فرآیند طراحی، اجرا و بررسی عملکرد رویه بتن غلتکی جهت پیشگیری و کاهش خرابی‌ها

نگاه موردی: جاده اختصاصی مجتمع تولیدی و تحقیقاتی پریفاب

سعید ذوالقدری
دانشجوی دکتری سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین
معاون اجرایی شرکت اریکه گستران سام، saeed.zolghadri@gmail.com

وحید قلی زاده
کارشناس ارشد سازه، مشاور تحقیقاتی شرکت اریکه گستران سام
vahid_gholizadeh@ymail.com

علی اکبر مقصودی
استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان
مشاور عالی شرکت اریکه گستران سام maghsoudi.a.a@mail.uk.ac.ir

چکیده

پس از استفاده موفقیت آمیز از بتن غلتکی در سدسازی، ویژگی‌ها و مزایای آن منجمله قابلیت کسب مقاومت‌های بالا در سنین کم و عدم نیاز به تسلیح، قالب‌بندی و پرداخت که سبب تقلیل، تسهیل و تسریع عملیات اجرایی می‌گردد، کارشناسان را به استفاده از این نوع بتن در روسازی راه‌ها ترغیب نمود. در کشور ما نیز با توجه به فزونی ظرفیت تولید انواع سیمان نسبت به مجموع نیاز پروژه‌های عمرانی داخلی و تقاضای بازارهای صادراتی، گسترش استفاده از رویه‌های بتنی در راه‌ها به عنوان راهکاری عملی جهت ایجاد بازار مصرف پایدار برای بخشی از سیمان تولید شده مطرح می‌باشد. پژوهش‌ها و تحقیقات مختلفی در زمینه طراحی مخلوط بتنی و مسائل مختلف اجرایی رویه های بتن غلتکی صورت پذیرفته و بسیاری نیز در دست انجام می باشد، لیکن ضرورت بررسی، پیشگیری و کاهش خرابی‌ها و مشکلات ناشی از آن و نیز تعمیرات رویه‌های بتن غلتکی چندان مورد توجه نبوده است. در این مقاله ضمن تشریح فرآیند طراحی و محاسبه ضخامت رویه بتن غلتکی، برخی از دستاوردهای آزمایشگاهی و تجارب اجرایی استفاده از بتن غلتکی به عنوان رویه نهایی در خیابان‌های داخلی کارخانه پریفاب، شامل استفاده از مصالح بومی و بخشی از پسماند تولید مصالح سنگی آن کارخانه بررسی و نتایج حاصل از پایش عملکرد رویه بتن غلتکی اجرا شده پس از حدود ۴۰ ماه بهره‌برداری، علل خرابی‌ها ی ایجاد شده تشریح و روش‌های پیشگیری جهت کاهش و یا حذف خرابی‌ها و روش‌های ترمیم و افزایش عمر مفید روسازی بتن غلتکی نیز به تفضیل بیان گردیده‌اند.

واژه‌های کلیدی: طراحی رویه بتن غلتکی، بتن غلتکی ($RCCP$)، مصالح بازیافتی، طرح مخلوط، خرابی‌های رویه بتن غلتکی، تعمیر روسازی بتنی

۱- مقدمه

۱-۱ تعریف، کاربرد و مزایای رویه بتن غلتکی

رفت و آمد و حمل و نقل لزوم ایجاد راه‌های مناسب و با دوام را برای بشر مسجل ساخته است (شکل ۱). با وجود قدمت رویه‌های آسفالتی برخی از مشکلات این رویه‌ها منجمله گسترش ترک و متلاشی شدن تدریجی رویه‌ها و یا موّاج و صیقلی شدن آنها همواره ذهن کارشناسان را به خود مشغول نموده است. از سوی دیگر مسائلی نظیر قیمت تمام شده، ضرورت پوشاندن بسترهای ضعیف‌تر، افزایش بار وارده به روسازی، اجبار به استفاده از مصالح سنگی با کیفیت پایین‌تر ضرورت یافتن جایگزین مناسب‌تری برای رویه‌های آسفالتی را روشن ساخت. برای اولین بار تجربه اجرای شفته سیمانی و تفکر استفاده از آن در قالب بتن غلتکی در سدسازی شکل گرفت. لیکن در ادامه و با تحقیقاتی که انجام گرفت، این نوع بتن برای استفاده در رویه‌ها معرفی شد (۱۹۷۶). بتن غلتکی روسازی *(RCCP)* یک ترکیب بتنی سیمانی با اسلامپ تقریب صفر و حرارت هیدراتاسیون کم می‌باشد که به وسیله غلتکهای فلزی، چرخ لاستیکی و ویبره‌ای، متراکم می‌گردد.

شکل ۱- مشکلات تردد و حمل‌ونقل-۱۹۱۲میلادی

از بتن غلتکی در ساخت بندها و سدهای خاکی و وزنی، لایه‌های اساس برای بارگذاری‌های سنگین، اپرون فرودگاه‌ها و محوطه‌های با تردد بالا نظیر بنادر و گمرکات استفاده می‌گردد. مزایای بتن غلتکی را می توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود:

۱- فنی و کاربردی: تامین نیازهای مقاومتی، دوام و امکان بارگذاری بیشتر روسازی، و همچنین حساسیت کمتر بتن نسبت به مواد شیمیایی مانند بنزین، گازوئیل و نیز مواد خورنده، عملکرد بهتر در شرایط محیطی با دمای بالا، نداشتن مشکلات ناشی از نشست.

۲- اقتصادی: در صورت استفاده از رویه‌های بتنی بطور متوسط هزینه‌های ساخت، بهره برداری و نگهداری ۲۵ تا ۵۰٪ نسبت به رویه‌های آسفالتی کاهش می‌یابد/ ۱/. کاهش هزینه‌ها به صورت کلی به علت کاهش هزینه ساخت ناشی از قیمت کمتر مصالح مصرفی، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و ترمیم در دوره بهره برداری، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری نظیر استهلاک وسایل نقلیه و تایرها، زمان صرف شده برای سفر، هزینه تصادفات به دلیل عملکرد ناقص رویه، هزینه مصرف سوخت و نیز افزایش طول عمر و کاهش هزینه تجدید رویه می‌باشد.

۳- سرعت اجرا و کاهش هزینه زمان: روش اجرای سریع *RCCP* در مقایسه با بتن معمولی باعث کاهش قابل ملاحظه هزینه‌ها می گردد. کاهش زمان اجرا علاوه بر مسائل فنی سبب ایجاد یک مزیت اصلی بنام اقتصادی شدن طرح در تعامل با زمان می‌گردد.

۴- زیست محیطی: یکی از اصول اساسی در ساخت بتن غلتکی بهره‌وری کامل از مصالح طبیعی در دسترس و منابع قرضه محلی است. به دلیل صرفه جویی در بکارگیری مصالح در لایه‌های بتنی آسیب کمتری به منابع طبیعی و

محیط زیست وارد می‌گردد. استفاده از رویه‌های بتنی سبب کاهش برداشت از منابع نفتی و نیز جلوگیری از ورود این مواد به عنوان ضایعات به محیط زیست می‌گردد.
با در نظر گرفتن مشکلات و خرابی‌های رویه‌های آسفالتی و تجارب عمومی در این خصوص باید سعی نمود تا در شروع استفاده از رویه‌های بتنی، ذهنیت عمومی نسبت به کارایی و مزایای این نوع رویه‌ها تضییع نگردد. ماحصل تجربه علمی و اجرایی استفاده از *RCCP* در جاده‌های اختصاصی شرکت پریفاب در تیرماه سال۱۳۹۳ با مساحتی بیش از۷۰۰۰ متر مربع در این مقاله ارائه شده است.

۲- مبانی طراحی ضخامت رویه بتن غلتکی

مسلم است فقط در صورت طراحی مناسب می‌توان انتظار دوام و پایایی از عملیات اجرا شده داشت. روسازی بتن غلتکی در گروه روسازی‌های بتنی ساده غیرمسلح درزدار (*JPCP*) دسته بندی می‌گردد و روش‌های طراحی آن به صورت کلی مشابه روش طراحی روسازی‌های بتنی ساده درزدار و به صورت بدون داول می‌باشد. البته تفاوت‌های قابل توجه *RCCP* و روسازی بتنی معمولی (*JPCP*) بدون داول که عمدتاً مربوط به فواصل درزها و عملکرد آنها از نظر انتقال بار می‌باشد نباید از نظر دور نگه داشته شوند.
رده‌های مقاومتی بتن غلتکی عمدتا *C25/30* می‌باشد که معادل مقاومت خمشی در حدود *MPa* ۳/۸ می‌باشد*[۲]*. رده مقاومتی *RCCP* برای مناطق نرمال معمولاً *MPa* ۲۵ و برای مناطق سردسیر دارای یخبندان عموما در حدود *MPa* ۴۰ در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که گاها ممکن است مقاومت خمشی مورد نظر نامشخص باشد، مقادیر معادل با مقاومت فشاری در راهنما *[۳]* آورده شده است؛ همچنین شاخصه مقاومت فشاری ۷ روزه *Mpa* ۲۰/۷-۱۷/۲ برای آزمونه استوانه‌ای می‌تواند نشانه خوبی باشد*[۴]*. بطور مثال پروژه‌ای با طراحی میانگین مقاومت فشاری *MPa* ۵۰، خمشی *MPa* ۵/۳، مدول الاستیسته *MPa* ۳۰۳۲، تجربه مقاومت فشاری ۷ روزه *MPa* ۳۳/۸ و مقاومت فشاری ۲۸ روزه *MPa* ۴۲/۸ برای مغزه‌های بتنی را داشته است *[۵]*.
روسازی‌ها همواره تحت تاثیر انواع تنش‌های فشاری، خمشی، خستگی و کششی قرار دارند؛ اما در طراحی بتن غلتکی تمرکز بر تنش خمشی است *[۶]*. دلیل آنست که احتمالاً شروع اغلب خرابی‌های مهم در این رویه‌ها ناشی از ضعف در تحمل نیروهای خمشی می‌باشد. مقاومت خمشی و مقاومت در برابر خستگی از جمله مهم‌ترین پارامترهای موثر بر ضخامت طراحی محسوب می‌گردند. مقادیر تنش‌ها و خستگی بستگی به محل قرار گرفتن بار چرخ دارد، به طوری که هرچه به لبه نزدیک می‌شویم این مقادیر افزایش می‌یابند. با تغییر اندک ضخامت بتن غلتکی تاثیر بسیار زیادی در کاهش خرابی‌ها مشاهده شده است *[۷]*.
در حال حاضر دو روش مهم برای طراحی ضخامت RCCP وجود دارد، روش انجمن سیمان پرتلند(*PCA*) *[۸]* و روش گروه مهندسین ارتش آمریکا. از روش *PCA* عموما در طراحی روسازی‌های صنعتی استفاده می‌گردد. برای استفاده از روش*PCA* داشتن اطلاعاتی نظیر *i)* مقاومت بستر یا زیر اساس و اساس، *ii)* مقاومت خمشی *RCC*، *iii)* مدول الاستیسیته *RCC*، *iii)* کارآیی درز، *iv)* مشخصات وسایل نقلیه شامل بار چرخ‌ها، فاصله چرخ‌ها، مشخصات تایر، *v)* تعداد تکرار بار در دوره عمر روسازی، *vi)* درصد انتقال الزامی است. اخیراً نیز نرم‌افزار *RCCPave* به کمک طراحان بتن غلتکی آمده تا با توجه به مشخصات فنی موردنظر طراحی مناسب و با دوام به سهولت قابل انجام باشد.

