



مطالعه رفتار پیوستگی میلگرد آجدار فولادی با بتن فوق توانمند تقویت شده با میکروالیاف فولادی با استفاده از روش المان محدود چندمقیاسی

محمد رضا اقدمی ثانی¹، عادل فردوسی^{2*}، مسعود پوربابا³، یوسف زندی⁴، سید سعید میرزایی²

- 1- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
 2- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
 3- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه
 4- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
 * تبریز، صندوق پستی 69718-76119، a_ferdousi@iaut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در تحقیق حاضر با توسعه مدل المان محدود به بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد فولادی آجدار از بتن فوق توانمند الیافی پرداخته شد. مدل المان محدود چندمقیاسی به صورت سه فاز مجزا شامل بتن فوق توانمند به صورت ماده ایزوتروپ، میکروالیاف فولادی و میلگرد شبیه سازی شد. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع بینانه تر، برای اولین بار آج های میلگرد نیز شبیه سازی شده و اندرکنش بین میلگرد و الیاف با بتن توسط مدل ناحیه تماس چسبیده اعمال شده است. پارامترهای مدل رفتاری ناحیه تماس چسبیده با کالیبره کردن نتایج مدل المان محدود و نتایج آزمون تجربی تعیین شد. در نهایت، پس از صحت سنجی نتایج المان محدود چندمقیاسی، بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، جابجایی متناظر و کار انجام لازم برای بیرون کشیدگی میلگرد با استفاده از منحنی های نیرو-لغزش تعیین شد. عواملی نظیر درصد حجمی میکروالیاف فولادی، طول مهارشدگی و قطر میلگرد، بر مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن فوق توانمند الیافی ارزیابی گردید. نتایج نشان می دهد که طول مهارشدگی تأثیر قابل ملاحظه ای بر رفتار پیوستگی میلگرد داشته و با افزایش طول مهارشدگی، نیروی بیرون کشیدگی نیز بیشتر می شود. با توجه به نتایج مشاهده می شود برای میلگرد با قطر 20 mm، با افزایش میزان الیاف از 0% به 2% نیروی بیرون کشیدگی و کار بیرون کشیدگی به ترتیب در حدود 30% و 22% افزایش می یابد.

دریافت: 1400/08/17

پذیرش: 1400/12/08

کلیدواژه ها

رفتار پیوستگی، بتن فوق توانمند الیافی، المان محدود چندمقیاسی، میکروالیاف فولادی، نیروی بیرون کشیدگی.

Investigation of bonding behavior of steel ribbed rebar embedded in ultra-high performance concrete reinforced with steel microfiber using multi-scale finite element method

Mohammad Reza Aghdami Sani¹, Adel Ferdousi^{1*}, Masoud Porbaba², Yousef Zandi¹, Seyed Saeed Mirrezaei¹

1- Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

* P.O.B. 69718-76119, Tabriz, Iran, a_ferdousi@iaut.ac.ir

Keywords

Bond behavior, Ultra high performance concrete, Multi-scale finite element, Steel microfibers, Pull-out force.

Abstract

In this study, by developing the finite element model, the pull-out behavior of ribbed steel rebar from ultra-high performance fiber reinforced concrete was investigated. For this purpose, the multi-scale finite element model was simulated in three separate phases, including ultra-high performance concrete in the form of isotropic material, steel microfibers and ribbed rebar. In order to consider more realistic assumptions, Rib pattern of rebar were simulated for the first time and the interaction between concrete with rebar and fibers was modeled by using the adhesive contact zone model. The constant parameters of the adhesive contact zone model were determined by calibrating the results of the finite element model and those of the experimental pull-out test. Finally, after validating the multi-scale finite element results, the maximum pull-out force, the corresponding displacement and the work required for the rebar pull-out were determined using the force-slip curves. Effective parameters such as bond length and rebar diameter, and the volume percentage of steel microfibers, on the bond strength were evaluated. The results show that the bond length has a significant effect on the bonding behavior of the rebar and with increasing the bond length the pull-out force also increases. According to the results, for rebar with a diameter of 20 mm, by increasing the amount of fibers volume from 0 to 2%, the pull-out force and the work increase by about 30% and 22%, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Aghdami Sani, M. R., Ferdousi, A., Porbaba, M., Zandi, Y., Mirrezaei, S. S., "Investigation of bonding behavior of steel ribbed rebar embedded in ultra-high performance concrete reinforced with steel microfiber using multi-scale finite element method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1632-1642, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.540625.1753>

1-مقدمه

خصوصیات منحصر بفرد کامپوزیت‌های پایه سیمان مانند هزینه کم ساخت، در دسترس بودن تمام و یا بخش اعظم منابع تولید آن در طبیعت، سازگار بودن در بسیاری از محیط‌ها و شرایط اقلیمی و وزن نسبتاً پایین، باعث شده است تا این ماده به عنوان یکی از مصالح اصلی مورد استفاده در صنعت ساختمان باشد [1-3]. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی کامپوزیت‌های پایه سیمان، توسعه استفاده از انواع مختلف الیاف و نانوذرات در آن می‌باشد [4-7]. نسل جدید این نوع مواد بنام بتن فوق‌توانمند الیافی¹ می‌باشد که نسبت به بتن‌های معمولی، بتن فوق‌توانمند و بتن‌های الیافی بهبود قابل توجهی در مشخصات مکانیکی داشته و کاربردهای بسیار مفیدی در صنعت ساخت‌وساز پیدا کرده است [7-9]. تقویت با الیاف برای تضمین رفتار غیر ترد و افزایش شکل‌پذیری و همچنین نسبت چسباننده زیاد با سنگ‌دانه‌های خاص از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن‌های فوق‌توانمند الیافی است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود اختصاص داده است [10].

به علت افزایش استفاده از بتن‌های فوق‌توانمند الیافی در ساختمان‌های خاص، این نوع بتن‌ها می‌توانند نقش مهمی در نجات جان افراد در کنار صرفه اقتصادی و بهره‌گیری بهتر از فضا را داشته باشند. افزودن الیاف به بتن فوق‌توانمند شکل‌پذیری، مقاومت به ضربه، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و استحکام آن در برابر بارهای دینامیکی و گسیختگی نرم را افزایش می‌دهد [11-14]. علاوه بر آن، استفاده از انواع مختلف الیاف امکان گسیختگی زود هنگام و آسیب‌های پوسته‌پوسته شدن بتن را کاهش داده و از انتشار ترک جلوگیری می‌کند و ناحیه نرم‌شدگی در ماتریس بتن را توسعه می‌دهد [15]. تأثیر استفاده از دسته الیاف در تقویت بتن توسط کماتی و همکاران [16] به صورت تجربی مطالعه شده است. آن‌ها کارایی پارچه‌های حلقوی تار پیچ‌گذاری شده در تقویت‌کننده بتن، میزان باربری و چقرمگی بتن تقویت شده با منسوج تحت آزمون خمشی چهار نقطه را بررسی کردند. سزاری و اشکذری [17] به بررسی عملکرد ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا و بتن فوق‌توانمند الیافی تحت برخورد پرتابه پرداختند و نشان دادند بتن فوق‌توانمند الیافی با دو درصد الیاف رفتاری شکل‌پذیر بروز می‌دهد و قادر به تحمل حداقل ده ضربه پی در پی چکش است. پرتان و همکاران [18] به مطالعه تجربی آثار ناشی از افزودن الیاف فورتا و پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، الگوی رشد ترک‌ها و انرژی جذب‌شده نمونه‌های استوانه‌ای بتنی پرداختند. آن‌ها برای بررسی دقیق‌تر جابجایی و تغییر شکل نمونه‌ها، روش همبستگی تصاویر دیجیتال را به کار گرفته و برای صحت‌سنجی این نتایج از نرم‌افزار اجزا محدود آپاکوس استفاده نمودند. در مدل‌سازی المان محدود ارائه شده توسط آن‌ها، بتن الیافی به صورت یک ماده ایزوتروپ در نظر گرفته شده است. صباغیان و خیرالدین [19] به بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف بر مشخصات مکانیکی و سن کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی پرداختند. حج فروش و همکاران [20] با استفاده از آزمون بیرون‌کشیدن میلگرد از داخل نمونه استوانه‌ای بتن حاوی 1.5 درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن را در نمونه‌های بتنی که مدت 2 دقیقه در معرض مستقیم میدان مغناطیسی قرار گرفتند، را مطالعه کردند.

نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مشخصه‌های مکانیکی بتن‌های فوق‌توانمند به رفتار چسبندگی بین الیاف و میلگرد با بتن، شکل هندسی الیاف

و میلگرد و همچنین مقاومت فشاری بتن بستگی دارد. کالتوف و رایچ [21] رفتار بیرون‌کشیدگی پیچ از بتن فوق‌توانمند را به صورت تجربی مطالعه کردند. رفتار چسبندگی بین میلگرد با بتن معمولی و بتن فوق‌توانمند الیافی توسط خاکسفید و همکاران [22] مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها با استفاده از آزمون بیرون‌کشیدگی، منحنی‌های نیرو-جابجایی را برای نمونه‌های مختلف استخراج کرده و به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نیروی بیرون‌کشیدگی پرداختند. ژائو و گیائو [23] رفتار چسبندگی میلگرد پوشش داده شده با اپوکسی و بتن فوق‌توانمند الیافی را بررسی کردند و مدل تحلیلی را به منظور تخمین منحنی‌های نیرو-جابجایی ارائه کردند.

