Civil and Project Journal, ۲۰۲۳, ۵(۴), ۱۱-۲۷
https://doi.org/۱۰.۲۲۰۳۴/cpj.۲۰۲۳.۴۰۴۴۲۶.۱۲۱۰

Civil and Project Journal
http://www.cpjournals.com/

Research Article

Investigation on the Bond Behavior Between GFRP Bar and Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete with Pull-out Test

Ehsan Mohsenian Fard[۱], Meysam Memar*[۲], Davood Ghaedian[۳]

۱. M.Sc. Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Zand Institute of Higher Education Shiraz, Shiraz, Iran
۲. Ph.D., Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Zand Institute of Higher Education Shiraz, Shiraz, Iran
۳. Ph.D., Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Eqlid Branch, Islamic Azad University, Eqlid, Iran

Received: ۳۰ April ۲۰۲۳; Revised۰۷ June ۲۰۲۳; Accepted: ۱۸ June ۲۰۲۳; Published: ۲۲ June ۲۰۲۳

Abstract

Concrete and rebars should have a good bond behavior so that there is no slip between rebars and concrete under the service loads. On the other hand, one of the major disadvantages of steel bars is their vulnerability to corrosion. Covering bars as a solution is also costly and cannot be implemented in all projects. So one of the most suitable alternative methods is the use of GFRP bars. Other ways to compensate for the weakness of the concrete tensile strength as well as its low ductility are the use of different fibers. Concrete with polypropylene fibers is highly ductiled compared to conventional concrete and is completely scattered in concrete and creates isotropetic conditions and can prevent cracks. Therefore, in this study, the effect of polypropylene fibers on concrete compressive strength and bonding strength between concrete and GFRP rebar was investigated experimentally. For this purpose, the amount of this type of fiber is selected ۰.۱۵, ۰.۳۰ and ۰.۴۵ % volume of concrete, and ۱۵cm cubic concrete samples were made in three types of ۳۵۰, ۴۰۰ and ۴۵۰ grade and were cured at ۷- and ۲۸-day ages. In this study, the rebar diameter of GFRP was chosen ۸ mm and rebars were embedded inside the concrete in a length five times the rebar diameter, and ۲۸-day concrete samples were tested through pull-out and compressive resistance tests. Finally, the compressive strength of the samples and the force-time curves from the pull-out test were assessed. Average compressive strength values, slump values, maximum force and other important parameters were discussed. The results showed that the bond resistance between the polypropylene fiber-reinforced concrete and GFRP rebar increased with the increase in the amount of fibers. Adding fibers also has a relatively good effect on enhancement of the compressive strength of the concrete.

Keywords:

Pull-out test, Bonding, Polypropylene fiber, GFRP rebar

Cite this article as: Mohsenian Fard, E., Memar, M., & Ghaedian, D. (۲۰۲۳). Investigation on the Bond Behavior Between GFRP Bar and Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete with Pull-out Test. Civil and Project, ۵(۴), ۱۱-۲۷. doi: ۱۰.۲۲۰۳۴/cpj.۲۰۲۳.۴۰۴۴۲۶.۱۲۱۰

ISSN: ۲۶۷۶-۵۱۱X / **Copyright:** © ۲۰۲۳ by the author.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution ۴.۰ International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/٤.٠/

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: *maysam.memar@gmail.com*

نشریه عمران و پروژه، ۱۴۰۲، ۵(۴)، ۲۷-۱۱
https://doi.org/۱۰.۲۲۰۳۴/cpj.۲۰۲۳.۴۰۴۴۲۶.۱۲۱۰

نشریه عمران و پروژه
http://www.cpjournals.com/

بررسی رفتار پیوستگی بین میلگرد GFRP و بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با استفاده از آزمایش بیرون‌کشیدگی

احسان محسنیان‌فرد[۱]، میثم معمار[۲*]، داوود قائدیان[۳]

۱. دانشجو کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، مؤسسه آموزش عالی زند شیراز، شیراز، ایران

۲. دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، مؤسسه آموزش عالی زند شیراز، زند، ایران

۳.دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید، اقلید، ایران

تاریخ دریافت: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ خرداد ۱۴۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۲۸ خرداد ۱۴۰۲؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ تیر۱۴۰۲

چکیده

بتن و میلگرد بایستی دارای پیوستگی مناسبی باشند تا تحت بارهای بهره‌برداری هیچ‌گونه لغزشی بین میلگرد و بتن به وجود نیاید. از طرف دیگر یکی از معایب عمده میلگردهای فولادی، آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر عوامل خورنده است. پوشش دادن میلگردها نیز به عنوان یک راه‌حل، پرهزینه بوده و در تمام پروژه‌ها قابل اجرا نیست. لذا یکی از مناسب‌ترین روش‌های جایگزین، استفاده از میلگردهای GFRP است. همچنین از دیگر راه‌های جبران ضعف در مقاومت کششی بتن و همچنین شکل‌پذیری کم و تردی زیاد آن، استفاده از الیاف‌های مختلف است. بتن با الیاف پلی‌پروپیلن دارای شکل‌پذیری بسیار زیاد و تردی کم نسبت به بتن معمولی است و به طور کامل در بتن پراکنده شده و شرایط ایزوتروپتری به وجود می‌آورد و می‌تواند از ایجاد ترک‌ها جلوگیری نماید. لذا در این پژوهش، تأثیر میزان الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری بتن و مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از این نوع الیاف به میزان ۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن استفاده و نمونه‌های بتنی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری در سه نوع عیار ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ ساخته و در سنین ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری صورت گرفت. در این تحقیق از میلگردهای GFRP به قطر ۸ میلی‌متر و با فرورفتگی معادل ۵ برابر قطر میلگرد (۴۰ میلی‌متر) در بتن استفاده شد و نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه تحت آزمایش کشش میلگرد (آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن) و آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. نهایتاً به بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده و منحنی‌های نیرو-زمان حاصل از تست بیرون‌کشیدگی مستقیم پرداخته شد. مقادیر مقاومت فشاری میانگین، اسلامپ و نیروی ماکزیمم و سایر پارامترهای مهم برای حالات مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت پیوستگی بین بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و میلگرد GFRP با افزایش میزان الیاف افزایش می‌یابد. همچنین افزودن الیاف تأثیر نسبتاً مناسبی در افزایش مقاومت فشاری بتن دارد.

کلمات کلیدی

الیاف پلی‌پروپیلن، رفتار پیوستگی، آزمایش بیرونکشیدگی، میلگرد GFRP

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: *maysam.memar@gmail.com*

۱. مقدمه

اساس عملکرد مرکب بتن و فولاد و تشکیل یک عضو بتن آرمه، بر پیوستگی کامل بین میلگرد مسلح کننده و بتن استوار است. ایفای نقش عضو کششی توسط میلگردهای فولادی و جبران ضعف مقاومت بتن تحت کشش، فقط در صورتی امکان‌پذیر است که پیوستگی کامل بین بتن و فولاد وجود داشته و امکان انتقال تنش‌های کششی بین دو ترک متوالی از بتن به فولاد برقرار باشد. میلگردها باید در طولی فراتر از نقطه‌ای که بارگذاری سبب حداکثر کشش می‌گردد به اندازه کافی جهت ایجاد ظرفیت کششی آن‌ها ادامه یابند یا به طور مناسب مهار گردند. تنش برشی بین میلگرد و بتن را که سبب انتقال نیرو از بتن به میلگرد می‌شود، تنش چسبندگی می‌گویند. این عملکرد به خصوص در ناحیه کششی بتن، که در آنجا بتن قادر به تحمل کشش نمی‌باشد بسیار مهم است. عدم وجود چسبندگی سبب لغزش میلگرد در بتن شده و میلگرد نقش تقویتی را از دست خواهد داد. به همین دلیل ضوابط آیین نامه های طراحی سازه های بتنی در دهه‌های اخیر، پیوستگی بین بتن و میلگرد را از عوامل مهم عملکرد صحیح سازه‌های بتن بیان می‌کنند (ACI ۴۰۸R-۰۳, ۲۰۰۳). از عوامل مؤثر بر پیوستگی می‌توان به چسبندگی شیمیایی بین فولاد و بتن، اصطکاک بین سطح میلگرد و بتن اطراف، درگیر شدن برآمدگی های میلگرد آجدار در بتن و مهار مکانیکی در انتهای میلگرد نام برد (Ehsani et al., ۱۹۹۵; Larralde & Silva-Rodriguez, ۱۹۹۳; Malvar, ۱۹۹۵; Nanni, ۱۹۹۵).

