

ارزیابی دوام و عملکرد شمع‌های بتنی سانتریفیوژ در محیط‌های مهاجم

Evaluation of Durability and Performance of PHC Piles in Aggressive Environments

در پروژه‌های عمرانی، انتخاب سیستم مناسب برای اجرای پی‌های عمیق تنها به مشخصات مقاومتی و الزمات ژئوتکنیکی محدود نمی‌شود. یک شمع زمانی واقعاً عملکرد مطلوبی دارد که بتواند در طول سال‌های بهره‌برداری، علاوه بر تحمل بارهای سازه‌ای، در برابر عوامل مخرب محیطی نیز مقاومت نماید.

این موضوع در محیط‌هایی مانند مناطق ساحلی، زمین‌های اشباع، محیط‌های حاوی یون کلرید و سولفات و به‌ویژه محل‌های دفن زباله اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ جایی که مصالح سازه‌ای ممکن است برای مدت طولانی در معرض یون‌های مهاجم و فرآیندهای پیچیده شیمیایی قرار گیرند.

در چنین شرایطی، شمع‌های بتنی پیش‌تنیده سانتریفیوژ (PHC) به دلیل سطح بالای فناوری تولید، تراکم بالا، مقاومت مکانیکی قابل‌توجه و ساختار نسبتاً کم‌تخلخل، می‌توانند به عنوان گزینه‌ای قابل اتکا مورد استفاده قرار گیرند.

یک مطالعه پژوهشی منتشرشده در سال ۲۰۲۵ در نشریه *Case Studies in Construction Materials*، عملکرد دوام شمع‌های PHC را در محیط بسیار مهاجم شیرابه محل دفن زباله بررسی کرده است. در این پژوهش، رفتار شمع از جنبه‌های مکانیکی، شیمیایی و ریزساختاری بررسی و همچنین عملکرد آن پس از شبیه‌سازی خوردگی معادل ۵۰ سال با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارزیابی شده است.



منطقه آزاد ارون، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارون. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۷۷۷۹۷

info@bgapiles.com

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰۱

فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

www.bgapiles.com

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۸۲۱۰۹



۱) تاثیر شیرابه دفن زباله بر دوام شمع‌های بتنی

شیرابه محل دفن زباله، محیطی با ترکیب شیمیایی پیچیده است و می‌تواند حاوی یون‌هایی مانند کلرید، سولفات و همچنین ترکیبات آلی باشد. نفوذ این مواد به داخل بتن می‌تواند در بلندمدت باعث ایجاد فرآیندهای شیمیایی و الکتروشیمیایی مخرب شود.

یون‌های کلرید یکی از مهم‌ترین عوامل خوردگی فولاد داخل بتن هستند. این یون‌ها می‌توانند به تدریج خود را به سطح آرماتور برسانند و لایه غیرفعال محافظ فولاد را تخریب کنند. در ادامه، خوردگی فولاد آغاز شده و محصولات خوردگی با افزایش حجم خود می‌توانند تنش‌هایی را در بتن اطراف آرماتور ایجاد کنند.

از سوی دیگر، یون‌های سولفات نیز می‌توانند با برخی ترکیبات موجود در خمیر سیمان واکنش داده و محصولات مانند ژپس و اترینجایت ایجاد کنند. تشکیل این محصولات در شرایط خاص می‌تواند با افزایش حجم همراه بوده و احتمال ایجاد ریزترک‌ها و افت تدریجی عملکرد بتن را افزایش دهد.

بنابراین، قرار دادن شمع PHC در چنین محیطی، آزمونی جدی برای ارزیابی دوام واقعی بتن و فولاد پیش‌تنیده محسوب می‌شود.

