





Experimental Laboratory Investigation of Twisted Basalt Fibers with Varying Inclination Angles in Pull-out Tests with Different Embedded Lengths

Hesammodin Nasaj Moghadam^{1*}, Farshid Jandaghi Alaei²

¹Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 02.03.2025

Revised: 24.03.2025

Accepted: 22.04.2025

Keyword:

Twisted basalt fiber
Single fiber pull-out test
Slip
Embedded length
Inclination angle

*Corresponding Author:

Hesammodin Nasaj Moghadam

Email:

Hesamnasaj1990@gmail.com

ABSTRACT

Normal concrete typically demonstrates minimal tensile strength and ductility. However, the addition of fibers to NC results in enhanced tensile and flexural strength, along with improved ductility. Moreover, the inclusion of fibers not only increases mechanical resistance compared to conventional concrete but also mitigates crack width, thus augmenting the durability and service life of concrete structures, particularly in marine and corrosive environments. The tensile strength exhibited in Fiber-Reinforced Concrete correlates directly with the quantity of fibers traversing the crack width and the behavior of individual fibers during pull-out. Therefore, a thorough understanding of fiber pull-out behavior from the concrete matrix is crucial for comprehending the uniaxial tensile and flexural behaviors of FRC. Twisted basalt fibers are used in reinforced concrete due to their inherent advantages, including corrosion resistance, environmental compatibility, high tensile strength, and suitable Young's modulus compared to steel fibers. Consequently, investigating and comprehending the precise pull-out behavior of twisted basalt fibers holds paramount significance. This study investigates the pull-out behavior of twisted basalt fibers at various orientations relative to the longitudinal axis of the specimens. The study investigates and analyzes the effects of fiber inclination angles (0, 30, 45, and 60 degrees) and embedded fiber lengths (8, 15, and 22 mm) on pull-out response parameters such as peak pull-out force, slip at peak load, and pull-out energy.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Materials with inherent brittleness, like mortars and ceramics, typically demonstrate limited toughness and are prone to cracking. Nonetheless, the addition of fibers in concrete can significantly delay crack initiation and control their spread, resulting in considerably higher energy absorption capacity and toughness compared to plain concrete. This advantageous outcome can be attributed to the bridging of cracks by fibers through the primary mechanism of fiber reinforcement, which involves the pull-out process of the fiber.

Basalt fiber is considered environmentally friendly and free from hazards, as it is derived from molten volcanic rocks, with no emission of harmful gases during the manufacturing process. Concurrently, there has been significant research carried out on basalt fiber-reinforced polymers, which has demonstrated their exceptional resistance to corrosion. Twisted basalt fibers have found successful application as reinforcement materials in cement-based materials. The melting point of basalt fibers is approximately 1400°C, significantly higher than that of synthetic fibers. Due to their exceptional fire resistance, basalt fibers are currently utilized in fire-protection applications. The growing popularity of basalt fiber in concrete reinforcement applications is a result of its remarkable mechanical properties and the eco-friendly nature of its manufacturing process.

The main objective of this article is to conduct a comprehensive study on pull-out tests performed on twisted basalt fibers extracted from the concrete matrix. These tests were carried out at various inclination angles, specifically 0, 30, 45, and 60 degrees, with embedded lengths ranging from 8 to 22 mm.

Methodology

In this study, single-fiber pull-out tests were conducted to investigate the behavior of twisted basalt fibers embedded in a cementitious matrix. Fibers were placed at varying inclination angles (0, 30, 45, and 60 degrees) and different embedded lengths (ranging from 8 mm to 22 mm). The primary objective of these tests was to analyze the effect of fiber inclination angle and embedded length on key parameters such as maximum pull-out force, the corresponding slip at maximum pull-out force, and pull-out energy. The specimens were prepared by embedding twisted basalt fibers into concrete samples, and the fibers were oriented at the specified angles within the matrix. During the pull-out process, the force required to extract the fibers from the matrix was measured, and both fiber debonding and pull-out failure mechanisms were observed. The analysis focused on the role of the fiber-matrix interface bond and its impact on crack propagation and energy absorption during the pull-out process. The test results were analyzed to determine the influence of fiber geometry and orientation on the concrete's toughness and the energy dissipation capacity.

Results and discussion

During the fiber pull-out experiments, it is observed that the highest fiber rupture occurs at 30 and 60 degrees with an embedded length of 22 mm. According to the fiber pull-out experiments, it is observed that the percentage of ruptured fibers at 0° is 11%,

at 30° is 50%, at 45° is 33%, and at 60° is 39%. As evident in the scanning electron microscopy (SEM) images, the resin layer of the fiber strands has been removed, and concrete particles adhere to the fiber strands, indicating proper bonding between the fibers and the concrete matrix.

The analysis of fiber pull-out graphs, shows that as the angle increases up to 45° relative to the load direction, the maximum pull-out force also increases with longer buried fibers. However, beyond 45°, at 60°, the pull-out force decreases. On the other hand, with an increase in the embedded fiber length, at the same inclination angles, the maximum pull-out force increases. Based on the results obtained from the force-slip diagrams and the, it is evident that with an increase in embedded length at a 0°, the average maximum force for lengths of 15 and 22 mm has increased by 15% and 51%, respectively, compared to the buried length of 8 mm. Similarly, the average maximum force for angles of 30, 45, and 60 degrees, with embedded lengths of 15 and 22 mm, has also increased by 42%, 51%, 46%, 55%, 18%, and 56%, respectively, compared to the buried length of 8 mm.

The pull-out energy of twisted basalt fibers rises as the inclination angle increases, reaching its maximum at 45°, after which it decreases. This peak at 45° highlights the superior effectiveness of fibers oriented at this angle in bridging cracks and resisting tensile forces. The findings at 0° and 45° further demonstrate that a longer embedded length markedly improves pull-out energy, owing to the expanded contact surface, enhanced interfacial friction, and the mechanical rotation of twisted fibers during extraction. This rotational mechanism dissipates part of the applied energy and consequently boosts the overall energy absorption capability of the system. As observed, an increase in the inclination from 0 to 30, 45, and 60 degrees leads to a corresponding increase in slip at maximum force by 259%, 27%, and 384%, respectively, for an buried length of 8 mm. On the other hand, for embedded lengths of 15 and 22 mm, the increase in angle from 0 to 30, 45, and 60 degrees results in a corresponding increase in slip at maximum load by 312%, 116%, 332%, 153%, 668%, and 553%, respectively.

Conclusion

The following results were obtained regarding the overall behavior of inclined pull-out of twisted basalt fibers with various embedded lengths from the cementitious matrix:

- The maximum pull-out force rises as the embedded fiber length increases until reaching a 45° inclination. Subsequently, at a 60° angle, the pull-out force exhibits a decline.
- The maximum force obtained was achieved with constant buried lengths at a 45°, resulting from the pulling force parallel to the fiber's direction compared to the force along the fiber, fiber bending at the exit point, and an increase in frictional stress due to the component of force perpendicular to the fiber's direction at the exit point.
- Increasing the fiber length at a 0° angle resulted in a 15% and 51% rise in the average maximum force for 15 mm and 22 mm lengths, respectively, compared to the buried length of 8 mm. Similarly, at angles of 30, 45, and 60 degrees, with buried

lengths of 15 mm and 22 mm, the average maximum force increased by 42%, 51%, 46%, 55%, 18%, and 56%, respectively, compared to the embedded length of 8 mm.

- The average pull-out energy of twisted basalt fibers increases with inclination angle up to 45° and decreases thereafter. The highest energy absorption occurs at 45° , indicating the most effective fiber orientation for crack control and tensile load resistance. Results at 0° and 45° also show that increasing the embedded length significantly raises the pull-out energy due to the larger contact area, higher interfacial friction, and the mechanical rotation of twisted fibers during pull-out. This rotational resistance dissipates part of the applied energy and enhances the system's overall energy absorption capacity.



بررسی آزمایشگاهی رفتار بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی با زوایای تمایل و طول‌های مدفون مختلف

حسام الدین نساج مقدم*^۱، فرشید جندقی علائی^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

بتن معمولی معمولاً مقاومت کششی و شکل پذیری کمی را نشان می‌دهد. از این رو، افزودن الیاف به بتن معمولی موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی، به همراه بهبود شکل پذیری می‌گردد. علاوه بر این، افزودن الیاف نه تنها باعث افزایش مقاومت مکانیکی بتن نسبت به انواع معمولی آن می‌شود، بلکه موجب کاهش عرض ترک‌ها نیز می‌گردد. این امر در نهایت به بهبود دوام و افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی، به ویژه در محیط‌های دریایی و خورنده، کمک می‌کند. مقاومت کششی بتن تقویت‌شده با الیاف، به طور مستقیم با تعداد الیاف عبوری از عرض ترک و رفتار الیاف در هنگام بیرون کشیده شدن از ماتریس بتنی مرتبط است. بنابراین، درک دقیق رفتار بیرون آمدن الیاف از ماتریس بتنی، برای فهم رفتارهای کششی تک‌محوره و خمشی بتن تقویت‌شده با الیاف اهمیت زیادی دارد. الیاف بازالتی تابیده به دلیل مزایای ذاتی خود از جمله مقاومت در برابر خوردگی، سازگاری با محیط‌زیست، استحکام کششی بالا و مدول الاستیسیته مناسب نسبت به الیاف فولادی، در بتن مسلح استفاده می‌شوند. از این رو، بررسی و درک رفتار دقیق بیرون کشیدن الیاف بازالتی تابیده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش به بررسی تحلیل رفتار بیرون کشیدن الیاف بازالتی تابیده در جهت‌های مختلف نسبت به امتداد محور طولی نمونه‌ها پرداخته شده است. این تحقیق تأثیرات زاویه‌های تمایل الیاف (۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) و طول‌های مختلف الیاف مدفون (۸، ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر) را بر پارامترهای پاسخ بیرون کشیدن، مانند بیشینه نیروی بیرون کشیدگی، لغزش در بیشینه نیرو و انرژی بیرون کشیدگی بررسی و تحلیل می‌کند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

کلید واژگان:

الیاف بازالتی تابیده
آزمایش بیرون کشیدگی الیاف
لغزش
طول مدفون
زاویه تمایل

*نویسنده مسئول:

حسام الدین نساج مقدم

پست الکترونیکی:

Hesamnasaj1990@gmail.com



مقدمه

مواردی مانند ملات‌ها و سرامیک‌ها که به طور ذاتی شکننده هستند، معمولاً مقاومت محدودی در برابر ضربه دارند و مستعد شرایط ترک‌خوردگی می‌باشند. افزودن الیاف به ماتریس بتنی می‌تواند به طور قابل توجهی شروع ترک‌خوردگی را به تأخیر انداخته و گسترش آن‌ها را کنترل کند، که این امر منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی و استحکام بتن الیافی (FRC)^۱ نسبت به بتن‌های معمولی می‌گردد [۱؛۲]. این بهبود عملکرد به دلیل عملکرد الیاف بر روی ترک‌ها از طریق مکانیزم پل زدن رخ می‌دهد که شامل فرآیند بیرون آمدن الیاف از درون ماتریس بتنی می‌باشد.

