

بررسی تأثیر عوامل موثر بر عمل آوری بتن سخت شده

علیرضا طاهری زاده^۱، مریم عباسی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه و مدیر علمی پژوهشی سازمان بسیج شهرداری تهران

alirezataherizade64@gmail.com

۲- فوق لیسانس عمران سازه و کارشناس اداره کل هماهنگی امور مناطق معاونت فنی عمرانی شهرداری تهران

maryamabbasi75@gmail.com

چکیده

امروزه توجه به عمل آوری و تأثیر آن بر روی مشخصات بتن سخت شده از اهمیت ویژه ای برخوردار است مدت زمان لازم برای حفاظت از بتن و عمل آوری به عواملی نظیر: نوع مواد سیمانی مورد استفاده، نسبت‌های مخلوط، مقاومت لازم، اندازه و شکل عضو بتنی، دما و رطوبت محیط در طول عمل آوری و پس از آن بستگی دارد. با این حال زمان لازم برای عمل آوری در کارهای اجرائی را نمی‌توان به سادگی تجویز کرد بسته به شرایط سازه و انتظاراتی که از آن می‌رود می‌تواند این زمان متغیر باشد. لذا برای شرایطی که نیاز به بتن مقاوم در برابر سایش و دوام خاص است دو برابر نمودن زمان عمل آوری می‌تواند تأثیر مثبتی بر افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن ایجاد نماید. لازم به ذکر است بتن با نسبت آب به سیمان کمتر مدت کوتاه‌تری عمل آورده می‌شود تا بتنی با نسبت آب به سیمان بیشتر. همچنین بتن با سیمان دیرگیر برای عمل آوردی به زمان بیشتری نیاز دارد. باید توجه داشت که دمای عمل آوری بالاتر نسبت به دمای پایین تر باعث رشد سریع‌تر مقاومت بتن می‌شود، اما مقاومت ۲۸ روزه در مقایسه با دمای کمتر کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری در دمای زیاد در سنین اولیه موجب افزایش مقاومت فشاری اولیه می‌شود ولی نهایتاً منجر به افت مقاومت فشاری می‌گردد. در حالیکه بتنی که در معرض دمای کم در سنین اولیه قرار می‌گیرد اگرچه با کاهش مقاومت روبرو می‌شود ولی مقاومت نهایی آن تقریباً با حالت استاندارد برابر است. اگر چه می‌توان بتن را در آزمایشگاه دوباره اشباع کرد، اما انجام این کار در محل دشوار است. لذا بهترین کار، عمل آوری مرطوب پیوسته بتن از زمان بتن‌ریزی و پرداخت تا کسب مقاومت، نفوذ ناپذیری یا دوام کافی است. توجه به عواملی از قبیل حساسیت بتن از نظر سیستم سیمانی به عمل آوری و وجود مواد افزودنی پودری معدنی (مکمل)، آهنگ هیدراتاسیون سیمان و میزان خلل و فرج حفره‌ای، شرایط محیطی قبل و بعد از عمل آوری تأثیرگذار بر آهنگ رشد مقاومت و شدت خشک شدن سطح بتن پس از خاتمه عمل آوری، وجود مواد افزودنی شیمیایی و تأثیر آن بر آهنگ هیدراتاسیون و کسب مقاومت، شرایط بهره‌برداری بتن تأثیرگذار بر خصوصیات سطح بتن و نسبت آب به سیمان و عیار سیمان در حداقل زمان عمل آوری موثر می‌باشد.

کلمات کلیدی: عمل آوری، بتن سخت شده، هیدراتاسیون، رطوبت، افزایش مقاومت، ترک خوردگی

مقدمه

به مجموعه اقداماتی که به پیشرفت جدی هیدراسیون، با بکارگیری رطوبت و دمای مناسب در بتن برای مدت زمانی پس از پایان عملیات بتن‌ریزی کمک می‌کند تا خصوصیات موردنظر ایجاد شود، عمل‌آوری گفته می‌شود.

مقاومت و دوام بتن تنها در صورتی تأمین می‌شود که به خوبی عمل‌آوری شده باشد. برای این منظور تنها تأمین رطوبت و دمای مناسب لازم است. عمل آوردن متشکل از محافظت، مراقبت و پروراندن می‌باشد. محافظت، جلوگیری از اثر نامطلوب عوامل خارجی و مراقبت به مجموعه تدابیر برای حفظ رطوبت به منظور رسیدن به حداکثر میزان آبگیری گفته می‌شود، و پروراندن، سرعت بخشیدن به گرفتن و سخت شدن بتن با افزایش دما می‌باشد. عمل‌آوری برای تولید بتنی که ویژگی‌های مطلوب را داشته باشد امری ضروری است.

عمل‌آوری بر روی خصوصیات بتن سخت‌شده تأثیرگذار است و دوام، آب‌بندی، مقاومت سایشی، پایداری حجمی و مقاومت در برابر ذوب و انجماد را افزایش می‌دهد.

پس از مخلوط شدن آب و سیمان، واکنشی به نام هیدراسیون انجام می‌شود. میزان پیشرفت این واکنش بر روی مقاومت و دوام بتن تأثیرگذار است. مقدار آب بتن تازه مخلوط شده معمولاً بیش از حد موردنیاز هیدراسیون سیمان است. اما به دلیل هدر رفتن زیاد آب در اثر تبخیر، هیدراسیون به تأخیر افتاده یا به حد کافی انجام نمی‌شود.

روش عمل‌آوری بتن به مصالح مورد استفاده، روش ساخت و مورد استفاده بتن بستگی دارد. در اکثر کارهای بتنی، عمل‌آوری معمولاً شامل به کار بردن مواد عمل‌آوری یا پوشاندن بتن تازه ریخته و پرداخت شده با ورق‌های نایلون یا گونی مرطوب است. هر چند مؤثرترین شیوه عمل‌آوری، رطوبت‌رسانی به بتن می‌باشد.

افزایش مقاومت بتن با گذشت زمان تحت شرایط زیر ادامه پیدا می‌کند:

۱- وجود سیمان هیدراته نشده

۲- مرطوب ماندن بتن یا وجود رطوبت نسبی بیش از ۸۰٪

۳- وجود حداقل دمای مطلوب در بتن

۴- وجود فضای کافی جهت تشکیل محصولات هیدراسیون

زمانی که رطوبت نسبی بتن به زیر حدود ۸۰٪ نزول پیدا می‌کند، هیدراسیون و افزایش مقاومت به طور نسبی متوقف می‌شود. چنانچه بتن پس از یک دوره خشک شدن دوباره اشباع شود، هیدراسیون دوباره از سر گرفته می‌شود و مقاومت مجدداً افزایش می‌یابد. اگر چه می‌توان بتن را در آزمایشگاه دوباره اشباع کرد، اما انجام این کار در محل دشوار است. لذا بهترین کار، عمل‌آوری مرطوب پیوسته بتن از زمان بتن‌ریزی و پرداخت تا کسب مقاومت، نفوذ ناپذیری یا دوام کافی است.

تبخیر آب و قرار گرفتن بتن در معرض تر و خشک شدن پی در پی باعث جمع‌شدگی بتن و در نتیجه ایجاد تنش‌های کششی در داخل بتن می‌شود. چنانچه این تنش‌ها پیش از کسب مقاومت کششی کافی بتن ایجاد شوند، ترک‌خوردگی سطحی پدید می‌آید. بنابراین عمل‌آوری و حفظ رطوبت بتن به محض آنکه به سطح بتن آسیب نرساند باید آغاز شود.

در صورت پایین بودن دمای بتن، هیدراسیون با سرعت بسیار کمتری ادامه پیدا می‌کند. برای رشد مقاومت اولیه دمای کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد نامطلوب است و در دمای کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد رشد مقاومت اولیه به مقدار زیادی به تأخیر می‌افتد و در دمای انجماد یا کمتر تا حد ۱۰- درجه سانتی‌گراد رشد مقاومت متوقف شده یا ناچیز خواهد بود.

