



کد مقاله: ۲-۱۵۶

## بررسی روش‌های جلوگیری و کنترل ترک خوردگی در عرشه پل‌های بتنی

علی جعفروند<sup>۱</sup>، جمال احمدی<sup>۲</sup>، علی گوهررخی<sup>۳</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه زنجان، [ali\\_jafarvand@znu.ac.ir](mailto:ali_jafarvand@znu.ac.ir)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه زنجان

۳- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه زنجان

### چکیده

در سالهای اخیر توجه بیشتری به ترک خوردگی در عرشه پل‌های بتنی صورت گرفته است. ترک خوردگی در عرشه پل‌ها، خصوصاً بخاطر استفاده روزافزون از بتن‌های با کیفیت بالا، یک مسئله مهم در صنعت راهسازی می‌باشد. ترک خوردگی عرشه پل اغلب باعث تسریع در خوردگی، افزایش هزینه‌های نگهداری و کاهش عمر بهره‌برداری می‌گردد و به همین دلیل به عنوان یک مشکل عمده و پرهزینه برای سازه‌های بزرگراهی در نظر گرفته می‌شود. در تلاش برای افزایش عمر بهره‌برداری عرشه پل‌ها، تحقیقات وسیعی به منظور شناسایی عوامل ترک و روشهای جلوگیری و کنترل آن انجام شده است. این تحقیق به بررسی ملاحظات مربوط به کنترل ترک خوردگی در عرشه پل و همچنین روش‌های جلوگیری از آن می‌پردازد.

کلمات کلیدی: ترک در بتن، عرشه پل، کنترل ترک خوردگی، جلوگیری از ترک خوردگی

### ۱- مقدمه

قدیمی‌ترین موضوع در سازه‌های بتنی بحث ترک خوردگی است. ترک در بتن به دلایل مختلف می‌تواند انتشار یابد ولی تنش کششی نسبتاً پایین آن اصلی‌ترین موضوع در این زمینه می‌باشد. زمانی که تنش‌های کششی از مقاومت کششی مصالح تجاوز کند، ترک‌های مرئی ایجاد می‌شوند. این ترک‌ها اغلب موجب نگرانی می‌شوند زیرا زمینه نفوذ محلول‌های مهاجم به بتن، میلگرد یا سایر اجزای بتنی را فراهم می‌سازند. این امر در نهایت منجر به خرابی می‌شود.

ترک خوردگی در عرشه پل‌ها، خصوصاً بخاطر استفاده روزافزون از بتن‌های با کیفیت بالا، یک مسئله مهم در صنعت راهسازی می‌باشد. ترک خوردگی در سازه‌های بتنی واقع در بزرگراه‌ها مسئله رایجی است که به دلیل عوامل ناشناخته مؤثر در طراحی، بارهای ترافیکی و تغییرات آب و هوایی علل گوناگون و اثرات مختلفی بر روی عملکرد درازمدت بتن دارد. از این رو پی بردن به دلایل گسترش ترک خوردگی در سازه‌های بتنی واقع در بزرگراه‌ها و روسازی‌ها امری مهم می‌باشد.

این تحقیق شامل دلایل ترک خوردگی، و روش‌های کنترل و جلوگیری از ترک خوردگی در عرشه پل‌های بتنی است.

## ۲- کنترل ترک خوردگی در عرشه پل ها

اینکه ترک خوردگی تحت بارهای بهره برداری در سطح قابل قبولی بماند، بستگی به جزئیات صحیح نظیر رعایت میلگرد حداقل، انتخاب صحیح قطر و فاصله میلگردها و همچنین کاهش قید دارد. ناوی نشان داده است که استفاده از تعداد زیادی میلگرد، که باعث کاهش فاصله آنها شود، منجر به تشکیل ترک های باریکی می شود. چنانچه عرض ترک در محدوده مقادیر قابل قبول باشد، اثرات خوردگی بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد [7].

در سالهای اخیر توجه بیشتری به ترک خوردگی در عرشه پل های بتنی صورت گرفته است. ترک خوردگی عرشه پل اغلب باعث تسریع در خوردگی، افزایش هزینه های نگهداری و کاهش عمر بهره برداری می گردد و به همین دلیل به عنوان یک مشکل عمده و پرهزینه برای سازه های بزرگراهی در نظر گرفته می شود. مطالعات انجام شده نشان داده اند که عوامل متعددی از جمله طراحی پل، طرح اختلاط بتن، مصالح و روشهای بتن ریزی، پرداخت و عمل آوری در ترک خوردگی عرشه پل مؤثرند. همچنین مطالعات نشان داده است که منشاء اصلی ترک خوردگی عرشه به ترکیبی از عوامل جمع شدگی (پلاستیک، درونی و خشک شدن) و تنش های حرارتی مربوط می شود که متأثر از عواملی نظیر طراحی پل، طرح اختلاط بتن، مصالح، شرایط محیطی و روش های اجرایی هستند.

### ۱-۱- عوامل طراحی پل

عوامل مربوط به طراحی پل تأثیر اساسی بر ترک خوردگی عرشه دارند. نوع، اندازه و فاصله تیرها همگی بر این ترک خوردگی مؤثرند. به عنوان مثال، تیرهای فولادی در مقایسه با تیرهای بتنی، که سختی کمتری دارند، شرایط مساعدتری برای ترک خوردگی عرشه ایجاد می نمایند. اندازه و فاصله تیرها دارای درجه اهمیت کمتری هستند، اما تیرهای بزرگتری که دارای فواصل نزدیکتر هستند (وقتی که کرنشهای جمع شدگی و حرارت مقید شوند) باعث ایجاد تنشهای پسماند بیشتری در عرشه شده و بنابراین پتانسیل ترک خوردگی را افزایش می دهند [6].

