



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## بررسی تجربی رفتار شکست مود ترکیبی کششی-برشی در فصل مشترک قطعه دو ماده‌ای دیسک برزیلی ساخته شده از استخوان مهره-سیمان استخوانی

دین محمد ایمانی<sup>1\*</sup>، محمدرضا محمد علیها<sup>2</sup>

1- استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشیار، آزمایشگاه تحقیقاتی جوش و اتصال، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16846-13114 ایمانی@iust.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله:

دریافت: 1400/06/21

پذیرش: 1400/08/24

## کلیدواژگان

سیمان استخوانی، استخوان مهره گاو، دیسک برزیلی دو ماده‌ای، مود ترکیبی کششی-برشی، شکست فصل مشترک، مطالعه تجربی

استفاده از رزین‌ها و کامپوزیت‌های استخوانی یکی از روش‌ها مناسب برای تقویت استخوان‌های آسیب‌دیده و دچار پوکی می‌باشد. تزریق سیمان یکی از روش‌های رایج جهت تقویت فوری استخوان‌های صدمه‌دیده است. چنانچه در هنگام تزریق سیمان استخوانی به بافت استخوان در فصل مشترک اتصال ناپیوستگی و عدم چسبندگی به وجود آید، این عدم چسبندگی همچون یک ترک رفتار نموده و در اثر اعمال بارهای مکانیکی می‌تواند باعث جدایش اتصال سیستم دو ماده‌ای استخوان-سیمان شود. در این مقاله با استفاده از قطعه دو ماده‌ای (بافت اسفنجی استخوان مهره گاو- سیمان استخوانی هیدروکسی آپاتیت) به شکل دیسک برزیلی به بررسی رفتار شکست فصل مشترک اتصال در حالت‌های مختلف بارگذاری پرداخته می‌شود. آزمایش‌های شکست مود ترکیبی در زوایای مختلف 0، 9، 18 و 27 درجه نسبت به فصل مشترک اتصال انجام و مقادیر متناظر بار و انرژی شکست نمونه‌ها به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه بارگذاری و افزایش مود لغزشی، مقدار بار و انرژی شکست اندکی افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی حالت‌های بارگذاری، شکست در فصل مشترک استخوان- سیمان اتفاق می‌افتد. مقایسه نمونه‌های دو ماده‌ای استخوان-سیمان و تک‌ماده استخوان نشان‌دهنده افزایش نیرو و انرژی شکست در نمونه‌های استخوان-سیمان به نسبت نمونه تک‌ماده‌ای استخوان می‌باشد.

## Experimental mixed-mode fracture study in the interface of vertebrae bone tissue-hydroxyapatite cement using the bi-material Brazilian disc specimen

Din Mohammad Imani<sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Mohammad Aliha<sup>2</sup>

1- Welding and Joining Research Center, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Welding and Joining Research Center, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, imanini@iust.ac.ir

## Keywords

Bone-cement, Bi-material Brazilian disc, Mixed mode loading, Interface fracture, Experimental study

## Abstract

The use of resin-based cement is a common method for strengthening and retaliating the damaged bones material. However due to lack of sufficient adhesion in the interface of two materials (i.e., bone and injected cement) a crack can be initiated in the interface and consequently it can be fractured due to application of external loads to the repaired bone part. In order to investigate the load carrying capacity and reliability of bi-material joint of bone's soft tissue-hydroxyl apatite cement, a number of bi-material bone-cement specimens in the shape of circular disc containing a center crack in the interface of disc and subjected to diametral compression were tested. The bi-material specimens were load under different inclination angles of crack related to the loading direction. This results in application of different mixed mode I+II (i.e., tensile-shear deformation) in the interface of center crack. The results showed that the fracture load and fracture energy become more by increasing the crack inclination angle (i.e., increasing the contribution of shear mode deformation relative to mode I component). In addition, the overall strength of bi-material bone-cement system was higher than the neat one material bone material. The fracture of all tested bi-material samples was extended along the interface line of Brazilian disc specimen with no kinking into any of two bone or cement materials.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Imani, D. M., Mohammad Aliha, M. R., "Experimental mixed-mode fracture study in the interface of vertebrae bone tissue-hydroxyapatite cement using the bi-material Brazilian disc specimen", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1583-1589, 2021.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.538798.1748