تأثیر الیاف در محدود کردن گسترش ترک‌ها در ماتریس بتنی، به صورت مستقیم با مقاومت پیوندی بین الیاف و ماتریس بتنی در ارتباط می‌باشد. هنگامی که ترک در ماتریس بتنی حاوی الیاف ایجاد می‌شود، فرآیندهای جداشدگی و لغزش در رابطه بین الیاف و ماتریس بتنی نقش بسزایی در تأثیرگذاری بر استهلاک انرژی حین گسترش ترک ایفا می‌کنند. در فرآیند بیرون آمدن الیاف از ماتریس بتنی، دو حالت محتمل: بیرون آمدن الیاف از ماتریس بتنی و شکست الیاف وجود دارد. شکست الیاف نتیجه‌ای نامطلوبی است که به دلیل مصرف انرژی پایین و تصادفی بودن آن، به طور قابل توجهی چقرمگی^۲ بتن را کاهش دهد [۳؛۴]. بنابراین، زمانی که مقاومت پیوندی بین الیاف و ماتریس بتنی کم‌تر از مقاومت کششی الیاف باشد، الیاف بیشتر مستعد بیرون آمدن از ماتریس و استهلاک انرژی بالا هستند. در چنین شرایطی، ویژگی‌های مکانیکی الیاف به طور کامل مورد استفاده قرار گرفته و افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری بتن الیافی را به همراه خواهد داشت. توانایی الیاف در جلوگیری از پیشرفت ترک به عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های مکانیکی ماتریس، الیاف، رابطه الیاف و ماتریس بتنی، و همچنین متغیرهایی مانند طول الیاف، زاویه تمایل^۳ الیاف، حجم الیاف و فاصله‌گذاری آن‌ها در ماتریس بتنی بستگی دارد [۵؛۶].

بسیاری از مشکلات فرسودگی و خرابی زیرساخت‌های بتنی، به تمایل ماتریس بتنی به ترک‌خوردگی و شکنندگی آن بازمی‌گردد. از اینرو، تحقیقات زیادی برای بهبود انعطاف‌پذیری بتن انجام شده است. تا کنون، موثرترین و رایج‌ترین روش برای افزایش انعطاف‌پذیری بتن، استفاده از الیاف در ماتریس بتنی بوده است. افزودن الیاف به ماتریس بتنی، معمولاً ویژگی‌های کشسانی پس از رسیدن به حداکثر تنش را بهبود می‌بخشد [۷].

در بتن‌های الیافی، اندرکنش بین ماتریس بتنی و الیاف موجود در آن به‌طور مؤثری بر روی مقاومت کششی تأثیر می‌گذارد. ماتریس و الیاف هر کدام جداگانه نقش خود را در تحمل نیروی کششی ایفا می‌کنند و انتقال تنش در رابطه بین آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. این انتقال تنش، که به‌عنوان تنش برشی در رابطه الیاف و ماتریس شناخته می‌شود، ابتدا به‌صورت الاستیک رخ می‌دهد و پیش از ایجاد ترک، عمل می‌کند. با افزایش بار، معمولاً جداشدگی بین الیاف و ماتریس اتفاق می‌افتد که منجر به لغزش اصطکاکی و انتقال تنش در این رابطه می‌شود. بنابراین، ویژگی‌های مکانیکی بتن الیافی مانند مقاومت کششی، رفتار تنش-کرنش کششی و چقرمگی

^۱Fiber Reinforced Concretet^۲Toughness^۳ Inclination angle

آن، به شدت به ویژگی‌های پیوندی بین الیاف و ماتریس بستگی دارد [۸؛۹]. از اینرو، بررسی ویژگی‌های پیوند بین ماتریس بتنی و الیاف برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی مختلف بتن الیافی ضروری است.

افزایش مقاومت فشاری معمولاً منجر به افزایش شکنندگی ماتریس بتنی می‌شود. بنابراین، وجود الیاف در ماتریس‌های سیمانی، برای ایجاد رفتار سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی کشسانی، بهبود انعطاف‌پذیری و افزایش ظرفیت جذب انرژی امری ضروری است. توجه به این نکته ضروری است که تمرکز اصلی می‌بایست بر روی ویژگی‌های پیوندی بین الیاف و ماتریس بتنی قرار گیرد، زیرا درک جامع این ویژگی‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد کششی بتن از طریق بهینه‌سازی پارامترهای مرتبط با الیاف کمک نماید [۱۰].

ویژگی‌های پیوندی به عوامل مختلفی، از جمله جهت‌گیری الیاف نسبت به جهت بار اعمالی، طول مدفون^۱ الیاف در ماتریس بتنی، هندسه الیاف و مقاومت ماتریس بتنی بستگی دارند. تا کنون تحقیقات زیادی به بررسی تأثیر پارامترهای مرتبط با هندسه الیاف و مقاومت ماتریس بر ویژگی‌های پیوندی پرداخته است [۱۱-۱۳]. همچنین، مدل‌های متعددی به منظور پیش‌بینی رفتار بیرون آمدن الیاف از ماتریس بتنی پیشنهاد شده است [۱۴؛۱۵].

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر مقاومت الیاف در برابر بیرون آمدن از ماتریس بتنی، زاویه تمایل الیاف می‌باشد. در حالی که بسیاری از محققان آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر زاویه تمایل الیاف انجام داده‌اند، بیشتر مطالعات بر روی بیشینه نیروی بیرون آمدن تمرکز کرده‌اند و بررسی بر روی این پارامتر همچنان موضوع بحث است [۸].

از سوی دیگر، تأثیر زاویه تمایل الیاف بر نیروی بیرون آمدن الیاف از ماتریس بتنی و انرژی بیرون کشیدگی کاملاً وابسته به عواملی مانند نسبت ابعادی الیاف، شکل آن‌ها (مستقیم، قلاب‌دار، موج‌دار و غیره)، و ویژگی‌های مواد مانند مقاومت تسلیم، و همچنین جنس الیاف (فلزی یا مصنوعی) می‌باشد. ارزیابی و شناسایی رابطه بین ماتریس بتنی و الیاف و همچنین اندازه‌گیری مقاومت بین آن‌ها معمولاً از طریق آزمایش بیرون کشیدگی تک‌محوره الیاف انجام می‌شود، که روشی رایج و متداول برای این منظور است. در این آزمایش، یک الیاف درون ماتریس بتنی قرار گرفته و تحت کشش تک محوره قرار می‌گیرد. این آزمایش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که یا الیاف از ماتریس بتنی خارج شود و یا الیاف بر اثر نیروی کششی وارد شده دچار پارگی و شکست گردد.

الیاف بازالت به دلیل استخراج از سنگ‌های آتشفشانی مذاب و عدم تولید و انتشار گازهای مضر به‌عنوان یک ماده دوستدار محیط‌زیست و بدون خطرات زیست‌محیطی شناخته می‌شود [۱۶؛۱۷]. امروزه، تحقیقات زیادی در مورد پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف بازالت (FRP) انجام شده است که نشان‌دهنده مقاومت خوب آن‌ها در برابر خوردگی است [۱۸-۲۱]. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که امروزه الیاف بازالتی تاییده به‌عنوان یک عنصر تقویت‌کننده، کاربردهای زیادی را در مواد پایه سیمانی از خود نشان داده‌اند [۲۰؛۲۲؛۲۳]. نقطه ذوب الیاف بازالتی حدود ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۲۴]، که به‌طور قابل توجهی بالاتر از الیاف مصنوعی است. به دلیل مقاومت بالای این الیاف در برابر آتش، الیاف بازالتی در حال حاضر در پروژه‌های محافظت در برابر آتش نیز مورد استفاده

^۱Embedded length

^۲Fiber Reinforced Polymer

^۳Twisted basalt fiber

قرار می‌گیرند [۲۵]. الیاف بازالتی در مقایسه با الیاف پلی‌اتیلن (PE)^۱ و الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA)^۲، در زاویه تمایل خاصی، کاهش قابل توجهی در استحکام را از خود نشان می‌دهند [۲۶]. با این حال، به دلیل محدودیت‌های فرآیند تولید، اشکال قلاب‌دار و موج‌دار برای تولید الیاف بازالتی تابیده مناسب نیستند [۲۷]. الیاف بازالتی تابیده اساساً نسخه کوچک‌تری از میلگردهای تقویت‌شده با پلیمرهای بازالت هستند و افزایش محبوبیت این الیاف در استفاده به منظور تقویت سازه‌های بتنی، نتیجه ویژگی‌های مکانیکی برجسته و فرآیند تولید دوستدار محیط‌زیست آن‌ها می‌باشد [۲۳]. جدول ۱ خصوصیات مکانیکی الیاف بازالتی و سایر الیاف استفاده شده در ساخت بتن‌های الیافی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ مشخص می‌گردد که الیاف بازالتی از مقاومت کششی بالاتری نسبت به سایر الیاف برخوردار است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف مختلف

