

Scientific Analysis and Optimization of GFRP Rebar Rib Geometry for Enhanced Bond Performance with Concrete

Hamid Navaei¹, Elham Shahabi Ghaghfaekhei¹, Jafar Eskandari Jam¹,
Amin Mirzaei¹, and Milad Shahsavari²

1. Department of Composite, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, 15875-1774, Iran
2. Department of Mechanics, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, 15875-1774, Iran

Received: 25 November 2025, accepted: 19 May 2026

ABSTRACT

Hypothesis: This study presents a comprehensive investigation into the bond behavior between glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars and concrete, a critical factor in ensuring structural integrity, effective stress transfer, and long-term durability of reinforced concrete structures. Given the distinct mechanical behavior of GFRP bars compared to conventional steel reinforcement, optimizing the surface rib geometry of GFRP bars is essential for enhancing their bond performance with concrete.

Methods: The primary focus of this research is to analyze the influence of four key rib geometry parameters—rib height, width, spacing (pitch), and cross-sectional angle—on the bond strength of GFRP bars embedded in concrete. These parameters were systematically varied and evaluated through a combination of experimental pull-out tests and advanced numerical simulations. Experimentally, six types of machined GFRP bars with different rib geometries, including two optimized designs, were subjected to standard pull-out tests to assess their bond behavior. Numerically, 36 different rib configurations were modeled using Abaqus software. The simulations employed the concrete damage plasticity (CDP) model to represent concrete behavior and the LaRC05 failure criterion to capture the response of composite materials.

Findings: The results revealed that rib height, spacing, and width significantly influence bond strength, while the cross-sectional angle has a comparatively minor effect. The optimized rib design—with a height of 0.73 mm, width of 9.44 mm, spacing of 13.84 mm, and angle of 53 degrees—achieved a maximum pull-out force of approximately 49,000 N, demonstrating a substantial improvement over conventional design. These findings underscore the importance of precise and engineered rib geometry in improving bond performance and provide a robust scientific and practical framework for the development of high-performance GFRP bars in civil engineering applications.

Keywords:

bond strength of GFRP rebar,
pull-out test,
numerical simulation of GFRP
rebar,
optimization,
rib geometric parameters

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: eskandari@mut.ac.ir

Please cite this article using:

Navaei H., Shahabi Ghaghfaekhei E., Eskandari Jam J., Mirzaei A., and Shahsavari M., Scientific Analysis and Optimization of GFRP Rebar Rib Geometry for Enhanced Bond Performance with Concrete, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 367-380, 2026.

تحلیل و بهینه‌سازی هندسه آج میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه برای افزایش چسبندگی با بتن

دسترسی پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هشتم، شماره ۵،

صفحه ۳۸۰-۳۶۷، ۱۴۰۴

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2026.35823.2440

حمیدرضا نوایی^۱، الهام شهابی قهفرخی^۱، جعفر اسکندری جم^{۱*}، امین میرزایی^۱، میلاد شاه‌سواری^۲

۱- تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه مواد کامپوزیت، کد پستی ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴

۲- تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه مهندسی مکانیک، کد پستی ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴

دریافت: ۱۴۰۴/۹/۴، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۹

چکیده

فرضیه: در این پژوهش، رفتار پیوندی میان میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) و بتن که نقش تعیین‌کننده‌ای در یکپارچگی سازه‌ای، انتقال تنش‌ها و دوام سازه‌های بتنی دارد، بررسی شد. با توجه به تفاوت‌های رفتاری میان میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه و فولادی سنتی، طراحی مناسب هندسه آج این نوع میلگردها برای بهبود عملکرد پیوندی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. پارامترهای ارتفاع، عرض، گام و زاویه سطح مقطع آج میلگرد به عنوان عوامل اصلی اثرگذار بر پیوند میلگردهای کامپوزیتی در نظر گرفته می‌شود.

روش‌ها: تمرکز اصلی این مطالعه بر تحلیل اثر چهار پارامتر کلیدی آج شامل ارتفاع، عرض، گام و زاویه سطح مقطع بر مقاومت پیوندی میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه در بتن بوده است. این پارامترها با رویکردی ترکیبی (تجربی-عددی) در بازه‌های استخراجی از ادبیات پژوهش، واکاوی شدند. در بخش تجربی، شش نوع میلگرد پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه ماشین‌کاری شده با هندسه‌های متفاوت، از جمله دو طرح بهینه‌سازی شده، تحت آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی قرار گرفتند تا رفتار پیوندی آن‌ها با بتن ارزیابی شود. در بخش عددی، ۳۶ پیکربندی مختلف از هندسه آج با نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی شدند. در این مدل‌سازی‌ها، از مدل نرمینگی آسیب بتن برای شبیه‌سازی رفتار بتن و از معیار شکست LaRC05 برای تحلیل رفتار مواد کامپوزیتی بهره گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، سه پارامتر ارتفاع، گام و عرض آج اثر شایان توجهی بر نیروی پیوند دارند، در حالی که زاویه مقطع عرضی نقش کمتری ایفا می‌کند. طرح بهینه‌شده با مشخصات هندسی شامل ارتفاع $10^{-2} \times 73/0$ m، عرض $10^{-2} \times 44/9$ m، گام $10^{-2} \times 84/13$ و زاویه 53° ، موفق به دستیابی به حداکثر نیروی بیرون‌کشیدگی معادل ۴۹۰۰۰ N شد که نسبت به طرح‌های رایج، بهبود چشمگیری را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با تأکید بر طراحی مهندسی هندسه آج، چارچوبی کاربردی برای توسعه میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه کارآمد ارائه می‌دهند.

واژه‌های کلیدی

میلگرد پلیمری تقویت‌شده با

الیاف شیشه،

آزمایش بیرون‌کشیدگی؛

شبیه‌سازی عددی؛

بهینه‌سازی؛

پارامترهای هندسی آج

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

eskandari@mut.ac.ir

مقدمه

بتن به دلیل استحکام فشاری زیاد، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی، یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی در جهان به‌شمار می‌رود. با وجود این، ضعف ذاتی بتن در برابر تنش‌های کششی، استفاده از آرماتورهای تقویتی را برای تضمین کارایی سازه‌ای الزامی می‌سازد. به‌طور سنتی، میلگردهای فولادی با سطح آج‌دار در تأمین ظرفیت کششی و ایجاد پیوند مکانیکی با بتن استفاده می‌شوند. با وجود کارایی مناسب، این میلگردها در برابر خوردگی، به‌ویژه در محیط‌های خورنده مانند مناطق ساحلی یا در معرض مواد شیمیایی، بسیار آسیب‌پذیر هستند که این موضوع می‌تواند دوام و ایمنی سازه را در بلندمدت به‌خطر اندازد [۱]. در پاسخ به این چالش، میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (glass fiber reinforced polymer, GFRP) به‌عنوان جایگزینی نوین و مقاوم در برابر خوردگی معرفی شده‌اند. این میلگردها از ترکیب الیافی نظیر شیشه، کربن، آرامید یا بازالت درون ماتریس پلیمری ساخته می‌شوند و از مزایایی نظیر وزن کم، استحکام کششی زیاد، استحکام شیمیایی، شفافیت الکترومغناطیسی و کارایی مطلوب در برابر خستگی برخوردارند [۲]. در میان انواع مختلف میلگردهای پلیمری تقویت‌شده، میلگردهای GFRP به‌دلیل هزینه کمتر و خواص مکانیکی مناسب، بیشترین توجه را در کاربردهای عمرانی به خود اختصاص داده‌اند.

