

بررسی آزمایشگاهی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مایل از ماتریس پایه سیمانی

احسان اله ضیغمی^۱، فرشید جندقی علایی^{۲*}، منصور جامعی^۳، مسعود سلطانی محمدی^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه شاهرود

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شاهرود

۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه شاهرود

۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

farshidja@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۶/۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۴/۱۴]

چکیده- ماتریس‌های پایه سیمانی دارای مقاومت کششی و شکل‌پذیری ناچیز است. افزودن الیاف به این ماتریس‌ها سبب بهبود مشخصات مکانیکی آنها می‌شود. مقاومت کششی پس از ترک‌خوردگی مواد مرکب سیمانی مسلح شده با الیاف فولادی به صورت مستقیم با تعداد الیاف عبور کننده از عرض ترک و رفتار بیرون کشیده شدن هرکدام از الیاف مرتبط است. بنابراین شناخت دقیق رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد، به منظور فهم رفتار کششی تک محوره و رفتار خمشی بتن‌های الیافی مسلح با الیاف فولادی ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که الیاف فولادی قلابدار یکی از کاراترین نوع الیاف مورد استفاده برای کاربردهای سازه‌ای است، پس بررسی و شناخت دقیق رفتار بیرون کشیدگی این نوع از الیاف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله یک مطالعه تجربی روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار در حالت‌هایی که الیاف عمود بر عرض ترک و یا به صورت مایل قرار می‌گیرند انجام شده و با بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار در زوایای تمایل ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و در طول مدفون‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر تاثیر زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد بارگذاری و طول مدفون الیاف، بر روی پاسخ بیرون کشیدگی شامل؛ بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، میزان موثر بودن الیاف و همچنین کنده‌شدگی ماتریس در هر حالت مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: الیاف فولادی قلابدار، رفتار بیرون کشیدگی، ماتریس پایه سیمانی مسلح به الیاف فولادی.

۱- مقدمه

داده شده است، الیاف همیشه بر امتداد ترک‌های بوجود آمده عمود نیستند و در جهات مختلف قرار می‌گیرند. هنگام باز شدن یک ترک در ماتریس، الیاف در زوایا و طول‌های مدفون مختلف تحت بار قرار می‌گیرند و باعث می‌شود در هنگام بیرون کشیده شدن این الیاف مایل از ماتریس، سازه‌های متفاوتی رخ دهد. به دلیل تاثیر اساسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف منفرد از ماتریس بر رفتار کلی این مواد مرکب، شناخت دقیق این پدیده و جزئیات آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [۱-۴].

اضافه کردن الیاف به ماتریس‌های پایه سیمانی علاوه بر بهبود شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، باعث افزایش قابلیت جذب انرژی و طاقت این مواد مرکب در مقایسه با ماتریس‌های پایه سیمانی بدون الیاف می‌شود. در هنگام انتشار ترک‌ها در ماتریس‌های پایه سیمانی، الیاف با استفاده از سازوکار پل زنی ترک‌ها مانع از گسترش سریع یک یا چند ترک و بهم‌پیوستگی آنها می‌شود. با این حال، به دلیل توزیع تصادفی الیاف در ماتریس، همان‌گونه که در شکل (۱) نشان

در این مطالعه در راستای انجام این هدف، آزمایش بیرون-کشیدگی روی الیاف با زوایای تمایل ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و با طول‌های مدفون ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر انجام گرفته است و اثر زاویه تمایل الیاف و طول مدفون روی پاسخ بیرون‌کشیدگی^۳ از جمله؛ بیشینه نیروی بیرون‌کشیدگی^۴، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون‌کشیدگی، میزان موثر بودن الیاف^۵ و همچنین کنده‌شدگی ماتریس^۶ در هر حالت بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- رفتار بیرون کشیدگی الیاف قلابدار فولادی

منحنی نمونه نیروی بیرون کشیدگی برحسب لغزش الیاف قلابدار فولادی در شکل (۲) نشان داده شده است. سه ساز و کار رفتاری مختلف در حین بیرون‌کشیدگی این الیاف بوجود می‌آید:

- ۱- چسبندگی برشی ارتجاعی بین الیاف و ماتریس در سطح مشترک.
- ۲- چسبندگی برشی اصطکاکی که امکان لغزش نسبی در سطح مشترک الیاف و ماتریس را فراهم آورده و هنگامی اتفاق می‌افتد که چسبندگی اولیه از بین برود.

شکل (۲) رفتار عمومی نیرو-لغزش الیاف قلابدار در روند بیرون

کشیدگی از ماتریس پایه سیمانی [۱۳، ۱۲]



Fig. 2. General pull-out force vs. slip behavior of hooked steel fiber from cementitious matrix [12,13]

- 3 Pull-out response
- 4 Maximum pull-out force
- 5 Fiber efficiency
- 6 Matrix spalling

شکل (۱) پل زنی ترک توسط الیاف [۹]

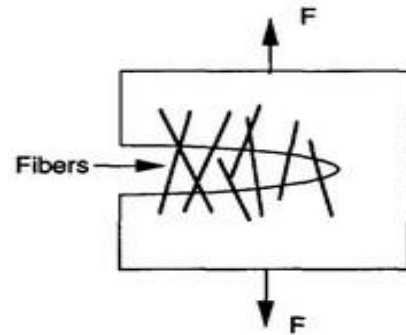


Fig. 1. Fiber bridging over crack [9]

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در خصوص رفتار بیرون-کشیدگی الیاف قلابدار به وسیله‌ی پژوهشگران صورت گرفته است [۵-۸]. با این حال، در مقایسه با رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف قلابدار فولادی همراستا با بار، مطالعات محدودتری روی رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف زاویه‌دار انجام شده است. از جمله این موارد می‌توان به مطالعات انجام شده به وسیله‌ی اوینگ و همکاران در خصوص بیرون‌کشیدگی هم‌زمان چند الیاف از ماتریس و توسعه مدل تحلیلی برای پیش‌بینی نیروی بیشینه و لغزش مربوطه اشاره نمود [۹]. رابینز و همکاران نیز مطالعاتی روی اثر مقاومت ماتریس، طول مدفون^۱ و زاویه تمایل الیاف^۲ در حین بازشدگی عرض ترک بر روی رفتار مواد مرکب سیمانی انجام دادند [۱۰]. لی و همکاران در پژوهشی به مطالعه روی رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف مایل مصنوعی از ماتریس پایه سیمانی پرداخته و اثر جهت‌گیری الیاف بر روی بیشینه نیرو و انرژی بیرون‌کشیدگی را بررسی قرار کردند [۱۱].

از آنجایی که مبنای راستی آزمایشی و کنترل مدل‌های تحلیلی توسعه یافته به وسیله‌ی پژوهشگران در خصوص بیرون-کشیدگی الیاف مایل، استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های الیاف در شرایط واقعی است، پس انجام مطالعات تجربی دقیق‌تر در این خصوص مورد نیاز است. همچنین با توجه به رفتار پیچیده الیاف مایل در روند بیرون‌کشیدگی، به دلیل وجود رفتارهای غیرخطی و ترکیب ساز و کارهای متفاوت در شرایط مختلف، لزوم انجام آزمایش‌های واقعی و بررسی جزئی‌تر نتایج آن در این خصوص ضروری است.

- 1 Embedded length
- 2 Inclination angle

روی منحنی بیرون کشیدگی می‌شود که نسبت به نقطه بیشینه اول مقدار کمتری دارد (شکل ۲). در ادامه در جایی که قسمت قلابدار الیاف تقریباً صاف می‌شود، تماس الیاف با ماتریس اطراف باعث ایجاد تنش اصطکاکی به نسبت ثابتی می‌شود (شکل ۳-د) که این مرحله باعث بوجود آمدن شاخه نزولی انتهای منحنی می‌شود [۱۲-۱۵].