## 1-مقدمه

استخوان ماده‌ای طبیعی است که همچون کامپوزیت‌های صنعتی ساختار غیر همگن و ارتوتروپیک داشته و متشکل از سه فاز (مواد آلی، مواد معدنی و آب) است [1]. استخوان‌ها با تشکیل اسکلت جانداران وظیفه تحمل و انتقال بارهای وارده را بر عهده دارند. نیروی وارد بر استخوان ممکن است منجر به تغییر ساختار و مشخصات مکانیکی (صدمه) استخوان شود. صدمات استخوانی در موارد شدید منجر به ترک خوردگی یا شکست استخوان می‌گردد. شکست استخوان انواع مختلف دارد، یکی از انواع خطرناک آن، شکست پاتولوژیک می‌باشد. این حالت از شکست زمانی رخ می‌دهد که ضعف ساختار استخوان ناشی از سابقه بیماری‌هایی همچون پوکی استخوان باشد. در این شرایط ساختار استخوان می‌تواند به صورتی ضعیف شود که در نیروهای بسیار کم بشکند.

با توجه به ضعف عمومی استخوان‌هایی که دچار پوکی شده‌اند و همچنین عوارض عمل‌های باز، در بسیاری از بیماران به‌کارگیری روش‌هایی همچون قرار دادن ایمپلنت‌های فلزی جهت تقویت استخوان مطلوب نمی‌باشد. در این شرایط عمل‌هایی بر پایه تزریق سیمان‌های زیست سازگار کامپوزیتی به استخوان (همچون عمل رتبرپلاستی<sup>1</sup>) می‌تواند جایگزین روش‌هایی همچون دارودرمانی، استراحت درمانی یا استفاده از کمربندهای طبی باشد [2]. استفاده از روش تزریق سیمان استخوانی که نمای شماتیک آن در شکل 1 مشاهده می‌شود در تقویت استخوان‌های پوک و آسیب‌دیده برای اولین بار توسط گیلبرت در سال 1984 میلادی در فرانسه برای درمان مهره گردنی آسیب‌دیده صورت گرفت و از سال‌های اولیه دهه 90 میلادی متداول گردید [3]. از مهم‌ترین ویژگی‌های یک ساختار استخوانی تقویت‌شده با تزریق سیمان استخوانی پایداری آن در برابر نیروهای وارده است، به صورتی که ساختار بتواند عملکردی حداقل برابر استخوان سالم داشته باشد.



Fig. 1 Schematic illustration of Vertebroplasty Surgical Procedure (cement injection into the damaged bone).

شکل 1 نمای شماتیک از عمل رتبرپلاستی (تزریق سیمان استخوانی زیست سازگار به استخوان آسیب‌دیده).

با توجه به بروز ترک، رشد آن و نهایتاً شکست کامل در مواد استخوانی، مطالعات متعددی در سال‌های اخیر برای بررسی رفتار ترک خوردگی بافت‌های سخت و اسفنجی استخوانی با استفاده از مبانی مکانیک شکست انجام شده است.

از شاخص‌های مهم در مکانیک شکست پارامتری به نام چقرمگی شکست است. چقرمگی شکست بیانگر مقاومتی است که یک ماده دارای ترک در برابر رشد ترک از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال، با استفاده از این پارامتر می‌توان در شرایط معینی از بارگذاری، رفتار شکست کامپوزیت‌های زیستی مورد استفاده در تقویت استخوان‌های آسیب‌دیده را تعیین کرده و بر اساس آن روش‌های تقویت استخوان را ارزیابی نمود.

طی سه دهه تحقیق در مورد استخوان و کامپوزیت‌های زیستی، محققان متعددی برای مطالعه رفتار این مواد از مکانیک شکست استفاده کرده‌اند. در این میان حوزه‌ای که کمتر به آن پرداخته شده است بررسی رفتار و کارایی استخوان پس از تقویت با سیمان استخوانی است. از جمله مطالعات در رابطه با شکست کامپوزیت‌های زیستی و بیومکانیکی دو یا چند ماده‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

تام و پیلبار (1993) از اولین محققانی بودند که از شاخص چقرمگی شکست برای مطالعه رفتار یک ساختار استخوان-رزین کامپوزیتی استفاده کردند. آن‌ها قطعه میله کوتاه ترک‌دار<sup>2</sup> دارای ترک در سطح تماس را تحت نیروی کششی قرار دادند و مقدار چقرمگی شکست اتصال دو ماده‌ای استخوان-رزین کامپوزیتی را به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه در چقرمگی شکست ساختارها با رزین‌های مختلف بود [4]. از دیگر مطالعات پیشگام در بررسی چقرمگی شکست ساختارهای چند ماده‌ای کامپوزیتی و زیستی می‌توان به تحقیق خواجویا و همکاران (1997) اشاره نمود [5].