با وجود این، استفاده گسترده از میلگردهای پلیمری تقویت‌شده در سازه‌های بتنی هنوز با چالش‌هایی مواجه است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، عدم شناخت کافی از رفتار پیوندی آن‌ها با بتن است. برخلاف میلگردهای فولادی که دارای الگوی آج‌زنی استاندارد و یکنواخت هستند، میلگردهای پلیمری تقویت‌شده به‌دلیل تفاوت در فرایندهای تولید، دارای هندسه‌های سطحی متنوعی هستند که ارزیابی و استانداردسازی عملکرد پیوندی آن‌ها را دشوار می‌سازد [۳]. طی سال‌های اخیر، در مطالعات متعددی عوامل مؤثر نظیر استحکام فشاری بتن، طول مهار، ضخامت پوشش و نوع پرداخت سطحی بر استحکام پیوندی میلگردهای پلیمری تقویت‌شده بررسی شده‌اند [۴،۵]. با وجود این، اثر دقیق پارامترهای هندسی آج مانند ارتفاع، عرض، گام و زاویه مقطع عرضی بر رفتار پیوندی، هنوز به‌طور جامع و سامانمند بررسی نشده است [۶،۷]. در این پژوهش، با هدف پرکردن این خلأ علمی، اثر پارامترهای کلیدی هندسه آج بر استحکام پیوندی میلگردهای GFRP در بتن با آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تحلیل و بهینه‌سازی شده است. با توجه به روند روبه‌رشد استفاده از مصالح نوین در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه در طرح‌هایی که در معرض شرایط محیطی

سخت قرار دارند، نیاز به توسعه میلگردهایی با عملکرد پیوندی بهینه و استحکام زیاد در برابر عوامل مخرب بیش از پیش احساس می‌شود. طراحی دقیق هندسه سطحی میلگردهای GFRP می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای چسبندگی آن‌ها با بتن و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری و دوام سازه ایفا کند. از این‌رو، یافته‌های این پژوهش نه‌تنها به درک عمیق‌تر از سازوکارهای پیوندی میان میلگردهای کامپوزیتی و بتن منجر می‌شود، بلکه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین استانداردهای طراحی و تولید میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با هندسه سطحی بهینه استفاده شود. این رویکرد، گام مؤثری برای افزایش اعتماد مهندسان و طراحان به کاربرد گسترده‌تر میلگردهای GFRP در طرح‌های عمرانی و زیرساختی خواهد بود.

تجربی

مواد

در تمام آزمایش‌های تجربی، از بتن معمولی با پایه سیمان پرتلند نوع II استفاده شد. در ادامه، جزئیات مربوط به مصالح مصرفی، فرایند ساخت نمونه‌ها، روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی ارائه می‌شود. هدف از این بخش، فراهم‌سازی بستر مناسبی برای تکرارپذیری آزمایش‌ها و درک بهتر نتایج به‌دست‌آمده است. برای تحلیل عددی و طراحی آزمایش‌ها، از نرم‌افزارهای Abaqus و Design-Expert بهره گرفته شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

بتن: بتن معمولی با پایه سیمان پرتلند نوع II فاقد هرگونه افزودنی معدنی یا شیمیایی بوده و تنها از اجزای اصلی شامل سیمان، سنگدانه‌های ریز و درشت و آب تشکیل شده است. نسبت اختلاط اجزا با استناد به طرح اختلاط پیشنهادی توسط Chen و همکاران [۸] تنظیم شد. مشخصات اختلاط در جدول ۱ آمده است. بتن یکی از مهم‌ترین عناصر در ساخت‌وساز به‌شمار می‌رود و نقش حیاتی در استحکام سازه‌ها دارد. پیش از بتن‌ریزی، باید قالب‌بندی به‌درستی آماده شود، زیرا انتخاب قالب مناسب و دقیق برای نمونه‌گیری بتن از اهمیت بسیاری برخوردار است. مواد اصلی تشکیل‌دهنده بتن شامل سیمان، ماسه، سنگدانه و آب هستند. مراحل آماده‌سازی بتن به شرح زیر است:

مرحله اول: نسبت وزنی (یا حجمی) هر یک از این اجزا باید مشخص شود. برای این کار هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده با نسبت تعیین‌شده وزن شد.



شکل ۱- نمونه‌هایی از میلگردهای ماشین‌کاری‌شده.

Fig. 1. Samples of machined rebars.

از میلگردهای ماشین‌کاری‌شده در شکل ۱ قابل مشاهده هستند. نمونه‌های میلگرد ماشین‌کاری‌شده (شکل‌های ۱ تا ۳)، برای مقایسه با شبیه‌سازی‌های عددی آماده شدند. این میلگردها با گام ۱۸، ارتفاع آج $1/24 \times 10^{-3}$ m، عرض آج $2/6 \times 10^{-3}$ m و زاویه مقطع آج 90° ماشین‌کاری شده‌اند.

ابتدا، نمونه‌های آزمایش استحکام فشاری بتن مطابق با استاندارد ASTM C109/109M [۱۰] و با سه نسبت اختلاط متفاوت تهیه شدند. پس از بتن‌ریزی، نمونه‌ها به مدت دو روز در قالب باقی ماندند تا بتن گیرش اولیه خود را انجام دهد و شکل قالب را به‌خود



شکل ۲- فرایند آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش بیرون‌کشیدگی.

Fig. 2. Pull-out test samples preparation process.

جدول ۱- نسبت اجزای تشکیل‌دهنده در مخلوط بتن [۸].

Table 1. Proportion of constituents in the concrete mixes [8].

Component	Content (kg/m ³)
Water	193
Cement	332
Water to cement ratio	0.58
Fine aggregate	905
Coarse aggregate	905

مرحله دوم: پس از اندازه‌گیری دقیق، مواد درون مخلوط‌کن ریخته شده و با هم ترکیب می‌شوند. انتخاب مخلوط‌کن مناسب با حجم کار نیز اهمیت دارد.

مرحله سوم: در نهایت، بتن داخل قالب ریخته شده و با استفاده از لرزاننده (vibrator) متراکم می‌شود. تراکم مناسب بتن برای حذف حفره‌های هوایی و افزایش استحکام آن بسیار ضروری است. پس از بتن‌ریزی، سطح بتن به آرامی پرداخت می‌شود تا صاف و یکنواخت شود. سپس فرایند عمل‌آوری (پخت) آغاز می‌شود. رعایت استانداردها و اجرای دقیق مراحل، نقش مهمی در ارتقای کیفیت سازه‌های بتنی دارد. عملیات اختلاط به‌صورت دستی در آزمایشگاه و با مخلوط‌کن استاندارد نوع دیگر انجام شد. ابتدا سنگدانه‌ها و سیمان به‌طور کامل و خشک با هم مخلوط شدند، سپس، آب به تدریج اضافه شد و مخلوط به مدت حدود ۱۵ min هم‌زده شد تا یکنواختی حاصل شود. مخلوط آماده‌شده درون قالب‌ها ریخته شد و با میله کوبشی متراکم شد تا حباب‌های هوا از بین بروند. تمام نمونه‌ها پس از مدت ۴۸ h از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در دمای محیط داخل آب عمل‌آوری شدند تا استحکام نهایی خود را به‌دست آورند.

