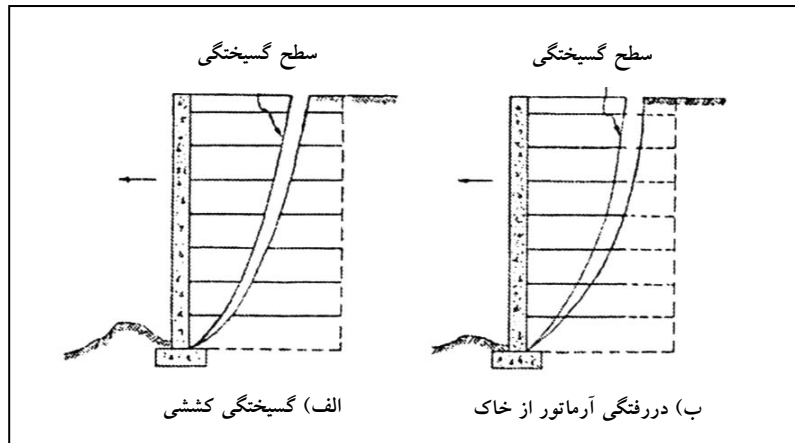
۲-۱-۴- عدم پایداری در عمق (پایداری کلی)

در مورد دیوارهایی که بر دامنه‌های شیب‌دار یا روی فونداسیونهایی با خاک نرم ساخته می‌شوند، مسأله پایداری در عمق از حساسیت زیادی برخوردار است. پایداری کلی از طریق آنالیز پایداری دورانی یا گوه‌ای تعیین شده و با استفاده از روشهای قدیمی افزایش پایداری شیروانی خاک قابل دستیابی است. هنگام محاسبه پایداری، کل سیستم دیوار MSE به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده و تنها سطوح گسیختگی که کاملاً خارج از مجموعه خاک مسلح قرار دارند، مد نظر هستند. برای چنین حالتی، حداقل ضریب ایمنی، $1/3$ پیشنهاد می‌شود. اگر طراحی اولیه نتواند پایداری در عمق را تأمین کند، طول آرماتوربندی باید زیاد شده یا روشهای اصلاح زمین به مورد اجرا گذاشته شوند.

۲-۲- پایداری داخلی

ارزیابی پایداری داخلی شامل ارتباط بین آرماتورها و خاکریز است (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۵). مکانیسم انتقال تنش به نوع سیستم دیوار، قابلیت توسعه و عدم قابلیت توسعه بستگی دارد. در زمینه طراحی، دو مورد گسیختگی داخلی مد نظر قرار می‌گیرند که عبارتند از: گسیختگی کششی و دررفتگی آرماتور از خاک (شکل ۲-۳). قبل از بررسی پایداری داخلی باید به ارزیابی مقدماتی مکانیسم انتقال نیرو پرداخت. این ارزیابی‌ها عبارتند از: (۱) تعیین حداکثر نیروهای کششی افزایش‌یافته و جایگاه آنها در امتداد مکان هندسی سطوح بحرانی لغزش. (۲) ارزیابی مقاومت کششی و

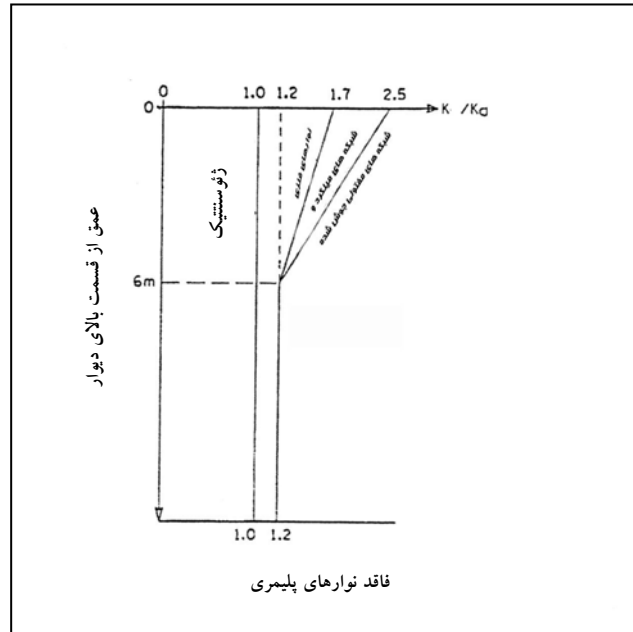
مقاومت آرماتور در برابر دررفتگی از خاک از طریق انجام آزمایشهای مکانیک خاک، بخشهای بعدی، روش کلی بررسی حالتیهای گسیختگی داخلی را شرح می دهند.



شکل (۳-۲) الف) گسیختگی کششی داخلی و ب) دررفتگی آرماتور از خاک دیوار MSE (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۵)

۲-۲-۱- گسیختگی کششی

گسیختگی کششی زمانی رخ می دهد که نیروی کششی موجود در آرماتور آنقدر زیاد شود که آرماتور بیش از حد امتداد یافته یا پاره شود (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶). بررسی گسیختگی کششی مستلزم تعیین حداکثر نیروی کششی موجود (T_{max}) و مقایسه آن با کشش مجاز (T_a) آرماتور است. به طور کلی، کشش مجاز (T_a) یا از طریق تولیدکننده های مصالح یا به وسیله آزمایش در آزمایشگاه مشخص می شود. حداکثر نیروی کششی موجود در هر لایه، از ضرب فاکتور یا ضریب فشار جانبی خاک (K) در تنش قائم موجود در آن عمق و با توجه به مجموع سطح مقطع هر یک از آرماتورهای دیگر به دست می آید. مطالعات قبلی نشان داده اند که حداکثر نیروی کششی طبق شکل (۲-۴) به نوع آرماتور بستگی دارد. این شکل از طریق تحلیل عکس نسبت تنش جانبی (K) به دست آمده از داده های میدانی موجود، رسم شده است. در این تحلیل، تنش های موجود در آرماتور به عنوان تابعی از ضریب فشار فعال خاک (K_a) اندازه گیری و تعدیل می شوند (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶). در قسمت فوقانی، دیوار آرماتورهای فلزی سبب گسترش نیروها شده و آنها را به مقداری بیش از آنچه که توسط ضریب فشار فعال خاک (K_a) پیش بینی می شود، می رساند. لذا مقدار عددی K باید بیشتر باشد. در مورد آرماتورهای ژئوسنتتیک، K_a عبارت است از ضریب فشار مناسب خاک. بعد از محاسبه مقدار T_{max} ، از طریق مقایسه آن با مقدار T_a می توان ضریب ایمنی در برابر گسیختگی را مشخص نمود.



شکل (۲-۴) تغییرات میزان تنش در ارتفاع دیوار MSE (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶)

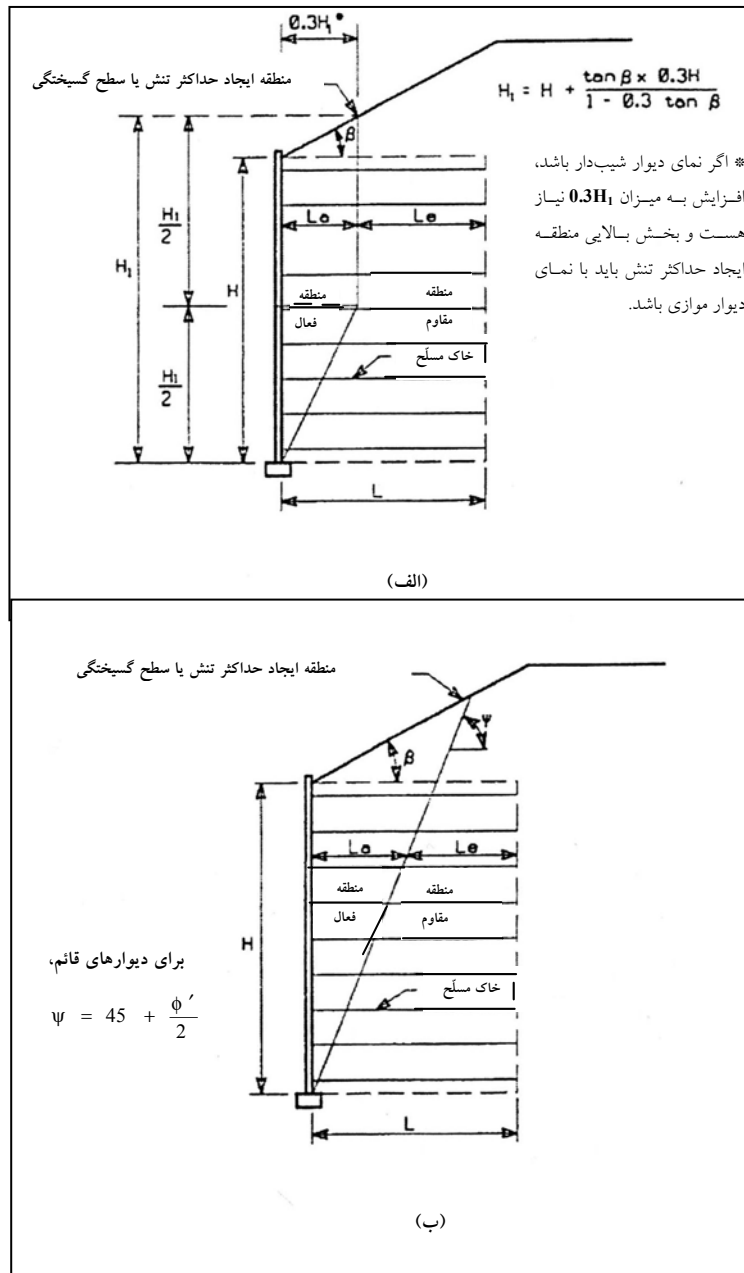
۲-۲-۲- دررفتگی آرماتور از خاک

مطالعه پایداری آرماتور در برابر دررفتگی از خاک، جدا از سایر روشهای مطالعه پایداری بوده و به محاسبه ضریب ایمنی حاصل از مقایسه نیروهای رانش و نیروهای مقاوم نمی‌پردازد. محاسبات لازم برای این حالت گسیختگی، از محاسبه طول آرماتور در منطقه مقاوم (L_e) که خارج از سطح گسیختگی داخلی است، انجام می‌شود. این منطقه مقاوم موجب افزایش نیروی مقاومت در برابر دررفتگی آرماتورها از خاک می‌شود. در پروژه‌های قبلی تصور بر این بود که مقاومت آرماتور در برابر دررفتگی از خاک در پشت صفحه گسیختگی کولمب افزایش می‌یابد. با این حال، محاسبات میدانی و تحلیلهای نظری نشان داده‌اند که صفحه وقوع گسیختگی عملاً با محل ایجاد حداکثر نیروهای کششی (T_{max}) در آرماتورها مطابقت دارد (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۵). همچنین محل وقوع حداکثر نیروهای کششی عمدتاً به قابلیت شکل‌پذیری آرماتورها بستگی دارد. شکل (۲-۵) محل سطح گسیختگی در آرماتور شکل‌پذیر و شکل‌ناپذیر را نشان می‌دهد. مقدار L_e برای هر یک از لایه‌های آرماتوربندی از طریق تقسیم حداکثر نیروی کششی موجود در آن لایه بر T_{max} مقاومت مجاز آرماتور در برابر دررفتگی از خاک به‌دست‌آمده در آزمایشگاه محاسبه می‌شود. در نهایت با توجه به مقدار عددی L_e ، ضریب ایمنی $1/5$ توصیه می‌شود.

۲-۳- معیارهای بررسی کیفیت خاکریز

در احداث دیوار MSE ایده‌آل، خاکریز به عنوان مهره اصلی ایفای نقش می‌کند. براساس تحلیلهای پایداری قبلی، مصالح ایده‌آل برای خاکریز باید دارای مقاومت برشی زیاد بعد از زهکشی بوده (C', ϕ') و خصوصیات زهکشی مناسبی داشته باشند. برای اجتناب از تغییر شکل‌های بیش از حد سطح کار، خاکریز باید با گذشت زمان تراکم‌پذیری

پایینی نیز داشته باشد. استفاده از مصالحی با کیفیت بالا منجر به کاهش طول مسلح نمودن خاک می شود و لذا هزینه کلی دیوار MSE کاهش می یابد. خاکریز با زهکشی خوب مانع از جمع شدن آب در پشت دیوار شده و لذا فشار جانبی را بر سیستم نما افزایش نمی دهد. خصوصیات فوق الذکر، عوامل اصلی در انتخاب مصالح خاکریز به شمار می روند. با این حال، جهت حصول اطمینان از عملکرد ایده آل دیوار در درازمدت باید سایر ویژگی های خاکریز در رابطه با مسایل مهندسی نیز مد نظر قرار گیرند. سایر معیارهای خصوصیات مصالح خاکریز در بخش ذیل مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.



شکل (۵-۲) محل سطح گسیختگی برای (الف) آرماتوربندی شکل ناپذیر و (ب) آرماتوربندی شکل پذیر

(الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶)

نفوذپذیری - مصالح مورد استفاده در احداث خاکریز انواع دیوارهای حائل باید به راحتی زهکش باشند، به طوری که فشار آب در پشت دیوار حائل ایجاد نگردد. خصوصیات خاکریز عمدتاً درصد ذرات موجود در آن را محدود می‌سازند. در مورد دیوارهای MSE، مصالحی که باعث زهکشی راحت خاکریز نمی‌شوند، خوردگی آرماتورهای فلزی را افزایش می‌دهند. لذا خاکریز با پتانسیل بالای جذب آب مانند خاکریز حاوی خاک رس یا پودر سنگ برای استفاده در دیوار MSE قابل قبول به نظر نمی‌رسد.

پارامترهای مقاومت برشی - مصالح خاکریز باید مقاومت برشی بالایی داشته باشند تا پایداری داخل خود خاکریز تأمین شده و ارتباط مناسبی با آرماتوربندی به وجود آید (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹). نیروهای موجود در آرماتورهای دیوار MSE به نیروی افقی زمین مربوط می‌شوند، همان طور که در شکل ۲-۴ دیده می‌شود. این نیرو در اعماق مختلف روی دیوار اعمال می‌شود. فشار افقی زمین با استفاده از پارامترهای مقاومت برشی خاکریز محاسبه می‌شود. به طور کلی، زمانی که از مصالح زهکش استفاده می‌شود، برای محاسبه پایداری دیوار باید از پارامترهای مربوط به تنش برشی مؤثر (C', ϕ') استفاده گردد. از سوی دیگر، اگر خاکریز نسبت به فشار آب منفذی، نفوذپذیری کمتری داشته باشد و کاهش فشار آب موجود طول بکشد، تکمیل خاکریز نیاز به صرف وقت زیادی دارد. در فرایند طراحی خاکریز باید پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده نیز مورد توجه قرار گیرند.

اصطکاک داخلی - زاویه اصطکاک سطح داخلی بین خاکریز و آرماتور در طراحی طول آرماتور بسیار مهم است. به طور کلی، این پارامتر از طریق آزمایشهای مقاومت آرماتور در برابر دررفتگی از خاک به دست می‌آید. طبق آخرین تحقیقی که روی اصطکاک سطح داخلی انجام گرفت، مصالحی که به خوبی دانه‌بندی شده و دارای دانه‌های با زوایای تیز هستند، زاویه اصطکاک سطح داخلی بالایی نیز دارند. همچنین مقدار رطوبت و درصد ذرات ریز می‌توانند روی مقاومت آرماتورها در برابر دررفتگی از خاک تأثیر داشته باشند.

خصوصیات تراکم - طی ساخت خاکریز، مصالح مورد استفاده در آن باید به خوبی متراکم شوند تا مقاومت برشی مناسب، اصطکاک سطح داخلی مناسب و حداقل تراکم را داشته باشند. اگر روش تراکم یکسان است، تفاوت در حداکثر چگالی خشک دو ماده مختلف، به شکل ذرات، دانه‌بندی و میزان رطوبت حین تراکم مربوط می‌شود. مصالحی که ورقه‌ای نیستند و نیز مصالحی که دانه‌بندی پیوسته دارند، همواره مقدار بیشتری از چگالی حداکثر را نشان می‌دهند. مصالحی که رطوبت کمتری دارند، دارای تنش‌های داخلی موثینه‌ای هستند که مانع از تراکم مصالح شده و لذا چگالی خشک آنها کمتر است (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹). شکستن ذرات در حین تراکم، عامل مهم دیگری از خصوصیات زهکشی خاکریز به شمار می‌رود. ذرات ریز اضافی ناشی از خردشدگی، نفوذپذیری کمتری دارند و خصوصیات مقاومت برشی خاکریز را تغییر می‌دهند.

تراکم‌پذیری ماده متراکم‌شده - به طور کلی، حضور ذرات ریز در ماده خاکریز نشانگر پتانسیل نشست خاکریز در درازمدت است. همچنین نشست، زمانی رخ می‌دهد که خاکریز در سراسر فضای دیوار به صورت یکنواخت متراکم

نشده باشد. این نشست‌ها می‌توانند مشکلاتی در زمینه اجرای روسازی روی سطح خاکریز ایجاد کنند. نشست زیاد نیز موجب تخریب آرماتوربندی و سیستم نمای دیواره می‌شود. وقتی چنین نشست‌هایی اتفاق می‌افتند، نیروهای قائم بر آرماتوربندی‌ها اعمال شده و تنش عمودی نامطلوب روی سیستم نما وارد می‌شود.

به علاوه، زمانی که خاکریز با مصالح دانه‌ای با چگالی خشک پایین و درصد رطوبت کم متراکم شود، به دلیل نفوذ رطوبت نشست قابل توجهی پیدا می‌کند. این مکانیسم تغییر شکل، نشست کلی نامیده می‌شود. در صورتی که این نوع خاک اگر مقدار آب کمتری داشته باشد، می‌تواند با اندک نشستی در برابر تنش‌های عمودی اعمال‌شده نسبتاً بزرگ مقاومت کند. اما بعد از افزایش رطوبت، در صورتی که تنش عمودی بیشتر از مقدار قبلی خود نباشد، باز هم خاکریز نشست قابل توجهی پیدا خواهد کرد (ASTM D5333). لذا پتانسیل نشست کلی خاکریز باید مورد مطالعه قرار گیرد.

رفتار وابسته به زمان (رفتار خزش) - رفتار خزشی عبارت است از تغییر شکل برگشت‌ناپذیر در طول زمان

ناشی از اعمال تنش افزایشی (ASTM D5520). در مورد دیوارهای MSE، اعتقاد بر این است که تغییر شکل خزش با افزایش نیروهای موجود در آرماتور مرتبط بوده و می‌تواند به واسطه تغییر شکل افراطی یا نشست کلی خاکریز، گسیختگی دیوار را در پی داشته باشد. در بعضی از مصالح، رفتار خزشی تابع درجه حرارت بوده و در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد. برای پایداری در درازمدت، مصالح خاکریز نباید مستعد خزش باشند. در مورد مصالح ناشناخته، آزمایش خزش انجام می‌شود تا رابطه بین مقاومت خزشی و عواملی مانند زمان گسیختگی، حداقل مقدار خزش، تداوم کرنش در گسیختگی و درجه حرارت مشخص شود. این روابط در انتخاب ماده‌ای با خصوصیات مناسب که با وضعیت بارگذاری فرضی نیز سازگار باشد به مهندسان کمک می‌کنند.

خوردگی - خوردگی در عملکرد آرماتوربندی فلزی دیوارهای MSE بسیار اهمیت دارد. خوردگی زودرس یا

غیر قابل پیش‌بینی آرماتوربندی‌ها می‌تواند موجب گسیختگی ناگهانی و فاجعه‌آمیز سازه‌های MSE شود. همان‌طور که در شکل (۲-۵) نشان داده می‌شود، این خوردگی نباید در محل حداکثر تنش کششی در امتداد سطح پتانسیل گسیختگی باشد. خاکریز نباید شامل مصالحی با آسیب‌رسانی بالا باشد، زیرا این مواد به آرماتوربندی آسیب رسانده یا موجب تخریب آن می‌شوند. FHWA از میزان pH و مقاومت الکتریکی به عنوان شاخص‌های نشان‌دهنده پتانسیل خوردگی مصالح خاکریز استفاده می‌کند.

مقاومت الکتریکی عبارت است از اندازه‌گیری پایداری ماده در برابر عبور جریان الکتریسیته. در نتیجه، مقدار

پایین مقاومت الکتریکی نشانگر پتانسیل بالای خوردگی می‌باشد. به علاوه، ماده به شدت اسیدی (pH پایین) یا به شدت قلیایی (pH بالا) خود یک ماده خورنده به شمار می‌رود، زیرا با حضور الکترولیت، تفاوت ولتاژ بین سطوح فلزی موجب به وجود آمدن جریان الکتریکی می‌شود. لذا خاکریز ایده‌آلی که بتواند در مقابل خوردگی مقاومت کند، باید دارای مقاومت الکتریکی بالا بوده و مقدار pH آن در محدوده مجاز باشد. مقدار مقاومت الکتریکی نیز تحت تأثیر وجود نمک‌های حلال موجود در مصالح قرار می‌گیرد. غلظت بالای نمک‌های حلال روی واکنش الکتروشیمیایی در سطح فلز تأثیر گذاشته و مقاومت الکتریکی ماده را کاهش می‌دهد. نوع یون نیز در فرایند خوردگی اهمیت دارد. دو یون شیمیایی

عمده که دارای پتانسیل بالای خوردگی شناخته شده می‌باشند، کلریدها و سولفات‌ها هستند (رابلر، ۱۹۸۹). حضور این دو ماده شیمیایی در خاکریز باید محدود بوده و به ترتیب برای کلریدها کمتر از ۱۰۰ ppm و برای سولفات‌ها کمتر از ۲۰۰ ppm باشد.

۲-۴- خلاصه

این فصل به تشریح روشهای طراحی دیوارهای MSE که از سوی FHWA پیشنهاد شده، می‌پردازد (الیاس و کریستوفر، ۱۹۹۶). روشهای طراحی فوق قصد دارند با استفاده از روشهای تعادل حدی، پایداری داخلی و خارجی دیوارهای MSE را مورد ارزیابی قرار دهند. خصوصیات بحرانی خاکریز که روی دیوار MSE تأثیر دارند، عبارتند از: نفوذپذیری، مقاومت برشی، اصطکاک داخلی بین خاکریز و آرماتور، خصوصیات تراکم و نشست، خزش و خوردگی. این معیارهای کیفیت خاکریز در طی یک دوره مطالعه سه‌ساله مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

۳- مسایل مهندسی مربوط به کاربرد RAP و CC به عنوان خاکریز مورد استفاده در دیوارهای MSE این فصل شامل آیین نامه FHWA و TxDOT جهت تعیین خصوصیات زمین‌شناختی مصالح لازم برای احداث خاکریز بوده و به بررسی مسایل مهندسی مربوط به کاربرد RAP و CC به عنوان خاکریز مورد استفاده در دیوار MSE می‌پردازد. مسایلی که در این فصل بررسی می‌شوند عبارتند از ویژگی‌های خاکریز (مثل نفوذپذیری، مقاومت برشی، رفتار خزشی)، روابط بین آرماتوربندی و خاکریز (مثل مقاومت) و دوام آرماتورها. تمام آیین‌نامه‌های ارایه‌شده در این بحث پیش از این در مورد مصالح سنتی خاکریزها آورده شده‌اند.

۳-۱- مسایل مکانیک خاک (ژئوتکنیک)

این بخش آیین‌نامه‌های مربوط به مصالح خاکریز دیوارهای MSE را بیان کرده و مسایل مربوط به استفاده از RAP و CC به عنوان خاکریز مورد استفاده در دیوارهای MSE را توصیف می‌کند.

۳-۱-۱- دانه‌بندی

از جمله خصوصیات مهم مکانیک خاک که معمولاً برای طبقه‌بندی مواد مختلف خاکریز مورد استفاده قرار می‌گیرد، دانه‌بندی است. دانه‌بندی عامل مهمی است که روی اجرای خاکریز از جمله پایداری، زهکشی و حساسیت در برابر یخ‌زدگی تأثیر می‌گذارد. از آن جایی که آیین‌نامه‌های تنظیم‌شده برای مواد بازیافتی استاندارد شده نیستند، نیاز به دانه‌بندی مصالح خاکریزهای سنتی طراحی شده توسط FHWA و TxDOT می‌تواند به عنوان راهنمای اولیه مورد استفاده قرار گیرد. خاکریز باید عاری از مواد آلی و مخرب بوده و طبق روشهای آزمایش دانه‌بندی Tex-110-E یا AASHTO T-27 حدود دانه‌بندی آن مشخص شده باشد. در مورد دانه‌بندی خاکریز، FHWA و TxDOT نیازهای نسبتاً مشابهی دارند و تنها تفاوت عمده بین آنها در حداکثر اندازه مجاز ریزدانه‌هاست. هر دو آیین‌نامه بیش از ۱۵٪ ریزدانه را مجاز می‌دانند (یعنی موادی که از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده باشند).

TxDOT مواد خاکریز را به دو نوع A و B طبقه‌بندی می‌کند. تفاوت عمده بین نوع A و نوع B در حداکثر اندازه مجاز دانه‌ها می‌باشد. برای نوع A، دانه‌هایی به بزرگی ۳ اینچ (۷۵ میلی‌متر) و برای نوع B، دانه‌هایی به بزرگی ۶ اینچ (۱۵۰ میلی‌متر) مجاز شناخته می‌شوند. FHWA برای خاکریزی با حداکثر اندازه ۴ اینچ (۱۰۰ میلی‌متر) تنها یک آیین‌نامه ارایه می‌دهد. جدول (۳-۱) دانه‌بندی را در آیین‌نامه FHWA و TxDOT مقایسه می‌کند. در مواردی که از آرماتوربندی فلزی پوشیده با اپوکسی یا آرماتوربندی غیر فلزی استفاده می‌شود، هر دوی FHWA و TxDOT حداکثر اندازه دانه خاکریز را به ۰/۷۵ اینچ (۱۹ میلی‌متر) محدود می‌سازند تا مطمئن شوند آرماتوربندی حداقل سایش را خواهد داشت. در فرایند بازیافت مصالح، اندازه سنگدانه‌ها در آسفالت و بتن و توزیع اندازه دانه‌های RAP و CC کنترل می‌شوند. طبق داده‌های به‌دست‌آمده از مناطق مختلف، حداکثر بزرگی اندازه دانه‌ها می‌تواند تا ۳ اینچ (۷۵ میلی‌متر)

باشد. با این حال، در بسیاری از بخشهای TxDOT، حداکثر ابعاد ۱/۵-۱ اینچ (۳۵ تا ۴۵ میلی‌متر) گزارش شده است. در فصل ۵، داده‌های بیشتری درباره دانه‌بندی ویژه مواد RAP و CC در تگزاس ارائه شده است.

جدول (۱-۳) مشخصات فنی مخصوص دانه‌بندی خاکریز دیوارهای MSE تهیه‌شده توسط TxDOT و FHWA

درصد دانه‌های رده‌شده از الک	اندازه و نمره الک	طبقه‌بندی	
۷۶ mm	۱۰۰	نوع A	TxDOT
#۴۰	۰-۶۰		
#۲۰۰	۰-۱۵		
۱۵۲mm	۱۰۰	نوع B	
۷۶mm	۷۵-۱۰۰		
#۲۰۰	۰-۱۵		
۱۰ mm	۱۰۰	FHWA	
#۴۰	۰-۶۰		
#۲۰۰	۰-۱۵		

۳-۱-۲- تراکم آزمایشگاهی

ارزیابی خصوصیات تراکم RAP و CC از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا این مواد همانند مصالح مورد استفاده در خاکریزهای سنتی دارای منحنی‌های تراکم رطوبت - خشکی نمی‌باشند. همچنین از آن جایی که پتانسیل خردشدگی دانه‌ها در حین تراکم اهمیت خاصی دارد، لازم است قبل و بعد از تراکم، آزمایش دانه‌بندی انجام شود تا افزایش احتمالی مقدار ریزدانه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. بخشهای زیر به معرفی آزمایشهای تراکم مورد استفاده TxDOT و FHWA می‌پردازند. روشهای تراکم مشخص‌شده از سوی TxDOT و FHWA در بخشهای بعدی بررسی می‌شوند.

آیین‌نامه TxDOT به تراکم مورد نیاز مصالح خاکریز جهت سازه‌های نگهدارنده اشاره می‌کند. در این آیین‌نامه، درصد تراکم نسبی با توجه به روش آزمایش Tex-114-E بیان شده است. آیین‌نامه فوق بیان می‌کند براساس روش Tex-114-E کار تراکم خاکریز با تراکم نسبی ۹۵٪ در ارتفاع ۱ متری خاکریز امکان‌پذیر است، در حالی که برای لایه‌های زیرین تراکم ۹۰٪ باید رعایت شود. با این وجود، روش آزمایش Tex-114-E حداکثر اندازه دانه‌ها را به ۷/۸ اینچ (۲۲ میلی‌متر) محدود می‌سازد که در واقع از حداکثر اندازه دانه‌های مجاز در خاکریز به مراتب کوچکتر بوده و از حداکثر اندازه دانه‌ها در مواد خاص مورد استفاده در RAP و CC، بسیار کوچکتر است. بر این اساس، روش Tex-114-E توصیه می‌کند برای مصالحی با دانه‌های بزرگتر از ۲۲ میلی‌متر از روش Tex-113-E استفاده شود، زیرا روش آزمایش Tex-113-E حداکثر اندازه دانه‌ها را تا ۴۴ میلی‌متر مجاز می‌داند.

موریس و دلفیا (۱۹۹۹) اخیراً مطالعاتی بر روی آیین‌نامه‌های خاکریز دیوارهای MSE انجام داده‌اند. آنها براساس استاندارد بریتانیایی BS-1377 (۱۹۹۰) به عنوان روش استاندارد متراکم‌سازی آزمایشگاهی، استفاده از چکش لرزان را توصیه می‌کنند، زیرا روش آزمایش Tex-113-E ارزش عددی ناچیزی برای حداکثر تراکم خشک، به خصوص

برای مصالح درشت‌دانه قابل است. با این حال، در بخشهای فرعی روش آزمایش Tex-113-E تحت عنوان «مصالحی که به سختی متراکم می‌شوند» به این نکته اشاره شده است که جهت دستیابی به تراکم خشک بالاتر بهتر است تراکم بالاتر با ۱۰۰ ضربه در هر لایه انجام شود. در نتایج مطالعه‌ای که به تازگی در دانشگاه تگزاس در شهر آستین انجام شده است (مارکس، ۲۰۰۱)، مشاهده می‌شود که با اصلاحات صورت‌گرفته در Tex-113-E نسبت به سایر آزمایشهای تراکم، بالاترین تراکم خشک را داراست.

همان طور که در روشهای C و D موجود در AASHTO T-99 اشاره شده است، آیین‌نامه FHWA بیان می‌کند که تراکم خاکریز باید با حداقل ۹۵٪ از حداکثر تراکم خشک و $\pm 2\%$ از رطوبت مناسب همراه باشد. این روش تراکم مشابه آزمایش استاندارد تراکم پروکتور است (چکش تراکم ۲۰۰g بر ۳ لایه یکسان از مصالح به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر فرود می‌آید). در روشهای آزمایش C و D قطر قالب تراکم متفاوت بوده، اما انرژی تراکم در آنها یکسان است. حداکثر اندازه مجاز دانه ۱۹ میلی‌متر است که از حداکثر اندازه دانه مورد نظر در RAP و CC کوچکتر می‌باشد. در چنین مواردی، آیین‌نامه AASHTO روش الک کردن را توصیه می‌کند. دانه‌هایی که بزرگتر از ۱۹ mm (۳/۴ in) هستند قبل از تراکم یکدست می‌شوند. ذراتی که از الک ۵۰-mm (۲-in) عبور کرده، اما در الک ۱۹-mm (۳/۴ in) باقی می‌مانند، دقیقاً با مقدار برابری از ماده‌ای که از الک ۱۹-mm (۳/۴ in) عبور کرده است جایگزین می‌شوند، اما همین ذرات روی الک ۴/۷۵-mm (الک نمره ۴) باقی می‌مانند.

۳-۱-۳- تراکم در محیط کارگاهی

طبق راهنمای FHWA از ماشین‌آلات و روشهایی که برای تراکم مصالح مرسوم خاکریزها استفاده می‌شود می‌توان برای تراکم RAP و CC نیز استفاده کرد. گفته می‌شود مصالح دانه‌ای که RAP نیز شامل آن است، در صورتی که با مقداری آب همراه باشند، بهتر متراکم می‌شوند (سنیور و همکاران، ۱۹۹۴). جهت تسهیل در قرارگیری دانه‌ها، معمولاً تراکم CC مستلزم آب اضافی است. همچنین از آن جایی که مصالح CC به شدت زاویه‌دار هستند، برای دستیابی به تراکم نسبی مناسب باید انرژی بیشتری مصرف شود. به علاوه، به هنگام تراکم دانه‌هایی به اندازه شن، باید احتیاط لازم به عمل آید تا یقین حاصل شود موادی که درصد تراکم ضعیفی دارند، مناطق وسیعی از خاکریز را تشکیل ندهند، زیرا همین مصالح منجر به نشست ناهموار خاکریز در درازمدت خواهند شد.

۳-۱-۴- نفوذپذیری هیدرولیکی

مصالح خاکریز باید نفوذپذیر باشند تا مطمئن شویم فشار آب منفذی در پشت سازه‌های حائل افزایش نخواهد یافت. میزان خوردگی آرماتورهای فلزی نیز که به خصوص در تگزاس استفاده می‌شوند، در درجه اول به مقدار رطوبت موجود در خاکریز بستگی دارد. دانه‌های چسبنده موجود در خاکریز مانع از حذف فشار آب منفذی در پشت سازه‌های حائل می‌شوند، در نتیجه نیروهای بیشتری روی دیوار تحمیل شده و خوردگی آرماتورها بیشتر می‌شود. بنابراین تحت چنین شرایط بسیار حساسی، مصالح چسبنده به عنوان ماده خاکریز چندان مطلوب به نظر نمی‌رسند. در نتیجه بهترین

خاکریز برای دیوار MSE، مصالحی هستند که چسبندگی نداشته و مقدار ریزدانه خمیری زیاد در آنها بسیار ناچیز بوده یا اصلاً فاقد این ذرات باشند.

