راهنمای
بتن تراوا

گزارش کمیته ۱۴۰۳-ICI-۵۲۲۰
از راهنمای جامع بتن ساز انجمن بتن ایران

انجمن علمی بتن ایران
انجمن بتن ایران
انجمن صنفی فن آوران بتن

به نام خدایی که خاک آفرید

بتن تراوا

گزارش زیر کمیته ICI-5220-1403

از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن‌ساز انجمن بتن ایران

بتن تراوا

گزارش زیر کمیته ICI-5220-1403

از راهنمای جامع بتن‌ساز انجمن بتن ایران

بتن تراوا
ناشر: اراده
نوبت چاپ: اول ۱۴۰۳
شمارگان : ۱۰۰۰جلد
شابک
ISBN : 8-0
فهرست نویسی براساس اطلاعات فیپا :
۱-

ویراستار: آیدین ریاضی
صفحه‌آرا: زهرا اسلامی نوکندی
پایگاه اینترنتی: WWW.ICI.IR

فهرست

پیش‌گفتار محمد شکرچی‌زاده ۹
پیش‌گفتار هرمز فامیلی/ محسن تدین/ مصطفی آدرسی ۱۰
پیش‌گفتار علیرضا نمدمالیان اصفهانی/ معین گودرزی ۱۱
چکیده ۱۳
فصل ۱- مقدمه و گستره ۱۴
۱-۱- مقدمه ۱۵
۱-۲- گستره ۱۶
فصل ۲- علائم و تعاریف ۱۸
۲-۱- علائم ۱۹
نماد ۱۹
توضیح ۱۹
۲-۲- تعاریف ۲۰
فصل ۳- کاربردها ۲۲
۳-۱- کلیات ۲۳
۳-۲- تاریخچه کاربرد در ساختمان ۲۳
۳-۳- کاربرد در روسازی ۲۵
۳-۳-۱- مزایا و معایب ۲۵
۳-۳-۱-۱- محوطه پارکینگ‌ها ۲۷
۳-۳-۱-۲- پیاده‌روها ۲۷
۳-۳-۱-۳- سواره‌روها ۲۸
۳-۳-۲- لایه‌های اساس و زهکش‌های کناری نفوذپذیر ۲۸
۳-۳-۳- شانه راه ۲۹
۳-۴- سایر کاربردها ۲۹
۳-۴-۱- زهکش‌ها ۲۹
۳-۴-۲- گلخانه‌ها ۳۰
۳-۴-۳- زمین‌های تنیس و بازی ۳۰
۳-۴-۴- موانع صوتی و دیوارهای ساختمان ۳۰
۳-۴-۵- به عنوان مصالح پرکننده در پشت دیوارهای حائل و تکیه‌گاه‌های کناری (کوله‌های) پل ۳۰
فصل ۴- مصالح ۳۲
۴-۱- کلیات ۳۳
۴-۲- سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن تراوا ۳۳
۴-۳- مواد سیمانی ۳۴

۴-۴- آب ۳۵
۴-۵- مواد افزودنی ۳۵
فصل۵- ویژگی‌ها ۳۸
۵-۱- کلیات ۳۹
۵-۲- نفوذپذیری ۳۹
۵-۳- مقاومت فشاری ۴۲
۵-۴- مقاومت خمشی ۴۵
۵-۵- دوام در شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن ۴۷
۵-۵-۱- هوازایی (حباب‌زایی) ۴۷
۵-۵-۲- استفاده از سنگدانه ریز یا الیاف ۴۸
۵-۵-۳- نسبت آب به مواد سیمانی ۴۸
۵-۵-۴- دوام سنگدانه ۴۹
۵-۵-۵- استفاده از مواد شیمیایی یخ‌زدا ۴۹
۵-۶- مقاومت در برابر سایش سطحی و واچیدگی ۵۰
۵-۷- چقرمگی شکست ۵۰
۵-۸- جذب صدا ۵۱
۵-۹- جلوگیری از لغزش و افتادن ۵۳
۵-۱۰- کاهش اثر جزیره گرمایی در محیط شهری ۵۳
۵-۱۱- ظرفیت زدودن آلاینده‌ها ۵۴
فصل۶- طرح مخلوط بتن تراوا ۵۶
۶-۱- کلیات طرح مخلوط ۵۷
۶-۲- معیارهای طرح مخلوط ۵۷
۶-۳- فرایند طرح مخلوط ۵۸
۶-۴- مثال‌هایی از فرایند طرح مخلوط ۶۲
فصل۷- طراحی روسازی تراوا ۶۸
۷-۱- مقدمه ۶۹
۷-۲- طراحی ساختگاه ۶۹
۷-۳- طراحی سازه‌ای ۶۹
۷-۳-۱- بستر و زیراساس ۶۹
۷-۳-۲- مقاومت بتن ۷۳
۷-۳-۳- انتخاب ضخامت روسازی ۷۳
۷-۴- طراحی مدیریت سیلاب ۸۳
۷-۴-۱- کلیات ۸۳

۷-۴-۱-۱- سه ویژگی مربوط به طراحی بتن تراوا ۸۳
۷-۴-۱-۱-۱- حجم کاهش‌یافته رواناب ۸۳
۷-۴-۱-۱-۲- حجم تصفیه کاهش‌یافته ۸۴
۷-۴-۱-۱-۳- سطح کاهش‌یافته ناتراوا ۸۴
۷-۴-۲- کاهش استعداد گرفتگی (پرشدگی) ۸۶
۷-۴-۳- طراحی زهکشی ۸۷
۷-۴-۳-۱- معادلات و نرم‌افزار طراحی ۹۰
۷-۴-۳-۲- ملاحظات روسازی‌های شیب‌دار ۹۱
۷-۴-۳-۳- مثال‌های طراحی ۹۲
۷-۵- سایر ملاحظات ۹۴
۷-۵-۱- تعمیر و نگهداری روسازی تراوا ۹۵
۷-۵-۲- اختصاص سهم مساحت رویه بتنی تراوا ۹۵
فصل۸- ساخت روسازی تراوا ۹۸
۸-۱- قواعد کلی ساخت ۹۹
۸-۲- آماده‌سازی بستر و زیراساس ۱۰۰
۸-۳- بتن‌ریزی ۱۰۱
۸-۳-۱- قالب‌ها ۱۰۲
۸-۳-۲- تخلیه بتن ۱۰۲
۸-۳-۳- نوارهای موقت افزایش ارتفاع قالب ۱۰۳
۸-۳-۴- تجهیزات بتن‌ریزی ۱۰۴
۸-۳-۵- سایر ابزارها ۱۰۵
۸-۳-۶- استفاده از روسازی به عنوان قالب بتن‌ریزی ۱۰۶
۸-۴-تراکم و پرداخت ۱۰۶
۸-۴-۱- شمشه غلتان ۱۰۷
۸-۴-۲- پرداخت پس از تراکم ۱۰۷
۸-۵- ایجاد درزها ۱۰۸
۸-۶- عمل‌آوری و محافظت ۱۰۸
۸-۷- محافظت در برابر هوای سرد ۱۱۱
۸-۸- محافظت در برابر هوای گرم ۱۱۲
فصل۹- بازرسی‌ها و آزمایش‌های کنترل و تضمین کیفیت ۱۱۴
۹-۱- کلیات ۱۱۵
۹-۲- بازرسی و آزمایش پیش از ساخت ۱۱۵
۹-۳- بازرسی و آزمایش حین ساخت ۱۱۶

۹-۴- بازرسی و آزمایش پس از ساخت ۱۱۸
فصل ۱۰- عملکرد ۱۲۰
۱۰-۱- کلیات ۱۲۱
۱۰-۲- تغییر نرخ تراوایی سطحی ۱۲۱
۱۰-۳- خرابی سازه‌ای ۱۲۳
۱۰-۴- خرابی سطحی ۱۲۳
۱۰-۵- مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن ۱۲۴
۱۰-۶- مقاومت در برابر یخ‌زداها ۱۲۶
۱۰-۷- تعمیر روسازی‌های بتنی تراوا ۱۲۷
۱۰-۷-۱- خراشیدن یا تراشیدن (خراش و تراش) ۱۲۷
۱۰-۷-۲- روکش‌ها ۱۲۷
۱۰-۷-۳- حفره‌ها یا فرورفتگی‌ها ۱۲۸
۱۰-۷-۴- برش‌کاری‌های مرتبط با تاسیسات ۱۲۸
۱۰-۸- تعمیر و نگهداری ۱۲۸
۱۰-۹- دوام و عملکرد میدانی روکش بتنی تراوا ۱۲۹
فصل ۱۱- محدودیت‌ها، استعدادهای کاربردی و نیازهای تحقیقاتی ۱۳۲
۱۱-۱- بتن تراوا در مناطق سردسیر ۱۳۳
۱۱-۲- تعیین مشخصات ساختار بتن تراوا ۱۳۵
۱۱-۳- مقاومت و سایر اولویت‌ها و محدودیت‌های آزمایشی ۱۳۵
۱۱-۴- آزمایش‌های غیرمخرب تعیین عملکرد و ویژگی‌های بتن تراوا ۱۳۷
۱۱-۵- مدیریت بارش ۱۳۷
۱۱-۵-۱- کنترل حجم ۱۳۷
۱۱-۵-۲- کنترل کیفیت ۱۳۸
۱۱-۶- اثر جزیره گرمایی در محیط شهری، کربناته شدن و سایر ویژگی‌های حرارتی ۱۴۰
۱۱-۷- نیازهای مربوط به ساخت، بهره‌برداری، و تعمیر و نگهداری ۱۴۱
۱۱-۷-۱- انتقال و انجام اصلاحات کارگاهی ۱۴۱
۱۱-۷-۲- عملیات پرداخت و عمل‌آوری ۱۴۱
۱۱-۷-۳- خرابی و ترمیم سطح ۱۴۲
۱۱-۸- سایر کاربردهای نوین ۱۴۲
۱۱-۸-۱- دوغاب متخلخل ۱۴۳
فصل ۱۲- بتن تراوا و محیط‌زیست ۱۴۴
منابع ۱۴۸

بتن تراوا

ریاست هیئت‌مدیره انجمن بتن ایران:
دکتر محمد شکرچی‌زاده

مدیر افتخاری:
دکتر علیرضا نمدمالیان اصفهانی

ریاست کمیته بتن سبک:
دکتر هرمز فامیلی
دکتر محسن تدین

کمیته کار (به ترتیب حروف الفبا):
دکتر مصطفی آدرسی
دکتر محسن تدین
مهندس حامد دشت‌آزاد
مهندس آیدین ریاضی
دکتر هرمز فامیلی

اعضا پیوسته کمیته (به ترتیب حروف الفبا):
دکتر مصطفی آدرسی
دکتر علیرضا باقری
دکتر محسن تدین
مهندس محمدرضا جبروتی
دکتر محمد شکرچی‌زاده
مهندس محمدحسین رفعت‌خواه
مهندس آیدین ریاضی
دکتر هرمز فامیلی
دکتر فریبرز محمدی تهرانی
دکتر علیرضا نمدمالیان

اعضا وابسته کمیته (به ترتیب حروف الفبا):
دکتر محمود ایراجیان
دکتر محمدحسین تدین
مهندس محمدامین جلیلی
مهندس محمدعلی دوستی
مهندس معین گودرزی
مهندس امیرمازیار رئیس قاسمی
دکتر سیدحسام مدنی
مهندس سید مهدی موسوی
دکتر رضا نعمت‌الهی

پیش گفتار

به‌نام خدا

یکی از دلایل پرمصرف بودن بتن استفاده گسترده آن برای انواع کاربردها می باشد. از جمله می توان از بتن به عنوان روسازی کف ها که دارای تراوائی زیاد باشد، استفاده کرد. بتن های تراوا بیش از سه دهه گذشته در فضاهای عمومی پارک ها و پیاده روها در شهرها بکار رفته است. استفاده از این بتن ها به کاهش روان آب ها، تصفیه آبهای سطحی آلوده شهرها قبل از ورود به سفره های آبهای زیرزمینی و احیای آبهای زیرزمینی کمک می کند. در واقع در سالهای اخیر با گسترش خانه سازی و متراکم شدن شهرها، سطح شهرها نفوذناپذیر شده اند و همزمان با خشکسالی و برداشت زیاد از آبهای زیرزمینی، سطح آبهای زیرزمینی پایین رفته است و در موارد متعددی پدیده فرونشست در شهرها گسترش پیدا کرده است.

توسعه استفاده از بتن های تراوا در سطوح شهری می تواند به تغذیه مجدد آبهای زیرزمینی و آبخوان ها کمک نماید. گزارش حاضر که توسط آقایان دکتر هرمز فامیلی و دکتر محسن تدین و با حمایت مادی و معنوی شرکت لیکا تهیه شده است، می تواند برای آشنایی مهندسین با این نوع بتن و گسترش کاربرد آن مفید باشد

در پایان از تهیه کنندگان این گزارش تشکر می نمایم.

محمد شکرچی زاده

رئیس هیئت‌مدیره انجمن بتن ایران

پیش گفتار

به‌نام خدا

در راستای تدوین نشریات بتن سبک، زیر کمیته بتن نیمه سبک یا متخلخل یا بتن تراوا تشکیل شد. این زیرکمیته با توجه به آخرین مطالب منتشره در این زمینه، بتن نیمه سبک را تحت عنوان رایج تر بتن تراوا ترجمه و تدوین کرد. بتن تراوا با کاربردهای متعدد امروزه جایگاه رفیعی را در صنعت ساخت و ساز بتن بویژه در زمینه رویه های بتنی راه و خیابان و پیاده رو پیدا کرده است.

این بتن تراوا با کاربردهای سازگار با محیط زیست، در زمینه توسعه پایدار نقش مهمی را ایفا می کند. این نشریه به شماره ICI-5220-1403 با حمایت شرکت لیکا تهیه و منتشر می شود. این کمیته کاری از طرف انجمن بتن ایران کمال تشکر و قدردانی را از این شرکت ابراز می دارد. اعضای کمیته کاری از زحمات آقای مهندس حامد دشت آرا در زمینه ترجمه سلیس و روان و اصلاح آنها در جلسات متعدد کمیته مزبور قدردانی می کند.کمیته کاری بتن تراوا شامل آقایان دکتر هرمز فامیلی، دکتر محسن تدین (رئیس زیرکمیته) و دکتر مصطفی آدرسی بوده است که در کوتاه ترین زمان ممکن، مطالب را آماده کردند.

امید است اصلاحات لازم با کمک سایر دوستان و همکاران گوشزد گردد تا در چاپ بعدی نقایص موجود برطرف شود و برغنای آن افزوده گردد. هم چنین امیدواریم با پژوهش های دست اندرکاران دانشگاهی و صنعت در این زمینه، این نشریه پربارتر شود.

هرمز فامیلی　　محسن تدین　　مصطفی آدرسی

پیش‌گفتار

به‌نام خدا

مجموعه حاضر که به همت انجمن بتن ایران و با مدیریت اساتید ارجمند دکتر هرمز فامیلی و دکتر محسن تدین فراهم شده است، اثری بسیار ارزشمند است که جای آن در جامعه بتن ایران خالی بود. امیدوارم که این کتاب، به عنوان یک منبع معتبر در رشد و توسعه صنعت بتن ایران نقش مهمی ایفا کند و به پیشرفت این حوزه کمک کند.

بتن تراوا (Pervious Concrete Pavement Systems) با سبکدانه رس منبسط شده (Light Expanded Clay Aggregate) یا LECA یکی از نوآوری‌های مهم در صنعت ساخت و ساز است که با هدف مدیریت بهتر آب‌های سطحی و کاهش اثرات زیست‌محیطی طراحی شده است.

با توجه به اقلیم کشور ایران که با کمبود آب و خشکسالی در برخی مناطق و تغییرات اقلیمی که منجر به بارش باران سیل‌آسا گردیده است، استفاده از بتن تراوا با سبکدانه رس منبسط (LECA) که توانایی نفوذ آب در حدود ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ لیتر در دقیقه در متر مکعب را دارد، در زیر سطح آسفالت و یا بتن روکش جاده‌ها باعث افزایش زهکشی و کاهش روان‌آب سطحی و جلوگیری از خطر سیلاب می‌گردد؛ از این رو استفاده از بتن تراوا در پارکینگ‌های روباز، مسیرهای دوچرخه‌سواری، خیابان‌ها و محوطه‌سازی، بام سبز، دیوارهای سبز و فضای سبز شهری مانع تجمع آب سطحی، بهبود نفوذ آب به خاک، حفظ رطوبت خاک، کاهش لغزندگی و آسیب به افراد و خودروها می‌شود و نیاز به استفاده از سیستم‌های زهکش پیچیده و پرهزینه را کاهش داده و به حفظ زیرساخت‌ها ، پایداری فضاهای سبز شهری ، کاهش نیاز به تعمیرات مکرر و بازیافت روان‌آب‌ها کمک می‌کند .

با توجه به اهمیت مقاومت در برابر چرخه یخبندان و آب شدن بتن تراوا، طبق تحقیقات بتن تراوا تولید شده با سبکدانه رس منبسط (LECA) میتواند تا ۳۰۰ چرخه یخبندان و آب‌شدگی بدون کاهش قابل توجه در مقاومت را تحمل کند که باعث افزایش عمر مفید و کاهش نیاز به تعمییر و نگهداری می‌گردد.

یکی از مهم ترین مزایای استفاده از بتن تراوا تولید شده با سبکدانه رس منبسط (LECA) عایق صوت و حرارت بتن مذکور می‌باشد. با تولید قطعات بتنی عایق و استفاده آن در حاشیه بزرگراه‌ها و خیابان‌های پر تردد میتوان از عبور صدا و انعکاس صدای خودروها به مناطق مسکونی و بزرگراه جلوگیری نمود. همچنین با کاهش وزن قطعات بتنی با استفاده از سبکدانه رس منبسط شده هزینه‌های حمل و نقل کاهش می‌یابد.

بتن تراوا تولید شده با سبکدانه رس منبسط (LECA) دارای مزایای زیست محیطی بسیاری می باشد؛ روش تولید سبکدانه رس منبسط (LECA) که با تبدیل یک متر مکعب خاک رس غیرقابل استفاده در کشاورزی به ۳ تا ۴ مترمکعب سبکدانه رس منبسط (LECA) نیاز به استخراج و برداشت حجم زیادی از مصالح طبیعی مانند شن و ماسه را کاهش و به حفظ منابع سنگدانه‌های طبیعی منجر می‌گردد.

شرکت لیکا از سال‌ها پیش با توجه به مسئولیت اجتماعی خود اقدام به تولید بلوک‌های توپر بدون ریزدانه

نموده است که بسیار سبک و دارای خواص آکوستیکی و هدایت حرارتی ویژه ای است. استفاده از بلوک های تولید شده با سبکدانه رس منبسط (LECA) در دیوار های ساختمان علاوه بر ویژگی های آکوستیکی و حرارتی ویژه باعث کاهش قابل توجه وزن ساختمان می گردد.

بتن تراوا با استفاده از سبکدانه رس منبسط (LECA) به دلیل ویژگی‌های خاص خود نظیر نفوذپذیری بالا، دوام و مزایای محیط‌زیستی، انتخابی مناسب برای کاربردهای مختلف در محیط‌های شهری و زیرساخت‌های مدرن است. استفاده از این نوع بتن می‌تواند به بهبود مدیریت آب‌های سطحی، کاهش اثرات جزیره حرارتی و افزایش پایداری و عمر مفید سازه‌ها کمک کند. بتن تراوا با LECA نه تنها از نظر فنی دارای مشخصات بسیار خوبی است، بلکه از دیدگاه محیط‌زیستی نیز راه‌حلی پایدارتر و مسئولانه‌تر ارائه می‌دهد. این ویژگی‌ها، بتن تراوا را به یک گزینه مطلوب برای معماران، مهندسان و برنامه‌ریزان شهری تبدیل کرده است که به دنبال بهبود کیفیت زندگی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی هستند. بار دیگر از زحمات اساتید ارجمند دکتر هرمز فامیلی و دکتر محسن تدین سپاسگزاری می‌نمایم.

علیرضا نمدمالیان اصفهانی- معین گودرزی

چکیده

این گزارش، اطلاعات فنی در مورد کاربرد، روش‌های طراحی، مصالح، ویژگی‌ها، طرح مخلوط، روش‌های ساخت، آزمایش و بازرسی بتن تراوا را ارائه می‌کند.

واژه «بتن تراوا» اغلب بیانگر مصالحی با اسلامپ نزدیک به صفر و با دانه‌بندی باز (یکنواخت) است که از سیمان پرتلند، سنگدانه درشت، سنگدانه ریز کم (یا بدون سنگدانه ریز)، مواد افزودنی و آب تشکیل شده است. مخلوط این اجزای تشکیل‌دهنده، ماده‌ای سخت‌شده با منافذ متصل به یکدیگر با ابعاد ۲ تا ۸ میلی‌متر ایجاد می‌کند که امکان عبور آسان آب از میان آن را می‌دهد. مقاومت فشاری معمول این بتن‌ها در بازه ۲/۸ تا ۲۸ مگاپاسکال است و مقدار تخلخل آن‌ها می‌تواند به ترتیب از ۳۵ تا ۱۵ درصد تغییر کند. نرخ زهکشی قائم روسازی بتنی تراوا، بسته به اندازه اسمی سنگدانه و چگالی مخلوط، متفاوت است اما به‌طور کلی در محدوده ۷۳۰ $L/min/m^2$ تا ۸۱ $L/min/m^2$ قرار می‌گیرد. بتن تراوا عموماً به عنوان یک مصالح ساختمانی سازگار با قابلیت توسعه پایدار شناخته می‌شود، زیرا رواناب ناشی از بارش را کاهش می‌دهد و کیفیت آب سیلابی را بهبود می‌بخشد. همچنین، می‌تواند به احیای ذخایر آب‌های زیرزمینی کمک کند و پیامدهای ناشی از اثر جزیره گرمایی در محیط شهری را کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: ساخت‌وساز، طراحی، زهکشی، ساختمان سبز، گواهینامه LEED®، نفوذپذیری، روسازی بتنی تراوا، سیلاب، سازگاری با محیط‌زیست، آزمایش.

فصل ۱

مقدمه و گستره

۱-۱- مقدمه

واژه «بتن تراوا[1]» معمولا به بتن حاوی سیمان هیدرولیکی اطلاق می‌شود که طرح مخلوط آن به گونه‌ای تهیه شده است که دارای حفره‌هایی درشت، قابل‌رویت، پراکنده و به‌هم‌پیوسته باشد که صرفا تحت اثر نیروی گرانش، امکان جریان یافتن آب از میان مصالح را می‌دهند. مخلوط این بتن اغلب از سنگدانه درشت دارای دانه‌بندی یکنواخت[2]، چسباننده سیمانی، سنگدانه ریز کم (یا بدون سنگدانه ریز)، مواد افزودنی و آب تشکیل شده است[3] (شکل ۱-۱-الف). مخلوط این اجزای تشکیل‌دهنده، ماده‌ای سخت با منافذ متصل به یکدیگر با ابعاد ۸ تا ۲ میلی‌متر ایجاد می‌کند که امکان عبور آسان آب از میان آن را می‌دهد. درصد حفره‌ها می‌تواند از ۳۵ تا ۱۵ متغیر باشد. نرخ تراوایی سطحی[4] روسازی بتنی تراوا، بسته به اندازه سنگدانه و چگالی مخلوط متفاوت است، اما به‌طور کلی در محدوده ۱/۲۰ s/cm تا ۰/۱۷ s/cm قرار می‌گیرد.

شکل ۱-۱-الف روسازی بتنی تراوا (عکس از **M. Offenberg**)

شکل ۱-۱-ب- تخلخل یکنواخت مشاهده شده در یک نمونه مغزه (عکس از **J. Montgomery**)

---

[1] Pervious concrete

[2] Open-graded

[3] می‌توان از الیاف نیز در این بتن استفاده کرد.

[4] Infiltration rate

۱-۲- گستره

آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا[۵] (EPA)، رواناب‌های سیلابی را بزرگ‌ترین عامل آسیب ناشی از آب‌های سطحی در ایالات متحده می‌داند. رواناب‌های سیلابی همچنین می‌توانند ذخایر آب سطحی و زیرزمینی را آلوده کنند. علاوه بر این، با توسعه کاربری اراضی (از طریق ساخت‌وساز و حذف پوشش گیاهی)، رواناب سیلابی نسبت به قبل از توسعه، با سرعت و حجم بیشتری از محوطه خارج می‌شود که منجر به ایجاد سیل در پایین‌دست و فرسایش کناره‌ها می‌شود. روسازی بتنی تراوا، با کاهش سرعت و یا حذف رواناب سیلابی و همچنین حفاظت از ذخایر آب، پیامدهای توسعه کاربری اراضی را کاهش می‌دهد. این گزارش، اطلاعات فنی در مورد کاربردها، روش‌های طراحی، مصالح، ویژگی‌ها، طرح مخلوط، روش‌های ساخت، آزمایش و بازرسی بتن تراوا را ارائه می‌دهد.

فصل ۲

علائم و تعاریف

۲-۱- علائم

نماد	توضیح
Ab	مساحت ناحیه ناتراوایی که قرار است زهکشی شود، m^2
Ap	مساحت روسازی تراوا، m^2
C	ضریب رواناب
c	مقدار سیمان، kg
Da	فاصله بین ذرات سنگدانه درشت
Dc	فاصله بین ذرات سنگدانه درشت پوشش‌دار با خمیر سیمان یا ملات
d_1	ضخامت روسازی، m
d_2	ضخامت بستر، m
$f'c$	مقاومت فشاری مشخصه بتن، MPa
fr	مدول گسیختگی بتن، MPa
t	زمان، s
h_1	بار آبی (اختلاف ارتفاع هیدرولیکی)[۶] اولیه، mm
h_2	بار آبی (اختلاف ارتفاع هیدرولیکی) نهایی، mm
hc	ضخامت لایه بتن تراوا، m
$hcurb$	ارتفاع جدول برای نگه‌داشتن آب جمع‌شده، m
hs	ضخامت لایه زیراساس[۷] یا لایه آبگیر[۸]، m
I	شدت بارندگی، m

[6] Head
[7] Subbase
[8] Reservoir layer

k	ضریب نفوذپذیری، s/mm
p_1	درصد حفرات روسازی
p_2	درصد حفرات بستر
R	ضریب بازگشت فشار[9]
rc	پوکی لایه بتن تراوا، ٪
rs	پوکی لایه زیراساس یا لایه آبگیر، ٪
V	کل حجم آبی که قرار است زهکشی شود، m^2
Vp	حجم موجود در روسازی برای ذخیره آب، m^2
Vr	حجم موردنیاز برای ذخیره آب، m^2
Vs	حجم موجود در بستر برای ذخیره آب، m^2
w	مقدار آب، kg

۲-۲- تعاریف

ACI فهرست جامعی از تعاریف پذیرفته‌شده را در قالب مرجعی تحت عنوان «واژگان سیمان و بتن» در دسترس قرار داده است. تعاریف ارائه شده در این بخش، مکمل فهرست یادشده هستند.

نرخ برون‌نشت[10]**:** نرخ طراحی یا اندازه‌گیری شده خروج آب از سامانه بتن تراوا.

هدایت هیدرولیکی[11]**:** میزان سهولت عبور سیالات از میان بتن به صورت تابعی از چگالی و گرانروی سیال و درجه اشباع که هنگام به کار رفتن برای آب در شرایط اشباع، تحت عنوان ضریب نفوذپذیری نیز شناخته می‌شود.

ناحیه ناتراوا: ناحیه پوشیده از مصالحی که از نفوذ آب بارندگی به درون خاک و تغذیه مجدد ذخایر آب زیرزمینی جلوگیری می‌کند.

نرخ تراوایی سطحی[12]**:** نرخ طراحی یا اندازه‌گیری شده ورود آب به سطح بتن تراوا.

نرخ تراوایی حجمی (درونی)[13]**:** نرخ حرکت آب از میان بتن تراوا که معمولا برحسب میلی‌متر در ساعت یا میلی‌متر در روز بیان می‌شود.

~~ن بتن تراوا برای فراهم کردن امکان عبور سیال (معمولا آب) از میان خود به صورت~~

[9] Exfiltration

تابعی از حجم نمونه، بار آبی سیال و گرانروی سیال.

بتن تراوا: بتن حاوی سیمان هیدرولیکی که طرح مخلوط آن با حفرات درشت قابل‌رویت، پراکنده و به هم پیوسته صورت گرفته است که صرفا تحت اثر نیروی گرانش، امکان جریان یافتن آب از میان مصالح را فراهم می‌نماید.

روسازی تراوا: روسازی حاوی مصالحی با حفرات درشت پیوسته برای ایجاد امکان عبور آب از سطح به لایه‌های زیرین.

پوکی: حجم فضای خالی میان‌ذره‌ای باز و به هم پیوسته در بتن تراوا به صورت درصدی از حجم کل.

واچیدگی[14] (کنده‌شدگی): ساییده شدن سطح در اثر جابه‌جایی ذرات سنگدانه از محل استقرار خود.

رواناب: آب حاصل از باران یا برف که به درون زمین جذب نمی‌شود بلکه روی سطوح دارای تراوایی کمتر جریان یافته و به نهرها و رودخانه‌ها سرازیر می‌شود.

رویه سطحی: بالاترین لایه از ساختار یک روسازی بتنی.

درصد حفرات (پوکی): نسبت حجم حفرات، شامل هوای غیرعمدی و ایجادشده، به حجم کل برحسب درصد.

[14] Raveling

فصل ۳

کاربردها

۳-۱- کلیات

رایج‌ترین کاربرد بتن تراوا معمولا در پارکینگ‌ها (شکل ۳-۱) و جاده‌های با حجم کم عبور و مرور و با هدف مدیریت رواناب است. با این حال، بتن تراوا همچون بتن متعارف، دارای طیف گسترده‌ای از کاربردها و فواید است که برخی از آن‌ها عبارتند از: محوطه پارکینگ‌ها، لایه‌های زهکشی، کف گلخانه‌ها، دیوارهای سازه‌ای با قابلیت عایق حرارتی، عایق‌های صوتی، زمین‌های تنیس، زمین‌های ورزشی چمنی مانند فوتبال، کف محل نگهداری حیوانات، موج‌شکن‌ها، صخره‌های مصنوعی و بتن نیمه‌سبک سازه‌ای.

در تمامی این کاربردها، به دلیل خطر زیاد خوردگی آرماتور در اثر ساختار متخلخل و باز مصالح، به‌طور معمول از بتن تراوای غیرمسلح استفاده می‌شود. برای ایجاد چقرمگی و دوام بیشتر در این نوع بتن، در برخی مناطق مشخص استفاده از جایگزین‌های تسلیح غیرخورنده از جمله الیاف ریز و درشت مصنوعی یا طبیعی متداول است.

شکل ۳-۱- روسازی پارکینگ ساخته‌شده با روسازی بتنی تراوا

۳-۲- تاریخچه کاربرد در ساختمان

بتن تراوا دست‌کم از اواسط قرن نوزدهم میلادی در ساخت ساختمان‌ها به کار رفته است. استفاده از بتن تراوا برای کاربردهای ساختمانی در ابتدا به دلیل کمبود سنگدانه ریز مناسب و پس از جنگ جهانی دوم به منظور صرفه‌جویی در مصالح صورت گرفت. در سراسر این فصل، برای توصیف این ماده از واژه

«بتن تراوا» استفاده می‌شود، اما در برخی منابع و از گذشته، ممکن است از آن تحت عنوان بتن بدون ریزدانه یا بتن دارای دانه‌بندی باز (یکنواخت) نیز یاد شده باشد. کشورهای اروپایی به شیوه‌های مختلف از بتن تراوا استفاده کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به دیوارهای باربر درجاریخته در خانه‌های یک و چند طبقه و در برخی موارد در ساختمان‌های بلندمرتبه، پانل‌های پیش‌ساخته و بلوک‌های عمل‌آوری شده با بخار اشاره کرد. در سال ۱۸۵۲، برای اولین بار در ساخت دو خانه در بریتانیا از بتن تراوا استفاده شد. این بتن فقط از شن درشت و سیمان تشکیل شده بود. تا سال ۱۹۲۳ که مجموعه‌ای متشکل از ۵۰ خانه دوطبقه با بتن حاوی سنگدانه کلینکر در Edinburgh اسکاتلند ساخته شد، مورد دیگری از کاربرد این بتن در مطالعات منتشر شده ذکر نشده است. در اواخر دهه ۱۹۳۰، انجمن مسکن ویژه اسکاتلند[15] استفاده از بتن تراوا برای ساخت‌وسازهای مسکونی را پذیرفت (Francis، ۱۹۶۵).

از سال ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵، ویرانی‌های جنگ جهانی دوم تقریبا تمام اروپا را با نیاز گسترده به مسکن مواجه کرد که باعث افزایش انگیزه برای توسعه روش‌های جدید ساخت‌وساز یا روش‌هایی که پیش از آن استفاده نشده بودند، گردید. در این میان یکی از روش‌های قابل توجه، استفاده از بتن تراوا بود (Malhotra، ۱۹۶۹ و ۱۹۷۶). در مقایسه با بتن متعارف، در بتن تراوا، سیمان کمتری در واحد حجم بتن به کار می‌رفت. تا سال ۱۹۴۲، بتن تراوا برای ساخت بیش از ۹۰۰ خانه در بریتانیا استفاده شد. در سایر کشورها، تقاضای بی‌سابقه برای آجر و متعاقب آن ناتوانی صنعت آجرسازی در تامین آجر کافی، به استفاده از بتن تراوا به عنوان مصالح ساختمانی منجر گشت. در آلمان از این روش استفاده شد، زیرا دفع مقدار زیادی نخاله آجر پس از جنگ، مشکل بود و به تحقیق در مورد ویژگی‌های بتن تراوا منجر گردید. بین سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۵۶، به‌طور مشابه، بسیاری از خانه‌ها در اسکاتلند با بتن تراوا ساخته شدند. این موضوع عمدتا به دلیل وجود ذخایر نامحدود سنگدانه‌های سخت و نبود آجرهای با ظاهر مناسب بود. اولین کاربرد ثبت‌شده از بتن تراوا در استرالیا در اوایل سال ۱۹۴۶ بود. سامانه بتن تراوا به احداث خانه‌های جدید در بریتانیا، آلمان، هلند، فرانسه، بلژیک، اسکاتلند، اسپانیا، مجارستان، ونزوئلا، آفریقای غربی، خاورمیانه، استرالیا و روسیه کمک قابل‌توجهی کرد.

قبل از جنگ جهانی دوم، استفاده از بتن تراوا به خانه‌های دوطبقه محدود می‌شد. با این حال، پس از سال ۱۹۴۶، برای طیف وسیع‌تری از کاربردها مورد استفاده قرار گرفت. بتن تراوا به عنوان مصالح اعضای باربر در ساختمان‌های تا حداکثر ۱۰ طبقه به کار رفت (Francis، ۱۹۶۵)

اگرچه طی ۶۰ سال گذشته در اروپا و استرالیا از بتن تراوا استفاده شده، اما در قدیم کاربرد آن به عنوان مصالح ساختمانی در آمریکای شمالی بسیار محدود بوده است. یکی از دلایل استفاده محدود از بتن تراوا در گذشته این است که پس از جنگ جهانی دوم، آمریکای شمالی به اندازه اروپا با کمبود مصالح مواجه نشد. اولین نمونه استفاده از بتن تراوا در ایالات متحده، دیوارهای بتنی تراوای مسلح در اطراف گورستان Rosehill در شیکاگو ایالت ایلینوی است که در اوایل قرن بیستم ساخته شد (شکل ۳-۲).

در کانادا، اولین کاربرد ثبت شده از بتن تراوا در سال ۱۹۶۰ بود. بتن تراوا در ساخت برخی از خانه‌ها در تورنتو و همچنین به عنوان بتن غیرسازه‌ای در یک ساختمان دولتی در اتاوا استفاده شد.

---

[15] Scottish special housing association

شکل ۳-۲- دیوارهای بتنی تراوای مسلح که در اوایل قرن بیستم ساخته شده‌اند (عکس از G.Seegebrecht)

۳-۳- کاربرد در روسازی

۳-۳-۱- مزایا و معایب

مزایای روسازی‌های بتنی تراوا در مقایسه با روسازی‌های بتنی متعارف عبارتند از:

الف) کنترل آلودگی سیلاب در محل شکل‌گیری آن

ب) کنترل رواناب بارش

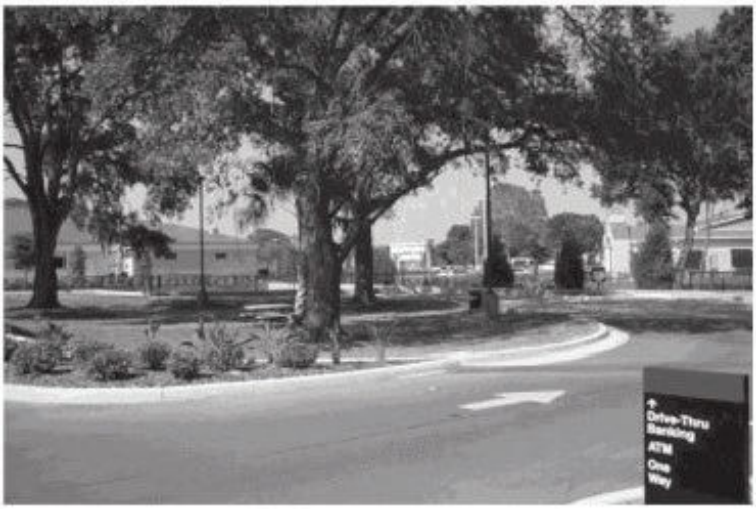
پ) افزایش ظرفیت پارکینگ از طریق رفع نیاز به نواحی نگهداشت آب (حذف فضای سبز و غیره)

ت) کاهش صدای تماس بین لاستیک وسیله نقلیه و روسازی

ث) کاهش بازتاب خیره‌کننده نور تا مسافت زیاد از سطح جاده، به ویژه هنگام خیس بودن روسازی در شب

ج) حذف یا کاهش اندازه فاضلاب‌های تعبیه‌شده برای زمان وقوع طوفان

چ) ایجاد امکان رسیدن هوا و آب به ریشه درختان، حتی با وجود روسازی در محدوده منطقه آب‌دهی به درخت (شکل ۳-۳-۱).



ح) کاهش لغزش و افتادن به دلیل کاهش یخبندان سطح

خ) کاهش جزیره گرمایی در محیط شهری و حفاظت از یخبندان دائمی در اثر کاهش ذخیره گرمایی

شکل ۳-۳-۱- روسازی بتنی تراوا که در محدوده منطقه آب‌دهی به درخت‌ها استفاده شده است (عکس از M.Offenberg)

معایب و چالش‌های احتمالی روسازی‌های بتنی تراوا عبارتند از:

الف) تجربه محدود بکارگیری در مسیرهای با تردد وسایل نقلیه سنگین

ب) روش‌های ساخت تخصصی

پ) زمان عمل‌آوری طولانی‌تر

ت) حساسیت به مقدار و کنترل آب در بتن تازه

ث) نیاز به توجه و مراقبت ویژه در طراحی در برخی از خاک‌ها مانند خاک‌های منبسط‌شونده و خاک‌های مستعد یخ‌بندان

ج) نبود روش‌های آزمایش استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری و خمشی و مقاومت در برابر واچیدگی

چ) نبود روش‌های طراحی استاندارد برای الزامات نفوذ سطحی حداقل

ح) احتمال نیاز به توجه ویژه در موارد سطح بالای آب زیرزمینی

مهندسان استفاده از بتن تراوا در روسازی را در موارد زیر توصیه کرده‌اند:

الف) رویه سطحی

(ب) لایه اساس نفوذپذیر و زهکش‌های کناری

ج) شانه راه

بر اساس تجربیات قبلی، میزان موفقیت استفاده از سامانه‌های روسازی بتنی تراوا در پروژه‌های مختلف، متفاوت بوده است. در بسیاری از مناطق، سامانه‌های روسازی بتنی تراوا با موفقیت استفاده شده‌اند. با این حال، در برخی مناطق دیگر، در مدت زمان کوتاهی دچار گرفتگی (پرشدگی) یا واچیدگی سطحی بیش از حد شده‌اند. بسیاری از خرابی‌ها را می‌توان به بی‌تجربگی پیمانکار یا تولیدکننده مخلوط بتن، تراکم بیش از حد خاک نسبت به میزان مشخص شده و طراحی نامناسب ساختگاه نسبت داد. استفاده از طرح مخلوط و روش‌های بتن‌ریزی مناسب در مقابله با مسائل مربوط به گرفتگی و واچیدگی موثر بوده‌اند. برای عملکرد موفقیت‌آمیز روسازی بتنی تراوا باید موارد زیر را رعایت نمود:

الف) نفوذپذیری خاک باید تایید شود. چه خاک روی زیراساس ماسه‌ای و چه روی خاکی با نفوذپذیری کمتر قرار داشته باشد، نفوذپذیری آن باید حداقل با نفوذپذیری مورد استفاده در طراحی سامانه مدیریت سیلاب مطابقت داشته باشد. به عنوان مثال، برای رس قرمز ناحیه Piedmont ایالات کارولینا و جورجیا، که نرخ تراوایی سطحی آن بسیار کمتر از ۱۳ میلی‌متر در ساعت است، احداث روسازی تراوا، موجب تسهیل نفوذ سطحی و تصفیه رواناب و همچنین احیای سفره آب زیرزمینی می‌شود (اگرچه، کل آب باران حاصل از طوفان‌های شدید در آن‌ها نفوذ نمی‌کند).

ب) چیدمان ساختگاه باید مانع از جریان رسوبات ناشی از خاک‌های مجاور یا نواحی دارای پوشش گیاهی به سمت روسازی تراوا شود.

پ) عبور و مرور در زمان ساخت (عمدتا با وسایل نقلیه) باید از نواحی روسازی بتنی تراوا منحرف شود تا از متراکم شدن لایه‌های زیرین خاک و کاهش ظرفیت نفوذ جلوگیری گردد.

ت) باید از ورود رواناب ساختگاه و تجهیزات سنگین به منطقه روسازی تراوا جلوگیری شود. تا زمانی که همه زمین‌های دست‌خورده که زهکشی آن‌ها به روسازی بتنی تراوا انجام می‌شود، به وسیله کاشت گیاهان تثبیت نشده‌اند، روسازی بتنی تراوا نباید مورد بهره‌برداری قرار گیرد. کنترل دقیق فرسایش و رسوب‌گذاری در طول هرگونه فعالیت ساخت یا محوطه‌سازی برای جلوگیری از گرفتگی سامانه بتنی تراوا ضروری است و باید در برنامه مدیریت سیلاب ساختگاه در نظر گرفته شود.

ث) مشخصات مناسبی که عملکرد مطلوب و الزامات موردنظر آزمایش بتن تازه و سخت‌شده را به‌طور واضح بیان می‌کنند، باید الزام‌آور شوند. بسیاری از خرابی‌ها به دلیل عدم ارائه دستورالعمل‌های واضح از طرف مهندس طراح در خصوص مواردی که از تولیدکننده و پیمانکار انتظار می‌رود، ایجاد شده‌اند.

۳-۳-۱-۱- محوطه پارکینگ‌ها

بتن تراوا در اوایل دهه ۱۹۷۰ در فلوریدا به عنوان مصالح روسازی محوطه پارکینگ شناخته می‌شد (Medico، ۱۹۷۵). این روش به‌عنوان ابزاری برای مدیریت حجم زیاد آب جاری در پارکینگ در زمان طوفان ایجاد شد. بتن تراوا امکان نفوذ آب به زمین زیر روسازی را می‌دهد. آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) سیاستی را اتخاذ کرده است که به عنوان بخشی از بهترین روش‌های مدیریت سیلاب[16] (BPMs)، استفاده از روسازی‌های تراوا را به عنوان راهی برای کاهش مشکل رواناب سیلابی توصیه می‌کند (U.S. EPA، ۲۰۲۱). پارکینگ‌های بتنی تراوا همچنین به عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی برای کمک به کاهش اثرات جزیره گرمایی در محیط شهری در برنامه «محلات خنک[17]» انتخاب شده است. دمای هوا در محوطه پارکینگ‌های بتنی تراوا معمولا خنک‌تر از آسفالت متراکم است. پارکینگ‌های بتنی تراوا، ماندگاری برف و یخ را نیز کاهش می‌دهند و عاری از آلودگی برای محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شوند. محدوده عملی ضخامت طراحی روسازی‌های بتنی تراوا برای اکثر پارکینگ‌ها، از ۲۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر است.

۳-۳-۱-۲- پیاده‌روها

در بسیاری از مناطق، بتن تراوا پیش از استفاده گسترده در بتن‌ریزی محوطه پارکینگ‌ها، برای نخستین بار با هدف آزمایش و کسب تجربه در پیاده‌روها به کار رفت. پیاده‌روهای بتنی تراوا چه به صورت درجاریخته و یا پیش‌ساخته، مانند پارکینگ‌های بتنی تراوا، همان مزایای مربوط به کنترل رواناب سیلابی و کاهش اثرات جزیره گرمایی در محیط شهری را ارائه می‌دهند، اما مزیت ویژه کاهش احتمال لغزش عابرین پیاده را نیز دارند (Kevern و همکاران، ۲۰۱۲). محدوده عملی ضخامت طراحی پیاده‌روهای بتنی تراوا برای مقاطع بدون تردد روزمره وسایل نقلیه، از ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر است.

---

[16] Best Management Practices
[17] Cool Communities

۳-۳-۱-۳- سواره‌روها

بتن تراوا معمولا برای کاربرد به عنوان سطح و یا لایه اصطکاکی در روسازی سواره‌روها در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، محدوده عملی ضخامت‌های طراحی برای بتن تراوای روسازی سواره‌روها از ۲۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر است. با این حال، ضخامت روکش‌های با اتصال کامل[18] (Maynard، ۱۹۷۰؛ Schaefer و همکاران، ۲۰۱۰) در حدود ۵۰ میلی‌متر بوده است. بزرگراه‌های متعددی در اروپا با استفاده از پوشش بتنی تراوای اصلاح شده با لاتکس ساخته شده‌اند که امکان زهکشی روسازی و کاهش صدای ناشی از تماس با لاستیک وسایل نقلیه را فراهم می‌کند. اصلاح با لاتکس منجر به ایجاد ویژگی‌های مکانیکی مطلوب‌تری می‌شود (Pindado و همکاران، ۱۹۹۹). یک روکش با اتصال کامل بتنی تراوا با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر که در سال ۲۰۰۸ در مرکز آزمایش اداره حمل و نقل مینه‌سوتا (MNROAD) ساخته شد، با وجود عبور و مرور کامیون عملکرد خوبی از خود نشان داد و با داشتن شدت آلودگی صوتی[19] (OBSI) کمتر از ۹۵ دسی‌بل، یکی از کم‌صداترین روسازی‌های بتنی در ایالات متحده بود (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۰؛ Kevern و همکاران، ۲۰۱۱).

۳-۳-۲- لایه‌های اساس و زهکش‌های کناری نفوذپذیر

لایه اساس بتنی تراوا، آبی را که به‌طور معمول در زیر روسازی جمع می‌شود را زهکشی می‌کند. این نوع ساخت به کاهش پمپ‌شدگی (بیرون‌زدگی گل و لای) مصالح لایه زیراساس که می‌تواند منجر به خرابی روسازی شود کمک می‌کند. در برخی ایالت‌های آمریکا ادارات حمل و نقل استانداردهایی را برای ساخت لایه‌های اساس و زهکش‌های کناری نفوذپذیر با استفاده از بتن تراوا تهیه کرده‌اند. داکوتای شمالی، کالیفرنیا، ایلینوی، اوکلاهاما و ویسکانسین دارای چنین مشخصات استانداردی هستند (Mathis، ۱۹۹۰). بتن تراوا در این کاربردها معمولا مقاومت کمتری دارد (۷ مگاپاسکال یا کمتر) و اغلب همراه با یک زمین‌پارچه بافته‌نشده[20] استفاده می‌شود. می‌توان از سامانه مشابهی برای تثبیت شیب‌ها نیز استفاده کرد. لایه‌های زیرین باند فرودگاه بین‌المللی Lambert در St. Louis ایالت میزوری ایالات متحده، از جنس بتن تراوا هستند که به یک سامانه زهکشی متصل است (شکل ۳-۳-۲).

شکل ۳-۳-۲- لایه اساس بتنی تراوا پیش از روسازی بتنی متعارف در فرودگاه بین‌المللی Lambert

[18] Bonded overlays
[19] On-board sound intensity
[20] Nonwoven geotextile

۳-۳-۳- شانه راه

به منظور کاهش پمپ‌شدگی قسمت زیرین روسازی‌های بتنی در فرانسه از شانه‌های بتنی تراوا استفاده شده است. در ایالات متحده، شانه‌های بتنی بزرگراه در چندین ایالت از جمله نوادا، یوتا، میسوری و نیویورک به کار رفته‌اند. در نیویورک، از شانه‌های بتنی تراوا برای کاهش نواحی مواجه با مشکلات ناشی از سیلاب استفاده شده است (شکل ۳-۳-۳).

شکل ۳-۳-۳- شانه بتنی تراوا به منظور کنترل سیلاب

۳-٤- سایر کاربردها

۳-٤-۱- زهکش‌ها

ادارات آب و برق ایالات متحده از بتن تراوا برای ساخت کف‌پوش زهکش نفوذپذیر و همچنین زهکش‌های زیر سازه‌های آبی استفاده کرده‌اند. این زهکش‌ها، فشارهای برخاستی[21] را کاسته و امکان زهکشی آب زیرزمینی از زیر لوله‌های فاضلاب را فراهم می‌کنند.

[21] Uplift pressure

۳-٤-۲- گلخانه‌ها

استفاده از بتن تراوا به عنوان یک سامانه ذخیره‌سازی گرما در کف گلخانه‌ها توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است (Monahan، ۱۹۸۱؛ Herod، ۱۹۸۱). کف گلخانه، به عنوان فضای ذخیره‌سازی و نیز تبادل‌گر گرمایی برای گلخانه‌های با گرمایش خورشیدی عمل می‌کند. از بتن تراوا همچنین به عنوان روکش کف گلخانه‌ها استفاده می‌شود تا از تجمع آب و و رشد علف‌های هرز جلوگیری و در عین حال سطحی بادوام و سخت برای جابجایی تجهیزات فراهم کند.

۳-٤-۳- زمین‌های تنیس و بازی

بتن تراوا به‌طور گسترده برای ساخت زمین‌های تنیس در اروپا مورد استفاده قرار گرفته است. دال‌های بتنی تراوا، امکان نفوذ آب و سپس زهکشی آن از طریق لایه اساس سنگدانه‌ای به کناره‌های دال را می‌دهند. استفاده از بتن تراوا در زیر زمین‌های چمن فوتبال، راگبی، هاکی و بیسبال، از دیگر کاربردهای مهم این بتن‌هاست.

۳-٤-٤- موانع صوتی و دیوارهای ساختمان

صداهای ناشی از منابع مختلف ترافیکی یا ساکنان یک ساختمان می‌تواند مشکل‌ساز باشد. گاهی اوقات برای کاهش صدا، موانع صوتی و دیوارهای داخلی با بتن تراوا ساخته می‌شوند. ساختار دارای دانه‌بندی یکنواخت در این نوع موانع و دیوارها، به جای انعکاس صدا به محل دیگر، تمایل به جذب و استهلاک آن در مصالح دارد.

۳-٤-٥- به عنوان مصالح پرکننده در پشت دیوارهای حائل و تکیه‌گاه‌های کناری (کوله‌های) پل

بتن تراوا یک مصالح پرکننده موثر برای استفاده در پشت دیوارهای حائل عمودی است که مقاومت در برابر فرسایش را افزایش و فشار آب را کاهش می‌دهد. سازمان حمل و نقل سریع شهری آتلانتا[۲۲] (MARTA) از بتن تراوای اسفنجی و قابل پمپ‌شدن برای کاهش فرسایش در پشت تکیه‌گاه‌های کناری (کوله) پل‌های راه‌آهن استفاده کرده است (Wright، ۲۰۰۸).

۳-٤-٦- به عنوان بتن نیمه‌سبک

از بتن تراوا باتوجه به وزن مخصوص نسبتا کم آن (در محدوده ۲۰۰۰ تا ۱۸۰۰) به ویژه در دیوار ساختمان‌ها برای کاهش نسبی جرم ساختمان استفاده می‌شود که بتن نیمه‌سبک سازه‌ای نام دارد.