در مورد ضخامت عرشه، عرشه های نازک تر تمایل به ایجاد تنشهای بیشتری دارند و انتظار می رود که ترک خوردگی در آنها بیشتر شود. عرشه های ضخیم تنشهای جمع شدگی و حرارتی کمتر و در نتیجه ترک خوردگی کمتری متحمل می شوند. لازم به ذکر است که این رابطه می تواند متأثر از نوع و اندازه تیرها و سازگاری آنها با عرشه، که می تواند منجر به اثرات متناقض روی ترک خوردگی گردد نیز باشد [6].

ترک خوردگی عرشه پل بر اثر نشست بتن در طول مرحله خمیری، در محل میلگردها، ناشی از پوشش کم بتن روی میلگردها می باشد. افزایش پوشش بتنی روی میلگردها احتمال وقوع این نوع ترک خوردگی را کاهش می دهد. بعلاوه آزمایش های انجام شده بر روی نرخ خوردگی بتن های در معرض شرایط جمع شدگی خمیری و نشست، نشان داده اند که در صورت افزایش پوشش میلگردها زمان شروع خوردگی بطور عمده افزایش می یابد [9]. جزئیاتی نظیر زهکش ها نیز باعث اشباع اعضای پل با محلول نمک شده که آنها را مستعد واکنشهای شیمیایی و آسیدهای ناشی از چرخه های یخ زدگی و آب شدن می کند که منجر به ترک خوردگی می شوند. همچنین نشست غیرمقارن شمع ها برای سازه های چند دهانه بتن درجا بحرانی بوده و جابجایی مجاز آنها باید محاسبه و در نقشه ها مشخص گردد.

## ۱-۲- انتخاب مصالح و نسبت‌ها

تخلخل مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان بالا (بیشتر از ۰/۴۵) زیاد بوده و ممکن است جمع شدگی ناشی از خشک شدن قابل ملاحظه و کاهش محافظت از میلگرد در مقابل کلریدها را داشته باشند. این موضوع باعث شده است که از مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان کم استفاده شود. با این وجود مطالعات اخیر نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت بتن، بخصوص اگر به اندازه کافی عمل‌آوری نشود، پتانسیل ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد. این امر ناشی از پنج عامل زیر است:

۱- جمع شدگی درونی اولیه،

۲- سختی بالای مصالح،

۳- افزایش ترد (شکنندگی)،

۴- کاهش خزش و

۵- افزایش سرعت جمع شدگی [12].

همچنین بتن با نسبت آب به سیمان پایین کمتر آب می‌اندازد و بنابراین بیشتر مستعد ترک‌خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری است. برخی از محققین نشان داده‌اند که عمل‌آوری طولانی با رطوبت، مدول ارتجاعی را افزایش و خزش را کاهش می‌دهد که این امر بتن را بیشتر مستعد ترک‌خوردگی می‌نماید [5]. جمع شدگی درونی (جمع شدگی بدون از دست دادن آب و تغییر دما)، بدلیل اینکه ممکن است کرنش‌های قابل ملاحظه‌ای قبل از رسیدن بتن به سن ۲۴ ساعت ایجاد شود، با کاهش نسبت آب به سیمان (وقتی که کمتر از ۰/۴۲ باشد) افزایش می‌یابد و می‌تواند کاملاً قابل توجه باشد. همچنین لازم به ذکر است که آب‌بندی بتن به منظور جلوگیری از هدر رفتن رطوبت برای ممانعت از جمع شدگی درونی کافی نیست. بهترین نتایج با نسبت آب به سیمان در بازه ۰/۳۸ الی ۰/۴۴ حاصل شده‌اند.

بتن‌های با میزان سیمان بیشتر بواسطه تولید گرمای بالاتر هیدراتاسیون، جمع شدگی بیشتر، مدول ارتجاعی بیشتر و خزش کمتر بسیار مستعد ترک خوردن هستند. کاربرد فراوان بتن‌های با مقاومت بالا در صنعت پل‌سازی، باعث استفاده از مقادیر زیاد سیمان شده است که هزینه ساخت بتن و همچنین پتانسیل ترک خوردگی را افزایش می‌دهد. با برنامه ریزی صحیح برای انتخاب مصالح و نسبت‌های اختلاط مناسب می‌توان بتن ضدترک با میزان سیمان کمتر، که مشخصات دوام و عملکردی را نیز داراست، تولید نمود.

