



## بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

محمد کنگوئی<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۹۹۱۹، eslami@kntu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با الیاف یکی از چالش‌های بزرگ مهندسی در صنایع مختلف به دلیل محدودیت‌های تولید آن می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش اختلاط جریان برشی به‌عنوان روشی جدید در حالت نیمه‌جامد و با کمک نیروی برشی در فرآیند تولید کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف استفاده شود. بدین منظور الیاف بازالت (با درصدهای حجمی 2، 4 و 6) در مذاب آلومینیوم A356 توزیع شده و با ایجاد جریان برشی در محدوده دمای نیمه‌جامد آلومینیوم، نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شدند. جهت بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها از آزمون سختی برینل و پانچ برشی استفاده شد. همچنین بررسی‌های ریزساختاری به همراه آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش درصد الیاف بازالت به‌طور هم‌زمان سختی، استحکام برشی و استحکام کششی بهبود یافته و در نهایت باعث بهبود استحکام نهایی کامپوزیت گردیده است. استحکام برشی از 119.1 مگاپاسکال برای نمونه بدون الیاف به 132.3 مگاپاسکال در کامپوزیت تقویت شده با 6 درصد حجمی الیاف بازالت افزایش یافت. همچنین نتایج آزمون سختی، افزایش سختی از 62.3 به 70.8 برینل را در نمونه حاوی 6 درصد حجمی الیاف بازالت نشان داد. استحکام کششی نهایی در این نمونه نیز بهبود 10.9 درصدی را نشان داد. بررسی‌های میکروساختاری نشان داد که تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک باعث بهبود خواص مکانیکی در این کامپوزیت شده است.

دریافت: 1402/03/13

پذیرش: 1402/05/18

### کلیدواژگان

کامپوزیت زمینه فلزی،  
اختلاط جریان برشی،  
خواص مکانیکی،  
رفتار سختی،  
الیاف بازالت

## Investigating the mechanical behavior and microstructure of basalt fibers-aluminum composite fabricated by thixomixing method

Mohammad Kangoobi<sup>1</sup>, Reza Eslami-Farsani<sup>1\*</sup>

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B 19919-43344, Tehran, Iran. eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Metal Matrix Composite,  
Shear Mixing,  
Mechanical Properties,  
Hardness Behavior,  
Basalt Fibers

### Abstract

Fabricating Metal matrix composites (MMCs) reinforced by fibers is one of the biggest issues in the engineering in various industries, due to production limitations. In this research, it has been tried to fabricate aluminum matrix composites reinforced by fibers through thixomixing as a novel method in semi-solid state and by helping shear force. For doing this, the basalt fibers (with the volume fraction of 2, 4, and 6) were dispersed into the molten A356 aluminum and by creating the shear mixing in the range of semi-solid temperature of aluminum, the composites were fabricated. For investigating the mechanical behavior of fabricated composites, the Brinell hardness and shear punch tests were used. Also, microstructural investigations and elemental analysis by scanning electron microscope were performed. The obtained results showed that by increasing the fibers content, the hardness and shear strength were simultaneously improved, which resulted in improvement of the ultimate strength of composite. The shear strength was increased from 119.1 MPa (for without fibers sample) to 132.3 MPa (in reinforced composite by 6 vol.% basalt fibers). Also, the hardness test results showed an increase in Brinell hardness from 62.3 to 70.8 Hb in the sample with 6 vol.% of basalt fibers. The ultimate tensile strength in this sample also showed 10.9% improvement. Microstructural investigations depicted that the formation of intermetallic compounds at the interface improved the mechanical properties.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Eslami-Farsani, R., Knagoobi, M., "Investigation the mechanical behavior and microstructure of basalt fibers aluminium composite fabricated by thixomixing method." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp. 2184-2192, 2023. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2002871.1839>

## 1- مقدمه

روی سطح الیاف، پوششی از جنس مس ایجاد کرده و سپس با روش ریخته‌گری نفوذی، کامپوزیت ساخته شد. بررسی سطوح شکست نشان داد که با افزایش دما و سرعت کرنش شکست، شکل‌پذیری همراه با افزایش دانسیته حفرت رخ می‌دهد. با توجه به سطح شکست کامپوزیت در دمای محیط و سرعت کرنش کم، شکست به صورت جدایش بین لایه‌ای، جدایش الیاف-زمینه به همراه خمش و کمانش الیاف بوده است. در مقابل در سرعت کرنش‌های بالا، مقدار چسبندگی بیشتری بین الیاف و زمینه و همچنین تغییر شکل پلاستیک زمینه در اطراف الیاف مشاهده شد.

تاکنون روش‌های گوناگونی برای تهیه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات یا الیاف گزارش شده است. روش‌های مختلفی مانند ریخته‌گری تحت فشار، نفوذ دهی تحت خلأ فلز مذاب و یا ریخته‌گری پیوسته کنترل شده با امواج آلتراسونیک را می‌توان اشاره نمود [10 و 11]. همچنین پوشش دهی با فلزات (مس، تیتانیوم و نیکل) و یا پوشش دهی با سرامیک‌ها (نظیر آلومینا و زیرکینا) روی الیاف و استفاده از فلاکس‌های مذاب به منظور افزایش ترشوندگی الیاف برای تولید کامپوزیت‌های آلومینیوم-الیاف نیز استفاده شده است.

یکی از روش‌های نوین ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیومی، اختلاط جریان برشی<sup>۶</sup> است که قابلیت تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده مانند الیاف کربن را فراهم می‌کند و اولین بار توسط اکبرزاده و همکاران معرفی شد [10]. در روش اختلاط جریان برشی، پس از ذوب آلیاژ پایه (آلومینیوم)، دمای مذاب تا محدوده نیمه جامد کم شده و سپس الیاف فاز تقویت کننده به آن اضافه می‌شود. به علت خاصیت نیمه جامد با ایجاد تنش برشی روی الیاف، ترکیبات بین فلزی تشکیل شده که باعث افزایش چسبندگی بیشتر الیاف به زمینه می‌شوند. در واقع ترکیبات بین فلزی به صورت یک لایه میانی عمل می‌کنند که از یک سو به الیاف چسبیده و از سوی دیگر به زمینه می‌چسبند و نقش انتقال دهنده نیرو از زمینه به الیاف را بر عهده دارند [10].

الیاف بازالت به عنوان الیاف معدنی قابلیت استفاده در دمای بالا را دارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، تحقیق در مورد کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت بسیار محدود بوده است. نوآوری کار پژوهشی حاضر، استفاده از روش اختلاط جریان برشی به منظور ساخت این کامپوزیت می‌باشد. به عبارت دیگر، با قرار دادن آلومینیوم در محدوده نیمه جامد، الیاف بازالت به آلومینیوم اضافه شده و پس از اختلاط در این محدوده به صورت یک قطعه خام بارریزی می‌شود. سپس خواص مکانیکی و ریزساختاری آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. آزمون پانچ برشی<sup>۸</sup> (SPT)، یکی دیگر از آزمون‌های موضعی استفاده شده از سال 1984 به بعد است [12]. این آزمون روشی برای ارزیابی خواص مکانیکی موادی است که از نظر دسترسی محدودیت دارند. این روش برای آزمون مواد پرتودیده<sup>۹</sup>، بایومواد، و کامپوزیت‌ها بکار برده شده است. داده‌های حاصل از SPT را می‌توان برای تعیین استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و افزایش طول بکار برد [12-15].