۲) مقاومت بالای شمع‌های بتنی سانتی‌فیوژ در برابر یون‌های مهاجم

یکی از تفاوت‌های مهم شمع‌های PHC با بسیاری از اعضای بتن‌آرمه متعارف، به فرآیند تولید آن‌ها بازمی‌گردد. در تولید شمع‌های PHC، پس از اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به فولاد، بتن تحت فرآیند سانتی‌فیوژ قرار می‌گیرد. نیروی گریز از مرکز باعث تراکم و آرایش مجدد مصالح بتن در مقطع شمع می‌شود و در نهایت، ساختاری متراکم و لایه‌ای ایجاد می‌کند.

در این آزمون شمع بتنی سانتی‌فیوژ به طول ۱۲ متر ساخته و قطعات یک متری از میان آن برش داده‌شد. سپس به‌منظور جلوگیری از ورود مستقیم یون‌های زیان‌آور موجود در شیرابه از طریق آرماتورهای موجود در سطح مقطع انتهایی شمع، آرماتورهای موجود در دو انتهای شمع PHC با استفاده از سیمان و رزین اپوکسی آب‌بندی شدند.



منطقه آزاد ارون، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارون. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۷۷۷۹۷

info@bgapiles.com

فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

www.bgapiles.com

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰۱

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۸۲۱۰۹





ساخت نمونه شمع بتنی سانتریفیوژ

مطالعه مورد بررسی نشان داد که این ساختار لایه‌ای می‌تواند نقش مهمی در رفتار نفوذ یون‌های مهاجم و دوام شمع داشته باشد. نتایج آزمایش‌های MIP و X-CT نشان داد که تخلخل بتن در لایه‌های مختلف شمع یکسان نیست. به بیان ساده‌تر، بتن موجود در لایه‌های خارجی شمع متراکم‌تر از بخش‌های داخلی آن است.

این موضوع از منظر دوام اهمیت زیادی دارد؛ زیرا هرچه شبکه حفرات در بتن محدودتر و متراکم‌تر باشد، مسیرهای موجود برای انتقال و نفوذ یون‌های مهاجم نیز محدودتر می‌شوند.



منطقه آزاد ارونند، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارونند. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۳۱۱

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰۱ فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۰۸۲۱۰۹ www.bgapiles.com

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۴۷۷۹۷

info@bgapiles.com





شرکت بنیان گستر ارونند

تهیه و تنظیم:
واحد تحقیق و توسعه
Research and Development

پژوهشگران همچنین نشان دادند که تخلخل بتن در شمع بتنی سانتریفیوژ (PHC)، در مجموع، به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر گزارش شده برای بتن C80 معمولی و سنگدانه هاست؛ عاملی که می تواند به مقاومت بالاتر شمع در برابر نفوذ عوامل مهاجم کمک کند.

۳) شبیه سازی ۵۰ سال خوردگی شمع

یکی از جذاب ترین بخش های این پژوهش، شبیه سازی خوردگی معادل ۵۰ سال در محیط شیرابه است. برای کاهش زمان آزمایش، پژوهشگران از یک روش تسریع شده الکتریکی استفاده کردند که در آن با اعمال جریان الکتریکی، مهاجرت یون های کلرید و فرآیند خوردگی فولاد سرعت داده شد.

در این آزمایش، یک شمع PHC در معرض شیرابه قرار گرفت و پس از محاسبات مربوط به نرخ خوردگی، زمان اعمال جریان به گونه ای تعیین شد که ۱۶۰ روز آزمایش تسریع شده معادل حدود ۵۰ سال شرایط خوردگی طبیعی در نظر گرفته شود. نتایج به دست آمده قابل توجه بود.

پس از این فرآیند، اگرچه افزایش پتانسیل خوردگی و مقدار محدودی زنگ زدگی در سطح فولاد مشاهده شد، اما بدنه شمع همچنان سالم باقی ماند و ترک های واضحی در آن مشاهده نشد.

مقاومت کششی فولاد پیش تنیده از 1490 MPa به 1461 MPa کاهش یافت؛ یعنی میزان کاهش مقاومت کششی تنها حدود ۲ درصد بود. همچنین مقاومت فشاری بتن در اندازه گیری های مربوط به بدنه شمع همچنان در محدوده حدود 80 MPa باقی ماند.