۲-۱ اصول طراحی ضخامت *RCCP* به روش *PCA* و طراحی ضخامت *RCCP* پروژه

قابلیت تحمل بار بستر و زیراساس توسط مدول عکس العمل بستر (*K*) بیان می‌شود. مقدار *K* توسط آزمایش صفحه که زیر بار غیر تکراری قرار می‌گیرد، تعیین می‌شود. از ضریب عکس العمل بستر به عنوان معیار مقاومت خاک استفاده می‌شود.

هنگامی که در اثر تکرار بار تنش وارده بیشتر از مقاومت گسیختگی مصالح باشد خستگی اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه تنش بحرانی در RCC از نوع خمشی است، لذا از خستگی ناشی از تنش خمشی برای طراحی ضخامت RCC استفاده می‌کنیم. در این حالت برای آنالیز عمر خستگی، از اصطلاحی به نام نسبت تنش *(SR)* استفاده می‌شود. نسبت تنش عبارت است از تنش مجاز خمشی طراحی به مقاومت خمشی بتن RCC مورد استفاده در روسازی. نسبت تنش با افزایش تعداد عبور و خستگی کاهش می‌یابد. برای تعداد تکرار بارهای متفاوت نسبت تنش پیشنهادی از مرجع *[۸]* قابل استحصال می‌باشد.

تخمین ترافیک عبوری، فاکتور مهمی در طراحی روسازی است. اطلاعات ترافیکی لازم شامل بزرگی بار چرخ، آرایش چرخ‌ها و فرکانس وارده از طرف سنگین‌ترین وسیله نقلیه عبوری از روسازی می‌باشد. در صورت امکان لیستی از انواع وسایل نقلیه عبوری می‌بایست تهیه شود. معمولا وسیله نقلیه دارای سنگین‌ترین بار نقش کنترلی در طراحی دارد، در عین حال باید سایر وسایل عبوری و تکرار عبور آنها در طراحی مد نظر قرار گیرد. ماکزیمم بار چرخ عبارتست از: نصف بار سنگین‌ترین محور سنگین‌ترین وسیله نقلیه.

با استفاده از گراف مرجع *[۸]* برای محور منفرد با چرخ زوج، تنش ناشی از بارگذاری محور منفرد زوج چرخ (تنش موجود روسازی) محاسبه می‌شود. ضخامت روسازی به گونه‌ای طراحی می‌شود که تنش موجود در روسازی از مقدار مجاز تنش خمشی طراحی بیشتر نباشد.

برای استفاده از گراف طراحی، نیاز به داشتن مقدار سختی نسبی (I) و مساحت بار تماسی با روسازی است. مقدار سختی از رابطه ۱ و مساحت تماس تایری که ماکزیمم بار را تحمل می‌کند با روسازی، از تقسیم بار چرخ بر فشار باد چرخ قابل تعیین است.

رابطه ۱
$$I = [\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K}]^{0.25}$$

که در آن: E مدول الاستیسیته بر حسب پوند بر اینچ مربع، h ضخامت روسازی بر حسب اینچ، μ ضریب پواسون که معمولا برای بتن ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود و K مدول عکس العمل بستر بر حسب پوند بر اینچ مکعب می‌باشد.

با فرض یکسان بودن رفتار آزمونه‌های بتن غلتکی سخت شده و بتن معمولی می‌توان از روابط مقاومت فشاری با مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته (روابط ۲ و ۳) برای بتن غلتکی نیز استفاده نمود. مقادیر ضرائب پشت رادیکال که در روابط مشاهده می‌شود، از تعداد محدودی آزمایش بدست آمده است. این ضرایب برای بتن غلتکی جای تحقیق بیشتر دارد.

رابطه (۲)
$$f_r = 0.747\sqrt{f_c'}$$

رابطه (۳)
$$E = 4733\sqrt{f_c'}$$

در این روابط پارامترها برحسب مگاپاسگال *(MPa)* می‌باشند.

با در نظر گرفتن موارد ذیل ضخامت رویه بتن غلتکی به روش PCA طراحی شد.

بتن غلتکی با رده مقاومتی $C30$ و مقاومت فشاری مشخصه در سن ۲۸ روزه $30\ MPa$ و با توجه به روابط ۲ و ۳ مدول الاستیسیته $25923\ MPa$ و مقاومت خمشی $4/1\ MPa$ برای بتن غلتکی پیش‌بینی شده است.

نوع وسیله نقلیه و تعداد عبور با توجه به اختصاصی بودن خیابان‌های کارخانه، ترافیک غیر حجیم ولی سنگین، با مطالعات اولیه بر اساس وسیله نقلیه کامیون سنگین، با وزن کل ۲۰ تن معادل گردید. با در نظر گرفتن فاصله زمانی ۱۵ دقیقه برای هر عبور، که برای سایر کامیونهای حمل مصالح در این محور نیز معادل سازی شد تعداد عبور طی شبانه روز ۹۶ بار تعیین شد. لذا با توجه به پیش بینی افق طرح رویه بتنی برای ۱۰ سال، ترافیک کل عبوری در افق طرح ۳۴۶۵۶۰ عبور تعیین گردید. همچنین نسبت تنش از مرجع *[۸]* مقدار ۰/۴۲ =SR تعیین شد.

بنابراین تنش مجاز خمشی طراحی روسازی:

$\sigma_{\text{تنش مجاز خمشی طراحی}} = 0.42 * 4.1 = 1.72\ MPa$

CBR خاک بستر برابر ۱۰ به طور محافظه کارانه در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن تاثیر مثبت زیر اساس بر ضریب عکس العمل بستر، با توجه به ضخامت لایه زیر اساس میزان K قابل افزایش است. لذا به طور محافظه کارانه ضریب عکس العمل بستر بدون اثر مثبت ضخامت زیر اساس برابر با ۲۰۰ پوند بر اینچ مکعب خواهد بود.

با در نظر گرفتن کامیون سنگین با محور ساده ۱۳ تن و زوج چرخ و کامیون فوق سنگین با محور ۲۴تن زوج چرخ به عنوان ترافیک عبوری از روسازی و با منظور نمودن فشار باد چرخ به مقدار ۱۲۰ پوند بر اینچ مربع طراحی ضخامت برای این ترافیک انجام شد. لذا با توجه به گراف مرجع *[۸]* و با محاسبه سختی I طبق رابطه ۱، تنش ناشی از بارگذاری برای محور منفرد زوج چرخ پس از حصول F از گراف، برای ضخامت h و بار P، طبق رابطه ۴ قابل محاسبه است.

رابطه (۴)

$$\sigma = \frac{\frac{P}{1000}}{h^2} * F$$

تنش مجاز و تنش ناشی از بارگذاری محور ساده زوج چرخ برای دو کامیون سنگین و فوق سنگین در جدول ۱ محاسبه شده است. مورد توجه است اگر تنش روسازی با ضخامت ۹ اینچ برای کامیون سنگین نیز محاسبه شود، مقدار MPa ۰/۵۷ حاصل شده که نشان می‌دهد با افزایش ۵۰ درصد ضخامت رویه (با مقایسه با ۶ اینچ)، حدود ۶۶ درصد تنش روسازی کاهش می‌یابد.

جدول ۱- محاسبه ضخامت برای دو محور ساده زوج چرخ با نیروهای متفاوت به روش PCA برای بتن غلتکی پروژه اجرایی

کنترل	تنش مجاز *MPa*	تنش موجود *(Psi)-Mpa*	F	I *(in)*	سطح تماس(a) (in^2)	بار چرخ منفرد *(lb)*	بار زوج چرخ *(lb)*	h *(in)*	بار محور مورد طراحی محور ساده زوج چرخ	
K.O	*۱/۷۲*	*(۳۲۰)-۲/۲۱*	۸۰۰	۲۴/۲۵	۶۰	۷۲۲۲	۱۴۴۴۴	۶	۲۸۸۸ *Lb*-۱۳*t*	کامیون سنگین
K.O	*۱/۷۲*	*(۳۶۶)-۲/۵۲*	۸۷۵	۳۰/۱	۱۱۱	۱۳۳۳۳	۲۶۶۶۶	۸	۵۳۳۳۳ *Lb*-۲۴*t*	کامیون فوق سنگین
OK	*۱/۷۲*	*(۲۵۶)-۱/۷۶*	۸۷۰	۲۷/۲۲	۶۰	۷۲۲۲	۱۴۴۴۴	۷	۲۸۸۸ *Lb*-۱۳*t*	کامیون سنگین
K.O	*۱/۷۲*	*(۳۱۶)-۲/۱۸*	۹۶۰	۳۲/۸۷	۱۱۱	۱۳۳۳۳	۲۶۶۶۶	۹	۵۳۳۳۳ *Lb*-۲۴*t*	کامیون فوق سنگین

با توجه به اینکه اغلب روش PCA محافظه کارانه است، از ارائه و بررسی ضخامت به روش آشتو صرف نظر شده است. لذا با توجه به تجارب گذشته و مطالعات انجام شده و به درخواست کارفرما با فرض ترافیک عبوری کامیون سنگین با وزن حداکثر محور ساده ۱۳ تن و چشم انداز ۱۰ساله، طراحی روسازی بتن غلتکی با ضخامت ۷ اینچ و ۱۸ سانتیمتر نهایی شد. حداقل و حداکثر ضخامت رویه بتن غلتکی با کابری‌های و بسترهای مختلف به ترتیب ۴ تا ۹ اینچ (حدود ۱۰الی ۲۳ سانتیمتر) توصیه شده است *[۸]*.

۳-مبانی طراحی مخلوط رویه بتن غلتکی

با نگاهی به روش‌های طرح مخلوط گروه مهندسین ارتش آمریکا *ACI 211-3R*، طرح مخلوط *RCCP* به روش انجمن سیمان پرتلند (*PCA*) با رویکرد تراکم خاک و بتن متراکم شده با غلتک *RCD* (روش ژاپنی) می‌توان به طرح مخلوط مناسب *RCC* رسید. تلفیق و جمع‌بندی هر سه روش اطلاعات جامع‌تری را در اختیارمان قرار می‌دهد. خلاصه هر یک از روش ها به شرح زیر بوده و با توجه به معیارهای طراحی مخلوط در روش *RCD* اغلب این روش برای بتن غلتکی سدسازی مناسب است و از شرح آن صرف نظر می‌شود.

در روش *ACI* یا آمریکایی بررسی کارایی بتن با دستگاه وی بی اصلاح شده طبق استاندارد *ASTM C1170* انجام می‌شود. حدود نتیجه وی بی اصلاح شده با سر بار *kg* ۲۲/۷ بین ۳۰ تا ۴۰ ثانیه و گاه تا ۴۵ ثانیه مطلوب است.