اما مطابق شکل (۴) در صورتی که یک رشته الیاف نسبت به امتداد بارگذاری زاویه θ (زاویه تمایل) بسازد و نیروی وارد بر الیاف مایل برابر P_θ باشد این نیرو قابل تجزیه به دو مؤلفه هم-جهت با الیاف P_x و عمود بر امتداد الیاف P_y است. پژوهشگران بر این باورند که مؤلفه نیروی بیرون کشیدگی که موازی با امتداد الیاف است (P_x)، که مقدار آن از P_θ کمتر است، عمده بیرون کشیدگی الیاف را سبب می‌شود. در مقابل، مؤلفه P_y ، باعث اعمال یک تنش اضافی به گوه ماتریسی، خردشدگی موضعی ماتریس و کنده شدگی آن در محل خروج الیاف می‌شود، همچنین با افزایش زاویه θ تمرکز تنش در نقطه خروج الیاف بیشتر شده و آثار ایجاد شده روی ماتریس تشدید می‌شود [۱۱]. علاوه بر این، پژوهشگران مختلف افزایش نیروی بیشینه بیرون کشیدگی با بیشتر شدن زاویه تمایل الیاف را به دلیل افزایش پیچ و خم مسیری که الیاف در حین بیرون آمدن از آن عبور می‌کنند بیان نمودند. این پژوهشگران توضیح می‌دهند که در این حالت الیاف برای صاف شدن و بیرون کشیده شدن با مقاومت بیشتری مواجه می‌شوند [۱۶، ۱۷].

شکل (۴) بیرون کشیدگی الیاف مایل و ساز و کارهای تسلیم [۹]

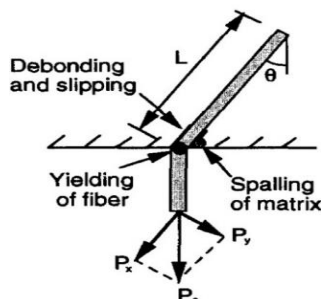


Fig. 4. Pull-out of inclined fibers and failure mechanisms [9]

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مایل

۳. مهار مکانیکی که باعث بوجود آمدن نقاط محلی انتقال نیرو بین الیاف و ماتریس می‌شود.

شکل (۳) مراحل مختلف بیرون کشیدگی الیاف قلابدار از ماتریس پایه

سیمانی [۱۲، ۱۳]

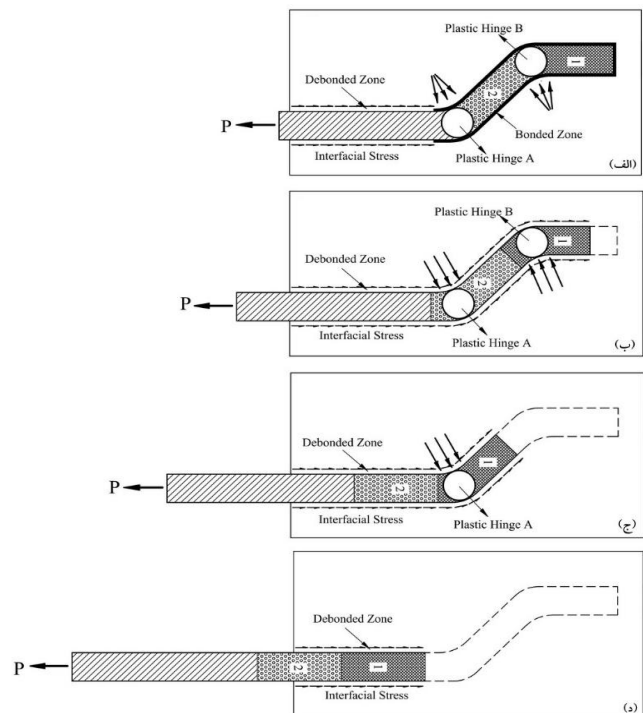


Fig. 3. Main stages of the pull-out process of hooked fibers from a cementitious matrix

پاسخ بیرون کشیدگی الیاف فولادی قلابدار را می‌توان به سه مرحله اصلی تقسیم بندی نمود: در بخش ابتدایی، الیاف به تدریج از ماتریس اطراف جدا می‌شود، که این جداسازی از انتهای آزاد الیاف آغاز شده و به سمت انتهای مدفون آن پیش می‌رود (شکل ۳-الف). این روند با یک ناحیه طولانی‌تر دنبال می‌شود که در آن دو مفصل خمیری در قسمت‌های منحنی شکل انتهایی الیاف (نقاط A و B) بوجود می‌آید. این دو بخش که باعث فعال شدن چسبندگی، اصطکاک و مهار مکانیکی می‌شود باعث بوجود آمدن شاخه صعودی منحنی بیرون کشیدگی می‌شود (شکل ۲). پس از آن قسمت دوم الیاف (قسمت ۲ در شکل ۳-ب) صاف شده و به سمت قسمت مستقیم مجرای الیاف حرکت می‌کند، بخش اول (قسمت ۱ در شکل ۳-ج) در جایی که قسمت دوم در ابتدا خم شده بود، یک بار دیگر خمیده می‌شود. این روند باعث ایجاد نقطه بیشینه دوم

شکل (۵) الیاف قلابدار فولادی مورد استفاده (Durocem 50/1.0)



Fig. 5. Durocem 50/1.0 hooked steel fiber

۳-۲- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

با توجه به قرارگیری الیاف در زوایای مختلف و با طول‌های مدفون متفاوت در ماتریس پایه سیمانی، قرارگیری الیاف در موقعیت مناسب و راستای مشخص، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، بدین منظور، علاوه بر ساخت قالب‌های مناسب از جنس پلی‌اتیلن، یک ساز و کار فلزی صلیبی شکل برای نگه داشتن الیاف در وضعیت مطلوب طراحی و ساخته شد. در شکل (۶) ابعاد و مشخصات قالب استوانه‌ای و اجزای مربوطه و در شکل (۷) مراحل و نحوه جای‌گذاری الیاف در قالب نشان داده شده است.

ساخت نمونه‌ها با استفاده از مخلوط‌کن Hobart صورت پذیرفت و روند اختلاط مطابق مراحل نشان داده شده در شکل (۸) انجام شد.

شکل (۶) هندسه قالب و اجزای مربوط به آن

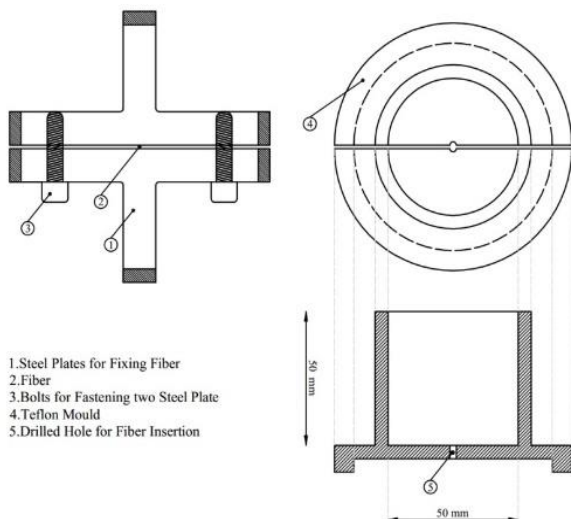


Fig. 6. Geometry of pull-out test mold

از ماتریس پایه سیمانی، نمونه‌های بیرون کشیدگی استوانه‌ای با قطر و ارتفاع یکسان (۵۰×۵۰ میلی‌متر) با زوایای تمایل ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و طول‌های مدفون ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر ساخته شد (از هر حالت ۵ نمونه و در جمع ۱۰۰ نمونه) این نمونه‌ها مورد آزمون بیرون کشیدگی قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای بیرون کشیدگی الیاف، لغزش آن در هر لحظه و نمودارهای نیرو-لغزش در هر حالت به دست آمد. در ادامه به جزییات برنامه آزمایشگاهی انجام شده پرداخته می‌شود.

۳-۱- مصالح

جدول (۱) نسبت‌های وزنی ماتریس مورد استفاده را ارائه می‌نماید. مقاومت فشاری این ماتریس برابر با ۴۰/۴ مگاپاسکال است. الیاف استفاده شده در ساخت نمونه‌ها از جنس فولادی و نوع قلابدار با نام تجاری Durocem 50/1.0 است. در شکل (۵) شکل این الیاف و در جدول شماره (۲) مشخصات مکانیکی آنها ارائه شده است.