این نتایج نشان می دهد که حتی در شرایط آزمایشگاهی بسیار مهاجم و پس از شبیه سازی خوردگی بلندمدت، هسته اصلی عملکرد مکانیکی شمع PHC همچنان حفظ شده است.



منطقه آزاد ارونند، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارونند. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۴۷۷۹۷

info@bgapiles.com

فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

www.bgapiles.com

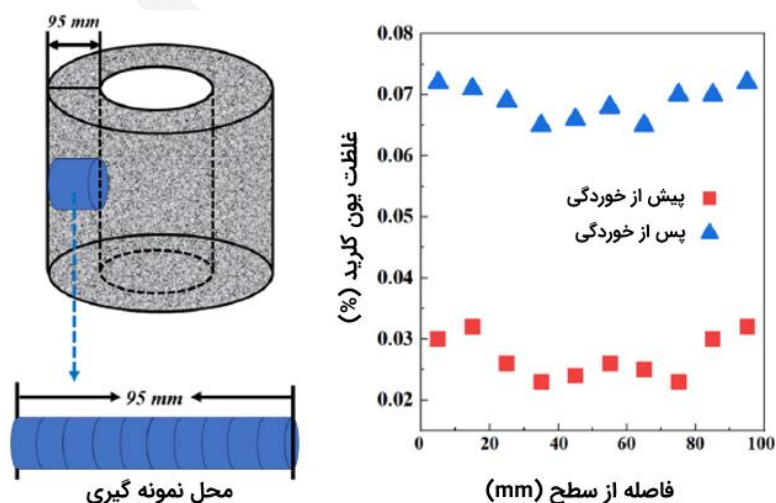
تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰۱

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۸۲۱۰۹



۴) حرکت یون‌های کلرید در شمع بتنی سانتریفیوژ

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، نحوه توزیع یون‌های کلرید در مقطع شمع بود. پس از غوطه‌وری در شیرابه، غلظت کلرید در دو سمت مقطع شمع بیشتر و در بخش میانی کمتر بود. پس از اعمال فرآیند خوردگی تسریع‌شده، همین الگوی توزیع حفظ شد، اما غلظت کلی یون کلرید افزایش پیدا کرد و به حدود ۰/۰۶۵ تا ۰/۰۷۲ درصد رسید در مجموع، افزایش غلظت کلرید در نقاط مختلف بتن حدود ۰/۰۴۰ درصد گزارش شد. این موضوع یک نکته مهم را نشان می‌دهد: ساختار داخلی شمع PHC باید در تحلیل دوام آن مورد توجه قرار گیرد.



غلظت یون کلرید پیش و پس از آزمایش خوردگی تسریع شده الکتریکی

بتن متراکم‌شده به روش گریز از مرکز دارای ساختار لایه‌ای است و این ساختار باعث می‌شود رفتار نفوذ یون‌ها در شمع الزاماً مشابه یک بتن با ساختار کاملاً یکنواخت نباشد.



منطقه آزاد ارون، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارون. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۷۷۹۷