فصل ٤

مصالح

٤-١- کلیات

بتن تراوا در ساده‌ترین حالت از سیمان پرتلند معمولی، سنگدانه درشت با دانه‌بندی باز (یکنواخت) و آب تشکیل می‌شود. مخلوط بتن تراوا معمولا دارای سنگدانه ریز کم یا بدون آن است. این مخلوط، توده‌ای از سنگدانه‌های درشت را تشکیل می‌دهد که توسط لایه نازکی از خمیر سیمان سخت‌شده، به یکدیگر چسبانده شده‌اند. این نوع ساختار باعث ایجاد حفره‌های به‌هم‌پیوسته (معمولا در اندازه‌های ۵ تا ۱ میلی‌متری) بین سنگدانه‌های درشت می‌شود که امکان نفوذ آب با نرخی بسیار بیشتر از بتن معمولی را می‌دهد. بتن تراوا نوع خاصی از بتن با تخلخل بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود. تفاوت دیگر این دو نوع بتن متخلخل، عمدتا مبتنی بر ساختار حفرات آن‌ها است. بتن‌های سبکدانه حاوی درصد زیادی از حفره‌های تقریبا غیرمتصل هستند. در حالی که بتن تراوا حاوی درصد زیادی (۳۵ تا ۱۵ درصد) از حفرات به هم پیوسته است که امکان عبور سریع آب از میان توده بتن را فراهم می‌کند.

٤-٢- سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن تراوا

سنگدانه درشت مورد استفاده برای بتن معمولی (نسبتا ناتراوا) با دانه‌بندی مشخص‌شده در ASTM C33/ C33M ممکن است فضای خالی کافی برای ایجاد یک مخلوط متخلخل مناسب را داشته یا نداشته باشد[۲۳]. چگالی انبوهی و حفرات سنگدانه‌ها باید مطابق با ASTM C29/C29M تعیین شود تا از وجود فضای خالی کافی برای مقدار سیمان مشخص‌شده و در عین حال حفظ مقدار حفرات تعیین‌شده اطمینان حاصل شود. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن تراوا، سنگدانه‌های درشت با دانه‌بندی باز (یکنواخت) و از نظر اندازه بین الک‌های ۹/۷۵ و ۴/۷۵ میلی‌متر هستند. گاهی اوقات، ممکن است در کاربردهای صنعتی از سنگدانه‌های بزرگ‌تر با ابعاد ۱۹ یا ۱۲ میلی‌متر یا در کاربرد به عنوان روسازی پیاده‌رو از سنگدانه‌های کوچکتر با ابعاد ۳ میلی‌متر استفاده شود. سنگدانه‌های گردگوشه و شکسته، با وزن معمولی یا سبک، برای ساخت بتن تراوا استفاده شده‌اند. تحقیقات نشان داده‌اند که ممکن است اضافه کردن سنگدانه ریز یا وجود آن، باعث افزایش مقاومت فشاری و چگالی شود، اما در پی آن نرخ جریان آب از میان بتن تراوا را کاهش می‌دهد (Schaefer و همکاران، ۲۰۰۶). تحقیقات بعدی و تجربه تولیدکننده‌ها نشان داده است که اگر فضای خالی کافی در ساختار سنگدانه درشت وجود داشته باشد، اضافه کردن ۵ درصد سنگدانه ریز (ماسه) باعث کاهش حفرات می‌شود و در عین حال مزایای دیگری مانند افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن را نیز فراهم می‌کند (Kevern، a۲۰۰۸).

کیفیت سنگدانه مورد استفاده در بتن تراوا به اندازه بتن متعارف اهمیت دارد. باید از به کار بردن سنگدانه‌های تخت یا کشیده و سوزنی اجتناب شود. سنگدانه‌های درشت با محدوده اندازه‌ای باریک (تک‌اندازه[۲۴]) باید سخت، تمیز و عاری از پوشش‌هایی مانند گرد و غبار، رس یا سایر مواد شیمیایی جذب شده باشند که می‌توانند تاثیر مخربی بر چسبندگی خمیر و سنگدانه یا هیدراته‌شدن سیمان بگذارند.

منابع سنگدانه با سابقه عملکرد قابل قبول ارجحیت دارند. در صورت عدم دسترسی به منبع سنگدانه با سابقه

عملکرد قابل قبول، می‌توان ترکیبی از آزمایش‌ها را انجام داد تا مبنایی برای ارزیابی مناسب بودن سنگدانه موردنظر برای استفاده در مخلوط بتن تراوا ایجاد شود (Kevern و همکاران، ۲۰۱۰). در شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن، اطمینان از سلامت سنگدانه سازگار با شرایط قابل قبول برای آن محل، دارای اهمیت زیادی است. علاوه بر این، آزمایش مقایسه‌ای مخلوط‌های یکسان با سنگدانه‌های موردنظر مطابق با ASTM C1747/C1747M، شاخصی از مناسب بودن آن برای استفاده در بتن تراوا را ارائه می‌دهد.

برای منابع ناشناخته سنگدانه، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده طبق ASTM C33/C33M و ASTM D448 باید توسط مهندس مشاور باتجربه در زمینه طراحی مخلوط بتن تراوا یا مهندس مواد باتجربه در زمینه بتن تراوا مورد بررسی قرار گیرد. بررسی نمونه‌ها توسط یک متخصص سنگ‌نگاری باتجربه می‌تواند ویژگی‌هایی مانند کیفیت، سختی، جذب آب، درجه هوازدگی و وجود پوشش‌های مضری که می‌توانند عملکرد مصالح را در زمان بهره‌برداری مختل نمایند را مشخص کند.

رطوبت سنگدانه در زمان اختلاط مهم است. مقدار آب جذب‌شده سنگدانه برای دستیابی به شرایط اشباع با سطح خشک[۲۵] (SSD) در صورت لزوم باید به کمک آماده‌سازی انباشته سنگدانه برآورده شود. استفاده از سنگدانه خشک می‌تواند منجر به ایجاد مخلوطی شود که برای بتن‌ریزی و متراکم‌کردن، کارایی کافی را نداشته باشد.

همچنین استفاده از سنگدانه‌های دارای رطوبت بیش از حد می‌تواند به شسته‌شدن و زهکشی خمیر منجر شود که گهگاه باعث گرفتگی ساختار حفرات موردنظر در بخش‌های تحتانی می‌شود.

٤-۳- مواد سیمانی

از سیمان پرتلند مطابق با مشخصات ASTM C150/C150M، سیمان آمیخته مطابق با مشخصات ASTM C595/C595M، یا سیمان هیدرولیکی مطابق با مشخصات ASTM C1157/C1157M به عنوان چسباننده اصلی استفاده می‌شود[۲۶]. علاوه بر سیمان پرتلند، می‌توان از مواد سیمانی مکمل[۲۷] مانند سرباره و پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی شامل خاکستر بادی و دوده‌سیلیس نیز استفاده کرد که در این صورت باید به ترتیب الزامات ASTM C618،ASTM C989/C989M و ASTM C1240 را برآورده کنند. آزمایش مواد در مخلوط‌های آزمون اکیدا توصیه می‌شود تا تایید گردد که سازگاری سیمان با مواد افزودنی از نظر تمایل به ایجاد گیرش کاذب مشکل‌ساز نیست و زمان گیرش، نرخ کسب مقاومت، تخلخل و نفوذپذیری می‌توانند برای فراهم کردن ویژگی‌های موردنیاز برای شرایط پیش‌بینی‌شده بتن‌ریزی و بهره‌برداری بدست آیند.

---

[25] Saturated surface dry

[۲۶] در ایران استاندارد ۳۸۹ برای سیمان‌های پرتلند و استاندارد ۲۳۴۰۲ برای سیمان‌های آمیخته کاربرد دارد و در آینده ممکن است استاندارد عملکردی سیمان نیز تهیه گردد.

[27] Supplementary cementitious materials

٤-٤- آب

کیفیت آب مورداستفاده برای بتن تراوا توسط همان الزامات آب برای بتن متعارف بررسی می‌شود. نسبت آب به مواد سیمانی (*cm/w*) در طرح مخلوط بتن تراوا باید تقریبا کم باشد (معمولا از ۰/۴۲ تا ۰/۳۴) زیرا آب بیش از حد منجر به شسته شدن خمیر و در نتیجه، گرفتگی سامانه حفرات می‌گردد. آب بسیار کم می‌تواند به هیدراته‌شدن نامناسب سیمان و در پی آن کاهش مقاومت، دشواری پرداخت و واچیدگی (کنده شدن) بتن منجر شود. بنابراین، باید بر اضافه کردن آب در کارگاه به دقت نظارت شود. مباحث تکمیلی در مورد کیفیت آب در ACI 301 ارائه شده است. تنها در صورتی می‌توان از آب بازیافتی حاصل از کارهای بتنی استفاده کرد که مطابق با الزامات 28ASTM C94/C94M یا AASHTO M 157 باشد. در مواردی که از آب گرم استفاده می‌شود، بتن‌ریزی باید برای اطمینان از عدم ایجاد گیرش سریع یا آنی بررسی شود. پیش از اینکه کارایی مخلوط از دست برود، باید استفاده از آب گرم را متوقف نمود یا بتن‌ریزی را متوقف کرد.

٤-٥- مواد افزودنی

به منظور پخش بهتر ذرات مواد سیمانی و نیز بهبود روان‌شدگی بتن‌های تراوا دارای نسبت کم آب به مواد سیمانی، از افزودنی‌های کاهنده یا فوق‌کاهنده آب مطابق با الزامات 29ASTM C494/C494M استفاده می‌شود. برای تثبیت و کنترل هیدراته‌شدن سیمان، از افزودنی‌های تثبیت[۳۰] و کندگیرکننده استفاده می‌گردد که اغلب هنگام سروکار داشتن با مخلوط‌های دارای نسبت کم آب به مواد سیمانی مانند بتن تراوا ارجحیت دارند. استفاده از افزودنی‌های تثبیت‌کننده هیدراته شدن سیمان به عنوان روشی برای کمک به افزایش زمان کاربری با مخلوط، در مطالعات گزارش شده است. این افزودنی‌ها به ویژه برای بتن‌ریزی در هوای گرم مفید هستند (NRMCA[۳۱]، ۲۰۰۹). افزودنی‌های تثبیت‌کننده و کندگیرکننده می‌توانند به عنوان روان‌کننده برای تخلیه بتن از مخلوط‌کن بکار روند و علاوه بر آن می‌توانند حمل و نقل و ویژگی‌های عملکردی درجای بتن را بهبود بخشند. هنگام بتن‌ریزی در هوای سرد نباید از افزودنی‌های زودگیرکننده استفاده کرد. گاهی اوقات برای جلوگیری از شسته شدن خمیر، از افزودنی‌های اصلاح‌کننده گرانروی[۳۲] (VMA) نیز استفاده می‌شود. هنگامی که در مخلوط بتن از افزودنی‌های متعدد استفاده می‌شود، توصیه می‌گردد که بتن‌ریزی با مخلوط آزمون برای شناسایی ناسازگاری مواد افزودنی و تایید اینکه ویژگی‌های موردنظر بتن تازه و سخت‌شده همواره قابل دستیابی هستند، انجام گیرد.

---

[۲۸] در ایران استاندارد ۶۰۴۴ و ضوابط آبای سال ۱۴۰۰ کاربرد دارد.

[۲۹] در ایران استاندارد ۲۹۳۰ کاربرد دارد.

[۳۰] Stabilizer : معمولا افزودنی‌هایی با کندگیری کنترل‌شده هستند.

[31] National Ready Mixed Concrete Association

[32] Viscosity modifying admixtures

استفاده از افزودنی‌های هوازا[۳۳] مطابق با الزامات ASTM C260/C260M[34]، معمولا در بتن‌های تراوا رایج نیست اما می‌توان در محیط‌های مستعد یخ‌زدن و آب‌شدن از آن‌ها استفاده نمود. هیچ روش قابل اطمینانی برای تعیین مقدار هوای ایجاد شده در مخلوط بتن تراوا وجود ندارد (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹e). در تحقیقات انجام شده استفاده از ماده هوازا برای ایجاد مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن مخلوط‌های بتن تراوا در نظر گرفته شده است (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۵b؛ Schaefer و همکاران، ۲۰۰۶؛ Baas، ۲۰۰۶؛ Kevern، ۲۰۰۶؛ Kevern و همکاران، ۲۰۰۸b و ۲۰۰۹e). اگرچه مقدار هوای ایجادشده را نمی‌توان به راحتی اندازه‌گیری کرد، اما در مواردی که بتن در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن قرار دارد، استفاده از یک افزودنی هوازا عملی سنجیده است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از الیاف در مخلوط‌هایی که در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن قرار دارند، برای بهبود دوام بتن در شرایط آب و هوایی سرد موفقیت‌آمیز بوده است (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸a). الیاف در صورت استفاده، باید از همان ابتدا در طرح مخلوط درنظر گرفته شوند، نه اینکه صرفا به مخلوط موجود اضافه شوند، زیرا الیاف می‌توانند ویژگی‌های بتن تازه و سخت‌شده را به میزان قابل توجهی تغییر دهند.

ساختار حفره‌دار و باز بتن تراوا، به ویژه در شرایط رطوبت کم یا وزش باد، این امکان را می‌دهد که رطوبت به سرعت از مخلوط تبخیر شود. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی خاص کاهش تبخیر، در شرایط محیطی که وزش باد باعث خشک‌شدن می‌شود نیز سودمند گزارش شده است. این شرایط محیطی، باعث ایجاد نرخ تبخیر زیادی می‌شود که بازه زمانی که در آن مخلوط به موثرترین شکل ریخته می‌شود را کاهش می‌دهد. در این خصوص، استفاده از کندکننده‌های تبخیر می‌تواند موثر واقع گردد. طبق تحقیقات انجام‌شده، عوامل عمل‌آوری درونی[۳۵] (ICAs) بر پایه پلیمر فوق جاذب[۳۶] می‌توانند رطوبت بتن تراوا را حفظ، و آب اضافه برای هیدراته‌شدن کامل سیمان را فراهم کنند (Kevern و Farney، ۲۰۱۲). برای مطالعه اطلاعات تکمیلی در مورد عوامل عمل‌آوری درونی به ACI 212.3R مراجعه شود.

فصل ۵

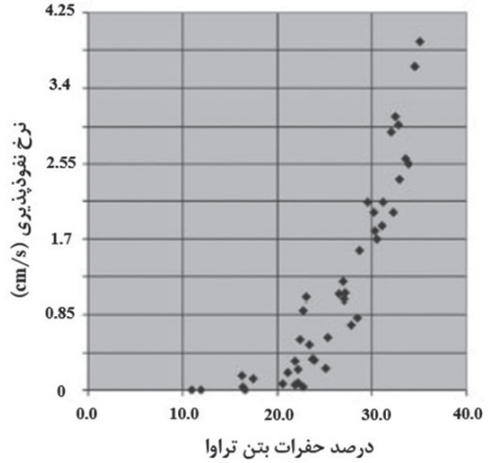
ویژگی‌ها

۵-۱- کلیات

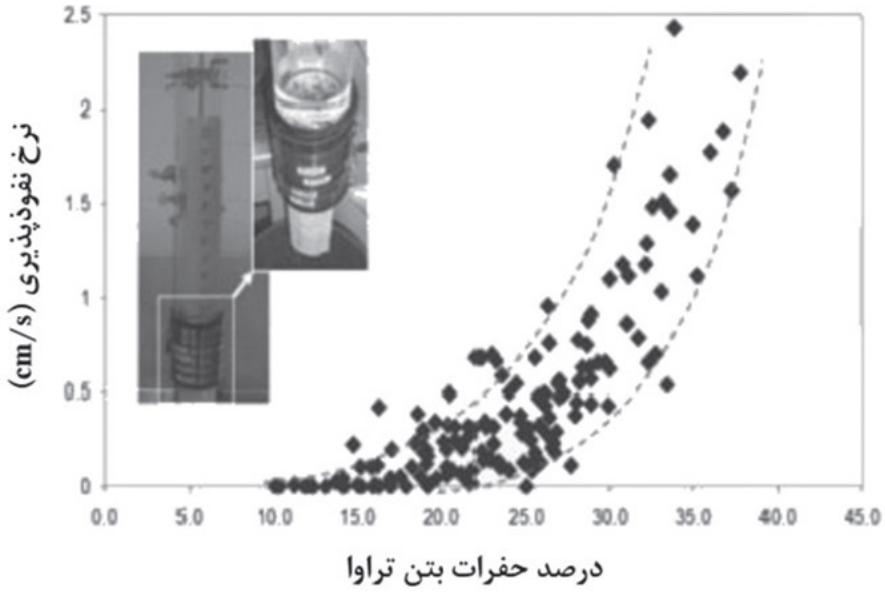
ویژگی‌های مختلف بتن تراوا در درجه اول به تخلخل بتن، مقدار مواد سیمانی، مقدار آب، میزان تراکم و حفرات سنگدانه آن بستگی دارد. بررسی‌ها عمدتا مبتنی بر نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بوده است و برخی داده‌ها نیز از نتایج ابزار دقیق نصب‌شده در کارگاه به‌دست آمده‌اند. ASTM C1688/C1688M، ASTM C1701/C1701M، ASTM C1747/C1747M و ASTM C1754/C1754M به‌طور ویژه برای استفاده در مورد بتن تراوا در نظر گرفته شده‌اند. مهندس طراح باید هنگامی که در مورد بتن تراوا، به روش‌های آزمایش درنظر گرفته‌شده برای بتن متعارف، سنگدانه، مصالح بنایی، آسفالت یا سایر مصالح ارجاع می‌دهد، محتاطانه عمل کند. در سراسر این فصل، از مرجع Meininger (۱۹۸۸) استفاده می‌شود، زیرا اولین مرجع مهمی است که ویژگی‌های مصالح بتن تراوا را به‌گونه‌ای ارائه کرده است که مقادیر آن‌ها به‌طور منسجم در گستره تحقیقات بعدی اعتبارسنجی شده‌اند.

۵-۲- نفوذپذیری

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن تراوا، توانایی آن در عبور آب از میان بافت آن است. نرخ نفوذپذیری بتن تراوا، با تخلخل و اندازه منافذ نسبت مستقیم دارد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که برای دستیابی به نفوذ قابل‌توجه، حداقل تخلخل تقریبی ۱۵ درصد موردنیاز است (Meininger، ۱۹۸۸). ضریب نفوذپذیری برای تخلخل ۲۰ تا ۲۵ درصد، تقریبا ۰/۹ s/cm گزارش شده است (گزارش Brite/Euram، ۱۹۹۴). شکل ۵-۲-الف (Meininger، ۱۹۸۸)، رابطه بین درصد حفرات هوا و نرخ نفوذپذیری مخلوط بتن تراوا را نشان می‌دهد. از آنجا که با افزایش درصد حفرات هوا، نفوذپذیری افزایش و در نتیجه مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد، چالش موجود در طرح مخلوط بتن تراوا، ایجاد تعادل بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری قابل قبول است. از آنجا که نفوذپذیری فقط تابعی از تخلخل کل نیست و به اندازه منافذ نیز بستگی دارد، در یک مقدار معین حفرات، نفوذپذیری می‌تواند تغییرات زیادی داشته باشد که توسط اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط کنترل می‌شود. شکل ۵-۲-ب (Kevern، ۲۰۰۶)، رابطه بین درصد حفرات و نفوذپذیری بتن تراوا را برای مخلوط‌های دارای طرح مخلوط و اجزای تشکیل‌دهنده متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲-الف- رابطه بین درصد حفرات و نرخ نفوذپذیری بتن تراوا (Meininger، ۱۹۸۸)



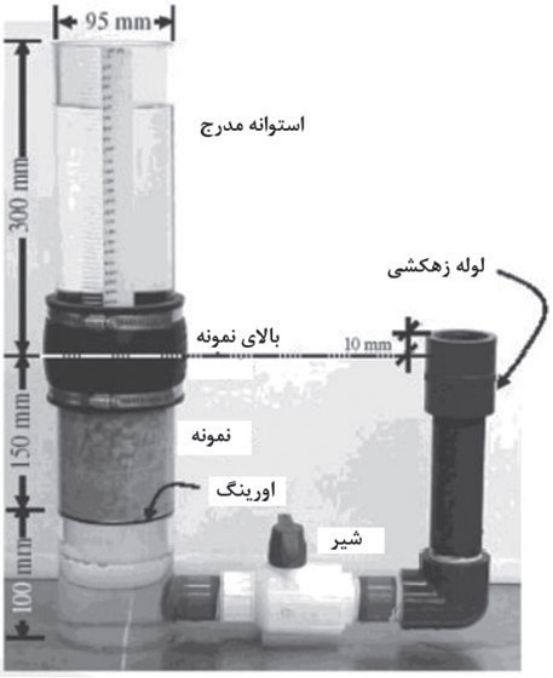
شکل ۵-۲-ب- تاثیر درصد حفرات بر نرخ نفوذپذیری بتن تراوا (Kevern، ۲۰۰۶)

همانطور که در شکل ۵-۲-پ نشان داده شده است، می‌توان نفوذپذیری بتن تراوا را با استفاده از یک نفوذسنج ساده با بار افتان اندازه‌گیری کرد (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۳). در این روش، آزمونه با غشایی از جنس لاتکس محصور می‌شود تا از جریان آب در راستای کناره‌های آن جلوگیری شود. آب به استوانه مدرج اضافه می‌شود تا محفظه آزمونه و لوله زهکشی پر گردد. آماده‌سازی آزمونه با اجازه دادن زهکشی آب از طریق لوله تا زمانی که سطح آب در استوانه مدرج با بالای لوله زهکشی برابر شود، انجام می‌گیرد. این کار حفره‌های هوا در آزمونه را به حداقل می‌رساند و از اشباع کامل آن اطمینان حاصل می‌شود. استوانه مدرج در حالی که شیر آب بسته است، با آب پر می‌شود. سپس شیر آب، باز و زمان لازم برای افت سطح آب از بار آبی اولیه h_1 به بار آبی نهایی h_2 بر حسب ثانیه اندازه‌گیری می‌گردد. استفاده از بار آبی اولیه h_1 ، ۲۵۰ میلی‌متر و بار آبی نهایی h_2 ، ۲۵ میلی‌متر در عمل کارآمد نشان داده شده است. ضریب نفوذپذیری k (بر حسب s/mm) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$k = A/t$$

که در آن A ثابتی برابر با ۱۹۲ میلی‌متر است.

برای تعیین نفوذپذیری بتن تراوا حاوی سیمان پرتلند (PCC) در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۱۰ s/cm، از یک نفوذسنج سه محوری ساده با دیواره انعطاف‌پذیر و بار ثابت استفاده شده است (Crouch و همکاران، ۲۰۰۶). به نظر می‌رسد که نفوذپذیری با بار آبی ثابت، تابعی از شسته‌شدن خمیر، مقدار حفرات موثر هوا و اندازه حفرات است. نتایج روش‌های بار افتان و بار ثابت برای نمونه‌های آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی دارند.



شکل ۵-۲-پ- دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن تراوا توسط یک نفوذسنج ساده با بار آبی افتان (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۳)

به غیر از تخلخل و اندازه حفرات، یکی از عوامل مهمی که بر نفوذپذیری بتن تراوا تاثیر می‌گذارد، پیچ درپیچی (پیچ و خم)[۳۷] یا درجه اتصال شبکه منفذی است. هیچ روش ساده‌ای برای اندازه‌گیری اتصال منافذ در بتن تراوا وجود ندارد. Neithalath و همکاران (۲۰۰۶) استفاده از روش‌های مبتنی بر مقاومت در برابر جریان الکتریکی[۳۸] برای تعیین ضریب اتصال منافذ بتن‌های تراوا را به منظور مرتبط نمودن آن با ویژگی‌های هیدرولیکی مصالح مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، برای تعیین دقیق اتصال منافذ در بتن‌های تراوا از لایه‌نگاری رایانه‌ای اشعه ایکس نیز استفاده شده است (Kevern، ۲۰۰۶).

مزایای زیست محیطی بتن تراوا طی تحقیقات مختلف کاملا اثبات شده است. Deo و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از آزمایش‌های به دقت طراحی‌شده و مدل‌سازی، کارایی بتن تراوا برای حبس روغن ریخته از خودروها در ساختار حفرات خود را بررسی نمودند. طرح مخلوط‌های بتن تراوا، با تخلخل بین ۲۵ تا ۱۳ درصد و با استفاده از دو سنگدانه دارای اندازه متفاوت تهیه شد. حبس و بازیابی روغن از طریق آزمایش بر روی لایه‌های ۵۰ میلی‌متری آزمونه‌های بتن تراوا با استفاده از روش سنجش وزنی قطعات[۳۹] تعیین شد. مشاهده گردید که تخلخل ۲۰ درصد برای حبس بهینه روغن در ساختار منافذ بتن تراوا ایده‌آل است. به منظور ایجاد چارچوبی برای مدل‌سازی حبس روغن در بتن تراوا، از یک مدل ایده‌آل چشمه منفذ[۴۰] استفاده شد. پارامترهای مصالح و همچنین ویژگی‌های ورودی که به احتمال زیاد بر حبس و بازیابی روغن تاثیرگذار هستند، شناسایی شدند. برای پیش‌بینی حبس روغن در آزمونه‌های بتن تراوا، از یک مدل

[37] Tortuosity
[38] Impedance-based methods
[39] Partition gravimetric
[40] Pore aperture model

مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیکی[41] استفاده شد. این روش مدل‌سازی، تخمین‌های خوبی از میزان احتباس روغن ارائه می‌دهد. عملکرد مدل مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیکی از نظر آمار خطا مورد قضاوت قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل، در مقایسه با نتایج بدست‌آمده از روش برازش خطی با پارامترهای ورودی یکسان قابل اعتمادتر بود. انتظار می‌رود که این مطالعه به آزمایش‌های بیشتر روی بهینه‌سازی ساختار منافذ بتن تراوا برای کاربردهایی از جمله حبس روغن و انتقال آب منجر شود.

۵-۳- مقاومت فشاری

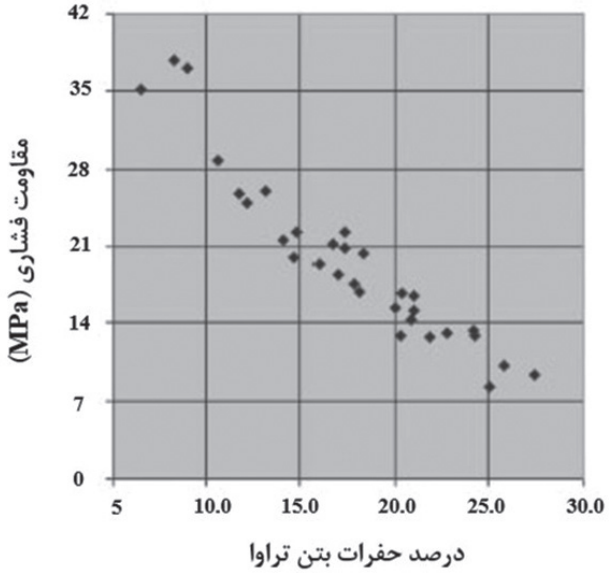
مقاومت فشاری بتن تراوا، به میزان زیادی تحت تاثیر طرح مخلوط و انرژی تراکمی[42] در حین بتن‌ریزی قرار می‌گیرد. Meininger (۱۹۸۸) رابطه بین مقاومت فشاری بتن تراوا و مقدار حفرات را بررسی کرد. نتایج این بررسی در شکل ۵-۳-الف نشان داده شده است. در این مطالعه مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی روی دو نوع سنگدانه درشت با اندازه‌های متفاوت انجام شد. انرژی تراکمی و دانه‌بندی سنگدانه برای هر اندازه سنگدانه متفاوت بود. Kevern (۲۰۰۶) نیز همان رابطه مقاومت فشاری بتن تراوا و مقدار حفرات را مورد بررسی قرار داد، اما از طرح مخلوط‌های متنوع‌تر شامل نوع سنگدانه، اندازه سنگدانه، دانه‌بندی سنگدانه، مقدار خمیر، ترکیب خمیر و نسبت آب به مواد سیمانی مختلف استفاده کرد (شکل ۵-۳-ب). اساسا هر دو مطالعه نشان می‌دهند که رابطه‌ای قوی بین مقدار حفرات و مقاومت فشاری وجود دارد؛ با این حال، می‌توان مخلوط‌ها را برای افزایش مقاومت فشاری به ازای مقداری مشخص از حفرات اصلاح نمود. نتایج مطالعه Mulligan (۲۰۰۵) نیز نشان می‌دهد که بین مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن تراوا رابطه‌ای وجود دارد (شکل ۵-۳-پ). اگرچه در این مطالعه فقط یک اندازه سنگدانه درشت مورد استفاده قرار گرفت، اما انرژی تراکمی و نسبت سنگدانه به سیمان متفاوت بود. داده‌های مطالعه Meininger (۱۹۸۸) نشان می‌دهد که دستیابی به مقاومت فشاری نسبتا زیاد در مخلوط‌های بتن تراوا امکان‌پذیر است، اما مقاومت زیاد فقط با کاهش مقدار حفرات حاصل می‌شود (شکل ۵-۳-الف). با این وجود، کاهش حفرات هوا به افت بازدهی نفوذ در بتن تراوا منجر می‌شود. Suleiman و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند زمانی که دامنه نوسان متراکم‌کننده از ۰/۱۲۷ میلی‌متر به ۰/۰۰۳۴ میلی‌متر کاهش یافت، ۱۱ درصد کاهش در مقاومت فشاری مشاهده شد. Crouch و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که افزایش مدول نرمی سنگدانه‌ها به کاهش مقاومت فشاری منجر می‌شود. Mahboub و همکاران (۲۰۰۸) هشدار می‌دهند که مقاومت مغزه‌های کارگاهی ممکن است به‌طور قابل‌توجهی با مقاومت استوانه‌های آزمون ساخته‌شده متفاوت باشد.

اگرچه نسبت آب به مواد سیمانی مخلوط بتن تراوا برای ایجاد مقاومت فشاری و ساختار حفرات مهم است، رابطه بین نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت فشاری بتن معمولی، در مورد بتن تراوا صدق نمی‌کند.

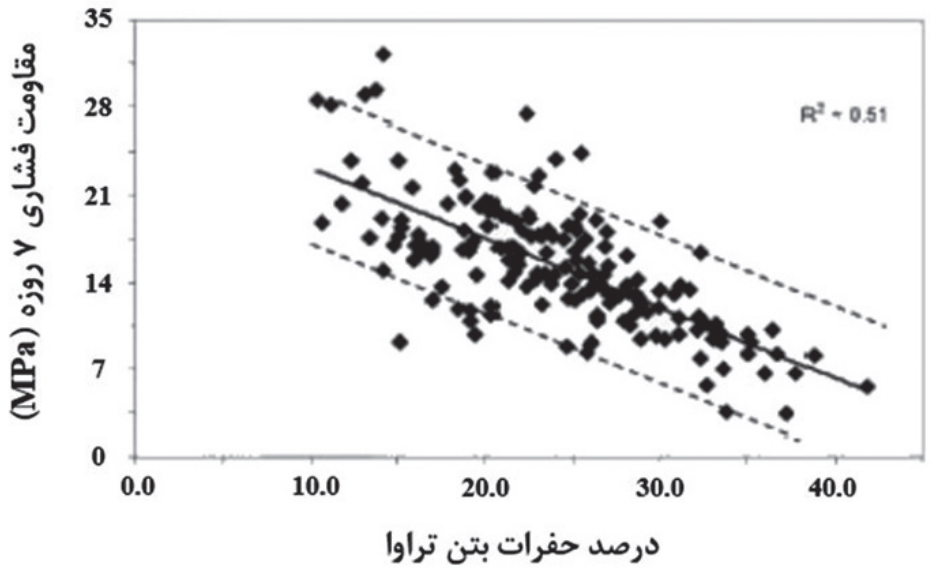
---

41 Genetic programming
42 Compaction effort

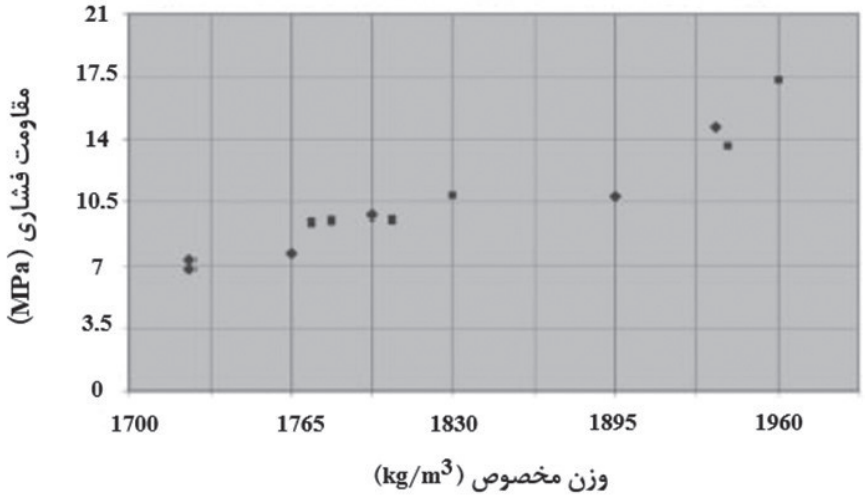
نسبت آب به مواد سیمانی زیاد می‌تواند به جریان یافتن خمیر از لابه‌لای سنگدانه منجر شود و ساختار حفرات را پر کند. نسبت آب به مواد سیمانی کم نیز می‌تواند به کاهش چسبندگی بین ذرات سنگدانه منجر شود که در نتیجه باعث چگالی کم و واچیدگی می‌گردد. رابطه بین نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار حفرات مخلوط بتن تراوا (با مقدار سیمان و سنگدانه ثابت) در دو میزان انرژی تراکمی مختلف در شکل ۵-۳-ت ارائه شده است (Meininger، ۱۹۸۸). تجربه نشان داده است که نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۲ تا ۰/۳۴ باعث ایجاد پوشش مناسب برای سنگدانه و پایداری خمیر می‌شود. زمانی که در طرح مخلوط بتن تراوا از سنگدانه‌های ریز استفاده می‌شود، اعتقاد بر این است که اندازه ذرات سنگدانه ریز نسبت به سنگدانه درشت بر تخلخل و در نتیجه بر مقاومت فشاری بتن متخلخل تاثیر می‌گذارد (Onstenk و همکاران، ۱۹۹۳).



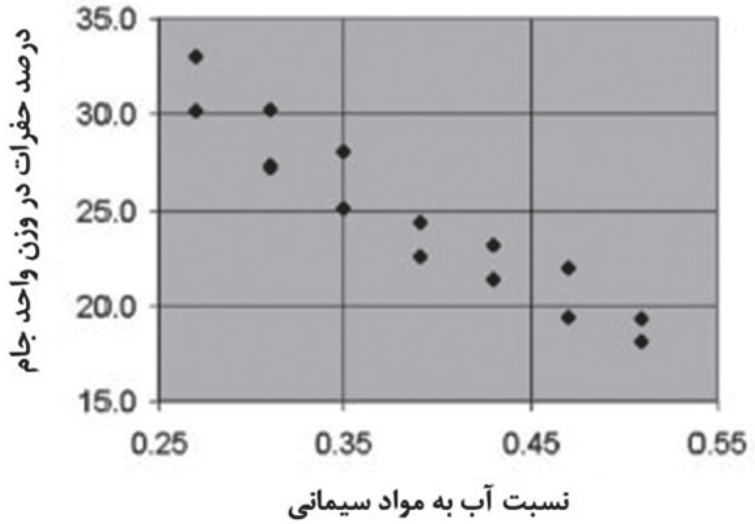
شکل ۵-۳-الف- رابطه بین درصد حفرات و مقاومت فشاری بتن تراوا (Meininger، ۱۹۸۸)



شکل ۵-۳-ب- رابطه بین درصد حفرات و مقاومت فشاری بتن تراوا (Kevern، ۲۰۰۶)



شکل ۵-۳-پ- رابطه بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن تراوا (Mulligan، ۲۰۰۵)

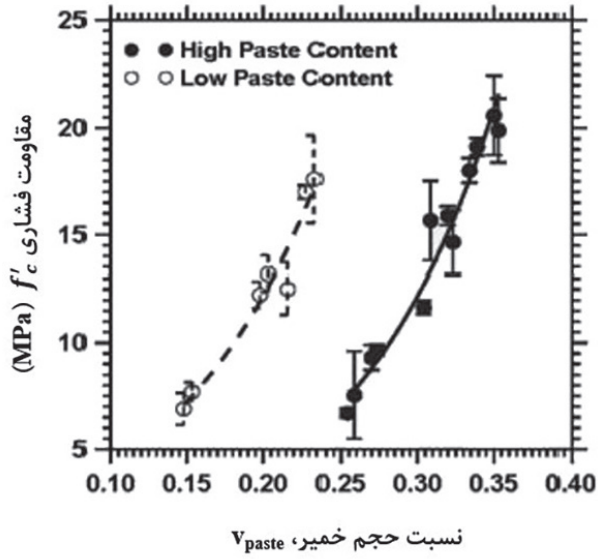


شکل ۵-۳-ت- رابطه بین درصد حفرات و نسبت آب به مواد سیمانی بتن تراوا برای دو انرژی تراکمی مختلف (Meininger، ۱۹۸۸)

مقدار کل مواد سیمانی و مقدار خمیر حاصل از مخلوط بتن تراوا برای ایجاد مقاومت فشاری و ساختار حفرات مهم است. مقدار خمیر بیش از حد ممکن است به پرشدن حفرات و در نتیجه کاهش تخلخل منجر شود. مقدار ناکافی مواد سیمانی نیز می‌تواند باعث کاهش پوشش خمیری سنگدانه و کاهش مقاومت فشاری گردد. مقدار بهینه مواد سیمانی به میزان زیادی به اندازه و دانه‌بندی سنگدانه‌ها بستگی دارد. به منظور تعیین مقدار بهینه مواد سیمانی، انجام آزمایش‌های زهکشی مواد سیمانی برای سنگدانه‌های انتخاب شده توصیه می‌شود (Nelson و Phillips، ۱۹۹۴). در برخی موارد، کاهش مقدار کل مواد سیمانی مخلوط، امکان افزایش مقدار آب و در نتیجه افزایش کارایی را بدون تاثیر بر مقدار کل خمیر فراهم می‌کند.

یکی دیگر از عواملی که می‌تواند تاثیر بسزایی بر مقاومت بتن تراوا داشته باشد، ضخامت لایه خمیری اطراف سنگدانه است. ضخامت خمیر به اندازه سنگدانه، مقدار مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی بستگی دارد. ضخامت خمیر و اندازه سنگدانه بر ویژگی‌های منافذ بتن تراوا موثر هستند و علاوه بر تخلخل

بر مقاومت نیز تاثیر می‌گذارند. علاوه بر این نشان داده شده است که میانگین فاصله آزاد بین منافذ نیز بر مقاومت نهایی بتن‌های تراوا تاثیرگذار است (Deo و Neithalath، ۲۰۱۰). Deo و Neithalath (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای تکمیلی، رابطه آماری معنی‌داری را بین مقاومت و تخلخل بدون توجه به مقادیر کل خمیر در مخلوط‌ها یافتند. همان‌طور که در شکل ۵-۳-ث نشان داده شده است، برای هر دو مقادیر خمیر کم و زیاد، روندهای متمایزی از رابطه بین مقدار خمیر و مقاومت فشاری مشاهده شد. هنگام برقراری رابطه بین مقادیر خمیر و مقاومت فشاری بتن تراوا، باید تاثیر حجم نسبی سنگدانه‌ها و انرژی تراکمی را در نظر گرفت.



شکل ۵-۳-ث- رابطه بین حجم خمیر و مقاومت فشاری بتن تراوا (Doe و Neithalath، ۲۰۱۱)

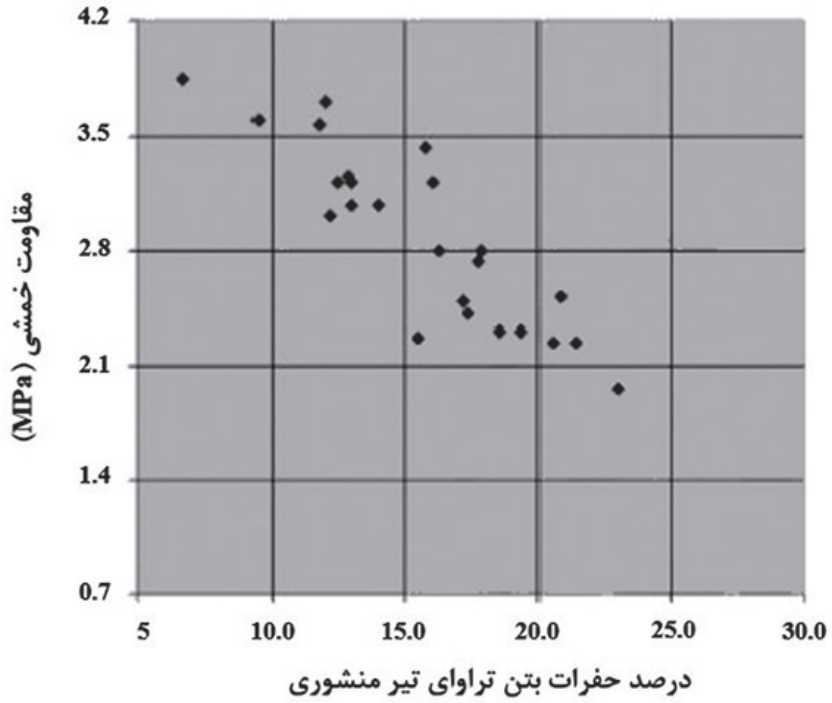
۵-٤- مقاومت خمشی

رابطه بین مقاومت خمشی و مقدار حفرات بتن تراوا بر اساس آزمونه‌های تیر منشوری در شکل ۵-۴-الف نشان داده شده است (Meininger، ۱۹۸۸). اگرچه این نتایج بر اساس آزمایش تعداد محدودی از آزمونه‌ها است، اما مقایسه داده‌های شکل ۵-۳-الف و ۵-۴-الف نشان می‌دهد که رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن تراوا وجود دارد. این رابطه مانند مقاومت فشاری به چندین متغیر بستگی دارد. رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن تراوا برای مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی در شکل ۵-۴-ب نشان داده شده است (Meininger، ۱۹۸۸). اضافه کردن مقدار کمی ماسه (تقریبا ۵ درصد حجمی) باعث افزایش مقاومت خمشی بتن تراوا می‌شود (Neithalath، ۲۰۰۴). افزایش مقاومت خمشی بتن تراوا با استفاده از یک نوع افزودنی پلیمری گزارش شده است (Onstenk و همکاران، ۱۹۹۳). مقاومت خمشی یک بتن تراوا که طرح مخلوط آن با استفاده از سنگدانه‌های با اندازه ۱۰ تا ۶ میلی‌متر انجام شده بود و تخلخل ۲۵ درصد داشت، تقریبا برابر ۳ مگاپاسکال مشاهده شده است (Nissoux و همکاران، ۱۹۹۳؛ گزارش Brite و Euram، ۱۹۹۴). قابلیت دستیابی به مقاومت خمشی زیاد برای بتن تراوا با استفاده از لایه روکش ضدسایش نشان داده شد که در این حالت مقاومت خمشی به ۶/۲ مگاپاسکال رسید (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۱).

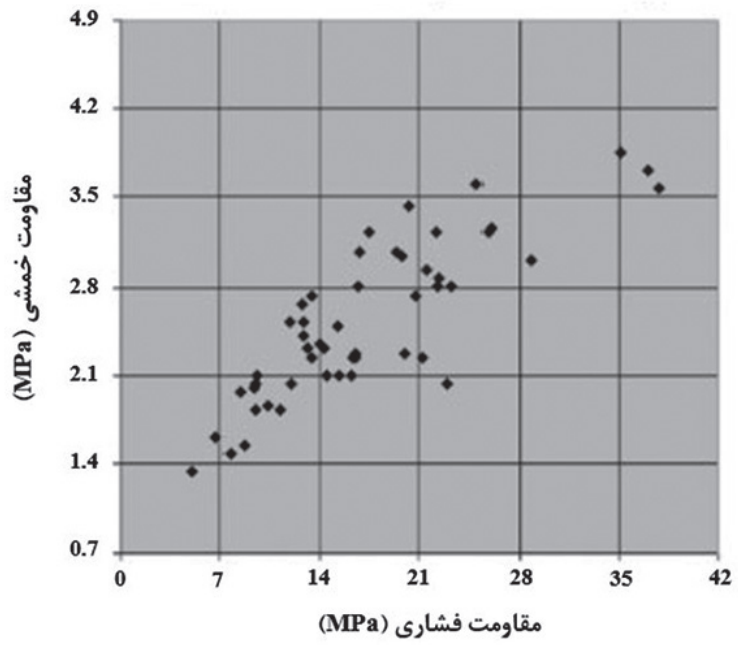
Crouch و همکاران (۲۰۰۶) رابطه بین مقاومت خمشی fr و مقاومت فشاری f_c' را برای روسازی بتنی تراوا بررسی کردند. آنها مشخص کردند که این رابطه با معادله‌ای که Shah و Ahmad (۱۹۸۵) برای بتن پیش‌ساخته ارائه کرده بودند، بیشترین مطابقت را دارد.

(۵-۴)

$$f_r = 0.083 f_c'^{2/3}$$



شکل ۵-۴-الف- رابطه بین درصد حفرات و مقاومت خمشی بتن تراوا (Meininger، ۱۹۸۸)



شکل ۵-۴-ب- رابطه بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بتن تراوا (Meininger، ۱۹۸۸)

۵-۵- دوام در شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن

فهرست واژگان سیمان و بتن ACI ، دوام را به عنوان «توانایی مصالح برای مقاومت در برابر اثر هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و سایر شرایط بهره‌برداری» تعریف می‌کند. در صورت امکان، مهم است که سامانه بتن تراوا طوری طراحی شود که هنگام یخ‌زدن اشباع نگردد. عوامل زیادی بر این موضوع تاثیر می‌گذارند، از جمله مقاومت، تخلخل، نسبت نواحی غیر قابل نفوذ به نواحی متخلخل، و تواتر نگهداری (تمیز کردن). به جز تخلخل و اندازه منافذ، یک عامل بسیار مهم که بر جریان آب از میان بتن تراوا تاثیرگذار است، پیچ در پیچی منافذ یا درجه اتصال شبکه منفذی است. عوامل مربوط به مخلوط که بیشترین تاثیر را بر مقاومت بتن در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن می‌گذارند شامل هوازایی، استفاده کردن از سنگدانه ریز، نسبت آب به مواد سیمانی و دوام سنگدانه‌ها هستند (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸c و ۲۰۱۰).

۵-۵-۱- هوازایی (حباب‌زایی)

در حالی که در اقلیم‌های رویارو با شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن، سامانه بتن تراوا نباید برای ذخیره آب در فضای منافذ بتن طراحی شود، ممکن است شرایطی وجود داشته باشد که روسازی مرطوب باشد و خمیر با وجود پر نبودن منافذ، اشباع شود. در شرایط محیطی مرطوب و یخبندان، آزمونه‌های دارای پرشدگی در مقایسه با آزمونه‌های بدون پرشدگی، درجه اشباع زیادتری دارند که باعث افزایش آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن می‌شود (Guthrie و همکاران، ۲۰۱۰). در نتیجه، مخلوط‌های در معرض یخ‌زدن باید برای دوام در شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن طراحی شوند، اگرچه شرایط در آزمایش بتن‌های کاملا اشباع ممکن است بسیار شدید باشد و بدترین حالت ممکن را نشان دهد. با این حال، آزمایش آزمایشگاهی استاندارد برای ارزیابی دوام بتن‌های تراوا در هنگام قرار گرفتن در معرض چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، مطابق با روش (الف) ارائه شده در ASTM C666/C666M انجام می‌شود که در آن نمونه‌ها در شرایط اشباع به سرعت یخ زده و آب می‌شوند. شرایط یخ‌زدن آهسته‌تر (یک چرخه در روز در مقایسه با پنج یا شش چرخه ذکرشده در روش (الف) ارائه شده درASTM C666/C666M) ممکن است امکان زهکشی آب از بتن تراوا را بدهد که در مقایسه با روش (ب) که در آن ذوب‌شدن در آب اتفاق می‌افتد، نتایج را بهبود بخشد (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۵b).

آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که هوازایی در خمیر سیمان، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن بتن را افزایش می‌دهد (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸b و ۲۰۰۹e). در آزمایشگاه و تحت شرایط آزمایش ASTM C666/C666M، نمونه‌های بتن تراوا بدون حباب هوا، پس از ۱۰۰ چرخه یا کمتر (ASTM C666/C666M، به صورت استاندارد ۳۰۰ چرخه را برای آزمایش لازم می‌داند) دچار گسیختگی شدند یعنی مدول دینامیکی نسبی آن‌ها به کمتر از ۶۰ درصد رسید. همچنین، آزمونه‌های بتن تراوا که در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن آهسته یا کند (یک چرخه در روز) قرار داشتند، نسبت به آزمونه‌هایی که مطابق شرایط روش (الف) ASTM C666/C666M در معرض پنج تا هفت چرخه در روز قرار گرفته بودند، آسیب

کمتری دیدند (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۵b). مطالعه دیگری نشان می‌دهد که بتن تراوای نیمه اشباع که در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن در هوا قرار می‌گیرد، در مقایسه با یخ‌زدن و آب‌شدن در حالت غرقاب، به‌طور قابل ملاحظه‌ای دوام بیشتری از خود نشان می‌دهد (Yang، ۲۰۰۶). این موضوع نیاز به تمیز کردن متناوب سطح بتن را نشان می‌دهد به‌طوری که از وقوع گرفتگی و تجمع آب در سطح بتن جلوگیری شود.

۵-۵-۲- استفاده از سنگدانه ریز یا الیاف

اضافه کردن مقادیر کم سنگدانه ریز یا الیاف مصنوعی برای افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن گزارش شده است (Wang و همکاران، ۲۰۰۶؛ Kevern، ۲۰۰۶؛ Kevern و همکاران، ۲۰۰۸a و ۲۰۱۵). سنگدانه ریز، گرانروی خمیر مواد سیمانی را افزایش می‌دهد و این امکان را می‌دهد که غشای ضخیم‌تری از خمیر، اطراف هر ذره سنگدانه را بپوشاند. هنگامی که این ذرات سنگدانه در هنگام بتن‌ریزی در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، سطح تماس بین آن‌ها در اثر غشای خمیر ضخیم‌تر افزایش می‌یابد و در نتیجه انتقال بار بیشتر و مقاومت زیادتری ایجاد می‌شود. زاویه تلاقی بین ذرات نیز کاهش می‌یابد که به محافظت در برابر تنش‌های ناشی از یخ‌شدن و آب‌شدن کمک می‌کند. الیاف به نگه‌داشتن ذرات سنگدانه در کنار هم کمک می‌کند و عملکرد بتن در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن را بهبود می‌بخشد.

استفاده از مقادیر زیادتر الیاف مصنوعی ماکرو در مقایسه با مقادیر کم الیاف مصنوعی میکرو، به دوام بتن تراوا کمک بیشتری می‌کند. استفاده از الیاف ماکرو، افزایش قابل توجهی را در ضریب دوام جرمی[43] و ضریب دوام نسبی[44] در آزمایش یخ‌زدن و آب‌شدن بتن تراوا نشان داده است (Kevern و همکاران، ۲۰۱۵). طبق مطالعه‌ای با روش آزمایش (الف) ASTM C666/C666M، آزمونه‌های حاوی الیاف ماکرو (۳ با طول ۵۷ میلی‌متر) در مقایسه با آزمونه‌های کنترلی بدون الیاف که پس از ۱۸۷ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن کاملا گسیخته شدند، به‌راحتی پس از ۳۰۰ چرخه سالم باقی ماندند (Kevern و همکاران، ۲۰۱۵).

۵-۵-۳- نسبت آب به مواد سیمانی

به منظور شبیه‌سازی تغییرات پیش‌بینی‌نشده مقدار آب که ممکن است در کارگاه رخ دهد، عملکرد مخلوطی با نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۲۵ تا ۰/۳۲ و مقدار ثابت مواد افزودنی در یک مطالعه تکمیلی (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸c) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در نسبت آب به مواد سیمانی بسیار کم (۰/۲۵ و ۰/۲۶)، خمیر حاصله خشک و درصد حفرات زیاد بود (۲۴ و ۲۸ درصد) و در نتیجه، مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن کم بود (به ترتیب ۷۴ و ۹۵ چرخه تا وقوع خرابی). با اضافه شدن آب، کارایی مخلوط بیشتر شد و درصد حفره‌ها به حدود ۱۶ درصد رسید. افزایش کارایی و مقدار آب، مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن را برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۱ و ۰/۳۲ تا ۳۰۰ چرخه افزایش داد.

