



آژند

۳

فصلنامه علمی - تخصصی اتحادیه انجمن های

علمی عمران دانشگاه ملی مهارت

سال اول - شماره ۳ - بهار ۱۴۰۵



شناسنامه :

صاحب امتیاز :

دانشکده شهید چمران کرمان

مدیر مسئول :

علیرضا تقی پور

سر دبیر :

امیر حسین آرمونتن

استاد مشاور انجمن علمی :

دکتر محمد مصطفی جعفری

زمینه انتشار :

علمی، تخصصی

ویراستار ادبی :

مهدی رستمی راوری

تاریخ / ترتیب انتشار :

۱۴۰۵/۰۳/۲۸ / فصلنامه

هیئت تحریریه :

مهدی رستمی راوری

علیرضا تقی پور

امیر حسین آرمونتن

سهیل پورخیز

محمد مهدی باغلی

راه های ارتباطی :

   @anjoman_azhand_omran

 azhandscienceassociation@gmail.com

 kerman.tvu.ac.ir

سخن مدیر مسئول



علیرضا تقی پور؛ دانشجوی کارشناسی عمران دانشکده شهید چمران کرمان

به نام پیوند دهنده اجزای آفرینش

هر مسیری که در علم آغاز می‌کنیم، گامی است به سوی دانش بیشتر و یافتن راه‌حل برای نیازهای مهندسی جامعه. ما، دانشجویان نسل امروز، می‌دانیم که انرژی و ایده‌های تازه چقدر می‌تواند این مسیر را روشن و پویا کند. با انگیزه و پشتکار جمعی، فصلنامه علمی - تخصصی «آژند» را بنیان گذاشتیم؛ نشریه‌ای که نامش یادآور ساختار و بنیاد هر سازه است و هدفش به اشتراک گذاشتن دانش، پژوهش‌های نوین، و ایجاد فضایی برای تبادل تجربه میان دانشجویان و مهندسين جوان می‌باشد. پس از ماه‌ها تلاش و همکاری مستمر، خوشحالیم که سومین شماره «آژند» را تقدیم جامعه علمی و مهندسی کشور می‌کنیم. امیدواریم این نشریه، بستری باشد برای رشد علمی، گفت‌وگو درباره پژوهش‌های نو، و ایجاد ارتباطی مستمر میان علاقه‌مندان به عمران و مهندسی. با امید، به آینده‌ای روشن و پویا

سخن سردبیر



امیر حسین آرمونتن؛ دانشجوی کارشناسی عمران دانشکده شهید چمران کرمان

به نام خداوند جان و خرد

خدا را شاکریم که توفیقی حاصل شد تا بتوانیم سومین فصلنامه نشریه آژند را با افتخار تقدیم علاقه‌مندان و فعالان حوزه مهندسی عمران نماییم. در این شماره از نشریه، تلاش کرده‌ایم تا مقالات و مطالبی پیرامون کاربردهای گسترده مهندسی عمران در توسعه زیرساخت‌ها و پیشرفت جوامع ارائه کنیم تا گامی هرچند کوچک در معرفی ابعاد وسیع این علم و بررسی جایگاه آن در جهان برداشته باشیم. جا دارد از تمامی نویسندگان، پژوهشگران، مترجمان و همراهانی که در مسیر تهیه و تدوین این شماره ما را یاری کردند، صمیمانه سپاسگزاری نمایم. همچنین از جناب آقای مهدی رستمی راوری بابت همراهی‌ها و حمایت‌های ارزشمندشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. در پایان، بر خود لازم می‌دانم از اساتید ارجمند، جناب آقای دکتر محمدمصطفی جعفری و سرکار خانم دکتر ملیحه ضیا، به دلیل حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و الطاف ارزشمندشان نسبت به این مجموعه، نهایت سپاس و قدردانی را ابراز نمایم.

فهرست

۱ پروژه ها و سازه های شاخص

- بررسی پل سوم تونگ‌لینگ بر روی رودخانه یانگ‌تسه

۸ مهندسی اجرایی سازه

- بررسی روش‌های اجرایی بتن‌ریزی زیر آب

۱۵ ژئوتکنیک ، راه ، ترابری و زیرساخت

- کاربرد ریزشمع در افزایش ظرفیت باربری و مقاوم‌سازی پی

۲۰ مرمت ، تعمیر و نگهداری

- مقایسه تقویت ستون‌های بتنی: ژاکت‌گذاری در برابر پوشش پلیمر مسلح با الیاف

۲۵ فناوری های نوین عمران و محیط زیست

- بررسی نقش نانوسیلیس در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن

۳۲ معرفی کتاب ، نرم افزار

- کتاب مهندسی پی پیشرفته
- نرم‌افزار Revit



پروژه ها و سازه های شاخص



نویسنده:

علیرضا تقی پور
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان



بررسی پل سوم تونگ‌لینگ بر روی رودخانه یانگ‌تسه^۱

مقدمه

در این مقاله، ویژگی‌های سازه‌ای، چالش‌های اجرایی و نوآوری‌های مهندسی این پل به‌صورت تحلیلی بررسی می‌شود.

مشخصات کلی پروژه

- مکان: شهر تونگ‌لینگ، استان آنهویی، چین
- طراح اصلی: مؤسسه طراحی پل راه‌آهن چین^۲
- پیمانکار اصلی: گروه ساخت پل راه‌آهن چین^۴
- نوع پل: پل دولایه با سیستم همکاری کابل‌کشی-معلق
- کاربری: حمل‌ونقل ترکیبی ریلی-جاده‌ای
- طول کل پروژه: ۱۱/۸۷۷ کیلومتر
- دهانه اصلی: ۹۸۸ متر
- عرض عرشه اصلی: حدود ۳۵ متر
- ارتفاع برج غربی: ۲۵۳/۵ متر
- ارتفاع برج شرقی: ۲۴۷/۵ متر
- عرشه فوقانی: بزرگراه جی ۳ پکن-تایپه، شش خط عبور
- عرشه تحتانی: چهار خط ریلی (دو خط راه‌آهن باری و دو خط پیش‌بینی‌شده برای راه‌آهن بین‌شهری)
- مصالح اصلی: فولاد سازه‌ای و بتن مسلح
- آغاز ساخت: ژانویه ۲۰۲۲
- افتتاح بخش بزرگراه: نوامبر ۲۰۲۵

رودخانه یانگ‌تسه، به‌عنوان طولانی‌ترین رودخانه آسیا، یکی از مهم‌ترین محورهای توسعه اقتصادی و حمل‌ونقل چین به شمار می‌رود. رشد سریع شبکه‌های ریلی و بزرگراهی، نیاز به احداث پل‌هایی با دهانه‌های بلند، ظرفیت عبور بالا و عملکرد سازه‌ای قابل اعتماد را بیش از پیش آشکار کرده است. در پاسخ به این نیاز، مهندسی پل در چین طی سال‌های اخیر از توسعه سازه‌های متداول فراتر رفته و به سمت طراحی سامانه‌های نوآورانه و چندمنظوره حرکت کرده است.

در این میان، پل سوم تونگ‌لینگ بر روی رودخانه یانگ‌تسه به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین پروژه‌های زیرساختی جهان شناخته می‌شود. این پل، نخستین پل دولایه جهان با سیستم ترکیبی کابل‌کشی و معلق^۳ است که برای عبور هم‌زمان بزرگراه و خطوط راه‌آهن طراحی شده است. تلفیق دو سیستم باربر متفاوت در یک سازه، علاوه بر افزایش ظرفیت حمل‌ونقل، چالش‌های پیچیده‌ای را در زمینه توزیع بار، کنترل تغییرشکل، صلبیت سازه و پایداری دینامیکی ایجاد کرده که حل آن‌ها مستلزم بهره‌گیری از پیشرفته‌ترین روش‌های تحلیل، طراحی و اجرا بوده است.

پل سوم تونگ‌لینگ تنها یک گذرگاه ارتباطی نیست، بلکه نمادی از تحول مهندسی پل در قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود؛ پروژه‌ای که با تلفیق نوآوری سازه‌ای، فناوری‌های نوین ساخت و ملاحظات زیست‌محیطی، افق تازه‌ای در طراحی پل‌های دهانه‌بلند و چندمنظوره ترسیم کرده است.

1 - Third Tongling Yangtze River Bridge
2 - Hybrid Cable-Stayed-Suspension Cooperative System
3 - China Railway Bridge Institute (CRBI)
4 - China Railway Bridge Bureau Group (CRBBG)

سامانه سازه‌ای پل سوم تونگ‌لینگ

انتخاب این سامانه نتیجه مطالعات گسترده مهندسان چینی بر روی پل‌های دهانه‌بلند بود؛ مطالعاتی که نشان داد برای پل‌های ریلی-جاده‌ای با دهانه‌های بسیار بزرگ، استفاده از یک سامانه منفرد همواره پاسخگوی الزامات صلبیت، بهره‌برداری و اقتصاد ساخت نیست. از این‌رو، در پل سوم تونگ‌لینگ با تلفیق مزایای دو سامانه، الگویی نوین برای طراحی پل‌های چندمنظوره ارائه شد که امروزه از آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای مهندسی پل در چین یاد می‌شود.

تحلیل سازه‌ای سامانه همکاری کابل‌کشی معلق

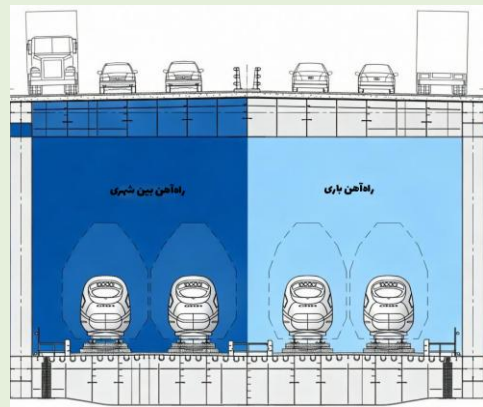
یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پل سوم تونگ‌لینگ، استفاده از سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق است؛ سامانه‌ای که با هدف بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای مکانیکی دو نوع پل کابلی و پل معلق توسعه یافته است. در این رویکرد، کابل‌های مایل و کابل‌های اصلی به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه از طریق عرشه و برج‌ها در یک سامانه یکپارچه، بارهای وارده را میان خود توزیع می‌کنند. این ویژگی موجب می‌شود رفتار سازه نسبت به پل‌های متعارف، متعادل‌تر و کارآمدتر باشد.

در پل‌های معلق، بخش عمده بارهای قائم از طریق آویزها به کابل‌های اصلی منتقل شده و سپس به برج‌ها و تکیه‌گاه‌های انتهایی انتقال می‌یابد. این سامانه اگرچه برای دهانه‌های بسیار بزرگ مناسب است، اما به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد کابل‌های اصلی، عرشه در برابر بارهای متحرک، به‌ویژه بارهای متمرکز ناشی از عبور قطار، مستعد ایجاد خیز و ارتعاش است. در مقابل، در پل‌های کابلی، کابل‌های مایل مستقیماً عرشه را به برج‌ها متصل می‌کنند و با کوتاه‌تر شدن مسیر انتقال نیرو، صلبیت قائم سازه افزایش می‌یابد؛ با این حال، افزایش طول دهانه باعث رشد قابل‌توجه نیروهای محوری در کابل‌ها و برج‌ها شده و از نظر اقتصادی و اجرایی محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند.

در پل سوم تونگ‌لینگ، این دو رفتار سازه‌ای به صورت مکمل با یکدیگر ترکیب شده‌اند. کابل‌های اصلی سهم عمده‌ای از بارهای ثقلی را تحمل می‌کنند، در حالی که کابل‌های مایل با محدود کردن تغییرشکل عرشه، بخشی از نیروهای قائم و افقی را مستقیماً به برج‌ها منتقل می‌کنند. در نتیجه، عرشه دیگر همانند یک پل معلق متعارف رفتار کاملاً انعطاف‌پذیر ندارد و در عین حال، برج‌ها نیز مانند یک پل کابلی تمام بارهای دهانه را به‌تنهایی تحمل

پل سوم تونگ‌لینگ یکی از معدود پل‌های دهانه‌بلند جهان است که در آن سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق به‌کار گرفته شده است. برخلاف پل‌های متداول که تنها بر پایه یکی از دو سامانه پل کابلی^۱ یا پل معلق^۲ طراحی می‌شوند، در این پروژه هر دو سامانه به‌صورت هم‌زمان و با عملکردی مکمل در انتقال بارهای وارده مشارکت دارند. هدف از این رویکرد، دستیابی به تعادل میان ظرفیت باربری، صلبیت سازه و کنترل تغییرشکل در دهانه‌ای نزدیک به یک کیلومتر بوده است.

عرشه اصلی پل از نوع عرشه خربایایی فولادی^۳ و به‌صورت دوطبقه طراحی شده است. طبقه فوقانی به بزرگراه شش‌خطه جی ۳ اختصاص دارد، در حالی که طبقه زیرین چهار خط ریلی را در خود جای داده است. (شکل ۱-۱) استقرار هم‌زمان بارهای سنگین ریلی و بارهای متغیر ناشی از ترافیک جاده‌ای، الزامات سخت‌گیرانه‌ای را در طراحی عرشه، اعضای خربایایی و سامانه باربر ایجاد کرده است؛ به‌گونه‌ای که کنترل ارتعاشات، خیز قائم و تغییرشکل‌های جانبی به یکی از مهم‌ترین معیارهای طراحی تبدیل شده است.

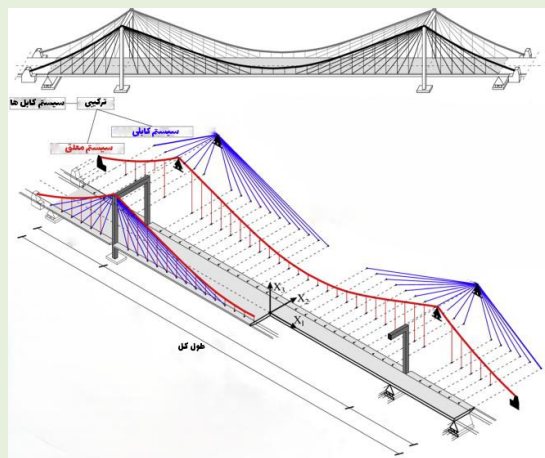


(شکل ۱-۱) شماتیکی از ترافیک جاده‌ای و ریلی پل

در این پل، برج‌های اصلی علاوه بر تحمل نیروهای ناشی از کابل‌های مایل، بارهای منتقل‌شده از کابل‌های اصلی سامانه معلق را نیز دریافت می‌کنند. به همین دلیل، برج‌ها نقش یک عضو باربر چندمنظوره را ایفا کرده و طراحی آن‌ها بر پایه تحلیل هم‌زمان اثرات کششی، فشاری، خمشی و پایداری کلی سازه انجام شده است. این آرایش موجب شده است که مسیر انتقال نیرو در مقایسه با پل‌های متعارف پیچیده‌تر، اما از نظر توزیع بار و عملکرد سازه‌ای کارآمدتر باشد.

- 1 - Cable-Stayed Bridge
- 2 - Suspension Bridge
- 3 - Steel Truss Girder

نمی‌کنند. این توزیع هوشمندانه نیروها، تنش‌های داخلی اعضا را متعادل کرده و بازده سازه را افزایش می‌دهد. (شکل ۱-۲)



(شکل ۱-۲) سیستم کابل ها

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این سامانه، افزایش صلبیت قائم^۱ است. عبور قطارهای سنگین با سرعت بالا مستلزم آن است که تغییرشکل قائم عرشه در محدوده بسیار کوچکی باقی بماند؛ زیرا کوچک‌ترین افزایش خیز می‌تواند بر کیفیت حرکت، ایمنی و آسایش بهره‌بردار تأثیر بگذارد. حضور کابل‌های مایل سبب می‌شود بخشی از بارهای متحرک پیش از آنکه موجب تغییرشکل قابل‌توجه کابل‌های اصلی شوند، مستقیماً به برج‌ها منتقل شوند. در نتیجه، مقدار خیز عرشه نسبت به یک پل معلق با دهانه مشابه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، این سامانه در کنترل تغییرشکل‌های جانبی و پیچشی^۲ نیز عملکرد مطلوبی دارد. قرارگیری دو طبقه ترافیکی با بارگذاری‌های متفاوت، خطر ایجاد پیچش در عرشه را افزایش می‌دهد. همکاری کابل‌های مایل با خرپای فولادی عرشه، سختی پیچشی سازه را افزایش داده و مانع از ایجاد تغییرشکل‌های نامتقارن در هنگام عبور هم‌زمان قطار و وسایل نقلیه سنگین می‌شود. این ویژگی برای پل‌های چندمنظوره اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا رفتار دینامیکی آن‌ها به‌مراتب پیچیده‌تر از پل‌های صرفاً جاده‌ای است. از منظر مهندسی، مهم‌ترین مزیت این سامانه، بهینه‌سازی مسیر انتقال بار است. در واقع، بارهای وارده میان کابل‌های اصلی، کابل‌های مایل، برج‌ها و عرشه توزیع می‌شوند و هیچ‌یک از اجزای اصلی سازه به‌تنهایی مسئول تحمل بخش عمده نیروها نیست. این ویژگی علاوه بر افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان سازه، امکان اجرای دهانه‌های

بلندتر با مصرف بهینه مصالح و کنترل بهتر تغییرشکل‌ها را فراهم می‌کند. به همین دلیل، پل سوم تونگ‌لینگ به‌عنوان یکی از نخستین نمونه‌های موفق به‌کارگیری سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق، گامی مهم در تکامل طراحی پل‌های دهانه‌بلند و چندمنظوره به شمار می‌رود.