### • سیمان

کنترل دمای اولیه بتن و دمای حداکثر در طول هیدراتاسیون، تنش‌های حرارتی و ترک‌های متعاقب آن را کاهش می‌دهد. همچنین سیمان می‌تواند تأثیر زیادی بر جمع شدگی ناشی از خشک شدن داشته باشد [4]، [5]. سیمان‌های با محتوای قلیایی بالا، مقادیر  $C_3S$  و  $C_3A$  زیاد،  $C_4AF$  کم و نرمی بالا، مقاومت بالایی کسب نموده و پتانسیل ترک خوردگی بالایی دارند [5]. بنابراین سیمان‌های تیپ ۳ را باید با احتیاط در عرشه پل بکار برد. به منظور کنترل دما، اغلب به جای سیمان تیپ یک، سیمان‌های تیپ ۲ و ۵ بخاطر گرمای هیدراتاسیون کم آنها، بخصوص وقتی که شرایط محیطی گرمتری باشد، در نظر گرفته می‌شوند. نشان داده شده است که با جایگزینی سیمان تیپ ۲ بجای سیمان تیپ یک، افزایش دما از ۹ به ۶ درجه سانتیگراد کاهش یافته و جمع شدگی ناشی از خشک شدن از ۴۸۸ به ۳۶۷ میکرواسترین کاهش یافت (۲۵٪ کاهش) [4]. همچنین انتظار می‌رود که سیمان کندگیر جمع شدگی ناشی از خشک شدن و ترک خوردگی کمتری داشته باشد.

## • مصالح سیمانی مکمل

مصالح سیمانی مکمل از قبیل خاکستر بادی، روباره و دوده سیلیسی بطور فراوان در ساخت بتن به منظور افزایش خواص عملکردی اولیه و درازمدت استفاده می‌شوند. خاکستر بادی و روباره نوعاً سرعت کسب مقاومت، گرمای هیدراتاسیون و نرخ رشد سختی را کاهش می‌دهند و بنابراین پتانسیل ترک‌خوردگی را کاهش می‌دهند. دوده سیلیسی می‌تواند نرخ رشد سختی و گرمای هیدراتاسیون را افزایش داده و آب انداختگی را کاهش دهد و شرایط را برای ترک‌خوردگی ایجاد نماید. برخی کاربرد دوده سیلیسی در عرشه پل‌ها را قویاً منع می‌کنند، ولی برخی دیگر بیان می‌دارند که دوده سیلیسی علت ترک‌خوردگی زودرس نمی‌باشد.

## • مقدار آب

انتظار می‌رود که با افزایش مقدار آب، جمع شدگی ناشی از خشک شدن افزایش یابد. برای یک نمونه متداول بتنی، مقدار آب ۱۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب منجر به جمع شدگی ناشی از خشک شدن تقریباً ۳۰۰ میکرواسترین می‌شود [1]. بازای هر ۵/۹ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش در مقدار آب، جمع شدگی ناشی از خشک شدن حدوداً ۳۰ میکرواسترین افزایش می‌یابد. مطالعه‌ای شامل ۱۲ پل در پنسیلوانیا با شدت ترک‌های متغیر از صفر تا ۸۷ متر در ۱۰۰ مترمربع و با نسبت آب متغیر از ۱۵۸ تا ۱۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب انجام شد [4]. نتایج این مطالعه نشان داد که هر افزایشی در مقدار آب، جمع شدگی ناشی از خشک شدن را تقریباً ۷۵ میکرواسترین افزایش می‌دهد و اینکه مقدار آب به تنهایی دلیل اصلی اختلاف قابل توجه عملکرد عرشه پل‌ها در مورد ترک خوردگی عرضی نمی‌باشد.

## • سنگدانه

برای طرح اختلاط یک عرشه پل با محدودیت ترک خوردگی، باید کمیت و کیفیت سنگدانه‌ها به دقت آزمایش شوند. افزایش مقدار سنگدانه‌ها اجازه کاهش عیار خمیر سیمان، که مستعدترین بخش مخلوط برای تنش‌های جمع شدگی و حرارتی است، را خواهد داد. به دلیل کاهش عیار خمیرسیمان مخلوط اقتصادی‌تری حاصل می‌شود. بعلاوه، افزایش حداکثر اندازه سنگدانه‌ها منجر به افزایش حجم سنگدانه قابل استفاده می‌شود. بنابراین معمولاً سنگدانه با بزرگترین اندازه ممکن (بشرطی که سنگدانه واکنش‌پذیر نبوده یا مستعد مشکلات یخ زدگی و آب شدن نباشد) و با دانه‌بندی بهینه (خوب دانه‌بندی شده) بکار می‌رود. این موضوع باعث می‌شود که کارایی مخلوط با عیار خمیر سیمان کمتری حفظ شده و پتانسیل کمتری برای وقوع تنش و ترک‌خوردگی ایجاد گردد. اغلب حداکثر اندازه سنگدانه را ۳۸ میلیمتر یا کوچکترین یک سوم ضخامت عرشه یا سه چهارم حداقل فاصله آزاد بین میلگردها توصیه می‌کنند [6].

جذب یک سنگدانه (ریزدانه و درشت‌دانه) ارتباط نزدیکی با تخلخل دارد و تخلخل نیز بر سختی و تراکم‌پذیری اثر می‌گذارد. معمولاً بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های دارای جذب بالا تمایل زیادی به تراکم‌پذیری دارند و بنابراین جمع شدگی‌های بیشتری را نتیجه می‌دهند. با افزایش جذب سنگدانه از ۰/۳٪ به ۰/۵٪ جمع شدگی ناشی از خشک شدن می‌تواند از ۳۲۰ به ۱۱۶۰ میکرواسترین افزایش یابد (تقریباً ۲۵۰٪ افزایش) [1]. عموماً کوارتز، سنگ آهک، دولومیت، گرانیت، فلداسپار و تاحدی بازالت تحت عنوان سنگدانه‌هایی که جمع شدگی کمتری ایجاد می‌نمایند رده-بندی می‌شوند. از طرف دیگر ماسه‌سنگ، اسلیت و برخی از انواع بازالت اغلب بتن‌های با جمع شدگی بالا تولید می‌نمایند. درگیری سنگدانه بصورت بالقوه نقشی اساسی در عملکرد عرشه پل‌ها در مورد ترک‌خوردگی عرضی دارد.