اگر سربار ۱۳ کیلوئی استفاده شود این زمان طبعاً افزایش یافته و بیش از ۴۵ ثانیه نیز مطلوب خواهد بود. در این روش از سه عیار سیمان مثلاً $300\ kg/m^3$ و ۳۲۵ و ۳۵۰ استفاده می‌شود. نسبت آب به سیمان با توجه به رده مقاومتی و کارایی مورد نظر و اغلب در محدوده ۰/۴۰ – ۰/۳۵ انتخاب شده و طبق رابطه حجم مطلق با فرض هوای ۲ درصد، حجم و وزن سنگدانه‌ها محاسبه شده و با توجه به منابع در دسترس نسبتهای شن و ماسه و... با در نظر گرفتن منحنی ترکیبی سنگدانه‌ها مشخص می‌گردد. پس از ساخت مخلوط بتن طبق استاندارد *C1170*، زمان وی بی اصلاح شده بدست می‌آید. در هر صورت برای عیارهای مورد نظر با توجه به شرایط جوی، مقاومتی، اجرایی و ... تا رسیدن به زمان وی بی لازم با نسبتهای آب به سیمان متفاوت طراحی و ساخت انجام می‌شود. در نهایت وزن مخصوص بتن مقبول در شرایط متراکم تازه اندازه‌گیری و آزمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی و درصد جذب آب در سنین مورد نظر تهیه می‌شوند. با توجه وزن مخصوص بتن، مقاومت و درصد جذب آب، طرح مخلوط بهینه و اقتصادی انتخاب می‌گردد.

در روش طرح مخلوط با خمیر زیاد، در ابتدا دانه‌بندی مورد نظر، منطبق با شرایط موجود اجرایی و با در نظر گرفتن منحنی ترکیبی مناسب تعیین می‌گردد. سپس درصد مواد سیمانی (مقدار سیمان تقسیم بر مجموع اوزان سنگدانه خشک و سیمان) با توجه به شرایط منطقه در حدود ۱۵-۱۳درصد در نظر گرفته می‌شود. سپس برای هر یک از سه عیار سیمان تعیین شده، آزمایش تراکم در محدوده ۴/۵ تا ۸/۵ درصد رطوبت (درصد رطوبت مقدار آب تقسیم بر اوزان خشک سیمان و سنگدانه و به نوعی مشابه آب کل در بتن است) با افزایش یک درصد انجام می‌شود. در نهایت با آزمایش تعیین درصد بهینه رطوبت براساس استاندارد *ASTM D 1557*، رطوبت بهینه و وزن مخصوص حداکثر برای هر عیار و نسبت مواد سیمانی تعیین می‌شود. سپس با هر درصد سیمان و رطوبت بهینه، بایستی به تعداد مورد نیاز در سنین مختلف طبق *ASTM C1176* (به روش میز لرزان و وزنه استاندارد) یا *ASTM C1435* (به روش چکش لرزان) از بتن آزمونه جهت آزمایش مقاومت فشاری، کششی و درصد جذب آب تهیه شود. پس از انجام آزمایش‌های لازم، در مورد انتخاب یک طرح مناسب و اقتصادی که الزامات پروژه را برآورده سازد تصمیم‌گیری می‌شود. در آزمایش تراکم برای هر آزمایش با هر عیار و هر رطوبت حدود حداقل ۹ کیلو سنگدانه لازم است و در هر تغییر رطوبتی بهتر است از ابتدا با مصالح اولیه مخلوط ساخته شود.

۴- برنامه آزمایشگاهی طراحی مخلوط رویه بتن غلتکی پروژه تحقیقاتی

طراحی مخلوط *RCCP* جهت اجرا طبق مقاومت فشاری هدف صورت گرفته است. چنانچه از ضوابط پذیرش *ACI* ۲۱۴*R* استفاده شود حاشیه امنیت *MPa* ۸-۷ کاملا منطقی است. در هر صورت طراح می‌تواند حاشیه امنیت را همانند بتن معمولی با توجه به رده مقاومتی در نظر گرفته و با توجه به نتایج کارگاهی انحراف معیار و متوسط مقاومت فشاری لازم را تعیین نموده و تغییرات جزئی طرح مخلوط را اعمال نماید. در این تحقیق چندین طرح مخلوط بتن غلتکی با رده مقاومت مشخصه *MPa* ۳۰ و مقاومت فشاری هدف *MPa* ۳۵ در دو حالت استفاده از پودر سنگ آهک و ماسه بادی به عنوان پسماند خط تولید مصالح سنگی در آزمایشگاه ساخته و بررسی گردیده است. طراحی مخلوط بتن غلتکی با روش‌های مبتنی بر وی بی اصلاح شده و تراکم ژئوتکنیکی صورت گرفت. معیار اولیه در پذیرش بتن حتی با وجود صفر بودن تقریبی اسلامپ، نداشتن جداشدگی بوده است.

۴-۱ انتخاب مصالح

در کلیه طرح‌های مخلوط آزمایشگاهی و طرح اجرایی از سیمان تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان تهران استفاده شده است. آب مصرفی در ساخت و عمل‌آوری بتن، آب مورد استفاده در کارخانه که از منابع آب زیرزمینی تأمین شده است می‌باشد. مشخصات آب مصرفی با آزمایش تعیین و نتایج حاصل از آزمایش، الزامات بند ۹-۳-۴-۲ و جدول ۹-۳-۱۸ از مرجع [۹] را برآورده نموده است. مصالح سنگی مورد استفاده در طرح‌های اجرایی و تحقیقاتی از مصالح

تولیدی کارخانه پریفاب می‌باشد. مشخصات مصالح سنگی در جدول ۲ آورده شده است. همچنین منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

از ماسه شکسته کوهی حاصل از خردایش سنگ باطله‌های کارخانه سیمان که به دلیل بالا بودن مقدار مصالح عبوری از الک نمره ۲۰۰ (با خاصیت غیر خمیری) به عنوان مصالح غیر استاندارد به مدت چندین ماه در محل جداگانه‌ای دپو شده بود استفاده گردیده است. از پسماندهای حاصل از شستشوی شن و ماسه که در حوضچه‌های آرامش (فوقانی) کارخانه انبار گردیده بود ماسه بادی استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است. از ماسه شکسته کوهی و شسته به نسبت وزنی یکسان (۵۰-۵۰) به عنوان بخش اصلی ریزدانه استفاده گردید (شکل۲)؛ و سپس ماسه ترکیبی ساخته شده با استفاده از ماسه بادی اصلاح گردید. منحنی ماسه ترکیبی اصلاح شده دقیقا در وسط محدوده منحنی‌های بتن معمولی در استاندارد *ISIRI 302* قرار گرفت.

ماسه شسته و شن نخودی مورد استفاده حاصل از فرآیند خردایش، جدایش(الک شدن) و شستشو مخلوط‌های شهری می‌باشد.

حداکثر اندازه سنگدانه در مخلوط برای دستیابی به سطح نهایی مناسب و نفوذناپذیر به $۱۰mm$ (شن نخودی با درصد سایش و شکستگی به ترتیب ۲۱ و ۹۱ درصد) محدود شد. کاهش حداکثر اندازه سنگدانه به جهت تقویت ناحیه اتصال خمیر و سنگدانه به ویژه در بتن‌های با رده مقاومتی بالا و بتن‌های غلتکی بسیار مؤثر است. در اغلب پیشنهادها به واسطه مقاومت در برابر سایش حداکثر اندازه سنگدانه‌ها به ۱۲/۵ میلیمتر محدود شده است. براساس نتایج آزمایشگاهی و اجرایی پروژه‌های مشابه داخلی عیار سیمان در محدوده ۳۷۵ تا ۴۰۰ کیلوگرم مناسب تشخیص داده شده است. مشخصات سیمان مصرفی نیز در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

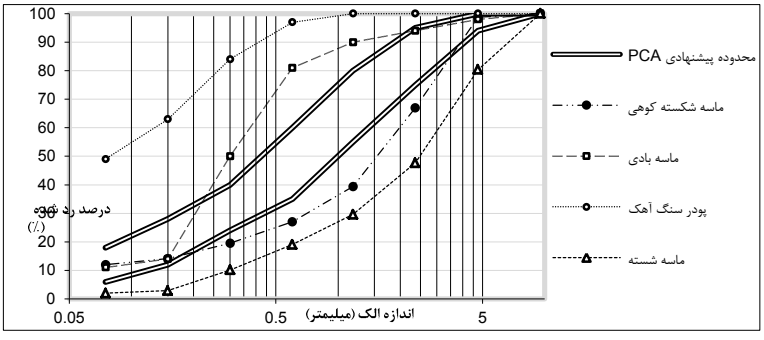
جدول ۲- دانه‌بندی و سایر مشخصات مصالح سنگی

محدوده ماسه *PCA*		پودر سنگ آهک	ماسه بادی	ترکیب مساوی وزنی ۱و۲	ماسه شکسته کوهی۲	ماسه شسته۱	شن ریز (نخودی)	شماره و اندازه الک	
Min	*Max*							-	*mm*
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۱/۲ اینچ	۳۷/۵
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱ اینچ	۲۵
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳/۴ اینچ	۱۹
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱/۲ اینچ	۱۲/۵
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۹	۳/۸ اینچ	۹/۵
۹۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۹۳	۹۹	۸۸	۱۳	نمره ۴	۴/۷۵
۷۵	۹۵	۱۰۰	۹۴	۶۳	۶۷	۵۹	۱	نمره ۸	۲/۳۶
۵۵	۸۰	۱۰۰	۹۰	۳۸	۴۱	۳۵	-	نمره ۱۶	۱/۱۸
۶۰	۳۵	۸۱	۸۱	۲۲	۲۹	۲۲	-	نمره ۳۰	۰/۶
۴۰	۲۵	۶۸	۵۰	۱۶	۲۲	۱۱	-	نمره ۵۰	۰/۳
۲۸	۱۲	۵۲	۱۴	۹	۱۵	۳	-	نمره ۱۰۰	۰/۱۵
۱۸	۶	۴۶	۱۱	۷/۲	۱۳	۱/۴	۰/۹	درصد عبوری از الک ۲۰۰	
-	-	۰/۹۹	۱/۷۴	۳/۵۵	۳/۲۸	۳/۸۳	۵/۹۷	مدول نرمی(*FM*)	
-	-	*۲/۷۰	*۲/۶۱	*۲/۶۰	۲/۵۹	۲/۶	۲/۶۸	چگالی *SSD*	
-	-	*۵٪	*۳/۸۴٪	*۲/۹۳	۳/۵٪	۱/۳۲٪	۰/۹٪	جذب آب مصالح	

* توضیح در پایین جدول

جذب آب و چگالی ماسه بادی به طور تقریب مانند ماسه تعیین شده است. جذب آب و چگالی پودر سنگ آهک به طور فرضی به ترتیب ۵ درصد و ۲/۷ تن در واحد حجم تعیین شده است. نسبت آب به سیمان با این فرض تعیین شده است. همچنین نتیجه جذب آب و چگالی ماسه ترکیبی بیش از میانگین نتایج تئوری هر یک بوده ولیکن

منحنی دانه‌بندی واقعی ماسه ترکیبی با منحنی تئوری حدودا یکسان بوده است. هرچند از مشخصات تفکیکی هر یک و با نسبت تقریبا یکسان در طرح مخلوط استفاده شده است. با توجه به طرح اختلاط به هر دو روش و تعیین درصد رطوبت (آب کل) با خشک کردن بتن تازه، لذا فقط جهت ارائه نسبت آب به سیمان موارد فوق بیان شد.