فناوری ساخت و چالش‌های اجرایی پل سوم تونگ‌لینگ

اجرای پل سوم تونگ‌لینگ، به دلیل ترکیب، دهانه اصلی ۹۸۸ متری، عرشه دوطبقه ریلی-جاده‌ای و سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق، از پیچیده‌ترین پروژه‌های پل‌سازی چین در سال‌های اخیر به شمار می‌رود. در چنین سازه‌ای، ترتیب اجرای اجزا اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا هر مرحله از ساخت، مستقیماً بر توزیع نیرو، وضعیت تنش اعضا و هندسه نهایی پل تأثیر می‌گذارد. از این‌رو، عملیات اجرایی بر پایه مدل‌سازی مرحله‌ای ساخت^۳ برنامه‌ریزی شد تا رفتار واقعی سازه در تمامی مراحل تحت کنترل باشد.

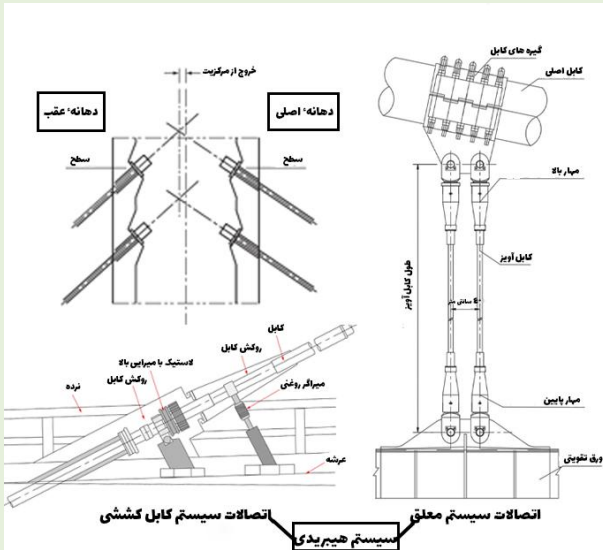
اجرای فونداسیون و برج‌های اصلی

نخستین مرحله اجرای پل، احداث فونداسیون برج‌های اصلی در بستر رودخانه یانگ‌تسه بود. جریان پرسرعت آب، تغییرات قابل‌توجه تراز رودخانه و وجود مسیر اصلی کشتیرانی، این مرحله را به یکی از حساس‌ترین بخش‌های پروژه تبدیل کرده بود. به همین دلیل، پیش از آغاز عملیات اجرایی، مطالعات ژئوتکنیکی، هیدرولیکی و آب‌شستگی بستر انجام شد تا موقعیت و عمق استقرار فونداسیون با دقت تعیین شود. فونداسیون برج‌ها بر پایه شمع‌های عمیق بتن‌آرمه اجرا شد که بارهای عظیم ناشی از برج‌ها، کابل‌های اصلی و کابل‌های مایل را به لایه‌های مقاوم زمین منتقل می‌کنند. برای اجرای این شمع‌ها، ابتدا با احداث سازه‌های محصورکننده آب^۴ و ایجاد سکوی کاری موقت، محیطی خشک و ایمن در محل استقرار پایه‌ها فراهم شد. سپس عملیات حفاری، نصب قفسه‌های آرماتور و بتن‌ریزی شمع‌ها با تجهیزات سنگین دریایی انجام گرفت و پس از تکمیل شمع‌ها، کلاhek فونداسیون اجرا شد تا بار میان تمامی شمع‌ها به‌صورت یکنواخت توزیع شود. پس از اتمام فونداسیون، اجرای برج‌های اصلی به‌صورت مرحله‌ای و با استفاده از قالب‌های بالارونده آغاز شد. با افزایش ارتفاع برج‌ها، کنترل قائم بودن، تغییرشکل ناشی از باد و دقت هندسی اهمیت بیشتری پیدا کرد؛ زیرا هرگونه انحراف می‌توانست بر آرایش کابل‌ها، موقعیت عرشه و عملکرد

- 1 - Vertical Stiffness
- 2 - Lateral and Torsional Deformations
- 3 - Construction Stage Analysis
- 4 - Cofferdam

نصب سامانه کابل‌ها

در پل سوم تونگ‌لینگ، نصب کابل‌های اصلی و کابل‌های مایل هم‌زمان با پیشرفت مونتاژ عرشه و به صورت مرحله‌ای انجام شد. پس از نصب هر یک از چند سگمنت فولادی، کابل‌های مربوط به همان بخش نصب و نیروی کشش آن‌ها به صورت تدریجی اعمال می‌شد تا تعادل سازه در طول فرآیند اجرا حفظ شود. (شکل ۵-۱)



(شکل ۵-۱) شماتیک اتصالات کابل‌ها

از آنجا که کابل‌های سیستم معلق و کابل‌های سیستم کاشی به طور مشترک در تحمل بارهای وارده مشارکت دارند، تنظیم دقیق نیروی کشش هر کابل اهمیت ویژه‌ای داشت. هرگونه اختلاف در میزان کشش می‌توانست موجب تغییر شکل عرشه، جابه‌جایی برج‌ها یا تغییر در توزیع نیروهای داخلی شود. به همین دلیل، عملیات کشش کابل‌ها بر اساس نتایج تحلیل مرحله‌ای ساخت^۴ انجام شد و پس از هر مرحله، موقعیت عرشه، برج‌ها و میزان تغییر شکل سازه با استفاده از سامانه‌های دقیق پایش و نقشه‌برداری کنترل و در صورت نیاز اصلاح می‌گردید. این روش اجرایی، ضمن تضمین پایداری سازه در تمامی مراحل ساخت، امکان دستیابی به هندسه نهایی پیش‌بینی‌شده در طراحی را فراهم کرد و نقش مهمی در کنترل تغییر شکل‌ها و کیفیت نهایی اجرای پل داشت.

تکمیل عرشه دوطبقه و آماده‌سازی بهره‌برداری

پس از تکمیل سامانه باربر، عملیات اجرای روسازی بزرگراه، نصب ریل‌ها، تجهیزات ایمنی، سامانه‌های زهکشی، روشنایی و پایش سلامت سازه انجام شد. (شکل ۶-۱) از آنجا که پل

نهایی سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق تأثیر بگذارد. از این رو، در طول عملیات ساخت، موقعیت برج‌ها به طور مستمر با سامانه‌های دقیق نقشه‌برداری و پایش هندسی کنترل و در صورت نیاز اصلاح می‌شد. (شکل ۳-۱)



(شکل ۳-۱) احداث سازه‌های محصورکننده آب و اجرای برج‌ها

مونتاژ عرشه و نصب سگمنت‌های فولادی

عرشه پل از نوع خرابایی فولادی^۱ دوطبقه است و به صورت قطعات پیش‌ساخته^۲ در کارخانه تولید شد. هر سگمنت پس از انتقال از طریق شناورهای حمل به محل پروژه، با استفاده از تجهیزات بالابر نصب‌شده روی سازه^۳ به تراز نصب منتقل شد. این روش، نیاز به استقرار جرثقیل‌های بسیار بزرگ را کاهش داد. (شکل ۴-۱)



(شکل ۴-۱) بالا بردن سگمنت با بالابر و نصب آن

پس از قرارگیری هر سگمنت در موقعیت طراحی، عملیات تنظیم هندسی، اتصال موقت، جوشکاری و نصب اتصالات دائمی انجام شد. استفاده از روش ساخت قطعه‌ای علاوه بر افزایش کیفیت ساخت به دلیل تولید کارخانه‌ای، زمان عملیات در بستر رودخانه را کاهش داد و با محدود کردن فعالیت‌های اجرایی در مسیر کشتیرانی، ایمنی و کارایی پروژه را افزایش داد.

- 1 - Steel Truss Girder
- 2 - Prefabricated Segments
- 3 - Deck-Mounted Lifting Equipment
- 4 - Construction Stage Analysis

باد به صورت پیوسته ثبت و تحلیل شوند. اطلاعات حاصل از این سامانه، امکان ارزیابی وضعیت سازه در زمان بهره‌برداری، تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها و برنامه‌ریزی مؤثر برای نگهداری را فراهم می‌کند. (شکل ۷-۱)



(شکل ۷-۱) جزئیات سامانه پایش سلامت سازه پل

کاهش اثرات زیست‌محیطی

از آغاز طراحی، کاهش اثرات پروژه بر اکوسیستم رودخانه یانگ‌تسه یکی از الزامات اصلی بود. به همین دلیل، تعداد پایه‌های واقع در بستر رودخانه محدود شد و استفاده گسترده از قطعات پیش‌ساخته و روش ساخت قطعه‌ای، زمان حضور تجهیزات اجرایی در محیط رودخانه را کاهش داد. این اقدامات، علاوه بر کاهش آلودگی ناشی از عملیات ساخت، تأثیر پروژه بر جریان آب، کشتیرانی و زیستگاه آبزیان را نیز به حداقل رساند.

مدیریت هم‌زمان حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای

یکی دیگر از نوآوری‌های این پروژه، طراحی عرشه دوطبقه برای بهره‌برداری هم‌زمان از بزرگراه و راه‌آهن است. این راهکار موجب افزایش ظرفیت عبور، کاهش نیاز به احداث پل‌های مستقل و استفاده بهینه از فضای عبور از رودخانه شده است. در عین حال، طراحی سازه به‌گونه‌ای انجام شده که اثرات متقابل بارهای دینامیکی ناشی از عبور قطار و وسایل نقلیه جاده‌ای کنترل شده و عملکرد پایدار پل در شرایط بهره‌برداری طولانی‌مدت تضمین شود.

جایگاه پل سوم تونگ‌لینگ در آینده مهندسی پل‌های دهانه‌بلند

پل سوم تونگ‌لینگ را نمی‌توان صرفاً یک پل جدید بر روی رودخانه یانگ‌تسه دانست، بلکه این پروژه را باید گامی مهم در تکامل سامانه‌های باربر پل‌های دهانه‌بلند ارزیابی کرد. در دهه‌های گذشته، انتخاب میان پل‌های کابلی و پل‌های

برای عبور هم‌زمان ترافیک جاده‌ای و ریلی طراحی شده است، کنترل ارتعاشات، نشست‌های موضعی و تغییرشکل‌های بلندمدت، پیش از بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفت تا عملکرد سازه در شرایط واقعی بهره‌برداری تأیید شود.



(شکل ۶-۱) عملیات اجرای روسازی بزرگراه

نوآوری‌های مهندسی در طراحی و اجرای پل سوم تونگ‌لینگ

پل سوم تونگ‌لینگ تنها به دلیل ابعاد و سامانه سازه‌ای خود شاخص نیست، بلکه به‌کارگیری فناوری‌های نوین در طراحی، اجرا و بهره‌برداری نیز آن را به یکی از پیشرفته‌ترین پروژه‌های زیرساختی چین تبدیل کرده است. در این پروژه، استفاده از ابزارهای دیجیتال، سامانه‌های هوشمند پایش و راهکارهای کاهش اثرات زیست‌محیطی، نقشی اساسی در افزایش ایمنی، بهبود کیفیت ساخت و ارتقای عملکرد بلندمدت سازه ایفا کرده‌اند.

مدل‌سازی اطلاعات

با توجه به پیچیدگی سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق و وجود عرشه دوطبقه، هماهنگی میان رشته‌های مختلف طراحی اهمیت ویژه‌ای داشت. از این رو، در مراحل طراحی و اجرا از مدل‌سازی اطلاعات^۱ برای یکپارچه‌سازی اطلاعات هندسی، سازه‌ای و اجرایی استفاده شد. این فناوری امکان شناسایی تداخلات، برنامه‌ریزی دقیق مراحل ساخت و کنترل بهتر فرآیند نصب اجزای اصلی را فراهم کرد و احتمال بروز خطاهای اجرایی را کاهش داد.

سامانه پایش سلامت سازه

یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این پل، بهره‌گیری از سامانه پایش سلامت سازه^۲ است. در این سامانه، حسگرهای متعددی بر روی کابل‌ها، عرشه و برج‌ها نصب شده‌اند تا پارامترهایی مانند تنش، تغییرشکل، ارتعاش، دما و اثرات

نخواهد شد، بلکه موفقیت پروژه‌ها بیش از پیش به توانایی مهندسان در تلفیق سامانه‌های سازه‌ای، فناوری‌های دیجیتال، روش‌های نوین ساخت و الزامات بهره‌برداری وابسته خواهد بود. از این منظر، این پروژه را می‌توان یکی از نمونه‌های شاخص تحول مهندسی پل در قرن بیست‌ویکم دانست؛ تحولی که در آن نوآوری، کارایی و پایداری به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جمع‌بندی

پل سوم تونگ‌لینگ نمونه‌ای برجسته از رویکرد نوین مهندسی پل است که در آن، طراحی سازه، فناوری ساخت و الزامات بهره‌برداری به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق، اجرای عرشه دوطبقه ریلی-جاده‌ای، بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته ساخت و پایش سلامت سازه، این پروژه را به یکی از شاخص‌ترین دستاوردهای مهندسی زیرساخت در سال‌های اخیر تبدیل کرده است.

موفقیت این پل نشان می‌دهد که پاسخ به چالش‌های آینده حمل‌ونقل، تنها با افزایش ابعاد سازه‌ها امکان‌پذیر نیست؛ بلکه نیازمند توسعه راهکارهای نوآورانه‌ای است که بتوانند میان ظرفیت باربری، صلبیت، دوام، بهره‌وری اقتصادی و پایداری محیط‌زیستی تعادل برقرار کنند. از این رو، پل سوم تونگ‌لینگ را می‌توان نه تنها یک دستاورد ملی برای چین، بلکه الگویی ارزشمند برای طراحی نسل آینده پل‌های دهانه‌بلند و چندمنظوره در جهان دانست.

معلق همواره تابع طول دهانه، نوع بارگذاری و الزامات بهره‌برداری بوده است؛ به‌گونه‌ای که پل‌های کابلی برای دهانه‌های متوسط و پل‌های معلق برای دهانه‌های بسیار بزرگ گزینه مناسب‌تری محسوب می‌شدند. با این حال، افزایش تقاضا برای احداث پل‌های چندمنظوره با قابلیت عبور هم‌زمان راه‌آهن و بزرگراه، محدودیت‌های هر دو سامانه را بیش از گذشته آشکار کرده است.

سامانه همکاری کابل‌کشی-معلق به‌کاررفته در پل سوم تونگ‌لینگ، تلاشی برای رفع این محدودیت‌هاست. در این سامانه، توزیع مناسب نیروها میان کابل‌های مایل، کابل‌های اصلی، برج‌ها و عرشه، ضمن افزایش صلبیت سازه، امکان اجرای دهانه‌های بزرگ با کنترل بهتر تغییرشکل‌ها را فراهم می‌کند. این ویژگی به‌ویژه در پل‌های ریلی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا بهره‌برداری ایمن از خطوط راه‌آهن مستلزم محدود بودن خیز، ارتعاش و تغییرشکل‌های بلندمدت عرشه است.