## • مواد افزودنی

بسته به نوع، مواد افزودنی وسیله‌ای برای بهبود کارایی، جاگیری و عملکرد بتن می‌باشند. مواد افزودنی می‌توانند هم اثر مثبت و هم منفی بر ترک‌خوردگی عرشه داشته باشند. در زمان طرح اختلاط، طراح باید همیشه با نوع ماده افزودنی و سازگاری آن با سایر اجزای مخلوط به منظور اجتناب از ترک‌خوردگی ناخواسته آشنا باشد.

مواد افزودنی کاهنده آب، بدلیل اینکه امکان کاهش نسبت آب و عیار خمیر سیمان را با حفظ کارایی فراهم نموده و بنابراین جمع شدگی ناشی از خشک شدن و ترک‌خوردگی را به حداقل می‌رسانند، مطلوب می‌باشند. کندگیرکننده‌ها اغلب در عرشه پل‌ها به منظور فراهم نمودن امکان بتن‌ریزی پیوسته کاربرد دارند. کندگیرکننده‌ها زمان گیرش را به تأخیر انداخته و باعث می‌شوند که بتن کمتر مستعد ترک‌خوردگی ناشی از تغییرشکل قالب در طول بتن‌ریزی شود. این موضوع همچنین باعث می‌شود که دمای پایین‌تری در حین هیدراتاسیون ایجاد شده و به کنترل تنشهای حرارتی کمک نماید. از طرف دیگر با افزایش زمان گیرش، مخلوط‌های حاوی کندگیرکننده متحمل خطر ترک‌خوردگی ناشی از جمع شدگی پلاستیک می‌شوند. ماده افزودنی شیمیایی دیگر، مواد افزودنی کاهنده جمع شدگی (SRA) می‌باشند [8]. کار این ماده افزودنی شیمیایی کاهش کشش سطحی آب خالص و در نتیجه کاهش جمع شدگی پلاستیک (لورا و همکاران ۲۰۰۶) و جمع شدگی درازمدت (وایز و برک ۲۰۰۲؛ پیس و همکاران ۲۰۰۵) می‌باشد.

## • تقویت با الیاف

بخاطر پایین بودن مقاومت کششی و طاقت شکست مواد سیمانی، تقویت با الیاف به عنوان یک روش موثر به منظور کاهش ترک‌خوردگی اولیه در بتن پیشنهاد شده است. الیاف طاقت بتن را افزایش داده و این امر باعث کاهش عرض ترک در بتن می‌شود. نشان داده شده است که مقادیر بیشتر الیاف مخصوصاً در به تأخیر انداختن زمان ترک خوردن، انتقال تنش از عرض ترک و کاهش عرض ترک مفید است [10].

## ۳-۱- روش های اجرا

اعمال روشهای اجرایی مناسب برای محدود نمودن تبخیر آب از سطح بتن تازه به منظور کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی ناشی از جمع شدگی پلاستیک در عرشه پل‌ها مهم می‌باشد. بدین منظور بهترین کار عمل‌آوری صحیح در ساعات اولیه بلافاصله بعد از بتن‌ریزی می‌باشد که منجر به کاهش نرخ تبخیر می‌گردد. بطور ایده‌آل، بتن تازه عرشه نباید از زمان اختلاط تا حداقل ۲۴ ساعت هیچگونه تبخیر آب از سطح بتن داشته باشد. نرخ تبخیر آب از بتن خمیری تابعی از رطوبت نسبی، دمای هوا، سرعت هوا و دمای بتن ریخته شده می‌باشد. معمولاً از نموداری که چندین سال پیش توسط لرج در PCA تهیه شده است، برای سنجش نرخ تبخیری که نشانگر پتانسیل ترک‌خوردگی می‌باشد، استفاده می‌شود [2]. استفاده از بادگیرها، کنترل دمای محیط بوسیله محافظت بتن تازه از تشعشع آفتاب و غیره از جمله تدابیری هستند که می‌توان برای محدود نمودن تبخیر اتخاذ نمود.

### ۳- روش‌های جلوگیری از ترک خوردگی در عرشه پل‌ها

ترک خوردگی در عرشه پل‌ها، خصوصاً بخاطر استفاده روزافزون از بتن‌های با کیفیت بالا، یک مسئله مهم در صنعت راهسازی می‌باشد. در تلاش برای افزایش عمر بهره‌برداری عرشه پل‌ها، تحقیقات وسیعی به منظور شناسایی عوامل ترک و روشهای جلوگیری از آن انجام شده است. مطابق نظر کراوس، روگولا و وایز، در بتن مورد استفاده در عرشه پل‌ها بطور ایده‌آل باید مدول ارتجاعی پایین، ظرفیت خزشی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، نفوذپذیری پایین، گرمای هیدراتاسیون پایین، طاقت بالا، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی پایین و جمع‌شدگی درونی نیز پایین باشد [12]. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های طرح اختلاط بتن عرشه پل نسبت آب به سیمان است که اگر این نسبت بطور منطقی پایین نگه داشته شود (یعنی در حدود ۰/۴)، بهترین نتایج حاصل خواهد شد. با این وجود، ممکن است مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان خیلی پایین جمع‌شدگی درونی قابل توجهی، مخصوصاً در ۲۴ ساعت اولیه، بروز دهند. در صورتی که حجم سنگدانه‌ها تا حد امکان بالا باشد، جمع‌شدگی درونی، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی و همچنین حرارتی کاهش می‌یابد. گرچه طبیعت مصالح ایجاب می‌کند که بتن درجه‌ای از ترک خوردگی را تجربه نماید، ولی می‌توان با اقداماتی در مراحل طراحی و ساخت از ایجاد ترک‌ها جلوگیری و یا شدت ترک‌های ایجاد شده را کم کرد.