شکل ۲ – ماسه شکسته کوهی، شسته، ترکیبی (راست) - منحنی دانه‌بندی ریزدانه و محدوده ریزدانه مطابق مرجع [۷](چپ)

جدول ۳- مشخصات شیمیای، فیزیکی و مکانیکی سیمان تیپ ۲ تهران

Chemical composition & phases (%)														
IR	*SiO2*	*Al2O3*	*Fe2O3*	*CaO*	*MgO*	*SO3*	*Na2O+0.658K2O*	*Loss*	*cl*	*C3S*	*C2S*	*C3A*	*C4AF*	*F/CaO*
۰/۶	۲۲/۷۴	۵	۴	۶۳/۰۴	۲	۲/۳	۱	۱/۳	۰/۰۳۵	۴۵/۵	۲۸	۶/۵	۱۲/۲	۰/۷۰

Physical & Mechanical tests						
Retained on Sieves (90μ)	*Blaine Cm^2/gr*	*Setting time(min)*		*Compressive strength(Kg/cm^2)*		
		Initial setting time	*Final setting time*	*3 days*	*7 days*	*28 days*
۵/۹۸	۲۹۱۲	۱۳۹	۱۷۸	۱۲۶	۲۰۵	۳۵۷

مرجع[۸] برای شن استفاده شده در RCC[1]، همان محدوده مرجع [۹] را با حداکثر اندازه ۱۹میلی‌متر برای بتن‌های معمولی پیشنهاد داده است. با مقایسه محدوده ریزدانه (ماسه) در NC[2] و RCC در مقایسه مراجع مشاهده می‌شود (شکل۲) که ماسه‌ها ریزتر شده‌اند. این نرمی بویژه در قسمت پایین منحنی آشکارتر است. همچنین ماسه‌های استفاده شده برای RCC باید دارای ۶ تا ۱۸ درصد ریزدانه عبوری از الک نمره ۲۰۰ باشند در صورتی که برای ماسه‌های استفاده شده در بتن‌های معمولی این مقدار به ۵ درصد محدود گردیده است. از آن جا که مصالح براساس استاندارد برای بتن معمولی تولید می‌شود، اصلاح آن ها جهت استفاده در رویه های بتنی غلتکی الزامی می‌باشد. هرچند اغلب ماسه‌های تولیدی در ایران جهت مصرف در بتن‌های معمولی و خودتراکم نیز نیاز به اصلاح دارند.

۲-۴ ضرورت رعایت محدوده دانه‌بندی در طراحی مخلوط بتن

اصولاً در بتن از سنگدانه‌های گرد و تیز گوشه (شکسته و نشکسته) استفاده می‌شود (مورد توجه است تعاریف شکسته، نشکسته، تیزگوشه و گردگوشه متفاوت است). دانه‌های گرد در مقایسه با دانه‌های نامنظم و گوشه‌دار در بتن علاوه بر ایجاد بافتی همگن با کارایی مناسب موجب کاهش مصرف سیمان (بدلیل کمتر بودن سطح ویژه در مقابل دانه‌های شکسته) می‌گردد. از نظر مقاومت نهائی، بتنی که با سنگدانه‌های گوشه‌دار ساخته می‌شود به دلیل امکان درگیر شدن بهتر سنگدانه‌ها با یکدیگر و برقراری اصطکاک بهتر بین آن‌ها، مقاوم‌تر خواهد بود. معمولاً سعی می‌شود از ترکیب هردو (سنگدانه های ریز گردگوشه یا طبیعی و شن‌های شکسته) با بهترین حالت دانه‌بندی استفاده شود. از مهمترین عوامل در برابر مقاومت و دوام بتن میزان درصد هوای ناخواسته موجود در بتن است. به عنوان مثال برای مخلوط‌های بتنی با میزان سیمان و آب ثابت، بیشترین مقاومت برای بتنی حاصل می‌شود که

[1] *Roller Compacted Concrete*
[2] *Normal Concrete*

مصالح سنگی موجود در بتن، سطح ویژه بیشتر و فضای خالی حداقل را با مناسب‌ترین دانه‌بندی ایجاد نمایند. البته بسیار مهم است که بتن از نظر کارایی نیز مناسب باشد. بدین منظور برای جلوگیری از فضای خالی و یا ایجاد سطح ویژه بسیار زیاد (که متقابلاً با ثابت بودن مقدار آب، کارایی را کاهش می‌دهد) در دانه‌بندی محدوده‌هایی تعیین شده است. هنر یک طراح مخلوط بتن، دستیابی به بهینه‌ترین ترکیب اجزاء تشکیل دهنده بتن در برابر نتایج متناقض فاز خمیری (کارایی) و سخت شده (مقاومت و ....) است.

۴-۳ روش‌های اصلاح دانه‌بندی *RCC* مطابق با مصالح سنگی موجود

ماسه‌های مصرفی در ایران دارای ذرات ریز کم (درصدهای عبوری از الک نمره ۵۰ و ۱۰۰) و مدول نرمی زیاد هستند و این امر منجر به خشن شدن ماسه، مخلوط سنگدانه و در نهایت بتن می‌گردد.

امروزه می‌توان با استفاده از هیدروسیکلون‌های پیشرفته و مدیریت عملکرد آن ها، از هدر رفتن ذرات تا ۱۰۰ میکرون نیز جلوگیری نمود. استفاده از ریزدانه‌هایی مانند پودر سنگ آهک، پوزولان، خاکستر بادی، و بعضاً افزایش عیار سیمان و بکارگیری میکروسیلیس در بتن‌های با رده‌های مقاومتی بالا، علاوه بر بهبود کارایی، سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام طرح مورد نظر نیز می‌گردد لیکن استفاده از این مصالح ریزدانه صنعتی افزایش بهای تمام شده و غیر اقتصادی شدن طرح و اغلب صعوبت در اجرا می‌گردند.

یکی دیگر از راهکارهای رفع مشکل، استفاده از پودر سنگ و راه حل دیگر استفاده از ماسه بادی به صورت کنترل شده است.

هرچند ممکن است به نظر برسد افزایش ریزدانه به دلیل افزایش سطح ویژه موجب تقاضای بیشتر آب می‌گردد، اما در صورت تامین ریزدانه لازم در مخلوط سنگدانه، می‌توان سهم ماسه را کاهش و حتی بعضا از حداکثر اندازه اسمی بالاتر استفاده نمود. در عمل نیز ثابت شده است که تعیین سهم فیلر بهینه به علت کاهش سطح ویژه ترکیب سنگدانه‌ها برخلاف افزایش سطح ویژه ریزدانه، بعضا کاهش مصرف سیمان در یک کارایی یکسان را به دنبال دارد.

از جمله نتایج استفاده بهینه از ذرات ریزتر از ۰/۳ میلیمتر در بتن، ۱) افزایش کارآیی ضمن کاهش روانی (تراکم پذیری و خوشکاری و ماله خوری بهتر)، ۲) کاهش جمع شدگی ۳) کاهش آب انداختگی، ۴) کاهش استعداد جداشدگی و امکان بتن‌ریزی بهتر در ستون و دیوارها، ۵) کاهش مصرف سیمان به علت جایگزینی و پر شدن فضای بین سنگدانه‌ها، ۶) افزایش قابلیت پمپاژ ، ۷) امکان ساخت بتن خودتراکم، ۸) ایجاد نما و ظاهر بهتر ، ۹) کاهش ترک‌های موئینه و نفوذ ناپذیرتر شدن، ۱۰) افزایش دوام آن می‌باشد.

۴-۴- اصلاح دانه‌بندی با ماسه بادی و روش‌های کنترل

به منظور استفاده از ماسه بادی برای اصلاح منحنی دانه بندی، رفتار خمیری و عبوری از الک ۲۰۰ آن، از نظر خاصیت رسی و لای‌دار بودن با آزمایش‌های حدود اتربرگ طبق استاندارد *ASTM D 4318*، بررسی شده است که شرایط قابل قبول (*NPI*) را داشته است. منحنی دانه‌بندی (بخش هیدرومتری) ماسه بادی و پودر سنگ آهک صنعتی قم تکمیل شد. مشاهدات حین آزمایش و تغییرات زمان سقوط ذرات ریز تا حدودی به قضاوت مهندسی درخصوص رفتار ماسه بادی کمک می‌نماید.

به عنوان مثال حداکثر مقدار استفاده از ماسه‌بادی در بتن‌های خودتراکم و یا معمولی به اندازه‌ای است که حداکثر درصد عبوری از الک ۲۰۰ در کل ماسه‌ها (ماسه شسته+ماسه بادی) از ۵٪ مقدار مجاز [۹] متجاوز نگردد. اما آنچه که مهم‌تر است و باید همزمان با شرط قبلی کنترل شود، مقدار درصد عبوری از الک ۲۰۰ در ترکیب سنگدانه‌هاست. می‌توان حداکثر مقدار وزنی مجاز عبوری از الک ۲۰۰ در ترکیب سنگدانه‌ها (ماسه ۵٪ و شن ۱٪ وزن مصرف شده) را با مقدار وزنی موجود در ترکیب مصالح سنگی مقایسه نمود. این مقدار تابعی از سهم هر نوع مصالح سنگی و درصد عبوری از الک ۲۰۰ همان جزء مصالح، در ترکیب سنگدانه‌هاست.

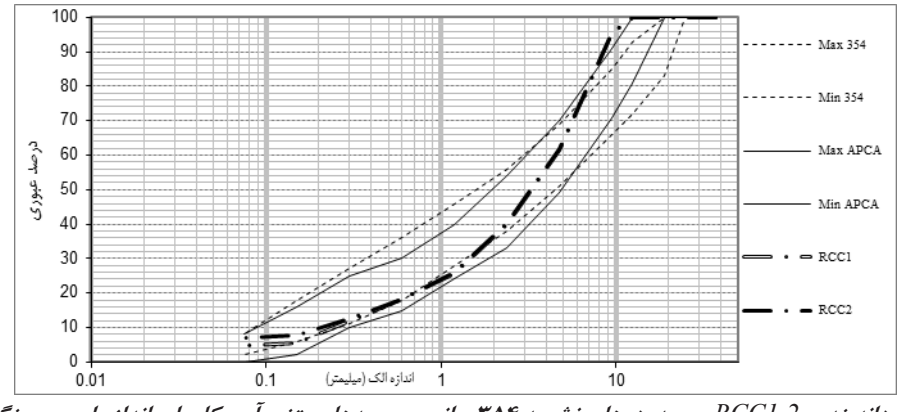
مقدار ماسه بادی در بتن‌های غلتکی تا رسیدن مقدار عبوری الک نمره ۲۰۰ به ۸ درصد کل مصالح مجاز است. در این بتن‌ها نیازی به کنترل عبوری ۲۰۰ در ماسه‌ها نیست. حداکثر سهم ماسه بادی در راستای کنترل عبوری از الک ۲۰۰ ترکیب سنگدانه‌ها، به کمتر از ۲۰٪ محدود شده است.

۴-۵ مقایسه طرح مخلوط حاوی ماسه بادی با طرح مخلوط مشابه حاوی پودرسنگ آهک

منحنی ترکیبی سنگدانه‌ها از مهمترین عوامل در نتایج فاز خمیری و سخت شده بتن است. ترکیب مناسب سنگدانه ها در مقدار عیارسیمان، آب و به تبع آن در مصرف بهینه افزودنی، کارایی بتن، اقتصاد طرح مخلوط، دوام و ... نقش اساسی ایفا می‌کند.