جدول (۳-۲) روشهای به کاررفته از سوی FHWA و TxDOT جهت آزمایش تراکم

انرژی تراکم (ft-lb/ft ³)	تعداد ضربه برای هر لایه	تعداد لایه‌ها	چکش تراکم		ابعاد قالب		روش آزمایش تراکم
			شکل نما	سقوط (in)	وزن (lb)	ارتفاع (in)		قطر (in)
۲۲۹۰۰	۵۰	۴	قطاع	۱۸	۱۰	۸	مورد استفاده برای مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک ۱/۴ رد می‌شوند مصالحی با دانه‌های بزرگتر از ۷/۸ مصالح اساس مصالح عمل‌آورده‌شده جهت خاکریزی / بستر روسازی مصالحی که به سختی تراکم می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک ۱/۴ رد می‌شوند مصالحی با دانه‌های بزرگتر از ۷/۸ مصالح اساس مصالح عمل‌آورده‌شده جهت خاکریزی / بستر روسازی
۱۲۶۰۰	۲۵	۴	قطاع	۱۲	۵/۵	۶	مصالحی که ۲۰٪ آنها یا کمتر روی الک ۱/۴ باقی می‌مانند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک ۳/۸ عبور می‌کنند مصالحی که جهت استفاده در خاک بستر روسازی/خاکریز تثبیت نشده‌اند
۱۲۶۰۰	۷۵	۴	قطاع	۱۲	۵/۵	۸	مصالحی که ۲۰٪ آنها روی الک ۱/۴ باقی می‌مانند مصالحی که جهت استفاده در خاکریزی/خاکریز تثبیت نشده‌اند
۱۲۴۰۰	۲۵	۳	دایره‌ای یا قطاع	۱۲	۵/۵	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند
۵۶۲۰۰	۲۵	۵	دایره‌ای یا قطاع	۱۸	۱۰	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند
۱۲۴۰۰	۲۵	۳	دایره‌ای قطاع	۱۲	۵/۵	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند
۱۲۴۰۰	۲۵	۳	دایره‌ای قطاع	۱۲	۵/۵	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند
۵۶۲۰۰	۲۵	۵	دایره‌ای یا قطاع	۱۸	۱۰	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند
۵۶۲۰۰	۲۵	۵	دایره‌ای یا قطاع	۱۸	۱۰	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند
۵۶۲۰۰	۲۵	۵	دایره‌ای یا قطاع	۱۸	۱۰	۴/۵۸۴	مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند مصالحی که ۱۰۰٪ آنها از الک نمره ۴ رد می‌شوند

به طور کلی، نفوذپذیری خاکریز دیوار MSE دقیقاً قابل اندازه‌گیری نیست، زیرا طبق آیین‌نامه، دانه‌بندی مصالح معمولاً منجر به نفوذپذیری بالا می‌شود. FHWA و TxDOT هر دو استفاده از ۱۵٪ ریزدانه‌ها (دانه‌هایی که از الک نم‌۲۰۰ عبور کرده‌اند) را در خاکریز جایز می‌دانند. لذا جای تردید نیست که مصالح انتخابی باید نفوذپذیر باشند. با این وجود، هنوز هم مشخص نیست که آب چگونه می‌تواند با RAP و CC خاکریز ارتباط داشته باشد، همچنین خرد شدن درشت‌دانه‌ها می‌تواند در حین کار تراکم اتفاق بیفتد که در نهایت با افزایش تعداد دانه‌ها، نفوذپذیری کاهش پیدا می‌کند. در مورد بتن خردشده، انتظار می‌رود پتانسیل جذب آب نسبت به آنچه که در مصالح مرسوم خاکریزها دیده می‌شود، بالاتر باشد. دلیل افزایش جذب آب، وجود نخاله‌ها و ملات است. به علاوه، سیمان غیر هیدراته در CC با آب نشت‌کرده واکنش نشان می‌دهد تا نفوذپذیری خاکریز تا حد قابل توجهی کاهش یابد. لذا نفوذپذیری می‌تواند با گذشت زمان و بعد از اتمام عملیات تراکم تغییر یابد.

۳-۱-۵- نشست

به طور کلی، مسأله نشست در خاکریز دیوار MSE به کیفیت مصالح مورد استفاده در خاکریز، یکنواختی ماده و یکنواختی تراکم در منطقه مسلح‌شده بستگی دارد. همچنین، هرچه میزان ریزدانه‌های موجود در مصالح مورد استفاده در خاکریز بیشتر باشد، تمایل به نشست در خاکریز نیز بیشتر می‌شود. از آنجایی که استفاده از حجم زیاد ریزدانه در مصالح خاکریز جایز نیست، اغلب اوقات نشست خاکریز تابع روش تراکم و میزان یکنواختی خاکریز است. خصوصیات تراکم‌پذیری RAP و CC همانند خصوصیات تراکم‌پذیری خاکریز مرسوم نیست. رفتار خزشی در RAP از اهمیت خاصی برخوردار است، چرا که میزان تنش موجود در خاکریز باید در طول زمان یکنواخت باشد. طبق داده‌های گزارش‌شده در مورد توزیع و پراکندگی ذرات RAP، درصد دانه‌ها معمولاً پایین است (کمتر از ۱٪). به عبارت دیگر، RAP قابلیت رفتار خزشی ندارد. در مورد مصالح درشت‌دانه، می‌توان (طبق ASTM D2435) از یکی از انواع آزمایشها استفاده کرد تا مسأله تراکم‌پذیری مصالح مورد ارزیابی قرار گیرد. این آزمایش خواصی از مواد را ارایه می‌دهد که جهت ارزیابی تغییر شکل اولیه و ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین با محاسبه پتانسیل ریزشی (ASTM D5333) می‌توان پتانسیل لازم برای ریزش ناشی از جذب رطوبت را محاسبه کرد. مصالح ریزشی منجر به نشست نسبی در پشت دیوار حائل می‌شوند.

انتظار می‌رود مسأله نشست خاکریز نیز مانند موضوع یکنواختی تراکم در منطقه‌ای درست پشت دیواره نماها آشکار شود، یعنی محلی که تنها استفاده از تجهیزات کوچک و دستی تراکم امکان‌پذیر است. به طور کلی، نشست در این منطقه به چگالی پایین مصالح موجود در خاکریز مربوط می‌شود. بنابراین جهت کاهش مشکلات ناشی از نشست، FHWA و TxDOT معتقدند که در تمام مدت احداث پروژه باید روی متراکم‌سازی خاکریز، نظارت منظم کارگاهی انجام شود.

۳-۱-۶- مقاومت برشی

پارامترهای مقاومت برشی خاکریز از جمله موارد مهم در مرحله طراحی به شمار می‌روند، زیرا همین پارامترها بر میزان پایداری دیوار تأثیر می‌گذارند. آیین‌نامه FHWA و TxDOT در مورد دانه‌بندی مواد و تراکم آنها به مسأله احداث خاکریزی با زاویه- اصطکاک بالا توجه دارند. آزمایشهای صورت گرفته بر روی RAP و CC نشان می‌دهند زوایای اصطکاک داخلی این مواد زیاد بوده، اما چسبندگی دانه‌های آنها بسیار ناچیز است (پترارکا و گالدیرو، ۱۹۸۴). می‌توان مقاومت برشی این مواد را با مصالح دانه‌ای مشابهی که به طور طبیعی دانه‌بندی شده‌اند مقایسه کرد، مثلاً مقاومت برشی CC مشابه مقاومت برشی مصالح دانه‌ای آهکی خرد شده است. بر این اساس، RAP و CC مقاومت برشی مناسبی برای سیستم خاکریز دارند. از آنجایی که FHWA و TxDOT آزمایشهای یکسانی برای محاسبه مقاومت برشی انجام ندادند، آزمایشهای مقاومت برشی تعیین شده از سوی هر یک از ادارات فوق به ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

TxDOT در مورد حداقل مقدار زاویه اصطکاک داخلی مصالح مورد استفاده در خاکریز محدودیتی تعیین نمی‌کند. با این حال، آیین‌نامه ارایه شده از سوی TxDOT قصد دارد مقاومت برشی مصالح را براساس روش آزمایش Tex-117-E اندازه‌گیری کند. این روش که به آزمایشهای سه‌محوری خاکهای دست‌خورده متراکم و مصالح اساس معروف است، مقاومت برشی، جذب آب و پتانسیل تورم خاک را اندازه‌گیری می‌کند. هر نمونه آزمایشی، قبل از انجام آزمایش تراکم سه‌محوری متراکم شده - زهکشی شده، از لحاظ جذب آب مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت میزان جذب آن اندازه‌گیری می‌شود. در پایان اندازه‌گیری، موضوع پارامترهای مقاومت برشی در قالب مسأله چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به همراه موضوع جذب آب و خصوصیات تورم مصالح بررسی می‌شود.

در آغاز کار آزمایش مشکلی بروز می‌کند، زیرا کار آزمایش مکانیک خاک مستلزم استفاده از نمونه‌های سه‌محوری است که قطر آنها حداقل شش برابر بزرگتر از اندازه درشت‌ترین دانه‌ها باشد. از آنجایی که RAP و CC اغلب حاوی دانه‌های بزرگتر از ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشند، تجهیزات آزمایش مرسوم آنقدر ناکارآمد هستند که نمی‌توانند مقاومت این گونه مصالح را به دقت اندازه‌گیری کنند. به عنوان مثال، آزمایش‌های انجام گرفته روی نمونه‌هایی با قطر ۵ سانتی‌متر مستلزم الک کردن دانه‌های بزرگتر از ۷/۶ سانتی‌متر می‌باشد که طی عملیات آماده‌سازی نمونه باید انجام شود. با این وجود، الک نمودن و جدا کردن دانه‌های بزرگ سبب می‌شود دانه‌هایی با مقاومت برشی بالاتر به دست آیند، زیرا ذرات بزرگ تمایل بیشتری برای شکست داشته و ضعیف‌تر هستند.

راهنمای طراحی FHWA متفاوت از آیین‌نامه TxDOT عمل کرده و برای مصالح مورد استفاده در خاکریز حداقل زاویه اصطکاک ۳۴° را در نظر می‌گیرد. راهنمای طراحی FHWA نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک باید براساس آزمایش استاندارد برش مستقیم (AASHTO T-236) اندازه‌گیری شود. همچنین، تنها مصالحی مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرند که از الک نمره ۱۰ ریزتر باشند. طبق راهنمای AASHTO T-99 (روش C یا D) نمونه آزمایشی باید دارای تراکم ۹۵٪ باشد و تحت روش تراکم زهکشی شده در فشارهای مختلف نرمال برش داده می‌شود. در مورد

خاکریز مرسوم، راهنمای طراحی FHWA بیان می‌کند اگر ۸۰٪ وزن مصالح به‌کاررفته در خاکریز دارای دانه‌های بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر باشد، نیازی به این آزمایش نخواهد بود.

۳-۱-۷- خصوصیات رفتار خزشی مصالح

هنگام طراحی دیوارهای MSE با خاکریز سنتی فاقد چسبندگی، اولین مسأله‌ای که غالباً به ذهن می‌رسد این است که موضوع خزش تنها در مورد آرماتوربندی مطرح بوده و به خاک موجود در خاکریز ارتباطی ندارد. با این وجود، به دلیل ویسکوزیته آسفالت موجود در RAP، این ماده استعداد زیادی برای رفتار خزشی دارد. این احتمال وجود دارد که تغییر شکل‌های خزشی زیاد در خاکریز حاوی RAP یا در فصل مشترک خاکریز و آرماتوربندی به وجود آید. تغییر شکل‌های خزشی، تحت تأثیر بارهایی است که به صورت دائمی و کمتر از بارگذاری گسیختگی تحمل می‌شوند. احتمالاً چنین رفتار خزشی در RAP تحت تأثیر درجه حرارت بوده و انتظار می‌رود در دماهای بالاتر با شدت بیشتری توام باشد، زیرا میزان سفتی و سختی آسفالت تحت تأثیر درجه حرارت قرار دارد.

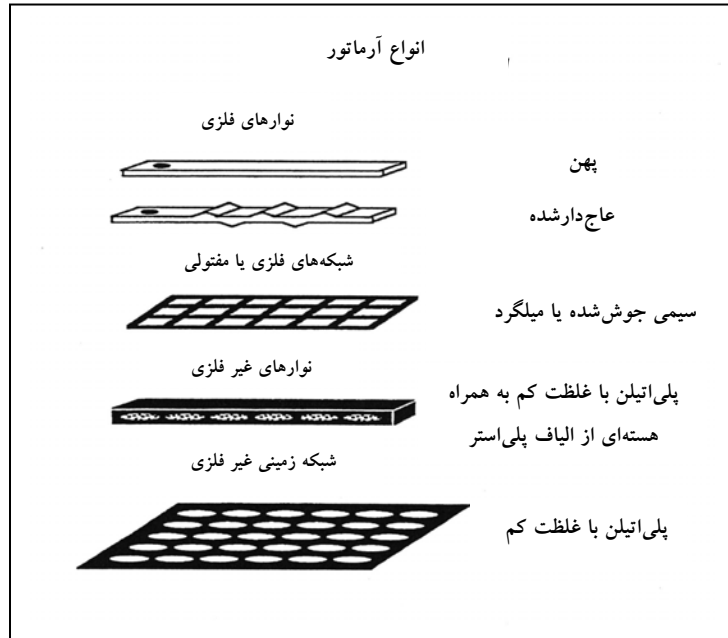
از آنجایی که FHWA و TxDOT انتظار ندارند خود ماده مورد استفاده در خاکریز دچار خزش شود، در آیین‌نامه‌ها یا راهنماهای طراحی خود نیز هیچ روش استاندارد جهت آزمایش خزش ارائه نداده‌اند. با این وجود، پتانسیل خزشی خاکریز باید مورد مطالعه قرار گیرد. در این راستا از آزمایش مرسوم خزش استفاده شده و در ابتدا از برش مستقیم خاکریز آغاز می‌شود. در این آزمایش از نمونه‌هایی با مقدار تنش متغیر استفاده می‌شود. از آن جایی که رفتار خزشی تحت تأثیر درجه حرارت قرار دارد، برنامه آزمایش خزش نیز باید طوری ترتیب یابد که در شرایط دمایی مختلف قابل اجرا باشد.

موضوع دیگری که به خصوصیات خزش مربوط می‌شود، رفتار خزشی در موقع باربرداری است. این نوع از مکانیسم خزش معمولاً با تغییر شکل‌های خزشی در اجزای آرماتوربندی پلیمری همراه است. ساویکی (۱۹۹۹) اثبات کرد خزش دیوار MSE عمدتاً در منطقه فعال صورت می‌گیرد (شکل ۲-۵). منظور از منطقه فعال محلی است که خاک به حالت خمیری درآمده و آرماتوربندی دارای حالت ویسکوالاستیسیته است. در مورد خاکریزهای مرسوم، این حالت خمیری خاک در منطقه فعال از طریق تغییر شکل‌های ویسکوالاستیک (ارتجاعی) آرماتوربندی کنترل می‌شود. با این حال، در مورد خاکریز مسلح RAP، خود RAP ماده‌ای است که استعداد و قابلیت خزش دارد. لذا پیش‌بینی می‌شود به علت خزش RAP و آرماتور، تغییر شکل بیش از حد در خاکریز به وجود آید.

۳-۱-۸- آرماتوربندی دیوار MSE

افزودن آرماتورهای افقی به خاک موجود در خاکریز، ماده مرکبی شبیه بتن مسلح می‌سازد که دارای بالاترین میزان تحمل بار است. آرماتوربندی مورد استفاده در مصالح خاکریز باید شامل خصوصیات ذیل باشد: (۱) مقاومت کششی بالا، (۲) حالت گسیختگی که نباید ترد و شکننده باشد، (۳) مقاومت بالا در برابر خزش، (۴) انعطاف‌پذیری مناسب، (۵) مقرون‌به‌صرفه بودن، (۶) پایایی و دوام بالا و (۷) مقاومت برشی بالا در فصل مشترک آرماتور و خاک

(موریس و دلفیا، ۱۹۹۹). آرماتورهای لازم برای دیوارهای MSE دو نوع متفاوت هستند: نواری و شبکه‌ای که معمولاً از فلز و پلیمر ساخته می‌شوند. شکل (۱-۳) انواع مختلف آرماتور و مصالح مورد استفاده برای آرماتوربندی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۳) انواع آرماتور (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹)

- بخش ذیل فهرستی از انواع رایج آرماتورهای مورد استفاده در دیوارهای MSE را ارائه می‌دهد (موریس و دلفیا، ۱۹۹۹).
- نوارهای فولاد گالوانیزه آج‌دار و بدون آج: این نوارها معمولاً ضخامت ۴۰ میلی‌متر و عرض ۵۰ میلی‌متر داشته و جهت کاهش اثرات خوردگی، دارای پوشش اپوکسی هستند.
 - تسمه‌های فولادی مستطیلی شکل: شبکه سیمی معمولاً در ابعاد $60\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ و با استفاده از میلگردهای فولادی ساده W11 یا W20 تشکیل می‌شود. میله‌های فولادی ساده‌ای که دارای قطر ۱۰ میلی‌متر هستند نیز در شبکه‌های $60\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ استفاده می‌شوند.
 - شبکه سیمی جوش‌شده: این آرماتورها در اندازه‌های مختلف مانند شبکه $2\text{ in} \times 6\text{ in}$ ($5\text{ cm} \times 15\text{ cm}$) از $W12 \times W5$ و $W9.5 \times W4$ ، $W7 \times W3.5$ ، $W4.5 \times W3.5$ در شبکه‌هایی به عرض $2/8$ متر ساخته می‌شوند. این آرماتورها همچنین می‌توانند در شبکه‌ای از $W9.5 \times W20$ و در ابعاد $15\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ استفاده شوند.
 - شبکه میلگرد پلیمری غیر فلزی: این شبکه‌ها از پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلین با چگالی بالا ساخته می‌شوند.
 - تورمرغی (شبکه‌های موازی): پاراوبها^۱ با عرض $13/5$ سانتی‌متر در دیوارهای MSE مورد استفاده قرار می‌گیرند و از الیاف پلی‌استر و پلی‌اتیلین با مقاومت کششی بالا ساخته می‌شوند.

۳-۱-۹- میزان مقاومت موجود در برابر دررفتگی از خاک

همان طور که در فصل ۲ بیان شد، میزان مقاومت موجود در برابر دررفتگی از خاک از جمله موضوعات مهمی است که در پایداری داخلی باید مورد توجه قرار گیرد. مقاومت المان مسلح‌کننده معمولاً از طریق دو مکانیسم ایجاد می‌شود که عبارتند از اصطکاک سطح مشترک و مقاومت غیر فعال. این دو مکانیسم با میزان مقاومت موجود در برابر دررفتگی از خاک ارتباط دارند، اما بر حسب نوع آرماتوربندی، یکی از این دو مکانیسم بر دیگری ارجحیت پیدا می‌کند. اصطکاک سطح مشترک بین خاک و بخش سطح جانبی آرماتوربندی متغیر بوده، در حالی که مقاومت غیر فعال به مکانیسم تنش تکیه‌گاهی بین خاک و مؤلفه‌های نیروی عرضی المان مسلح‌کننده مربوط می‌شود. در مورد خاکریز RAP و CC، آزمایش دررفتگی آرماتور از خاک در مورد انواع مختلف آرماتوربندی انجام می‌شود. جهت تعیین دقیق مقاومت آرماتور در برابر دررفتگی از خاک برای بررسی دوام موجود در طراحی دیوار MSE این اطلاعات مورد نیاز خواهند بود.

از آن جایی که استاندارد ASTM برای آزمایش دررفتگی آرماتور از خاک همواره در حال توسعه و تغییر است، FHWA پیشنهاد می‌کند که اندازه‌گیری میزان مقاومت موجود در برابر دررفتگی آرماتور از خاک با استفاده از GRT GG-5 (دررفتگی ژئوگرید از خاک) و با GRI GT-6 (دررفتگی ژئوتکستایل از خاک) انجام شود. برای آزمایش کوتاه‌مدت دررفتگی آرماتور از خاک، از روش سرعت تغییر شکل تحت کنترل استفاده می‌شود. برای میزان مقاومت موجود در برابر دررفتگی آرماتور از خاک در طولانی‌مدت، از روش تنش ثابت (خزش) می‌توان استفاده کرد. علاوه بر این، آزمایش دررفتگی آرماتور از خاک در طولانی‌مدت در مورد RAP بسیار ضروری است. این ضرورت زمانی بیشتر احساس می‌شود که بارگذاری یا باربرداری المان مسلح‌کننده در درجه حرارت نسبتاً بالا صورت می‌گیرد.

۳-۱-۱۰- خلاصه‌ای از آیین‌نامه‌های مربوط به مصالح مورد استفاده در احداث دیوار MSE

عملکرد رضایت‌بخش دیوار MSE به ویژگی خاک موجود در خاکریز بستگی دارد. جدول (۳-۳)، مشخصات آیین‌نامه خاکریز FHWA و TxDOT را نشان می‌دهد. هر دو راهنمای طراحی FHWA و TxDOT، استفاده از مصالح فاقد چسبندگی را توصیه می‌کنند. استفاده از این مصالح سبب می‌شود زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته و زهکشی به خوبی انجام شود. دانه‌بندی مناسب مصالح مورد استفاده در خاکریز باعث می‌شود خاکریز مقاومت و زهکشی مناسبی داشته باشد. هر دوی FHWA و TxDOT استفاده از ۱۵٪ ریزدانه رادر خاک جایز می‌دانند. روش تراکم Tex-114-E ارایه‌شده از سوی TxDOT و روش تراکم AASHTO T-99 ارایه‌شده توسط FHWA، انرژی تراکم نسبتاً یکسانی دارند (جدول ۳-۲). TxDOT محدودیتی برای زاویه اصطکاک داخلی تعیین نمی‌کند، در حالی که FHWA حداقل مقدار زاویه فوق را مشخص می‌کند (بخش ۳-۱-۶). در نهایت از دو پارامتر pH و مقاومت الکتریکی جهت نشان دادن پتانسیل خوردگی خاکریز استفاده می‌شود. هر دو راهنمای فنی، محدوده مجاز pH و مقاومت الکتریکی را مشخص کرده‌اند. در بخش بعدی که به مسأله دوام خاکریز اختصاص دارد، در مورد مقاومت الکتریکی و pH بیشتر بحث خواهد شد.

جدول (۳-۳) مشخصات خاکریز دیوارهای MSE که توسط FHWA و TxDOT تعیین شده است

FHWA	(نوع B) TxDOT *	(نوع A) TxDOT	موارد مورد نیاز
			۱- دانه‌بندی
			حداکثر اندازه
۱۰۰ میلی‌متر	۱۵۰ میلی‌متر	۷۶ میلی‌متر	
-	۷۵-۱۰۰	-	درصدی از مصالح که از الک ۷۶ میلی‌متری عبور می‌کنند.
۰-۶۰	-	۰-۶۰	درصدی از مصالح که از الک نمره ۴ عبور می‌کنند.
۰-۱۵	۰-۱۵	۰-۱۵	درصدی از مصالح که از الک نمره ۲۰۰ عبور می‌کنند.
<۶	-	-	۲- شاخص خمیری (PI) ^۱
			۳- تراکم
%۹۵ (AASHTO T-99)	%۹۵ (Tex-114-E)		چگالی خشک
W _{opt} از %۲ در محدوده خشکی	W _{opt} از ±۲		درصد رطوبت
۵-۱۰	۵/۵-۱۰		۴- pH
>۳۰۰۰	>۳۰۰۰		۵- مقاومت الکتریکی (سانتی‌متر-اهم)

* توضیح: خاکریز نوع B که مطابق شرایط الک نمره ۲۰۰ نمی‌باشد، در صورتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که:

۱- کمتر از ۲۵٪ آن از الک نمره ۲۰۰ عبور کند

۲- $PI \leq 6$

۳- حداکثر تراکم خشک %۹۵ (Tex-114-E) و $W_{opt,\phi} \geq 34$ (Tex-117-E)

۳-۲- نکاتی درباره قابلیت پایداری

هنگام بررسی کاربرد CC و RAP به عنوان مصالح مورد استفاده در احداث خاکریز دیوارهای MSE، باید به ارزیابی پایایی طولانی مدت سازه‌ها پرداخت. مشکلات پتانسیل پایایی (مثلاً هجوم مواد شیمیایی بر روی CC) روی خود خاکریز تأثیر داشته یا به احتمال بیشتر روی آرماتور به کاررفته در خاکریز نیز اثر می‌گذارد (مثل خوردگی آرماتور فلزی یا فرسایش و تخریب آرماتوربندی‌های ساخته شده از مصالح کمپوزیت). این بخش پیرامون برخی از موضوعات مهم قابلیت پایداری بحث خواهد کرد. ابتدا مشکلات پتانسیل پایداری که به شدت به CC و RAP مربوط می‌شود مورد بررسی قرار گرفته و سپس به مسأله تخریب و خوردگی آرماتوربندی MSE می‌پردازد.

۳-۲-۱- استفاده از آسفالت بازیافتی روسازی‌ها

دوام RAP در دیوارهای MSE به اندازه CC اهمیت ندارد. روسازی‌های آسفالتی مورد تهاجم مواد شیمیایی قرار نمی‌گیرند، لذا هنگام خردشدگی نیز از ترکیبات شیمیایی مخرب در امان هستند. روسازی‌هایی که در معرض نمکهای یخ‌زدا قرار دارند، حاوی مقداری کلرید هستند که البته مقدار کلرید آنها به اندازه کلرید موجود در بتن نیست (دلیل آن وجود مقدار زیادی از مصالح دانه‌ای و نفوذپذیری کمتر است). %۹۵ از روسازی آسفالتی شامل مصالح دانه‌ای

می‌باشد و لذا RAP عمدتاً شامل مصالح دانه‌ای و سنگدانه‌هاست. بنابراین پایایی طولانی‌مدت RAP مورد استفاده در دیوار MSE، تحت تأثیر نوع و ماهیت مصالح دانه‌ای موجود در روسازی‌های اصلی قرار دارد. از آن جا که لایه نازکی از آسفالت می‌تواند مصالح دانه‌ای موجود در RAP را بپوشاند، خصوصیات اصلی آسفالت تأثیرات زیادی بر عملکرد آن خواهند داشت. قیر خالص (جامدی) که در روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحت تأثیر گذر زمان است. به عبارت دیگر، به مرور زمان قیر اکسید شده و روغن را به رزین و رزین را به آسفالتین تبدیل می‌کند (FHWA, 1998). این تغییرات منجر به ویسکوزیته بالای قیر شده و روی خصوصیات مهندسی RAP به کاررفته در دیوارهای MSE تأثیر می‌گذارد. در ارزیابی کاربرد RAP به کاررفته در دیوارهای MSE باید به تغییراتی که با گذشت زمان در خصوصیات آسفالت به وجود می‌آیند و عمدتاً در شرایط دمایی بالا شتاب بیشتری به خود می‌گیرند، توجه کرد. خزش RAP که احتمالاً موضوع بسیار مهمی تلقی می‌شود، در جای دیگری از این گزارش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. گذشت زمان و نیز تحمل آب و هوای گرم روی رفتار خزشی قیر مؤثر هستند. مسأله دیگری که در مورد RAP مطرح می‌شود، استفاده از RAP حاوی نوعی مصالح دانه‌ای است که موجب رگه‌رگه شدن یا فقدان چسبندگی بین مصالح آسفالتی می‌شود. اگر به هنگام استفاده از RAP به عنوان خاکریز، این فرایند همچنان ادامه داشته باشد، امکان دارد مقاومت RAP یا ارتباط مکانیکی بین RAP و آرماتورها تغییر یابد.

۳-۲-۲- بتن خردشده با مصالح CC

در بسیاری از موارد بتن با مصالح شکسته، ماده‌ای سالم و مقاوم بوده و دوام زیادی دارد. با این حال، اگر بتن اصلی حاوی مقدار زیان‌باری از مصالح دانه‌ای فعال یا سولفات‌ها باشد (مصالح دانه‌ای فعال که منجر به حالت قلیا-سیلیکا می‌شوند یا سولفات‌ها که منجر به حمله سولفاتی می‌شوند)، در این صورت مواد شکسته‌شده هنوز هم در معرض همان مکانیسم تخریب و نابودی قرار خواهند داشت. هر دو واکنش قلیا-سیلیکا (ASR)^۱ و حمله سولفاتی در سازه‌های بتنی تگزاس مشاهده شده‌اند، لذا به نظر می‌رسد اولین کاری که باید صورت گیرد، برچیدن و بازیافت سازه‌هایی است که آثار تخریب و خوردگی در آنها دیده می‌شود. این مکانیسم‌های تخریب در نهایت موجب تورم زیان‌بار شده و انبساط فوق‌نیز در دیوارهای MSE نقش مخربی دارد. آب، منشاء اصلی این مشکلات بوده و خاکریزی که شرایط زهکشی خوبی داشته باشد، عملاً مقاومت بیشتری در برابر تخریب از خود نشان می‌دهد. از آن جایی که در خصوص تثبیت پایایی CC مورد استفاده در پروژه‌های قبلی خاکریز دیوارهای MSE، تنها مطالعات محدودی (در صورت وجود) انجام گرفته است، در مورد استفاده از CC که دوام ضعیفی از خود نشان داده است، تحقیقات زیادی باید انجام شود. زمانی که بتن حاوی کلرید با غلظتهای بالا بازیافت می‌شود، CC به دست آمده هنوز هم مقدار قابل توجهی از کلریدها را داراست. حضور این املاح تأثیر جدی بر خوردگی آرماتوربندی فلزی خواهد داشت. در بخش‌های بعدی در این مورد بیشتر بحث خواهد شد.

1- Alkali-silica reaction

۳-۲-۳- دوام آرماتور در دیوارهای MSE

در احداث دیوارهای MSE از هر دو نوع آرماتوربندی فلزی و پلیمری استفاده می‌شود. میزان مشکلات موجود در زمینه دوام خاکریز به نوع آرماتور و نیز نوع مصالح خاکریز بستگی دارد. الیاس (۱۹۹۶) مطالعه جامعی در مورد خوردگی/تخریب و پوسیدگی آرماتورهای به‌کاررفته در دیوارهای MSE انجام داد. اما این مطالعه تقریباً بیشتر توجه خود را به خاکهای مهاجم و آسیب‌رسان معطوف داشته و کمتر به مصالح بازیافت‌شده‌ای مانند RAP و CC پرداخته بود، لذا در مورد دوام انواع مختلف آرماتور در RAP و CC تحقیقات زیادی باید صورت گیرد. شاید بزرگترین مسأله‌ای که در کاربرد CC اهمیت دارد، پتانسیل خوردگی آرماتوربندی‌های فلزی باشد. لذا بخش قابل توجهی از این مطالعه به این موضوع حساس اختصاص می‌یابد.

هنگام بررسی پتانسیل تخریب یا خوردگی آرماتورهای دیوارهای MSE که از RAP و CC به عنوان خاکریز استفاده کرده‌اند، باید به تمام آرماتورهای متداول توجه کرد. علاوه بر این، متغیرهای مهمی مانند تأثیر pH، رطوبت و ناخالصی‌ها که به مصالح مورد استفاده در خاکریز مربوط می‌شوند، باید مورد بررسی قرار گیرند.

۳-۲-۴- تخریب آرماتورهای پلیمری

وقتی در احداث دیوارهای MSE از آرماتوربندی پلیمری استفاده می‌شود، می‌توان براساس میزان کاهش مقاومت کششی آرماتوربندی در طول زمان، عملکرد طولانی‌مدت آن (آرماتوربندی) را تخمین زد. مقاومت کششی آرماتور به‌کاررفته در احداث دیوار MSE در اثر ایجاد اشکال در دوام، رفتار خزشی و نحوه قرارگیری آن کاهش پیدا می‌کند (الیاس، ۱۹۹۶). واکنش آرماتوربندی نسبت به این پارامترها به نوع پلیمر مورد استفاده، شرایط هوازدگی (مثل خصوصیات خاکریز) و بار اعمال‌شده بستگی دارد. بیشتر آرماتورهای به‌کاررفته در دیوارهای MSE از پلی‌پروپیلین (۸۳٪)، با دو پلیمر بسیار متداول پلی‌استر (۱۴٪) و پلی‌اتیلین (۲٪) ساخته می‌شوند (الیاس، ۱۹۹۶).

اصلی‌ترین دلایل تخریب آرماتوربندی پلیمری (الیاس، ۱۹۹۶) عبارتند از:

- ۱- اکسیداسیون پلی‌پروپیلین و پلی‌اتیلین
- ۲- هیدرولیز پلی‌استر
- ۳- ترک خوردگی تنش پلی‌اتیلین
- ۴- تخریب در اثر امواج ماوراءبنفش (UV)^۱
- ۵- تخریب بیولوژیکی
- ۶- انحلال شیمیایی کامل

اما عملاً به ندرت دیده می‌شود که مکانیسم‌های فوق‌الذکر به تنهایی بتوانند پلیمرها را تحت تأثیر خود قرار دهند، بلکه ترکیبی از مکانیسم‌های تخریب وارد عمل می‌شوند. خوشبختانه، پلیمرهای مورد استفاده در آرماتوربندی خاک به شکلی پردازش می‌شوند که تخریب طولانی‌مدت را به حداقل می‌رسانند. به عنوان مثال، اغلب اوقات پلیمرها

1- Ultra violet

شامل آنتی اکسیدانها (جهت کاهش اکسیداسیون)، مواد مقاوم در برابر ایجاد ترکهای تنشی و تثبیت کننده UV می باشند. با این حال، هنگام استفاده از آرماتوربندی پلیمری در احداث دیوارهای MSE، به خصوص هنگام استفاده از انواع جدید خاکریز نظیر RAP و CC باید به مسأله از بین رفتن خواص اصلی پلیمر در درازمدت توجه کرد.

براساس تحقیقات گسترده انجام شده، مسأله دوام طبیعی انواع آرماتورهای پلیمری در انواع مختلف خاکها فهرست بندی شده است. جدول (۳-۴) مقاومت پلیمرهای مختلف در برابر محیطهای خاکی متفاوت را نشان می دهد. توجه داشته باشید که مصالح بازیافت شده مانند RAP و CC در مطالعات این جدول گنجانده نشده اند. استفاده از آرماتوربندی های پلیمری در این مصالح جدید نیاز به بررسی و مطالعه بیشتر دارد.

جهت آزمایش دوام آرماتور پلیمری در آزمایشگاه، روشها و فناوری های متعددی وجود دارد. برای سرعت بخشیدن به این آزمایشها، از درجه حرارت های بالاتر و محیط های با شرایط سخت و آسیب رسان می توان استفاده کرد. به دست آوردن داده ها و اطلاعاتی که در روشهای طراحی موجود مورد استفاده قرار گیرند، اهمیت خاصی دارد. همچنین به منظور پیش بینی عمر مفید آرماتوربندی های پلیمری در دیوارهای MSE که از RAP و CC به عنوان خاکریز استفاده می کنند، می توان از داده های به دست آمده از این آزمایش استفاده کرد.