#### ۲-۱- انتخاب مصالح

##### • سنگدانه‌ها

استفاده از سنگدانه نرم (ماسه سنگ) منجر به افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی می‌شود، در حالی که سنگدانه سخت (کوارتز)، دولومیت و سنگ آهک) باعث کاهش آن می‌شود. در غیاب اطلاعات عملکردی سنگدانه بهتر است که سنگدانه‌ای با جذب محدود انتخاب شود. با این حال، ترک خوردگی در بتن با عوامل زیادی مرتبط است و سنگدانه‌های با جذب آب بالا نظیر سنگدانه‌های سبک می‌توانند در برخی موارد به منظور کاهش ترک خوردگی ناشی از ترک خوردگی درونی استفاده شوند.

##### • چسباننده سیمان

کاهش مقدار سیمان تأثیری مستقیم و مثبت بر کنترل و کاهش ترک خوردگی دارد. هرچه از سیمان کمتری استفاده شود، حرارت ناشی از هیدراتاسیون کاهش یافته که منجر به جمع‌شدگی حرارتی کمتری می‌گردد. همچنین بتن با سیمان کمتر، جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی و جمع‌شدگی درونی کمتری دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که برخی از انواع سیمان‌ها بخاطر ترکیبات خود ممکن است باعث جمع‌شدگی بیشتری در بتن نسبت به انواع دیگر شوند. بعنوان مثال، سیمان‌های با قلیائی بالا ممکن است جمع‌شدگی سریع با مقدار کلی بیشتری نشان دهند. همچنین سیمان تیپ II گرمای هیدراتاسیون کمتری نسبت به تیپ I دارد. مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی و روباره گرمای هیدراتاسیون را کاهش داده و در نتیجه منجر به کاهش روند صعودی دمای بتن و بنابراین جمع‌شدگی حرارتی می‌شوند.

##### • مواد افزودنی

مواد افزودنی خاصی می‌توانند برای کنترل جمع‌شدگی استفاده شوند. برخی مواد افزودنی کاهنده آب و کندگیرکننده، روند صعودی دمای بتن را کاهش داده و می‌توانند برای کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی حرارتی بکار روند. کندگیرکننده‌ها نیز، به ویژه وقتی که انتظار می‌رود

دمای محیط به ۲۴ درجه سانتیگراد یا بیشتر برسد، مفید می‌باشند. همچنین از کاهنده‌های آب بدلیل اینکه باعث کاهش مقدار آب مخلوط و در نتیجه کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن می‌شوند، می‌توان استفاده کرد. در برخی موارد به منظور کاهش جمع‌شدگی تا ۰.۵٪، می‌توان مواد افزودنی کاهش دهنده جمع‌شدگی را نیز بکار برد [11].

## ۲-۲- روش های اجرا

موارد اجرایی را می‌توان در دو نوع طبقه‌بندی کرد: موارد اجرایی فیزیکی که در کنترل پیمانکار یا مجری هستند و موارد محیطی که در اختیار او نمی‌باشند. هر دو بخش می‌تواند با ترکیبی از مشخصات، روش‌های بتن‌ریزی صحیح، بازرسی، برنامه‌ریزی مناسب و آگاهی پیمانکار تعیین شود. در این بخش اساساً موارد اجرایی مربوط به ترک‌خوردگی و نحوه رسیدگی به آنها در سطح پروژه بررسی می‌شود.

### • قرارگرفتن در معرض شرایط دمایی

تجربه نشان داده است که یکی از اقدامات مؤثر، کاهش گرادیان‌های حرارتی در طول بتن‌ریزی و عمل‌آوری عرشه می‌باشد. این امر شامل اختلاف دمای محتمل بین عرشه تازه بتن‌ریزی شده و تیرهای زیر آن می‌شود. اگر عرشه در طول گرمای روز بتن‌ریزی شود، تیرها گرمتر خواهند شد و بعداً در روز و طی عصر سرد خواهند شد، در حالی که بتن در نتیجه گرمای هیدراتاسیون به حداکثر دمای خود می‌رسد. عرشه‌ای که در شب یا در ساعات اولیه صبح بتن‌ریزی شود، همزمان با تیرها افزایش گرمای خود را تجربه خواهد نمود و بنابراین گرادیان حرارتی آن محدود خواهد شد.