با توجه به اینکه انجام آزمون‌های تجربی در این زمینه دارای محدودیت‌های زمانی بوده و هزینه‌های زیادی دارد، بنابراین در سال‌های اخیر استفاده از روش المان محدود به منظور پیش‌بینی رفتار مکانیکی این مواد توسعه پیدا کرده است. خانی و همکاران [24] با استفاده از روش المان محدود به بررسی خواص الاستیک کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربنی مارپیچ و رشته‌ای پرداختند. اسماعیلی و عندیلی [25] به توسعه مدل المان محدود چندمقیاسی سه‌بعدی به منظور مطالعه رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با میکروالیاف فلزی پرداختند. آن‌ها جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از روش المان محدود غیرخطی سه‌بعدی استفاده و اندرکنش بین الیاف و ماتریس را با استفاده از مدل ناحیه چسبندگی شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که چسبندگی بین الیاف و ماتریس بتن به پارامترهای مختلفی مانند جهت الیاف، طول گیرداری الیاف، شکل هندسی آن‌ها و مقاومت ماتریس بستگی دارد. بر این اساس، در مدل‌سازی عددی برای اینکه بتن و الیاف توأم و صحیح عمل کند باید قانونی ایجاد شود که خصوصیات این ناحیه را به صورت صحیح نمایش دهد. کریم‌زاده و همکارانش [26] یک روند مدل‌سازی محاسباتی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت پلیمر/نانولوله را پیشنهاد دادند که در آن‌ها برهم‌کنش بین نانولوله و ماتریس با استفاده از تئوری مکانیک پیوسته و المان محدود مدل شده است. آیت‌اللهی و همکاران [27] مدل‌سازی چندمقیاسی را برای پیش‌بینی خواص نانوکامپوزیت پلیمری تحت شرایط بارگذاری خمشی و پیچشی ارائه دادند که در مدل پیشنهادی آن‌ها فاز میانی به صورت پیوسته شبیه‌سازی شده و مدول‌های یانگ مختلفی برای آن فرض شده است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که مشخصات مکانیکی فصل مشترک بین الیاف و ماتریس اثر اندکی بر سفتی نانوکامپوزیت دارد، ولی نسبت ظاهری² الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مدول یانگ آن دارد.

مطالعات عددی زیادی به منظور فهم رفتار مایکرومکانیکی سیستم الیاف و ماتریس و با استفاده از تکنیک‌های مختلف مانند روش المان مرزی [28-30]، روش المان محدود توسعه‌یافته [31] و روش ترک پخشی و مکانیک شکست به منظور تحلیل جدایش در سطح تماس و متعاقباً ورود خرابی به ماتریس انجام شده است. در یکی از جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه، اسماعیلی و همکاران [32] با استفاده از روش المان محدود بر مبنای مقیاس مزو و در نظر گرفتن اجزای مختلف بکار رفته در بتن، رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف فولادی از کامپوزیت پلیمری را با در نظر گرفتن شکل‌های هندسی مختلف انتهای الیاف مطالعه کردند. آن‌ها در مطالعه خود الگوریتم جدیدی را به منظور توزیع تصادفی الیاف در داخل ماتریس پلیمری ارائه دادند و با در نظر گرفتن اندرکنش بین الیاف و ماتریس به استخراج نتایج با استفاده

¹ UHPFRC² Aspect ratio

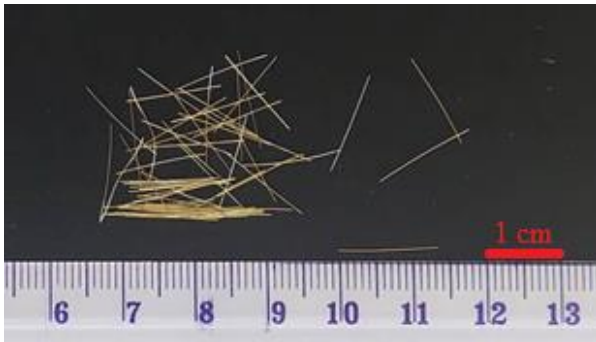


Fig. 1 Geometry of the steel micro-fiber

شکل 1 میکروالیاف فولادی مورد استفاده

جدول 1 مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فولادی [34]

Table 1 Mechanical and geometrical properties of the steel fiber [34]

نوع الیاف	E_f (GPa)	f_p (MPa)	f_t (MPa)	نسبت ظاهری $[L/d_f]$	L (mm)	d_f (mm)
فولادی	200	430	2240	30	13	0.2

2-2- طرح اختلاط بتن

به منظور ساخت بتن فوق‌توانمند الیافی با مقاومت 120 MPa، طرح اختلاط‌های مختلفی طرح شد و جهت تعیین مقاومت فشاری از هر مخلوط ساخته شده، سه نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ تهیه گردید. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت 2 دقیقه روی میز لرزان متراکم و سپس مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران شماره 17040 به مدت 24 ساعت در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند و سپس از قالب‌ها خارج شده و تحت شرایط مرطوب و درون حوضچه تا سن آزمایش 28 روزه نگهداری شدند. در انتها، نمونه‌ها مورد آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی تک محوره قرار گرفتند. طرح اختلاط نهایی با توجه به نتایج آزمون مقاومت فشاری انتخاب شده و مشخصات آن در جدول 2 ارائه شده است. به منظور ساخت نمونه بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن الیافی، 2 درصد الیاف فولادی در مرحله اختلاط به بتن فوق‌توانمند اضافه شده است.

2-3- میلگردهای مورد استفاده

میلگردهای مصرفی برای آزمایش بیرون‌کشیدگی الیاف بر اساس استاندارد ASTM A615 و با مقاومت تسلیم 400 MPa استفاده شدند. در این تحقیق از میلگردهای آجدار با قطر 16 mm استفاده گردیده است و منحنی تنش-کرنش آن با استفاده از آزمون کشش و بر اساس استاندارد ASTM A615 استخراج و در شکل 2 منحنی تنش-کرنش و میلگرد آن نشان داده شده است.

جدول 2 طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند

Table 2 UHPC Mix Design and Ratios

مقدار (kg/m ³)	مشخصه‌های طرح مخلوط
670	سیمان پرتلند نوع II
200	میکروسلیس
285	پودر کوارتز
1020	ماسه سیلیکا
20.1	فوق روان‌کننده (3%)
178	آب (لیتر)

از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. همچنین، در برخی از مطالعات از مدل‌های ناحیه چسبیده در قالب کدهای روش المان محدود برای مدل‌سازی ناحیه اتصال الیاف و ماتریس و همچنین مطالعه پیدایش و رشد جدایش در این ناحیه استفاده شده است. مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از مدل ناحیه چسبیده به منظور شبیه‌سازی ناحیه فصل مشترک در مواد کامپوزیتی نشان می‌دهد که استفاده از این روش با دقت مناسبی رفتار چسبندگی الیاف و ماتریس را پیش‌بینی می‌کند. به عنوان نمونه بوهالا و همکاران [33] با استفاده از مدل ناحیه چسبیده و روش المان محدود، پارامترهای خرابی کامپوزیت‌ها را تعیین نموده‌اند. در این روش ضخامت المان‌های بین سطحی صفر بوده و می‌توان رفتار جدایش الیاف و ماتریس را شبیه‌سازی نمود. با توجه به دقت این روش، در مقاله حاضر نیز فصل مشترک بین الیاف و ماتریس با مدل ناحیه چسبیده شبیه‌سازی خواهد شد.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در زمینه شبیه‌سازی مکانیکی رفتار بتن فوق‌توانمند الیافی تحقیقات محدودی صورت پذیرفته است و در هیچ یک از این مطالعات، رفتار بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن بررسی نشده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر، به توسعه مدل المان محدود چندمقیاسی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی پرداخته می‌شود. بدین منظور، از میکروالیاف فولادی جهت چسبندگی اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت بتنی استفاده شده و سپس استحکام کششی، فشاری و مدول یانگ این مواد با انجام آزمون‌های تجربی به دست آمده است. در ادامه، آزمون بیرون‌کشیدگی میلگرد بر روی نمونه‌های مختلف انجام پذیرفته است. در ادامه با مدنظر قرار دادن خواص مکانیکی به دست آمده و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، به ارائه روشی به منظور شبیه‌سازی المان محدود بتن‌های فوق‌توانمند تقویت شده با میکروالیاف فولادی پرداخته شد. در این تحقیق برای اولین بار و با استفاده از مدل چندمقیاسی، مشخصات چسبندگی میلگرد آجدار با بتن فوق‌توانمند تقویت شده با میکروالیاف تعیین می‌شود. به منظور شبیه‌سازی اندرکنش بین میکروالیاف/میلگرد و بتن از مدل ناحیه چسبیده (CZM) استفاده شده و پارامترهای این مدل رفتاری با استفاده از نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد تعیین می‌شود. سپس با شبیه‌سازی مجزای بتن فوق‌توانمند و الیاف و استفاده از مدل المان محدود چندمقیاسی، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند درصد وزنی الیاف، قطر میلگرد و عمق مدفون‌شدگی آن بر روی خواص چسبندگی میلگرد با بتن فوق‌توانمند الیافی پرداخته می‌شود. در نهایت، برای ارزیابی مدل چندمقیاسی ارائه شده، نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و صحت مدل ارائه شده مورد بحث قرار می‌گیرد.