میلگرد کامپوزیتی: انواع مختلفی از میلگردهای کامپوزیتی آج‌دار در بازار موجود است که معمولاً نوع آج آن‌ها به‌صورت مارپیچی پیچیده شده است. در این پژوهش، به دلیل روش خاص ایجاد آج که به‌صورت ماشین‌کاری انجام می‌شود و نیز بررسی پارامترهای هندسی آج‌ها، نیاز به استفاده از میلگردهای صاف و کشیده‌شده (پالترودشده) وجود داشت تا عملیات آج‌زنی طبق سناریوهای مختلف بررسی شود. بدین منظور، میلگردی صاف با قطر 12×10^{-3} m ساخته شده از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر، با نسبت حجمی الیاف ۶۵٪ از شرکت عصر کامپوزیت تهیه شد [۹]. برای ایجاد آج روی میلگرد، چند نمونه میلگرد صاف با دستگاه تراش دستی ماشین‌کاری شدند تا ناهمواری‌های لازم برای درهم‌گیری مکانیکی ایجاد شود. نمونه‌هایی

به مدت ۲۸ روز در آب باقی می‌ماند تا فرایند عمل‌آوری کامل شود. پس از این دوره، نمونه‌ها آماده انجام آزمایش هستند. در این پژوهش، دو نوع آزمایش انجام شد. نخست، خواص بتن براساس استاندارد ASTM C109/109M [۱۰] بررسی شد تا ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی بتن، از جمله استحکام فشاری، تعیین شود. برای این آزمایش، از دستگاه آزمون فشار UTM Universal با ظرفیت بارگذاری حداکثر ۱۰۰ تن استفاده شد. به منظور توزیع یکنواخت و گسترده نیرو، از صفحات فولادی با ضخامت $20 \times 10^{-3} \text{ m}$ و ابعاد $200 \times 10^{-3} \text{ m}$ بهره گرفته شد. نرخ جابه‌جایی تعریف‌شده برای دستگاه آزمون، 0.3 mm/min بود.

آزمایش دوم، آزمایش بیرون‌کشیدگی است که مطابق با استاندارد ACI 440.3R-12 [۱۱] و براساس مطالعه Chen و همکاران [۸] انجام شده است تا حداکثر نیروی لازم و استحکام پیوندی بین میلگرد و بتن تعیین شود. در این آزمایش، رفتار بیرون‌کشیدگی میلگردها (مانند میلگردهای FRP) از داخل بتن بررسی شد. این آزمایش‌ها با هدف ارزیابی مقدار پیوند و عملکرد میلگردها در محیط بتنی انجام می‌شوند. نتایج این آزمایش‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و تحلیل سازه‌هایی کمک کند که با میلگردهای FRP تقویت شده‌اند. برای این آزمایش، از دستگاه کشش Universal با ظرفیت حداکثر ۱۸ تن (SANTAM STM-150) استفاده شد. تجهیزات نگهدارنده بلوک‌های بتنی شامل دو صفحه فولادی با ضخامت $20 \times 10^{-3} \text{ m}$ و چهار میله رزوه‌دار (۱۲ M) با طول $250 \times 10^{-3} \text{ m}$ بودند که با استفاده از ۱۶ عدد مهره به صفحات متصل شدند. نگهدارنده بتن به فک بالایی دستگاه با یک گیره (pin) وصل شد. نمونه‌ها، نحوه نصب و تجهیزات نگهدارنده در شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده هستند.

برای جلوگیری از له‌شدگی و آسیب به میلگردهای کامپوزیتی در فک پایینی دستگاه آزمایش، از قطعه‌ای کمکی (تب) ساخته شده از لوله فولادی، الیاف شیشه و رزین اپوکسی استفاده شد. طول این تب‌ها بین ۸ تا $10 \times 10^{-3} \text{ m}$ بود و فضای بین لوله فولادی و میلگرد با پیچیدن الیاف شیشه تقویت شد، سپس با رزین پر شده و تحت فرایند پخت رزین قرار گرفت. همچنین، برای حذف تمرکز تنش در محل اتصال تب و میلگرد، یک گوشه گرد با استفاده از چسب قطره‌ای ایجاد شد. تصاویر مربوط به تب‌ها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

طراحی آزمایش

در این پژوهش، از نرم‌افزار Design Expert برای طراحی و تحلیل آزمایش‌ها، بهینه‌سازی هندسه آج‌ها و تحلیل نتایج استفاده شد. در این نرم‌افزار، چهار پارامتر اصلی مطابق با شکل ۶ تعریف شدند: ارتفاع



شکل ۳- نمونه‌های آزمایش بیرون‌کشیدگی.

Fig. 3. Pull-out test samples.

بگیرد. سپس، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در دمای محیط داخل مخزن آب نگه‌داری شدند تا فرایند عمل‌آوری کامل شده و استحکام مدنظر حاصل شود. سپس، مطابق با استاندارد ACI 440.3R-12 [۱۱] و براساس مطالعه Chen و همکاران [۸]، نمونه‌های آزمایش بیرون‌کشیدگی (شکل‌های ۲ و ۳) در دو مجموعه دوتایی تهیه شدند: یک مجموعه شامل میلگردهای صاف پیش از ماشین‌کاری به‌عنوان نمونه‌های کنترل برای مقایسه و مجموعه دیگر شامل میلگردهای ماشین‌کاری‌شده.

تهیه نمونه‌ها

در ابتدای فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سوراخی در کف قالب‌ها ایجاد می‌شود تا میلگرد در آن قرار گیرد. سپس، میلگردها به‌صورت عمودی در قالب‌ها قرار داده شده و در طول مهار مشخص شده ($105 \times 10^{-3} \text{ m}$) که از استاندارد و مقاله نام‌برده استخراج شده، تثبیت می‌شوند. پیش از بتن‌ریزی، یک لوله PVC با ابعاد مشخص ($45 \times 10^{-3} \text{ m}$) بریده شده و در انتهای میلگرد داخل قالب قرار می‌گیرد تا از تماس سطح میلگرد با بتن جلوگیری شود. پس از آن، بتن درون قالب ریخته می‌شود. عملیات بتن‌ریزی به‌صورت زیر انجام می‌شود:

ابتدا یک‌سوم قالب با بتن پر می‌شود، سپس، با استفاده از میله‌ای چند سوراخ در بتن ایجاد می‌شود. چند ضربه آرام نیز به قالب وارد می‌شود تا حباب‌های هوای موجود در بتن خارج شوند. همین روند برای یک‌سوم بعدی نیز تکرار می‌شود. این روش به‌عنوان جایگزینی برای دستگاه لرزاننده عمل می‌کند. پس از پرشدن کامل قالب، سطح بتن صاف می‌شود و نمونه‌ها به مدت ۲ روز در قالب باقی می‌مانند. پس از این مدت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مخزن آب منتقل می‌شوند. نمونه‌ها



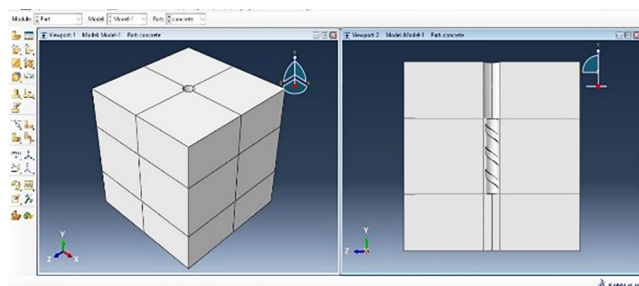
شکل ۵- تب‌زنی نمونه‌ها.

Fig. 5. Tabbing of samples.

از نرم‌افزار Abaqus برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. تمام اجزا به صورت سه‌بعدی و به عنوان اجسام جامد و تغییرپذیر مدل‌سازی شدند. واحد طول میلی‌متر، واحد تنش مگاپاسکال و واحد نیرو نیوتن در نظر گرفته شد.

بلوک بتنی مکعبی نشان داده شده در شکل ۷ با ابعاد $150 \times 100 \times 100$ mm رسم شده است. برای ایجاد ناحیه‌ای ناپیوسته، استوانه‌ای با شعاع 7×100 mm و ارتفاع 45×100 mm از داخل این بلوک حذف شده است. هندسه آج‌های میلگرد درون بتن، به منظور ایجاد تماس ایده‌آل بین میلگرد و بتن، با دقت زیاد و با استفاده از روش برش نمونه (cut instance) در ماژول مونتاژ مدل‌سازی شده است.