روش‌های عمل‌آوری

بتن را می‌توان به صورتهای زیر مرطوب نگه داشت:

۱- روش‌های رطوبت‌رسانی مستقیم: از جمله این روش‌ها می‌توان به غرقاب کردن، آب بتن روی بتن آب‌فشانی یا مه‌سازی و یا بخاردادن اشاره کرد. در این روش‌ها به دلیل تبخیر آب مقداری خنک‌سازی نیز صورت می‌گیرد که در هوای گرم سودمند است.

۲- روش‌های رطوبت‌رسانی غیرمستقیم (با واسطه جاذب): استفاده از گونی مرطوب یا حصیر و گلیم، پوشال، خاک‌اره و ماسه مرطوب از جمله این روش‌ها به حساب می‌آید. در این روش‌ها نیز سطح بتن می‌تواند خنک شود.

۳- روش‌های کاهش اتلاف آب مخلوط از سطح بتن: با پوشاندن بتن با کاغذ نفوذناپذیر یا ورق‌های پلاستیک و یا استفاده از مواد شیمیایی غشاء‌ساز عمل‌آوری می‌توان جلوی تبخیر از سطح را گرفت.

روش انتخابی یا ترکیب روش‌های فوق به عواملی همچون در دسترس بودن مواد عمل‌آوری، اندازه، شکل و سن بتن، امکانات تولید، زیبایی ظاهری و امکان انجام آن صرفه اقتصادی بستگی دارد.

۱- غرقاب کردن و غوطه‌ور کردن

سطوح صافی مثل کف بتنی را می‌توان به روش غرقابی عمل‌آوری کرد. غرقاب کردن روشی ایده‌آل در جلوگیری از تلف شدن رطوبت موجود در بتن است. همچنین این روش برای حفظ دمای یکنواخت در بتن مؤثر است. برای جلوگیری از تنش‌های حرارتی که باعث ترک‌خوردگی می‌شود، دمای آب عمل‌آوری نباید بیش از حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد از دمای بتن خنک‌تر باشد. روش غرقابی مستلزم کار و نظارت قابل توجهی است، در مواردی که ظاهر بتن دارای اهمیت است، آب مورد استفاده برای عمل‌آوری باید عاری از موادی باشد که باعث لک‌شدگی یا تغییر رنگ بتن می‌شود.

کامل‌ترین روش عمل‌آوری با آب، غوطه‌ورکردن کل عضو بتنی است. از این روش برای عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه و یا قطعات پیش‌ساخته استفاده می‌شود.

۲- مه‌سازی و آب‌پاشی

در مواردی که دمای محیط کاملاً بالای حد انجماد بوده و رطوبت پایین است، مه‌سازی و آب‌پاشی بهترین روش عمل‌آوری محسوب می‌شود. مه‌ریزدانه اغلب از طریق سیستمی از افشانک‌ها یا افشانه‌ها ایجاد می‌شود که رطوبت نسبی هوا را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب تبخیر آب از سطح بتن کند می‌شود.

آب‌پاشی می‌تواند عملیاتی پرهزینه باشد. این روش مستلزم مصرف مقدار زیادی آب و نظارت دقیق است. چنانچه آب‌پاشی به صورت متناوب انجام شود، باید با استفاده از گونی یا مواد مشابه از خشک شدن بتن در فواصل زمانی آب‌پاشی جلوگیری کرد. در غیر این صورت چرخه‌های پی‌درپی تر و خشک شدن بتن باعث ترک‌خوردگی و ترک‌های ریز سطحی می‌شود. رطوبت لازم نیز در اختیار بتن قرار می‌گیرد. دمای آب در آب‌پاشی نباید بیش از ۱۲ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای سطح بتن باشد.

۳- پوشش‌های مرطوب

از پوشش‌های الیافی اشباع شده با آب مانند گونی، زیر انداز کتانی، پتو یا دیگر الیاف نم گیر مانند حصیر طبیعی به شکل معمول برای عمل‌آوری بتن استفاده می‌شود. گونی باید عاری از موادی باشد که برای بتن زیان‌بخش بوده یا باعث تغییر رنگ می‌شوند. گونی و کرباس و وسایل مشابه، باید قبلاً خوب شسته شوند تا از ایجاد لک روی سطح بتن جلوگیری شود. گونی‌های مصرفی باید به حد کافی ضخیم بوده و مرتباً مرطوب شوند.

پوششی از خاک، ماسه یا خاک اره مرطوب نیز روش عمل‌آوری مؤثری است و اغلب برای کارهای کوچک مفید است. خاک، خاک اره و ماسه باید از مواد مضر برای بتن و دانه‌های درشت‌تر از ۲۵ میلی‌متر عاری باشد. ضخامت این نوع پوشش‌ها باید حداقل ۵۰ میلی‌متر باشد و تمامی سطح بتن را بپوشاند و به طور مداوم خیس نگاه داشته شود. نقطه ضعف اصلی پوشش خاک، ماسه، خاک اره، علف یا کاه مرطوب احتمال تغییر رنگ بتن است. از کاه یا علف خیس و مرطوب نیز می‌توان برای عمل‌آوری سطوح تخت استفاده کرد. این مواد باید در لایه‌ای به ضخامت حداقل ۱۰ سانتی‌متر پخش و با وسایلی نظیر تور سیمی در برابر وزش باد محافظت شوند.

۴- کاغذ نفوذ ناپذیر

این کاغذها از دو لایه کاغذ مخصوص مسلح به رشته‌های نازک تقویتی ساخته که به وسیله مواد قیری به یکدیگر چسبانده می‌شوند. این کاغذ امکان عمل‌آوری سطوح افقی و بتن‌سازه‌ای با اشکال نسبتاً ساده را فراهم می‌کند. یک مزیت مهم این روش آن است که نیازی به پاشیدن دوره‌ای آب وجود ندارد. در عمل‌آوری با کاغذ نفوذ ناپذیر علاوه بر عمل‌آوری تا حدودی از بتن در برابر آسیب دیدگی ناشی از فعالیت‌های ساختمانی بعدی و همین‌طور نور مستقیم خورشید محافظت می‌شود. در هوای گرم بهتر است از کاغذهای روشن یا سفید که جذب گرمای کمتری دارند استفاده شود. این کاغذها سنگین هستند و بر سطح بتن متکی می‌شوند و در اثر باد سریعاً از سطح جدا نمی‌شوند. همپوشانی ۱۰۰ میلی‌متری در استفاده از آنها ضروری است و تعمیر آنها براحتی امکان‌پذیر است. تعریق در زیر آنها مشکلی بوجود نمی‌آورد.

۵- ورق‌های پلاستیکی

این پوشش‌ها مانند ورق‌های نازک پلی‌اتیلن به ضخامت حداقل ۰/۱ میلی‌متر پس از مرطوب کردن سطح بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. ورق پلاستیک باید کاملاً سطح بتن را بپوشاند و با همپوشانی حدود ۱۰۰ میلی‌متر روی هم قرار گیرد و قطعات چوب بر روی آن قرار داده شود تا ورق کاملاً در تماس با سطح بتن باشد و وزش باد سبب بلند کردن و حرکت آن نگردد. ممکن است یک طرف ورق پلی‌اتیلن با کرباس پوشیده شود، به این ترتیب پوشش مرکبی حاصل می‌شود که به نگهداری سطح بتن کمک می‌نماید. مزیت این روش این است که می‌توان آن را بر روی سطوح با اشکال پیچیده به سادگی به کار برد. اجرای ورق‌های نازک پلاستیکی بر روی ستون‌ها و پوشاندن آن‌ها پس از قالب‌برداری به راحتی امکان‌پذیر است و رطوبت موجود را حفظ می‌کند. به راحتی سوراخ یا پاره می‌شود در حالیکه ترمیم آنها معمولاً مشکل می‌باشد. تعریق در زیر نایلون و لطمه زدن به زیبایی سطوح افقی از مشکلات آن می‌باشد. ورق نایلون را می‌توان همراه با گونی خیس به کار برد.