2- آزمون‌های تجربی

در این بخش، نحوه ساخت بتن فوق‌توانمند الیافی و همچنین انجام آزمون‌های تجربی بیرون‌کشیدگی میلگرد بیان می‌شود.

2-1- مشخصات الیاف

در این تحقیق به منظور تقویت بتن فوق‌توانمند از میکروالیاف فولادی ساخت شرکت یوجیان¹ چین که در شکل 1 نشان داده شده است، استفاده شده است. جنس الیاف از فولاد St37 می‌باشد و مشخصات مکانیکی و هندسی این الیاف در جدول 1 ارائه شده است [34]. به منظور بررسی تأثیر پارامترها، کسرهای حجمی مختلف الیاف در محدوده 0% تا 2% مورد مطالعه قرار داده می‌شود.

¹ Yujian

حجمی میکرو الیاف و قطر میلگرد بر روی رفتار چسبندگی آن، کامپوزیت بتن فوق‌توانمند تقویت شده با میکرو الیاف فلزی از سه بخش میکرو الیاف فولادی، بتن فوق‌توانمند و سطح مشترک الیاف و بتن تشکیل شده است. میکرو الیاف فولادی به صورت استوانه‌هایی با قطر و طول نشان داده شده در جدول 1 شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین، بتن فوق‌توانمند به صورت یک مکعب مستطیل با مواد همگن و یکنواخت در نظر گرفته شده که خواص مکانیکی آن از انجام آزمون تجربی بر روی نمونه آزمایشگاهی تعیین شده است. خواص مکانیکی بتن فوق‌توانمند بدون الیاف با انجام آزمون‌های فشار و کشش تک‌جهته به دست آمده است و نتایج آن به همراه نحوه انجام آزمایش در شکل 5 نشان داده شده است. جهت تعریف مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند که مدول الاستیک آن برابر 44 GPa می‌باشد، از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن¹ موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. به منظور تشکیل مدل هندسی کامپوزیت الیافی، الیاف با توزیع تصادفی در مدل ایجاد و سپس حجم مجموعه الیاف از بتن حذف شده است. در ادامه جزئیات المان محدود بیان می‌شود.

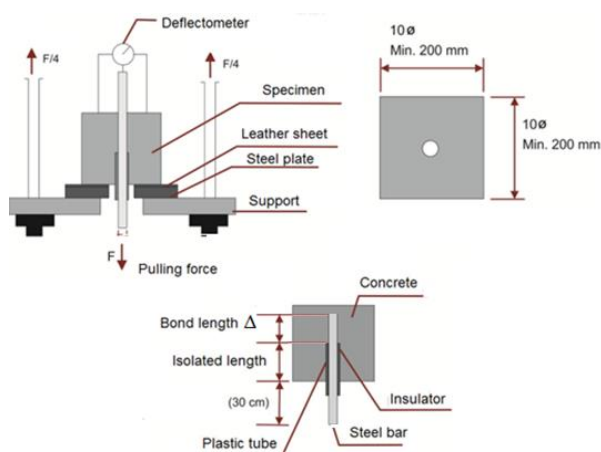


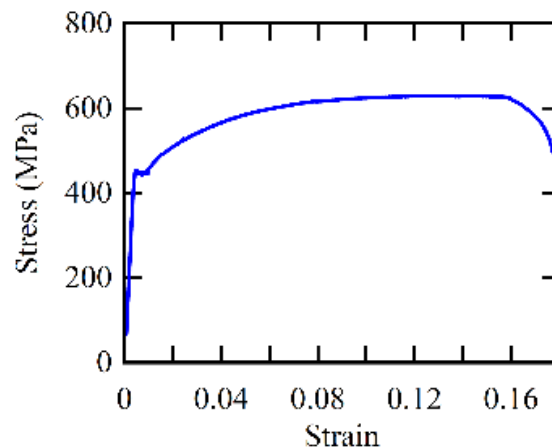
Fig. 3 Pull-out test set up details and views based on RILEM-RC6 standard [35, 36]

شکل 3 مشخصات هندسی نمونه‌های بیرون کشیدگی تحت بررسی بر اساس استاندارد RILEM-RC6 [35, 36]



Fig. 4 (a) Test set up details (b) displacement sensor

شکل 4 (الف) چیدمان آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد و (ب) نحوه قرارگیری سنسور جابجایی سنج



(الف)-a



(ب)-b

Fig. 2 (a) stress-strain curve of the rebar and (b) deformed rebar after direct tensile testing

شکل 2 (الف) منحنی تنش-کرنش میلگرد مورد استفاده و (ب) میلگرد پس از آزمایش کشش مستقیم میلگرد

4-2- آزمون بیرون کشیدگی میلگرد

در این تحقیق برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی مابین میلگرد و ماتریس بتن فوق‌توانمند الیافی، آزمایش بیرون کشیدگی ترتیب داده شد. آزمون بیرون کشیدگی شامل خارج کردن میلگرد از داخل بتن می‌باشد. نیروی بیرون کشیدگی از یک طرف و جابجایی نیز از انتهای دیگر میلگرد اندازه‌گیری می‌شود. در تحقیق حاضر ساخت نمونه‌های بیرون کشیدگی بر اساس استاندارد RILEM-RC6 [35 و 36] انجام پذیرفته است. بر اساس این استاندارد نمونه‌های بتنی مورد استفاده در تحقیق حاضر دارای طول و عرض 200mm می‌باشد و مشخصات هندسی نمونه‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. در این شکل، Δ طول مهارشدگی میلگرد در بتن و ϕ قطر میلگرد می‌باشد. مطابق شکل 3، در این پیکربندی نمونه‌های بتنی بر روی یک جعبه فولادی قرار گرفته و انتهای آزاد میلگرد داخل فک‌های دستگاه ثابت می‌شود. به منظور انجام آزمون‌های تجربی از دستگاه کشش یونیورسال با ظرفیت حداکثر نیروی 10kN و با نرخ جابجایی 0.1 mm/min استفاده شده است. به منظور ثبت جابجایی از سنسور جابجایی سنج LVDT که مطابق شکل کب بر روی سطح بالایی نمونه بتنی قرار داده شده و جابجایی نسبی بین قاب فولادی و نمونه بتنی را اندازه می‌گیرد، استفاده شده است. اختلاف دو جابجایی نسبی، نشان دهنده لغزش بین میله و بتن می‌باشد. در نهایت با انجام آزمون‌های تجربی، منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های بتن فوق‌توانمند دارای 0 و 2 درصد الیاف به دست می‌آید.

3- شبیه‌سازی‌های المان محدود چندمقیاسی

هدف اصلی پژوهش حاضر، توسعه روش المان محدود به منظور بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند تقویت شده با الیاف و مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار مکانیکی آن می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر کسر

¹ Concrete Damage Plasticity

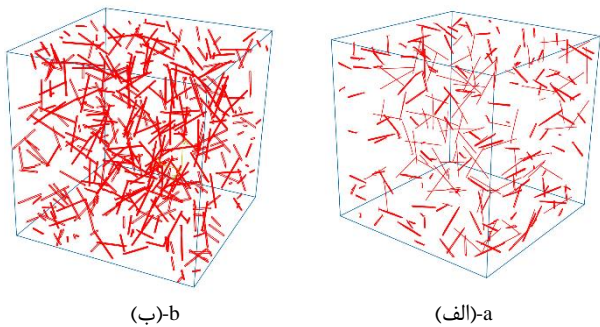


Fig. 6 Geometry of microfibrils with random distribution (a) 1% volume fraction and (b) 2% volume fraction

شکل 6 هندسه میکروالیاف با توزیع تصادفی برای الیاف با نسبت ظاهری 30 (الف) کسر حجمی 1% و (ب) کسر حجمی 2%

تنش ماکزیمم برشی یا استحکام ناحیه چسبیده (σ_{max})، (ب) حداکثر کرنش جدایش بحرانی δ_{in} ، که به ازای مقادیر بیشتر از آن سطح چسبیده ظرفیت تحمل تنش خود را از دست داده و ترک رشد می‌کند و G_c که انرژی جدایش می‌باشد نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مدل ناحیه چسبیده می‌باشد. با توجه به اینکه در مسئله حاضر، بارگذاری روی الیاف به صورت مود ترکیبی می‌باشد بنابراین، هر دو مؤلفه تنش‌های مماسی و عمودی تماس در انرژی شکست مشارکت دارند و از فرم توانی انرژی شکست به صورت رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