تان و همکاران (2013) به بررسی اثر حفره بر مقاومت سیمان‌های استخوانی پرداختند و با استفاده از نمونه‌های دیسکی شکل تحت نیروی فشاری نمونه‌های بدون حفره را با نمونه‌های حفره‌دار مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تخلخل در ساختار سیمان استخوانی و استحکام آن‌ها اثری قابل توجه دارد [6].

سوزا و همکاران (2016) به بررسی چقرمگی شکست فصل مشترک دندان-سیمان پرداختند. آن‌ها در این مطالعه پنج نوع سیمان متداول که در ترمیم دندان استفاده می‌شود را به کمک دو قطعه کشش مستقیم و تیر تحت بار چهار نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نوع قطعه قابل توجهی بر مسیر شکست ترک دارد، به صورتی که مسیر شکست ترک در قطعات کشش مستقیم معمولاً از فصل مشترک عبور می‌کند در صورتی که در قطعات تیر تحت خمش چهار نقطه، الگویی معین برای مسیر رشد ترک وجود ندارد [7].

تنگ و همکاران (2007) با استفاده از قطعه دیسک برزیلی به بررسی چقرمگی شکست فصل مشترک ساختار استخوان-سیمان متصل شده به کمک رزین از مود یک خالص تا مود دو خالص پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده سهولت استفاده از قطعه دیسک برزیلی نسبت به دیگر قطعات در مطالعه رفتار شکست مود ترکیبی کشش-برشی این مواد می‌باشد [8].

علیها و همکاران (2015) به بررسی تأثیر نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و نانوالومینا بر رفتار چقرمگی شکست کامپوزیت‌های دندانی و استخوانی پایه پلیمری پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که خواص استحکامی پروتوزهای دندانی پایه پلیمری موجود با اضافه نمودن درصدی مناسبی از نانوذرات ریز سازگار تا حد قابل توجهی بهبود می‌یابد [9].

یکی از نکات مهم در خصوص موفقیت‌آمیز بودن و اثربخشی عملیات تزریق سیمان استخوانی به استخوان آسیب‌دیده میزان استحکام اتصال دو ماده می‌باشد. در این حالت چنانچه در موضع اتصال ناپیوستگی ایجاد شود، احتمال بروز جدایش ناشی از بارهای مکانیکی افزایش می‌یابد. در این زمینه بررسی استحکام فصل مشترک اتصال‌های استخوان-سیمان استخوانی دارای اهمیت بسیار می‌باشد.

<sup>2</sup> Short-rod

<sup>1</sup> Vertebroplasty

کششی در قطعه مشاهده خواهد شد. به عبارت دیگر، برای زاویه‌های غیر صفر ترک، قطعه دیسک برزیلی در حالت مود ترکیبی کششی-برشی قرار می‌گیرد. در این حالت مود برشی خالص (مود لغزش درون صفحه‌ای یا مود II) با توجه به طول ترک در زاویه‌ای خاص حاصل می‌شود.

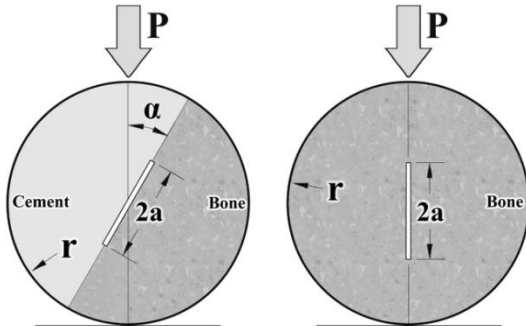


Fig. 2 Geometry and loading condition of Brazilian disc specimen subjected to diametral compression load.