نوع الیاف	قطر (میکرومتر)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	ازدیاد طول (%)
فولاد [۴۹]	۲۵۰-۱۰۰۰	۷/۸	۲۸۰-۲۸۰۰	۲۰۰-۲۵۰	۰/۵-۴
بازالت [۵۰]	۱۵	۲/۶۵	۳۲۰۰-۴۵۰۰	۸۰-۱۰۰	۲/۴-۳
کربن [۵۱]	۷	۱/۷۶	>۳۰۰۰	۲۰۰	۱/۵
شیشه [۵۲]	۱۳	۲/۶۸	۱۵۰۰	۷۱	۲/۵
پلی وینیل الکل [۵۳]	۴۰	۱/۳	۱۶۰۰	۴۲	۷
پلی پروپیلین ^۳ [۵۴]	-	۰/۹۱	۳۶۵-۶۰۰	۲/۴-۳/۲	۲۵-۶۰
پلی اتیلن ^۴ [۵۵]	۲۰	۰/۹۷	۲۹۰۰	۱۶۶	۲/۴۲
اکرلیک ^۵ [۵۶]	-	۱/۱۸	۵۰۰-۶۰۰	۷-۹	۲۰-۲۶
آرامید ^۶ [۵۷]	۱۲	۱/۳۹-۱/۴۴	۲۹۰۰-۳۴۰۰	۷۴-۱۲۴	۳-۴/۵
آزبست ^۷ [۵۸]	۰/۰۲-۳۰	۲/۵	۲۰۰-۱۸۰۰	۱۶۴	۲-۳

تحقیقات متعددی به منظور بررسی رفتار مقاومت کششی بتن الیافی، به‌ویژه از طریق آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی، انجام شده است [۲۷-۳۰]. برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی، تأثیر پارامترهایی مانند نوع بتن [۳۰-۴۱]، نرخ بارگذاری [۳۲؛۳۴؛۳۵]، طول مدفون الیاف [۴۲]، زاویه تمایل الیاف در ماتریس بتنی [۳۰-۴۵؛۴۳]، و نوع الیاف مورد بررسی قرار گرفته است [۴۶-۴۸؛۲۳؛۳۰؛۳۷؛۴۴]. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده برای الیاف بازالتی تابیده، استفاده از این الیاف در ساخت سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی، ساحلی و خورنده نسبت به سایر الیاف بسیار عملی و سودمند است. بنابراین، درک کافی از

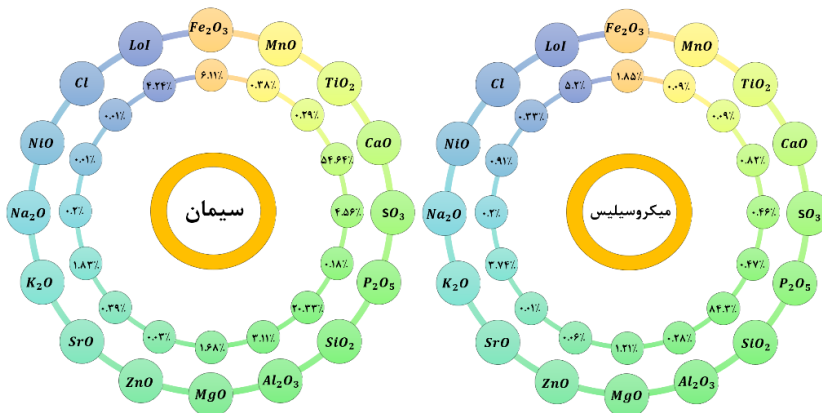
^۱Polyethylene^۲Polyvinyl alcohol^۳Polypropylene^۴Polyethylene^۵Acrylic^۶Aramid^۷Asbestos

نحوه عملکرد این الیاف در بتن الیافی موجب بهبود عملکرد پژوهشگران در استفاده از این نوع الیاف برای ساخت سازه‌های بتنی می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، انجام بررسی و مطالعه جامع بر روی رفتار الیاف بازالتی تابیده در بتن‌های الیافی از طریق آزمایش بیرون کشیدگی الیاف می‌باشد. این آزمایش‌ها در زاویه‌های تمایل مختلف ۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به امتداد محور طولی نمونه‌ها، با طول‌های مدفون از ۸ تا ۲۲ میلی‌متر در ماتریس بتنی با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال انجام شده است. این تحقیق به دنبال بررسی تأثیر زاویه تمایل و طول مدفون الیاف در حالت‌های مختلف بر پارامترهای مهمی مانند بیشینه نیروی بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی، لغزش متناظر در بیشینه نیرو، و انرژی بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی می‌باشد. با بررسی دقیق پارامترهای مذکور، این پژوهش در تلاش است تا دیدگاه‌های ارزشمندی در مورد رفتار الیاف بازالتی تابیده در ماتریس‌های بتنی تحت شرایط مختلف ارائه دهد.

برنامه آزمایشگاهی

مصالح

مصالح بکار رفته برای ساخت بتن استفاده‌شده در این پژوهش، شامل: سیمان پرتلند نوع II با وزن مخصوص ۳/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، آب، ماسه، شن، ماسه سیلیسی ریز عبوری از الک شماره ۲۰۰ (S200)، ماسه سیلیسی ریز عبوری از الک شماره ۴۰۰ (S400)، میکروسیلیس^۱ (تشکیل شده از حدوداً ۸۵ درصد سیلیسیم دی اکسید (SiO₂)) و فوق‌روان‌کننده (SMF)^۲ می‌باشد. در شکل ۱ ترکیب شیمیایی سیمان و میکروسیلیس و در شکل ۲ منحنی توزیع اندازه ذرات ماسه، شن و S200 بر اساس دسته‌بندی یونیفاید^۳ نمایش داده شده است. لازم به توضیح است که به منظور افزایش کارایی بتن و تسهیل در امر بتن‌ریزی در قالب‌ها از مصالح با دانه‌بندی ریز استفاده شده است.

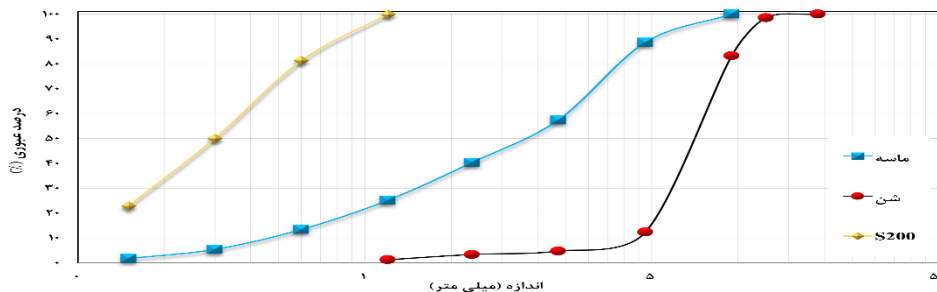


شکل ۱. نمایش شماتیک از ترکیبات سیمان و میکروسیلیس

^۱Silica fume

^۲Sulfonate Melamine Formaldehyde superplasticizer

^۳Unified



شکل ۲. نمایی شماتیک از منحنی توزیع اندازه ذرات ماسه، شن و S200

ریزدانه استفاده شده در بتن مصرفی، ماسه طبیعی رودخانه با مدول نرمی $3/7$ و درشت‌دانه از شن شکسته طبیعی با اندازه حداکثر $12/5$ میلی‌متر تشکیل شده است. وزن مخصوص بدست آمده برای شن و ماسه مصرفی به ترتیب $2/22$ و $2/27$ گرم بر سانتی‌متر مکعب ثبت شده است. شکل ۳ نشان دهنده فوق روان کننده (SMF) مورد استفاده در طرح اختلاط بتن می‌باشد. فوق روان کننده مذکور، مایع شیمیایی با وزن مخصوص حدود $1/3$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و محدوده pH بین ۷ تا ۸ می‌باشد.



الف



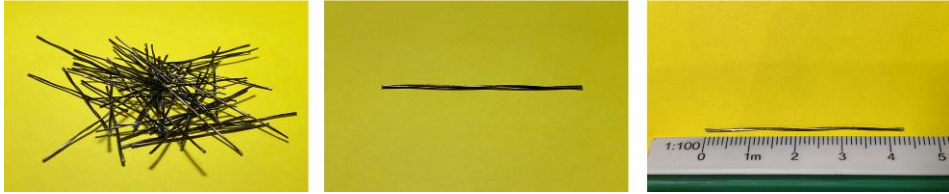
ب

شکل ۳. الف) فوق روان کننده SMF، ب) مقدار PH فوق روان کننده SMF

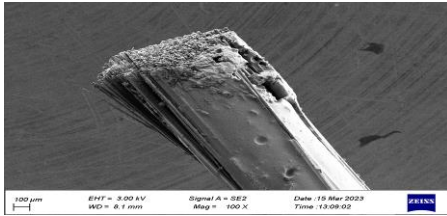
جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف بازالتی تابیده را نشان می‌دهد. در ادامه، شکل‌های ۴ و ۵ نمای ظاهری و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) الیاف بازالتی تابیده را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تصویر میکروسکوپی الیاف بازالتی تابیده نشان دهنده پوشش الیاف بازالتی به وسیله لایه‌ای از جنس رزین می‌باشد که باعث پیوستگی و یکپارچگی این الیاف تابیده شده است. از سوی دیگر سطوح زبر و شکل تابیده این الیاف موجب تقویت استحکام پیوند الیاف بازالتی با بتن می‌شود.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف بازالتی تابیده

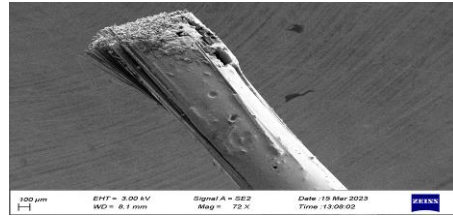
نمونه	طول (میلی‌متر)	نسبت طول به قطر الیاف	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	تعداد در هر کیلوگرم
الیاف بازالتی تابیده	۴۳	۶۱	۲/۱	۱۰۰۰	۴۴	۲۷۴۰۰