آنچه در مورد دانه‌بندی مخلوط سنگدانه در منابع[۳ و ۴] و [۶ و ۸] و [۱۰] دیده می‌شود جنبه توصیه‌ای دارد و اتفاق نظر وجود ندارد. محدوده ترکیب سنگدانه‌های بتن غلتکی پیشنهادی مرجع [۱۰]، برای حداکثر اندازه‌های اسمی مختلف ارائه شده است مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

سهم مصالح در طرح‌ها به گونه‌ای تعیین شده است که نمودار دانه‌بندی ترکیب مصالح طرح، در محدوده مناسب پیشنهادی مرجع *[۳]* به ویژه در قسمت ریزدانه ترکیب دانه‌بندی (عبوری از الک ۳۰) قرار گیرد. مورد توجه است که مرجع *[۱۰]* حدود ۳ ماه پس از اجرای پروژه ارائه شده است. در شکل ۳ محدوده دانه‌بندی مرجع *[۳]* و *[۱۰]* و همچنین منحنی ترکیبی مصالح سنگی بتن غلتکی پروژه مذکور در دو حالت با ماسه بادی (*RCC1*) و پودر سنگ آهک (*RCC2*) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی RCC1,2 و محدوده‌های نشریه ۳۵۴ و انجمن رویه‌های بتنی آمریکا برای اندازه اسمی سنگدانه ۱۲/۵ م.م

در جدول۴ طرح اختلاط نهایی کاربردی با ماسه بادی و پودر سنگ آهک نشان داده شده است. نسبت آب به سیمان با توجه به مشخصات مصالح (جدول ۲) و با توجه به عدم اطمینان قطعی از مقدار جذب آب فیلر به طور تقریب تعیین شده است. جدول ۵ مشخصات فاز خمیری و سخت شده (مقاومت فشاری و دو نیم شدگی) طرح مخلوط نهایی بتن غلتکی در آزمایشگاه حاوی پودر سنگ آهک و ماسه بادی و نتایج یک مرحله نمونه گیری در مرحله اجرایی را نشان می‌دهد. از هر طرح مخلوط ۴ آزمونه استوانه‌ای مطابق استاندارد *ASTM C1176* (به روش میز لرزان و وزنه استاندارد) تهیه و آزمایش مقاومت فشاری و کششی برزیلی مطابق با استانداردهای *C496, BS ASTM 1881* انجام شد. ۴ عدد آزمونه مکعبی *۱۵Cm* با وزنه‌ای معادل وزنه آزمونه استوانه و در سه لایه برای تعیین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه تهیه شده است. در معادل سازی تهیه آزمونه مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری از بتن غلتکی بعضا در شکست آزمونه‌ها شکل ظاهری شکست نامناسب بوده که احتمالاً به علت قرارگیری توزیع تنش به موازات سطوح تراکم لایه‌ها است. آزمونه‌های مکعبی *۱۰Cm* جهت تعیین جذب آب حجمی مطابق با *BS 1881-P122* با وزنه‌ای معادل نیمی از وزنه آزمونه استاندارد (*۴/۵Kg*) در دولایه تهیه شدند. پس از تعیین جذب آب حجمی مقاومت کششی آزمونه‌ها مطابق با استاندارد *EN12390-P6* به صورت کششی تعیین شد. انجام

آزمایش وی بی اصلاح شده، تعیین چگالی ماکزیمم، تهیه آزمونه از *RCC* و وزنه‌های معادل در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در مرحله ساخت رطوبت مصالح نزدیک به صفر و نسبتا خشک بوده است. کنترل آب با انجام درصد رطوبت و تجربی و پس از ساخت به صورت اتفاقی در مراحل ابتدایی با آزمایش وی بی اصلاح شده کارایی نیز کنترل شده است. به علت شرایط جوی در مرحله اجرا رطوبت بتن غلتکی با اغماض ۰/۵ درصد بیش از رطوبت بهینه و زمان وی بی اصلاح شده به ۲۵ تا ۳۲ ثانیه محدود شده است. هرچند در مرحله اجرا و پس از پخش نمودن ممکن است رطوبت به حالت اپتیمم و چگالی نیز به حداکثر خود نزدیک شده باشد. مورد توجه است بیش از ۸۰ درصد پروژه با طرح اختلاط *RCC1* اجرا شده است.

جدول ۴ - مشخصات طرح اختلاط‌های بتن غلتکی اجرا شده در کارخانه پریفاب-اوزان خشک

شماره طرح	*C* عیار سیمان $\frac{kg}{m^3}$	مقدار آب کل و نسبت آب به سیمان تقریبی	*Geravel* شن نخودی		*Sand* ماسه شسته		ماسه شکسته کوهی		*Filer* پودر سنگ آهک		ماسه بادی	
			$\frac{kg}{m^3}$	% *AV*	$\frac{kg}{m^3}$	% *AV*	$\frac{kg}{m^3}$	% *AV*	$\frac{kg}{m^3}$	% *AV*	$\frac{kg}{m^3}$	% *AV*
RCC1	۴۰۰	۱۷۵- (۰/۳۵۵)	۷۵۰	۴۰	۴۹۰	۲۷	۴۹۰	۲۷	–	–	۱۱۵	۶
RCC2	۴۰۰	۱۸۳- (۰/۳۶۵)	۷۵۰	۴۰	۴۹۰	۲۷	۴۹۰	۲۷	۱۲۰	۶	–	–

% Aggregate Volume (AV)= سهم حجمی هر سنگدانه در ترکیب حجمی سنگدانه‌هاست که در هر دو طرح مخلوط بتن غلتکی با فرض ۱/۵٪ هوای ناخواسته، حجم سنگدانه‌ها ۷۲٪ از کل حجم بتن غلتکی بوده است.

جدول ۵ – نتایج حداکثر چگالی خشک و نتایج فاز سخت شده طرح اختلاط‌های بتن غلتکی اجرایی به همراه نتایج یک مرحله نمونه گیری کارگاهی

شماره طرح	رطوبت بهینه ٪	چگالی خشک واقعی *(Kg/m³)*	زمان وی‌بی اصلاح شده (ثانیه)	مقاومت فشاری ۷ روزه مکعبی معادل *(MPa)*	مقاومت فشاری ۲۸ روزه *(MPa)*			مقاومت کششی ۲۸ روزه *(MPa)*		جذب آب مکعبی معادل٪	
					استوانه ای	مکعبی معادل	کارگاهی	استوانه ای	مکعبی معادل	اولیه	نهایی
RCC1	٪۷/۸	۲۴۳۶	۳۳	۳۰/۱	۴۴/۱	۳۱/۶	۳۸/۴	۳/۹۶	۳/۶۸	۱/۲۵	۲/۴۱
				۴۷/۲	۲۷/۷	۴۱/۹	۳۲/۳	۴/۲۱	۵/۲۸	۱/۲۴	۲/۳۵
RCC2	٪۸/۱	۲۴۵۳	۳۵	۴۴/۴	۳۵/۱	۴۳/۶	-	۴/۵۳	۵/۰۵	۰/۹۷	۲/۲۱
				۴۵/۶	۲۷/۶	۴۷/۱	-	۴/۱۵	۴/۷۸	۱/۰۸	۲/۲۳

شکل ۴ –آزمایش تراکم اصلاح شده و تعیین چگالی خشک ماکزیمم، زمان وی بی اصلاح شده، و تهیه آزمونه از RCC در آزمایشگاه

۵- مراحل تولید و اجرای *RCCP* در کارخانه پریفاب

۵-۱ انبارش مصالح

در مورد انبار کردن سیمان و آب عینا مانند بتن معمولی عمل شده است. سنگدانه‌ها نیز مانند بتن معمولی انبار شده است. بهتر است فیلر جداگانه انبار و مصرف شود. به نظر می‌رسد شکستن دانه‌ها برای ایجاد فیلر بیشتر توجیه دارد. بهتر است شن‌ها نیمه شکسته یا صد درصد شکسته باشند تا مقاومت فشاری و کششی بتن به ازاء نسبت آب به سیمان ثابت بهبود یابد.

۲-۵ تولید و حمل بتن *RCC*

کنترل رطوبت سنگدانه‌ها روزانه حداقل دو مرتبه انجام شده و اصلاح رطوبتی طرح مخلوط بتن صورت می‌گیرد. برای کنترل نسبت آب به سیمان و تا حدودی کارایی بتن غلتکی، درصد رطوبت بتن با خشک کردن سریع تعیین شده و با آب کل بتن مقایسه می‌گردد. هرچند کارایی بتن در هنگام ساخت، چند مرحله با نتیجه آزمایش وی بی اصلاح شده کنترل شده است. بدین منظور مقدار رطوبت برای دستیابی به چگالی حداکثر همراه با زمان وی بی اصلاح شده مورد نظر (۳۰ ثانیه) با ارتباط بین دو روش ACI و PCA در طرح‌ها مد نظر قرار گرفت. اختلاط بتن با مخلوط کن تغاری (پره جدا از دیگ) با ظرفیت اسمی ۰/۵ متر مکعب انجام گرفته است. مخلوط کن‌های پیوسته برای ساخت بتن‌های غلتکی رایج است به ویژه اگر حجم بتن در هر ساعت از حدود ۸۰ مترمکعب بیشتر باشد.

بتن سفت با اسلامپ صفر به سختی مخلوط می‌شود و عملا از تراک میکسر نیز تخلیه نمی‌گردد. ساخت بتن به صورت وزنی و برای مقادیر آب و سیمان با خطای کمتر از ۱درصد و مصالح سنگی نیز با خطای حداکثر ۲ درصد بوده است. زمان اختلاط بتن غلتکی معمولا بیشتر از بتن معمولی منظور می گردد. در صورت استفاده از روان کننده نیز زمان اختلاط افزایش می‌یابد. برای بررسی کارایی RCC به صورت کارگاهی (چشمی)، با فشردن بتن در یک دست و باز کردن دست، بتن باید کاملاً گلوله شده و روی دست کمی رطوبت (بصورت لکه‌های نم) باقی بماند. البته این روش یک عامل لازم نه کافی در بررسی کارگاهی کارایی RCC است. زیرا میزان کارایی بتن به عوامل متعددی مانند دمای محیط، مدت حمل، نوع سیمان و.... بستگی دارد. به دلیل استفاده از بچینگ مستقر در محوطه کارخانه و حداکثر فاصله حمل ۷۵۰ متر (حدود ۵ دقیقه پس از اتمام بارگیری) زمان وی بی اصلاح شده در محل ساخت و پهن کردن تفاوت زیادی نداشته است. تجربه نشان داد که بدلیل وجود فیلر زیاد در RCC و همچنین میزان آب اختلاط کم، مقدار زیادی ریزدانه در حین ساخت به بدنه مخلوط‌کن می‌چسبد. علاوه بر فشار وارده به دستگاه بتن ساز ناشی از سفتی بتن برخورد پره‌ها (در حالت مخلوط کن تغاری) در حین چرخش با بدنه دیگ، خطر از کار افتادن گرداننده مرکزی را افزایش می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که الف) حداکثر از ۸۰ تا نهایتا ۹۰ درصد از ظرفیت اسمی بچینگ استفاده شود. (در این پروژه مقدار ساخت بتن با بچینگ نیم متری به ۰/۴متر مکعب محدود شد) ب) قبل از شروع ساخت بدنه مخلوط‌کن با روغن قالب آغشته شود. ج) حدودا هر ۴ ساعت بچینگ یک بار به صورت کامل پاکسازی شود.