که در آن G_n و G_t به ترتیب، انرژی‌های شکست عمودی و مماسی می‌باشند و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی هستند که از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$G_n = \int_0^{\delta_{fin}} \sigma_n(\delta) d\delta \quad (2)$$

$$G_t = \int_0^{\delta_{fin}} \tau_t(\delta) d\delta \quad (3)$$

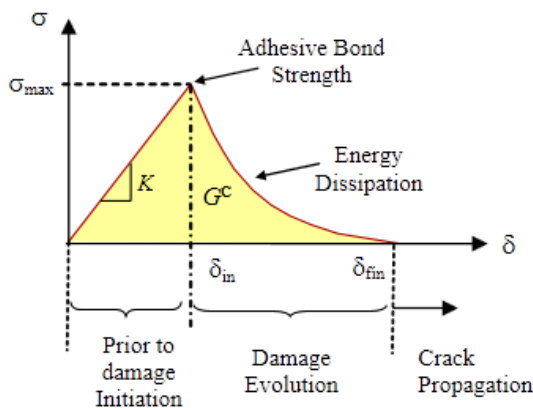
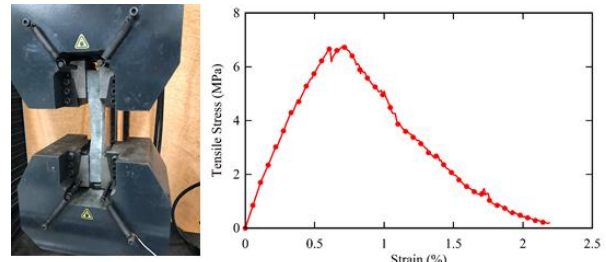
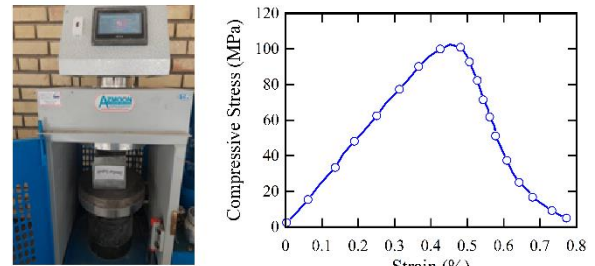


Fig. 7 Shear stress changes in the adhesion zone in terms of slip [37]
شکل 7 تغییرات تنش برشی ناحیه چسبندگی برحسب میزان لغزش [37]



a-(الف)



b-(ب)

Fig. 5 (a) Direct tensile test and tensile stress-strain curve, (b) Unidirectional compressive test and compressive stress-strain curve

شکل 5 الف) نحوه انجام آزمون کشش مستقیم و منحنی تنش-کرنش کششی و ب) نحوه انجام آزمون فشار و منحنی تنش-کرنش فشاری

1-3- ایجاد الیاف با توزیع تصادفی

به منظور ایجاد الیاف با توزیع تصادفی گاوسی از نرم‌افزار Digimat استفاده شده است. اندازه، توزیع و موقعیت ذرات در ماتریس را می‌توان با استفاده از پارامترهای موجود در نرم‌افزار تعیین نمود. با توجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق حاضر بررسی اثر کسر حجمی بر رفتار چسبندگی میلگرد با بتن می‌باشد، بنابراین با در نظر گرفتن مشخصات الیاف مطابق جدول 1، الیاف با کسر حجمی برابر 0، 1% و 2% ایجاد شده است. به عنوان نمونه، در شکل 6 تولید الیاف با توزیع تصادفی برای الیاف با نسبت ظاهری (نسبت طول به قطر الیاف) 30 و دو کسر وزنی 1 و 2 درصد، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الیاف به صورت تصادفی در حجم نمونه توزیع شده و این پراکندگی به نحوی می‌باشد که هیچ یک از الیاف با همدیگر تداخل ندارند.

2-3- تعریف اندرکنش بین الیاف و کامپوزیت

برای مدل‌سازی آسیب و پدیده جدایش در ناحیه تماس بین میکرو الیاف و کامپوزیت از تئوری مدل ناحیه چسبیده که بر پایه نمودارهای نیرو-جابجایی هستند، استفاده شده است. در مدل ناحیه چسبیده، رفتار ترک با قانون کشش-جدایش¹ که رابطه بین تنش و جابجایی دو سطح چسبیده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. تعریف خواص مواد در مدل ناحیه چسبیده به دو صورت نمایی و دوخطی انجام می‌پذیرد که هر کدام دارای توابع پتانسیل مربوط به خود هستند. در مقاله حاضر، تحلیل جدایش اتصال الیاف از کامپوزیت با استفاده از سطوح چسبیده در نرم‌افزار ABAQUS انجام می‌شود. رفتار مکانیکی مربوط به سطح تماس با استفاده از قانون تنش-جدایش و مبتنی بر مدل نمایی آن شبیه‌سازی می‌شود. همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است، در غیاب هر نوع خرابی رفتار سطح تماس خطی فرض می‌شود که این رفتار خطی با پیدایش خرابی از بین می‌رود. در این مدل فرض می‌شود که تمامی مکانیزم‌های ساختار میکرو و فرایند شکست را می‌توان به وسیله سه پارامتر مورد توجه قرار داد:

¹ Traction-separation Law

3-3- بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی

در تحقیق حاضر جهت گسترش نتایج آزمایشگاهی، به مدل‌سازی المان محدود آزمایش بیرون کشیدن میلگرد آجدار پرداخته شده است. آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر در مدل‌های سه‌بعدی، از المان چسب برای تعریف چسبندگی شیمیایی بین میلگرد و بتن کمک گرفته شده و جهت معتبرسازی مدل‌های عددی، نتایج اولیه المان محدود با نتایج آزمایشگاهی مربوط به بتن فوق‌توانمند بدون الیاف مقایسه شده و اقدام به کالیبره کردن مدل‌های المان محدود شده است. در این تحقیق، برای اولین بار میلگرد به صورت آجدار شبیه‌سازی شده و در شکل 8 مدل المان محدود یک نمونه به همراه شرایط مرزی و بارگذاری مورد استفاده نشان داده شده است. به منظور تعریف درگیری مکانیکی بین آج‌های میلگرد با بتن از قید تماسی Contact و معیار تماس سطح-به-سطح¹ استفاده شده است و ضریب اصطکاک برابر 0.3 در نظر گرفته شده است. در مدل‌های تحت بررسی با توجه به مدل آزمایشگاهی سطح بالایی نمونه‌های بتنی به صورت کامل مقید شده است و جابجایی تا حداکثر 20 mm به قسمت بالایی میلگرد اعمال می‌شود. با توجه به اینکه نواحی اطراف میلگرد دارای حساسیت بیشتری می‌باشد، بنابراین در این نواحی از المان‌های ریزتری استفاده شده است. در مدل‌های المان محدود برای مش‌بندی بتن، میلگرد و الیاف از المان‌های هرمی سه‌بعدی غیرخطی 10 گرهی (C3D10M) استفاده و به منظور تحلیل مسأله روش شبه استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. ابعاد مناسب المان‌ها پس از بررسی استقلال از شبکه تعیین شده است.

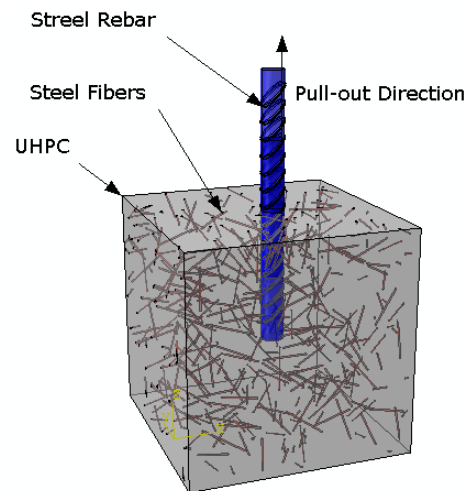


Fig. 8 Multi-scales Finite element model of pull-out test with boundary and loading conditions

شکل 8 مدل المان محدود چندمقیاسی آزمایش بیرون کشیدگی به همراه شرایط مرزی و بارگذاری

4- بررسی نتایج

در این بخش ابتدا با استفاده از آزمون‌های تجربی انجام شده به تعیین پارامترهای مدل ناحیه چسبنده پرداخته می‌شود و سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بیرون کشیدگی و مقاومت پیوستگی² میلگرد آجدار با بتن مطالعه می‌شود. اندرکنش بین الیاف و بتن با استفاده از قید تماسی و تعریف

المان‌های چسبنده صورت پذیرفت که پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به نحوی تعیین شدند که منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از مدل المان محدود بر نتایج تجربی آزمون بیرون کشیدگی میلگرد فولادی با قطر 16 mm از بتن فوق‌توانمند الیافی منطبق باشد (شکل 9). پارامترهای ناحیه چسبنده بین میلگرد و بتن با استفاده از نتایج آزمون تجربی بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بدون الیاف به دست آمده است که نتایج آن مطابق شکل 9 الف می‌باشد. پس از تأیید صحت مدل بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بدون الیاف، در ادامه پارامترهای ناحیه تماس چسبنده بین الیاف و بتن با استفاده از نتایج آزمون‌های تجربی مربوط به آزمون بیرون کشیدگی میلگرد از بتن الیافی به دست آمده است و نتایج آن در شکل 9 ب آمده است. پس از کالیبره کردن نتایج، مشخصات رفتاری مدل ناحیه چسبنده مشخص شده در شکل 7، مطابق جدول 3 به دست آمده است. با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول 3، منحنی نیرو-لغزش مدل نهایی المان محدود و نتایج حاصل از آزمون تجربی نمونه‌های دارای 0 و 2 درصد الیاف در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همپوشانی مطلوبی هم از لحاظ شکل منحنی و هم از لحاظ میزان حداکثر نیروی بیرون کشیدگی نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود برقرار است و کمتر از 4% خطا در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی در نمونه آزمایشگاهی نسبت به نمونه المان محدود وجود دارد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که مدل المان محدود با دقت بسیار مناسبی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی را پیش‌بینی می‌کند و می‌توان با استفاده از آن تأثیر پارامترهای مختلف را مورد مطالعه قرار داد.