جدول (۳-۴) مقاومت پیش بینی شده پلیمرها در محیط های خاکی مخصوص

(FHWA ۲۰۰۰، ACPA ۱۹۹۳، پترارکا و گالدیرو ۱۹۸۴)

نوع پلیمر			شرایط محیط خاک
پلی پروپیلین	پلی اتیلین (HDPE)	پلی استر (PET)	
به انجام آزمایشهای تعیین ویژگی های مصالح در این شرایط نیاز است.	به انجام آزمایشهای تعیین ویژگی های مصالح در این شرایط نیاز است.	بدون تأثیر	خاکهای اسیدی- سولفاتی
بدون تأثیر	بدون تأثیر	بدون تأثیر	خاکهای آلی
بدون تأثیر	بدون تأثیر	بدون تأثیر	خاکهای شور
بدون تأثیر	بدون تأثیر	بدون تأثیر	خاکهای آهکی
بدون تأثیر	بدون تأثیر	به انجام آزمایشهای تعیین ویژگی های مصالح در این شرایط نیاز است.	خاکهای اصلاح شده (آهک، سیمان عمل آورده شده)
بدون تأثیر	بدون تأثیر	به انجام آزمایشهای تعیین ویژگی های مصالح در این شرایط نیاز است.	خاکهای قلیایی ($pH > 20$)
به انجام آزمایشهای تعیین ویژگی های مصالح در این شرایط نیاز است.	به انجام آزمایشهای تعیین ویژگی های مصالح در این شرایط نیاز است.	بدون تأثیر	خاکهای دارای عناصر واسطه

۳-۲-۵- خوردگی آرماتوربندی های فلزی قرار گرفته در خاک

همان طور که در فصل ۲ اشاره شد، ویژگی های خاکریز نقش مهمی در خوردگی آرماتوربندی های فلزی یا شبکه ها دارند. عوامل متعددی می توانند بر میزان خوردگی فلزات کار گذاشته شده در خاک تأثیر بگذارند. برخی از این

عوامل که به همراه شرایط محیطی خاک موجود روی خوردگی عناصر فلزی قرار گرفته در خاک تأثیر می‌گذارند عبارتند از:

- مقاومت الکتریکی
- بافت یا ساختار
- محیط ناهمگن
- درصد رطوبت
- سختی آب
- اکسیژن محلول
- املاح حل شده
- مقدار مواد آلی
- پتانسیل کاهش اکسیژن

بخش بعدی توضیح مختصری از تأثیر عوامل فوق‌الذکر و نحوه تأثیر آنها بر خوردگی فولادهای قرار گرفته در خاک ارائه می‌دهد.

مقاومت الکتریکی - بررسی مقاومت الکتریکی و pH متداول‌ترین روش مورد استفاده در تخمین خوردگی است. با این وجود، از آن جایی که سایر عوامل نیز بر خوردگی تأثیر چشمگیری دارند، جهت تخمین بهتر فعالیت خوردگی فلزات مدفون‌شده در خاک یا خاکریزهای مهندسی‌ساز، خصوصیات این خاکها و خاکریزهای مهندسی‌ساز فوق باید به خوبی مشخص شوند. مقاومت الکتریکی خاک اغلب به عنوان بهترین شاخص اندازه‌گیری میزان خوردگی خاک شناخته می‌شود. مقاومت الکتریکی عبارت است از اندازه‌گیری میزان مقاومتی که جریان الکتریکی در عبور از یک ماده با آن مواجه می‌شود. این میزان مقاومت برحسب واحد اهم - سانتی‌متر بیان می‌شود. مقاومت الکتریکی خاک نشانگر مقاومت آن در برابر انتقال جریانات خوردگی به عنوان یک الکترولیت است. در نتیجه، میزان پایین مقاومت الکتریکی نشانگر پتانسیل بالای خوردگی است و متقابلاً مقاومت الکتریکی بالا، بیانگر پتانسیل پایین برای ایجاد محیط‌های خورنده است.

در حالی که مقاومت الکتریکی به عنوان پارامتر کلیدی در جهت اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی در خاکها محسوب می‌شود، در سنجش میزان آن به عنوان معیار خوردگی تغییرات قابل توجهی به چشم می‌خورد. همان طوری که در جدول (۳-۵) دیده می‌شود، کشورهای مختلف از معیارهای مختلفی استفاده می‌کنند تا تغییرات موجود در میزان مقاومت الکتریکی را به خوبی نشان دهند. محدوده تغییرات مقاومت الکتریکی که در حال حاضر توسط TxDOT و FHWA مشخص شده شامل مقاومت الکتریکی بیش از ۳۰۰۰ اهم - سانتی‌متر می‌باشد (جدول ۳-۳). کارشناسان بر این عقیده‌اند که ماده ایده‌آل برای یک خاکریز باید میزان مقاومت الکتریکی بالاتری داشته و ارزش pH آن نیز در محدوده مجاز باشد. با این حال، مسأله قابلیت اعتماد در تعیین قابلیت خوردگی خاک که براساس مقدار مقاومت الکتریکی آن صورت می‌گیرد همواره بحث برانگیز بوده است.

مقاومت الکتریکی به عوامل متعدد دیگری نیز مربوط می‌شود. مقاومت الکتریکی اندازه‌گرفته‌شده تحت تأثیر املاح محلول و مقدار رطوبت موجود در خاک قرار دارد. غلظت بالای املاح محلول موجب کاهش مقاومت الکتریکی ماده شده و روی واکنشهای الکتروشیمیایی در سطح فلز تأثیر می‌گذارد.

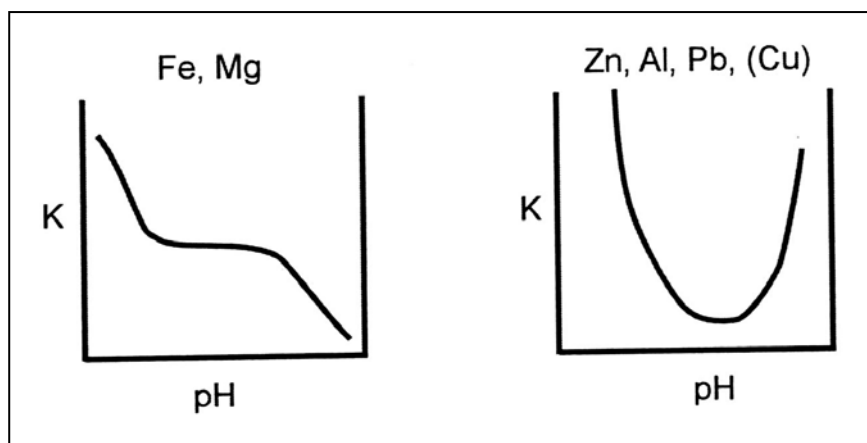
هنگامی که تنها از مقاومت الکتریکی برای ارزیابی پتانسیل خوردگی استفاده می‌شود باید دقت زیادی به عمل آورد، زیرا در خوردگی‌های مشاهده‌شده، بین مقاومت الکتریکی خاک و میزان pH اندازه‌گرفته‌شده در آن ارتباط ضعیفی دیده شده است (اسکالانت، ۱۹۸۹). به عنوان مثال، پتانسیل کم برای کاهش مقدار اکسیژن موجود در خاک می‌تواند محیطی با خوردگی بالا به وجود آورد که تحت القائات میکروبی قرار دارد و متقابلاً براساس داده‌های به‌دست‌آمده از مقاومت الکتریکی خاک با پتانسیل بالا برای کاهش اکسیژن، محیطی با خوردگی متوسط به وجود می‌آورد. با این حال، متداول‌ترین پارامترهای موجود در پیش‌بینی پتانسیل خوردگی خاک، pH و مقاومت الکتریکی آن است.

جدول (۳-۵) معیار آزمایش آرماتوربندی فولاد گالوانیزه در کشورهای مختلف (الیاس، ۱۹۹۰)

آلمان	انگلستان	فرانسه	ایالات متحده FHWA	خصوصیات
>۳۰۰۰	>۵۰۰۰	مرطوب > ۳۰۰۰، خشک > ۱۰۰۰	>۳۰۰۰	مقاومت الکتریکی (سانتی‌متر - اهم)
>۵ & <۹	>۶ & <۱۰	>۵ & <۱۰	>۵ & <۱۰	pH
<۵۰	<۵۰۰	مرطوب < ۱۰۰، خشک < ۲۰۰	<۲۰۰	مقدار کلرید (ppm)
<۵۰۰	<۵۰۰	مرطوب < ۱۰۰۰، خشک < ۵۰۰	<۱۰۰۰	مقدار سولفات (ppm)
---	---	مرطوب ۱۰۰، خشک < ۳۰۰	---	مقدار سولفید (ppm)
---	---	۱۰۰ ppm	---	مقدار مواد آلی (ppm)
---	---	حداقل	---	نیاز به اکسیژن بیوشیمیایی
۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	---	---	پتانسیل کاهش اکسیژن (+mV)

pH - به خوبی روشن است که pH یک محلول می‌تواند روی میزان خوردگی فلز تأثیر داشته باشد. وایت‌کوچ (۱۹۹۰) معتقد است بین نسبت خوردگی (K) و مقدار pH در فلزات مختلف رابطه مستقیمی وجود دارد. شکل ۲-۳ نیز نشانگر رابطه فوق است. این شکل نشان می‌دهد که در مورد آهن (Fe)، مقدار pH بالا (pH بالای ۱۰) میزان خوردگی را کاهش خواهد داد. با این حال، بسیاری از آیین‌نامه‌ها مقدار مجاز pH لازم برای آرماتوربندی دیوارهای MSE را تقریباً کمتر از ۱۰ تعیین کرده‌اند. لذا برای فولاد عادی، pH بالاتر می‌تواند محافظت بیشتری در برابر خوردگی ایجاد کند و محدود کردن pH نمی‌تواند نتایج مطلوب داشته باشد. همان طوری که شکل (۲-۳) نشان می‌دهد در مورد فلز روی، همزمان با تغییر pH و نزدیک شدن آن به pH خنثی، میزان خوردگی به شدت افزایش می‌یابد. در حال حاضر، معیار pH سعی دارد مقدار pH را طوری محدود سازد که فعالیت خوردگی فلز روی به حداقل برسد. از آن جایی که فلز "روی" آند کاهنده (قطب مثبت کاهنده) محسوب می‌شود، فلز روی موجود در سطح فولاد گالوانیزه‌شده در نهایت خورده شده و فولاد بدون پوشش باقی می‌ماند. فولادی که در محلولی با pH بالا قرار دارد، میزان خوردگی پایینی نشان می‌دهد. کار روی فلزات جهت بهینه‌سازی عمر مفید آنها امری ضروری است و در این رابطه معیاری که اخیراً برای pH مشخص شده، به مطالعه و بررسی بیشتر احتیاج دارد.

سختی آب - اگر میزان سختی آب (یعنی غلظت کربنات کلسیم آب) بالا باشد، میزان خوردگی فولاد کاهش می‌یابد (مور و هالمارک، ۱۹۸۷). به طور کلی اعتقاد بر این است که عامل سختی آب تأثیر کمی بر عملکرد خوردگی فولاد در خاکها یا خاخریزی‌هایی دارد که به شیوه مهندسی احداث شده‌اند.



شکل (۲-۳) تأثیر pH بر میزان خوردگی فلزات مختلف (وایت‌کوچ، ۱۹۹۰)

املاح محلول - همچنان که مقدار نمک محلول در خاک افزایش می‌یابد، مقاومت الکتریکی آن کاهش پیدا می‌کند. حضور املاح باعث کاهش مقاومت الکتریکی خاک شده و بر واکنش الکتروشیمیایی در سطح فلز تأثیر می‌گذارد. در حالی که میزان مقاومت الکتریکی خاک تعیین‌کننده مقدار غلظت نمک محلول در آن است، نوع یونی که باعث کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود نیز بسیار حایز اهمیت است. بعضی از یونها موجب تسریع مقدار خوردگی می‌شوند. یونهای خاصی که مقدار خوردگی بالایی دارند، کلریدها و سولفات‌ها می‌باشند (رابلر، ۱۹۸۹). حضور سولفیدها می‌تواند نشانگر باکتری کاهش‌دهنده سولفات باشد (بوشمن و مهالیک، ۱۹۸۹). مقدار مجاز پیشنهادشده برای حضور این دو یون در خاکریز به ترتیب ۱۰۰ ppm و ۲۰۰ ppm برای کلریدها و سولفات‌هاست (الیاس، ۱۹۹۰). همان طوری که قبلاً در جدول (۳-۵) اشاره شد، در پروژه‌های سراسر دنیا محدودیت وجود مقدار کلرید و سولفات در خاکریز متفاوت است.

پتانسیل کاهش اکسیژن - پتانسیل کاهش اکسیژن می‌تواند اطلاعاتی در مورد نوع خاصی از مکانیسم خوردگی مانند خوردگی توسط باکتری غیر هوازی ارائه دهد. الیاس (۱۹۹۰) در گزارش خود می‌نویسد که کاهش اکسیژن می‌تواند نشانگر استعداد و حساسیت نسبت به تهاجم میکروبی باشد و پتانسیل بالای کاهش اکسیژن نوعی از خوردگی را نشان می‌دهد که با کمک اکسیژن صورت می‌گیرد. همچنین در پتانسیل پایین کاهش اکسیژن مشاهده می‌شود که خوردگی در اثر وجود باکتری غیر هوازی صورت می‌گیرد. منشاء مشکلات خوردگی براساس مقاومت الکتریکی خاک می‌تواند متفاوت باشد. اندازه‌گیری مقدار پتانسیل کاهش اکسیژن امکان‌پذیر بوده و در عین حال نتایج حاصل از این محاسبه می‌تواند به شدت پراکنده باشند، زیرا اندازه‌گیری‌ها نسبت به تغییرات خاک منطقه و توزیع آن روی نتایج تأثیر مستقیم دارند. در مورد تأثیر احداث خاکریز روی پتانسیل کاهش اکسیژن در خاک، به خصوص زمانی که از مصالح بازیافت‌شده به عنوان ماده خاکریز استفاده می‌شود، تحقیقات زیادی صورت نگرفته است.

دانه‌بندی - خاکریز ریزدانه خاصیت زهکشی ضعیفی دارد و لذا مقدار رطوبت خاک در آن بالا رفته و میزان ایستایی آب در خاکریز افزایش می‌یابد. این شرایط، فعالیت میکروبیولوژیکی را بالا برده و لذا تأثیر فعالیت

میکروبیولوژیکی بر مقدار خوردگی به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. خاک درشت‌دانه دارای خاصیت زهکشی بیشتر بوده و لذا دارای زهکشی بهتر و شرایط تهجمی کمتری می‌باشد. دانه‌بندی خاک نیز روی نفوذپذیری هوا در خاک تأثیر دارد، لذا دانه‌بندی خاک در محاسبه غیر مستقیم هوادهی خاک مؤثر است. خاکهای ماسه‌ای درشت‌دانه که نفوذپذیری زیادی نسبت به آب‌وهوا دارند، می‌توانند هوادهی خوبی ایجاد کنند و متقابلاً خاکهای رسی ریزدانه هوادهی ضعیفی دارند. هوادهی خوب سبب افزایش میزان خوردگی اولیه می‌شود، با این حال به محض اینکه خوردگی اولیه ایجاد شد، این خوردگی می‌تواند مانع و پوشش محافظی ایجاد کند که نتیجه آن کاهش فعالیت خوردگی است. خوردگی موضعی که معمولاً در خاکهای فاقد هوادهی دیده می‌شود و خود تحت تأثیر مقدار یون موجود در خاک قرار دارد، بیش از فرایند خوردگی یکنواخت مخرب است. به نظر می‌رسد نمونه‌هایی که در درازمدت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، بر این نکته تأکید داشته‌اند که شدت مشکلات خوردگی در خاکهای رسی ریزدانه به مراتب بیشتر از مشکلات خوردگی در خاکهای ماسه‌ای درشت‌دانه است. با این حال در احداث خاکریزها نتایج دیگری نیز به دست آمده است.

مقدار رطوبت - فلزاتی که در خاک خشک قرار دارند دچار خوردگی نمی‌شوند. برای اینکه عمل خوردگی

اتفاق بیافتد، نیاز به رطوبت است. مقاومت الکتریکی خاک با افزایش میزان رطوبت آن از حالت خشک به حالت مرطوب کاهش می‌یابد و با افزایش میزان رطوبت خاک، میزان مقاومت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. حداکثر میزان خوردگی اغلب زمانی رخ می‌دهد که مقدار رطوبت خاک متوسط باشد، یعنی درصد رطوبت اشباع حدود ۶۵٪ باشد (بریود و همکاران، ۱۹۹۸). هنگامی که مقدار رطوبت خاک پایین باشد، آب کافی برای حمایت از فرایند خوردگی وجود نخواهد داشت. متقابلاً زمانی که مقدار رطوبت خاک بالا باشد، یون اکسیژن از سطح فلز رها شده و میزان خوردگی پایین خواهد بود. نمونه‌ای از این وضعیت توسط کامتیز و ونیکا (۱۹۸۹) بررسی شده است. آنها معتقد بودند خوردگی، بیشتر در فولادهای بالاتر از سطح سفره آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد و دلیل آن را به قابلیت دسترسی به اکسیژن جهت تأمین واکنشهای خوردگی نسبت می‌دادند. میلر و همکارانش (۱۹۸۱) بر این باورند که در خاکهایی با مقدار رطوبت بالا و خاکهایی که زیر سفره آب زیرزمینی قرار دارند، میزان خوردگی بیشتری دیده می‌شود. بخشی از این رفتار مشاهده‌شده به خاطر وجود مکانیسم‌های خوردگی است که از شرایط خاص محیطی مانند خوردگی میکروبی ناشی می‌شوند (میلر و همکاران ۱۹۸۱، اسکالانت ۱۹۸۹). افزایش میزان رطوبت خاک منجر به کاهش حضور اکسیژن می‌شود. لذا اکسیژنی که برای فرایند خوردگی مورد نیاز است باید از طریق انتشار و پراکندگی در میان آب موجود در خاک انتقال یابد. تحقیقات متعدد نشان می‌دهند اگر مقدار رطوبت تقریباً کمتر از ۲۰٪ باشد، میزان اکسیژنی که بین هوا و آب موجود در خاک (رطوبت خاک) منتقل می‌شود، زیاد خواهد بود و لذا خوردگی بیشتری رخ خواهد داد (کینگ، ۱۹۷۷). خاکی که دارای رطوبت ۲۰٪ یا بیشتر باشد، احتمالاً دچار خوردگی یکنواخت می‌شود (با فرض اینکه هیچ یون کلرید یا سولفات وجود نداشته باشد)، در حالی که خاکهایی با رطوبت ۲۰٪ یا بیشتر دچار خوردگی نقطه‌ای خواهند شد (کینگ، ۱۹۷۷). مقدار رطوبتی که باعث حداکثر میزان خوردگی می‌شود، برحسب ویژگی‌ها و خصوصیات خاک متغیر است.

برای توصیف رطوبت خاک، پارامترهای متعددی وجود دارد. مقدار رطوبت عبارت است از نسبت آب موجود در خاک به وزن خشک خاک. به علت اهمیت نقش اکسیژن در فرایند خوردگی، اندازه‌گیری رطوبت که عمدتاً به مطالعات خوردگی مربوط می‌شود، می‌تواند برحسب درصد رطوبت اشیاع باشد یا با درصد حجم تخلخل اشغال‌شده توسط آب تعریف گردد.

اکسیژن محلول - اجزای فلزی می‌توانند در خاکهای دست‌نخورده، خاکهای دست‌خورده یا مصالح بازیافت‌شده خاکریز (که آنها نیز دست‌خورده هستند) مدفون شوند. مطالعات رومانف (۱۹۵۷) نشان می‌دهند میزان خوردگی در خاکهای دست‌خورده شدیدتر از سایر خاکهاست، البته این مشاهده‌ها از سوی یک سری مطالعات بعدی نیز تأیید شدند. فیشر و بيو (۱۹۸۱) به این نتیجه رسیده‌اند که شمع‌های موجود در رسوبهای دست‌نخورده کشور نروژ، علی‌رغم مقاومت الکتریکی ناچیز، خوردگی بسیار کمی از خود نشان می‌دهند. اسکالانت (۱۹۸۹) نیز بر این باور است که انتشار اکسیژن در خاکهای دست‌نخورده، به خصوص در خاکهای دست‌نخورده موجود در زیر سفره آب زیرزمینی، به قدری پایین است که فرایند خوردگی در آنها متوقف می‌شود. تأثیر این حالت بر شاخص‌های معمول خوردگی (مقاومت الکتریکی، pH و غیره) چشمگیرتر است. از آن جایی که دسترسی به اکسیژن در کل فرایند خوردگی نقش مهمی دارد، اندازه‌گیری اکسیژن محلول در آب موجود در منافذ خاک، می‌تواند پارامتر معناداری ارائه دهد که به فرایند خوردگی مربوط می‌شود.

مقدار مواد آلی - مصالح به‌کاررفته در خاکریز نباید شامل مقدار زیادی از مواد و مصالح مضر باشد که به آرماتوربندی هجوم آورده یا موجب خرابی خود مصالح خاکریز شوند. این مسأله در مورد مصالح بازیافت‌شده بسیار اهمیت داشته و لذا باید نهایت دقت به عمل آید تا میزان مواد آلی موجود در مواد و مصالح به‌کاررفته در خاکریز محدود باشد.

محیط ناهمگن - برای اینکه فرایند خوردگی اتفاق بیافتد، نیاز به یک الکترولیت می‌باشد. فلز خورنده باید در محیطی قرار گیرد که عناصر موجود در آن بتوانند نقش یک الکترولیت را بازی کنند. محیط ناهمگن یا دارای الکترولیت می‌تواند عملاً روی مقدار خوردگی تأثیر بگذارد، زیرا وجود ناهمگنی‌ها در الکترولیت می‌تواند موجب تغییر در سطح فلز شود. نمونه‌هایی از محیط‌های ناهمگن که توسط اسکالانت (۱۹۸۹) گزارش شده است عبارتند از: تفاوت در میزان هوادهی، درجه حرارت، ترکیبات شیمیایی موجود در خاک و وجود ناهمگنی در جریان الکترولیت.

بسیاری از این موقعیت‌ها منجر به ایجاد محیط ناهمگن در خاکریز می‌شوند. دیواره نماها از اجزای مهم دیوارهای MSE به شمار می‌روند، در معرض حرارت و تشعشعات خورشید قرار گرفته و دچار تغییرات دایمی درجه حرارت می‌شوند. اما خاک پشت دیوار MSE تحت تأثیر این گونه تغییرات دایمی درجه حرارت قرار نمی‌گیرد. لذا تفاوت دمای بین دیواره نما و خاک پشت آنها منجر به تفاوت درجه حرارت بالقوه بین اجزای مختلف آرماتورها شده و این به نوبه خود باعث افزایش فعالیت خوردگی می‌شود. به علاوه، خاکی که دقیقاً پشت دیواره نما قرار گرفته، نسبت به خاکی که در فاصله دورتر از آن قرار دارد کمتر متراکم می‌شود. خاکی که به عنوان خاکریزی که دقیقاً پشت دیوار قرار می‌گیرد، انتخاب می‌شود می‌تواند از خاک موجود در محل دیوار یا سایر خاکریزهایی که در فواصل دورتر قرار دارند

متفاوت باشد. لذا تفاوت در پتانسیل باعث می‌شود میزان خوردگی، شتاب بیشتری به خود بگیرد. اگر آرماتوربندی خاک فقط در ناحیه خاکریز انتخابی که بدنه اصلی کار را تشکیل می‌دهد انجام شود، تفاوت بین دو خاک (خاک موجود در خاکریز پشت دیوار و خاک مناطق دورتر خاکریز) موضوع مهمی نمی‌تواند باشد. آب زهکشی شده از مصالح زیراساس جاده و حرکت طبیعی آب موجود در خاک (رطوبت خاک)، املاح را به خاکریز انتقال داده و لذا واکنش شیمیایی در سطح فولاد آرماتوربندی صورت می‌گیرد. پتانسیل تغییرات به وجود آمده در خاکریز پشت دیوار MSE که ناشی از وجود محیط ناهمگن است به سختی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در خصوص سهم این موضوع در میزان خوردگی آرماتورهای MSE اطلاعات زیادی در دسترس نیست، بنابراین مطالعات و تحقیقات بیشتری در این زمینه باید انجام شود.

۳-۲-۶- پیش‌بینی میزان خوردگی

همان طور که قبلاً اشاره شد، متغیرهای بسیاری بر فعالیت خوردگی فلزات در زیر زمین تأثیر دارند. فعالیت خوردگی در خاکها به پارامترهایی بستگی دارد که به جنس فلز و شرایط محیط خاک مربوط می‌شوند. در قسمت فوق به عوامل محیطی خاک که می‌توانند روی میزان خوردگی فلزات تأثیر داشته باشند، اشاره شد. پارامترهای مربوط به فلز که میزان خوردگی را تغییر می‌دهند عبارتند از عناصر آلیاژی، روشهای (فناوری‌های) پردازش سطح فلز و پوشش‌های عایق غیر الکتریکی که روی سطح فلز قرار دارند. این پارامترها می‌توانند مکانیسم خوردگی را دچار تغییر و تحول کرده و لذا میزان خوردگی را نیز دستخوش تغییر نمایند. بنابراین در قسمت بعدی، مکانیسم‌های کلی خوردگی که در میان سازه‌های فلزی زیرزمینی متداول هستند، توصیف شده و به دنبال آن پیرامون مدل‌های رایج مورد استفاده در پیش‌بینی عمر مفید خوردگی فلزات بحث خواهد شد.

مکانیسم‌های خوردگی - کاهش حجم ثابت و منظم سطح رویه فلز به عنوان خوردگی یکنواخت تعریف

می‌شود. این نوع خوردگی بسیار متداول بوده و پدیده‌ای بسیار پرهزینه می‌باشد. این خوردگی اغلب به دلیل شرایط جوی است ولی در سازه‌های زیرزمینی نیز اتفاق می‌افتد. برای اینکه خوردگی یکنواخت رخ دهد، فلز باید از لحاظ متالورژی و ترکیبات و ساختمان یکنواخت بوده و شرایط هوازدگی باید به گونه‌ای باشد که تمام سطوح آن با همان شرایط محیطی یکنواخت هوازده شوند. در محیط‌های زیرزمینی، خوردگی یکنواخت به اندازه سایر مکانیسم‌های خوردگی متداول نیست. سایر مکانیسم‌های خوردگی به علت تفاوت در سطح آب زیرزمینی، غیر یکنواختی خاکها و یا مصالح خاکریزها، مقدار متغیر اکسیژن و عوامل دیگر ایجاد می‌شوند. فرایند خوردگی یکنواخت نسبتاً قابل پیش‌بینی بوده و همبستگی بین عمر مفید محاسبه‌شده و عمر مفید واقعی، معین است.

آلیاژهای غیر مشابه جفتی در حضور الکترولیت خورنده، می‌توانند باعث به وجود آمدن خوردگی ترجیحی در یکی از آلیاژها شوند. وقتی این جفت‌شدگی اتفاق می‌افتد، خوردگی نسبی یا گالوانیک رخ می‌دهد. هنگامی که فلزات، آلیاژها و اجزای ریزسازه‌ای در الکترولیت‌های خورنده غوطه‌ور می‌شوند، پتانسیل خوردگی خاص خود را دارند. وقتی دو فلز یا دو آلیاژ متفاوت حین غوطه‌ور شدن در الکترولیت خورنده با هم ارتباط پیدا می‌کنند، فلز یا آلیاژ با پتانسیل

خوردگی فعال‌تر (منفی‌تر) به همراه E_{corr} ، الکترونیهای اضافی خود را به فلز یا آلیاژ با فعالیت کمتر (مثبت‌تر) واگذار می‌کند. بروز این نوع از خوردگی در محل احداث خاکریز یعنی محل وجود انواع مصالح مختلف در کل محوطه پروژه امری طبیعی است. به طور کلی، خوردگی گالوانیک منجر به خوردگی یکنواخت سطح فعال فلز می‌شود.

جهت افزایش عمر آرماتوربندی به‌کاررفته در دیوارهای MSE، معمول‌ترین روش، گالوانیزه کردن آرماتوربندی است. گالوانیزاسیون به عنوان آند کاهنده عمل کرده و فرایندی مشابه خوردگی گالوانیک شکل می‌گیرد. اگر ضخامت گالوانیزاسیون (که اغلب با استفاده از پوشش فلز روی انجام می‌شود) و مقدار کل خوردگی مشخص باشد، طول عمر افزایش‌یافته ناشی از گالوانیزه کردن فولاد قابل پیش‌بینی و محاسبه خواهد بود.

علاوه بر فرایندهای خوردگی یکنواخت، فرایندهای خوردگی موضعی نیز در سازه‌های زیرزمینی متداول هستند. خوردگی موضعی منجر به تهاجم موضعی شتابزده روی سطح فلز می‌شود که اغلب با نام خوردگی نقطه‌ای (حفره‌ای) معروف است. مناطقی که به صورت موضعی مورد تهاجم قرار گرفته‌اند خیلی کوچک به نظر می‌رسند، ولی می‌توانند فلز را به شدت خورده و در نتیجه مقطع عرضی دچار تخریب می‌شود. خوردگی نقطه‌ای متفاوت از خوردگی یکنواخت بوده و غیر قابل پیش‌بینی است. میزان این نوع از خوردگی متغیر بوده و به حرکت مواد آسیب‌رسان بستگی دارد که به نقطه خوردگی وارد شده یا از آن بیرون می‌آیند. وقتی الکترولیت شامل کلریدها، سولفات‌ها یا سایر املاح است، مکانیسم‌های خوردگی به صورت موضعی رخ می‌دهند و زمانی که یونهای فوق حضور داشته باشند، خوردگی موضعی به عنوان مکانیسم رایج در تخریب خاکریزهای احداث‌شده محسوب می‌شود.

پیش‌بینی عمر مفید مرتبط با خوردگی - در زمینه تخمین پتانسیل خوردگی خاک، مطالعات متعددی صورت گرفته است. در این مطالعات از پارامترهای برگرفته از شرایط محیطی خاک استفاده می‌شود تا عمر مفید سازه‌های زیرزمینی پیش‌بینی گردد. انجمن سازه‌های هیدرولیکی آمریکا (AWWA)¹ سیستمی ارائه کرده است که به وسیله آن می‌توان لزوم یا عدم لزوم اجرای عملیات محافظتی در برابر خوردگی را مشخص نمود. سیستم فوق تنها مجموعه‌ای از شاخص عددی است و با اندازه‌های مقاومت الکتریکی، pH، پتانسیل کاهش اکسیداسیون، سولفیدها و مقدار رطوبت خوردگی خاک در ارتباط است. اگر میزان خصوصیات فوق‌الذکر در خاک مشخص باشد، طبق جدول (۳-۶)، می‌توان برای خصوصیات مختلف امتیازبندی کرد. اگر مجموعه امتیازها بزرگتر از ده باشد، AWWA (و FHWA) استفاده از پوششهای محافظ را توصیه می‌کند. یکی از معایب اصلی سیستم فوق این است که برای حضور یونهای کلرید امتیازی در نظر گرفته نمی‌شود و دلیل آن بر این فرضیه استوار است که حضور کلریدها منجر به کاهش مقاومت الکتریکی خاک می‌شود. در روش AWWA (و FHWA) نیز از این فرضیه استفاده شده است. با این حال، تأثیر خوردگی ناشی از کلریدها بسیار مخرب‌تر از کاهش مقاومت الکتریکی خاک خواهد بود. بنابراین، اگر هنگام استفاده از سیستم AWWA، حضور کلریدها قطعی باشد، پیش‌بینی می‌شود که پتانسیل خوردگی پایین باشد. این سیستم امتیازبندی نیز می‌تواند یک‌طرفه و نادرست باشد، زیرا امتیازات تعیین‌شده برای pH، ۴/۰ - ۲/۰ در مقایسه با تعداد امتیازات تعیین‌شده برای مقدار pH بیشتر از آن، ۸/۵ برابر است. برای بررسی تأثیر pH روی میزان خوردگی آهن در محدوده pH ۴/۰ - ۲/۰ و

۱۴- ۸/۵ به شکل (۲-۳) مراجعه شود. در این شکل مشاهده می‌شود که بزرگی میزان خوردگی‌های پیش‌بینی‌شده متفاوت خواهد بود.

برای پیش‌بینی عمر مفید از روشهای تحلیل آماری نیز استفاده می‌شود. یکی از این روشها که توسط بوشمن و مهالیک (۱۹۸۹) ارائه شده است، جهت پیش‌بینی میانگین زمان لازم برای خرابی در اثر خوردگی (MTCF) استفاده می‌شود. این مطالعات نشان دادند که در اندازه‌گیری متغیرهای القاکننده خوردگی، واریانس قابل توجهی اتفاق می‌افتد و بررسی یک متغیر به تنهایی برای پیش‌بینی MTCF کافی نخواهد بود. جهت بحث پیرامون این مسأله، از مدل تحلیل رگرسیون مرکب استفاده می‌شود. در این مدل، MTCF تحت تأثیر هر کدام از متغیرهای مستقل قرار دارد. متغیرهای فوق از طریق ضریبی که سهم نسبی متغیر را در MTCF نشان می‌دهد، تلفیق می‌شوند. شکل کلی مدل تحلیل رگرسیون مرکب که توسط بوشمن و مهالیک ارائه شده، عبارت است از:

$$Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+\dots+B_kX_k+e \quad (1)$$

در این رابطه:

B_0 = ثابت عددی

Y = متغیر وابسته (به عنوان مثال مقدار CMFT، تعداد سالهایی است که لوله آب چدنی لازم است مورد آزمایش قرار گیرد)

$X_{1,2,\dots,K}$ = هر متغیر مستقلی که روی MCFT تأثیر دارد (مثال مقاومت الکتریکی خاک، مقدار رطوبت، غیره)

$B_{1,2,\dots,K}$ = ضریب ارائه‌شده برای هر متغیر مستقل براساس سهم نسبی هر متغیر دخیل در محاسبه MCFT

e = خطای تصادفی که دارای توزیع احتمال نرمال بوده و دارای میانگینی برابر با صفر با انحراف معیار ثابت است.

مشکلاتی که در تعیین ضرایب به‌کاررفته در این روش وجود دارد، امکان استفاده عملی از آن را محدود نموده‌اند.

AASHTO و اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا (DOT) اصول راهنمای طراحی ارائه کرده‌اند که به وسیله آن می‌توان

عمر مفید فولاد گالوانیزه موجود در پروژه‌های خاکی را ارزیابی کرد. مدل AASHTO برای هر سازه دایمی عمر

۷۵ ساله پیش‌بینی کرده و برای سازه‌های MSE پارامترهای ویژه‌ای ارائه نموده است. با استفاده از روش اداره حمل‌ونقل

کالیفرنیا می‌توان عمر مفید فولاد ۱۸ عیار را با ۲۸/۳۵ گرم از پوشش فلز روی در هر متر مربع از آن برآورد کرد. فولاد

مذبور برای کارهایی از قبیل احداث آبگذر استفاده می‌شود.