میلگرد کامپوزیتی به صورت یک مونتاژ دو بخشی مدل‌سازی شد. یک میله صاف به عنوان هسته مرکزی میلگرد طراحی شد و هندسه آج‌دار میلگرد به صورت جداگانه و با شکل‌های مختلف رسم شد. اتصال این دو بخش میلگرد با ویژگی‌های رزین تشکیل‌دهنده کامپوزیت، در ماژول برهم‌کنش (interaction) تعریف شد. این روش به دلیل نبود معیارهای شکست سه‌بعدی کامل برای مواد کامپوزیتی در نرم‌افزار Abaqus انتخاب شده است. با مدل‌سازی میلگرد به صورت دو بخشی، امکان تحلیل شکست ناشی از جدایش آج‌ها فراهم می‌شود. هندسه



شکل ۷- هندسه بلوک بتنی.

Fig. 7. Concrete block geometry.



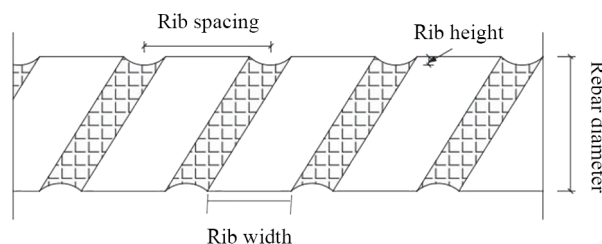
شکل ۴- آزمایش بیرون‌کشیدگی.

Fig. 4. Pull-out test.

در بازه 0.48 تا 1.44 (10^{-3} m)، عرض در بازه 3 تا 12 (10^{-3} m)، گام در بازه $7/5$ تا 36 (10^{-3} m) و زاویه مقطع عرضی آج در بازه 40° تا 90° . خروجی مدنظر در این طراحی، حداکثر نیروی پیوندی بود. بازه هر یک از پارامترها با توجه به مطالعات پیشین در نظر گرفته شده است. افزون بر این، یک محدودیت منطقی در نرم‌افزار تعریف شد که براساس آن، عرض آج باید کمتر از گام آن باشد تا شیارهای مناسبی ایجاد شود. در غیر این صورت، سطح میلگرد صاف باقی می‌ماند. این محدودیت تضمین می‌کند، آج‌ها دارای شیارهای مناسب باشند. در نهایت، نرم‌افزار با توجه به مقدار داده‌های ورودی و به منظور اطمینان از دقت آماری نمونه‌ها، تعداد 36 آزمایش طراحی کرد که امکان تحلیل دقیق و بهینه‌سازی هندسه آج‌ها را فراهم ساخت و نتایج قابل اعتمادی به دست آمد. از روش تحلیلی بهینه‌سازی (optimization) موجود در نرم‌افزار، بهینه‌ترین مقدار برای هر یک از پارامترها به دست آمد. این روش‌ها به کارآمدی فرایند پژوهش و دستیابی به نتایج مطلوب کمک می‌کنند.

شبیه‌سازی عددی

برای کاهش هزینه‌های پژوهشی و افزایش سرعت انجام آزمایش‌ها،



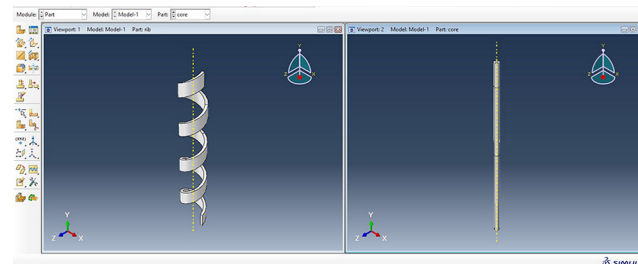
شکل ۶- پارامترهای هندسی.

Fig. 6. Geometric parameters.

از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر را نشان می‌دهد که در مدل‌سازی عددی استفاده شدند. مدل LaRC05 بر پایه نظریه‌های پیشرفته‌ای است که توسط Pinho و همکاران [۱۲] ارائه شده‌اند. این مدل به‌ویژه برای پیش‌بینی آغاز و گسترش تخریب در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف مناسب است. LaRC05 را می‌توان برای لایه‌های کامپوزیتی یک‌جهتی و نیز برای کامپوزیت‌های چندلایه به‌کار برد.

بتن به‌عنوان ماده‌ای جامد و همگن در نظر گرفته شده است و ویژگی‌های آن با استفاده از نظریه نرمینگی آسیب بتن (concrete damaged plasticity, CDP) تعریف شده‌اند. مدل CDP در نرم‌افزار Abaqus برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در شرایط مختلف بارگذاری به‌کار گرفته می‌شود. این مدل به‌دلیل کامل بودن، محبوب‌ترین روش برای تحلیل رفتار بتن در نرم‌افزار Abaqus است. مدل‌های دیگر نظیر ترک‌خوردگی پیش‌رونده بتن (concrete smeared cracking) به‌دلیل قدیمی بودن و ضعف در بارگذاری‌های پیچیده در این پژوهش استفاده نشد. این مدل با تلفیق نظریه‌های نرمینگی و مکانیک آسیب، رفتار بتن را در شرایط مختلف توصیف می‌کند. در این چارچوب، بتن به‌عنوان ماده‌ای همسان‌گرد در نظر گرفته می‌شود که رفتار کششی و فشاری متفاوتی دارد. نرمینگی در این مدل با استفاده از معیار تسلیم و سخت‌شوندگی تعریف شده و آسیب به‌صورت کاهش سختی ماده در اثر ترک‌خوردگی و شکست نشان داده می‌شود. این مدل قابلیت شبیه‌سازی رفتار بتن در بارگذاری‌های یکنواخت، چرخه‌ای و دینامیکی را دارد و برای تحلیل سازه‌های بتن مسلح و غیرمسلح مناسب است. همچنین، فرسایش بتن با استفاده از کلیدواژه‌های تعریف‌شده مشخص شده است. خواص مکانیکی مصالح بتن تعریف‌شده در نرم‌افزار در جدول ۳ قابل مشاهده هستند. همچنین گرانروی بتن در مقادیر واردشده به نرم‌افزار صفر در نظر گرفته شد. گفتنی است، گرانروی در Abaqus یک ابزار ریاضی برای پایدارسازی تحلیل است و صفر بودن آن در مدل شبیه‌سازی بتن (CDP) به معنی دقت محض در تحلیل عددی است.

مقادیر زیر برای بتن از مطالعات Hafezolzghorani و همکاران [۱۳] و Qingfu و همکاران [۱۲] استخراج شده‌اند و با نوع خاصی از بتن تولیدشده تطبیق داده شده‌اند. با توجه به ویژگی‌های غیرخطی مصالح بتن و تغییر شکل اجزای مدل و نیز عدم امکان اعمال معیار شکست بتن در حل گر Static, General، شبیه‌سازی به‌صورت شبه‌ایستا و با استفاده از حل گر Dynamic, Explicit انجام شد. همچنین، برای دستیابی به شرایط تحلیل شبه‌ایستا، بازه زمانی ۴ s برای این حل گر تعریف شد. جابه‌جایی و نیروی عکس‌العمل در انتهای میلگرد و بلوک بتنی به‌عنوان پارامترهای خروجی درخواست شدند. برای تعریف



شکل ۸- آج و هسته میلگرد کامپوزیتی

Fig. 8. Composite rebar rib and core.

آج‌ها و هسته مرکزی میلگرد در شکل ۸ نشان داده شده است. در مائول خواص (properties)، مشخصات ماده کامپوزیتی شیشه‌ای براساس داده‌های فنی ارائه‌شده توسط تولیدکننده میلگرد کامپوزیتی و نیز منابع علمی و مقالات مرتبط با بتن تعیین شد. میلگرد کامپوزیتی به‌عنوان ماده‌ای جامد، همگن و ناهمسان‌گرد (دارای خواص متفاوت در جهت‌های مختلف) تعریف شد و جهت اصلی الیاف با تنظیم جهت ماده مشخص شد.