---

[43] Mass Durability Factor
[44] Relative Durability Factor

برای این مجموعه طرح مخلوط‌ها، شسته‌شدن خمیر در نسبت آب به مواد سیمانی بیش از ۰/۳۲ اتفاق افتاد. همان‌طور که پیش‌تر در بخش ۵-۲ ذکر شد، نتایج نسبت آب به مواد سیمانی برای بتن تراوا متفاوت هستند، و این مطالعه نشان داد که برای مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن، مرطوب‌شدن مناسب خمیر در مقایسه با نسبت کم آب به مواد سیمانی از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۵-۵-٤- دوام سنگدانه

در مطالعه‌ای که به سفارش انجمن سیمان پرتلند[45] (PCA) انجام شد، مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن بتن تراوایی که با انواع سنگدانه‌های درشت از مناطق مختلف ایالات متحده و کانادا تولید شده بود، مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی اثر سنگدانه، از طرح مخلوط‌های یکسان با سنگدانه‌های مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که عوامل موثری که از نظر آماری معنی‌دار هستند، چگالی ویژه و جذب آب آن‌ها است. سنگدانه‌های با چگالی ویژه بیشتر (میانگین ۲/۶۴) و جذب آب کمتر (میانگین ۰/۸۲ درصد) مقاومت خوبی در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن داشتند، در حالی که نمونه‌های دارای مقاومت غیرقابل‌قبول در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن، چگالی ویژه کمتر (۲/۵۷) و جذب آب بیشتری (۲/۲۷ درصد) داشتند. در طرح مخلوط ثابت، تخلخل، وزن مخصوص، مقاومت فشاری و مقاومت کششی نگدانه‌های مختلف هیچ ارتباطی با مقاومت بتن در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن نداشت (Kevern و همکاران، ۲۰۱۰).

۵-۵-۵- استفاده از مواد شیمیایی یخ‌زدا

در مناطقی که در مورد مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن نگرانی وجود دارد، مقاومت در برابر نمک‌های یخ‌زدا نیز یک سازوکار خرابی قابل‌توجه است. تحقیقات انجام شده توسط Cutler و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که برای بتن تراوای تولید شده با ۵۰ درصد جایگزینی سیمان با خاکستر بادی نوع C و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی، نمونه‌های حاوی یک ماده افزودنی بر پایه لاتکس در مقایسه با نمونه‌های فاقد آن، مقاومت بسیار ضعیف‌تری در برابر نمک‌های یخ‌زدا داشتند. کلرید کلسیم و پس از آن کلرید سدیم و استات کلسیم منیزیم بیشترین خرابی را به همراه داشتند و خرابی کمی در اثر آب مقطر ایجاد شد. توصیه‌های ارائه‌شده در این مطالعه شامل اجتناب از کاربرد افزودنی‌های بر پایه لاتکس و کلرید کلسیم برای کاربردهای یخ‌زدایی است (Cutler و همکاران، ۲۰۱۰). سایر مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد یخ‌زدای کلرید منیزیم به مصالح بتن آسیب می‌رساند. این موضوع به دلیل حمله شیمیایی به سیمان است که ظرفیت چسبانندگی آن را از طریق تشکیل بروسیت[46] کاهش می‌دهد. این واکنش در دماهای بیشتر از دمای یخ‌بندان رخ می‌دهد (Sutter و همکاران، ۲۰۰۸؛ Sumsion و Guthrie، ۲۰۱۳).

---

[45] Portland Cement Association
[46] Brucite

علاوه بر این، تجربیات میدانی و نتایج تجربی نشان می‌دهد که استفاده از مواد شیمیایی یخ‌زدا در سنین کم پس از بتن‌ریزی و نیز استفاده طولانی‌مدت از محصولات یخ‌زدا، موجب خرابی شدید می‌شود. بنابراین، باید تا حد امکان از کاربرد محصولات یخ‌زدا به ویژه تا یک سال پس از بتن‌ریزی اجتناب گردد.

۵-۶- مقاومت در برابر سایش سطحی و واچیدگی

واچیدگی یکی از سازوکارهای اصلی خرابی در بتن تراوا است که نه تنها بر ظاهر و صافی سطح تاثیر می‌گذارد، بلکه نفوذپذیری را نیز کاهش می‌دهد. افت جرمی نمونه‌ها در اثر سایش در دستگاه لس‌آنجلس[۴۷] پس از ۵۰۰ دور، مطابق ASTM C1747/C1747M اندازه‌گیری می‌شود. میزان سایش سطحی، از طریق افت جرم و عمق سایش ایجادشده توسط چرخ‌های سنگ‌زنی تحت‌بار که سطح بتن را با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲ دقیقه سایش می‌دهند، مطابق ASTM C944/C944M تعیین می‌گردد. در ارزیابی مخلوط‌های مختلف، استفاده از ASTM C1747/C1747M مناسب‌تر است (Offenberg، ۲۰۱۱)، در حالی که بهبودهای ناشی از کاربرد ترکیبات عمل‌آوری۴۸ یا سخت‌کننده‌های سطحی را می‌توان مطابق ASTM C944/C944M تعیین نمود.

آزمایش سایش سطحی، امکان تایید مناسب‌ترین روش‌های عمل‌آوری و ترمیم را ارائه می‌دهد. عمل‌آوری در زیر لایه پلاستیکی، در مقایسه با حالتی که فقط از ترکیبات عمل‌آوری استفاده شود، موثرتر بوده است (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹b). با این حال، مانند سایر افزودنی‌ها، نمونه‌هایی که با استفاده از یک پلیمر فوق‌جاذب، عمل‌آوری درونی شده‌اند، حتی در شرایط گرم و خشک (دمای ۳۲°C و رطوبت نسبی ۳۲ درصد) نیز مقاومت سایشی بهتری نسبت به مخلوط بتن تراوای متعارف دارند. در مطالعه دیگری، روش‌های کاهش واچیدگی هنگامی که نمونه‌ها تحت شرایط یکسان گرم و خشک، عمل‌آوری‌شده بودند، مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از غشای سیلیکات سدیم در سطح، که به‌طور معمول برای سخت‌کردن کف‌های بتنی صیقل داده شده استفاده می‌شود، بدون تاثیر بر تخلخل یا نفوذپذیری، واچیدگی را تا ۵۰ درصد کاهش داد (Kevern و Sparks، ۲۰۱۳). استفاده از هر دو نوع الیاف مصنوعی میکرو و ماکرو نیز اثر قابل‌توجهی برای کاهش واچیدگی در هنگام آزمایش مطابق با روش ASTM C944/C944M نشان داده‌اند (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹b و ۲۰۱۵).

۵-۷- چقرمگی شکست

برای افزایش کیفیت چقرمگی می‌توان از الیاف مصنوعی استفاده کرد. مقدار چقرمگی را می‌توان با چند روش آزمایش، از جمله ASTM C1399/C1399M تعیین کرد. در نتیجه این آزمایش، یک مقدار برای مقاومت پس از ترک‌خوردگی برحسب تنش بدست می‌آید که به مقاومت خمشی خمیره بتن مربوط می‌شود. آزمایش نمونه‌های تیر منشوری بتن تراوای حاوی الیاف مصنوعی مطابق با ASTM C1399/C1399M نشان داد که الیاف با طول ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متری، در افزایش چقرمگی بتن موثرتر بودند (سامانه‌های بتنی SI، ۲۰۰۲).

---

[47] Los Angeles abrasion device
[48] Curing compounds

چقرمگی بتن‌های تراوا، علاوه بر استفاده از تسلیح با الیاف، به ویژگی‌های ساختار منافذ نیز بستگی دارد. در مطالعه‌ای، پارامترهای شکست مصالح (ضریب شدت تنش بحرانی (KIC) و جابجایی بحرانی بازشدگی نوک ترک (CTODc)) تیرهای شکاف‌دار با استفاده از آزمایش‌های خمش سه‌نقطه‌ای تعیین شد (Rehder و همکاران، ۲۰۱۴). برای نشان دادن تاثیر ویژگی‌های ساختار منافذ بر چقرمگی، از دو تخلخل مختلف (ϕ_d) که با استفاده از روش مبتنی بر الگوریتم انباشتگی ذرات[۴۹] با دو اندازه سنگدانه مختلف (و بنابراین اندازه منافذ مختلف) طراحی شده بود، استفاده گردید (Rehder و همکاران، ۲۰۱۴). برخلاف بتن‌های متعارف، اندازه بزرگ‌تر منافذ در بتن‌های تراوا تا حدودی از تاثیر الیاف بر افزایش چقرمگی جلوگیری می‌کند. این رابطه از نظر محاسباتی توسط بازسازی سه‌بعدی[۵۰] تعیین شد (Sumanasooriya و همکاران، ۲۰۱۰).

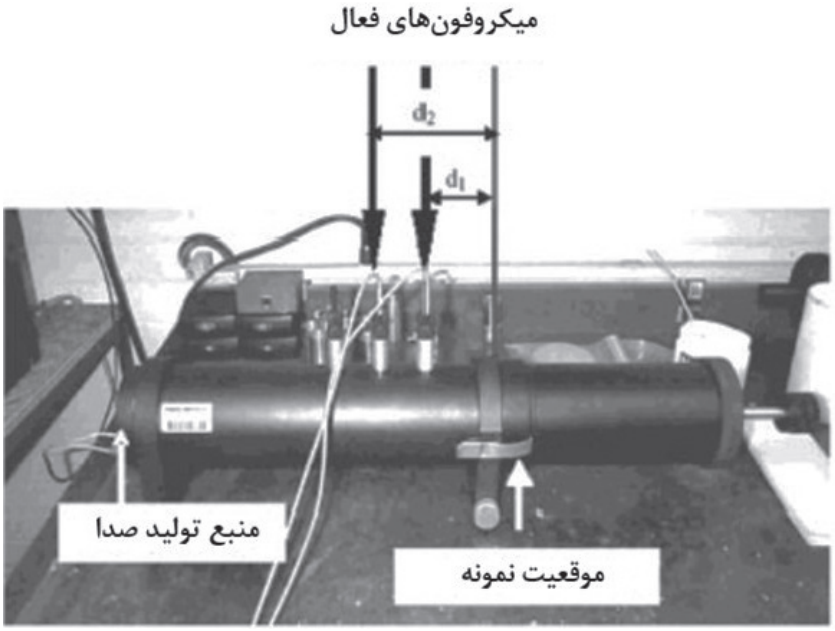
۵-۸- جذب صدا

بتن تراوا به دلیل وجود حجم زیادی از منافذ به هم پیوسته با اندازه‌های قابل‌توجه در ساختار خود، در جذب صدا بسیار موثر است. از این مصالح می‌توان در روسازی‌های بتنی به منظور کاهش سر و صدای ناشی از تماس لاستیک وسایل نقلیه و روسازی راه‌ها استفاده کرد. کاهش سر و صدا، در نتیجه اثر توام کاهش تولید صدا و افزایش جذب صدا ایجاد می‌شود. روسازی‌های تراوا با به حداقل‌رساندن اثر پمپ‌شدن هوا بین لاستیک و سطح جاده، تولید صدا را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، منافذ، صدا را از طریق اصطکاک داخلی بین مولکول‌های متحرک هوا و دیواره‌های منافذ جذب می‌کنند.

برای ارزیابی ویژگی‌های جذب صدا در بتن تراوا، می‌توان همانطور که در شکل ۵-۸ نشان داده شده است از یک لوله امپدانس استفاده کرد (Neithalath، ۲۰۰۴؛ Marolf و همکاران، ۲۰۰۴). آزمونه‌های بتنی استوانه‌ای با قطر ۹۵ میلی‌متر را می‌توان در لوله امپدانس جای داد. نمونه در داخل یک غلاف استوانه‌ای نازک از جنس پلی تترا فلوئورواتن[۵۱] (PTFE) که به راحتی نمونه را به‌طور چسبان در خود جای می‌دهد قرار داده می‌شود. نمونه در یک انتهای لوله امپدانس به تکیه‌گاه صلبی که مجهز به منبع ایجاد صدا است، تکیه داده می‌شود. یک موج صوتی تخت توسط منبع صدا ایجاد و در امتداد محور لوله منتشر می‌شود. میکروفون‌هایی که در طول لوله قرار داده شده‌اند، برای تشخیص فشار موج صوتی منتقل‌شده به نمونه و بخش انعکاس‌یافته موج استفاده می‌شوند (ASTM E1050) . ضریب انعکاس فشار R، نسبت فشار موج منعکس‌شده به موج ورودی در یک فرکانس مشخص است.

---

[49] Particle packing
[50] Three-dimensional reconstruction
[51] Polytetrafluoroethene



شکل ۵-۸- لوله امپدانس برای اندازه‌گیری خصوصیات جذب صدا در بتن تراوا (Neithalath، ۲۰۰۴؛ Marolf و همکاران، ۲۰۰۴)

ضریب جذب، معیاری از توانایی مصالح در جذب صدا است. مصالحی با ضریب جذب ۱ نشان‌دهنده ماده‌ای کاملا جاذب است، در حالی که مصالحی با ضریب جذب صفر نشان می‌دهد که ماده، صدا را به‌طور کامل منعکس می‌کند. به عنوان مثال، ضریب جذب بتن متعارف معمولا بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ است (Neitha-lath، ۲۰۰۴). محدوده ضریب جذب برای بتن تراوا معمولا از ۰/۱ (برای مخلوط‌هایی با عملکرد ضعیف) تا نزدیک به ۱ (برای مخلوط‌هایی با حجم و اندازه بهینه منافذ) است. از آنجا که ضریب جذب به فرکانس امواج صوتی برخوردکننده بستگی دارد، تعیین حداقل ضخامت بتن تراوا که صداهای فرکانس موردنظر را به کمترین مقدار می‌رساند، حائز اهمیت است. آزاردهنده‌ترین امواج صوتی برای گوش انسان، دارای فرکانس بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ هرتز است.

در سال ۲۰۰۸، برای ارزیابی قابلیت بتن تراوا برای کاهش صدا در مناطق شهری و به عنوان بخشی از برنامه خصوصیات سطح روسازی انجمن بزرگراه‌های ایالتی آمریکا[۵۲] (FHWA)، یک روکش بتنی تراوا ساخته شد. مطابق باAASHTO T 360 ، میانگین شدت صوت بدست آمده از میکروفون‌های کار گذاشته شده در لبه جلویی و انتهایی، در نزدیکی لاستیک استاندارد وسیله نقلیه استانداردی که با سرعت ۹۷ کیلومتر در ساعت حرکت می‌کرد، محاسبه شد. با استفاده از این روش آزمایش، روسازی‌هایی با نتایج کمتر از ۱۰۰ دسی‌بل، به عنوان روسازی بی‌صدا در نظر گرفته می‌شوند (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج شدت آلودگی صوتی در داخل خودرو (OBSI) برای روکش بتنی تراوا، مقادیر بین ۹۰ تا ۹۶ دسی‌بل را نشان می‌دهد (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۰). این نتایج نشان می‌دهد که روسازی‌های بتنی تراوا می‌توانند در مقایسه با روسازی‌های بتنی متعارف بی‌صدای کنونی، ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بی‌صداتر باشند. جزئیات کامل در مرجع Schaefer و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است.

[52] Federal Highway Administration

۵-۹- جلوگیری از لغزش و افتادن

اگرچه پیش‌تر به‌طور شهودی و بنا بر شواهد، مشاهده شده بود که بتن تراوا، سطح پیاده‌روی مقاوم‌تری در برابر لغزش است، اما تا پیش از مطالعه اخیر، هیچ‌گونه شواهد تجربی برای اثبات بتن تراوا به عنوان سطح پیاده‌روی دارای ویژگی‌های لغزشی بهتر در مقایسه با بتن متعارف وجود نداشت. به منظور بررسی تاثیر بتن تراوا بر ویژگی‌های لغزش در حین پیاده‌روی، یک برنامه آزمایشی منحصربه‌فرد با استفاده از ارزیابی بیومکانیکی[۵۳] در آزمایشگاه حرکت انسانی[۵۴] دانشگاه میزوری-کانزاس‌سیتی ایجاد شد. نمونه‌های آزمایش‌شده بتن تراوای دارای حفرات ۳۰ درصدی و نفوذپذیری زیاد با نرخ نفوذ بیش از ۱ سانتی‌متر بر ثانیه بودند. در داخل یک ناحیه محتمل برقراری تماس بین کفش و سطح بتن، مساحت سطح تماس کفش با نمونه‌های بتن تراوا، ۴۵ درصد مساحت سطح تماس با بتن متعارف بود. فشار تماس بین کفش و پیاده‌رو برای بتن تراوا، بیش از دو برابر پیاده‌روی بتنی متعارف بود. ضریب اصطکاک روسازی بتن تراوای خشک، ۲ تا ۳ برابر بیشتر از بتن متعارف بود. در زمان یخ‌بندان، بیشترین تفاوت در ضریب اصطکاک بین این دو نوع سطح، بین ۴- و $^{\circ}C$ ۱- ایجاد می‌شود و لغزش کمتری روی بتن تراوا رخ می‌دهد. فشار تماس و ضریب اصطکاک اضافی و کاهش احتمال تجمع آب و یخ‌بندان سطح نشان داد که در شرایط زمستانی، بتن تراوا می‌تواند سطح پیاده‌روی مقاوم‌تری در برابر لغزش باشد (Kevern و همکاران، ۲۰۱۲).

۵-۱۰- کاهش اثر جزیره گرمایی در محیط شهری

روسازی‌ها به دلیل جرم انبوهی و ظرفیت جذب گرما، به اثر جزیره گرمایی در محیط شهری (UHI) کمک می‌کنند. سطوحی که از خاک یا ماسه تشکیل شده‌اند، به اندازه روسازی‌ها به اثر UHI کمک نمی‌کنند. ماهیت متخلخل سطوح خاکی یا ماسه‌ای می‌تواند اثر جزیره گرمایی در محیط شهری را هم با افزایش ظرفیت عایق و هم با توسعه سازوکار خنک‌سازی ناشی از تبخیر آب جذب‌شده، کاهش دهد. بتن تراوا، دارای شبکه‌ای از حفره‌های به هم پیوسته است که امکان خروج آب به سمت زیراساس را فراهم می‌کند. تعداد محدودی از مطالعات روی بتن تراوا نشان می‌دهد که سطح بتن تراوا می‌تواند در مقایسه با روسازی‌های نفوذناپذیر (ناتراوا) متعارف مشابه، دماهای زیادتری داشته باشد، اما این دماها در زیر روسازی کمتر هستند.

مطالعاتی در آیووا، کارولینای جنوبی و واشنگتن انجام گرفته که در آن‌ها، هر دو نوع سامانه روسازی بتنی تراوا و بتنی متعارف به‌کار رفته و دماهای درون سامانه‌ها برای دوره‌های زمانی طولانی ثبت شده است (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹a و ۲۰۰۹c؛ Haselbach و Gaither، ۲۰۰۸). در تحلیل‌ها، روزهایی با بارش قبلی ناچیز و دمای زیاد هوا که شرایط محیطی شدید برای ایجاد اثرات UHI هستند، پوشش داده شدند. نتایج نشان داد که در هنگام گرمایش سامانه‌های بتنی تراوا نسبت به سامانه‌های بتنی متعارف، انرژی کمتری ذخیره می‌شود.

---

[53] Biomechanical Evaluation
[54] Human motion

این نتایج در حالی بود که در هر دو نوع روسازی، از مخلوط‌های سیمانی مشابه (رنگ‌های مشابه سیمان) استفاده شد و همچنین بر اساس تحقیقات قبلی، بازتابش نور خورشید برای سطح بتنی تراوا کمتر، و در نتیجه دمای سطح آن در شرایط یکسان تابش خورشید، زیادتر است.

به‌عنوان یکی از راهکارهای کاهش اثر UHI می‌توان از سامانه‌های روسازی با ذخیره انرژی کمتر استفاده کرد. استفاده از سامانه‌های بتنی تراوا که ممکن است لایه‌های مصالح آن‌ها در مقایسه با سامانه‌های روسازی متعارف، تخلخل زیادتری داشته باشند، می‌تواند ابزار موثری در کاهش اثر UHI باشد. ملاحظات مربوط به خصوصیات مصالح زیر سطح زمین از جمله تخلخل، در تعیین ظرفیت یک روسازی نفوذپذیر برای کاهش اثر جزیره گرمایی مهم است. بازتابش نور خورشید نباید مستقل از سایر این متغیرها مورد استفاده قرار گیرد و روسازی بتنی تراوا بدون توجه به رنگ آن، در آیین‌نامه بین‌المللی ساخت‌وساز سبز[۵۵] (IgCC)، به عنوان راه‌حلی برای روسازی خنک در نظر گرفته می‌شود (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹a؛ ICC IgCC، ۲۰۲۱).

۵-۱۱- ظرفیت زدودن آلاینده‌ها

نشان داده شده است که سامانه‌های روسازی بتنی تراوا ظرفیت زیادی برای زدودن آلاینده‌های ناشی از سیلاب دارند. قسمتی از فرآیند حذف آلاینده‌ها، از طریق صاف‌کردن (غربال‌کردن) فیزیکی ذرات موجود در سیلاب انجام می‌شود به این صورت که آلاینده‌ها یا روی سطح و یا در درون سامانه باقی می‌مانند. نمونه‌هایی از آلاینده‌ها با بازدهی حذف زیاد، شامل ذرات جامد، هیدروکربن‌ها و فلزات هستند. علاوه بر این، در درون سامانه نیز فرصت‌هایی برای از بین رفتن مواد شیمیایی از طریق جذب یا تبادل یونی و در مورد روغن‌ها یا سایر هیدروکربن‌ها از طریق تخریب میکروبی وجود دارد. این موضوع ممکن است در بتن تراوا رخ دهد، اما در سامانه زیرین آن، از جمله زیراساس سنگدانه‌ای و خاک نیز مشاهده شده است (Pratt و همکاران، ۱۹۹۹). نشان داده شده است که لایه بتن تراوا به دلیل ترکیب شیمیایی بتن، ظرفیت قابل‌توجهی برای حذف طولانی مدت روی و مس دارد (Ahiablame و همکاران، ۲۰۱۲؛Haselbach و همکاران، ۲۰۱۴a؛ Rushton، ۲۰۰۱).

فصل ۶

طرح مخلوط بتن تراوا

٦-١- کلیات طرح مخلوط

عیار سیمان (نسبت سنگدانه درشت به مواد سیمانی) و نسبت آب به مواد سیمانی، متغیرهای اصلی موثر بر خصوصیات مکانیکی بتن تراوا هستند. بسته به نوع کاربری و عملکرد موردنظر، طیف وسیعی از عیارهای سیمان قابل قبول هستند. افزودنی‌های شیمیایی علاوه بر تاثیرگذاری بر نسبت آب به مواد سیمانی، با هدف تغییر مقدار خمیر، کارایی و زمان گیرش، بهبود خصوصیات مکانیکی مختلف و دوام طولانی‌مدت بتن تراوا استفاده می‌شوند. در حال حاضر، آزمایش استانداردی برای سنجش مقاومت بتن تراوا وجود ندارد و آزمایش مقاومت به عنوان یک معیار پذیرش، مناسب نیست. دوام از نظر مقاومت در برابر واچیدگی با استفاده از ASTM C1747/C1747M تعیین می‌شود.

فرآیند ایجاد طرح مخلوط بتن تراوا اغلب از طریق تکرار آزمون و خطا انجام می‌شود. به عنوان مثال، ممکن است به منظور حصول اطمینان از رفتار و عملکرد موردانتظار، مجموعه‌ای از مخلوط‌های آزمون در آزمایشگاه تولید و سپس در کارگاه آزمایش شوند. به‌طور کلی، طرح مخلوط بتن تراوا برای رسیدن به تعادلی بین حفرات، مقدار خمیر، کارایی، مقاومت و دوام انجام می‌گیرد.

٦-٢- معیارهای طرح مخلوط

مقدار بهینه آب، خمیر سیمانی کاملا مرطوب با گرانروی کافی برای پوشاندن ذرات سنگدانه درشت ایجاد می‌کند بدون اینکه خمیر از سنگدانه‌های درشت، خارج و موجب گرفتگی منافذ بتن تراوا شود. شرایط ظاهری خمیر سیمانی کاملا مرطوب، اغلب به صورت یک سطح فلزی‌مانند مرطوب یا درخشنده توصیف می‌شود. برای مجموعه‌ای از طرح مخلوط‌های دارای اندازه و انواع سنگدانه‌های مشخص و مقادیر معین مواد افزودنی، محدوده قابل قبول برای نسبت آب به مواد سیمانی بتن تراوا در مقایسه با بتن متعارف، کوچک‌تر است. مقدار خمیر سیمانی مناسب، پیوند کافی بین ذرات سنگدانه ایجاد و در عین حال، فضای خالی کافی برای نفوذ آب فراهم می‌کند. یکی از ملاحظات مهم برای به دست آوردن دوام و ساختار منفذی موردنظر در بتن تراوا، نسبت آب به مواد سیمانی است. نسبت آب به مواد سیمانی زیاد، چسبندگی خمیر به سنگدانه را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود حتی در مواردی که تراکم کمی انجام شده است، خمیر جریان یافته و حفره‌ها را پر کند. نسبت آب به مواد سیمانی کم، از اختلاط کامل جلوگیری می‌کند، باعث تشکیل گلوله‌هایی[۵۶] در مخلوط‌کن می‌شود، از توزیع یکنواخت خمیر سیمان جلوگیری می‌کند و چسبندگی خمیر به سنگدانه و در نتیجه مقاومت و دوام نهایی بتن را کاهش می‌دهد. نسبت آب به مواد سیمانی کم اغلب یکی از دلایل ایجاد واچیدگی در سن کم بتن (۱ تا ۷ روز) است. برای به دست آوردن کارایی مطلوب در بتن تراوا، نسبت آب به مواد سیمانی معمولا در محدوده ۰/۳ تا ۰/۴ قرار می‌گیرد. رابطه معمول بین نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت فشاری برای بتن متعارف، در بتن تراوا به صورت مستقیم کاربرد ندارد. کنترل دقیق رطوبت سنگدانه‌ها و نسبت آب به مواد سیمانی برای تولید بتن تراوای یکنواخت، حائز اهمیت است.

---

۵۶ تعیین مقدار موردنظر حفرات در بتن تراوا، اقدامی برای ایجاد تعادل بین نرخ نفوذ و مقاومت فشاری است که

مطابق آن، نرخ نفوذ زیادتر به مقاومت و دوام کمتر منجر می گردد. هدف طرح مخلوط بتن تراوا، یافتن مخلوطی است که یک نرخ نفوذ اولیه حداقل را فراهم کند که مقدار آن، نه خیلی کم و نه خیلی زیاد باشد. نرخ نفوذ سطحی کم، احتمال وقوع گرفتگی سریع در اثر مواد ریز حمل شده توسط سیلاب را افزایش می‌دهد. نرخ نفوذ زیاد نیز ممکن است احتمال وقوع گرفتگی در عمق در اثر رسوبات یا مواد جامد بزرگ‌تر و واچیدگی سطحی زیاد را افزایش دهد. به‌طور کلی، روسازی‌هایی با نرخ نفوذ بین ۷ s/mm تا ۱/۷۵ s/mm ، دارای مقاومت و دوام کافی هستند و در عین حال مقاومت خوبی در برابر گرفتگی (پرشدگی) ایجاد می کنند (Kevern، ۲۰۱۱؛ Kevern و همکاران، ۲۰۱۵). نرخ‌های نفوذ اولیه در این محدوده‌ها همواره بسیار بیشتر از میزان موردنیاز برای تعادل سیلاب‌های معمول است و بنابراین، افزایش این نرخ معمولا سودمند نیست. در عوض، باید مسائل مربوط به وقوع گرفتگی (پرشدگی) و راه‌حل‌های تمیز کردن آن‌ها در نظر گرفته شود.

مقاومت فشاری و دوام بتن تراوا نیز تابعی از مقاومت سنگدانه‌ها، خصوصیات چسبندگی خمیر و مقاومت خود خمیر سیمان است. هنگام به کار بردن این مقادیر در طراحی‌های عملی باید کمی احتیاط کرد، زیرا هنوز روش‌های آزمایش استانداردی برای این ویژگی‌های بتن تراوا وجود ندارد. بحث ارائه شده در این قسمت باید صرفا به عنوان یک توصیف کیفی در نظر گرفته شود.

۶-۳- فرایند طرح مخلوط

طیف گسترده‌ای از روش‌های مختلف برای طرح مخلوط بتن تراوا، مشابه بتن متعارف وجود دارد. در ادامه، روشی ساده برای تهیه طرح مخلوط آزمون اولیه برای آزمون و خطاهای بعدی ارائه شده است. برای مطالعه مسائل مرتبط با مصالح مطلوب و خصوصیات آن‌ها، به فصول ۴ و ۵ مراجعه شود.

گام ۱- تعیین درصد حفرات برای انتخاب سنگدانه درشت: سنگدانه درشتی انتخاب شود که حداقل درصد حفرات محاسبه شده آن برای وزن مخصوص خشک متراکم با میله[۵۷] (DRUW) که مطابق ASTM C29/C29M تعیین شده است، ۳۸ درصد باشد.

گام ۲- تعیین مقدار سنگدانه درشت موردنیاز: برای در نظر گرفتن حجم غشای خمیر بین ذرات سنگدانه درشت، همان‌طور که در شکل ۶-۳-الف نشان داده شده است، در صورت عدم وجود سنگدانه ریز مقدار وزن مخصوص خشک متراکم با میله، در ۰/۹۵ و در صورت وجود سنگدانه ریز، مقدار آن در ۰/۹۰ ضرب شود. فاصله بین ذرات درشت سنگدانه *Da*، با وجود خمیر یا ملات، به *Dc* افزایش می‌یابد و بنابراین کاهشی در حجم سنگدانه برای حفظ نسبت‌های حجمی بتن موردنیاز است.

[57] Dry Rodded Unit Weight

گام ۳- تعیین مقدار مواد چسباننده موردنیاز:

گزینه (الف): برای بتن تراوای پرمقاومت یا بتن تراوایی که با انرژی تراکمی کم ریخته شده است، مقدار سنگدانه درشت تعیین شده در گام ۲، در ۰/۲۴ ضرب گردد.

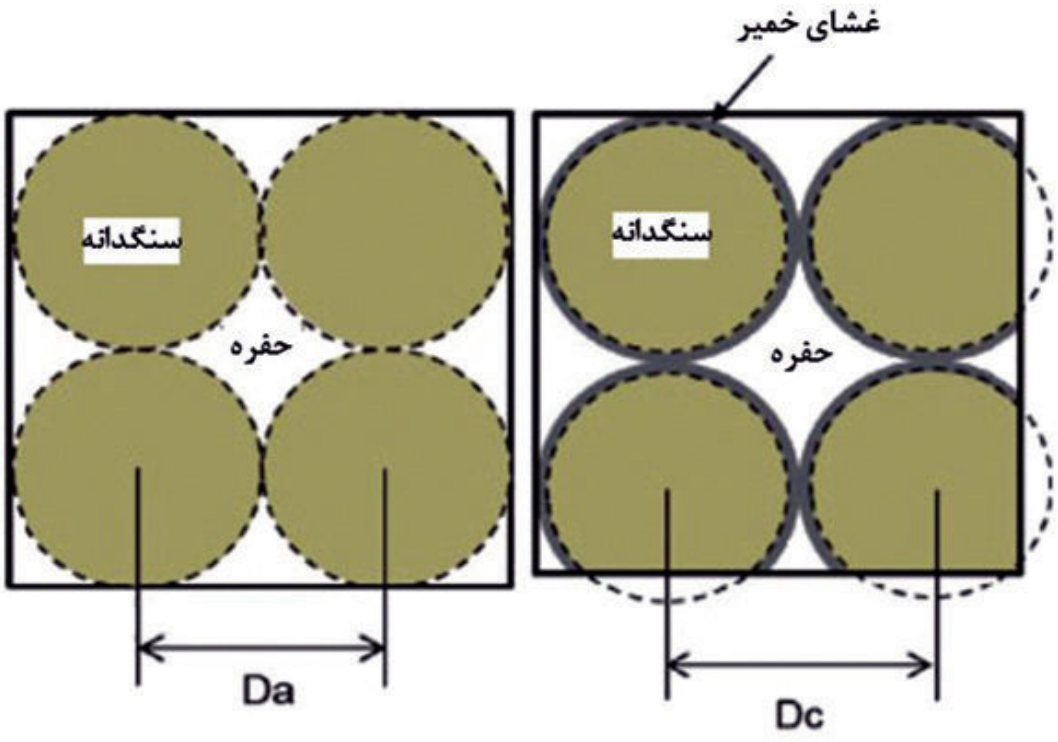
گزینه (ب): برای بتن تراوای با مقاومت کم یا بتن تراوایی که با انرژی تراکمی زیاد ریخته شده است، مقدار سنگدانه درشت تعیین شده در گام ۲، در ۰/۲۱ ضرب شود.

تحقیقات نشان داده است که برای سنگدانه‌های با وزن معمولی، اضافه کردن ۷ تا ۵ درصد جرمی ماسه، ضخامت غشای خمیر، مقاومت و دوام را افزایش می‌دهد. مقدار خمیر و انرژی تراکمی، بر مقدار خمیر موردنیاز حفرات برای برآوردن اهداف مقاومت و دوام تاثیر می‌گذارد (شکل ۶-۳-ب).

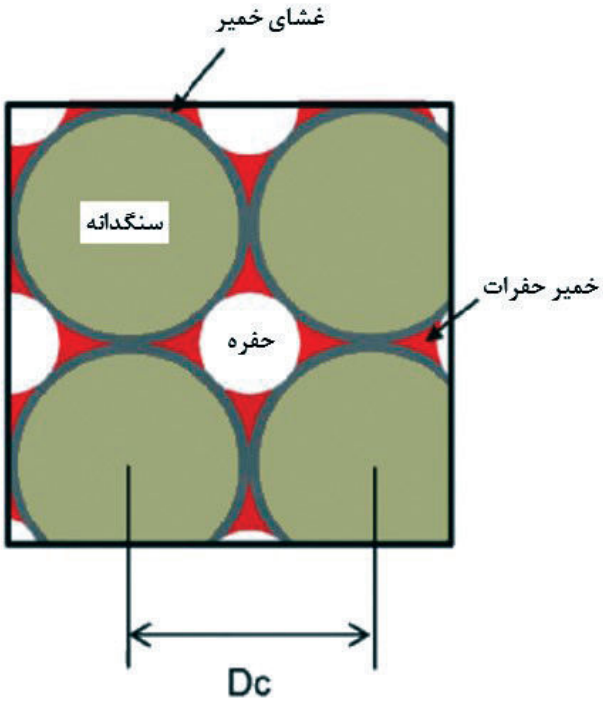
گام ٤- انتخاب مواد سیمانی مکمل مطلوب: خاکستر بادی، سرباره و دوده‌سیلیس همگی با موفقیت در بتن تراوا به کار رفته‌اند. برای مطالعه بیشتر در مورد نرخ جایگزینی مواد سیمانی مکمل، به فصل‌های ۴ و ۵ مراجعه شود.

گام ۵ - انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار آب موردنیاز: نسبت معمول آب به مواد سیمانی برای بتن متخلخل در بازه ۰/۴ تا ۰/۳ قرار دارد.

گام ٦- انتخاب مواد افزودنی: برای مطالعه بیشتر در مورد استفاده از مواد افزودنی مختلف، به فصل‌های ۴ و ۵ مراجعه گردد. مواد افزودنی رایج شامل افزودنی‌های کاهنده‌های آب، کنترل‌کننده هیدراته‌شدن، هوازا و اصلاح‌کننده‌های گرانروی است.



شکل ۶-۳-الف- کاهش موردنیاز حجم سنگدانه برای تطبیق با ضخامت پوشش خمیر



شکل ۶-۳-ب- رابطه بین پوشش غشای خمیر و خمیر حفرات

گام ۷ - انتخاب الیاف (در صورت نیاز): طیف گسترده‌ای از اشکال و مواد الیاف در دسترس است. تحقیقات انجام‌گرفته، فواید مصرف از بسیاری از انواع مختلف الیاف در بتن تراوا را نشان داده‌اند. به‌طور کلی، در کاربری‌های عادی از الیاف ریزتر و مقادیر کمتر استفاده می‌شود، در حالی که برای کاربردهای صنعتی الیاف درشت‌تر و مقادیر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از مقادیر گزارش‌شده برای مقدار مصرف الیاف عبارتند از:

(الف) الیاف میکروی (ریز) تک‌رشته‌ای[58]: ۰/۹ kg/m^3 تا ۰/۶

(ب) الیاف رشته‌رشته‌ای[59] یا سلولزی: ۱/۸ kg/m^3 تا ۰/۹

(پ) الیاف ماکرو (درشت)[60]: ۴/۴ kg/m^3 تا ۱/۵

گام ۸- تعیین طرح مخلوط آزمون، وزن مخصوص طرح بتن سخت‌شده (DUW) و مقدار حفرات طرح (DVC): مقدار حفرات طرح (DVC) به صورت حجمی، از طرح‌های مخلوط انتخابی تعیین می‌شود. مقدار حفرات طرح، شامل حفرات هوای ایجادشده (عمدی) و حفرات نفوذپذیر آب می‌گردد. وزن مخصوص طرح بتن سخت‌شده (DUW)، شامل مواد سیمانی، سنگدانه خشک و بخشی از آبی که در محصولات هیدراته‌شده قرار گرفته است، می‌گردد. در نسبت‌های آب به مواد سیمانی بیشتر از ۰/۳۸، درجه هیدراته‌شدن (DOH) ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که ترکیب شیمی واقعی سیمان مشخص باشد، می‌توان مقدار واقعی آب مورد نیاز برای هیدراته کردن مواد سیمانی را محاسبه کرد.

---

[58] Monofilament microfibers
[59] Fibrillated fibers
[60] Macrofibres

اما در صورتی که اطلاعاتی در این خصوص وجود ندارد، به عنوان یک تخمین خوب می‌توان فرض نمود زمانی که نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۳۸ بیشتر باشد، ۱۰ کیلوگرم آب از نظر شیمیایی در هیدراته‌شدن ۴۰ کیلوگرم سیمان مشارکت می‌کند (حدود ۲۵ درصد). اگر نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۳۸ کمتر باشد، در این صورت مجاری و منافذ کافی، اجازه هیدراته‌شدن کامل را نمی‌دهند و مقدار آب سهیم در خمیر سیمان کاهش می‌یابد. شکل ۶-۳-پ، درجه کاهش هیدراته‌شدن را نشان می‌دهد (Bentz و همکاران (۲۰۰۵)).

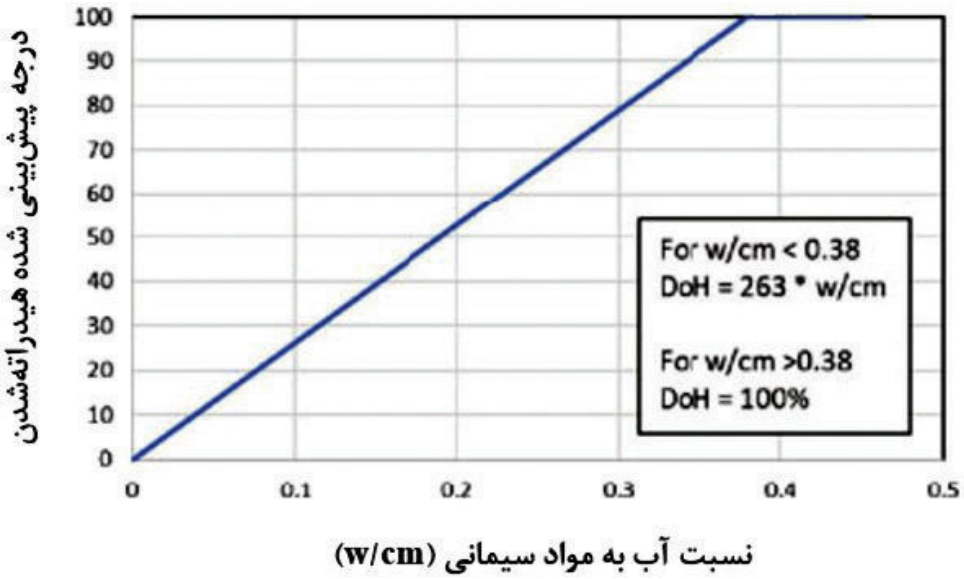
مثال برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵:

درجه پیش‌بینی‌شده هیدراته‌شدن:

$۰/۳۵ \times ۲۶۳ = ۹۲/۱ \ ٪$

مقدار پیش‌بینی‌شده آب برای مشارکت در بتن سخت‌شده:

برای ۴۰ کیلوگرم سیمان $۹۲/۱ \ ٪ \times ۱۰ = ۹/۲ \ kg$



شکل ۶-۳-پ- درجه پیش‌بینی‌شده هیدراته‌شدن برای نسبت‌های مختلف cm/w [۶۱]

گام ۹ - آزمایش مخلوط آزمون: مخلوط آزمون را می‌توان در آزمایشگاه یا کارگاه ساخت. از آنجا که شبیه‌سازی تراکم کارگاهی در آزمایشگاه دشوار است، بتن‌ریزی واقعی در کارگاه بیشترین مطابقت را برای آزمون و خطاهای بعدی خواهد داشت.

(الف) چگالی بتن تازه مطابق با شرایط ASTM C1688/C1688M اندازه‌گیری می‌شود. از آنجا که انرژی تراکمی مرتبط با ASTM C1688/C1688M، با تراکم کارگاهی مطابقت ندارد، در کنترل کیفیت برای تغییرپذیری نسبت‌ها و کارایی بتن تحویلی باید از چگالی بدست‌آمده مطابق با شرایط ASTM C1688/C1688M استفاده شود و با وزن مخصوص طرح بتن سخت‌شده (DUW) مقایسه نشود. مقادیر معمول چگالی در بازه ۱۹۹۰ تا ۲۱۳۰ متغیر است[۶۲].

---

[۶۱] درجه هیدراته شدن به عمل‌آوری هم مربوط است، نه فقط به نسبت آب به مواد سیمانی.

[۶۲] این مقادیر برای حالت نسبتا متراکم است و در حالت غیرمتراکم، مقادیر از حدود ۱۹۰۰ تا ۲۰۳۰ متغیر هستند.

(ب) نمونه‌ها، مغزه‌گیری می‌گردد و چگالی بتن سخت‌شده مطابق با ASTM C1754/C1754M تعیین می‌شود.

(پ) پس از تعیین چگالی بتن سخت‌شده، باید تغییرپذیری تراکم قائم و ته‌نشین شدن خمیر را تعیین کرد. آزمونه‌ای استوانه‌ای بتن سخت‌شده به دو قسمت مساوی برش داده، و چگالی بتن سخت‌شده قسمت‌های بالایی و پایینی به صورت جداگانه تعیین می‌شود. مقدار تفاوت این چگالی‌ها نباید بیش از ۵ درصد باشد. چگالی بسیار بیشتر در نیمه بالایی، نشان‌دهنده کارایی ضعیف روش تراکم موردنظر است و در این حالت استعداد وقوع ترک‌خوردگی پایین به بالا افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، چگالی بسیار بیشتر در نیمه پایینی نشان‌دهنده ته‌نشین شدن خمیر سیمان است و در این حالت استعداد وقوع گرفتگی (پرشدگی) در مقطع بتنی تراوا افزایش خواهد یافت.

(ت) احتمال واچیدگی مطابق با ASTM C1747/C1747M تعیین می‌شود. برای نمونه‌هایی که با چگالی موردنظر ریخته می‌شوند، میزان افت جرم باید کمتر از ۴۰ درصد باشد.

گام ۱۰ - اصلاح مخلوط:

(الف) در صورتی که وزن مخصوص کم است، برای افزایش کارایی، مقدار مواد سیمانی، مقدار ماسه یا مواد افزودنی افزایش داده شود.

(ب) در صورتی که وزن مخصوص زیاد است، برای کاهش کارایی، مقدار مواد سیمانی، مقدار ماسه یا مواد افزودنی کاهش داده شود.

(پ) در صورتی که میزان سایش زیاد است، به منظور افزایش کارایی، مقدار الیاف، مقدار مواد سیمانی یا مواد افزودنی افزایش داده شود.

٦-٤- مثال‌هایی از فرایند طرح مخلوط

مثال ۱:

طرح مخلوط زیر، برای مخلوطی است که قرار است در فضای عمومی پیاده‌رو واقع در فلوریدا (بدون نگرانی‌های مرتبط با یخ‌زدن و آب‌شدن) ریخته شود و به دلیل موقعیت ساختگاه، استفاده از شمشه‌های غلتان بزرگ امکان‌پذیر نیست. بتن‌ریزی با استفاده از تخته‌ماله دسته‌بلند لبه‌صاف و ارتعاشی انجام خواهد شد. این مخلوط حاوی سنگدانه درشت از جنس سنگ آهک خردشده با وزن مخصوص خشک ذرات ۲/۴۰، جذب آب ۱/۵ درصد و وزن مخصوص خشک متراکم با میله $1440 kg/m^3$ است. مخلوط، حاوی سیمان پرتلند نوع I مطابق با مشخصات ذکرشده در ASTM C150/C150M با چگالی ویژه ۳/۱۵ و دوده‌سیلیس با چگالی ویژه ۲/۲ خواهد بود.

گام ۱- تعیین درصد حفرات برای انتخاب سنگدانه درشت: مطابق ASTM C29/C29M و ویژگی‌هایی که پیش‌تر ارائه شد، درصد حفرات پس از تراکم با میله برابر ۴۰ درصد و از مقدار حداقل لازم ۳۸ درصد بیشتر است.

$$\left(1-\frac{1440}{2400}\right)\times 100 = 40\%$$

گام ۲- تعیین مقدار سنگدانه مورد نیاز: از آنجا که به دلیل نبود نگرانی‌های مربوط به یخ‌زدن و آب‌شدن و همچنین بار کم پیاده‌رو، نیازی به استفاده از سنگدانه ریز نبود، ضریب اصلاح خمیر برای وزن مخصوص خشک متراکم با میله برابر ۰/۹۵ است.

مقدار سنگدانه درشت $۱۴۴۰\ kg/m^3 \times ۰/۹۵ = ۱۳۶۸\ kg/m^3$

در این مثال از سنگدانه ریز استفاده نشده است.

گام ۳ - تعیین مقدار مواد چسباننده موردنیاز: به دلیل این که شرایط ساختگاه (پیاده‌رو)، استفاده از انرژی تراکمی کم را اقتضا می‌کند، مقدار مواد سیمانی (چسباننده) مورد نیاز برابر حاصل ضرب وزن سنگدانه در عدد ۰/۲۴ است.

مقدار کل مواد سیمانی $۱۳۶۸\ kg/m^3 \times ۰/۲۴ = ۳۲۸\ kg/m^3$

گام ٤ - انتخاب مواد سیمانی مکمل موردنیاز: در صورت مساله بیان شد که از دوده‌سیلیس به عنوان ماده سیمانی مکمل استفاده خواهد شد. تحقیقات مربوط به بتن تراوا نشان داده است که کاربرد حداکثر ۵ درصد دوده‌سیلیس، مناسب و سودمند است و بر همین اساس، در این مثال نیز از مقدار ۵ درصد استفاده می‌شود.

مقدار دوده‌سیلیس $۳۲۸\ kg/m^3 \times ۰/۰۵ = ۱۶\ kg/m^3$

مقدار دوسیمان پرتلند نوع I $۳۲۸\ kg/m^3 - ۱۶ = ۳۱۲\ kg/m^3$

گام ۵ - انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار آب موردنیاز: اگرچه محدوده متداول نسبت آب به مواد سیمانی برای بتن تراوا، از ۰/۳ تا ۰/۴ است، اما به این دلیل که در این مثال مخلوط حاوی دوده‌سیلیس است، به منظور کمک به بهبود کارایی مخلوط و به حداقل رساندن جمع‌شدگی خمیر و عدم نیاز به مقاومت زیاد، نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۷ انتخاب می‌شود.

مقدار آب $۳۲۸\ kg/m^3 \times ۰/۳۷ = ۱۲۱\ kg/m^3$

گام ٦- انتخاب مواد افزودنی: برای مطالعه جزییات مربوط به انتخاب مواد افزودنی به فصل‌های ۴ و ۵ مراجعه شود. دو ماده افزودنی زیر و مقدار آن‌ها از مقادیری که معمولا در ادبیات فنی گزارش شده است انتخاب گردیده‌اند.

(الف) عامل فوق‌کاهنده آب پلی کربوکسیلات: $۱/۲\ kg/m^3$ (حدود ۰/۳۶ درصد مواد سیمانی حاوی دوده‌سیلیس)

(ب) افزودنی کنترل‌کننده هیدراته‌شدن: $۱/۲\ kg/m^3$ (حدود ۰/۳۶ درصد مواد سیمانی حاوی دوده‌سیلیس)

گام ۷ - انتخاب الیاف (در صورت نیاز): در این مثال از هیچ الیافی استفاده نخواهد شد.

گام ۸ - تعیین طرح مخلوط آزمون، وزن مخصوص طرح (DUW) و مقدار حفرات طرح (DVC): برای این مخلوط، مقدار حفرات طرح برابر ۲۰/۳ درصد طبق جدول زیر خواهد بود که تقریبا در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصدی معمول برای بتن تراوا است. مقدار وزن مخصوص بتن سخت‌شده خشک طرح، شامل مقدار مواد سیمانی، سنگدانه خشک و آب مشارکت‌کننده در محصولات هیدراته‌شده است[۶۳].

---

[۶۳] از حجم فوق‌روان‌کننده و ... در محاسبات صرف نظر شد چون بیشتر آن‌ها تبخیر می‌شوند.

وزن مخصوص بتن سخت‌شده خشک[۶۴]:

$$312+16+1368+(\frac{263\times37/0}{100}\times121)=1814kg/m^3$$

جزء تشکیل‌دهنده	مقدار (kg/m^3)	چگالی ویژه	حجم در مترمکعب (لیتر)	٪
سیمان	۳۱۲	۳/۱۵	۹۹	۹/۹
دوده‌سیلیس	۱۶	۲/۲۰	۷/۳	۰/۷
سنگدانه درشت	۱۳۶۸	۲/۴۰	۵۷۰	۵۷/۱
آب	۱۲۱	۱	۱۲۱	۱۲/۲
مقدار حفرات طرح	–		۲۰۲/۷	۲۰/۳

مثال ۲:

طرح مخلوط زیر بر اساس مخلوطی است که برای روسازی پارکینگ باید در شرایط آب و هوایی با خطر یخ‌زدن و آب‌شدن ریخته شود و حاوی سنگدانه درشت از جنس سنگ آهک خردشده با وزن مخصوص خشک ذرات ۲/۶۷، جذب آب ۰/۵ درصد و وزن مخصوص خشک متراکم با میله $1570kg/m^3$ است. سنگدانه ریز از جنس ماسه رودخانه‌ای گردگوشه با چگالی ویژه خشک ذرات ۲/۶۱ و جذب آب ۰/۸ درصد نیز در مخلوط استفاده می‌شود. مواد سیمانی شامل سیمان پرتلند نوع I مطابق با مشخصات ذکرشده در ASTM C150/C150M با چگالی ویژه ۳/۱۵، سرباره با چگالی ویژه ۲/۹ و دوده‌سیلیس با چگالی ویژه ۲/۲ است و در مخلوط از الیاف استفاده خواهد شد. روسازی با استفاده از یک شمشه غلتان سنگین ریخته و توسط یک ماله لرزاننده پرداخت می‌شود.

گام۱- تعیین درصد حفرات برای انتخاب سنگدانه درشت: مطابق با شرایط ASTM C29/ C29M و ویژگی‌هایی که پیش‌تر ارائه شد، مقدار حفره‌ها پس از تراکم برابر ۴۱/۲ درصد است که از مقدار حداقل لازم ۳۸ درصد بیشتر است.

$$\left(1-\frac{1570}{2670}\right)\times100=2/41\%$$

گام۲- تعیین مقدار سنگدانه موردنیاز: از آنجا که به دلیل نگرانی‌های مربوط به یخ‌زدن و آب‌شدن و نیز بارگذاری زیاد، استفاده از سنگدانه ریز مطلوب بود، ضریب اصلاح خمیر برای وزن مخصوص خشک متراکم با میله برابر ۰/۹ است. برای سنگدانه با وزن معمولی، استفاده از ۵ تا ۷ درصد سنگدانه ریز باعث افزایش مقاومت و دوام می‌شود.

مقدار سنگدانه درشت $۱۵۷۰\ kg/m^3 \times ۰/۹ = ۱۴۱۳\ kg/m^3$

مقدار سنگدانه ریز $۱۴۱۳\ kg/m^3 \times ۰/۰۵ = ۷۱\ kg/m^3$

گام ۳ - تعیین مقدار مواد سیمانی موردنیاز: از آنجا که در بتن‌ریزی از انرژی تراکمی زیاد استفاده می‌شود، مقدار مواد سیمانی موردنیاز برابر حاصل ضرب وزن سنگدانه در عدد ۰/۲۱ است.

مقدار کل مواد سیمانی ۲۹۷ = ۰/۲۱ × ۱۴۱۳

گام ٤ - انتخاب مواد سیمانی مکمل موردنیاز: در صورت مساله بیان شد که از سرباره و دوده‌سیلیس به عنوان ماده سیمانی مکمل استفاده خواهد شد. تحقیقات مربوط به بتن تراوا نشان داده است که کاربرد حداکثر ۵ درصد دوده‌سیلیس، مناسب و سودمند است و بر همین اساس، در این مثال از مقدار ۵ درصد استفاده می‌شود و میزان جایگزینی سرباره نیز برابر ۲۵ درصد خواهد بود.