1- Mean Time to Corrosion Failure

2- Department Of Transportation

جدول (۳-۶) امتیازبندی براساس روش AWWA - استاندارد C105-72 (پالمر، ۱۹۸۹)

امتیازها	خصوصیات خاک	
مقاومت الکتریکی - (سانتی‌متر - اهم)		
(براساس یک نمونه استوانه‌ای شکل یا نمونه مکعبی شکل اشیاع میلر)		
۱۰	< ۷۰۰	
۸	۱۰۰۰	تا ۷۰۰
۵	۲۰۰۰	تا ۱۰۰۰
۲	۱۵۰۰	تا ۱۲۰۰
۱	۲۰۰۰	تا ۱۵۰۰
۰	> ۲۰۰۰	
pH		
۵	۲/۰	تا ۰/۰
۳	۴/۰	تا ۲/۰
۰	۶/۵	تا ۴/۰
۰	۷/۵	تا ۶/۵
۰	۸/۵	تا ۷/۵
۳	> ۸/۵	
پتانسیل کاهش اکسیژن		
۰	> +۱۰۰ mV	
۳/۵	+۱۰۰ mV	تا +۵۰
۴	+۵۰ mV	تا ۰
۵		منفی
سولفیدها		
۳/۵		مثبت
۲		خنثی
۰		منفی
رطوبت		
۲		زهکشی ضعیف، همواره مرطوب
۱		زهکشی متوسط، کاملاً نمدار
۰		زهکشی خوب، کاملاً خشک

در این بخش، مطالبی پیرامون روش طراحی AASHTO ارائه می‌شود. برای کارهای اجرایی دیوار MSE

محدودیت‌های ذیل باید رعایت شود:

- مقاومت الکتریکی بزرگتر از ۳۰۰۰ اهم - سانتی‌متر

- $5 < PH < 10$

- مقدار مواد آلی کمتر از ۱٪

- مقدار کلرید کمتر از ۱۰۰ ppm

- مقدار سولفات کمتر از ۲۰۰ ppm

AASHTO معتقد است حداکثر جرمی که فرض می‌شود از بین خواهد رفت، عبارت است از:

- $15 \mu\text{m}/\text{yr}$ برای خوردگی پوشش فلز روی طی دو سال اول
- $4 \mu\text{m}/\text{yr}$ تا وقتی که پوشش فلز روی کاملاً از بین می‌رود و آنگاه
- $12 \mu\text{m}/\text{yr}$ برای عمر باقی‌مانده سازه

با استفاده از این مقادیر، می‌توان قطر فولاد را بعد از عمر مفید ۷۵ ساله برآورد کرده و ظرفیت آرماتوربندی خورده‌شده در سیستم دیوار MSE را تعیین نمود. اگر ظرفیت مقاومت سیستم فوق بعد از ۷۵ سال بیش از مقادیر تعیین‌شده در طراحی باشد، سیستم پیشنهادی مناسب تشخیص داده می‌شود. توجه به این نکته مهم است که در روش طراحی فوق هیچ کاهش در مقاومت دررفتگی آرماتور از خاک صورت نمی‌گیرد.

حال به روش طراحی کالیفرنیا می‌پردازیم. روش آزمایشی ۶۴۳ اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا زمان را بدون نیاز به سرویس برای فولاد گالوانیزه تعیین می‌کند. این فولاد در خاکهایی با pH کمتر از ۷/۳ و در پروژه‌هایی مانند احداث آبگذر، زیر جسم راه به کار می‌رود. جهت محاسبه زمان بدون نیاز به سرویس برای فولاد مذکور از این معادله استفاده می‌شود:

$$R = 13/79 \times [\log_{10} R - \log_{10} (2160 - 2490 \times \log_{10}(\text{PH}))] \quad (2)$$

در این رابطه R حداقل مقاومت الکتریکی است. برای مقدار pH بزرگتر از ۷/۳ از معادله ذیل استفاده می‌شود:

$$R = 1/47 \times R^{0.41} \quad (3)$$

پرسنل اداره حمل‌ونقل وظیفه دارند در مورد قابلیت استفاده از اصول راهنمای طراحی، بازبینی‌ها و نظرات مختلفی به کار گیرند. گروه تحقیقاتی معتقد است به منظور داشتن برآورد بهتری از عملکرد خوردگی این سیستمها، پارامترهای دیگری نیز باید مورد توجه قرار گیرند.

۳-۳- خلاصه

آیین‌نامه‌های مناسب جهت احداث خاکریزها نقش مهمی در عملکرد قابل قبول دیوارهای MSE ایفا می‌کنند. این فصل پیرامون مشخصات فنی رایجی که از سوی FHWA و TxDOT و برای مصالح خاکریز دیوارهای MSE ارائه شده، بحث می‌کند. در بخش زیر، مسایل مکانیک خاک مربوط به استفاده از RAP و CC به عنوان مصالح به‌کاررفته در خاکریز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- حداکثر ابعاد دانه‌ها در RAP و CC با مشخصات فنی فعلی در مورد دانه‌بندی خاکریز معمولی مقایسه می‌شود.

۲- خصوصیات تراکم رطوبت - چگالی برای RAP و CC با خاکریز با مصالح سنگدانه‌ای سنتی مقایسه می‌شود.

۳- خردشدگی بیشتر RAP و CC در طی تراکم کارگاهی.

۴- نفوذپذیری RAP و CC با خاکریز با مصالح سنگدانه‌ای سنتی مقایسه می‌شود.

۵- مقاومت برشی RAP و CC با خاکریز با مصالح سنگدانه‌ای سنتی مقایسه می‌شود.

۶- پتانسیل موجود برای خزش در RAP و در فصل مشترک آرماتور - RAP.

مهمترین خصوصیات ژئوتکنیکی که بر عملکرد دیوارهای MSE تأثیر می‌گذارند، عمدتاً شامل نفوذپذیری CC و پتانسیل خزش RAP است. نفوذپذیری CC کمتر از مصالح معمول در خاکریز است و دلیل آن وجود سیمان غیر هیدراته است که طی فرایند تراکم هیدراته شده و فضای منافذ موجود در خاک را تقلیل می‌دهد. نفوذپذیری کمتر می‌تواند منجر به تجمع آب در پشت دیوار MSE ساخته شده از CC شود. علاوه بر آن، تجمع رطوبت اضافی در خاکریز CC، خوردگی آرماتوربندی فلزی را سرعت می‌بخشد. موضوع رفتار خزشی RAP از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا ویسکوزیته قیر معدنی یا طبیعی موجود در RAP موجب تغییر شکل بیش از حد در دیوارهای MSE می‌شود. خصوصیات خزش خود RAP و نیز فصل مشترک آرماتور - RAP نیز موضوع مهمی بوده و به عنوان بخشی از این مطالعه تحقیقاتی مورد بررسی و آزمایش قرار خواهد گرفت.

آزمایش مکانیک خاک که در ادامه این مطالعه سه ساله صورت می‌گیرد، روی مسایل مهم فوق‌الذکر تأکید داشته و به مسأله نفوذپذیری CC و پتانسیل رفتار خزشی در RAP توجه خاصی دارد. برای تعیین تمام خصوصیات RAP و CC به عنوان مصالح خاکریز در دیوارهای MSE، سایر آزمایشهای مکانیک خاک نیز انجام خواهد شد. از جمله این آزمایشها می‌توان به مقاومت برشی، تراکم و آزمایشهای تراکم کارگاهی اشاره کرد.

دوام مصالح خاکریز و آرماتوربندی در عملکرد طولانی مدت و رضایت بخش دیوارهای MSE نقش اساسی دارند. دوام خود مصالح RAP مسأله چندان مهمی به نظر نمی‌رسد، اما پایداری CC می‌تواند تابعی از بتن تشکیل دهنده آن باشد. اگر بتن اولیه واکنش قلیا - سیلیکا یا حمله سولفاتی را تجربه کرده باشد، خاکریز CC به دست آمده دارای مشکلات زیادی خواهد بود که دلیل آن مربوط به تورم بیش از حد ناشی از جذب رطوبت است. برای مطالعه این پدیده تحقیقاتی انجام خواهد شد.

دوام آرماتوربندی دیوار MSE موضوعی مهم است. آرماتوربندی پلیمری به گونه‌ای پردازش و طراحی می‌شود که فرسایش و خرابی طولانی مدت را به حداقل برساند، اما تأثیر مصالح بازیافت شده‌ای نظیر RAP و CC، بر روی تخریب آرماتورهای پلیمری هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته است. ارتباط فوق به عنوان بخشی از این پروژه تحقیقاتی مطالعه خواهد شد. پتانسیل خوردگی آرماتور فلزی نیز موضوعی حایز اهمیت است. خصوصیات خاک و آرماتور فلزی روی پتانسیل خوردگی تأثیر دارند. این پروژه تحقیقاتی شامل انجام آزمایشهای خوردگی نیز خواهد بود و هدف از این آزمایشها تعریف آن دسته از پارامترهایی است که هنگام برآورد و بررسی عملکرد خوردگی آرماتوربندی فلزی در دیوارهای MSE با خاکریز RAP و CC نقش بیشتری دارند و باید بیشتر مورد توجه قرار گیرند.

۴- کاربردهای رایج RAP و CC

در سالهای اخیر، استفاده از RAP و CC در ساخت و احداث بزرگراههای سراسر ایالات متحده بسیار متداول شده است. با این حال، در مقایسه با سایر کاربردهای RAP و CC، تمایل زیادی برای استفاده از این مواد به عنوان مصالح به کاررفته در خاکریز دیده نمی شود. به نظر می رسد RAP و CC اغلب اوقات به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگدانه ای جهت ساخت جسم راه به کار رفته و عملکرد خوبی از خود نشان می دهند. این فصل پیرامون کاربردهای قبلی RAP و CC در پروژه های ساخت راه بحث کرده و به مطالعات تحقیقاتی که به تازگی روی این مصالح صورت گرفته، اشاره می کند.

۴-۱- کاربردهای رایج RAP مرتبط با مکانیک خاک

بازیافت روسازی آسفالتی در آمریکا موضوع جدیدی نیست. با افزایش قیمت آسفالت در طول بحران نفت اوایل دهه ۱۹۷۰، بازیافت روسازی آسفالتی، راهی ممکن برای کاهش هزینه های احداث بزرگراه محسوب می شد (احمد، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲). طبق برآوردهای انجام یافته بیش از ۳۳ میلیون تن، یعنی حدود ۸۰٪ از آسفالت اضافی که به تازگی تولید شده است، به عنوان بخشی از آسفالت گرم بازیافت شده در مخلوط های سرد استفاده شده یا به عنوان سنگدانه در مصالح دانه ای یا مصالح اساس به کار می رود (FHWA، ۲۰۰۰). در بسیاری از پروژه های اجرایی بزرگراهها از RAP استفاده شده است. در این پروژه ها، RAP به عنوان مصالح سنگدانه ای جایگزین شده و مکمل آسفالت بوده و می تواند در آسفالت روسازی بازیافت شده، اساس، زیراساس راه یا به عنوان مصالح تثبیت شده سنگدانه ای و یا به عنوان ماده سازنده خاکریز استفاده شود. براساس گزارش شماره ۱۲۷۲ ارائه شده از سوی TxDOT (استخری و بوتون، ۱۹۹۲)، TxDOT توانسته است در کارهای اجرایی راهها از RAP تثبیت نشده، با موفقیت استفاده کند. این کارهای اجرایی عبارتند از آسفالت کردن راههای دسترسی و راههای بین شهری، رویه سازی اطراف محل صندوقهای پست و سطل زباله های سر چهارراهها و تعمیر لبه ها و کناره های روسازی ها.

طبق اطلاعات موجود TxDOT، بیش از ۹۰٪ پروژه های راهسازی در تگزاس برای عملیات ساخت و اجرای روسازی خود از RAP استفاده می کنند. سایر پروژه ها نیز از RAP به عنوان مصالح خاکریز برای احداث خاکریز دیوار MSE استفاده می کنند. جدول (۴-۱) جزئیات بیشتری در مورد این دسته از پروژه های خاکریزی ارائه می دهد. عملکرد این خاکریزها در درازمدت رضایت بخش بوده و هیچ گونه گودافتادگی یا نقص قابل توجهی در آنها دیده نمی شود.

از آن جایی که RAP به عنوان ماده روسازی در احداث راهها به کار می رود، بسیاری از پروژه های تحقیقاتی سالهای اخیر که روی RAP کار کرده اند، به قابلیت های این ماده به عنوان ماده روسازی تأکید زیادی داشته اند. در واقع، برنامه های آزمایشی روی ویژگی های مقاومتی مورد استفاده در طراحی روسازی مانند مدول یا ضریب برجهندگی، مدولهای الاستیسیته (ارتجاعی) و خصوصیات خستگی تأکید دارند. اطلاعات به دست آمده از تحقیقات گذشته نشان

داده‌اند که عملکرد RAP به عنوان ماده‌ای برای روسازی نسبت به مصالح دانه‌ای دست‌نخورده متفاوت است (کندی و همکاران ۱۹۷۷، ماهر و همکاران ۱۹۹۷). همچنین تحقیقات نشان داده است دوام روسازی‌های متشکل از مواد بازیافت‌شده با دوام روسازی‌هایی که ۱۰۰٪ از مصالح دانه‌ای دست‌نخورده ساخته شده‌اند، برابر است.

جدول (۴-۱) پروژه‌های TxPOT با استفاده از RAP به عنوان خاکریز (بعد از ۱۹۹۹، TxDOT)

بخش یا ناحیه	محل	به کاررفته در سال	آیین‌نامه TxDOT	نتیجه	توضیحات
آستین (Austin)	تراویس کانتی (Travis County)	۱۹۹۵	NA	نامعلوم	
بومونت (Beaumont)	لیبرتی (Liberty)	۱۹۸۷	NA	خوب	
بومونت	جاسپر (Jasper)	۱۹۸۷	NA	عالی	
بریان (Bryan)	SH-21 در برازوس ریور (Brazos River)	۱۹۹۶	ماده #۱۳۲	عالی	خاکهایی که با RAP سرندشده مخلوط شده‌اند.
ال پاسو (El Paso)	ال پاسو	۱۹۹۳	ماده #۱۳۲	نامعلوم	به عنوان عامل تثبیت‌کننده که در سطح شانه راه استفاده می‌شود.

تازه‌ترین مطالعه تحقیقاتی که از سوی TxDOT بر روی RAP صورت گرفته، با عنوان پروژه ۱۳۴۸ و توسط سعید و همکاران (۱۹۹۵، ۱۹۹۶) انجام شده است. این مطالعات روی کاربرد بالقوه ضایعات مواد بازیافت‌شده در احداث اساس راه تأکید داشته‌اند. در این مطالعه، هشت ماده بازیافت‌شده مورد ارزیابی قرار گرفتند که عبارتند از RAP، روسازی بتنی با سیمان پرتلند (RPCP)^۱، آهن سرباره کوره بلند، فولاد سرباره، خاکستر زغال‌سنگ، لاشه سنگهای ساختمانی، شیشه و تایرهای لاستیکی فرسوده. هر ماده بازیافت‌شده به طور جداگانه ارزیابی شده و در این ارزیابی‌ها چهار معیار ارزیابی از جمله معیار تکنیکی (فنی)، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مد نظر بوده است. برای هر یک از این معیارها، روش متفاوتی جهت تعیین امتیاز مربوط به کار رفته است. مجموع امتیازات به‌دست‌آمده برای هر معیار که از طریق رابطه همگن‌سازی، همگن شده‌اند، به دست می‌آید تا کاربرد بالقوه هر ماده تحت عنوان "ضریب پتانسیل کاربرد مصالح ضایعاتی بازیافت‌شده" (WRMUP)^۲ مشخص شود. مطالعه فوق، RAP را به عنوان مناسب‌ترین ماده برای کاربرد در اساس راه معرفی می‌کند (جدول ۴-۲) که عمده‌ترین دلیل آن دسترسی آسان به این ماده در بسیاری از نواحی بومی TxDOT ذکر شده است. گزارش ۱۲۷۲ بیان می‌کند که حدود ۹۰٪ (۱۹ مورد از ۲۱ ایالت) از بخشهای مورد مطالعه دارای دپوی بتن آسفالتی قدیمی بوده و لذا نتیجه گرفته می‌شود که TxDOT تنها اقدام به انبار کردن مقادیر کافی و قابل توجهی از RPCP و RAP نموده تا بر این مطلب تأکید داشته باشد که استفاده از این مواد مقرون‌به‌صرفه است. جزییات بیشتر مبنی بر چگونگی تعیین امتیاز برای هر ماده در گزارش ۱۳۴۸، TxDOT ارایه شده است (سعید و همکاران ۱۹۹۵، ۱۹۹۶).

1- Reclaimed Portland Cement Concrete Pavement
2- Waste Recycled Materials Utilization Potential

جدول (۲-۴) طبقه‌بندی مصالح ضایعاتی بازیافتی به عنوان مصالح سنگدانه‌ای در احداث اساس راه
(سعید و همکاران، ۱۹۹۶)

توضیحات	WRMUP (%)	مصالح
بهترین مصالح	۶۸/۶۰	بتن آسفالتی بازیافت شده
مصالح مناسب	۶۰/۴۰	فولاد سرباره قوس الکتریکی
تنها برای مقایسه	۵۸/۸۵	سنگ آهک شکسته استاندارد برای اساس راه
حاشیه‌ای	۵۰/۲۰	بتن بازیافت شده سیمان پرتلند
به عنوان مصالح دانه‌ای مورد استفاده در اساس راه نامناسب هستند	۴۵/۲۰	خاکستر بادی (Fly Ash)
	۴۵/۲۰	Bottom Ash
	۴۵/۰۰	Pond Ash

توجه: WRMUP = پتانسیل کاربرد مواد زاید بازیافت شده

در بررسی تأثیر رفتار خزشی RAP، ایوب (۱۹۸۳) رفتار طولانی مدت عوامل جوان ساز بر روی عملکرد روسازی آسفالتی بازیافت شده سرد را مورد مطالعه قرار داد. جهت ارزیابی رفتار RAP در درازمدت یک سری آزمایشهای غیر مخرب خزشی انجام شد. در پایان برنامه آزمایشی، نتایج رفتار آغازین و رفتار مخلوط‌های بازیافت شده در درازمدت گزارش شده و با سایر نمونه‌های اصلی که خصوصیات متفاوتی داشتند، مقایسه گردید. طبق این مطالعه، بین رفتار خزشی مخلوط‌های بازیافت شده و مخلوط‌های اصلی تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود. نتایج آزمایش فوق نشان داد که در مراحل اولیه کار به علت سخت‌شدگی امولسیون قیر، خزش به سرعت کاهش یافته و سپس به علت تأثیر مواد جوان ساز، رفتار خزشی به تدریج افزایش می‌یابد. دما نیز بر خزش مخلوط بازیافت شده تأثیر مهمی دارد. درجه حرارت بالا (بیش از ۶۰ درجه سلیسیوس) سبب می‌شود میزان خزش در مخلوط بازیافت شده نسبت به مخلوط اصلی بیشتر باشد، اما در درجه حرارت پایین (کمتر از ۲۴ درجه سلیسیوس) تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود.

FHWA (۲۰۰۰) نشان می‌دهد که حداقل پنج ایالت (کانکتیکات، کالیفرنیا، ایلینویز، لویزیانا و تنسی) از مصالح RAP به عنوان خاکریز استفاده می‌کنند. در حالی که سایر ایالات، RAP را به صورت مصالح جانبی و اضافی در احداث خاکریزها مورد استفاده قرار می‌دهند. به طور کلی، عملکرد RAP در این پروژه‌ها رضایت‌بخش تا خوب توصیف می‌شود (FHWA، ۲۰۰۰). وقتی از RAP به عنوان مصالح خاکریز یا پشته‌چینی استفاده می‌شود، بخشی از دانه‌های آن که اندازه کوچکتر (کوچکتر از ۵۰ میلی‌متر) دارند با خاک و/یا مصالح دانه‌ای که به خوبی دانه‌بندی شده‌اند، مخلوط می‌شوند. RAP با دانه‌های بزرگتر نیز معمولاً به عنوان اساس و پی خاکریز به کار می‌رود. روشهای مورد نیاز جهت احداث خاکریز RAP (یعنی دپوی مصالح، تراکم کارگاهی، کنترل کیفیت، مسایل مربوط به طراحی) همانند روشهایی است که در احداث خاکریزهای سنتی از آنها استفاده می‌شود. با این وجود، FHWA (۲۰۰۰) پیشنهاداتی در زمینه روشهای احداث خاکریزهای ساخته شده از RAP ارائه می‌دهد:

- ۱- نمونه برداری تصادفی و آزمایش مصالح RAP انبار شده امری ضروری است، زیرا منابع مختلف RAP می‌توانند عملکردهای متفاوتی داشته باشند.

- ۲- فرایند تراکم باید به دقت انجام شود تا یقین حاصل گردد هیچ ناحیه‌ای از خاکریز دارای تراکم ضعیف نیست، زیرا همین تراکم ضعیف در درازمدت منجر به نشست نسبی خاکریز خواهد شد.
- ۳- بعضی از آیین‌نامه‌ها وجود حداقل فاصله‌ای بین منابع آب و خاکریز ساخته شده از RAP را ضروری می‌دانند و معتقدند فاصله مذکور مانع از فرو رفتن آب در RAP می‌شود، زیرا آبی که از RAP نشت و عبور می‌کند، موضوعی است که با محیط زیست نیز ارتباط دارد.

۲-۴- کاربردهای رایج CC مرتبط با مکانیک خاک

از دهه ۱۹۴۰، بتن خردشده شده (CC) با موفقیت کامل در احداث راهها به کار رفته است. بلافاصله بعد از جنگ جهانی دوم و برای اولین بار در اروپا و اتحاد جماهیر شوروی سابق، تحقیقات آزمایشگاهی بر روی بتن بازیافت شده انجام گرفت (هالم، ۱۹۸۰). مقدار قابل توجهی از CC که طی جنگ و از طریق بمباران و خرابی‌های آن تولید شده بود در بازسازی مناطق شهری مورد استفاده قرار گرفت. در ایالات متحده آمریکا، بخش اعظم CC از طریق تخریب اجزای بتن سیمان پرتلند موجود در راهها و ساختمانها به دست آمده بود. در ایالات متحده آمریکا، CC غالباً در روسازی‌ها به کار می‌رود. در واقع، CC به عنوان مصالح سنگدانه‌ای جایگزین در روسازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عمل تا جایی رواج یافت که بسیاری از ادارات، مصالح سنگدانه‌ای CC را به عنوان مصالح سنگدانه‌ای رایج پذیرفتند. به نظر می‌رسد استفاده از CC به عنوان مصالح به کاررفته در احداث خاکریز در مقایسه با سایر کاربردهای آن اهمیت چندانی زیادی ندارد. با این حال، گزارشهای زیادی بر این نکته تأکید دارند که CC یکی از اولین مواد بازیافت شده‌ای است که در کارهای اجرایی خاکریز مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

مطالعات تحقیقاتی متعددی درصدد ارزیابی کاربردهای بالقوه CC بوده‌اند. در این مطالعات روی قابلیت کاربرد CC به عنوان مصالح سنگدانه‌ای بتن سازه‌ای به کاررفته در ساختمان و روسازی تأکید شده است. در نتیجه، بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی اخیر روی خصوصیات ماده CC، جهت استفاده در سازه‌های مذکور تأکید داشته‌اند. تحقیقات پیشین نشان داد که بتن ساخته شده از سنگدانه‌های CC عملکردی قابل مقایسه با بتن ساخته شده از سنگدانه‌های دست‌نخورده دارد (کاتل و همکاران ۱۹۹۷، بارکسدیل و همکاران ۱۹۹۲، ACPA ۱۹۹۳). خلاصه‌ای از تحقیق در مورد CC که در بخش مروری بر مطالب گذشته توصیف شده بود در اینجا آورده می‌شود.

خصوصیات فیزیکی - FHWA (۲۰۰۰) معتقد است شکل دانه‌های CC بیشتر گوشه‌دار بوده و وزن مخصوص کمتری داشته و نسبت به سنگدانه‌های دست‌نخورده هم‌اندازه خود ظرفیت بیشتری برای جذب آب دارند. وزن مخصوص CC بین ۲/۰ و ۲/۵ متغیر است، در حالی که ظرفیت جذب آب بر حسب اندازه ذرات آن از ۲٪ تا ۸٪ متغیر می‌باشد (جدول ۳-۴). وزن مخصوص CC به علت وجود ملات اضافه موجود در سازه بتنی اصلی بسیار ناچیز است. همان طور که در جدول (۳-۴) دیده می‌شود، ریزدانه‌های CC نسبت به درشت‌دانه‌های آن وزن مخصوص کمتری دارند، زیرا در بخش ریزتر ماده CC ملات بیشتری به چشم می‌خورد. انتظار می‌رود ظرفیت CC در جذب آب

بیشتر باشد، زیرا ظرفیت جذب آب ملات بیش از سنگدانه‌های طبیعی است (ACPA ۱۹۹۳، راشوان و آبورزیک ۱۹۹۷، امهانی ۱۹۹۷، مک و سلبرگ ۱۹۹۳).

جدول (۳-۴) خصوصیات فیزیکی مصالح بتن خردشده (از ACPA ۱۹۹۳)

درشت‌دانه‌ها	ریزدانه‌ها	خصوصیات
۲/۵ تا ۲/۲	۲/۳ تا ۲/۰	وزن مخصوص
۶ تا ۲	۸ تا ۴	میزان جذب آب (بر حسب درصد)

خصوصیات مکانیکی - گزارشهای ثبت شده حاکی از آن است که در اجرای روسازی، بتن ساخته شده از سنگدانه CC نسبت به بتن مخلوط شده با سنگدانه‌های طبیعی، دارای مقاومت فشاری و مقاومت خمشی کمتری است (ACPA ۱۹۹۳، مالهتورا ۱۹۷۸). مالهتورا (۱۹۷۸) میزان مقاومت‌های فشاری را تا ۳۰٪ و مقدار مقاومت‌های خمشی را تا ۲۰٪ کمتر می‌داند. زمانی که مخلوط سنگدانه - بازیافت شده نیز حاوی مصالح ریزدانه‌تر بازیافتی باشد، حداقل مقاومت فشاری مخلوط مذکور نیز کاهش پیدا می‌کند، زیرا بخش قابل توجهی از ریزدانه‌های بازیافت شده همان ملات به دست آمده از بتن هستند. ACPA (۱۹۹۳) در ادامه به این نکته اشاره می‌کند که دلیل اصلی کاهش مقاومت مخلوط سنگدانه - مواد بازیافت شده وجود موادی است که دانه‌های آنها کوچکتر از ۲ میلی‌متر (۰/۰۸ اینچ) هستند.

سایر تحقیقات به مسایل مکانیک خاک توجه داشته و به بررسی مسأله مقاومت برشی CC نامحدود پرداخته‌اند. امهانی و میلیگان (۱۹۹۱) معتقد بودند اگر CC چگالی خشک پایین تری داشته باشد، مقاومت برشی آن همانند سنگ آهک بالا خواهد بود (شکل ۴-۱). محققان نتایج آزمایشها را به صورتی تعبیر می‌کنند تا به این نتیجه برسند که وجود تنش اعمال شده، تأثیر کمی روی زاویه اصطکاک داخلی دارد (شکل ۴-۲). با این حال، همان طور شکل (۴-۲) نشان می‌دهد، زاویه اصطکاک با تنش قائم تا حدی کاهش می‌یابد که البته این موضوع در مورد مصالح سنگدانه‌ای امری شایع است.

خصوصیات شیمیایی - pH آب مخلوط شده با CC اغلب بیشتر از ۱۱ است. خاصیت قلیایی بالای CC می‌تواند سبب خوردگی آلومینیوم یا لوله‌های فولاد گالوانیزه‌ای شود که در تماس مستقیم با CC بوده و در معرض رطوبت قرار دارند (FHWA، ۲۰۰۰). به علاوه، به خاطر استفاده از املاح یخ‌زدا، CC با یونهای کلرید آغشته می‌شود. همچنین امکان دارد CC به دلیل تماس با خاکهایی که سولفات زیادی دارند، در معرض حمله سولفات‌ها نیز قرار گیرد. در CC به دست آمده از ساختمانها نیز آثاری از سولفات به چشم می‌خورد که عمدتاً شامل سولفات کلسیم موجود در گچ مورد استفاده برای پوشش دیوار است (باک، ۱۹۷۳). یونهای کلرید با خوردگی فولاد در ارتباط هستند، در حالی که واکنشهای سولفات منجر به اضمحلال وسیع ملات سیمان موجود در سنگدانه می‌شوند (FHWA، ۲۰۰۰). با این حال، ACPA (۱۹۹۳) متذکر می‌شود که مقدار کلرید موجود در روسازی‌های بتنی قدیمی کمتر از مقدار آستانه بحرانی و از ۰/۰۳ تا ۰/۰۹ است. وقتی آلومینیوم در داخل CC به کار می‌رود، مثلاً زمانی که خاکریز CC لوله مجرای آب را در خود جای می‌دهد، pH بالای CC می‌تواند منجر به تسریع خوردگی و تورم و انتشار گاز هیدروژن شود (بارکسدیل و همکاران، ۱۹۹۲).

اولین پروژه اداره حمل و نقل تگزاس (TxDOT) که از CC به عنوان مصالح سنگدانه‌ای در روسازی‌های جدید استفاده کرد، مربوط به بخش هاستون تگزاس بود. در این پروژه از هیچ مصالح دانه‌ای دست اولی استفاده نشده بود. این بدان معناست که هم مصالح درشت‌دانه و هم مصالح ریزدانه از بتن بازیافتی به دست آمده بودند. یافته‌های مهمی که در مورد عملکرد CC از این پروژه به دست آمده به شرح ذیل ارائه می‌شود (TxDOT، ۱۹۹۹):

۱- در مقطع روسازی که ۱۰۰٪ آن از سنگدانه بازیافت شده ریزدانه و درشت‌دانه ساخته شده، آثار تخریب یا نقص دیده نمی‌شود.

۲- بخش اعظمی از ملات قدیمی موجود در بتن بازیافت شده تأثیر چندان مهمی بر روسازی تازه نداشته است.

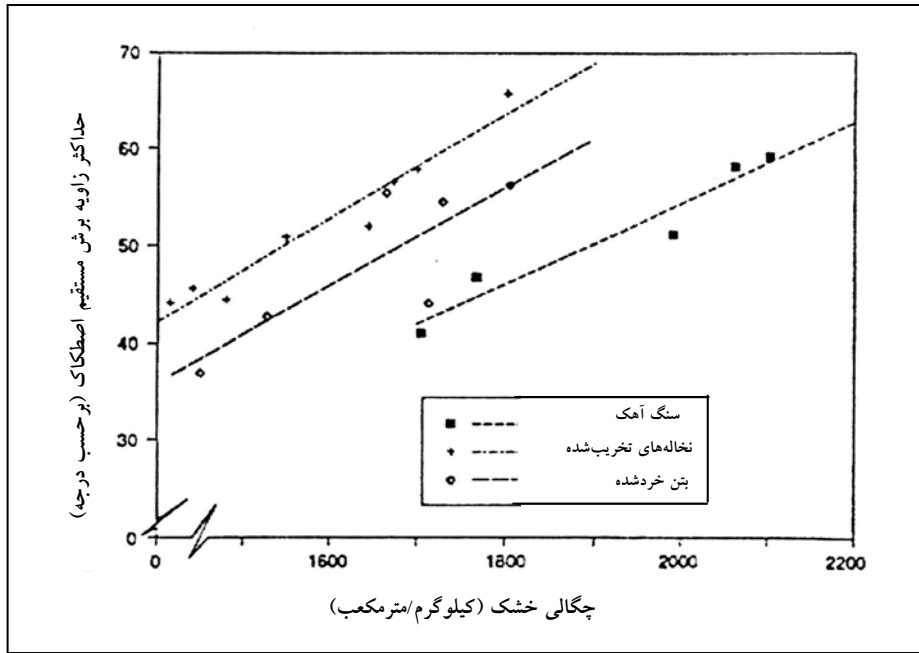
۳- رطوبت موجود در CC نقش مهمی در ایجاد بتن مقاوم و کارآمدی آن ایفا می‌کند.

۴- استفاده از سنگدانه‌های ریزدانه و درشت‌دانه بازیافت شده باعث کاهش چشمگیر مدول الاستیسیته (ارتجاعی) روسازی می‌شود.

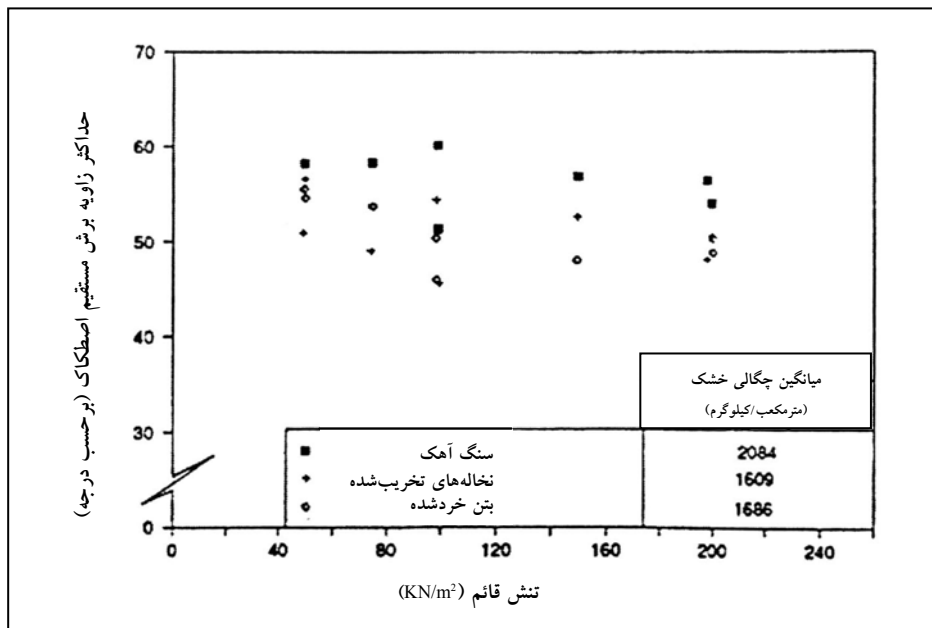
۵- به علت وجود ملات قدیمی بتن، سنگدانه‌های بازیافت شده درشت‌دانه نسبت به سنگدانه‌های اولیه (دست اول) از ضریب حرارتی بالاتری برخوردار هستند.

TxDOT به سه پروژه‌ای اشاره می‌کند که در آنها CC به عنوان ماده خاکیز استفاده شده است. جدول (۴-۴) اطلاعاتی پیرامون این سه پروژه ارائه می‌کند. همان طور که قبلاً اشاره شد، هنگام استفاده از CC به عنوان ماده مورد استفاده در احداث خاکریز دیوار MSE، مهم‌ترین مسأله امکان خوردگی آرماتوربندی‌های فلزی است. دیدگاه فوق از این فرضیه ناشی می‌شود که pH بالای آب مخلوط شده با بتن خرد شده میزان خوردگی فولاد را بالا خواهد برد. پوپووا و همکاران وی (۱۹۹۸) به منظور استفاده از بتن خرد شده در خاکریز دیوار MSE به مطالعه رفتار خوردگی آن پرداختند. در مورد میله فولادی گالوانیزه مدفون شده در خاکریز، میزان خوردگی در آغاز آزمایش در بتن خرد شده و مصالح سنگدانه‌ای خاکریز برابر است (تقریباً ۰/۰۲ میلی‌متر در هر سال). با این وجود، میزان خوردگی ماده CC در درازمدت افزایش می‌یابد (۰/۰۷۵ میلی‌متر در سال طی ۴۰۰ روز)، در حالی که این میزان خوردگی در مورد مصالح سنگدانه‌ای خاکریز کاهش می‌یابد (۰/۰۰۵ میلی‌متر در سال در ۴۰۰ روز).