در صورت طرح نامناسب در روسازی بتن غلتکی و یا هر موردی که موجب عدم اجرای موفق روسازی شود، جمع آوری و یا تراشیدن آن به مراتب دشوارتر از روسازی آسفالتی است. شکل ۶ مراحل کنترل طرح در محل بچینگ و مسیر را نشان می‌دهد.

جهت حمل بتن از کامیون های کمپرسی معمول استفاده گردید. در حین ریختن بتن درون کامیون نباید جداشدگی (حرکت درشت‌دانه‌ها از بالا یا اصطلاحاً قله دپو به پایین یا اطراف دپو) مشاهده گردد. بهتر است رطوبت بتن با نایلون یا روش مشابه در طول حمل بتن حفظ شود و در صورت توقف موقت، بتن درون کامیون و بدون تخلیه و پخش باقی بماند. محدودیت زمان حمل تا ۱۵ دقیقه و بعضا در شرایطی تا ۳۰ دقیقه توصیه شده است. با داشتن مواد دیر گیر کننده ممکن است بتوان این زمان را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. به هر حال آنچه نگران‌کننده است سفت‌شدگی بیش از حد که مزاحم یکپارچگی بتن و تراکم مناسب است می‌باشد. بنابراین زمانی که کارآیی بتن به مرز غیر قابل قبول می‌رسد (زمان گیرش) را می‌توان به دست آورد که قاعدتا حمل، ریختن و تراکم باید قبل از آن انجام گردد. زمان گیرش بتن غلتکی به روش مقاومت الکتریکی یا التراسونیک قابل تعیین است. بهرحال این مدت بهتر است از ۴۵ دقیقه در شرایط گرم و از حدود ۷۵ تا ۹۰ دقیقه در هوای خنک تجاوز نکند. این زمان به عیار سیمان، نوع سیمان و نسبت آب به سیمان نیز بستگی دارد و دمای بتن یا شرایط محیطی (دما، باد و خشکی هوا) نیز اهمیت دارد. شکل ۵ مراحل انتقال و بارگیری را نشان میدهد.

شکل۵ – مراحل انتقال بتن با نوار نقاله از بچینگ به کامیون و اقدامات لازم در حین بارگیری

۵-۳ آماده‌سازی بستر کار (بستر سازی)

زیرسازی از مهمترین‌عواملی است که در تخریب سازه‌ای و اکثر خرابی‌ها دراز مدت رویه های بتن غلتکی نقش اساسی را ایفا می‌نماید. به علت صلبیت بالا و مسلح نبودن کوچکترین نشست‌های ناهمگن موجب ترک خوردگی و آغاز دوره خرابی سازه‌ای و خرابی‌های دراز مدت رویه های بتن غلتکی می‌گردد. فارغ از کاربری رویه و نوع بارگذاری (حتی در سطوح با بارگذاری ناچیز مانند محوطه‌های تفریحی) زیراساس باید با در نظر گرفتن صلبیت روسازی از تراکم کافی برخوردار باشد. بستر روسازی قبل از پخش بتن بایستی مرطوب گردد تا آب بتن غلتکی را جذب ننماید. رطوبت اشباع سطح نیز موجب اختلال در تراکم و حرکت بتن زیر غلتک می گردد. دقت در اجرای شیب‌های طولی و عرضی در بستر *RCCP* به دلیل اهمیت رعایت ضخامت *RCCP* ضرروری است.

در مواردی مشاهده شده که املاح خاک زیرسازی بهمراه رطوبت از طریق ایجاد لوله‌های موئینه به سمت سطح بتن حرکت کرده و بصورت سفیدک رویت می گردد. در این فرآیند هیدروکسید کلسیم با یون کربنات محلول در آب واکنش داده و موجب ایجاد کربنات کلسیم می‌گردد که نشانه خوبی نبوده و سطح بتن غلتکی طی حداقل یک هفته پس از اجرا پوشانیده شود.

۵-۴ پهن کردن و کوبیدن

هر چند ریختن بتن با اسکریپر مانند سدهای بتنی در روسازی نیز تجربه شده است اما توصیه می‌گردد در روسازی بتن غلتکی از این وسیله استفاده نشود. در صورت استفاده از اسکریپر و تنظیم دریچه‌های خروجی، معمولا از گریدر برای تنظیم ضخامت و سطح بتن استفاده می گردد. در صورت پخش بتن غلتکی با فینیشر عرض فینیشر بایستی حداقل معادل عرض هر خط عبوری باشد. در صورت استفاده از فینیشر آسفالت، اصلاحاتی همچون بزرگتر کردن دریچه قیف تغذیه بتن، افزایش ظرفیت فینیشر از طریق افزایش ارتفاع دیواره قیف و منظور نمودن پیچهای حاوی *screed* (شمشه) برای فینیشر ضروری است. سرعت حرکت فینیشر باید ترجیحا یکنواخت باشد و گرنه سطح صاف و منظم حاصل نمی‌گردد. بهتر است شمشه فینیشر بتن از نوع ارتعاشی و مجهز به کوبه میله‌ای بوده تا تراکم بهتری حاصل گردد. قیف فینیشر نباید از بتن خالی شود و لازم است بتن همواره روی شفت اوگر فینیشر را بپوشاند.

ذکر این تجربه حائز اهمیت است که پر بودن جام فینیشر و حرکت مداوم و با زمان توقف حداقل، عامل مهمی در ایجاد سطحی هموار و بدون موج خواهد بود. هرچند حجم مخلوط کن مورد استفاده در این پروژه کم بوده است، اما تا حد امکان سعی شد تا با هماهنگی در سرعت ساخت، زمان حمل و سرعت کامیون‌ها، سرعت حرکت فینیشر، استفاده از بچینگ در محل کارخانه حداکثر بهره برداری از ظرفیت موجود به عمل آید. استفاده همزمان از چند دستگاه بتن‌ساز یا یک مخلوط کن با ظرفیت اسمی بیش از ۱ مترمکعب برای دستیابی به رویه بتن غلتکی یکنواخت و مناسب توصیه می گردد.

بسته به نوع طرح مخلوط بتن و قدرت تراکم، تفاوت ضخامت بتن پخش شده و کوبیده شده بین ۱۰ تا ۲۵ درصد است. باید در ابتدا یک اجرای آزمایشی را تجربه کرد و با تعیین دانسیته بتن متراکم و میزان درصد تراکم نسبت به نتایج آزمایشگاهی، تعداد عبور، تغییر ضخامت و حتی کارآیی مناسب را تعیین نمود. مشاهده رفتار بتن تازه در زیر

استوانه غلتک فلزی بدون ارتعاش می‌تواند در تنظیم کارآیی نقش داشته باشد. شکل ۶ پخش کردن *RCCP* در جاده اختصاصی کارخانه پریفاب را قبل و بعد از تراکم نشان می‌دهد.

شکل ۶- ریختن و پخش کردن RCCP در جاده اختصاصی شرکت پریفاب قبل و بعد از تراکم

تراکم بتن غلتکی، با استفاده از غلتک‌های استوانه‌ای ارتعاشی ۱۰ تنی دوبل و غلتک‌های چرخ لاستیکی ۱۰ تا ۲۰ تنی انجام گردیده است. پس از پخش بتن، عملیات تراکم با دو عبور (یک رفت و یک برگشت) بدون ارتعاش، حدود ۴ عبور با ارتعاش توسط غلتک استوانه‌ای فلزی و حدود ۴ عبور برای بستن حفرات و درزها توسط غلتک چرخ لاستیکی انجام می گردد. در نهایت غلتک استوانه‌ای فلزی مجددا بدون ارتعاش باید حرکت کند تا اثر چرخ غلتک لاستیکی را از بین ببرد (اتو کردن). برای داشتن سطح صیقلی‌تر که لزوما در همه موارد نیز مفید نیست می‌توان قبل از اتو کردن آب را به صورت غبار افشان روی سطح پاشید (شکل ۶). در شرایط محیطی گرم و یا توقف‌های پیش بینی نشده که موجب از دستن رفتن مقداری از آب بتن شده است می‌توان از همین روش قبل و یا در حین تراکم سطح استفاده نمود. قطعات پس از فرارسیدن زمان گیرش اولیه و یا توقف‌های طولانی در حین اجرا استفاده از این روش ماحصلی نخواهد داشت. بیشتر از حد بودن رطوبت بتن، مشکلات زیادی در تراکم و چسبیدن لایه‌ها به غلتک ایجاد می نماید.

تراکم ارتعاشی، باید با فرکانس کم و دامنه ارتعاش زیاد و با سرعت ۲/۴ تا ۳/۲ کیلومتر بر ساعت انجام شود. عبور غلتک‌ها باید متوالی و مستمر باشد و وقفه بین آنها جایز نیست. حدود ۳۰ سانتی‌متر از لبه کناری که به خوبی متراکم نمی گردد، باید قبل از ریختن، باند کناری با برشکاری برداشته و مقطع برش خورده شسته و عاری از هرگونه ریزدانه چسبیده شده به مقطع ناشی از برشکاری شود (شکل ۷). در این حالت در باند جدید ارتفاع اضافی لایه باید پیش بینی گردد. درز برش داده شده باید مرطوب گردد. همچنین به میزان ۲۵ تا ۷۵ میلیمتر بتن باید روی باند قبلی ریخته شود. سپس بتن اضافی باند اول با وسیله دستی روی باند دوم هل داده می‌شود تا بتن اضافی روی باند اول (قبلی) باقی نماند و تراکم در این قسمت انجام گردد (شکل۷). موارد اشاره شده باید در اتصال رویه جدید به قدیم و همچنین در آغاز هر روز کاری و در مقاطع خاص نیز رعایت شود.

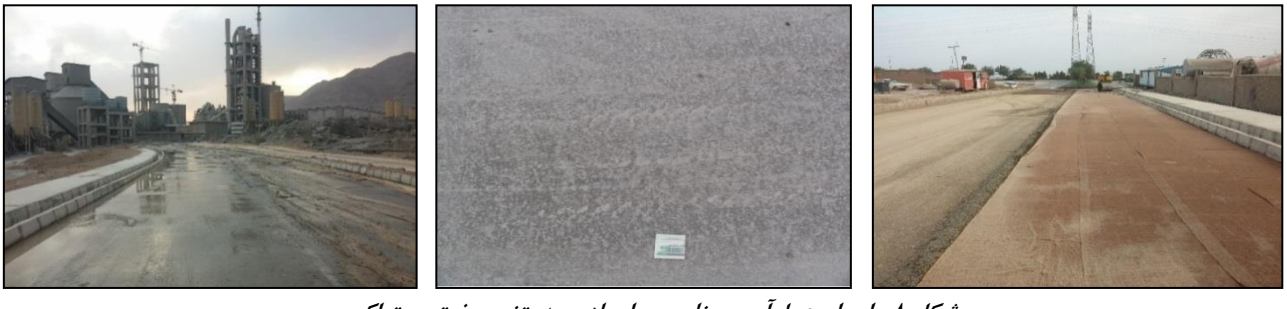
شکل ۷- مقطع طولی RCCP قبل شستشو (سمت راست) - مقطع RCCP پس از شستشو (وسط) - آماده‌سازی محل درز قبلِ تراکم (سمت چپ)

در صورتی که باند بعدی (جدید) با فاصله زمانی کمتر از حدود ۱ ساعت (بسته به شرایط هوا و وضعیت بتن قبلی) در کنار مسیر قبل ریخته شود نیازی به برداشتن قسمت کناری مسیر قبلی نیست و عملاً بتن مسیر جدید باید با غلتک کوبیده شود و سپس کار تراکم در این قسمت و بخش‌های دیگر انجام شود. این حالت را درز تازه می‌گویند. سطح بتن متراکم نباید بصورت دان دان همراه با ترکهای برش افقی به ویژه برای بتن‌های خیلی خشک و همچنین نباید خیلی صاف و صیقلی برای بتن‌های روان و پر سیمان باشد.

