

بهبود دوام و مقاومت سازه‌های بتنی:

بررسی ضعف‌ها، مواد افزودنی، و

استراتژی‌های مقاوم‌سازی

مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی به عنوان یکی از مهم‌ترین مباحث در مهندسی عمران و معماری شناخته می‌شود. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و توسعه شهرنشینی، ساخت و سازه‌های بتنی در مناطق مختلف با شرایط محیطی گوناگون انجام می‌شود. این شرایط محیطی می‌تواند شامل تغییرات شدید دما، رطوبت بالا، وجود مواد خورنده، و حتی زلزله باشد. در چنین شرایطی، تضمین دوام و پایداری سازه‌های بتنی اهمیت زیادی دارد.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌های موجود در این حوزه، ضعف‌های ذاتی بتن در برابر شرایط محیطی سخت است. این ضعف‌ها می‌توانند منجر به کاهش مقاومت سازه، افزایش ترک‌خوردگی، و در نهایت کاهش عمر مفید ساختمان شوند. به همین دلیل، استفاده از مواد افزودنی مناسب و تکنیک‌های آب‌بندی به منظور بهبود مقاومت و دوام بتن بسیار حیاتی است.

در این مقاله، به بررسی مقاومت بتن و نقش مواد افزودنی و آب‌بندی در افزایش آن پرداخته می‌شود. همچنین، انواع ضعف‌های سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار می‌گیرند تا شناخت دقیقی از چالش‌های موجود در این زمینه به دست آید. علاوه بر این، عواملی که در انتخاب بهترین روش مقاوم‌سازی ساختمان‌های اسکلت بتنی نقش دارند، مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. هدف از این مقاله، ارائه راهکارهای عملی و کاربردی برای افزایش دوام و مقاومت سازه‌های بتنی در برابر شرایط محیطی سخت است.

مقاومت بتن چیست؟

مقاومت فشاری (Compressive Strength)

- تعریف: میزان تحمل بتن در برابر نیروهای فشاری قبل از شکست.
- اهمیت: این نوع مقاومت بیشترین اهمیت را در سازه‌های بتنی دارد و معمولاً به عنوان معیاری برای کیفیت بتن استفاده می‌شود.
- اندازه‌گیری: معمولاً بر روی نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای انجام می‌شود و نتایج آن بر حسب مگاپاسکال (MPa) یا پوند بر اینچ مربع (psi) بیان می‌شود.

مقاومت کششی (Tensile Strength)

- تعریف: میزان تحمل بتن در برابر نیروهای کششی قبل از شکست.
- اهمیت: مقاومت کششی بتن بسیار کمتر از مقاومت فشاری است و به همین دلیل، در طراحی سازه‌های بتنی معمولاً بتن با میلگردهای فولادی ترکیب می‌شود.

- اندازه‌گیری: از روش‌های مختلفی مانند آزمون شکافتگی یا آزمون خمشی برای تعیین مقاومت کششی بتن استفاده می‌شود.

مقاومت خمشی (Flexural Strength)

- تعریف: میزان تحمل بتن در برابر نیروهای خمشی.
- اهمیت: این نوع مقاومت برای طراحی دال‌ها و تیرهای بتنی بسیار مهم است.
- اندازه‌گیری: از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های بتنی استفاده می‌شود.

مقاومت برشی (Shear Strength)

- تعریف: میزان تحمل بتن در برابر نیروهای برشی.
- اهمیت: این نوع مقاومت برای طراحی عناصر سازه‌ای مانند تیرها و ستون‌ها مهم است.

عوامل مؤثر بر مقاومت بتن

مواد افزودنی (Admixtures)

- استفاده از مواد افزودنی مانند فوق‌روان‌کننده‌ها، تسریع‌کننده‌ها، و میکروسیلیس می‌تواند بهبود قابل توجهی در مقاومت بتن ایجاد کند.

نسبت آب به سیمان (Water-Cement Ratio)

- کاهش نسبت آب به سیمان باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود، زیرا آب زیاد باعث ایجاد حفره‌ها و کاهش تراکم بتن می‌شود.