از دیدگاه اقتصادی نیز، استفاده از یک پل مشترک برای حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی، علاوه بر کاهش هزینه‌های احداث و نگهداری، موجب بهره‌برداری بهینه از کریدورهای عبور از رودخانه می‌شود. این رویکرد با سیاست‌های توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع زیرساختی هم‌راستا بوده و می‌تواند الگوی مناسبی برای پروژه‌های مشابه در سایر کشورها باشد.

تجربه طراحی و اجرای پل سوم تونگ‌لینگ نشان می‌دهد که آینده پل‌سازی تنها به افزایش طول دهانه محدود





مهندسی اجرایی سازه

نویسندگان:

علیرضا تقی پور
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان



محمد مهدی باغکلی
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان



بررسی روش‌های اجرایی بتن‌ریزی زیر آب

مقدمه

در این مقاله، مهم‌ترین روش‌های اجرایی بتن‌ریزی زیر آب، تجهیزات تخصصی، افزودنی‌های پیشرفته و چالش‌های اجرایی با رویکردی کاربردی و بر پایه استانداردهای معتبر بین‌المللی و آیین‌نامه بتن ایران بررسی و تحلیل می‌شوند.

الزامات فنی بتن‌ریزی زیر آب

اجرای موفق بتن‌ریزی زیر آب، پیش از آنکه به نوع تجهیزات یا روش انتقال بتن وابسته باشد، به طراحی صحیح بتن و رعایت الزامات فنی در مرحله تولید و اجرا بستگی دارد. بتن مورد استفاده در این شرایط باید ضمن برخورداری از روانی کافی برای انتقال و تراکم مناسب، در برابر اثرات مخرب محیط آبی نظیر آب‌شویی، جداسازی اجزا و کاهش یکنواختی مقاومت کند. به همین دلیل، استانداردهای بین‌المللی و آیین‌نامه بتن ایران، الزامات ویژه‌ای را برای مشخصات بتن تازه، طرح اختلاط و کنترل کیفیت این نوع بتن ارائه کرده‌اند.

ویژگی‌های بتن مناسب برای بتن‌ریزی زیر آب

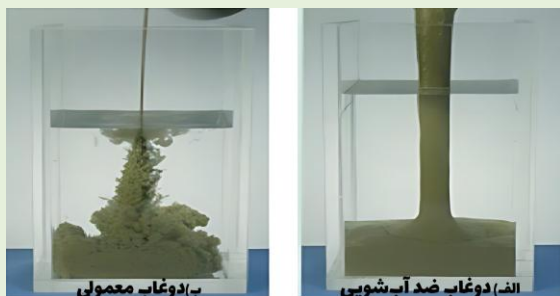
مهم‌ترین ویژگی بتن زیر آب، حفظ انسجام مخلوط در تماس مستقیم با آب است. در صورت از دست رفتن این ویژگی، خمیر سیمان از مخلوط شسته شده و علاوه بر کاهش مقاومت نهایی بتن، موجب افزایش کدورت آب و آلودگی محیط نیز خواهد شد.

بتن‌ریزی زیر آب یکی از تخصصی‌ترین عملیات اجرایی در مهندسی عمران است که در ساخت اسکله‌ها، پایه پل‌ها، شمع‌های درجا، سازه‌های بندری، تونل‌های زیرآبی و پروژه‌های فراساحلی کاربرد گسترده‌ای دارد. برخلاف بتن‌ریزی در شرایط معمول، حضور آب می‌تواند موجب آب‌شویی خمیر سیمان، جداسازی سنگدانه‌ها، کاهش انسجام مخلوط و افت کیفیت بتن شود؛ ازاین‌رو، انتخاب روش اجرایی مناسب، طراحی صحیح طرح اختلاط و کنترل دقیق فرآیند اجرا، نقش تعیین‌کننده‌ای در دوام و عملکرد سازه دارند.

پیشرفت فناوری بتن طی سال‌های اخیر، زمینه توسعه روش‌های نوینی مانند بتن‌ریزی با لوله ترمی پیشرفته، پمپاژ مستقیم، بتن خودتراکم زیر آب و استفاده از افزودنی‌های ضد آب‌شویی را فراهم کرده است. این فناوری‌ها علاوه بر افزایش کیفیت بتن، امکان اجرای ایمن‌تر و اقتصادی‌تر پروژه‌های دریایی را در شرایط محیطی پیچیده فراهم می‌کنند. هم‌زمان، استانداردهای بین‌المللی و آیین‌نامه بتن ایران نیز الزامات مشخصی برای طراحی، اجرا و کنترل کیفیت بتن‌ریزی زیر آب ارائه کرده‌اند که رعایت آن‌ها برای دستیابی به دوام و عملکرد مطلوب سازه ضروری است.

- افزایش کنترل شده مقدار مواد ریزدانه برای بهبود چسبندگی و کاهش احتمال جداسازی.
- استفاده از مواد مکمل سیمانی نظیر میکروسیلیس یا سرباره کوره آهن گدازی برای افزایش تراکم ریزساختار، کاهش آب انداختگی و بهبود دوام در محیط های دریایی.
- استفاده از افزودنی های ضد آبشویی^۴ در پروژه هایی که سرعت جریان آب یا عمق بتن ریزی زیاد است. (شکل ۲-۱)

در پروژه های دریایی، طراحی مخلوط تنها بر اساس مقاومت فشاری انجام نمی شود؛ بلکه شاخص هایی مانند دوام، نفوذپذیری، مقاومت در برابر یون کلرید، مقاومت در برابر سیکل های تر و خشک و پایداری بتن تازه نیز از معیارهای اصلی طراحی محسوب می شوند.



(شکل ۲-۱) آزمایش مقایسه ای ریختن دو نوع دوغاب

کنترل کیفیت بتن تازه پیش از اجرا

کنترل کیفیت بتن زیر آب باید پیش از آغاز عملیات بتن ریزی انجام شود؛ زیرا پس از تخلیه بتن در زیر آب، امکان اصلاح کیفیت مخلوط وجود ندارد و هرگونه نقص در بتن تازه مستقیماً بر عملکرد سازه تأثیر خواهد گذاشت.

مهم ترین کنترل های پیش از اجرا عبارت اند از:

- بررسی روانی بتن با آزمون مناسب و اطمینان از حفظ کارایی تا پایان عملیات.
- کنترل یکنواختی مخلوط و عدم مشاهده جداسازی یا آب انداختگی.
- ارزیابی زمان حفظ کارایی متناسب با مدت حمل و بتن ریزی.

از مهم ترین مشخصات بتن مناسب برای بتن ریزی زیر آب می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کارایی^۱ بالا به منظور عبور یکنواخت بتن از لوله ترمی یا خطوط پمپاژ بدون ایجاد انسداد.
- روانی مناسب همراه با پایداری مخلوط؛ افزایش روانی نباید منجر به جداسازی سنگدانه ها شود.
- مقاومت بالا در برابر آبشویی^۲ برای جلوگیری از خروج ذرات سیمان و مواد ریزدانه در تماس با آب و همچنین چسبندگی و ویسکوزیته مناسب به منظور حفظ یکپارچگی بتن هنگام تخلیه.
- قابلیت حفظ اسلامپ در مدت حمل و اجرا، زیرا در پروژه های دریایی فاصله میان بچینگ تا محل بتن ریزی معمولاً بیشتر از پروژه های متعارف است.
- حداقل میزان آب انداختگی^۳ به منظور جلوگیری از ایجاد حفرات و کاهش دوام بتن.

در بتن های نوین زیر آب، دستیابی همزمان به روانی بالا و پایداری مخلوط عمدتاً از طریق استفاده فوق روان کننده های پلی کربوکسیلاتی و افزودنی های اصلاح کننده ویسکوزیته امکان پذیر شده است؛ رویکردی که نسبت به افزایش ساده نسبت آب به سیمان، کیفیت و دوام بسیار بالاتری ایجاد می کند.

الزامات طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن زیر آب باید به گونه ای طراحی شود که ضمن تأمین مقاومت مورد نیاز، پایداری مخلوط در تمام مراحل انتقال و بتن ریزی حفظ شود. افزایش بی رویه آب اختلاط، اگرچه روانی بتن را افزایش می دهد، اما مهم ترین عامل کاهش مقاومت در برابر آبشویی و جداسازی محسوب می شود.

در طراحی مخلوط، رعایت نکات زیر اهمیت ویژه ای دارد:

- انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی پایین و کنترل شده برای افزایش دوام و کاهش نفوذپذیری.
- استفاده از سنگدانه های با دانه بندی پیوسته به منظور کاهش فضای خالی و افزایش انسجام.
- محدود کردن حداکثر اندازه سنگدانه متناسب با قطر لوله ترمی یا خطوط پمپاژ، به منظور جلوگیری از انسداد مسیر انتقال.

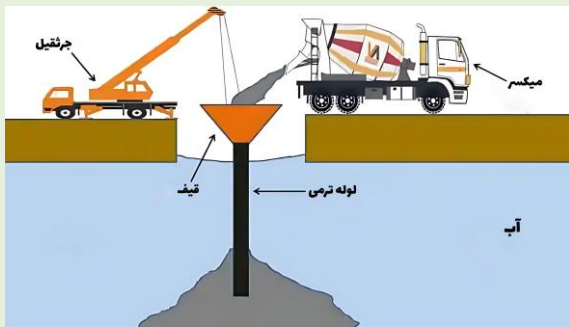
1 - Workability

2 - Washout Resistance

3 - Bleeding

4 - Anti-Washout Admixtures

آیین نامه بتن آمریکا این روش را به عنوان مرجع اصلی بتن ریزی در شرایط غوطه‌وری معرفی می‌کند، زیرا در صورت اجرای صحیح، تماس مستقیم بتن تازه با آب را به حداقل رسانده و از آب‌شویی خمیر سیمان جلوگیری می‌کند. در این روش، بتن از طریق یک لوله فولادی قائم که انتهای آن در داخل بتن تازه قرار دارد، به محل نهایی منتقل می‌شود. با پیشروی عملیات، بتن جدید، بتن قبلی را به سمت بالا جابه‌جا می‌کند و آب موجود بدون اختلاط قابل توجه با بتن از محدوده بتن‌ریزی خارج می‌شود. (شکل ۲-۲)



(شکل ۲-۲) شماتیک اجزای سیستم بتن ریزی زیر آب

الزامات اجرایی روش ترمی

اجرای موفق این روش مستلزم رعایت چند اصل اساسی است:

- پیش از آغاز بتن‌ریزی، لوله ترمی باید کاملاً آب‌بندی شده باشد تا از ورود آب به داخل لوله جلوگیری شود.
- شروع بتن‌ریزی باید به گونه‌ای انجام شود که نخستین حجم بتن، آب موجود در لوله را به طور کامل خارج کند.
- انتهای لوله باید در تمام مدت اجرا داخل بتن تازه باقی بماند؛ خارج شدن آن از سطح بتن، مهم‌ترین عامل ورود آب به لوله، آب‌شویی و ایجاد ناپیوستگی در بتن است.
- بتن‌ریزی باید به صورت پیوسته و بدون توقف طولانی انجام شود؛ زیرا توقف عملیات می‌تواند موجب تشکیل درز سرد و کاهش یکپارچگی سازه شود.
- سرعت بتن‌ریزی باید با ظرفیت خروج بتن و شرایط هیدرولیکی محل اجرا هماهنگ باشد تا از آشفته‌گی جریان و جداسازی مصالح جلوگیری شود.

- کنترل دمای بتن تازه، به‌ویژه در پروژه‌های با حجم زیاد یا شرایط اقلیمی گرم.
- بررسی مقدار مصرف افزودنی‌ها و انطباق آن با طرح اختلاط مصوب.
- نمونه‌گیری از بتن تازه و تهیه نمونه‌های استاندارد برای کنترل مقاومت و دوام.

در پروژه‌های بزرگ دریایی، علاوه بر آزمایش‌های متداول، پایش مستمر کیفیت بتن در حین انتقال و ثبت پارامترهای اجرایی نظیر زمان حمل، زمان تخلیه و حجم بتن‌ریزی نیز به عنوان بخشی از نظام تضمین کیفیت در نظر گرفته می‌شود.

روش‌های اجرایی بتن‌ریزی زیر آب

انتخاب روش مناسب برای بتن‌ریزی زیر آب، یکی از مهم‌ترین تصمیمات اجرایی در پروژه‌های دریایی، بندری و سازه‌های هیدرولیکی است. عواملی نظیر عمق آب، سرعت جریان، حجم بتن‌ریزی، شکل هندسی عضو، دسترسی به محل اجرا، امکانات کارگاهی و الزامات دوام، همگی در انتخاب روش مناسب نقش تعیین‌کننده دارند. بر اساس آیین نامه بتن آمریکا^۱، روش انتخابی باید به گونه‌ای باشد که از تماس مستقیم بتن تازه با آب تا حد امکان جلوگیری کرده، پیوستگی عملیات را حفظ کند و مانع از جداسازی اجزای بتن شود. همچنین آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بر اجرای پیوسته بتن‌ریزی، کنترل کیفیت بتن تازه و جلوگیری از ایجاد درزهای سرد تأکید دارد.

در میان روش‌های موجود، استفاده از لوله ترمی^۲ همچنان رایج‌ترین و مطمئن‌ترین روش بتن‌ریزی زیر آب در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود؛ با این حال، توسعه تجهیزات پمپاژ، بتن‌های خودتراکم ویژه زیر آب و سامانه‌های کنترل هوشمند، موجب گسترش روش‌های اجرایی نوین و افزایش کیفیت ساخت در پروژه‌های پیچیده شده است.

بتن‌ریزی با لوله ترمی

- روش ترمی، متداول‌ترین و معتبرترین روش بتن‌ریزی زیر آب است که در اجرای شمع‌های درجا، فونداسیون پل‌ها، پایه اسکله‌ها، دیوارهای دیافراگمی و بسیاری از سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1 - ACI 304R

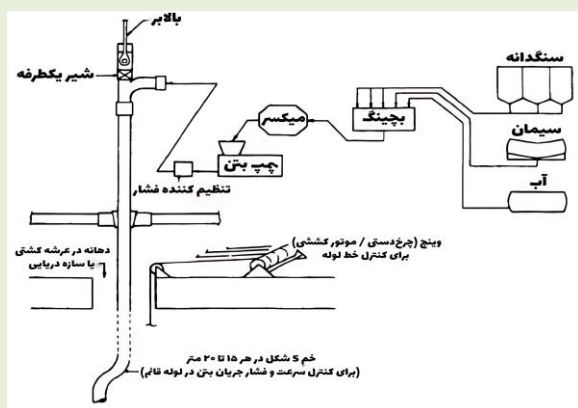
2 - Tremie Method

انسداد و جداسدگی بتن هستند. همچنین آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بر استفاده از بتن با کارایی مناسب و جلوگیری از توقف‌های طولانی در حین انتقال تأکید دارد؛ زیرا توقف جریان می‌تواند باعث افزایش فشار داخلی، گیرکردن بتن در لوله و افت کیفیت بتن شود. (شکل ۲-۳)

از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سرعت بالای انتقال بتن؛
- کاهش تعداد تجهیزات شناور؛
- امکان بتن‌ریزی در محل‌های با دسترسی محدود؛
- کنترل مناسب حجم بتن خروجی.

در مقابل، حساسیت بیشتر به طرح اختلاط و احتمال انسداد خطوط انتقال، از مهم‌ترین محدودیت‌های این روش به شمار می‌رود.



(شکل ۲-۳) شماتیک انتقال بتن زیر آب با استفاده از پمپ و خطوط لوله تحت فشار

بتن خودتراکم ویژه زیر آب^۲

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های سال‌های اخیر، توسعه بتن‌های خودتراکم ویژه زیر آب است. این بتن‌ها بدون نیاز به ویبره، تنها تحت اثر وزن خود در قالب جریان یافته و تمامی فضاهای خالی را پر می‌کنند. بر اساس دستورالعمل اروپایی بتن خودتراکم^۳، بتن خودتراکم باید علاوه بر قابلیت پرکنندگی، از مقاومت کافی در برابر جداسدگی برخوردار باشد؛ در بتن‌های ویژه زیر آب، این ویژگی با استفاده هم‌زمان از فوق‌روان‌کننده‌ها و افزودنی‌های اصلاح‌کننده ویسکوزیته تقویت می‌شود.

آیین‌نامه بتن ایران (آبا) نیز بر تداوم عملیات بتن‌ریزی و جلوگیری از هرگونه وقفه‌ای که موجب کاهش پیوستگی بتن شود، تأکید کرده و رعایت این اصل را از الزامات اجرای صحیح سازه‌های بتنی می‌داند.