## 2- بخش تجربی

## 2-1- مواد اولیه

در این تحقیق از آلومینیوم A356 شرکت Xuxing Machinery استفاده شد. الیاف خرد شده بازالت با طول 4 mm نیز از شرکت Basaltex بلژیکی تهیه شد.

از جمله اهداف مهم در مهندسی مواد، دستیابی به مواد با خواص بهتر و در بسیاری از موارد، همراه کاهش هزینه‌های اقتصادی است. یکی از بزرگ‌ترین گروه‌های مواد مهندسی، کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند. با پیشرفت روزافزون علم و روش‌های جدید تولید مواد، و همچنین نیازمندی‌های روزافزون به ماده‌هایی جدید با ویژگی‌هایی همچون سبکی وزن، استحکام بالا و چقرمگی مناسب، توجه بسیاری از متخصصان و محققین مواد به این نوع از کامپوزیت‌ها جذب شده است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی محدوده وسیعی از مواد پیشرفته را شامل می‌شوند که می‌توانند در بازه گسترده‌ای از کاربردها مانند صنایع هوافضا، خودرو، بیوفناوری، الکترونیک و ورزشی استفاده شوند. کامپوزیت‌های زمینه فلزی شامل یک تقویت کننده در یک زمینه فلزی هستند. این دسته از کامپوزیت‌ها دارای مزایایی نسبت به فلز پایه و تقویت کننده می‌باشند. از جمله این مزایا می‌توان به رسانایی گرمایی، مقاومت سایشی، مقاومت خزشی، پایداری ابعادی و بخصوص نسبت چقرمگی به وزن و استحکام به وزن مناسب نام برد [1-4]. معمولاً در کامپوزیت‌های زمینه فلزی از فلزات سبک نظیر Al و Mg به عنوان زمینه استفاده می‌شود.

عبدالعظیم<sup>۱</sup> و همکاران [5] بر روی رفتار مکانیکی و سایشی کامپوزیت زمینه آلومینیوم حاوی الیاف کوتاه آلومینا با استفاده از روش ریخته‌گری تحقیق کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که فصل مشترک بین الیاف آلومینا و زمینه آلومینیوم می‌تواند به وسیله حضور عناصر آلیاژی در مذاب فلزی، استفاده از اتمسفر کنترل شده و پیش حرارت دهی الیاف قبل از ریخته‌گری بهبود یابد. حضور الیاف آلومینا به مقدار 12-2 درصد باعث اصلاح و ریزش ساختار یوتکتیک و سیلیسیم اولیه در آلیاژ شده است. همچنین گزارش شد که الیاف آلومینا باعث افزایش سختی و استحکام نهایی و کاهش چقرمگی شکست کامپوزیت شده است.

بابو و کانگ<sup>۲</sup> [6] به وسیله آزمون فرورونده نانو<sup>۳</sup> روی رفتار مکانیکی کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوالیاف گرافیت و الیاف کوتاه آلومینا مطالعه کردند. در این تحقیق وجود نانوالیاف گرافیت و الیاف کوتاه آلومینا و رسوبات ناشی از آن بر رفتار سختی و مدول کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج نشان داد که وجود مقدار زیاد نابعایی در ناحیه پلاستیک اطراف نانوالیاف گرافیت باعث افزایش سختی و مدول شده است.

حجاری<sup>۴</sup> و همکاران [7] تأثیر اعمال فشار بر رفتار شکست و استحکامی کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف کربن پوشش داده شده با فلز نیکل را توسط ریخته‌گری فشاری مورد بررسی قرار دادند. فشارهای انتخاب شده 30، 50 و 70 MPa بودند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش فشار باعث جدایش پوشش نیکل از سطح الیاف می‌شود. اما در فشار 30 MPa هیچ گونه جدایشی دیده نشد. کیونو<sup>۵</sup> و همکاران [8] تأثیر سیکل گرمایی بر رفتار کامپوزیت آلومینیوم-الیاف کربن را بررسی کردند. روش ساخت این محققان ریخته‌گری فشاری بود. نتایج نشان داد که تشکیل Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> در فصل مشترک، مکانیزم تخریب ناشی از سیکل‌های گرمایی می‌باشد. همچنین جدایش فصل مشترک یکی از عوامل مهم و اصلی تخریب بوده است.

لی<sup>۶</sup> و همکاران [9] تأثیر دما و سرعت کرنش را بر خواص کامپوزیت آلومینیوم 7075 حاوی الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند. این محققان ابتدا

6 Lee

7 Thixomixing

8 Shear Punch Test

9 Irradiated materials

1 Abd El-Azim

2 Babu and Kang

3 Nanoindentation

4 Hajjari

5 Kyono

تکرارپذیری، روی هر دسته نمونه حداقل سه آزمون انجام گرفت و از میانگین اعداد گزارش شده برای هر حالت، استحکام برشی محاسبه شد. برای محاسبه تنش برشی نیز از رابطه 1 استفاده شد [13].

$$\tau = \frac{P}{\pi dt} \quad (1)$$

P بار اعمالی، t ضخامت نمونه و d میانگین اقطار سنبه و قالب هستند.

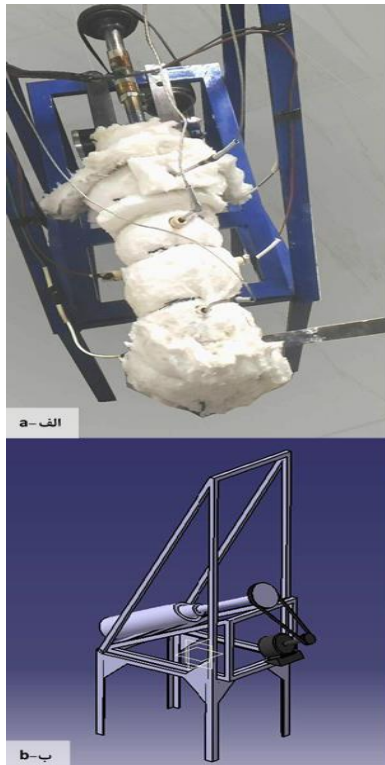


Fig. 1 The used mixture device for fabricating composite by thixomixing method, a) device image, and b) scheme of device

شکل 1 دستگاه همزن استفاده شده برای ساخت کامپوزیت به روش اختلاط جریان برشی: الف) تصویر دستگاه، ب) شکل شماتیک دستگاه

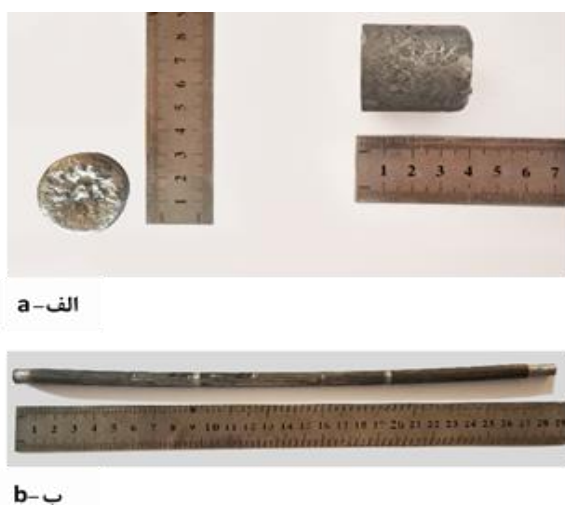


Fig. 2 the fabricated basalt fibers/aluminum composite by thixomixing method, a) casted sample, and b) extruded sample

شکل 2 کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی: الف) نمونه ریخته شده، ب) نمونه اکسترود شده

چگالی این الیاف (بر اساس مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت سازنده) بین 2.38 تا 2.52 g/cm<sup>3</sup> است. قطر هر لیف در حدود 2-4 μm، پایداری حرارتی آن 1350 °C و آهار آن از نوع سیلان بود. لازم به ذکر است که آهار الیاف بازالت پیش از عملیات تولید کامپوزیت باید حذف شود. بدین منظور الیاف بازالت ابتدا در محلول NaOH نیم مولار به مدت 10 دقیقه قرار گرفت. جهت اطمینان از حذف آهار، الیاف خرد شده به مدت 10 دقیقه در دمای 530 °C قرار گرفت و در محیط کوره سرد شد.