نوع و کیفیت سیمان

- نوع سیمان و کیفیت آن بر مقاومت نهایی بتن تأثیر مستقیم دارد.

سنگدانه‌ها (Aggregates)

- نوع، اندازه، شکل و کیفیت سنگدانه‌ها می‌تواند مقاومت بتن را تحت تأثیر قرار دهد. سنگدانه‌های با کیفیت بالا و تراکم مناسب به افزایش مقاومت بتن کمک می‌کنند.

شرایط عمل‌آوری (Curing Conditions)

- شرایط عمل‌آوری بتن، شامل دما و رطوبت، بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه بر مقاومت نهایی بتن تأثیرگذار است. عمل‌آوری مناسب می‌تواند به افزایش مقاومت بتن کمک کند.

انواع مختلف ضعف‌های سازه‌های بتنی

سازه‌های بتنی می‌توانند در طول زمان به دلایل مختلف دچار ضعف‌های متعددی شوند. این ضعف‌ها می‌توانند ناشی از شرایط محیطی، طراحی نادرست، کیفیت پایین مصالح، یا عدم رعایت استانداردهای اجرایی باشند. در ادامه، انواع مختلف ضعف‌های سازه‌های بتنی لیست شده‌اند:

۱. ترک خوردگی بتن

- ترک‌های حرارتی: ناشی از تغییرات دما و انقباض و انبساط بتن.

- ترک‌های جمع‌شدگی پلاستیک: به دلیل از دست دادن سریع آب در سطح بتن تازه.
- ترک‌های جمع‌شدگی خشک: به دلیل از دست دادن رطوبت در طول زمان.
- ترک‌های نشست: به علت نشست یا جابه‌جایی در پایه‌ها و زیرساخت‌ها.
- ترک‌های خمشی: ناشی از بارگذاری اضافی یا طراحی نادرست.
- ترک‌های انقباضی: به دلیل کاهش حجم بتن در زمان گیرش.

۲. پوسته شدن و جداشدگی بتن

- پوسته شدن سطحی: به دلیل انجماد و ذوب مکرر در مناطق سردسیر.
- جداشدگی لایه‌های بتن: به علت عدم تراکم مناسب یا استفاده از آب اضافی در مخلوط بتن.
- جداشدگی سنگدانه‌ها: به دلیل عدم همگنی در مخلوط بتن.

۳. خوردگی میلگردها

- خوردگی ناشی از کلریدها: به دلیل نفوذ آب حاوی کلرید (مانند آب دریا) که باعث زنگ‌زدگی میلگردها می‌شود.
- خوردگی ناشی از کربناته شدن: به دلیل واکنش دی‌اکسید کربن با هیدروکسید کلسیم موجود در بتن که به خوردگی میلگردها منجر می‌شود.

۴. نفوذپذیری و جذب آب

- نفوذ آب: به دلیل عدم آب‌بندی مناسب که می‌تواند باعث خرابی و زوال بتن شود.
- جذب آب و رطوبت: که می‌تواند منجر به یخ‌زدگی و ترک خوردگی یا رشد قارچ و کپک شود.

۵. خرابی‌های شیمیایی

- حمله سولفاتی: به دلیل وجود سولفات‌ها در آب یا خاک که با اجزای سیمان واکنش می‌دهند و باعث خرابی بتن می‌شوند.
- حمله اسیدی: ناشی از تماس بتن با مواد شیمیایی اسیدی که سیمان را تجزیه می‌کنند.
- واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR): واکنش بین سیلیس موجود در سنگدانه‌ها و قلیایی‌های سیمان که باعث ترک خوردگی و تورم بتن می‌شود.

۶. خرابی‌های فیزیکی

- سایش و فرسایش: ناشی از تردد یا جریان آب و مواد ساینده بر روی سطح بتن.
- یخ‌زدگی و ذوب مکرر: که باعث ایجاد ترک‌ها و خرابی‌های سطحی می‌شود.
- تورم و جمع‌شدگی: ناشی از تغییرات رطوبت یا دما.