۶- مواد شیمیایی عمل آوری غشاساز

از مواد مایع شیمیایی غشاساز شامل مومها، رزینها، یا روغن بزرک جو شانه شده و دیگر مواد می‌توان برای کند کردن یا کاهش تبخیر از سطح بتن استفاده کرد. در زمان به کار بردن این اندود، سطح بتن باید مرطوب باشد. برای کسب بهترین نتیجه و بازده، باید بلافاصله بعد از پرداخت نهایی سطح بتن و نیز پیش از آنکه سطح بتن کاملاً خشک شود، مواد عایق به طور یکنواخت روی سطح بتن به صورت دو لایه عمود بر هم پاشیده شود تا با ایجاد غشائی نازک و غیر قابل نفوذ، از تبخیر آب از سطح بتن جلوگیری کند.

در پروژه‌های بزرگ توصیه می‌شود که از دستگاه‌های رنگ پاش (پيستوله) استفاده شود تا مواد عمل آورنده به صورت یکنواخت پخش گردد. لازم است در بیشتر موارد این مواد در پایان عمل آوری از سطح بتن زدوده شود و به کارگیری نوع محلول در آب ارجحیت دارد. مقدار مصرف این مواد بسته به صافی سطح معادل ۰/۲۵ تا ۰/۴ لیتر در مترمربع است. این مواد نباید قبل از اتمام دوره عمل آوری، ترک بخورد یا طبله و پوسته نماید.

۷- باقی گذاشتن قالب‌ها در جای خود

چنانچه سطوح بالایی نمایان بتن مرطوب نگه داشته شوند، قالب‌ها حفاظت رضایت بخشی در مقابل اتلاف رطوبت ایجاد می‌کنند. در این حالت باید قالب‌ها را تا حد امکان به مدت طولانی‌تری در جای خود باقی گذاشت. قالب‌های چوبی باز نکرده را به ویژه در هوای گرم و خشک باید با آب یا شی مرطوب نگه داشت. چنانچه انجام این کار ممکن نیست، آن‌ها را باید هر چه سریع‌تر باز کرد و بدون درنگ از روش عمل آوری دیگری استفاده نمود. میتوان با شل کردن قالب‌های قائم چوبی یا فولادی، آب را به سطوح جانبی بتن رسانید بدون اینکه قالب‌ها را بطور کامل باز نمود.

۸- عمل آوری با بخار

عمل آوری با بخار روشی برای عمل آوری سریع بتن است که در مواردی همچون اهمیت داشتن کسب مقاومت سریع یا ضروری بودن گرما برای انجام هیدراسیون در شرایطی همچون هوای سرد مفید است. دو روش عمل آوری با بخار عبارتند از: بخار در فشار جو و بخار فشار بالا در اتوکلاو.

۸-۱- عمل آوردن با بخار در فشار اتمسفر

این روش برای سازه‌های بتنی واقع در محیط‌های بسته یا اعضا و قطعات پیش ساخته به کار گرفته می‌شود. عمل آوری با بخار در فشار جو معمولاً در فضای محصور انجام می‌شود تا اتلاف رطوبت و گرما به حداقل برسد. برای ایجاد فضای محصور اغلب از برزنت استفاده می‌شود. اعمال بخار در فضای محصور را باید تا انجام گیرش اولیه یا حداقل ۳ ساعت پس از بتن‌ریزی نهایی به تأخیر انداخت تا فرصت سخت شدن جزیی بتن فراهم شود.

دمای بخار موجود در فضای محصور را باید تا ایجاد مقاومت موردنظر در بتن، در حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشت. از دمای عمل آوری بالای ۷۰ درجه سانتی‌گراد باید پرهیز کرد، زیرا غیر اقتصادی می‌باشد و احتمال آسیب دیدگی وجود دارد. عمل آوری بتن در دمای حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد علاوه بر کسب مقاومت سریع، مزایای دیگری نیز در بردارد. برای مثال جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و خزش در مقایسه با بتن عمل آمده ۲۸ روزه در دمای ۲۳ کاهش پیدا می‌کند.

نرخ افزایش دما در قطعات نازک باید کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در هر ساعت و برای قطعات ضخیم کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد در هر ساعت باشد. نرخ کاهش دما در پایان عمل آوری نیز در همین حدود یا کمتر از آن می‌باشد. مدت عمل آوری در بخار با احتساب زمان تأخیر اولیه و افزایش دما، حفظ دما و کاهش آن بهتر است از ۲۴ ساعت فراتر نرود زیرا علاوه بر غیر اقتصادی بودن ممکن است لطماتی را نیز به وجود آورد.

۸-۲- عمل آوردن در اتوکلاو

برای عمل آوردن سریع بتن و رسیدن به مقاومت‌های موردنظر و قالب‌برداری فوری قطعات پیش ساخته، استفاده از این روش معمول می‌باشد و توصیه می‌شود، اما در ساخت درجا کاربردی ندارد. دمای عمل آوری بین ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کار در سیستم بخاردهی ۴ تا ۱۲ مگاپاسکال می‌باشد. از این روش در ساخت لوله‌های بتنی و بعضی اعضا و قطعات ساختمانی پیش ساخته و به ویژه سبک استفاده می‌شود. در صورت استفاده از این روش برای جلوگیری از کاهش مقاومت درازمدت و دوام بهتر است از مواد سیلیسی فعال (روباره و پوزولان‌ها) استفاده نمود.

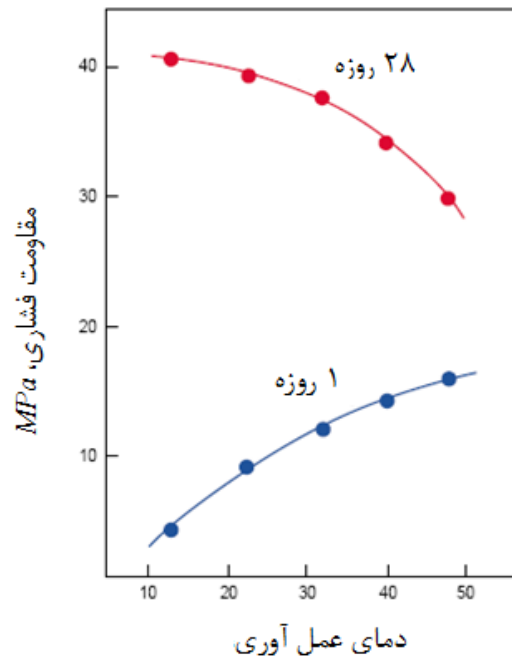
۹- پوشش عایق حرارت

در مواردی که دما به کمتر از صفر کاهش پیدا می‌کند، از لایه‌ای عایق برای جلوگیری از کاهش دمای بتن همچون کاه خاکی یا علف می‌توان برای عایق بندی بتن در برابر یخ زدن استفاده کرد. این روش در بتن‌ریزی در هوای سرد کاربرد دارد. استفاده از خاک یا ماسه، بکارگیری پتوی عایق پشم شیشه یا فوم پلی‌استایرن (یونولیت) امکان‌پذیر است. به هر حال هدایت یا انتقال حرارت مواد مختلف یکسان نیست و نیاز به ضخامت‌های مختلفی وجود دارد.

مدت و دمای عمل آوری

مدت زمان لازم برای حفاظت از بتن و عمل آوری به عواملی نظیر: نوع مواد سیمانی مورد استفاده، نسبت‌های مخلوط، مقاومت لازم، اندازه و شکل عضو بتنی، دما و رطوبت محیط در طول عمل آوری و پس از آن بستگی دارد. زمان لازم برای عمل آوری را در کارهای اجرائی نمی‌توان به سادگی تجویز کرد و بستگی به شرایط سازه و انتظارات ما دارد. برای شرایطی مانند نیاز به بتن مقاوم در برابر سایش و دوام خاص، دو برابر نمودن زمان عمل آوری مطلوب خواهد بود. در این رابطه بیان شده است که بتنی با نسبت آب به سیمان کمتر مدت کوتاه‌تری عمل آورده می‌شود تا بتنی با نسبت آب به سیمان بیشتر. همچنین بتن با سیمان دیرگیر برای عمل آوری به زمان بیشتری نیاز دارد.