مقدار دوده‌سیلیس $۲۹۷\ kg/m^3 \times ۰/۰۵ = ۱۵\ kg/m^3$

مقدار سرباره $۲۹۷\ kg/m^3 \times ۰/۲۵ = ۷۴\ kg/m^3$

مقدار سیمان پرتلند نوع I $۲۹۷\ kg/m^3 - ۱۵ - ۷۴ = ۲۰۸\ kg/m^3$

گام ۵ - انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار آب موردنیاز: محدوده متداول نسبت آب به مواد سیمانی برای بتن تراوا، از ۰/۳ تا ۰/۴ است. به این دلیل که در این مثال نسبت آب به مواد سیمانی مشخص نشده بود، نسبت ۰/۳۵ به عنوان مقدار اولیه انتخاب می‌شود تا مقاومت و دوام موردنیاز برآورده گردد.

مقدار آب $۲۹۷\ kg/m^3 \times ۰/۳۵ = ۱۰۴\ kg/m^3$

گام ٦ - انتخاب مواد افزودنی: برای مطالعه جزییات مربوط به انتخاب مواد افزودنی به فصل‌های ۴ و ۵ مراجعه شود. سه ماده افزودنی زیر و مقدار آن‌ها از مقادیری که معمولا در ادبیات فنی گزارش شده است انتخاب گردیده‌اند.

(الف) ماده هوازا: $۰/۳۷\ kg/m^3$ (۰/۱۲ درصد مواد سیمانی حاوی دوده‌سیلیس)

(ب) ماده فوق‌کاهنده آب پلی‌کربوکسیلات: $۱/۱\ kg/m^3$ (۰/۳۷ درصد مواد سیمانی حاوی دوده‌سیلیس)

(پ) افزودنی کنترل‌کننده هیدراته‌شدن: $۱/۱\ kg/m^3$ (۰/۳۷ درصد مواد سیمانی حاوی دوده‌سیلیس)

گام ۷ - انتخاب الیاف (در صورت نیاز): در این مثال از الیاف میکروی تک‌رشته‌ای پلی‌پروپیلن با چگالی ۰/۹ استفاده شد که مقدار آن برابر حداکثر ذکرشده در بند (الف) گام ۷ بخش ۶-۳ خواهد بود.

گام ۸ - تعیین طرح مخلوط آزمون، وزن مخصوص طرح (DUW) و مقدار حفرات طرح (DVC): برای این مخلوط، مقدار درصد حفرات طرح برابر ۲۴ درصد خواهد بود که در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصدی معمول برای بتن تراوا است. مقدار وزن مخصوص بتن سخت‌شده خشک طرح، شامل مقدار مواد سیمانی، سنگدانه خشک و آب مشارکت‌کننده در محصولات هیدراته‌شدن است.

وزن مخصوص بتن سخت‌شده خشک:

$$208+74+15+1413+71+0/9+(\frac{263\times 35/0}{100}\times 104)=1878 kg/m^3$$

جزء تشکیل‌دهنده	مقدار (kg/m^3)	چگالی ویژه	حجم در مترمکعب (لیتر)	درصد حجمی
سیمان	۲۰۸	۳/۱۵	۶۶	۶/۶
سیمان سرباره	۷۴	۲/۹۰	۲۵/۵	۲/۵۵
دوده‌سیلیس	۱۵	۲/۲۰	۶/۸	۰/۷
سنگدانه درشت	۱۴۱۳	۲/۶۷	۵۲۹	۵۲/۹
سنگدانه ریز	۷۱	۲/۶۱	۲۷	۲/۷
آب	۱۰۴	۱	۱۰۴	۱۰/۴
الیاف	۰/۹	۰/۹	۱	۰/۱
مقدار حفرات طرح	–		۲۴۰/۳	۲۴

فصل ۷

طراحی روسازی تراوا

۷-۱- مقدمه

در طراحی روسازی تراوا، باید طراحی و چیدمان ساختگاه با درنظر گرفتن ضخامت روسازی انجام شود. در تعیین ضخامت یک مقطع روسازی تراوا، دو تحلیل مهم باید انجام گیرد: یکی برای کفایت سازه‌ای و دیگری برای خصوصیات هیدرولیکی. این دو ویژگی بر یکدیگر تاثیرگذار هستند، بنابراین هر دو باید با دقت مورد توجه قرار گیرند. باید از ضخامت روسازی بیشتری که بدست می‌آید استفاده شود. در این فصل هر دو جنبه مذکور مورد بحث قرار می‌گیرند.

۷-۲- طراحی ساختگاه

طراحی و چیدمان ساختگاه برای روسازی‌های تراوا، مستلزم تغییر رویکرد نسبت به طراحی‌های قدیمی روسازی غیرتراوا است. برخلاف روسازی‌های غیرتراوا که در آن‌ها لایه اساس زیر روسازی، خشک نگه داشته می‌شود، در روسازی تراوا، آب در لایه آبگیر ذخیره می‌گردد. به جای شیب‌بندی زمین ساختگاه به‌گونه‌ای که بیشتر آب زهکشی به سمت روسازی جریان یابد، طراحی ساختگاه باید به صورتی باشد که رواناب نواحی فضای سبز و سطوح غیرتراوا را به قسمت‌های دور از روسازی تراوا هدایت کند تا از رسوب‌گذاری و گرفتگی حفرات به‌هم‌پیوسته موجود در آن جلوگیری شود. بسته به ساختگاه، جداسازی منابع رسوب از روسازی تراوا را می‌توان توسط روش‌های مختلف، از جداسازی تراز ارتفاعی آن‌ها تا ساخت سازه‌های کمکی (ایجاد موانع) انجام داد.

۷-۳- طراحی سازه‌ای

۷-۳-۱- بستر و زیراساس

زیراساس، لایه سنگدانه‌ای است که در زیر روسازی اجرا می‌شود. بستر، خاک زیر روسازی و زیراساس است. زیراساس، باربری قائم، ظرفیت ذخیره آب و قابلیت صاف کردن (فیلتر کردن) به منظور زدودن آلاینده‌ها را فراهم می‌کند. ممکن است برخی از خاک‌ها، باربری و زهکشی کافی را تامین کنند، بنابراین در این حالت اجرای لایه زیراساس می‌تواند اختیاری باشد. با این حال، در صورتی که باربری و قابلیت زهکشی یا صاف کردن (فیلترکردن) بستر محدود باشد، در این صورت اجرای لایه زیراساس ضروری است. در مناطق رویارو با چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، لایه زیراساس سنگی به عنوان عایق عمل می‌کند و تاخیر قابل‌توجهی در تشکیل یخ در زیر روسازی تراوا به وجود می‌آورد (Bäckström، ۲۰۰۰؛ Kevern و Schaefer، ۲۰۰۸). بستر نیز باربری قائم را برای روسازی فراهم می‌کند. افزایش سختی زیراساس و بستر، باعث افزایش ظرفیت باربری سامانه روسازی می‌شود. سختی بستر را می‌توان توسط مدول واکنش بستر، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) یا چند روش دیگر که کمتر متداول هستند، اندازه‌گیری کرد. جدول ۷-۳-۱-الف که از مراجع ACI 330R و Delatte (۲۰۱۴) تهیه شده است، مقادیر سختی معمول انواع خاک‌های مختلف و همبستگی بین مقادیر محاسباتی و مقادیر حاصله از روش‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

در طراحی روسازی متعارف، تلاش می‌شود که از ورود آب به بستر جلوگیری گردد. در حالی که در بیشتر موارد، روسازی تراوا به گونه‌ای طراحی می‌شود که ورود آب به بستر و اشباع نمودن آن را تسهیل کند. هنگام تعیین ویژگی‌های بستر باید این نکته را در نظر گرفت. هرچه خاک بیشتر متراکم شود، تخلخل آن کمتر می‌گردد. به همین دلیل، بستر روسازی تراوا، در مقایسه با بستر روسازی بتنی متعارف معمولا با چگالی کمتری متراکم می‌شوند. نرخ تراوایی سطحی خاک به منظور استفاده در طراحی هیدرولوژیکی باید مطابق با ASTM D3385 اندازه‌گیری شود. در برخی از کاربردها، مانند روسازی پیاده‌رو، ممکن است متراکم‌کردن بستر ضروری نباشد.

ASTM D1883 روشی آزمایشگاهی برای تعیین CBR یک خاک معین تعریف می‌کند که شامل گزینه‌ای اختیاری برای خیساندن نمونه خاک در آب به مدت ۹۶ ساعت قبل از آزمایش است. از این گزینه اختیاری باید برای آزمایش خاک‌های ریزدانه استفاده شود که بر اساس معیارهای تراکم تعیین‌شده توسط مهندس طراح، متراکم خواهند شد.

هنگام تعیین میزان تراکم در طراحی سازه‌ای، باید به تاثیری که تراکم، بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های مختلف دارد توجه شود. متراکم‌کردن برخی از خاک‌های رسی تا ۹۰ درصد ممکن است باعث کاهش قابل‌توجه نفوذپذیری گردد، در حالی که متراکم نمودن خاک‌های ماسه‌ای تا حدود ۱۰۰ درصد ممکن است تاثیر ناچیزی بر نفوذپذیری داشته باشد. بنابراین، مهم است که قبل از تعیین محدوده تراکم، خاک‌های موجود در هر پروژه از نظر ظرفیت‌های سازه‌ای و زهکشی به دقت بررسی شوند. آزمایش کارگاهی نفوذپذیری بستر پس از انجام تراکم به منظور حصول اطمینان از اینکه همچنان با محاسبات سازه‌ای و هیدرولیکی مورد استفاده برای آن ساختگاه مطابقت دارند نیز به همان اندازه حائز اهمیت است.

جدول ۷-۳-۱-الف- محدوده توصیه‌شده مقدار k برای خاک‌های مختلف (برگرفته از AASHTO، ACI 330R (۱۹۹۸) و Delatte (۲۰۱۴)

طبقه‌بندی AASHTO	توصیف	طبقه‌بندی ASTM/USCS	چگالی خشک (kg/m^3)	CBR (٪)	مقدار k (m/MPa)
خاک‌های درشت‌دانه					
A-1-a، خوب دانه‌بندی‌شده	شن	GW، GP	۲۲۴۰ تا ۲۰۰۰	۸۰ تا ۶۰	۱۲۲ تا ۸۱
A-1-a، بد دانه‌بندی‌شده			۲۰۸۰ تا ۱۹۲۰	۶۰ تا ۳۵	۱۰۸ تا ۸۱
A-1-b	ماسه درشت	SW	۲۰۸۰ تا ۱۷۶۰	۴۰ تا ۲۰	۱۰۸ تا ۵۴
A-3	ماسه ریز	SP	۱۹۲۰ تا ۱۶۸۰	۲۵ تا ۱۵	۸۱ تا ۴۱
خاک‌های A-2 (خاک‌های دانه‌ای با ریزدانه زیاد)					
A-2-4، شنی A-2-5، شنی	شن سیلت‌دار و ماسه‌دار	GM	۲۳۲۰ تا ۲۰۸۰	۴۰ تا ۸۰	۱۳۶ تا ۸۱
A-2-4، ماسه‌ای A-2-5، ماسه‌ای	ماسه سیلت‌دار و شن‌دار	SM	۲۱۶۰ تا ۱۹۲۰	۲۰ تا ۴۰	۱۰۸ تا ۸۱
A-2-6، شنی A-2-7، شنی	شن رس‌دار و ماسه‌دار	GC	۲۲۴۰ تا ۱۹۲۰	۲۰ تا ۴۰	۱۲۲ تا ۵۴
A-2-6، ماسه‌ای A-2-7، ماسه‌ای	ماسه رس‌دار و شن‌دار	SC	۲۰۸۰ تا ۱۶۸۰	۱۰ تا ۲۰	۹۵ تا ۴۱
خاک‌های ریزدانه (۱)					
A-4	سیلت	ML، OL	۱۶۸۰ تا ۱۴۴۰	۸ تا ۴	۴۵ تا ۷ (۱)
	مخلوط سیلت، ماسه و شن		۲۰۰۰ تا ۱۶۰۰	۱۵ تا ۵	۶۰ تا ۱۱ (۱)
A-5	سیلت بد دانه‌بندی‌شده	MH	۱۶۰۰ تا ۱۲۸۰	۸ تا ۴	۵۱ تا ۷ (۱)
A-6	رس خمیری	CL	۲۰۰۰ تا ۱۶۰۰	۱۵ تا ۵	۶۹ تا ۷ (۱)
A-7-5	رس ارتجاعی با خاصیت خمیری متوسط	CL، OL	۲۰۰۰ تا ۱۴۴۰	۱۵ تا ۴	۵۸ تا ۷ (۱)
A-7-6	رس ارتجاعی با خاصیت خمیری زیاد	CH، OH	۱۷۶۰ تا ۱۲۸۰	۵ تا ۳	۶۰ تا ۱۱ (۱)

(۱) مقدار k برای خاک ریزدانه به‌طور قابل توجهی به درجه اشباع آن بستگی دارد.

خاک‌های منبسط‌شونده[۶۵]، خاک‌هایی هستند که در صورت تغییر در میزان رطوبت، تغییر حجم می‌دهند. اثرات منفی خاک‌های منبسط‌شونده را می‌توان توسط اصلاح شیمیایی یا از طریق خاکبرداری لایه‌های بالایی و جایگزینی آن‌ها با خاک‌های غیرمنبسط‌شونده کاهش داد. عمق جایگزینی یا اصلاح خاک باید به گونه‌ای انتخاب شود که فشار رو به پایینی که توسط خاک پایدار واقع در عمق کم ایجاد می‌شود، از فشارهای رو به بالای خاک منبسط‌شونده در اثر افزایش رطوبت خاک در قسمت‌های عمیق‌تر بیشتر باشد. نفوذپذیری خاک رسی از طریق تثبیت با آهک[۶۶] به سرعت افزایش می‌یابد. خاک‌های حاوی مقدار رس زیادتر و خاک‌هایی که در سمت خشک‌تر از رطوبت بهینه متراکم شده‌اند، تمایل دارند که در نتیجه اصلاح با آهک، افزایش بیشتری در نفوذپذیری داشته باشند. با این حال، در برخی موارد، نفوذپذیری با افزایش سن کاهش می‌یابد (Bell، ۱۹۹۳). خاک‌های اصلاح‌شده با سیمان و خاکستر بادی، پس از کاربرد، نفوذپذیری کمتری از خود نشان می‌دهند (Little و همکاران، ۲۰۰۰). بسته به نوع کاربرد، نفوذپذیری کاهش‌یافته می‌تواند برای کاربردهایی مانند برداشت آب[۶۷] (جمع‌آوری و برداشت آب ناشی از بارش) مطلوب باشد.

برخی از خاک‌ها در معرض بالازدگی (برآمدن) ناشی از یخ‌بندان[۶۸] هستند. خاک‌هایی که بالاتر از عمق یخ‌بندان قرار دارند باید برداشته، و با خاک‌هایی که در معرض خطر بالازدگی (برآمدن) ناشی از یخ‌بندان نیستند، جایگزین شوند. همانطور که پیش‌تر بیان شد، ثابت شده است که یک لایه زیراساس مناسب در محافظت از روسازی‌های تراوا در برابر یخ‌بندان موثر است.

اضافه‌کردن یک لایه زیراساس سنگدانه‌ای در زیر روسازی بتنی، سختی تکیه‌گاه روسازی را افزایش می‌دهد. جدول ۷-۳-۱-ب، که از جدول ۳-۲ گزارش ACI 330R-08 و Delatte (۲۰۱۴) تهیه شده، نشان‌دهنده افزایش مدول واکنش بستر در نتیجه ضخامت‌های متفاوت زیراساس است. از این لایه دانه‌ای می‌توان به عنوان محل ذخیره بارش نیز استفاده کرد.

جدول ۷-۳-۱-ب- تاثیر لایه‌های زیراساس اصلاح‌نشده بر مقادیر k

مقدار k بستر (m/MPa)	ضخامت لایه زیراساس (mm)			
	۱۰۰	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰
۱۳/۵	۱۷/۵	۲۰	۲۳	۳۰
۲۷	۳۵	۳۸	۴۳	۵۱
۵۴	۶۰	۶۲	۷۳	۸۷
۸۱	۸۷	۸۹	۱۰۰	۱۱۷

۷-۳-۲- مقاومت بتن

راهنمای طراحی سازه‌ای روسازی‌های بتنی متعارف برای پارکینگ‌ها در ACI 330R و برای خیابان‌ها و جاده‌ها در ACI 325.12R ارائه شده است. این مراجع بسیاری از جنبه‌های مختلف طراحی روسازی را

پوشش می‌دهند. با این حال، توصیه‌های مربوط به طراحی سازه‌ای در این مراجع، لزوما برای کاربرد در روسازی تراوا مناسب نیستند. به عنوان مثال، جداول طراحی در این دو راهنما بر اساس حداقل مقاومت خمشی بتن 4/3 MPa هستند در حالی که بتن تراوا اغلب دارای مقاومت‌های خمشی کمتری است. از آنجا که هیچ روش آزمایش استانداردی برای تعیین مقاومت فشاری و خمشی بتن تراوا وجود ندارد، طراحی و تدوین مشخصات بر اساس مقاومت بتن نگرانی‌هایی را ایجاد می‌کند. با این حال، تا زمانی که روش‌های آزمایش مناسب در دسترس قرار گیرد، می‌توان طراحی را بر اساس مقاومت‌های تخمینی انجام داد.

برنامه طراحی ACPA PerviousPave به مهندس طراح این امکان را می‌دهد تا روسازی‌های تراوا را با استفاده از واحدهای مرسوم ایالات متحده یا SI طراحی کند. این نرم‌افزار را می‌توان برای طراحی هیدرولوژیکی و همچنین طراحی سازه‌ای روسازی‌های بتنی تراوا استفاده کرد (ACPA، a۲۰۱۴).

برای روسازی‌های بتنی تراوا، تا حدودی همچون روسازی‌های متعارف، ابتدا طراحی سازه‌ای و سپس طراحی سامانه زهکشی یا هیدرولوژیکی انجام می‌شود. با توجه به نتایج این دو طراحی، از مقطع دارای ضخامت بیشتر استفاده می‌شود.

طراحی روسازی‌های بتنی بر اساس خستگی، اندکی مشکل‌زا است. در حال حاضر، هیچ روش آزمایش استانداردی برای بررسی خستگی بتن تراوا وجود ندارد و تحقیقات کمی در مورد عملکرد خستگی آن انجام شده است. در نتیجه، در حال حاضر این رویکرد طراحی را باید با احتیاط بکار برد. این احتیاط هم در نرم‌افزار PerviousPave و هم در دستورالعمل‌های پشتیبان ACPA (ACPA، a2014) ارائه شده است. هنگامی که اطلاعات دقیق‌تری در مورد خستگی روسازی‌های بتنی تراوا در دسترس قرار گیرد، می‌توان روش‌های طراحی مبتنی بر خستگی را به روز کرد.

در تهیه این جداول طراحی، مقاومت‌های فشاری بتن تراوا برابر ۱۳/۸، ۲۰/۷، یا ۲۷/۶ MPa در نظر گرفته می‌شود که به ترتیب به مقاومت‌های خمشی ۲/۱ تا ۳/۱، ۲/۸ تا ۳/۸ و ۳/۵ تا ۴/۵ MPa مربوط هستند. در حال حاضر هیچ روش آزمایش پذیرفته شده‌ای برای مقاومت خمشی بتن تراوا وجود ندارد.

۷-۳-۳- انتخاب ضخامت روسازی

برای یک مقاومت معین بتن، انتخاب ضخامت روسازی عمدتا بر مبنای مدول واکنش بستر (مقدار k) و میزان تردد وسایل نقلیه انجام می‌شود. مقادیر مدول واکنش بستر و تعدیل‌های مربوط به لایه‌های اساس اصلاح‌نشده در جداول ۷-۳-۱-الف و ۷-۳-۱-ب ارائه شده است. مطابق با دستورالعمل برنامه ACPA Per-viousPave (a2014)، مقدار k را می‌توان مستقیما یا به صورت مدول ارتجاعی بستر[۶۹] (MRSG) برحسب تنش به همراه ویژگی‌های لایه یا لایه‌های آبگیر به نرم‌افزار وارد کرد. ممکن است از یک یا دو لایه آبگیر استفاده شود که ضخامت آن‌ها بر حسب میلی‌متر به نرم‌افزار وارد می‌شود. به جز حالتی که روسازی‌های تراوا مستقیما روی خاک‌های با زهکشی آزاد قرار دارند، تقریبا همواره از لایه‌های اساس آبگیر استفاده می‌شود.

[69] Resilient modulus of the subgrade

بنابراین، مقدار k زیراساس نسبت به سایر روسازی‌های با تردد کم، از اهمیت کمتری برخوردار است.

طبقه‌بندی‌های میزان تردد وسایل نقلیه توسط میانگین عبور روزانه کامیون (ADTT) تعریف می‌شود. مباحث تکمیلی در این مورد در مراجع ACI 330R و Delatte (۲۰۱۴) ارائه شده است. ADTT، معادل بار محور یک کامیون تک‌اندازه نیست، بلکه مجموعه‌ای از کامیون‌های با اندازه های کوچک تا بزرگ، با تواتر زیاد کامیون‌های کوچک و تواتر کم کامیون‌های بزرگ را در نظر می‌گیرد. از آنجا که سنگین‌ترین کامیون‌ها، حتی با تعداد عبور کم، دلیل عمده آسیب ناشی از خستگی روسازی هستند، باید مبنای انتخاب طبقه‌بندی میزان تردد باشند. طبقه‌بندی‌های میزان تردد در نرم‌افزار ACPA PerviousPave (a2014)عبارتند از: راه محلی یا پارکینگ، راه جمع کننده[70] ۷۰، شانه راه‌های شریانی درجه ۲، و شانه راه‌های شریانی درجه ۱. در این برنامه فرض می‌شود که شانه راه تنها ۱۰ درصد از حجم عبوری وسایل نقلیه از روسازی خط سواره‌روی اصلی را متحمل می‌شود. طبقه‌بندی میزان تردد وسایل نقلیه در جدول ۷-۳-۳-الف ارائه شده است.

طراحی ضخامت روسازی بتنی همچنین تحت تاثیر تکیه‌گاه کناری روسازی قرار دارد. خیابان‌های شهری معمولا دارای جداول و جوی‌های کوچکی هستند که به لبه پیاده‌رو متصل، و یا به‌طور یکپارچه با پیاده‌روها اجرا شده‌اند. این کار تنش‌های کناره‌ای روسازی را کاهش می‌دهد و ساخت روسازی‌های نازک‌تر را ممکن می‌سازد. می‌توان ابتدا جداول و جوی‌های کوچک را ساخت و سپس از آن‌ها به عنوان قالب‌های جانبی برای ساخت روسازی خیابان یا پارکینگ استفاده نمود.

در مواردی که تکیه‌گاه کناری فراهم نشده نباشد، ضخامت روسازی را می‌توان با استفاده از جدول ۷-۳-۳-ب تعیین کرد. جدول ۷-۳-۳-پ برای روسازی‌های دارای تکیه‌گاه کناری است. این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار PerviousPave تهیه شده‌اند و بر اساس عمر طراحی ۲۰ ساله هستند.

به عنوان مثال، یک جاده جمع‌کننده با میانگین تردد روزانه یک‌طرفه (ADT) ۱۰۰۰ وسیله نقلیه، با ۵ درصد یا ۵۰ کامیون در روز را در نظر بگیرید. جنس خاک بستر از نوع ماسه رس‌دار SC یا خاک ماسه‌ای A-2-6یا A-2-7 با مقدار CBR ۱۰ تا ۲۰ و مقدار k برابر ۴۱ m/MPa است. با اجرای یک لایه زیراساس از جنس سنگ خردشده با ضخامت ۲۰۰ mm، مقدار k را می‌توان با درونیابی از جدول ۷-۳-۱-ب، به مقدار ۵۴ m/MPa افزایش داد. یک جدول و جوی کوچک بتنی وجود دارد و مقاومت خمشی تخمینی بتن تراوا برابر ۲/۸ MPa است. با استفاده از جدول ۷-۳-۳-پ، ضخامت موردنیاز روسازی برابر ۱۹۱ mm است. مباحث تکمیلی در مورد این مثال طراحی در مرجع Delatte (۲۰۱۴) ارائه شده است.

راه‌حلی جایگزین برای مدیریت تردد سنگین‌تر وسایل نقلیه و در عین حال حفظ مزایای روسازی بتنی تراوا، ترکیب بتن تراوا با روسازی متعارف بتنی یا آسفالتی است.

---

[70] Collector

می‌توان بخشی از پارکینگ را با استفاده از بتن تراوا ساخت، در حالی که بقیه روسازی آن به صورت آسفالتی یا بتنی متعارف است و رواناب آن‌ها به بخش تراوای روسازی زهکشی می‌شود. راه‌حل جایگزین دیگری که برای خیابان‌های شهری با چهار خط سواره‌رو استفاده شده، ساخت خطوط سواره‌روی میانی با بتن متعارف است که به خطوط کناری که با استفاده از بتن تراوا ساخته شده‌اند، زهکشی می‌شوند. در این موارد، بتن تراوا باید طوری طراحی شود که نه تنها بارانی که مستقیما روی آن می‌بارد، بلکه رواناب سطوح ناتراوای مجاور را نیز کنترل کند. این کار می‌تواند در صورتی که بتن تراوا به‌طور منظم تمیز نشود، خطر پرشدگی آن با رسوبات را افزایش دهد (Delatte، ۲۰۱۴). تمیز کردن بتن تراوا در بخش ۸-۱۰، قسمت تعمیر و نگهداری مورد بحث قرار گرفته است.

جدول ۷-۳-۳-الف- طبقه‌بندی میزان تردد خیابان و پارکینگ بر اساس ACI 325,12R و ACI 330R (Delatte، 2014)

طبقه‌بندی خیابان یا پارکینگ	VPD یا ADT، دوطرفه [1]	وسایل نقلیه سنگین (دومحوره، شش‌چرخ و سنگین‌تر)		طبقه بندی راه
		درصد	تعداد عبور کامیون در روز	
فقط پارکینگ خودرو		۰	۰	محلی
خطوط دسترسی کامیون			۱ تا ۱۰	محلی
راه محلی با تردد کم	۲۰۰	۱ تا ۲	۲ تا ۴	محلی
راه محلی	۲۰۰ تا ۱۰۰۰	۱ تا ۲	۲ تا ۴	محلی
ورودی مراکز خرید و خطوط خدماتی، پارکینگ اتوبوس و کامیون			۲۵ تا ۳۰۰	جمع‌کننده
راه جمع‌کننده	۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰	۳ تا ۵	۵۰ تا ۵۰۰	جمع‌کننده
پارکینگ اتوبوس و کامیون			۱۰۰ تا ۷۰۰	شریانی درجه ۲
شریانی درجه ۲	۴۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰	۱۰	۳۰۰ تا ۶۰۰	شریانی درجه ۲
شریانی درجه ۱	۴۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰	۱۵ تا ۲۰	۷۰۰ تا ۱۵۰۰	شریانی درجه ۱
تجاری	۱۱۰۰۰ تا ۱۷۰۰۰	۴ تا ۷	۴۰۰ تا ۷۰۰	شریانی درجه ۱
صنعتی	۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰	۱۵ تا ۲۰	۳۰۰ تا ۸۰۰	شریانی درجه ۱
پارکینگ کامیون‌های سنگین			۷۰۰	شریانی درجه ۱

(۱) تعداد وسیله نقلیه در روز یا میانگین تعداد عبوری

جدول ۷-۳-۳-ب- جدول طراحی ضخامت روسازی، بدون تکیه‌گاه کناری (**Delatte**، ۲۰۱۴)

CBR = ۲		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۵ ۱۳/MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰
	۱۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۳۰
جمع کننده	۲۵	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۵۵
	۳۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۸۰
	۳۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۹۰
	۷۰۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۸۰	۳۰۵
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۵۵	۲۷۵	۲۹۰	۳۲۰
	۱۵۰۰	۲۷۵	۲۸۰	۳۰۵	۳۳۰
CBR = ۳		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۲۷ MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۲۰۰
	۱۰	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۳۰
جمع کننده	۲۵	۱۹۰	۲۰۰	۲۳۰	۲۴۰
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۷۵
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۷۵
	۷۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۸۰	۳۰۵
	۱۵۰۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰	۳۲۰

جدول ۷-۳-۳-ب (ادامه)- جدول طراحی ضخامت روسازی، بدون تکیه‌گاه کناری (Delatte، ۲۰۱۴)

CBR = ۶		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۴۰/۵ MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۲۰۰
	۱۰	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۳۰
جمع‌کننده	۲۵	۱۹۰	۲۰۰	۲۳۰	۲۴۰
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۷۵
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۷۵
	۷۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۸۰	۳۰۵
	۱۵۰۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰	۳۲۰
CBR = ۱۰		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۵۴ MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۰
	۱۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۰	۲۱۵
جمع‌کننده	۲۵	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰
	۳۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۷۵
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵
	۷۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۸۰
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۹۰
	۱۵۰۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۸۰	۳۰۵

جدول ۷-۳-۳-ب (ادامه)- جدول طراحی ضخامت روسازی، بدون تکیه‌گاه کناری (Delatte، ۲۰۱۴)

CBR = ۲۶		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۸۱ MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۴۰	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰
	۱۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰
جمع‌کننده	۲۵	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۳۰
	۳۰۰	۱۹۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰
	۳۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵
	۷۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۷۵
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۸۰
	۱۵۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰

جدول ۷-۳-۳-پ- جدول طراحی ضخامت روسازی، با تکیه‌گاه کناری (**Delatte**، ۲۰۱۴)

CBR = ۲		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۱۳/۵ MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۱۹۰
	۱۰	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵
جمع کننده	۲۵	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۴۰	۲۷۵
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۵۵
	۳۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۷۵
	۷۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۷۵
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۸۰	۳۰۵
	۱۵۰۰	۲۴۰	۲۷۵	۲۸۰	۳۰۵
CBR = ۳		مقاومت خمشی بتن تراوا			
۲۷ MPa/m		۳/۱ MPa	۲/۸ MPa	۲/۴ MPa	۲/۱ MPa
طبقه‌بندی تردد	ADTT	ضخامت موردنیاز روسازی (mm)			
راه محلی یا پارکینگ	۱	۱۴۰	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰
	۱۰	۱۵۰	۱۶۵	۱۸۰	۲۰۰
جمع کننده	۲۵	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵
	۳۰۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۳۰	۲۴۰
شانه راه شریانی درجه ۲	۱۰۰	۱۹۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۳۰
	۳۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۴۰
	۷۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۲۴۰	۲۵۵
شانه راه شریانی درجه ۱	۷۰۰	۲۱۵	۲۳۰	۲۵۵	۲۷۵
	۱۵۰۰	۲۳۰	۲۴۰	۲۵۵	۲۸۰

جدول ۷-۳-۳-پ (ادامه)- جدول طراحی ضخامت روسازی، با تکیه‌گاه کناری (Delatte، ۲۰۱۴)

مقاومت خمشی بتن تراوا				CBR = ۶	
۲/۱ MPa	۲/۴ MPa	۲/۸ MPa	۳/۱ MPa	۴۰/۵ MPa/m	
ضخامت موردنیاز روسازی (mm)				ADTT	طبقه‌بندی تردد
۱۶۵	۱۵۰	۱۴۰	۱۲۵	۱	راه محلی یا پارکینگ
۱۹۰	۱۸۰	۱۶۵	۱۵۰	۱۰	
۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۶۵	۲۵	جمع کننده
۲۳۰	۲۱۵	۱۹۰	۱۸۰	۳۰۰	
۲۳۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۰۰	شانه راه شریانی درجه ۲
۲۴۰	۲۱۵	۲۰۰	۱۹۰	۳۰۰	
۲۴۰	۲۳۰	۲۰۰	۱۹۰	۷۰۰	
۲۵۵	۲۴۰	۲۱۵	۲۰۰	۷۰۰	شانه راه شریانی درجه ۱
۲۷۵	۲۴۰	۲۳۰	۲۱۵	۱۵۰۰	
مقاومت خمشی بتن تراوا				CBR = ۱۰	
۲/۱ MPa	۲/۴ MPa	۲/۸ MPa	۳/۱ MPa	۵۴ MPa/m	
ضخامت موردنیاز روسازی (mm)				ADTT	طبقه‌بندی تردد
۱۶۵	۱۵۰	۱۴۰	۱۲۵	۱	راه محلی یا پارکینگ
۱۸۰	۱۶۵	۱۵۰	۱۴۰	۱۰	
۲۰۰	۱۹۰	۱۶۵	۱۶۵	۲۵	جمع کننده
۲۳۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۳۰۰	
۲۱۵	۲۰۰	۱۸۰	۱۶۵	۱۰۰	شانه راه شریانی درجه ۲
۲۳۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۳۰۰	
۲۴۰	۲۱۵	۲۰۰	۱۹۰	۷۰۰	
۲۵۵	۲۳۰	۲۱۵	۲۰۰	۷۰۰	شانه راه شریانی درجه ۱
۲۵۵	۲۴۰	۲۱۵	۲۰۰	۱۵۰۰	

جدول ۷-۳-۳-پ (ادامه)- جدول طراحی ضخامت روسازی، با تکیه‌گاه کناری (Delatte، ۲۰۱۴)

مقاومت خمشی بتن تراوا				CBR = ۲۶	
۲/۱ MPa	۲/۴ MPa	۲/۸ MPa	۳/۱ MPa	۸۱ MPa/m	
ضخامت موردنیاز روسازی (mm)				ADTT	طبقه‌بندی تردد
۱۵۰	۱۴۰	۱۲۵	۱۲۵	۱	راه محلی یا پارکینگ
۱۸۰	۱۵۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۰	
۱۹۰	۱۸۰	۱۶۵	۱۵۰	۲۵	جمع‌کننده
۲۱۵	۱۹۰	۱۸۰	۱۶۵	۳۰۰	
۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۶۵	۱۰۰	شانه راه شریانی درجه ۲
۲۱۵	۲۰۰	۱۸۰	۱۶۵	۳۰۰	
۲۳۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۷۰۰	
۲۴۰	۲۱۵	۲۰۰	۱۹۰	۷۰۰	شانه راه شریانی درجه ۱
۲۴۰	۲۳۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۵۰۰	

۷-٤- طراحی مدیریت سیلاب

۷-٤-۱- کلیات

مزیت اصلی بتن تراوا عملکرد هیدرولوژیکی آن است. در حالی که مقررات سازمان‌های دولتی کنترل سیلاب، متفاوت است، مقررات محلی معمولا تعیین‌کننده چگونگی عملکرد هیدرولوژیکی بتن تراوا است. این مقررات حتی برای مناطق مختلف زمین‌شناسی که در محدوده یک شهر دیده می‌شود نیز تغییر می‌کنند. با این حال، بدون توجه به منطقه جغرافیایی، اصول اولیه فناوری، یکسان است.

تلاش‌هایی برای کاهش اثر توسعه شهرنشینی با کاهش حجم رواناب سیلابی تا مقادیر قبل از توسعه و زدودن آلاینده‌های سیلاب قبل از خروج از محل انجام شده است. در ایالات متحده، سامانه ملی دفع پساب‌های آلوده[۷۱] (NPDES)، تصفیه تمام رواناب‌های سیلابی را برای کاهش میزان آلاینده‌های آب الزام‌آور می‌داند. این یک علم تجربی است و به دلیل تغییر مقدار و جریان آلاینده‌ها، به اندازه تصفیه منابع آب آشامیدنی کاملا دقیق نیست. این فناوری برای تصفیه آب به منظور تولید آب آشامیدنی در نظر گرفته نشده است، زیرا این کار، عملی، اقتصادی یا ضروری نیست. هدف از این کار، تنها حذف بیشترین مقدار آلاینده ممکن است تا همواره آب تمیزتری تخلیه، و تاثیر توسعه شهرنشینی بر منابع آب کاسته شود.

منابع آب معمولا به دو دسته تقسیم می‌شوند: آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی. ایجاد ساختگاه بر روی خاک‌های ماسه‌ای دارای سطح آب زیرزمینی عمیق ممکن است از فلسفه طراحی نفوذ سطحی پیروی کند: تخلیه آب که تا حد امکان تمیز است به سفره آب زیرزمینی انجام می‌شود و تخلیه به بدنه آب‌های سطحی فقط در زمان وقوع طوفان‌های شدید صورت می‌گیرد. هنگامی که ایجاد ساختگاه بر روی خاک‌های رسی، سیلتی و یا در مناطقی با سنگ بستر کم‌عمق صورت می‌پذیرد، زهکشی معمولا باید آب را قبل از خروج از ساختگاه تصفیه کند تا در نهایت به یک جریان آب سطحی مانند نهر، رودخانه یا دریاچه بریزد. با این حال، در زمان وقوع طوفان، مقداری آب در این خاک‌های دارای نفوذپذیری کم دقیقا مانند خاک‌های با نفوذپذیری زیاد، به‌طور سطحی نفوذ می‌کند؛ تنها با این تفاوت که مقدار آب نفوذی، کمتر است. اثر تجمعی این موضوع بر احیا و تصفیه کیفیت آب در طول یک سال می‌تواند قابل توجه باشد.

۷-٤-۱-۱- سه ویژگی مربوط به طراحی بتن تراوا وجود دارد که طراح می‌تواند از آنها بهره‌مند شود: ۱) حجم کاهش‌یافته رواناب، ۲) حجم کاهش‌یافته تصفیه، و ۳) سطح کاهش‌یافته ناتراوای در ساختگاه.

۷-٤-۱-۱-۱- حجم کاهش‌یافته رواناب

حجم کاهش‌یافته رواناب، مقدار سیلابی است که تاسیسات ساخته‌شده با بتن تراوا، علاوه بر حجم رواناب تخلیه‌شده پیش از ساخت، به زمین یا بدنه آبی مجاور تخلیه خواهد کرد.

این تاسیسات که از جمله بهترین اقدامات مدیریت رواناب (BMPs) به شمار می‌روند، شامل حوضچه‌های نگهداشت دائمی آب[۷۲]، حوضچه‌های نگهداشت موقت آب[۷۳]، زیرزهکش‌ها[۷۴]، گودال‌ها و تالاب‌ها هستند. بیشتر این BMPها، املاک و زمین‌های با ارزش و قابل بهره‌برداری را اشغال می‌کنند. با حذف یا کاهش اندازه این تاسیسات، پروژه می‌تواند سود بیشتری برای مالک داشته باشد. این سود می‌تواند به‌صورت کاهش زمین موردنیاز برای پروژه و یا افزایش فضای مولد درآمد باشد.

۷-٤-۱-۱-۲- حجم تصفیه کاهش‌یافته

حجم کاهش‌یافته تصفیه، حجمی از سیلاب است که باید در ساختگاه نگهداری، و قبل از خروج تصفیه شود. تصفیه سیلاب، بسته به نوع BMP می‌تواند توسط ترکیبی از فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی انجام گیرد.

۷-٤-۱-۱-۳- سطح کاهش‌یافته ناتراوا

سطح کاهش‌یافته ناتراوا، بخشی از مساحت زمین است که امکان نفوذ سطحی آب باران در شروع بارندگی را نمی‌دهد. این بخش معمولا از ساختمان‌ها و روسازی‌ها تشکیل شده است. بسیاری از شهرداری‌ها، مساحت سطح ناتراوای مجاز در ساختگاه یک پروژه معین را محدود می‌کنند.

۷-۴-۱-۲- استفاده از روسازی‌های بتنی تراوا، مشروط به نگهداری مناسب، به عنوان یک سامانه نگهداری یا نفوذ سطحی و به عنوان یکی از بهترین اقدامات مدیریت رواناب (BMP)، برای بهبود کیفیت و کاهش حجم رواناب موثر است (جدول ۷-۴-۱-۲). برای مثال، مدیریت آب منطقه‌ای رودخانه St. Johns(۱۹۹۹)، سامانه نگهداری رواناب را به‌گونه‌ای تعریف می‌کند که شامل روسازی تراوای با زیرسازی باشد.

کاهش تاسیسات زهکشی ناشی از حجم کاهش‌یافته رواناب در نتیجه استفاده از بتن تراوا، برای سازنده منفعت اقتصادی دارد. این منفعت اقتصادی را می‌توان با مقایسه قیمت ساخت پارکینگ بتنی تراوا با ساخت حوضچه به همراه سازه‌های زهکشی و خریداری زمین مربوطه ارزیابی کرد.

---

[72] Retention pond
[73] Detention pond
[74] Underdrain

جدول ۷-۴-۱-۲- مطالعات مربوط به حذف آلاینده‌ها توسط بتن تراوای برجا در مقایسه با روسازی ناتراوا

مطالعه	منطقه	تعداد دفعات بارش در نمونه	C یا M	TSS	TP	TN	Pb	Zn	Cu
Rushton (۲۰۰۱)	Tampa، فلوریدا	۱۲ تا ۳۰	C	۲۶ تا ۲۸	۳۹ تا ۵۶	۳۱ تا ۶۲	۵۸ تا ۶۹	۳۶ تا ۵۳	۵۸ تا ۶۷
Drake و همکاران (۲۰۱۲)	Vaughan، اونتاریو	۳۰ تا ۴۵	C	۷۹	–	–	-۵	۸۷	۴۹
Selbig و Buer (۲۰۱۸)	Madison، ویسکانسین	۴۳	M	۵۹	۲۳	–	–	–	–
Selbig و همکاران (۲۰۱۹)	Madison، ویسکانسین	۸۴	M	۶۵	۴۳	–	۵۹	۵۲	۴۹
Pilon و همکاران (۲۰۱۹)	Alcoa، تنسی	۵	C	۹۷	–	–	–	۳۱	–

توضیحات: C = کاهش غلظت آلاینده اندازه‌گیری شده است؛ M = کاهش جرم آلاینده‌ها اندازه‌گیری شده است؛ TSS = کل ذرات جامد معلق؛ TP = کل فسفر؛ TN = کل نیتروژن؛ Cd = کادمیوم؛ Pb = سرب؛ Zn = روی؛ Cu = مس. مقادیر منفی نشان‌دهنده کمک روسازی به افزایش میزان آلاینده است.

برای مباحث کامل‌تر در مورد بهترین اقدامات مدیریت تصفیه سیلاب، به مرجع مدیریت آب منطقه‌ای رودخانه St. Johns (۱۹۹۹) مراجعه گردد. برای اطلاعات کلی در مورد هیدرولوژی سیلاب که به حوزه کنترل اداره مدیریت آب خاصی مربوط نیست، به Ferguson (۱۹۹۴، ۱۹۹۸) و Debo و Reese (۲۰۰۲) مراجعه شود.

۷-٤-۲- کاهش استعداد گرفتگی (پرشدگی)

طراح روسازی بتنی تراوا می‌تواند با اطمینان از رعایت موارد زیر در طراحی ساختگاه، احتمال وقوع گرفتگی (پرشدگی) را کاهش دهد:

الف) ارتفاع مناطق محوطه‌سازی‌شده، از ارتفاع روسازی بتنی تراوا پایین‌تر باشد (شکل ۷-۴-۲). در صورتی که این کار امکان‌پذیر نیست، شیب قسمت‌های محوطه‌سازی‌شده تا حداقل میزان ممکن کاهش، و این مناطق که در ارتفاعی بالاتر از روسازی بتنی تراوا قرار دارند، به وسیله جدول از روسازی تراوا جدا شوند.

شکل ۷-۴-۲- نمونه فضای سبز در ارتفاعی کمتر از روسازی بتنی تراوا

ب) طراحی ساختگاه، فرسایش قسمت‌های دارای خاک دست‌خورده را به حداقل برساند. در این قسمت‌ها، باید از کاربرد خاک بدون پوشش اجتناب شود و استفاده از چمن دائمی و بوته‌های پوشاننده توصیه می‌گردد. در زمان ساخت، همواره باید از اقدامات کنترلی ویژه مانند حصار توری[۷۵] استفاده شود.

پ) از حرکت وسایل نقلیه از مناطق بدون روسازی به سطح روسازی بتنی تراوا جلوگیری شود.

ت) ساختگاه، در مسیر باد وزیده از سمت نواحی بدون روسازی، سواحل یا بیابان‌ها، قرار نداشته باشد و مقدار روانابی که از روسازی‌های متعارف (ناتراوای) مجاور و مناطق فضای سبز، به سطح روسازی بتنی تراوا جریان می‌یابد، محدود گردد، مگر اینکه نشان داده شود:

۱- رواناب ناشی از روسازی متعارف، عاری از رسوبات است.

۲- برای مدیریت آب ناشی از مناطق مجاور (روسازی‌های ناتراوا و فضای سبز)، زیراساس تراوا طراحی شده است.

[75] Silt fence

۳- سطح کافی بتن تراوا برای کنترل برگ‌ها، زباله‌ها یا سایر موادی که ممکن است باعث گرفتگی زودهنگام بتن تراوا، پیش از رسیدن به زمان تعمیر و نگهداری شود، وجود دارد.

۷-٤-۳- طراحی زهکشی

رواناب، توسط بسیاری از روش‌های پذیرفته‌شده تخمین زده می‌شود. دو مورد از رایج‌ترین ابزارها برای این منظور، روش منطقی یا استدلالی[۷۶] و روش شماره منحنی[۷۷] (CN) سازمان حفاظت خاک آمریکا[۷۸] (SCS) هستند. در هر دو روش، طراح باید در تحلیل رواناب، متغیرهای ورودی و خروجی مختلف مانند جذب آب، تبخیر، شدت بارندگی، نفوذ سطحی و مدت زمان طوفان را در نظر بگیرد. هریک از این متغیرها، بر حجم رواناب و حجم تصفیه موردنیاز برای ساختگاه تاثیر می‌گذارند.

در روش منطقی یا استدلالی، به منظور تعیین بده (دبی) اوج رواناب[۷۹] برای یک شدت بارندگی و منطقه زهکشی معین، از یک ضریب استفاده می‌شود. ضریب رواناب C برای کاربری زمین، نوع خاک و شیب منطقه محاسبه می‌گردد. مقادیر معمول برای C از ۰/۰۵ برای یک فضای سبز صاف واقع روی خاک ماسه‌ای تا ۰/۹۵ برای پشت بام متغیر است.

ضریب رواناب برای سایر انواع روسازی‌ها از ۰/۶۵ تا ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود. برای روسازی تراوا، نوع خاک زیرین و نفوذپذیری آن بر ضریب رواناب تاثیرگذار خواهد بود. در هر بارندگی، نوع خاک زیراساس و نفوذپذیری آن بر ضریب رواناب تاثیر خواهد داشت. روسازی تراوایی که به خوبی نگهداری شده باشد، معمولا سریع‌تر از خاک‌های زیرین از آب تخلیه می‌شود، که نرخ نفوذ سطحی سامانه را محدود می‌کند.

تحقیقات (Wimberly و همکاران، ۲۰۰۱) نشان می‌دهد که برای طراحی‌های مشخص سامانه‌های بتن تراوا، به‌ویژه روسازی‌هایی که روی بسترها و زیراساس‌های با زهکشی مناسب قرار دارند، ضریب رواناب بتن تراوا برای طوفان‌هایی با دوره بازگشت ۲ تا ۵ ساله ناچیز، و برای طوفان‌های با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برابر ۰/۳۵ است.

سایر مطالعات (Haselbach و Freeman، ۲۰۰۶) نیز نشان می‌دهند که در سامانه‌هایی که روی خاک‌های ماسه‌ای قرار دارند، میزان نفوذ سطحی کاهش می‌یابد، اما ضریب رواناب موردانتظار آن‌ها برای اکثر بارندگی‌ها همچنان بسیار کم خواهد بود.

Das (۱۹۹۳) نشان داد که با افزایش چگالی خاک، نرخ نفوذ سطحی و در نتیجه نفوذپذیری خاک به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش ضریب رواناب روش منطقی برای یک طراحی معین را توجیه می‌کند. از این رو، خاک بستر روسازی بتنی تراوا باید به‌طور یکنواخت و به اندازه کافی متراکم شود تا باربری مناسب را برای روسازی فراهم کند، اما در عین حال باید توجه نمود که به منظور کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش ضریب رواناب روش منطقی، نباید خاک بستر را بیش از حد متراکم کرد.

---

[76] Rational method
[77] Curve number method (CN)
[78] Soil conservation service
[79] Peak runoff rate (discharge)

انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا[80] (۱۹۹۰)، متراکم‌کردن خاک‌های زیراساس ماسه‌ای تا حداقل چگالی ۹۲ تا ۹۶ درصد حداکثر چگالی خشک مطابق با AASHTO T 180 را توصیه می‌کند. در سایر مناطق ایالات متحده و برای انواع دیگر خاک‌ها، رویکردهای تراکم، متفاوت هستند. نهشته‌های یخچالی[81] تا ۹۰ الی ۹۵ درصد چگالی حاصل از روش پروکتور استاندارد (AASHTO T 99) متراکم شده‌اند؛ در ایالت کارولینای آمریکا، تراکم تا ۹۲ درصد چگالی بدست آمده از روش پروکتور اصلاح‌شده (AASHTO T 180) به کار است و در جورجیا، خاک‌های ریزدانه معمولا تا ۹۵ درصد چگالی حاصل از روش پروکتور استاندارد (AASHTO T 99) متراکم می‌شوند. در این شرایط، ممکن است لازم باشد که یک لایه زیراساس سنگدانه‌ای (یا بستر احیا[82]) با دانه‌بندی باز (یکنواخت) به سامانه روسازی اضافه گردد تا نرمی خاک بستر، جبران، و از مزیت افزایش حجم نگهداشت آب بهره برده شود.

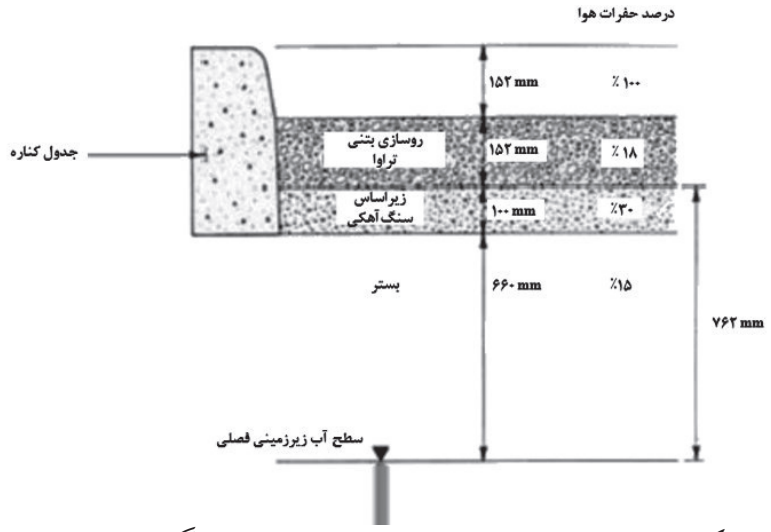
خاک‌ها با استفاده از روش SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا، ۱۹۸۶)، به گروه‌های هیدرولوژیکی خاک[83] (HSGs) طبقه‌بندی می‌شوند تا حداقل نرخ نفوذ سطحی به‌دست آمده برای خاک بدون پوشش پس از خیس شدن طولانی‌مدت نشان داده شود. گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (شامل گروه‌های A، B، C و D)، یکی از عوامل مورد استفاده در تعیین شماره منحنی رواناب هستند.

خاک‌های نوع A، بیشترین نفوذپذیری را دارند و میزان نفوذپذیری در خاک‌های گروه B، C و D به ترتیب کاهش می‌یابد. از ترکیب این گروه‌های خاک با نوع پوشش زمین، یک شماره منحنی (CN) تعیین می‌شود. مقدار CN به طراح نشان می‌دهد که برای تعیین حجم رواناب برای یک طوفان معین، باید به کدام منحنی مراجعه کند. این روش، به جای تخمین بده اوج، بیشتر برای ایجاد یک هیدروگراف (آب‌نگاشت) کامل استفاده می‌شود. مقدار CN برای روسازی‌های بتنی تراوا در محدوده ۶۰ تا ۹۵ است. در این روش نیز، نوع خاک بستر، میزان تراکم، و نفوذپذیری حاصله، بر CN و در نتیجه بر ویژگی‌های زهکشی سامانه تاثیرگذار است.