جدول (۱) طرح اختلاط ماتریس پایه سیمانی

ماتریس	سیمان ^۳	میکروسیلیس	سنگدانه ^۲	آب	فوق روان‌کننده ^۱
نسبت وزنی	۱/۰۰	۰/۲۵	۱/۵۸	۰/۲۵	۰/۰۱۲

۱. فوق روان‌کننده PCE

۲. سنگدانه سلیسی با ابعاد ۰ تا ۵ میلی‌متر

۳. سیمان پرتلند تیپ II

Table 1. Composition of matrix mixtures by weight ratio

جدول (۲) مشخصات الیاف

نام الیاف	مهار مکانیکی	قطر (mm)	طول (mm)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مقاومت کششی (MPa)	جنس پوشش	مدول الاستیسیته (GPa)
Durocem 50/1.0	قلاب‌دار	۱/۰	۵۰	۷۸۵۰	۸۰۰	مس	۲۰۰

Table 2.

شکل (۱۰) نمونه‌های آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

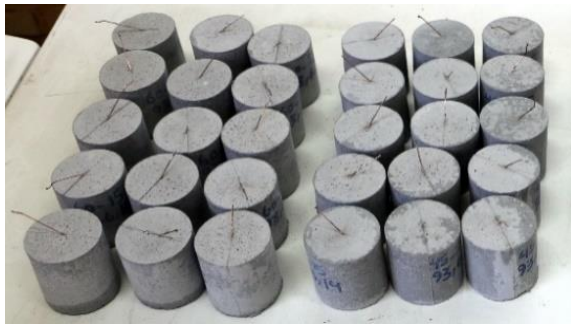


Fig. 10. Pull-out test specimens

با توجه به اهمیت قرارگیری الیاف در موقعیت مورد نظر، پس از عمل‌آوری نمونه‌ها و قبل از انجام آزمایش بیرون‌کشیدگی، به‌منظور اطمینان از عدم تغییر موقعیت اولیه الیاف از نمونه‌ها به‌روش رادیوگرافی تصویربرداری شد که برای نمونه یکی از این تصاویر در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه‌ها راستای اولیه قرارگیری الیاف در ماتریس تغییر نکرده و نمونه‌های ساخته شده از دقت کافی برخوردار است. شکل (۱۰) تعدادی از نمونه‌های آماده شده را برای انجام آزمون بیرون‌کشیدگی نشان می‌دهد.

۳-۳- چگونگی انجام آزمایش‌ها

به‌منظور انجام آزمون بیرون‌کشیدگی الیاف از ماتریس پایه سیمانی از هندسه و چیدمان مشخص شده در شکل (۱۱) استفاده شده است. این پیکره‌بندی عملکرد پل زنی ترک به وسیله الیاف و بیرون‌کشیدگی آنها را، هنگام بازشدگی ترک در مواد مرکب شبیه‌سازی می‌نماید. برای انجام آزمون بیرون‌کشیدگی نمونه‌ها، از دستگاه ساخته شده به وسیله پژوهشگران دانشگاه شاهرود که در شکل (۱۲) نشان داده شده، استفاده شده است. این دستگاه مجهز به یک نیروسنج^۱ با ظرفیت ۱۰۰۰ نیوتن بوده که بارگذاری نمونه‌ها را به صورت کنترل تغییر مکان و با سرعت ۰/۱۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌دهد. به‌منظور اعمال نیروی کششی، انتهای آزاد الیاف در درون فک نگهدارنده دستگاه قرار می‌گیرد. برای کاهش خطای ناشی از افزایش طول الیاف در ثبت لغزش، فاصله بین فک دستگاه

شکل (۷) نحوه و مراحل جایگذاری الیاف در درون قالب‌ها



Fig. 7. Fiber installation in pull-out specimen mold

پس از ریختن مخلوط در داخل قالب، عملیات متراکم کردن آن با استفاده از میز لرزان به مدت ۵ دقیقه انجام شد. سپس سطح نمونه‌ها پرداخت شده و برای جلوگیری از تبخیر سطحی، روی قالب‌ها با استفاده از پوشش‌های پلاستیکی پوشانده شد. قالب‌ها بعد از مدت زمان ۲۰-۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز داخل حوضچه آب قرار گرفتند.

شکل (۸) روند طرح اختلاط

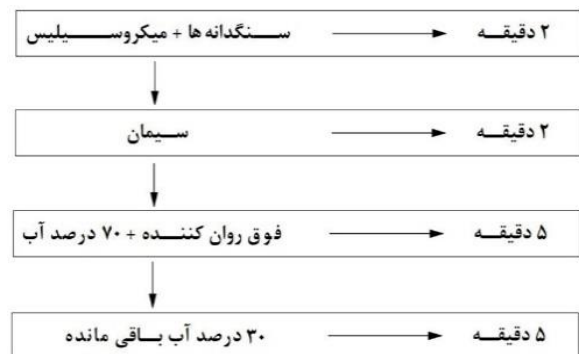


Fig. 8. Mixing procedure

شکل (۹) تصویربرداری با اشعه ایکس از نمونه ساخته شده

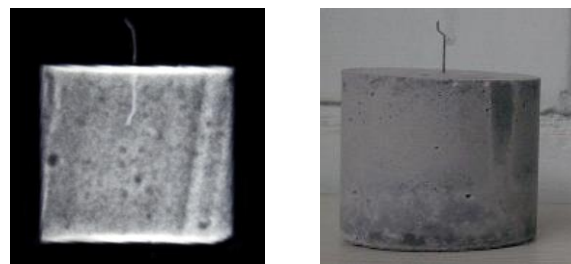


Fig. 9. X-ray imaging of samples

1 Load cell

شکل (۱۲) دستگاه آزمون بیرون کشیدگی الیاف

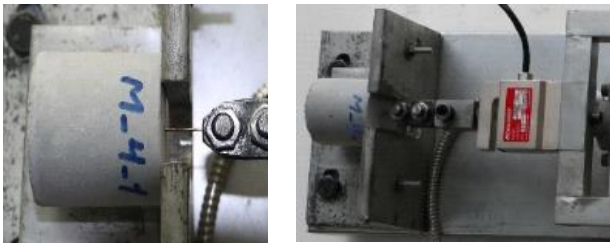


Fig. 12. Pull-out testing machine

با توجه به پیکره‌بندی در نظر گرفته شده برای انجام آزمون بیرون کشیدگی الیاف منفرد با استفاده از مدفون کردن تک الیاف در درون ماتریس با طول مدفون و زاویه تمایل دلخواه، امکان ثبت و شبیه‌سازی رفتار واقعی بیرون کشیده شدن الیاف در حین رشد ترک در یک ماده مرکب فراهم می‌شود.

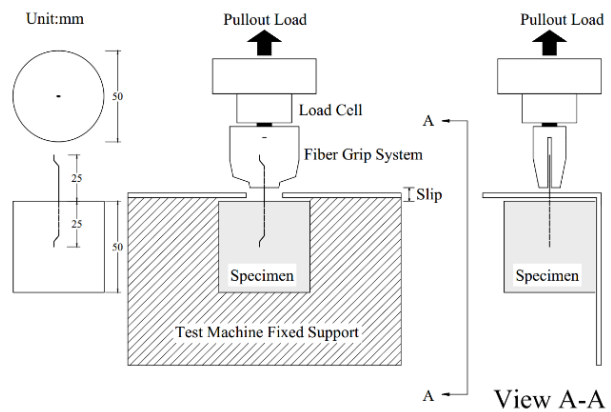
۳-۴ نتایج آزمایش‌ها

نتایج به دست آمده از انجام آزمون بیرون کشیدگی الیاف به صورت نمودارهای نیرو- لغزش برای تمام نمونه‌های ساخته شده در شکل (۱۳) رسم شده که مشتمل بر ۲۰ نمودار است، که با توجه به طول مدفون الیاف (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ میلی‌متر) و یا زاویه تمایل آنها نسبت به امتداد عمود (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) از یکدیگر متمایز شده‌اند. در هر یک از حالات حداقل ۵ نمونه مورد آزمون قرار گرفته است.