دمای عمل آوری بالاتر نسبت به دمای پایین تر باعث رشد سریع‌تر مقاومت بتن می‌شود، اما همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقاومت ۲۸ روزه در مقایسه با دمای کمتر کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری در دمای زیاد در سنین اولیه موجب افزایش مقاومت فشاری اولیه می‌شود ولی نهایتاً منجر به افت مقاومت فشاری می‌گردد. در حالیکه بتنی که در معرض دمای کم در سنین اولیه قرار می‌گیرد اگرچه با کاهش مقاومت روبرو می‌شود ولی مقاومت نهایی آن تقریباً با حالت استاندارد برابر است. همچنین تغییر دما در سنین بعد از ۳ روز تأثیر کمی بر مقاومت نهایی دارد.



شکل ۱: افزایش مقاومت ۱ روزه و کاهش مقاومت ۲۸ روزه با افزایش دمای عمل آوری

چند عامل را باید مورد بررسی قرار داد تا حداقل زمان عمل آوری معلوم شود:

- حساسیت بتن از نظر سیستم سیمانی به عمل آوری و وجود مواد افزودنی پودری معدنی (مکمل)
 - دمای بتن که بر آهنگ هیدراسیون سیمان و میزان خلل و فرج حفره‌ای اثر می‌گذارد
 - شرایط محیطی قبل و بعد از عمل آوری که بر آهنگ رشد مقاومت و شدت خشک شدن سطح بتن پس از خاتمه عمل آوری اثر می‌گذارد.
 - شرایط بهره‌برداری بتن که بر خصوصیات سطح بتن می‌تواند مؤثر باشد.
 - وجود مواد افزودنی شیمیایی و تأثیر آن بر آهنگ هیدراسیون و کسب مقاومت، نسبت آب به سیمان و عیار سیمان.
- در بتن‌های توانمند به علت کاهش نفوذپذیری سریع بتن که مدت زمان آن باید معین شود، بتن اجازه ورود مؤثر آب را نمی‌دهد و دیگر عمل آوری مرطوب چندان کارایی نخواهد داشت. استفاده از مواد جایگزین سیمانی نیز به دلیل حساسیت آنها، به عمل آوری بلند مدت تری نیاز دارند.
- مدت عمل آوری بتن را می‌توان از جدول ۱ بدست آورد.

جدول ۱ حداقل مدت عمل آوری رطوبتی برحسب روز با توجه به عوامل مختلف

کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	روند هیدراسیون سیمان* شرایط محیطی مجاور*
$\frac{140}{T+10}$	$\frac{120}{T+10}$	$\frac{100}{T+10}$	$\frac{80}{T+10}$	ضعیف
$\frac{120}{T+10}$	$\frac{100}{T+10}$	$\frac{80}{T+10}$	$\frac{60}{T+10}$	متوسط
ضابطه خاصی وجود ندارد و مدت عمل آوری معینی توصیه نمی‌شود.				خوب

* در مواردی که دوام خاصی مورد نظر است مانند بتن در محیط خلیج فارس یا بتن در معرض سایش یا یخ‌بندان و آب‌شدگی پی در پی، زمان مزبور را می‌توان ۵۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش داد. بتن توانمند نیز شامل این مورد می‌شود.

* دمای بتن T بین ۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند تغییر کند و برای دمای بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد این رابطه اعتبار ندارد. زمان لازم برای عمل آوری در دمای بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از مقدار بدست آمده از این رابطه است.

* شرایط محیطی خوب دارای رطوبت نسبی بیش از ۸۰ درصد و بدون باد و آفتاب است و شرایط محیطی ضعیف دارای رطوبت نسبی کمتر از ۵۰ درصد و همراه باد و آفتاب می‌باشد و شرایط محیطی متوسط حد فاصل دو شرایط خوب و ضعیف است.

* مواد سیمانی با سرعت هیدراسیون خیلی زیاد مانند سیمان پرتلند نوع زود سخت شونده، سرعت هیدراسیون زیاد مانند سیمان پرتلند نوع ۱ و ۲ یا سیمان پرتلند آهکی، سرعت هیدراسیون متوسط مانند سیمان‌های پرتلند پوزولانی و روباره‌ای یا پرتلند نوع ۵ (ضد سولفات) و سرعت هیدراسیون کم مانند سیمان پرتلند پوزولانی ویژه یا سیمان پرتلند روباره‌ای ضد سولفات می‌باشد. وجود مواد افزودنی زودگیر یا دیرگیر کننده می‌تواند یک سیمان را از نظر سرعت هیدراسیون یک رده بالا یا پایین ببرد.

عمل آوری در شرایط خاص

۱- عمل آوری بتن دارای مواد سیمانی مکمل

تأثیر شرایط دما و رطوبت بر روی خصوصیات گیرش و رشد مقاومت بتن‌های دارای مواد سیمانی مکمل مشابه تأثیر آن‌ها بر روی بتنی است که تنها از سیمان پرتلند ساخته شده است. اما به هر حال برای مواد معینی که مقاومت اولیه خود را به آهستگی کسب می‌کنند، به زمان عمل آوری بیشتری احتیاج است.

میزان مصرف زیاد دوده سیلیس ممکن است به ایجاد بتنی بسیار چسبنده با آب‌انداختگی یا جداشدگی بسیار کم سنگدانه‌ها منجر گردد. به دلیل کمی یا نبود آب‌انداختگی در سطح بتن جهت تبخیر، در صورت عدم انجام اقدامات پیش‌گیرانه، امکان ایجاد ترک خوردگی خمیری به ویژه در روزهای گرم و همراه باد وجود دارد.

عمل آوری صحیح تمامی بتن‌ها به ویژه بتن دارای مواد سیمانی مکمل را باید بلافاصله پس از پرداخت کاری آغاز کرد. برای بتن‌های دارای مواد سیمانی مکمل معمولاً باید عمل آوری مرطوب ۷ روزه یا عمل آوری غشایی کافی انجام داد. همانند بتن سیمان پرتلند، دمای عمل آوری پایین می‌تواند به کاهش رشد مقاومت اولیه منجر شود.

بتن‌های حاوی مواد پوزولانی به عمل آوری بسیار حساس هستند. افت مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان در اثر ضعف عمل آوری نسبت به بتن‌های معمولی بیشتر است که بدلیل رشد ریزترک‌های ناشی از خشک‌شدگی می‌تواند باشد.

۲- عمل آوری بتن‌های توانمند

در مورد بتن توانمند و بتن با مقاومت بسیار زیاد ملاحظات عمل آوری اضافی اعمال می‌گردد. در مواردی که از نسبت آب به مواد سیمانی کم استفاده می‌شود و به ویژه در زمان استفاده از دوده سیلیس در مخلوط، مقدار آب‌انداختگی بتن ناچیز خواهد بود. در این شرایط عمل آوری با مه یا به کار بردن ماده کندکننده تبخیر بلافاصله پس از صاف کردن سطح بتن امری اجباری است. این کار برای جلوگیری از ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری سطوح افقی و به حداقل رساندن پوسته شدگی ضرورت دارد. در این مورد عمل آوری با مه و به دنبال آن ۷ روز عمل آوری مرطوب بسیار مؤثر است.

۳- عمل آوری و حفاظت بتن در هوای گرم

بعد از عملیات بتن ریزی و پرداخت بتن، بلافاصله باید اقداماتی برای حفاظت بتن در برابر دمای زیاد، تشعشع مستقیم خورشید، رطوبت کم و وزش باد صورت گیرد. در صورت امکان، شرایط دمایی کار باید بطور یکنواخت متعادل نگه داشته شود تا اجازه دهد که بتن به مقاومت کامل خود برسد. اثر دمای زیاد عمل آوری اولیه بر کاهش مقاومت نهایی بتن در بتن ریزی در دمای زیاد، بیشتر است. روش‌هایی برای حفظ سطوح نمایان از خشک شدگی باید با پوشش وسیع و بدون درنگ آن‌ها شروع شده و بدون وقفه ادامه یابد. نقصان در کار ممکن است منجر به جمع شدگی و ترک خوردگی بیش از حد شود و به دوام و مقاومت سطحی بتن آسیب وارد نماید. عمل آوری باید برای حداقل ۷ روز اول ادامه یابد و هرگونه تغییر در روش عمل آوری بعد از اینکه بتن سه روزه شد، انجام گیرد. نباید اجازه داده شود که سطح بتن در حین انتقال خشک شود. بتن باید همچنان در مقابل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی حرارتی در اثر تغییرات سریع دما، مخصوصاً در طی ۲۴ ساعت اول حفظ شود. بتن در معرض خشک شدن سریع، ظرفیت کرنش کششی کمتری داشته و در مقابل ترک خوردگی نسبت به بتنی که اجازه داده می‌شود که با سرعت آهسته تر خنک گردد، آسیب پذیرتر است.