بررسی منحنی‌های نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل 9 نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان میلگرد، استفاده از الیاف باعث بهبود قابل توجهی در نیروی چسبندگی و پیوستگی میلگرد با بتن می‌شود. به عنوان نمونه برای میلگرد با قطر 16 mm حداکثر نیروی چسبندگی بتن فوق‌توانمند دارای 0 و 2 درصد وزنی الیاف به ترتیب برابر 70.6 kN و 78.5 kN می‌باشد که نشان می‌دهد استفاده از 2 درصد الیاف باعث افزایش 12 درصدی نیروی پیوستگی می‌شود که علت این امر را می‌توان در افزایش نیروهای مکانیکی در نتیجه اضافه کردن الیاف به بتن دانست. با توجه به شکل 9 مشاهده می‌شود که منحنی نیرو-لغزش میلگرد آجدار از سه بخش چسبندگی شیمیایی، پایداری اصطکاکی و پیوستگی برشی تشکیل می‌شود. در ابتدای بارگذاری، بخش OA، مکانیزم اصلی مقاومت در برابر نیروهای خارجی چسبندگی شیمیایی بین میلگرد و بتن می‌شود و در این مرحله هیچ لغزشی قابل اندازه‌گیری نیست. با افزایش نیرو، چسبندگی شیمیایی از بین رفته و عواملی مانند پایداری اصطکاکی و درگیری مکانیکی بین بتن و آج‌های میلگرد باعث بالا رفتن مقاومت پیوستگی می‌شود (بخش AB). در ادامه به علت وجود پیوستگی برشی میلگرد پیوستگی خود را با بتن حفظ می‌کند. در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی مکانیکی میلگرد آجدار با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های میلگرد و کلیدهای بتنی بین آن‌ها انجام می‌شود. در نتیجه در محل تماس آج میلگرد و بتن، تنش فشاری ایجاد می‌شود که در اثر آن در مقطع عرضی بتن اطراف میلگرد تنش‌های حلقوی کششی و در کلیدهای بتن بین آج‌ها تنش برشی تولید می‌شود. با توجه به این میدان تنش، دو نوع مود شکست پیوستگی قابل پیش‌بینی است. اگر تنش برشی موجود در

¹ Surface-to-surface contact

² Bond Resistance

پیوستگی با نام شکافت¹ خوانده می‌شود. در شکل 10 دو نوع شکست متفاوت در نمونه‌های بتن فوق‌توانمند بدون الیاف و دارای 2 درصد وزنی الیاف نشان داده شده است.

در شکل‌های 11 و 12 توزیع تنش در سه فاز مجزای الیاف، میلگرد و بتن برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف و به ازای نیروی 60 kN نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در حضور الیاف و در نتیجه عمل پل‌زنی بین الیاف و بتن نیروی اعمالی به بتن در الیاف نیز توزیع شده و در نتیجه آن تنش‌های قابل ملاحظه‌ای در الیاف به وجود می‌آید. به عنوان نمونه در این حالت خاص نشان داده شده، حداکثر تنش ایجاد شده در سه فاز مجزای الیاف، میلگرد و بتن به ترتیب برابر 519.1 MPa، 289.3 MPa و 49.9 MPa به دست می‌آید. بر این اساس، مشاهده می‌شود که الیاف بخش قابل ملاحظه‌ای از نیروی انتقالی به بتن را دریافت کرده و در نتیجه باعث بهبود قابل توجهی در مشخصات مکانیکی بتن و رفتار پیوستگی آن با میلگرد می‌شود. با توجه به توزیع تنش به وجود آمده در میلگرد آجدار که در شکل 12 نشان داده شده است مشاهده می‌شود که به علت بیشتر بودن مهار مکانیکی میلگرد با بتن، حداکثر تنش ایجاد شده در میلگرد در محل آج‌ها می‌باشد.



Fig. 10 (a) Cracking and splitting path of UHPC specimen without fibers (b) Splitting failure for UHPC specimen with 2% of fibers by volume

شکل 10 الف) مسیر ترک و شکافته شدن بتن برای نمونه بتن فوق‌توانمند بدون الیاف (ب) خرابی از نوع بیرون کشیدگی برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف

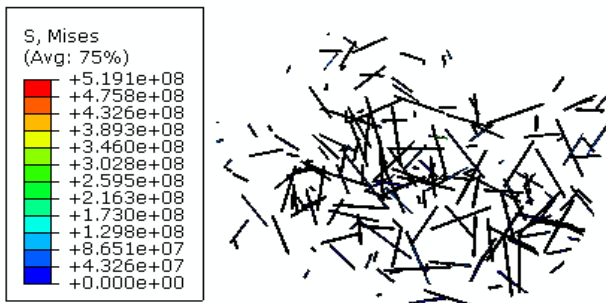


Fig. 11 Stress distribution in steel microfibers of UHPC for a sample with 2% by volume of fibers in force of 60 kN

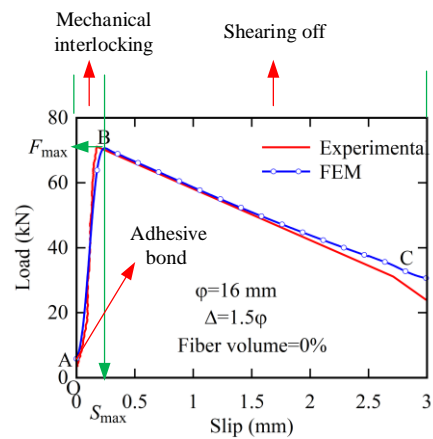
شکل 11 توزیع تنش در الیاف برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف و به ازای نیروی 60 kN

کلیدهای بتنی بین آج‌های میلگرد از حد مقاومت برشی بتن بگذرد، میلگرد به سمت خارج حرکت می‌کند و شکست از نوع بیرون کشیده شدن میلگرد از بتن خواهد بود.

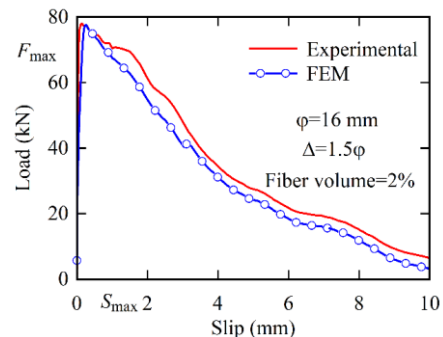
جدول 3 پارامترهای مدل ناحیه چسبیده به منظور تعریف اندرکنش میکرو الیاف فولادی و میلگرد آجدار با بتن فوق‌توانمند

Table 3 Adhesive zone model parameters to define the interaction of steel microfibers and ribbed rebar with UHPC

σ_{max}	δ_{in}	G_c	
8.23 MPa	$2.8 \times 10^{-3} \text{mm}$	0.23 MPa.mm	الیاف فولادی
130 MPa	$1.1 \times 10^{-3} \text{mm}$	2.32 MPa.mm	میلگرد آجدار



(الف)-a



(ب)-b

Fig. 9 Force-slip curve of the final finite element model and the results of the experimental test of ribbed rebar pull-out test of fiber-reinforced UHPC with (a) 0% fiber contents (b) 2% fiber contents

شکل 9 منحنی نیرو- لغزش مدل نهایی المان محدود و نتایج حاصل از آزمون تجربی بیرون کشیدگی میلگرد آجدار (الف) بتن فوق‌توانمند بدون الیاف و (ب) بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد الیاف