### 2-2- روش تولید

شکل 1 دستگاه همزن استفاده شده در این کار تحقیقاتی را نشان می دهد که شامل یک قسمت ثابت (استاتور) و یک قسمت چرخنده (روتور) از جنس چدن خاکستری است. دلیل انتخاب چدن خاکستری ترشوندگی بسیار ناچیز آلومینیوم با چدن خاکستری است. فاصله بین استاتور و روتور 5 mm طراحی شد تا با استفاده از تنش برشی، مذاب نیمه جامد را با الیاف مخلوط نماید. موتور الکتریکی 24 V، 500 W با کنترلر سرعت نیز جهت اختلاط مذاب نیمه جامد با الیاف استفاده شد. بدنه همزن دارای المنت و سه کنترلر (جهت کنترل یکنواخت دما) بوده و در انتهای استاتور دریچه ای جهت خروج مواد تعبیه شده است.

الیاف آلومینیوم A356 در دمای 680 °C در کوره المنتی مافلی در بوته آلومینایی ذوب شد. پس از رسیدن به دمای مذکور، مذاب به مدت 10 دقیقه نگهداری شد و سپس گاززدا به آن اضافه گردید. در ادامه و بعد از 3 دقیقه نیز مذاب به درون دستگاه همزن برشی (که تا دمای 680 °C گرم شده بود)، انتقال یافت. الیاف خرد شده نیز به همزن اضافه شد و سپس دمای المنت آن روی 575 °C تنظیم گردید. سرعت چرخش به صورتی تنظیم شد که مخلوط شدن به صورت یکنواخت انجام پذیرد و با کاهش دما روتور از چرخش نیافتد. همچنین مواد نیمه جامد به علت سرعت زیاد روتور به استاتور نچسبند و اختلاط به صورت بهینه انجام گیرد.

پس از رسیدن به دمای 575 °C مخلوط به مدت 20 دقیقه نگهداری شد و در ادامه از دستگاه خارج شده و داخل قالب سرامیکی آلومینایی ریخته شد. تصویر کامپوزیت آلومینیوم/بازالت ساخته شده پس از ریخته گری اختلاط جریان برشی در شکل (الف-2) قابل مشاهده است. از آنجایی نمونه های تولیدی دارای تخلخل هستند، تمامی نمونه ها اکسترود شدند. ضریب کاهش سطح اعمال شده 11 به 1 است. چهار گونه نمونه جهت انجام آزمون های مختلف تولید شد. نمونه های کامپوزیتی نیمه جامد بدون الیاف (SS)، با 2 درصد حجمی الیاف (SS-2%)، با 4 درصد حجمی الیاف (SS-4%)، و با 6 درصد حجمی الیاف (SS-6%) تولید شدند. برای اکسترود از قالب اکسترود استوانه ای با قطر ورودی 30 mm و خروجی 9 mm استفاده شد. ابتدا نمونه و قالب تا دمای 410 °C گرم شده و سپس نمونه در دستگاه با نیروی 80 تن اکسترود شد (شکل ب-2).

### 3-2- مشخصه یابی

چگالی نمونه ها به وسیله روش ارشمیدس اندازه گیری شد. در این روش ابتدا وزن واقعی نمونه توسط ترازو (با دقت 4 رقم اعشار) سنجیده شد (W) و سپس وزن غوطه ور شده نمونه در آب (وزن ظاهری) اندازه گیری شد (W'). از تقسیم وزن واقعی بر اختلاف این وزن با وزن ظاهری، چگالی محاسبه می شود. سختی نمونه ها با دستگاه Welltest با بار 31.5 kgf و ساچمه فرورونده به قطر 2.5 mm در معیار برینل براساس استاندارد ASTM E10 اندازه گیری شد. نمونه ها به قطر 9 mm و ضخامت 0.7 mm آماده شدند و سپس آزمون پانچ برشی با قالب پانچ و سنبه تخت انجام شد. لازم به ذکر است به منظور ارزیابی

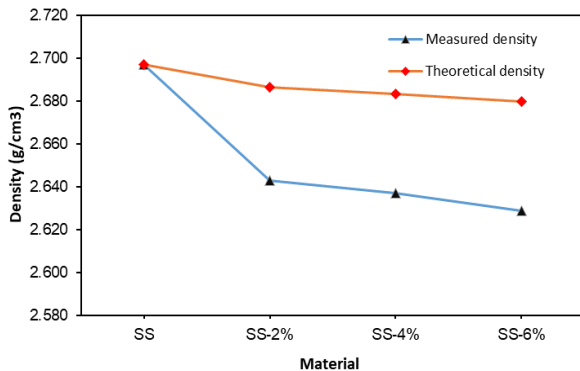
را می توان ناشی از نزدیک بودن میزان چگالی الیاف بازالت و فلز آلومینیوم دانست، به صورتی که با افزایش اندک در میزان الیاف بازالت، میزان تغییرات چگالی ناچیز می باشد. با رسیدن میزان الیاف بازالت به 6 درصد حجمی، چگالی واقعی بیش تر شده و به  $2.629 \text{ g/cm}^3$  رسید. چگالی تئوری محاسبه شده برای کامپوزیت های حاوی 2، 4 و 6 درصد حجمی به ترتیب،  $2.687 \text{ g/cm}^3$ ،  $2.683$  و  $2.680$  می باشند. مقایسه بین چگالی تئوری و واقعی بین هر یک از کامپوزیت های ذکر شده نشان می دهد که میزان اختلاف این دو چگالی به ترتیب، 1.610، 1.711 و 1.891 است.

با مقایسه چگالی تئوری و واقعی در تمامی کامپوزیت ها می توان بیان کرد که میزان اختلاف آن ها کمتر از 2 درصد است. دلیل این اختلاف کم بین چگالی تئوری و واقعی می تواند ناشی از خطاهای اندازه گیری باشد که مقدار آن ناچیز است. به نظر می رسد با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت میزان اختلاف چگالی تئوری و واقعی افزایش می یابد. یکی از نکاتی که باید مدنظر داشت، چسبیدن الیاف در حین اختلاط در محفظه دستگاه است. بنابراین هرچه میزان الیاف بیش تر باشد، امکان چسبیدن بیش تر الیاف به روتور و استاتور دستگاه افزایش می یابد که باعث کاهش میزان توزیع الیاف در زمینه آلومینیومی می شود. به همین دلیل می توان بیان کرد که با افزایش درصد الیاف، اختلاف چگالی نیز روندی افزایشی خواهد داشت.