پوپووا و همکارانش (۱۹۹۸) در ادامه کار خود به مطالعه استفاده از سیمان به عنوان عامل تثبیت‌کننده خاک پرداخته و دریافتند میزان خوردگی بتن خرد شده و مصالح سنگدانه‌ای تثبیت شده با سیمان تقریباً یکسان است و این در حالی است که این مصالح (بتن خرد شده و مصالح سنگدانه‌ای) از مقدار سیمان یکسانی برخوردار بوده‌اند. به علاوه، این مطالعه نشان داد که میزان خوردگی میله‌های فولادی گالوانیزه موجود در CC تثبیت شده با سیمان، با میله‌های فولادی گالوانیزه مدفون شده در خاکریز سنگدانه‌ای تثبیت شده با سیمان قابل مقایسه بوده و احتمالاً نتیجه بهتری دارد. میانگین عددی مقدار خوردگی در CC تثبیت شده سیمانی بین ۰/۰۰۵ mm در سال تا ۰/۰۲ mm در سال بوده و در محدوده مجاز ۰/۰۱ mm در سال قرار دارد. به این ترتیب، عمر مفید طرح تا ۱۰۰ سال تضمین می‌شود (پوپووا و همکاران، ۱۹۹۸).



شکل (۱-۴) تأثیر چگالی خشک بر حداکثر زاویه برش اصطکاک (امهانی و میلیگان، ۱۹۹۱)



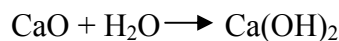
شکل (۲-۴) تأثیر تنش قائم بر حداکثر زاویه برش اصطکاک (امهانی و میلیگان، ۱۹۹۱)

جدول (۴-۴) پروژه‌های TxDOT که از CC به عنوان مصالح خاکریز استفاده می‌کنند

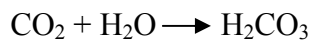
نام ناحیه TxDOT	موقعیت	نتایج	به کاررفته در سال	آیین نامه	توضیحات
کورپوس کریستی (Corus Christi)	مختلف	عالی	۱۹۷۷	۱۳۲	برای احداث خاکریز و کنترل فرسایش دهانه آبریز
لافکین (Lufkin)	در سراسر بخش	عالی	۱۹۸۲	--	--
بیومونت	SH82, SH87	خوب	۱۹۹۴	ندارد	برای احداث خاکریز جهت کنترل فرسایش آبراهه ساحلی

موضوع دیگر در مورد خاکریز CC، به وجود آمدن رسوب کربنات کلسیم موجود در مواد شسته‌شده حاصل از CC است. رسوبات کربنات کلسیم که توفانامیده می‌شوند از طریق یک سری واکنشهای شیمیایی تشکیل می‌یابند. شبکه‌ای از فیلتر اطراف زهکش‌های زیرسطحی و در زیراساس روسازی CC قرار دارد و از آن جایی که ذرات و دانه‌های سنگین و بزرگ CC از این صافی عبور نمی‌کنند، مشکل رسوبات توفان نیز چندان مهم به نظر نمی‌رسد (براکسدیل و همکاران ۱۹۹۲، مک و همکاران ۱۹۹۳). گوپتا و همکارانش (۱۹۹۳) در مورد سنگدانه‌های مختلف روسازی مطالعاتی انجام دادند. آنها معتقد بودند وجود آهک آزاد (CaO) عامل تولید توفان محسوب می‌شود. گوپتا و همکارانش (۱۹۹۴) مجموعه‌ای از واکنشهای شیمیایی تشکیل دهنده توفان را به شرح زیر معرفی کردند.

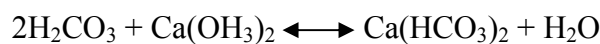
۱- آهک آزاد با آب باران واکنش نشان داده و هیدروکسید کلسیم $[Ca(OH)_2]$ تولید می‌کند.



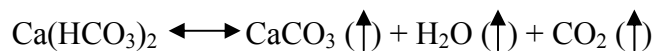
۲- دی‌اکسیدکربن (CO_2) موجود در اتمسفر و دی‌اکسید کربن حاصل از آگزوز اتومبیل‌ها با آب باران واکنش نشان داده و اسیدکربنیک (H_2CO_3) می‌سازد.



۳- اسیدکربنیک با هیدروکسیدکلسیم واکنش نشان داده و بی‌کربنات کلسیم $[Ca(HCO_3)_2]$ تشکیل می‌دهد.



۴- آب حاصل از محلول بی‌کربنات کلسیم، در مجرای خروجی لوله زهکشی به علت وجود دمای بالا تبخیر شده و دی‌اکسیدکربن وارد اتمسفر می‌شود. این شرایط منجر به رسوب کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و تشکیل توفان می‌شود.



در آخرین واکنش شیمیایی، درجه حرارت بالا در طول فصل تابستان میزان رسوب‌گذاری توفان را افزایش می‌دهد، در حالی که درجه حرارت پایین در فصل زمستان باعث می‌شود CO_2 در محلول باقی بماند. واکنشهای شیمیایی قبلی به روشنی نشان می‌دهند که غلظت آهک آزاد، آب، دی‌اکسیدکربن، دما و رطوبت پارامترهای مهم کنترل‌کننده رسوب توفان هستند. طبق یافته‌های تحقیقاتی، CC که حاوی هر دو ماده هیدروکسیدکلسیم $[Ca(OH)_2]$ و بی‌کربنات کلسیم $[Ca(HCO_3)_2]$ است می‌تواند موجب تولید توفان گردد. بنابراین حضور آهک آزاد یا هیدروکسیدکلسیم در خمیر سیمان بتن می‌تواند موجب رسوب توفان شود (گوپتا و همکاران، ۱۹۹۳). جهت کنترل رسوب توفان، بر شستن سنگدانه‌های CC از سوی بعضی از مؤسسات تأکید می‌شود. دلیل شستن این سنگدانه‌ها، از بین بردن گردوغباری است که عمدتاً شامل آهک آزاد و هیدروکسیدکلسیم می‌باشد. FHWA توصیه می‌کند برای ایجاد خاکریز در راهسازی از CC مناسب که شامل مقادیر زیادی از سیمان غیر هیدراته یا آهک آزاد نباشد، استفاده شود. آزمایش شستگی نیز باید انجام شود تا مقدار رسوب توفان CC مورد استفاده در دیوار MSE مشخص گردد.

۴-۳- خلاصه

RAP و CC در پروژه‌های مربوط به حمل‌ونقل، کاربرد بسیار گسترده‌ای دارند. از RAP بیشتر در احداث بزرگراهها و به عنوان ماده روسازی استفاده می‌شود و آن دسته از پروژه‌های TxDOT که در روسازی‌های جدید از RAP استفاده کرده‌اند، عملکرد خوبی از خود نشان داده‌اند. به نظر سعید و همکارانش (۱۹۹۶)، RAP ماده‌ای است با قابلیت‌های بالا که برای احداث اساس راه استفاده می‌شود. سایر ایالات آمریکا نیز از RAP برای احداث پشته و خاکریز استفاده کرده و نتایج مطلوبی به دست آورده‌اند. با این حال، بعضی از محققان در گزارشهای خود به تغییر شکل‌های خزشی بزرگ در RAP، به خصوص با افزایش دما اشاره کرده‌اند. CC نیز به عنوان مصالح سنگدانه‌ای جایگزین در اجزای روسازی‌ها و بتن سازه‌ای در ساختمان به طور گسترده استفاده شده و عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. با این حال، برخی از گزارشها به کاهش مقاومت و سختی بتن جدید ساخته شده از مصالح سنگدانه‌ای CC اشاره کرده‌اند. TxDOT از CC به عنوان مصالح خاکریز استفاده کرده و عملکرد آن را مثبت و رضایت‌بخش ارزیابی می‌کند. کاربرد CC در زیراساس روسازی بازده مطلوبی ندارد. برخی از تحقیقات به این مطلب اشاره داشته‌اند که شبکه فیلتر موجود در اطراف زهکش‌های زیرسطحی به علت رسوب کربنات کلسیم حاصل از CC مسدود می‌شود. انسداد شبکه فیلتر برای دیوارهای MSE موضوع مهمی تلقی می‌شود، زیرا این دیوارها اغلب برای زهکشی خود به فیلتر موجود در سراسر اتصالات بین دیواره نماها وابسته هستند. به عنوان بخشی از این پروژه تحقیقاتی، بخش بعدی به مسأله رسوب کربنات کلسیم اختصاص یافته است.

۵- مشخصات مصالح مورد استفاده در دیوارهای MSE در تگزاس

۵-۱- مقدمه و کلیات

این فصل حاوی اطلاعاتی پیرامون پروژه‌های اجرا شده در مورد خصوصیات مصالح دیوارهای MSE در تگزاس بوده و نحوه انتخاب و تهیه منابع مصالح مورد نیاز آزمایش‌های بعدی را توضیح می‌دهد. روش‌های مورد استفاده در انتخاب منابع تولید و آزمایش مصالح در پاراگراف‌های بعدی فهرست‌بندی شده‌اند.

تولیدکنندگان RAP و CC بسیاری در تگزاس فعال هستند، لذا توجه به کارخانجات مختلف و محل فعالیت آنها در تعیین خصوصیات این مواد بسیار مهم است. براساس مطالعاتی که بر روی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه و در بخش‌های مختلف TxDOT انجام شد، از تولیدکنندگان اصلی RAP و CC خواسته شد تا طی یک دوره دو ماهه، نمونه‌ای از تولیدات خود را به صورت دوره‌ای ارائه دهند تا دانشگاه تگزاس و دانشگاه A&M تگزاس در مورد خصوصیات و ویژگی‌های این محصولات مطالعه کنند. آزمایش‌های تعیین مشخصات فنی عبارتند بودند از دانه‌بندی، حدود آتربرگ (شامل حد انقباض، حد خمیری و حد روانی)، وزن مخصوص، pH و مقاومت الکتریکی. TxDOT و آیین‌نامه FHWA برای کسب اطلاعات بیشتر پیرامون خاکریز دیوارهای MSE، تأکید دارند تا آزمایش‌های مذکور انجام شوند. از نمونه‌های مختلف RAP و CC برای ارزیابی مسأله تغییر مشخصات فنی در طی زمان و تفاوت آنها با محصولات سایر تولیدکنندگان استفاده می‌شود.

بعد از تکمیل مطالعه اولیه پیرامون مشخصات فنی محصولات، یک تولیدکننده RAP و یک تولیدکننده CC به دقت انتخاب می‌شوند تا مواد لازم برای ادامه پروژه تحقیقاتی انتخاب شود. همچنین تولیدکننده مصالح رایج خاکریزها نیز انتخاب می‌شود تا تولیدات خود را به صورت فله‌ای برای مقایسه مشخصات RAP و CC به گروه تحقیقاتی ارسال کند.

۵-۲- نتایج بررسی

۵-۲-۱- جداول نتایج بررسی

جهت تعیین منابع بازیافتی RAP و CC تحقیقی صورت گرفته و TxDOT سعی دارد در مورد بخش‌های مختلف خود و تولیدکنندگان مصالح که اقدام به تولید و استفاده از این مصالح نموده‌اند، اطلاعات اضافی ارائه کند. فهرستی از شرکتها و بخش‌های شرکت‌کننده در تولید RAP و CC تهیه شده و در مورد هر یک از منابع، بررسی‌های لازم انجام شد. جداول (۵-۱) تا (۵-۴) حاوی اطلاعاتی هستند که از مطالعات انجام‌شده بر روی نواحی TxDOT و تولیدکنندگان انبوه مصالح بازیافتی جمع‌آوری شده‌اند.

جدول (۱-۵) نتایج بررسی‌های صورت گرفته در نواحی TxDOT

منبع	انبارشده	سال/تن	میزان تولید	محصول	ناحیه TxDOT
* NA	بله	۳۵۰۰۰	۳۳۱۸۴	RAP	آبیلین (Abilene)
روسازی‌ها	بله	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	RAP	آماریلو (Amarillo)
?	بله	۱۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	RAP	آتالانتا
NA	?	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	RAP	آستین
روسازی‌ها	بله	۴۰۰۰۰	۳۵۰۰۰	NA	چایلدردس (Childress)
NA	بله	۵۹ K-۱۱۸K	۵۹ K-۱۱۸K	RAP	کرپس کریستی
روسازی‌ها/تولید تجاری	بله	?	** ?	RAP/CC	دالاس
روسازی‌ها	بله	۵۰۰۰۰:۱۰۰۰۰	۵۰۰۰۰:۱۰۰۰۰	RAP/CC	فورت‌ورث (Fort Worth)
روسازی‌ها	بله	نامشخص	نامشخص	NA	هاستون
NA	NA	NA	NA	NA	لاردو (Laredo)
NA	خیر	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	RAP	لابوک (Lubbock)
NA	بله	۱۲۰۰۰	۱۲۰۰۰	RAP	لافکین
NA	بله	?	?	RAP	اودسا (Odessa)
روسازی‌ها	?	تخمین زده نشده	تخمین زده نشده	RAP	پاریس
NA	بله	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	RAP	تایلر (Tyler)
NA	بله	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	RAP	واکو (Waco)
NA	بله	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	RAP	ویچیتا فالز (Wichita Falls)
NA	بله	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	RAP	یواکوم (Yoakum)

توجه: * بدون پاسخ

** مقادیر اعلام نشده

جدول (۲-۵) نتایج حاصل از مطالعات نواحی TxDOT

همکاری در تحقیقات	آزمایشهای فیزیکی / شیمیایی	روش پردازش مصالح بازیافت شده	حداکثر اندازه میلی‌متر (اینچ)	کاربردهای محصولات	ناحیه TxDOT
?	خیر	آسیاب در محل	۵۰ (۲)	روسازی، تعمیر لبه‌ها، بازیافت و تبدیل به مخلوط آسفالتی	آبلین
?	دانه‌بندی، درصد قیر	آسیاب در محل	۷۵ (۳)	روسازی	آماریلو
?	AC، آزمایش نفوذ، DSR	آسیاب در محل	۷۵ (۳)	کاربرد مربوط به مکانیک خاک	آتلانتا
خیر	خیر	آسیاب در محل	?	روسازی	آستین
بله	خیر	خرد کردن، آسیاب در محل، الک کردن	۵۰ (۲)	روسازی	چایلدرس
بله	خیر	آسیاب در محل	۲۵ (۱)	روسازی	کرپوس کریستی
بله	TEX528C, 502C, 211F, 117E	خرد کردن، آسیاب در محل، سرنند کردن	RAP (۲) ۵۰، CC (۱/۷۵) ۴۷	روسازی با RAP، اساس انعطاف‌پذیر با CC	دالاس
بله	دانه‌بندی	خرد کردن، آسیاب در محل، سرنند کردن	۵۰ (۲)	روسازی	فورت‌ورث
بله	دانه‌بندی، LL، PI	آسیاب در محل	RAP (۲) ۵۰، CC (۱/۷۵) ۴۷	اساس تثبیت‌شده، مخلوط آسفالت بتنی	هاستون
بله	خیر	آسیاب در محل	۲۵ (۱)	روسازی	لاردو
بله	خیر	آسیاب در محل	۲۵ (۱)	روسازی	لابوک
بله	بله	آسیاب در محل	۵۰ (۲)	روسازی، خاکریز	لافکین
?	خصوصیات فیزیکی آسفالت در RAP	آسیاب در محل	۵۰ (۲)	روسازی خاکریز، لبه‌ها و شیبها	اودسا
خیر	خیر	آسیاب در محل	?	روسازی خاکریز، لبه‌ها و راههای اختصاصی	پاریس
بله	?	آسیاب در محل	۲۵ (۱)	روسازی، کاربرد مربوط به مکانیک خاک	تایلر
بله	دانه‌بندی	آسیاب در محل	۵۰ (۲)	روسازی/روسازی خاکریز، لبه‌ها	واکو
?	خیر	آسیاب در محل	?	مصالح اساس	ویجتافالز
?	خیر	آسیاب در محل	۶۴ (۲/۵)	روسازی، خاکریز	یواکوم

جدول (۳-۵) نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته روی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه

منابع مواد خام	انبار شده	سال/تن ۵ سال آینده	تولید (سال/تن)	محصول	محل	شرکت
۹۵٪ روسازی‌ها، ۵٪ سازه‌های قدیمی	خیر	۳۰۰۰۰	?	RAP/CC	آماریلو	شرکت راه آماریلو (Amarillo Road Co.)
?	?	?	?	?	ادموند، اکی (Edmond, OK)	شرکت مصالح آرباکل (Arbuckle Materials Inc.)
روسازی‌ها	خیر	۵۰۰۰۰	?	RAP	آرلینگتون (Arlington)	شرکت آرچروسترن کانت (Archer Western Cont.)
روسازی‌ها، پلها/سازه‌ها، مخلوطهای آماده بتنی	بله	۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	RAP/CC	دالاس	شرکت بتن خردشده بیگ سیتی (Big City Crushed Concrete, Inc.)
NA	NA	NA	NA	NA	جانکشن (Junction)	شرکت راهسازی و پل سازی چروکی (Cherokee Bridge & Road, Inc.)
روسازی‌ها	بله	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	RAP	وسلاکو (Wesalco)	شرکت روسازی فورموست (Foremost Paving Inc.)
۹۰٪ روسازی‌ها، ۵٪ ساختمانها، ۵٪ لوله‌ها	بله	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	RAP/CC	?	شرکت مصالح فرانترا (Frontera Materials Inc.)
?	?	?	?	?	آماریلو	شرکت فولرو پسران (Fuller & Sons)
روسازی‌ها، بتن روسازی و پیاده‌روها	بله	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	RAP/CC	آماریلو	شرکت ساختمانی هولمز (Holms Construction Co., Inc.)
?	خیر	۱۰۰-۲۰۰ K	۲۵۰۰۰۰	?	تی (TYE)	شرکت جی. ایچ. استرین و پسران (J. H. Strain & Sons, Inc.)
روسازی‌ها	بله	بیش از ۲۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	RAP/CC	ال پاسو	محصولات بتنی جاب (Jobe Concrete Products)
روسازی‌ها/ساختمانها	بله	بیش از ۲۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	RAP/CC	هوستون	شرکت بتن خردشده جنوب (Southern Crushed Concrete)
NA	NA	NA	NA	NA	اکلاهاما	شرکت مصالح استرینگتون (Stringtown Materials L.P.)
روسازی‌ها، پایه‌های ساختمانی	خیر	۱۰۰	۵۰	CC	هوستون	شرکت والرو ریفاینینگ (Valero Refining)
?	?	?	?	?	هوستون	شرکت برادران ویلیامز (Williams Brothers)
NA	NA	NA	NA	NA	جکس‌برو (Jacksboro)	شرکت زاک بورکت (Zack Burkett Co.)

جدول (۴-۵) نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته روی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه

شرکت	کاربرد محصولات	حداکثر اندازه میلی‌متر (اینچ)	روش پردازش مصالح بازیافت شده	آزمایش‌های فیزیکی/شیمیایی	مشارکت در تحقیقات
شرکت راه آماریلو	روسازی	۵۰ (۲)	خرد کردن، آسیاب	تنها آنالیز دانه‌بندی	بله
شرکت مصالح آرباکل	?	?	?	?	?
شرکت آرچروسترن کانت	روسازی	۴۶ (۱/۵)	آسیاب در محل	خیر	بله
شرکت بتن خردشده بیگ‌سیتی	روسازی/ کاربرد مربوط به مکانیک خاک	۷۵ (۳)**	خرد کردن/ سرنند کردن	pH و مقاومت الکتریکی	بله
شرکت راهسازی و پل‌سازی چروکی	NA	NA	NA	NA	بله
شرکت روسازی فورموس	روسازی	۵۰ (۲)	آسیاب در محل	خیر	بله
شرکت مصالح فرانتر	سازه‌های / روسازی	۵۰ (۲)	خرد کردن/ آسیاب در محل / سرنند کردن	سه‌محوری، PI، دانه‌بندی مخلوط آسفالتی	بله
شرکت فولر و پسران	?	?	?	?	?
شرکت ساختمانی هولمز	روسازی	۷۵ (۳)	خرد کردن/ آسیاب در محل / سرنند کردن	خیر	بله
شرکت جی. اچ. استرین و پسران	روسازی	۵۰ (۲)	آسیاب در محل	خیر	خیر
محصولات بتنی چوب	روسازی‌ها	۵۰ (۲)	خرد کردن	دانه‌بندی، LL، PI	بله
شرکت بتن خردشده جنوب	سازه‌ها/ روسازی / کاربرد مربوط به مکانیک خاک	TXDOT#247	خرد کردن / آسیاب در محل	بله	بله
شرکت مصالح استرینگتون	NA	NA	NA	NA	NA
شرکت والرو ریفاپینگ	سازه‌ها/ روسازی	?	حفاری و ارسال به شرکت بتن خردشده جنوب	بله	خیر
شرکت برادران ویلیامز	?	?	?	?	?
شرکت زاک بورکت	NA	NA	NA	NA	NA

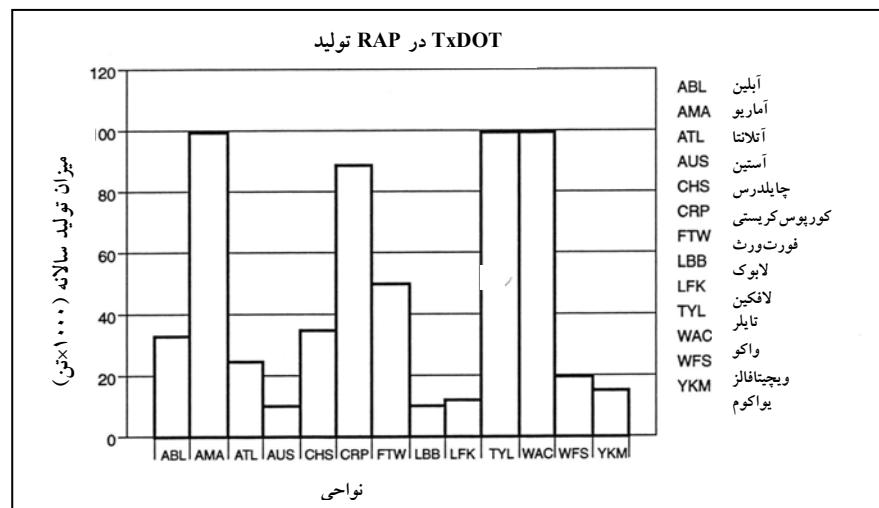
۵-۲-۲- نحوه مطالعه و بررسی

از هر یک از تولیدکنندگان تجاری مصالح بازیافتی در هر یک از نواحی، در زمینه نوع مصالح بازیافت شده تولیدی و ظرفیت تولید سالانه آنها اطلاعاتی جمع‌آوری می‌شود. در این مطالعه، اطلاعاتی در مورد میزان تولید سالانه تخمین زده شده طی پنج سال آتی و وجود انبار مصالح (دپو) در محل هر یک از کارخانجات ثبت می‌شود. این اطلاعات، نشانگر خط‌مشی و سیاست تولیدکنندگان تجاری و سایر بخشها در زمینه تولید و استفاده از مصالح بازیافت شده هستند.

منابع مصالح بازیافت شده و کاربرد خاص این تولیدات و نیز حداکثر ابعاد دانه‌های مصالح بازیافتی تولید شده بررسی و ثبت می‌شوند. مسأله حداکثر ابعاد دانه بسیار حایز اهمیت است، زیرا TxDOT برای مصالح مورد استفاده در خاکریز دیوارهای MSE حداکثر ابعاد دانه‌ها را تعیین می‌کند. سایر اطلاعات مورد نیاز عبارتند از: روش مورد استفاده برای پردازش و تولید مواد بازیافت شده، آزمایشهای فیزیکی و شیمیایی خاص و اینکه آیا تولیدکنندگان تجاری و سایرین تمایلی برای مشارکت در این پروژه تحقیقاتی دارند یا خیر.

۵-۲-۳- یافته‌های جدید از مطالعات فوق

نتایج بررسی‌ها، اطلاعات مفیدی در مورد تولید RAP و CC در سراسر ایالت تگزاس به دست می‌دهند. شکل (۱-۵) گزارش مربوط به مقدار تولید سالانه RAP در بخشهای TxDOT را نشان می‌دهد. به طور کلی، بسیاری از بخشهای TxDOT تنها اقدام به تولید RAP کرده‌اند و تنها چند بخش از این ایالات اقدام به تولید هر دو ماده RAP و CC نموده‌اند (جدول ۱-۵). حداکثر تولید سالانه RAP حاصل از این نواحی، حدود ۱۰۰۰۰۰ تن بود. چهار ناحیه ایالت تگزاس که این مقدار از RAP را تولید کرده‌اند عبارتند از آماریلو، کورپوس کریستی، تایلر و واکو. مقدار تولید سالانه RAP در ناحیه کورپوس کریستی بین ۵۹۰۰۰ و ۱۱۸۰۰۰ تن بوده است (جدول ۱-۵). بخش کورپوس کریستی سالانه مقادیر زیادی از روسازی آسفالتی را بازیافت کرده است، زیرا استفاده از RAP تولید شده در این ناحیه از اهمیت خاصی برخوردار است. نواحی که در تحقیق حاضر مشارکت داشته‌اند، به طور میانگین سالانه حدود ۴۶۰۰۰ تن RAP تولید کرده‌اند.



شکل (۱-۵) تولید RAP در نواحی مختلف TxDOT

در این مطالعه، آمارهایی که از تولیدکنندگان تجاری این محصولات به دست آمد با آمارهای ثبت شده از سوی نواحی TxDOT تا حدی متفاوت بود. تولیدکنندگان تجاری تمایل بیشتری برای تولید هر دو محصول RAP و CC از خود نشان می‌دهند. گزارش تولید سالانه RAP و CC از سوی تولیدکنندگان تجاری در شکل (۲-۵) ارائه شده است.

شرکت بتن خردشده جنوب، بزرگترین تولیدکننده RAP و CC می‌باشد. تولید سالانه این شرکت ۲۰۰۰۰۰۰ تن است. شرکت بیگ‌سیتی با تولید ۱۰۰۰۰۰۰ تن بتن خردشده در سال در مقام دوم قرار دارد (شکل ۵-۲). نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهند که مصالح بازیافتی RAP و CC عمدتاً در اجرای روسازی و در پشت خاکریزها به کار می‌روند. آخرین دستاورد تحقیق فوق بیان می‌کند زمانی که از بخشهای تولیدی و تولیدکنندگان تجاری پرسیده شد که آیا تمایلی برای مشارکت در تحقیقات مشابه دارند، اکثریت آنها پاسخ مثبت دادند. این پاسخ مثبت، نشانگر قابلیت استفاده گسترده از این مصالح بازیافتی در ایالت تگزاس است.



شکل (۲-۵) تولید CC و RAP از سوی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه

۴-۲-۵- استفاده از نتایج تحقیق جهت انتخاب منابع لازم برای آزمایشهای اولیه مشخصات فنی مصالح بازیافتی تصور می‌شود تمام این تولیدکنندگان تجاری و نواحی که با انجام این مطالعه همکاری نداشته‌اند در آن موقع تمایل چندانی به مشارکت در این پروژه تحقیقاتی نشان نداده‌اند. کلیه منابع موجود مورد بررسی قرار گرفتند تا یقین حاصل شود تمام مطالعات به هدف نهایی خود رسیده و منابع غیر ضروری خارج از حوزه مطالعه کنار گذاشته شده‌اند. ۱۶ تولیدکننده تجاری پرسشنامه‌های مطالعه را پر کرده و تحویل دادند. از مجموع ۲۵ بخش مورد مطالعه TxDOT نیز ۱۸ مورد به سؤالات پاسخ داده بودند.

ظرفیت تولید سالانه یکی از خصوصیات اصلی در انتخاب منابع لازم برای آزمایشهای اولیه تعیین خصوصیات مصالح بازیافتی به شمار می‌رود. شرکت بیگ‌سیتی (BC) تولیدکننده بتن خردشده و شرکت بتن خردشده جنوب (SCC) سالانه بالغ بر ۱۰۰۰۰۰۰ تن RAP و CC تولید کرده‌اند. این دو شرکت تمایل زیادی برای مشارکت در تحقیق حاضر و ارسال نمونه جهت مطالعه از خود نشان دادند. لذا برای آزمایشهای اولیه تعیین مشخصات فنی، دو شرکت SCC و BC به عنوان شرکتهای تولید مصالح بازیافتی انتخاب شدند. شرکت SCC نمونه‌های RAP و CC خود را ارسال کرد، اما شرکت BC تنها اقدام به ارسال نمونه‌های CC نمود.

ناحیه کورپوس کریستی محصولات RAP خود را به مرکز تحقیقاتی ارسال کرده و این ناحیه از TxDOT برای مطالعه محصولات بازیافتی انتخاب شد. کورپوس کریستی سالانه مقادیر زیادی از روسازی آسفالتی را بازیافت می‌کند. انتظار می‌رود با گذشت زمان این حجم تولید افزایش یابد. با این توضیحات، برای آزمایشهای اولیه تعیین مشخصات فنی مصالح بازیافتی از RAP تولیدشده در بخش کورپوس کریستی استفاده شد. در مطالعه اولیه تعیین مشخصات فنی مصالح بازیافت شده، نمونه‌های به دست آمده از ۴ انبار جداگانه موجود در این ناحیه از ایالت تگزاس مورد بررسی قرار گرفتند.

برای تعیین منابع مورد مطالعه در این پروژه تحقیقاتی، مسأله تمایل مشارکت این مراکز نیز مورد توجه مسئولین امر قرار داشت. بنابراین هر شرکت یا هر بخشی از ایالت تگزاس که علاقه‌ای به همکاری در این پروژه تحقیقاتی نداشت از حوزه مطالعات حذف شد.

۳-۵- نتایج آزمایشهای انجام شده در آزمایشگاه

۳-۵-۱- مقدمه

از شرکت‌های CC و BC موجود در ناحیه کورپوس کریستی خواسته شد تا به صورت دوره‌ای و در دوره‌های دوماه از تولیدات خود نمونه‌برداری کرده و نمونه‌های فوق را جهت آزمایش به دانشگاه تگزاس و دانشگاه A&M تگزاس بفرستند. برای تعیین ویژگی‌های نمونه‌های RAP و CC دریافت شده از کورپوس کریستی، SCC و BC آزمایشهای متعددی صورت گرفت. این آزمایشها عبارت بودند از دانه‌بندی، تعیین حدود آتربرگ، وزن مخصوص، pH و مقاومت الکتریکی. هدف از این آزمایشها، تعیین تنوع موجود در خصوصیات و ویژگی‌های نمونه مواد آرایه شده از سوی تولیدکنندگان مختلف و در زمانهای مختلف بود. بخش ذیل اطلاعات دقیق تری از نتایج این آزمایشها ارائه می‌دهد.

۳-۵-۲- دانه‌بندی

بر اساس روش آزمایش Tex-401-A که از سوی TxDOT آرایه شده بود، مسأله دانه‌بندی مصالح دانه‌ای نمونه‌های RAP و CC مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای رسم شده و با دانه‌بندی مربوط به دیوارهای MSE مقایسه گردید. مطالب فوق در بحث مشخصات فنی استاندارد TxDOT آرایه شده است، البته بند ۲-۴۲۳ مورد استفاده در این آزمایش، مشخصات مربوط به احداث بزرگراهها و پلهاست.

جداول (۵-۵) تا (۹-۵) نتایج حاصل از آزمایشهای دانه‌بندی نمونه‌های RAP به دست آمده از SCC و کورپوس کریستی را فهرست کرده‌اند. شکل (۳-۵) نشان‌دهنده منحنی‌های دانه‌بندی است که برای همه نمونه‌های آزمایش شده ترسیم شده است. این منحنی‌ها با مشخصات فنی TxDOT برای دیوارهای MSE مقایسه می‌شوند. تمام نمونه‌های RAP دارای مشخصات فنی تعیین شده برای دیوارهای MSE هستند. همچنین مشاهده می‌شود که تمام

نمونه‌های RAP آزمایش شده، ریزدانه‌هایی کمتر از ۱٪ دارند (یعنی کمتر از ۱٪ دانه‌های RAP از الک نمره #۲۰۰ عبور کرده‌اند). این مقدار در مقایسه با حداکثر مجاز ۱۵٪ بسیار کمتر است. نمونه RAP به دست آمده از کورپوس کریستی دارای دانه‌های با ابعاد بزرگتر از RAP به دست آمده از SCC است. با این حال، RAP حاصل از SCC طی مراحل الک می‌شود تا ذرات بزرگتر را حذف کرده باشد. در مورد هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش، منحنی‌های دانه‌بندی در طی چندین دوره مختلف و به صورت مشابه الک شدند.

جدول (۵-۱۰) نتایج حاصل از آزمایش‌های الک این مصالح را نشان می‌دهد. این آزمایشها بر روی نمونه‌های CC به دست آمده از SCC و BC انجام شده بود. منحنی‌های دانه‌بندی هر یک از نمونه‌ها در شکل (۵-۴) نشان داده شده و با مشخصات فنی TxDOT که برای دیوارهای MSE ارائه شده‌اند، مقایسه می‌شوند. این بار نیز تمام نمونه‌های CC مورد آزمایش دارای مشخصات فنی مورد نیاز دیوارهای MSE هستند. منحنی‌های دانه‌بندی به دست آمده از هر یک از مراکز مورد مطالعه بسیار مشابه بوده و منحنی‌های دانه‌بندی رسم شده در دوره‌های مختلف نیز مشابه هستند. همچنین مشاهده می‌شود تقریباً تمام نمونه‌های CC آزمایش شده شامل ریزدانه‌هایی کمتر از ۱٪ هستند (یعنی از الک نمره #۲۰۰ عبور می‌کنند) که از حداکثر مجاز ۱۵٪، بسیار کمتر است.