۵-۵ عمل‌آوری بتن

عمل‌آوری می‌تواند طبق آنچه برای بتن‌های معمولی گفته شده است انجام شود. در مواردی که دوام بتن مطرح باشد (که در رویه‌های بتن غلتکی در غالب موارد چنین است) بهتر است مقادیر ذکر شده برای بتن معمولی را در حدود ۵۰ درصد افزایش داد. در نشریه ۳۵۴ و سایر منابع، حداقل مدت عمل‌آوری برابر ۷ روز ذکر شده است که با در نظر گرفتن شرایط محیطی، دمای محیط مجاور و حتی نوع سیمان می‌تواند بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. عمل‌آوری رطوبتی با آب همواره نسبت به عمل‌آوری های عایقی (نایلون و مواد عمل‌آوری) ارجح است. استفاده از مواد عمل آوری توصیه نمی‌گردد. مگر اینکه عمل آوری رطوبتی به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت انجام شود و سپس از این مواد استفاده گردد (به ویژه برای زمانی که دوام بتن‌ها از اهمیت برخوردار باشد).

در ساعات اولیه آب باید بر سطح بتن اسپری شود و ذرات آن نباید خیلی درشت و پر فشار به سطح بتن برخورد نماید. پیشنهاد می‌شود در عمل‌آوری از چتایی استفاده شود تا علاوه بر حفظ رطوبت در دراز مدت، از شسته شدن سطح بویژه در سنین اولیه (شسته شدن خمیر سیمان) جلوگیری بعمل آید. بهتر است وسایل آب پاشی، تانکرهای کوچک باشد تا تردد آنها بر روی بتن مشکلی بوجود نیاورد. عمل‌آوری رطوبتی باید مستمر بوده و تکرار خشک و تری عملاً کیفیت را مخدوش میکند. عبور وسایل نقلیه (بجز وسیله آب پاشی) بر روی بتن تا ۱۴ روز مجاز نیست اما اگر به مقاومت حدود $۲۰Mpa$ برسیم مشکلی وجود ندارد. هرچند با توجه به ضخامت رویه حداقل مقاومت فشاری برای باز کردن ترافیک بر روی روسازی باید تعیین شود *[۱۰]*. شکل ۸ عمل‌آوری $RCCP$ جاده اجرا شده در مجتمع تولیدی شرکت پریفاب را نشان می‌دهد.



شکل ۸- اجرا و عمل‌آوری مناسب و ایجاد رویه بتنی سخت و متراکم

۵-۶ درز جمع‌شدگی (انقباض)

برای جلوگیری از ترک خوردگی ناشی جمع‌شدگی در اثر خشک شدن لازم است ترکها را با ایجاد درز جمع‌شدگی به حداقل رسانید. فواصل درزهای جمع‌شدگی بین ۶ تا ۱۲ متر توصیه می‌شود، هر چند گاهی فواصل ۴ متری نیز بکار می‌رود (شکل ۹). اجرای درزهای عمودی با عمق ۱/۴ تا ۱/۳ ضخامت رویه بتنی (متناسب با شرایط آب و هوا، ضخامت لایه، سنگدانه‌ها و ...) در کمتر از ۱۲ ساعت، جهت جلوگیری از ترک و کاهش دوام ضروری است. این درزها با اره دورانی به عرض ۳ میلیمتر بریده می‌شوند. در برخی از پروژه‌های بتن غلتکی که اهمیت کمتری دارد این درزها ایجاد نشده و لذا ترک ها بصورت تصادفی مشاهده می‌شود که بسته به میزان جمع‌شدگی و مقاومت کششی بتن در آن هنگام خواهد بود (شکل ۹). قبل از تردد از روی سطح، لازم است درزها با مواد مناسب (نئوپرن،

سیلیکون یا پلی سولفاید) از نوع سرد اجرا یا گرم اجرا پر شوند و گر نه لبه درز خرد شده و آب به داخل درز نفوذ کرده، یخ می‌زند و لبه‌ها را ترک‌دار می‌کند. چنانچه عرض راه در مجموع بیشتر از ۱۲ متر باشد نیاز به درز جمع‌شدگی طولی نیز وجود دارد. معمولا سعی می‌کنند این درز در بین خطوط رفت و برگشت بوده و در مسیر چرخ واقع نگردد.

شکل ۹–فواصل درز جمع شدگی اجرا شده با کاتر، درز جمع‌شدگی تصادفی که در امتداد خط دیده می‌شود

۶-سطوحی با عملکرد خوب و خرابی‌های مشاهده شده و علل احتمالی خرابی‌ها پس از ۴۰ماه بهره‌برداری

بطور کلی دلایل تخریب رویه‌های بتنی اشکالات در طراحی، اجرا و تاثیر شرایط محیطی حاکم بر بتن در دوره بهره‌برداری می‌باشد. یکی از عمده‌ترین مشکلات بتن‌های غلتکی، طراحی نادرست ضخامت و فواصل درزهاست. انتقال بار در محل ترک و درزهای رویه بتنی از طریق قفل و بست سنگدانه‌ها انجام می‌شود. از طرفی معمولاً این انتقال بار را در طراحی صفر لحاظ می شود که بنظر صحیح نمی‌باشد. لذا در محل درزهای بتن غلتکی بویژه موارد ایجاد شده در تمام مقطع و یا قسمتی از آن، بیشترین خرابی‌ها دیده می‌شود. مکانیسم آن بدین گونه است که با نفوذ آب و حرکت ریزدانه‌ها به سمت بالا بعلت افت و خیز زیاد و طی بارگذاری لبه‌ای، چرخه خرابی به مرور تشدید می‌یابد. شکل ۱۰ انواع خرابی‌های روسازی پروژه مذکور پس از بهره‌برداری مستمر در بیش از ۴۰ ماه را نشان می‌دهد.

بازدیدها و بررسی‌های همراه با قضاوت مهندسی نشان داد که اغلب خرابیهای عمده ناشی از درز سرد اجرایی در طول و عرض مسیر(شکل۱۰-۱ و ۱۰-۲) بوده است. همانطور که در شکل ۷ نیز واضح است، متاسفانه در مرحله اجرا ضخامت بتن غلتکی متراکم شده اغلب کمتر از ضخامت طراحی شده است. همچنین تردد بعضا کامیونهای فوق سنگین کارخانه سیمان تهران از مسیر پروژه مذکور، و تردد بیشتر در شاخه اصلی جاده اختصاصی (درب ورودی)، نشان دهنده اعمال بار ترافیکی بیش از بار طراحی است. لذا موارد گفته شده در قسمت‌هایی موجب وقوع ترکهای بلوکی دال (شکل ۱۰-۳) شده است. دیگر خرابی های ناشی از عدم دقت در اجرای بتن تازه، شامل روانی بیش از حد و چسبیدن بخشی از رویه بتنی به غلتک (شکل ۱۰-۴)، هم‌پوشانی بتن تازه با سخت شده در محل درزهای طولی و عرضی اجرایی (شکل۱۰-۵)، خرابی‌های پیش‌رونده در فضاهای محدود با اجزای مزاحم تراکم مانند شبکه‌های پوشاننده کانال آب به صورت موردی مشاهده شده است. متقابلا اتصالات و عملکرد بسیار مناسب در حاشیه‌ها نیز قابل بیان است. نگهداری نامناسب از رویه بتنی از جمله ریزش بتن سرریز شده از میکسرهای حمل بتن در شکل ۱۰-۶ مشاهده می‌شود. برخی از گستره خرابی ها ناشی از اعمال بارهای بیشتر از بارهای طراحی به رویه می باشد.

حتی با عدم اجرای پرکننده در درزهای انقباضی نیز در قسمت هایی که ضخامت رعایت شده است، مشکلات تخریب وجود نداشته و بعضا لب پر شدگی مشاهده شده است (شکل۱۰-۷). اتصال رویه بتنی به آسفالتی در محل شروع عملیات اجرایی به علت آماده سازی محل اتصال و کوبیدن مناسب، بدون بتن اضافی روی لایه آسفالتی وضعیت مطلوبی داشته است (شکل۱۰-۸ و ۱۰-۹). در هر دو بخش کناری مسیر و مجاور جداول بتنی که اغلب محل تجمع آب و یخ زدگی است، خرابی هایی نظیر پوسته شدن ناشی از سیکل هاب ذوب و یخ زدن و مشکلات مضرس و شن نما شدن سطح مشاهده نشده است. لازم به ذکر است عیوب سطحی نظیر پوسته شدن، شن نما و

تخریب خمیر سیمان در کل سطح نیز به مشاهده نگردید و می توان نتیجه گیری نمود که طرح مخلوط بتن غلتکی رویه مناسب بوده است (اشکال ۱۰-۱۰ الی ۱۲).

شکل۱۰- سطوح مناسب و خرابی‌های ایجاد شده در رویه بتن غلتکی جاده اختصاصی پریفاب

۷- تعمیر و نگهداری

فرآیند تعمیر و ترمیم خرابی بتن غلتکی بسیار مشکل‌تر و پیچیده‌تر از بتن آسفالتی است. اولین گام در ترمیم بتن غلتکی مطالعه و شناسایی گستره خرابی هاست که باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام شده و تا حد امکان از افزایش بازه زمانی تشخیص تا عملیات اجرایی تعمیر جلوگیری گردد. تخریب منطقه خرابی تا حد امکان بیشتر از مقدار خرابی (۱/۳۳ برابر) و تا ناحیه‌ی سالم باید صورت پذیرد (شکل ۲۰). این امر با توجه به اینکه تعیین ناحیه مجاور مطلوب قبل از عملیات اجرایی تعمیر، مشکل و یا امکان‌پذیر نبوده؛ موجب بر هم زدن معادلات برآورد اقتصادی در حین انجام عملیات تخریب شده و بعضاً موجب افزایش حجم و سطح تخریب می‌گردد. بعضا می‌توان گسترهٔ خرابی در سطح مانند خرابی‌های همچون کرمو شدن و یخ زدن را بصورت دیداری مشاهده نمود. عمق این خرابی‌ها را نیز بعضا قبل از تخریب با روش‌هایی همچون اولتراسونیک و یا در حین تخریب می‌توان تعیین کرد. هرچند ضخامت منطقه خرابی متغیر است اما به هر حال معمولا به ناچار عمق منطقه خرابی به صورت یکسان تخریب می‌شود. جهت مطالعه گستره خرابی‌ها و انتخاب مواد ترمیمی مواردی همچون عمر رویه، متوسط فواصل

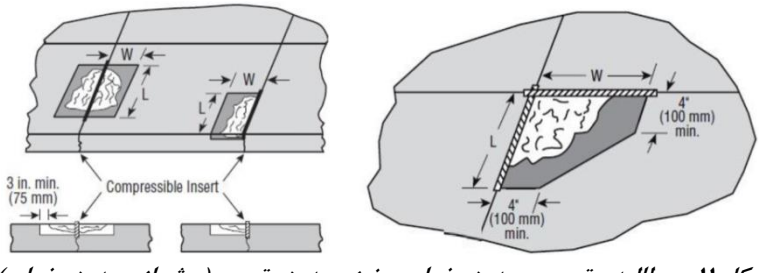
درزهـا، شکسـتگی و پخـی لبـه و حاشـیه‌هـا، انـدازه ذرات خـرد شـده، طـول، عـرض و عمـق درزهـا، نـوع ترافیـک، دمـای متوسط محیط، تعداد روزهای بالای ۳۲ درجه در سال و ... باید مدنظر قرار بگیرد [۱۱].