هنگام طراحی سامانه روسازی تراوا، مانند سامانه نگهداشت یا نفوذ سطحی آب، حجم کل لایه‌های تراوای روسازی (روسازی و زیراساس) باید در نظر گرفته شود (Paine، ۱۹۹۰). به عنوان مثال، بخشی از بتن تراوا با درصد حفرات ۲۰ درصد را در نظر بگیرید. در یک مقطع روسازی با ضخامت ۱۵۰ mm، این میزان حفرات برای نگهداشت بیش از ۲۵ mm بارش رگباری کافی است. علاوه بر این، اگر بتن تراوا روی یک لایه زیراساس از جنس سنگ خردشده با ضخامت ۱۵۰ mm قرار گیرد، ظرفیت کل سامانه تقریبا به میزان ۶۵ mm افزایش می‌یابد. حداقل ضخامت روسازی بتنی تراوا با توجه به نیازهای سازه‌ای سامانه روسازی تعیین می‌شود. با این حال، ممکن است برای افزایش ظرفیت نگهداشت بارش، به اجرای یک لایه بتنی تراوا یا لایه زیراساس ضخیم‌تری نیاز باشد، با این حال، ممکن است این روش، اقتصادی‌ترین راه‌حل نباشد. اگر ظرفیت بیشتری لازم باشد، ممکن است فضایی برای نگهداشت آب در بالای سطح روسازی، در یک پارکینگ دارای جداول کناری اضافه شود (شکل ۷-۴-۳).

---

[80] Florida concrete and products association
[81] Glacial till
[82] Recharge bed
[83] Hydrologic soil group



شکل ۷-۴-۳- طرح روسازی بتنی تراوا به عنوان سامانه نگهداشت بارش

از جمله دیگر روش‌هایی که روسازی‌های تراوا برای تصفیه آب بارش طراحی شده‌اند، استفاده از سامانه زیرزهکش است. در این روش، ممکن است احیای آب زیرزمینی به دلیل شرایط خاک ساختگاه محدود شود. روسازی تراوا، روی لوله‌ای سوراخ‌دار قرار می‌گیرد که در بستری از جنس سنگدانه با دانه‌بندی باز (یکنواخت) قرار گرفته است. آب بارش از میان روسازی و خاک شنی نفوذ می‌کند و به لوله می‌رسد. سپس، بارش تصفیه شده از آنجا به یک بدنه آبی (مانند نهر، رودخانه و غیره) تخلیه می‌شود. بازدهی تصفیه این سامانه به‌طور متوسط برابر ۶۶ درصد است. علاوه بر این، مقداری از این آب صرف احیای مستقیم سفره آب زیرزمینی می‌شود که حجم کل رواناب را تا ۳۳ کاهش می‌دهد (FCPA، ۱۹۹۰). این درصدها بسته به نوع خاک، متفاوت خواهند بود.

از سامانه‌های دیگر احیای سفره آب زیرزمینی، می‌توان استفاده از شمع‌های درجاریخته که با سنگدانه‌ای دارای دانه‌بندی باز (یکنواخت) پر شده‌اند را نام برد که در این حالت، آب پس از عبور از میان خاک رسی به لایه‌های نفوذپذیرتر وارد می‌شود. یک طرح رایج برای این سامانه، می‌تواند شامل یک لایه زیراساس سنگدانه‌ای با دانه‌بندی باز (یکنواخت) برای روسازی بتنی تراوا باشد که روی خاک‌های ریزدانه ساختگاه قرار می‌گیرد. فاصله شمع‌ها از یکدیگر باید منظم باشد تا ظرفیت کافی برای احیای سفره آب زیرزمینی را فراهم کند. بستر باید به‌صورت شیب‌دار اجرا شود تا امکان زهکشی مثبت به شمع‌ها فراهم گردد. انتظار می‌رود که بازدهی تصفیه این سامانه، مشابه طراحی سامانه زیرزهکش باشد. با این وجود، انتظار می‌رود که نرخ احیای سفره آب زیرزمینی در این روش بسیار بیشتر باشد.

از چند طرح دیگر برای عبور حجم اضافی آب باکیفیت، افزایش ظرفیت ذخیره آب، و یا افزایش حجم تصفیه استفاده شده است که از جمله آن‌ها می‌توان موارد زیر را ذکر کرد:

الف) قرار دادن لوله سوراخ‌دار در بالای یک لایه آبگیر از جنس سنگ خردشده به منظور عبور جریان آب اضافی پس از پر شدن لایه آبگیر

ب) تعبیه محل نگهداشت سطحی آب در پارکینگ، گودال مجاور یا حوضچه نگهداشت موقت با قابلیت انتقال مناسب جریان اضافی.

پ) اضافه کردن یک لایه ماسه‌ای و لوله سوراخ‌دار در زیر زیراساس دانه‌ای، به منظور صاف (فیلتر) کردن حجم آب باکیفیت (با رعایت اضافه‌کردن یک لایه فیلتر بین لایه ماسه و زیراساس دانه‌ای)

ت) قرار دادن یک مخزن زیرزمینی نگهداشت آب یا سامانه آب‌انبار در زیر لایه‌ها، به منظور ذخیره آب تصفیه شده برای استفاده مجدد

یکی دیگر از عوامل مهم در محاسبه حجم ذخیره آب، تبخیر است. تحقیقات نشان می‌دهد که آب ذخیره شده در روسازی و زیراساس تراوا می‌تواند تبخیر شود (Wanielista و همکاران، ۲۰۰۷).

تمامی جزییات مربوط به طراحی زهکشی بارش با استفاده از روسازی بتنی تراوا، به‌طور قابل ملاحظه‌ای به روش‌ها و مقررات محلی بستگی دارد. برای مطالعه نمونه‌ای از مجموعه محاسبات طراحی که توسط انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا (۱۹۹۰) منتشر شده است، به بخش ۷-۴-۳-۳ مراجعه شود. همواره لازم است که متن کامل مقررات محلی مدیریت بارش در نظر گرفته شود.

در صورتی که ارتفاع تمام شده سطح روسازی، در ناحیه‌ای باشد که تحت تاثیر سیلاب قرار می‌گیرد، طراحان می‌توانند زهکشی اضافی در نظر بگیرند. این کار می‌تواند شیب‌بندی روسازی به‌گونه‌ای باشد که به سادگی رواناب را با شیب ناچیز به نواحی دور از ساختمان هدایت نماید.

علاوه بر رواناب، طراح باید جزئیات مربوط به آلاینده‌ها، از جمله ماهیت و محدوده تقریبی غلظت آن‌ها را نیز تخمین بزند. این اطلاعات، همراه با آب‌نگاشت موردنیاز، به طراح این امکان را می‌دهد که اندازه و طراحی مناسب سامانه مدیریت بارش را تعیین کند.

۷-٤-۳-۱- معادلات و نرم‌افزار طراحی

طراحی هیدرولوژیکی روسازی‌های بتنی تراوا، همچون روسازی‌های متعارف، پس از طراحی سازه‌ای انجام می‌شود. در حال حاضر، دو روش برای طراحی هیدرولوژیکی روسازی‌های تراوا موجود است. روش مورد استفاده در نرم‌افزار PerviousPave، بر اساس روش «شهر لس‌آنجلس[۸۴]» است که در آن فرض می‌شود لایه زیراساس یا آبگیر، برای نگهداری کل حجم رواناب طراحی شده است.

در نرم‌افزار PerviousPave برای طراحی هیدرولیکی روسازی بتنی تراوا از روش «شهر لس‌آنجلس» استفاده می‌شود (Rodden و همکاران، ۲۰۱۰؛ ACPA، a۲۰۱۴). حجم کل آب V (بر حسب مترمکعب) که باید توسط روسازی بتنی تراوا زهکشی شود را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$I \times (Ab + Ap) = V \qquad (۷-۴-۳-۱-الف)$$

معادله روش «شهر لس‌آنجلس» برای تعیین مساحت موردنیاز بتن تراوا به‌صورت زیر است:

$$A_p = \frac{V}{r_s \times h_s}$$

[84] Los Angeles county method

این روشی محافظه‌کارانه است که فرض می‌کند تمام آب بارندگی در لایه آبگیر نگهداری می‌شود. در صورتی که مقداری از آب در درون بتن تراوا، یا توسط حوضچه‌ای که در بالای بتن تراوا با استفاده از جدول ایجاد شده است، نگهداری می‌شود، معادله فوق باید به صورت زیر اصلاح شود:

$$A_p = \frac{V}{h_{curb} + r_c \times h_c + r_s \times h_s}$$

از آنجا که مساحت سطح بتن تراوا معمولا تحت تاثیر طراحی ساختگاه قرار دارد و ضخامت بتن تراوا نیز از طراحی سازه‌ای تعیین می‌شود، پارامتر کلیدی که در اینجا باید انتخاب شود، ضخامت لایه زیراساس یا لایه آبگیر است. با حل معادله (۷-۴-۱-۳-پ) برای این ضخامت، معادله زیر بدست می‌آید:

$$h_r = \frac{1}{r_s}\left(\frac{V}{A_p} - h_{curb} - r_c \times h_c\right)$$

همچنین لازم است بررسی شود که از مدت زمان نگهداشت موقت آب، که معمولا ۲۴ ساعت است، تجاوز نشده باشد. مدت زمان محاسباتی نگهداشت موقت آب بر حسب ساعت برابر است با:

$$t_d = \frac{V}{A_p \times E}$$

مقادیر توصیه شده E برای خاک‌های ماسه‌ای در محدوده ۱۳ تا ۲۵ میلی‌متر در ساعت، برای خاک‌های از نوع لای برابر ۲/۵ میلی‌متر در ساعت، و برای خاک‌های رسی برابر ۰/۲۵ میلی‌متر در ساعت است (ACPA، a۲۰۱۴). در صورتی که حساسیت سامانه به نفوذ بسیار زیاد باشد، ممکن است لازم باشد آزمایش نفوذپذیری در محل برای هر نوع خاک را مطابق با روش ASTM D3385 انجام داد.

این روش محافظه‌کارانه است، زیرا در آن فرض می‌شود که مخزن ابتدا باید کل حجم آب بارندگی را در خود نگه دارد و تنها پس از آن است که تخلیه آب شروع می‌شود. البته در واقعیت، آب در هنگام بارندگی به خاک زیرین نفوذ می‌کند و بنابراین، ضخامت واقعی موردنیاز لایه آبگیر باید کمتر باشد.

۷-٤-۳-۲- ملاحظات روسازی‌های شیب‌دار

روسازی‌های متعارف معمولا به منظور زهکشی به صورت شیب‌دار ساخته می‌شوند. در مقابل، برای روسازی‌های بتنی تراوا، شیب‌بندی‌های متقاطع و خط‌الراس ضروری نیست، زیرا آب به جای عبور از قسمت رویی روسازی، به درون آن نفوذ می‌کند. ACPA (b2014)، به عنوان مکملی برای نرم‌افزار Pervious-Pave، مطالبی در مورد ملاحظات شیب‌بندی ارائه می‌دهد. روسازی‌های تراوا با شیب تا حداکثر ۱۶ درصد با موفقیت اجرا شده‌اند. در برخی موارد، می‌توان ترانشه های عرضی (یا دیگر طرح‌های آب‌شکن[85]) با لوله‌های زهکشی را در سراسر شیب قرار داد.

---

[85] Check dam

در واقع، به دلیل جریان سریع آب از میان روسازی تراوا، امکان خروج سیلابی از پایین‌دست شیب وجود دارد. بنابراین، ساخت روسازی بتنی تراوا به صورت شیب‌دار، ظرفیت ذخیره آب در آن را کاهش می‌دهد. حجم موثر ذخیره آب را می‌توان با استفاده از معادله (۷-۴-۳-۲-الف) محاسبه کرد (ACPA، b۲۰۱۴):

$$\text{حجم مؤثر}(\%)=\frac{d}{2\times s\times L}\times 100$$

به عنوان مثال، برای یک روسازی بتنی تراوا با طول و ضخامت به ترتیب ۳۰ m و ۳۰۰ mm که از یک لایه سطحی و یک لایه آبگیر هریک با ضخامت ۱۵۰ mm تشکیل شده، و شیب آن برابر ۱ درصد است، حجم موثر برابر است با:

$$\text{حجم مؤثر}(\%)=\frac{d}{2\times s\times L}\times 100=\frac{0.3}{2\times 0.01\times 30}\times 100=50\%$$

بنابراین، روسازی‌های بتنی تراوا باید تا حد امکان بدون شیب باشند تا حجم ذخیره‌سازی در آن‌ها به حداکثر برسد. در غیر این صورت، ممکن است به افزایش ضخامت لایه آبگیر نیاز باشد. گزینه‌ای دیگر، تعبیه یک بستر احیا یا یک چاه در پنجه شیب است. همچنین، می‌توان لایه آبگیر را با شیب پلکانی ساخت یا از آب‌شکن‌های اصلاحی استفاده کرد (ACPA، b۲۰۱۴).

۷-٤-۳-۳- مثال‌های طراحی

مثال ۱ (انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا، ۱۹۹۰) :

داده‌ها:

روسازی باید اولین ۱۳ mm رواناب تصفیه‌نشده را ذخیره کند و در دوره زمانی ۷۲ ساعته پس از بارش این حجم را بازیابی نماید.

حجم ذخیره‌سازی Vr موردنیاز روسازی تراوا را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$V_r=\frac{\text{بارش}(mm)\times A\times 1(m)}{1000m^3}(m^3)$$

بنابراین، برای تخلیه اولین ۱۳ mm بارندگی خواهیم داشت:

$$V_r=\frac{13(mm)\times A\times 1(m)}{1000m^3}=0.013A(m^3)$$

انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا (۱۹۹۰) توصیه می‌کند که ظرفیت ذخیره‌سازی سامانه روسازی تراوای قرار گرفته بر روی خاک ماسه‌ای بستر، باید شامل حفرات بالای تراز آب زیرزمینی فصلی و بالای هرگونه فضای ذخیره‌سازی روسازی بتنی تراوا باشد. این حجم ذخیره‌سازی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$V_p = A \times d_1 \times \frac{p_1}{100}$$ (ب-۳-۳-۴-۷)

$$V_s = A \times d_2 \times \frac{p_2}{100}$$ (پ-۳-۳-۴-۷)

این روابط، مشابه روش «شهر لس‌آنجلس» هستند.

پس از محاسبه حجم موردنیاز ذخیره‌سازی آب Vr، و کم کردن حجم خاک بستر و حجم موجود در روسازی برای ذخیره‌سازی آب ، چنانچه حاصل کار، عددی منفی باشد، نشان‌دهنده برآورده شدن الزامات است، و اگر عددی مثبت باشد، نشان‌دهنده نیاز به حجم ذخیره اضافی است. تعبیه یک لایه زیراساس دانه‌ای، مانند سنگدانه رده ۵۷ ذکرشده در ASTM C33/C33M با درصد حفرات ۳۰ درصد یا بیشتر، می‌تواند فضای ذخیره‌سازی اضافی را تامین کند. سطح بالای روسازی نیز برای ذخیره‌سازی آب قابل استفاده است. با این حال، به طراح هشدار داده می‌شود که هنگام استفاده از این روش طراحی، ارتفاع آب در بارش‌های طرح با دوره بازگشت زیاد (تواتر کم)، ممکن است باعث بالاآمدن و تجمع آب روی سطح روسازی شود. تراز روی روسازی باید کمتر از تراز همکف ساختمان مجاور باشد تا از آسیب ناشی از سیل جلوگیری گردد.

انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا (۱۹۹۰)، مثال‌های طراحی بیشتری را برای محاسبه ظرفیت نگهداشت پارکینگ، حجم رواناب و زمان بازیابی ارائه می‌دهد. برخی از این محاسبات به عنوان نمونه در کمیسیون منطقه‌ای آتلانتا[۸۶] (۲۰۰۱) نیز ارائه شده است.

مثال ۲ (Delatte، ۲۰۱٤):

طراحی سازه‌ای این مثال مشابه مثال قبلی است. مساحت کل روسازی بتنی تراوا در این مثال برابر $۱۴۸۶ m^2$ است و سطح ناتراوایی معادل $۲۹۷۲m^2$ را زهکشی می‌کند که از سقف‌ها، محوطه‌سازی‌ها و سایر سطوح بدون زهکشی تشکیل شده است. بنابراین، نسبت سطح ناتراوای زهکشی شده به سطح تراوا برابر ۲ به ۱ است. نرخ تراوایی سطحی خاک ۱۲/۷ میلی‌متر در ساعت که مربوط به قسمت پایینی خاک ماسه‌ای است. لای‌ها و رس‌ها معمولا دارای نرخ تراوایی سطحی بسیار کمتری هستند.

در این مثال، اجازه تجمع آب روی سطح روسازی داده نمی‌شود و لایه سطحی بتن تراوا به عنوان بخشی از طراحی هیدرولوژیکی در نظر گرفته نشده است. این کار برای شرایط آب و هوایی که احتمال یخ‌زدن و آب‌شدن در آن وجود دارد، معمول است. درصد حفرات لایه آبگیر برابر ۴۰ درصد فرض شده است.

میزان بارش طرح، باید بر اساس موقعیت جغرافیایی روسازی باشد و مقدار آن باید برای مقدار بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ یا ۱۰ ساله باشد. در ایالات متحده، این مقادیر را می‌توان از طریق اداره ملی اقیانوسی و جوی[۸۷] دریافت کرد. نرم‌افزار PerviousPave، اطلاعات مربوط به بارش‌های با دوره بازگشت ۲ و ۱۰ ساله را برای بسیاری از شهرهای ایالات متحده در دسترس قرار می‌دهد. برای شهر کلیولند در ایالت اوهایو ایالات متحده، میزان بارش مربوط به طوفانی با دوره بازگشت ۲ ساله برابر ۵۹ mm است. حداکثر زمان نگهداشت آب معمولا برابر ۲۴ ساعت تعیین می‌شود.

---

[86] Atlanta regional commission

[87] National oceanic and atmospheric administration

بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار PerviousPave، حجم آب تصفیه‌شده برابر m^3 ۲۶۵ و حداقل ضخامت موردنیاز لایه آبگیر برابر mm ۴۴۶ می‌باشد که از ۲۰۰ میلی‌متر موجود بیشتر است.

در این حالت چند گزینه وجود دارد. در یک گزینه می‌توان ضخامت لایه آبگیر را افزایش داد که در بیشتر موارد احتمالا اقتصادی‌ترین روش خواهد بود. همچنین می‌توان سطح روسازی تراوا را افزایش، و یا سطح قسمت ناتراوایی که رواناب آن به قسمت تراوا زهکشی می‌شود را کاهش داد. در روشی دیگر، می‌توان تدابیر دیگری برای مدیریت بخشی از بارش اندیشید، و یا می‌توان از جدول برای نگهداشت سرریز اضافی استفاده کرد.

۷-۵- سایر ملاحظات

ویژگی‌های روسازی بتن تراوای درجا بسیار متغیر است و به مهارت و تجربه پیمانکار بتن‌ریزی و تامین‌کننده بتن بستگی دارد. ویژگی‌های بتن مورد استفاده برای طراحی باید در مواردی که عملی باشد، طبق تجربیات قبلی محلی واسنجی شود، اما به دلیل ماهیت تخصصی بتن تراوا و نیاز به پیمانکاران واجد شرایط، جستجو برای یافتن پیمانکاران باتجربه فعال در مناطق اطراف می‌تواند تا زمانی که پیمانکاران محلی واجد شرایط، در اجرای بتن تراوا ماهر شوند، سودمند باشد.

روسازی بتنی تراوا معمولا به‌صورت درجا ریخته اجرا می‌شود و پس از آن شمشه‌کشی و متراکم می‌گردد. با افزایش ضخامت روسازی در مقادیر بیش از mm ۲۰۰، به دلیل عمق محدود تاثیر غلتک، متراکم‌کردن کل سطح مقطع روسازی برای دستیابی به نتایج یکنواخت، دشوار خواهد بود. قسمت بالایی روسازی نسبت به پایین آن متراکم‌تر می‌شود. از آنجا که مقاومت روسازی با افزایش تراکم افزایش می‌یابد، در طراحی مقطع بتنی باید این مقاومت کاهش‌یافته در بخش پایینی رویه بتنی تراوا را در نظر گرفت. در یک کارخانه تولید بتن در اورگان، چهار روسازی تراوا با ضخامت mm ۲۵۰ به صورت تیرهای منشوری برش داده شدند تا تفاوت مقاومت خمشی بین نیمه متراکم بالایی و پایینی رویه اندازه‌گیری شود. نتایج نشان داد در حالی که مقاومت خمشی نیمه بالایی در محدوده ۲/۱۴ تا MPa ۳/۳۴ متغیر بود، نیمه پایینی تیرهای خمشی آزمون دارای مقاومت خمشی کمتری در محدوده ۱/۸۸ تا ۱/۹۰ بودند. با وجودی که این یک آزمایش بسیار محدود است، اما نشان می‌دهد که بخش غیرمتراکم روسازی، همگن است و با استفاده از تراکم می‌توان به افزایش مقاومت قابل‌توجهی دست یافت (Erickson، ۲۰۰۶).

ساختار حفره‌دار مخلوط بتن تراوا، نه تنها امکان انتقال قائم آب را فراهم می‌کند، بلکه امکان جریان افقی آن را نیز به‌دست می‌دهد. این قابلیت منحصربه‌فرد باید در هنگام ایجاد نیمرخ‌های زهکشی در نظر گرفته شود. نرخ جریان قائم، به نفوذپذیری بستر و همچنین به ضخامت و پوکی روسازی بستگی دارد. نیمرخ‌های پارکینگ باید تا حد امکان بدون شیب ساخته شوند. این کار، باعث افزایش زمان موجود برای جذب و انتقال آب به لایه‌های پایین‌تر و کاهش سرعت جریان افقی می‌شود. در مواردی که شرایط، اجازه اجرای بدون شیب سطح روسازی را نمی‌دهد، طراح می‌تواند گزینه ایجاد موانع ناتراوا در جهت جریان افقی را در نظر بگیرد. این موانع را می‌توان با افزایش تراکم نوار حاشیه روسازی در امتداد لبه درزهای اجرایی عرضی ایجاد کرد. افزایش تراکم، باعث

بسته شدن (پرشدن) ساختار حفرات در این قسمت‌ها می‌شود. ایجاد نوارهای عرضی حاشیه‌ای بتن معمولی ناتراوا، باعث کاهش جریان جانبی در جهت شیب می‌شود. ساخت جدول در اطراف محوطه روسازی‌شده نیز به کاهش نرخ جریان جانبی و همچنین برآوردن الزامات نگهداشت بارش کمک می‌کند. اگر اقدامات کافی برای کنترل حجم و سرعت جریان آب از میان لایه زیراساس و بستر انجام نشود، ممکن است باعث فرسایش بستر و واردشدن آسیب به روسازی گردد. برای جلوگیری از این فرسایش، باید در امتداد تمام مناطقی که احتمال جریان یافتن آب در زیر روسازی وجود دارد، جداول یا موانع دیگری ساخته شود.

۷-۵-۱- تعمیر و نگهداری روسازی تراوا

از مولفه‌های غیرسازه‌ای، که می‌تواند به اطمینان از تعمیر و نگهداری مناسب روسازی بتنی تراوا کمک کند، تدوین یک راهنمای دقیق تعمیر و نگهداری است که دستورالعمل‌های معینی از جمله نحوه انجام روال معمول تعمیر و نگهداری و تعمیرات یا بازسازی سطح را ارائه می‌دهد. در بهترین حالت، باید علائمی در محل نصب شوند که نواحی روسازی بتنی تراوا را مشخص کنند. این علائم می‌توانند به این صورت نوشته شوند: «در این محل برای کاهش آلودگی، از روسازی بتنی تراوا استفاده می‌شود. تردد وسایل نقلیه سنگین ممنوع است. روسازی مجدد با مصالح ناتراوا انجام نشود. برای اطلاعات بیشتر با شماره... تماس بگیرید.»

طراحان می‌توانند احتمال گرفتگی (پرشدگی) روسازی بتنی تراوا را در طراحی زهکشی در نظر بگیرند. اگر ساختگاه، برای تاسیسات دولتی مانند تاسیسات مدیریت بارش مجهز به برنامه و پرسنل تعمیر و نگهداری طراحی شده باشد، گرفتگی (پرشدگی) در نظر گرفته نخواهد شد. در پروژه‌های خصوصی که ممکن است تعمیر و نگهداری انجام نشود، طراح می‌تواند از یک ضریب اطمینان اضافی برای طراحی سیلاب استفاده کند تا مقدار گرفتگی (پرشدگی) پیش‌بینی شده و کاهش پوکی روسازی بتنی را در نظر بگیرد. در مراجع Wanielista و همکاران (۲۰۰۵) و همچنین Delatte و همکاران (۲۰۰۷)، برخی از مطالعات موردی خاص در مورد عملکرد میدانی و گرفتگی (پرشدگی) روسازی‌های بتنی تراوا ارائه شده است.

۷-۵-۲- اختصاص سهم مساحت رویه بتنی تراوا[88]

بسیاری از شهرداری‌ها، از طریق محدودکردن مساحت ناحیه ناتراوا در محل پروژه، ایجاد فضای سبز و کاهش رواناب در ساخت‌وساز را تشویق می‌کنند. به‌طور معمول، مساحت ناحیه ناتراوا به ۲۵ تا ۷۵ درصد از زمین پروژه محدود می‌شود. با توجه به ماهیت رویه بتنی تراوا، نباید آن را کاملا غیر قابل نفوذ در نظر گرفت. با این حال، به دلیل نگرانی‌های مربوط به حذف فضای سبز، به‌ندرت به عنوان ناحیه کاملا تراوا در نظر گرفته می‌شود. با این وجود، اختصاص سهم مساحت تراوا به بتن تراوا توسط شهرداری‌ها متداول است. شهرداری‌های مختلف از مقادیر ۲۵، ۵۰ یا ۱۰۰ درصد استفاده کرده‌اند که برای مالک، به معنای کاهش مساحت موردنیاز فضای سبز یا مساحت غیرقابل ساخت در زمین محل پروژه و افزایش مساحت قابل ساخت است.

---

[88] Pervious area credit

به عنوان مثال، زمین پروژه‌ای را در نظر بگیرید که مساحت آن برابر $۴۰۰۰m^2$، و مساحت پارکینگ آن که با بتن تراوا ساخته شده، برابر $۹۰۰m^2$ است. اگر مطابق با الزامات شهرداری منطقه پروژه، مساحت ناحیه تراوای موردنیاز برای زمین پروژه برابر ۳۰ درصد باشد (یعنی $۱۲۰۰m^2$)، آن گاه طراحی ساختگاه به مساحت ناتراوای $۲۸۰۰m^2$ محدود می‌شود. این مساحت شامل ساختمان، پیاده‌روها و پارکینگ‌ها است و در آن فرض می‌شود که هیچ سهمی برای بتن تراوا درنظر گرفته نشده است. با درنظر گرفتن ۵۰ درصد سهم مساحت تراوا برای پارکینگ بتنی، مساحت قابل ساخت به $۳۲۵۰m^2$ افزایش می‌یابد که معادل ۱۶ درصد افزایش در مساحت قابل استفاده در زمین پروژه است. این مساله می‌تواند یک پروژه را برای سازنده بسیار جذاب‌تر کند، و با کاهش زمین‌های ساخته نشده می‌تواند موجب کاهش گسترش شهرها شود، زیرا می‌توان از زمین‌های کوچکتری برای برآوردن نیازهای مشخص ساخت‌وساز استفاده کرد.

سازمان‌های محلی با مقررات روزافزونی مواجه هستند که تصفیه سیلاب را الزام‌آور می‌کنند. بنابراین، ممکن است به نفع آن‌ها باشد که درصد سهم اختصاص یافته به پارکینگ‌های بتنی تراوا را به درصد رواناب واقعی باقی‌مانده در محل پروژه افزایش دهند تا افراد بیشتری را به استفاده از این فناوری تشویق کنند. بتن تراوا، امکان گسترش شهر را با فشار بسیار کمتری روی زیرساخت‌های زهکشی سیلاب می‌دهد. از آنجا که روسازی بتنی تراوا امکان جریان مجدد آب، به سفره‌های آب زیرزمینی رو به افول را می‌دهد، موقعیتی استثنایی را برای تبدیل سیلاب از تهدید به فرصت فراهم می‌کند.

فصل ۸

ساخت روسازی تراوا

ساخت روسازی بتنی تراوا باید با برنامه‌ریزی‌ها و مشخصات پروژه مطابقت داشته باشد تا نتیجه نهایی، نیازهای مالک و مقررات محلی را برآورده کند (ACI 522.1). ساخت موفقیت‌آمیز روسازی بتنی تراوا، با برنامه‌ریزی جامع شروع می‌شود. برای رسیدگی به مسائلی مانند موارد ذیل، برگزاری جلسه‌ای پیش از شروع ساخت، ساخت آزمایشی یک قطعه و یا هر دو توصیه می‌گردد:

الف) تایید اینکه تمام افراد شاغل در پروژه بر اساس آخرین مجموعه برنامه‌ها و مشخصات کار می‌کنند و تمام بازنگری‌های پروژه، مستند شده‌اند.

ب) تایید تکمیل تمام اسناد و مدارک تاییدشده موردنیاز

پ) تعیین مراحل ساخت و فاصله درزهای اجرایی

ت) جانمایی محل استقرار تجهیزات، مصالح، خودروهای کارگاهی، تجهیزات موردنیاز افراد شاغل و الزامات ایمنی

ث) فراهم نمودن دسترسی مناسب برای کامیون‌های تحویل بتن و سامانه‌های انتقال بتن

ج) انتخاب تجهیزات بهینه با توجه به اندازه و شرایط پیش‌بینی‌شده پروژه

چ) هماهنگی بازرسی‌های در محل، آزمایش مصالح و یا هر دو. بازرسان و پرسنل آزمایش باید در جلسات، در هنگام بتن‌ریزی قطعات آزمایشی و همچنین در هنگام آزمایش‌ها حضور داشته باشند.

ح) تایید طرح مخلوط بتن پیشنهادی، در دسترس بودن مصالح و مواد افزودنی، و هماهنگی برنامه زمانی پیشنهادی برای تحویل بتن با تامین‌کننده آن

خ) تایید صلاحیت پیمانکار بتن تراوا، پرسنل کارخانه بتن، پرسنل پخش و تراکم و پرسنل آزمایش (بخش ۹-۳)

د) هماهنگی بتن‌ریزی قطعات آزمایشی

ذ) تایید الزامات کارگاهی

ر) هماهنگی مسئولیت‌های مربوط به عمل‌آوری و حفاظت بتن

۸-۱- قواعد کلی ساخت

روش ساخت با بتن تراوا، به دلیل ویژگی‌های خاص آن، به میزان قابل توجهی با روش‌های ساخت با بتن متعارف متفاوت است (Offenberg، ۲۰۰۵). فرآیند ساخت با بتن تراوا، مطابق مراحل کلی زیر تکمیل می‌شود: پس از ریختن بتن تراوا، شمشه‌کشی، تراکم و ایجاد درزهای اجرایی انجام می‌شود و سپس بلافاصله، با استفاده از پاشش ماده حاوی ترکیبات عمل‌آوری تاییدشده و در زیر لایه نایلونی و یا فقط در زیر لایه نایلونی عمل‌آوری می‌گردد. تجهیزاتی که برای ریختن بتن تراوا به طور موفقیت‌آمیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، شامل شمشه‌های غلتان ناهمسوگرد با یک، دو و یا سه استوانه؛ متراکم‌کننده‌های صفحه‌ای؛ قالب‌های لغزان؛ شمشه‌های لیزری؛ ماشین‌های پخش آسفالت با شمشه کوبشی اصلاح شده؛ و ماشین‌آلاتی که به طور ویژه برای ریختن بتن تراوا ساخته یا اصلاح شده‌اند، می‌شود. روش‌های مورد استفاده برای پرداخت بتن تراوا، نباید باعث آب‌بندی سطح آن شوند. مقدار و روانی مواد سیمانی مخلوط تعیین می‌کند

که کدام روش‌های پرداخت برای حصول اطمینان از دستیابی به سطحی بادوام و در عین حال نفوذپذیر مناسب هستند. مدت زمان لازم برای پرداخت بتن تراوا در مقایسه با بتن متعارف به طور قابل توجهی متفاوت است، زیرا از آنجا که در بتن تراوا آب انداختن وجود ندارد، بین زمان درجاریختن و پرداخت بتن، تاخیری جایز نیست. صرف‌نظر از این که از چه تجهیزاتی استفاده می‌شود، روسازی تراوا را تنها در صورتی می‌توان با موفقیت ساخت که بتن ریخته شده دارای روانی مناسب باشد. اگر بتن تراوا بیش از حد خشک باشد، مشکلاتی از نظر چسبندگی و هیدراته‌شدن کم سیمان وجود خواهد داشت. همچنین، مشکلات مشاهده شده در مخلوط‌های بیش از حد مرطوب، باعث آب‌بندی حفره‌های سطحی یا پایین رفتن خمیر به درون بتن می‌شوند، که ساختار ضعیفی از خود به جای گذاشته و احتمالا باعث گرفتگی (پرشدگی) قسمت‌های زیرین روسازی می‌گردند. استفاده از برخی افزودنی‌ها و روش‌ها، از جمله افزودنی‌های تثبیت‌کننده هیدراته‌شدن، اصلاح‌کننده گرانروی، کاهنده آب، و عمل‌آوری درونی، برای ایجاد و حفظ روانی مناسب در بتن تراوا مفید هستند. مقدار کم آب و ساختار متخلخل بتن تراوا، که سطوح خمیر را در معرض تبخیر قرار می‌دهد، مستلزم آن است که تحویل بتن و بتن‌ریزی به سرعت انجام شود تا بتوان غشای عمل‌آوری را نیز به سرعت در محل خود اجرا کرد. زمان مجاز بدون پوشش ماندن بتن تازه، ممکن است با توجه به شرایط محیطی، مانند احتمال تبخیر سریع، به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد. ساختار متخلخل بتن تراوا، همچنین باعث افزایش حساسیت آن در برابر دماهای کم در هنگام بتن‌ریزی و پس از آن می‌شود که در نتیجه، دقت بیشتری را برای بتن‌ریزی در هوای سرد ایجاب می‌کند. دمای کمتر از ۱۰°C می‌تواند حداقل مدت زمان لازم برای سخت‌شدن بتن، قبل از قرار گرفتن در معرض تردد وسایل نقلیه را افزایش دهد.

۸-۲- آماده‌سازی بستر و زیراساس

بستر، خاکی است که روسازی روی آن ساخته می‌شود و می‌تواند از جنس خاک برجا یا خاک‌هایی باشد که از منابع دیگر تهیه شده‌اند. در برخی موارد، روسازی روی لایه زیراساس از جنس شن تمیز یا سنگ خردشده ساخته می‌شود که می‌تواند به عنوان مخزن ذخیره بارش مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که خاک ساختگاه یا خاک‌های انتقالی از منابع دیگر، پس از تراکم، دارای نرخ تراوایی حجمی (درونی) کافی باشند و همچنین پروژه در منطقه‌ای اجرا شود که نگرانی‌های مربوط به یخ‌زدن و آب‌شدن وجود نداشته باشد، ممکن است به اجرای لایه زیراساس شنی نیاز نباشد. مهندس طراح پروژه باید این تصمیم را بر اساس مقررات محلی، نرخ تراوایی سطحی خاک، حجم بارش، بارهای ترافیکی پیش‌بینی‌شده و هدف از اجرای روسازی اتخاذ نماید.

هنگامی که به دلیل ویژگی‌های خاک بستر، لازم باشد که یک لایه زیراساس سنگی[۸۹] در زیر روسازی به عنوان مخزن ذخیره بارش قرار داده شود، می‌توان بین لایه سنگی و بستر آماده‌شده، از یک لایه فیلتر

---

[۸۹] زیراساس سنگی موردنظر در این متن، دارای قابلیت نفوذپذیری زیادی است و با سایر زیراساس‌های رایج در روسازی در ایران متفاوت می‌باشد.

سنگی[۹۰] یا زمین‌پارچه بافته‌نشده و یا پارچه فیلتر[۹۱] استفاده نمود. زمین‌پارچه، امکان عبور آب را می‌دهد اما از عبور خاک بستر و وارد شدن آن به حفرات لایه زیراساس جلوگیری می‌کند. با این حال، در مناطق حاوی رسوبات زیاد و ریز، این نگرانی وجود دارد که پارچه در طول زمان مسدود شود و از انتقال آب به بستر جلوگیری نماید.

برای ساخت یک روسازی با کیفیت، بستر و زیراساس باید کاملا آماده شوند و به طور یکنواخت در ترازهای ارتفاعی صحیح، متراکم گردند. بستر و زیراساس نباید در هنگام شروع بتن‌ریزی، گل‌آلود، اشباع و یا یخ‌زده باشد. علاوه بر این، قبل از شروع بتن‌ریزی، بستر و زیراساس باید مرطوب شوند. آب‌پاشی بستر روسازی در هوای گرم، به کاهش دمای آن کمک می‌کند و احتمال هیدراته‌شدن سریع، که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت روسازی و خرابی زودرس آن شود را کاهش می‌دهد. برای ایجاد سطحی صاف برای ساخت روسازی، باید قبل از شروع بتن‌ریزی شیارهای به جا مانده در اثر عبور چرخ وسایل نقلیه را از بین برد.

۸-۳- بتن‌ریزی

طرح ساختی که به خوبی برنامه‌ریزی شده باشد، می‌تواند عملیات ساخت را تسریع کند، امکان استفاده بهینه از تجهیزات بتن‌ریزی را بدهد و دسترسی کامیون‌های تحویل بتن را نیز فراهم نماید. پیمانکار و مهندس طراح باید پیش از شروع عملیات ساخت، در مورد طرح مشترک و روش‌های ساخت به توافق برسند. نقشه‌ای که محل تمامی درزهای اجرایی و نوبت‌های بتن‌ریزی را نشان می‌دهد باید به عنوان مرجع موجود باشد. محل اشیاء ثابت مانند دریچه‌های آدم‌رو باید با در نظر گرفتن محل درزها و روش‌های ساخت تعیین شود. محل تاییدشده درزها باید مطابق با طرح درزهایی باشد پیش از بتن‌ریزی تهیه شده است. برای این منظور روی قالب‌ها یا بستر، علامت‌گذاری می‌شود.

ریختن بتن تراوا باید در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود. بتن تراوا تقریبا هیچ آب اضافی در مخلوط خود ندارد و به محض ریخته شدن بر روی زمین، آماده پرداخت است. مصالح تازه‌ای که بلافاصله پس از بتن‌ریزی در معرض عوامل مختلف قرار می‌گیرند، ممکن است به سرعت آب موردنیاز برای هیدراته‌کردن سیمان را از دست بدهند. این خشک‌شدن سریع خمیر سیمان می‌تواند به از دست دادن مقاومت و واچیدگی سطح روسازی، در آینده منجر شود. تمام عملیات و تجهیزات بتن‌ریزی باید با در نظر گرفتن این موضوع طراحی و انتخاب شوند. تجهیزات باید برای بتن‌ریزی و عمل‌آوری سریع روسازی کاملا آماده باشند. به جز مواردی که به گونه‌ای دیگر مشخص شده باشد و به غیر از مواقعی که اقدامات دیگری برای طولانی‌تر کردن فرایند بتن‌ریزی و پرداخت انجام می‌شود، عمل‌آوری باید در بازه زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه پس از تخلیه بتن آغاز گردد. به ویژه در شرایط آب و هوایی گرم یا خشک، ممکن است این الزامات تشدید شوند، به طوری که لازم باشد عمل‌آوری در محدوده زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه پس از تخلیه بتن، و یا به فاصله حدود ۳ متر پس از شمشه‌کشی انجام گیرد.

---

[۹۰] Choker course: لایه‌ای از جنس سنگ خردشده تک‌اندازه که ابعاد سنگ‌ها در آن، در مقایسه با زیراساس کوچک‌تر است و برای جلوگیری از زهکشی ریزدانه و پرشدگی لایه سنگی استفاده می‌شود.

[91] Filter fabric

۸-۳-۱- قالب‌ها

روش مرسوم ساخت روسازی تراوا، همانطور که در ساخت دال‌های متعارف روی زمین نیز معمول است، استفاده از قالب‌های کناری است. این قالب‌ها می‌توانند چوبی، پلاستیکی یا فولادی باشد. تراز بالای قالب باید با تراز سطح بتن برابر باشد. قالب‌ها باید از مقاومت و پایداری کافی برای تحمل بار تجهیزات شمشه‌کشی و تراکم مورد استفاده در هنگام بتن‌ریزی برخوردار باشند. مصالح بستر و زیراساس که در زیر قالب‌ها قرار می‌گیرند، باید مطابق با مشخصات تعیین شده توسط طراح، متراکم شوند. طول پین‌های اتصال قالب و تکیه‌گاه باید بر اساس نوع مصالح بستر یا زیراساس انتخاب شود. برای جلوگیری از حرکت و خم شدن قالب‌ها باید از تعداد پین و پشت‌بند[۹۲] کافی استفاده شود. ممکن است برای جلوگیری از تغییرشکل قالب در حین تراکم بتن کناره‌ها، به پشت‌بندهای پاشنه (رامکا)[۹۳] نیاز باشد. هنگامی که شمشه‌های غلتان یا سایر تجهیزات تراکم، با لبه‌های قالب همپوشانی دارند، باید دقت کرد که ارتفاع بالای پشت‌بندها و سایر اتصالات مورداستفاده برای نگهداری قالب، از تراز بالای قالب کمتر باشد تا مانع انجام عملیات پرداخت و تراکم نشوند. تمام قالب‌ها باید در صورت لزوم، تمیز و با ماده رهاساز (روغن قالب)[۹۴] مناسب، پوشانده شوند.

۸-۳-۲- تخلیه بتن

بتن باید تا حد امکان از ارتفاعی نزدیک به محل نهایی استقرار خود تخلیه شود. این کار معمولا با تخلیه مستقیم بتن از ناوه[۹۵] کامیون مخلوط‌کن روی بستر یا زیراساس انجام می‌شود (شکل ۸-۳-۲-الف). معمولا تنها یک قطعه ناوه تکمیلی اضافی را می‌توان به ناوه تاشو یا مفصلی نصب شده بر روی کامیون مخلوط‌کن اضافه کرد که حداکثر عرض خطوط بتن‌ریزی به ۴/۵ متر محدود می‌شود. برخی از تامین‌کنندگان بتن، مقاطع نیمه‌ناوه[۹۶] را برای افزایش این محدوده ارائه می‌دهند. در بتن‌ریزی‌هایی که ناوه مخلوط‌کن نمی‌تواند به آن محل برسد، یا مواردی که دست‌خوردگی خاک باید حداقل باشد، می‌توان از تسمه نقاله یا سایر تجهیزات انتقال بتن استفاده نمود (شکل ۸-۳-۲-ب). باید دقت شود که مخلوط پس از انتقال بررسی گردد، زیرا ممکن است هنگام استفاده از تسمه نقاله، مقداری از خمیر از دست برود. اگر تسمه نقاله به صورت دوره‌ای تمیز نشود، خمیر اضافی می‌تواند روی سطح بتن تازه بریزد و موجب پرشدگی حفرات شود. پس از بتن‌ریزی، تراکم لبه‌ها باید به صورت لایه لایه و تا تراز نهایی بالای بتن قبل از شمشه‌کشی انجام شود. مخلوط را باید به صورت حدودی تا تراز ارتفاعی اندکی بالاتر از تراز نهایی موردنظر ریخت و سپس به وسیله شن‌کش بتنی یا سایر ابزار دستی مشابه، سطح آن را تراز نمود (شکل ۸-۳-۲-پ). برای حفظ ساختار حفرات باید دقت کافی مبذول گردد. لرزاندن بیش از حد و پاشش آب روی سطح روسازی می‌تواند باعث آب‌بندی (پرشدن حفرات) سطح شود و بنابراین توصیه نمی‌گردد. کارگران باید برای جلوگیری از تراکم غیریکنواخت بتن و آلوده‌نمودن سطح با مواد مضر، راه رفتن روی بتن تازه را به حداقل برسانند.

[92] Stake
[93] Kicker stake
[94] Release agent
[95] Chute
[96] Half chute section

۸-۳-۳- نوارهای موقت افزایش ارتفاع قالب[۹۷]

اگر تراکم بیشتری موردنظر باشد، می‌توان این نوارهای موقت را در بالای قالب‌ها قرار داد تا یک ارتفاع اولیه بیشتری را برای نوارها ایجاد کنند. ضخامت این نوارها از ۶ تا ۱۹ mm متفاوت است؛ ضخامت موردنیاز، به تراکم موردنیاز سطح، ضخامت مقطع روسازی، سنگدانه به‌کار رفته در بتن تراوا و روش های بتن‌ریزی مورد استفاده توسط پیمانکار بستگی دارد. برای جزئیات بیشتر به بخش ۸-۴ مراجعه شود.

شکل ۸-۳-۲-الف- ریختن بتن تراوا توسط تخلیه از ناوه کامیون مخلوط‌کن (عکس از S. Erickson)

شکل ۸-۳-۲-ب- استفاده از تسمه نقاله برای ریختن بتن تراوا

[97] Riser stripes

شکل ۸-۳-۲-پ- استفاده از شن‌کش برای رساندن تراز سطح بتن تراوا به تراز تقریبی (عکس از J. Kevern)

۸-۳-٤- تجهیزات بتن‌ریزی

روش‌های بتن‌ریزی، بسته به اندازه پروژه، بافت موردنظر سطح و کارایی مخلوط، متفاوت است. برای کارهای کوچک مانند معابر اختصاصی جلوی خانه‌ها یا برای مناطق کم‌عرض، استفاده از تخته‌ماله‌های دستی یا شمشه‌های غلتان قابل قبول است. در کارهای بزرگ‌تر، استفاده از شمشه‌های غلتان مرسوم است (شکل ۸-۳-۲-پ). هنگامی که از تخته ماله یا شمشه خرپایی استفاده می‌شود، استفاده از یک غلتک بدون لرزش برای تراکم موردنیاز است، مگر اینکه در مشخصات مخلوط، استفاده از روش‌های دیگر مجاز اعلام شده باشد. شمشه‌های سنگین دارای استوانه‌های غلتان (غلتکی‌ها) که هنگام حرکت، لایه‌ای از بتن را در جلوی خود نگه می‌دارند، تراکم اولیه را ایجاد می‌کنند و بنابراین ممکن است در این حالت به همان ضخامت نوارهای موقت (در صورت وجود) و نیز به تراکم اضافی با استفاده از غلتک بدون لرزش نیازی نباشد. در صورتی که برای تراکم از شمشه غلتان استفاده می‌شود، پرداخت تکمیلی معمولا توسط شمشه‌کشی مناسب در جهت عرضی انجام می‌شود (شکل ۸-۳-۴). لایه بتنی که در هنگام حرکت، در جلوی شمشه غلتان جمع می‌شود، به منظور ایجاد تراکم کافی برای کاهش ضخامت نوارهای موقت و یا عدم استفاده از غلتک بدون لرزش بسیار مهم است. هنگام استفاده از این روش، طرح مخلوط باید به درستی و با روانی نسبتا زیاد تهیه شده باشد تا بتن به تراکم کافی برسد.

برای ریختن حجم زیادی از بتن تراوا در روسازی‌ها، از شمشه‌های لیزری، ماشین‌آلات پخش آسفالت و قالب‌های لغزنده بتن استفاده شده است. این فرآیند، به تجربه و تخصص زیاد در زمینه روش‌های طرح مخلوط و بتن‌ریزی نیاز دارد. نکته کلیدی، تایید روانی مناسب مخلوط برای هر روش انتخاب شده است.

شکل ۸-۳-۴- پرداخت سطح بتن تراوا با استفاده از شمشه غلتان در جهت عرضی (عکس از B. Banka)

۸-۳-۵- سایر ابزارها

ابزارهای پرداخت بتن متعارف مانند لبه‌گردکن‌ها[98] و شمشه T شکل[99] (ابزاری شبیه به بیل که دارای یک تیغه بلند با لبه صاف است) را می‌توان برای تسهیل ریختن مناسب بتن تراوا نیز استفاده کرد. از تخته‌ماله دسته‌بلند و ماله‌های بتن متعارف نباید استفاده شود مگر اینکه پیمانکار بتواند نشان دهد که در صورت استفاده از این ابزارها، قابلیت پرداخت مخلوط، بدون آب‌بندی (پرشدگی) سطح یا آسیب رساندن به پیوند بین سیمان و سنگدانه‌ها وجود دارد. تمام عملیات پرداخت باید به سرعت و قبل از اینکه مخلوط، درخشندگی خود را از دست بدهد و شروع به گیرش کند، تکمیل شود. دستکاری مخلوط پس از شروع گیرش اولیه، به پیوند بین سیمان و سنگدانه آسیب می‌رساند و ممکن است منجر به واچیدگی سطح بتن شود. پس از اتمام پرداخت و تراکم اولیه، اغلب از شمشه‌کشی ثانویه در جهت عرضی استفاده می‌شود که با کاهش امواج عرضی ناشی از حرکت رو به جلوی شمشه غلتان، موجب بهبود صافی سطح می‌گردد. شمشه غلتانی که در جهت عرضی استفاده می‌گردد، نسبتا سبک است و مشابه تخته ماله دسته بلند در بتن متعارف، به صورت عمود بر جهت بتن‌ریزی استفاده می‌شود. استفاده از شمشه غلتان در جهت عرضی، تراکم قابل توجهی ایجاد نمی‌کند بلکه به کاهش نقاط برجسته‌ای که در حین شمشه‌کشی، در جهت عرضی ایجاد شده‌اند کمک می‌کند. شمشه‌کشی در جهت عرضی بر روی لایه نایلونی، به چسباندن این لایه به بتن تازه کمک، و از چسبیدن بتن به شمشه جلوگیری می‌نماید (شکل ۸-۳-۴). با این حال، این روش می‌تواند از شناسایی واضح عیوب سطح روسازی توسط کارگر، که می‌توانند با استفاده بیشتر از شمشه در جهت عرضی اصلاح شوند، جلوگیری کند. به هرحال لازم به ذکر است هرچه طول (پهنای) غلتک پرداخت عرضی را بیشتر در نظر بگیریم، ناهمواری‌های کمتری باقی می‌ماند.

---

[98] Edger
[99] Come-along

۸-۳-٦- استفاده از روسازی به عنوان قالب بتن‌ریزی

هنگام ریختن یک مقطع بتنی تراوا در مجاورت بتن ریخته‌شده‌ی قبلی، باید دقت ویژه‌ای را به خصوص از روز قبل داشت (بتن‌ریزی در همان روز، بتن‌ریزی‌های کنار هم، و استفاده از تجهیزات مکانیکی توصیه نمی‌شود). فرایند پیشنهادی به شرح زیر است:

۱- لایه نایلونی عمل‌آوری که روی بتن‌ریزی قبلی کناری قرار دارد، به‌دقت و در حدی جدا گردد که لبه روسازی نمایان شود. باید مراقب بود که بتن قبلی، تا جایی که ممکن است پوشیده باقی بماند. ناحیه بدون پوشش باید با آب مرطوب شود. مرطوب کردن برای جبران از دست رفتن رطوبت ناشی از برداشتن لایه نایلونی توصیه می‌شود و احتمال از دست رفتن رطوبت مخلوط تازه در زمان تماس با لبه گرم یا خشک بتن قبلی را کاهش می‌دهد.

۲- در بالای بتن قبلی پرداخت شده و در امتداد لبه، نوار موت ارتفاع‌دهنده یا لایه محافظتی قرار داده شود.

۳- بتن تراوای تازه، حداکثر تا لبه روسازی قبلی ریخته شود و مخلوط تازه، تا تراز ارتفاعی بالاتری از تراز نهایی بتن قبلی متراکم شده شود، به گونه‌ای که مخلوط بتن تازه با شمشه‌کشی و تراکم آن به تراز نهایی برسد.

۴- برای محافظت از روسازی مجاور و شمشه‌کشی قسمت‌های اضافی بتن تازه ریخته‌شده به منظور دست‌یابی به تراز ارتفاعی مناسب، باید از ورق فلزی یا سایر مواد با ضخامت کم بر روی بتن قبلی استفاده شود. در این حالت باید مراقب بود که بتن‌ریزی قبلی تحت تاثیر قرار نگیرد.

۵- در پی آن تراکم با غلتک انجام شود و عملیات پرداخت مطابق معمول و تا حصول اطمینان از هم‌تراز شدن درزهای اجرایی با سطح بتن قبلی ادامه یابد.

۶- سطوح بدون پوشش بتن قبلی مجددا پوشانده شوند و بتن‌ریزی جدید نیز با لایه عمل‌آوری پوشانده گردد.

۸-٤-تراکم و پرداخت

هدف از پرداخت بتن تراوا، متراکم‌کردن مخلوط با حفظ سامانه مناسب حفرات است. تراکم سطح بتن تراوا، پیوند قوی‌تری بین سنگدانه‌ها ایجاد می‌کند و اندازه حفرات سطح را کاهش می‌دهد. این موضوع به گیرافتادن ذرات رسوبی در حفرات نزدیک به سطح کمک می‌کند تا بتوان آنها را راحت‌تر از زمانی که در قسمت‌های عمیق‌تر روسازی گیر می‌کنند، خارج کرد. لبه‌ها آسیب‌پذیرتر هستند و باید قبل از شمشه‌کشی متراکم شوند. یکی از روش‌هایی که برای تراکم لبه به کار می‌رود، راه رفتن کارگر روی بتن تراوای تازه (با چکمه‌ای تمیز) در امتداد لبه است تا مخلوط بتن با این روش به موازات قالب متراکم شود. با واردشدن نیروی وزن کارگر به مخلوط بتن، تراکم کافی ایجاد می‌شود. ممکن است نیاز باشد که این فرایند تا زمانی که اطمینان حاصل شود که لبه تراکم یافته، کمی بالاتر از تراز نهایی است و با شمشه‌کشی به تراز نهایی می‌رسد، تکرار شود. از جمله سایر روش‌های تراکم لبه، استفاده از ابزارهایی مانند کوبه است.