میلگردهای فولادی در بتن مسلح شده، علاوه بر تحمل بارهای کششی، تحمل تنشها و بارهای برشی را نیز به عهده دارند. یکی از معایب عمده میلگردهای فولادی، آسیب پذیری آنها در برابر عوامل خورنده است. پوشش دادن میلگردها نیز به عنوان یک راه حل پرهزینه است و در تمام پروژه‌ها قابل اجرا نیست.یکی از بهترین روش‌های جایگزین، استفاده از میلگردهای GFRP[۱] است. GFRP در واقع نوعیFRP است که فیبرهای آناز جنس شیشه است. GFRP علاوه بر تأمین ویژگیهای مورد انتظار فولاد، در مقابل عوامل خورنده نیز مقاوم است. علاوه بر این می‌توان به مزایای دیگر از جمله وزن کم و استحکام بالای آن نسبت به میلگرد فولادی معمولی، عدم قابلیت هدایت الکتریسیته و حرارت، مقاومت در برابر یونهای کلرید و سایر مواد شیمیایی و سهولت در فرایند نصب میلگردها اشاره نمود (Focacci et al., ۲۰۰۰; Greco et al., ۱۹۹۸). یکی دیگر از راههای جبران ضعف در مقاومت کششی بتن و همچنین شکل پذیری کم و تردی زیاد آن استفاده از الیاف‌های مختلف و یا مواد نانو است که ایده آن به هزاران سال پیش مانند استفاده از کاه‌گل در دوران مصر باستان بر می‌گردد. بتن با الیاف پلی‌پروپیلن[۲] دارای شکل پذیری بسیار زیاد و تردی کم نسبت به بتن معمولی است و نسبت به آن به راحتی خرد نمی‌شود. همچنین مزیت دیگر این الیافها این است که به طور کامل در بتن پراکنده و شرایط ایزوتروپتری به وجود می‌آورند و می‌توانند از ایجاد ترک‌ها جلوگیری نمایند (Brown et al.).

به منظور بررسی میزان مقاومت چسبندگی میلگرد با بتن، یکی از سریعترین و ساده‌ترین آزمایش‌ها، آزمایش بیرون‌کشیدگی (Pull-Out)، است (Chaallal & Benmokrane۱۹۹۳). گسیختگی چسبندگی میان فولاد و بتن معمولاً به وسیله دو مود به نامهای گسیختگی بیرون‌کشیدگی و گسیختگی دو نیم شدن و شکافتن شناسایی و مشخص می‌شود (ACI ۴۰۸, ۱۹۷۹; Eligehausen et al., ۱۹۸۲; Hawkins, ۱۹۹۹; Zuo & Darwin, ۲۰۰۰).

موسوی خطیر و دهستانی (۱۳۹۳) به بررسی آزمایشگاهی مقاومت چسبندگی میان بتن خود متراکم و میلگرد GFRP با قطرهای مختلف با استفاده از آزمایش بیرون‌کشیدگی پرداختند. برای این منظور، آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد GFRP برروی ۱۲ نمونه استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلیمتر با دو طرح اختلاط در آزمایشگاه صورت گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که

[۱] Glass Fiber Reinforced Polymer
[۲] polypropylene

مقاومت چسبندگی میلگردهای GFRP و بتن خود متراکم کمتر از مقاومت چسبندگی میلگردهای فولادی با بتن خود متراکم بود. همچنین ملاحظه گردید که با افزایش قطر میلگرد، از مقاومت چسبندگی میان بتن خود متراکم و میلگردهای GFRP کاسته می‌شود (Mousavi Khatir & Dehestani, ۱۳۹۳). گازُویکوا[۱] و همکاران (۲۰۱۸)، رفتار چسبندگی بین بتن و میلگرد GFRP را با استفاده از آزمایش بیرون‌کشیدگی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور آزمایش بیرون‌کشیدگی برروی پنج نمونه مکعبی ۲۸ روزه بتنی حاوی یک نوع میلگرد GFRP از نوع آجدار انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت چسبندگی بین بتن و میلگرد GFRP بستگی به مقاومت برشی بین لایه‌های بتن اطراف میلگرد و نیز تغییرشکل‌های میلگرد دارد. همچنین ملاحظه گردید که در نمونه‌های بتنی با سن کمتر، محصور شدگی کافی و مناسب میلگرد به علت پدیده انقباض فراهم نشد و همین موضوع سبب تشکیل سطح گسیختگی بین بتن و میلگرد GFRP و در نتیجه کاهش شدید مقاومت چسبندگی گردید (Gažovičová et al., ۲۰۱۸). وی[۲] و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی آزمایشگاهی و عددی عملکرد پیوستگی بین بتن و میلگردهای FRP با استفاده از ۴۸ آزمایش بیرون‌کشیدگی پرداختند. در این بررسی تأثیرات قطر، نوع و سطح میلگردهای FRP در نظر گرفته شدند. همچنین دو نوع مود گسیختگی شامل مود بیرون‌کشیدگی و مود شکاف مشاهده گردید (Wei et al., ۲۰۱۹).

محبی و همکاران (۲۰۱۹) اثرات الیاف پلی‌پروپیلن بر عملکرد پیوستگی بین میلگردهای فولادی در بتن با مقاومت بالا را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. در این مطالعه هشت نمونه تیر تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای و ۱۲ نمونه مکعبی تحت آزمایش بیرون‌کشیدگی قرار گرفتند. همچنین نسبت‌های مختلف الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن) در طرح اختلاط بتن به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی الیاف دارای تعداد ترک‌های بیش‌تر، تغییرشکل و بار گسیختگی بیش‌تر و عرض ترک بزرگ‌تر در مرحله گسیختگی بودند. همچنین با مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای و آزمایش بیرون‌کشیدگی، ملاحظه گردید که آزمایش بیرون‌کشیدگی ارزیابی مناسبی از تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت پیوستگی ارائه نمی‌دهد (Mohebi et al., ۲۰۱۹).

موسوی خطیر و دهستانی (۱۳۹۶) به بررسی آزمایشگاهی مقاومت چسبندگی بین بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و میلگرد GFRP با قطرهای مختلف با استفاده از آزمایش بیرون‌کشیدگی پرداختند. برای این منظور آزمایش بیرون‌کشیدگی برروی چهار نمونه استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که مقاومت چسبندگی نمونه‌های حاوی میلگردهای GFRP و بتن الیافی بیش‌تر از مقاومت چسبندگی نمونه‌های حاوی میلگرد فولادی با بتن معمولی بود. همچنین مشاهده گردید که با افزایش قطر میلگرد GFRP، مقاومت چسبندگی میان بتن الیافی و میلگردهای GFRP، ۲۵ درصد کاهش می‌یابد (Mousavi Khatir & Dehestani, ۱۳۹۶). رولاند[۳] و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی آزمایشگاهی رفتار پیوستگی بین بتن و میلگردهای FRP پرداختند. در این مطالعه آزمایش بیرون‌کشیدگی برروی سه نوع میلگرد FRP از جنس کربن، شیشه و آرامید و همچنین میلگردهای فولادی آجدار انجام شد. در این مطالعه تأثیر عوامل مختلفی از قبیل نوع الیاف میلگردها، قطر میلگردهای FRP و نیز نوع سطح میلگردها (آج‌دار یا ساده) بر رفتار پیوستگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مشخصات پوشش شن و ماسه نقش مهمی در مکانیزم انتقال بار در سطح تماس با میلگردها، مقاومت پیوستگی و تنش حداکثر دارند. همچنین مشاهده گردید که در قطرهای یکسان میلگرد، نمونه‌های دارای میلگرد GFRP تا حدودی مقاومت پیوستگی بالاتری نسبت به میلگردهای فولادی آج‌دار از خود نشان دادند (Rolland et al., ۲۰۱۸). هانگ[۴] و همکاران (۲۰۲۰)