شکل 2 هندسه و بارگذاری قطعات دیسک برزیلی تک‌ماده‌ای و دو ماده‌ای دارای ترک مرکزی تحت بارگذاری فشاری قطری.

نمونه‌های استخوانی مورد استفاده در این تحقیق از استخوان مهره گاو حدوداً 10 ساله تهیه شده است. طی بررسی‌های چشمی دقیق از سالم بودن، عدم یخ‌زدگی، تازگی و زنده بودن بافت این مهره‌ها اطمینان حاصل گردید. قطعات دیسکی مورد نیاز برای آزمایش به کمک ابزارهای برش از مهره‌ها مغزه‌گیری شد. برای جلوگیری از تغییر خواص استخوان، قطعات ساخته شده در محیطی با دمای کنترل شده و به دور از عوامل فاسد کننده نگهداری شدند. نمایی از استخوان مهره و نمونه‌های گرفته شده از مهره‌ها در شکل 3 نشان داده شده است.

با توجه به محدودیت ابعادی مهره‌ها و محدودیت‌های ماشین‌کاری و تراشکاری و برش، از هر مهره دیسک‌هایی به قطر 24 میلی‌متر (به عنوان بزرگترین اندازه قابل استخراج) و ضخامت 2 میلی‌متر از بافت اسفنجی میان مهره‌های مغزه‌گیری شد. در نمونه‌های استخوان-سیمان، پس از نصف کردن هر قطعه استخوان، هر نیمه در قالب ساخته شده از پلکسی گلس قرار گرفت و نیمه خالی قالب با سیمان استخوانی پر شد.

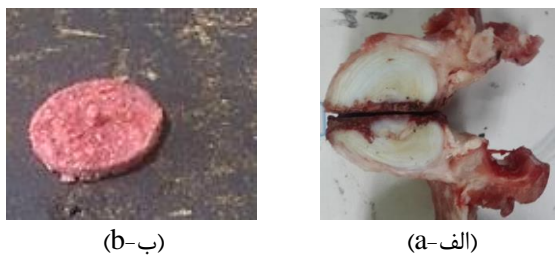


Fig. 3 Preparation of disc shape specimen from the soft tissue of a bovine vertebrae bone

شکل 3 آماده‌سازی قطعات استخوان از قسمت بافت اسفنجی استخوان مهره گاو (الف) استخوان مهره برش خورده، (ب) قطعه استخراج شده دیسکی شکل از بافت اسفنجی استخوان

سیمان استخوانی بکار رفته از نوع سیمان هیدروکسی آپاتیت می‌باشد. روند آماده‌سازی سیمان بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده طی شد. برای این منظور پودر سیمان استخوانی و حلال با نسبت 2 به 1 ترکیب و به مدت

از تزریق رزین‌های کامپوزیتی یا سیمان استخوانی عمدتاً جهت تقویت مهره‌های ستون فقرات استفاده می‌شود. مهره‌ها دارای هندسه‌ای استوانه شکل بوده (شکل 1) و در طول عمر خود در معرض انواع بارهای فشاری، کششی، پیچشی و برشی با ماهیت ناگهانی یا تکرارشونده قرار می‌گیرند. در حضور این بارها وجود ترک یا عدم پیوستگی در فصل مشترک اتصال سیمان-استخوان تواند باعث رشد ترک در مود ترکیبی کشش-برش (مود ترکیبی I-II یا مود ترکیبی هم‌زمان بازشونده لبه ترک و لغزش داخل صفحه لبه‌های ترک) گردد. در نتیجه به منظور بررسی رفتار شکست اتصالات دو ماده‌ای استخوان - سیمان در موده‌های ترکیبی باید از روش‌های مناسب آزمایشگاهی استفاده نمود.