۸-٤-۱- شمشه غلتان

متداول‌ترین روش تراکم و پرداخت بتن تراوا، برای شمشه‌کشی بتن اضافی و نیز متراکم کردن بتن، استفاده از شمشه غلتان هیدرولیکی، برقی یا گازی است (شکل ۸-۳-۲-پ). به منظور افزایش وزن شمشه و تراکم بهتر بتن تازه، استوانه توخالی آن معمولا با آب یا ماسه پر می‌شود. برای اطمینان از چگالی و بافت سطحی یکنواخت، سعی می‌شود یک لایه از بتن تازه در جلوی شمشه غلتان وجود داشته باشد.

۸-٤-۲- پرداخت پس از تراکم

در برخی مواقع، به انرژی بیشتری برای اطمینان از روسازی با کیفیت نیاز است. در مواردی همچون خطوط سواره‌رو که کیفیت رانندگی (سواری‌دهی) مورد توجه ویژه است، ممکن است نیاز باشد برای روسازی از مخلوط‌های تراوایی استفاده شود که به پیمانکار اجازه می‌دهد تا از ابزارهایی برای پرداخت استفاده کند که در مقایسه با حالتی که فقط از شمشه‌کشی عرضی استفاده می‌شود، سطح صاف‌تری را ایجاد می‌کنند. استفاده از ماله فرزنوی سنگین[100]، سینی ماله پروانه‌ای[101]، یا سایر ابزارهای عریضی که قادر به صاف کردن برجستگی‌های سطح هستند، تا زمانی که منجر به آب‌بندی سطح نشوند، مجاز است (شکل ۸-۴-۲-الف). تمامی لبه‌ها، حتی در نواحی چسبیده به جدول، باید با ابزار مناسب صاف شوند تا واچیدگی کاهش یابد، زیرا جدول و روسازی به طور مستقل حرکت می‌کنند (شکل ۸-۴-۲-ب). توجه شود که تراکم، پرداخت و لبه‌سازی مناسب باید تنها در عرض چند دقیقه پس از بتن‌ریزی انجام شود. هرگونه عملیات پرداخت که لازم است پس از مسطح کردن، تراکم و لبه‌سازی انجام شود، باید بدون تاخیر شروع شود.

شکل ۸-۴-۲-الف- نمونه استفاده از ماله فرزنوی سنگین برای تصحیح آثار به جا مانده از شمشه‌کشی عرضی

[100] Weighted fresno
[101] Spinning pan float

شکل ۸-۴-۲-ب- لبه‌سازی بتن تراوا (عکس از M. Offenberg)

۸-۵- ایجاد درزها

درزهای انقباض که گاهی اوقات به آنها درزهای کنترلی نیز گفته می‌شود باید همان‌طور که در نقشه‌ها مشخص شده‌اند اجرا شوند. عمق این درزها باید از یک سوم تا یک چهارم ضخامت روسازی باشد. این درزها را می‌توان در بتن تازه با استفاده از ابزارهای مخصوص و یا در بتن سخت‌شده با استفاده از اره‌های متعارف ایجاد کرد. ترک‌های جمع‌شدگی در بتن تراوا و همچنین بتن متعارف ایجاد می‌شوند و در بتن‌ریزی‌های بزرگ می‌توانند حتی قبل از اینکه بتن زمان کافی برای عمل‌آوری را داشته باشد تا بتوان آن را با اره دورانی برش داد، رخ دهند. ابزارهای ایجاد درز در بتن متعارف را می‌توان برای بتن‌ریزی‌های کوچک مانند پیاده‌روها به‌کار برد.

اگر درزهای انقباض با اره ایجاد می‌شوند، این روش باید به محض اینکه روسازی به اندازه کافی سخت شد، شروع شود تا از آسیب به سطح جلوگیری گردد. تنها باید حداقل مقداری از لایه نایلونی برداشته شود که برای برش دادن روسازی لازم است. پس از اره کردن، باید قسمت‌های اطراف آن با آب شسته شوند تا ذرات ریز ناشی از اره کردن از بین برود و اطمینان حاصل شود که آب کافی برای عمل‌آوری مناسب وجود دارد. به محض اتمام برش با اره، قسمت‌های بدون پوشش فورا با لایه نایلونی پوشش داده شود.

۸-٦- عمل‌آوری و محافظت

از آنجا که به دلیل ساختار باز و حفره‌دار بتن تراوا، سطح بیشتری از خمیر در معرض خشک شدن قرار دارد، عمل‌آوری در این نوع بتن بسیار مهم است. عملیات تسطیح، تراکم و عمل‌آوری باید از نظر زمانی تا حد امکان به هم نزدیک باشند تا از خشک شدن سطح بتن تراوا جلوگیری شود. عمل‌آوری فوری بتن تراوا برای عملکرد مناسب آن ضروری است. در شرایط مساعد جوی (رطوبت زیاد یا سرعت کم باد)، مواد پوششی باید حداکثر ۲۰ دقیقه پس از بتن‌ریزی، روی آن قرار داده شوند. در شرایط محیطی شدیدتر

(رطوبت کم یا سرعت زیاد باد)، مواد پوششی باید در فاصله زمانی کمتری روی بتن قرار داده شوند.

در حال حاضر، دو روش برای عمل‌آوری بتن تراوا با استفاده از لایه نایلونی وجود دارد. روش اول استفاده از یک لایه نایلونی نازک با ضخامت ۰/۰۲۵ mm است، که وقتی روی قالب‌ها منگنه و محکم کشیده می‌شود، به صورت کامل بتن را پوشش می‌دهد و از چسبیدن بتن به شمشه غلتان در هنگام شمشه‌کشی عرضی جلوگیری می‌کند. لایه پلاستیکی نازک، قبل از قرار دادن لایه نایلونی ضخیم در دوره عمل‌آوری موردنیاز قرار داده می‌شود. این لایه نایلونی ضخیم پس از برداشتن مواد عمل‌آوری، آثار باقی‌مانده روی بتن را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. روش دوم این است که شمشه‌کشی عرضی مستقیما روی لایه نایلونی ضخیم انجام شود، تا شمشه غلتان تمیز باقی بماند و در دوره موردنیاز عمل‌آوری، به عنوان ماده عمل‌آوری نیز عمل کند. در این حالت، به دلیل رطوبتی که از بتن تبخیر می‌شود و پس از جمع‌شدن زیر لایه نایلونی ضخیم مجددا روی سطح بتن تراوا می‌ریزد، احتمال باقی ماندن خطوطی روی سطح بتن وجود دارد. این آثار به جا مانده فقط نمای ظاهری بتن تراوا را مختل می‌کنند و به دوام آن آسیبی نمی‌رسانند. ماده پوششی باید از نوع لایه نایلونی ضخیم، مطابق با الزامات ASTM C171 و دارای ابعاد کافی برای پوشش دادن تمام عرض روسازی باشد (شکل ۸-۶-الف). از مواد بافته‌شده مانند گونی و زمین‌پارچه نباید استفاده کرد، زیرا نمی‌توانند رطوبت کافی را در بتن حفظ کنند. برای بیشتر مخلوط‌های بتن تراوا، استفاده از پاشش مواد حاوی ترکیبات عمل‌آوری به تنهایی نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد. زمانی که شرایط محیطی نامطلوب مانند دمای زیاد، وزش باد شدید یا رطوبت کم وجود دارد، می‌توان قبل از پوشاندن بتن با لایه نایلونی، یک ماده کاهنده تبخیر را به آرامی روی سطح آن پاشید.

لایه نایلونی باید تمام سطوح بتنی بدون پوشش را به طور کامل بپوشاند و فراتر از تمام لبه‌های جانبی روسازی در جای خود محکم شود تا از تبخیر آب بتن و همچنین از جابجایی آن توسط باد جلوگیری گردد. لایه‌های پلاستیکی باید برای ایجاد آب‌بندی مناسب، با یکدیگر همپوشانی کافی داشته باشند. برای محکم کردن پوشش نایلونی و به منظور جلوگیری از جمع‌شدن هوا در زیر آن، می‌توان از آرماتور، الوار، کیسه‌های ماسه یا بلوک‌های بتنی استفاده کرد (شکل ۸-۶-ب). ذرات ریزی مانند خاک یا ماسه را نباید در بالای پوشش نایلونی قرار داد، زیرا ممکن است در هنگام بارندگی شدید یا در زمان برداشتن پوشش، وارد حفرات بتن شوند. اگر از قالب‌های چوبی استفاده می‌شود، می‌توان برای محکم کردن لایه‌های نایلونی در جای خود از نوارهای موقت ارتفاع‌دهنده استفاده کرد. لایه‌های نایلونی باید ابتدا با اتصال مجدد این نوارها به بالای قالب‌ها با استفاده از میخ سر دکمه‌ای، در یک سمت خط بتن‌ریزی به بالای قالب متصل شوند، به طوری که لایه نایلونی بین قالب و نوار قرار گیرد. سپس لایه نایلونی باید تا حد امکان محکم کشیده شود تا چین‌خوردگی‌های آن از بین برود و احتمال تغییر رنگ یا راه راه شدن بتن به حداقل برسد. تمام سطوح روسازی باید به درستی پوشانده شوند. انجام ندادن این کار ممکن است باعث واچیدگی نواحی بدون پوشش شود. هرگونه از دست دادن رطوبت، برای مثال در اثر رفتن باد به زیر لایه نایلونی محکم، می‌تواند برای عمل‌آوری مناسب و کسب مقاومت بتن روسازی مضر باشد.

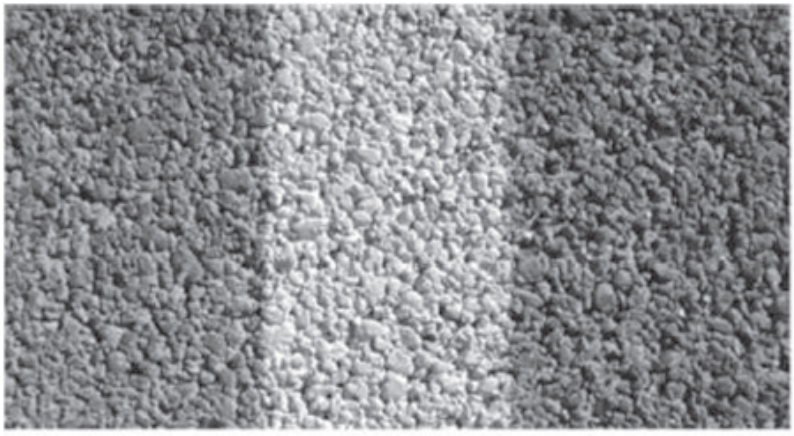
مالک باید از تغییررنگ احتمالی سطح روسازی به دلیل عمل‌آوری غیریکنواخت در زیر لایه نایلونی آگاه شود. تغییر رنگ زمانی رخ می‌دهد که کشش سطحی باعث شود تا آب دارای pH زیاد، زیر لایه‌های نایلونی جمع شود. هنگامی که آب تبخیر می‌شود، باعث سفیدک زدن سطح می‌شود. با گذشت زمان، تغییر رنگ باید محو شود تا زمانی که رنگ سطح بتن یکنواخت گردد. تغییررنگ را می‌توان با استفاده از اندکی اسید موریاتیک[۱۰۲] (اسید کلریدریک) رقیق برطرف کرد. اگر برای کاهش تغییررنگ سطح از اسید موریاتیک استفاده می‌شود، باید ابتدا غلظت و اثربخشی آن را در یک ناحیه غیربحرانی آزمایش کرد تا بررسی شود که غلظت انتخاب شده باعث تجزیه شیمیایی خمیر یا واچیدگی سطح نمی‌شود. نویسنگان استفاده از این روش را توصیه نمی‌کنند زیرا قابلیت تخریب بتن در این روش زیاد است.

برای عمل‌آوری مناسب، روسازی معمولا باید حداقل به مدت ۷ روز برای مخلوط‌های بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی و ۱۰ روز برای مخلوط‌های بتنی که حاوی مواد سیمانی مکمل مانند خاکستر بادی یا سرباره هستند، پوشیده باقی بماند. در هوای سرد ممکن است لازم باشد که این زمان‌های معمول عمل‌آوری افزایش یابند. افزایش زمان عمل‌آوری در زیر لایه نایلونی به مدت بیش از ۷ روز، مقاومت را به طور قابل توجهی افزایش نمی‌دهد. با این حال، زمان عمل‌آوری اضافی منجر به افزایش مقاومت در برابر سایش می‌شود (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹b). استفاده از رنگ برای خط‌کشی روسازی باید تنها پس از سپری شدن دوره عمل‌آوری صورت پذیرد (شکل ۸-۶-پ). در هنگام عمل‌آوری نباید اجازه تردد وسایل نقلیه روی روسازی داده شود. پیمانکار باید اقداماتی را برای جلوگیری از آسیب دیدن روسازی در اثر سایر عملیات ساختمانی نادرست انجام دهد. به طور ویژه، باید از برداشتن زودهنگام مواد عمل‌آوری و هرگونه تردد وسایل نقلیه از روی روسازی بتنی تراوا جلوگیری کرد. علاوه بر این، به جز مواردی که برای درجا نگه داشتن لایه نایلونی استفاده می‌شود، پیمانکار نباید اجازه انباشت هرگونه مصالح روی روسازی را بدهد.

شکل ۸-۶-الف- عمل‌آوری با استفاده از لایه نایلونی بلافاصله پس از تراکم (عکس از C. Martin)

[102] Muriatic acid

شکل ۸-۶-ب- استفاده از کیسه‌های ماسه برای ثابت نگه‌داشتن پوشش نایلونی عمل‌آوری (عکس از J. Kevern)



شکل ۸-۶-پ- خط‌کشی‌های قابل مشاهده روی روسازی بتنی تراوا (عکس از M. Offenberg)

۸-۷- محافظت در برابر هوای سرد

بتن تراوا در مقایسه با بتن متعارف حساسیت بیشتری در برابر شرایط محیطی سرد دارد (بخش ۸-۱) و بنابراین، زمانی که انتظار می‌رود دمای محیط، در طی ۱ روز پس از بتن‌ریزی، به کمتر از ۴ °C کاهش یابد، می‌توان بتن‌ریزی را به تعویق انداخت و یا از روکش‌های عمل‌آوری (پتوها) استفاده کرد. استفاده از افزودنی‌های تثبیت‌کننده و کندکننده‌های هیدراته‌شدن در مخلوط‌های بتن تراوا برای کمک به افزایش طول عمر کاری آن در اجرا رایج است. در بتن تراوا، به دلیل استفاده از مواد افزودنی کندگیرکننده، گرمای کمتری برای کمک به هیدراته‌شدن، تولید یا حفظ می‌شود که عمل‌آوری را با مشکل بیشتری مواجه می‌کند. همچنین به دلیل تاخیر در گیرش و تبخیر سریع ناشی از ساختار حفره‌دار و نسبت کم آب به سیمان بتن تراوا، هنگام پیمانه کردن آن در هوای سرد باید با رعایت احتیاط از آب گرم استفاده کرد. در هنگام عمل‌آوری، باید اقداماتی برای محافظت از بتن تراوا در برابر یخ‌زدن و در عین حال حفظ رطوبت برای مدت زمان لازم برای دستیابی به مقاومت موردنظر انجام شود. برای برآورده کردن این هدف، استفاده از پوشش‌های

عمل‌آوری کفایت می‌کند. اگر بتن‌ریزی روسازی در دماهای کمتر از ۱۰ °C انجام می‌شود، پیمانکار باید از بتن در برابر یخ‌زدن محافظت کند و دمای بتن را حداقل دو بار در هر دوره ۲۴ ساعته مطابق با شرایط ACI ۳۰۶,۱ ثبت کند. علاوه بر این، پیمانکار باید روش‌های تولید، انتقال، ریختن، محافظت، عمل‌آوری و پایش دمای بتن را به صورت دقیق ارائه دهد.

۸-۸- محافظت در برابر هوای گرم

در هوای گرم، انتقال، ریختن و تراکم بتن باید در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود. مخلوط‌های حاوی مواد افزودنی، به‌ویژه تثبیت‌کننده هیدراته‌شدن، در شرایط گرم‌تر یا خشک‌تر به افزودنی بیشتری نیاز دارند. پس از تراکم و قبل از قرار دادن لایه نایلونی، در صورتی که به نظر می‌رسد درخشندگی سطح در حال از دست رفتن است، می‌توان سطح را مه‌پاشی کرد یا از یک ماده کندکننده تبخیر استفاده نمود. اگر شرایط آب و هوایی، مدت زمان کارایی مخلوط را به اندازه‌ای کاهش دهد که پیش از آن که درخشندگی ظاهر مخلوط از بین برود، مانع از انجام کلیه مراحل بتن‌ریزی شود، باید تا زمانی که شرایط محیطی بهبود یابد بتن‌ریزی را به تعویق انداخت. زمانی که هوای گرم در راه است، پیمانکار باید روش‌های تولید، حمل‌ونقل، ریختن، محافظت، عمل‌آوری و پایش دمای بتن تراوا را به صورت دقیق ارائه دهد.

فصل ۹

بازرسی‌ها و آزمایش‌های کنترل و تضمین کیفیت

۹-۱- کلیات

تایید کیفیت روسازی بتنی تراوا مانند هر ماده مهندسی دیگری حائز اهمیت است. آزمایش‌های مربوط به شرایط بستر و زیراساس، برای حصول اطمینان از چگالی، میزان باربری و نفوذپذیری مناسب آن‌ها است. آزمایش مخلوط بتن تراوا باید برای بررسی ویژگی‌های بتن تازه و سخت‌شده و به منظور تضمین کیفیت چگالی و ضخامت مناسب آن انجام شود. مانند تمام بتن‌ها، برای اطمینان از انجام آزمایش مناسب و تولید محصول نهایی با کیفیت، همکاری و ارتباط خوب بین تولیدکننده، پیمانکار و نهاد مسئول آزمایش بتن مهم است.

زیرکمیته ASTM C09.49، سه روش آزمایش را به طور ویژه برای بتن تراوا تدوین کرده است (C1688/C1688M، C1701/C1701M و C1747/C1747M) که امکان اندازه‌گیری استاندارد چگالی و درصد حفرات بتن تازه و سخت شده، میزان تراوایی سطحی، و استعداد واچیدگی مخلوط را می‌دهند. بسیاری از روش‌های آزمایش موجود در ASTM و AASHTO برای بتن تراوا نیز قابل استفاده هستند. با توجه به ویژگی های فیزیکی مواد، همه آزمایش‌های بتن متعارف برای کاربرد در بتن تراوا مناسب نیستند.

مراحل کنترل کیفیت برای بتن تراوا را می‌توان به تهیه مخلوط و ارزیابی کیفی ساختگاه پیش از ساخت، آزمایش تولید و بازرسی مواد بتن تازه، از جمله قطعات آزمایشی که در آن اهداف آزمایش ارزیابی می‌شوند، و ارزیابی کیفی پس از ساخت و آزمایش سامانه بتن تراوای تکمیل شده تقسیم کرد. در ادامه به این سه دسته بیشتر پرداخته شده است.

۹-۲- بازرسی و آزمایش پیش از ساخت

همانند سایر مصالح مورد استفاده برای روسازی، آزمایش پیش از ساخت باید به عنوان روشی اولیه برای تهیه طرح مخلوط مورد استفاده قرار گیرد. تولیدکنندگان بتن تراوا باید داده‌ها و تاریخچه معتبری از مخلوط‌های بتن تراوای خود تهیه کنند. روش‌های مختلفی وجود دارند که می‌تواند توسط تولیدکنندگان بتن تراوا برای تهیه طرح مخلوط و ارزیابی آن استفاده شود. همانطور که در فصل ۴ ذکر شد، می‌توان از ASTM C29/C29M برای تعیین وزن مخصوص خشک متراکم با میله و همچنین درصد حفرات سنگدانه درشت استفاده کرد. ASTM D1747 به طور خاص برای تهیه طرح مخلوط مفید است. از این استاندارد می‌توان برای مقایسه چند گزینه طرح مخلوط با هدف تولید بادوام‌ترین روسازی استفاده کرد. از ASTM C1688/C1688M می‌توان به منظور ایجاد رابطه‌ای بین درصد حفرات و چگالی بتن تازه برای طرح مخلوط بتن تراوای موردنظر استفاده نمود. شرح کامل روش‌ها توسط Kevern و همکاران (d۲۰۰۹) ارائه شده است. با استفاده از آزمونه‌های ۱۰۰ میلی‌متری و ASTM C1754/C1754M، می‌توان از روش مشابهی به منظور ایجاد رابطه بین چگالی بتن تازه مطابق با ASTM C1688/C1688M، چگالی بتن سخت شده و درصد حفرات برای یک طرح مخلوط مشخص بتن تراوا استفاده نمود.

بازرسی ساختگاه پیش از ساخت نیز باید انجام شود. در طراحی و ساخت سامانه بتن تراوا، تعیین نفوذپذیری خاک بستر اهمیت ویژه‌ای دارد. آزمایش‌های اصلی مربوط به ویژگی‌های بستر باید شامل دانه‌بندی (ASTM D422)،

طبقه‌بندی (ASTM D2487؛ ASTM D2488) و آزمایش پروکتور استاندارد یا اصلاح‌شده (ASTM D698؛ ASTM D1557)، یا در مورد خاک‌های غیرچسبنده، حداکثر و حداقل وزن مخصوص (ASTM D4253؛ ASTM D4254) باشد. نتایج این آزمایش‌ها، داده‌های ورودی طراحی روسازی را در اختیار مهندس طراح قرار می‌دهد.

آزمایش تراوایی حجمی (درونی) استاندارد که برای طراحی میدان‌های تخلیه فاضلاب خانگی[۱۰۳] (سپتیک) استفاده می‌شود، آزمایش مناسبی برای تعیین نفوذپذیری بستر روسازی‌های تراوا نیست، بلکه به منظور آزمایش صحیح نفوذپذیری بستر باید از نفوذسنج دوحلقه‌ای[۱۰۴] (ASTM D3385) یا سایر آزمایش‌های مناسب استفاده نمود. این آزمایش‌ها در پروژه‌های کوچک ممکن است ضروری نباشند، به خصوص اگر مهندس طراح، تجربه طراحی با خاک‌های مشابه را داشته باشد.

فرایندهای مربوط به آزمایش بررسی چگالی خاک بستر (تراکم)، باید پیش از بتن‌ریزی و به عنوان بخشی از برنامه معمول کنترل کیفیت، مطابق با یک روش آزمایش استاندارد انجام شود. در مواردی که مصالح بستر ماهیت چسبنده دارد، باید آن را بازرسی کرد تا قبل از ریختن سنگدانه زیراساس، آب‌بندی نشده باشند. لازم به ذکر است که مصالح زیراساس اغلب دارای دانه‌بندی باز (یکنواخت) هستند و به رطوبت حساس نمی‌باشند. برای این‌گونه مصالح، به جای حداکثر چگالی خشک تعیین شده از آزمایش پروکتور، باید از چگالی نسبی استفاده کرد.

مصالح بستر و زیراساس اغلب در اوایل زمان‌بندی ساخت، ریخته و بازرسی می‌گردند، اما در اثر عملیات ساختمانی که پیش از ریختن بتن تراوا انجام می‌گیرد، دچار گرفتگی (پرشدگی) می‌شوند و یا تحت تاثیر قرار می‌گیرند. مصالح لایه اساس و بستر روسازی باید قبل از ریختن بتن تراوا محافظت شوند تا از عملکرد کل سامانه بتن تراوا اطمینان حاصل شود.

خاکبرداری نواحی روسازی بتنی تراوا باید به منظور حفاظت از خاک بستر به تاخیر انداخته شود. از گذشته، خاکبرداری ساختگاه، زود انجام می‌گردد و در طول ساخت از پارکینگ‌های بدون روسازی استفاده می‌شود. این کار می‌تواند در نتیجه تردد ماشین‌آلات ساختمانی، باعث تراکم بیش از حد خاک بستر شود که اغلب منجر به نیاز به خاکبرداری بیشتر خاک بستر، پیش از ساخت روسازی و اعمال هزینه‌های اضافی می‌گردد. به‌جای خاکبرداری زودهنگام نواحی پارکینگ، در صورت امکان، تردد ماشین‌آلات ساختمانی باید به قسمت‌های دیگر منتقل شود و یا در مواردی که این کار امکان‌پذیر نیست، تراز اولیه ساختگاه باید بالاتر از تراز نهایی در نظر گرفته شود. نواحی تراوا باید تنها زمانی که آماده تکمیل روسازی هستند، خاکبرداری شوند.

۹-۳- بازرسی و آزمایش حین ساخت

همانطور که در ACI 522.1 مشخص شده است، بتن‌ریزی قطعات آزمایشی در این مرحله از فرآیند ریختن بتن تراوا انجام می‌شود. به منظور محقق کردن تمام اهداف مهم برای بتن‌ریزی نهایی، باید از قطعات آزمایشی استفاده شود. از این رو، ضروری است که همه متغیرهای مخلوط بتن تا حد امکان، نزدیک به

[103] Septic field
[104] Double-ring infiltrometer

مقادیر پیش‌بینی شده محصول نهایی نگه داشته شوند تا تفاوت بین قطعات آزمایشی و محصول نهایی به حداقل برسد. برای تایید داده‌های طراحی مخلوط ارائه‌شده توسط تولیدکننده بتن و تایید توانایی پیمانکار بتن تراوا برای ریختن مخلوط تراوا در شرایط پیش‌بینی شده پروژه نیز از قطعات آزمایشی استفاده می‌شود. برای ارزیابی مناسب مخلوط بتن در طول عملیات بتن‌ریزی، برآورد چگالی تازه واقعی بتن تراوا (مطابق با شرایط ذکرشده در ASTM C1688/C1688M) حائز اهمیت است. عملکرد پیمانکار را می‌توان به صورت چشمی و همچنین با استفاده از روش‌های آزمایش ASTM برای بتن تراوای سخت‌شده تایید کرد. روش‌های آزمایش مذکور شامل ASTM C1701/C1701M و ASTM C1754/C1754M هستند. تحقیقات نشان داده است که نتایج آزمایش ASTM C1754/C1754M تقریبا ۶۴ تا ۱۲۸ کمتر از نتایج مربوط به ASTM C1688/C1688M خواهد بود، اما این رابطه به طراحی مخلوط بتن و چگونگی عملیات بتن‌ریزی توسط پیمانکار بستگی دارد و باید در زمان ارزیابی قطعات آزمایشی ایجاد شود.

روش اولیه برای کنترل کیفیت بتن تراوای تحویلی به پروژه باید مطابق با ASTM C1688/C1688M و با استفاده از مقادیر هدف تعیین شده در هنگام بتن‌ریزی قطعات آزمایشی باشد. برای هر کامیون تحویل بتن، انجام یک بار آزمایش چگالی توصیه می‌شود، اگرچه تواتر این آزمایش را می‌توان بر اساس تواتر تحویل بتن و بودجه اختصاص داده شده برای آزمایش‌های پروژه اصلاح کرد. در حالی که نسخه فعلی ACI 522.1، رواداری ±۸۰ را برای چگالی بتن تازه تحویلی توصیه می‌کند، اما نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که استفاده از رواداری سختگیرانه‌تر (±۵۰) از لحاظ تولید کاملا امکان‌پذیر است و به درصد حفرات یکنواخت‌تر بتن منجر می‌شود. به همین دلیل، کنترل کیفیت کارخانه بتن در زمان تولید بسیار مهم است و در حین عملیات پیمانه کردن بتن، باید به رطوبت سنگدانه توجه ویژه‌ای شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که چگالی بتن تازه یک محموله تحویلی بتن تراوا می‌تواند از ابتدا تا انتهای کامیون از ۹۶ تا ۱۲۸ تغییر کند، بنابراین ویژگی‌های بتن تراوا باید به طور مستمر توسط تولیدکننده، پیمانکار و ناظر پروژه پایش شود تا اصلاحات لازم در سریع‌ترین زمان ممکن انجام گیرد. بسیاری از مشخصات پروژه، اضافه کردن آب در کارگاه به منظور تنظیم مخلوط‌های متعارف بتن را ممنوع می‌کنند؛ با این حال در مورد بتن تراوا، ممکن است اصلاحات موردنیاز به طور مکرر برای حفظ روانی مخلوط و ویژگی‌های مناسب خمیر سیمان ضروری باشند.

روشی مفید برای ارزیابی روانی و استعداد آب‌بندی خمیر، آزمایش مخروط اسلامپ وارونه است. این آزمایش با قرار دادن یک مخروط اسلامپ وارونه بر روی سطحی تراز و غیرجاذب انجام می‌شود. مخروط، بدون انجام هیچ تراکمی با بتن تراوا پر می‌گردد. پس از ۲ دقیقه، به صورت چشمی کنترل می‌شود که در پایین مخروط حلقه‌ای از خمیر سیمان تشکیل شده است یا خیر. اگر خمیر از میان بتن زهکشی شده و در پایین مخروط، حلقه‌ای از خود به جا گذاشته باشد، نشان‌دهنده این است که بتن تراوا بیش از حد مرطوب است یا پوشش خمیری ناپایداری دارد و بتن به احتمال زیاد در قسمت‌های پایینی دچار گرفتگی (پرشدگی) خواهد شد و میزان تراوایی کاهش خواهد یافت. اگر حلقه خمیر در پایین وجود نداشته باشد و نمونه پایدار به نظر برسد، ارزیابی بیشتر روانی را می‌توان با بلند کردن آهسته مخروط انجام داد. بتن باید تنها با چند تکان عمودی ملایم

از مخروط خارج شود. نیاز به تعداد تکان‌های بیشتر ممکن است نشان‌دهنده خشکی بیش از حد بتن تراوا باشد.

آزمایش‌ها و بازرسی‌های کارگاهی بتن تراوا باید توسط فردی انجام شود که به‌عنوان کارشناس فنی بتن تراوا، دارای گواهی NRMCA یا معادل آن و به‌عنوان کارشناس فنی پایه ۱ آزمایش کارگاهی بتن ACI یا معادل آن تایید شده باشد.

۹-٤- بازرسی و آزمایش پس از ساخت

به منظور تضمین کیفیت، به ازای هر ۴۵۰m^2 بتن روسازی، باید سه مغزه گرفته شود و ضخامت و چگالی آن‌ها مورد آزمایش قرار گیرد. مغزه‌ها باید مطابق با ASTM C42/C42M ، حداقل ۷ روز پس از بتن‌ریزی گرفته شوند و قطر آن‌ها حدود ۱۰۰ mm باشد. ضخامت مغزه‌ها باید توسط یک کارشناس فنی آزمایشگاهی دارای گواهینامه پایه ۲ از ACI مطابق با استاندارد ASTM C174/C174M و چگالی آن‌ها مطابق با استاندارد ASTM C1754/C1754M اندازه‌گیری شود. ضخامت بتن‌ریزی باید با استفاده از مغزه‌های بتن سخت شده و برش داده نشده تعیین شود. پس از تعیین ضخامت، مغزه‌ها باید با همان روشی که برای آزمایش قطعات آزمایشی استفاده می‌شود، برش داده شوند و وزن مخصوص آن‌ها اندازه‌گیری گردد. چگالی قابل قبول مغزه‌های بتن سخت شده باید در محدوده ۵%± چگالی بتن سخت شده مورد تایید به دست آمده از قطعات آزمایشی باشد. لازم به ذکر است که چگالی بتن تازه به دست آمده با استفاده از ASTM C1688/C1688M با چگالی بتن سخت شده با استفاده از ASTM C1754/C1754M قابل مقایسه نخواهد بود.

برای تایید این که نرخ زهکشی روسازی، الزام حداقل ۱۰۵ min/mm یا مقادیر بیش از آن را برآورده می‌کند، از روش استاندارد مطابق با ASTM C1701/C1701M استفاده می‌شود. با توجه به تغییرپذیری موضعی روسازی‌های تراوا، باید چند آزمایش انجام شود و به جای اینکه روسازی، به عنوان نقاط آزمایشی جداگانه ارزیابی گردد، به عنوان یک مجموعه کلی یا به صورت مقطع مقطع یا قطعه قطعه مورد ارزیابی قرار گیرد. صرف‌نظر از این که آزمایش تراوایی سطحی مطابق با ASTM C1701/C1701M، به عنوان بخشی از برنامه کنترل کیفیت و تضمین کیفیت پروژه انجام می‌شود یا نه، توصیه می‌شود که پیمانکار پس از اتمام عمل‌آوری هر مقطع روسازی، این آزمایش را انجام دهد. این آزمایش، یک نرخ تراوایی سطحی مبنا برای اهداف پایش و تعمیر و نگهداری آینده به دست می‌دهد.

علاوه بر این، بازرسی چشمی مغزه‌ها، امکان بررسی وجود حفرات کافی موردنیاز برای تسهیل زهکشی را فراهم می‌کند. در صورتی که پس از بازرسی چشمی مشاهده شود که ساختار حفرات، کاملا بسته یا بسیار ناچیز هستند، می‌تواند نشان‌گر این باشد که روسازی به درستی عمل نخواهد کرد و مقاطعی که کاملا ناتراوا هستند باید برداشته و جایگزین شوند. با توجه به نرخ میانگین تراوایی سطحی کلی روسازی، وجود برخی نواحی ناتراوای موضعی می‌تواند قابل قبول باشد. توافق در مورد این که چه معیاری به عنوان ناتراوا تلقی می‌شود، و همچنین روش اندازه‌گیری تراوایی سطحی، باید قبل از بتن‌ریزی اولیه انجام، و در قطعات آزمایشی مورد تایید قرار گیرد.

پذیرش بتن تراوا، چه بتن تحویلی و چه مغزه‌های بتنی گرفته شده از روسازی، هرگز نباید بر اساس مقاومت فشاری آن انجام شود. از آنجا که افزایش تراکم می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن تراوا شود، طیف گسترده‌ای از مقاومت‌ها وجود دارد که می‌تواند از یک محموله تحویلی بتن تراوا به دست آید. مطالعاتی برای ایجاد روشی استاندارد برای آزمایش مقاومت فشاری بتن تراوا در حال انجام است. روش‌های معمول مغزه‌گیری، هنگامی که برای بتن تراوا استفاده می‌شوند، به گونه‌ای باعث دست‌خوردگی خمیره سیمان می‌گردند که ممکن است نتایج مقاومت فشاری بتن به‌طور نادرستی کم باشد. تجربیات به دست آمده از پروژه‌های تکمیل شده در محدوده جغرافیایی پروژه موردنظر، قطعات آزمایشی و یا هر دو، باید نشان دهند که یک طرح مخلوط و ترکیب مواد معین، مقاومت کافی برای مقاومت در برابر تنش‌های ناشی از بارهای ترافیکی طراحی را دارد یا خیر.

فصل ۱۰

عملکرد

۱۰-۱- کلیات

بیش از ۳۰ سال از بهره‌برداری روسازی‌های بتنی تراوا می‌گذرد و زمان لازم برای انجام مطالعات تحقیقاتی جامع و تهیه استانداردهایی برای درک بهتر عملکرد آن‌ها را فراهم کرده است. در این خصوص، اطلاعات بدست آمده از مطالعات کنترل‌شده (میدانی) در مورد عملکرد بلندمدت روسازی‌های بتنی تراوا موجود است. معیارهای عملکردی که در این فصل مورد بحث قرار می‌گیرند، شامل تغییرات نرخ تراوایی سطحی، خرابی سازه‌ای، خرابی سطحی، مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن، مقاومت در برابر نمک‌های یخ‌زدا و عملکرد روسازی است.

۱۰-۲- تغییر نرخ تراوایی سطحی

در گذشته، نگرانی در مورد نحوه تعمیر و نگهداری رویه‌های بتنی تراوا، مانعی در گسترش هرچه بیشتر این رویه‌ها به شمار می‌رفت. امروزه روسازی بتنی تراوا حتی در صورت گرفتگی (پرشدگی) نیز همچنان نفوذپذیری خود را حفظ خواهد کرد. پرشدگی حفرات رویه یا بستر، مانع از نفوذ درونی آب بارش در بتن با نرخ زیاد می‌شود (Wanielista و همکاران، ۲۰۰۷؛ Mata و Leming، ۲۰۰۸). بنابراین، در صورتی که بارش نتواند با نرخ طراحی شده از میان لایه بتنی تراوا زهکشی شود، روسازی دیگر به اندازه کافی تراوا نیست زیرا فرض مزیت طراحی روسازی تراوا دیگر معتبر نمی‌باشد و روسازی نتوانسته است هدف موردنظر را برآورده نماید. روسازی‌های بتنی تراوا می‌توانند برای سال‌ها با وجود مقداری پرشدگی همچنان عملکرد خوبی داشته باشند (Wanielista و همکاران، ۲۰۰۷)، اما نرخ تراوایی باید بیشتر از نرخ تراوایی طراحی شده باشد. پرشدگی زمانی اتفاق می‌افتد که مواد خارجی، ساختار باز حفرات که معمولا در سطح فوقانی قرار دارند را پر می‌کنند و در نتیجه امکان عبور جریان آب از میان روسازی‌های بتنی تراوا را محدود می‌نمایند. این مواد می‌توانند ذرات ریزی باشند که وارد حفرات بتن تراوا می‌شوند و یا بقایای گیاهان (مانند برگ، علف یا تکه‌های شاخه و پوست درختان) باشند که روی سطح یا درون حفرات بتن تراوا جمع می‌گردند. ذرات ریز ممکن است به صورت آبرفتی یا بادرفتی باشند و یا در نتیجه تردد وسایل نقلیه، روی سطح روسازی بتنی تراوا باقی بمانند و درون آن نفوذ کنند. بقایای گیاهان ناشی از درختان یا گیاهان مجاور روسازی بتنی تراوا هستند. ذرات ریز آبرفتی، توسط رواناب‌هایی آورده می‌شوند که از خارج از محدوده روسازی بتنی تراوا سرچشمه می‌گیرند و مواد را به سطح روسازی منتقل می‌کنند. پرشدگی روسازی بتنی تراوا که بروز مشکلات در بهره‌برداری آن را مستعد می‌سازد، به عنوان یکی از معایب اصلی همه سامانه‌های روسازی تراوا در نظر گرفته می‌شود. طراحی مناسب ساختگاه روسازی بتنی تراوا باید به‌گونه‌ای باشد که مانع از ورود ذرات ریز ناشی از بارش یا تردد وسایل نقلیه با چرخ آلوده به روسازی شود و پرشدگی را به حداقل برساند. به عنوان مثال، روسازی‌های بتنی تراوا باید در تراز ارتفاعی بالاتری از محوطه‌سازی مجاور قرار گیرند و شیب محوطه‌سازی خلاف جهت روسازی باشد. حجم ذرات ریز بادرفتی در بسیاری از مناطق معمولا ناچیز است، اما در مناطق خشک می‌تواند نگران‌کننده باشد. بقایای گیاهان به طور مرتب بر روی

سطح روسازی‌های بتنی تراوا جمع می‌شوند و از این رو، تمیزکردن دوره‌ای روسازی، برای از بین بردن آن‌ها الزامی است. عملیات ساختمانی در مجاورت روسازی بتنی تراوا نیز ممکن است باعث جمع شدن ذرات ریز بر روی سطح آن شود. بنابراین، عملیات ساخت و ساز باید به گونه‌ای ترتیب داده شود تا از به جا ماندن این ذرات بر روی روسازی جلوگیری شود.

در سال ۱۹۸۹ مطالعه‌ای میدانی روی عملکرد روسازی‌های بتنی تراوا با مدت زمان بهره‌برداری تا حداکثر ۱۳ سال در فلوریدا انجام شد (Wingerter و Paine، ۱۹۸۹). از این مطالعه نتیجه گرفته شد که روسازی‌های بتنی تراوایی که به درستی طراحی، ساخته و تعمیر و نگهداری شده باشند، پس از گذشت سال‌ها از بهره‌برداری، تنها دچار پرشدگی جزئی می‌شوند. در این مطالعه همچنین نرخ تراوایی حجمی برای روسازی‌های بتنی تراوایی که دچار پرشدگی شده بودند، اندازه‌گیری شد. نرخ تراوایی درونی روسازی بتنی دارای پرشدگی، با چمن مجاور برابر بود. مطالعه میدانی دیگری (Wanielista و همکاران، ۲۰۰۷) بر روی چند روسازی بتنی تراوای واقع در جنوب شرقی ایالات متحده نشان داد که روسازی‌هایی که بین ۱۰ تا ۱۵ سال قبل ساخته شده بودند، بدون نیاز به تعمیر و نگهداری، همچنان تقریبا بدون هیچ پرشدگی و مطابق طراحی‌ها در حال بهره‌برداری بودند. این مطالعه همچنین گزینه‌های مختلف برای ترمیم و پاکسازی (از جمله شستشو با آب پرفشار یا جاروبرقی پرقدرت) روسازی‌های تراوایی که دچار پرشدگی شده بودند را مورد بررسی قرار داد (Wanielista و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعه جدیدتری (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۱) برای بررسی مشکل پرشدگی در روسازی‌های بتنی تراوا با درصد حفرات (تخلخل) طراحی ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد و پرشدگی با سه نوع ذرات، شامل ماسه، رس لای‌دار، و مخلوط ماسه و رس لای‌دار انجام شد. برای میزان معمولی بارش، پرشدگی با رس لای‌دار ریزدانه تقریبا هیچ تاثیری بر جریان آب از میان آزمونه‌ها نداشت. نتایج مربوط به پرشدگی با ماسه و مخلوط ماسه و رس لای‌دار نشان داد که فقط در حالت کمترین تخلخل (۱۵ درصد) و عمدتا با مخلوط ماسه و رس لای‌دار مشکل‌ساز است. در بیشتر موارد، حتی پس از وقوع پرشدگی نیز نفوذپذیری کافی وجود داشت و برای اکثر روسازی‌های تراوا، جریان آب از میان بتن تراوا مشکلی در بهره‌برداری ایجاد نمی‌کرد. علاوه بر این، چند روش برای پاکسازی روسازی نیز مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از جاروبرقی پرقدرت بهترین روش برای پاکسازی روسازی دچار پرشدگی است. برای آن دسته از روسازی‌هایی که با مخلوط ماسه و رس لای‌دار پر شده بودند، شستشو با آب پرفشار در ترکیب با جاروبرقی پرقدرت، بهترین روش پاکسازی بود (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۱). تغییرات نرخ تراوایی سطحی روسازی در دوره بهره‌برداری را می‌توان با استفاده از ASTM C1701/C1701M بررسی کرد. انجام این پایش میدانی، از زمان شروع ساخت، نرخ مبنایی را برای تراوایی سطحی گزارش می‌کند و امکان ارزیابی سالیانه نواحی دچار پرشدگی روسازی و به‌روزآوری عملکرد تراوایی آن‌ها توسط یک برنامه تعمیر و نگهداری را فراهم می‌نماید.

برای عملکرد مناسب سامانه روسازی تراوا، ممکن است به تعمیر و نگهداری در فواصل زمانی منظم نیاز باشد. اگر روسازی، در محلی با شرایط محیطی سخت مانند مناطق ساحلی یا مناطق دیگری که باعث تجمع

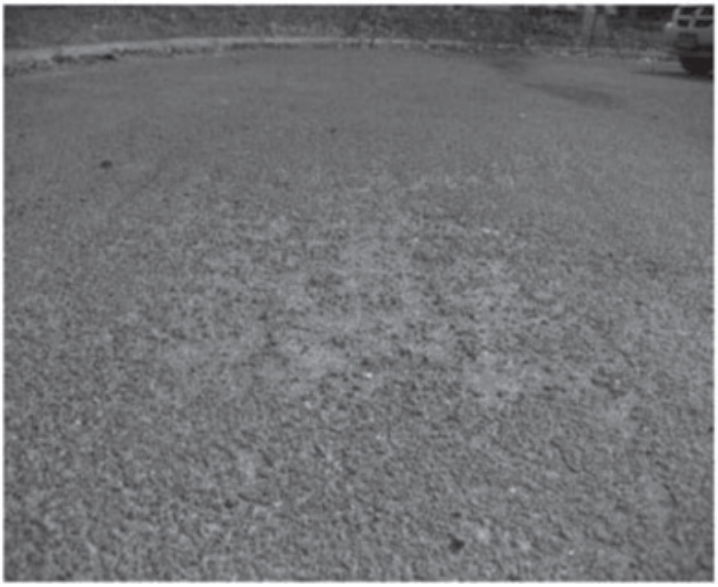
زیاد ذرات ریز شود، قرار داشته باشد، ممکن است لازم باشد تواتر این تعمیر و نگهداری پیشگیرانه بیشتر شود. یک متخصص واجد شرایط دارای گواهی معتبر باید روسازی را برای تعیین برنامه تعمیر و نگهداری مناسب، عملکرد صحیح و یا لزوم تمیزکردن آن، بررسی کند.

۱۰-۳- خرابی سازه‌ای

خرابی سازه‌ای روسازی‌های بتنی تراوا، اغلب به شکل‌های زیر رخ می‌دهد: ترک‌خوردگی یا نشست دال به دلیل از دست رفتن ظرفیت باربری خاک بستر. خرابی سازه‌ای می‌تواند از بارهای زیاد (بیش از ظرفیت سازه‌ای روسازی)، ضعف خاک بستر به دلیل اشباع‌شدن یا آب‌شستگی خاک بستر به دلیل جریان آب افقی از میان روسازی بتنی تراوا ناشی گردد. همچنین، فشار تماسی زیاد در سطح روسازی بتنی تراوا، به خرابی سطحی و واچیدگی (شن‌زدگی) منجر می‌شود که معمولا بر ظرفیت سازه‌ای روسازی تاثیر نمی‌گذارد.

۱۰-٤- خرابی سطحی

شایع‌ترین خرابی سطحی روسازی بتنی تراوا، واچیدگی (شن‌زدگی) است. واچیدگی اغلب به دلیل مسائل مربوط به ساخت، از جمله طرح مخلوط ضعیف یا نامناسب، تراکم نامناسب و عمل‌آوری ناکافی رخ می‌دهد. عمل‌آوری برای بتن تراوا اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تخلخل زیاد و نسبت کم آب به مواد سیمانی، باعث از دست رفتن سریع رطوبت بتن تازه در اثر تبخیر می‌شود. برای استفاده گسترده از بتن تراوا در کاربردهای جاده‌ای و با ظهور محصولات و روش‌های جدید، مطالعات بیشتری در مورد روش‌های عمل‌آوری موردنیاز خواهد بود (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹b). نتایج یک مطالعه میدانی در مورد عملکرد روسازی‌های بتنی تراوا در فلوریدا (Wingerter و Paine، ۱۹۸۹) نشان داد که واچیدگی سطحی در این روسازی‌ها، از نسبت نامناسب آب به مواد سیمانی، تراکم نامناسب یا روش‌های عمل‌آوری نامناسب ناشی شده بودند. این محققان گزارش دادند که پروژه‌های روسازی بتنی تراوای بررسی شده، هیچ نشانه‌ای از خرابی سازه‌ای نداشتند. در بیشتر موارد، با برداشتن لایه رویی مصالح سست سطحی، واچیدگی متوقف شد. ASTM C1747/C1747M، یک آزمایش سایش برای ارزیابی مقاومت مخلوط بتن تراوا در برابر خرابی سطحی را ارائه می‌دهد. شکل ۱۰-۴، پدیده واچیدگی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده خرابی سازه‌ای روسازی نیست. Kevern و Sparks (۲۰۱۳) در مورد چند روش برای ترمیم واچیدگی سطحی بحث کرده‌اند. استفاده از مواد سخت‌کننده که روی سطح پاشیده می‌شوند و کاربرد آن‌ها معمولا برای کف‌های داخلی صیقل داده شده است، واچیدگی بتن تراوای با عمل‌آوری ضعیف را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در موارد واچیدگی سطحی شدید، استفاده از یک روکش نازک متخلخل محافظ یا تراشیدن سطح بتن تراوا از جمله روش‌های موثر برای کاهش واچیدگی است (Kevern و Sparks، ۲۰۱۳؛ Kevern و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۱۰-۴- واچیدگی سطحی بتن تراوا

۱۰-۵- مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن

ساختار حفره‌دار بتن تراوا، با هوای عمدی ایجاد شده در بتن متعارف حاوی سیمان پرتلند متفاوت است. در روسازی‌های بتنی تراوایی که به درستی طراحی و اجرا شده باشند، آب به لایه زهکشی زیرین و خاک نفوذ می‌کند و در ساختار حفرات باقی نمی‌ماند. با این حال، زمانی که بتن تراوا کاملا اشباع باشد و در معرض یخ‌زدن قرار گیرد، آب جایی برای زهکش شدن ندارد. این موضوع می‌تواند به اعمال تنش‌های بیش از حد روی پوشش نازک خمیر سیمان سنگدانه‌ها و آسیب دیدن بتن تراوا منجر شود. برخی از بتن‌های تراوای کاملا اشباع و بدون هوای عمدی، هنگامی که در آزمایشگاه مطابق با روش ASTM C666/C666M آزمایش شدند، مقاومت ضعیفی در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن از خود نشان دادند (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۵b). به منظور محافظت از پوشش خمیر، می‌توان در مخلوط‌های بتن تراوا از افزودنی‌های هوازا استفاده کرد، اما با روش‌های آزمایش استاندارد فعلی نمی‌توان کیفیت هوازایی را تایید و یا مقدار آن را اندازه‌گیری کرد (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸b و ۲۰۰۹e). مرکز ملی فناوری روسازی بتنی (Schaefer و همکاران، ۲۰۰۶)، چند طرح مخلوط مختلف را برای بررسی مقاومت آن‌ها در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن آزمایش کردند. آن‌ها دریافتند که آزمونه‌های اشباع ساخته شده با یک طرح مخلوط معین، هنگام قرار گرفتن در معرض ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن مطابق با روش (الف) ASTM C666/C666M، تنها ۲ درصد کاهش جرم داشتند. این مخلوط، شامل سنگدانه درشت رده ۴ [۱۰۵]، ۷ درصد ماسه، ۳۳۸ kg/m^3 سیمان، و نسبت آب به مواد سیمانی آن برابر ۰/۲۷ بود. در این مخلوط، از ماده افزودنی هوازا و فوق کاهنده آب استفاده شد. درصد حفرات آزمونه‌های ساخته شده با این طرح مخلوط برابر ۱۸/۳ درصد بود. نتایج نشان داد که اضافه کردن چسباننده لاتکس به مخلوط، باعث افزایش مقاومت آزمونه‌ها در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن می‌شود، اما تاثیر آن به اندازه افزودن مقدار کمی ماسه به

---

[۱۰۵] شن تک‌اندازه (۳۸ - ۱۹) میلی‌متر مطابق با ASTM C33 یا استاندارد ۳۰۲ ایران

مخلوط بتن نیست. بتن تراوایی که تا حدی اشباع شده باشد، احتمالا مقدار حفرات کافی برای حرکت آب و همچنین مقاومت خوبی در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن خواهد داشت.

روش (الف) ASTM C666/C666M برای آزمایش آزمونه‌های بتنی اشباع‌شده استفاده می‌شود. این روش آزمایش با اشباع کامل، عملکرد روسازی تراوا در شرایط واقعی را شبیه‌سازی نمی‌کند، زیرا در روسازی‌هایی که در محیط‌های مستعد یخ‌زدن و آب‌شدن، به طور صحیح ساخته شده باشند، سازوکاری برای خروج آب از روسازی در نظر گرفته می‌شود. با این حال، در شرایط واقعی، درصد اشباع آزمونه‌های دارای پرشدگی می‌تواند باعث اشباع بحرانی روسازی شود و احتمال خرابی آن در اثر یخ‌زدن و آب‌شدن را تشدید نماید (Guthrie و همکاران، ۲۰۱۰). در حال حاضر، هیچ روش استانداردی برای ارزیابی مقاومت بتن تراوا در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن وجود ندارد و بهترین روش برای سنجش دوام مناسب بتن تراوا، ارزیابی توانایی آن در زهکشی هر آبی است که در شرایط آب و هوایی مورد انتظار محل وارد ساختار آن می‌شود. برای بهبود مقاومت بتن تراوا در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن، اقدامات پیشگیرانه ذیل توصیه می‌گردد. اجرای کلیه این اقدامات پیشگیرانه در همه شرایط ضروری نیست. این اقدامات به ترتیب اولویت ذکر شده‌اند:

الف) استفاده از یک لایه اساس سنگدانه‌ای تمیز به ضخامت ۲۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در زیر بتن تراوا

ب) تلاش برای محافظت از خمیر سیمان با استفاده از افزودنی‌های هوازا در مخلوط بتن تراوا. نتایج آزمایش‌های محدود و اولیه آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقاومت بتن تراوای کاملا اشباع و دارای هوای عمدی در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن، هنگام آزمایش مطابق با شرایط ASTM C666/C666M به طور قابل توجهی بهتر بود. نتایج سایر مطالعات نشان می‌دهد که آزمایش RapidAir [۱۰۶]، روشی موثر برای تعیین مشخصات ساختار حفرات عمدی هوا در بتن تراوا است (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸b). هوازایی باعث افزایش حجم خمیر و بهبود کارایی و دوام بتن تراوا می‌شود و از این رو، استفاده از آن در مخلوط‌های بتن تراوا توصیه می‌گردد (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۱).