اگر تنش‌های حلقوی کششی، پیش از آنکه کلید بتن بین دو آج مجاور به صورت برشی کنده شود، از حد مقاومت کششی بتن تجاوز کند، ترک‌های شعاعی در بتن اطراف میلگرد ایجاد و نهایتاً موجب خردشدگی پوشش بتنی اطراف میلگرد و گسیختگی و شکافت بتن می‌شود. در این مرحله از رفتار پیوستگی بتن و میلگرد آجدار، تأثیر اصطکاک در ظرفیت نیروی پیوستگی نهایی ناچیز است که در نتیجه شکست ترد و ناگهانی است. این نوع شکست

¹ Splitting

طول مهارشدگی و قطر میلگرد بر منحنی‌های نیرو-لغزش ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول مهارشدگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار پیوستگی میلگرد داشته و با افزایش طول مهارشدگی، نیروی بیرون کشیدگی نیز بیشتر می‌شود. با توجه به نتایج شکل 14 مشاهده می‌شود که به ازای طول مهارشدگی برابر 1.5ϕ و 4ϕ حداکثر نیروی بیرون کشیدگی به ترتیب برابر 70.3 kN و 98.3 kN به دست می‌آید که نشان دهنده افزایش حدود 40 درصدی در نیروی بیرون کشیدگی می‌باشد. نتایج مشابهی در خصوص تأثیر قطر میلگرد بر مقاومت پیوستگی با توجه به شکل 15 نیز مشاهده می‌شود. یعنی افزایش قطر میلگرد مقدار نیروی لازم برای ایجاد شکست پیوستگی را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش قطر میلگرد، سطح پیوستگی و درگیری مکانیکی میلگرد و بتن بیشتر می‌شود بنابراین افزایش نیروی پیوستگی نهایی منطقی می‌باشد. به ازای طول مهارشدگی برابر 2.5ϕ با افزایش قطر میلگرد از 12 mm به 18 mm ، نیروی پیوستگی نهایی از مقدار 48.2 kN به 93.8 kN افزایش می‌یابد که نشان دهنده بیشتر شدن حدود 95 درصدی نیروی بیرون کشیدگی می‌باشد. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود، زمانی که حداکثر تنش پیوستگی حاصل می‌شود، مکانیزم تحمل بار از بین رفته و مقاومت اتصال باقیمانده اساساً به مقاومت اصطکاکی وابسته می‌شود. پس از انجام تحلیل‌های امان محدود و بررسی نحوه شکست نمونه‌ها مشخص گردید که مطابق شکل 16 میلگردهای فولادی به صورت لغزشی از بتن فوق‌توانمند الیافی خارج می‌گردند و هیچکدام از میلگردهای فولادی به مرز تنش جاری شدن نرسیدند. همچنین، با توجه به شکل 16 مشاهده می‌شود که با افزایش الیاف مورد استفاده در بتن، حداکثر تنش ایجاد شده در میلگرد نیز افزایش می‌یابد و بیشترین تنش در اطراف آج‌های میلگرد ایجاد می‌شود.

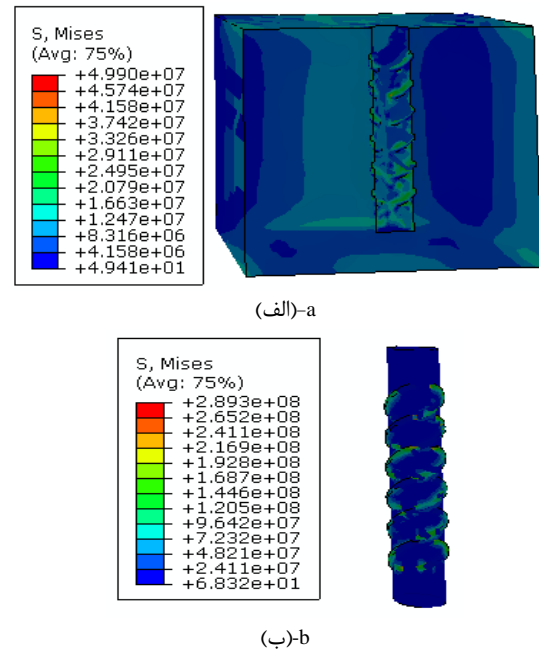


Fig. 12 Stress distribution in three separate phases of fibers, rebar and UHPC for a sample with 2% by volume of fibers in force of 60 kN (a) UHPC and (b) ribbed rebar

شکل 12 توزیع تنش در سه فاز مجزای الیاف، میلگرد و بتن برای نمونه بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف و به ازای نیروی 60 kN (الف) بتن فوق‌توانمند و (ب) میلگرد آجدار

در ادامه تأثیر طول مهارشدگی و قطر میلگرد بر رفتار پیوستگی میلگرد و بتن فوق‌توانمند الیافی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل‌های 13 و 14 تأثیر

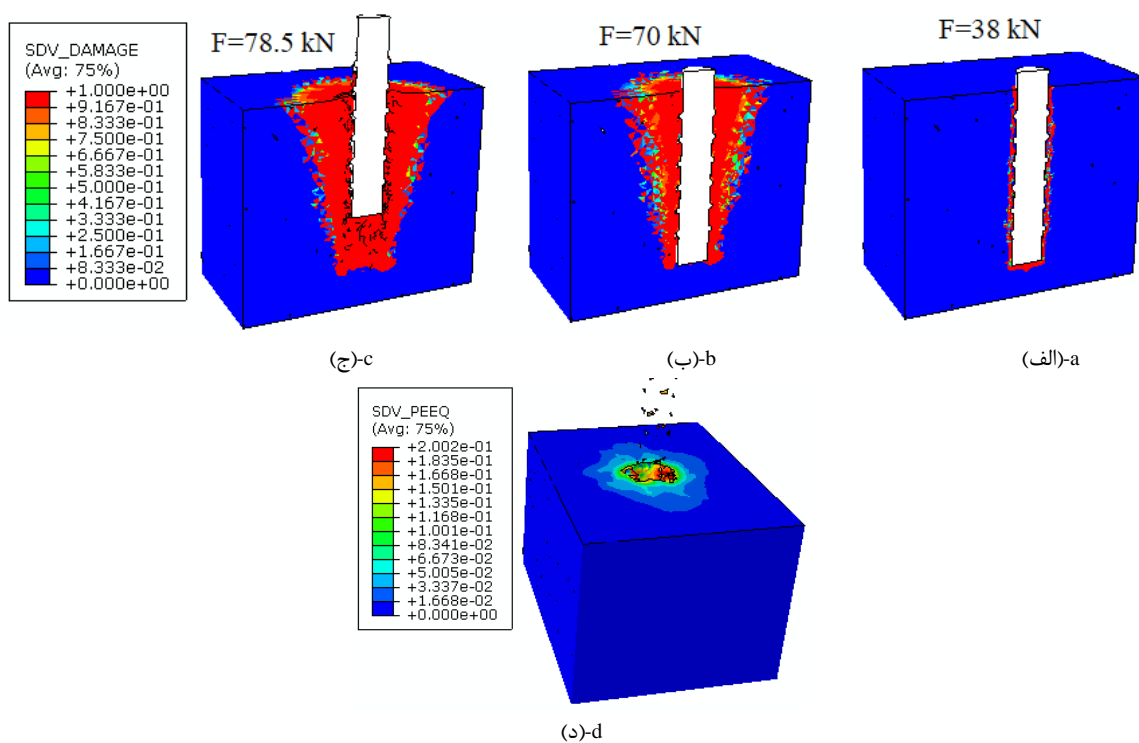


Fig. 13 failure distribution and pull-out of ribbed rebar from UHPC with 2% of steel fibers in three areas: (a) chemical bonding, (b) mechanical bonding, (c) maximum pull-out force and (d) final state after pull-out

شکل 13 توزیع خرابی و نحوه بیرون کشیدگی میلگرد آجدار از بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد وزنی الیاف در سه ناحیه (الف) پیوستگی شیمیایی، (ب) پیوستگی مکانیکی، (ج) حداکثر نیروی بیرون کشیدگی و (د) حالت نهایی پس از بیرون کشیدگی

آن بر بیشتر شدن نیروی پیوستگی نهایی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش میزان الیاف از 0% به 1.5% نیروی پیوستگی نهایی در حدود 28% بیشتر می‌شود، در صورتی که با افزایش الیاف از 1.5% به 2%، نیروی پیوستگی نهایی تنها در حدود 3% افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در ناحیه چسبندگی مکانیکی میلگرد و بتن، الیاف باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌شوند، بنابراین استفاده از الیاف در این ناحیه بیشترین تأثیر را داشته و در ناحیه پیوستگی برشی به علت کاهش درگیری الیاف و بتن، تأثیر الیاف بر نیروی بیرون کشیدگی تقریباً قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