هندسه نامنظم و ابعاد کوچک استخوان از چالش‌های مهم در مطالعه تجربی و آزمایشگاهی استخوان و ترکیبات استخوانی می‌باشد. در این شرایط روش و هندسه قطعه آزمایش باید به گونه‌ای انتخاب شود که نیازهای مطالعه را تأمین نماید. محققان از نمونه‌های مختلفی جهت مطالعه رفتار شکست در حالت‌های مختلف بارگذاری و مواد مهندسی تک‌ماده‌ای و یا در فصل مشترک ساختارهای دو ماده‌ای استفاده کرده‌اند. از جمله این قطعات می‌توان به قطعه دیسک برزیلی [8,10-16]، قطعه تیر تحت بار خمشی سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای [7,9,17-21]، قطعه جداشونده گوه [21]، قطعه میله کوتاه ترک‌دار [20]، قطعه کشش مستقیم [20]، قطعه رینگ [11]، قطعه نیم دیسک تحت بار خمشی سه نقطه‌ای [22,23]، قطعه تیر کوتاه دو ماده‌ای با ترک لبه‌ای مورب و تحت بار خمشی سه نقطه‌ای [24] و قطعه مستطیلی با ترک داخلی [25] اشاره نمود.

در حال حاضر روش استاندارد و قطعه توصیه شده‌ای برای بررسی رفتار شکست در فصل مشترک مواد دو ماده‌ای و خصوصاً مواد دو جنسه استخوانی وجود ندارد. با وجود این، از میان نمونه‌های فوق قطعات آزمایشگاهی دایره‌ای شکل شبیه‌ترین هندسه به هندسه طبیعی مهره‌ها را دارند. در نتیجه ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با هندسه دیسک برزیلی (که از جمله قطعات پر کاربرد با هندسه دایره‌ای شکل می‌باشد) با سهولت بیشتر و مراحل کمتری نسبت به سایر قطعات و هندسه‌ها قابل انجام است. همچنین در مقایسه با سایر قطعات، قطعه دیسک برزیلی به جهت ابعاد کوچک مورد نیاز و نیز اعمال بار فشاری قطری بدون نیاز به فیکسچر خاص از مزیت بیشتری برای آزمایش چقرمگی شکست مواد بیومکانیکی برخوردار است.

در این مقاله کاربرد و توانایی قطعه دیسک برزیلی دو ماده‌ای برای مطالعه استحکام شکست اتصال بافت اسفنجی استخوان مهره به سیمان استخوانی هیدروکسی آپاتیت به روش تجربی و آزمایشگاهی در موده‌های مختلف کششی- برشی شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## 2-مطالعه آزمایشگاهی شکست ساختار دو ماده‌ای

شکل 2 نمای شماتیک قطعه دیسک برزیلی دو ماده‌ای را نشان می‌دهد. این قطعه به شکل یک دیسک به شعاع (r) و ضخامت (t) می‌باشد که یک ترک مرکزی به طول (2a) در فصل مشترک دو ماده قرار گرفته است. با اعمال نیروی فشاری قطری (P) به نمونه و با تغییر زاویه راستای ترک، ترکیب‌های مختلفی از کشش و برش در ترک و در فصل مشترک دو ماده قابل دستیابی می‌باشد.

حالت کشش خالص (مود I یا مود بازشونده) شکست در شرایطی به وجود می‌آید که راستای ترک و راستای بارگذاری موازی هستند ( $\alpha=0^\circ$ ). با افزایش زاویه راستای ترک از صفر درجه، مشارکت مود برشی نیز در کنار مود

3- نتایج و بحث

شکل 6 نمونه‌ای از منحنی‌های بار-جاب‌جایی قطعات دیسک برزیلی آزمایش شده را نشان می‌دهد، این منحنی‌ها به‌طور کلی نشان‌دهنده رفتار تقریباً الاستیک خطی نمونه‌ها می‌باشند.

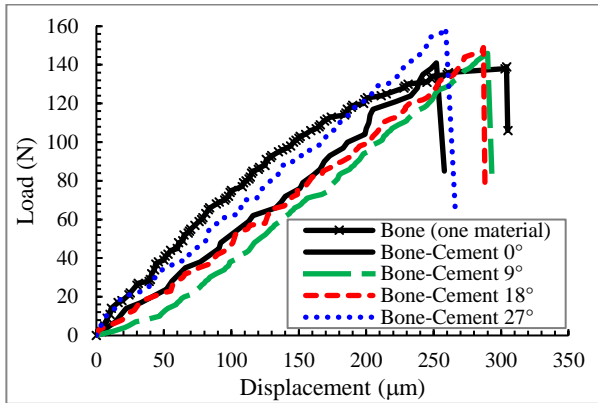


Fig. 6 Load-displacement curves obtained from the tested bi-material Brazilian disc samples