خطاهای رایج در اجرای روش ترمی

بررسی پروژه‌های اجرایی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مشکلات بتن‌ریزی زیر آب، ناشی از خطاهای اجرایی و نه ضعف طرح اختلاط است. مهم‌ترین این خطاها عبارت‌اند از:

- خروج انتهای لوله از داخل بتن تازه.
 - کاهش بیش از حد حجم بتن داخل قیف و ورود هوا به سیستم.
 - استفاده از بتن با کارایی نامناسب یا افت اسلامپ بیش از حد.
 - توقف طولانی عملیات بتن‌ریزی.
 - انتخاب قطر نامناسب لوله نسبت به حداکثر اندازه سنگدانه.
 - جابه‌جایی سریع یا نامنظم لوله در حین بتن‌ریزی.
- در پروژه‌های بزرگ دریایی، برای کاهش این خطاها از سامانه‌های پایش لحظه‌ای، حسگرهای اندازه‌گیری تراز بتن و تجهیزات موقعیت‌یاب استفاده می‌شود تا عمق قرارگیری لوله و روند بتن‌ریزی به‌صورت پیوسته کنترل شود.

بتن‌ریزی زیر آب با پمپ^۱

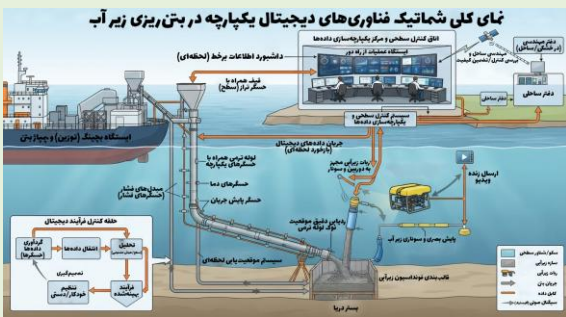
پیشرفت فناوری پمپ‌های بتن و سیستم‌های انتقال تحت فشار، استفاده از روش پمپاژ را در بسیاری از پروژه‌های دریایی و هیدرولیکی گسترش داده است. این روش به‌ویژه در پروژه‌هایی که امکان استقرار مستقیم لوله ترمی وجود ندارد یا حجم بتن‌ریزی زیاد است، گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود. مطابق آیین‌نامه بتن آمریکا، موفقیت این روش به هماهنگی میان مشخصات بتن، ظرفیت پمپ و شرایط اجرایی وابسته است.

در این روش، بتن از طریق خطوط لوله تحت فشار به محل بتن‌ریزی منتقل می‌شود. طراحی مناسب مسیر انتقال، جلوگیری از تغییر ناگهانی قطر لوله، کنترل فشار پمپاژ و حفظ جریان یکنواخت، از مهم‌ترین عوامل جلوگیری از

1 - Underwater Concrete Placement by Pumping
2 - Underwater Self-Compacting Concrete
3 - EFNARC

کرده‌اند. استفاده از سامانه‌های هدایت از راه دور، حسگرهای اندازه‌گیری تراز بتن، سامانه‌های پایش فشار داخل لوله ترمی و سیستم‌های موقعیت‌یابی لحظه‌ای، امکان کنترل بهتر عملیات را فراهم کرده است.

در پروژه‌های فراساحلی بزرگ، اطلاعات حاصل از این تجهیزات به‌صورت برخط در اختیار تیم اجرایی قرار می‌گیرد و امکان اصلاح سریع فرآیند بتن‌ریزی را فراهم می‌کند. این رویکرد، علاوه بر کاهش خطاهای انسانی، موجب افزایش کیفیت بتن و کاهش هزینه‌های ناشی از تعمیرات بعدی می‌شود و با رویکرد مدیریت کیفیت مورد تأکید مدل فدراسیون بین‌المللی بتن^۲ و استانداردهای نوین مدیریت پروژه هم‌خوانی دارد. (شکل ۲-۵)



(شکل ۲-۵) شماتیک فناوری‌های دیجیتال یکپارچه در بتن‌ریزی زیر آب

تجهیزات تخصصی، افزودنی‌های نوین و چالش‌های اجرایی

موفقیت عملیات بتن‌ریزی زیر آب، علاوه بر انتخاب روش مناسب، به هماهنگی میان تجهیزات اجرایی، کیفیت بتن و مدیریت صحیح عملیات وابسته است. آیین نامه بتن آمریکا بر این موضوع تأکید دارد که حتی در صورت طراحی مناسب طرح اختلاط، استفاده از تجهیزات نامناسب یا بروز اختلال در فرآیند اجرا می‌تواند موجب کاهش کیفیت بتن و افت دوام سازه شود. استاندارد بتن اروپا^۳ بر حفظ یکنواختی کیفیت بتن از مرحله تولید تا زمان بتن‌ریزی تأکید دارد.

در پروژه‌های امروزی، تجهیزات مورد استفاده شامل پمپ‌های بتن با ظرفیت متناسب، لوله‌های ترمی، جرثقیل‌های شناور، بارج‌های عملیاتی، تجهیزات غواصی صنعتی، دوربین‌های زیر آب و سامانه‌های هدایت از راه دور است. استفاده از این تجهیزات، به‌ویژه در پروژه‌های فراساحلی، علاوه بر افزایش دقت اجرا، امکان پایش پیوسته

در مقایسه با بتن معمولی، بتن‌های خودتراکم ویژه زیر آب دارای مزایای زیر است:

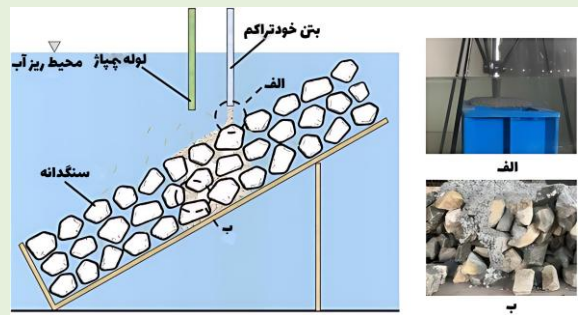
- کاهش احتمال ایجاد حفرات و کرموشدگی؛
- بهبود کیفیت بتن در مقاطع با تراکم زیاد آرماتور؛
- کاهش نیاز به تجهیزات تراکم؛
- افزایش یکنواختی بتن در اعضای حجیم.

با وجود این مزایا، کنترل دقیق طرح اختلاط و کیفیت مصالح در این روش اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا تغییرات جزئی در نسبت مواد یا مقدار افزودنی‌ها می‌تواند رفتار رئولوژیکی بتن را به‌طور محسوسی تغییر دهد.

بتن پیش‌آکنده^۱

روش بتن پیش‌آکنده، یکی از روش‌های تخصصی بتن‌ریزی زیر آب است که بیشتر در تعمیر سازه‌های دریایی، تقویت فونداسیون‌ها و مقاطع حجیم کاربرد دارد. در این روش، ابتدا سنگدانه‌های درشت در محل اجرا قرار داده شده و سپس دوغاب سیمانی با فشار کنترل‌شده به فضای خالی میان آن‌ها تزریق می‌شود.

بر اساس توصیه‌های آیین نامه بتن آمریکا، این روش زمانی مناسب است که امکان بتن‌ریزی معمول وجود نداشته یا محدودیت‌های اجرایی مانع از انتقال مستقیم بتن شوند. مهم‌ترین مزیت آن، کاهش جداسدگی و امکان اجرای عملیات در فضاهای محدود است؛ با این حال، کیفیت نهایی به نحوه تزریق دوغاب و یکنواختی پر شدن فضاهای خالی وابستگی زیادی دارد. (شکل ۲-۴)



(شکل ۲-۴) شماتیک بتن‌ریزی به روش پیش‌آکنده

فناوری‌های نوین در بتن‌ریزی زیر آب

در سال‌های اخیر، فناوری‌های دیجیتال نقش مهمی در افزایش دقت و ایمنی عملیات بتن‌ریزی زیر آب ایفا

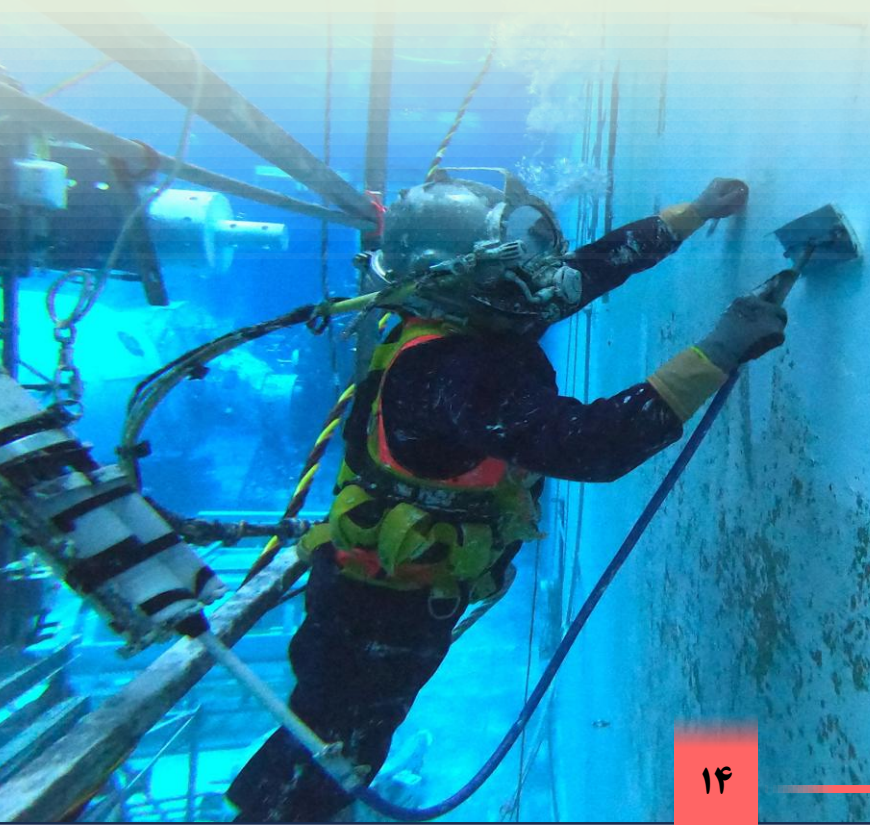
1 - Preplaced Aggregate Concrete
2 - fib Model Code
3 - EN 206

نتیجه گیری

بتن ریزی زیر آب یکی از حساس ترین عملیات اجرایی در مهندسی عمران است که کیفیت آن به تعامل صحیح میان طرح اختلاط، روش اجرا، تجهیزات و کنترل مستمر فرآیند وابسته است. بررسی روش های نوین نشان داد که اگرچه روش ترمی همچنان مطمئن ترین گزینه برای اغلب پروژه های دریایی به شمار می رود، اما توسعه فناوری های پمپاژ، بتن های خودتراکم ویژه زیر آب و سامانه های پایش هوشمند، موجب افزایش کیفیت اجرا و گسترش دامنه کاربرد بتن ریزی در شرایط پیچیده شده است. مطابق آیین نامه بتن ایران (آبا)، آیین نامه بتن آمریکا و استاندارد بتن اروپا دستیابی به بتن بادوام در محیط های آبی مستلزم طراحی دقیق طرح اختلاط، استفاده از افزودنی های مناسب، اجرای پیوسته بتن ریزی و کنترل کیفیت در تمامی مراحل عملیات است. از این رو، انتخاب روش اجرایی نباید صرفاً بر مبنای هزینه اولیه انجام شود، بلکه شرایط محیطی، ویژگی های سازه، امکانات کارگاهی و الزامات دوام نیز باید به عنوان معیارهای اصلی تصمیم گیری در نظر گرفته شوند. بهره گیری از فناوری های نوین و رعایت هم زمان الزامات آیین نامه ای ملی و بین المللی، می تواند ضمن افزایش ایمنی و دوام سازه های دریایی، هزینه های تعمیر و نگهداری را در طول عمر بهره برداری به طور قابل توجهی کاهش دهد.

عملیات و کنترل موقعیت تجهیزات را فراهم می کند. از سوی دیگر، توسعه فناوری افزودنی های شیمیایی نقش مهمی در بهبود عملکرد بتن زیر آب داشته است. استاندارد بتن اروپا و دستورالعمل اروپایی بتن خودتراکم بر استفاده از فوق روان کننده های نسل جدید، افزودنی های اصلاح کننده ویسکوزیته و افزودنی های ضد آب شویی برای حفظ انسجام بتن، کاهش جداسدگی و افزایش دوام تأکید دارند. همچنین استفاده از مواد مکمل سیمانی مانند میکروسیلیس و سرباره، با کاهش نفوذپذیری و بهبود ریزساختار بتن، مقاومت سازه را در برابر محیط های دریایی افزایش می دهد. علاوه بر عوامل فنی، هماهنگی میان تیم اجرایی، اپراتور تجهیزات، تیم غواصی و واحد کنترل کیفیت نیز از عوامل مؤثر بر موفقیت عملیات بتن ریزی زیر آب محسوب می شود.

با وجود پیشرفت های فنی، بتن ریزی زیر آب همچنان با چالش هایی مانند جریان آب، جزر و مد، انسداد لوله های انتقال، ایجاد درز سرد، جداسدگی بتن و دشواری کنترل کیفیت در حین اجرا مواجه است. بر اساس آیین نامه بتن ایران (آبا)، اجرای پیوسته عملیات، کنترل زمان حمل، پایش مستمر کیفیت بتن تازه و آموزش نیروهای اجرایی از مهم ترین راهکارهای کاهش این مخاطرات محسوب می شوند. همچنین بهره گیری از سامانه های پایش هوشمند و مدیریت دقیق عملیات، نقش مؤثری در افزایش کیفیت و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری سازه های دریایی دارد.





ژئو تکنیک، راه، ترابری
و زیر ساخت



نویسنده:

امیرحسین آرمونتن
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان



کاربرد ریزشمع^۱ در افزایش ظرفیت باربری و مقاوم سازی پی

مقدمه

در بسیاری از پروژه‌ها، ظرفیت باربری پی موجود پاسخگوی بارهای جدید نیست یا شرایط زمین به گونه‌ای است که اجرای پی جدید با محدودیت‌های اجرایی، اقتصادی یا فنی همراه خواهد بود. در چنین شرایطی استفاده از روش‌هایی که بتوانند بدون تخریب گسترده سازه موجود، ظرفیت باربری پی را افزایش داده و نشست‌های احتمالی را کنترل کنند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از ریزشمع است. ریز شمع‌ها با قطر کم (معمولاً دارای قطری بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) هستند که معمولاً با حفاری، نصب میلگرد یا قفسه فولادی و تزریق دوغاب سیمان اجرا می‌شوند این سیستم برای انتقال بارهای سازه به لایه‌های مقاوم‌تر خاک یا سنگ طراحی شده و بسته به شرایط پروژه می‌تواند تحت بارهای فشاری، کششی یا ترکیبی عمل کند.

مکانیزم انتقال بار در ریزشمع

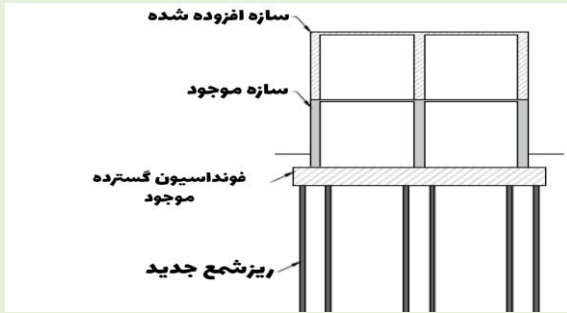
عملکرد ریزشمع بر پایه انتقال تدریجی بار از سازه به زمین است. پس از اعمال بار، نیرو ابتدا از طریق اتصال سر شمع وارد عضو فولادی می‌شود. سپس این نیرو توسط دوغاب سیمان به محیط اطراف منتقل شده و در نهایت از طریق اصطکاک بین دوغاب و خاک یا سنگ جذب می‌شود.