اسـتفاده از وسـایل مناسـب (همچـون قلـم و چکـش، پیکـور یـا دژبـر، جـت آب و ...) و سـازگار بـا شـرایط منطقـه خرابـی کمک زیادی به رسیدن نتیجـه مطلـوب درعملیـات تخریـب و تعمیـر مـی‌کنـد. تـا حـد امکـان از بـی‌نظمـی در سـطح تعمیـر و لبـه‌هـای شـیب‌دار (یـا پخـی) بایـد پرهیـز نمـود. مـنظم بـودن سـطح تعمیـر، اسـتفاده از اشـکال مـنظم در سـطح تخریـب (مسـتطیل، مربـع، مثلـث و ...)، گونیـا بـودن لبـه محـیط تخریـب، عمـق یکسـان در تخریـب، نتیجـه مثبتـی در تعمیـر را بـه همراه دارد. آماده سازی سـطح قبـل از انجـام عملیـات تعمیـر از جملـه تمیـز بـودن سـطح (از چربـی‌هـا و ...)، عـاری بـودن از مواد و مصالح سست و لق شـده، مضرسـی، ناصـافی، اشـباع بـا سـطح خشـک و عـدم صـیقلی بـودن سـطح ضـروری اسـت. بـا مقایسه مواد ترمیمی بنظر می‌رسد بعضاً نوع مناسب به لحاظ مقاومتی، آب‌انداختگی و ... MMA[3] باشد [۱۲].

طبق یک سری آزمایش سه پانل به سـه روش بـا بـتن قـوی، بـتن ضـعیف و تلفیقـی از بـتن ضـعیف و قـوی بـتن‌ریـزی شـده اسـت. مشـاهده شـده کـه نـوع سـوم ضـعیف‌تـرین پانـل بـوده اسـت/۱۳/. لـذا واضـح اسـت جهـت تـرمیم بایـد از بتنـی بـا مقاومت و مشخصات مشـابه بـتن اطـراف ناحیـه تخریبـی اسـتفاده نمـود. در انتخـاب مـواد ترمیمـی مـوارد زیـر حـائز اهمیـت است:

۱) تـامین مشخصـات مقـاومتی و فنـی مـدنظر، ۲)تغییـرات حجمـی سـازگار بـا بـتن، ۳)کمتـرین اخـتلاف ضـریب تغییـرات دمائی بـتن و مـواد پلیمـری، ۴) پـایین‌تـرین اخـتلاف مـدول الاستیسـیته بـتن و مـواد پلیمـری، ۵) کمتـرین اخـتلاف مـابین تغییرات ناشی از انبساط و انقباض بتن و مواد پلیمری و ۶) صرفه اقتصادی.

نکتـه مهـم در مـواد تعمیـری مسـئله جمـع شـدگی اسـت، کـه بعضـا موجـب جداشـدگی در محـل اتصـال مـی‌شـود. پـس انتخاب مصالح مناسب در تعمیر موجب بهبود وضعیت اتصال وترمیم می‌گردد.



شکل ۱۱ - مطالعه و تعیین محدوده خرابی و نیز محدوده ترمیم (بیش از محدوده خراب)

۸- نتیجه‌گیری

با توجه بـه اجـرای حـدود ۱ کیلـومتر طـول جـاده بـا عـرض ۸ متـر بـتن غلتکـی و مـوارد اشـاره شـده در مـتن، مـوارد ذیـل بایستی مورد توجه قرار گیرد:

۱-در طراحـی و اجـرای مخلـوط رویـه بـتن غلتکـی نیـاز بـه دقـت و اسـتفاده از افـراد مجـرب بـیش از دیگـر انـواع رویـه‌هـا ضروری است.

۲- در اجرا به کنترل کیفیت و نظارت دقیق به مراتب بیشتری از رویه‌های آسفالتی نیاز است.

۳- کنترل و رعایت ضخامت در مرحله اجرا و در نظر گرفتن اثرات شیب‌های عرضی بسیار حائز اهمیت است.

۴- در معادل سازی تهیه آزمونـه مکعبـی بـرای آزمـایش مقاومـت فشـاری از بـتن غلتکـی بعضـا در شکسـت آزمونـه‌هـا شـکل ظاهری شکست مطابق پیشنهادها مراجـع مربوطـه نامناسـب بـوده کـه احتمـالاً بـه علـت قرارگیـری توزیـع تـنش بـه مـوازات سطوح تراکم لایه‌ها است. هرچند نتایج برای مقایسه طرح مخلوط‌های مختلف مناسب است.

[3] *Methyl methacrylate(MMA) concrete*

۵- درز سرد اجرایی، به علت قرارگیری قسمتی از غلتک روی لبه لایه بتن سخت شده مشکلاتی را بویژه در تراکم ارتعاشی در محل درز ایجاد میکند. پیشنهاد می‌شود در صورت الزام به ایجاد درز سرد اجرایی بدلیل محدودیت‌ها، بخشی از درز اجرایی به طور منظم با اره دورانی جمع آوری و با استفاده از بتن مناسب پر شود.

۶- در صورت عدم وجود بخش ریزدانه *(فیلر)* در مصالح سنگی می‌توان با انجام آزمایش‌های لازم، مناسب بودن ماسه بادی را بررسی نموده و از آن در اصلاح ماسه استفاده کرد و تنها درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ معیار عدم تمیزی مصالح نیست و باید رفتار آنها نیز در مصالح بررسی شود.

۷- پیشنهاد می‌شود محل‌های ایجاد درز انقطاع بموجب کاهش اثرات پامپینگ، قبل از اجرای رویه بتنی تعیین شده و حداقل در محل‌های مورد نظر از لایه‌های نفوذناپذیر مانند (ژئوتکستایل و ...) استفاده شود.

۵- عدم تشخیص صحیح بارهای دوره بهره‌برداری و در نظر نگرفتن الزامات مربوطه در طراحی رویه‌های بتنی قطعا گسترش خرابی‌ها را در پی دارد.

۶ -عدم بهره‌برداری صحیح از رویه بتنی اجرا شده و عبور و مرور با ظرفیت‌های غیرمجاز بر روی رویه قطعا سبب تسریع در ایجاد و گسترش خرابی‌ها و کاهش عمر مفید رویه اجرا شده می‌گردد.

۹-تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم از مدیریت وقت شرکت پریفاب و کلیه کارکنان زحمتکش آن شرکت که در انجام بخش اجرایی این پروژه ما را یاری نمودند تشکر و قدردانی به عمل آوریم.

۱۰- مراجع

[۱]. رمضانیانپور، علی‌اکبر، اعرابی، نگین، (۱۳۹۳)، مقایسه فنی- اقتصادی و زیست محیطی روسازی‌های بتنی و آسفالتی، چاپ اول، تهران، نگارنده دانش.

[2]. European Ready Mixed Concrete Organization (ERMCO). (2013). Guide to roller compacted concrete for pavements.

[۳]. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، (۱۳۸۸)، نشریه ۳۵۴، راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور، چاپ اول، تهران، انتشارات سازمان برنامه و بودجه.

[4]. Iowa State University's Institute. (2010). guide for roller compacted concrete pavements. Portland Cement Association or the National CP Tech Center.

[5]. Jeffers, m. (2001). Roller Compacted Concrete Pavement. Concrete Paving of Tennessee (CPAT). Buzzi Unicem USA.

[6]. American Concrete Institute (ACI). (2002). Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads. ACI 325R-02.

[7]. Bakhsh, K. (2014). Design Methodology for Subgrades and Bases Under Concrete Roads and Parking Lots ,Test Methods & Results of Erosion Potential of Commonly Used Subgrade and Base Materials. Technical report submitted to the ready mixed (RMC) research and education. Foundation Texas Transportation Institute.

[8]. Portland Cement Association (PCA). (2009). Thickness Design of a Roller Compacted Concrete Composite Pavement System. Skokie, IL: Portland Cement Association.

[۹]. دفتر مقررات ملی ساختمان – وزارت راه و شهرسازی، (۱۳۹۲)، مبحث نهم - طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه - ویرایش چهارم، چاپ سوم، تهران، نشر توسعه ایران.

[10]. American Concrete Pavement Association (ACPA). Roller Compacted Concrete Pavements as Exposed Wearing Surface. (2041). Skokie. IL: American Concrete Pavement Association.

[11]. Strategic Highway Research Program (SHRP). (1994). Concrete Pavement Repair Manual of Practice.

[12]. Cement Concrete & Aggregates Australia. (2009). Concrete Pavement Maintenance / Repair.

[۱۳].قدوسی، پرویز، (۱۳۸۰)، تعمیر سازه‌های بتنی - مصالح و روشها، چاپ اول، تهران، انتشارات شهر و سازه.

Design, Implementation and Evaluation of Roller Concrete Pavements to Prevent and Reducing the Breakdowns Case Study: Using RCCP in the Domestic Roads of the PREFAB Company

Saeed Zolghadri
saeed.zolghadri@gmail.com

Vahid Gholizade
vahid_gholizadeh@ymail.com

Ali Akbar Maghsodi
maghsoudi.a.a@mail.uk.ac.ir

Abstract

After successful use of roller compacting concrete in construction of dams, its features and advantages including the ability to obtain high stiesth at low ages, no need to be reintorcol, no need for formwall and finishing, which reduce and accelerates the operation, encouraged experts to use this type of concrete in pavements. In our country, because of the plussage capacity of cement production in comparison to the total cement demand in domestic construction projects and the demand in the export markets, the expansion of the use of concrete pavements as a practical way to create a sustainable consumption market for some of the produced cements. Various studies and researches on the design of concrete mixes and various issues of the implementation of roller concrete pavements have been carried out, and many are under way, but the need to investigating on how to prevent and reduce malfunctions and its problems, as well as the repairing methods of roller concrete pavements has not been truly considered yet . In this paper, while describing the process of designing and calculating the thickness of roller concrete pavement, some of the laboratory achievements and practical experiences of the use of roller concrete in the domestic roads of the Prefab factory, including the use of indigenous materials and some of the waste of the factory's internal crushing plant as a part of the needed sand and the monitoring results of it's performance after about 40 months of utilization, the causes of the breakdowns created and the methods of prevention and reducing or eliminating the failures and methods of repair to increase The useful life of the roller concrete pavement has also been expressed in great detail.

Keywords: Roller Compacted Concrete Pavement, Recycled Materials, Concrete Mixture Design, Methods of Restoration and Repairing Pavements Made of RCCP