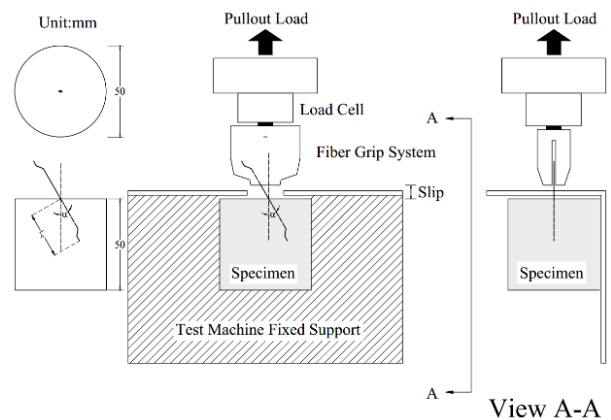
نتایج مربوط به بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، مقدار لغزش متناظر با بیشینه نیرو (معادل نصف عرض ترک باز شده در حالت ترک‌خوردگی ماده مرکب)، سطح زیر نمودار بیرون کشیدگی (انرژی بیرون کشیدگی) و نسبت بیشینه تنش به دست آمده در الیاف بر تنش نهایی آنها σ_{max}/f_u (مؤثر بودن الیاف) برای هر کدام از نمونه‌ها به همراه مقادیر متوسط آنها در هر حالت محاسبه شده و در جدول (۳) نشان داده شده است. در این قسمت، با تحلیل و بررسی این نمودارها و مشاهده مربوط به رفتار نمونه‌ها در روند بارگذاری، تاثیر زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد بارگذاری و طول مدفون الیاف، بر روی پاسخ بیرون کشیدگی شامل؛ بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، میزان مؤثر بودن الیاف و همچنین کنده‌شدگی ماتریس در هر حالت مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

طوری طراحی شده که تا حد امکان نزدیک به سطح نمونه باشد. لازم به توضیح است که در ترسیم نمودارهای نیرو- لغزش به منظور حذف کامل خطای ناشی از تغییر طول ارتجاعی الیاف، این مقدار در هر لحظه محاسبه شده و از مقدار لغزش ثبت شده کم شده است، که البته در مقایسه با لغزش ناشی از بیرون کشیدگی خود الیاف بسیار ناچیز است. بار اعمال شده به وسیله‌ی دستگاه در هر لحظه با استفاده از نیروسنج نصب شده بین فک نگهدارنده الیاف و قسمت جلویی دستگاه اندازه‌گیری می‌شود و برای ثبت لغزش ناشی از بیرون کشیده شدن الیاف از درون ماتریس از تغییر مکان سنج^۱ تعبیه شده در درون دستگاه بیرون کشنده استفاده می‌شود. برای هر کدام از آزمایش‌ها تعداد ۵ نمونه یکسان ساخته شد و تمام نمونه‌ها به صورت کامل تحت بارگذاری قرار گرفتند.

شکل (۱۱) هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش بیرون کشیدگی الیاف



(a) Aligned fiber specimen الف- نمونه الیاف مستقیم



(b) Inclined fiber specimen ب- نمونه الیاف مایل

Fig. 11. Single fiber pull-out test setup and specimen geometry

1 Linear variable displacement transducer (LVDT)

داده است، با توجه به نمودارهای شکل (۱۴) و اطلاعات جدول (۳) مشاهده می‌شود که، درصد الیاف گسیخته شده در زوایای ۶۰ درجه ۵۰٪، ۴۵ درجه ۶۵٪، ۳۰ درجه ۵۰٪، ۱۵ درجه ۴۰٪ و ۰ درجه ۵٪ است.

در روند آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی الیاف مایل در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش زاویه تمایل و افزایش طول مدفون، تعداد الیاف گسیخته شده افزایش می‌یابد که بیشترین تعداد آن در زاویه ۴۵ درجه و طول مدفون‌های ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر رخ

شکل (۱۳) نمودارهای نیرو - لغزش آزمون بیرون‌کشیدگی الیاف

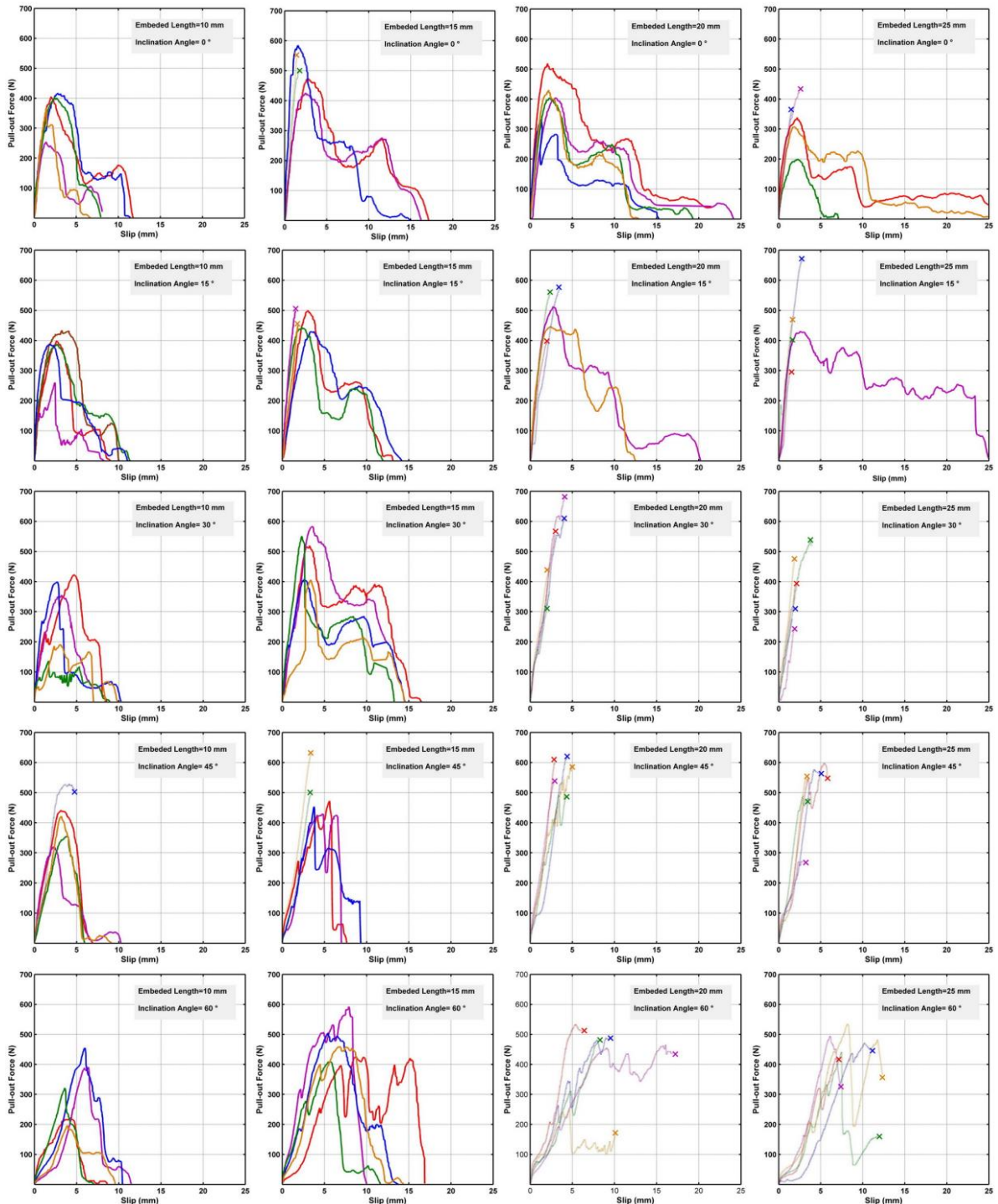


Fig. 13. Pull-out force vs. slip curves

جدول (۳) نتایج مربوط به بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه بیشینه نیرو و انرژی بیرون کشیدگی