جدول (۵-۵) دانه‌بندی RAP تولید شده از SCC

درصد RAP عبور کرده از الک			اندازه چشمه‌های الک (میلی متر)	نمره الک
SCC به دست آمده از RAP (۱۲/۱۸/۰۰)	SCC به دست آمده از RAP (۱۲/۱۱/۰۰)	SCC به دست آمده از RAP (۱۲/۰۷/۰۰)		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۵۰/۰۰	۶
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۷۵/۰۰	۳
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۳۷/۵۰	۳/۲
۷۵/۵	۸۷/۲	۸۹/۳	۲۵/۰۰	۱
۵۴/۰	۵۹/۴	۷۰/۲	۱۸/۷۵	$\frac{۲}{۴}$
۳۵/۹	۳۹/۹	۵۴/۳	۱۲/۵۰	$\frac{۱}{۲}$
۲۸/۶	۳۱/۶	۴۶/۶	۹/۳۸	$\frac{۲}{۸}$
۱۸/۴	۱۸/۱	۳۲/۲	۴/۷۵	۴
۱۳/۱	۱۲/۵	۲۲/۹	۲/۳۶	۸
۹/۶	۹/۱	۱۶/۱	۱/۱۸	۱۶
۶/۶	۶/۵	۱۰/۸	۰/۶۰	۳۰
۴/۹	۵/۰	۸/۱	۰/۴۳	۴۰
۳/۳	۳/۶	۵/۸	۰/۳۰	۵۰
۱/۶	۱/۷	۲/۴	۰/۱۵	۱۰۰
۰/۵	۰/۵	۰/۸	۰/۰۸	۲۰۰

جدول (۵-۶) دانه بندی RAP تولید شده در کورپوس کریستی

درصد RAP عبور کرده از الک				اندازه چشمه های الک (میلی متر)	نمره الک
ک. کریستی ۱-۴ (۰۱/۰۹/۰۱)	ک. کریستی ۴-۴ (۱۲/۱۳/۰۰)	ک. کریستی ۴-۴ (۱۱/۳۰/۰۰)	ک. کریستی ۱-۴ (۱۱/۱۵-۱۶/۰۰)		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۵۰/۰۰	۶
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۷۵/۰۰	۳
۸۷/۳	۸۷/۹	۹۱/۲	۹۱/۹	۳۷/۵۰	۳/۲
۸۲/۴	۸۱/۲	۷۴/۲	۸۱/۲	۲۵/۰۰	۱
۷۷/۲	۷۵/۳	۶۸/۲	۷۴/۵	۱۸/۷۵	$\frac{۲}{۴}$
۷۰/۹	۶۹/۴	۵۹/۵	۶۷/۰	۱۲/۵۰	$\frac{۱}{۲}$
۶۴/۶	۶۱/۲	۵۰/۹	۵۹/۸	۹/۳۸	$\frac{۲}{۸}$
۴۲/۸	۳۷/۹	۲۷/۳	۳۶/۳	۴/۷۵	۴
۲۷/۱	۲۳/۹	۱۴/۶	۲۲/۷	۲/۳۶	۸
۱۸/۳	۱۶/۸	۸/۸	۱۵/۱	۱/۱۸	۱۶
۱۲/۹	۱۱/۸	۵/۵	۱۰/۱	۰/۶۰	۳۰
۱۰/۱	۵/۹	۴/۳	۷/۶	۰/۴۳	۴۰
۶/۶	۲/۶	۳/۰	۴/۴	۰/۳۰	۵۰
۱/۹	۰/۴	۱/۰	۱/۳	۰/۱۵	۱۰۰
۰/۴	۰/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۰۸	۲۰۰

محل نمونه برداری: int. US-77 & IH-37, سمت شرق N.US-77

جدول (۵-۷) دانه بندی RAP تولید شده در ناحیه کورپوس کریستی

درصد RAP عبور کرده از الک				اندازه چشمه های الک (میلی متر)	نمره الک
ک. کریستی ۳-۴ (۰۱/۰۹/۰۱)	ک. کریستی ۲-۴ (۱۲/۱۳/۰۰)	ک. کریستی ۱-۴ (۱۱/۳۰/۰۰)	ک. کریستی ۲-۴ (۱۱/۱۵-۱۶/۰۰)		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۵۰/۰۰	۶
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۷۵/۰۰	۳
۹۵/۹	۹۳/۹	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۳۷/۵۰	۳/۲
۸۵/۲	۸۷/۵	۹۵/۴	۹۸/۴	۲۵/۰۰	۱
۷۶/۰	۷۶/۹	۸۶/۸	۹۰/۷	۱۸/۷۵	$\frac{۲}{۴}$
۶۴/۳	۶۳/۹	۷۱/۱	۷۹/۲	۱۲/۵۰	$\frac{۱}{۲}$
۵۲/۲	۵۳/۸	۵۸/۴	۶۸/۸	۹/۳۸	$\frac{۲}{۸}$
۳۰/۵	۳۱/۱	۳۳/۳	۴۴/۰	۴/۷۵	۴
۱۹/۸	۱۸/۸	۲۱/۵	۳۱/۴	۲/۳۶	۸
۱۳/۵	۱۲/۳	۱۵/۳	۲۱/۹	۱/۱۸	۱۶
۸/۰	۷/۶	۹/۹	۱۲/۴	۰/۶۰	۳۰
۵/۰	۵/۴	۶/۷	۷/۱	۰/۴۳	۴۰
۲/۹	۳/۲	۴/۱	۳/۷	۰/۳۰	۵۰
۰/۷	۰/۷	۱/۰	۰/۶	۰/۱۵	۱۰۰
۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۰۸	۲۰۰

محل نمونه برداری: int. US-77 & SH-239, سمت غربی N.US-77, انبار شماره SH-239

جدول (۵-۸) دانه‌بندی RAP به دست آمده از ناحیه کورپوس کریستی

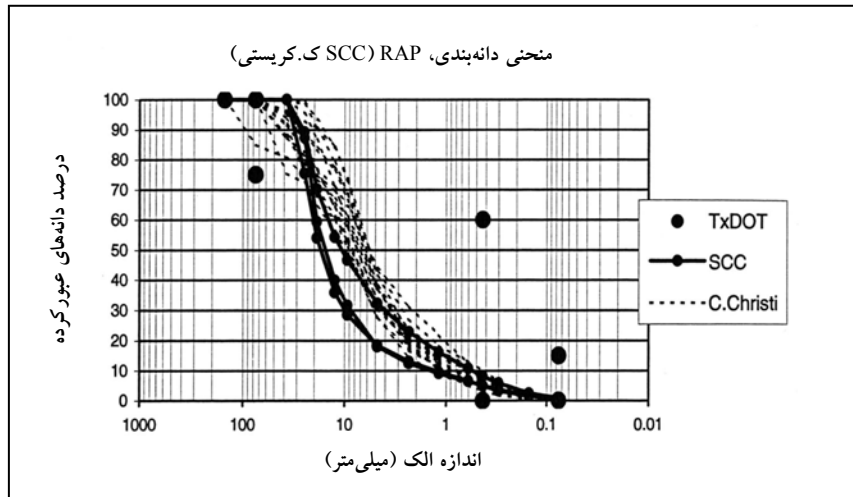
درصد RAP عبور کرده از الک				اندازه چشمه‌های الک (میلی‌متر)	نمره الک
ک. کریستی ۴-۴ (۰۱/۰۹/۰۱)	ک. کریستی ۳-۴ (۱۲/۱۳/۰۰)	ک. کریستی ۲-۴ (۱۱/۳۰/۰۰)	ک. کریستی ۳-۴ (۱۱/۱۵-۱۶/۰۰)		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۵۰/۰۰	۶
۸۴/۹	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۷۵/۰۰	۳
۸۰/۶	۸۷/۰	۸۸/۲	۷۵/۴	۳۷/۵۰	۳/۲
۷۳/۹	۷۸/۶	۷۹/۴	۷۲/۲	۲۵/۰۰	۱
۶۷/۸	۷۰/۵	۷۳/۳	۶۴/۴	۱۸/۷۵	$\frac{2}{4}$
۶۰/۲	۶۱/۱	۶۵/۵	۵۶/۳	۱۲/۵۰	$\frac{1}{2}$
۵۳/۳	۵۳/۰	۵۷/۲	۴۸/۸	۹/۳۸	$\frac{2}{8}$
۳۱/۸	۳۱/۷	۳۳/۶	۲۷/۹	۴/۷۵	۴
۱۹/۹	۱۷/۹	۲۰/۷	۱۶/۷	۲/۳۶	۸
۱۴/۰	۱۱/۱	۱۴/۸	۱۱/۶	۱/۱۸	۱۶
۱۰/۶	۷/۰	۱۱/۰	۸/۵	۰/۶۰	۳۰
۸/۷	۵/۳	۸/۰	۷/۰	۰/۴۳	۴۰
۶/۳	۳/۷	۵/۴	۴/۹	۰/۳۰	۵۰
۲/۱	۱/۳	۱/۶	۱/۷	۰/۱۵	۱۰۰
۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۴	۰/۰۸	۲۰۰

محل نمونه‌برداری: SH-286 نزدیک خط P.

جدول (۵-۹) دانه‌بندی RAP به دست آمده از ناحیه کورپوس کریستی

درصد RAP عبور کرده از الک				اندازه چشمه‌های الک (میلی‌متر)	نمره الک
ک. کریستی ۲-۴ (۰۱/۰۹/۰۱)	ک. کریستی ۱-۴ (۱۲/۱۳/۰۰)	ک. کریستی ۳-۴ (۱۱/۳۰/۰۰)	ک. کریستی ۴-۴ (۱۱/۱۵-۱۶/۰۰)		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۵۰/۰۰	۶
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۷۵/۰۰	۳
۹۵/۳	۹۱/۵	۹۶/۲	۱۰۰/۰	۳۷/۵۰	۳/۲
۸۹/۲	۸۸/۱	۹۲/۸	۹۹/۱	۲۵/۰۰	۱
۸۴/۰	۸۳/۴	۹۰/۷	۹۳/۴	۱۸/۷۵	$\frac{2}{4}$
۷۶/۵	۷۷/۳	۸۴/۳	۸۴/۱	۱۲/۵۰	$\frac{1}{2}$
۶۶/۶	۶۸/۳	۷۳/۹	۷۲/۹	۹/۳۸	$\frac{2}{8}$
۳۶/۷	۳۸/۲	۴۱/۴	۳۷/۸	۴/۷۵	۴
۲۰/۵	۲۰/۶	۲۲/۴	۱۸/۸	۲/۳۶	۸
۱۲/۵	۱۲/۸	۱۳/۴	۱۰/۱	۱/۱۸	۱۶
۸/۰	۸/۲	۸/۱	۵/۱	۰/۶۰	۳۰
۶/۰	۶/۲	۶/۰	۳/۳	۰/۴۳	۴۰
۴/۱	۴/۲	۴/۱	۱/۸	۰/۳۰	۵۰
۱/۵	۱/۳	۱/۵	۰/۵	۰/۱۵	۱۰۰
۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۰۸	۲۰۰

محل نمونه‌برداری: US-77 نزدیک گردشگاه، شمال پل رودخانه آرانزاس (Aransas River)، جهت شرق N.US-77.



شکل (۳-۵) منحنی دانه‌بندی برای نمونه‌های RAP ارسال شده از SCC و کورپوس کریستی

جدول (۵-۱۰) دانه‌بندی CC ارسالی از BC و SCC

درصد بتن خردشده							اندازه چشمه‌های الک (میلی متر)	نمره الک
عبور کرده از الک								
SCC CC (۱۲/۱۸/۰۰)	SCC CC (۱۲/۱۱/۰۰)	SCC CC (۱۲/۰۷/۰۰)	BC CC ۰/۱/۲۶/۰۱	BC CC ۰/۱/۱۹/۰۱	BC CC ۰/۱/۱۲/۰۱	BC CC (۱۱/۲۷/۰۰)		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰		
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۵۰/۰۰	۶
۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۹/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۷۵/۰۰	۳
۷۵/۵	۸۷/۲	۸۹/۳	۸۴/۲	۸۳/۶	۸۹/۲	۹۰/۰	۳۷/۵۰	۱۱/۲
۵۴/۰	۵۹/۴	۷۰/۲	۷۳/۲	۶۷/۳	۷۶/۱	۷۷/۱	۲۵/۰۰	۱
۳۵/۹	۳۹/۹	۵۴/۳	۵۵/۶	۵۰/۶	۶۳/۹	۶۶/۲	۱۸/۷۵	$\frac{2}{4}$
۲۸/۶	۳۱/۶	۴۶/۶	۴۵/۳	۴۱/۰	۵۳/۸	۵۸/۳	۱۲/۵۰	$\frac{1}{2}$
۱۸/۴	۱۸/۱	۳۲/۲	۲۷/۷	۲۶/۳	۳۶/۸	۴۱/۴	۹/۳۸	$\frac{2}{8}$
۱۳/۱	۱۲/۵	۲۲/۹	۱۸/۹	۱۸/۵	۲۶/۲	۳۰/۵	۴/۷۵	۴
۹/۶	۹/۱	۱۶/۱	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۹/۰	۲۳/۰	۲/۳۶	۸
۶/۶	۶/۵	۱۰/۸	۹/۴	۹/۶	۱۳/۳	۱۶/۷	۱/۱۸	۱۶
۴/۹	۵/۰	۸/۱	۷/۲	۷/۲	۹/۹	۱۳/۴	۰/۶۰	۳۰
۳/۳	۳/۶	۵/۸	۴/۷	۴/۶	۶/۲	۸/۶	۰/۴۳	۴۰
۱/۶	۱/۷	۲/۴	۱/۷	۱/۷	۲/۲	۳/۷	۰/۳۰	۵۰
۰/۵	۰/۵	۰/۸	۰/۰۸/۵	۰/۵	۰/۷	۱/۲	۰/۱۵	۱۰۰

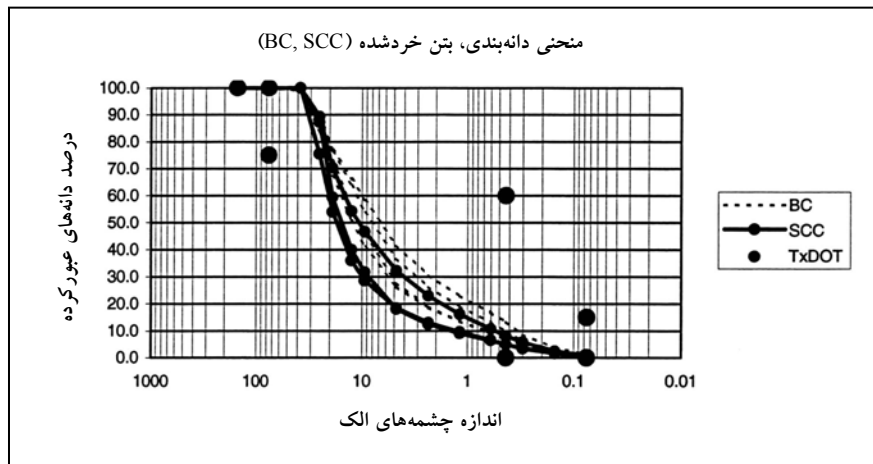
۵-۳-۳- حدود آتربریگ

هدف از انجام این آزمایش، اندازه‌گیری حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) نمونه‌های RAP و CC است. از نتایج به‌دست‌آمده جهت محاسبه دامنه خمیری نمونه‌ها (PI) یعنی $PI=LL-PL$ استفاده می‌شود. TxDOT معتقد

- 1- Liquid Limit
- 2- Plasticity Index

است مصالح خاکریز مورد استفاده در دیوارهای MSE باید دارای PI حداکثر ۶ یا کمتر از آن باشند. این آزمایشها براساس روش Tex-104-E مربوط به TxDOT انجام شدند. آزمایشهای مذکور تنها به آزمایش مصالحی می‌پردازند که از الک نمرة ۴۰ عبور کرده باشند. میزان LL برای هر یک از نمونه‌ها تعیین شده، اما میزان PL هیچ یک از نمونه‌ها مشخص نمی‌شود، زیرا ماده موجود در آنها غیر خمیری است. لذا در مورد این مواد امکان محاسبه PI وجود ندارد. از آنجایی که RAP و CC غیر خمیری هستند، می‌توانند دارای مشخصات فنی مربوط به PI باشند.

جدول (۵-۱۱) خلاصه‌ای از نتایج آزمایش LL را نشان می‌دهد. میانگین عددی LL برای هر یک از نمونه‌های ارسالی از مراکز مورد مطالعه و نیز میانگین کلیه داده‌های تنظیم شده برای RAP و CC محاسبه شده است. میانگین عددی LL محاسبه شده برای RAP، ۲۳ با انحراف استاندارد ۳ است. به همین ترتیب، میانگین LL محاسبه شده برای CC، ۳۱ با انحراف استاندارد ۴ می‌باشد. نتایج حاصله نشان می‌دهند که مواد فوق مشخصات مشابهی دارند.



شکل (۴-۵) منحنی دانه‌بندی برای نمونه‌های CC ارسال شده از BC و SCC

جدول (۵-۱۱) خلاصه‌ای از حدود آتبرگ

انحراف استاندارد	خلاصه‌ای از نتایج LL	
۱	۳۲	BC CC
۰	۱۸	SCC RAP
۶	۲۹	SCC CC
۱	۲۳	ک. کریستی - A
۴	۲۲	ک. کریستی - B
۳	۲۲	ک. کریستی - C
۳	۲۶	ک. کریستی - D
۴	۳۱	CC
۳	۲۳	RAP
تمام نمونه‌های غیر خمیری (NP)		

۵-۳-۴- وزن مخصوص

با استفاده از روش آزمایشی ASTM D854، وزن مخصوص نمونه‌های RAP و CC محاسبه شده است. جدول (۵-۱۳) خلاصه‌ای از اعداد اندازه گرفته شده برای وزن مخصوص را نشان می‌دهد. میانگین عددی وزن مخصوص به دست آمده از هر یک مراکز مورد مطالعه و نیز میانگین کل داده‌های تنظیم شده برای RAP و CC محاسبه شده است. میانگین وزن مخصوص محاسبه شده برای CC برابر با ۲/۶۲ با انحراف استاندارد ۰/۰۴ است. نتایج حاکی از آن است که بین نمونه‌های به دست آمده از منابع مختلف در طی دوره آزمایش شباهتهایی وجود دارد.

جدول (۵-۱۲) خلاصه‌ای از وزن مخصوص

انحراف استاندارد	خلاصه‌ای از نتایج SG	
۰/۰۲	۲/۶۴	BC CC
۰/۰۶	۲/۴۰	SCC RAP
۰/۰۴	۲/۵۹	SCC CC
۰/۰۷	۲/۲۶	ک. کریستی - A
۰/۰۳	۲/۲۹	ک. کریستی - B
۰/۰۵	۲/۲۳	ک. کریستی - C
۰/۰۳	۲/۲۴	ک. کریستی - D
۰/۰۴	۲/۶۷	CC
۰/۰۷	۲/۲۸	RAP

۵-۳-۵- pH

از روش 4972-95a مربوط به ASTM (روش استاندارد آزمایش اندازه‌گیری pH خاکها) برای اندازه‌گیری pH نمونه‌های RAP و CC ارسال شده از سوی تولیدکنندگان مختلف استفاده گردید. این روش قابلیت حل شدن مواد معدنی خاک و قابلیت به جریان افتادن یونهای خاک را تعیین می‌کند. لازم به یادآوری است برای اندازه‌گیری pH خاک روش آزمایشی دیگری نیز با عنوان G51-95 وجود دارد (روش استاندارد آزمایش اندازه‌گیری pH خاک به منظور استفاده در آزمایش خوردگی). یکی از گروههای تحقیقاتی برای آزمایش pH روش ASTM D4972-95a را انتخاب کرد، زیرا این روش مشابه روش آزمایش ۶۴۳ اداره حمل و نقل کالیفرنیا (California DOT Test 643) برای تعیین pH موجود در خاک است. هدف آن به کار بردن pH اندازه‌گیری شده در محاسبه عمر مفید است (فرمول فوق از طرف اداره حمل و نقل کالیفرنیا رایج شده است). روش G51-95 بدون افزودن آب به خاک اقدام به اندازه‌گیری pH می‌کند، در حالی که روش ASTM 4972-95a جهت محاسبه میزان pH از آب برای تهیه مخلوط آب - خاک استفاده می‌نماید.

نتایج حاصل از آزمایش pH در جدول (۵-۱۳) خلاصه و طبقه‌بندی شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد pH بتن خرد شده ارسال شده از SCC و BC حدود ۱۲/۴، برای RAP ارسالی از کورپوس کریستی حدود ۸/۰ و برای RAP فرستاده شده از SCC برابر ۸/۴ است. میزان pH نمونه RAP منطبق بر حدود مجاز آیین‌نامه احداث خاکریز دیوارهای

MSE است (جدول ۳-۳). این آیین‌نامه‌ها از سوی FHWA و TxDOT پذیرفته شده است. نمونه‌های CC فرستاده شده از SCC و BC فاقد مشخصات فنی لازم pH هستند. این مشخصات به تازگی از سوی TxDOT و FHWA برای کاربرد در دیوارهای MSE تعیین شده‌اند. با این وجود، انتظار می‌رود pH بالا باعث ایجاد شکستگی و ترک در اجزای فولادی نشود.

جدول (۵-۱۳) خلاصه‌ای از نتایج آزمایش pH

حروف اختصار	pH	انحراف استاندارد	وضعیت نمونه
BC CC	۱۲/۳۴	۰/۷۹	بتن خردشده بیگ‌سیتی، CC
SCC CC	۱۲/۴۰	۰/۱۰	بتن خردشده جنوب، CC
SCC RAP	۸/۴۱	۰/۲۱	بتن خردشده جنوب، RAP
ک. کریستی-A	۸/۰۹	۰/۰۹	بخش ک. کریستی TxDOT، محل A، RAP
ک. کریستی-B	۸/۰۷	۰/۱۸	بخش ک. کریستی TxDOT، محل B، RAP
ک. کریستی-C	۸/۰۹	۰/۱۵	بخش ک. کریستی TxDOT، محل C، RAP
ک. کریستی-D	۸/۰۹	۰/۱۹	بخش ک. کریستی TxDOT، محل D، RAP

۵-۳-۶- مقاومت الکتریکی

با استفاده از روش آزمایش ۶۴۳ اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا می‌توان حداقل مقاومت الکتریکی خاک را برای هر یک از نمونه‌های جمع‌آوری شده RAP و CC محاسبه کرد. به این منظور، هر یک از نمونه‌ها در قالب مکعبی شکل گذاشته می‌شوند. شروع آزمایش نمونه خاک مکعبی شکل مشابه آزمایش شکل ۲ در طرح ASTM G57-95z است.

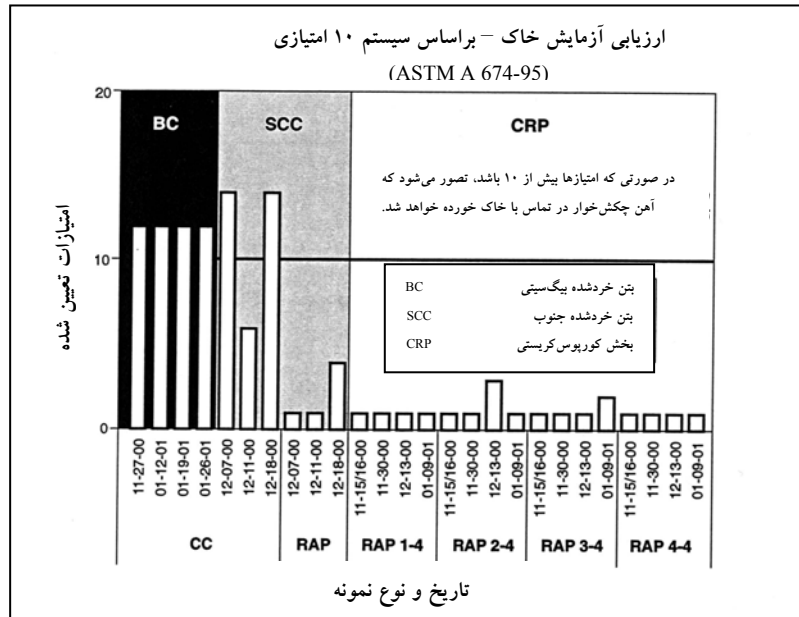
جدول (۵-۱۴) خلاصه‌ای از فعالیتهایی را نشان می‌دهد که طی آنها، حداقل مقاومت الکتریکی مواد RAP و CC اندازه‌گیری شده است. حداقل مقدار مقاومت الکتریکی تعیین شده برای CC ارایه شده از سوی مراکز تولیدی SCC و BC، برابر با ۷۶۰ اهم- سانتی‌متر بوده و مقدار مقاومت الکتریکی برای RAP بین ۴۸۴۰ تا ۲۶۴۰ اهم- سانتی‌متر است. تمام نمونه‌های RAP به دست آمده از کورپوس کریستی TxDOT منطبق بر حدود آیین‌نامه خاکریز دیوارهای MSE ارایه شده از سوی FHWA و TxDOT هستند و میزان مقاومت الکتریکی آنها به جز در محل B یکسان به نظر می‌رسد. نمونه‌های CC به دست آمده از SCC و BC، علاوه بر اینکه فاقد میزان pH تعیین شده در آیین‌نامه FWHA و TxDOT جهت احداث خاکریز دیوارهای MSE هستند، بلکه مقدار مقاومت الکتریکی آنها نیز مطابق میزان تعیین شده در آیین‌نامه مذکور نیست. نکته مهم دیگر اینکه در زمینه pH باید تحقیقات بیشتری صورت گیرد، زیرا به خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش pH میزان خوردگی فولاد بدون پوشش نیز کاهش می‌یابد. اعتقاد بر این است که حد مجاز فعلی pH، برای فولاد گالوانیزه کاربرد بیشتری دارد.

جدول (۵-۱۴) خلاصه‌ای از نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

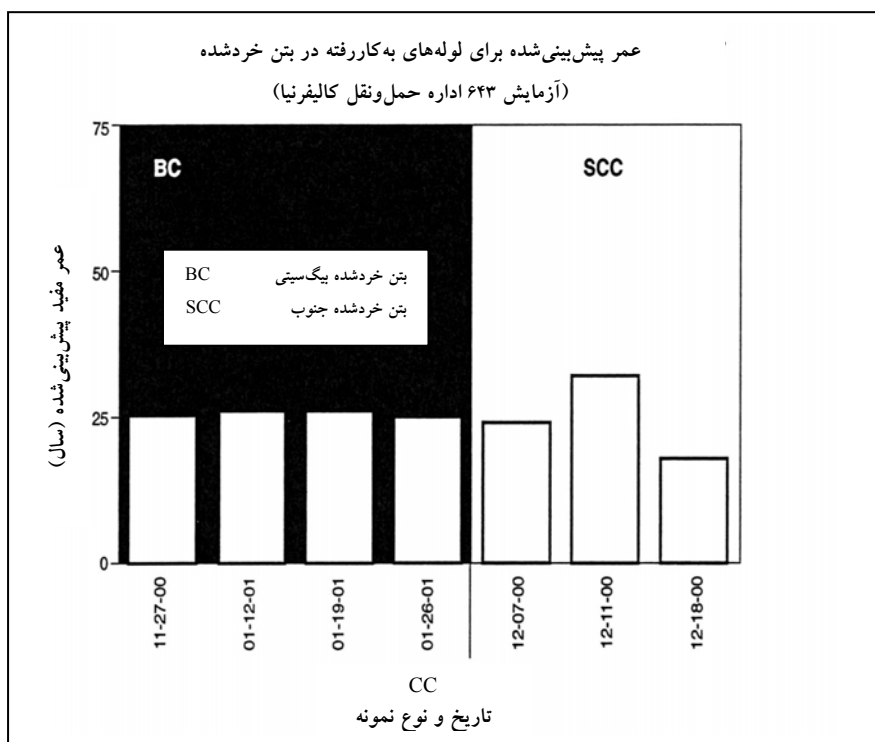
وضعیت نمونه	انحراف استاندارد	مقاومت الکتریکی (اهم - سانتی متر)	حروف اختصار
بتن خردشده بیگ‌سیتی، CC	۵۰	۷۶۰	BC CC
بتن خردشده جنوب، CC	۵۰۰	۷۶۰	SCC CC
بتن خردشده جنوب، RAP	۱۳۸۰	۳۷۵۰	SCC RAP
بخش ک. کریستی TxDOT، محل A، RAP	۸۰۰	۳۱۶۰	ک. کریستی -A
بخش ک. کریستی TxDOT، محل B، RAP	۹۷۰	۲۶۴۰	ک. کریستی -B
بخش ک. کریستی TxDOT، محل C، RAP	۱۴۷۰	۳۷۸۰	ک. کریستی -C
بخش ک. کریستی TxDOT، محل D، RAP	۱۶۵۰	۴۸۳۰	ک. کریستی -D

۵-۳-۷- پیش‌بینی فعالیت خوردگی

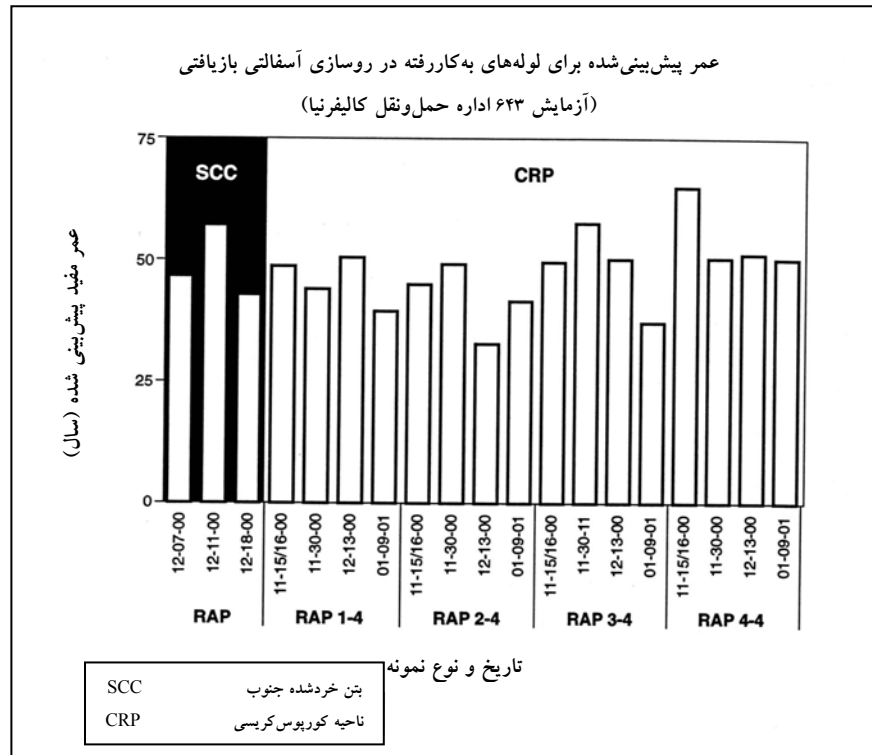
با در دست داشتن مقدار pH و مقاومت الکتریکی نمونه‌های RAP و CC به دست آمده از شرکت بتن خردشده بیگ‌سیتی (BC) در دالاس، شرکت بتن خردشده جنوب (SCC) در هوستون و بخش TxDOT در کورپوس کریستی، گروه تحقیقاتی توانست پتانسیل خوردگی مواد را محاسبه کند. از روش آزمایش ۶۴۳ اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا برای تعیین این مقادیر استفاده شد. شکل (۵-۵) نتایج حاصل از موارد به دست آمده از انجام آزمایش ASTM A674-95 (استاندارد کاربردی برای استفاده از پلی‌اتیلین جهت پوشش دادن لوله چدنی نشکن برای عبور آب یا سایر مایعات) را نشان می‌دهد. شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) به ترتیب مقادیر عمر مفید پیش‌بینی شده برای RAP و CC را نمایش می‌دهند. هر دو روش، امکان خوردگی CC و احتمال کاهش خوردگی RAP را ثابت می‌کنند. به این نکته توجه داشته باشید که این برآوردها در مورد نمونه‌های فولادی گالوانیزه صحت داشته و مقادیر تخمین زده شده عمدتاً به عملکرد فلز روی در این شرایط محیطی (pH و مقاومت الکتریکی) مربوط می‌شوند. مقایسه شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) نشان می‌دهند که عمر مفید پیش‌بینی شده فولاد گالوانیزه موجود در RAP نسبت به فولاد گالوانیزه موجود در CC تقریباً دو برابر است. از آن جایی که این نتایج مخصوص فلز روی و سایر محصولات فلز روی هستند، قابلیت استفاده از این نتایج برای فولاد فاقد پوشش (یعنی فولاد غیر گالوانیزه) یا برای فولاد گالوانیزه‌ای که پوشش گالوانیزه آن به علت خوردگی فعال از بین رفته، نامناسب و در واقع ناممکن است. به کار بردن آزمایش عملکرد خوردگی واقعی مصالح درست یا نادرست بودن این پیش‌بینی‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵) طبقه‌بندی تعیین شده برای CC و RAP



شکل (۶-۵) عمر مفید پیش‌بینی شده برای لوله‌های به‌کاررفته در مصالح CC



شکل (۵-۷) عمر مفید پیش‌بینی شده برای لوله‌های به‌کاررفته در مصالح RAP

۴-۵- عملیات انتخاب مصالح RAP و CC

برای تحقیق و مطالعه بیشتر باید یک نمونه از RAP و یک نمونه از CC انتخاب شده و به عنوان نمونه مواد بازیافتی استفاده شوند. به علاوه، یکی از تولیدکنندگان مصالح مرسوم خاکریز مورد استفاده در دیوارهای MSE انتخاب می‌شود تا مصالح لازم جهت انجام مقایسه را تهیه و در اختیار گروه تحقیقاتی قرار دهد. آزمایشهای اولیه مشخصات فنی مصالح نشان دادند مصالح بازیافت‌شده‌ای که از تولیدکنندگان مختلف جمع‌آوری شدند، خصوصیات مشابهی داشتند. جهت انتخاب منابع RAP و CC سه ویژگی مهم مد نظر بود: (۱) میزان تولید سالانه براساس نتایج مطالعه، (۲) نتایج آزمایش اولیه مشخصات مصالح و (۳) همکاری بخشهای تولیدی و تولیدکنندگان تجاری در زمینه تحقیق. ناحیه کورپوس کریستی به عنوان منبع تولیدکننده RAP برای تحقیق بیشتر انتخاب شد تا عملکرد این ماده در دیوارهای MSE مطالعه شود.

این ناحیه یکی از تولیدکنندگان پیش‌رو و موفق در زمینه تولید RAP بوده و سالانه ۵۹۰۰۰ تا ۱۱۸۰۰۰ تن RAP تولید می‌کند. نتایج آزمایش اولیه مشخصات فنی نشان می‌دهند که دانه‌بندی، خواص خمیری، pH و مقاومت الکتریکی نمونه‌های RAP با آیین‌نامه TxDOT که برای دیوارهای MSE تعیین شده، مطابقت دارد. به علاوه، به علت افزایش مقدار تولید RAP در ناحیه کورپوس کریستی، در زمینه کاربرد RAP در دیوار MSE باید تحقیقات بیشتری در این بخش از ایالت انجام شود. برای انجام مطالعات بیشتر بر روی CC، نمونه‌های ارسالی شرکت بتن خردشده بیگ‌سیتی به عنوان نمونه‌های مورد نظر انتخاب شدند. این شرکت علاوه بر همکاری داشته و اطلاعات و نمونه‌های لازم برای تحقیق را در اختیار گروه محققان قرار داده است. نتایج بررسی‌ها به روشنی نشان می‌دهند که شرکت بیگ‌سیتی در

تگزاس تولیدکننده بزرگ RAP و CC بوده و سالانه ۱۰۰۰۰۰۰ تن از این مواد تولید می‌کند. به همین ترتیب، نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین مشخصات فنی نیز نشان می‌دهند که دانه‌بندی و خواص خمیری CC با آیین‌نامه TxDOT در مورد دیوارهای MSE مطابقت دارد. با این وجود، نمونه‌های CC که از تمام تولیدکنندگان جمع‌آوری شده‌اند، دارای pH و مقاومت الکتریکی تعیین‌شده از سوی TxDOT نیستند.