۷. ضعف‌های ناشی از بارگذاری

- بارگذاری اضافی: که باعث ترک خوردگی یا خمیدگی بیش از حد سازه می‌شود.
- بارگذاری دینامیکی: ناشی از زلزله، بادهای شدید، یا بارهای ضربه‌ای که باعث خرابی‌های جدی در سازه می‌شود.
- نشست پی: که منجر به ترک خوردگی و جابه‌جایی سازه می‌شود.

۸. ضعف‌های ناشی از طراحی و اجرا

- طراحی نادرست: مانند عدم در نظر گرفتن بارهای محیطی یا دینامیکی.
- اجرای نادرست: شامل تراکم ناکافی بتن، استفاده از مخلوط نامناسب، یا عدم رعایت استانداردها در طول ساخت.
- کیفیت پایین مصالح: که می‌تواند باعث ضعف کلی سازه شود.

۹. فرسودگی و پیری بتن

- پیری بتن: به دلیل اثرات محیطی طولانی مدت مانند نفوذ رطوبت، تغییرات دما، و تابش UV که باعث کاهش مقاومت و دوام بتن می شود.
- کاهش مقاومت مکانیکی: به مرور زمان و تحت تاثیر شرایط محیطی مختلف.

۱۰. آسیب های ناشی از عوامل زیست محیطی

- حمله قارچ ها و کپک ها: به خصوص در محیط های مرطوب که می تواند به ساختار بتن آسیب برساند.
- رشد گیاهان در ترک ها: که می تواند باعث گسترش ترک ها و کاهش استحکام سازه شود.

مقاومت سازه های بتنی در برابر شرایط محیطی سخت: نقش مواد افزودنی و آب بندی

۱. نقش مواد افزودنی در بهبود مقاومت بتن

مواد افزودنی به موادی اطلاق می شود که به مخلوط بتن افزوده می شوند تا خواص فیزیکی و شیمیایی آن را بهبود بخشند. این مواد به دسته های مختلفی تقسیم می شوند که هر یک می تواند تأثیرات متفاوتی بر روی بتن داشته باشد.

۱.۱. ابر روان کننده ها

- ابر روان کننده ها مانند Strusin N510 و Strusin Dragon-WSR501 از جمله مواد افزودنی هستند که باعث کاهش میزان آب مورد نیاز در مخلوط بتن می شوند. این مواد با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت نهایی بتن را افزایش می دهند و در عین حال موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام آن در برابر شرایط محیطی سخت می شوند.

۲.۱. افزودنی های آب بند کننده

- افزودنی های آب بند کننده مانند Struseal WS و Strusin Dragon-WSR501 به بتن افزوده می شوند تا نفوذپذیری آن در برابر آب را کاهش دهند. این مواد با ایجاد یک شبکه کریستالی در داخل بتن، مسیرهای نفوذ آب را مسدود می کنند و از ورود آب و مواد خورنده به داخل سازه جلوگیری می کنند.

۳.۱. افزودنی های ضد یخ زدگی

- برای سازه هایی که در مناطق سردسیر قرار دارند، استفاده از افزودنی های ضد یخ زدگی مانند Struset Nitro ضروری است. این افزودنی ها باعث کاهش نقطه انجماد آب در داخل بتن می شوند و از تشکیل یخ در منافذ بتن جلوگیری می کنند که این امر مانع از ترک خوردگی و شکست بتن در شرایط سرد می شود.

۴.۱. ژل های میکروسیلیس

- ژل های میکروسیلیس مانند Strumin Supergel و Strumin Power از جمله افزودنی های پوزولانی هستند که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در مخلوط بتن استفاده می شوند. این مواد با کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن در برابر مواد شیمیایی خورنده، نقش مهمی در بهبود دوام سازه های بتنی دارند.