افزون بر این، تخریب ماده کامپوزیتی با استفاده از معیار تخریب LaRC05 و افزودن کلیدواژه‌ها تعریف شد. مدل شکست LaRC05 یکی از معیارهای پیشرفته برای تحلیل تخریب مواد کامپوزیتی در نرم‌افزار Abaqus است. این مدل توسط مرکز پژوهشی Langley ناسا توسعه یافته و به‌طور ویژه برای مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف طراحی شده است. سایر معیارهای تخریب برای کامپوزیت‌ها (به‌طور مثال معیارهای شروع آسیب (damage initiation criteria) و تکامل آسیب (damage evolution) برای تحلیل در فضای سه‌بعدی مناسب نیستند. ویژگی‌های مکانیکی ماده کامپوزیتی در جدول ۲ آمده است. این جدول خواص مکانیکی و فیزیکی ماده کامپوزیتی ساخته‌شده

جدول ۲- خواص کامپوزیت شیشه-پلی‌استر [۹].

Table 2. Properties of glass-polyester composite [9].

Parameters	Values
E1 (Pa)	37.5*
E2 (Pa)	15*
E3 (Pa)	15*
v12 (poisson ratio)	0.15
v13 (poisson ratio)	0.15
v23 (poisson ratio)	0.33
G12 (Pa)	4*
G13 (Pa)	4*
G23 (Pa)	1.5*
Density (kg/m ³)	1.89*

جدول ۳- خواص مکانیکی بتن [۱۳].

Table 3. Mechanical properties of concrete [13].

Parameters	Values
E (Pa)	20111*
Poisson ratio (ν)	0.2
Yield surface shape parameter (K)	0.6667
Tensile strength to compressive strength ratio (F_{b0}/F_{c0})	1.16
Eccentricity	0.1
Dilation angle	40
Density (kg/m^3)	2.5*

نتایج و بحث

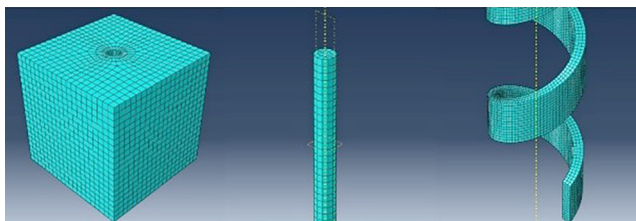
مشاهدات آزمایشگاهی

نتایج آزمایش‌های مربوط به دو دسته از نمونه‌ها بررسی شد. دسته اول شامل میلگردهای صاف به‌عنوان نمونه‌های کنترل بود، در حالی که دسته دوم از میلگردهای ماشین‌کاری‌شده تشکیل می‌شد. از هر دسته، دو نمونه ساخته و آزمایش شد. ابتدا نتایج آزمایش‌هایی ارائه می‌شود که روی نمونه‌های میلگرد صاف انجام شده‌اند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). این نمونه‌ها به‌عنوان نمونه‌های کنترل در نظر گرفته شدند تا امکان مقایسه با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده فراهم شود. سپس، نتایج مربوط به نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده تحلیل شدند (شکل‌های ۱۲-۱۴). این نمونه‌ها با استفاده از فرایندهای ماشین‌کاری خاص تهیه شده‌اند تا اثر ناهم‌واری سطح ناشی از این فرایندها بر خواص مکانیکی و استحکام اتصال بررسی شود.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

برای اعتبارسنجی مدل عددی، نمودارهای نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند (شکل ۱۵). در این شبیه‌سازی، از خواص واقعی مصالح، مدل‌های پیشرفته آسیب CDP برای بتن و LaRC05 برای GFRP، و ابعاد واقعی آج‌ها استفاده شده است. مقایسه انجام‌شده نشان داد، تطابق زیادی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌شده از نظر نیروی اوج و نیز از نظر نحوه شکست وجود دارد. مدل عددی به‌خوبی توانست آغاز جداسازی آج‌ها، ترک‌خوردگی بتن و کاهش عملکرد پس از نقطه اوج را بازسازی کند. مقدار انحراف متوسط بین مقادیر نیروی اوج آزمایشگاهی و عددی کمتر از ۸٪ بود که اعتبار مدل اجزای محدود توسعه‌یافته را تأیید می‌کند. همچنین اطلاعات آماری مرتبط با رابطه بین پارامترهای مختلف آج و نیروی اتصال (خروجی نرم‌افزار تحلیل آماری Design Expert) در جدول ۴ آمده است.

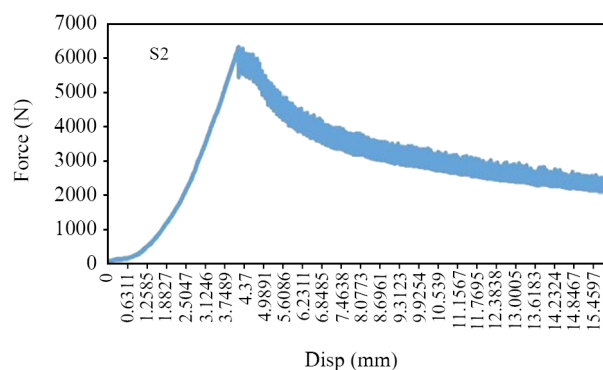
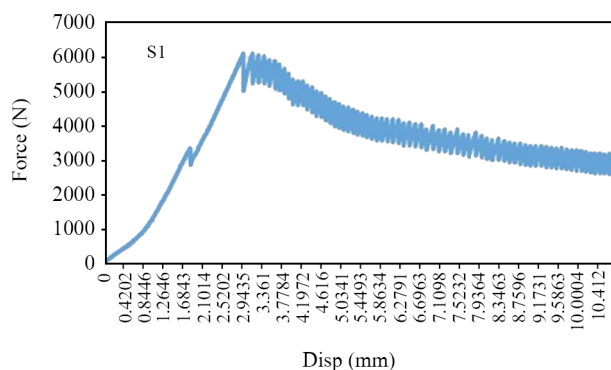
تمام آزمایش‌های طراحی‌شده با نرم‌افزار Design-Expert



شکل ۹- مش‌بندی.

Fig. 9. Meshing.

برهم‌کنش بین اجزا، یک نوع تماس عمومی (general contact) ایجاد شد که ویژگی‌های کلی آن شامل تماس سخت و ضریب اصطکاک ۰/۷۵ بود. برای اتصال آج‌ها به هسته میلگرد در این برهم‌کنش عمومی، از بخش اختصاص ویژگی‌های جداگانه استفاده شد و سطح داخلی آج‌ها با سطح خارجی هسته، با استفاده از خواص رزین تشکیل‌دهنده کامپوزیت به یکدیگر متصل شدند. رزین استفاده‌شده در میلگرد از نوع پلی‌استر بود و ویژگی‌های رفتاری چسبندگی آن از مطالعات Singh و همکاران [۱۴] و Dalaev و همکاران [۱۵] استخراج شده‌اند. برای تعریف شرایط مرزی، ابتدا نقاط مرجع به انتهای میلگرد و سطح بالایی بلوک بتنی متصل شدند. سپس، تمام درجه‌های آزادی نقطه مرجع متصل به انتهای میلگرد صفر در نظر گرفته شد تا میلگرد به‌طور کامل مقید شود. درباره نقطه مرجع متصل به بلوک بتنی، همه درجه‌های آزادی به جز جهت جابه‌جایی محدود شدند. جابه‌جایی به مقدار 8×10^{-3} m، با تابع Smooth Step تعریف شد و در جهت منفی در امتداد میلگرد اعمال شد. انتخاب دامنه تابع Smooth Step با هدف ایجاد شرایط مناسب‌تر برای تحلیل شبه‌ایستا انجام شده است. برای مش‌بندی هسته مرکزی میلگرد و آج‌های آن، از جزء C3D8R استفاده شد. اندازه مش به‌گونه‌ای انتخاب شد که حداقل دو جزء در ضخامت هسته آج‌های میلگرد تشکیل شود. برای مش‌بندی بلوک بتنی، به‌دلیل هندسه پیچیده‌تر و نسبتاً نامنظم آن، از چند جزء شامل C3D4، C3D8R و C3D6 استفاده شد. اندازه مش در این بخش به‌صورت تدریجی ریزتر شد، به‌طوری که از لبه‌های بیرونی ($7/5 \times 10^{-3}$ m) به سمت نواحی داخلی (3×10^{-3} m) کاهش یافت. مش‌بندی اجزا در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های کنترل S1 و S2.