**جدول 1** چگالی اندازه گیری و محاسبه شده کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

**Table 1** The measured and calculated densities of basalt fibers/aluminum composite by thixomixing method

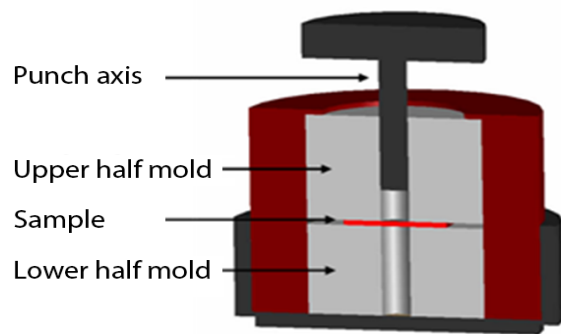
SS-6%	SS-4%	SS-2%	SS	نمونه
3.4322	3.2554	3.4385	3.2345	وزن واقعی (g)
2.1267	2.0210	2.1377	2.0354	وزن درون آب (g)
1.3055	1.2344	1.3008	1.1991	تغییرات وزن (g)
2.629	2.637	2.643	2.697	چگالی واقعی ( $\text{g/cm}^3$ )
2.680	2.683	2.687	2.697	چگالی تئوری ( $\text{g/cm}^3$ )
1.891	1.711	1.610	---	میزان اختلاف (/)



**Fig. 4** The variation between measured and calculated densities in basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

**شکل 4** تفاوت چگالی اندازه گیری شده و محاسبه شده در کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

شکل 3 به طور شماتیک نحوه برش در حین آزمون پنج برشی را نشان می دهد. با توجه به این تصویر، تغییر شکل نمونه در منطقه ی باریکی بین قالب و سنبه متمرکز است، بدون این که تغییر شکلی خارج از منطقه ی دایره ای واقع شود [16]. در این آزمون سنبه ی استوانه ای کف تخت نمونه های دیسکی را با سرعت ثابت برش داد. برای آزمون سنبه برشی نمونه ها به ضخامت 1 mm توسط وایرکات برش خورده و با سنباده زنی به ضخامت 0.7 mm رسانده شدند. قالب پنج با مشخصات قطر پنج 3.175 mm و قطر حفره ی 3.225 mm استفاده شد. آزمون های مکانیکی در دمای محیط (با دستگاه یونیورسال سننام 20 kN) با سرعت  $0.25 \text{ mm.min}^{-1}$  انجام شد. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM مدل Philips با ولتاژ کاری 30 kV) مجهز به سیستم های الکترون ثانویه، الکترون برگشتی و اسپکتومتری تفکیک انرژی انجام شد.



**Fig. 3** Schematic illustration of sample during shear in punch shear test  
**شکل 3** تصویر شماتیک از نمونه در حال برش در آزمون پنج برشی

### 3- نتایج و بحث

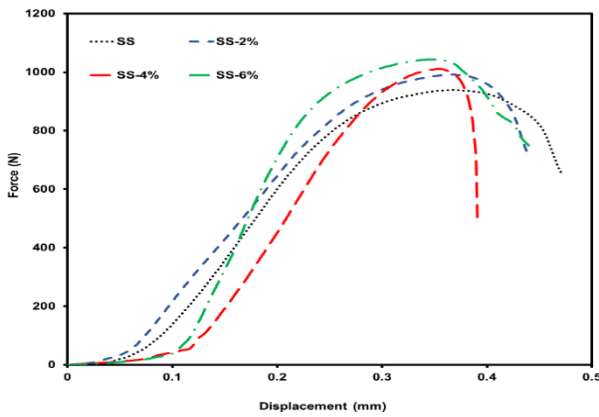
#### 3-1- چگالی کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت

به دلیل انجام اختلاط به منظور ایجاد نیروی برشی در روش اختلاط نیمه جامد، میزان تخلخل در نمونه های کامپوزیتی ریخته شده به خاطر ورود هوا به درون آن ها افزایش می یابد. به همین دلیل نیاز است که نمونه های کامپوزیتی اکستروود شوند تا میزان تخلخل موجود در آن ها کاهش یابد. زیرا اکستروود باعث کاهش ضریب سطح تخلخل ها شده که در نهایت موجب بسته شدن یا حذف آن ها می شود. براساس نتایج دیگر محققان [17]، دمای مناسب برای اکستروود نمونه های آلومینیومی در محدوده  $400-450 \text{ }^\circ\text{C}$  است.

برای بررسی دقیق تر نیاز است که چگالی واقعی و چگالی تئوری محاسبه و با یکدیگر مقایسه شوند که نتایج آن در جدول 1 آورده شده است. شکل 4 نیز براساس جدول 1 به منظور نشان دادن دقیق تر رفتار چگالی تئوری و واقعی در کامپوزیت های ساخته شده رسم شده است. لازم به ذکر است که چگالی تئوری در کامپوزیت ها از قانون مخلوط ها و براساس رابطه 2 محاسبه شده است.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2)$$

که در رابطه 2،  $\rho_c$ ،  $\rho_f$ ،  $\rho_m$ ،  $V_f$  و  $V_m$  به ترتیب چگالی کامپوزیت، چگالی الیاف، کسر حجمی الیاف، چگالی آلومینیوم و کسر حجمی آلومینیوم هستند. چگالی الیاف 2.518 و چگالی آلومینیوم  $2.69 \text{ g/cm}^3$  در نظر گرفته شدند. با توجه به شکل 4 می توان مشاهده کرد که چگالی واقعی کامپوزیت حاوی 2 درصد حجمی الیاف بازالت،  $2.643 \text{ g/cm}^3$  می باشد. با افزایش درصد الیاف بازالت و رسیدن به 4 درصد حجمی در زمینه آلومینیومی چگالی واقعی تغییری آن چنانی نکرده و همان مقدار  $2.637 \text{ g/cm}^3$  است. دلیل عدم تفاوت در چگالی



**Fig. 6** The force-displacement curves of shear punch test for fabricated basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method  
**شکل 6** منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمون پانچ برشی برای نمونه‌های ساخته شده کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت به روش اختلاط جریان برشی

**جدول 2** نتایج به دست آمده از آزمون پانچ برشی برای کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

**Table 2** The obtained results from shear punch for basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

SS-6%	SS-4%	SS-2%	SS	نمونه
105.4	96.7	89.1	76.8	استحکام تسلیم برشی (MPa)
132.4	128.1	125.7	119.1	استحکام برشی نهایی (MPa)
186.5	171.1	157.7	135.9	استحکام تسلیم کششی (MPa)
238.3	230.6	226.3	214.4	استحکام کششی نهایی (MPa)

همچنین شکل‌های 7 و 8 به ترتیب استحکام برشی نهایی و استحکام کششی نهایی برای هر نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهند.

بر اساس شکل 7 می‌توان فهمید که استحکام برشی نهایی آلومینیوم ریخته شده به روش اختلاط جریان برشی 119 MPa است. افزودن 2 درصد حجمی الیاف بازالت به آلومینیوم ریخته شده به روش اختلاط جریان برشی باعث شد تا میزان استحکام برشی نهایی به 126 MPa برسد. این بدان معنی است که 5.9 درصد بهبود در استحکام برشی نهایی با افزودن تنها 2 درصد حجمی الیاف بازالت ایجاد شده است. با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت به 4 درصد حجمی این روند ادامه داشته و استحکام برشی نهایی به 128 MPa رسیده است که نشان‌دهنده بهبود 7.6 درصدی می‌باشد. همچنین با رسیدن درصد حجمی الیاف بازالت به 6 درصد حجمی، استحکام برشی نهایی به دست آمده 132 MPa می‌باشد که نشان‌دهنده بهبود 10.9 درصدی است. شکل 8 رفتار کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف خرد شده بازالت را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در نمونه بدون الیاف بازالت، استحکام کششی نهایی 119 MPa می‌باشد. با افزودن الیاف بازالت، این خاصیت مکانیکی روندی افزایشی داشته است. به طوری که در نمونه حاوی 6 درصد حجمی الیاف بازالت مقدار آن به 132 MPa رسیده است. به عبارت دیگر، بهبود 10.9 درصدی در استحکام کششی نهایی در این نمونه حاصل شده است.