[۱] Gazovicova
[۲] Wei
[۳] Rolland
[۴] Huang

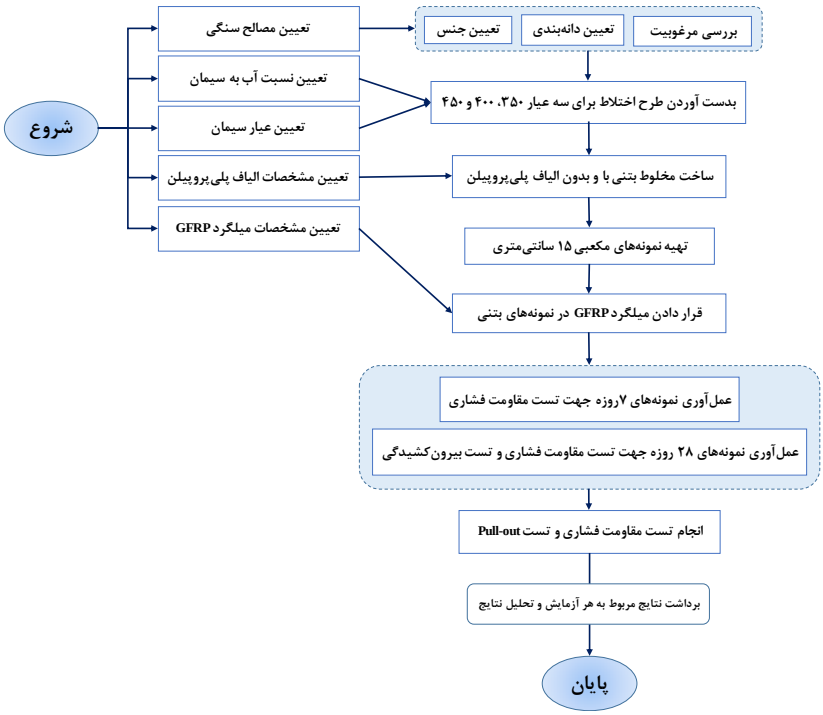
به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات پیوستگی بین میلگردهای GFRP با بتن حاوی الیاف ترکیبی[۱] (شامل الیاف کربن، پلی‌پروپیلن و آرامید) پرداختند. همچنین در این مطالعه تأثیر عواملی از قبیل میزان الیاف ترکیبی به کار رفته، قطر میلگرد، طول مهارشدگی و نوع سطح میلگرد مورد بررسی قرار گرفت.در مجموع ۴۸ نمونه، شامل ۳۶ نمونه HFRC با میلگردهای GFRP و ۱۲ نمونه بتن معمولی با میلگردهای GFRP ساخته و مورد آزمایش بیرون‌کشیدگی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که رفتار پیوستگی بین میلگردهایGFRP و HFRC به علت تأثیر ترکیبی الیاف کربن، پلی‌پروپیلن و آرامید به طور قابل توجهی بهبود یافت. همچنین یک مدل پیوستگی-لغزش برای میلگردهای GFRP مهار شده در بتن HFRC و بتن معمولی پیشنهاد شد که دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی بود (Huang et al., ۲۰۲۰).

پس از بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت فشاری بتن و پیوستگی انواع بتن‌های اصلاح شده با انواع میلگردها مشاهده شد که تا کنون بررسی جامع و کاملی بر روی تأثیر همزمان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و تأثیرات میزان این الیاف برتنش پیوستگی بتن و میلگرد GFRP مورد بررسی قرار نگرفته است. علت انتخاب میلگردهای GFRP جهت کم شدن آسیب‌پذیری بتن آرمه در برابر مواد خورنده و علت انتخاب الیاف پلی‌پروپیلن نیز بیشتر شدن شکل پذیری مخلوط بتنی است. برای این منظور در این پژوهش تلاش بر این است تا اثرات استفاده از پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری بتن و مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد GFRP با استفاده از آزمایش‌های کشش میلگرد (آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن) و مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گیرند.

۲. روش تحقیق

در این مقاله با استفاده از روش آزمایشگاهی و مطابق با روندنمای شکل ۱، تأثیر میزان الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری بتن و مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد GFRP مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور در این مقاله سعی شده است تا اثرات استفاده از پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری بتن و مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد GFRP مورد بررسی قرار گیرد. لذا از این الیاف به مقدار ۰/۱۵، ۰/۳۰و ۰/۴۵ درصدهای حجمی بتن و در سه عیار ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ و از میلگردهای GFRP با قطر ۸ میلی‌متر و با فرورفتگی معادل ۵ برابر قطر میلگرد (۴۰ میلی‌متر) در بتن استفاده شده است و نمونه‌های بتنی مکعبی ساخته شده در سن ۲۸ روزه تحت آزمایش بیرون‌کشیدگی و آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند.

[۱] hybrid fiber-reinforced concrete (HFRC)



شکل۱ : روندنما پژوهش حاضر.

۱.۲. مواد و مصالح مصرفی

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از سنگ‌شکن ۷۰۰۰ واقع در کیلومتر ۱۰ محور جهرم-لار تهیه گردید و دانه‌بندی این مصالح به روش شست‌وشو براساس استاندارد ASTM C۱۳۶ انجام شد. علاوه‌براین دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه نیز طبق استاندارد ASTM C۳۳ بود. هدف از این دانه‌بندی دست‌یابی به یک مخلوط بتنی با دانه‌بندی پیوسته، متراکم و با کمترین فضای خالی بوده است. طبق ACI مدول نرمی ماسه بین ۲/۳ تا ۳/۱ قرار داشت و برای اندازه‌گیری آن از الک‌های استاندارد ذکر شده در ASTM C۱۳۶ استفاده گردید. نسبت اختلاط مصالح سنگی درشت‌دانه در طرح به صورت ۲۰ درصد شن درشت و ۸۰ درصد شن ریز است.

سیمان مورد استفاده جهت تهیه بتن از نوع سیمان تیپ دو فیروزآباد است. این سیمان کاملا سالم بوده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن با مشخصات مندرج در استانداردهای ASTM C۱۵۰ (سیمان‌های پرتلند معمولی) و ASTM C۵۹۵ (سیمان‌های آمیخته پوزولانی) منطبق است.

طبق آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، برای ساخت بتن باید از آب تمیز و صاف استفاده کرد و کاربرد آب‌هایی که دارای مقدار غیرمجازی از مواد قابل آسیب به بتن یا میلگرد مانند روغن‌ها، املاح‌ها، مواد آلی، اسیدها و بازها هستند مجاز نمی‌باشد. طبق آبا، PH آب مورد استفاده برای تهیه بتن باید بین ۵ تا ۸/۵ باشد.

الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده جهت بهبود خواص بتن و همچنین تسلیح بتن از شرکت شیمی ساختمان و با نام فرکوفایبر P.P[۱] تهیه گردیده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. مشخصات این الیاف نیز در جدول ۱ ذکر گردیده است. الیاف

[۱] FARCO FIBER P.P (Polypropylene)

پلی‌پروپیلن جهت تهیه نمونه‌های بتنی در سه میزان ۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصدهای حجمی بتن مطابق مرجع (Mohebi et al., ۲۰۱۹) است.

شکل۲ : الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی در بتن.

جدول۱. مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی در بتن

نام الیاف	شکل الیاف	طول الیاف l (mm)	قطر الیاف d (mm)	نسبت ابعادی (l/d)	چگالی (Kg/cm^3)	مقاومت کششی (N/mm^2)
پلی‌پروپیلن (P.P)	مستقیم	۱۲	۰/۰۲۲	۵۴۵	۰/۹۱	۳۵۰

میلگرد GFRP مورد استفاده در بتن از شرکت شاهکار فکر توانا تهیه گردیده است که مشخصات آن براساس استاندارد ASTM D۷۲۰۵ در جدول ۲ ذکر گردیده است. میلگردهای GFRP با قطر ۸ میلی‌متر و با فرورفتگی معادل ۵ برابر قطر میلگرد (۴۰ میلی‌متر) استفاده شدند. تصویر این میلگردها در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل۳ : تصویر میلگرد GFRP مورد استفاده در آزمایش بیرون‌کشیدگی.