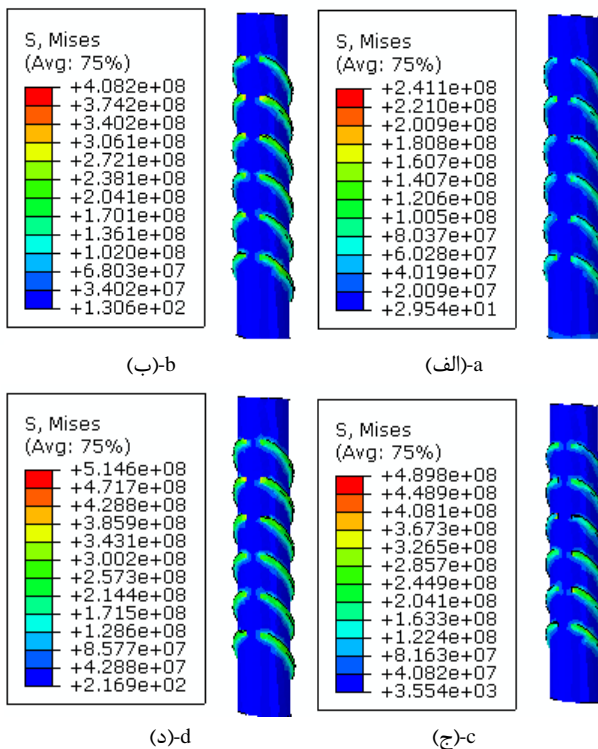


Fig. 16 Stress distribution in rebar in UHPC containing (a) 0% fibers, (b) 1% fibers, (c) 1.5% fibers and (d) 2% fibers

شکل 16 توزیع تنش در میلگرد واقع در بتن فوق‌توانمند الیافی حاوی 0 درصد الیاف، (ب) 1 درصد الیاف، (ج) 1.5 درصد الیاف و (د) 2 درصد الیاف

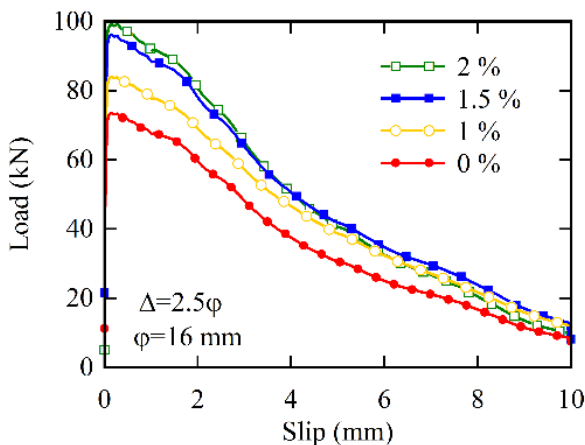


Fig. 17 Force-slip curve in samples with different content of steel microfibers

شکل 17 منحنی نیرو-لغزش در نمونه‌های دارای مقادیر مختلف میکروالیاف فولادی

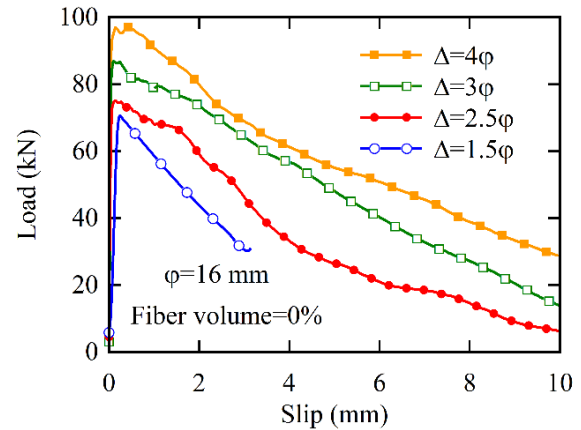


Fig. 14 Effect of bound length on the force-slip curve of rebar and UHPC

شکل 14 تأثیر طول مهارشدگی بر منحنی نیرو-لغزش میلگرد و بتن فوق‌توانمند

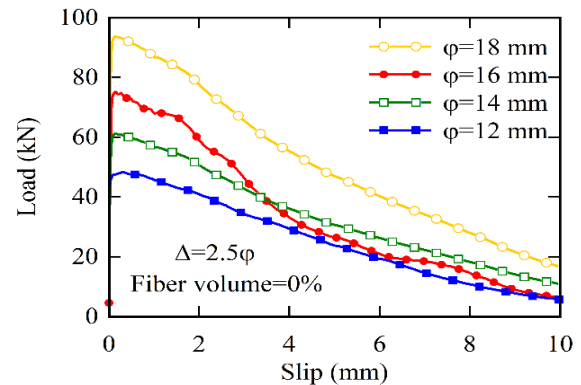


Figure 15 Effect of rebar diameter on the force-slip curve of rebar and UHPC

شکل 15 تأثیر قطر میلگرد بر منحنی نیرو-لغزش میلگرد و بتن فوق‌توانمند

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های چسبندگی میلگرد با بتن فوق‌توانمند الیافی در جدول 4 اثر طول مهارشدگی، قطر میلگرد و کسر وزنی الیاف بر پاسخ بیرون کشیدگی از جمله نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، تنش مؤثر بیرون کشیدگی در هر حالت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیروی بیرون کشیدگی و کل کار بیرون کشیدگی (مساحت زیر منحنی نیرو-لغزش) با افزایش قطر، طول مهارشدگی و میزان الیاف افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای میلگرد با قطر 20 mm، با افزایش میزان الیاف از 0 به 2% نیروی بیرون کشیدگی و کار بیرون کشیدگی به ترتیب در حدود 30% و 22% افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که تنش پیوستگی با افزایش قطر میلگرد کاهش می‌یابد ولی عکس این نتیجه در مورد کسر حجمی الیاف صادق بوده و با بیشتر شدن میزان الیاف مورد استفاده در بتن فوق‌توانمند الیافی، تنش پیوستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف فولادی بیرون کشیدگی میلگرد از بتن را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشند. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر پیوستگی میلگرد و بتن فوق‌توانمند، کسر وزنی الیاف مورد استفاده می‌باشد که در شکل 17 منحنی نیرو-لغزش در نمونه‌های دارای مقادیر مختلف میکروالیاف فولادی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف باعث بیشتر شدن نیروی پیوستگی نهایی می‌شود ولی با افزایش بیشتر کسر وزنی الیاف اثر افزودن

جدول 4 اثر طول مهارشدگی، قطر میلگرد و میزان الیاف بر نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، تنش مؤثر بیرون کشیدگی

Table 4 Effect of bound length, rebar diameter and fibers content on pull-out force, slip related to maximum pull-out force, pull-out energy and effective pull-out stress

نیروی بیرون کشیدگی (kN)	لغزش (mm)	انرژی بیرون کشیدگی (N/mm)	تنش مؤثر (MPa)	قطر میلگرد ϕ (mm)	طول مهارشدگی (Δ/ϕ)	میزان الیاف (%)
48.3	0.311	281	427.3	12	1.5	0
61.2	0.236	328	397.8	14		
70.1	0.145	359	348.8	16		
86.8	0.139	526	341.8	18		
106.4	0.132	604	338.9	20		
57.8	0.296	308	511.3	12	2.5	1
69.5	0.220	384	451.7	14		
88.3	0.142	440	439.6	16		
104.9	0.123	603	412.4	18		
121.0	0.105	671	385.4	20		
135.6	0.139	659	431.8	20	2.5	0
142.4	0.134	743	453.5			1
169.6	0.120	781	540.1			1.5
177.3	0.114	804	564.6			2

6- مراجع

- [1] Ghaderi, M., Ghaffarzadeh, H. and Maleki, V. A., "Investigation of Vibration and Stability of Cracked Columns under Axial Load" *Earthquakes and Structures*, Vol. 9, No. 6, pp. 1181-1192, 2015.
- [2] Makul, N., "Principles of Cement and Concrete Composites", Springer Nature, 2021.
- [3] Gencil, O., Karadag, O., Oren, O. H. and Bilir, T., "Steel Slag and Its Applications in Cement and Concrete Technology: A Review" *Construction and Building Materials*, Vol. 283, pp. 34-56, 2021.
- [4] Rezaee, M., Vahid A. Maleki. "An analytical solution for vibration analysis of carbon nanotube conveying viscose fluid embedded in visco-elastic medium." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* Vol. 229, No. 4, pp. 644-650, 2015.
- [5] Wang, L., He, T., Zhou, Y., Tang, S., Tan, J., Liu, Z. and Su, J., "The Influence of Fiber Type and Length on the Cracking Resistance, Durability and Pore Structure of Face Slab Concrete" *Construction and Building Materials*, Vol. 282, pp. 34-56, 2021.
- [6] Ghaderi, M., Maleki, V. A. and Andalibi, K., "Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls under Blast Loading by Frp and Spray on Polyurea" *Cumhuriyet Science Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 462-477, 2015.
- [7] Vahidi Pashaki, Pooyan, Milad Pouya, Vahid A. Maleki. "High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [8] Wang, J., Yu, R., Xu, W., Hu, C., Shui, Z., Qian, D., Leng, Y., Liu, K., Hou, D. and Wang, X., "A Novel Design of Low Carbon Footprint Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Based on Full Scale Recycling of Gold Tailings" *Construction and Building Materials*, Vol. 304, pp. 78-95, 2021.
- [9] Guan, D., Chen, Z., Liu, J., Lin, Z. and Guo, Z., "Seismic Performance of Precast Concrete Columns with Prefabricated Uhpj Jackets in Plastic Hinge Zone" *Engineering Structures*, Vol. 245, pp. 45-67, 2021.
- [10] Hung, C.-C., El-Tawil, S. and Chao, S.-H., "A Review of Developments and Challenges for Uhpj in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design" *Journal of Structural Engineering*, Vol. 147, No. 9, pp. 12-42, 2021.