Inclination Angle (deg.)	Embedded Length (mm)	Failure Mode	Peak Load (N)	Matrix Spalling	Avg. Peak Load (N)	Peak slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)	Pull-out Work (N.mm)	Avg. Pull-out Energy (N.mm)	σ_{max}^c (F_u (%))
0°	10	Pull-out	364.05	*	332.42	2.02	2.02	2111.21	1639.46	52.93
		Pull-out	228.51	*		1.38		1093.82		
		Pull-out	375.57	*		2.83		2183.32		
		Pull-out	362.61	*		2.41		1583.85		
		Pull-out	331.38	*		1.46		1225.23		
		Pull-out	383.94	*		2.84		3121.84		
	15	Pull-out	381.78	*	2.49	3257.42				
		Pull-out	367.65	*	1.55	1929.33				
		Pull-out	344.43	*	2.08	2476.41				
		Pull-out	352.53	*	2.39	2638.72				
		Pull-out	419.76	*	2.08	3835.30				
		Pull-out	363.78	*	3.12	3034.51				
15°	10	Pull-out	447.66	*	396.25	1.29	2.17	2749.12	2915.98	63.10
		Pull-out	363.15	*		2.23		2651.92		
		Pull-out	386.91	*		2.23		2309.14		
		Pull-out	487.26	*		2.21		3578.11		
		Fracture	436.70	*		3.11		637.16		
		Pull-out	431.82	*		1.388		4428.91		
	25	Pull-out	453.60	*	2.15	4810.90				
		Pull-out	450.63	*	1.72	4105.61				
		Pull-out	398.11	*	2.64	1638.60				
		Pull-out	260.52	*	2.45	721.92				
		Pull-out	386.74	*	2.73	1826.50				
		Pull-out	385.31	*	2.87	2219.80				
30°	10	Pull-out	433.10	*	372.74	3.26	2.79	2319.50	1745.26	59.35
		Pull-out	499.90	*		3.03		3044.51		
		Pull-out	465.60	*		1.68		604.52		
		Pull-out	430.12	*		3.77		3300.12		
		Fracture	443.61	*		2.31		2635.31		
		Fracture	409.93	*		1.57		432.10		
	15	Pull-out	396.71	*	1.98	583.49				
		Pull-out	512.01	*	2.78	4064.41				
		Pull-out	870.12	*	3.50	1422.61				
		Pull-out	554.51	*	2.32	940.73				
		Fracture	445.30	*	2.46	3405.94				
		Pull-out	528.71	*	2.65	4840.71				
30°	10	Pull-out	532.42	*	478.65	2.45	2.62	4954.18	3735.15	76.22
		Fracture	664.32	*		2.77		1338.10		
		Fracture	407.33	*		1.57		471.93		
		Fracture	476.32	*		1.68		565.68		
		Pull-out	422.42	*		3.33		1769.21		
		Pull-out	355.33	*		3.21		1567.00		
	25	Pull-out	398.84	*	3.95	1683.90				
		Pull-out	418.73	*	3.21	2007.71				
		Pull-out	381.95	*	3.08	1983.21				
		Pull-out	519.11	*	3.21	4661.22				
		Pull-out	583.50	*	3.50	4605.13				
		Pull-out	407.58	*	2.40	3277.31				
15	Pull-out	551.37	*	520.30	3.32	3.20	3142.37	3612.06	82.85	
	Pull-out	540.14	*		3.38		2374.45			

Inclination Angle (deg.)	Embedded Length (mm)	Failure Mode	Peak Load (N)	Matrix Spalling	Avg. Peak Load (N)	Peak slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)	Pull-out Work (N.mm)	Avg. Pull-out Energy (N.mm)	σ_{max}^c (F_u (%))
30°	20	Fracture	586.40	*	N.C.	3.23	N.C.	1198.60	N.C.	85.18
		Fracture	676.9	*		4.13		1947.60		
		Fracture	608.40	*		4.11		1767.60		
		Fracture	365.12	*		2.32		522.14		
		Fracture	437.81	*		2.22		627.07		
		Fracture	393.11	*		2.07		499.72		
	25	Fracture	256.22	*	1.9	252.09				
		Fracture	236.81	*	1.64	296.79				
		Fracture	533.21	*	3.81	1696.90				
		Fracture	432.31	*	1.92	627.46				
		Pull-out	440.60	*	3.17	1745.50				
		Pull-out	319.61	*	3.31	1184.31				
45°	10	Fracture	528.62	*	383.95	4.17	3.12	1825.11	1390.60	61.14
		Pull-out	353.84	*		3.79		1232.62		
		Pull-out	421.84	*		3.19		1400.12		
		Pull-out	472.00	*		5.62		2741.61		
		Pull-out	430.12	*		4.78		2287.72		
		Pull-out	453.51	*		3.75		2612.32		
	15	Fracture	492.15	*	3.36	1190.82				
		Fracture	624.81	*	3.39	1263.41				
		Fracture	600.61	*	2.97	1036.82				
		Fracture	536.91	*	2.93	1274.91				
		Fracture	619.92	*	4.38	1742.41				
		Fracture	491.84	*	3.41	1339.62				
60°	20	Fracture	591.64	*	N.C.	5.03	N.C.	1935.85	N.C.	90.47
		Fracture	598.31	*		5.44		2241.11		
		Fracture	270.82	*		2.66		495.88		
		Fracture	575.94	*		4.23		1534.11		
		Fracture	489.67	*		2.86		1137.71		
		Fracture	546.91	*		3.23		987.83		
	10	Pull-out	222.5	*	4.32	853.97				
		Pull-out	390.2	*	6.37	1532.81				
		Pull-out	454.4	*	6	2078.62				
		Pull-out	321.3	*	3.55	950.98				
		Pull-out	195.2	*	3.9	891.40				
		Pull-out	379.1	*	7.86	2327.11				
15	Pull-out	363.2	*	5.43	2528.72					
	Pull-out	409.4	*	5.72	1953.23					
	Pull-out	367.52	*	6.81	2569.32					
	Pull-out	371.36	*	8.39	2241.23					
	Fracture	533.2	*	5.38	1944.81					
	Fracture	454.2	*	9.05	5447.12					
20	Fracture	488.3	*	9.02	2837.62					
	Fracture	471.9	*	8.05	1895.55					
	Fracture	250.8	*	4.68	1379.82					
	Fracture	419.8	*	6.78	1406.23					
	Fracture	494.4	*	6.1	1730.61					
	Fracture	470.6	*	10.2	2299.71					
25	Fracture	441.1	*	7.48	2020.72					
	Fracture	534.3	*	8.19	3450.32					

Table 3. Result of peak pull-out load, slip at peak pull-out load and pull-out energy

شد که الیاف در امتداد بار صاف شده و باعث خردشدگی ماتریس تا نقطه ای با فاصله از مرکز نمونه قبل از بیرون کشیدگی شدند (در مورد گسیختگی الیاف نیز همین مورد به چشم می خورد). در شکل (۱۵) تعدادی از نمونه های آزمون بیرون کشیدگی نشان داده شده است. در نمودارهای بیرون کشیدگی الیاف فولادی از ماتریس مشاهده شد که در زوایای تمایل بالاتر از ۳۰ درجه به دلیل خردشدگی موضعی ماتریس و کنده شدن آن در نقطه خروج الیاف طول مدفون کاهش یافته و باعث افت مقدار نیروی بیشینه می شود.

شکل (۱۵) نمونه های آزمون بیرون کشیدگی



کنده شدگی ماتریس گسیختگی الیاف بیرون کشیدگی الیاف

Fig. 15. Pull-out test specimens

شکل (۱۴) تاثیر زاویه تمایل الیاف بر پاسخ بیرون کشیدگی

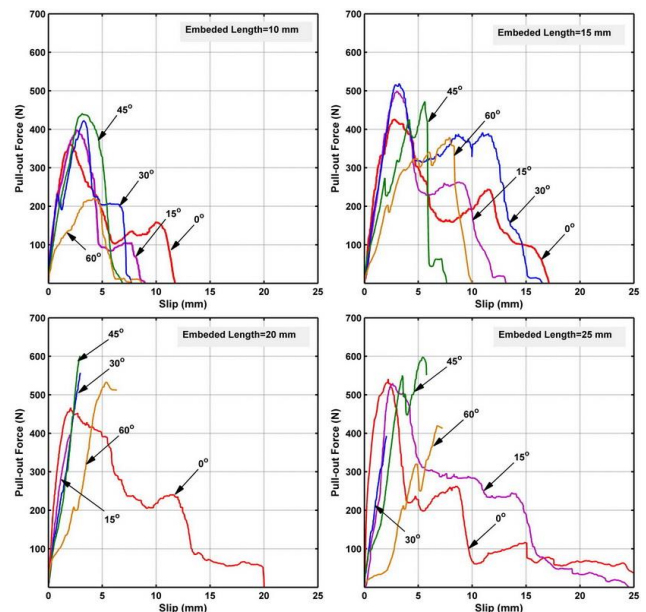


Fig. 14. Effect of fiber orientation on fiber pull-out behavior

در آزمایش های بیرون کشیدگی الیاف با زاویه تمایل بیشتر از ۳۰ درجه، الیاف از مرکز نمونه بیرون کشیده نشدند و مشاهده