عوامل مختلفی باعث افزایش استحکام و سختی پس از اضافه نمودن الیاف بازالت به آلومینیوم ریخته شده توسط روش اختلاط جریان برشی می‌شوند. لازم به ذکر است که الیاف بازالت دارای استحکام بالاتری نسبت به آلومینیوم است. بنابراین اضافه کردن آن با مقدار و توزیع مناسب باعث ایجاد ساختار کامپوزیتی با استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب می‌شود که داده‌های سختی و استحکام برشی نهایی این موضوع را تأیید می‌نمایند. این بدان معنی است که

### 2-3- خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت

یکی از معیارهای مناسب برای بررسی رفتار مکانیکی مواد بخصوص فلزات و کامپوزیت‌های زمینه فلزی آزمون سختی است. نتایج حاصل آزمون سختی سنجی برینل روی نمونه‌های کامپوزیتی در شکل 5 آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که نمونه آلومینیوم ریخته شده به روش اختلاط نیمه برشی دارای سختی Hb 62.3 می‌باشد. افزودن 2 درصد حجمی الیاف بازالت به این آلیاژ باعث شد تا میزان سختی تا Hb 64.4 افزایش یابد. این روند افزایشی با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت ادامه داشته، به صورتی که با افزایش الیاف بازالت تا 6 درصد حجمی، میزان سختی آن به Hb 70.8 رسید. به عبارت دیگر با افزودن 2، 4 و 6 درصد حجمی الیاف بازالت به آلومینیوم ریخته شده با روش اختلاط جریان برشی، سختی به ترتیب، به میزان 3، 10 و 13 درصد بهبود داشته است.

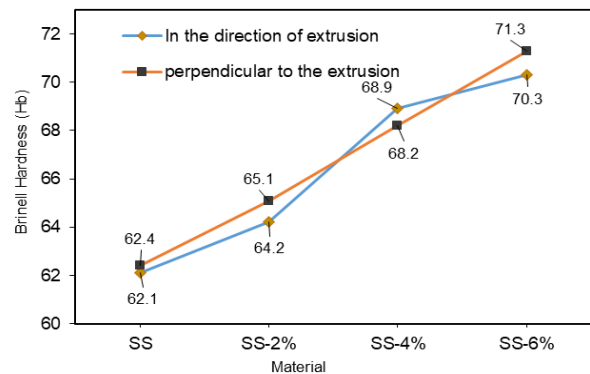
به دلیل موضعی بودن این آزمون می‌توان انتظار داشت که سختی‌های به دست آمده پراکندگی کمی داشته باشند که نتایج آزمون سختی آن را تأیید می‌نماید. در آزمون‌های سختی انجام شده در راستای اکستروژن و در راستای عمود بر اکستروژن نتایج تقریباً یکسان بود. همچنین سختی در راستای اکستروژن کمی کمتر به دست آمد که می‌تواند به دلیل جهت‌گیری ترکیبات بین‌فلزی در راستای اکستروژن باشد. عدم تفاوت زیاد در سختی‌های اندازه‌گیری شده در جهت‌های مختلف می‌تواند ناشی از ذات این کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت باشد که معمولاً در یک جسم کامل نتایج نهایی به دست آمده به خوبی این را تأیید می‌نماید. عامل دیگر برای روند بیان شده، ذات موضعی بودن آزمون سختی سنجی است.

آزمون مکانیکی دیگر که بر اساس آن می‌توان رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی ریخته شده با روش اختلاط جریان برشی را با یکدیگر مقایسه کرد، آزمون پانچ برشی است. این آزمون در دامای محیط انجام شد. داده‌های این آزمون به صورت نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد که در شکل 6 قابل مشاهده است. بر اساس این آزمون می‌توان استحکام تسلیم کششی و استحکام کششی نهایی را بر اساس رابطه‌های تجربی 3 و 4 به دست آورد [18].

$$\sigma_y = 1.77\tau_y \quad (3)$$

$$\sigma_{UTS} = 1.80\tau_{UTS} \quad (4)$$

که در آن  $\tau_y$ ، تنش تسلیم برشی و  $\tau_{UTS}$ ، استحکام برشی نهایی است [18]. نتایج حاصل از آزمون پانچ برشی به صورت خلاصه در جدول 2 آورده شده است.



**Fig. 5** The Brinell hardness for basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

**شکل 5** سختی سنجی برینل برای کامپوزیت‌های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی



ترکیبات بین فلزی Al-Fe-Si (که بیشتر به صورت Al<sub>5</sub>FeSi هستند) بهتر توزیع شده و باعث افزایش استحکام در آلومینیوم و کامپوزیت های آن شوند. همچنین تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Si-Mn-Fe باعث افزایش شکل پذیری در کامپوزیت می شود که توزیع یکنواخت این ترکیبات بین فلزی در ساختار این عملکرد را تشدید می نماید [21].

3-3- بررسی میکروسکوپی

به منظور بررسی عامل های تأثیرگذار بر خواص کامپوزیت های ساخته شده، مطالعه میکروسکوپی و ریزساختاری امری ضروری است. در اختلاط جریان برشی فاز نیمه جامد غیردندانه ای و کروی شکل، فاز اولیه آلفا (Al) درون مذاب (سیال غیرنیوتونی) تشکیل شده و عناصر آلیاژی به داخل مذاب پس زده می - شوند. در این حالت غلظت عناصر آلیاژی درون مذاب افزایش می یابد و در نتیجه سیلیسیم در حین کاهش دما به صورت فازهای نسبتاً بزرگ تر از حالت ریخته گری متداول تولید می شود (شکل 9).

در شکل 10، نحوه توزیع ترکیبات بین فلزی و در شکل 11، توزیع الیاف بازالت با 2، 4 و 6 درصد حجمی در زمینه آلومینیومی آورده شده است. با توجه به شکل 10 می توان مشاهده نمود که با افزایش درصد الیاف توزیع ترکیبات بین فلزی یکنواخت تر شده و همچنین اندازه آن ها کاهش یافته است. در روش اختلاط جریان برشی که براساس ریخته گری نیمه جامد پایه ریزی شده است، در ابتدا آلومینیوم اولیه جوانه زده و با کاهش دما در جلوی جبهه انجماد عناصر آلیاژی پس زده شده و غلظت عناصر آلیاژی افزایش پیدا می کند. با افزایش غلظت عناصر آلیاژی در مذاب باقی مانده ترکیب بین فلزی اولیه تشکیل می شود. با تشکیل فاز جامد اولیه دمای مذاب باقی مانده افزایش یافته و یا به عبارت دیگر گرمای تشکیل خود را به مذاب داده و اختلاف دمای مذاب باقی مانده با دمای بارریزی افزایش می یابد.