جدول۲. مشخصات میلگرد GFRP مورد استفاده در آزمایش بیرون‌کشیدگی

قطر میلگرد (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
۸	۱۳۸۵	-
۸	۱۱۱۷	-
۱۰	۱۱۵۷	۴۴۸۰۰
۱۰	-	۴۶۹۰۰
۱۲	۱۳۱۶	-
۱۲	۱۲۹۹	-
۱۴	۹۶۸	۳۹۴۰۰
۱۴	۸۶۲	۴۱۸۰۰

۲.۲. طرح اختلاط

هدف از ارائه طرح اختلاط بتن تعیین نسبت اجزای بتن است به نحوی که بتن تولید شده تا حد امکان مقرون به صرفه باشد و الزامات مورد نیاز را تامین کند. طرح اختلاط مورد استفاده جهت تهیه بتن در سه عیار مختلف ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ در جدول ۳ ارائه گردیده است. این طرح اختلاط‌ها براساس روش طرح اختلاط استاندارد ACI-۲۱۱ ارائه گردیده است.

جدول۳. طرح اختلاط‌های مورد استفاده در سه عیار ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰

نام مصالح	وزن و مقدار مصالح مورد استفاده براساس عیار سیمان		
	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰
شن درشت (kg)	۱۶۰	۱۶۰	۱۵۵
شن ریز (kg)	۶۴۵	۶۳۰	۶۱۵
ماسه شسته (kg)	۹۷۵	۹۵۵	۹۳۰
سیمان (kg)	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰
آب(lit)	۱۹۵	۱۹۵	۱۹۵

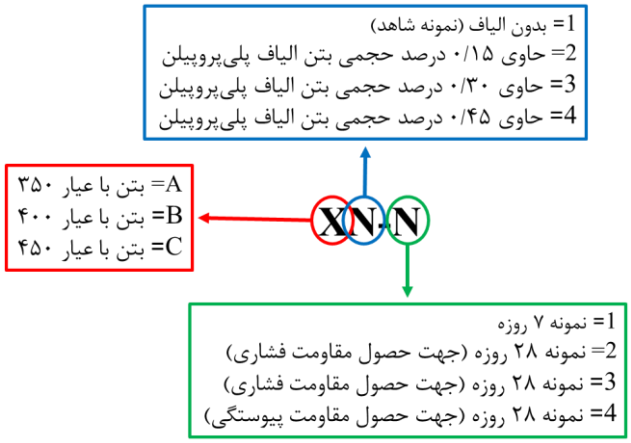
۳.۲. روش ساخت نمونه‌های آزمایش و نام‌گذاری آن‌ها

جهت ساخت مخلوط‌های بتنی و بررسی تأثیر میلگرد GFRP و الیاف پلی‌پروپیلن، دو نوع مخلوط بتنی شامل مخلوط شاهد و مخلوط تقویت شده در سه عیار مختلف (۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰) با استفاده از میکسر دستی تهیه گردید. مخلوط‌های تقویت شده خود شامل درصدهای حجمی متفاوتی از الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن) بودند. در گام بعدی با استفاده از مخلوط‌های تهیه شده، نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شدند.

جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ذکر شده از قالب‌های مکعبی ۱۵×۱۵× ۱۵سانتی‌متری که براساس استاندارد BS هستند و از قبل درون آن کاملا به روغن آغشته شده استفاده شد. جهت ساخت نمونه‌ها، طبق استاندارد BS، مخلوط بتنی در سه لایه ریخته شده و هر لایه با استفاده از میله تراکم و اعمال ۳۵ ضربه متراکم گردید سپس سطح بتن با استفاده از کاردک صاف و میلگرد GFRP به قطر ۸ میلی‌متر به صورت کاملا عمود به داخل نمونه وارد شده و نهایتا نمونه به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوای آزاد قرار گرفته است. پس از این زمان نمونه‌ها از قالب خارج گردید و به حوضچه عمل‌آوری منتقل شد. براساس استاندارد دمای حوضچه عمل‌آوری باید □۲±۲۰+ باشد. تصویر نهایی نمونه‌های تهیه شده در شکل ۴ نشان داده شده است. برای هر یک از نمونه‌های مخلوط بتنی یک نمونه ۷ روزه و سه نمونه ۲۸ روزه تهیه گردید. از میان نمونه‌های ۲۸ روزه، یک نمونه جهت بدست آوردن مقاومت پیوستگی و دو نمونه جهت بدست آوردن مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفت.

شکل۴ : تصویر نهایی نمونه‌های تهیه شده با میلگرد GFRP.

جهت نام‌گذاری نمونه‌های تهیه شده از یک حرف لاتین و دو عدد که به صورت XN-N نشان داده می‌شود، استفاده شد. حرف لاتین نشان دهنده عیار سیمان، عدد اول میزان الیاف به کار برده شده و عدد دوم عمر نمونه را نشان می‌دهد. شیوه نام‌گذاری نمونه‌ها در شکل ۵ با شرح کامل قابل مشاهده است.



شکل۵ : شیوه نام‌گذاری نمونه‌های آزمایش.

۴.۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

اولین آزمایش انجام شده بر روی هر یک از مخلوط‌های تهیه شده و پیش از ساخت نمونه‌های مکعبی، آزمایش اسلامپ است که طبق استاندارد ASTM C۱۴۳ (ASTM, ۲۰۲۰) جهت تعیین کارایی و روانی بتن انجام می‌شود.

آزمایش بررسی مقاومت فشاری نیز یکی از رایج‌ترین آزمایشات در ارتباط با بتن سخت‌شده است که طبق استاندارد BS، برای انجام این آزمایش حداقل دو نمونه با شماره‌های انتهایی ۲ و ۳ در نام‌گذاری و با عمر ۲۸ روزه تهیه گردیده است و متوسط نتیجه این دو نمونه به عنوان مقاومت فشاری معرفی می‌گردد. در این پژوهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز با استفاده از دستگاه بارگذاری هیدرولیکی از نوع دیجیتال تمام اتومات با نرخ بارگذاری در محدوده MPa/s (N/mm۲.s) ۰.۶±۰.۲ (شکل ۶) و طبق BS EN ۱۲۳۹۰-۳:۲۰۰۹ (Institutes & EN, ۲۰۰۹) انجام شد.

شکل۶ : دستگاه آزمایش مقاومت فشاری مورد استفاده.

آزمایش بیرون‌کشیدگی به روش مستقیم (Pull-Out) یکی از رایج‌ترین و کم هزینه‌ترین آزمایشات جهت بررسی مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد و مقایسه حالات مختلف می‌باشد. نمونه‌ی مورد استفاده در این آزمایش همان نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر و عمر ۲۸ روزه است که در این پژوهش با شماره انتهایی ۴ در نام‌گذاری مشخص شده هستند. دستگاه مورد نیاز برای انجام این آزمایش دستگاه کشش بوده که شامل دو فک در بالا و پایین می‌باشد و نمونه بتنی در بین این دو

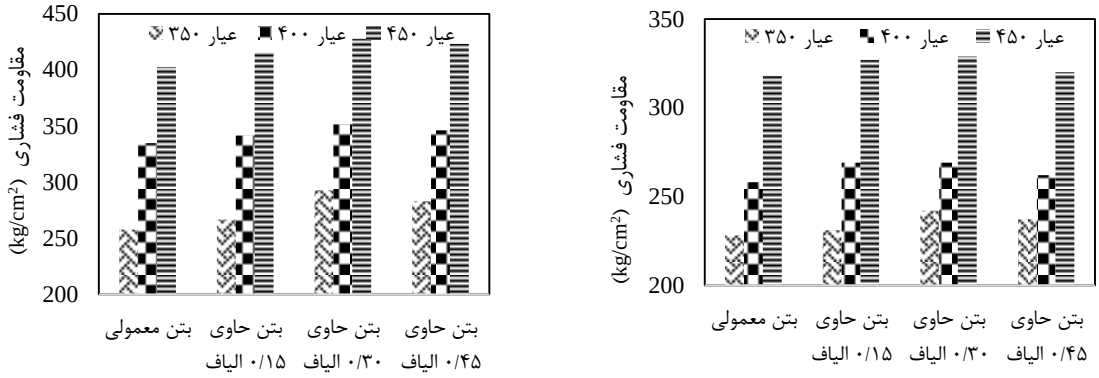
فک و در درون قالب مخصوص (تهیه شده با ورق‌های فلزی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر) قرار داده می‌شود. در قسمت بالای این قالب شیاری وجود دارد که میلگرد موجود در نمونه در آن ناحیه قرار می‌گیرد و توسط فک‌های بالا با سرعت و نیروی مشخص کشیده شده و نهایتا مقاومت پیوستگی بین میلگرد GFRP و بتن بدست می‌آید. شکل ۷ تصویر دستگاه آزمایش و جزئیات آن را نشان می‌دهد.