دهد که با افزایش زاویه تمایل الیاف نسبت به امتداد بار، نیروی بیرون کشیدگی بیشینه تا زوایای حدود ۳۰ درجه افزایش و پس از آن در زوایای تمایل بالاتر (۴۵ و ۶۰ درجه) کاهش می‌یابد. به صورت کلی، با افزایش زاویه تمایل الیاف، تغییر مکان (لغزش) نظیر نیروی بیرون کشیدگی بیشینه افزایش می‌یابد که به دلیل خردشدگی موضعی ماتریس و کنده شدن آن در زوایای تمایل بالاتر در نقطه خروج الیاف است که باعث افزایش مقادیر لغزش در بار بیشینه می‌شود.

از طرف دیگر، با افزایش طول مدفون الیاف، در زوایای تمایل یکسان، نیروی بیرون کشیدگی بیشینه افزایش کمی می‌یابد که با توجه به سهم قابل توجه مهار مکانیکی قلاب انتهایی نسبت به سهم طول مدفون توجیه پذیر است [۱۸].

همچنین انرژی بیرون کشیدگی کامل الیاف (انرژی بیرون کشیدگی) با افزایش زاویه تمایل، با چشم پوشی از مقدار طول مدفون تا زوایای حدود ۳۰ درجه افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار طول مدفون تا زاویه ۳۰ درجه در صورت عدم گسیختگی الیاف مقدار انرژی بیرون کشیدگی افزایش یافته و پس از آن در زوایای تمایل بالاتر به دلیل اعمال نیروی متمرکز در نقطه خروج الیاف، کنده شدن گوه ماتریسی و کاهش طول مدفون و همچنین افزایش درصد الیاف گسیخته شده، این مقدار کاهش می‌یابد.

شکل (۱۷) تاثیر زاویه تمایل الیاف و طول مدفون بر بیشینه نیروی بیرون

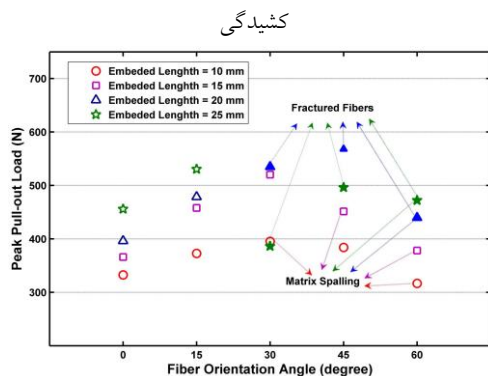


Fig. 17. Effect of fiber orientation and embedment length on peak pull-out load

شکل (۱۷) مقدار بیشینه نیروی بیرون کشیدگی را به صورت تابعی از زاویه تمایل و طول مدفون الیاف نشان می‌دهد. به منظور تشریح دقیق ساز و کارهای تاثیرگذار در بیرون کشیدگی

در شکل (۱۶) افت نیروی بیرون کشیدگی در اثر کنده شدن ماتریس در نمودار نیرو-لغزش به همراه شکل نمونه بیرون کشیدگی که در آن گسیختگی موضعی ماتریس رخ داده نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش طول مدفون افت نیروی بیرون کشیدگی بیشتر می‌شود که به دلیل بزرگتر شدن گوه گسیختگی ماتریس می‌باشد.

شکل (۱۶) کنده شدگی ماتریس در نمونه با زاویه تمایل ۶۰ درجه و افت نیروی بیرون کشیدگی در اثر آن

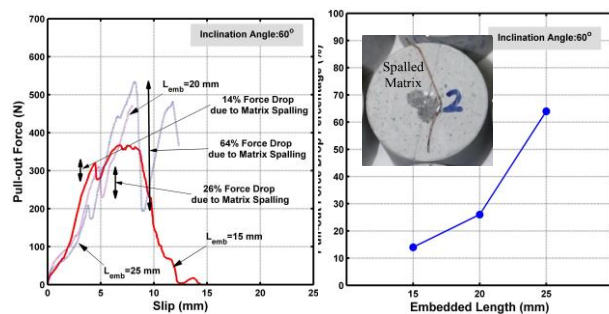


Fig. 16. Matrix spalling in specimen with the inclination angle of 60° and the resulting pull-out force drop

به منظور تعیین ظرفیت کششی استفاده شده الیاف در زوایای تمایل مختلف و طول مدفون‌های متفاوت نسبت σ_{max}/f_u در هر حالت به دست آمده که در آن مقدار بیشینه تنش بوجود آمده در الیاف با در نظر گرفتن نسبت بیشینه نیروی اعمال شده در روند بیرون کشیدگی به سطح مقطع الیاف و f_u تنش نهایی الیاف است که مقادیر آن به صورت درصد در جدول (۳) نشان داده شده است. همان گونه که نتایج نشان می‌دهد، ظرفیت کششی استفاده شده الیاف (میزان مؤثر بودن الیاف) در زوایای ثابت با افزایش طول مدفون اضافه می‌شود مگر در جایی که در الیاف گسیختگی رخ دهد و در طول‌های مدفون ثابت با افزایش زاویه تمایل در حدود ۳۰-۴۵ درجه این مقدار افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.

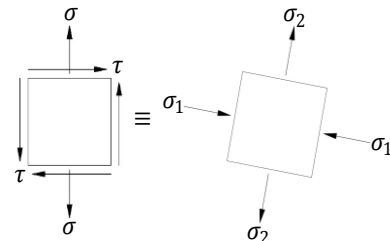
۳-۴-۱-۳ بیشینه نیروی بیرون کشیدگی و لغزش مربوطه (معادل نصف عرض ترک)

مقایسه و بررسی نمودارهای بیرون کشیدگی الیاف در زوایای مختلف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه) و با طول‌های مدفون متفاوت (۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر) در شکل (۱۴) نشان می‌-

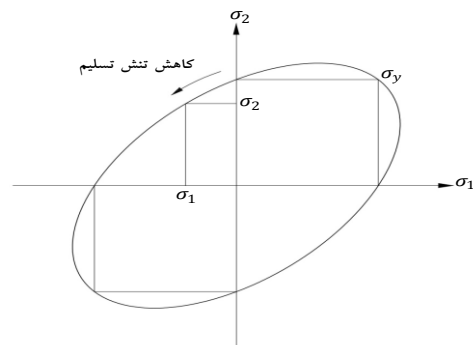
در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، با توجه به طول مدفون کافی الیاف برای صاف‌شدگی (حداقل ۱۰ میلی‌متر) و حرکت کامل قلاب در خلال بیرون‌کشیدگی و صاف‌شدگی آن، افزایش مقدار بیشینه نیروی بیرون‌کشیدگی تا زوایای حدود ۳۰ درجه رخ داد، با این‌حال در مطالعات انجام شده به وسیلهی رابینز و همکاران گزارش شده درحالی که طول مدفون الیاف برای تامین گیرداری لازم در ماتریس کافی نباشد و قلاب انتهایی به طور کامل به حرکت در نیاید، زاویه تمایل تأثیر ناچیزی بر رفتار بیرون‌کشیدگی دارد و نیروی بیرون‌کشیدگی بیشینه نسبت به زاویه تمایل تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند [۱۹، ۲۰]. در روند آزمایش‌ها، دیده شد که با افزایش زاویه تمایل الیاف، بار گسیختگی نیز کاهش می‌یابد. این کاهش نیروی گسیختگی در اثر افزایش زاویه تمایل را می‌توان به اعمال تنش برشی اضافی روی الیاف مایل در محل خروج الیاف از ماتریس نسبت داد. در حقیقت اضافه شدن تنش برشی τ سبب ایجاد یک مؤلفه فشاری σ_1 در وضعیت تنش‌های اصلی المان می‌شود (شکل ۱۸-الف). بدین ترتیب با توجه به معیار تسلیم فون-میسز (شکل ۱۸-ب) دیده می‌شود تنش تسلیم کاهش یافته و به تبع آن نیروی گسیختگی نیز کاهش می‌یابد. متوسط مقدار لغزش (معادل نصف عرض ترک) اندازه‌گیری شده در نقطه بیشینه نیرو برحسب زاویه تمایل در شکل (۱۹) نشان داده شده است. به صورت کلی برای تمام طول‌های مدفون عرض ترک در بار بیشینه با اضافه شدن زاویه تمایل افزایش می‌یابد. این پدیده به وسیلهی سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۲۱]. علاوه بر این در صورت استفاده کامل از ظرفیت مهار مکانیکی قلاب انتهایی (بیرون کشیدگی کامل الیاف و صاف‌شدگی قلاب)، عرض ترک در بار بیشینه به طور کلی مستقل از طول مدفون الیاف است. افزایش عرض ترک در بار بیشینه در برابر افزایش زاویه تمایل، بیشتر مربوط به ترکیب آثار خردشدگی ماتریس و صاف‌شدگی الیاف در محل وارد شدن الیاف به ماتریس در روند بیرون کشیده شدن الیاف است که این امر باعث اضافه شدن لغزش اندازه‌گیری شده می‌شود.