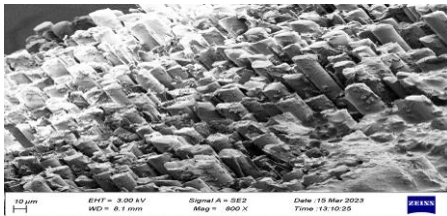
شکل ۴. نمایی از الیاف بازالتی تابیده



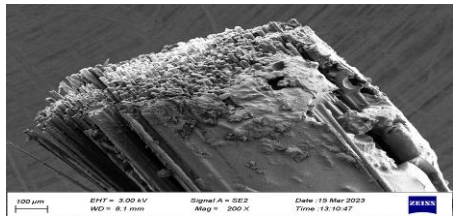
ب



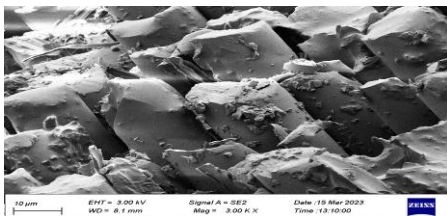
الف



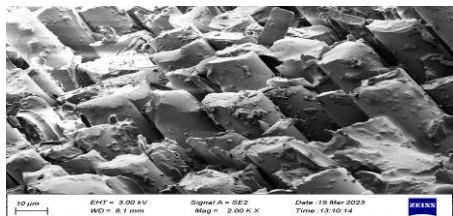
د



ج



و



ه

شکل ۵. نمایی از تصاویر میکروسکوپی الیاف بازالتی تابیده در بزرگنمایی: الف) ۷۲X، ب) ۱۰۰X، ج) ۲۰۰X، د) ۸۰۰X، ه) ۲۰۰۰X و و) ۳۰۰۰X

ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

جدول ۳ اجزای مورد استفاده در ساخت مخلوط بتن مورد استفاده برای ارزیابی رفتار بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی را نشان می‌دهد. برای ساخت بتن در این پژوهش از همزن ۵ لیتری هوبارت^۱ رومیزی استفاده شده است (شکل ۶). برای ساخت مخلوط بتن، نسبت ثابت آب به مجموع سیمان و میکروسیلیس برابر ۰/۴۵ و نسبت میکروسیلیس به سیمان برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به کوچک بودن قالب‌ها و

^۱Hobart

اطمینان از یکنواختی بتن، از فوق‌روان‌کننده (SMF) در تمامی نمونه‌ها برای رسیدن به اسلامپ 120 ± 5 میلی‌متر استفاده شده است.

جدول ۳. ترکیب بکار رفته در بتن معمولی (کیلوگرم بر متر مکعب)

نمونه	سیمان	آب	ماسه	شن	S200	S400	میکروسیلیس	SMF
بتن معمولی	۴۲۴	۲۰۸	۱۰۶۶	۴۵۸	۱۳۰	۴۳/۵	۴۳	۷/۵



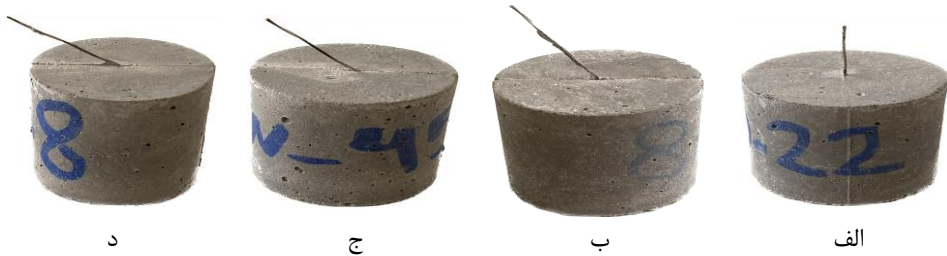
شکل ۶. نمایی از همزن رومیزی هوبارت

از جمله عوامل ایجاد انحراف در نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی، خطا در ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها می‌باشد. از اینرو مراحل وزن‌کشی مصالح، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها برنامه‌ریزی و انجام آن به‌صورت دقیقی شکل گرفته است. شکل ۷ زمان لازم برای ساخت بتن را نشان می‌دهد که در حدود ۱۱-۱۰ دقیقه می‌باشد. ابتدا ماسه و شن به مدت ۱ دقیقه در همزن مخلوط می‌گردند. پس از آن، آب جذبی به مخلوط شن و ماسه اضافه و به مدت ۱ دقیقه دیگر مخلوط می‌گردند. در مرحله بعد، سیمان، ریزدانه‌ها و میکروسیلیس به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه مخلوط می‌شوند. در مرحله بعدی، آب و فوق‌روان‌کننده (SMF) به مخلوط اضافه و به مدت ۳ دقیقه دیگر کل بتن در همزن هوبارت با یکدیگر مخلوط می‌شوند. در نهایت، تمامی مواد به مدت ۳ دقیقه دیگر مخلوط می‌شوند تا بتن تولید شده به قوام مناسب برسد. عملیات بتن‌ریزی در قالب‌ها در دو مرحله صورت گرفته شده است. برای دستیابی به سطح یکنواخت در بتن، فرایند وایبره به‌صورت دو لایه‌ای درون قالب انجام شده است. پس از ریختن هر لایه بتن، به‌وسیله میله‌ای فولادی ۲۴ بار ضربه و فشرده شده است، سپس هر لایه به مدت ۳۶ ثانیه با دستگاه وایبره تحت لرزش قرار گرفته است.



شکل ۷. نمایی شماتیک از مراحل فرآیند طرح اختلاط بتن

در این پژوهش، الیاف بازالتی تابیده با سه طول مدفون مختلف ۸، ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر و زاویه‌های تمایل ۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به امتداد محور طولی نمونه‌ها در ماتریس بتنی با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال جایگذاری شده است (شکل ۸). در این پژوهش، نام‌گذاری نمونه‌ها طبق الگوی ذکر شده در ادامه انجام شده است. حرف اولیه "N" نمایانگر بتن معمولی است، که پس از آن دو عدد قرار می‌گیرد. عدد اول زاویه تمایلی را که الیاف درون ماتریس بتنی قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد و عدد دوم عمق مدفون الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی را مشخص می‌کند. به عنوان مثال، نمونه بتنی که الیاف آن در زاویه تمایل ۴۵ درجه نسبت به امتداد محور طولی نمونه با عمق مدفون ۱۵ میلی‌متر قرار دارد، طبق سیستم نام‌گذاری این پژوهش به صورت N-45-15 شناخته می‌شود.



شکل ۸. نمونه‌هایی با زوایای تمایل مختلف نسبت به امتداد محور طولی نمونه در ماتریس بتنی: الف) صفر، ب) ۳۰، ج) ۴۵ و د) ۶۰ درجه

برای جایگذاری الیاف در درون قالب، ابتدا با توجه به زاویه تمایل و طول مدفون مورد نظر، الیاف بازالتی تابیده توسط گوه‌ای چوبی پیش ساخته در گیره نگهدارنده الیاف قرار داده می‌شوند. در ادامه قالب پلی اتیلن دو تکه به وسیله‌ای بستی محکم بر روی گیره نگهدارنده الیاف بسته می‌شود (شکل ۹).



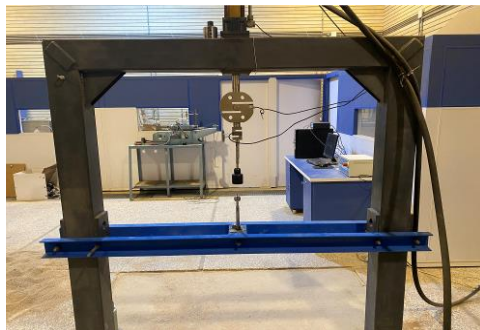
شکل ۹. الف) قرار دادن الیاف با زاویه مناسب در قالب توسط گوه چوبی، ب) گیره نگهدارنده الیاف و قالب و ج) قالب بر روی گیره نگهدارنده

برای انجام هر مورد آزمایش، شش نمونه تولید و سپس مورد آزمایش قرار گرفته شده است. تمامی نمونه‌ها، ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی در دمای اتاق از قالب خارج شده و سپس به مدت ۲۸ روز در یک تانک آب در دمای 23 ± 2 درجه سلسیوس نگهداری و عمل‌آوری شده است. پارامترهایی مانند بیشینه نیرو، جابجایی مربوط به بیشینه نیرو و انرژی بیرون کشیدگی (مساحت زیر منحنی) در بخش‌های بعدی مشخص و تحلیل خواهند شد. لازم به

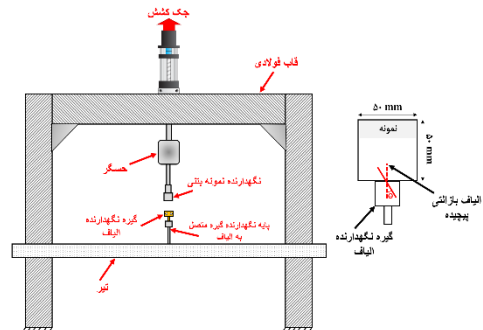
توضیح است که تمامی پارامترهای بیان شده در بخش‌های بعدی، میانگین حداقل شش آزمایش انجام شده برای هر مورد می‌باشد.

روند انجام آزمایش

شکل ۱۰ نشان دهنده دستگاه آزمایش بیرون کشیدگی الیاف می‌باشد که با یک حسگر وزنی ۱۰۰۰ نیوتن و کنترل جابجایی از طریق حسگر الکترومکانیکی خطی (LVDT)^۱ برای تمامی آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده است. برای انجام آزمایش‌ها، سرعت حرکت دستگاه بر روی ۱ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شده است. انتهای آزاد الیاف به‌طور محکم در گیره قرار گرفته و بار کششی به آن وارد می‌گردد. به‌منظور جلوگیری از لغزش الیاف در هنگام انجام آزمایش، طول آزاد الیاف بین نمونه و دستگاه گیره به حداقل رسانده شده است. شرایط شبیه‌سازی شده در این آزمایش مشابه با وضعیت یک نمونه بتن مسلح به الیاف است که ترک خورده و الیاف در حال پل زدن روی ترک‌ها هستند. نیروی کشش توسط حسگر وزنی متصل به سیستم گیره الیاف و دستگاه آزمایش ثبت می‌گردد، در حالی که لغزش الیاف توسط دستگاه حسگر الکترومکانیکی خطی ثبت گردیده شده است. برای هر نمونه مورد بررسی حداقل شش نمونه مشابه تهیه شده است (شکل ۱۱) و تمامی آزمایش‌ها تا زمانی که الیاف به‌طور کامل از بتن جدا شوند، ادامه یافته است.