Fig. 10. Force-displacement curve for control specimens S1 and S2.

متغیر تعیین شد. نمونه میلگرد کامپوزیتی آج‌دار با هندسه بهینه‌شده که در مراحل پیشین به دست آمده بود، ساخته شد. برای ایجاد آج‌هایی با ابعاد غیرمتعارف، از دستگاه تراش CNC در فرایند آج‌زنی استفاده شد. نمونه‌های آزمایش بیرون‌کشیدگی نیز آماده شدند که در شکل ۱۶ قابل مشاهده هستند. نمونه‌ها تحت آزمایش بیرون‌کشیدگی قرار گرفتند و نتایج آن‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. نوع شکست نمونه‌های بهینه‌شده در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در نهایت براساس نتایج و با توجه به سطح صاف و تا حد زیادی صیقلی میلگرد کامپوزیتی در نمونه شاهد، بخش عمده‌ای از نیروی لازم برای بیرون‌کشیدن میلگرد از بلوک بتنی را می‌توان به اصطکاک میان سطح میلگرد و بتن نسبت داد. اثر عوامل دیگر مانند قفل‌شدگی مکانیکی یا پیوند شیمیایی ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. در طول این آزمایش، هیچ‌گونه آسیب سازه‌ای مشاهده نشد.

در هر دو نمونه ماشین‌کاری‌شده، نیروی اصلی اتصال از درهم‌گیری مکانیکی ناشی از ناهمواری‌های ایجادشده در فرایند ماشین‌کاری به وجود آمد. در این حالت، نوع شکست شامل جداشدگی آج‌ها از هسته میلگرد کامپوزیتی بود. علت این نوع شکست را می‌توان به آسیب‌های ریز و ترک‌هایی نسبت داد که حین ماشین‌کاری در این کامپوزیت ایجاد شده‌اند، همچنین هندسه نامناسب آج‌ها نیز در این موضوع مؤثر بوده است. افزون بر این، ترک‌هایی بر سطح بلوک بتنی مشاهده شد که نشان‌دهنده ترکیبی از شکست بتن و جداشدگی آج‌ها از میلگرد کامپوزیتی در طول این آزمایش است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده، مقدار آسیب شامل شکست بتن، جداشدگی آج‌ها و سایش سطح میلگرد کامپوزیتی است که اثر آن بر بتن نیز قابل مشاهده است. همچنین، باقی‌مانده‌های آج‌های جداشده نیز در تصویر قابل تشخیص هستند. یافته‌های آماری مربوط به رابطه

مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده و با آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شدند. در مجموع، ۳۶ آزمایش تحلیل شد و خروجی‌های مربوط به نیرو و جابجایی برای بعضی از آن‌ها در جدول ۵ آمده است.

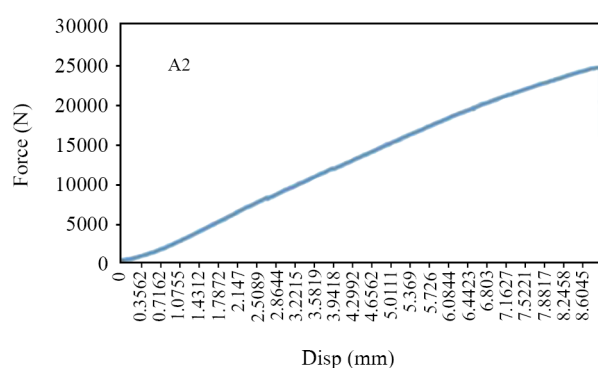
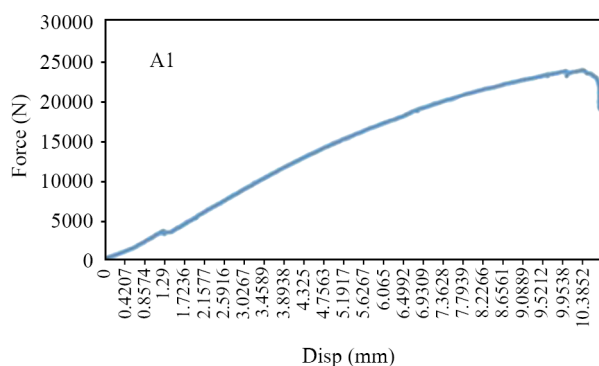
هندسه بهینه آج‌ها و کارایی آن

با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert، هندسه بهینه میلگرد کامپوزیتی آج‌دار تعیین شد. این بهینه‌سازی با هدف افزایش استحکام اتصال و کاهش اثرهای منفی ناشی از پارامترهای مختلف انجام شد. مقادیر بهینه برای هر یک از متغیرها در جدول ۶ آمده است. در این روش، ابتدا از روش‌های طراحی آزمایش برای انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با هدف بررسی اثر پارامترهای مختلف بر استحکام اتصال استفاده شد. سپس با تحلیل نتایج و به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی موجود در نرم‌افزار Design-Expert، مقادیر بهینه برای هر



شکل ۱۱- حفره باقی‌مانده از قرارگیری میلگرد کامپوزیتی در نمونه کنترل، پس از انجام آزمایش و خارج‌سازی میلگرد از بلوک بتنی.

Fig. 11 Void left by the placement of the composite rebar in the control specimen within the concrete block after testing and extraction of the rebar.



شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های ماشین‌کاری شده A1 و A2.

Fig. 12. Force-displacement curve for machined specimens A1 and A2.

ابتدا رابطه بین ارتفاع آج و نیروی اتصال بررسی شد. ضریب همبستگی منفی و متوسط (-0.474) نشان داد، افزایش بیش از حد ارتفاع آج می‌تواند به کاهش نیروی اتصال منجر شود. این همبستگی از نظر آماری معنادار است، زیرا مقدار p بسیار کم (0.006) به دست آمده است. افزون بر این، توان آماری زیاد آزمون (99.7%) و مقدار قابل قبول عامل تورم واریانس (variance inflation factor, VIF) 1.06886 تأیید می‌کند که ارتفاع آج می‌تواند به عنوان متغیر مستقل قابل اعتماد در مدل‌سازی پیش‌بینی استفاده شود. درباره عرض آج، تحلیل‌ها نشان دادند، ضریب همبستگی منفی و ضعیفی (-0.115) بین عرض آج و نیروی اتصال وجود دارد. با وجود این، مقدار p کم (0.077) و توان آماری بسیار زیاد (99.8%) نشان‌دهنده معنادار بودن این رابطه هستند. همچنین، مقدار VIF برای عرض آج نیز نبود هم‌خطی چندگانه را تأیید می‌کند که این موضوع، قابل‌اعتماد بودن آن را به عنوان یک متغیر مستقل در مدل‌سازی آماری نشان می‌دهد. سومین پارامتر، یعنی فاصله آج‌ها، ضریب همبستگی منفی و متوسطی -0.344 با نیروی اتصال نشان داد. این رابطه از نظر آماری معنادار بود، زیرا مقدار p کم (0.077) و توان آماری زیاد (99.8%) به دست آمد. همچنین، مقدار VIF برای فاصله آج‌ها نشان داد، در مدل آماری،

میان پارامترهای مختلف آج و نیروی اتصال بررسی شد (جدول ۴). نتایج نشان داد، ارتفاع، عرض و فاصله آج‌ها به عنوان متغیرهای مستقل اثر قابل توجهی بر نیروی اتصال دارند، در حالی که زاویه مقطع عرضی آج اثر معناداری در این زمینه نشان نمی‌دهد.