الیاف مایل می‌توان گفت: که کمتر بودن مؤلفه نیروی موازی با امتداد الیاف نسبت به نیروی در امتداد عمود، برای تمام انواع بیرون کشیدگی الیاف مایل وجود دارد و خمش الیاف و افزایش تنش اصطکاکی در روند بیرون‌کشیدگی الیاف مایل از ماتریس وجود دارند، با این حال خمیدگی الیاف به محض اعمال نیرو آغاز می‌شود و خمش در نیروهای بسیار کوچک نیز وجود دارد. از طرف دیگر تنش اصطکاکی در سطح مشترک الیاف و ماتریس تنها هنگامی رخ می‌دهد که الیاف نسبت به ماتریس شروع به لغزش نمایند (ابتدا جداشدگی الیاف و سپس لغزش نسبی الیاف نسبت به ماتریس). از آنجاییکه مقادیر لغزش قبل از نقطه بیشینه بسیار کم است تأثیر تنش اصطکاکی بر روی بیرون‌کشیدگی الیاف مایل قبل از نقطه بیشینه ناچیز است، بنابراین کمتر بودن نیروی بیرون‌کشیدگی موازی با امتداد الیاف (P_x) نسبت به نیروی در امتداد عمود (P_θ) و اثر خمش به عنوان ساز و کارهای اولیه بالابرنده نیروی بیرون‌کشیدگی الیاف مطرح هستند و تنش‌های اصطکاکی پس از نقطه بیشینه اهمیت و نقش زیادی پیدا می‌کنند.

شکل (۱۸) وضعیت تنش در الیاف مایل در محل خروج از ماتریس



(الف) مؤلفه‌های تنش در الیاف مایل Stress components in inclined fiber



(ب) معیار تسلیم فون-میسز Von-mises yield criterion
Fig. 18. Inclined fiber stress at exit point from matrix

۴- نتیجه گیری

در خصوص رفتار کلی بیرون کشیدگی الیاف مایل با طول مدفون‌های مختلف از ماتریس پایه سیمانی نتایج زیر به دست آمد:

- نیروی بیرون کشیدگی بیشینه در زوایای حدود ۳۰ تا ۴۵ درجه مشاهده شد، که این امر به دلیل ساز و کارهای بوجود آمده از جمله کاهش نیروی بیرون کشنده موازی با امتداد الیاف (P_{θ}) نسبت به نیروی در امتداد الیاف (P_{θ})، خمش الیاف در نقطه خروج و افزایش تنش اصطکاکی ناشی از مولفه نیروی عمود بر امتداد الیاف در نقطه خروج آن است. به علاوه لغزشی (معادل نصف عرض ترکی) که در آن بار بیشینه رخ می‌دهد با افزایش زاویه تمایل افزایش می‌یابد. همچنین، برای الیاف گسیخته شده با افزایش زاویه تمایل نیروی گسیختگی کاهش می‌یابد.

- در خصوص جذب انرژی بیرون کشیدگی الیاف فلاپدار، الیاف مایل نسبت به الیاف مستقیم مقدار بیشتری انرژی جذب می‌نمایند و مقدار انرژی بیرون کشیدگی بیشینه در زوایای تمایل حدود ۱۵ درجه رخ می‌دهد.

- افزایش طول مدفون و جهت‌گیری الیاف فلاپدار (نسبت به امتداد بارگذاری) باعث افزایش انرژی بیرون کشیدگی می‌شود مگر در جایی که مقاومت بیرون کشیدگی به حدی زیاد شود که از مقاومت کششی الیاف عبور کند و الیاف گسیخته شوند که در این حالت این روند با محدودیت مواجه می‌شود.

- در بیرون کشیدگی الیاف فولادی از ماتریس مشاهده شد که در زوایای تمایل بالاتر از ۳۰ درجه به دلیل خردشدگی موضعی ماتریس و کنده‌شدگی آن در نقطه خروج الیاف مقدار نیروی بیشینه کاهش می‌یابد.

- دیده شد، ظرفیت کششی استفاده شده الیاف (مؤثر بودن الیاف)، با افزایش طول مدفون، در زوایای ثابت اضافه می‌شود، مگر در جایی که در الیاف گسیختگی رخ دهد و با افزایش زاویه تمایل، در طول‌های مدفون ثابت تا ۳۰ و ۴۵ درجه این مقدار افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.

- لازم به گفتن است که نتایج بیان شده در این مطالعه فقط با انجام آزمون بیرون کشیدگی روی الیاف منفرد به دست آمده و

شکل (۱۹) تاثیر زاویه تمایل الیاف و طول مدفون بر لغزش نقطه بیشینه

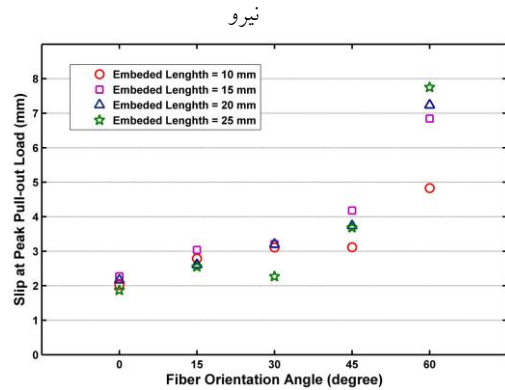


Fig. 19. Effect of fiber orientation and embedment length on slip at peak pull-out load

۳-۲ جذب انرژی

مقادیر متوسط انرژی بیرون کشیدگی الیاف به صورت تابعی از زاویه تمایل در شکل (۲۰) ترسیم شده است. انرژی بیرون کشیدگی با محاسبه سطح کل زیر نمودار پاسخ بیرون کشیدگی (نیرو-لغزش) به دست آمده است. با مقایسه مقادیر انرژی بیرون کشیدگی در زوایای تمایل مختلف در می‌یابیم که با افزایش زاویه تمایل با چشم‌پوشی از مقدار طول مدفون انرژی بیرون کشیدگی تا زوایای حدود ۱۵ درجه افزایش می‌یابد و در طول مدفون‌های بیشتر از ۲۰ میلی‌متر و زوایای تمایل بالاتر از ۳۰ درجه مشاهده حاکی از افزایش تعداد الیاف گسیخته شده و کاهش انرژی بیرون کشیدگی است. به علاوه در صورت استفاده از نهایت ظرفیت مهار مکانیکی قلاب مشاهده می‌شود که برای یک زاویه تمایل مشخص با افزایش طول مدفون مقدار انرژی بیرون کشیدگی نیز افزایش می‌یابد.