ب



الف



د



ج

شکل ۱۰. الف) نمایشی شماتیک از آزمایش بیرون کشیدگی الیاف، ب) دستگاه بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی، ج) حسگر وزنی و نگهدارنده قطعه بتنی و د) پایه نگهدارنده گیره متصل به الیاف

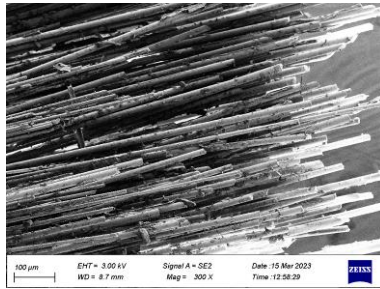
^۱Linear Variable Differential Transformer



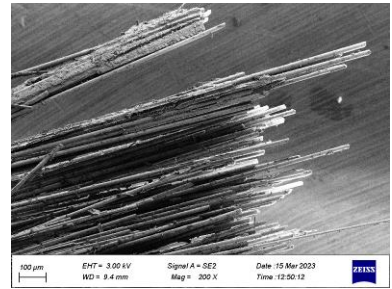
شکل ۱۱. آماده سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی

نتایج آزمایش

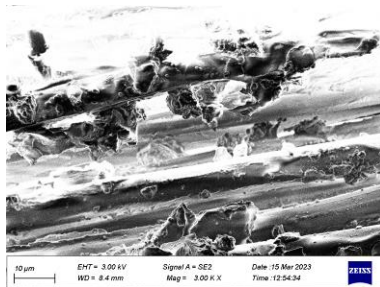
نتایج حاصل از انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف در منحنی‌های نیرو-لغزش برای تمامی نمونه‌های ساخته‌شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این منحنی‌ها بر اساس طول مدفون الیاف (۸، ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر) و زاویه‌های تمایل آن‌ها نسبت به امتداد محور طولی نمونه‌ها (۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) از یکدیگر متمایز شده‌اند. برای هر حالت، حداقل ۶ نمونه تحت آزمایش قرار گرفته شده است. نتایج مربوط به بیشینه نیروی کششی، جابجایی مربوطه در بیشینه نیرو و مساحت زیر منحنی نیرو-لغزش (انرژی بیرون کشیدگی) برای هر نمونه بررسی و محاسبه شده است. این مقادیر همراه با میانگین‌های آن‌ها برای هر حالت در جدول ۴ آورده شده است. در این قسمت تأثیر زاویه تمایل الیاف نسبت به جهت بارگذاری و طول مدفون الیاف بر پاسخ بیرون کشیدگی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی الیاف، مشاهده می‌گردد که بیشترین شکست الیاف در زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه با طول مدفون ۲۲ میلی‌متر صورت گرفته است. بر اساس نمودارهای شکل ۱۳، درصد الیاف شکسته شده در زاویه صفر درجه برابر ۱۱ درصد، در زاویه ۳۰ درجه برابر ۵۰ درصد، در زاویه ۴۵ درجه برابر ۳۳ درصد، و در زاویه ۶۰ درجه برابر ۳۹ درصد است. شکل ۱۲ نشان دهنده الیاف پاره شده در هنگام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی برای نمونه‌های N-45-15 و N-60-8 می‌باشد. همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده می‌شود، لایه رزین الیاف از بین رفته و ذرات بتن به الیاف بازالتی تابیده چسبیده شده است که این مورد نشان‌دهنده پیوند مناسب بین الیاف و ماتریس بتنی است. این امر نشان می‌دهد که در مدت بیرون آمدن الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی، سطح تابیده آن‌ها باعث استهلاک انرژی قابل توجهی بین دو سطح ترک می‌شود.



ب



الف



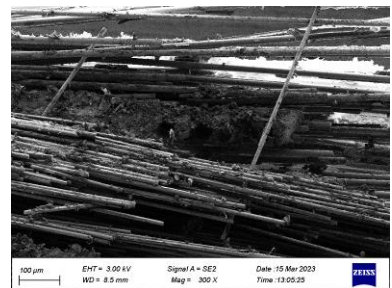
د



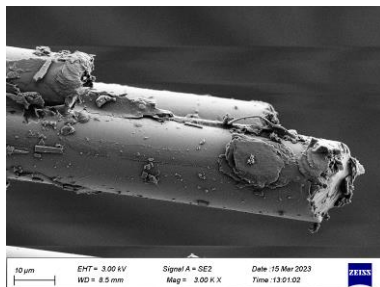
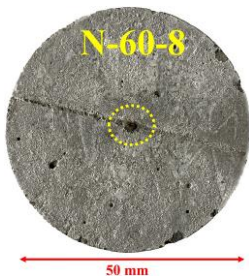
ج



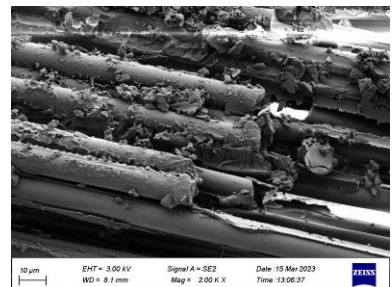
و



ه

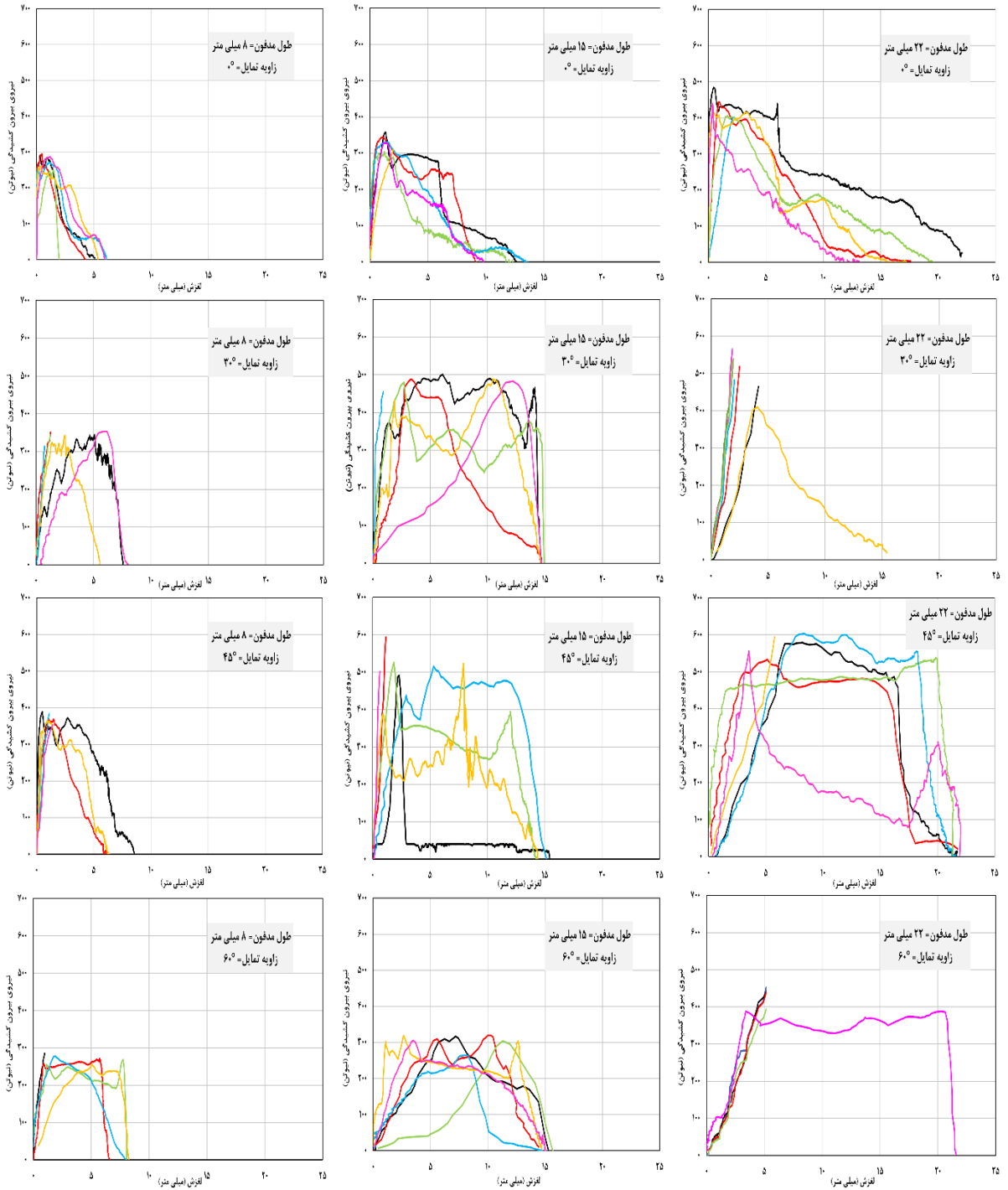


ح



ز

شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های N-45-15 (الف) $\times 200$ ، (ب) $\times 300$ ، (ج) $\times 2000$ ، (د) $\times 3000$ و N-60-8 (ه) $\times 300$ ، (و) $\times 800$ ، (ح) $\times 3000$ و (ز) $\times 2000$ و (ز) $\times 800$



شکل ۱۳. نتایج نمودارهای نیرو-لغزش بدست آمده از آزمایش های بیرون کشیدگی ایف

جدول ۴. نتایج مرتبط با بیشینه نیرو، لغزش متناظر با بیشینه نیرو و انرژی شکست در آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