بر اساس دستورالعمل اداره فدرال بزرگراه‌های ایالات متحده^۲، در اغلب ریزشمع‌ها سهم اصطکاک جداره^۳ در تحمل بار بسیار بیشتر از مقاومت نوک شمع است؛ به همین دلیل کیفیت حفاری، تزریق مناسب دوغاب و شرایط زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت باربری دارند. در زمین‌های سنگی یا خاک‌های متراکم، مقاومت پیوند میان دوغاب و محیط اطراف افزایش یافته و ظرفیت باربری نیز به طور قابل توجهی بیشتر خواهد بود. در شرایطی که ریزشمع تحت بار کششی قرار گیرد، همین پیوند میان دوغاب و زمین مانع بیرون کشیده شدن شمع می‌شود. به همین علت این سیستم علاوه بر بارهای فشاری، در مقابله با نیروهای ناشی از زلزله، فشار آب زیرزمینی، واژگونی سازه‌ها و نیروهای ناشی از باد نیز کاربرد دارد.

کاربردهای ریزشمع

یکی از مهم‌ترین کاربردهای ریزشمع، افزایش ظرفیت باربری پی‌های موجود است. در بسیاری از ساختمان‌ها پس از تغییر کاربری، اضافه شدن طبقات یا نصب تجهیزات جدید، بارهای وارد بر سازه افزایش می‌یابد و پی اولیه دیگر توان تحمل بارهای جدید را ندارد. در چنین شرایطی، احداث پی جدید معمولاً مستلزم تخریب بخشی از سازه یا ایجاد وقفه در بهره‌برداری است.

- 1 - Micropile
- 2 - Federal Highway Administration (FHWA)
- 3 - Bond Strength



(شکل ۳-۱) استفاده از ریزشمع جهت افزایش ظرفیت باربری پی

نقش ریزشمع در عملیات زیرسازی پی^۱

منظور از زیرسازی پی، تقویت یا اصلاح پی موجود به منظور افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست یا جبران ضعف‌های ایجاد شده در طول عمر سازه است. این عملیات معمولاً زمانی انجام می‌شود که پی موجود به دلایل مختلف قادر به تحمل بارهای بهره‌برداری نباشد یا تغییر شرایط زمین موجب کاهش ایمنی آن شده باشد. در روش زیرسازی پی با استفاده از ریزشمع، ابتدا محل مناسب برای نصب ریزشمع‌ها بر اساس وضعیت پی و نتایج مطالعات ژئوتکنیکی تعیین می‌شود. پس از اجرای ریزشمع‌ها، سر آنها به وسیله تیر یا کلاهک بتنی به پی موجود متصل می‌شود تا بخشی از بار ساختمان به ریزشمع‌ها منتقل گردد. در این حالت، پی اولیه و ریزشمع‌ها به صورت یک سیستم مشترک عمل کرده و بار سازه میان آنها توزیع می‌شود. از جمله این مزایا روش می‌توان به کاهش حجم خاکبرداری، امکان اجرای عملیات در فضای محدود، عدم نیاز به تجهیزات سنگین، کاهش ارتعاش ناشی از عملیات اجرایی و قابلیت بهره‌برداری از ساختمان در حین اجرای پروژه اشاره کرد. به همین دلیل این روش در مقاوم‌سازی ساختمان‌های تاریخی، بیمارستان‌ها، مراکز صنعتی و ساختمان‌هایی که امکان تخلیه آنها وجود ندارد، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است.

استفاده از ریزشمع این امکان را فراهم می‌کند که بخش قابل توجهی از بار سازه از طریق ریزشمع‌ها به لایه‌های مقاوم‌تر خاک یا سنگ منتقل شود و بدون تخریب گسترده، ظرفیت باربری سیستم پی، بدون ایجاد آسیب برای سازه‌های مجاور را فراهم می‌کند.

کاربرد مهم دیگر ریزشمع، کاهش و کنترل نشست است. نشست بیش از حد یا نشست نامتقارن می‌تواند موجب ایجاد ترک در دیوارها، تغییر شکل اعضای سازه‌ای و کاهش عملکرد ساختمان شود. زمانی که علت نشست، ضعف لایه‌های سطحی خاک باشد، انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر توسط ریزشمع باعث کاهش تنش وارد بر خاک سطحی و در نتیجه محدود شدن مقدار نشست خواهد شد. در بسیاری از پروژه‌های مقاوم‌سازی، هدف اصلی اجرای ریزشمع نه افزایش ظرفیت باربری، بلکه کنترل تغییر شکل‌های ناشی از نشست است.

از دیگر کاربردهای مهم این سیستم، مقاوم‌سازی لرزه‌ای پی است. هنگام وقوع زلزله، علاوه بر نیروهای قائم، نیروهای جانبی و واژگونی نیز به پی منتقل می‌شوند. در صورتی که ظرفیت سیستم پی برای تحمل این نیروها کافی نباشد، احتمال ایجاد تغییر مکان‌های بزرگ یا حتی گسیختگی موضعی وجود خواهد داشت. با اجرای میکروپایل و اتصال مناسب آن به پی، بخشی از این نیروها به لایه‌های مقاوم‌تر زمین منتقل شده و سختی سیستم پی افزایش می‌یابد. به همین دلیل در پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها، پل‌ها و سازه‌های صنعتی، استفاده از ریزشمع یکی از روش‌های متداول محسوب می‌شود.

ریزشمع همچنین در پروژه‌هایی که با محدودیت اجرایی مواجه هستند، مزیت قابل توجهی دارد. در مناطق شهری، فضای محدود، مجاورت ساختمان‌های موجود، وجود تأسیسات زیرزمینی و ممنوعیت ایجاد ارتعاش، استفاده از شمع‌های کوبشی را با مشکل مواجه می‌کند. تجهیزات مورد استفاده برای اجرای ریزشمع ابعاد کوچک‌تری دارند و عملیات حفاری نیز با لرزش و صدای بسیار کمتری نسبت به روش‌های متداول انجام می‌شود. این ویژگی امکان اجرای عملیات مقاوم‌سازی را افزایش می‌دهد. (شکل

(۱-۳)

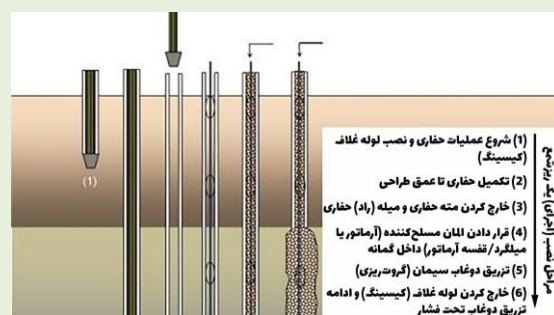
مراحل اجرایی ریزشمع

مزایا و محدودیت‌های استفاده از ریزشمع

استفاده از ریزشمع در پروژه‌های ژئوتکنیکی و مقاوم‌سازی طی سال‌های اخیر به دلیل قابلیت اجرایی بالا و سازگاری با شرایط مختلف زمین، توسعه چشمگیری یافته است. یکی از مهم‌ترین مزایای این سیستم، امکان اجرا در فضاهای محدود است. ابعاد کوچک تجهیزات حفاری و عدم نیاز به ماشین‌آلات سنگین باعث می‌شود که اجرای ریزشمع در زیرزمین ساختمان‌ها، مجاورت سازه‌های موجود، تونل‌ها، پل‌ها و محیط‌های شهری با حداقل محدودیت امکان‌پذیر باشد. از دیگر مزایای مهم این روش می‌توان به ایجاد لرزش و آلودگی صوتی بسیار کم اشاره کرد. برخلاف شمع‌های کوبشی که با ارتعاش و صدای قابل توجه همراه هستند، اجرای ریزشمع عمدتاً بر پایه حفاری و تزریق دوغاب انجام می‌شود؛ از این رو خطر آسیب به ساختمان‌های مجاور کاهش یافته و امکان اجرای عملیات در محیط‌های حساس مانند بیمارستان‌ها، مراکز درمانی، ساختمان‌های تاریخی و مراکز صنعتی فراهم می‌شود. قابلیت تحمل بارهای فشاری، کششی و جانبی از دیگر ویژگی‌های مهم ریزشمع است. این ویژگی سبب شده است که این سیستم علاوه بر افزایش ظرفیت باربری پی، در مقاوم‌سازی لرزه‌ای، کنترل نیروهای واژگونی، پایدارسازی دیوارهای حائل و تثبیت شیلروانی‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین امکان انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر و مقاوم‌تر خاک، نقش مؤثری در کاهش نشست و افزایش عملکرد بلندمدت پی ایفا می‌کند.

با وجود مزایای متعدد، استفاده از ریزشمع با محدودیت‌هایی نیز همراه است. ظرفیت نهایی این سیستم به کیفیت مطالعات ژئوتکنیکی، نحوه حفاری، مشخصات دوغاب، کیفیت تزریق و اجرای صحیح عملیات وابسته است. هرگونه نقص در فرآیند حفاری یا تزریق می‌تواند مقاومت پیوند میان دوغاب و خاک را کاهش داده و عملکرد ریزشمع را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل کنترل کیفیت در تمام مراحل اجرا، از مطالعات اولیه تا آزمایش‌های بارگذاری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر، در برخی پروژه‌ها به دلیل عمق زیاد لایه مقاوم یا تعداد بالای ریزشمع‌های مورد نیاز، هزینه اجرای این روش ممکن است نسبت به برخی گزینه‌های دیگر افزایش یابد.

اجرای صحیح ریزشمع تأثیر مستقیمی بر عملکرد نهایی آن دارد و تمامی مراحل باید مطابق مشخصات فنی و کنترل‌های کیفی انجام شوند. در مرحله نخست، موقعیت دقیق هر ریزشمع بر اساس نقشه‌های اجرایی تعیین شده و عملیات حفاری آغاز می‌شود. عمق حفاری باید به گونه‌ای انتخاب شود که بخش تزریقی در لایه‌ای با مقاومت مناسب قرار گیرد. در زمین‌های سست یا ریزشی، استفاده از لوله جداره برای حفظ پایداری گمانه ضروری است. پس از پایان حفاری، عضو فولادی در داخل گمانه نصب می‌شود. بسته به ظرفیت مورد نیاز، این عضو می‌تواند از میلگردهای با مقاومت بالا، لوله فولادی یا ترکیبی از آنها تشکیل شده باشد. رعایت فاصله مناسب عضو فولادی از جداره گمانه برای ایجاد پوشش کافی دوغاب اهمیت زیادی دارد. مرحله بعد، تزریق دوغاب سیمان است که یکی از حساس‌ترین مراحل اجرایی ریزشمع محسوب می‌شود. دوغاب باید تمام فضای خالی اطراف عضو فولادی را پر کرده و اتصال مناسبی میان شمع و زمین ایجاد کند. در برخی پروژه‌ها، به منظور افزایش مقاومت پیوند میان دوغاب و خاک، عملیات تزریق در چند مرحله یا تحت فشار انجام می‌شود. کیفیت دوغاب، فشار تزریق و زمان اجرای عملیات، همگی بر ظرفیت نهایی ریزشمع تأثیرگذار هستند. پس از گیرش دوغاب و دستیابی به مقاومت مورد نیاز، اتصال نهایی میان ریزشمع و پی اجرا شده و در صورت لزوم، آزمون‌های کنترل کیفیت مانند آزمایش بارگذاری استاتیکی یا آزمون‌های صحت اجرا انجام می‌شود تا عملکرد سیستم پیش از بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار گیرد. (شکل ۳-۲)



(شکل ۳-۲) مراحل اجرای ریزشمع

نتیجه گیری

ریزشمع به عنوان یکی از روش های تقویت پی، امروزه جایگاه ویژه ای در پروژه های ژئوتکنیکی و مقاوم سازی سازه ها یافته است. ویژگی هایی نظیر قطر کم، امکان اجرا در فضاهای محدود، حداقل ارتعاش و آلودگی صوتی، و قابلیت انتقال بار به لایه های مقاوم تر زمین، این سیستم را به گزینه ای مناسب برای افزایش ظرفیت باربری، کنترل نشست و تقویت پی های موجود تبدیل کرده است. به همین دلیل، در بسیاری از پروژه های مقاوم سازی ساختمان ها، پل ها، سازه های صنعتی و بناهای تاریخی، استفاده از ریزشمع به عنوان راهکاری مؤثر و قابل اعتماد مورد توجه قرار گرفته است.

در مجموع، می توان نتیجه گرفت که ریزشمع راهکاری کارآمد برای افزایش ظرفیت باربری و مقاوم سازی پی در شرایطی است که اجرای روش های متداول با محدودیت های فنی، اجرایی یا اقتصادی همراه باشد. با توسعه فناوری های حفاری و تزریق، افزایش نیاز به بهسازی و مقاوم سازی زیرساخت های موجود و گسترش ساخت و ساز در محیط های شهری، انتظار می رود دامنه کاربرد این فناوری در سال های آینده بیش از پیش افزایش یابد. در این مسیر، بهره گیری از مطالعات دقیق ژئوتکنیکی، طراحی مبتنی بر ضوابط آیین نامه ای و اجرای اصولی، مهم ترین عوامل در تضمین ایمنی، دوام و عملکرد مطلوب سیستم ریزشمع خواهند بود.



(شکل ۳-۳) کشش میلگرد توسط جک هیدرولیک



(شکل ۴-۳) تقویت فونداسیون موجود با استفاده از ریزشمع



مرمت، تعمیر و نگهداری



نویسنده:

مهدی رستمی راوری
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان



مقایسه تقویت ستون‌های بتنی: ژاکت‌گذاری در برابر پوشش پلیمر مسلح با الیاف

مقدمه

برای این منظور، معمولاً پیش از هرگونه اقدام اجرایی، گزارش ارزیابی آسیب‌شناسی شامل بازرسی چشمی، آزمون‌های غیرمخرب مقاومت بتن و بررسی وضعیت خوردگی میلگردها تهیه می‌شود. مهم‌ترین دلایل رایج نیاز به تقویت ستون عبارت‌اند از:

- کاهش سطح مقطع مؤثر میلگرد در اثر خوردگی ناشی از نفوذ رطوبت و کلراید
- افزایش بار مرده یا زنده نسبت به طرح اولیه، مانند افزودن طبقه یا تغییر کاربری فضا
- ضعف در فاصله‌گذاری تنگ‌های عرضی ستون در ساختمان‌های قدیمی که ظرفیت شکل‌پذیری و برشی را کاهش می‌دهد
- به‌روزرسانی آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای و افزایش سطح خطرپذیری پذیرفته‌شده منطقه
- آسیب‌های موضعی ناشی از آتش‌سوزی، ضربه یا زلزله‌های گذشته

هر یک از این عوامل، بسته به شدت آسیب و محدودیت‌های اجرایی پروژه مانند: تغییر مجاز در ابعاد ستون، امکان تخلیه ساختمان، بودجه و زمان در دسترس می‌تواند مبنای انتخاب یکی از روش‌های تقویت باشد.

ستون‌های بتن مسلح از مهم‌ترین اعضای باربر در ساختمان‌ها و سازه‌های زیربنایی به شمار می‌روند و هرگونه کاهش ظرفیت آن‌ها می‌تواند پایداری کل سازه را به خطر بیندازد. با گذشت زمان، عواملی مانند خوردگی میلگردها، افزایش بارهای بهره‌برداری نسبت به طرح اولیه، تغییر کاربری ساختمان، اشتباهات اجرایی و طراحی، آسیب‌های ناشی از زلزله‌های گذشته و به‌روزرسانی آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، موجب می‌شود بسیاری از ستون‌های موجود دیگر پاسخگوی الزامات ایمنی نباشند.

در چنین شرایطی، تقویت ستون‌ها به‌جای تخریب و بازسازی کامل سازه، از نظر اقتصادی و زمانی به‌صرفه‌تر است. در میان روش‌های متعدد موجود، دو رویکرد «ژاکت‌گذاری» و «پوشش با پلیمر مسلح با الیاف» بیشترین کاربرد عملی را در پروژه‌های مرمت و نگهداری دارند. در این نوشتار، این دو روش از نظر مکانیزم عملکرد، فرایند اجرا، هزینه، سرعت کار و محدودیت‌های فنی با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا مبنایی روشن برای انتخاب روش مناسب در هر پروژه فراهم شود.

چرا ستون‌های بتنی نیاز به تقویت پیدا می‌کنند؟

پیش از انتخاب هر روشی، شناخت دقیق علت اصلی ضعف ستون ضروری است؛ زیرا هر روش تقویت برای پاسخ به نوع خاصی از کمبود ظرفیت طراحی شده و انتخاب نادرست، علاوه بر هزینه‌ی بی‌مورد، ممکن است رفتار سازه را در برابر زلزله بهبود ندهد.