شکل (۲۰) تاثیر زاویه تمایل الیاف و طول مدفون بر انرژی بیرون کشیدگی

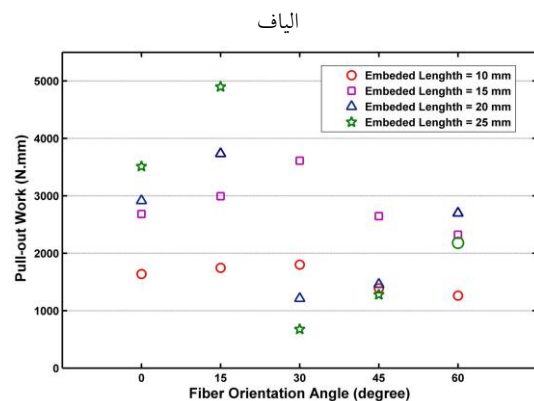


Fig. 20. Effect of fiber orientation and embedment length on pull-out energy

- [11] Li, V.C., Wang, Y., and Backer, S.; "Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix"; *Composites*, 21(2), 1990, 132-140.
- [12] Ghoddousi, P., Ahmadi, R., and Sharifi, M.; "Fiber pullout model for aligned hooked-end steel fiber"; *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37 (9), 2010, 1179-1188.
- [13] Laranjeira, F., Molins, C., and Aguado, A.; "Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers"; *Cement and Concrete Research* 40(10), 2010, pp. 1471-1487.
- [14] Laranjeira, F., Aguado, A., and Molins, C.; "Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers. *Materials and Structures* 43, 2010, pp. 875-895.
- [15] Van Gysel, A. ;"A pullout model for hooked end steel fibres"; *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC 3)*, RILEM Publications S.A.R.L., 1999.
- [16] Zhang, J., and Li, V. C., "Effect of inclination angle on fiber rupture load in fiber reinforced cementitious composites"; *Composites Science and Technology* 62, 2002, 775-781.
- [17] Lee, Y., Kang, S., and Kim, J. K. ;"Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix"; *Construction and Building Materials* 2010, 24(10), 2030-2041.
- [18] Tuyan, M., and Yazıcı H.; "Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix"; *Construction and Building Materials*, 35, 2012, 571-577.
- [19] Stefanidi, K. G., Mistakidis E., Pantousa D., and Zygomalas M. ;"Numerical modelling of the pull-out of hooked steel fibres from high-strength cementitious matrix, supplemented by experimental results"; *Construction and Building Materials*, 24(12), .2010, 2489-2506.
- [20] Soetens, T., Van Gysel, A., Matthys, S., and Taerwe, L.; "A semi-analytical model to predict the pull-out behaviour of inclined hooked-end steel fibres"; *Construction and Building Materials*, 43, 2013, 253-265.
- [21] Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., and Zhan, Y.; "Experimental, analytical and numerical analysis of the pullout behaviour of steel fibres considering different fibre types, inclinations and concrete strengths"; *Structural Concrete*, 15(2), 2014, 126-135.

در حالت بروز ترک در مواد مرکب به دلیل حضور الیاف دیگر در محل ترک و مقدار بازشدگی متفاوت ترک در آن حالت استفاده از این نتایج به شکل مستقیم قابل استفاده نیست و این نتایج بیشتر برای صحنه گذاری مدل‌های عددی و تحلیلی کاربرد دارد.

References

۵-مراجع

- [1] Kanda, T., and Li, V.; "Effect of Fiber Strength and Fiber-Matrix Interface on Crack Bridging in Cement Composites"; *Journal of Engineering Mechanics*, 125(3), 1999, 290-299.
- [2] Naaman, A. E.; "Evaluation of steel fibers for applications in structural concrete"; 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes, 2004, 389-400.
- [3] Bantia, N., and Trottier, J.-F.; "Concrete reinforced with deformed steel fibers, part I: bond-slip mechanisms"; *ACI Materials Journal*, 1994, pp. 435-445.
- [4] Lawrence, P.; "Some theoretical considerations of fibre pullout from an elastic matrix"; *Journal of Materials Science*, 7, 1972, 1-6.
- [5] Fantilli, A., and Vallini, P.; "A cohesive interface model for the pullout of inclined steel fibers in cementitious matrixes"; *Journal of Advanced Concrete Technology* , 2007, 247-258.
- [6] Mandel, J., Wei, S., and Said, S.; "Studies of the properties of the fiber-matrix interface in steel fiber reinforced mortar"; *ACI Materials Journal*, 84, 1987, 101-109.
- [7] Naaman, A. E., Namur, G., Alwan, J., and Najm, H.; "Fiber Pullout and Bond Slip. I: Analytical Study. II: Experimental validation"; *Journal of Structural Engineering*, 117, 1991, 2769-2800.
- [8] Alwan, J., Naaman, A. E., and Guerrero, P.; "Effect of mechanical clamping on the pullout response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices"; *Concrete Science and Engineering* 1, 1999, 15-25.
- [9] Ouyang, C., Pacios, A., and Shah, S.; "Pullout of Inclined Fibers from Cementitious Matrix"; *Journal of Engineering Mechanics*, 120(12), 1994, 2641-2659.
- [10] Robins, P., Austin, S., and Jones, P.; "Pullout behavior of hooked end steel fibres"; *Materials and Structures* 35(7), 2002, pp. 434-442.

Experimental investigation of pull-out behavior of inclined fiber from cementitious matrix

E. Zeighami^{1*}, F.J. Alae², M. Jamee³, M. Soltani⁴

1- Ph.D. Candidate, Structural Eng., Shahrood University

2- Associate Prof., Civil Eng Dept., Faculty of Civil Eng., Shahrood University

3- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil Eng., Shahrood University

4- Associate Prof., Civil Eng Dept., Faculty of Civil Eng., Tarbiat Modares University

farshidja@yahoo.com

Abstract:

This paper presents the pull-out characteristics of inclined hooked steel fiber from cementitious matrix. The effect of fiber embedded length and angle of inclination are evaluated together with the interaction of these parameters. The experimental program involved single fiber pull-out test of five inclination angle and four embedded length. The studied inclination angles were 0, 15, 30, 45 and 60 degrees. The embedded lengths were 10, 15, 20 and 25 mm. Compressive strength of matrix was 40 Mpa. The length and diameter of hooked steel fibers were 50 mm and 1mm, respectively and their tensile strength was 800 Mpa.

At least five specimens were prepared and tested for each combination of inclination angle and embedded length. A special mold supplemented by a cross shaped device was designed to hold the fiber in desired angle and embedded length. X-ray radiography was used to verify the inclination angle and embedded length of fiber. All the specimens were tested at 28-day age. Pull-out test performed under displacement control condition in order to record descending branch of pull-out curves. A load cell and a displacement transducer were used to acquire pull-out load and slip during pull-out test. Pull-out load versus slip were recorded and parameters such as maximum pull-out force and its associated slip, pull-out energy, fiber efficiency and matrix spalling were drawn for comparison purpose.

Based on the experimental results, the pull-out response of hooked steel fibers is predominately influenced by fiber embedded length and inclination angle. The results indicate that the peak pull-out load is maximized at approximately 30 degrees, although at greater inclination angle, the peak pull-out load decreases. The fracture load also decreases as fiber inclination angle increases. The additional shear stress imposed on inclined fibers; provide mechanisms favoring slip between the crystals in the steel. This causes a reduction in both yield and ultimate strength of the fiber, resulting in a reduced fracture load. The results indicate that providing the hook is fully mobilized, the peak pull-out load is almost independent of embedded length of fiber. The results indicate that fracture of fiber is more presumable at greater inclination angle.

Slip associated with peak pull-out load increases as the inclination angle increases. This can be attributed to matrix spalling. Matrix spalling also causes the drop of pull-out load in pull-out curves. The load drop is directly related to the size of crushed matrix. Matrix starts to spall at 30 degrees inclination angle. The results indicate that increase in embedded length and inclination angle result in increase of pull-out energy. An inclined fiber with respect to the loading direction absorbs a greater amount of energy at a given slip than an aligned one, with maximum pull-out energy occurring around 30 degrees. Fiber efficiency increases as the embedded length of fiber increases. Maximum fiber efficiency occurs at 30 to 45 degrees and decreases at greater inclination angle. The effect of elastic deformation of fiber during pull-out test was taken into account by calculation of elastic deformation and subtracting from slip, although, its effect was negligible.

Keywords: Hooked steel fibre, pull-out, inclination angle, cementitious matrix.