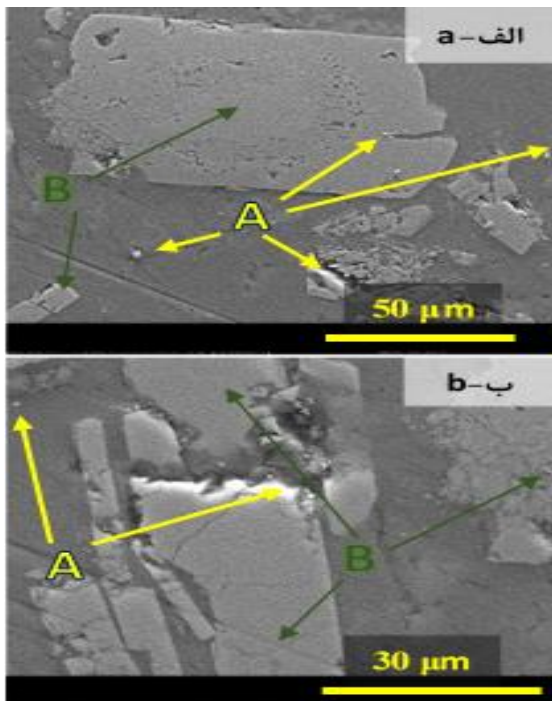


Fig. 9 Etched semi-solid sample, a) Al<sub>5</sub>FeSi/ Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> intermetallic, b) primary Si

شکل 9 کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت حکاکی شده: الف) ترکیبات بین فلزی Al<sub>5</sub>FeSi/ Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>، ب) Si اولیه

الیاف بازالت قابلیت لازم برای کامپوزیت شدن با زمینه آلومینیوم را دارد. زیرا از آنجایی که آلومینیوم در دمای بالا در حالت نیمه جامد قرار دارد، بسیاری از الیاف رایج قابلیت تحمل دمای بالا را ندارند و خواص خود را از دست می دهند. نتایج تحقیقات هندرونورسیتو<sup>1</sup> و همکاران [19] با افزودن الیاف خرد شده بازالت به آلومینیوم مذاب نشان دادند که این الیاف قابلیت کامپوزیت شدن را دارد. می توان انتظار داشت با افزایش درصد بازالت تا درصد مشخصی روند بهبود استحکام و سختی ادامه داشته باشد. این درصد بهینه وابسته به قابلیت اختلاط، میزان ترشوندگی و قابلیت توزیع الیاف در زمینه دارد. در این کار پژوهشی، قابلیت تولید کامپوزیت به روش جریان اختلاط برشی با حداکثر 6 درصد وزنی الیاف بازالت امکان پذیر بود، چون الیاف بازالت روی دمای اختلاط جریان برشی و همچنین میزان گرانیوی آن تأثیر گذاشته و امکان تولید در دمای 575 °C را نمی دهد. بنابراین روند بهبود خواص در این کامپوزیت تا 6 درصد حجمی مشاهده شد. روندی مشابه در ریخته گری معمولی کامپوزیت آلومینیوم 7075- الیاف خرد شده بازالت توسط کارتیگیان<sup>2</sup> و همکاران گزارش شد [20].

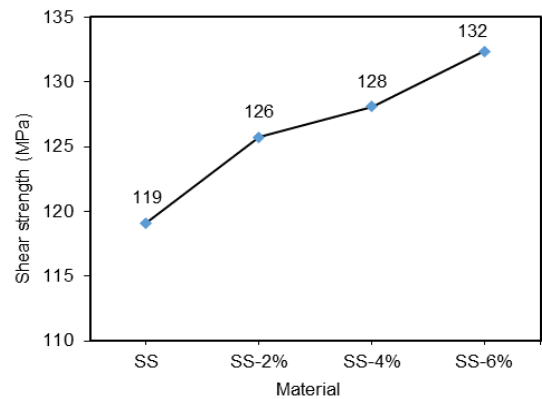


Fig. 7 The ultimate shear strength for fabricated basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

شکل 7 استحکام برشی نهایی برای کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

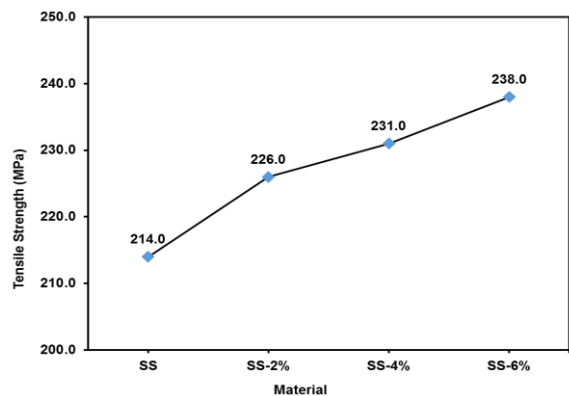


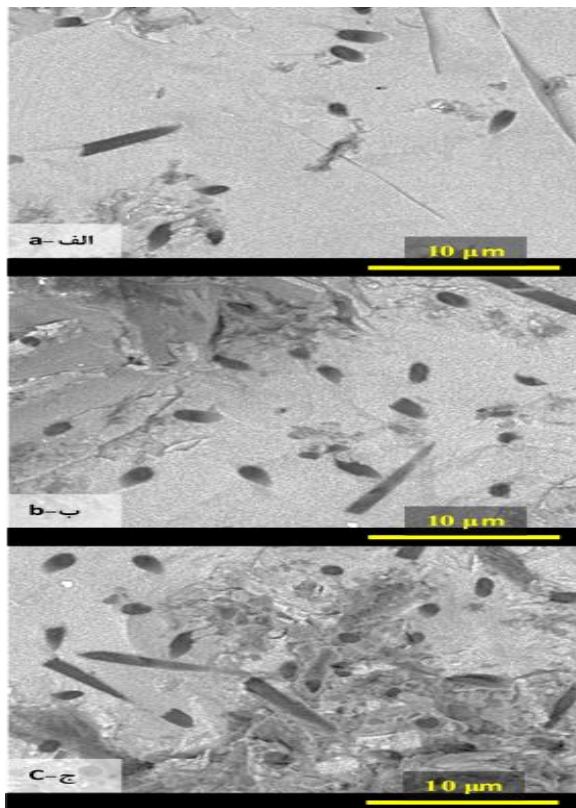
Fig. 8 The ultimate tensile strength for fabricated basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method

شکل 8 استحکام کششی نهایی برای کامپوزیت های آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی

معمولاً برای افزایش استحکام آلیاژ A356 (که یک آلیاژ ریخته گری است)، پس از ذوب ریزی و برای همگن کردن ساختار نهایی، عملیات حرارتی T6 روی قطعه انجام می شود. این عملیات حرارتی باعث می شود که سیلیسیم اولیه و

<sup>1</sup> Hendronursito

<sup>2</sup> Karthigeyan



**Fig. 11** SEM images from un-etched samples, a) sample with 2 vol.% of fibers, b) sample with 4 vol.% of fibers, c) sample with 6 vol.% of fibers  
**شکل 11** تصویر SEM کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت حکاکی نشده: الف) کامپوزیت با 2 درصد حجمی الیاف، ب) کامپوزیت با 4 درصد حجمی الیاف، ج) کامپوزیت با 6 درصد حجمی الیاف