توجه به این نکته بسیار مهم است که مقادیر تعیین‌شده بالا، ویژه فولادهای گالوانیزه می‌باشند. در محیط‌هایی با pH بالا مانند محیطی که تحت فشار آب منفذی بتن خرده‌شده ایجاد می‌شود، فعالیت خوردگی در مورد محصولات فولاد غیر گالوانیزه به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. جهت تعیین حدود pH و مقاومت الکتریکی برای فولاد گالوانیزه و فولاد ساده در شرایط مختلف، تحقیقات بیشتری باید انجام شود. بعد از تعیین خصوصیات اولیه RAP و CC، تصمیم گرفته شد تا مصالح مرسوم در خاکریز (CFM)^۱ جهت مقایسه با مواد بازیافتی انتخاب شود. شرکت سنگ شکسته تگزاس که یکی از تولیدکنندگان محلی واقع در جورج تاون تگزاس است، به عنوان تولیدکننده انبوه CFM انتخاب شد. این ماده از طریق شکستن سنگ آهک موجود در معدن تولید می‌شود.

۵-۵- آرماتوربندی

اطلاعات لازم در مورد انواع و شکل‌های مختلف آرماتوربندی که عموماً در دیوارهای MSE در تگزاس استفاده می‌شوند، از شرکتها و بخش‌های مختلف TxDOT جمع‌آوری شد. نوع آرماتوربندی مورد استفاده از طرف سازنده دیوار و بر روی نقشه کارگاهی مشخص می‌شود. در مقاله دوریس و دلفیا (۱۹۹۹)، فهرستی از انواع آرماتوربندی بسیار متداول ارائه شده است. جدول (۵-۱۵) حاوی خلاصه‌ای از این اطلاعات است. برای دیوارهای MSE از دو نوع اصلی آرماتوربندی استفاده می‌شود: نواری و شبکه‌ای. هر یک از این آرماتوربندی‌ها می‌تواند فلزی یا پلیمری باشد، لذا مطالعه عملکرد و پایایی هر یک از آرماتوربندی‌های فلزی و پلیمری در دیوارهای MSE از اهمیت زیادی برخوردار است. ناحیه کورپوس کریستی TxDOT نشان داد که آرماتوربندی نواری پهن فلزی گالوانیزه در این بخش از ایالت کاربرد زیادی دارد. در گذشته از سیستم شبکه‌ای جوشی بیشتر استفاده می‌شد (جمع‌آوری اطلاعات از طریق مکاتبات اداری، ۵ مارس ۲۰۰۰). با در نظر گرفتن اینکه RAP به‌دست‌آمده از این ناحیه از ایالت به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شده، ما قصد داریم برای آزمایش‌های مکانیک خاک و دوام بیشتر از این نوارهای فلزی گالوانیزه‌شده استفاده شود. براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده در جدول (۵-۱۳)، شرکت خاک مسلح (Reinforced Earth Company) به عنوان مجری آرماتوربندی نواری فلزی گالوانیزه‌شده همکاری خواهد کرد. شرکت تنسر (Tensar Corporation) یکی از شرکتهایی است که آرماتوربندی مورد نیاز TxDOT را تأمین می‌کند. تنسر اطلاعات مربوط به انواع مختلف آرماتورهای پلیمری مورد استفاده در دیوارهای MSE را نیز فراهم می‌آورد. طی مکاتبات و تماس‌های تلفنی، این شرکت علاقه خود جهت همکاری در زمینه پروژه تحقیقاتی را اعلام کرد. لذا اتحادیه تنسر به عنوان منبع تهیه آرماتور پلیمری در آزمایش‌های بعدی مکانیک خاک و دوام انتخاب شد.

جدول (۵-۱۵) انواع آرماتورهای دیوار MSE (موريس و دلفيا، ۱۹۹۹)

نام شرکت	جزئیات آرماتوربندی
شرکت خاک مسلح	نوارهای فولادی گالوانیزه آج‌دار و بدون آج، با ضخامت ۴ میلی‌متر و عرض ۵ سانتی‌متر
اتحادیه VSL	شبکه مستطیلی شکل میلگردهای فولاد ساده (W11 یا W20)، شبکه ۱۵ cm × ۶۰ cm
شرکت هیل‌فیلر (The Hilfiller Company)	شبکه سیمی جوش‌شده، شبکه ۵ cm × ۵ cm شبکه سیمی جوش‌شده، شبکه ۶۰ cm × ۱۵ cm
شرکت تنسر	شبکه بافته‌شده پلیمری
اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا	شبکه مستطیلی شکل میلگردهای فولاد ساده با قطر ۱۰ سانتی‌متر
اداره حمل‌ونقل جورجیا	شبکه مستطیلی شکل میلگردهای فولاد ساده با قطر ۱۰ سانتی‌متر
شرکت سازه‌های خاکی با مسئولیت محدود (Soil Structures Int. Ltd.)	Paraweb (۵/۳ اینچ) × ۱۳۵ میلی‌متر، پلی‌استر با مقاومت کششی بالا

۵-۶-۵- توصیه‌ها و پیشنهادها

با توجه به مطالب قبلی این فصل، پیشنهادهای مفیدی در زمینه RAP، CC و CFM و آرماتوربندی مورد استفاده برای تحقیقات بعدی ارائه می‌شود.

۵-۶-۱- روسازی آسفالتی بازیافت‌شده

ناحیه کورپوس کریستی از ایالت تگزاس به عنوان منبع تأمین RAP انتخاب می‌شود تا از این ماده در پروژه‌های تحقیقاتی بعدی که به بررسی عملکرد دوام و آزمایشهای مکانیک خاک و ارزیابی این مسایل می‌پردازند، استفاده شود. خصوصیات اولیه نمونه‌های RAP نشان داد که دانه‌بندی، خواص خمیری (پلاستیسیته)، pH و مقاومت الکتریکی مربوط به RAP، با شرایط تعیین‌شده در آیین‌نامه TxDOT در مورد دیوارهای MSE مطابقت دارند.

۵-۶-۲- بتن خردشده (CC)

شرکت بتن خردشده بیگ‌سیتی در شهر دالاس به عنوان منبع تولیدکننده CC جهت مطالعات بیشتر در مسایل دوام و مکانیک خاک مشارکت خواهد کرد. مشخصات فنی اولیه نمونه‌های CC نشان دادند که دانه‌بندی و خواص خمیری (پلاستیسیته) CC، شرایط مطرح‌شده در آیین‌نامه TxDOT درباره دیوارهای MSE را دارا بوده، اما میزان pH و مقاومت الکتریکی آن با مقادیر مشخص‌شده مطابقت ندارد.

۵-۶-۳- مصالح رایج خاکریز

شرکت سنگ شکسته تگزاس در شهر جورج تاون ایالت تگزاس تهیه CFM مورد نیاز پروژه‌های تحقیقاتی را به عهده گرفته است. در این پروژه آزمایشهای دوام و مکانیک خاک بیشتری بر روی CFM انجام می‌گیرد.

۵-۶-۴- آرماتوربندی

در این پروژه تحقیقاتی، شرکت خاک مسلح مشارکت داشته و آرماتورهای نواری ساخته‌شده از فولاد گالوانیزه آج‌دار را تهیه خواهد کرد. همچنین شرکت تنسر تهیه شبکه میلگرد آرماتوری پلیمری را بر عهده گرفت.

۶- خصوصیات اصلی مصالح مورد استفاده در نمونه‌های حجمی RAP، CC و CFM

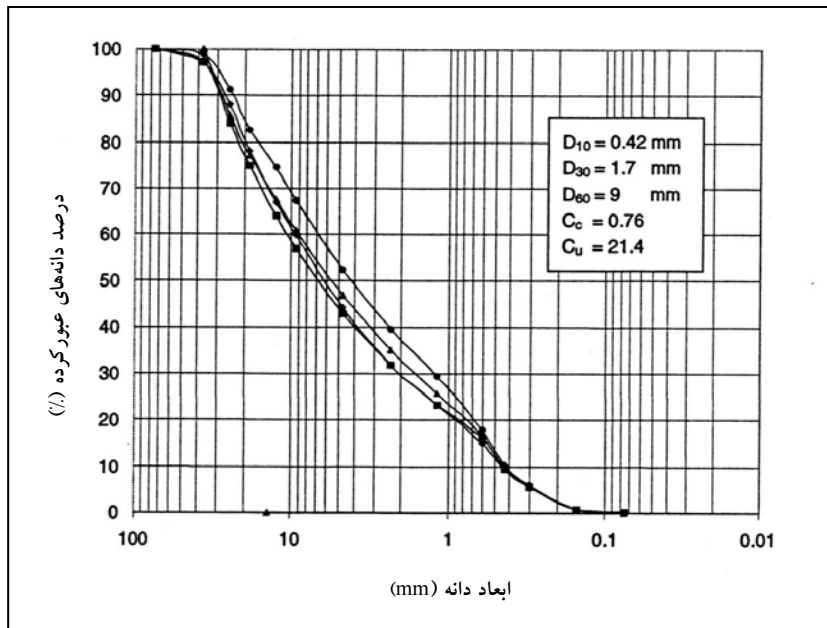
این فصل حاوی نتایج حاصل از آزمایشهایی است که جهت ارزیابی مشخصات فنی مکانیک خاک نمونه‌های حجمی بتن خردشده (CC)، روسازی آسفالتی بازیافت‌شده (RAP) و یا مصالح مرسوم خاکریز (CFM) انجام گرفته‌اند. مصالح فوق از سوی تولیدکنندگان مصالح به صورت انبوه (فصل ۵) تأمین شده‌اند. نمونه‌های RAP و CC در ماه مه ۲۰۰۱ به دست آمده و نمونه حجمی CFM در آگوست ۲۰۰۱ به گروه تحقیقاتی ارسال شده است. تقریباً ۲۰ تن از RAP و CC از سوی تولیدکنندگان نامبرده در فصل ۵ تهیه شده است، این در حالی است که میزان تولید CFM مراکز یادشده حدود ۱۰ تن بوده است. مصالح به صورت فله در مرکز تحقیقاتی پیکل (Pickle) واقع در شهر آستین تگزاس انبار می‌شوند. این انبارها منبع مصالح مورد استفاده در کلیه برنامه‌های آزمایشی به شمار می‌روند.

۶-۱- توزیع مصالح دانه‌ای از نظر ابعاد (دانه‌بندی)

با استفاده از روش آزمایش ASTM D422 و از طریق آزمایشهای دانه‌بندی، مسأله توزیع مصالح دانه‌ای از نظر ابعاد (دانه‌بندی) ارزیابی شد. نمره‌بندی الکها از ۷۵ mm (۳ اینچ) تا ۰/۰۷۵ mm (۰/۰۲۹ اینچ) متغیر است. آزمایشهای مصالح دانه‌ای روی نمونه‌های آزمایشی به‌دست‌آمده از مصالحی انجام شد که در مرکز تحقیقاتی پیکل انبار شده بودند.

۶-۱-۱- بتن خردشده (CC)

بتن خردشده (خردشده) لازم از سوی شرکت بتن خردشده بیگ‌سیتی تأمین شد. این شرکت یکی از تولیدکنندگان بتن خردشده در شهر دالاس تگزاس محسوب می‌شود. از آن جایی که شرکت مذکور یکی از بزرگترین تولیدکنندگان بتن خردشده در تگزاس به شمار رفته و در تعدادی از پروژه‌هایی که نیاز به مصالح بتن خردشده داشته‌اند، شرکت نموده است (فصل ۵)، لذا در پروژه تحقیقاتی ما نیز به عنوان منبع تولیدکننده بتن خردشده مشارکت می‌کند. شکل (۶-۱) نمودار دانه‌بندی نمونه‌های CC را نشان می‌دهد که از چهار قسمت مختلف انبار مصالح نمونه‌برداری شده‌اند. شکل (۶-۱) نشان می‌دهد که دانه‌بندی CC در تمام نقاط انبار تقریباً یکسان است. کمتر از ۵٪ از مواد بزرگتر از ۴۰ mm (۱/۵۷ اینچ) بوده و سنگدانه‌هایی با ابعاد بزرگتر از ۷۵ mm (۳ اینچ) وجود ندارند. حدود ۱۰٪ از مواد از الک نمره ۴۰ (۰/۴۲۵ mm) عبور کرده‌اند، ولی هیچ یک از دانه‌ها نتوانسته‌اند از الک نمره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ mm) عبور کنند. در طبقه‌بندی USCS، این ماده در گروه شن با دانه‌بندی ضعیف (GP) قرار می‌گیرد. براساس دانه‌بندی، CC فله‌ای با معیار دانه‌بندی که از سوی TxDOT و FHWA و برای دیوارهای MSE در نظر گرفته شده‌اند، مطابقت دارند.



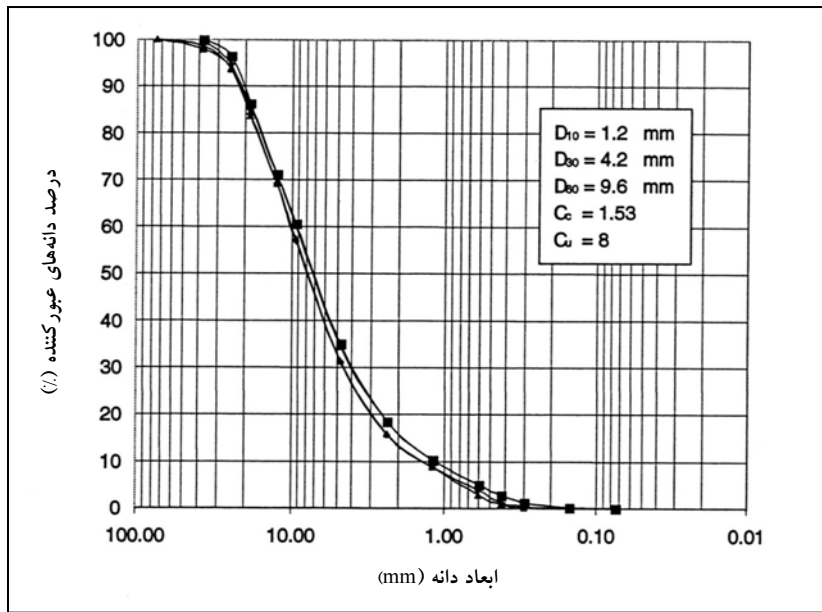
شکل (۱-۶) نمودار دانه‌بندی CC

۲-۱-۶- روسازی آسفالتی بازیافتی (RAP)

RAP مورد نیاز برای مطالعه از سوی ناحیه کورپوس کریستی TxDOT تأمین شد. از آن جایی که ناحیه کورپوس کریستی دارای انبارهای بزرگ RAP است، این ناحیه به عنوان تأمین‌کننده RAP مورد نیاز انتخاب گردید. شکل (۲-۶) توزیع دانه‌بندی RAP نمونه‌برداری شده از چهار نقطه انبار را نشان می‌دهد. این انبار در مرکز تحقیقاتی پیکل قرار دارد. شکل (۲-۶) نشان می‌دهد که دانه‌بندی RAP در تمام نقاط انبار کاملاً یکنواخت است. وضعیت RAP نیز مشابه CC بوده و کمتر از ۵٪ از این مصالح ابعادی بزرگتر از ۴۰ mm (اینچ ۱/۵۷) دارند، حال آنکه هیچ یک از ذرات بزرگتر از ۷۵ mm (اینچ ۳) نیستند. تنها ۲٪ از این مصالح از الک شماره ۴۰ (میلی‌متر ۰/۴۲۵) عبور کرده است، در حالی که هیچ یک از دانه‌ها قادر نبودند از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ mm) عبور کنند. در طبقه‌بندی USCS، این ماده در طبقه شن با دانه‌بندی مناسب (GW) قرار می‌گیرد. با توجه به آزمایش دانه‌بندی، RAP نیز به لحاظ دانه‌بندی خوب، مصالح مناسبی برای دیوارهای MSE محسوب می‌شود.

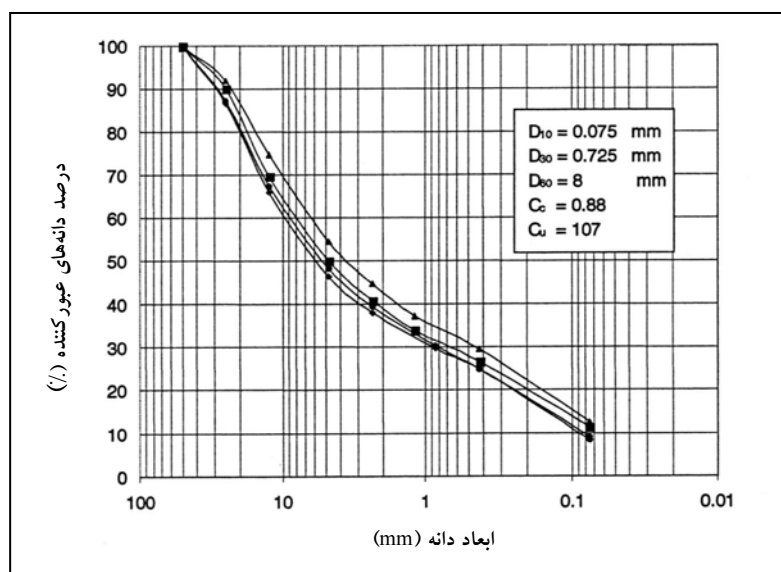
۳-۱-۶- مصالح مرسوم خاکریز (CFM)

مصالح مرسوم خاکریز (CFM) مورد نیاز از سوی شرکت سنگ شکسته تگزاس که یکی از تولیدکنندگان محلی واقع در شهر جورج‌تاون تگزاس است، تأمین شد. این مصالح مرسوم خاکریز شامل سنگ آهک خردشده بوده و شبیه مصالحی است که به عنوان مصالح مورد استفاده در احداث خاکریز تعدادی از دیوارهای MSE در تگزاس مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل (۲-۶) نمودار دانه‌بندی RAP

نتایج حاصل از آزمایش‌های دانه‌بندی در شکل (۳-۶) نشان داده شده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که دانه‌بندی مصالح CFM در تمام نقاط انبار یکسان است. شکل (۳-۶) نشان می‌دهد که کمتر از ۵٪ از CFM ابعادی بزرگتر از ۴۰ mm (۱/۵۷ in) داشته و هیچ یک از ذرات از ۷۵ mm (۳ in) بزرگتر نیستند. با این حال، ۲۸٪ از ماده CFM از الک نمره ۴۰ (۰/۴۲۵ mm) عبور کرده و ۱۰٪ از آن قادر به عبور از الک نمره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ mm) بوده‌اند؛ یعنی نسبت CFM به RAP و CC دانه‌های ریزتر داشته است. با این وجود، این ماده هنوز هم با آیین‌نامه TxDOT در مورد خاکریز دیوارهای MSE مطابقت ندارد. در طبقه‌بندی USCF، ماده CFM در طبقه مصالح شنی با دانه‌بندی نامناسب (GP) قرار می‌گیرد.

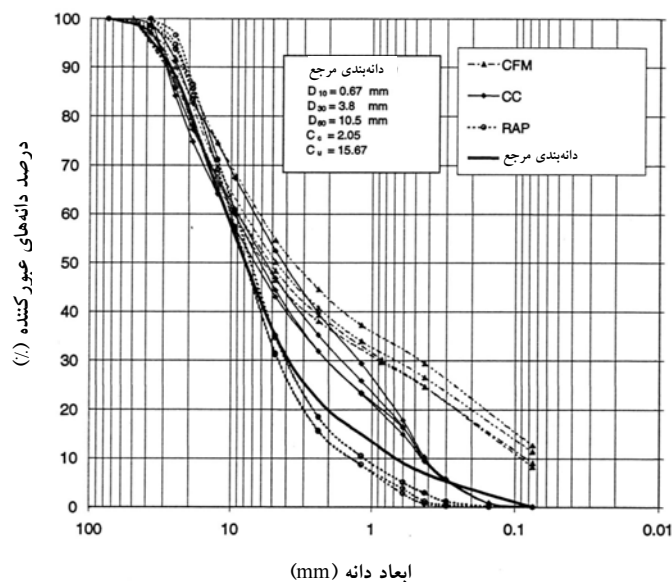


شکل (۳-۶) نمودار دانه‌بندی CFM

۴-۱-۶- دانه‌بندی نهایی پیشنهادشده

از آنجایی که مصالح موجود در انبار به چندین روش دانه‌بندی می‌شوند، مبنایی برای دانه‌بندی‌ها پیشنهاد شد (شکل ۴-۶). ماده مورد استفاده در آزمایشهای بعدی طوری مخلوط می‌شود که مطابق با دانه‌بندی پیشنهادی باشد. استفاده از یک مرجع دانه‌بندی منفرد برای دانه‌بندی مصالح باعث دقت در نتایج آزمایشهای بعدی می‌شود، لذا آزمایشهای مذکور می‌توانند در مورد اثرات نحوه ترکیب مصالح مختلف اطلاعات دقیق‌تری ارائه دهند. شکل (۴-۶) نشان می‌دهد که دانه‌بندی پیشنهادشده مرجع، حداکثر اندازه دانه‌ها را تا ۵۰ mm (۲ in) محدود می‌سازد، همچنین دانه‌بندی پیشنهادشده مرجع، اندازه مصالح عبوری از الک شماره ۴۰ را تا ۷٪ محدود کرده و اجازه نمی‌دهد هیچ یک از دانه‌ها از الک شماره ۲۰۰ عبور کنند.

دانه‌بندی پیشنهادشده مرجع در مقایسه با دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در آزمایش، مشابه دانه‌بندی RAP می‌باشد و این دانه‌بندی مرجع تا حدی متفاوت از دانه‌بندی CC و CFM است. دانه‌بندی CC در مورد ذراتی با اندازه ۰/۴ تا ۱۰mm متفاوت از دانه‌بندی مرجع است. دانه‌بندی CFM حاوی ریزدانه بیشتر از دانه‌بندی مرجع است. به علاوه، حدود ۱۰٪ از CFM شامل ریزدانه‌ها (دانه‌های عبورکرده از الک شماره ۲۰۰) است. این مقدار تفاوت نسبت به دانه‌بندی سایر مصالح و دانه‌بندی مرجع چشمگیر و قابل ملاحظه است. هنگام اجرای آزمایش نمونه‌های CFM، ریزدانه‌ها طوری تنظیم می‌شوند که با دانه‌بندی پیشنهادشده مرجع مطابقت داشته باشند.



شکل (۴-۶) دانه‌بندی پیشنهادشده مرجع برای تمام مصالح مورد آزمایش

۴-۲- وزن مخصوص

وزن مخصوص (Gs) عبارت است از نسبت جرم یک حجم مشخص از ذرات جامد به جرم آب یا حجم برابر آن. وزن مخصوص ذرات بزرگتر از الک شماره ۴ (۴/۷۵ mm) با استفاده از روش آزمایشی ASTM C127 اندازه‌گیری شده

و در اندازه‌گیری وزن مخصوص ذرات کوچکتر از الک نمره ۴ (۴/۷۵ mm) از روش آزمایش ASTM D854 استفاده می‌شود.

استاندارد ASTM C127 مستلزم اندازه‌گیری وزن نمونه‌ای از مصالح خشک در هوا و اندازه‌گیری وزن همان مصالح در شرایطی است که کاملاً در آب غوطه‌ور باشند. پارامتر حاصل «وزن مخصوص ظاهری» نامیده می‌شود، زیرا این پارامتر وزن مخصوص بخش غیر قابل نفوذ سنگدانه جامد را نشان داده و وزن هوای محبوس در حفره‌های خالی مصالح را در نظر نمی‌گیرد. وزن مخصوص ظاهری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_s = \frac{A}{(A-C)} = \frac{V\gamma_{dry}}{V\gamma_w} = \frac{VG_s\gamma_w}{V\gamma_w} \quad (1)$$

در این رابطه :

A = وزن نمونه آزمایش خشک شده در فر در هوا

C = وزن نمونه آزمایش اشباع شده در آب

A-C = $V\gamma_w$ = وزن حجم برابری از آب

برای ذرات کوچکتر از الک نمره ۴ از روش آزمایش ASTM D854 استفاده می‌شود. در این روش، وزن مخصوص به عنوان نسبت جرم یک حجم فرضی مشخص شده از خاک در هوا نسبت به جرم آب با حجم برابر آن محاسبه می‌شود (با این حال جرم مقدار برابری از آب با در نظر گرفتن جرم پیکنومتری که کاملاً با آب پر شده و همان پیکنومتر که با آب و خاک پر شده، اندازه‌گیری می‌شود). وزن مخصوص از طریق معادله ذیل محاسبه می‌شود:

$$G_s = \frac{M_s}{M_s + M_{pw} - M_{pws}} \quad (2)$$

در این رابطه:

M_s = جرم خاک خشک شده در فر

M_{pw} = جرم پیکنومتر پر شده از آب

M_{pws} = پیکنومتر پر شده از آب و خاک

جهت به دست آوردن وزن مخصوص مناسبی که کل ماده را در برگیرد، میانگین مجموعه وزنه‌های مخصوص محاسبه می‌شود. به این منظور از روشهای ASTM D854 و ASTM C127 استفاده می‌شود. از طریق وزن کردن هر یک از وزنه‌های مخصوص که با توجه به درصد دانه‌های بزرگ و کوچک انجام می‌شود، می‌توان میانگین وزنی را مطابق معادله ۳ محاسبه کرد:

$$(G_s)_{avg} = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} + \frac{P_2}{100G_2}} \quad (3)$$

در این رابطه:

P_n = درصد وزنی هر یک از نمونه‌ها

G_n = وزن مخصوص مناسب هر یک از نمونه‌ها

جدول (۱-۶) وزن مخصوص هر سه ماده به دست آمده از این روش را نشان می دهد. این جدول حاکی از آن است که مقدار عددی وزن مخصوص ذرات کوچک و بزرگ شباهت خیلی زیادی با هم دارند. به علاوه، این جدول نشان می دهد که مقدار وزن مخصوص CC و CFM مشابه هم هستند. با این حال، وزن مخصوص RAP عمدتاً متأثر از وجود پوشش قیری (اندود قیری) پیرامون ذرات آن است. این پوشش سبب می شود حجم بیشتری از سنگدانه ها غیر قابل نفوذ شده و لذا وزن مخصوص نیز کوچک تر شود.

جدول (۱-۶) وزن مخصوص مصالح مورد آزمایش

مصالح	وزن مخصوص	
	الک نمرة ۴** <	الک نمرة ۴** >
CC	۲/۶۲	۲/۶۲
RAP	۲/۳۳	۲/۳۶
CFM	۲/۶۶	۲/۶۹

توجه: * وزن مخصوص ظاهری مواد درشت دانه طبق ASTM C127

** وزن مخصوص مواد ریزدانه طبق ASTM D854

۳-۶- مشخصات فنی تراکم

مشخصات فنی تراکم و روابط چگالی - رطوبت در مورد هر یک از مواد (RAP، CC و CFM) اندازه گیری می شود. در این رابطه، روش آزمایشی Tex-113-E به کار می رود. در این آزمایش، خاک در قالب تراکم (۱۵ سانتی متر قطر در ۲۰ سانتی متر ارتفاع) و با استفاده از چکش ۴/۵ کیلوگرم (۱۰ lb) که صفحه وزنه دایره ای شکل آن از ارتفاع ۴۵ سانتی متری روبه پایین پرتاب می شود، متراکم می گردد. تراکم در ۴ لایه صورت می گیرد و برای هر لایه ۵۰ ضربه چکش وارد می شود. با این روش تراکم سازی، انرژی تراکم نمونه مورد آزمایش به 11500 gr.cm/cm^3 (22900 ft-lb/ft^3) می رسد. بعد از اینکه مصالح مورد آزمایش در قالب متراکم شد، وزن نمونه فوق محاسبه شده، از قالب خارج گردیده و در فر خشک می شود. برای محاسبه وزن کل واحد از وزن کل و حجم کل استفاده می شود و از طریق وزن مصالح خشک شده در فر می توان مقدار آب را محاسبه نمود. از وزن کل واحد و مقدار آب برای محاسبه وزن خشک واحد استفاده می شود. وزن خشک محاسبه شده واحد و مقدار آب، داده های جداگانه ای هستند که به رابطه بین مقدار آب- تراکم خشک اشاره دارند. برای به دست آوردن منحنی کامل تراکم به مواد متراکم شده با مقادیر مختلف آب نیاز می باشد.

با استفاده از Tex-113-E، منحنی تراکم برای هر یک از مواد رسم شده است. همچنین نمونه هایی از مواد که در انبار نگهداری می شوند، مورد بازدید قرار گرفته و طوری مخلوط شده اند که قبل از آزمایش تراکم مطابق دانه بندی مرجع باشند. شکل های (۵-۶) تا (۷-۶) منحنی های تراکم را نشان می دهند. منحنی اشباع که نشانگر اشباع ۱۰۰٪ است، در هر نمودار ترسیمی خود وزن مخصوص هر یک از مصالح مورد آزمایش را نمایش می دهد. در بخش ذیل پیرامون هر یک از منحنی های تراکم بحث خواهد شد.

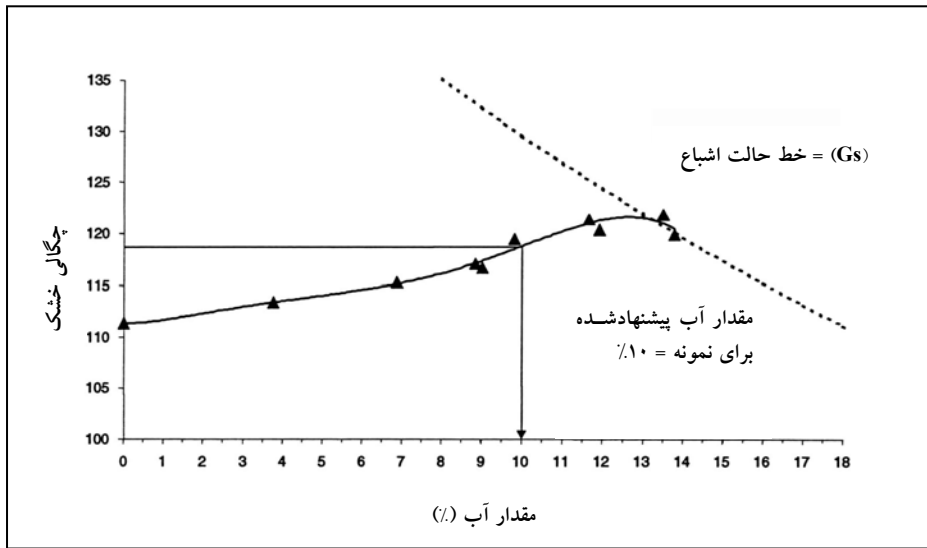
منحنی تراکم در شکل (۶-۵) که در مورد CC رسم شده است، نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آب از ۰٪ تا ۱۲٪ چگالی خشک نیز افزایش می‌یابد. با این وجود، اگر مقدار آب بیش از ۱۲٪ باشد، مقدار چگالی خشک ثابت باقی می‌ماند. در مواردی که مقدار آب بیش از ۱۴٪ است، امکان ساخت نمونه‌های CC وجود ندارد، زیرا آب مازاد از قالب تراکم بیرون می‌زند (منحنی تراکم CC فاقد نقطه اوج متمایز مشخص برای خاک می‌باشد). با این حال، منحنی‌های تراکم که برای خاکهای شنی بدون مواد آلی رسم می‌شوند فاقد نقطه اوج هستند، زیرا چگالی خشک آنها نسبت به مقدار آب حساسیت زیادی از خود نشان نمی‌دهند (لام و وایتمن، ۱۹۷۹). طبق آنچه که در منحنی تراکم شکل (۶-۵) مشاهده می‌شود، توصیه می‌گردد برای آزمایش‌های بعدی (مثلاً آزمایش مقاومت برشی و آزمایش خوردگی)، مقدار آب ۱۰٪ و وزن مخصوص خشک مربوطه (۱۱۹ Pcf) $1/79 \text{ gr/cm}^3$ در نظر گرفته شود. مقدار آب ۱۰ درصدی (۰٪) باعث اشباع تقریباً ۷۰٪ می‌شود. مقدار آب به این دلیل ۱۰٪ انتخاب می‌شود که به راحتی در محیط آزمایشگاه قابل استفاده بوده و در عین حال چگالی خشک بالایی ایجاد می‌کند.

منحنی تراکم رسم شده برای RAP (شکل ۶-۶) نشان می‌دهد که با مقدار آب ۳٪، چگالی خشک اندکی افزایش می‌یابد. با این حال، مقدار چگالی خشک با وجود مقدار زیاد آب، پایین‌تر از نقطه ماکزیمم نمودار نبوده و زمانی که مقدار آب به ۷٪ می‌رسد، چگالی خشک نیز مجدداً شروع به افزایش می‌کند. RAP نیز مانند CC عمل کرده و زمانی که مقدار آب بیشتر از معمول باشد، نمونه‌های RAP ساخته نمی‌شوند، زیرا آب اضافی از قسمت تحتانی قالب تراکم خارج می‌شود. هنگامی که مقدار آب موجود در RAP کاهش یابد، چگالی خشک بالاترین مقدار خود را نشان می‌دهد، زیرا اندود قیری روی ذرات RAP تأثیر می‌گذارد. براساس این منحنی تراکم، توصیه می‌شود برای آزمایش‌های بعدی از مقدار آب ۳٪ و وزن مخصوص خشک $1/76 \text{ gr/cm}^3$ (۱۱۷ pcf) استفاده شود. این مقدار آب برای درجه اشباع ۳۰٪ کافی خواهد بود. اگرچه این سطح از اشباع برای CC کوچکتر است، ولی استفاده از آب کم ضروری به نظر می‌رسد، زیرا در صورتی که مقدار آب مصرفی متوسط یا زیاد باشد، ساخت نمونه‌های RAP به سختی امکان‌پذیر خواهد بود. منحنی تراکم CFM (شکل ۶-۷) با منحنی تراکم رسم شده برای CC مشابه است. با افزایش مقدار آب، میزان چگالی خشک نیز زیاد می‌شود تا جایی که مقدار آب حدوداً به ۱۱٪ می‌رسد. نتیجه تمام آزمایش‌های تراکم که مقدار آب آنها ۱۱٪ بود، نشان داد که چگالی‌های خشک این آزمایش‌ها به منحنی اشباع نزدیک شده و مقدار اشباع ۱۰۰٪ را نشان می‌دهند. براساس این منحنی تراکم، توصیه می‌شود برای آزمایش‌های بعدی مقدار آب ۱۰٪ و میزان وزن مخصوص خشک مربوطه $1/88 \text{ gr/cm}^3$ (۱۲۵ PCF) باشد. این مقدار آب برای اشباع ۸۰٪ کافی است.