میانگین انرژی بیرون کشیدگی (نیوتن-متر)	انرژی بیرون کشیدگی (نیوتن-متر)	میانگین لغزش بیشینه (میلی متر)	لغزش بیشینه (میلی متر)	میانگین بیشینه نیرو (نیوتن)	بیشینه نیرو (نیوتن)	نوع شکست	طول مدفون (میلی متر)	زاویه تمایل (درجه)
۶۸۱/۷۰	۶۵۲/۷۷	۰/۷۵	-۰/۲۶	۲۹۰/۶۰	۳۰۴/۴۴	بیرون کشیدگی	۸	
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
۱۵۴۹/۳۶	۲۰۳۸/۶۲	۱/۳۸	۱/۲۰	۳۳۴/۳۷	۳۶۲/۰۵	بیرون کشیدگی	۱۵	
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						شکست		
۲۸۹۵/۴۰	۱۴۸۲/۷۶	۱/۰۶	-۰/۳۷	۲۳۸/۷۴	۴۸۶/۹۸	بیرون کشیدگی	۲۲	
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						شکست		
						بیرون کشیدگی		
۸۶۹/۲۴	۱۸۳۳/۶۹	۲/۶۹	۴/۵۲	۲۵۲/۲۱	۳۶۱/۴۹	بیرون کشیدگی	۸	
						شکست		
						شکست		
						شکست		
						بیرون کشیدگی		
۳۷۹۹/۸۸	۶۰۴۸/۹۷	۵/۶۸	۵/۸۷	۵۰۰/۸۰	۴۹۵/۲۴	بیرون کشیدگی	۱۵	
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						شکست		
						بیرون کشیدگی		
۹۴۸/۲۹	۱۰۲۸/۰۸	۲/۶۸	۴/۱۷	۵۳۲/۰۹	۵۸۱/۴۳	شکست	۲۲	
						شکست		
						شکست		
						شکست		
						بیرون کشیدگی		
۸۹۰/۱۶	۲۰۹۶/۱۶	۰/۹۵	-۰/۲۸	۳۷۱/۲۱	۳۹۵/۳۷	بیرون کشیدگی	۸	
						بیرون کشیدگی		
						شکست		
						شکست		
						شکست		
۲۴۲۲/۶۷	۹۵۱/۷۵	۲/۹۸	۲/۰۰	۵۴۲/۰۷	۵۰۸/۹۰	بیرون کشیدگی	۱۵	
						شکست		
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
۶۵۹۸/۶۸	۷۵۷۵/۳۱	۸/۱۴	۷/۴۲	۵۷۶/۳۱	۵۸۳/۱۰	بیرون کشیدگی	۲۲	
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						بیرون کشیدگی		
						شکست		

جدول ۴. نتایج مرتبط با بیشینه نیرو، لغزش متناظر با بیشینه نیرو و انرژی شکست در آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

زاویه تمایل (درجه)	طول مدفون (میلی متر)	نوع شکست	بیشینه نیرو (نیوتن)	میانگین بیشینه نیرو (نیوتن)	لغزش بیشینه (میلی متر)	میانگین لغزش بیشینه (میلی متر)	انرژی بیرون کشیدگی (نیوتن-متر)	میانگین انرژی بیرون کشیدگی (نیوتن-متر)
۸	۸	شکست	۲۹۳/۴۵	۲۷۹/۱۵	۰/۹۷	۳/۶۳	۱۸۱/۰۰	۱۰۷۰/۱۲
		بیرون کشیدگی	۲۷۳/۵۲		۵/۷۳		۱۴۶۵/۲۶	
		بیرون کشیدگی	۲۸۸/۴۸		۷/۶۷		۱۶۹۹/۰۰	
		بیرون کشیدگی	۲۸۱/۹۹		۱/۵۷		۱۴۰۷/۵۱	
		شکست	۲۷۶/۴۵		۰/۹۲		۱۰۹/۱۵	
		بیرون کشیدگی	۲۶۱/۲۰		۴/۹۰		۱۵۵۸/۷۷	
۶۰	۱۵	بیرون کشیدگی	۳۳۶/۳۰	۳۳۸/۴۰	۶/۶۳	۵/۹۶	۲۷۶۶/۳۵	۲۵۸۷/۲۷
		بیرون کشیدگی	۳۳۵/۶۶		۵/۲۶		۲۹۲۸/۶۱	
		بیرون کشیدگی	۳۳۱/۳۸		۱۰/۷۶		۲۰۳۸/۷۳	
		بیرون کشیدگی	۳۱۹/۹۵		۷/۵۲		۱۷۱۶/۳۱	
		بیرون کشیدگی	۳۳۰/۷۰		۲/۲۷		۳۳۱۳/۱۵	
		بیرون کشیدگی	۳۲۶/۴۰		۳/۳۱		۲۸۶۰/۳۶	
۲۲	۲۲	شکست	۴۸۹/۴۰	۴۳۴/۹۰	۵/۱۶	۶/۹۲	۱۱۷۲/۹۲	۲۲۶۴/۸۰
		شکست	۴۵۸/۱۰		۵/۱۶		۱۰۷۷/۶۴	
		شکست	۴۱۶/۹۸		۵/۴۳		۱۱۱۲/۴۵	
		شکست	۴۱۱/۳۰		۵/۱۶		۱۰۲۸/۷۵	
		بیرون کشیدگی	۳۹۸/۷۰		۱۳/۷۱		۶۹۳۲/۲۳	

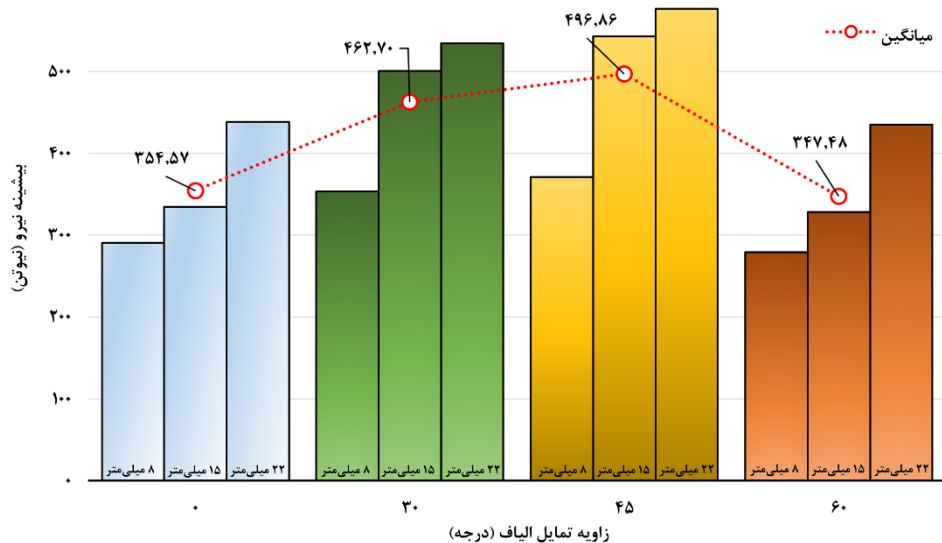
بر اساس شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در بیش‌تر آزمایش‌های بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده از ماتریس بتنی، الیاف از مرکز نمونه و بدون آسیب به اطراف یا ایجاد ترک موضعی خارج شده است.



شکل ۱۴. نتایج خروج الیاف از نمونه‌ها در آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

با توجه به منحنی‌های بیرون کشیدگی الیاف در شکل ۱۵، مقایسه بین زوایای مختلف انحراف (۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) و طول‌های دفن شده (۸، ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر) انجام پذیرفته است. همان‌طور که مشخص است با افزایش زاویه تا ۴۵ درجه نسبت به جهت بار، بیشینه نیرو با افزایش طول مدفون الیاف افزایش می‌یابد. اما پس از ۴۵ درجه و در زاویه ۶۰ درجه، بیشینه نیروی کششی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش طول مدفون الیاف، در زاویه‌های تمایل مشابه، بیشینه نیرو افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل از نمودارهای نیرو-لغزش و داده‌های جدول ۴، مشخص می‌گردد که با افزایش طول دفن در زاویه صفر درجه، بیشینه نیروی میانگین برای طول‌های ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر به ترتیب ۱۵ و ۵۱ درصد بیش‌تر از طول مدفون ۸ میلی‌متر افزایش یافته است. به‌طور مشابه، بیشینه نیروی میانگین برای زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با طول‌های مدفون ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر نیز به ترتیب

۴۲، ۵۱، ۴۶، ۵۵، ۱۸ و ۵۶ درصد نسبت به طول مدفون ۸ میلی‌متر افزایش یافته است که این روند با توجه به نقش قابل توجه شکل تابیده الیاف بازالتی قابل توجیه است (شکل ۱۵). با توجه به جدول ۳ و شکل ۱۳، مشخص می‌گردد که بیش‌ترین مقدار انرژی بیرون کشیدگی به مقدار ۶۵۹۹ نیوتن-میلی‌متر و لغزش بیشینه مربوط به نیروی اوج به ۸/۱۴ میلی‌متر، مرتبط با نمونه N-45-22 می‌باشد.



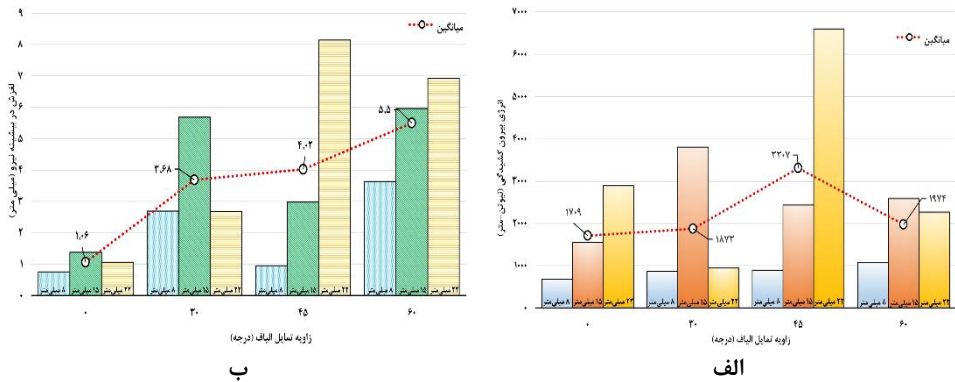
شکل ۱۵. نمودار بیشینه نیرو-زاویه تمایل در آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیدگی به مکانیزم چسبندگی آن‌ها در خصوص بین الیاف و ماتریس بتنی بستگی دارد. اجزای اصلی این مکانیزم را چسبندگی، اصطکاک و قفل شدن مکانیکی بین الیاف و ماتریس بتنی تشکیل می‌دهد. قفل شدن مکانیکی الیاف بازالتی تابیده مهم‌ترین عامل در ایجاد مقاومت در برابر بیرون کشیدگی است. برای دستیابی به رفتار سخت‌شدگی کششی یا سخت‌شدگی ناشی از کرنش، مقاومت پس از ترک خوردگی مواد باید بیشتر از مقاومت اولیه تشکیل ترک باشد. مقاومت پس از ترک خوردگی مواد به‌طور مستقیم به استحکام پیوند میانگین بین الیاف و ماتریس بتنی بستگی دارد. با فرض ثابت بودن استحکام پیوند در طول مدفون الیاف، استحکام معادل پیوند می‌تواند با محاسبه انرژی مورد نیاز برای بیرون کشیدن الیاف در آزمایش مربوطه تعیین شود.