شکل ۱۳- میلگرد کامپوزیتی پس از پایان آزمایش بیرون‌کشیدگی.
Fig. 13. Composite rebar following the completion of the pull-out test.

جدول ۴- نتایج آماری رابطه بین متغیرهای مستقل مربوط به آج‌ها و نیروی اتصال.

Table 4. Statistical results of independent variables of the ribs.

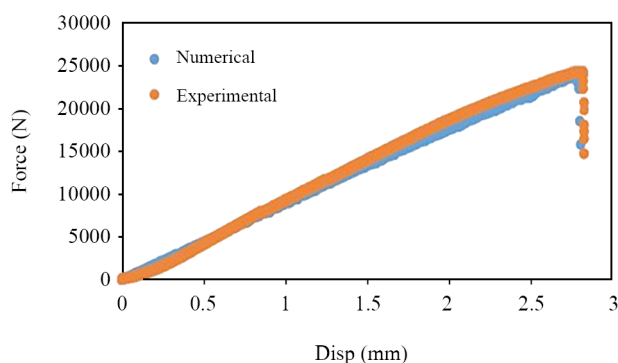
Independent Variable	VIF	Statistical Power (%)	p-value	Correlation
Rib Height (Hr)	1.06886	99.7	0.0006	- 0.47
Rib Width (Wr)	1.0337	99.7	0.50	- 0.11
Rib Spacing (Sr)	1.02646	99.8	0.007	- 0.34
Rib Cross-Section Angle (Ar)	1.0337	99.7	0.85	- 0.06

جدول ۵- برخی از نتایج شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های طراحی شده.

Table 5. Some numerical simulation results of the designed tests.

Test number	Displacement	Force (N)	Rib cross-section angle [Ar](degree)	Rib spacing [Sr]	Rib width [Wr]	Rib height [Hr]
1	1	38291.1	52.5	5.25	13.5	0.72
3	3.1	43982.6	52.5	5.25	28.5	0.72
5	0.56	45140.2	52.5	9.75	13.5	0.72
6	0.4	38046.2	52.5	9.75	13.5	1.2
7	2.47	43491.6	52.5	9.75	28.5	0.72
8	0.25	15262.1	52.5	9.75	28.5	1.2
11	2.6	47129.2	77.5	5.25	28.5	0.72
13	0.63	50992.2	77.5	9.75	13.5	0.72
19	0.43	46520.5	65	7.5	7.5	0.96
21	2	46679.6	65	3	21	0.96
27	1.41	30194.1	65	7.5	21	0.96
33	1.76	39285.9	65	5.25	13.5	0.72

مقطع عرضی آج نشان داد، این ویژگی اثر قابل توجهی بر نیروی اتصال ندارد. ضریب همبستگی منفی بسیار ناچیز (-0.065) و مقدار زیاد $p(0.8578)$ نشان‌دهنده نبود ارتباط آماری معنادار بین این متغیر و نیروی اتصال است. این یافته‌ها بر اهمیت حیاتی ارتفاع، عرض و فاصله آج‌ها در مدل‌سازی نیروی اتصال تأکید دارند، در حالی‌که زاویه مقطع عرضی آج ارزش پیش‌بینی‌کننده چندانی ندارد و لازم است در چارچوب‌های پیش‌بینی بازنگری شود.



شکل ۱۵- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی.

Fig. 15. Comparison of the force-displacement curves obtained from experimental testing and numerical simulation.

هم‌خطی چندگانه وجود ندارد و این پارامتر می‌تواند به‌عنوان متغیر مستقل قابل اعتماد در تحلیل‌ها استفاده شود. در نهایت، تحلیل زاویه



شکل ۱۴- مقطع عرضی محل شکست

Fig. 14. Cross-section of the failure location.

اتصال میان میلگرد و بتن دارد. فرایند آزمایش به روشنی نشان داد، اصلاحات هندسی، به‌ویژه در پارامترهایی مانند ارتفاع، عرض و فاصله آج‌ها، می‌تواند به افزایش چشمگیر نیروی اتصال منجر شود. این نتایج با مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های آماری انجام‌شده در مراحل پیشین طرح هم‌راستا هستند؛ همان‌طور که Zhang و همکاران نیز به آن اشاره کرده‌اند [۱۶]. براساس نتایج می‌توان نتیجه گرفت، بهینه‌سازی هندسه آج‌ها در میلگردهای کامپوزیتی اثر مستقیمی بر افزایش استحکام اتصال دارد. هرچند استفاده از دستگاه CNC برای فرایند آج‌زنی ممکن است، هزینه‌بر باشد، اما این روش می‌تواند تولید میلگردهایی با استحکام بیشتر و کیفیت یکنواخت‌تر را امکان‌پذیر سازد. این موضوع به‌ویژه در کاربردهای عملی و صنعتی، به‌ویژه در طرح‌های ساختمانی که نیازمند اتصالات مقاوم و بادوام هستند، بسیار سودمند خواهد بود. نتایج با مطالعات Qing Do و همکاران [۱۷] همخوانی دارد و اهمیت درهم‌گیری مکانیکی در عملکرد اتصال را تأیید می‌کند.

نوع شکست نمونه‌های بهینه‌شده، همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده، شامل ترک‌خوردگی بتن و بیرون‌کشیدگی میلگرد است. این مشاهده نشان می‌دهد، آج‌های بهینه‌شده از یکپارچگی سازه‌ای کافی برخوردار هستند. تغییرات در فاصله و عرض آج‌ها نیز بر عملکرد اتصال اثرگذارند. فاصله بیش از حد میان آج‌ها خطر لغزش را افزایش می‌دهد، در حالی که کاهش فاصله، جای‌گذاری بتن را محدود می‌کند. زاویه 53° به‌عنوان مقدار بهینه شناخته شد، زیرا برهم‌کنش مناسبی میان درهم‌گیری مکانیکی و کاهش لغزش ایجاد می‌کند؛ هرچند انحراف از این زاویه می‌تواند نیروهای برشی را افزایش داده یا پایداری آج‌ها را کاهش دهد [۲۰-۱۸].

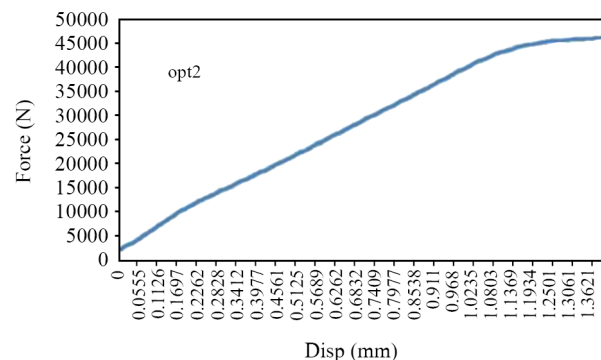
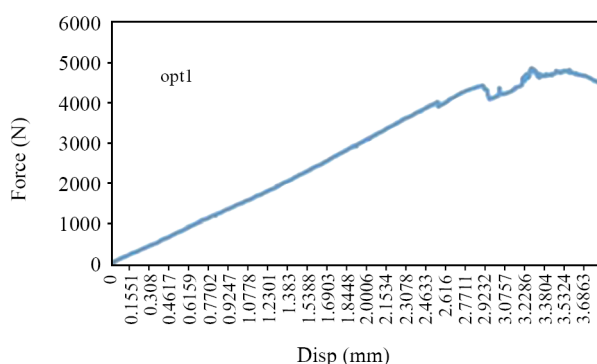
این پژوهش بر تحلیل پارامترهای هندسی آج‌های میلگرد کامپوزیتی و اثر آن‌ها بر استحکام اتصال تمرکز داشت. برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود: اثر بر استحکام اتصال، اثر عوامل محیطی مانند دما و



شکل ۱۶- میلگردهای کامپوزیتی با هندسه بهینه‌شده آج‌ها.
Fig. 16. Composite rebars with optimized rib geometry.