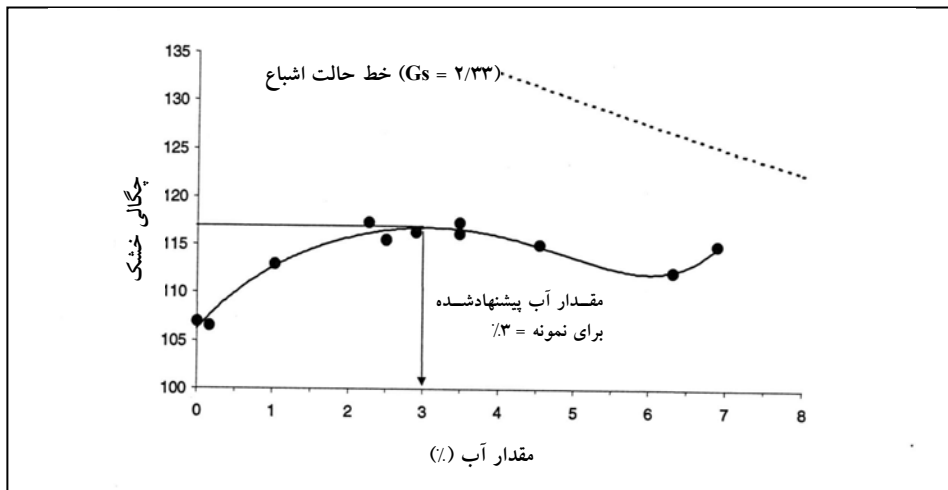
جدول (۶-۲) پیشنهاداتی جهت انتخاب مقدار آب و چگالی‌های خشک برای ساخت نمونه‌های متراکم آزمایش‌های بعدی ارائه می‌دهد.

جدول (۶-۲) مقدار چگالی خشک و مقدار آب پیشنهاد شده برای هر یک از نمونه‌ها

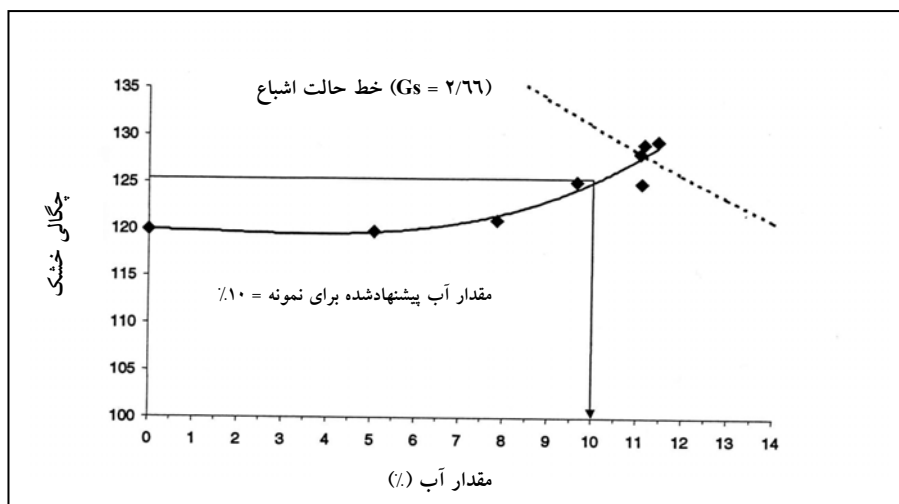
مصلح	مقدار آب (برحسب درصد)	چگالی خشک (gr/cm^3)
CC	۱۰	۱/۷۹
RAP	۳	۱/۷۶
CFM	۱۰	۱/۸۸



شکل (۵-۶) منحنی تراکم برای CC براساس روش آزمایشی Tex-113-E



شکل (۶-۶) منحنی تراکم برای RAP براساس روش آزمایشی Tex-113-E



شکل (۷-۶) منحنی تراکم برای CFM براساس روش آزمایشی Tex-113-E

۴-۶- روش تهیه نمونه

این بخش پیرامون روش تهیه نمونه جهت آزمایشهای بعدی بحث می‌کند. زمانی که قصد ساخت نمونه‌هایی برای انجام آزمایش تراکم داریم، توجه به روش تراکم مطرح شده در Tex-113-E ضروری است (11500 gr/cm^3). انرژی تراکم اعمال شده بر یک حجم معین از خاک به روش ذیل محاسبه می‌شود:

$$\text{انرژی تراکم} = \frac{(\text{تعداد ضربه‌ها/ لایه‌ها})(\text{تعداد لایه‌ها})(\text{ارتفاع سقوط چکش})(\text{وزن چکش})}{(\text{کل حجم نمونه})} \quad (۴)$$

در روش تراکم Tex-113-E با استفاده از موارد ذیل می‌توان معادله (۴) را محاسبه نمود:

$$\text{وزن چکش} = 4/5 \text{ Kg}$$

$$\text{ارتفاع سقوط چکش} = 45 \text{ cm} = (1/5 \text{ فوت})$$

$$\text{تعداد لایه‌ها} = 4$$

$$\text{تعداد ضربه‌ها به ازای هر لایه} = 50$$

$$\text{کل حجم نمونه} = 0/13 \text{ ft}^3 = (\text{قطر } 15 \text{ سانتی‌متر، ارتفاع } 20 \text{ سانتی‌متر})$$

با توجه به مقادیر عددی بالا، میزان انرژی تراکم به دست آمده 11500 gr.cm/cm^3 (22900 ft-lb/ft^3) است. معادله (۴) نشان می‌دهد که انرژی تراکم در قالب انرژی ضربه‌ای اعمال شده بر هر واحد از حجم نمونه بیان می‌شود. اگر نمونه‌های مورد آزمایش حجم‌های مختلف داشته باشند، انرژی ضربه‌ای باید طوری تنظیم شود که همان سطح از انرژی ضربه‌ای در هر واحد از حجم اعمال شود (به عبارت دیگر انرژی ضربه‌ای در تمام قسمت‌های نمونه مورد آزمایش یکنواخت باشد). به عنوان مثال، نمونه آزمایش سه‌محوری با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به ضربه‌های چکشی کمتری نیاز دارد. حجم کلی نمونه سه‌محوری با قطر ۱۰ سانتی‌متر حدود 1570 cm^3 می‌باشد. این حجم مستلزم انرژی ضربه‌ای $18 \times 10^6 \text{ gr.cm}$ (1328 ft-lb) است تا انرژی ضربه‌ای مطلوب به دست آید. به منظور توسعه روشهای تراکم جهت تهیه نمونه‌های مورد نیاز آزمایشهای بعدی در این پروژه از همین روش می‌توان استفاده کرد.

۵-۶- خلاصه

این فصل در مورد خصوصیات اصلی مکانیک خاکی نمونه‌های حجمی RAP، CC و CFM از جمله دانه‌بندی، وزن مخصوص و تراکم بحث می‌کند. CFM جهت مقایسه با RAP و CC در برنامه آزمایش گنجانده شده است. بخش ۱-۶ در مورد دانه‌بندی مصالح مورد آزمایش در انبارهای واقعی بحث می‌کند. دانه‌بندی RAP و CC مشابه هم بوده، اما CFM دارای مقادیر قابل توجهی از ریزدانه است که از الک نمره ۲۰۰ عبور می‌کنند. در آزمایشهای بعدی جهت حذف تأثیر دانه‌بندی بر نتایج آزمایش، دانه‌بندی مرجع پیشنهاد شد. در آزمایشهای بعدی جهت مطابقت دانه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش با دانه‌بندی مرجع، نمونه‌های مذکور باید الک و جدا شده و مجدداً مخلوط شوند.

بخش ۶-۲ پیرامون مسأله وزن مخصوص هر یک از مصالح مورد آزمایش بحث می‌کند. وزن مخصوص CFM و CC بین ۲/۶۰ و ۲/۶۵ است. این مقادیر عددی معمولاً در مورد خاکها نیز صادق است. وزن مخصوص RAP حدود ۲/۳۰ است که از مقدار تعیین شده برای خاک کمتر می‌باشد. وزن مخصوص کمتر به علت وجود پوشش قیری (اندود قیری) است که دانه‌های موجود در مصالح را احاطه کرده است.

خصوصیات تراکم هر ماده در بخش ۶-۳ توصیف شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایشهای تراکم نشان می‌دهند که چگالی خشک این مواد نسبت به مقدار آب مصرف شده نوسان زیادی از خود نشان نمی‌دهد. مقدار آب و چگالی خشک پیشنهاد شده برای نمونه‌های بعدی مورد آزمایش در بخش ۶-۳ مشخص شده است.

بخش ۶-۴ روشی برای توسعه شیوه‌های تراکم معرفی می‌کند. شیوه‌های مذکور جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی با اندازه‌های مختلف به کار می‌روند. مقدار انرژی تراکم به‌دست آمده در این روش با مقدار انرژی تراکم به‌دست آمده از روش آزمایشی Tex-113-E یکسان است. در تمام آزمایشهای بعدی از این روش جهت تراکم نمونه‌های آزمایشی استفاده خواهد شد.

۷- خلاصه و نتایج

۷-۱- خلاصه

دیوارهای MSE، سازه‌های متداول در راههای ایالت تگزاس و سراسر ایالات متحده آمریکا محسوب می‌شوند. این سازه‌های نگهدارنده خاک از دیواره نما، اجزای مسلح‌کننده (آرماتورها) و خاکریزهای با مصالح سنگدانه‌ای با کیفیت بالا تشکیل می‌شوند. در مناطقی که امکان دستیابی به خاکریز با مصالح سنگدانه‌ای با کیفیت مرغوب وجود ندارد، از مصالح بازیافتی مانند RAP و CC به عنوان جایگزین مناسب و مقرون به صرفه استفاده می‌شود.

این گزارش تحقیقاتی در مورد کاربرد مصالح بازیافتی RAP و CC به عنوان خاکریز دیوارهای MSE تأکید زیادی داشته و به بررسی خصوصیات اولیه مواد RAP و CC می‌پردازد. در این راستا، مباحث مربوط به طراحی دیوارهای MSE (فصل ۲)، آیین‌نامه‌های فعلی خاکریزهای دیوارهای MSE که از سوی FHWA و TxDOT ارائه شده (فصل ۳)، همچنین مسایل مربوط به اعمال آیین‌نامه فعلی خاکریزها در مورد RAP و CC (فصل ۳)، و کاربردهای رایج RAP و CC در رابطه با سازه‌های مرتبط با حمل و نقل (فصل ۴) مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. علاوه بر آن، خصوصیات اصلی مواد به کاررفته در نمونه‌های RAP و CC در سراسر ایالت تگزاس مطالعه می‌شود (فصل ۵). از این خصوصیات در جهت انتخاب تولیدکنندگان نمونه‌های حجمی RAP و CC استفاده شد. همچنین یکی از کارخانجات تولیدکننده مواد قراردادی خاکریزی (CFM) نیز انتخاب شد. در آزمایشهای بعدی که به عنوان بخشی از پروژه تحقیقاتی فعلی محسوب می‌شوند، از نمونه‌های حجمی RAP، CC و CFM استفاده خواهد شد. در نهایت، مشخصات فنی اصلی مصالح (یعنی مشخصات فنی دانه‌بندی، وزن مخصوص و تراکم نمونه‌های حجمی RAP، CFM و CC مورد ارزیابی قرار می‌گیرند) (فصل ۶).

۷-۲- مروری بر مطالب پیشین

این بخش مروری بر مطالب پیشین از جمله خصوصیات مهم خاکریزهای مورد استفاده در دیوارهای MSE داشته و به توصیف مسایل مهندسی مربوط به استفاده از RAP و CC به عنوان خاکریز دیوارهای MSE می‌پردازد. خصوصیات بحرانی خاکریز به صورت مشخصات فنی همچون نفوذپذیری، مقاومت برشی، اصطکاک داخلی بین خاکریز و آرماتور، خصوصیات تراکم، تراکم‌پذیری، پتانسیل رفتار خزشی و خوردگی معرفی شدند. در مورد استفاده از RAP و CC به عنوان خاکریز دیوارهای MSE، مسایل مکانیک خاک خاصی وجود دارد. این مسایل عبارتند از:

۱- حداکثر ابعاد دانه‌های RAP و CC

۲- شکل منحنی تراکم چگالی- رطوبت برای RAP و CC

۳- میزان خردشدگی RAP و CC حین تراکم

۴- نفوذپذیری RAP و CC

۵- تشکیل رسوب حاصل از CC در سازه‌های زهکشی

۶- مقاومت برشی RAP و CC

۷- پتانسیل رفتار خزشی در RAP و در فصل مشترک RAP - آرماتوربندی

براساس نتایج حاصل از بررسی مطالب پیشین، مهم‌ترین مسایل مکانیک خاک عمدتاً شامل نفوذپذیری CC و پتانسیل رفتار خزشی RAP می‌باشد. دوام آرماتورهای دیوارهای MSE نیز موضوع مهمی به شمار می‌رود. آرماتورهای پلیمری به شکل خاصی تهیه و به کار برده می‌شوند تا خرابی طولانی‌مدت را به حداقل برسانند، اما در مورد اثرات RAP و CC بر روی خرابی آرماتورهای پلیمری هنوز مطالعه‌ای صورت نگرفته است. پتانسیل خوردگی آرماتوربندی فلزی نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. خصوصیات خاک و آرماتوربندی فلزی روی پتانسیل خوردگی تأثیر می‌گذارند. با این حال، پارامترهای متداول، یعنی pH و مقاومت الکتریکی، در ارزیابی پتانسیل خوردگی مصالح RAP و CC در خاکریز از اهمیت چندانی برخوردار نیستند.

۷-۳- تعیین مشخصات فنی مصالح

برای تعیین مشخصات فنی مصالح، نمونه‌های ارسالی از سوی تولیدکنندگان مختلف سراسر ایالت تگزاس آزمایش شده و سپس سه شرکت تولیدکننده انبوه انتخاب شدند تا نمونه‌های حجمی خود را جهت مطالعه خصوصیات مصالح ارسال کنند. برای بررسی خصوصیات اولیه مواد، از تولیدکنندگان اصلی RAP و CC خواسته شد تا به صورت دوره‌ای و طی یک دوره دو ماهه از تولیدات خود نمونه‌برداری کنند. سپس دانه‌بندی، حدود آتبرگ، وزن مخصوص، pH و مقاومت الکتریکی هر یک از نمونه‌ها بررسی و اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از آزمایشهایی که بر روی نمونه‌های ارسالی از سوی تولیدکنندگان متعدد انجام شده بود، مشابه به نظر می‌رسید و این امر ثابت می‌کرد که مواد RAP و CC در سراسر ایالت مشابه هم هستند. لذا آزمایشهای بعدی روی آن دسته از نمونه‌هایی از RAP و CC انجام شد که تنها از سوی یک تولیدکننده ارائه شده بودند. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایشها باید برای RAP و CC تولیدشده در سراسر ایالات تگزاس قابل تعمیم باشند. تعیین خصوصیات اولیه مواد نشان داد که تمام نمونه‌های RAP از لحاظ دانه‌بندی حدود آتبرگ، pH و مقاومت الکتریکی با آیین‌نامه‌های رایج TxDOT مطابقت دارند.

جهت انجام بقیه آزمایشهای این پروژه سه‌ساله، از نمونه‌های حجمی ارسال‌شده RAP و CC و مصالح مرسوم در خاکریز (CFM) استفاده شد. دانه‌بندی، وزن مخصوص و تراکم از جمله مشخصات فنی اصلی هستند که باید در مورد نمونه‌های مذکور مورد مطالعه قرار گیرند. دانه‌بندی‌های این سه ماده جهت استفاده در خاکریز دیوارهای MSE منطبق بر آیین‌نامه ارائه‌شده از سوی TxDOT بوده، اما دانه‌بندی مواد فوق از لحاظ اندازه ریزدانه‌ها مشابه هم نبود. بنابراین دانه‌بندی مرجع ارائه‌شده و مصالح مورد استفاده طوری مخلوط شدند که دانه‌بندی نمونه‌های آزمایشی در آزمایشهای بعدی با دانه‌بندی مرجع مطابقت داشته باشد. به کار بردن دانه‌بندی مرجع باعث تغییر مبنای دانه‌بندی مصالح شده و لذا نتایج حاصل از آزمایشهای بعدی نیز دچار تغییر خواهد شد. وزن مخصوص CFM و CC حدود ۲/۶۰ تا ۲/۶۵ بوده، اما وزن مخصوص RAP خیلی کمتر می‌باشد ($G_s=2.33$). نتایج حاصل از آزمایشهای تراکم نشان می‌دهند که چگالی خشک CFM و RAP و CC حساسیت زیادی نسبت به مقدار آب ندارد. در آن دسته از آزمایشهای تراکم که میزان انرژی تراکم در آنها مشخص است، مقدار آب مورد استفاده در آزمایش براساس منحنی‌های تراکم تعیین می‌شود.

۸- مراجع

- 1- Ahmad, I. (1991). "Use of Recycled Materials in Highway Construction." Research Report.
- 2- FHWA/IN/JHRP-91/3, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- 3- Ahmad, I., and Lovell, C. W. (1992). "Use of Recycled Materials in Highway Construction: State of the Practice and Evaluation of Selected Waste Products." Transportation Research Record, Vol. 1345, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- 4- Anderson, L. R., Nelson, K. J., and Sampaco, C. L. (1995). "Mechanically Stabilized Earth Walls." Transportation Research Circular, Vol. 444, 17 pp.
- 5- American Concrete Pavement Association (ACPA) (1993). "Concrete Paving Technology: Recycling Concrete Pavement." Report No. TB-014P, Arlington Heights, Illinois, 20pp.
- 6- ASTM A674-00 (2000). "Standard Practice for Polyethylene Encasement for Ductile Iron Pipe for Water or Other Liquids, American Society for Testing and Materials," West Conshohocken, PA.
- 7- ASTM C127 (2001). "Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.02
- 8- Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 9- ASTM D422 (2001). "Standard Test Method for Particle-size Analysis of Soils," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 10- ASTM D698 (2001). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Standard Effort," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 11- ASTM D854 (2001). "Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 12- ASTM D1557 (2001). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Modified Effort," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 13- ASTM D2434 (2001). "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant head)," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 14- ASTM D2435 (2001). "Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils," Annual Book of ASTM Standards," Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

- 15- ASTM D4972-95a (2000). "Standard Test Method for pH of Soils", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 16- ASTM D5520 (2001). "Standard Test Method for Laboratory Determination of Creep Properties of Frozen Soils Samples by Uniaxial Compression," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 17- ASTM D5333 (2001). "Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils," Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol. 4.08 Soil and Rock, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 18- ASTM G51-95 (2000). "Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 19- ASTM G57-95a (2000). "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- 20- Ayoub, Nicolas F. (1983). "Evaluation of Long Term Behavior of Cold-Recycled Asphalt Pavement Using the Creep Test." M.S. Thesis, The State University of New York at Buffalo, 79 pp.
- 21- Barksdale, R. D., Itani, S. Y., and Swor, T. E. (1992). "Evaluation of Recycled Concrete, Opened-Graded Aggregate, and Large Top-Size Aggregate Bases." Transportation Research Record, Vol. 1345, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 92-105.
- 22- Briaud, J. L., Griffin, R., Yeung, A., Soto, A., Suroor, A., and Park, H. (1998). "Long-Term Behavior of Ground Anchors and Tieback Walls," Research Report No. 1391-1, Texas Transportation Institute and Texas Department of Transportation, College Station, Texas.
- 23- Buck, A. D. (1973). "Recycled Concrete." Highway Research Record, Issue 430, Highway Research Board, pp. 1-8.
- 24- Bushman, J. B. and Mehalick, T. E. (1989). "Statistical Analysis of Soil Characteristics to Predict Mean Time to Corrosion Failure of Underground Structures," Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, V. Chaker and J. D. Palmer, Eds., American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- 25- Camitz, G. and Vinka, T. G. (1989). "Corrosion of Steel and Metal-Coated Steel in Swedish Soils - Effects of Soil Parameters," Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, V. Chaker and J.D. Palmer, Eds., American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- 26- Cuttell, G. D., Snyder, M. B., Vandebossche, J. M., and Wade, M. J. (1997). "Performance of Rigid Pavements Containing Recycled Concrete Aggregates." Transportation Research Record, Vol. 1574, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 89-98.
- 27- Elias, V. (1990). "Durability/Corrosion of Soil Reinforced Structures," Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-89-186.

- 28- Elias, V. (1996). "Corrosion/Degradation of Soil Reinforcements for Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes." FHWA Demonstration Project 82, FHWA- SA-96-072, 105 pp.
- 29- Elias, V., and ChristophHer, B. (1996). "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines." FHWA Demonstration Project 82, FHWA SA-96-071, 371 pp.
- 30- Escalante, V. (1989). "Concepts of Underground Corrosion," Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, V. Chaker and J. D. Palmer, Eds., American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- 31- Estakhri, C., and Button, J. W. (1992). "Routine Maintenance Uses for milled Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)." Research Report 1272, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas, 158 pp.
- 32- Federal Highway Administration (FHWA) (2000). "User Guidelines: Reclaimed Asphalt Pavement, Reclaimed Concrete Materials."
<http://www.tfhrc.gov/////hnr20/recycle/waste/>, accessed October 1, 2000.
- 33- Fisher, K. P. and Bue, B. (1981). "Corrosion and Corrosivity of Steel in Norwegian Marine Sediments," Underground Corrosion, ASTM STP 741, Edward Escalante, Ed., American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
- 34- Frondistou, S. (1985). "Corrosion Susceptibility of Internally Reinforced Soil Retaining Structures," Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-83-105.
- 35- Gupta, J. D. and W. A. Kneller. (1993). "Precipitate Potential of Highway Subbase Aggregates." Research Report FHWA/OH-94/004, prepared for the Ohio Department of Transportation.
- 36- Gupta, J.D., W. A. Kneller, R. Tamirisa, and E. Skrzypczak-Jankun. (1994). "Characterization of Base and Subbase Iron and Steel Slag Aggregates Causing Deposition of Calcareous Tufa in Drains." Transportation Research Record, No. 1434.
- 37- Halm, H. J. (1980). "Concrete Recycling." Transportation Research News, Issue 89, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, pp. 6-10.
- 38- Kennedy, T. W., and Perez, I. (1977). "Preliminary Mixture Design Procedure for Recycled Asphalt Materials." Recycling of Bituminous Pavements, ASTM Special Technical Pub. No. 662, pp. 47-67.
- 39- King, R.A. (1977). "A Review of Soil Corrosiveness with Particular Reference to Reinforced Earth." Transport and Road Research Laboratory, Supplementary Rep. No. 316, Crowthorne, Berkshire.
- 40- Lambe, T. W., and Whitman, R.V. (1979). "Soil Mechanics." John Wiley & Sons, New York, NY.
- 41- Mack, J. W., Solberg, C.E., and Voight, G.F. (1993). "Recycling Concrete Pavements," Concrete Construction, Vol. 38, No. 7, pp. 470-473.
- 42- Malhotra, V. M. (1978). "Recycling Concrete - A New Aggregate," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 42-52.

-
- 43- Maher, M. H., Gucunski, N., and Papp, W. J., Jr. (1997). "Recycled Asphalt Pavement as a Base and Sub-Base Material." Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials, ASTM Special Technical Publication No. 1275, pp. 42-53.
 - 44- Marx, E. (2001). "Influence of Compaction Conditions on the Settlement Due to Wetting of Fine Uniform Sands," M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, 126 pp.
 - 45- Miller, F. P., Foss, J. E. and Wolf, D. C. (1981). "Soil Surveys: Their Synthesis, Confidence Limits, and Utilization for Corrosion Assessment of Soil," Underground Corrosion, ASTM STP 741, Edward Escalante, Ed., American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.
 - 46- Mitchell, J. K., and Villet, W. C. B. (1987). "Reinforcement of Earth Slopes and Embankments." Report No. 290, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 323 pp.
 - 47- Moore, T. J. and Hallmark, C. T. (1987). "Soil Properties Influencing Corrosion of Steel in Texas Soils," Soil Science Society of America Journal, Vol. 51, No. 5, Madison, WI.
 - 48- Morris, D. V., and Delphia, J. G. (1999). "Specifications for Backfill of Reinforced-Earth Retaining Walls." Texas Transportation Institute, FHWA/TX-99/1431-S, 189 pp.
 - 49- O'Mahony, M. M. (1997). "An Analysis of the Shear Strength of Recycled Aggregates," Material and Structures, Vol. 30, pp. 599-606.
 - 50- O'Mahony, M. M., and Milligan, G. W. E. (1991). "Use of Recycled Materials in Subbase Layers," Transportation Research Record, Vol. 1310, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 73-80.
 - 51- Palmer, J. D. (1989). "Environmental Characteristics Controlling the Soil Corrosion of Ferrous Piping," Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM STP 1013, V. Chaker and J.D. Palmer, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 5-17.
 - 52- Petrarca, R. W., and Galdiero, V. A. (1984). "Summary of Testing of Recycled Crushed Concrete," Transportation Research Record, Vol. 989, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, pp.19-26.
 - 53- Popova, S. N., Popov, B. N., White, R. E., Petrou, M. F., and Morris, D. (1998). "Corrosion Effects of Stabilized Backfill on Steel Reinforcement." ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 5, pp.570-577.
 - 54- Rashwan, S., and Abourizk, S. (1997). "The Properties of Recycled Concrete." Concrete International, Vol. 19, pp.56-60.
 - 55- Rabeler, R. C. (1989). "Soil Corrosion Evaluation of Screw Anchors." Effects of Soil Characteristics on Corrosion, ASTM Special Technical Pub. No. 1013, V. Chaker and J.D. Palmer, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
 - 56- Romanoff, M. (1957). Underground Corrosion. NBS Circular 579, National Bureau of Standards, Washington, D.C.
 - 57- Sawicki, A. (1999). "Creep of Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls." Geotextiles and Geomembranes, Vol. 17, pp. 51-65.

- 58- Schlosser, F. (1990). "Mechanically Stabilized Earth Retaining Structures in Europe." Proc., ASCE Conf. on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Ithaca, N.Y., pp. 347-378.
- 59- Schlosser, R, and Delage, P. (1988). "The Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures," NATO ASI Series, Applied Sciences, Vol. 147, pp. 3-65.
- 60- Saeed, A., Hudson, W. R., and Anaejionu, P. (1995). "Location and Availability of Waste and Recycled Materials in Texas and Evaluation of their Utilization Potential in Roadbase." Research Report 1348-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 40 pp.
- 61- Saeed, A., and Hudson, W. R. (1996). "Evaluation and the Use of Waste and Reclaimed Materials in Roadbase Construction." Research Report 1348-2F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 189 pp.
- 62- Senior, S. A., Szoke, S. I., and Rogers, C. A. (1994). "Ontario's Experience with Reclaimed Materials for Use in Aggregates." International Road Federation Conference, Calgary, Alberta.
- 63- Texas Department of Transportation (TxDOT) (1999a). "Year of the Recycled Roadway Materials - January: Crushed concrete."
<http://www.dot.state.tx.us/insdtdot/orgchart/gsd/recycle/mat.htm>, accessed October 1, 2000, 17pp.
- 64- Texas Department of Transportation (TxDOT) (1999b). "Year of the Recycled Roadway Materials - June: Reclaimed asphalt pavement."
<http://www.dot.state.tx.us/insdtdot/orgchart/gsd/recycle/mat.htm>, accessed October 1, 2000, 23 pp.
- 65- Whitecavage, J. B. (1990) "Fundamentals of pH Field Test Methods and Instrumentation," Appalachian Underground Corrosion Short Course. Proc., 35th Annual, Durham, A., and Noah, M., Eds., West Virginia University.

فهرست انتشارات

الف) پروژه‌های تحقیقاتی

۱. بررسی عوامل مؤثر در ارزیابی و توجیه فنی و اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی پروژه‌های راه و راه‌آهن
۲. کاربرد آب و مصالح محلی چابهار برای ساخت بلوکهای ساختمانی
۳. شیوه‌های طراحی و کاربرد حفاظها و ضربه‌گیرهای ایمنی در راهها
۴. ضوابط طراحی و اجرای روسازی راه آهن بدون بالاست
۵. بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی رویه‌های بتنی و آسفالتی
۶. راهنمای طراحی و اجرای سیستم زهکشی آبهای سطحی و زیرسطحی راه، راه‌آهن و فرودگاه (و نقشه‌های اجرایی)
۷. ضوابط طراحی و اجرای آسفالت ماستیک
۸. بررسی مسائل کمی و کیفی مصرف قیر در راههای کشور
۹. راهنمای طراحی و ایمن‌سازی پایه علائم راه
۱۰. روش‌های جدید طرح مخلوط‌های آسفالتی بر اساس عملکرد و پیشنهاد روش مناسب برای کشور
۱۱. راهنمای تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راهها
۱۲. تسلیح خاکریز و بستر راهها با استفاده از ژئوگرید
۱۳. سیستم حمل‌ونقل ریلی
۱۴. ارایه روش‌های ساماندهی فعالیت عوارض بزرگراهها و آزادراههای کشور
۱۵. ظرفیت باربری محوری شمعها
۱۶. آیین‌نامه نحوه بارگیری، حمل و مهار ایمن بار وسایل نقلیه باربری جاده‌ای
۱۷. ضوابط طرح پلهای راه و راه‌آهن در برابر زلزله

ب) گزارش‌های تخصصی

۱. پیشنهاداتی برای آزمایش ژئوتکستایلها
۲. ممیزی ایمنی راه
۳. راهنمایهای سودمند برای طراحی و ساخت خاکریزهای راه
۴. روشها و شرایط لازم برای عملیات خاکی به منظور کاهش اثرات زیست محیطی پروژه‌های راه
۵. آلودگی ناشی از دی‌اکسید نیتروژن در تونلهای راه
۶. ایمنی در تونلهای
۷. مدیریت ترافیک و کیفیت سرویس
۸. گزارش سالانه ژوئیه ۲۰۰۳ GRSP

۹. بهینه سازی شبکه‌های موجود بین شهری
۱۰. بیست و دومین همایش جهانی راه پیارک
۱۱. یارانه‌ها هزینه‌ها و منافع اجتماعی حمل و نقل عمومی
۱۲. برنامه‌ریزی و بودجه در شبکه راهها
۱۳. روشهای مشارکت همگانی در توسعه پروژه راه
۱۴. قیمت‌های بین‌المللی سوخت (بنزین و گازوییل)
۱۵. سیاست حمل و نقل اروپایی تا سال ۲۰۱۰
۱۶. مبانی تحلیل اقتصادی
۱۷. انتخاب مصالح و طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر برای آمدوشد و شرایط آب‌وهوایی سخت
۱۸. راهنمای فیلم‌های IRF
۱۹. راهنمای ممیزی ایمنی راه
۲۰. ارتقاء و بهبود عملکرد داخلی راهها
۲۱. فرآیند تصمیم‌گیری در اعمال سیاست‌های پایدار حمل و نقل جاده‌ای
۲۲. کیفیت خدمات جاده‌ای
۲۳. روشهای ارزیابی اقتصادی برای پروژه‌های راه در کشورهای عضو پیارک
۲۴. روشهایی برای ارزیابی خطر وقوع زمین لغزه‌ها
۲۵. روشهای ساده نگهداری راه
۲۶. تقسیم مسئولیت برای داشتن جاده‌های ایمن‌تر
۲۷. راههای دسترسی به مناطق برون شهری
۲۸. تجهیزات اتوماتیک بررسی ترک‌خوردگی روسازی راه
۲۹. تأمین مالی و ارزیابی اقتصادی
۳۰. بهبود تأمین منابع مالی و مدیریت نگهداری راه
۳۱. بازیافت روسازی‌های انعطاف‌پذیر موجود
۳۲. حمل و نقل هوشمند
۳۳. محیط زیست و پروژه‌های راهسازی
۳۴. راهنمای ارزیابی سیستم‌های نگهدارنده خاک
۳۵. آشنایی با مفاهیم مدیریت روسازی
۳۶. راهنمای انعقاد قرارداد، نحوه انتخاب و مدیریت مشاوران در فعالیت‌های مهندسی پیش از ساخت
۳۷. تضمین کیفیت در عملیات خاکی
۳۸. طبقه‌بندی تونل‌ها، دستورالعمل‌ها، تجربیات موجود و پیشنهادات
۳۹. نقش مدل‌های اقتصادی و اجتماعی - اقتصادی در مدیریت راه
۴۰. رویه‌های بتنی مسلح پیوسته

۴۱. حمل و نقل ترکیبی، اقداماتی جهت تشویق به استفاده از حمل و نقل عمومی
۴۲. پیشرفت مدیریت و تأمین بودجه نگهداری راهها در افریقا
۴۳. برنامه ملی ایمنی ترافیک کشور ترکیه
۴۴. بررسی توسعه حمل و نقل در منطقه اسکاپ در سال ۲۰۰۳، آسیا و اقیانوسیه
۴۵. تبادل فناوری و توسعه
۴۶. راههای دارای رویه بتنی
۴۷. تجدید ساختار بخش راه
۴۸. حمل و نقل کالا
۴۹. گزارش سالانه ژوئن ۲۰۰۴
۵۰. بکارگیری مصالح حاصل از بازیافت رویه‌های آسفالتی و بتن خرد شده در خاکریز

ج) کتب

۱. فرهنگ جامع دریایی
۲. برنامه‌ریزی و طراحی فرودگاه (دو جلد)
۳. فرهنگ و اصطلاحات فنی و مهندسی راه
۴. راهنمای ایمنی راه (پیارک)
۵. فرهنگ مصور دریایی (همراه با نسخه الکترونیک)

د) لوح فشرده

۱. نشریات **Austrroads** (شامل ۱۸۶ عنوان از نشریات وزارت راه استرالیا و نیوزلند در موضوعات مختلف بصورت فایل pdf)
۲. فیلم‌های آموزشی راه **IRF** (شامل ۱۰۷ فیلم در ۴۲ لوح فشرده)
۳. نشریات **SWOV** (شامل ۱۳۸ عنوان از نشریات **SWOV, DRI, VTI, NCHRP** در موضوعات مختلف بصورت فایل pdf)
۴. آیین‌نامه ایمنی راهها (مجموعه هفت جلدی منتشر شده از سوی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی)

Ministry of Roads and Transportation
Deputy of Education Research and Technology
Transportation Research Institute

*Recycled Asphalt Pavement and
Crushed Concrete Backfill*