شکل ۱۶-الف تغییرات میانگین انرژی بیرون کشیدگی الیاف را در زوایای مختلف تمایل نمایش داده شده است. تحلیل این نمودار بیانگر آن است که تا زاویه ۴۵ درجه، میانگین انرژی بیرون کشیدگی افزایش و سپس کاهش یافته است. بیشینه میانگین انرژی بیرون کشیدگی مربوط به زاویه ۴۵ درجه است می‌باشد که نشان دهنده عملکرد خوب الیاف در این زاویه می‌باشد. به بیان دیگر در این حالت، با توجه به خصوصیات و شکل تابیده الیاف، انرژی بسیار زیادی تلف شده و ظرفیت باربری سازه افزایش پیدا می‌کند. از سوی دیگر نیز با توجه به شکل ۱۶-الف، در زوایای ۰ و ۴۵ درجه، افزایش طول مدفون سبب افزایش میانگین انرژی بیرون کشیدگی می‌شود. این

روند را می‌توان با افزایش سطح تماس، افزایش اصطکاک، و به‌ویژه اثر چرخش الیاف تابیده هنگام بیرون کشیدگی توجیه کرد. در واقع، الیاف تابیده با ایجاد مقاومت مکانیکی پیشگی، بخش قابل توجهی از انرژی اعمال شده را مستهلک می‌سازند و از این طریق موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی سیستم می‌شوند. علت عدم روند مشابه در زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه در ارتباط با پارگی الیاف در هنگام انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی می‌باشد.

همچنین در شکل ۱۶-ب، تغییرات میانگین لغزش در نقطه اوج نیرو به‌عنوان تابعی از زاویه تمایل الیاف بررسی شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، افزایش زاویه تمایل منجر به افزایش میانگین لغزش می‌گردد که این مورد در سایر مطالعات نیز گزارش شده است [۵۹؛۶۰]. به‌طور خاص، در آزمون‌های دارای طول مدفون ۸ میلی‌متر، افزایش زاویه تمایل از ۰ به ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه منجر به افزایش لغزش در نقطه اوج نیرو به میزان ۰/۳، ۲/۶ و ۳/۸ برابر می‌گردد. برای آزمون‌هایی با طول مدفون ۱۵ میلی‌متر، این افزایش برابر با ۳/۱، ۱/۲ و ۳/۳ برابر و در آزمون‌های با طول مدفون ۲۲ میلی‌متر به ترتیب معادل ۱/۵، ۶/۷ و ۵/۵ برابر است. این افزایش میانگین لغزش در اثر بالا رفتن مؤلفه‌های افقی نیرو در الیاف انحراف‌یافته و همچنین افزایش سطح تماس مؤثر در فرآیند بیرون کشیدگی قابل توجیه می‌باشد.



شکل ۱۶. نمودار تاثیرات زاویه تمایل و طول مدفون الیاف بر روی الف) انرژی بیرون کشیدگی و ب) مقدار لغزش در بیشینه نیرو

نتیجه‌گیری

یکی از اهداف انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف، بررسی مکانیزم رفتار الیاف در بتن مسلح الیافی است. قرارگیری تصادفی الیاف در داخل ماتریس بتنی باعث می‌شود که وقتی بتن الیافی تحت تنش‌های کششی و گسترش ترک قرار می‌گیرد، این الیاف رفتارها و اثرات مختلفی از خود نشان دهند که بسته به زاویه قرارگیری الیاف در دو وجه ترک و همچنین طول مدفون الیاف در ماتریس بتنی متفاوت است. انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی به روشن‌سازی و افزایش درک نحوه تأثیر الیاف مختلف بر ماتریس بتنی کمک می‌کند. از سوی دیگر، پارامترهای مختلف مرتبط با الیاف مورد استفاده در بتن الیافی، مانند شکل الیاف، طول الیاف، مدول الاستیسیته الیاف و غیره، باعث تقویت مقاومت کششی و خمشی بتن الیافی با اثرات مختلف می‌شود. بنابراین،

بررسی رفتار هر یک از این الیاف می‌تواند به محققان در درک بهتر و عمیق‌تر استفاده از انواع مختلف الیاف کمک کند. شایان ذکر است که نتایج ارائه‌شده در این پژوهش تنها از طریق انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس بتنی به‌دست‌آمده است. این نتایج بیشتر برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی و تحلیلی مفید هستند. نتایج زیر در خصوص رفتار کلی بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده با طول‌های مدفون و زوایای تمایل مختلف از ماتریس سیمانی به‌دست‌آمده است:

۱. بیشینه نیرو با افزایش طول مدفون الیاف افزایش می‌یابد و در زاویه ۴۵ درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این افزایش به دلیل کشش موازی با جهت الیاف در مقایسه با کشش در طول آن‌ها، خم شدن الیاف در نقطه خروج، و افزایش تنش اصطکاکی ناشی از مؤلفه نیروی عمود بر جهت الیاف در این نقطه است. با این حال، در زاویه ۶۰ درجه، بیشینه نیرو کاهش می‌یابد.
۲. بررسی تغییرات میانگین انرژی بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده در زوایای مختلف تمایل نشان می‌دهد که این شاخص تا زاویه ۴۵ درجه روندی افزایشی داشته و پس از آن کاهش می‌یابد. بیشترین میزان انرژی جذب‌شده هنگام بیرون کشیدگی، در زاویه ۴۵ درجه به‌دست آمد که بیانگر عملکرد بهینه الیاف در این زاویه نسبت به ترک است. به‌عبارت دیگر، هنگامی که الیاف تابیده با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح شکست در بتن قرار می‌گیرند، قادرند نقش مؤثرتری در مهار ترک و تحمل نیروهای کششی ایفا کنند. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در زوایای صفر و ۴۵ درجه، افزایش طول مدفون الیاف منجر به افزایش محسوس انرژی بیرون کشیدگی می‌گردد. این رفتار را می‌توان به افزایش سطح تماس، افزایش اصطکاک بین الیاف و ماتریس، و به‌ویژه نقش چرخش مکانیکی الیاف تابیده هنگام بیرون کشیدگی نسبت داد. الیاف تابیده با ایجاد مقاومت پیچشی، بخشی از انرژی اعمال‌شده را مستهلک کرده و در نتیجه به ارتقای ظرفیت جذب انرژی سیستم کمک می‌کنند.
۳. افزایش طول مدفون الیاف در زاویه صفر درجه به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۵ و ۵۱ درصد در بیشینه نیروی کشیدگی میانگین برای طول‌های ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر در مقایسه با طول مدفون ۸ میلی‌متر می‌شود. به‌طور مشابه، در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، با طول‌های مدفون ۱۵ و ۲۲ میلی‌متر، میانگین بیشینه نیروی کشیدگی به‌ترتیب ۴۲، ۵۱، ۴۶، ۵۵، ۱۸ و ۵۶ درصد افزایش یافته است.
۴. مقایسه انرژی بیرون کشیدگی در زوایای تمایل مختلف نشان می‌دهد که در هر زاویه تمایل خاص، الیاف با طول مدفون بیش‌تر، بیشینه نیروی بیرون کشیدگی بیشتری را از خود نشان می‌دهند. این افزایش به شکل تابیده الیاف بازالتی و طول مدفون آن‌ها در ماتریس بتنی مرتبط است. الیاف با طول مدفون بیش‌تر در هنگام بیرون آمدن از ماتریس بتنی، انرژی بیشتری را مستهلک می‌نمایند که به علت چرخش آن‌ها در هنگام خروج از ماتریس بتنی می‌باشد.
۵. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های بیرون کشیدگی الیاف بازالتی تابیده نشان می‌دهند که با افزایش زاویه تمایل الیاف بازالتی تابیده در ماتریس بتنی، حداکثر لغزش مربوط به بیشینه نیرو نیز افزایش می‌یابد.

References

- [1] Alarjy, A. M. A., Akhaveissy, A. H., & Al-Abbas, B. (2024). Assessing the Impact of Fire on the Behavior of GFRP-reinforced Lightweight Concrete Deep Beams with

- Varied Stirrup Spacing: An Experimental Analysis. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University*, 21(1), 651-671. <https://www.doi.org/10.48301/KSSA.2024.405795.2624>
- [2] Cucchiara, C., La Mendola, L., & Papia, M. (2004). Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement. *Cement and concrete composites*, 26(7), 777-786. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.07.001>
- [3] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2018). How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC?. *Cement and Concrete Composites*, 90, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.021>
- [4] Lee, S. F., & Jacobsen, S. (2011). Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and structures*, 44, 1451-1465. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9710-4>
- [5] Shah, S. P., & Ouyang, C. (1991). Mechanical behavior of fiber-reinforced cement-based composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(11), 2727-2953. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb06836.x>
- [6] Kim, J. K., Zhou, L. M., & Mai, Y. W. (1993). Interfacial debonding and fibre pull-out stresses: Part III Interfacial properties of cement matrix composites. *Journal of materials science*, 28, 3923-3930. <https://doi.org/10.1007/BF00353200>
- [7] Cotterell, B., & Mai, Y. W. (1995). *Fracture mechanics of cementitious materials* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482269338>
- [8] Armelin, H. S., & Banthia, N. (1997). Predicting the flexural postcracking performance of steel fiber reinforced concrete from the pullout of single fibers. *Materials Journal*, 94(1), 18-31. <https://doi.org/10.14359/281>
- [9] Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., & Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, 99(5), 463-472. <https://hdl.handle.net/2027.42/84693>
- [10] Lee, Y., Kang, S. T., & Kim, J. K. (2010). Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2030-2041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.009>
- [11] Chanvillard, G., & Aïtcin, P. C. (1996). Pull-out behavior of corrugated steel fibers: Qualitative and statistical analysis. *Advanced cement based materials*, 4(1), 28-41. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90060-7](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90060-7)
- [12] Sujivorakul, C., Waas, A. M., & Naaman, A. E. (2000). Pullout response of a smooth fiber with an end anchorage. *Journal of engineering mechanics*, 126(9), 986-993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:9\(986\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:9(986))
- [13] Ezeldin, A., & Balaguru, P. (1989). Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 86(5), 515-524. <https://doi.org/10.1109/ISUMA.1993.366713>
- [14] Stang, H., Li, V. C., & Krenchel, H. (1995). Design and structural applications of stress-crack width relations in fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 28, 210-219. <https://doi.org/10.1007/BF02473251>
- [15] Lin, Z., Kanda, T., & Li, V. C. (1999). On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites. *Journal of Concrete Science and Engineering*, 1(173), 173-184. <https://hdl.handle.net/2027.42/84718>
- [16] Wang, X., Wu, G., Wu, Z., Dong, Z., & Xie, Q. (2014). Evaluation of prestressed basalt fiber and hybrid fiber reinforced polymer tendons under marine