پ) اگر ضخامت لایه اساس سنگدانه‌ای، برای زهکشی تمام آب از میان روسازی کافی نباشد، باید یک لوله پلی وینیل کلرید (PVC) سوراخ‌دار به طور افقی در لایه اساس سنگدانه‌ای قرار داد و آن را به خروجی زهکش وصل نمود. لوله زهکشی باید در ترازی قرار گیرد که از اشباع‌شدن روسازی بتنی تراوا با آب جلوگیری کند.

ت) اضافه کردن مقدار کمی ماسه به مخلوط بتن را می‌توان به عنوان راه‌حلی در نظر داشت. نتایج مطالعات، گزارش‌های منتشرشده قبلی مبنی بر لزوم وجود ماسه در مخلوط بتن تراوا، برای مقاومت آن در برابر یخبندان در شرایط اشباع یا تاحدودی اشباع، صرف‌نظر از کاربرد افزودنی هوازا را تایید کرده‌اند (Mata، ۲۰۰۸؛ Kevern و همکاران، ۲۰۰۸a).

دوام بتن تراوا در شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن به خوبی مستند شده است، بدون اینکه هیچ‌گونه خرابی در میدان به طور خاص به دلیل چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن مشاهده شده باشد (Delatte و همکاران، ۲۰۰۷).

---

[۱۰۶] روشی غیرمخرب که با تزریق هوای تحت فشار به نمونه بتنی انجام می‌شود. با اندازه‌گیری فشار موردنیاز برای حفظ یک نرخ معین جریان هوا، اطلاعاتی در مورد اندازه، فاصله و مساحت سطح ویژه حفرات هوای ایجادشده در داخل بتن بدست می‌آید.

با این وجود، در حال حاضر تجربیات میدانی نشان می‌دهند که استفاده از مواد یخ‌زدا بلافاصله پس از بتن‌ریزی و همچنین استفاده زیاد و طولانی مدت از مواد یخ‌زدا، باعث خرابی شدید روسازی بتن تراوا می‌شود.

پروژه‌های زیادی از بتن تراوا در جورجیا، پنسیلوانیا، تنسی، کارولینای شمالی و نیومکزیکو وجود دارند که در معرض شرایط مختلف یخ‌زدن و آب‌شدن هستند و با این حال عملکرد بسیار خوبی داشته‌اند (NRMCA، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷). Bass (۲۰۰۶) از افراد متخصص در سراسر ایالات متحده نظرسنجی کرد و از آن‌ها خواست تا مشاهدات خود را در مورد مقاومت بتن تراوا در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن شرح دهند. پاسخ‌دهندگان در اوهایو، مینه‌سوتا، کنتاکی شمالی، تنسی، ایندیانا و کالیفرنیا هیچ‌گونه آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن در روسازی بتنی تراوا گزارش نکردند. روسازی بتنی تراوا در مناطق پربرف کلرادو، یوتا، ورمانت، نیوهمپشایر، نوادا، مونتانا و آریزونای شمالی نیز هیچ نشانه‌ای از خرابی ناشی از چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن نداشته‌اند. همین مورد را می‌توان در مورد استان‌های ساحلی شرق کانادا نیز بیان کرد، جایی که تعداد زیادی روسازی بتنی تراوا اجرا شده است و در مشخصات بتن متعارف، اغلب استفاده از افزودنی‌های هوازا توصیه می‌شود. عملکرد میدانی تقریبا ۲۴ پروژه بتن تراوا که در ایالت‌های اوهایو، کنتاکی، ایندیانا، کلرادو و پنسیلوانیا قرار دارند، بررسی شد. به طور کلی، روسازی‌های ارزیابی‌شده در محیط‌های مستعد یخ‌زدن و آب‌شدن عملکرد خوبی داشته و نیاز به تعمیر و نگهداری کمی دارند[۱۰۷]. با این حال، این پروژه‌ها نسبتا جدید هستند، بنابراین نیاز است که عملکرد میدانی آن‌ها در آینده مجددا پایش شود (Delatte و همکاران، ۲۰۰۷). از گذشته، استفاده از بتن تراوا در محیط‌های مستعد یخ‌زدن و آب‌شدن که سطح آب زیرزمینی در فاصله کمتر از یک متر از تراز سطح بستر قرار داشته باشد، توصیه نمی‌شود.

۱۰-۶- مقاومت در برابر یخ‌زداها

در مناطق سردسیر، برای بهبود مقاومت لغزشی روسازی‌های متعارف، روی سطح روسازی، اغلب از مواد یخ‌زدا استفاده می‌شود. بر اساس تجربیات میدانی گسترده، به خوبی اثبات شده است که کاربرد مواد یخ‌زدا به بتن تراوا آسیب می‌رساند.

آب در درون بتن تراوا یخ می‌زند، اما می‌تواند روی سطح (به صورت یخ یا برف آب شده) وجود داشته باشد. اگر در این آب، مواد یخ‌زدا وجود داشته باشد و آب مجددا یخ بزند، می‌تواند به سطح روسازی بتنی تراوا آسیب برساند که معمولا به صورت واچیدگی ظاهر می‌شود. یکی از راه‌های جلوگیری از این وضعیت، تمیزکردن منظم سطح است که خطر وجود آب ساکن حاوی مواد یخ‌زدایی که یخ بزند را کاهش می‌دهد.

---

[۱۰۷] علت اصلی این دوام، عدم ماندگاری آب به دلیل زهکشی مناسب است. در صورتی که به دلیل طراحی نادرست یا عدم نگهداری صحیح و وجود پرشدگی، آب در بتن تراوا باقی بماند، دوام در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن پی در پی کاهش می‌یابد.

۱۰-۷- تعمیر روسازی‌های بتنی تراوا

۱۰-۷-۱- خراشیدن یا تراشیدن (خراش و تراش)

نقاط برجسته سطح روسازی را می‌توان توسط تراش‌دهنده پرقدرت تراشید. با این حال، استفاده از وسیله تراش باعث برش و نمایان‌شدن سنگدانه در نقاط تراشیده شده می‌شود و نمای ظاهری روسازی را تغییر می‌دهد. اگر در اثر عمل‌آوری ناکافی، سطح بتن تراوا دچار واچیدگی بیش از حد شود، تراشیدن سطح ضعیف برای جدا کردن قسمت‌های سست و دستیابی به سطحی مناسب، گزینه‌ای برای ترمیم آن است (شکل ۱۰-۷-۱). قبل از این کار باید ابتدا با تحلیل عمق خرابی نمونه‌های مغزه‌گیری شده، میزان سست‌شدگی و عمق تراشیدن مشخص شود.

شکل ۱۰-۷-۱- خراشیدن سطح روسازی تراوا برای ترمیم واچیدگی سطحی

۱۰-۷-۲- روکش‌ها

زمانی که عمق سست‌شدگی از عمق مناسب برای تراشیدن فراتر رود، استفاده از روکشی نازک با ضخامت ۵۰ میلی‌متر ممکن است گزینه مناسب‌تری نسبت به برداشتن و جایگزینی کامل باشد (Kevin و Sparks، ۲۰۱۳). برای اجرای موفقیت‌آمیز روکش بتنی تراوا، باید ابتدا هرگونه مصالح سست که در زیر آن قرار دارد برداشته شود و علاوه بر این، ساختگاه باید قابلیت تطبیق با تغییر شیب ناشی از ضخامت اضافی روکش را داشته باشد. موضوع کلیدی برای اجرای موفق روکش تراوا، اطمینان از چسبندگی مناسب آن با مصالح زیرین است. مخلوط بتن روکش باید کارایی کافی داشته باشد تا امکان چسبیدن خمیر به مصالح قبلی را فراهم کند. بتن تراوای قبلی باید درست قبل از ریختن روکش، مرطوب شود تا به افزایش مقاومت پیوستگی (اتصالی) کمک کند.

۱۰-۷-۳- حفره‌ها یا فرورفتگی‌ها

حفره‌ها یا فرورفتگی‌های کوچک باید با مخلوطی از سنگدانه و اپوکسی و یا توسط خمیر سیمان اصلاح شده با لاتکس وصله‌کاری شوند. می‌توان سنگدانه‌ها را قبل از وصله‌کاری، به منظور مطابقت با ظاهر سطح روسازی، با خمیر سیمان پوشانید و عمل‌آوری کرد. حفره‌های بزرگ باید با بتن تراوایی با همان طرح مخلوط سطح اولیه وصله‌کاری شوند. احتمال این که هنگام وصله‌کاری، رنگ وصله با مصالح سطح اصلی مطابقت داشته باشد، بسیار کم است. برای اطمینان از پیوستگی مناسب بین سطوح قدیم و جدید، می‌توان از چسب‌های اپوکسی یا خمیر سیمان اصلاح شده با لاتکس استفاده نمود. برای پنهان کردن ناحیه وصله از رنگ‌های اکریلیک استفاده شده است که میزان موفقیت آن‌ها متفاوت بوده است. بخش های نازک و بدون پیوستگی مصالح وصله ممکن است تحت بارهای ترافیکی سالم باقی نمانند. در صورت تردید، توصیه می‌شود که تعمیر عمقی انجام شود.

۱۰-۷-٤- برش‌کاری‌های مرتبط با تاسیسات

در مواردی که قسمتی از بتن تراوا برش داده شود، باید تعمیر عمقی انجام گیرد. این تعمیر شامل برداشتن بخشی مربعی‌شکل به عرض یک خط بتن‌ریزی است، به گونه‌ای که سطح بتنی جدید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند یکپارچگی سازه‌ای خود را تحت بارگذاری حفظ کند.

۱۰-۸- تعمیر و نگهداری

روسازی‌های بتنی تراوا سامانه‌های طراحی شده بر اساس نفوذ بارش هستند. در حالی که نتایج مطالعات نشان داده است که حتی روسازی‌های بتنی تراوای دارای پرشدگی زیاد، همچنان بیشتر بارش‌ها را به طور موثر زهکشی می‌کنند، اما همه روسازی‌های تراوا در صورتی که تمیز نگه داشته شوند، بهترین عملکرد را دارند. در بهترین حالت، روسازی به گونه‌ای طراحی می‌شود که با جدا کردن رواناب مناطق محوطه‌سازی‌شده توسط آبراهه‌های کم‌عمق و نیز زهکشی قسمت‌های ناتراوای روسازی به سایر نقاط، میزان قرار گرفتن در معرض مواد رسوبی محدود گردد. در همه موارد، برداشتن زودهنگام بقایای گیاهان و سایر مواد رسوبی، موثرترین راه برای حفظ نفوذپذیری روسازی تراوا است. آب عبوری از میان روسازی، آلودگی‌های محلول و نامحلول را با غلظت‌های مختلف با خود حمل می‌کند. بیشتر این رسوبات روی سطح روسازی یا نزدیک آن ته‌نشین می‌شوند. قسمت عمده تعمیر و نگهداری روسازی‌های بتنی تراوا شامل برداشتن این رسوبات انباشته شده است. استفاده از پمپ باد مخصوص جمع کردن برگ‌ها در زمان انجام تعمیر و نگهداری منظم فضای سبز و یا جاروبرقی زدن منظم توسط شرکت‌های تعمیر و نگهداری روسازی توصیه می‌شود. اگر نرخ زهکشی اندازه‌گیری‌شده روسازی مطابق با ASTM C1701/C1701M، کمتر از حد قابل‌قبول باشد، تمیزکاری عمیق‌تری موردنیاز است. شستشو با آب پرفشار برای تمیزکردن بتن تراوا موثر است، اما باید دقت

شود که فشار آب به دقت کنترل گردد. در صورت مشاهده آسیب، باید فشار را کاهش داد یا افشانه[۱۰۸] را دورتر از سطح نگه داشت. آب‌فشان‌های پرفشاری[۱۰۹] که افشانه آن‌ها دارای سر چرخشی است به طور ویژه موثر هستند. برای تعیین فشار مناسب آب برای یک روسازی معین، باید بخش کوچکی از روسازی بتنی تراوا را با فشارهای متغیر شست. استفاده از جاروبرقی‌های پرقدرت، آلاینده‌ها و سایر رسوبات را با خارج کردن آن‌ها از حفرات روسازی پاک می‌کند. با این حال، موثرترین کار، ترکیب این دو روش و استفاده از جاروبرقی پرقدرت بعد از شستشو با آب پرفشار است. نمونه‌ای از برنامه تعمیر و نگهداری روسازی بتنی تراوا در جدول ۱۰-۸ ارائه شده است.

تحقیقات انجام شده توسط انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا (۱۹۹۰)، مقدار نفوذ آلاینده‌ها در روسازی بتنی تراوای پارکینگ‌های روباز را تعیین کرده است. به عنوان بخشی از این مطالعه، پنج پارکینگ مورد بررسی قرار گرفتند و میزان نفوذ آلاینده‌ها در آن‌ها بسیار کم بود. مشخص شد که پس از حداکثر ۸ سال از شروع بهره‌برداری، میزان نفوذ آلاینده‌ها در محدوده ۰/۱۶ تا ۳/۴ درصد از کل حجم حفرات را اشغال کرده بود و جاروکشی سطح، بیش از ۵۰ درصد از نفوذپذیری روسازی پرشده را بازیابی می‌کند.

جدول ۱۰-۸- اقدامات رایج تعمیر و نگهداری بتن تراوا

شرح فعالیت	تواتر
(الف) اطمینان از عدم وجود زباله‌های ریز روی سطح روسازی (ب) اطمینان از عدم وجود رسوبات روی سطح روسازی (پ) برداشتن بقایای گیاهی سست با استفاده از پمپ باد	ماهانه
(الف) کاشت گیاه در مناطق بدون پوشش بالادست (ب) جاروکشی سطح برای پاک‌کردن رسوبات (پ) از بین بردن منابع رسوبی از رسوب‌گیرها، گودال‌ها یا سازه‌های جریان بالادست	در زمان نیاز
(الف) بررسی سطح برای مشاهده هرگونه خرابی یا کنده‌شدگی	سالیانه

۱۰-۹- دوام و عملکرد میدانی روکش بتنی تراوا

در اکتبر سال ۲۰۰۸، در جاده کم‌تردد MnROAD که یک مسیر آزمایشی میدانی[۱۱۰] در منطقه سردسیر نزدیک Albertville ایالت مینه‌سوتا در ایالات متحده است، روی بتنی که ابتدا در جولای سال ۱۹۹۳ اجرا شده بود، یک روکش بتنی تراوا ساخته شد. ضخامت اسمی روکش بتنی تراوا ۱۰۰ mm بود و درزهای آن تقریبا در همان محل درزهای مورب بتن اصلی ایجاد شد (شکل ۱۰-۹). در طرح مخلوط اولیه روکش، استفاده از ماشین‌آلات به عنوان روش ریختن در نظر گرفته شده بود. اما، به دلیل تاخیرهای مربوط به شرایط جوی و عدم دسترسی به تجهیزات، به این منظور از شمشه غلتان برقی استفاده شد. روش‌های مورد استفاده در اجرا شامل شمشه غلتان، ایجاد درزها با برش مکانیکی و عمل‌آوری در زیر لایه نایلونی به مدت ۷ روز بود. ساخت این روکش باعث ایجاد برخی خرابی‌های سطحی به شکل ترک‌های مویی و پرشدگی با خمیر

سیمان در سطح شد. وضعیت روکش در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ بررسی شد. مشکل اصلی روکش، خرابی درزها بود. باتوجه به ترک‌خوردگی ناچیز روکش، اعتقاد بر این بود که خرابی درز، به دلیل روش ایجاد آن بوده است؛ ایجاد درزها با استفاده از اره به خرابی کمتری منجر می‌شد. خرابی درز هر سال افزایش می‌یافت که به احتمال زیاد به دلیل اثر استفاده از ماشین‌آلات برف‌روب است. خصوصیات مربوط به جریان آب به صورت سالیانه بررسی شده که بر اساس نتایج آن، در تمامی سال‌ها نرخ نفوذپذیری، زیاد و جریان آب، یکنواخت بوده است. عملکرد روکش تراوا در هنگام بارندگی نشان می‌دهد که به سرعت بارش را از سطح روسازی خارج می‌کند و آب به سمت کناره‌های روسازی حرکت می‌نماید، که نشان می‌دهد بتن تراوا روشی موفق برای کاهش پاشش آب جمع‌شده روی سطح روسازی در اثر تردد وسایل نقلیه و همچنین کاهش لغزندگی جاده به دلیل عدم وجود این آب بر روی روسازی و عدم وقوع پدیده آب‌پیمایی[۱۱۱] است (Schaefer و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این، آلودگی صوتی نیز برای روکش جاده کم‌تردد MnROAD اندازه‌گیری شده که نشان‌دهنده یک روسازی بسیار بی‌صدا است. در حالی که شدت آلودگی صوتی بتن متعارف، از حدود ۱۰۰ تا ۱۱۰ دسی‌بل متغیر است، مقادیر اندازه‌گیری شده در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ برای بتن تراوا، در محدوده ۹۶ تا ۹۸ دسی‌بل قرار داشت که این روکش تراوا را به یکی از بی‌صداترین روسازی‌های بتنی موجود تبدیل می‌کند.

شکل ۱۰-۹- ریختن روکش بتنی تراوا به منظور کاهش صدا و افزایش مقاومت لغزشی روسازی

فصل ۱۱

محدودیت‌ها، استعدادهای کاربردی و نیازهای تحقیقاتی

گسترده‌ترین کاربردهای بتن تراوا، روسازی و اصلاح سطح به منظور فراهم نمودن امکان زهکشی است. این موارد می‌توانند اشکال مختلفی همچون سطوح پارکینگ، جاده‌ها، انبارها، و محل عملیات جداسازی مایع از جامد مانند خارج کردن آب از کودهای کشاورزی داشته باشند. هریک از این کاربردها، محدودیت‌ها و دغدغه‌های خاص خود را دارند. انجام تحقیقات بیشتر به گسترش استفاده از بتن تراوا برای این اهداف و همچنین سایر کاربردها و نیز تایید عملکرد آن در محیط‌های مختلف کمک خواهد کرد.

برخی از زمینه‌های تحقیقاتی موردنیاز به شرح زیر هستند:

الف) تعیین مقاومت و محدودیت‌های آن

ب) تعیین مشخصات ساختار بتن تراوا

پ) یخ‌زدن و آب‌شدن و کاربرد در مناطق سردسیر

ت) دوغاب متخلخل و سایر گزینه‌های کاهش فشار منفذی

ث) مدیریت آب‌های سطحی

ج) قابلیت پالایش و تصفیه زیست‌محیطی

چ) خرابی و ترمیم سطح

ح) ایجاد و استانداردسازی روش‌های آزمایش بیشتر

خ) روش‌های آزمایش غیرمخرب برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد

د) اثر جزیره گرمایی در محیط شهری، کربناته شدن و سایر ویژگی‌های حرارتی

ذ) سایر کاربردهای نوآورانه

۱۱-۱- بتن تراوا در مناطق سردسیر

انجام تحقیقات بیشتر برای ارزیابی توانایی فناوری‌های شناخته‌شده در محافظت از بتن تراوا در مناطق سردسیر ارزشمند خواهد بود. اگرچه روسازی‌های بتنی تراوای زیادی در مناطق سردسیر اجرا شده‌اند، اما برای اینکه بتوان بتن تراوا را با اطمینان بیشتر و برای کاربردهای وسیع‌تر در مناطق سردسیر استفاده نمود، همچنان سوالاتی باقی مانده است. دو موضوع اصلی وجود دارند که باید بیشتر مورد توجه قرار گیرند: اولین مورد، تعیین تاثیر یخ‌زدن و آب‌شدن روی بتن در طیف وسیع‌تری از کاربردها است و دوم اینکه تاثیر احتمالی نمک‌های یخ‌زدا روی بتن تراوا با اطمینان بیشتری مشخص شود، به ویژه به این دلیل که ساختار باز و حفره‌دار این نوع بتن، در مقایسه با بتن متعارف، اجازه نفوذ سریع‌تر این نمک‌ها به داخل بتن را می‌دهد. اولین مشاهده مستقیم ثبت شده از رفتار بتن تراوا در هنگام یخ‌زدن، آزمایشی آزمایشگاهی بود که توسط آزمایشگاه تحقیقات و مهندسی مناطق سرد ارتش ایالات متحده[۱۱۲] انجام شد (Korhonen و Bayer، ۱۹۸۹). آزمونه‌های بتن تراوای بدون هوای عمدی و بدون تسلیح یا سایر روش‌های محافظت در برابر یخ‌زدگی، بارها تحت چرخه‌های یخ‌زدن و و آب‌شدن قرار گرفتند. در طول آزمایش، نمونه‌ها در فواصل [illegible] به یخ‌زدن خارج، و تحت نیروی فشاری قرار گرفتند تا میزان کاهش مقاومت فشاری

آن‌ها مورد آزمایش قرار گیرد. آزمونه‌هایی که در شرایط خشک یا مرطوب (خیس و سپس زهکشی شده) یخ‌زده بودند، پس از ۱۶۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن، افت مقاومت کمی را نشان دادند. نتایج یک آزمایش آزمایشگاهی بعدی (Yang و Jiang، ۲۰۰۳) نشان داد که پس از ۲۵ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن در هوا، مقاومت فشاری تک‌محوری پنج آزمونه، ۱۵ تا ۲۳ درصد کاهش یافت. در حالی که آزمونه‌های مشابهی که در محفظه‌های پر از آب یخ‌زده بودند، به تدریج دچار خرابی شدند. با این وجود، اطمینان از زهکشی سریع دال بتنی تراوا به بستری با زهکشی مناسب، یک اقدام پیشگیرانه حیاتی برای جلوگیری از اثرات یخ‌زدگی است. در مناطق سردسیر، معمولا در مخلوط بتن از افزودنی‌های هوازا استفاده می‌شود تا از آن در برابر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی محافظت کند (AASHTO، ۱۹۹۳). تجربیات به‌دست آمده عمدتا از ساخت ساختمان‌ها نشان می‌دهد که مشابه بتن متعارف، ایجاد هوای عمدی در بتن تراوا نیز مقاومت آن را در برابر آسیب ناشی از چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن بهبود می‌بخشد (انجمن بتن و محصولات بتنی فلوریدا، ۱۹۹۰؛ Monahan، ۱۹۸۱؛ Neithalath و همکاران، ۲۰۰۳). افزودنی‌های پلیمری مایع و لاتکس می‌توانند با بستن حفرات کوچک خمیر سیمان و جلوگیری از ورود آب به آن‌ها، به کاهش آسیب‌های یخ‌زدن و آب‌شدن کمک کنند. مواد سیمانی مکمل، الیاف مختلف و پلیمرهای مایع می‌توانند مقاومت بتن را افزایش دهند، جمع‌شدگی را محدود کنند و در نتیجه مقاومت بتن را در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن و مواد شیمیایی یخ‌زدا بهبود بخشند (Pindado و همکاران، ۱۹۹۹).

اگرچه نشان داده شده که ایجاد هوای عمدی برای مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن بتن تراوایی که در شرایط آزمایشگاهی ساخته می‌شود، مفید و ضروری است، اما هیچ آزمایش میدانی مشابهی روی مقاطع واقعی انجام نشده است (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸b، ۲۰۰۹e). مقدار هوای عمدی آزمونه‌های بتنی سخت شده با استفاده از تحلیل خودکار مرتبط با ASTM C457/C457M با موفقیت اندازه‌گیری شده است که با عملکرد یخ‌زدن و آب‌شدن بررسی شده در آزمایشگاه مطابقت دارد (Kevern و همکاران، ۲۰۰۸b). تحلیل هوای عمدی تازه ایجاد شده در شرایط میدانی با استفاده از روش‌های فشاری یا حجمی متعارف، مشکل‌ساز بوده است، در حالی که روش تحلیل‌گر هوای منفذی[۱۱۳] (AVA) امیدوارکننده به نظر می‌رسد. در هر حال، برای ارزیابی میدانی طیف وسیعی از مقادیر هوای عمدی و تعیین میزان کافی آن برای دوام مناسب در شرایط مختلف، به تحقیقات بیشتری نیاز است. بررسی دلیل فقدان یا کمبود مشاهده شده هوای عمدی در برخی از بتن‌ریزی‌های میدانی که در آزمایشگاه عملکرد خوبی را نشان داده بودند، ممکن است حتی از اهمیت بیشتری برخوردار باشد (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹e).

بررسی عملکرد میدانی روسازی‌های تراوا نشان داده است که استفاده زودهنگام نمک‌های یخ‌زدا بلافاصله پس از اجرا و نیز در شرایطی که استفاده شدید از این نمک‌ها بوده، موجب آسیب جدی این روسازی‌ها گردیده است.

---

[113] Air void analyzer

۱۱-۲- تعیین مشخصات ساختار بتن تراوا

ویژگی‌ها و عملکرد هر ماده متخلخلی به طور گسترده به ویژگی‌های ساختار حفرات آن مانند حجم کل حفرات، اندازه حفرات و توزیع آن‌ها، و همچنین اتصال و پیچ‌درپیچی ساختار حفرات بستگی دارد. از آنجا که بتن تراوا عمدتا برای مدیریت آب‌های سطحی استفاده می‌شود، ویژگی عملکردی که بیشتر مورد توجه مصرف‌کننده نهایی قرار دارد، نفوذپذیری آن است. تخلخل به عنوان مهم‌ترین ویژگی ساختار حفرات مواد متخلخل در نظر گرفته می‌شود، اما برای ارائه توصیف کاملی از عملکرد ماده، به تنهایی کافی نیست. تخلخل زیادتر لزوما به معنای نفوذپذیری بیشتر نیست، زیرا نفوذپذیری تابعی از مساحت سطح، اندازه و پیچ‌درپیچی حفرات است. استفاده از سنگدانه‌هایی با اندازه‌های مختلف در بتن تراوا به منظور ایجاد تخلخل یکسان، به نفوذپذیری‌های متفاوتی منجر شده است (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۶). درک صحیح ویژگی‌های ساختار حفرات و چگونگی تاثیر پارامترهای بتن تراوا و طرح مخلوط، به تحقیقات دقیق و کامل نیاز دارد. در مطالعات محدود با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری به بررسی تاثیر دانه‌بندی و مخلوط سنگدانه بر تخلخل، اندازه و اتصال حفرات بتن‌های تراوا پرداخته شده است (Neithalath، ۲۰۰۴؛ Neithalath و همکاران، ۲۰۰۶؛ Low و همکاران، ۲۰۰۸). به منظور ایجاد روشی برای طراحی مبتنی بر عملکرد بتن تراوا، تحقیقات زیادی جهت درک ساختار حفرات این ماده نیاز است. تخلخل درشت یا ماکروسکوپی بتن‌های تراوا، مشروط به تناسب تخلخل و اندازه حفرات، اغلب می‌تواند به کنترل ترک‌خوردگی بتن منجر شود. این موضوع، عملکرد سازه‌ای بتن تراوا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از همین رو، درک کامل عملکرد بتن تراوا و طرح مخلوط مبتنی بر طراحی مصالح تنها زمانی امکان‌پذیر است که مشخصات ساختار حفرات به خوبی شناخته شده باشد.

۱۱-۳- مقاومت و سایر اولویت‌ها و محدودیت‌های آزمایشی

روش‌های آزمایش فعلی رایج برای بتن متعارف، در بسیاری از موارد در مورد بتن تراوا قابل کاربرد نیستند. بنابراین لازم است روش‌های آزمایش جدید یا اصلاح‌شده‌ای ایجاد شوند که ویژگی‌های منحصر به فرد بتن تراوا را در نظر بگیرند. استانداردسازی یا ارجاع به این روش‌ها برای مقایسه اکثر خصوصیات و نیز برای معیارهای طراحی سامانه‌های بتنی تراوا ضروری است. رایج‌ترین آزمایش‌های کنترل کیفیت برای بتن متعارف شامل اسلامپ، وزن مخصوص، درصد هوای بتن تازه و مقاومت فشاری و خمشی است. از بین این آزمایش‌ها، تنها استاندارد ASTM C1688/C1688M برای چگالی و درصد حفرات بتن تراوای تازه موجود است. نیاز مبرمی برای اصلاح یا جایگزینی سایر آزمایش‌های متداول بتن متعارف به منظور کاربرد در بتن تراوا وجود دارد.

برای درک سازوکار مقاومت بتن تراوا و افزایش آن به تحقیقات بیشتری نیاز است. قابلیت بتن تراوا برای تحمل بارهای سنگین وسایل نقلیه (کامیون حمل بار معمولی یا عبور و مرور بزرگراه)، می‌تواند دامنه کاربرد آن را گسترش دهد. تحقیقاتی در مورد مقاومت فشاری و خمشی برخی از بتن‌های تراوا انجام شده است

(Yang و Jiang، ۲۰۰۳؛ Neithalath، ۲۰۰۴؛ Marolf و همکاران، ۲۰۰۴؛ Wimberly و همکاران، ۲۰۰۱؛ Crouch و همکاران، ۲۰۰۳؛ Zouaghi و همکاران، ۲۰۰۰). Delatte و همکاران (۲۰۰۷) ، تخلخل و مقاومت چندین مغزه گرفته شده از روسازی‌های بتنی تراوای در حال بهره‌برداری را اندازه‌گیری کردند. انواع و کاربردهای بسیار گوناگونی وجود دارند؛ با این حال، مقاومت بتن تراوا به تخلخل آن وابسته است (Neitha-lath، ۲۰۰۴؛ Marolf و همکاران، ۲۰۰۴؛ Mulligan، ۲۰۰۵؛ Montes و Haselbach، ۲۰۰۶؛ Kevern و همکاران، ۲۰۰۸a). ثابت نشده که ASTM C39/C39M روش موثری برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن تراوا است. میله زدن برای خارج کردن هوای غیرعمدی بتن تراوا مناسب نیست. ممکن است روش بتن‌ریزی میدانی باعث تغییر تخلخل بتن تراوا در جهت قائم شود که این موضوع می‌تواند بر مقاومت خمشی و سایر ویژگی‌های روسازی تاثیر بگذارد (Haselbach و Freeman، ۲۰۰۶). به منظور تایید امکان دستیابی به مقاومت ۲۸ روزه مناسب در اجرا و همچنین در مورد کاربردها و ویژگی‌های مقاومتی انواع مختلف بتن تراوا به تحقیقات بیشتری نیاز است.

اگرچه در ایالات متحده، بتن تراوا بیشتر برای مدیریت آب‌های سطحی استفاده می‌شود، اما در سایر نقاط جهان، علاقه به بتن تراوا بر کاربرد به عنوان قشر رویه متمرکز است. اروپا، ژاپن و استرالیا، استفاده از بتن تراوا در جاده‌ها را به منظور کاهش صدا (Neithalath، ۲۰۰۴) و نیز بهبود مقاومت لغزشی در هنگام بارندگی (Wang و همکاران، ۲۰۰۸) بررسی کرده‌اند. در این موارد، بتن تراوا یا روی بتن متعارف تازه ریخته می‌شود و یا به عنوان سطحی بر روی دال‌های بتنی پیش‌ساخته به کار می‌رود. بی‌صداترین روسازی جهان، قسمتی از جاده‌ای در هلند است که با مقاطع بتنی پیش‌ساخته و قشر رویه بتنی تراوا ساخته شده است. در مورد استفاده از بتن تراوا برای سطوح جاده‌هایی که بتن متعارف و ناتراوای زیرین، از نفوذ آب به زیراساس جلوگیری می‌کند، نگرانی وجود دارد، زیرا این موضوع می‌تواند باعث تضعیف زیراساس و در نتیجه از دست رفتن بحرانی باربری سازه‌ای در زیر روسازی‌های ناتراوا شود. اگرچه، بخش عمده این از دست رفتن مصالح زیراساس، به دلیل نیروهای هیدرواستاتیکی در این ناحیه تراوش آب است که در اثر بارهای نقطه‌ای چرخ وسایل نقلیه روی سطح به وجود می‌آیند و باعث اعمال فشار به خاک و شسته شدن آن می‌شوند. بدیهی است که بتن تراوا امکان تراوش آب به لایه زیراساس را فراهم می‌کند، زیرا این موضوع هدف اصلی طراحی آن است. با این حال، ممکن است همان نیروهای هیدرواستاتیکی مخرب در زیراساس ایجاد نشوند، چرا که آب می‌تواند به صورت قائم در ستون تراوا نیز حرکت کند. در مورد تاثیر آب بر مقاومت و خاک زیرین در سایر کاربردهای بتن تراوا، مانند سطح جاده‌ها، به تحقیقات بیشتری نیاز است.

آزمایش‌های میدانی کنترل و تضمین کیفیت بتن تراوا باید تدوین شوند. روش‌هایی برای آزمایش کارایی یا روانی بتن تراوا مانند آزمایش اسلامپ برای بتن معمولی، به همراه آزمایش‌های مقاومت فشاری و درصد هوای عمدی، از ابزارهای ضروری کنترل کیفیت توسط تولیدکننده بتن به شمار می‌روند. همچنین، وجود آزمایش‌هایی برای سنجش مقاومت فشاری و هوای عمدی، برای اطمینان مالک از مقاومت و دوام روسازی‌های بتنی تراوا، بسیار ضروری است. در حال حاضر، استاندارد ASTM C1688/C1688M برای

تعیین چگالی بتن تازه وجود دارد که می‌توان آن را با یکنواختی تولید بتن مرتبط دانست. اگرچه در مشخصات بتن، وزن مخصوص اغلب تعیین می‌شود، اما هیچ رابطه استانداردی بین چگالی بتن تازه و سخت شده وجود ندارد. علاوه بر این، صنعت بتن تراوا هنوز درک مناسبی از تغییرات موردانتظار و مجاز چگالی بتن سخت‌شده در محل اجرا ندارد. همچنین، لازم است که روش‌های آزمایشی جدیدی برای بکارگیری در بتن تراوا ایجاد شوند که هیچ شباهتی به روش‌های متعارف مورد استفاده در صنعت بتن ندارند. علاوه بر این، ایجاد روش‌های آزمایشی برای سنجش حذف آلاینده‌ها، برای طراحی و استفاده از مزایای بالقوه بتن تراوا در بهبود کیفیت آب مفید خواهد بود.

۱۱-٤- آزمایش‌های غیرمخرب تعیین عملکرد و ویژگی‌های بتن تراوا

یکی از موانع مهم کاربرد گسترده بتن تراوا، نبود روش‌های آزمایش برای ارزیابی یا پیش‌بینی عملکرد آن در محل اجرا و بهره‌برداری است. به دلیل ساختار باز و متخلخل بتن تراوا، روش‌های معمول تخمین عملکرد بتن متعارف، در آن قابل استفاده نیستند. اخیرا، تعدادی روش آزمایش نوین برای ارزیابی غیرمخرب ویژگی‌های بتن تراوا مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به سهولت اشباع کردن آزمونه بتنی تراوا با الکترولیت دارای رسانایی الکتریکی معین، بنابراین برای تخمین عملکرد بتن تراوا، تاکید بر استفاده از روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های الکتریکی بوده است. برای تخمین دقیق نفوذپذیری بتن تراوا، استفاده از پارامتر اصلاح شده‌ای که می‌توان آن را از رسانایی الکتریکی به دست آورد، مورد استفاده قرار گرفته است (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین، روش‌های مشابهی برای پیش‌بینی رفتار بتن تراوا در جذب صدا ایجاد شده است. Delatte و همکاران (۲۰۰۷)، برای بررسی روسازی‌های بتنی تراوای در حال بهره‌برداری و همچنین مغزه‌های گرفته شده، از روش سرعت پالس فراصوت یا اولتراسونیک[۱۱۴] (UPV)استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که سرعت پالس فراصوت، همبستگی مناسبی با ویژگی‌های مهندسی بتن تراوا، مانند مقاومت و تخلخل دارد.

۱۱-۵- مدیریت بارش

۱۱-۵-۱- کنترل حجم

مدیریت بارش دارای دو جنبه مهم است: کنترل رواناب و کنترل کیفیت آب. در مورد نرخ تراوایی سطحی، هدایت هیدرولیکی و ضریب منطقی رواناب بتن تراوا چندین مطالعه اولیه انجام شده است (Wan-ielista و همکاران، ۲۰۰۷؛ Montes و Haselbach، ۲۰۰۶؛ Wimberly و همکاران، ۲۰۰۱؛ Valavala و همکاران، ۲۰۰۶). برای بررسی موضوع نفوذ آب از میان سطوح بتنی تراوای شیب‌دار و تغییر نرخ تراوایی با گذشت زمان و در اثر سایر عوامل محیطی، به تحقیقات بیشتری نیاز است.

---

[114] Ultrasonic pulse velocity

۱۱-۵-۲- کنترل کیفیت

مسائل مربوط به کیفیت آب در آبخیزها اهمیت روزافزونی یافته‌اند. بخش زیادی از مواد شسته‌شده که به نهرها، رودخانه‌ها و در نهایت به آب‌های زیرزمینی وارد شده‌اند، از رواناب سطحی حاوی مواد بکاررفته روی سطح زمین ناشی می‌شوند. این آلاینده‌ها می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- کود و عناصر گیاهی اضافی
- آفت‌کش‌ها
- نمک‌های یخ‌زدای جاده یا سایر مواد عمدی به‌کار رفته روی سطح
- نشتی بنزین و فرآورده‌های نفتی ناشی از روغن‌ریزی وسایل نقلیه
- خرده لاستیک‌های سایش‌یافته یا سایر مواردی همچون زباله‌های کوچک، فضولات حیوانی و گرد و غبار

برخی از موارد، توسط رواناب به سرعت جذب یا حل شده و حمل می‌شوند، در حالی که ممکن است این موضوع در مورد برخی دیگر مانند گریس‌های نامحلول و روغن‌های دیرتبخیر صدق نکند.

منبع دیگر رواناب حاوی آلاینده‌ها، عدم کنترل یا کنترل ناکارآمد رواناب بر روی زمین بدون پوشش است که اغلب از کارگاه پروژه‌های در دست احداث ناشی می‌شوند. عدم کنترل موثر فرسایش، به افزایش قابل‌توجه رسوب در برخی مناطق منجر شده است. با کنترل رواناب سطحی اضافی از طریق استفاده از سامانه روسازی بتنی تراوایی که به طور مناسب طراحی شده باشد، می‌توان سرعت اوج جریان رودخانه را کاهش داد. به این ترتیب، فرسایش بستر رودخانه و در نتیجه میزان رسوبات حمل شده توسط جریان رودخانه کاهش می‌یابد. حمل شدن مقادیر زیادی از عناصر شیمیایی (ترکیبات حاوی نیتروژن و فسفر زیاد) به آبخیز توسط رواناب پیامدهای زیادی دارد. رشد گیاهان، به ویژه زیست‌توده‌های میکروبی مانند فیتوپلانکتون و رشد جلبک‌ها در آب افزایش می‌یابد. اگرچه گیاهان در زمان زنده بودن، اکسیژن تولید می‌کنند، اما پس از آن تجزیه شده و از اکسیژن موجود محلول استفاده می‌کنند و نیاز بیوشیمیایی به اکسیژن[۱۱۵] (BOD) را افزایش می‌دهند. ایجاد یا افزایش تنش BOD می‌تواند در شرایط حاد، به وقایعی مانند از بین رفتن ماهی‌ها منجر گردد. رشد گیاه در سامانه‌های بتن تراوا به دلیل کمبود نور خورشید، حداقل است. در بسیاری از موارد، اما نه در همه آن‌ها، غلظت آلاینده‌ها در رواناب اولیه بارش، از رواناب‌های بعدی بیشتر خواهد بود. باران اولیه تا حدی سطح را شستشو می‌دهد. قسمتی از رواناب که غلظت بیشتری از آلاینده‌ها را به همراه دارد، «شستشوی اولیه[۱۱۶]» نامیده می‌شود و به این موضوع اشاره دارد که تقریبا ۹۰ درصد از آلاینده‌ها، در اولین ۲۵ میلی‌متر بارش‌های سنگین، شسته، و با جریان آب حمل می‌شوند (Leming و همکاران، ۲۰۰۷). در مناطق خشک که فواصل زمانی زیادی بین بارندگی‌ها وجود دارد، ممکن است پدیده «شستشوی اولیه فصلی» نیز رخ دهد. یکی از اهداف رایج کنترل رواناب، مهار پدیده شستشوی اولیه است. این موضوع به ویژه در حوزه‌های آبریز کوچک صادق است.

---

[۱۱۵] Biochemical oxygen demand : میزان اکسیژن لازم برای متلاشی کردن مواد آلی موجود در فضولات (به ویژه در آب).

[116] First flush

در برخی از موارد زیر ممکن است پدیده شستشوی اولیه رخ ندهد:

الف) در حوزه‌های آبریز بزرگ، شستشوی اولیه به ندرت رخ می‌دهد، زیرا جریانی مداوم از شستشوی اولیه مناطق دورتر از آن، به مرور زمان به حوزه آبگیر می‌رسند.

ب) اگر آلاینده‌ها به راحتی شسته یا حل نشوند، ممکن است شستشوی اولیه اتفاق نیفتد.

پ) در صورتی که منبع ایجاد آلاینده‌ها مداوم باشد (به عنوان مثال، رسوب ناشی از زمین بدون پوشش و به راحتی فرسایش‌پذیر)، ممکن است تشخیص تفاوت غلظت آلاینده‌ها در طول زمان دشوار باشد.

برای انتخاب یا تایید طراحی‌ها و ویژگی‌های کنترلی، به دلیل کمبود داده‌های میدانی کافی، اغلب از قوانین سرانگشتی نسبتا ساده در ترکیب با اطلاعات مربوط به تغییرات یا اثرات فصلی و بارندگی‌های پیشین استفاده شده است. به عنوان یک قانون سرانگشتی اولیه، برای مکان‌های کوچکی مانند پارکینگ‌ها، شستشوی اولیه در نیم تا ۱ ساعت اول بارش رخ می‌دهد. هنگامی که از بتن تراوا استفاده می‌شود، به طور کلی حداقل یک ساعت اول بارندگی را مهار خواهد کرد. بنابراین، این فرض منطقی است که حداقل آن بخشی از رواناب که دارای بیشترین غلظت آلاینده‌ها است، توسط روسازی تراوا مهار شود. روسازی‌های بتنی تراوا، شستشوی اولیه را به درون حفرات بتن هدایت می‌کنند و باران اضافی، آلاینده‌های بیشتری را بدون بازگشت به جریان رواناب، به داخل سامانه منتقل می‌کند. سپس اثر طبیعی تمیزکنندگی خاک ممکن است رواناب را بیشتر تصفیه کند. انتخاب نوع خاصی از تجهیزات و ویژگی‌ها برای کاهش آلاینده‌ها، به کاربری ساختگاه، نوع و مقدار آلاینده‌های پیش‌بینی شده، حجم تخمینی رواناب و ویژگی‌های ساختگاه بستگی دارد. در حالی که مهار شستشوی اولیه در یک منطقه اغلب مطلوب است، اما دفع آن می‌تواند از نظر فنی چالش‌برانگیز و پرهزینه باشد.

برای تایید یا اثبات بسیاری از مشاهدات و فرضیات مربوط به آلاینده‌های حبس شده توسط روسازی‌های بتنی تراوا به تحقیقات بیشتری نیاز است (Rushton، ۲۰۰۰). تعدادی از فرضیات مرتبط با کیفیت آب که به تایید نیاز دارند، عبارتند از:

الف) گریس‌ها و روغن‌های دیرتبخیر مانند روغن ریخته‌شده از وسایل نقلیه که معمولا در پارکینگ‌ها دیده می‌شوند، احتمالا به سطح یا درون حفرات بتن تراوا جذب یا توسط اجتماعات میکروبی سامانه تجزیه می‌گردند (Pratt و همکاران، ۲۰۰۲) و به آب‌های زیرزمینی یا سطحی منتقل نخواهند شد. در مطالعات اخیر، بازدهی بتن‌های تراوا برای حبس روغن‌های ریخته‌شده از وسایل‌نقلیه بررسی شده است (Bhayani و همکاران، ۲۰۰۷؛ Deo و همکاران، ۲۰۰۸). در این مطالعات، طرح مخلوط بتن‌های تراوا با درصد حفرات ۱۳ تا ۲۵ درصد و با استفاده از دو نوع سنگدانه دارای اندازه‌های مختلف انجام شده است. مقدار حبس و بازیابی روغن از طریق آزمایش روی قطعات ۵۰ میلی‌متری آزمونه‌های بتن تراوا و با استفاده از روش وزنی قطعات[۱۱۷] تعیین شد. به منظور ایجاد چارچوب مدل‌سازی حبس روغن در بتن تراوا، از یک مدل ایده‌آل چشمه منفذ استفاده شد.

---

[117] Partition gravimetric method

پارامترهای مصالح و همچنین ویژگی‌های ورودی که به احتمال زیاد بر حبس و بازیابی روغن تاثیرگذار هستند، شناسایی شدند. برای پیش‌بینی حبس روغن در آزمونه‌های بتن تراوا، از یک مدل مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیکی استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که این روش مدل‌سازی، تخمین‌های خوبی از میزان حبس روغن ارائه می‌دهد.

ب) آبی که مواد جامد و عناصر کودی محلول را از بتن تراوا به خاک منتقل می‌کند، تحت فرآیند تصفیه و پالایش طبیعی قرار می‌گیرد. به گونه‌ای که آبی که به سفره آب زیرزمینی می‌رسد، از نظر کیفیت تقریبا مشابه رواناب حاصل از بارش مستقیم باران به زمین خواهد بود.

پ) حداکثر زمان تخلیه آب از سامانه بتن تراوا باید بین ۳ تا ۵ روز باشد که این مقدار با طراحی مخازن کنترل سیلاب مطابقت دارد و ممکن است برای روسازی‌های بتنی تراوایی که روی خاک‌های رسی ساخته شده‌اند رخ دهد. از آنجا که نور خورشید به سطح زیرین بتن نمی‌رسد، رشد و به دنبال آن تجزیه زیست‌توده‌ها به دلیل غلظت زیاد عناصر کودی موجود در رواناب، ناچیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه بتن تراوا در دوره بهره‌برداری خود، به دفعات زیاد کاملا اشباع نمی‌شود، حفرات آن نسبتا کوچک هستند اما اندازه آن‌ها به گونه‌ای نیست که خاصیت موئینگی داشته باشند. به همین دلیل، هوای موجود در مقایسه با حجم کلی بتن، سطح تماس زیادی را در اختیار دارد و تجزیه مواد آلی قابل‌تجزیه‌زیستی در مقایسه با تجزیه رخ داده در سطح روسازی تفاوت چندانی ندارد.

بتن تراوا علاوه بر قابلیت صاف (فیلتر) کردن یا تصفیه آلاینده‌های ناشی از آب‌های سطحی (Tamai و همکاران، ۲۰۰۴)، به عنوان ماده‌ای برای صاف کردن یا تصفیه سایر آلاینده‌های زیست‌محیطی، به ویژه در صنایع کشاورزی و تصفیه فاضلاب مورد توجه است. از بتن تراوا پیش‌تر برای کف گلخانه‌ها استفاده شده است. همچنین، تمایل به استفاده از بتن تراوا به عنوان رویه سطحی به منظور خارج نمودن آب کود یا لجن نیز وجود دارد.

۱۱-۶- اثر جزیره گرمایی در محیط شهری، کربناته شدن و سایر ویژگی‌های حرارتی

سطوح تیره روسازی‌های متعارف، سهم زیادی در ایجاد پدیده جزیره گرمایی در محیط‌های شهری دارند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بتن تراوا که می‌تواند تاثیر آن بر پدیده جزیره گرمایی در محیط شهری را کاهش دهد، ماهیت متخلخل آن است. بسیاری از مواد متخلخل عایق هستند و بتن تراوا نیز می‌تواند برخی از این ویژگی‌ها را داشته باشد. با این وجود، بتن تراوا همچنین دارای حفرات به هم‌پیوسته‌ای است که می‌تواند بر همرفت گرما به درون یا خارج از سطح زمین تاثیر بگذارد. اینکه کدام فرآیند انتقال حرارت غالب است و تحت چه شرایطی رخ می‌دهد، مشخص نیست. در مقایسه با سایر روسازی‌های ناتراوا، تحقیقات کمی در مورد اثر استفاده از بتن تراوا بر جزایر گرمایی در محیط‌های شهری انجام شده است، بنابراین همچنان به اطلاعات بیشتری در این مورد نیاز است (Ferguson، ۲۰۰۵). جنبه‌های حرارتی بتن تراوا نیز می‌تواند به همین ترتیب برای تعیین سرعت تصفیه آلاینده‌ها و سایر فرآیندهای زیست‌محیطی مهم باشد.

استفاده از بتن تراوا ممکن است بر جنبه دیگری از تغییرات اقلیمی جهانی تاثیر بگذارد. تحقیقات و نگرانی‌های زیادی در مورد میزان دی اکسید کربن موجود در جو زمین وجود دارد. بسیاری از محققان، تحلیل‌های چرخه عمر انتشار دی اکسید کربن ناشی از بسیاری از مصالح ساختمانی را انجام داده‌اند. بتن، به دو روش در انتشار دی اکسید کربن نقش دارد: روش اول، به مصرف انرژی برای ساخت سیمان مربوط است، به ویژه اگر منبع این انرژی، تجدیدپذیر نباشد. روش دوم، به فرآیند شیمیایی تشکیل سیمان از مواد اولیه آن مربوط است که دی اکسید کربن را به عنوان محصول جانبی آزاد می‌کند. بنابراین، حتی اگر بتوان انتشار دی اکسید کربن ناشی از مصرف انرژی را حذف کرد، تولید بتن تراوا همچنان به تولید خالص دی اکسید کربن منجر می‌شود. دی اکسید کربن ممکن است به مرور زمان دوباره توسط سازه‌های بتنی جذب شود. این فرآیند که کربناته شدن نامیده می‌شود، شامل یک تغییر شیمیایی است و می‌تواند بخشی از دی اکسید کربن حاصل از فرآیند تولید سیمان را جذب و جبران کند. کربناته شدن در شرایط محیطی، معمولا کند است، اما زمانی که سطح زیادی از بتن متعارف در معرض هوا قرار داشته باشد، سرعت بیشتری می‌گیرد. مثالی از این فرآیند، زمانی است که بتن، خرد شده و برای استفاده در خاکریزها بازیافت می‌شود. سطح در معرض هوای بتن تراوا در مقایسه با سایر بتن‌ها، بسیار بزرگتر است و می‌تواند سرعت کربناته‌شدن زیادتری داشته باشد. برای درک بهتر تاثیر کلی استفاده از بتن تراوا بر میزان دی اکسید کربن موجود در جو، تحقیقات بیشتری در مورد سرعت این فرآیند موردنیاز است.

۱۱-۷- نیازهای مربوط به ساخت، بهره‌برداری، و تعمیر و نگهداری

۱۱-۷-۱- انتقال و انجام اصلاحات کارگاهی

در بتن متعارف، رویه رایج و بهترین روش این است که در کارگاه، آبی به مخلوط بتن تازه ساخته‌شده اضافه نشود. اما در بتن تراوا، دستیابی به کارایی مناسب برای رسیدن به درصد حفرات طراحی شده، به جای صرفا حفظ نسبت آب به سیمان معین، ارجحیت دارد. برای تعیین اینکه چه زمانی و چه مقدار آب را می‌توان در کارگاه به مخلوط بتن تراوا اضافه کرد و همچنین شناسایی زمانی که این افزایش‌ها شروع به تاثیر مضر بر بتن نهایی می‌کنند، به ارزیابی اصولی نیاز است.