در مورد دمای تیرها در زمان ساخت عرشه، تنها مسئله گرمای تابستان نیست. معمولاً مشخصات بتن در هوای سرد ایجاب می‌نماید که دمای آن در طول دوره عمل‌آوری در سطح خاصی حفظ گردد. این موضوع اغلب با استفاده از روکش‌های عایق‌دار عمل‌آوری و یا ایجاد حصاری با گرمایش موقتی انجام می‌گیرد. استفاده از روکش عمل‌آوری، با اینکه حفظ گرما در حین عمل‌آوری را فراهم می‌نماید، اجازه می‌دهد که تیرها در معرض دمای محیط پیرامون واقع شوند و می‌تواند منجر به گرادیان دمایی شدیدی گردد. به همین شکل، بیشتر محافظت‌ها اغلب در بالای سطح عرشه ایجاد می‌شوند و اجازه می‌دهند که تیرهای زیرین در معرض دمای محیط قرار گیرند. در برخی موارد از زیر گرما تأمین می‌شود، ولی حفاظت زیادی در مقابل شرایط محیطی فراهم نمی‌کند. حفظ گرما در پایین عرشه می‌تواند با حصار کامل دورتادوری یا حداقل با چادر برزنتی روی کناره خارجی پل برای جلوگیری از وزش باد در زیر آن تأمین شود.

بابایی و پورویس (۱۹۹۵) توصیه کردند که با حفظ اختلاف دمای بین عرشه و تیر در حد کمتر از ۱۲ درجه سانتیگراد و در طول مدت ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی عرشه، جمع‌شدگی حرارتی مقید به ۱۵۰ میکرواسترین محدود گردد. این موضوع می‌تواند با انتخاب زمان مناسبی از روز برای بتن‌ریزی و در فصل سرد اعمال کنترل‌های دمایی صحیح در حین بتن‌ریزی عرشه و پس از آن انجام گیرد.

در رابطه با اختلاف دمای بین عرشه بتنی و پل که در بالا ذکر شد، بابایی و پورویس (۱۹۹۵) توصیه نمودند که جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی را می‌توان به شرح زیر محدود کرد: جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن برای نمونه ۴ ماهه باید کمتر از ۷۰۰ میکرواسترین باشد (یا ۴۰۰ میکرواسترین برای نمونه ۲۸ روزه). با کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، اختلاف دمای مجاز بین عرشه و تیر می‌تواند افزایش یابد [3].

## • قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی در طول بتن‌ریزی و عمل‌آوری

گرچه استفاده از مواد مکمل برای عرشه پل‌ها باعث ساخت عرشه‌های با کیفیت‌تری می‌گردد، ولی در عین حال منجر به استفاده از بتنی می‌شود که به شرایط محیطی حساس‌تر بوده و مستعد ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری می‌باشد. این نوع ترک‌خوردگی ناشی از آب انداختگی خیلی کم و یا عدم آب انداختگی می‌باشد. اقدامات متعددی می‌توان برای کاهش مدت زمان قرارگیری بتن در معرض تبخیر و تشکیل احتمالی ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری انجام داد.

آئین‌نامه‌ها برای تعیین سرعت نظری تبخیر برای زمان بتن‌ریزی عرشه (در مناطق مختلف)، در حدود ۰/۵ تا ۱/۰ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت است، نمودارهایی ارائه کرده اند [2]. این حدود بخصوص برای بتن‌های حاوی سیمان‌های مکمل مهم است. معمولاً اگر سرعت تبخیر بالا باشد، زمان بتن‌ریزی را به تأخیر می‌اندازند. اگر بتن‌ریزی عرشه در مرز این حدود یا نزدیک آنها انجام شود، اقدامات حفاظتی لازم خواهد شد. دستورالعمل‌ها اغلب استفاده از آب‌فشان‌ها به منظور فراهم کردن رطوبت در روی عرشه یا بادشکن‌ها به منظور ایجاد حفاظ در برابر اثر خشک‌کنندگی باد را پیشنهاد می‌دهند. در صورت استفاده از آب‌فشان، نازل باید مه‌تابتی ایجاد نماید که اجازه تجمع آب بر روی عرشه را ندهد. معمولاً بادشکن‌ها کاربرد عملی در کاربردهای پل‌سازی ندارند، زیرا دقیقاً قبل از بتن‌ریزی عرشه قابل اعمال بر سازه نیستند و پیمانکار مایل به قراردادن بادشکنی که ممکن است ضرورتی نیز نداشته باشد، ندارد. علاوه بر این، در واقع ممکن است بادشکن‌ها باد مؤثر در تراز عرشه را بخاطر جریان گردابی تشکیل شونده در بالای موانع افزایش دهند. همچنین می‌توان از کندکننده‌های تبخیر که بطور موضعی اعمال می‌شوند، استفاده نمود. برای کم کردن اثرات محیطی در شروع بتن‌ریزی، نباید بتن را با فاصله زیادی مقابل ماشین پرداخت دپو کرد. بتن معمولاً در عرض عرشه و حداقل امکان در نزدیکی موقعیت نهایی اش دپو می‌شود.

ماشین پرداخت باید قادر به پرداخت تمام سطوح، به غیر از سطوحی که معمولاً قابل دسترسی نیستند، باشد. همچنین پرداخت دستی را باید به حداقل رساند و استفاده از تخته‌ماله‌ها را متوقف کرد. لازم به ذکر است که پرداخت بیش از اندازه نه تنها باعث قرارگیری طولانی‌تر در معرض شرایط محیطی می‌گردد، بلکه می‌تواند منجر به مشکلات پوسته‌پوسته شدن نیز در آینده شود.