شکل 6 نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های دیسک برزیلی تک‌ماده‌ای و دو ماده‌ای آزمایش شده در حالت‌های مختلف مود ترکیبی

بر این اساس با توجه به زاویه بارگذاری قطعات منحنی‌های متفاوتی به دست می‌آید که نشان‌دهنده تأثیر مود بارگذاری کششی-برشی بر رفتار شکست نمونه‌ها و بار و انرژی (سطح زیر منحنی بار-جاب‌جایی) شکست قطعات دو ماده‌ای استخوان - سیمان استخوانی است. به عبارت دیگر با افزایش زاویه بارگذاری، نیروی شکست بیشتر شده و انرژی بیشتری برای ایجاد جدایش در فصل مشترک ساختار دو ماده‌ای نیاز است.

بار متناظر با لحظه شکست (بار شکست) نمونه‌ها در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، در قطعات با زاویه ترک 0، 9، 18 و 27 درجه، مقدار بار بحرانی شکست در قطعات استخوان-سیمان به ترتیب 5، 9، 10 و 18 درصد بیشتر از بار بحرانی شکست در قطعه استخوان تک‌ماده‌ای در مود کششی می‌باشد. در این نمودار B1 و B2 و B3 داده‌های مربوط به شکست استخوان تک‌ماده‌ای و C1، C2 و C3 داده‌های مربوط به سیستم دو ماده‌ای استخوان-سیمان می‌باشد.

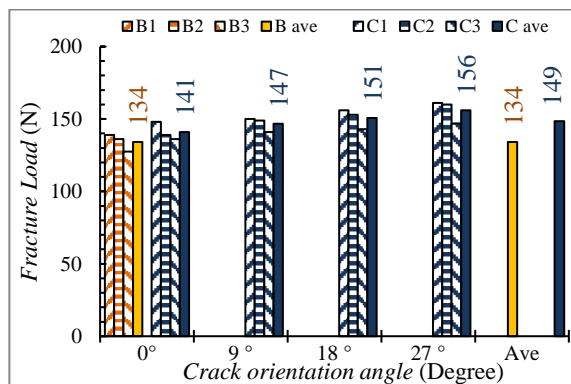


Fig. 7 Fracture loads obtained for the tested bone and bone-cement BD specimens under different loading angles.

شکل 7 نیروی شکست قطعات دیسک برزیلی دو ماده‌ای استخوان-سیمان در حالت‌های مختلف مود ترکیبی

30 ثانیه در دمای کمتر از ۲۵ درجه سلسیوس مخلوط گردید و خمیر حاصله قبل از سفت شدن به قالب تزریق شد. با توجه به ابعاد کوچک (شعاع و ضخامت کوچک) بخش نیمه دیسک ساخته شده از سیمان استخوانی اعمال فشار به سطح خمیر در حین تزریق به قالب و اتصال به بخش استخوانی برای حصول اطمینان از عدم وجود حباب و تخلخل کافی به نظر می‌رسد. در عمل نیز سیمان استخوانی به طریق مشابه به بافت استخوان تزریق می‌شود. به‌منظور ایجاد ترک در نمونه‌های استخوان-سیمان، پیش از اضافه نمودن سیمان به قالب، یک ورق بسیار نازک آلومینیومی با طول 7.2 میلی‌متر در فصل مشترک قرار داده شد و سپس سیمان به قالب اضافه گردید. این ورق پس از خشک شدن ساختار و اتصال دو ماده به همدیگر، نقش ترک را ایفا می‌نماید. شکل 4 نمونه‌ای از قطعه دیسک برزیلی دو ماده‌ای استخوان مهره-سیمان هیدروکسی آپاتیت را نشان می‌دهد.