طبق استاندارد کانادا زمانی که دمای هوا در حدود ۲۷ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر است، عمل آوری در طول دوره عمل آوری پایه باید با افشانه کردن آب یا با استفاده از پارچه جاذب اشباع از آب انجام شود تا خنک سازی تبخیری صورت گیرد. در مورد بتن حجیم زمانی که دمای هوا در حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر است باید عمل آوری را در دوره عمل آوری پایه انجام داد تا افزایش دمای بتن به حداقل کاهش پیدا کند. در استاندارد کانادا دوره عمل آوری پایه به صورت عمل آوری سه روزه در حداقل دمای ۱۰ درجه یا زمان لازم جهت دستیابی به ۴۰٪ مقاومت فشاری مشخصه ۲۸ روزه تعریف شده است. میزان رشد یا بلوغ بتن سه روزه در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد مقدار ۶۰ درجه روز می‌شود که عملاً معادل ۴۰ در صد مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی سیمان با سرعت هیدراسیون زیاد (سیمان پرتلند معمولی) می‌گردد.

در این حالت نیز دمای آب عمل آوری نسبت به بتن نباید بیش از ۱۲ درجه سانتی‌گراد سردتر باشد. این موضوع خطر ترک خوردگی ناشی از تنش‌های حرارتی حاصل از اختلاف دمای میان بتن و آب عمل آوری را به حداقل کاهش می‌دهد. سطوح عمل آوری شده مرطوب باید پس از دوره عمل آوری به آهستگی خشک شوند تا خطر ترک‌های ریز سطحی و ترک خوردگی کاهش پیدا کند. ترک‌های ریز سطحی تا عمق زیادی در زیر سطح نفوذ نمی‌کنند و به دلیل جمع شدگی جزئی سطحی ایجاد می‌شوند. ترک‌های ریز سطحی به سختی مشهوداند، مگر آن که بتن پس از مرطوب شدن سطح در حال خشک شدن باشد.

هوای گرم که شاید باعث ترک خوردگی حرارتی شود، شامل اختلاف دمای زیاد شب و روز می‌باشد. در این شرایط، بتن باید بوسیله گذاشتن چندین لایه ورق ضد آب روی بتن یا بوسیله استفاده از روش‌های عایق سازی محافظت شود. در بین روش‌های عمل‌آوری، عمل‌آوری مرطوب بهترین روش برای رشد مقاومت بتن و به حداقل رساندن جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن اولیه می‌باشد. این روش می‌تواند با انباشتن آب بر سطح بتن، پوشش با ماسه تمیز که بطور پیوسته خیس نگه داشته می‌شود یا آب پاشی مداوم، فراهم گردد. زمانی که آب پاشی مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید مراقبت شود که سطح بتن آسیب نبیند. روش عملی‌تر عمل‌آوری مرطوب، شامل تر نمودن بتن و پوشاندن آن با روکش نفوذناپذیر و یا بکارگیری حصیرهای جاذب آب یا پارچه چتایی که بطور پیوسته خیس نگه داشته می‌شود، می‌باشد. این مواد باید در همهٔ زمان‌ها در تماس با سطح بتن نگه داشته شود. از چرخه‌های متناوب خیس و خشک شدن باید اجتناب شود چون منجر به ترک خوردگی می‌شود. دمای آب استفاده شده برای عمل‌آوری بتن تا حد ممکن باید به دمای بتن نزدیک باشد تا از شوک حرارتی بتن اجتناب گردد.

در جایی که شرایط کارگاه برای عمل‌آوری مرطوب، مطلوب نیست، استفاده از ترکیبات عمل‌آوری غشاساز مایع، عملی‌ترین روش عمل‌آوری است. این مواد اتلاف رطوبت از بتن را محدود می‌کند و بدین وسیله اجازه می‌دهد تا مقاومت، دوام و مقاومت سایشی رشد نماید. در سطوح بتن در معرض آفتاب، ترکیبات رنگدانه سفید که حرارت را منعکس می‌کنند باید استفاده شود. قابلیت حفظ رطوبت بطور قابل ملاحظه‌ای بین محصولات فرق می‌کند. برای استفاده در شرایط هوای گرم، مصالحی باید انتخاب شوند که نگهداری بهتر رطوبت را فراهم کنند.

قالب‌های چوبی بتن باید بطور مداوم در طی دوره عمل‌آوری اولیه مرطوب نگاه داشته شود. بتن قالب‌گیری شده نیاز به دسترسی اولیه به آب عمل‌آورنده خارجی فراوان برای رشد مقاومت دارد. بعد از برداشتن قالب، سوراخ پیچ‌های نگهدارنده قالب می‌تواند پر شود و تعمیرات لازم با برداشتن پوشش بخش کوچکی از بتن در زمان پرداختن به این کار، انجام شود. این تعمیرات باید بتواند در چند روز اول بعد از قالب‌برداری، کامل شود تا اینکه تعمیرات و پرکردن سوراخ پیچ‌های قالب بتواند با بتن‌های مجاور انجام گیرد.

۴- عمل‌آوری و حفاظت بتن در هوای سرد

چنانچه در تمام طول شبانه روز امکان یخ‌بندان هست، بتن باید در مقابل یخ‌زدگی محافظت و گرم نگه داشته شود تا کسب مقاومت امکان‌پذیر شود. معمولاً قالب‌های چوبی به تنهایی عایق مناسبی برای بتن به شمار می‌روند، در حالیکه قالب‌های فلزی عایق خوبی برای گرما نیستند.

برای عمل‌آوری در هوای سرد می‌توان از روش‌های زیر استفاده کرد:

۴-۱- دوربند

دوربندهای گرم شده برای حفاظت از بتن در هوای سرد بسیار مؤثر است، اما بسیار پرهزینه‌اند. دوربندها را می‌توان از چوب، برزنت کرباسی یا ورق پلی‌اتیلن ایجاد کرد (شکل ۵-۲). همچنین دوربندهای پیش ساخته پلاستیکی صلب نیز وجود دارند. در مواردی که دوربند در زیر سقف ساخته می‌شود، قالب‌بندی را می‌توان تا بالای سقف ادامه داد تا به عنوان باد شکن نیز عمل کند. معمولاً ارتفاع ۲ متر از بتن و کارکنان ساختمانی در مقابل بادهای گزنده‌ای که باعث افت دما یا تبخیر می‌شوند

حفاظت کافی ایجاد می‌کند. بسته به سرعت بادهای پیش‌بینی شده، دمای محیط، رطوبت نسبی و دمای بتن‌ریزی، باد شکن را می‌توان بلندتر یا کوتاه‌تر ساخت.



شکل ۲ برای محصور کردن اسکلت ساختمان از ورقهای پلاستیکی پلی اتیلن استفاده شده است.

۲-۴- مواد عایق بندی

گرما و رطوبت بتن را می‌توان با پوشاندن آن با پتوهای عایق یا عایق لحافی حفظ کرد. کارآیی عایق‌بندی را می‌توان با قرار دادن دماسنج در زیر آن و در تماس با بتن مشخص کرد. گوشه‌ها و لبه‌های بتن در برابر یخ‌زدگی آسیب‌پذیرترند. به همین دلیل دمای این بخش‌ها را باید به طور مرتب کنترل کرد.