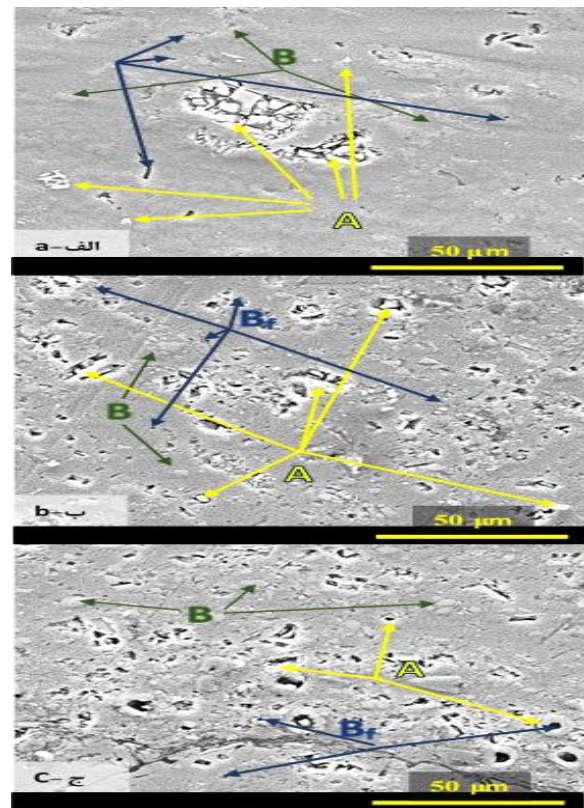
در شکل (الف-ا) 12- اثر به جامانده از الیاف بازالت در زمینه آلومینیومی قابل مشاهده است. به منظور تشخیص عناصر موجود در ناحیه اثر الیاف بازالت آزمون آنالیز عنصری (EDX) انجام شد (شکل (ب-ب) 12). میزان عناصر در این ناحیه در جدول 3 آورده شده است. در دیگر روش های مرسوم ساخت کامپوزیت های پایه آلومینیومی معمولاً از پوشش های مختلف فلزی و یا سرامیکی بروی الیاف جهت افزایش ترشوندگی استفاده می شود. اما در روش اختلاط برشی لایه بین فازی به صورت درجا در حین عملیات تولید می شود که باعث بهبود چسبندگی الیاف بازالت به زمینه آلومینیومی می شود. این لایه پوششی را می توان در شکل 10-ج نیز مشاهده نمود.

#### 4- نتیجه گیری

در این کار پژوهشی با استفاده از روش اختلاط جریان برشی کامپوزیت های زمینه آلومینیوم تقویت شده با الیاف خرد شده بازالت (با درصدهای حجمی 2، 4 و 6) ساخته شدند. سپس خواص مکانیکی کامپوزیت های ساخته شده شامل سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی تحت بارگذاری برشی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت بررسی ریزساختاری به منظور شناسایی مکانیزم های تأثیرگذار انجام شد. در ادامه، خلاصه نتایج نهایی به دست آورده شده اند.

1- با افزایش الیاف بازالت از صفر به 6 درصد حجمی، سختی از 62 به 71 Hb رسید.

2- با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت از صفر به 6 درصد حجمی، استحکام



**Fig. 10** SEM images from etched samples, a) sample with 2 vol.% of fibers, b) sample with 4 vol.% of fibers, c) sample with 6 vol.% of fibers, (A-  $Al_3FeSi / Al_9Fe_2Si_2$  intermetallic, B- primary Si, Bf- basalt fibers)  
**شکل 10** تصاویر SEM کامپوزیت آلومینیوم-الیاف بازالت حکاکی شده: الف) کامپوزیت با 2 درصد حجمی الیاف، ب) کامپوزیت با 4 درصد حجمی الیاف، ج) کامپوزیت با 6 درصد حجمی الیاف، (A- ترکیبات بین فلزی  $Al_3FeSi / Al_9Fe_2Si_2$ ، B- سیلیسیم اولیه، Bf- الیاف بازالت)

این اختلاف باعث ایجاد فوق تبرید در مذاب می شود. هر چه مقدار این فوق تبرید زیادتر باشد و یا محل های مناسب جهت ایجاد ترکیبات بین فلزی بیشتر باشد، شعاع بحرانی جوانه زنی کمتر می شود. لذا در واحد حجم تعداد جوانه های پایدار بیشتر شده و در نتیجه ترکیبات بین فلزی ساختار ریزتر و یکنواختتری خواهند داشت. وجود الیاف می تواند محل های مناسبی برای جوانه زنی غیر همگن در مذاب نیمه جامد باشند. در نتیجه با افزایش درصد الیاف محل های جوانه زنی افزایش یافته و ساختار نهایی ریزتر و یکنواخت تر می شود [22]. این توزیع یکنواخت، افزایش استحکام کلی کامپوزیت را به همراه دارد.

وجود ذرات سیلیسیم اولیه کوچک تر و پراکندگی مناسب آن باعث بهبود خواص می شود. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد موانعی مانند ذرات سیلیسیم در برابر حرکت نابجایی ها، استحکام و سختی کامپوزیت افزایش می یابد. از طرف دیگر به علت وجود اکسید آهن و اکسید سیلیسیم در الیاف بازالت، روی الیاف ترکیب بین فلزی تشکیل شده که از یک جهت چسبندگی به الیاف داشته و از سوی دیگر به زمینه آلومینیومی چسبندگی دارد و فصل مشترک مناسب تری را ایجاد می نماید. این موضوع نشان دهنده افزایش ترشوندگی و در نهایت افزایش استحکام در راستای الیاف بازالت است. از آنجایی که الیاف بازالت کوتاه اولیه حین عملیات اختلاط برشی خرد شده اند و سپس در مذاب نیمه جامد پخش شده اند، خواص ناشی از استحکام الیاف در یک جهت کمی کاهش یافته و به سمت یکسان شدن در همه جهات پیش می رود [23 و 24].