به محض اتمام پرداخت، معمولاً از گونی خیس یا حصیر پنبه‌ای، حداکثر ۱۰ الی ۱۵ دقیقه بعد از پرداخت، باید استفاده کرد. برخی با عمل‌آوری مرطوب به این زودی و بدون در نظر گرفتن آسیب‌های عرشه مخالفت می‌کنند. گرچه تورفتگی‌های عمیق مطلوب نمی‌باشند و می‌توانند با مراقبت صحیح حین گذاشتن گونی در عرشه به حداقل برسند، اما در آسیب‌های سطحی نباید از جاگذاری فوری گونی صرفه‌نظر کرد.

روش دیگری که می‌تواند در کاهش اثرات قرارگیری در معرض شرایط محیطی مؤثر باشد، استفاده از عمل‌آوری ترکیبی می‌باشد. در صورت استفاده از آن، با پاشنده‌ای غیر از سمپاش باغی و بلافاصله پس از پرداخت اعمال می‌شود. این روش در طی دو مرحله، به نحوی که مرحله دوم عمود بر مرحله اول باشد و با سرعتی که مطابق توصیه سازنده است، اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که عمل‌آوری ترکیبی به عنوان محافظتی مضاعف می‌باشد و نمی‌توان آن را یک ضریب اطمینان برای اجازه به تأخیر در شروع عمل‌آوری مرطوب در نظر گرفت.

## • ترتیب بتن‌ریزی

قبلاً در عرشه‌های چند دهانه ابتدا نواحی لنگر مثبت ناشی از بار مرده و سپس نواحی لنگر منفی بتن‌ریزی می‌شدند. این روش اجازه می‌دهد که مقداری خیز در تیرها ایجاد شده و میزان برآمدگی عرشه در ناحیه لنگر منفی کاهش یابد.



با استفاده از ماشین‌های پرداخت خودکار و مواد افزودنی کندگیرکننده، ساخت عرشه‌های چنددهانه با بتن‌ریزی منفرد بطور روزافزون متداول و از نظر اقتصادی نیز مطلوب شده است. معمولاً لازم است که بتن در دهانه‌هایی که قبلاً ریخته شده است در حالت خمیری باشد. بطور نظری این امر بخاطر این است که اجازه دهد خیز، قبل از اینکه باعث ترک خوردگی ناشی از برآمدن بتن گیرش یافته شود، رخ دهد. اغلب انجام این عمل مشکل است، به همین دلیل برای انجام صحیح آن، مقدار کندگیرکننده در کل بتن‌ریزی برای حصول گیرش یکنواخت عرشه متغیر است. گرچه ساخت یک عرشه چند دهانه در بیش از یک مرحله بتن‌ریزی درزهایی ایجاد خواهد کرد، ولی این درزها می‌توانند به منظور کاهش تأثیرشان بر دوام درازمدت عرشه آماده‌سازی و اصلاح شوند. نکته دیگر در مجاز بودن بتن‌ریزی منفرد به صورت پیوسته، تضمین این است که پیمانکار و تأمین کننده بتن ضرورت خمیری ماندن بتن و اعمال مناسب کندگیرکننده را کاملاً درک کرده باشند. این بحث اغلب در جلسه پیش از بتن‌ریزی صورت می‌گیرد و تمام افراد در مورد اینکه چگونه شرایط خمیری بتن برای مدت لازم حفظ گردد، متوجه شده و توافق می‌نمایند.

#### • ویریه و تراکم

یکی از اصول اجرای خوب بتن اطمینان یافتن از تراکم صحیح است. با این حال اغلب نادیده گرفته شده‌ترین جنبه در اجرای عرشه پل می‌باشد. تراکم صحیح به اطمینان یافتن از یکنواختی عرشه و جلوگیری از ناحیه‌هایی که می‌توانند به عنوان نقاط شروع یا گسترش ترک عمل نمایند، کمک می‌کند. پرسنل ساخت و ناظرین اغلب توجه کمی به طرز ویریه صحیح و کامل بودن آن دارند. بعلاوه، اغلب اوقات تنها یک یا شاید دو دستگاه ویراتور در طول بتن‌ریزی وجود دارد. این تعداد شاید برای بتن‌ریزی‌های کوچکتر کافی باشد ولی اگر سرعت بتن‌ریزی خیلی زیاد باشد، برای تأمین ویریه یا تراکم صحیح کافی نیست. آئین نامه‌ها لازم می‌دانند که حداقل دو ویراتور (به اضافه یک دستگاه پشتیبان در کارگاه) در تمام بتن‌ریزی‌های عرشه به اضافه تعدادی دیگر که بر اساس سرعت بتن‌ریزی ضرورت دارد، استفاده شود. همچنین لازم است که ویراتورها با فواصل ۰/۳ متری بر روی یک سیستم مکانیکی مستقر بوده و قادر به تراکم یکنواخت کل بتن عرشه باشند.