در آمریکای شمالی از دهه ۱۹۹۰ استفاده از قالب‌های عایق دائمی بتن متداول شده است. قالب‌هایی را که برای استفاده مکرر ساخته می‌شوند اغلب می‌توان به شکلی اقتصادی با عایق پتویی یا لحاف تجاری پوشاند. این عایق باید پوشش مقاوم ضد رطوبتی داشته باشد تا در اثر استفاده نادرست و قرار داشتن در معرض هوا دوام بیاورد. استفاده از حصیر برای سطوح افقی از قبیل دال‌ها اشکالی ندارد، به شرط آنکه ابتدا با یک لایه پلی اتیلن سطح بتن را پوشانده، سپس حصیر را بر روی آن قرار داده شود و بعد با یک لایه دیگر از پلی اتیلن یا برزنت روی حصیر پوشانده شود.

پتوهای عایق بندی از پشم شیشه، لاستیک اسفنجی، پلی استایرن اسفنجی، فوم وینیل، پشم سنگ یا الیاف سلولز ساخته می‌شوند. پوشش‌های خارجی از کرباس، پلی اتیلن بافته یا الیاف مقاوم ساخته می‌شوند تا در جابه‌جایی‌ها دوام بیاورند. کارآیی پتوهای عایق بندی را باید با دماسنج کنترل کرد. در صورت ضرورت می‌توان از این پتوها به صورت ۲ و یا ۳ لایه استفاده کرد.

۳-۴- بخاری‌ها

برای عمل‌آوری بتن (پروراندن) در هوای سرد از انواع گرمایش زیر استفاده می‌شود:

(۱) بخاری با استفاه از مواد سوختنی

(۲) بخاری بادبزن دار

(۳) سیستم گرمایش آبی یا بخار و روغن داغ (رادیاتور)

(۴) جریان برق

(۵) بخار آب

(۶) استفاده از آبگرم

(۷) استفاده از گرمای بتن

در بخاری‌های هواکش دار یا غیرمستقیم، هواکشی وجود دارد که محصولات و گازهای ناشی از اشتعال را به بیرون انتقال می‌دهد (شکل ۵-۳). در مواردی که گرما از طریق سطح بالایی بتن تازه اعمال می‌شود برای مثال در دال کف، استفاده از این بخاری‌ها برای انتقال CO₂ به بیرون ضرورت دارد. از بخاری‌های بدون هواکش می‌توان برای گرم کردن فضای محصور شده قالب‌دار زیر بتن کف یا سقف بام استفاده کرد.

در بخاری‌هایی که با سوخت فسیلی کار می‌کنند و به خوبی می‌سوزد CO₂ تولید می‌شود. این گاز با کلسیم هیدروکسید (آهک) موجود در سطح بتن تازه ترکیب و لایه ضعیفی از کلسیم کربنات ایجاد می‌کند که باعث اختلال در هیدراسیون سیمان می‌شود، و pH بتن را پایین می‌آورد. پس استفاده از بخاری‌های بدون هواکش برای گرم کردن هوای روی سطح بتن‌ریزی مجاز نیست (حداقل ۲۴ ساعت باید سپری شود). به علاوه در این مدت باید استفاده از تجهیزات دیگری که سوخت مصرف می‌کنند و گاز CO₂ تولید می‌کنند را محدود ساخت. در صورت استفاده از بخاری‌های بدون هواکش، عمل‌آوری مرطوب فوری یا استفاده از مواد عمل‌آوری کربناسیون را به حداقل کاهش می‌دهد.

بخاری اشتعالی معمولی ارزان قیمت، فاقد بادبزن است که محصولات اشتعال را به هوای اطراف تخلیه می‌کند. گرمایش با تابش حاصل از بدنه فلزی بخاری انجام می‌شود. بخاری‌های دستی با، نفت، چوب یا پروپان مایع یا گاز طبیعی (متان) و زغال سنگ کار می‌کنند. نقطه ضعف اصلی بخاری‌های معمولی دمای بالای بدنه فلزی آنهاست که خطر جدی آتش سوزی را در پی دارد. و خشک‌شدگی موضعی را در صورت نزدیکی به بتن لخت بوجود می‌آورد.

بخاری‌های بادبزن دار که با مواد سوختنی فسیلی یا چوب کار می‌کنند بسیار مفید باشد مشروط بر اینکه گاز ناشی از سوختن مواد مختلف توسط دودکش به بیرون از محوطه انتقال یابد.



شکل ۳ بخاری غیرمستقیم یا هواکش دار، به لوله هواکش حامل گازهای اشتعال به بیرون فضای محصور توجه نمایید.

سیستم‌های گرمایش آبی بدون تأثیرات منفی گازهای خروجی و خشک شدن بتن در اثر حرکت هوا نسبت به سیستم‌های دمیدن هوا از کارایی بیشتری در انتقال گرما برخوردار است. در صورت استفاده از این سیستم، علاوه بر حذف تقریباً قطعی

ترک خوردگی و تابیدگی ناشی از گرادیان دما، خطر اضافه گرمایش اتفاقی بتن و نقص رشد مقاومت درازمدت نیز برطرف می‌شود.

کاربردهای معمول سیستم‌های گرمایش آبی بسته، ذوب کردن یخ و پیش گرمایش می‌باشد، که در عمل‌آوری دال‌های طبقات بالا و متکی به زمین، دیوارها، پی‌ها و ستون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای گرم کردن یک عضو بتنی، معمولاً شلنگ‌های سیستم گرمایش آبی بر روی عضو قرار داده شده یا از سازه مجاور آویزان می‌شوند و با پتوهای عایق و گاهی ورق‌های پلاستیک پوشانده می‌شوند (شکل ۴). در این حالت معمولاً ساخت دوربند موقت ضرورت ندارد. از سیستم‌های گرمایش آبی می‌توان بر روی بخش‌های بزرگی استفاده کرد که محصور کردن آن‌ها غیر عملی است. در صورت نیاز به دوربند گرم شده، می‌توان با صرف نظر کردن از لوله‌های گرمایش آبی (باقی گذاشتن آن‌ها در زیر دال متکی به زمین) از دال به عنوان بخاری تابشی سازه روی آن استفاده کرد.

بجای آب گرم می‌توان از بخار آب یا روغن داغ استفاده کرد. در این حالت تابش می‌تواند عامل گرمایش مهمتری محسوب شود. به هر حال در تمام موارد سیستم گرمایش از نوع بسته است و به آن سیستم رادیاتوری می‌توان گفت. در کارگاه‌ها و به ویژه در کارخانه قطعات پیش ساخته این روش‌ها کاربرد بیشتری دارند.



شکل ۴ سیستم گرمایش آبی، برای آب شدن یخ بستر شلنگ‌های گرمایش بر روی زمین قرار داده شده‌اند.

از الکتریسیته نیز می‌توان برای عمل‌آوری بتن در زمستان استفاده کرد. یک روش انجام این کار استفاده از پتوهای برقی مجهز به ترموستات است. همچنین از پتو می‌توان برای آب کردن یخ بستر استفاده کرد. استفاده از المنت‌های برقی (بخاری برقی) در فاصله مناسب از بتن نیز یک روش دیگر است. در مواردی که از این المنت‌ها استفاده می‌شود باید در طول دوره گیرش اولیه عایق بندی را تأمین کرد، زیرا ممکن است بتن به صورت موضعی شدیداً خشک شود و ترک بخورد. گرمایش تابشی در استفاده از این نوع بخاری‌های برقی نقش عمده‌ای دارد و به هر حال تولید گاز CO_2 نیز نمی‌کند. بخاری برقی می‌تواند بادبزنی دارد باشد که وسیله مناسب تری تلقی شود و توزیع گرما بهتر خواهد بود. استفاده از جریان برق و روشن کردن لامپ مادون قرمز باعث مصرف کمتر برق می‌شود اما از تابش شدیدی برخوردار است و نباید مستقیماً بر سطح بتن تابیده شود بلکه بهتر است به سطح قالب نشانه رود. از جریان برق می‌توان برای گرم کردن قالب فلزی یا میلگرد بتن در مرحله قبل از بتن ریزی یا پس از بتن ریزی استفاده نمود در این حالت باید از یک تراز سفورماتور (مبدل) استفاده کرد و ولتاژ را به کمتر از ۸۰ ولت رسانید و آمپر (شدت جریان) را افزایش داد تا در میلگرد و قالب دمای مناسبی که قبل از بتن ریزی از ۳۰ درجه

سانتی‌گراد بالاتر نمی‌باشد ایجاد نمود. پس از گیرش بتن می‌توان این دما را به تدریج تا حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد بالا برد. به هر حال نیاز به رطوبت رسانی در این مورد نیز نباید از نظر دور باشد. این کار در کارگاه‌های بسیار سرد یا کارخانه‌های پیش ساخته کاربرد جدی دارد و اتلاف گرمای کمتری را بدنبال دارد.