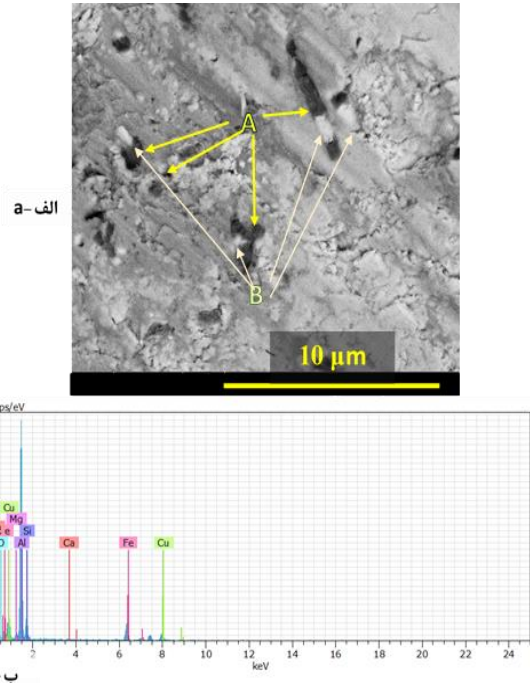
<sup>1</sup> Energy Dispersive X-ray

## 5- منابع

- [1] Babalola, P. O., Bolu, C., Inegbenebor, O., and Odunfa, K. M., "Development of Aluminium Matrix Composites: A review," International Journal of Engineering and Technology Research, Vol. 2, pp. 1-11, 2014.
- [2] Akhlaghi, F., Eslami-Farsani, R., and Sabet, S. M. M., "Synthesis and Characteristics of Continuous Basalt Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 47, No. 27, pp. 3379-3388, 2013.
- [3] Sabet, S. M.M., Akhlaghi, F., and Eslami-Farsani, R., "Production and Optimization of Aluminum-Basalt Composites by Hand Lay-Out Technique," Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Vol. 3, pp. 1826-1829, 2012.
- [4] Sabet, S. M. M., Akhlaghi, F., and Eslami-Farsani, R., "The Effect of Thermal Treatment on Tensile Properties of Basalt Fibers, Journal of Ceramic Science & Technology, Vol. 06, No. 03, pp. 245-248, 2015.
- [5] Abd El-Azim, A. N., Kassem, M. A., El-Baradie, Z. M., and Waly, M., "Structure and Properties of Short Alumina Fibre Reinforced AlSi18Cu1 Produced by Stir Casting," Materials Letters, Vol. 56, No. 6, pp. 936-969, 2002
- [6] Babu, J. S. S., and Kang, C. G., "Nanoindentation Behaviour of Aluminium Based Hybrid Composites with Graphite Nanofiber/Alumina Short Fiber," Materials and Design, Vol. 31, No. 10, pp. 4881-4885, 2010.
- [7] Hajjari, E., Divandari, M., and Mirhabibi, A. R., "The Effect of Applied Pressure on Fracture Surface and Tensile Properties of Nickel Coated Continuous Carbon Fiber Reinforced Aluminum Composites Fabricated by Squeeze Casting," Materials and Design, Vol. 31, No. 5, pp. 2381-2386, 2010.
- [8] Kyono, T., Kuroda, E., Kitamura, E., Mori, T., and Taya, M., "Effects of Thermal Cycling on Properties of Carbon Fiber/Aluminum Composites," Journal of Engineering Materials, Vol. 110, No. 2, pp. 89-95, 1988.
- [9] Lee, W. S., Sue, W. C., and Lin, C. F., "The Effects of Temperature and Strain Rate on the Properties of Carbon-Fiber-Reinforced 7075 Aluminum Alloy Metal-Matrix Composite," Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 10, pp. 1975-1983, 2000.
- [10] Akbarzadeh, E., "Characterization of Aluminum Silicon / Short Carbon Fiber Composites Fabricated by Novel Thixomixing Method", PhD. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2016.
- [11] Matsunaga, T., Matsuda, K., Hatayama, T., Shinozaki, K., and Yoshida, M., "Fabrication of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Aluminum-Magnesium Alloy Composite Wires Using Ultrasonic Infiltration Method," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 38, No. 8, pp. 1902-1911, 2007.
- [12] Lucas, G. E., Shekherd, J. W., Odette G. R., and Panchanadeeswaran, S., "Shear Punch Tests for Mechanical Property Measurements in TEM Disc-Sized Specimens," Journal of Nuclear Materials, V. 122, No. 1-3, pp. 429-434, 1984.
- [13] Wanjara, P., Drew R. A. L., and Yue, S., "Application of Small Specimen Testing Technique for Mechanical Property Assessment of Discontinuously Reinforced Composites," Materials Science and Technology, Vol. 22, No. 1, pp. 61-71, 2006.
- [14] Hosur, M. V., Waliul Islam, S. M., Vaidya U. K., and Kumar, A., "Dynamic Punch Shear Characterization of Plain Weave Graphite/Epoxy Composites at Room and Elevated Temperatures," Composite Structures, Vol. 70, No. 3, pp. 295-307, 2005.
- [15] Toloczko, M. B., Hamilton, M. L., and Lucas, G. E., "Ductility Correlations between Shear Punch and Uniaxial Tensile Test Data," Journal of Nuclear Materials, Vol. 283-287, pp. 987-991, 2000.
- [16] Guduru, R. K., Nagasekhar, A. V., Scattergood, R. O., Koch C. C., and Murty, K. L., "Finite Element Analysis of a Shear Punch Test," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 37A, pp. 1477-1483, 2006.
- [17] Tavighi, K., Emamy, M., Emami, A.R., "Effects of extrusion temperature on the microstructure and tensile properties of Al-16 wt% Al4Sr metal matrix composite," Materials and Design, Vol 46, pp. 598-604, 2013.

برشی از 119 به 132 MPa افزایش یافت.

3- مکانیزم‌های بهبود استحکام در آلومینیوم شامل قابلیت کامپوزیت شدن با الیاف بازالت خردشده، کاهش تخلخل در روش نیمه‌جامد با عملیات اکستروژن و کوچک شدن و توزیع بهتر ترکیبات بین‌فلزی ( $Al_5FeSi/ Al_9Fe_2Si_2$ ) و سیلیسیم اولیه بودند.



**Fig. 12** Characterizing the mechanisms by using microscopic images from basalt fibers/aluminum composites by thixomixing method, a) Foot-print from basalt fibers, b) EDX analysis from point C. (A-Foot-Print, B-  $Al_5FeSi/ Al_9Fe_2Si_2$  intermetallic, C- EDX Point)

**شکل 12** شناسایی مکانیزم‌ها با استفاده از تصویر میکروسکوپی از کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی: الف) اثرات به‌جامانده از الیاف بازالت، ب) نمودار آنالیز EDX در نقطه C، ج) اثرات به‌جامانده از الیاف، B - ترکیبات بین‌فلزی  $Al_5FeSi/ Al_9Fe_2Si_2$  - C محل انجام آزمون (EDX)

**جدول 3** آنالیز عنصری به‌دست‌آمده از EDX کامپوزیت آلومینیوم/الیاف بازالت در ناحیه اثر به‌جامانده از الیاف بازالت

**Table 3** Obtained elemental analysis from EDX of basalt fibers/aluminum composites in the area of basalt fibers foot-print

عنصر	درصد اتمی	درصد وزنی
Al	62.5977	57.7172
Fe	7.52154	13.8702
Si	9.54237	9.47518
Cu	3.46914	7.13547
O	12.325	6.99328
Mg	2.88571	2.45605
Ca	1.65852	2.35264



- [18] Guduru, R. K., Darling, K. A., Kishore, R., Scattergood, R. O., Koch C. C., and Murty, K. L., "Evaluation of Mechanical Properties Using Shear-Punch Testing," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 395, No. 1-2, pp. 307-314, 2005.
- [19] Hendronursito, Y., Ojahan, T., Rajagukguk, Sofii, R. N. S. A., Isnugroho, K., Birawidha, D. C., and Al Muttaqii, M. A. M., "Analysis of Aluminum Basalt Particulate Composite Using Stirring Casting Method Through Taguchi Method Approach," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 807, No. 1, p. 012003, 2020.
- [20] Karthigeyan, R., Ranganath, G., and Sankaranarayanan, S., "Mechanical Properties and Microstructure Studies of Aluminium (7075) Alloy Matrix Composite Reinforced with Short Basalt Fibre," *European Journal of Scientific Research*, Vol. 68, No. 4, pp. 606-615, 2012.
- [21] Bazilah, N. F., Kamal, M. R. M., Maidin, N. A., Marjom, Z., Ali, M. A. M., and Ahmad, U. H., "T6 Solutionizing Heat Treatment Parameter of A356 Alloy by Investment Casting," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 834, No. 1, p. 012005, 2020.
- [22] Abbaschian, R., and Reed-Hill, R.E., "Physical Metallurgy Principles - SI Version," Cengage Learning, pp. 411-418, 2009.
- [23] Akbarzadeh, A., Picas, J. A., and Baile, M. T., "Orthogonal Experimental Design Applied for Wear Characterization of Aluminum/Csf Metal Composite Fabricated by The Thixomixing Method," *International Journal of Material Forming*, Vol. 9, No. 5, pp. 601-612, 2016.
- [24] Akbarzadeh, E., Barrachina, J. A. P., and Puig, M. B., "Thixomixing as Novel Method for Fabrication Aluminum Composite with Carbon and Alumina Fibers," *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, Vol. 9, No. 8, pp. 822-826, 2015.