شکل۷ : دستگاه آزمایش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن مورد استفاده و جرئیات آن.

۳. بحث و نتایج

۱.۳. بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها

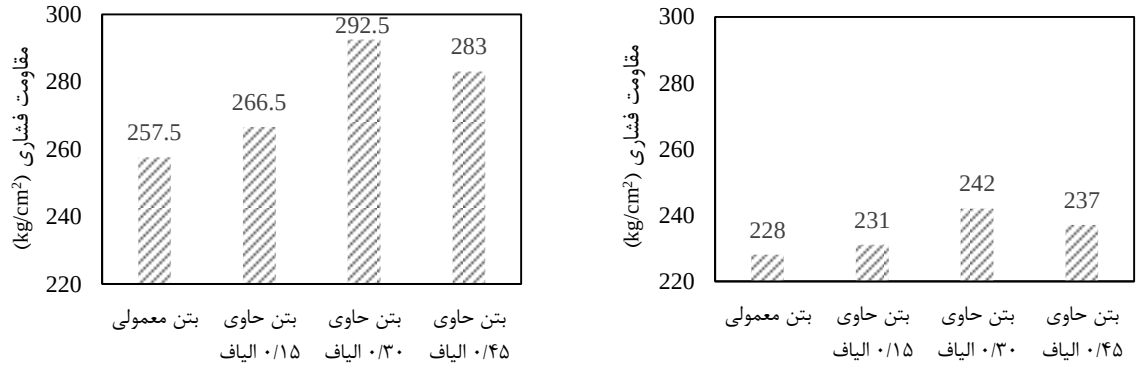
نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های حاصل با عمر ۷ و ۲۸ روزه با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن در نمودارهای شکل ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است. همچنین طبق نتایج حاصل از اسلامپ، استفاده از الیاف سبب کاهش میزان اسلامپ بتن در کلیه عیارها به میزان یک الی ۴ سانتی‌متر شده است. براساس نمودارهای شکل ۸، با افزایش عیار سیمان میزان مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های متناظر با یکدیگر در سنین ۷ و ۲۸ روزه افزایش یافته است. افزایش عیار سیمان به معنی افزایش میزان سیمان به کار رفته در ماده بتن با نسبت ثابت سنگ‌دانه‌ها و آب است. به همین دلیل است که افزایش عیار سیمان سبب افزایش چسبندگی و در نهایت افزایش مقاومت فشاری بتن حاصله می‌شود که نتیجه‌ای کاملا منطقی است.



(الف) نمونه‌های بتنی ۷ روزه **(ب) نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه**

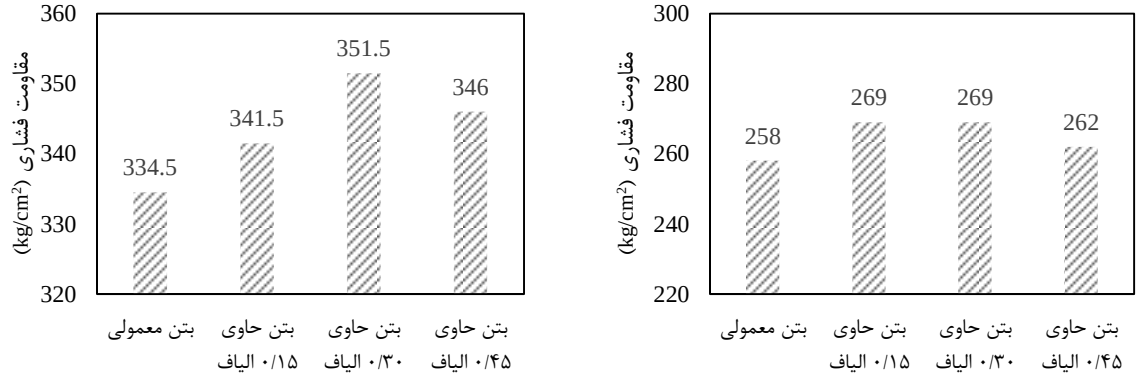
شکل۸ : مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیارهای مختلف، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.

نمودارهای شکل ۹ تا ۱۱ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۷ و ۲۸ روزه با عیارهای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ را نشان می‌دهد. طبق شکل ۹، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن در نمونه‌های با عیار ۳۵۰، در عمر ۷ روزه به ترتیب سبب افزایش ۱/۳۲، ۶/۱۴ و ۳/۹۵ درصدی و در عمر ۲۸ روزه به ترتیب سبب افزایش ۳/۵۰، ۱۳/۶۰ و ۹/۹۰ درصدی مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن معمولی می‌شود. مشخص است که هر چه مدت زمان عمل‌آوری بتن بیش‌تر باشد، بتن به مقاومت فشاری مطلوب خود نزدیک‌تر می‌شود؛ به خاطر همین موضوع است که در نمونه‌های با سن ۲۸ روزه میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه‌های متناظر در سن ۷ روزه بیش‌تر است. همچنین طبق شکل ۱۰، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن در نمونه‌های با عیار ۴۰۰، در عمر ۷ روزه به ترتیب سبب افزایش ۴/۲۶، ۴/۲۶ و ۱/۵۵ درصدی و در عمر ۲۸ روزه به ترتیب سبب افزایش ۲/۰۹، ۵/۰۸ و ۳/۴۴ درصدی مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن معمولی می‌شود. همچنین طبق شکل ۱۱، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن در نمونه‌های با عیار ۴۵۰، در عمر ۷ روزه به ترتیب سبب افزایش ۲/۸۳، ۳/۴۶ و ۰/۶۳ درصدی و در عمر ۲۸ روزه به ترتیب سبب افزایش ۲/۹۸، ۶/۲۱ و ۵/۰۹ درصدی مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن معمولی می‌شود.



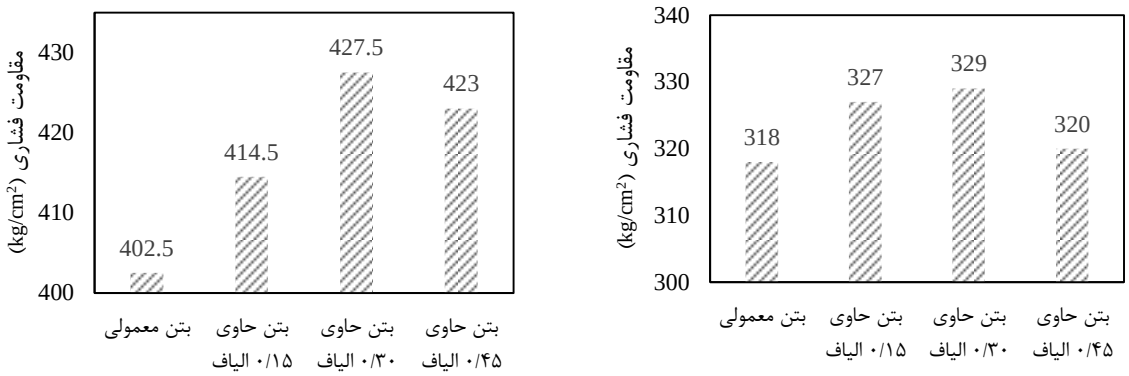
(الف) نمونه‌های بتنی ۷ روزه **(ب) نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه**

شکل۹ : مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۳۵۰، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.



(الف) نمونه‌های بتنی ۷ روزه **(ب) نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه**

شکل۱۰ : مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.