#### • سن تیر بتنی

اختلاف خزش و جمع‌شدگی بین عرشه و تیرها نیز ممکن است منجر به گسترش ترک شود. با اینکه خزش و جمع‌شدگی تیرهای بتنی در مرحله طراحی لحاظ می‌شوند، ولی این موارد اغلب در حین ساخت در نظر گرفته نمی‌شوند. اگر قرار است که یک عرشه بتنی بر روی تیر بتنی پیش‌تنیده واقع شود، پروژه می‌تواند طوری زمان‌بندی شود که تیرها قبل از زمانی که عملیات ساخت عرشه آماده شروع باشد، بتن‌ریزی کامل نشوند. این امر خزش و جمع‌شدگی متفاوت را، زمانی که تیرها خیلی قبل‌تر از عرشه بتن‌ریزی شوند، کاهش می‌دهد. همچنین بخاطر تأثیر احتمالی این عمل بر برنامه زمانبندی پیمانکار، باید در مشخصات پروژه قید شود؛ زیرا که از یک پیمانکار نمی‌توان بطور منطقی انتظار داشت که برنامه زمانی‌اش را بطرز قابل توجهی پس از قرارداد تغییر دهد.

#### ۴- نتیجه گیری

ترک‌خوردگی در عرشه پل‌ها، خصوصاً بخاطر استفاده روزافزون از بتن‌های با کیفیت بالا، یک مسئله مهم در صنعت راهسازی می‌باشد. ترک‌خوردگی در سازه‌های بتنی واقع در بزرگراه‌ها مسئله رایجی می‌باشد که به دلیل عوامل ناشناخته مؤثر در طراحی، بارهای ترافیکی و تغییرات آب و هوایی علل گوناگون و اثرات مختلفی بر روی عملکرد درازمدت بتن دارد. از این رو پی بردن به دلایل گسترش ترک‌خوردگی در سازه‌های

بتنی واقع در بزرگراه‌ها و روسازی‌ها امری مهم می‌باشد. بعنوان مثال اثر ترک‌خورگی در دوام بتن، مخصوصاً در زمینه خوردگی برای سازه‌های مربوط به حمل و نقل مضر می‌باشد. تر و خشک شدن بتن به صورت متناوب امکان نفوذ نمک‌ها به داخل ترک‌ها را فراهم می‌کند و به شدت موجب تسریع خرابی می‌شود.

عموماً دلیل ترک خوردگی، بارگذاری خارجی و ایجاد تنش‌های کششی پنداشته می‌شود، ولی سهم زیادی از ترک‌خورگی مربوط به ناپایداری حجمی ذاتی بتن یا واکنش‌های شیمیایی مخرب می‌باشد.

مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که عوامل متعددی از جمله طراحی پل، طرح اختلاط بتن، مصالح و روشهای بتن‌ریزی، پرداخت و عمل-آوری در ترک‌خورگی عرشه پل مؤثرند. همچنین مطالعات نشان داده است که منشاء اصلی ترک‌خورگی عرشه به ترکیبی از عوامل جمع‌شدگی (پلاستیک، درونی و خشک شدن) و تنش‌های حرارتی مربوط می‌شود که متأثر از عواملی نظیر طراحی پل، طرح اختلاط بتن، مصالح، شرایط محیطی و روش‌های اجرایی هستند.

در بتن مورد استفاده در عرشه پل‌ها باید سعی شود که مدول ارتجاعی پایین، ظرفیت خزشی بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، نفوذپذیری پایین، گرمای هیدراتاسیون پایین، طاقت بالا و همچنین جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی و درونی پایین باشد.

## مراجع

- [1] ACI 224-90R. "Control of Cracking in Concrete Structures", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1990.
- [2] ACI-305R. Hot "Weather Concreting", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1999, section 2.2.2, paragraph 1.
- [3] Babaei, K., and R. L. Purvis. "Premature Cracking of Concrete Bridge Decks": Cause and Method of Prevention. Proc., 4th International Bridge Engineering Conference, 1996.
- [4] Babaei, K., and R. L. Purvis. "Prevention of Cracks in Concrete Bridge Decks": Report on Laboratory Investigations of Concrete Shrinkage. Report No: PA-FHWA-95-004+89-01, 1995.
- [5] Burrows, R. W. "The Visible and Invisible Cracking of Concrete", ACI Monograph No. 11. ACI, Farmington Hills, Mich., 1998.
- [6] Krauss, P. D., and E. A. Rogalla. NCHRP Report 380: "Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks". TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996.
- [7] Nawy, E. G. "Fundamentals of High-Performance Concrete", 2nd ed., John Wiley & Sons, N.Y., 2001.
- [8] Nmai, C., R. Tomita, F. Hondo, and J. Buffenbarger. "Shrinkage Reducing Admixtures". Concrete International, Vol. 20, No. 4, 1998, pp. 31-37.
- [9] Qi, C., W. J. Weiss, and J. Olek. "Statistical Significance of the Restrained Slab Test for Quantifying Plastic Cracking in Fiber Reinforced Concrete". ASTM Journal of Testing and Evaluation, 2005.
- [10] Shah, H. R., A. B. Hossain, and W. J. Weiss. "Using Restrained Ring Test in Conjunction with Passive Acoustic Emission to Quantify the Role of Steel Fiber Reinforcement in Shrinkage Cracking Mitigation". Presented at International Conference on Fiber Reinforced Concretes, High-Performance Concrete and Smart Materials, Chennai, India, 2004.
- [11] Weiss, W. J., and N. S. Berke. "Admixtures for Reduction of Shrinkage and Cracking". Early Age Cracking in Cementitious Systems—State of the Art Report (A. Bentur, ed.) 2002.
- [12] Weiss, W. J., W. Yang, and S. P. Shah. "Factors Influencing Durability and Early-Age Cracking in High Strength Concrete Structures", SP 189-22. High Performance Concrete: Research to Practice, Farmington Hills, Mich., 1999, pp. 387-409.