۲. نقش آب بندی در افزایش دوام سازه های بتنی

آب بندی یکی از مهم ترین مراحل در ساخت سازه های بتنی است که می تواند تأثیر زیادی بر دوام و عملکرد آن ها در برابر شرایط محیطی سخت داشته باشد. آب بندی به دو دسته کلی تقسیم می شود: آب بندی داخلی و آب بندی خارجی.

۲.۱. آب‌بندی داخلی

- آب‌بندی داخلی به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن مواد آب‌بند کننده به مخلوط بتن افزوده می‌شوند تا نفوذپذیری آن کاهش یابد. محصولات مانند Struseal C512 و Struproof W1 از جمله موادی هستند که به عنوان آب‌بند داخلی در بتن استفاده می‌شوند. این مواد با تشکیل کریستال‌های غیرمحلول در منافذ بتن، مسیرهای نفوذ آب را مسدود می‌کنند و از ورود آب به داخل سازه جلوگیری می‌کنند.

۲.۲. آب‌بندی خارجی

- آب‌بندی خارجی به فرآیندی اشاره دارد که در آن لایه‌های محافظتی بر روی سطح بتن اعمال می‌شود تا از نفوذ آب و مواد خورنده به داخل سازه جلوگیری شود. محصولات مانند Strutop Brush و Struseal C514 برای آب‌بندی خارجی بتن استفاده می‌شوند. این مواد با ایجاد یک لایه محافظ بر روی سطح بتن، از نفوذ آب و مواد خورنده به داخل سازه جلوگیری می‌کنند و در عین حال اجازه تنفس بتن را می‌دهند تا رطوبت داخلی آن تبخیر شود.

۳. مطالعات موردی و تجربیات عملی

در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی بزرگ و مهم، استفاده از مواد افزودنی و آب‌بندی نقش حیاتی در افزایش دوام و عملکرد سازه‌های بتنی داشته است. به عنوان مثال، در ساخت سدها، تونل‌ها و پل‌های بزرگ، استفاده از ژل‌های میکروسیلیس و افزودنی‌های آب‌بند کننده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مواد نه تنها مقاومت بتن را در برابر نفوذ آب و مواد خورنده افزایش می‌دهند، بلکه باعث بهبود خواص مکانیکی و افزایش عمر مفید سازه‌ها نیز می‌شوند.

انتخاب بهترین روش مقاوم سازی بتن

مقاوم‌سازی ساختمان‌های اسکلت بتنی یک فرآیند پیچیده است که تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. انتخاب بهترین روش مقاوم‌سازی بستگی به شرایط خاص هر پروژه، نوع آسیب‌دیدگی، و اهداف مقاوم‌سازی دارد. در زیر به بررسی عوامل مؤثر در انتخاب بهترین روش مقاوم‌سازی ساختمان‌های اسکلت بتنی پرداخته می‌شود:

۱. نوع و میزان آسیب‌دیدگی

- ترک‌ها و شکستگی‌ها: اگر ساختمان دارای ترک‌ها و شکستگی‌های گسترده باشد، ممکن است نیاز به تقویت با الیاف پلیمری (FRP) یا استفاده از پوشش‌های محافظتی وجود داشته باشد.
- خوردگی آرماتورها: در صورت وجود خوردگی در آرماتورهای فولادی، استفاده از مواد ضد خوردگی و پوشش‌های حفاظتی می‌تواند مؤثر باشد.
- افت ظرفیت باربری: اگر ساختمان ظرفیت باربری کافی را از دست داده باشد، می‌توان از روش‌های افزایش مقطع یا تقویت با صفحات فولادی استفاده کرد.

۲. نوع سازه و کاربرد آن

- ساختمان‌های مسکونی: برای ساختمان‌های مسکونی که نیاز به حداقل تداخل در زندگی روزمره دارند، روش‌های غیرمخرب مانند استفاده از کامپوزیت‌های FRP مناسب‌تر هستند.
- سازه‌های صنعتی و تجاری: در این سازه‌ها، که ممکن است بارهای دینامیکی بیشتری تحمل کنند، استفاده از روش‌های تقویتی سنگین‌تری مانند جک‌های پیش‌تنیده یا افزودن ستون‌ها و تیرهای جدید ممکن است لازم باشد.