استفاده مستقیم از آب‌گرم یا گرم کردن آبی که بتن در آن غرقاب است امکان‌پذیر می‌باشد تو صیه می‌شود اگر از ریختن یا پاشیدن آب گرم بر روی بتن استفاده می‌شود اختلاف دمای آن با سطح بتن زیاد نباشد. گرم کردن آب استخر یا مخازن نگهداری بتن نیز روشی معمول در برخی کارخانه‌های قطعات پیش ساخته است.

بخار منبع دیگری در گرمایش زمستانی است. بخار را می‌توان با لوله به محیط محصور منتقل کرد. بخار رطوبت و گرما را با هم منتقل می‌کند و روش بسیار خوبی برای عمل‌آوری است. این روش به ویژه در هوای سرد بسیار عملی است زیرا رطوبت تأمین می‌شود و خشک شدن سریع ناشی از گرم کردن هوای سرد را جبران می‌کند. دمای بخار در این رابطه نباید از ۷۵ درجه سانتی‌گراد در هنگام تماس با بتن بیشتر شود به نحوی که دمای بتن از ۶۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر نگردد.

در انتخاب منبع گرمایش باید به خاطر داشت که بتن به خودی خود از طریق هیدراسیون سیمان گرما ایجاد می‌کند. در صورتی که بتوان این گرما را با عایق بندی حفظ کرد، معمولاً برای عمل‌آوری بتن کفایت می‌کند، تا زمانی که درجه حرارت محیط بیرونی بیشتر از ۵- درجه سانتی‌گراد باشد. به هر حال از آنجا که باید بتن را با حداقل دمای مجاز ریخت، حفظ این دما با عایق بندی نیز تا حدودی میسر است و ترکیب دمای اولیه و گرمای ناشی از هیدراسیون که در صورت افزایش دمای اولیه بیشتر می‌باشد می‌تواند در صورت عایق بندی مناسب در هوای سردتر از ۵- درجه سانتی‌گراد نیز بکار رود.

۴-۴- عمل‌آوری رطوبتی در هوای سرد

در صورت عدم دسترسی به رطوبت موردنیاز عمل‌آوری، رشد مقاومت عملاً متوقف می‌شود. بتن درون قالب‌ها یا پوشیده شده با عایق بندی به ندرت در دمای ۴ تا ۱۴ درجه سانتی‌گراد آنقدر رطوبت از دست می‌دهد که برای عمل‌آوری زیان‌بخش باشد. با این حال برای جبران خشک شدگی ناشی از رطوبت پایین زمستانی و بخاری‌ها و گرمایش خشک مورد استفاده در محیط محصور در هوای سرد باید برای عمل‌آوری مرطوب، رطوبت اضافی را تأمین کرد. از مواد شیمیایی عمل‌آوری نیز می‌توان برای عمل‌آوری اولیه سطوح بتنی در محیط محصور گرم استفاده کرد، یا آنرا با ورقه نایلونی پوشانید. به هر حال رسانیدن رطوبت همواره ارجح است. تصور می‌شود که در صورت تأمین گرمای خشک، بتن نیاز به رطوبت ندارد در حالی که تبخیر در این حالت شدید است، و جمع شدگی و ترک خوردگی ناپیدا و پیدا کاملاً متحمل است، زیرا در این حالت مصرف آب برای واکنش‌های سیمان و تشکیل ژل سیمان تسریع می‌یابد و حفرات موئینه خمیر سیمان به سرعت از حالت اشباع فاصله می‌گیرد.

گاه در منابعی توصیه می‌شود که در هوای سرد به بتن از آب داده نشود زیرا احتمال یخ زدن وجود دارد. این امر در مرحله پس از عمل‌آوری ممکن است صحیح باشد اما در مرحله عمل‌آوری که توأم با حفاظت و گرمایش است به هیچ وجه صادق نیست و همراه با خطر افت کیفی بتن به ویژه در قسمت‌های سطحی می‌باشد.

نتیجه گیری

تبخیر آب و قرار گرفتن بتن در معرض تر و خشک شدن پی در پی باعث جمع شدگی بتن و در نتیجه ایجاد تنش‌های کششی در داخل بتن می‌شود. چنانچه این تنش‌ها پیش از کسب مقاومت کششی کافی بتن ایجاد شوند، ترک خوردگی سطحی پدید می‌آید. بنابراین عمل آوری و حفظ رطوبت بتن به محض آنکه به سطح بتن آسیب نرساند باید آغاز شود. در این پژوهش به روش توصیفی تحلیلی روش‌های عمل آوری بتن از جمله رطوبت رسانی مستقیم: از طرق غرقاب کردن، آب بتن روی بتن آب فشانی یا مه‌سازی و یا بخار دادن، رطوبت رسانی غیرمستقیم (با واسطه جاذب): از طریق استفاده از گونی مرطوب یا حصیر و گلیم، پوشال، خاک اره و ماسه مرطوب و روش کاهش اتلاف آب مخلوط از سطح بتن: با پوشاندن بتن با کاغذ نفوذ ناپذیر یا ورق‌های پلاستیک و یا استفاده از مواد شیمیایی غشاء ساز عمل آوری بیان می‌گردد. باید توجه داشت روش انتخابی یا ترکیب روش‌های فوق به عواملی همچون در دسترس بودن مواد عمل آوری، اندازه، شکل و سن بتن، امکانات تولید، زیبایی ظاهری و امکان انجام آن صرفه اقتصادی بستگی دارد. مدت زمان لازم برای حفاظت از بتن و عمل آوری به عواملی نظیر: نوع مواد سیمانی مورد استفاده، نسبت‌های مخلوط، مقاومت لازم، اندازه و شکل عضو بتنی، دما و رطوبت محیط در طول عمل آوری و پس از آن بستگی دارد. پس از مخلوط شدن آب و سیمان، واکنشی به نام هیدراسیون انجام می‌شود. میزان پیشرفت این واکنش بر روی مقاومت و دوام بتن تأثیرگذار است. عمل آوری برای تولید بتنی که ویژگی‌های مطلوب را داشته باشد امری ضروری است. لذا توجه به

عامل زیر می‌تواند در تعیین حداقل زمان لازم برای عمل آوری بتن مؤثر باشد:

- حساسیت بتن از نظر سیستم سیمانی به عمل آوری و وجود مواد افزودنی پودری معدنی (مکمل)
- دمای بتن که بر آهنگ هیدراسیون سیمان و میزان خلل و فرج حفره‌ای اثر می‌گذارد
- شرایط محیطی قبل و بعد از عمل آوری که بر آهنگ رشد مقاومت و شدت خشک شدن سطح بتن پس از خاتمه عمل آوری اثر می‌گذارد.
- شرایط بهره‌برداری بتن که بر خصوصیات سطح بتن می‌تواند مؤثر باشد.
- وجود مواد افزودنی شیمیایی و تأثیر آن بر آهنگ هیدراسیون و کسب مقاومت، نسبت آب به سیمان و عیار سیمان.

منابع

- پایان نامه، بررسی مقاومت فشاری و خمشی نانو بتن سبک الیافی، طاهری زاده علیرضا، تابستان ۱۳۹۵، دانشکده فنی مهندسی گروه عمران رشته عمران گرایش: سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.
- پایان نامه، بررسی استفاده از پلیمر سوپر جاذب در نانو بتن سبک، عباسی. مریم، تابستان ۱۳۹۵، دانشکده فنی مهندسی گروه عمران رشته عمران گرایش: سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.
- تکنولوژی بتن پیشرفته، تألیف پرفسور مهتا و پرفسور مونته ئیرو، ترجمه علی اکبر رمضانیانپور، قدوسی و گنجیان، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- طراحی و کنترل مخلوط‌های بتنی (انجمن سیمان پرتلاز، FCA کانادا، CAC)، ترجمه اردشیر اطیابی، انتشارات جویبار، ۱۳۸۵.