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود چندمقیاسی به بررسی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد آجدار از بتن فوق‌توانمند الیافی پرداخته شد. اندرکنش بین الیاف و میلگرد با بتن با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی شده است که پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج آزمون تجربی بیرون کشیدگی میلگرد به دست آمده است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود با نتایج آزمون تجربی انجام شده، تأثیر طول مهارشدگی، قطر و کسر حجمی الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی میلگرد آجدار با بتن مطالعه شد. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر عبارت است از:

- نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که روش المان محدود چندمقیاسی ارائه شده با دقت مناسبی رفتار بیرون کشیدگی میلگرد از بتن فوق‌توانمند الیافی را پیش‌بینی می‌کند و با استفاده از آن می‌توان بدون نیاز به انجام آزمون‌های تجربی زمان‌بر و پر هزینه تأثیر بسیاری از پارامترهای مؤثر را با دقت مناسبی مورد مطالعه قرار داد.
- با افزایش میزان الیاف از 0% به 1.5% نیروی پیوستگی نهایی در حدود 28% بیشتر می‌شود، در صورتی که با افزایش الیاف از 1.5% به 2%، نیروی پیوستگی نهایی تنها در حدود 3% افزایش می‌یابد.
- بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به هزینه بالای الیاف و همچنین مشکلات موجود در مخلوط کردن مقادیر بالای الیاف در بتن، استفاده از 1.5% میکروالیاف فولادی جهت دستیابی به مقاومت پیوستگی مناسب بین میلگرد و بتن هم به لحاظ اقتصادی و هم به لحاظ اجرایی مطلوب می‌باشد.
- با افزایش میزان الیاف، تنش ایجاد شده بر روی میلگرد افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد به طوری که برای بتن فوق‌توانمند دارای 2 درصد الیاف، حداکثر تنش ایجاد شده در میلگرد در حدود 113 درصد نسبت به حالت متناظر در نمونه بدون الیاف بیشتر می‌باشد. بر این اساس در طراحی میلگردهای مورد استفاده در بتن‌های فوق‌توانمند الیافی باید میزان تنش اعمالی بر آن‌ها نیز در نظر گرفته شود تا بتوان از حداکثر ظرفیت عملکرد پیوستگی میلگرد با بتن استفاده نمود.

- Loading“ Composite Structures, Vol. 93, No. 9, pp. 2250-2259, 2011
- [28] Budhe, S., Banea, M., De Barros, S. and Da Silva, L., “An Updated Review of Adhesively Bonded Joints in Composite Materials“ International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 72, pp. 30-42, 2017.
- [29] Velasco, M., Graciani, E., Távora, L., Correa, E. and París, F., “Bem Multiscale Modelling Involving Micromechanical Damage in Fibrous Composites“ Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 93, pp. 1-9, 2018.
- [30] París, F., Correa, E. and Mantič, V., “Micromechanical Evidences on Interfibre Failure of Composites“ in: The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites, Eds., pp. 359-390: Springer, 2017.
- [31] Vahidi Pashaki, P., Pouya, M. and Maleki, V. A., “High-Speed Cryogenic Machining of the Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites: Finite Element Analysis and Simulation“ Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [32] Esmaili, J., Andalibi, K., Gencel, O., Maleki, F. K. and Maleki, V. A., “Pull-out and Bond-Slip Performance of Steel Fibers with Various Ends Shapes Embedded in Polymer-Modified Concrete“ Construction and Building Materials, Vol. 271, pp. 121-131, 2021.
- [33] Bouhala, L., Makradi, A., Belouettar, S., Younes, A. and Natarajan, S., “An Xfem/Czm Based Inverse Method for Identification of Composite Failure Parameters” Computers & Structures, Vol. 153, pp. 91-97, 2015.
- [34] Ren, G. M., Wu, H., Fang, Q., Liu, J. Z., “Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC” Construction and Building Materials, Vol. 163, pp. 826-839, 2018.
- [35] RILEM-CEB-FIP-RC6., Recommendation Rc 6: Bond Test Reinforcement Steel. 2. Pull-out Test, Georgi Publishing Company Paris, 1983 .
- [36] Carvalho, E. P., Ferreira, E. G., Cunha, J. C. d., Rodrigues, C. d. S. and Maia, N. d. S., “Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars“ Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 14, pp. 1932-1951, 2017.
- [37] Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., Little, D. and Sanchez-Silva, M., “Probabilistic Modeling of the Effect of Air Voids on the Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Subjected to Moisture Diffusion“ Asphalt Paving Technology-Proceedings Association of Asphalt Technologists, Vol. 79, pp. 221, 2010.
- [11] Ashrafian, A., Berenjian, J. and Asghari Tilaki, F., “Optimization of Mixture Proportions of Self-Compacted Fiber Reinforced Concrete Incorporating Polypropylene Using Genetic and Crow Search Algorithms“ Modares Civil Engineering journal, Vol. 20, No. 3, pp. 1-12, 2020.
- [12] Hosseini, M. and Fakhri, D., “Experimental Study of Effect of Glass and Polypropylene Hybrid Fibers on the Physical and Mechanical Properties of Concrete and Cement Mortar“ Journal of Mineral Resources Engineering ,Vol. 34, pp. 34-56, 2021.
- [13] adlparvar, m., Taghavi Parsa, M. H. and Mahmoodabadi, M., “Study and Design of Prefabricated Fiber Concrete Segments of Metro Tunnels Using with the Beam-Spring Method“ Road, Vol. 134, pp. 45-67, 2020.
- [14] Gholhaki, M., Pachideh, G. and Rezaifar, O., “An Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers at High Temperatures“ Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 167-179, 2017.
- [15] Esmaili, J., Sharifi, I., Andalibi, K. and Kasaei, J., “Effect of Different Matrix Compositions and Micro Steel Fibers on Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete“ in *Proceeding of IOP Publishing*, pp. 012031 .
- [16] Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asgharian Jeddi, A. A. and Nasrollahzadeh, K., “Increasing the Efficiency of Carbon Fiber Bundles in Reinforcing Fine Grained Concrete: An Experimental Study of Flexural Bearing Capacity“ Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 310-318, 2019.
- [17] Sezari, M. and Ashkezari, G. D., “Investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile“ Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology Vol. 23, No. 9, pp. 23-45, 2018.
- [18] Aram Partan, M., Eskandari, H., Lezgy-Nazargah, M. and Gharouni Nik, M., “Evaluating the Effect of Forta and Polypropylene Fibers on Compressive Strength, Ductility and Energy Absorption of Cylindrical Concrete Specimens“ Concrete Research, Vol. 14, No. 2, pp. 53-67, 2021.
- [19] sabbaghian, m. and Kheyroddin, A., “Experimental Investigation of the Effect of Fiber on Mechanical Properties and the Age of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites” Concrete Research, Vol. 12, No. 4, pp. 53-68, 2019.
- [20] Hajforoush, M., Kheyroddin, A. and Rezaifar, O., “The Effect of Magnetic Field on Bond Strength between Reinforcing Steel Bar and Steel Fiber Reinforced Concrete by Means of Pull-out Test“ Concrete Research, Vol. 13, No. 4, pp. 5-16, 2020.
- [21] Kalthoff, M. and Raupach, M., “Pull-out Behaviour of Threaded Anchors in Fibre Reinforced Ordinary Concrete and Uhpcc for Machine Tool Constructions“ Journal of Building Engineering, Vol. 33, pp. 89-96, 2021.
- [22] Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M. and de Brito, J., “Bond Behaviour of High-Strength Steel Rebars in Normal (NSC) and Ultra-High Performance Concrete (UHPC)“ Journal of Building Engineering, Vol. 33, pp. 34-57, 2021.
- [23] Zhou, Z. and Qiao, P., “Bond Behavior of Epoxy-Coated Rebar in Ultra-High Performance Concrete“ Construction and Building Materials, Vol. 182, pp. 406-417, 2018.
- [24] Khani, N., Yildiz, M. and Koc, B., “Elastic Properties of Coiled Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposite: A Finite Element Study“ Materials & Design, Vol. 109, pp. 123-132, 2016.
- [25] Esmaili, J. and Andalibia, K., “Development of 3d Meso-Scale Finite Element Model to Study the Mechanical Behavior of Steel Microfiber-Reinforced Polymer Concrete“ Computers and Concrete, Vol. 24, No. 5, pp. 413-422, 2019.
- [26] Karimzadeh, F., Ziaei-Rad, S. and Adibi, S., “Modeling Considerations and Material Properties Evaluation in Analysis of Carbon Nano-Tubes Composite“ Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 38, No. 4, pp. 695-705, 2007.
- [27] Ayatollahi, M., Shadlou, S. and Shokrieh, M., “Multiscale Modeling for Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites Subjected to Different Types of