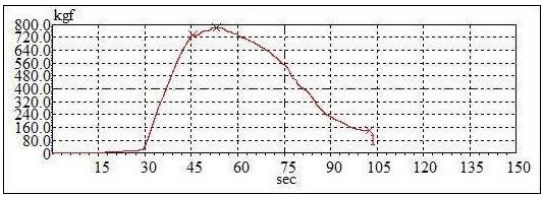
(الف) نمونه‌های بتنی ۷ روزه **(ب) نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه**

شکل۱۱ : مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۵۰، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.

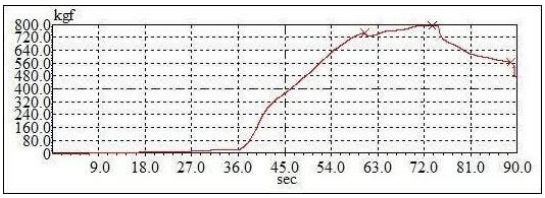
نتیجه قابل توجهی که از بررسی نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده می‌گردد این است که، با افزایش مقدار الیاف تا یک حد مشخصی، مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش می‌یابد به گونه‌ای که نمونه‌های حاوی الیاف ۰/۳۰ درصد حجمی بتن بیشترین مقاومت فشاری را در بین مابقی نمونه‌ها از خود نشان داده‌اند، به طوری که با افزایش میزان الیاف به مقدار ۰/۴۵ درصد حجمی بتن، مقاومت فشاری کاهش یافته است؛ با این حال مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف ۰/۴۵ درصد حجمی بتن همچنان مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه بتنی معمولی (فاقد الیاف) از خود نشان داده‌اند. لذا می‌توان مقدار الیاف به میزان ۰/۳۰ درصد حجمی بتن را به عنوان درصد بهینه الیاف پلی‌پروپیلن جهت افزودن به بتن برای دستیابی به مقاومت فشاری بهینه پیشنهاد نمود. علت این اتفاق این است که کاربرد الیاف سبب درگیری بهتر مواد داخل بتن می‌شود یا به عبارت دیگر سبب افزایش استحکام و پیوستگی در بتن می‌شود. لذا با افزایش درصد حجمی بتن تا میزان ۰/۳ درصد حجمی، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. اما از طرف دیگر کاربرد بیش از اندازه از الیاف (تا ۰/۴۵ درصد حجمی بتن) کاهش مقاومت فشاری بتن را در پی دارد که ممکن است به دو دلیل رخ دهد: الف) عدم پخش یکنواخت و همگن الیاف در بتن، ب) پر شدن فضاهایی در ماتریس بتن که حالا با الیاف پر شده و در لحظه شکست ممکن است شکست از آن‌جا ایجاد شود.

۲.۳. بررسی مقاومت پیوستگی نمونه‌ها

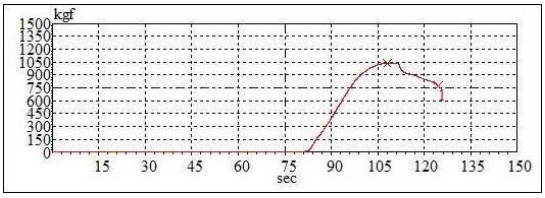
نتایج آزمون‌های بیرون‌کشیدگی توسط رایانه متصل به دستگاه، به صورت منحنی‌های نیرو-زمان مطابق شکل ۱۲ تا ۱۴ بدست آمده است. این منحنی‌ها شامل اطلاعاتی از قبیل نیروی حداکثر، نیروی تسلیم‌شدگی و نیروی شکست بر حسب kgf است. مقایسه این منحنی‌ها نشان می‌دهد که در هر سه نوع عیار، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن سبب افزایش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP نسبت به نمونه بتن معمولی می‌شود. همچنین افزایش در میزان الیاف سبب افزایش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP می‌گردد. علت این امر این است که کاربرد الیاف در جسم بتن باعث بالا رفتن نسبی مقاومت کششی در مقطع شده و بنابراین بر روی پیوستگی فولاد و بتن نیز تاثیر خواهد داشت. با قرار گرفتن رشته‌های الیاف پلی‌پروپیلن در محدوده اطراف میلگرد GFRP، رشد ترک‌های کششی در اطراف میلگرد محدود شده و در نتیجه مقاومت پیوستگی به طور نسبی افزایش می‌یابد.



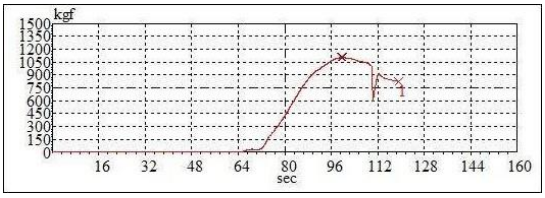
(الف) بتن معمولی



(ب) بتن حاوی ۰/۱۵ الیاف پلی‌پروپیلن

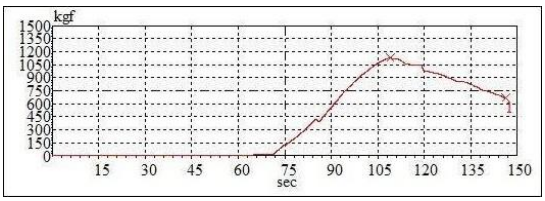


(ج) بتن حاوی ۰/۳۰ الیاف پلی‌پروپیلن

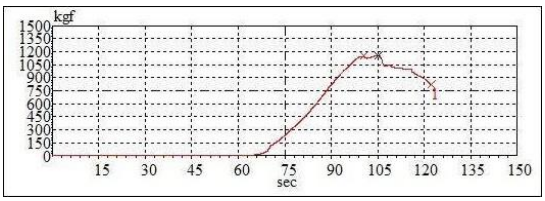


(د) بتن حاوی ۰/۴۵ الیاف پلی‌پروپیلن

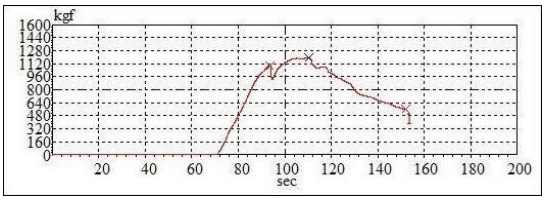
شکل۱۲ : منحنی‌های نیرو-زمان آزمون بیرون‌کشیدگی نمونه‌های ۲۸ روزه با عیار ۳۵۰.



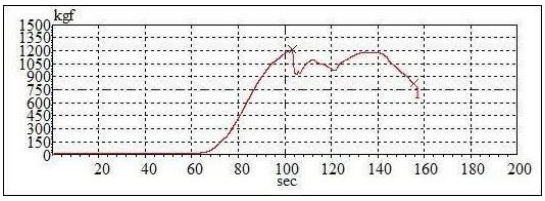
(الف) بتن معمولی



(ب) بتن حاوی ۰/۱۵ الیاف پلی‌پروپیلن

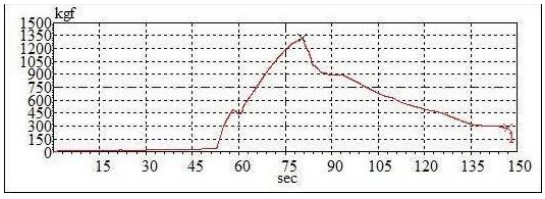


(ج) بتن حاوی ۰/۳۰ الیاف پلی‌پروپیلن

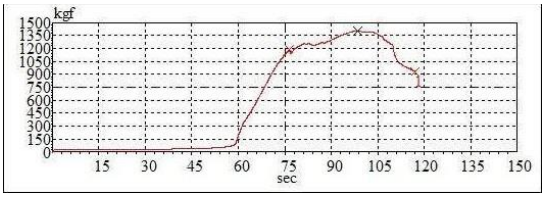


(د) بتن حاوی ۰/۴۵ الیاف پلی‌پروپیلن

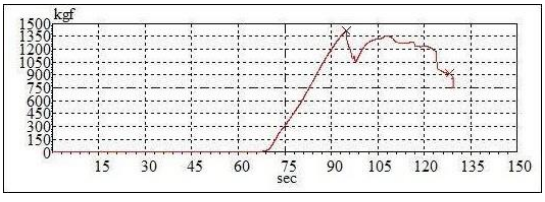
شکل۱۳ : منحنی‌های نیرو-زمان آزمون بیرون‌کشیدگی نمونه‌های ۲۸ روزه با عیار ۴۰۰.