- environment. *Materials & Design*, 64, 721-728.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.064>
- [17] LiLi, H., Yuan, Z., Zhao, J., Miao, S., Li, Y., Liu, C., ... & Yang, C. (2023). Effects of TiO₂ doped to basalt on producing continuous fiber and their electrical properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 599, 121986.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121986>
- [18] Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A., & Zhang, K. (2017). Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*, 155, 1101-1111..
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.130>
- [19] Dong, Z., Wu, G., Zhao, X. L., Zhu, H., & Shao, X. (2019). Behaviors of hybrid beams composed of seawater sea-sand concrete (SWSSC) and a prefabricated UHPC shell reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, 213, 32-42.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.059>
- [20] Su, C., Wang, X., Ding, L., Chen, Z., Liu, S., & Wu, Z. (2021). Experimental study on the seismic behavior of seawater sea sand concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars. *Engineering Structures*, 248, 113269.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113269>
- [21] Shi, J., Wang, X., Zhang, L., Wu, Z., & Zhu, Z. (2022). Composite-wedge anchorage for fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Composites for Construction*, 26(2), 04022005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001194)
- [22] Jiang, K., Wang, X., Chen, Z., Ding, L., Peng, Z., & Wu, Z. (2022). Effect of constituent content on mechanical behaviors of ultra-high performance seawater sea-sand concrete. *Construction and Building Materials*, 351, 128952.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128952>
- [23] Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., & Taylor, C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878-886.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.009>
- [24] Niaki, M. H., Fereidoon, A., & Ahangari, M. G. (2018). Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete. *Composite Structures*, 191, 231-238.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.063>
- [25] Landucci, G., Rossi, F., Nicolella, C., & Zanelli, S. (2009). Design and testing of innovative materials for passive fire protection. *Fire Safety Journal*, 44(8), 1103-1109. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.08.004>
- [26] Choi, J. I., & Lee, B. Y. (2015). Bonding properties of basalt fiber and strength reduction according to fiber orientation. *Materials*, 8(10), 6719-6727.
<https://doi.org/10.3390/ma8105335>
- [27] Jiang, K., Wang, X., Ding, L., Chen, Z., Liu, J., & Wu, Z. (2023). Experimental study on pullout behaviour of basalt fiber-reinforced polymers minibar embedded in ultra-high performance seawater sea-sand concrete. *Journal of Building Engineering*, 68, 106160. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106160>
- [28] Storm, J., Pise, M., Brands, D., Schröder, J., & Kaliske, M. (2021). A comparative study of micro-mechanical models for fiber pullout behavior of reinforced high performance concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 243, 107506.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107506>

- [29] Krahl, P. A., Pereira, M. F., Dalfré, G. M., & Siqueira, G. H. (2020). A novel approach to characterize the direct shear pullout behavior of single hooked steel fibers. *Cement and concrete composites*, 113, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103685>
- [30] Pang, Z., Lu, C., Liu, J., Yao, Y., & Wang, J. (2023). Experimental study of tensile properties of strain-hardening cementitious composites (SHCCs) reinforced with innovative twisted basalt fibers. *Structures*, 48, 1977-1988. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.067>
- [31] Xu, M., Hallinan, B., & Wille, K. (2016). Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 70, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.014>
- [32] Tai, Y. S., El-Tawil, S., & Chung, T. H. (2016). Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates. *Cement and Concrete Research*, 89, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.013>
- [33] Tai, Y. S., & El-Tawil, S. (2017). High loading-rate pullout behavior of inclined deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 204-218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.018>
- [34] Park, J. K., Park, S. H., & Kim, D. J. (2018). Effect of matrix shrinkage on rate sensitivity of the pullout response of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 94, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.014>
- [35] Park, J. K., Ngo, T. T., & Kim, D. J. (2019). Interfacial bond characteristics of steel fibers embedded in cementitious composites at high rates. *Cement and Concrete Research*, 123, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105802>
- [36] Jamnam, S., Maho, B., Techaphatthanakon, A., Ruttanapun, C., Aemlaor, P., Zhang, H., & Sukontasukkul, P. (2022). Effect of graphene oxide nanoparticles on blast load resistance of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 343, 128139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128139>
- [37] Chindaprasirt, P., Sukontasukkul, P., Techaphatthanakon, A., Kongtun, S., Ruttanapun, C., Yoo, D. Y., ... & Banthia, N. (2021). Effect of graphene oxide on single fiber pullout behavior. *Construction and Building Materials*, 280, 122539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122539>
- [38] Wille, K., & Loh, K. J. (2010). Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes. *Transportation Research Record*, 2142(1), 119-126. <https://doi.org/10.3141/2142-18>
- [39] Wu, Z., Khayat, K. H., & Shi, C. (2017). Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 95, 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.031>
- [40] Wu, Z., Shi, C., & Khayat, K. H. (2018). Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO₃ particles. *Cement and Concrete Composites*, 86, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.014>

- [41] Benedetty, C. A., Krahl, P. A., Goes, C. M., de Almeida, L. C., Trautwein, L. M., & Silva, F. A. (2023). Effects of fiber content, inclination angle, and casting point on the fiber-matrix interaction of High-Strength Fiber-Reinforced Self Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 398, 132537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132537>
- [42] Yoo, D. Y., Je, J., Choi, H. J., & Sukontasukkul, P. (2020). Influence of embedment length on the pullout behavior of steel fibers from ultra-high-performance concrete. *Materials Letters*, 276, 128233. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128233>
- [43] Cao, Y. Y. Y., & Yu, Q. L. (2018). Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 201, 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.029>
- [44] Wang, L., Li, T., Shu, Q., Sun, S., Li, C., & Dai, C. (2023). Experimental Study of Fiber Pull-Outs in a Polymer Mortar Matrix. *Materials*, 16(9), 3594. <https://doi.org/10.3390/ma16093594>
- [45] Huang, L., Yuan, M., Wei, B., Yan, D., & Liu, Y. (2022). Experimental investigation on sing fiber pullout behaviour on steel fiber-matrix of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*, 318, 125899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125899>
- [46] Zhang, K., Yuan, Q., Zuo, S., Huang, T., & Wang, Y. (2023). Pullout behavior of steel fiber embedded into cement matrix under low humidity curing. *Cement and Concrete Research*, 172, 107217. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107217>
- [47] Xu, X., Xu, L., Zeng, G., & Wang, X. (2023). Effect of different fiber sizing on basalt fiber-reinforced cement-based materials at low temperature: From macro mechanical properties to microscopic mechanism. *Construction and Building Materials*, 392, 131773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131773>
- [48] Shi, F., Yin, S., Pham, T. M., Tuladhar, R., & Hao, H. (2021). Pullout and flexural performance of silane groups and hydrophilic groups grafted polypropylene fibre reinforced UHPC. *Construction and Building Materials*, 277, 122335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122335>
- [49] Iwaszko, J. (2019). Making asbestos-cement products safe using heat treatment. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00221. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00221>
- [50] Gong, X., Liu, Y., Wang, Y., Xie, Z. Dong, M., Liu, H., et al., (2019). Amino graphene oxide/dopamine modified aramid fibers: Preparation, epoxy nanocomposites and property analysis. *Polymer*, 168, 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.02.021>
- [51] Liu, B., Zhang, Y, Zhang, Y., Liu, E., Xu, K., Tian, Z., Chen, J., Meng, X, and Yan, K. (2021). Study on resource utilization of composite powder suppressor prepared from acrylic fiber waste sludge, *Journal of Cleaner Production*, 291, 125914. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125914>
- [52] Aldosari, S.M., Khan, M., and Rahatekar, S. (2020). Manufacturing carbon fibres from pitch and polyethylene blend precursors: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7786-7806. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.037>
- [53] Karimipour, A., and de Brito, J. (2021). Influence of polypropylene fibres and silica fume on the mechanical and fracture properties of ultra-high-performance

- geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 283, 122753. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122753>
- [54] Sagar, B., and Sivakumar, M. V. N. (2021). Compressive properties and analytical modelling for stress-strain curves of polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 291, 123192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123192>
- [55] Mirza, F.A., and Soroushian, P. (2002). Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 223-227. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00038-5)
- [56] Qi, L., Li, S., Zhang, T., Zhou, J., and Li, H. (2019). An analysis of the factors affecting strengthening in carbon fiber reinforced magnesium composites. *Composite Structures*, 209, 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.109>
- [57] Li, W., and Xu, J. (2009). Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar. *Materials Science and Engineering: A*, 513, 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.033>
- [58] Perceka, W., and Liao, W. (2021). Experimental study of shear behavior of high strength steel fiber reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, 240, 112329. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112329>
- [59] Robins, P., Austin, S., & Jones, P. (2002). Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and structures*, 35, 434-442. <https://doi.org/10.1007/BF02483148>
- [60] Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., & Zhan, Y. (2014). Experimental, analytical and numerical analysis of the pullout behaviour of steel fibres considering different fibre types, inclinations and concrete strengths. *Structural Concrete*, 15(2), 126-135. <https://doi.org/10.1002/suco.201300058>