تقویت با ژاکت‌ها

ژاکت بتنی: در این روش، یک لایه بتن جدید مسلح با میلگردهای طولی و عرضی اضافه، دور ستون موجود قرار می‌گیرد. ابتدا سطح بتن قدیمی زبر و شست‌وشو می‌شود، سپس میلگردهای جدید در محل نصب و به میلگردهای اصلی یا صفحات مهاری متصل می‌شوند، قالب‌بندی انجام می‌گیرد و در نهایت بتن جدید معمولاً با استفاده از بتن خودتراکم یا تزریق دوغاب ریخته می‌شود. ضخامت لایه افزوده معمولاً بین هفتاد و پنج تا صد و پنجاه میلی‌متر است. (شکل ۴-۱)

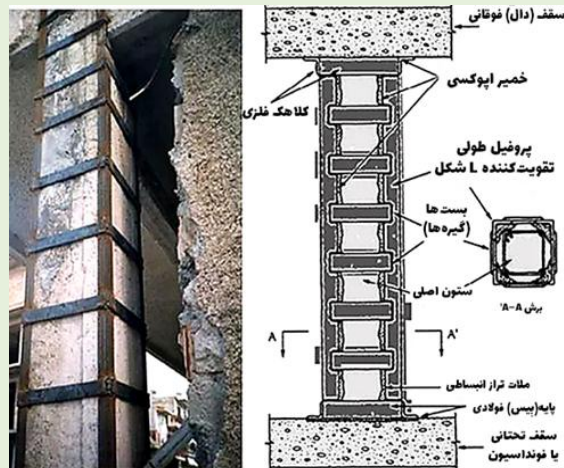


(شکل ۴-۱) مقطع عرضی ستون تقویت‌شده با ژاکت بتنی، همراه با میلگردهای طولی و عرضی افزوده

ژاکت فلزی: در این روش از نبشی‌های فولادی در چهار گوشه ستون همراه با تسمه‌های افقی یا صفحات فولادی پیوسته دور ستون استفاده می‌شود. نبشی‌ها با ملات یا رزین اپوکسی به بتن متصل و تسمه‌ها با جوش یا پیچ به نبشی‌ها محکم می‌شوند. فاصله‌گذاری تسمه‌ها بر اساس محاسبات محصورشدگی مورد نیاز تعیین می‌شود.

مزایای ژاکت فلزی: افزایش کمتر در ابعاد ستون نسبت به ژاکت بتنی؛ سرعت اجرای بیشتر و عدم نیاز به زمان عمل‌آوری؛ افزایش مؤثر شکل‌پذیری و مقاومت برشی.

معایب: حساسیت فولاد به خوردگی در محیط‌های مرطوب یا خورنده در صورت نبود پوشش حفاظتی مناسب؛ نیاز به دقت اجرایی بالا در جوشکاری و اتصالات؛ افزایش وزن سازه نسبت به روش الیاف.



(شکل ۴-۲) جزئیات اجرای ژاکت فلزی با نبشی‌های گوشه و تسمه‌های افقی دور ستون بتنی

روش تقویت با پوشش پلیمر مسلح با الیاف

پلیمر مسلح با الیاف^۱ از رشته‌های پیوسته با مقاومت کششی بسیار بالا الیاف کربنی^۲، شیشه‌ای^۳ یا آرامیدی^۴ تشکیل شده که در قالب پارچه یا ورق، به کمک رزین اپوکسی به سطح بتن می‌چسبد و دور محیط ستون پیچیده می‌شود.

مکانیزم محصورشدگی: وقتی ستون بتنی تحت بار محوری فشرده می‌شود، تمایل به انبساط جانبی پیدا می‌کند.

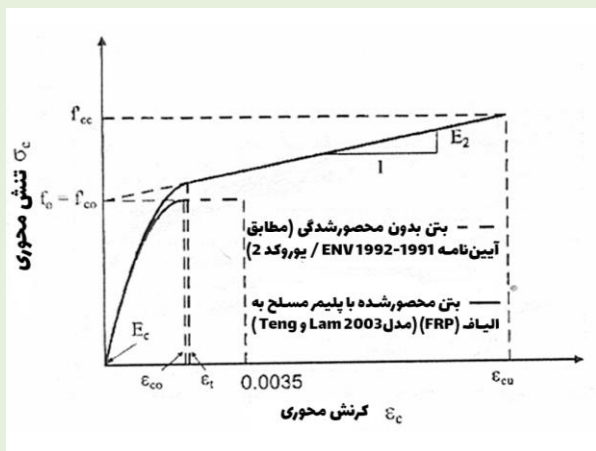
مزایای ژاکت بتنی: افزایش قابل‌توجه سطح مقطع و ظرفیت باربری محوری و خمشی؛ سازگاری کامل با رفتار سازه‌ای بتن مسلح؛ دوام بالا در محیط‌های عادی؛ امکان اجرا با نیروی فنی محلی و بدون تجهیزات خاص.

معایب: افزایش ابعاد ستون که می‌تواند فضای معماری را کاهش دهد و بار مرده سازه را افزایش دهد؛ زمان اجرای طولانی‌تر به دلیل نیاز به عمل‌آوری بتن؛ نیاز به تخلیه یا محدودسازی بهره‌برداری از فضا در حین اجرا؛ آلودگی صوتی و گرد و غبار ناشی از عملیات زبرسازی سطح.

- 1 - Fiber Reinforced Polymer (FRP)
- 2 - Carbon FRP (CFRP)
- 3 - Glass FRP (GFRP)
- 4 - Aramid FRP (AFRP)

مزایای این روش: بدون افزایش ابعاد قابل توجه ستون؛ وزن بسیار سبک نسبت به فولاد؛ سرعت اجرای بالا و امکان انجام کار بدون تخلیه کامل ساختمان؛ مقاومت عالی در برابر خوردگی؛ کارایی بیشینه در مقاطع دایره‌ای که در آن‌ها اثر محصورشدگی به بیشترین میزان خود می‌رسد.

معایب: حساسیت رزین اپوکسی به دما و رطوبت هنگام اجرا؛ افت مقاومت چسبندگی در برابر آتش‌سوزی به دلیل حساسیت رزین به حرارت بالا؛ نیاز به نیروی کار متخصص و کنترل کیفیت دقیق؛ عملکرد ضعیف‌تر در مقاطع مربعی یا مستطیلی با گوشه‌های تیز نسبت به مقاطع دایره‌ای؛ هزینه بالاتر مواد اولیه در مقایسه با فولاد ساده، هرچند هزینه تمام‌شده اجرا غالباً پایین‌تر است.



(شکل ۴-۴) نمودار مقایسه‌ای منحنی تنش-کرنش بتن محصورشده با پلیمر مسلح با الیاف در برابر بتن بدون محصورشدگی

معیارهای انتخاب روش مناسب

اگر افزایش ابعاد ستون مجاز نباشد (مانند فضاهای معماری حساس یا راهروهای باریک)، پوشش پلیمر مسلح با الیاف ارجحیت دارد.

• اگر افزایش قابل توجه ظرفیت باربری محوری یا خمشی مورد نیاز باشد نه صرفاً شکل‌پذیری ژاکت بتنی گزینه مؤثرتری است.

• در پروژه‌های با محدودیت زمانی شدید یا نیاز به تداوم بهره‌برداری از ساختمان، پلیمر مسلح با الیاف یا ژاکت فلزی بر ژاکت بتنی ترجیح دارند.

پوشش دورپیچی الیاف که دور محیط ستون قرار گرفته، در برابر این انبساط مقاومت کرده و یک فشار محصورکننده^۱ غیرفعال ایجاد می‌کند. این محصورشدگی، مشابه اثر تنگ‌های عرضی در بتن مسلح، مقاومت فشاری بتن هسته را افزایش می‌دهد و مهم‌تر از آن، کرنش نهایی قابل تحمل بتن را چند برابر می‌کند؛ به معنای افزایش چشمگیر شکل‌پذیری ستون در برابر بارهای لرزه‌ای. (شکل ۳-۴)



(شکل ۳-۴) دورپیچ ستون بتنی با پارچه الیاف کربنی و رزین اپوکسی

مراحل اجرا

• آماده‌سازی سطح بتن: زیرسازی، گردکردن لبه‌های تیز ستون (حداقل شعاع بیست میلی‌متر برای جلوگیری از پارگی الیاف)، و پرکردن حفره‌ها و ترک‌ها با ملات ترمیمی.

• آماده‌سازی و آغشته‌سازی الیاف با رزین اپوکسی.

• دورپیچ کردن پارچه یا ورق الیاف حول ستون در یک یا چند لایه، با هم‌پوشانی حداقل پانزده تا بیست سانتی‌متر در محل اتصال.

• عمل‌آوری رزین در دمای محیط، معمولاً طی بیست‌وچهار تا هفتادودو ساعت.

• در صورت نیاز، اجرای پوشش نهایی محافظ در برابر اشعه ماورای بنفش و رطوبت.

نتیجه‌گیری

انتخاب میان ژاکت‌گذاری و پوشش پلیمر مسلح با الیاف صرفاً یک تصمیم فنی ساده نیست، بلکه باید بر پایه ارزیابی دقیق وضعیت موجود سازه، هدف مشخص تقویت (افزایش ظرفیت باربری در برابر افزایش شکل‌پذیری لرزه‌ای)، محدودیت‌های اجرایی و بودجه پروژه اتخاذ شود. مهندس مسئول مرمت باید پیش از انتخاب روش، گزارش ارزیابی آسیب‌شناسی سازه و تحلیل سازه‌ای دقیق را در دستور کار قرار دهد تا راه‌حل انتخابی، هم از نظر ایمنی و هم از نظر اقتصادی، پاسخگوی نیاز واقعی پروژه باشد.

- در محیط‌های در معرض خطر آتش‌سوزی بدون امکان اجرای پوشش ضدحریق مناسب، ژاکت بتنی گزینه مطمئن‌تری است.

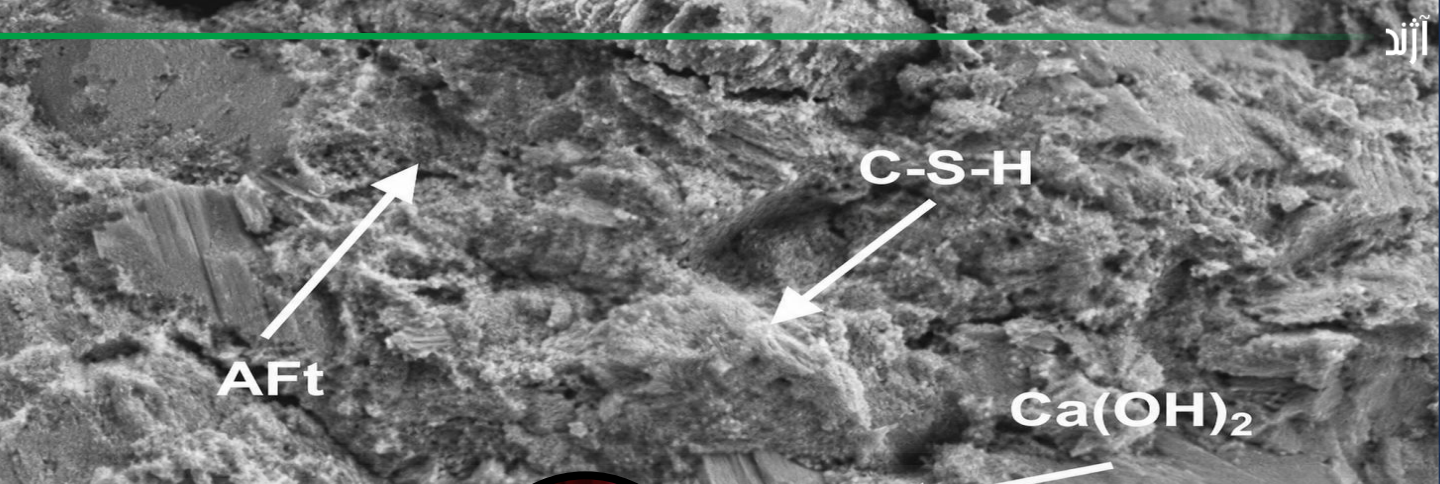
- برای ستون‌های با مقطع دایره‌ای، پلیمر مسلح با الیاف از نظر فنی و اقتصادی هر دو برتری دارد.

در بسیاری از پروژه‌های واقعی، ترکیب دو روش مانند اجرای ژاکت بتنی برای افزایش ظرفیت خمشی همراه با دورپیچ الیاف در ناحیه مفصل خمیری برای افزایش شکل‌پذیری بهترین نتیجه فنی و اقتصادی را به همراه دارد.





فناوری های نوین عمران
و محیط زیست



نویسنده:

سهیل پورخیز
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده امام محمد باقر (ع) ساری



بررسی نقش نانوسیلیس^۱ در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن

مقدمه

پیشرفت فناوری نانو، نسل جدیدی از مواد اصلاح‌کننده بتن با عنوان «نانومواد» معرفی شده‌اند که قادرند با تأثیرگذاری بر ریزساختار خمیر سیمان در مقیاس میکرو و نانو، خواص بتن را به شکل مؤثرتری بهبود دهند. در میان این مواد، نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، فعالیت پوزولانی قابل توجه و سازگاری شیمیایی مناسب با سیستم سیمان، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نانومواد مورد استفاده در بتن شناخته می‌شود. این ماده می‌تواند با پر کردن حفرات بسیار ریز و تسریع واکنش‌های هیدراسیون، موجب افزایش مقاومت، کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن گردد.

هدف این مقاله ارائه مروری جامع و در عین حال قابل فهم برای دانشجویان مقطع کارشناسی درباره ویژگی‌ها، سازوکار اثرگذاری و تأثیر نانوسیلیس بر خواص مختلف بتن است. در این راستا، تلاش شده است تا مفاهیم اصلی به‌صورت ساده و کاربردی بیان شده و نقش این نانوماده در بهبود عملکرد بتن مورد بررسی قرار گیرد.

نانوسیلیس و ویژگی‌های آن

تعریف: نانوسیلیس به ذرات بسیار ریز اکسید سیلیسیم^۲ گفته می‌شود که اندازه آن‌ها در مقیاس نانو، معمولاً در محدوده حدود ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر قرار دارد. به دلیل این اندازه بسیار کوچک، نانوسیلیس دارای سطح ویژه بسیار بالا و واکنش‌پذیری قابل توجهی است که آن را به یکی از مؤثرترین مواد افزودنی در اصلاح ریزساختار بتن تبدیل کرده است.

بتن به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، نقش بسیار مهمی در ساخت‌وسازهای عمرانی و توسعه زیرساخت‌ها ایفا می‌کند. این ماده به دلیل مزایایی مانند در دسترس بودن مواد اولیه، هزینه نسبتاً مناسب، مقاومت فشاری قابل قبول و امکان شکل‌پذیری در قالب‌های مختلف، به‌طور گسترده در پروژه‌های ساختمانی، پل‌ها، سدها و سایر سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، بتن با وجود این مزایا دارای محدودیت‌هایی نیز هست؛ از جمله مقاومت کششی پایین، تخلخل نسبتاً زیاد و حساسیت در برابر عوامل مخرب محیطی. این ویژگی‌ها می‌توانند در طول دوره بهره‌برداری سازه مشکلاتی نظیر ترک‌خوردگی، نفوذ یون‌های مهاجم مانند کلرید و سولفات، و در نهایت خوردگی آرماتورهای فولادی را به دنبال داشته باشند که کاهش دوام و عمر مفید سازه را در پی دارد.

در چند دهه اخیر، برای بهبود عملکرد بتن و کاهش این مشکلات، استفاده از مواد مکمل سیمانی مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره کوره‌های آهن‌گدازی، و همچنین افزودنی‌های شیمیایی نظیر فوق‌روان‌کننده‌ها مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این مواد با اصلاح ساختار خمیر سیمان و کاهش تخلخل، تا حدی باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شده‌اند.

با پیشرفت فناوری نانو، نسل جدیدی از مواد اصلاح‌کننده بتن با عنوان «نانومواد» معرفی شده‌اند که قادرند با تأثیرگذاری بر ریزساختار خمیر سیمان در مقیاس میکرو و نانو، خواص بتن را به شکل مؤثرتری بهبود دهند.