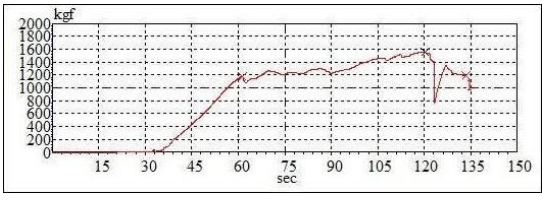
(الف) بتن معمولی



(ب) بتن حاوی ۰/۱۵ الیاف پلی‌پروپیلن



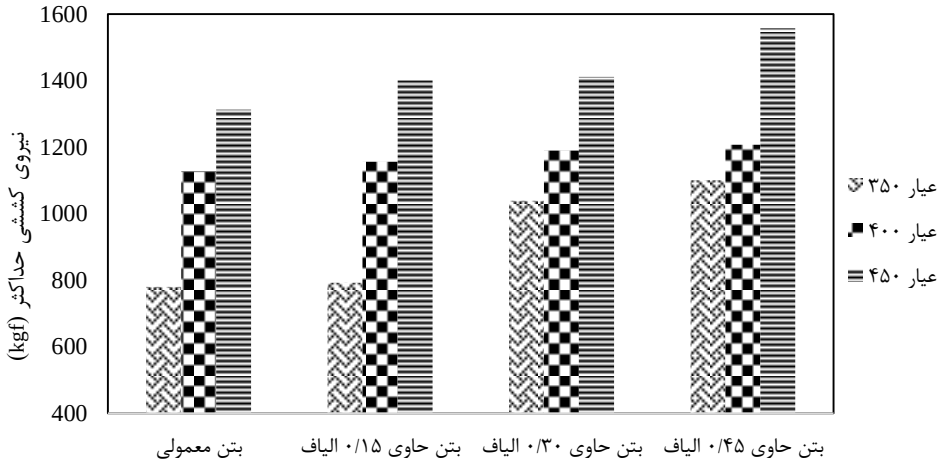
(ج) بتن حاوی ۰/۳۰ الیاف پلی‌پروپیلن



(د) بتن حاوی ۰/۴۵ الیاف پلی‌پروپیلن

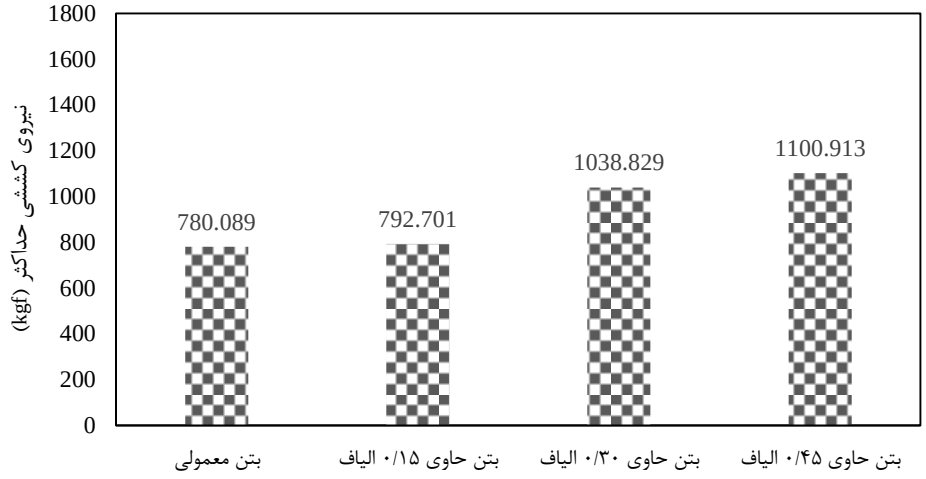
شکل۱۴ : منحنی‌های نیرو-زمان آزمون بیرون‌کشیدگی نمونه‌های ۲۸ روزه با عیار ۴۵۰.

شکل ۱۵ نتایج حاصل از حداکثر نیروی پیوستگی نمونه‌های بتنی با عیارهای مختلف ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ را با یکدیگر مقابسه می‌کند. براساس این نمودار کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن و همچنین استفاده از بتن با عیارهای بالاتر سبب افزایش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP می‌شود به گونه‌ای که هرچه عیار سیمان بیشتر شود، مقاومت پیوستگی نیز بیشتر می‌شود. علت این امر افزایش قدرت چسبندگی بین خمیر بتن و میلگرد GFRP است.

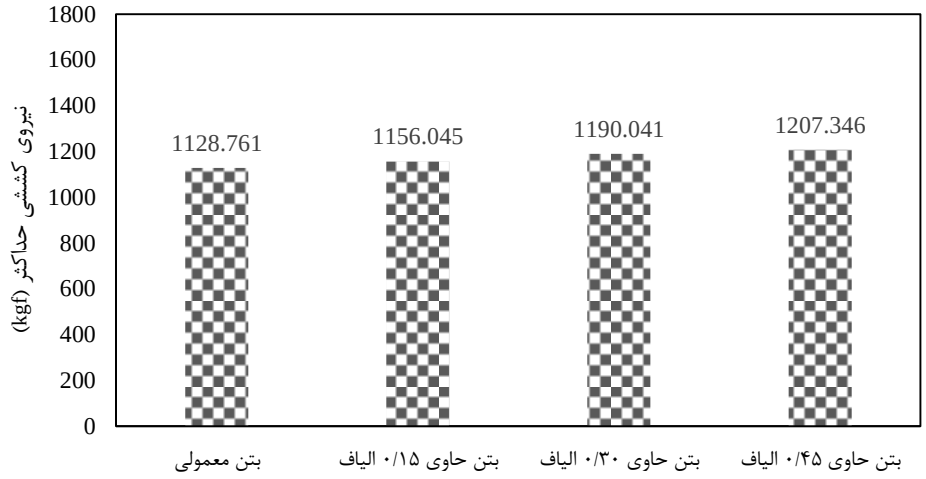


شکل۱۵: مقایسه نیروی کششی حداکثر آزمون‌های بیرون کشیدگی با عیارهای مختلف، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.

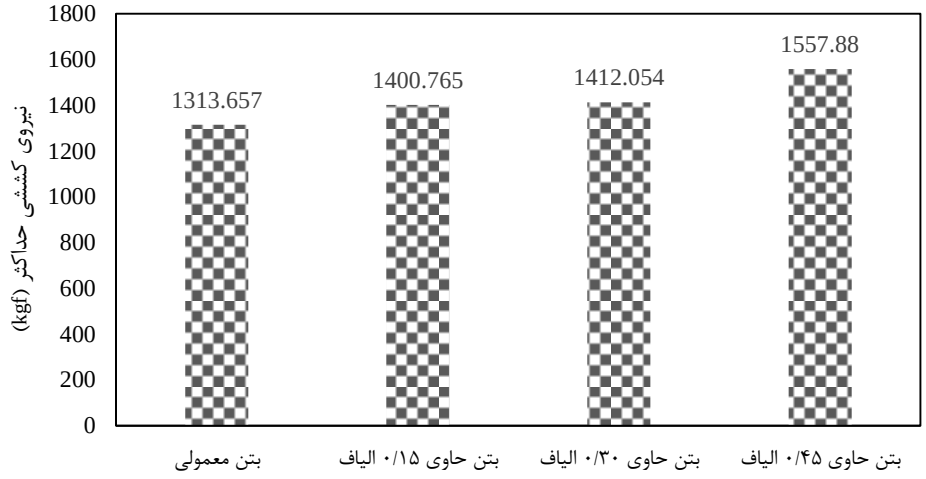
جهت مقایسه بهتر نتایج آزمون‌های مقاومت پیوستگی با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن، از نمودارهای میله‌ای مطابق شکل ۱۶ تا ۱۸ استفاده شده است. براساس شکل ۱۶ و با بررسی نتایج حاصل از حداکثر نیروی پیوستگی نمونه‌های بتنی با عیار ۳۵۰، مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن، به ترتیب سبب افزایش ۱/۶۲، ۳۳/۱۷ و ۴۱/۱۳ درصدی حداکثر نیروی پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP نسبت به بتن معمولی می‌شود. براساس شکل ۱۷ و با بررسی نتایج حاصل از حداکثر نیروی پیوستگی نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰، مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن، به ترتیب سبب افزایش ۲/۴۲، ۵/۴۳ و ۶/۹۶ درصدی حداکثر نیروی پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP نسبت به بتن معمولی می‌شود. براساس شکل ۱۸ و با بررسی نتایج حاصل از حداکثر نیروی پیوستگی نمونه‌های بتنی با عیار ۴۵۰، مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن، به ترتیب سبب افزایش ۶/۶۳، ۷/۴۹ و ۱۸/۵۹ درصدی حداکثر نیروی پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP نسبت به بتن معمولی می‌شود.