۳. شرایط محیطی

- رطوبت و خوردگی: در مناطقی که رطوبت و خطر خوردگی بالا است، استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی و رطوبت مانند مواد پلیمری و رزین‌ها توصیه می‌شود.
- زلزله: در مناطق زلزله خیز، تقویت سازه با استفاده از سیستم‌های مقاوم در برابر لرزه مانند دیوارهای برشی یا قاب‌های مقاوم لرزه‌ای ضروری است.

۴. محدودیت‌های اجرایی و مالی

- بودجه پروژه: محدودیت‌های مالی می‌تواند تأثیر زیادی بر انتخاب روش مقاوم‌سازی داشته باشد. روش‌های مقرون به صرفه مانند استفاده از مواد افزایشی ممکن است ترجیح داده شود.
- محدودیت‌های فضایی: در صورت محدودیت فضایی، روش‌های کم جا مانند استفاده از الیاف پلیمری یا افزایش مقطع داخلی ممکن است مناسب‌تر باشند.
- زمان اجرا: زمان مورد نیاز برای اجرای پروژه می‌تواند تعیین‌کننده باشد. روش‌های سریع‌الاجرا مانند استفاده از کامپوزیت‌های FRP یا مواد تزریقی ممکن است ترجیح داده شوند.

۵. اهداف مقاوم‌سازی

- افزایش ظرفیت باربری: در مواردی که هدف افزایش ظرفیت باربری سازه است، روش‌های تقویتی سنگین‌تری مانند افزودن ستون‌ها و تیرهای جدید یا استفاده از جک‌های پیش‌تنیده ممکن است مناسب باشد.
- بهبود عملکرد لرزه‌ای: در مناطقی با خطر زلزله، بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه با استفاده از دیوارهای برشی، قاب‌های مقاوم لرزه‌ای یا میراگرهای لرزه‌ای ممکن است ضروری باشد.
- افزایش دوام و عمر مفید سازه: در مواردی که هدف افزایش دوام و عمر مفید سازه است، استفاده از مواد ضد خوردگی، پوشش‌های محافظتی و روش‌های تعمیر و تقویت ترک‌ها و شکستگی‌ها مؤثر خواهد بود.

۶. نوع مصالح مورد استفاده

- بتن و فولاد: استفاده از مواد تقویتی مانند الیاف پلیمری (FRP)، صفحات فولادی، و مواد تزریقی می‌تواند به بهبود مقاومت و عملکرد سازه کمک کند.
- مواد پلیمری و رزین‌ها: در مواردی که نیاز به مقاومت در برابر خوردگی و رطوبت وجود دارد، استفاده از مواد پلیمری و رزین‌ها توصیه می‌شود.

۷. تأثیر بر ظاهر و معماری ساختمان

- حفظ ظاهر معماری: در ساختمان‌های تاریخی یا بناهای با ارزش معماری، انتخاب روش‌های مقاوم‌سازی که تأثیری بر ظاهر ساختمان نداشته باشند، مهم است. روش‌هایی مانند استفاده از کامپوزیت‌های FRP یا تقویت داخلی می‌تواند مناسب باشد.

اما در نهایت؛

مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی در برابر شرایط محیطی سخت، یک فرآیند پیچیده و حیاتی است که نیاز به بررسی دقیق و انتخاب مناسب‌ترین روش‌ها دارد. در این مقاله، تحلیل‌های گسترده‌ای از مقاومت بتن، انواع ضعف‌های رایج در سازه‌های بتنی، و نقش مواد افزودنی و تکنیک‌های آب‌بندی ارائه شد. همچنین، عوامل کلیدی در انتخاب بهترین روش‌های مقاوم‌سازی بررسی گردید.