۱۱-۷-۲- عملیات پرداخت و عمل‌آوری

بتن تراوا به طور سنتی، با استفاده از نوار موقت افزایش ارتفاع قالب، تا ترازی بالاتر از تراز نهایی ریخته می‌شد و قبل از متراکم شدن با شمشه سنگین، این نوار موقت برداشته می‌شد. مشاهده شده است که این مرحله اضافی، به سطح، زمان کافی برای خشک شدن می‌دهد و در بسیاری از موارد اجرا، به سطوحی با دوام کمتر از حد مطلوب منجر می‌شود. رایج‌ترین روش تراکم و پرداخت نهایی، چند بار عبور شمشه غلتان بر روی سطح بتن است. با این حال، از روش‌های جدید پرداخت، از جمله شمشه لیزری و سینی ماله پروانه‌ای نیز استفاده می‌شود. برای ارزیابی این روش‌های جدید و مقایسه آن‌ها با روش‌های متعارف،

تحقیقات بیشتری موردنیاز است. بسیاری از مقاطع قدیمی بتن تراوا در چند لایه اجرا شده‌اند. به دلیل سرعت اجرا و نگرانی در مورد پرشدگی درز بین لایه‌های بتن‌ریزی، تمایل صنعت ساخت به اجرای بتن تراوا در یک لایه تغییر کرده است. با این حال، به خوبی مشخص شده است که تراکم بتن در هنگام بتن‌ریزی در عمق‌های مختلف، متفاوت است و در برخی از روسازی‌ها، قسمت‌های زیرین تراکم بسیار کمی دارند (Haselbach و Freeman، ۲۰۰۶). برای بررسی مجدد ضخامت مناسب لایه برای روش‌های مختلف تراکم و همچنین نیاز احتمالی به اجرای بتن تراوا در چند لایه در موارد خاص، احتیاج به تحقیقات بیشتری است.

یکی از تغییرات در مخلوط و روش‌های اجرای بتن تراوا، استفاده از روش‌های عمل‌آوری درونی برای کاهش نیاز به عمل‌آوری با لایه نایلونی است. هنگامی که از پلیمرهای فوق‌جاذب (SAPS) یا سبکدانه‌های پیش مرطوب شده در مخلوط بتن تراوا استفاده می‌شود، می‌توان استفاده از عمل‌آوری با لایه نایلونی را کاهش داد (Kevern و Farney، ۲۰۱۲). همچنین، روش‌های دیگری مانند اعمال سخت‌کننده‌های سطحی روی بتن تراوای تازه و سخت‌شده، به عنوان روش‌هایی کارآمد برای حذف عمل‌آوری با لایه نایلونی بدون کاهش دوام سطح، نشان داده شده‌اند (Kevern و Sparks، ۲۰۱۳). هنگامی که برای اولین بار از روش‌های عمل‌آوری به غیر از لایه نایلونی در یک محل استفاده می‌شود، بتن‌ریزی‌های آزمایشی برای اطمینان از عمل‌آوری مناسب بتن تراوا اکیدا توصیه می‌شود.

۱۱-۷-۳- خرابی و ترمیم سطح

روش‌های ترمیم سطحی معمول برای بتن متعارف ممکن است در مورد بتن تراوا قابل کاربرد نباشند، زیرا بسیاری از این روش‌ها باعث آب‌بندی سطح می‌شوند و می‌توانند بر نفوذپذیری روسازی بتن تراوا تاثیر بگذارند. برای افزایش دوام روسازی بتنی تراوا در فصل زمستان ممکن است بر روی بتن تراوا از دستگاه پخش بتن استفاده شود. برای تولید روکش‌های سطحی که بتوانند عمر روسازی بتنی تراوا را افزایش دهند و به پایداری و زیبایی آن بیافزایند و همچنین، برای دستیابی به مواد و روش‌های ترمیم برای این نوع روسازی، به تحقیقات بیشتر نیاز است. درزها، صرف‌نظر از اینکه با استفاده از اره درز پیتزایی[118] ایجاد شوند یا توسط اره، همواره نقطه ضعف و خرابی بتن تراوا هستند. در صنعت ساخت مدت‌هاست که توصیه می‌شود که درزها نباید آب‌بندی شوند، با این حال شواهد تجربی نشان می‌دهد که آب‌بندی درز از خرابی ناشی از سیال‌های تراکم‌ناپذیر جلوگیری می‌کند. برای تعیین اثرات احتمالی روش‌های مختلف اجرای درز و همچنین روش‌های آب‌بندی آن‌ها، تحقیقات بیشتری موردنیاز است.

۱۱-۸- سایر کاربردهای نوین

علاوه بر استفاده از بتن تراوا به عنوان روسازی برای کنترل آب‌های سطحی و یا به عنوان فیلتر زیست‌محیطی برای فرآیندهای آبگیری، کاربردهای جدید دیگری نیز برای این نوع بتن وجود دارد. به دلیل چگالی کم‌تر

[118] Pizza cutter

بتن تراوا، استفاده از آن در ساخت ساختمان می‌تواند برای کاهش نیازهای سازه‌ای سودمند باشد. یکی از ملاحظات مهم در استفاده سازه‌ای از این نوع بتن، نیاز به آرماتور و عملکرد آن است. اگرچه، عملکرد دو دیوار بتنی تراوای مسلح در شیکاگو پس از ۱۰۰ سال عالی بوده است (Seegebrecht، ۲۰۱۵)، اما برای تایید معیارهای طراحی و رفتار پیوستگی فولاد و بتن، علاوه بر دوام آن، به تحقیقات بیشتری نیاز است.

گاهی اوقات به بتن تراوا، بتن با تخلخل زیاد نیز گفته می‌شود و نشان داده شده است که این بتن در جذب صدا موثر است. برخی از کاربردهای آن به عنوان روسازی جاده و دیوارهای مانع صدا است (Neithalath و همکاران، ۲۰۰۵a؛ Tamai و همکاران، ۲۰۰۴؛ Neithalath، ۲۰۰۴؛ Schaefer و همکاران، ۲۰۱۰).

۱۱-۸-۱- دوغاب متخلخل

فناوری تزریق دوغاب برای ایجاد باربری سازه‌ای در زیر پی از سال ۱۸۰۲ در صنعت ساختمان به کار گرفته شده است (Houlsby، ۱۹۹۰). اجزای متعارف این دوغاب، مخلوطی از سیمان پرتلند، آب و اغلب اوقات پرکننده‌ای مانند ماسه بوده است. این اجزا برای تشکیل دوغاب، مخلوط می‌شوند و به ناحیه موردنظر که معمولا سطح مشترک پی با خاک یا سنگ بستر است، تزریق می‌گردند تا پیوند سازه‌ای صلب و اغلب ناتراوایی را تشکیل دهند. با این حال، در برخی موارد، هدایت هیدرولیکی مطلوب است تا بتوان تاثیر نیروهای هیدرواستاتیکی طبیعی را بدون ایجاد خرابی ناشی از اشباع‌شدن، فرسایش و آب‌شستگی ذرات ریز کاهش داد. این موضوع در مواردی که پی‌ها در هنگام ساخت قابل دسترسی هستند، به استفاده گسترده از زهکش‌های فرانسوی (ستون شنی)، پتوهای زهکشی و پارچه برای زهکشی و جلوگیری از فرسایش (زمین‌پارچه‌ها) منجر شده است. این نوع دوغاب تزریقی متخلخل، به ویژه در پروژه‌های مربوط به اصلاح و نوسازی ساختگاه، پاسخگوی نیاز اساسی صنعت ساخت خواهد بود. نمونه‌هایی از کاربرد این ماده تزریقی و متخلخل شامل ترمیم سدها (Weaver، ۱۹۹۱)، تونل‌ها، بزرگراه‌ها، کانال‌ها، راه‌آهن‌ها و تصفیه‌خانه‌های زیست‌محیطی است. برای مطالعه مصالح دوغاب‌های متخلخلی که قابل پمپ‌شدن باشند، تحقیقاتی انجام گرفته است (Yen و همکاران، ۲۰۰۲). این مطالعات طیف وسیعی از مصالح پمپ شده با ویژگی‌های زهکشی را در بر می‌گرفت.

فصل ۱۲

بتن تراوا و محیط‌زیست

سامانه‌های بتنی تراوا به عنوان یکی از بهترین روش‌های مدیریت بارش (BMPs) توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده و آژانس‌های صدور مجوز شناخته شده‌اند. سامانه‌های بتنی تراوا همچنین موردتایید سایر طرح‌های نوآورانه توسعه پایدار مانند طرح کاهش جزیره گرمایی سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (U.S. EPA، a۲۰۲۲) و توسعه کم زیان[۱۱۹] (U.S. EPA ۲۰۲۲ b) نیز هستند. بتن تراوا چند ویژگی زیست‌محیطی را ارائه می‌دهد که مورد توجه سازمان‌های ارزیابی توسعه پایدار مانند سیستم رتبه‌بندی LEED برای ساخت ساختمان‌های با توسعه پایدار (شورای ساختمان سبز ایالات متحده، ۲۰۱۳) و برنامه Envision موسسه زیرساخت‌های با توسعه پایدار (ISI، ۲۰۲۲) قرار گرفته است. مدیریت آب‌های سطحی به ویژه در پروژه‌های زیرساخت شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در این زمینه بتن تراوا به صورت بالقوه یکی از اجزای کلیدی است (شکل ۱۲).

ظرفیت ذخیره آب‌های سطحی در درون و زیر سامانه‌های روسازی بتنی تراوا، می‌تواند برای کاستن از اوج رواناب مورد استفاده قرار گیرد. حجم رواناب ناشی از بارندگی از طریق نفوذ به خاک زیرین روسازی بتنی تراوا، نگهداری و تبخیر و یا هر دو کاهش می‌یابد. کاهش کل حجم رواناب به کاهش آلاینده‌های مرتبط با سامانه به نهرها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها منجر می‌شود. با نفوذ آب‌های سطحی، نه تنها حجم رواناب به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، بلکه بتن تراوا به طور موثری تصفیه کیفیت آب شستشوی اولیه را امکان‌پذیر می‌کند. حتی زمانی که از بتن تراوا به عنوان سامانه نگهداری آب‌های سطحی استفاده می‌شود، نه تنها مزیت کاهش اوج رواناب را به همراه دارد، بلکه کیفیت آب‌های سطحی را نیز بهبود می‌بخشد.

قابلیت فیلتر کردن بافت حفره‌دار بتن تراوا یا بستر سنگدانه‌ای ذخیره زیرزمینی در سامانه‌های بتنی تراوا می‌تواند باعث حبس آلاینده‌های آلی شود. همچنین، رشد طبیعی میکروبی، می‌تواند قبل از اینکه آلاینده‌های حبس شده در صورت نفوذ یا انتقال از طریق زیرزهکش‌ها در نهایت توسط خاک طبیعی تبدیل شوند، تصفیه شیمیایی را انجام دهد. بتن تراوا همچنین کل مواد جامد معلق[۱۲۰] (TSS) که یکی از آلاینده‌های اصلی رواناب سطحی در نظر گرفته می‌شود را جمع‌آوری می‌کند (U.S. EPA، ۱۹۹۹؛ Mata و Leming، ۲۰۱۲). علاوه بر موارد ذکر شده، لایه بتن تراوا می‌تواند غلظت بسیاری از فلزات موجود در رواناب سطحی را به طور موثری کاهش دهد. این کار از طریق جذب فلزات متصل به ذرات معلق و همچنین حذف شیمیایی فلزات در فاز محلول انجام می‌شود. این فرآیند از طریق جذب سطحی یا تبادل یونی درون خمیر بتن تراوا صورت می‌گیرد. برخی از فلزات محلول که تصفیه می‌شوند، روی، مس، سرب و کادمیوم هستند. این فلزات در رواناب جاده‌ها رایج هستند و کنترل آن‌ها در هنگام تخلیه آب‌های سطحی به منابع آبی حساس مانند زیستگاه گونه‌های ماهی آزاد حائز اهمیت است (Haselbach و هکاران، a۲۰۱۴ و b۲۰۱۴؛ Holmes و همکاران، ۲۰۱۷).

نفوذپذیری بتن تراوا به طور بالقوه باعث احیای آب‌های زیرزمینی، آبیاری پوشش گیاهی سطحی و ریشه

درختان مجاور و همچنین کاهش آلودگی حرارتی در منابع آبی می‌گردد که رواناب به آن‌ها وارد می‌شود. آلودگی حرارتی زمانی رخ می‌دهد که باران روی آسفالت داغ می‌بارد و رواناب ناشی از آن می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دمای آب شود که این موضوع بر زیستگاه ماهیان، آبزیان و گیاهان در منابع آبی مختلف تاثیر منفی می‌گذارد. همچنین، در صورت وجود مجوز قوانین محلی، امکان برداشت آب از چاه برای اهداف مختلف، افزایش می‌یابد.

بتن تراوا نسبت به اکثر روسازی‌های متعارف، گرمای کمتری را جذب و نگهداری می‌کند و همین موضوع باعث می‌شود تا بتواند تاثیر مثبتی بر پدیده جزیره گرمایی در محیط شهری داشته باشد. دلیل این مطلب آن است که ساختار متخلخل بتن تراوا، گرمای کمتری را در خود ذخیره و منتقل می‌کند و در نتیجه به کاهش اثر جزیره گرمایی در مناطق شهری کمک می‌کند (Kevern و همکاران، ۲۰۰۹a؛ Haselbach و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این، آبی که پس از بارندگی در لایه بتنی تراوا ذخیره می‌شود، می‌تواند از طریق تبخیر به کاهش جزیره گرمایی کمک کند (Lorenzi و همکاران، ۲۰۱۵).

منابع

American Association ofState Highway and Transportation Officials (AASHTO)

AASHTO M 157-13(2017)—Standard Specification for Ready-Mixed Concrete

AASHTO T 1X0-20—Standard Method of Test for Mois-ture-Density Relations of Soils Using a 4.54 kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (IS-in.) Drop

AASHTO T 360-16(2020)—Standard Method of Test for Measurement of Tire'Pav ement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method

American Concrete Institute (ACI)

ACI 212.3R-16—Report on Chemical Admixtures for Concrete

ACI 301-20—Specifications for Concrete Construction

ACI 306.1-90(02)—Standard Specification for Cold Weather Concreting

ACI 325.12R-O2(19f-Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads

ACI 330R-08—Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots

ACI 522.1-13—Specification for Pervious Concrete Pavement

ASTM International

ASTM C29/C29M-17a- Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate

ASTM C33/C33M-18—Standard Specification for Concrete Aggregates

ASTM C39/C39M-20—Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

ASTM C42/C42M-20—Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete

ASTM C94'C94M-22a—Standard Specification for Ready-Mixed Concrete

ASTM C15O/C15OM-22—Standard Specification for Portland Cement

ASTM Cl71-20—Standard Specification for Sheet Mate¬rials for Curing Concrete

ASTM C174/CI74M-I7—Standard Test Method for Measuring Thickness of Concrete Elements Using Drilled Concrete Cores

ASTM C260C260M-10a(2016)—Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete

ASTM C457/C457M-16—Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete

*ASTM C494 C494M-19*1 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*

ASTM C595/C595M-21—Standard Specification for Blended Hydraulic Cements

ASTM C618-22 Standard Specification forCoal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

ASTM C666 C666M-15—Standard Test Method for

Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing

ASTM C944 C944M-I9—Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method

ASTM C989/C989M-22-Standard Specification for Slag Cement for Use tn Concrete and Mortars

ASTM C1157C1157M-20a Standard Performance

Specification for Hydraulic Cement

ASTM C1240-20 Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures

ASTM CI399/CI399M-10(20l5}—Standard Test

Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber- Reinforced Concrete

ASTM CI688/CI688M-l4a—Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete

ASTM Cl701/Cl70IM-17a—Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete

ASTM CI747/CI747M-13—Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion (withdrawn 2022)

ASTM CI754/C1754M-I2—Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete (withdrawn 2021)

ASTM D422-2O—Standard Test Method for Particle-Size Analysis (withdrawn 2022)

ASTM D448-12(2017)— Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge

Construction

ASTM D698-12(2021)—Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Stan¬dard Effort (12.400 ft-lbf ft' (600 kN-m/m'))

ASTM DI 557-12(2021)— Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modi-fied Effort (56.000 ft-lbf ft' (2,700 kN-m/m'))

ASTM DI747-09(2019)—Standard Test Method for Refractive Index of Viscous Materials

ASTM DI883-2I—Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils

ASTM D2487-17'1—Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classifica¬tion System)

*ASTM D2488-17*1—Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures)*

ASTM D3385-18 Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer

*ASTM D4253-16*1—Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*

ASTM D4254-16—Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density

ASTM E1050-I9—Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube. Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System

International Code Council (ICC)

ICC IgCC 2021 - International Green Construction Code

Authored documents

AASHTO, 1993. Guide for Design of Pavement Struc¬tures. Washington. DC. 640 pp.

AASHTO. 1998, "Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures." Washington. DC.

Ahiablame, L. M.; Engel. B. A.; and Chaubey. I., 2012. "Effectiveness of Low Impact Development Practices: Liter-ature Review and Suggestions for Future Research," Water, Air. and Soil Pollution. V. 223, No. 7. pp 4253-4273. doi: 10.1007/s 11270-012-1189-2

ACPA. 2014a, "PerviousPave Background. Purpose. Assumptions, and Equations," American Concrete Pave¬ment Association. Skokie. IL, http://acpa.org/PerviousPave/ A bout° o20 Pervious Pa vepdf (last accessed July 20, 2020)

ACPA. 2014b. "PerviousPave Slope Considerations," American Concrete Pavement Association. Skokie, IL. http://www.acpa.OTg/PerviousPave/PerviousPave%20-%20 Slope"o20Considerations.pdf (last accessed July 20. 2020)

Atlanta Regional Commission. 2001. Georgia Stormwater Management Manual, pp. 3.3-33 and 3.3-40.

Baas, W. P., 2006. "Pervious Concrete Pavement Surface Durability in a Freeze-Thaw Environment where Rain. Snow and Ice Storms are Common Occurrences." Ohio Concrete. Columbus. OH. 4 pp.

Backstrom. M,, 2000. "Ground Temperature in Pavement During Freezing and Thawing,"

Journal of Transportation Engineering, ASCE, V. 126. No. 5. Sept-Oct.. pp. 375-381. doi: 10.1061/(ASCE)O733-947X(2OOO) 126:5(375)

Bell, F. G., 1903. Engineering Treatment of Soils. Taylor and Francis. Abingdon. UK. 302 pp.

Bentz. D.; Lura, P.: and Roberts. J.. 2005. "Mixture Proportioning for Internal Curing." Concrete International. V. 27. No. 2, Feb., pp. 35-40.

Bhayani. B.; Holsen. T. M.; and Neithalath. N., 2007. "Investigations on the Efficiency of Enhanced Porosity Concretes in Containing Vehicular Oil Spills." Proceedings tn CD of the International Conference on Sustainability of Construction Materials and Structures. Coventry, UK. 8 pp.

Brite/Euram Report. 1994, "Surface Properties of Concrete Roads in Accordance with Traffic Safety and Reduction of Noise." Brite/Euram Project BE3415, 138 pp.

Crouch. L. K.; Cates. M. A.: Dotson. V. J.; Honeycutt. K. R.; and Badoe, D. A.. 2003, "Measuring the Effective Air Void Content of Portland Cement Pervious Pavements," Cement, Concrete and

Aggregates, V. 25, No. 1. pp. 16-20.

Crouch. L. K.; Smith. N.: Walker. A. C.; Dunn. T. R.; and Sparkman. A.. 2006, "Determining Pervious PCC Perme¬ability with a Simple Triaxial Flexible-Wall Constant Head Permeameter." TRB 85th Annual Meeting Compendium of Papers, 18 pp.

Cutler. H.; Wang. K.; Schaefer. V. R.; and Kevem. J. T,, 2010, "Resistance of Portland Cement Pervious Concrete to Deicing Chemicals." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRB), V. 2164, No. 1. Transportation Research Board of the National Academies, Washington DC. pp. 98-104. doi: 10.3141/2164-13

Das. B.. 1993, Principles of Geotechnical Engineering, PWS Publishing Co.. Boston, MA, 146 pp.

Debo, T. N., and Reese. A. J., 2002. Municipal Storm Haler Management, second edition, CRC Press. Boca Raton. FL. 976 pp.

Delattc. N.; Miller. D.; and Mrkajic, A., 2007, "Field Performance Investigation on Parking Lot and Roadway Pavements: Final Report." RMC Research & Education Foundation. Alexandria. VA. 79 pp.

Delattc. N. J.. 2014, Concrete Pavement Design, Construc-tion. and Performance, second edition. CRC Press. Boca Raton. FL, 445 pp.

Deo. O.; Bhayani. B.; Holsen. T. M.; and Neithalath, N,, 2008. "Modeling the Retention of Oil in Enhanced Porosity Concretes," Proceedings of the NRMCA Concrete Tech¬nology' Forum. Denver, CO.

Deo, O.. and Neithalath. N., 2010. "Compressive Behavior of Pervious Concretes and A Quantification of the Influence of Random Pore Structure Features." Materials Science and Engineering A. V. 528, No. I. pp. 402-412. doi: 10.1016/j. tnsea.2010.09,024

Deo.O., and Neithalath, N..2011, "Compressive Response of Pervious Concretes Proportioned for Desired Porosi¬ties." Construction and Building Materials. V, 25, No. 11, pp. 4181-4189. doi: I0.l0l6/j. conbuildmat.20l 1.04.055

Drake. J.; Bradford, A.; Van Scters, T.; and MacMillan. G., 2012. "Evaluation of Permeable Pavements in Cold Climates - Final Report, Toronto and Region Conservation Authority," Sustainable Technologies Evaluation Program. Dec., https:// sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2013/02 KPP- Final-20l2.pdf. (last accessed July 20.2020)

Erickson. S., 2006, "Pervious Concrete Durability Testing." Technical Report. Viesko Quality Concrete. Salem. OR. 6 pp.

Ferguson, B K., 1994. Stormwater Infiltration. CRC Press. Boca Raton, FL, 288 pp.

Ferguson, B. K.. 1998, Introduction to Stormwater: Concept. Purpose. Design. Wiley. New York. 272 pp.

Ferguson, B. K., 2005, Porous Pavements, Taylor & Francis, New York. 600 pp.

Florida Concrete and Products Association (FCPA). 1990, Pervious Pavement Manual. Orlando, FL, 57 pp.

Francis, A. M., 1965, "Early Concrete Buildings in Britain." Concrete and Constructional Engineering, V. 60, No. 2. Feb., pp. 73-75.

Guthrie, W. S.; DeMille, C. B.; and Eggctt, D. L.. 2010, "Effects of Soil Clogging and Water Saturation on Freeze-Thaw Durability' of Pervious Concrete." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Resean h Board, V. 2164. No. 1. pp. 89-97. doi: 10.3141/2164-12

Haselbach, L.; Boyer. M.; Kevem. J.; and Schaefer, V,, 2011, "Cyclic Heat Island Impacts in Traditional versus Pervious Concrete Pavement Systems." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, V. 2240, No. 1. pp. 107-115. doi: 10.3141/2240-14

Haselbach, L. M,, and Freeman. R M., 2006, "Vertical Porosity Distributions in Pervious Concrete Pavement," ACI Materials Journal, V. 103, No. 6, Nov.-Dec., pp. 452-458.

Haselbach, L_. and Gaither. A., 2008, "Preliminary Field Testing: Urban Heat Island Impacts and Pervious Concrete," Proceedings of the NRMCA 2008 Concrete Technology' Forum: Focus on Sustainable Development, Denver. CO. (CD-ROM)

Haselbach. L.; Poor. C.; and Tilson. J.. 2014a. "Dissolved Zinc and Copper Retention from Stormwater Runoff in Ordi-nary Portland Cement Pervious Concrete," Construction and Building Materials. V. 53. pp. 652-657. doi: 10.10l6.j. conbuildmat 2013.12.013

Haselbach. L.; Tilson. J.; and Poor, C,, 2014b. "Long¬Term Metal Sorption in Pervious Concrete with Ordinary Portland Cement and Fly Ash: Proceedings." 2014 Inter¬national Symposium on Pavement Life-Cycle Assessment, University of California, Davis, Davis, CA. Oct.

Herod. S., 1981, "Porous Concrete Market Blooms in Greenhouse," Modern Concrete, Mar., pp. 40-44.

Holmes. R. R.; Hart. M. L.; and Kevem. J. T., 2017, "Heavy Metal Removal Capacity of Individual Compo¬nents of Permeable Reactive Concrete," Journal of Contain¬ment Hydrology, V. 196. Jan. pp. 52-61. doi: 10.1016/j. jconhyd.2016.12.005

1 loulsby, A. C.. 1990. Construction and Design of Cement Grouting. John Wiley and Sons. New York. 442 pp.

Institute for Sustainable Infrastructure (1SI). 2022. https://sustainablcinfrastructure.org/envision/ overvicw- of-envirion/. (last accessed Apr. 7, 2023)

Kevem, J. T., 2006, "Mix Design Determination for Freeze-thaw Resistant Portland Cement Pervious Concrete." master's thesis, Iowa State University. Ames. IA.

Kevem. J. T., 2011, "Operation and Maintenance of Pervious Concrete Pavements," 90th Annual Transportation Research Board Annual Meeting. Washington. DC.

Kevem. J. T., and Famey. C., 2012. "Reducing Curing Requirements for Pervious Concrete with a Superabsor¬bent Polymer for Internal Curing." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 2290. No. IJam.pp. 115-121. doi: 10.3141/2290-15

Kevem. J. T.. and Schaefer. V. R,, 2008, "Tempera¬ture Response in a Pervious Concrete System Designed for Stormwater Treatment," Proceedings of the American Society of Civil Engineers GeoCongress, New Orleans. LA. pp. 1137-1144.

Kevem. J. T., and Sparks. J. D,, 2013, "Low-Cost Tech¬niques for Improving the Surface Durability of Pervious Concrete," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, V. 2342. No. 1, pp 83-89 doi: 10.3141/2342-10

Kevem. J. T; Biddle. D.: and Cao. Q., 2015, "Effect of Macro-Synthetic Fibers on Pervious Concrete Properties." Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V. 27, No.9.pp. 1-6. doi: IO.IO61/ (ASCE)MT.1943-5533.OOO12I3

Kevem. J. T.; Haselbach. L.; and Schaefer, V. R,, 2009a. "Hol Weather Comparative Heat Balances in Pervious/ Impervious Pavement Systems," Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands, Berkeley, CA.

Kevem, J. T.; King, G. W.; and Bruetsch. A., 2012. "Pervious Concrete Surface Characterization to Reduce Slip-Related Falls," Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, V. 26, No. 4. Aug., pp. 526-531. doi: 10.1061 /(ASCE KF 1943-5 509.0000263

Kevem. J. T.; Schaefer. V. R.: and Wang. K.. 2009b. "The Effect of Curing Regime on Perv ious Concrete Abra¬sion Resistance." Journal of Testing and Evaluation, V. 37. No. 4, p. 101761. doi: 10.1520/JTE101761

Kevem. J. T.; Schaefer. V. R.; and Wang. K . 2009c. "Temperature Behavior of a Pervious Concrete System." Transportation Research Record: Journal of the Transpor-tation Research Board, V. 2098. No. I. Jan., pp. 94-101. doi: 10.3141 /2098-10

Kevem. J. T.; Schaefer. V. R.; and Wang. K.. 2009d. "Predicting Performance of Pervious Concrete using Unit Weight." Proceedings of the 2009 NRMCA Concrete Tech-nology Forum—Focus on Performance Prediction. Cincin-nati. OH.

Kevem. J. T.; Schaefer. V. R.; and Wang. K.. 2011, "Mixture Proportion Development and Performance Evalu¬ation for Pervious Concrete for Overlay Applications." ACI Materials Journal. N. 108. No 4. July-Aug., pp. 439-448.

Kevem. J. T,; Schaefer. V. R.; W'ang. K.; and Suleiman.

Improved Frceze-Thawr Durability," Journal of.4STM Inter-national. V. 5. No. 2. doi: 10.1520/ JAI101320

Kevem, J. T.: Wang. K.: and Schaefer, V. R.. 2008b, "A Novel Approach to Determine Entrained Air Content in Pervious Concrete," Journal of ASTM International, V. 5. No. 2. pp. 1-10. doi: 10.1520/JAI 101434

Kevem, J. T; Wang, K.; and Schaefer, V. R . 2008c, "Pervious Concrete in Severe Exposures Development of Pollution-Reducing Pavement for Northern Cities," Concrete International. V. 30, No. 7, July, pp. 43-49.

Kevem, J. T.; Wang, K.; and Schaefer. V. R.. 2009e. "Test Methods for Characterizing Air Void Systems in Portland Cement Perv ious Concrete." Journal of ASTM International. V.6, No. 9. Oct., pp. 119-134.

Kevem. J. T.; Wang. K.; and Schaefer. V. R,, 2010. "The Effect of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Dura¬bility of Pervious Concrete." Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE. V. 22, No 5, May, pp. 469-475. doi: 10.1061/(ASCE)MT. 1943-5533.0000049

Korhonen. C. J., and Bayer. J. J.. 1989. "Porous Portland Cement Concrete as an Airport Runway Overlay," Special Report 89-12, U.S. Army Cold Regions Research and Engi-neering Laboratory. Hanover. NH. 20 pp.

Leming. M. L.; Malcom. H. R.; and Tennis. P. D,, 2007. Hydrologic Design of Pervious Concrete Pavements, EB3O3, Portland Cement Association. Skokie. IL. 72 pp.

Little. D. N.; Males. E. H.; Prusinski, J. R.; and Stewart, B., 2000. Cementitious Material Stabilization. TRB Committee A2J01, Transportation Research Board. Washington. DC. 7 pp.

Lorenzi, A.; Haselbach, L.; and Silva Filho, L. C. P,, 2015. "Field Data for Heat Island Mitigation by Pervious Concrete in Porto Alegre." Proceedings of the 3rd Inter¬national Conference on Best Practices for Concrete Pave¬ments, Bonito, Brazil.

Low. K.; Harz, D.; and Neithalath, N., 2008, "Statistical Characterization of the Pore Structure of Enhanced Porosity Concretes." Proceedings of the NRMCA Concrete Tech¬nology Forum. Denver. CO.

Mahboub, K.; Canlcr, J.; Rathbone. R.; Robi. T.; and Davis. B., 2008. "The Effects of Compaction and Aggre¬gate Gradation on Pervious Concrete." Proceedings of the NRMCA Concrete Technology Forum. Denver. CO.

Malhotra. V. M.. 1969. "A Low-Cost Concrete Building." Engineering News Record, pp. 62-63.

Malhotra. V. M,, 1976. "No-Fines Concrete—Its Prop¬erties and Applications." ACI Journal Proceedings, V. 73. No. 11. Nov., pp. 628-644.

Marolf. A.; Neithalath. N.; Sell. E.; Wegner. K.; Weiss. J.; and Olek. J.. 2004, "Influence of Aggregate Gradation on the Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete." ACI Materials Journal. V. 101. No. I. Jan.-Feb., pp. 82-91.

Mata. L., 2008. Sedimentation of Pervious Concrete Pavement Systems. PCA R&D Serial No. SN3104. Portland Cement Association. Skokie. IL.

Mata. L,, and Leming. M.. 2008, "Sedimentation Effects on Pervious Concrete." Proceedings of the 2008 National

M. T. 2008a. "Pervious Concrete Mixture Pr @seismicisolationn

Read}' Mixed Concrete Association Concrete Technology Forum. Denver. CO.

Mala, L. A . and Leming. M., 2012, "Vertical Distribution of Sediments in Pervious Concrete Pavement Systems." AC! Materials Journal. V. 109. No. 2. Mar.-Apr., pp. 149-155.

Mathis. D. E.. 1990, "Permeable Bases—An Update." PCA. No. 8, Nov., pp. 3-4.

Maynard. D. P., 1970. "A No-Fines Road." Concrete Construction. V. 15. No. 3, pp. 116-117.

Medico, J. J. Jr.. 1975, "Porous Pavement." U.S. Patent No. 3870422.

Meiningen R. C., 1988. "No-Fines Pervious Concrete for Paving." Concrete International. V. 10. No. 6. Aug., pp. 20-27.

Monahan. A., 1981. "Porous Portland Cement Concrete; the State of Art." U.S. Army Engineer Waterways Experi¬ment Station, Structures Laboratory. Vicksburg. MS.. Jan., 27 pp.

Montes. F.. and Haselbach, L. M,, 2006, "Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete." Environ¬mental Engineering Science, V. 23. No. 6, Nov., pp. 960-969, doi: 10. l089/ees.2006.23.960

Mulligan, A.. 2005. "Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems," master's thesis. University of Central Florida, Orlando, FL. 132 pp.

Neithalath. N.. 2004, "Development and Characterization of Acoustically Efficient Cementitious

material Materials," PhD thesis. Purdue University. West Lafayette, IN, 269 pp.

Neithalath, N.; Weiss, J.; and Olek. J.. 2005a, "Modeling the Influence of Pore Structure on the Acoustic Absorp¬tion of Enhanced Porosity Concrete," Journal of Advanced Concrete Technology, V. 3. No. 1. Feb., pp 29-40. doi: IO.3l5L'jact.3.29

Neithalath. N.; Weiss. J.; and Olek. J., 2006. "Character-izing Enhanced Porosity Concrete Using Electrical Imped-ance to Predict its Acoustic and Hydraulic Performance." Cement and Concrete Research, V. 36. No. II, pp. 2074¬2085. doi: 10.10l6/j.cemconres.2006.09.00l

Neithalath. N.; Weiss. W. J.; and Olek. J.. 2003. "Devel-opment of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials," Final Report, The Institute for Safe. Quiet, and Durable Highways, West Lafayette, IN, 179 pp

Neithalath. N.; Weiss. W. J.; and Olek. J.. 2005b. "Modi-fying the Surface Texture to Reduce Noise in Portland Cement Concrete Pavements," Report No. SN 2878. Port¬land Cement Association. Skokie. IL. 67 pp.

Nelson, P M,, and Phillips, S., 1994, "Designing Porous Road Surfaces to Reduce Traffic Noise," Transportation Research Laboratory Annual Review. TRL, Crow Thome. UK, 58 pp

Nissoux, J. L.; Gnagne, C.; Marzin, J.; Lefebvre. J.-P.; and Pipicn, G., 1993, "A Pervious Cement Concrete Wearing Course Below 73 dB(A)." Proceedings of the Fifth Interna-tional Conference on Concrete Pavement and Rehabilitation, Purdue University. West Lafayette. IN. V. 2, pp. 269-284.

NRMCA. 2004, "Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete." National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD. 17 pp.

NRMCA. 2007, Text Reference for Pervious Concrete Contractor Certification. Publication 2PPCRT. National Ready Mixed Concrete Association. Silver Spring. MD, Feb.. 60 pp.

NRMCA. 2009. Pervious Concrete: Guideline to Mixture Proportioning. Publication 2PE001, V. 1,0. National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring. MD, Feb., II PP

Offenberg. M.. 2005, "Producing Pervious Pavements." Concrete International. V. 27, No, 3. Mar., pp. 50-54.

Offenberg, M..2011, "Development of a New Test Method for Assessing the Raveling Resistance of Pervious Concrete." STP-1551, ASTM International. West Conshohocken. PA, pp. 80-96.

Onstenk. E.; Aguado. A.; Eickschen. E.; and Josa. A., 1993, "Laboratory Study of Porous Concrete for Its Use as Top Layer of Concrete Pavements," Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete Pavement and Rehabilitation, Purdue University, West Lafayette. IN, V. 2. pp. 125-139.

Paine. J. E.. 1990, "Stormwater Design Guide. Portland Cement Pervious Pavement," Florida Concrete and Products Association. Orlando. FL. 13 pp.

PCA. 1984, "Thickness Design forConcretc Highway and Street Pavements," Engineering Bulletin EB109P. Portland Cement Association, Skokie, IL.

Pilon. B. S.; Tyner. J. S.; Yoder, D. C.; and Buchanan, J. R . 2019. "The Effect of Pervious Concrete on Water Quality Parameters: A Case Study." Hater (Basel), V. II, No. 2. Feb., p. 263. doi: 10.3390/ wl 1020263

Pindado, M. A.; Aguado, A.; and Josa, A., 1999, "Fatigue Behavior of Polymer-Modified Porous Concretes." Cement and Concrete Research, V. 29. No. 7, pp. 1077-1083. doi: 10.101680008-8846(99 >00095-2

Pratt. C.; Wilson, S.; and Cooper. P., 2002, "Source Control Using Constructed Pervious Surfaces Hydraulic, Structural and Water Quality Performance Issues," CIRIA, 152 pp.

Pratt. C. J.; Newman, A. P.; and Bond. P. C,, 1999, "Mineral Oil Biodegradation within a Permeable Pavement: Long Tenn Observations," Hater Science and Technology. V. 39. No. 2. pp. 103-109. doi: 10.2166 wst. 1999 0096

Rehder, B.; Banh, Q.; and Neithalath. N., 2014. "Fracture Behavior of Pervious Concretes: The Effects of Pore Struc-ture and Fibers," Engineering Fracture Mechanics, V, 118, Mar . pp. 1-16. doi: 10.1016/j.cngfracmech.2014.01.0I5

Rodden. R.; Voigt. G.; and Gieraltowski. A.. 2010, "Struc-tural and Hydrological Design of Pervious Concrete Pave-ments using PerviousPave," FHWA International Confer¬ence on Sustainable Concrete Pavements, Sacramento. CA.

Rushton. B., 2000. "Low Impact Parking Lot Design Reduces Runoff and Pollutant Loads." Southwest Florida Water Management District. Brooksville. FL. 225 pp.

Rushton. B.. 2001. "Low-Impact Parking Lol

Reduces Runoff and Pollutant Loads."

Journal of Water Resources Planning and Manage¬ment, ASCE. V. 127. No. 3. pp. 172-179. doi: IO. 1061/ (ASCE)0733-9496(200l >127:3(172)

Sehaefer. V.; Kevem. J.; and Wang. K.. 2011. "An Inte-grated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications," Final Report. Federal Highway Administration. DTFH61-06-H-00011 Work Plan 10, Oct.

Schaefer, V. R.; Kcvem. J. T.; Izevbckhai. B.; Wang. K.; Cutler. H.; and W'iegand. P. 2010. "Construction and Performance of Pervious Concrete Overlay at Minnesota Road Research Project." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 2164, No. I.pp. 82-88. doi: 10.3141a164-11

Schaefer. V. R ; Wang. K.; Suleiman. M. T.; and Kcvem. J. T.. 2006. "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates." National Concrete Pavement Technology Center. 85 pp.

SeegebrechL G. W., 2015. "Reinforcing Steel in Pervious Concrete," Concrete International, V. 37, No. 3, Mar., pp 53-57.

Selbig, W. R.. and Buer. N., 2018. "Hydraulic. Water Quality, and Temperature Performance of Three Types of Permeable Pavement under High Sediment Loading Condi-tions," U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, doi: 10.3133/sir2OI 85037

Selbig, W. R.; Buer, N.; and Danz. M. E., 2019, "Storm-water-Quality Performance of Lined Permeable Pavement Systems," Journal of Environmental Management, V. 251, Dec. doi: 10.1016/j. jenvman.2019.109510

Shah. S. P.. and Ahmad. S. H., 1985, "Structural Properties of High Strength Concrete and its Implications for Precast Prestressed Concrete," PC! Journal, V. 30. No. 6, Nov./Dec., pp 92-119. doi: 10.15554. pcij. 11011985.92.119

SI Concrete Systems, 2002. "Fiber-Reinforced Pervious Concrete," Project 2120-36, Chattanooga. TN, Oct.

Soil Conservation Service. 1986. "Urban Hydrology for Small Watersheds," Technical Release No. 55. Soil Conser-vation Service. U.S. Department of Agriculture. Washington. DC. 160 pp.

St. Johns River Water Management District (SJRWMD). 1999, Applicant's Handbooks: Regulation of Stormwater Management Systems, Palatka, FL, 285 pp.

Suleiman. M.; Kevem, J.; Schaefer. V. R.; and Wang, K.. 2006, "Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties," Proceedings of the NRMCA Concrete Tech¬nolog)' Forum Focus on Pervious Concrete, Nashville. TN. 8 PP

Sumanasooriya, M. S.; Bentz. D. P; and Ncithalath, N., 2010, "Planar Image based Reconstruction of Pervious Concrete Pore Structure and Permeability Prediction." ACI Materials Journal, V. 107. No 4. July-Aug., pp. 413-421.

Sumsion. E. S., and Guthrie. W,, 2013. "Physical and Chemical Effects of Deicers on Concrete Pavement: Litera-ture Review." UT-13.09. Utah Department of Transporta¬tion. Taylorsville. UT. Dec.. 50 pp.

Sutter. I..; Peterson. K.; Julio-Betancourt. G.; Hooton, D,; ical Effects of Concentrated Deicing Solutions of Portland Cement Concrete." SD2OO2-OI. South Dakota Department of Tran spoliation, SD2OO2-O1, Pierre, SD, Apr , 65 pp.

Tamai. M.; Mitzuguchi. H.; Hatanaka. S.; Katahira. H.; Makazawa. T.; Yanagihashi, K.; and Kunieda. M.. 2004. "Design. Construction, and Recent Applications of Porous Concrete in Japan," Proceedings of the JCI Symposium on Design. Construction, and Recent Applications of Porous Concrete, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan. 15 pp.

U.S. EPA. 2021. "Stormwater Best Management Prac¬tice," EPA-832-F-21-031W. U.S. Environmental Protec¬tion Agency. Washington DC, Dec., https:.'Www.epa gov/ systcm/files/documents/2021 -I I bmp-permeable-pavc- mcnts.pdf. (last accessed Apr. 7, 2023)

U.S. EPA. 2022a. "Reduce Heat Island Effect." U.S. Envi-ronmental Protection Agency. Washington

DC. https://www. epa.gov/green-infrastructure/reduce-urban-heat-island- effect. (last accessed Apr. 7, 2023)

U.S. EPA. 2022b. "Urban Runoff: Low Impact Develop-ment." U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, https://www.epa.gov/nps/urban-runoff-low-impact- development. (last accessed Apr. 7,2023)

U.S. EPA. 1999, "Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices." EPA- 82I-R-99-012, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington. DC. Aug., https://www.epa. gov/sites/default/files/2015-11 documents/urban-storm- water-bmps preliminary-study 1999.pdf. (last accessed Apr. 7.2023)

U.S. Green Building Council. 2013, "LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction." U.S. Green Building Council, Washington, D.C.

Valavala. S.; Montes, F,; and Haselbach. L. M.. 2006, "Area-Rated Rational Coefficients for Portland Cement Pervious Concrete Pavement," Journal of Hydrologic Engi¬neering, ASCE. V. 11. No. 3, pp. 257-260. doi: 10.1061/ (ASCE)1084-0699(2006)11:3(257)

Wang. K.; Kevem. J.; and Schaefer. V., 2008. "Self Consolidating Pervious Concrete for Overlay Applications." Proceedings of the National Readv-Mixed Concrete Asso-ciation Concrete Technolog)-Forum, Denver. CO.

Wang, K.; Schaefer, V. R.; Kevem, J. T.; and Suleiman. M. T.. 2006, "Development of Mix Proportion for Func¬tional and Durable Pervious Concrete." Proceedings of the NRMCA Concrete Technolog)' Forum: Focus on Pervious Concrete, Nashville. TN. 12 pp.

Waniclista, M.; Chopra, M.; Offenberg, M.; Spence, J.; and Ballock. C., 2005, "Performance of Pervious Concrete Pavements," Presentation: Stormwater Management for Highways, Transportation Research Board TRB AFB60. Washington, DC.

Wanielista, M.; Chopra. M.; Spence. J.; and Ballock. C., 2007, "Hydraulic Performance Assessment of Pervious Concrete Pavements for Stormwater Management Credit." Stormwater Management Academy, University of Central I lorida, < fetedo, FL, 81 pp

Weaver. K.. 1991. Dam Foundation Grouting, ASCE

Wimberly, J. D.; Leming, M. L.; and Nunez. R A., 2001, Evaluation of Mechanical and Hydrological Properties of High-l'oids Pervious Concrete. North Carolina State Univer-sity. Raleigh. NC. 39 pp.

Wingerter, R.. and Paine. J. E., 1989. Field Perfor¬mance Investigation. Portland Cement Pervious Pavement, Concrete and Products Association, Orlando, FL. 16 pp.

Wright, C. D., 2008. "Permeable Concrete for Railway Abutment and U-Wall Drainage Remediation." Geocon¬gress. pp. 1121-1128.

Yang. J,, and Jiang, G.. 2003, "Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials," Cement and Concrete Research, V, 33, No. 3. pp. 381-386. doi: 10. IOI6'SOOO8-8846(02)00966-3

Yang, Z.; Brown, H.; and Cheney. A., 2006. "Influence of Moisture Conditions of Freeze and Thaw Durability of Portland Cement Pervious Concrete." Proceedings of the NRMCA Concrete Technology' Forum Focus on Pervious Concrete. 15 pp.

Yen. P. T.: Sundaram. P. N.; and Godwin. W. A.. 2002. "Pumped-in-Place Permeable Grout Systems, Penneation Grouting," Bechtel Corporation Technical Grant, pp. 1-44.

Zouaghi, A.; Kumagai, M.; and Nakazawa, T., 2000, "Fundamental Study on Some Properties of Pervious Concrete and Its Applicability to Control Stormwater Run-Off." Transactions of the Japan Concrete Institute, V. 22. pp. 43-50.

بلوک لیکا

معرفی: بلوک های سبک لیکا ازرایج ترین قطعات پیش ساخته سبک بتنی هستند. این بلوک ها با اختلاط سبکدانه لیکا، سیمان و آب در دستگاه های تمام اتوماتیک به صورت تو پر و تو خالی قالب گیری و مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۷۷۸۲ تولید می شوند.

ویژگی ها:

- وزن کم
- راحتی در اجرا
- ترک نخوردن
- جمع شدگی کنترل شده
- مقاوم در برابر حریق و آتش سوزی
- عایق حرارت
- عایق صوت
- پایداری و مقاومت مکانیکی مطلوب

Leca

Light Expnded Clay Aggregate

سبکدانه های لیکا

واژه لیکا از عبارت Light Expanded Clay Aggregate (سبکدانه رس سبک منبسط شده) می باشد.
سبکدانه های لیکا از انبساط خاک رس در کوره های گردان با حرارتی حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به دست می آیند.

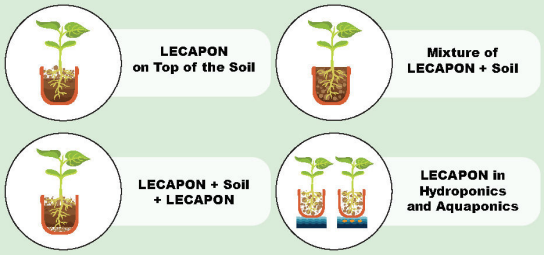
ویژگی ها : وزن کم – عایق حرارت – تراکم ناپذیری – واکنش ناپذیری – مقاوم در برابر یخ زدگی عمر مفید – عایق صوتی – مقاوم در برابر آتش – همگام با محیط زیست – جذب آب پایین قابل استفاده در کاربرد های مختلف مباحث ژئوتکنیک

Leca 0.1 - 4 mm | Leca 4 - 10 mm | Leca 10 - 25 mm

Leca
Light Expnded Clay Aggregate

سبکدانه کشاورزی (لیکاپون)

لیکاپون نام تجاری دانه لیکا در بخش کشاورزی بوده که بواسطه تولید آن بصورت مجزا و در خط تولید کشاورزی شرکت لیکا و با توجه به تغییر مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در مقایسه با دانه ساختمانی همچون PH. EC و...جهت مصارف کشاورزی قابل استفاده می باشد.



ویژگی ها :

وزن کم ـ جایگزین مناسب خاک و همچنین بستر مناسب کشت ـ ذخیره سازی آب ـ تهویه ریشه به نحو مطلوب کاهش تبخیر آب لایه های زیرین ـ زیبایی ظاهری در مقایسه با خاک ـ عدم نیاز به زیر گلدانی در گلدان های آپارتمانی ـ عاری از هر نوع آفات و بیماری ها ـ جلوگیری از گندیدگی ریشه ـ عمر مفید بالا

Lecapon

لیکامیکس

ماده اولیه اصلی در تهیه مخلوط های خشک آماده لیکا (لیکامیکس) سبکدانه لیکا بوده که این کیسه های آماده ترکیبی از سبکدانه های لیکا، سیمان و افزودنی می باشد. این محصولات دارای خواص عایقی در مقابل صوت و حرارت، مقاومت در برابر حریق و سبکی جهت کاهش بار مرده ساختمان می باشند.

ویژگی ها:
کارپذیری بهتر ـ کیفیت و مقاومت بالا ـ سهولت در استفاده فقط با اضافه کردن آب ـ اتلاف بسیار ناچیز مواد حین استفاده و آماده سازی در محل پروژه ـ کاهش چشمگیر هزینه های کارگری و جابجایی ـ از بین بردن ترک های ریز و درشت در صورت اجرای اصولی ـ سهولت در حمل و نقل و جا بجایی ـ اجرای سریع تر و راندمان بسیار بالا ـ سیمان مصرفی کمتر با توجه به امکان اجرای لایه های نازک تر ـ مصرف بهینه مواد ـ دارای خواص منحصر به فرد لیکا

ملات بنایی

MA100, MA200

PL60 , PL61

PL110, PL111

PL120, PL121

PL180, PL181

اندود ساختمانی

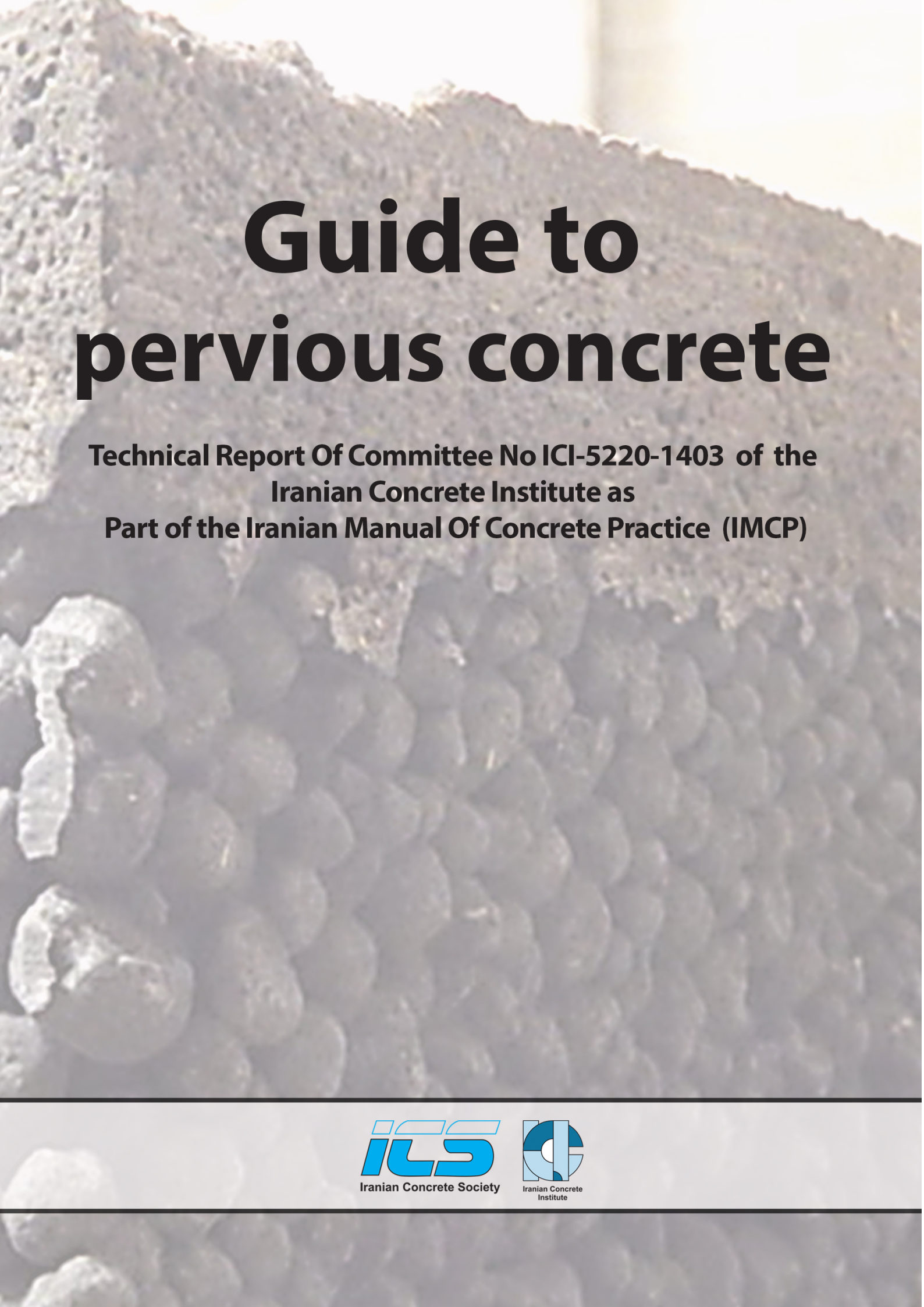
بتن کفسازی

FL400 , FL700 , FL1200 , FL2200

SC1400 , SC1600 , SC1800

بتن سازه ای

Lecamix



Guide to pervious concrete

Technical Report Of Committee No ICI-5220-1403 of the Iranian Concrete Institute as Part of the Iranian Manual Of Concrete Practice (IMCP)

Iranian Concrete Society

Iranian Concrete Institute