info@bgapiles.com

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۱۳۳۰۰۱

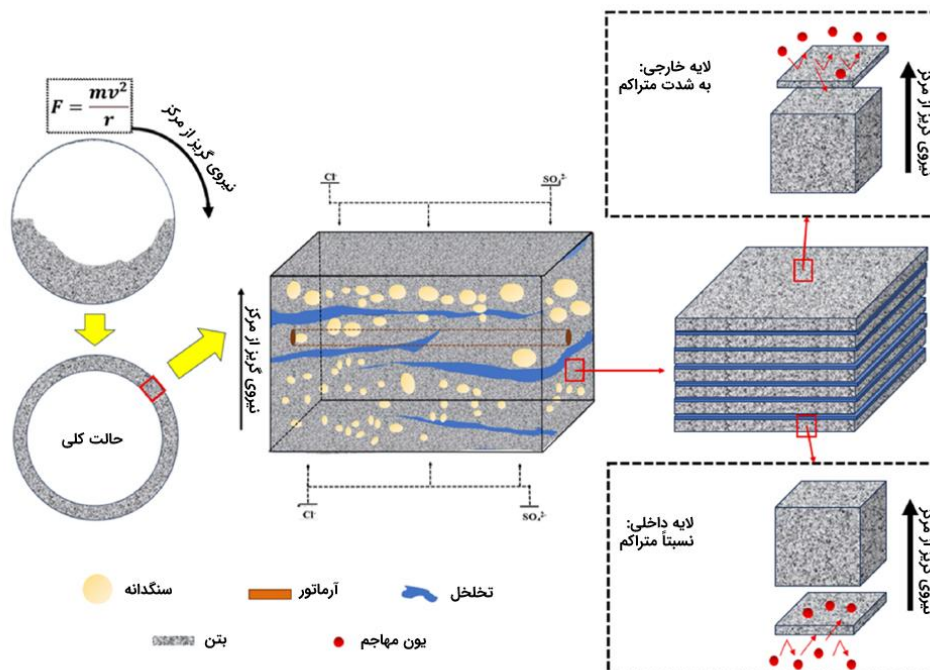
فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۱۳۳۰۵

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۸۲۱۰۹

www.bgapiles.com



بررسی‌های X-CT نیز وجود همین ساختار لایه‌ای را تأیید کردند؛ در فرآیند سانتریفیوژ، بتن به صورت تدریجی متراکم شده و لایه‌های مختلفی با ویژگی‌های متفاوت ایجاد می‌شوند.



مکانیزم مقاومت شمع باتی سانتریفیوژ در برابر یون‌های مضر



منطقه آزاد ارونند، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارونند. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۴۷۷۹۷

info@bgapiles.com

فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

www.bgapiles.com

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰-۱

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۸۲۱۰۹



۵) وضعیت ظرفیت باربری شمع پس از خوردگی

از دیدگاه مهندسی، شاید مهم‌ترین سؤال این باشد: اگر شمع در طول عمر بهره‌برداری در معرض محیط مهاجم قرار گیرد، آیا همچنان می‌تواند بار سازه را تحمل کند؟

برای پاسخ به این سؤال، پژوهشگران یک مدل اجزای محدود در نرم‌افزار ANSYS ایجاد کردند و رفتار شمع PHC را قبل و بعد از خوردگی تحت بار طراحی بررسی کردند.

در مدل مورد استفاده، بار فشاری طراحی برابر 2288 kN در نظر گرفته شد.

بر اساس نتایج این تحلیل، شمع PHC پس از شبیه‌سازی خوردگی معادل ۵۰ سال همچنان توانست الزامات طراحی برای ظرفیت باربری قائم را برآورده کند.

۶) نتیجه گیری

بررسی عملکرد شمع‌های بتنی پیش‌تنیده سانتریفیوژ (PHC) در محیط‌های مهاجم نشان می‌دهد که فرآیند تولید به روش سانتریفیوژ و ساختار متراکم بتن، نقش مهمی در افزایش دوام و حفظ عملکرد مکانیکی این شمع‌ها ایفا می‌کند. تراکم بالای بتن و شکل‌گیری ساختار لایه‌ای در اثر نیروی گریز از مرکز، موجب کاهش تخلخل و محدود شدن مسیرهای نفوذ عوامل مهاجم به داخل مقطع شمع می‌شود. نتایج آزمون‌های MIP و X-CT نیز این ویژگی ساختاری را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که لایه‌های خارجی شمع از تراکم بیشتری نسبت به بخش‌های داخلی برخوردارند.