جدول ۶ مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای هر یک از متغیرها را نشان می‌دهد که با هدف بیشینه‌سازی نیروی اتصال و هم‌زمان کاهش اثرهای منفی سایر پارامترها انتخاب شده‌اند. بهینه‌سازی هندسه آج‌ها برای میلگردهای کامپوزیتی با نرم‌افزار Design-Expert نشان داد، مقادیر بهینه ارائه‌شده در جدول ۶ می‌توانند به‌طور قابل توجهی نیروی اتصال را افزایش دهند. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی میلگردهای کامپوزیتی با عملکرد بهبودیافته در کاربردهای مختلف استفاده شوند.

براساس نمودارها، نمونه بهینه‌شده قابلیت تحمل نیروهایی تا ۸ برابر بیشتر از نمونه کنترل و حدود ۲ برابر بیشتر از نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده A1 و A2 را دارد. این نتایج اثر چشمگیر هندسه بهینه آج‌ها بر استحکام اتصال میلگرد کامپوزیتی با بتن نشان می‌دهند. یافته‌ها نشان دادند، به‌کارگیری هندسه بهینه‌شده برای آج‌ها اثر مثبتی بر استحکام



شکل ۱۷- نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های با هندسه بهینه‌شده آج‌ها (opt1 و opt2).
Fig. 17. Force-displacement curve of the specimens with optimized rib geometry (opt1 and opt2).

جدول ۶- پارامترهای هندسه بهینه آج‌ها.

Table 6. Optimal rib geometry parameters.

parameters	Optimal value
Rib Height [Hr]	0.73
Rib Width [Wr]	9.44
Rib Spacing [Sr]	13.84
Rib Cross-Section Angle [Ar] (degree)	53

بهینه می‌تواند به جداسدگی آج‌ها و کاهش استحکام کششی منجر شود. همچنین یافته‌های مطالعه حاضر نقش مهم هندسه آج‌ها را در بهینه‌سازی استحکام اتصال برجسته می‌کنند و دیدگاه‌های ارزشمندی برای طراحی سازه‌های بتنی بادوام ارائه می‌دهند.

قدردانی

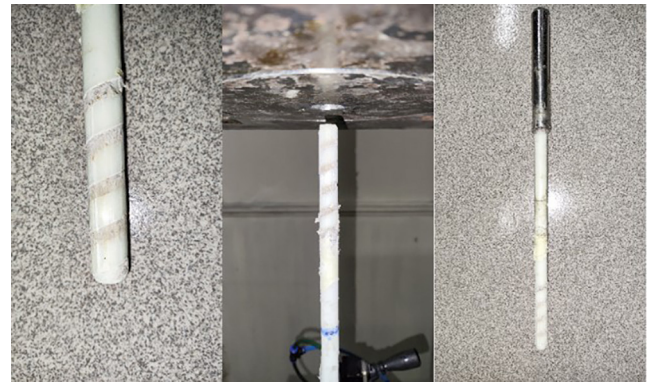
از همکاری و حمایت مسئولان و اعضای هیئت علمی دانشکده مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین لازم است، از معاونت پژوهشی دانشگاه مالک اشتر برای حمایت مالی از این پژوهش و صدور مجوز انجام آن، تشکر ویژه شود.

تعارض منافع

در انتشار این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی وجود ندارد.

مراجع

1. ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-15), ACI, 2015.
2. Bank L.C., *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, John Wiley and Sons, 2006.
3. Benmokrane B., El-Salakawy E., and Masmoudi R., Bond Strength of Glass Fiber-Reinforced Polymer Rebars in Concrete, *ACI Struct. J.*, **99**, 322-329, 2002.
4. Gao Y. and Zhang, Y., Bond Behavior of GFRP Bars in Concrete Under Different Surface Treatments, *Constr Build. Mater.*, **211**, 172-183, 2019.
5. *FRP Composites in Civil Engineering*, Machida A. (Ed.), CRC, 2007.
6. Nanni A., De Luca A., and Zadeh H., *Reinforced Concrete with FRP Bars*, Taylor and Francis Group, LLC. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2014,
7. Solyom S. and Balázs G.L., Bond of frp Bars with Different Surface Characteristics. *Constr. Build. Mater.*, **264**, 119839, 2020.
8. Chen L., Liang K., and Shan Z., Experimental and Theoretical Studies on Bond Behavior Between Concrete and frp Bars with Different Surface Conditions, *Compos. Struct.*, **309**, 116721, 2023.
9. Properties of Polymer Composites, <https://asrecomposite.com/data-sheet-pultrusion>, Available in 1 May 2026.
10. Standard Test Method for Compressive Strength of



شکل ۱۸- نحوه شکست نمونه‌های بهینه‌شده.

Fig. 18. Failure mode of the optimized specimens.

رطوبت، نقش انواع مختلف بتن و افزودنی‌ها در عملکرد اتصال و اثرهای بلندمدت از جمله فرسودگی و مواجهه با شرایط محیطی مطالعه شود. این مسیرهای پژوهشی می‌توانند به درک بهتر موضوع کمک کنند و کاربرد میلگردهای کامپوزیتی در صنعت ساخت‌وساز را بهبود بخشند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر هندسه آج‌های میلگرد کامپوزیتی بر استحکام اتصال با بتن بررسی شد و طراحی بهینه‌ای با ارتفاع آج 0.73×10^{-3} m، عرض 9.44×10^{-3} m، فاصله 13.84×10^{-3} m و زاویه 53° شناسایی شد. نتایج نشان داد، افزایش ارتفاع آج با افزایش سطح تماس، موجب بهبود استحکام اتصال می‌شود، اما عبور از ابعاد

- Hydraulic Cement Mortars, A.B.O.A. ASTM Standards c109/109m, 2016.
11. Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures, **440**, A.C., Aci 440.3r-12, 2012.
 12. Qingfu L., Wei G., and Yihang K., Parameter Calculation and Verification of Concrete Plastic Damage Model of Abaqus, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP, 012036, 2020.
 13. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Jaafar M.S.B., and Karimzade K., Simplified Damage Plasticity Model for Concrete, *Struct. Eng. Int*, **27**, 68-78, 2017.
 14. Singh G., Kumar D., and Mohite P., Damage Modelling of Epoxy Material Under Uniaxial Tension Based On Micromechanics and Experimental Analysis, *Arch. Appl. Mech*, **87**, 721-736, 2017.
 15. Dallaev R., Pisarenko T., Papež N., Sadovský P., and Holcman V., A Brief Overview on Epoxies in Electronics: Properties, Applications, and Modifications, *Polymers*, **15** 3964, 2023.
 16. Zhang P., Zhang S., Gao D., Dong F., Liu Y., Zhao J., and Sheikh S.A., Influence of Rib Parameters on Mechanical Properties and Bond Behavior in Concrete of Fiber-Reinforced Polymer Rebar, *Adv. Struct. Eng*, **24**, 196-208, 2021.
 17. Hao Q.D., Wang Y.L., Zhang Z.C., and Ou J.P., Bond Strength Improvement of Gfrp Rebars with Different Rib Geometries, *J. Zhejiang Univ. Sci A*, **8**, 1356-1365, 2007.
 18. Sadki N., Belbachir N. and Bahar S., Numerical Evaluation and Prediction of Bond Performance of Ribbed FRP and Steel Bars in Concrete Using Pull-out Test Simulations, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, **70**, 283-300, 2026.
 19. Chao S., Li C., Dong J., and Lu Z., Towards Selecting an Optimal Bonding Test Method for Rebar-Concrete: Comparison Between Pull-Out Test and Full-Beam Test, *Bldg J.*, **15**, 2375, 2025.
 20. Liu L., Ouyang X., Wang X., and Zhang Q., Multi-Factors Effects on Developments of Bond Behaviors Between the High-Strength Grout and Steel Rebar and Its Optimization, *Structures*, **77**, 109067, 2025.