خواص بتن (بتن شناسی)، تألیف نویل، ترجمه هرمز فامیلی، انتشارات ابوریحان بیرونی، ۱۳۷۸.

مشخصات فنی، راهنمای تولید و پذیرش جداول بتنی پیش ساخته، تألیف محسن تدین، فریدون رضایی، سید مسعود نصر آزادانی.

راهنمای کنترل کیفی بتن در پروژه‌های عمرانی شهری، تألیف محسن تدین، فریدون رضایی، سید مسعود نصر آزادانی.

اصول اجرایی در قالب‌بندی، آرماتور بندی و بتن‌ریزی، تألیف سعید غفارپور جهرمی، انتشارات دانشگاه شهید رجایی، ۱۳۸۶.

سیمان پرتلند، تألیف جی.سی.بای، ترجمه محمد شکرچی زاده، هومن قاسمی و عسکر هورفر، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

سنگدانه‌های بتن، تألیف علیرضا خالو و محمود ایرجیان، انتشارات سینه سرخ، ۱۳۸۲.

کتاب بتن و اجرای آن، ترجمه علی‌اکبر رضانیانپور، قدوسی و هوشدار تهرانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۰.

نظارت بر اجرای سازه‌های بتنی، دوره پایه، تألیف منوچهر بهرویان، انتشارات پوینده، ۱۳۸۴.

دستنامه اجرای بتن، تألیف دوبروولسکی و وادل، ترجمه علی‌اکبر رضانیانپور، شاپور طاحونی و منصور پیدایش، انتشارات علم و ادب، ۱۳۸۰.

آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، بخش اول، نشریه شماره ۱۲۰، معاونت امور فنی دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، انتشارات سازمان برنامه و بودجه، چاپ سوم، ۱۳۷۶.

بتن حجیم سد کارون ۴، شماره گزارش ۸۳۰۷۱۳۶، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.

طرح اختلاط بتن طبق آیین‌نامه آمریکا، ACI ۲۱۱،۱-Reapproved ۱۹۹۷ تألیف کمیته ۲۱۱،۱ انجمن بتن آمریکا، ترجمه باقری و ایراجیان، انتشارات نشر انگیزه، ۱۳۷۸.

تکنولوژی بتن، ترجمه علی‌اکبر رضانیانپور و شاه‌نظری، انتشارات علم و صنعت، ۱۳۶۹.

دستورالعمل‌های آزمایشگاه بتن، ترجمه شاه‌نظری و سبحان، انتشارات پرهام، ۱۳۸۴.

مشخصات فنی و عمومی کارهای ساختمانی، نشریه ۵۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۳.

دستورالعمل ساخت و اجرای بتن در کارگاه، نشریه شماره ۳۲۷، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵.

گزارش شناسایی، ارزشیابی و خواص پوزولان‌های ایران، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، محمد شکرچی زاده، پوریا قدس، روح الله عالی زاده، مقداد حسینی، ۱۳۸۳.

گزارش افزودنی‌های شیمیایی بتن، سمینار تخصصی افزودنی‌های بتن، بیستم آذر ماه ۱۳۸۶، شرکت صنایع شیمیایی پارسا با همکاری انجمن بتن ایران، محمد شکرچی زاده، نیکلاس علی لیبر، زهرا منصوری.

آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیش‌نهادی)، تألیف علیرضا پورخورشیدی و علی‌اکبر رضانیانپور، انتشارات وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۵.

بتن در مناطق گرم سیر (ارائه شده در سمینار بندر سازی)، سید علی اکبر ها شمی و فریدون علی پناه، نشریه شماره ۱۸۴، معاونت امور فنی و تدوین معیارها، انتشارات سازمان برنامه و بودجه، چاپ دوم، ۱۳۷۸.

پایان نامه ارزیابی بتن های ساخته شده با سیمان های آمیخته، جاوید خطیبی طالقانی، شهریور ۱۳۷۶، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

پایان نامه بررسی و امکان سنجی استفاده از ژئولیت به عنوان پوزولان در بتن، بابک احمدی، مهرماه ۱۳۸۶، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

راهکارهای بهبود کیفیت بتن در ایران و کاهش مصرف سیمان، محسن تدین، ۱۳۸۶.

خصوصیات مکانیکی بتن حاوی میکروسیلیس ایران، طیبه پرهیزکار، افشین طاهری، پرویز قدوسی، اسماعیل گنجیان، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، جلد سوم، ۱۳۷۶.

اثر دوده سیلیس در جمع شدگی ناشی از خشک شدن، موسی مظلوم و علی اکبر رضانیانپور، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، جلد سوم، ۱۳۷۶.

کاهش اثرات زیست محیطی بتن، محمد شکرچی زاده، نشریه انجمن بتن، شماره ۵، ۱۳۸۰.

Alireza Taherizadeh, Maryam Abbasi, Alireza Ashofteh, Choose the Best Mix of Light Weight Nano Silica Composite Concrete with Mineral Pumice in Bending and Compressive Behavior of Concrete Beams, JOURNAL OF ALGEBRAIC STATISTICS, Vol. ۱۳ No. ۱ (۲۰۲۲). <https://www.publishoa.com/index.php/journal/article/view/۹۳>

ACI. ۲۰۰۷. standard building code for Reinforced Concrete (Chapter ۳), American Concrete Institute Detroit

ACI ۳۰۸, “Standard practice for curing concrete,” ACI Manual of Concrete Practice, part ۲, American Concrete Institute

ACI Committee ۳۶۲R-۹۲, ۲۰۰۴. State of the Report on High Strength Concrete, ACI manual of concrete practice, Atluri, S.N. and Shen, S., (۲۰۰۲), The Meshless Local Petrov– Galerkin (MLPG) Method, Tech Science Press, USA.

Kolver K, Jensen OM, editors. ۲۰۰۷. internal curing of concrete RILEM TC ۱۹۶-ICC: crete, state-of-the-art report, France;. ۱۶۱ pp. Ksenija Jankovic, (۲۰۱۶),

Mineral admixtures, ASTM sp. Tech. publion, No. ۱۶۹-A, pp. ۵۴۳-۵۵ (۱۹۶۶).

Concrete, Second Edition, by Sidney Mindess & Young & Darwin, published by Pearson Education Inc., ۲۰۰۳.

“Standard Specification for coal Fly-Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete”, ASTM C ۶۱۸-۹۹.

Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM: C ۴۹۴/C ۴۹۴M – ۹۹a.

Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete, ASTM: C ۱۰۱۷/C ۱۰۱۷M – ۹۸.

ACI ۳۰۸-۹۲, Standard Practice for Curing Concrete, Reapproved ۱۹۹۷, American Concrete Institute.

Kim J.K., Moon Y.H., Eo S.H., Compressive Strength Development of Concrete with Different Curing Time and Temperature, Cement and Concrete Research, V. ۲۸, No. ۱۲, ۱۹۹۸, pp. ۱۷۶۱-۱۷۷۳.

Ramezaniapour A.A., Malhotra V.M., Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume, Cement and Concrete Composites, 17, 1990, pp. 120-133.

Carino N.J., Meeks K.W., Curing of High-Performance Concrete: Phase I Study, NISTIR 6000, NIST, 2001.

ACI 221R-96, Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete, Reapproved 2001, Reported by ACI Committee 221.

ACI Committee 300, Hot-Weather Concreting, ACI 300R-99, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999, 17 pages.

ACI Committee 306, Cold-Weather Concreting, ACI 306R-88, reapproved 1997, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1997, 23 pages.

ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structures, Reported by ACI Committee 224.

ACI 214-77, Evaluation of Strength Test Results of Concrete, Reported by ACI Committee 214.