شکل۱۶: مقایسه نیروی کششی حداکثر آزمون‌های بیرون کشیدگی با عیار ۳۵۰، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.



شکل۱۷: مقایسه نیروی کششی حداکثر آزمون‌های بیرون کشیدگی با عیار ۴۰۰، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.



شکل۱۸: مقایسه نیروی کششی حداکثر آزمون‌های بیرون کشیدگی با عیار ۴۵۰، با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر روی مقاومت پیوستگی بین بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و میلگرد GFRP به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. سه نوع عیار ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ در نظر گرفته شده و برای هر یک از این عیارها چهار نمونه مکعبی ۱۵×۱۵ سانتی‌متری بدون الیاف، ۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد حجمی بتن الیاف ساخته شد که یک نمونه ۷ روزه و سه نمونه ۲۸ روزه عمل‌آوری گردید. از سه نمونه ۲۸ روزه، دو نمونه جهت بدست آوردن مقاومت فشاری و یک نمونه برای بدست آوردن مقاومت پیوستگی مورد استفاده قرار گرفت. مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد GFRP از طریق تست بیرون‌کشیدگی مستقیم توسط دستگاه کشش یونیورسال تعیین شد. با توجه به نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و منحنی‌های نیرو-زمان حاصل از تست بیرون‌کشیدگی نتایج کلی به شرح زیر حاصل گردید:

۱- استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن سبب کاهش میزان اسلامپ بتن در کلیه عیارها شد.

۲- از بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۷ روزه و با عیارهای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ مشاهده گردید که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن نهایتاً سبب افزایش حدود ۴ درصدی مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف نسبت به بتن معمولی شد.

۳- از بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه با عیارهای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ مشاهده گردید که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن نهایتاً به ترتیب سبب افزایش حدود ۱۴، ۵ و ۶ درصدی مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف نسبت به بتن معمولی شد.

۴- در نمونه‌های با سن ۲۸ روزه به دلیل عمل‌آوری بیشتر، میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه‌های متناظر در سن ۷ روزه بیش‌تر حاصل گردید.

۵- نمونه‌های حاوی الیاف ۰/۳۰ درصد حجمی بتن بیشترین مقاومت فشاری را در بین مابقی نمونه‌ها از خود نشان دادند. لذا مقدار الیاف به میزان ۰/۳۰ درصد حجمی بتن به عنوان درصد بهینه الیاف پلی‌پروپیلن جهت افزودن به بتن برای دستیابی به مقاومت فشاری بهینه پیشنهاد می‌شود.

۶- مقایسه منحنی‌های نیرو-زمان حاصل از آزمایش بیرون‌کشیدگی نشان داد که در هر سه نوع عیار، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن سبب افزایش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP نسبت به نمونه بتن معمولی شد. همچنین افزایش در میزان الیاف سبب افزایش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP گردید.

۷- نتایج حاصل از حداکثر نیروی پیوستگی نمونه‌های بتنی با عیارهای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ نشان داد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن نهایتاً به ترتیب سبب افزایش حدود ۴۱، ۷ و ۱۹ درصدی حداکثر نیروی پیوستگی بین بتن و میلگرد GFRP نسبت به بتن معمولی می‌شود.

مراجع

ACI ٤٠٨. (١٩٧٩). Suggested development, splice and standard hook provisions for deformed bars in tension. *Concr. Internat.: Design Constr.*, *١*(٧), ٤٤–٤٦.

ACI ٤٠٨R-٠٣. (٢٠٠٣). *Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension*.

Brown, R., Shukla, A., & Natarajan, K. R. (n.d.). *Fiber reinforcement of concrete structures*.

Chaallal, O., & Benmokrane, B. (١٩٩٣). Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout. *Materials and Structures*, *٢٦*(٣), ١٦٧–١٧٥.

Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., & Tao, S. (١٩٩٥). Bond of hooked glass fiber reinforced plastic (GFRP) reinforcing bars to concrete. *ACI Materials Journal*, *٩٢*(٤), ٣٩١–٤٠٠.

Eligehausen, R., Popov, E. P., & Bertero, V. V. (١٩٨٢). *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*.

Focacci, F., Nanni, A., & Bakis, C. E. (٢٠٠٠). Local bond-slip relationship for FRP reinforcement in concrete. *Journal of Composites for Construction*, *٤*(١), ٢٤–٣١.

Gažovičová, N., Bilčík, J., Holly, I., & Halvonik, J. (٢٠١٨). Bond Behaviour between GFRP Reinforcement and Concrete Using a Pull-Out Test. *Solid State Phenomena*, *٢٧٢*, ٢٣٢–٢٣٧.

Greco, C., Manfredi, G., Pecce, M., & Realfonzo, R. (١٩٩٨). Experimental analysis of bond between GFRP deformed. *ECCM-٨: European Conference on Composite Materials; Science, Technologies and Applications; ٣-٦ June, ١٩٩٨, Naples-Italy*, *٢*, ٣٠١.

Hawkins, N. M. (١٩٩٩). *State-of-the-Art Report: Bond under Cyclic Loads*.

Huang, H., Yuan, Y., Zhang, W., Hao, R., & Zeng, J. (٢٠٢٠). Bond properties between GFRP bars and hybrid fiber-reinforced concrete containing three types of artificial fibers. *Construction and Building Materials*, *٢٥٠*, ١١٨٨٥٧.

Institutes, B. S., & EN, B. S. (٢٠٠٩). BS EN ١٢٣٩٠-٦: ٢٠٠٩, Testing Hardened Concrete. Tensile Splitting Strength of Test Specimens. *British Standard Institution: London, UK*.

Larralde, J., & Silva-Rodriguez, R. (١٩٩٣). Bond and slip of FRP rebars in concrete. *Journal of*

Materials in Civil Engineering, ۵(۱), ۳۰–۴۰.

Malvar, L. J. (۱۹۹۵). Tensile and bond properties of GFRP reinforcing bars. *Materials Journal*, ۹۲(۳), ۲۷۶–۲۸۵.

Mohebi, Z. H., Bahnamiri, A. B., & Dehestani, M. (۲۰۱۹). Effect of polypropylene fibers on bond performance of reinforcing bars in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, ۲۱۵, ۴۰۱–۴۰۹.

Mousavi Khatir, M., & Dehestani, M. (۱۳۹۳). Laboratory Investigation of Bond Strength between Self-Compacting Concrete and GFRP Bar with Different Diameters Using Pull-Out Test. *۱st National Conference on Iranian Structural Engineering (Persian)*.

Mousavi Khatir, M., & Dehestani, M. (۱۳۹۶). Laboratory Investigation of Bond Strength between Polypropylene Fiber Concrete and GFRP Bar with Different Diameters Using Pull-Out Test. *۹th National Conference of Concrete (Persian)*.

Nanni, A. (۱۹۹۵). Bond of FRP reinforcement to concrete-experimental results. *The Proceedings of Second International RILEM Symposium (FRPRCS-۲)*, ۱۳۵–۱۴۵.

Rolland, A., Quiertant, M., Khadour, A., Chataigner, S., Benzarti, K., & Argoul, P. (۲۰۱۸). Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, ۱۷۳, ۱۳۶–۱۴۸.

Wei, W., Liu, F., Xiong, Z., Lu, Z., & Li, L. (۲۰۱۹). Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests. *Construction and Building Materials*, ۲۲۷, ۱۱۶۸۰۳.

Zuo, J., & Darwin, D. (۲۰۰۰). *Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-strength concrete*.