1 - Nano-Silica
2 - SiO₂

نتیجه افزایش دوام بتن در برابر عوامل مخرب محیطی می‌شود. با این حال، یکی از چالش‌های استفاده از نانوسیلیس تمایل ذرات آن به کلوخه شدن است. به دلیل انرژی سطحی بالا و نیروهای جاذبه بین ذرات بسیار ریز، در صورت عدم استفاده از روش‌های مناسب پراکندگی، این ذرات ممکن است به یکدیگر چسبیده و توده‌های بزرگ‌تری تشکیل دهند که می‌تواند کارایی و عملکرد مطلوب آن‌ها را کاهش دهد. بنابراین، در عمل نحوه اختلاط، استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها و توزیع یکنواخت نانوسیلیس در مخلوط بتن اهمیت زیادی دارد.

مکانیزم اثر نانوسیلیس در خمیر سیمان

اثر پرکنندگی: در خمیر سیمان معمولی، بین ذرات سیمان و محصولات حاصل از هیدراتاسیون، حفرات مؤثنه‌ای وجود دارد که سبب افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش نفوذپذیری بتن می‌شوند. نانوسیلیس به دلیل اندازه بسیار ریز ذرات خود می‌تواند به داخل این حفرات نفوذ کرده و بخشی از فضای خالی را پر کند. این پدیده باعث کاهش حجم حفرات مؤثنه، متراکم‌تر شدن ریزساختار خمیر سیمان و در نهایت افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. در نتیجه، بتن دارای ساختاری یکنواخت‌تر و پایدارتر خواهد بود. این اثر به‌ویژه در بتن‌های پرمقاومت که دارای نسبت آب به سیمان پایین هستند اهمیت بیشتری دارد و می‌تواند به بهبود دوام و عملکرد بلندمدت بتن کمک کند.

واکنش پوزولانی: یکی از محصولات اصلی هیدراتاسیون سیمان پرتلند، هیدروکسید کلسیم^۱ است که فازی نسبتاً ضعیف محسوب می‌شود و از نظر شیمیایی در برابر برخی عوامل مهاجم مانند یون‌های سولفات آسیب‌پذیر است. نانوسیلیس با این فاز وارد واکنش پوزولانی شده و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته^۲ تولید می‌کند که مهم‌ترین فاز مقاوم‌کننده در خمیر سیمان به شمار می‌رود.

در نتیجه این واکنش، مقدار هیدروکسید کلسیم کاهش یافته و میزان ژل سیلیکات کلسیم هیدراته افزایش می‌یابد که این امر موجب بهبود مقاومت مکانیکی و دوام بتن می‌شود. به بیان دیگر، نانوسیلیس با تبدیل ترکیبات ضعیف‌تر به محصولات مقاوم‌تر، ساختار داخلی بتن را تقویت کرده و عملکرد آن را در برابر عوامل مخرب محیطی بهبود می‌بخشد.

این ذرات قادرند در فضاهای بسیار ریز موجود در خمیر سیمان نفوذ کرده و با محصولات حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش دهند.

نانوسیلیس از نظر شکل مصرف می‌تواند به صورت‌های مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. این ماده معمولاً به شکل پودر خشک، سوسپانسیون یا محلول کلئیدی در آب، و یا به صورت ترکیب‌شده در برخی افزودنی‌های آماده بتن در دسترس است. استفاده از نانوسیلیس به صورت محلول کلئیدی در بسیاری از موارد ترجیح داده می‌شود، زیرا توزیع یکنواخت‌تری در مخلوط بتن ایجاد کرده و از تجمع ذرات جلوگیری می‌کند.

ویژگی‌های مهم: نانوسیلیس دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاصی است که آن را به یکی از مؤثرترین نانومواد در بهبود خواص بتن تبدیل کرده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این ماده، سطح ویژه بسیار بالای آن است؛ به‌طوری‌که به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات، سطح تماس آن‌ها با محیط اطراف می‌تواند به چند صد متر مربع بر گرم برسد. این سطح ویژه بالا موجب افزایش فعالیت شیمیایی ذرات و فراهم شدن امکان واکنش بیشتر با محصولات هیدراتاسیون سیمان می‌شود. از سوی دیگر، نانوسیلیس دارای فعالیت پوزولانی بسیار شدیدی است و در حضور آب با هیدروکسید کلسیم، که یکی از محصولات اصلی هیدراتاسیون سیمان است، واکنش داده و ژل سیلیکات کلسیم آبدار تولید می‌کند.

این ژل عامل اصلی ایجاد مقاومت در خمیر سیمان محسوب می‌شود و افزایش مقدار آن می‌تواند موجب بهبود مقاومت و دوام بتن گردد. این واکنش از نظر ماهیت مشابه واکنش مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس است، اما به دلیل ابعاد نانومتری ذرات، سرعت و شدت آن بیشتر بوده و حتی در سنین اولیه بتن نیز اثر قابل توجهی دارد. علاوه بر این، نانوسیلیس دارای خاصیت پرکنندگی قابل توجهی است؛ به این معنا که ذرات بسیار ریز آن قادرند حفرات میکروسکوپی موجود در خمیر سیمان و ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها را پر کرده و ساختار داخلی بتن را متراکم‌تر کنند.

این موضوع باعث کاهش تخلخل، کاهش نفوذپذیری و در

1 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$

2 - C-S-H

هسته زایی: ذرات نانوسیلیس می‌توانند به‌عنوان مراکز هسته‌زایی برای تشکیل محصولات هیدراتاسیون سیمان عمل کنند. به این معنا که این ذرات به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، محیط مناسبی برای آغاز تشکیل و رشد بلورهای ژل سیلیکات کلسیم هیدراته و سایر فازهای هیدراتاسیون فراهم می‌کنند. حضور تعداد زیادی از این مراکز هسته‌زایی باعث افزایش سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون، به‌ویژه در سنین اولیه بتن می‌شود.

در نتیجه، مقاومت اولیه بتن (برای مثال در سنین ۱ تا ۳ روز) افزایش می‌یابد و فرآیند گیرش و سخت شدن اولیه نیز ممکن است اندکی سریع‌تر رخ دهد. این ویژگی در پروژه‌هایی که نیاز به کسب مقاومت سریع‌تر دارند می‌تواند بسیار مفید و مؤثر باشد.

تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن

مقاومت فشاری: مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی عملکرد بتن، مقاومت فشاری آن است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزودن مقدار مناسبی از نانوسیلیس می‌تواند مقاومت فشاری بتن را در سنین مختلف افزایش دهد. این افزایش مقاومت عمدتاً به متراکم‌تر شدن ریزساختار خمیر سیمان، افزایش تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته و کاهش حفرات و میکروتکرک‌ها نسبت داده می‌شود. در نتیجه، پیوستگی داخلی بتن بهبود یافته و ساختار آن یکنواخت‌تر و مقاوم‌تر می‌گردد.

در بسیاری از تحقیقات، مصرف حدود ۲ درصد نانوسیلیس نسبت به وزن سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد گزارش شده است. البته میزان این بهبود به عواملی مانند طرح اختلاط، نوع سیمان، نسبت آب به سیمان و حضور سایر مواد مکمل سیمانی بستگی دارد و در شرایط مختلف ممکن است متفاوت باشد.

مقاومت خمشی و کششی غیرمستقیم: با کاهش ترک‌های ریز و بهبود پیوستگی میان خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، مقاومت خمشی و همچنین مقاومت کششی غیرمستقیم بتن نیز افزایش می‌یابد. حضور نانوسیلیس باعث متراکم‌تر شدن ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها شده و از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه بتن رفتار مقاوم‌تری در برابر تنش‌های

کششی و خمشی از خود نشان می‌دهد. این موضوع به‌ویژه در اعضای سازه‌ای که تحت خمش قرار دارند، مانند تیرها و دال‌ها، اهمیت زیادی دارد.

هرچند میزان افزایش مقاومت خمشی معمولاً کمتر از مقاومت فشاری است، اما در برخی تحقیقات افزایش حدود ۱۵ تا ۲۰ درصدی برای مقاومت خمشی بتن حاوی نانوسیلیس گزارش شده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این ماده بر عملکرد مکانیکی بتن است.

مدول الاستیسیته: برخی تحقیقات نشان داده‌اند که با افزودن نانوسیلیس و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته بتن نیز تا حدی افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود بتن رفتار سخت‌تری از خود نشان دهد و میزان تغییر شکل‌های الاستیک آن کاهش یابد. علت این پدیده را می‌توان در متراکم‌تر شدن ریزساختار خمیر سیمان و بهبود پیوستگی بین اجزای بتن دانست. با این حال، میزان افزایش مدول الاستیسیته معمولاً کمتر از افزایش مقاومت فشاری است و علاوه بر حضور نانوسیلیس، به عواملی مانند نوع و سختی سنگدانه‌ها، نسبت آب به سیمان و طرح اختلاط بتن نیز وابسته است.

تأثیر نانوسیلیس بر دوام بتن

نفوذپذیری و جذب آب: دوام بتن تا حد زیادی به میزان نفوذپذیری آن وابسته است؛ هرچه ساختار بتن متراکم‌تر و حجم حفرات آن کمتر باشد، ورود آب و یون‌های مهاجم به درون بتن دشوارتر خواهد بود. استفاده از نانوسیلیس با کاهش تخلخل و قطع پیوستگی حفرات موئینه، باعث متراکم‌تر شدن ریزساختار خمیر سیمان شده و در نتیجه نفوذپذیری و میزان جذب آب بتن را کاهش می‌دهد. این موضوع نقش مهمی در افزایش دوام بتن در محیط‌های خورنده ایفا می‌کند.

نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و همچنین آزمون‌های استانداردمانند آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید^۱ نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به بتن‌های معمولی جریان عبوری یون‌ها و میزان جذب آب کمتری دارند که نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی است.

با این حال، در صورتی که نسبت آب به سیمان به شدت کاهش یابد و عمل‌آوری مناسب انجام نشود، ممکن است به دلیل خشک شدن سریع‌تر بتن و افزایش تنش‌های داخلی، ترک‌های سطحی بیشتری ایجاد شود. بنابراین در بتن‌های حاوی نانوسیلیس، انجام عمل‌آوری مناسب و حفظ رطوبت و دمای مطلوب اهمیت بسیار زیادی دارد. در صورت تأمین شرایط عمل‌آوری مناسب، استفاده از نانوسیلیس معمولاً به کاهش ترک‌های مویینه و بهبود یکپارچگی و دوام بتن کمک می‌کند.

تأثیر نانوسیلیس بر دوام بتن

کارایی: یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در استفاده از نانوسیلیس در بتن، کاهش کارایی و روانی مخلوط است. نانوسیلیس به دلیل داشتن سطح ویژه بسیار زیاد و اندازه بسیار ریز ذرات، تمایل بالایی به جذب آب دارد و همین موضوع می‌تواند باعث کاهش اسلامپ و سفت‌تر شدن مخلوط بتن شود. علاوه بر این، توزیع یکنواخت این ذرات در مخلوط نیز اهمیت زیادی دارد، زیرا در صورت تجمع ذرات نانو، کارایی بتن بیشتر کاهش می‌یابد.

برای رفع این مشکل، معمولاً از فوق‌روان‌کننده‌های پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده می‌شود تا بدون افزایش نسبت آب به سیمان، روانی و کارایی مناسبی به مخلوط داده شود. استفاده همزمان از نانوسیلیس و فوق‌روان‌کننده می‌تواند ضمن حفظ کارایی بتن، به بهبود خواص مکانیکی و دوام آن نیز کمک کند.

مقدار بهینه مصرف: استفاده بیش از حد از نانوسیلیس در بتن نه تنها باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود، بلکه می‌تواند مشکلاتی مانند کاهش شدید کارایی مخلوط، پخش نشدن یکنواخت ذرات و حتی ایجاد حباب‌های هوا در بتن را به همراه داشته باشد. این مسائل ممکن است در نهایت بر کیفیت و عملکرد بتن تأثیر منفی بگذارند. به همین دلیل، تعیین مقدار مناسب نانوسیلیس از اهمیت زیادی برخوردار است.

بیشتر پژوهش‌ها مقدار بهینه نانوسیلیس را در حدود ۱ تا ۳ درصد وزنی سیمان پیشنهاد می‌کنند، زیرا در این محدوده معمولاً بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و دوام بتن مشاهده می‌شود. با این حال، این مقدار باید از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و با توجه به طرح اختلاط

مقاومت در برابر یون کلر و خوردگی آرماتور: در سازه‌های بتن مسلح، نفوذ یون‌های کلر می‌تواند باعث آغاز خوردگی آرماتورها شده و در نهایت منجر به کاهش مقاومت و عمر مفید سازه گردد. استفاده از نانوسیلیس با کاهش نفوذپذیری و متراکم‌تر کردن خمیر سیمان، مسیرهای نفوذ یون‌های مهاجم را محدود کرده و ورود یون کلر به ناحیه اطراف میلگردها را دشوارتر می‌کند.

در نتیجه، احتمال شروع و گسترش خوردگی آرماتورها کاهش می‌یابد. به همین دلیل، بتن‌های حاوی نانوسیلیس در سازه‌هایی که در معرض محیط‌های خورنده قرار دارند، مانند سازه‌های دریایی، اسکله‌ها، پل‌های ساحلی و همچنین سازه‌هایی که در زمستان در معرض نم‌پاشی جاده‌ها هستند، عملکرد دوام بهتری از خود نشان می‌دهند.

مقاومت در برابر سولفات‌ها: یون‌های سولفات می‌توانند با ترکیبات موجود در خمیر سیمان واکنش داده و موجب ایجاد انبساط، ترک‌خوردگی و در نهایت تخریب تدریجی بتن شوند. حضور نانوسیلیس با کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم و همچنین متراکم‌تر کردن ریزساختار بتن، مقاومت آن را در برابر حملات سولفاتی افزایش می‌دهد. این ماده از طریق واکنش پوزولانی و کاهش تخلخل، مسیر نفوذ یون‌های مهاجم را محدود کرده و پایداری شیمیایی بتن را بهبود می‌بخشد. به همین دلیل، در محیط‌های حاوی سولفات مانند خاک‌ها و آب‌های سولفاتی، بتن‌های حاوی نانوسیلیس معمولاً تغییر حجم کمتر، ترک‌خوردگی محدودتر و دوام بیشتری نسبت به بتن‌های معمولی از خود نشان می‌دهند.

تأثیر نانوسیلیس بر جمع‌شدگی و ترک‌خوردگی: جمع‌شدگی بتن، به‌ویژه جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن، یکی از عوامل اصلی ایجاد ترک‌های سطحی در بتن محسوب می‌شود. استفاده از نانوسیلیس به دلیل کاهش مقدار آب آزاد در خمیر سیمان و همچنین کاهش تخلخل و ریزتر شدن ساختار داخلی بتن، می‌تواند تا حدی میزان جمع‌شدگی را کاهش دهد. علاوه بر این، افزایش تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته و متراکم‌تر شدن خمیر سیمان باعث می‌شود توزیع تنش‌های داخلی یکنواخت‌تر شده و احتمال ایجاد ترک‌های ریز کاهش یابد.

نتیجه گیری

نانوسیلیس به عنوان یکی از مهم‌ترین نانومواد معدنی مورد استفاده در فناوری بتن، نقش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن ایفا می‌کند و می‌تواند عملکرد بتن را در سطوح ریزساختاری و ماکروسکوپی به طور هم‌زمان ارتقا دهد.

افزودن مقدار مناسب نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن، به‌ویژه در سنین اولیه، می‌شود که این موضوع برای پروژه‌هایی با نیاز به کسب مقاومت زود هنگام اهمیت ویژه‌ای دارد.

استفاده از نانوسیلیس با کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن، منجر به افزایش دوام و کاهش آسیب‌پذیری در برابر عوامل محیطی می‌شود.

حضور نانوسیلیس مقاومت بتن را در برابر نفوذ یون‌های مخرب مانند کلر و سولفات بهبود می‌بخشد و در نتیجه احتمال خوردگی آرماتورها و تخریب شیمیایی بتن کاهش می‌یابد.

نانوسیلیس با کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم و افزایش تشکیل ژل سلیکات کلسیم هیدراته، باعث اصلاح ریزساختار خمیر سیمان و متراکم‌تر شدن بافت داخلی بتن می‌شود.

با این حال، استفاده از نانوسیلیس مستلزم توجه به ملاحظات اجرایی از جمله حفظ کارایی مخلوط، استفاده از فوق‌روان‌کننده مناسب، انجام عمل‌آوری کافی و ارزیابی اقتصادی در طرح اختلاط است.