مقاومت بتن به عنوان یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن، تأثیر زیادی بر پایداری و عمر مفید سازه‌های بتنی دارد. ضعف‌های متداولی همچون ترک خوردگی، خوردگی آرماتورها، و افت ظرفیت باربری می‌توانند منجر به کاهش عملکرد و ایمنی سازه‌ها شوند. به همین دلیل، استفاده از مواد افزودنی مانند الیاف پلیمری، رزین‌های ضد خوردگی، و تکنیک‌های آب‌بندی می‌تواند به طور مؤثری به بهبود مقاومت بتن و دوام سازه‌ها کمک کند.

انتخاب مناسب‌ترین روش مقاوم‌سازی بستگی به مجموعه‌ای از عوامل شامل نوع و میزان آسیب‌دیدگی، شرایط محیطی، محدودیت‌های اجرایی و مالی، و اهداف مقاوم‌سازی دارد. روش‌هایی مانند استفاده از کامپوزیت‌های FRP، افزایش مقاطع، و جک‌های پیش‌تنیده می‌توانند بر اساس نیازهای خاص هر پروژه به کار گرفته شوند.

در نهایت، سرمایه‌گذاری در بهبود مقاومت و دوام سازه‌های بتنی نه تنها به افزایش طول عمر سازه‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری کمک می‌کند، بلکه ایمنی و کارایی ساختمان‌ها را نیز تضمین می‌نماید. به کارگیری تکنیک‌های مناسب مقاوم‌سازی و استفاده از مواد با کیفیت بالا، نقش کلیدی در موفقیت پروژه‌های ساختمانی و عمر مفید سازه‌ها ایفا می‌کند.

منابع:

- روش‌های مقاوم‌سازی و تقویت سازه بتنی - نویسنده: مهرداد مشایخ‌فر، نشریه مجله عمران و پروژه - خرداد ۱۴۰۲
مروری بر مباحث مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی - نویسنده: فرید دائمی، دومین کنفرانس محیط زیست، عمران، معماری و شهرسازی - ۱۳۹۹
روشهای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی - نویسندگان: مجتبی اصغری سرخی، یحیی شربتی ناوان، الهام بخشیان لموکی، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور - ۱۳۸۷
ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی - نویسنده: علیرضا سرتیپی زاده، نشریه مطالعات مهندسی انتظامی - زمستان ۱۳۹۰
تقویت، ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی - نویسنده: خالد بهرام زاده، کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر و محیط زیست؛ افق‌های آینده، نگاه به گذشته - ۱۳۹۴
Pfeifer, C. (2014). Concrete Durability: A Review. *Journal of Structural Engineering*, 140(6), 04014010.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1945-541X.0000925](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1945-541X.0000925)
Neville, A. M. (2010). *Properties of Concrete*. 5th Edition. Pearson Education
ACI Committee 518. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute
Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th Edition. McGraw-Hill Education
BS 8110-1. (1997). *Structural Use of Concrete - Part 1: Code of Practice for Design and Construction*. British Standards Institution
Khan, M. N., & Rizvi, S. M. A. (2006). *Concrete Technology*. 2nd Edition. McGraw-Hill
European Committee for Standardization (CEN). (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Standard
Siddique, R., & Klaus, J. (2011). *Sustainable Construction Materials: Concrete*. Springer
Berrocal, J. M., & Torrenti, J. M. (2011). *Advanced Concrete Technology*. Elsevier
Hewlett, P. C., & Liska, J. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4th Edition. Butterworth-Heinemann
Ramsay, J. D. (2000). *Concrete Repair and Rehabilitation*. CRC Press
Papadakis, V. G., & Vayenas, C. G. (2002). *Hydration, Setting, and Durability of Cementitious Materials*. Springer
American Concrete Institute (ACI). (2005). *Guide for the Repair of Concrete*. ACI 546R-05
El-Dakhkhni, W., & El-Khalil, E. (2015). *Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers*. Springer
Teng, J. G., & Yu, T. (2009). *FRP Strengthened Concrete Structures*. Wiley

ویراستار و همکار تحقیقاتی: ایلیا هادی نژاد
این مقاله توسط واحد تحقیق و توسعه شرکت بسپار بتن ایرانیان هوشمند (استرامیکس) بررسی و تأیید علمی شده است.