اهمیت این ویژگی زمانی بیشتر آشکار می‌شود که شمع در محیط‌هایی با غلظت بالای یون‌های کلرید و سولفات قرار گیرد. نتایج مطالعه مورد بررسی، که عملکرد شمع PHC را در محیط بسیار مهاجم شیرابه محل دفن زباله ارزیابی کرده است، نشان می‌دهد که حتی پس از شبیه‌سازی خوردگی معادل ۵۰ سال، بدنه شمع همچنان سالم باقی مانده و ترک‌های واضحی در آن مشاهده نشده است. همچنین مقاومت فشاری بتن در محدوده حدود ۸۰ مگاپاسکال حفظ شده و کاهش مقاومت کششی فولاد پیش‌تنیده تنها حدود ۲ درصد گزارش شده است.



منطقه آزاد ارون، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارون. کد پستی: ۷۴۳۸۱۹۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۷۷۹۷

info@bgapiles.com

فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

www.bgapiles.com

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰۱

شماره ملی: ۱۴۰۰۰۸۲۱۰۹





شرکت بنیان گستر ارون

تهیه و تنظیم:
واحد تحقیق و توسعه
Research and Development

از سوی دیگر، بررسی توزیع یون‌های کلرید نشان می‌دهد که رفتار نفوذ در شمع PHC تحت تأثیر ساختار لایه‌ای ایجادشده در فرآیند سانتریفیوژ قرار دارد. اگرچه پس از فرآیند خوردگی تسریع‌شده، افزایش غلظت کلرید در مقطع شمع مشاهده شد، اما این نفوذ به افت قابل‌توجه عملکرد مکانیکی شمع منجر نشد. بررسی‌های X-CT نیز وجود ساختار لایه‌ای و تفاوت ویژگی‌های نواحی مختلف بتن را تأیید کرده‌اند.

از منظر سازه‌ای، شاید مهم‌ترین یافته این پژوهش، حفظ ظرفیت باربری شمع پس از قرارگیری طولانی‌مدت در شرایط مهاجم باشد. تحلیل اجزای محدود انجام‌شده در نرم‌افزار ANSYS نشان داد که شمع PHC پس از شبیه‌سازی خوردگی معادل ۵۰ سال، همچنان قادر به برآورده کردن الزامات طراحی برای ظرفیت باربری قائم بوده است.

در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که شمع‌های بتنی پیش‌تنیده سانتریفیوژ را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان عضوی با مشخصات مقاومتی بالا در نظر گرفت؛ دوام و پایداری عملکرد درازمدت نیز یکی از نقاط قوت مهم این سیستم محسوب می‌شود. ترکیب بتن متراکم، مقاومت مکانیکی بالا، پیش‌تنیدگی و فرآیند کنترل‌شده تولید، شمع‌های سانتریفیوژ را به گزینه‌ای قابل اتکا برای استفاده در پروژه‌هایی تبدیل می‌کند که شمع‌ها در معرض محیط‌های بالقوه مهاجم قرار دارند.

بنابراین، انتخاب شمع بتنی سانتریفیوژ می‌تواند علاوه بر تأمین الزامات مکانیکی، به افزایش اطمینان از عملکرد بلندمدت سیستم پی و کاهش ریسک ناشی از تخریب تدریجی مصالح کمک کند؛ موضوعی که در پروژه‌های ساحلی، مناطق اشباع و محیط‌های حاوی یون‌های مهاجم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



منطقه آزاد ارون، شهرک صنعتی خرمشهر، خیابان صنعت ۴، صنعت ۳،

کارخانه بنیان گستر ارون. کد پستی: ۶۴۳۸۱۹۳۳۱۱

موبایل: ۰۹۱۶۵۴۷۷۷۹۷

info@bgapiles.com

فکس: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۵

www.bgapiles.com

تلفن: ۰۶۱۵۳۵۸۳۳۰۰۱

شناسه ملی: ۱۴۰۰۰۰۸۲۱۰۹