در مجموع، نانوسیلیس را می‌توان ابزاری مؤثر برای تولید بتن‌های با عملکرد بالا و دوام بیشتر دانست، مشروط بر آنکه مقدار مصرف و نحوه استفاده از آن به‌صورت دقیق طراحی، کنترل و متناسب با شرایط هر پروژه انتخاب شود.

نوع سیمان، نسبت آب به سیمان و شرایط اجرایی هر پروژه به طور دقیق تعیین شود.

هزینه و دسترسی: تولید نانوسیلیس در مقایسه با مواد پوزولانی متداول مانند میکروسیلیس معمولاً هزینه بیشتری دارد، زیرا فرایند تولید و دستیابی به ذرات در مقیاس نانو نیازمند فناوری پیشرفته‌تر و کنترل دقیق‌تری است. به همین دلیل استفاده از آن در همه پروژه‌های عمرانی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست و بیشتر در بتن‌های ویژه، بتن‌های پرمقاومت و سازه‌های مهم به کار می‌رود. همچنین در پروژه‌هایی که دوام بسیار بالا، نفوذپذیری کم و عملکرد بلندمدت بتن اهمیت زیادی دارد، مانند سازه‌های دریایی، پل‌ها و سازه‌های صنعتی، استفاده از نانوسیلیس می‌تواند مزایای فنی قابل توجهی ایجاد کند. در چنین مواردی، افزایش هزینه اولیه ممکن است با بهبود دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در طول عمر سازه جبران شود.

کاربردهای بتن حاوی نانوسیلیس: با توجه به مزایا و محدودیت‌های ذکر شده، بتن حاوی نانوسیلیس در برخی کاربردهای خاص که نیاز به مقاومت و دوام بالاتری دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به بتن‌های پرمقاومت^۱ و فوق‌پرمقاومت^۲ اشاره کرد که در ساختمان‌های بلندمرتبه، پل‌های خاص و سازه‌های ویژه به کار می‌روند. همچنین در سازه‌های دریایی و ساحلی مانند اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها و سازه‌های فراساحلی که در معرض محیط‌های خورنده قرار دارند، استفاده از نانوسیلیس می‌تواند به افزایش دوام بتن کمک کند.

از دیگر کاربردهای آن می‌توان به مخازن آب، تصفیه‌خانه‌ها و تونل‌ها اشاره کرد که در آن‌ها آب‌بندی مناسب و نفوذپذیری کم اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این، در کف‌سازی‌های صنعتی که باید در برابر سایش و بارهای سنگین مقاومت بالایی داشته باشند نیز از بتن حاوی نانوسیلیس استفاده می‌شود. این ماده همچنین در بتن خودتراکم^۳ کاربرد دارد، زیرا می‌تواند ضمن حفظ روانی مناسب مخلوط، به بهبود مقاومت و دوام بتن کمک کرده و کیفیت ریزساختار آن را افزایش دهد.

1 - HPC- High-Performance Concrete

2 - UHPC- Ultra-High Performance Concrete

3 - SCC- Self-consolidating concrete

نتیجه گیری

نانوسیلیس به عنوان یکی از مهم‌ترین نانومواد معدنی مورد استفاده در فناوری بتن، نقش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن ایفا می‌کند و می‌تواند عملکرد بتن را در سطوح ریزساختاری و ماکروسکوپی به طور هم‌زمان ارتقا دهد.

افزودن مقدار مناسب نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن، به‌ویژه در سنین اولیه، می‌شود که این موضوع برای پروژه‌هایی با نیاز به کسب مقاومت زود هنگام اهمیت ویژه‌ای دارد.

استفاده از نانوسیلیس با کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن، منجر به افزایش دوام و کاهش آسیب‌پذیری در برابر عوامل محیطی می‌شود.

حضور نانوسیلیس مقاومت بتن را در برابر نفوذ یون‌های مخرب مانند کلر و سولفات بهبود می‌بخشد و در نتیجه احتمال خوردگی آرماتورها و تخریب شیمیایی بتن کاهش می‌یابد.

نانوسیلیس با کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم و افزایش تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، باعث اصلاح ریزساختار خمیر سیمان و متراکم‌تر شدن بافت داخلی بتن می‌شود.

با این حال، استفاده از نانوسیلیس مستلزم توجه به ملاحظات اجرایی از جمله حفظ کارایی مخلوط، استفاده از فوق‌روان‌کننده مناسب، انجام عمل‌آوری کافی و ارزیابی اقتصادی در طرح اختلاط است.

در مجموع، نانوسیلیس را می‌توان ابزاری مؤثر برای تولید بتن‌های با عملکرد بالا و دوام بیشتر دانست، مشروط بر آنکه مقدار مصرف و نحوه استفاده از آن به‌صورت دقیق طراحی، کنترل و متناسب با شرایط هر پروژه انتخاب شود.

نوع سیمان، نسبت آب به سیمان و شرایط اجرایی هر پروژه به طور دقیق تعیین شود.

هزینه و دسترسی: تولید نانوسیلیس در مقایسه با مواد پوزولانی متداول مانند میکروسیلیس معمولاً هزینه بیشتری دارد، زیرا فرایند تولید و دستیابی به ذرات در مقیاس نانو نیازمند فناوری پیشرفته‌تر و کنترل دقیق‌تری است. به همین دلیل استفاده از آن در همه پروژه‌های عمرانی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست و بیشتر در بتن‌های ویژه، بتن‌های پرمقاومت و سازه‌های مهم به کار می‌رود. همچنین در پروژه‌هایی که دوام بسیار بالا، نفوذپذیری کم و عملکرد بلندمدت بتن اهمیت زیادی دارد، مانند سازه‌های دریایی، پل‌ها و سازه‌های صنعتی، استفاده از نانوسیلیس می‌تواند مزایای فنی قابل توجهی ایجاد کند. در چنین مواردی، افزایش هزینه اولیه ممکن است با بهبود دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در طول عمر سازه جبران شود.

کاربردهای بتن حاوی نانوسیلیس: با توجه به مزایا و محدودیت‌های ذکر شده، بتن حاوی نانوسیلیس در برخی کاربردهای خاص که نیاز به مقاومت و دوام بالاتری دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به بتن‌های پرمقاومت^۱ و فوق‌پرمقاومت^۲ اشاره کرد که در ساختمان‌های بلندمرتبه، پل‌های خاص و سازه‌های ویژه به کار می‌روند. همچنین در سازه‌های دریایی و ساحلی مانند اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها و سازه‌های فراساحلی که در معرض محیط‌های خورنده قرار دارند، استفاده از نانوسیلیس می‌تواند به افزایش دوام بتن کمک کند.

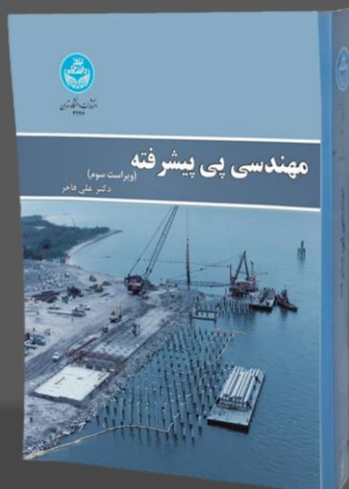
از دیگر کاربردهای آن می‌توان به مخازن آب، تصفیه‌خانه‌ها و تونل‌ها اشاره کرد که در آن‌ها آب‌بندی مناسب و نفوذپذیری کم اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این، در کف‌سازی‌های صنعتی که باید در برابر سایش و بارهای سنگین مقاومت بالایی داشته باشند نیز از بتن حاوی نانوسیلیس استفاده می‌شود. این ماده همچنین در بتن خودتراکم^۳ کاربرد دارد، زیرا می‌تواند ضمن حفظ روانی مناسب مخلوط، به بهبود مقاومت و دوام بتن کمک کرده و کیفیت ریزساختار آن را افزایش دهد.

1 - HPC- High-Performance Concrete

2 - UHPC- Ultra-High Performance Concrete

3 - SCC- Self-consolidating concrete

معرفی کتاب

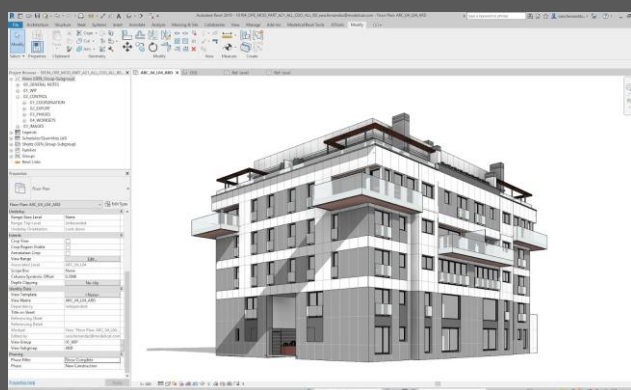


کتاب «مهندسی پی پیشرفته (ویراست سوم)» اثر "دکتر علی فاخر" (عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران) این کتاب با رویکردی علمی و کاربردی، مباحث اساسی و پیشرفته مهندسی پی از جمله ظرفیت باربری، نشست، طراحی و اجرای پی‌های سطحی، دیوارهای حائل، فشار جانبی خاک، تسلیخ خاک، شمع‌های تکی و گروه شمع را به صورت منظم و تحلیلی ارائه می‌دهد. استفاده از مبانی نظری، مثال‌های کاربردی و نتایج پژوهش‌های روز، این اثر را به منبعی ارزشمند برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی، پژوهشگران و مهندسان ژئوتکنیک تبدیل کرده و موجب شده است که به عنوان یکی از مراجع اصلی درس «مهندسی پی پیشرفته» در دانشگاه‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد.

معرفی نرم افزار

نرم افزار **Revit** یکی از قدرتمندترین و پرکاربردترین نرم افزارهای مهندسی ساختمان در حوزه مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) است. این نرم افزار با فراهم کردن امکان طراحی، مدل سازی و مستندسازی پروژه های معماری، سازه و تأسیسات، فرآیند طراحی و اجرای پروژه های ساختمانی را به صورت یکپارچه مدیریت می کند.

Revit قابلیت ایجاد مدل های سه بعدی هوشمند، استخراج خودکار نقشه ها، تهیه متره و برآورد، هماهنگی بین رشته های مختلف و مدیریت تغییرات پروژه را دارد و در پروژه های ساختمانی کوچک تا بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد. محیط کاربری مناسب، دقت بالا در مستندسازی، افزایش هماهنگی میان تیم های طراحی و کاهش خطاهای اجرایی، از مهم ترین ویژگی های این نرم افزار به شمار می روند.



منابع

- ۱-۲ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۴۰۰). آیین‌نامه بتن ایران (آبا) (ویرایش پنجم). وزارت راه و شهرسازی.
- ۱-۳ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۴۰۰). مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان؛ پی و پی‌سازی.
- ۲-۳ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۴۰۰). آیین‌نامه بتن ایران (آبا) (ویرایش پنجم). وزارت راه و شهرسازی.
- ۳-۳ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۳۹۹). مبحث نهم مقررات ملی ساختمان؛ طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه. (بخش الزامات بتن و میلگرد).
- ۱-۴ دفتر مقررات ملی ساختمان، *مقررات ملی ساختمان، مبحث نهم: طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه، ویرایش ۱۳۹۹، تهران: وزارت راه و شهرسازی، دفتر مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۹.
- ۲-۴ سازمان برنامه و بودجه کشور، نشریه شماره ۳۶۰: دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، تهران: سازمان برنامه و بودجه کشور.
- ۳-۴ سازمان برنامه و بودجه کشور، نشریه شماره ۵۴۹: راهنمای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از پلیمرهای مسلح با الیاف، تهران: سازمان برنامه و بودجه کشور.
- ۱-۵ محسن تدین، مجتبی مغربی، مصطفی خانزادی، محمود حبیبیان، ۱۳۸۷، بررسی تأثیر ابعاد مواد پوزولانی (سیلیس آمورف) در دو مقیاس میکرو و نانو متر بر روی خواص مکانیکی خمیر سیمان، مجله تحقیقات بتن شماره ۲ دوره ۱.
- ۲-۵ رضا کریمی، محمد علی دشتی رحمت آبادی، ۱۴۰۴، مروری بر تأثیر نانوسیلیس بر خواص بتن، دومین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری، شهرسازی و محیط زیست.
- ۳-۵ سید رضا میر هادی، رضا قدیریان، ۱۳۹۹، بررسی تأثیر استفاده از مواد نانو (اکسید آهن، اکسید گرافن، اکسید تیتانیوم، سیلیس) بر خواص مکانیکی بتن خود تراکم، سومین کنگره ملی شیمی و نانوشیمی از پژوهش تا فناوری، تهران.
- ۴-۵ رمضانپور، علی اکبر و مروج جهرمی، سیدمسعود و مهدیخانی، مهدی، ۱۳۸۸، مقایسه اثرات نانوسیلیس و دوده سیلیس بر روی ریزساختار و دوام نمونه‌های بتنی، نخستین کنفرانس بین‌المللی بتن، تبریز.
- ۵-۵ مسعود غنمی، سید مجتبی موحدی فر، ۱۴۰۳، بررسی اثر افزودنی‌های نانو (اکسید آهن، سیلیس) بر خواص مکانیکی و دوام بتن پلیمری، یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار ایران.

منابع

- 1-1 New Development Bank. (2022). Project document: Anhui Province G3 Tongling Yangtze River Highway-Railway Bridge Project. Shanghai, China: New Development Bank.
- 1-2 Anhui Provincial Transport Holding Group Co., Ltd. (2024). G3 Tongling Yangtze River Highway-Railway Bridge project updates. Hefei, China.
- 1-3 China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd. (2024). Construction progress of G3 Tongling Yangtze River Highway-Railway Bridge. Wuhan, China.
- 1-4 Chen, W. F., & Duan, L. (Eds.). (2014). Bridge Engineering Handbook (2nd ed.). CRC Press.
- 1-5 Gimsing, N. J., & Georgakis, C. T. (2012). Cable Supported Bridges: Concept and Design (3rd ed.). Wiley.
- 1-6 Walther, R., Houriet, B., Isler, W., Moia, P., & Klein, J. F. (1999). Cable Stayed Bridges (2nd ed.). Thomas Telford.
- 1-7 Podolny, W., & Scalzi, J. B. (1986). Construction and Design of Cable-Stayed Bridges. Wiley.
- 1-8 Chen, B., & Duan, L. (2015). Bridge Engineering Handbook: Construction and Maintenance. CRC Press.
- 2-1 American Concrete Institute. (2000, reaffirmed 2009). ACI 304R-00: Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete. American Concrete Institute.
- 2-2 Comité Européen de Normalisation. (2016). EN 206: Concrete—Specification, performance, production and conformity. CEN.

2-3 EFNARC. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use. European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

2-4 Fédération internationale du béton. (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn.

2-5 Khayat, K. H. (1999). Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. ACI Materials Journal, 96(3), 346–353.

2-6 Assaad, J. J. (2018). Development and use of anti-washout admixtures in underwater concrete. Construction and Building Materials, 160, 50–60.

2-7 Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5–15.

3-1 Federal Highway Administration (FHWA). Micropile Design and Construction Guidelines – Implementation Manual. Report No. FHWA-NHI-05-039, 2005.

3-2 Federal Highway Administration (FHWA). Drilled and Grouted Micropiles: State of Practice Review. FHWA-SA-97-070.

3-3 Bruce, D. A., Juran, I., Nicholson, P. The Practice of Micropiles. Federal Highway Administration.

3-4 ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318). American Concrete Institute.

3-5 Tomlinson, M. J., & Woodward, J. Pile Design and Construction Practice. CRC Press.

3-6 Bowles, J. E. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill.

منابع

4-1 ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17), Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2017



از تمامی دانشجویان صمیمانه دعوت می‌گردد تا با ارائه مطالب علمی در حوزه عمران و همچنین در بخش‌های فنی و گرافیکی نشریه ما را در ارتقاء هرچه بهتر محتوا و ظاهر آن یاری رسانند. همچنین از اساتید محترم نیز تقاضا می‌شود با حضور ارزشمند، مشارکت و بازبینی در مطالب و محتوای نشریه بر غنای آن بیافزایند.

از تمامی اساتید، دانشجویان و مسئولین محترم که در تهیه، تدوین و انتشار این نشریه یاری دادند؛ کمال تشکر را داریم.

راه‌های ارتباطی :

   @anjoman_azhand_omran

 azhandscienceassociation@gmail.com

 kerman.tvu.ac.ir