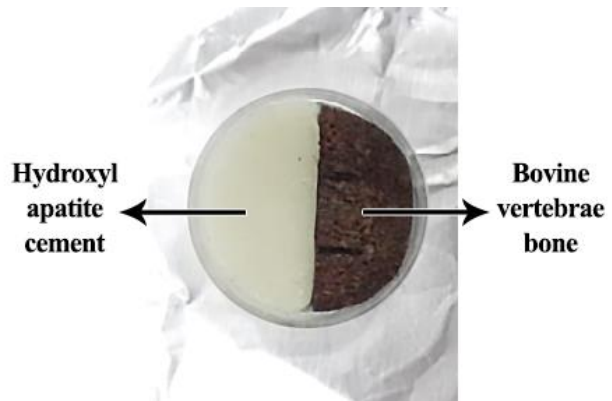


Fig. 4 A typical bi-material (bone-cement) Brazilian disk specimen

شکل 4 قطعه دیسک برزیلی دو ماده‌ای استخوان مهره گاو- سیمان هیدروکسی آپاتیت

نمونه‌های دو ماده‌ای دیسک برزیلی ساخته‌شده با ترکی به طول 7.2 میلی‌متر (نسبت شعاع به طول ترک 0.3) در زوایای ترک 0، 9، 18 و 27 درجه با استفاده از دستگاه بارگذاری تحت فشار قطری قرار گرفته و نمودارهای بار برحسب جابه‌جایی هر نمونه ثبت گردید. نرخ بارگذاری نمونه‌ها برابر با 1.5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد و برای افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، هر حالت با سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. شکل 5 نشان‌دهنده یکی از نمونه‌ها در حال آزمایش و تحت بار فشاری قطری است.

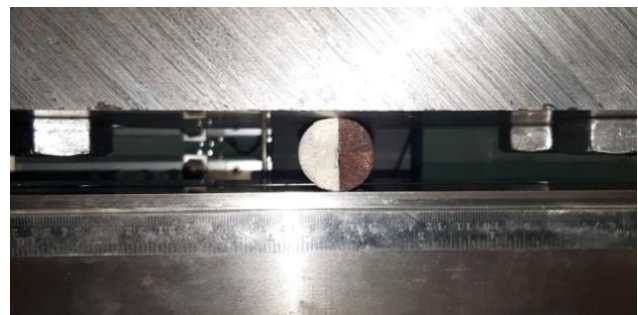


Fig. 5 Typical bi-material (bone-cement) Brazilian disk specimen inside the loading test machine

شکل 5 نمونه دیسک برزیلی دو ماده‌ای در دستگاه آزمایش

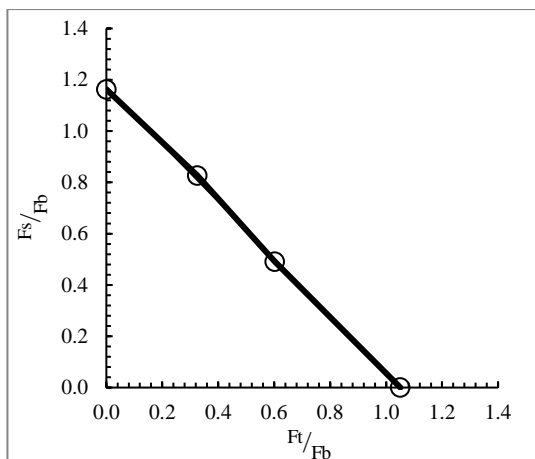


Fig. 9 Fracture curve envelope ( $F_s/F_b - F_t/F_b$ ) obtained for the tested bi-material bone - cement system.

شکل 9 منحنی بار شکست بی بعد شده مود ترکیبی نمونه های دو ماده ای آزمایش شده

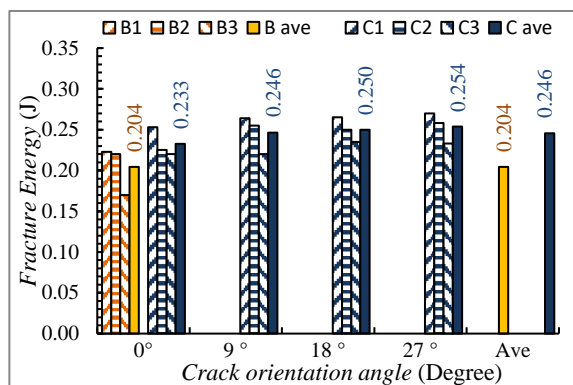


Fig. 10 Fracture energy value obtained for the tested bone and bone-cement BD specimens under different loading angles.

شکل 10 انرژی شکست قطعات دیسک برزیلی دو ماده ای استخوان-سیمان در حالت های مختلف مود ترکیبی

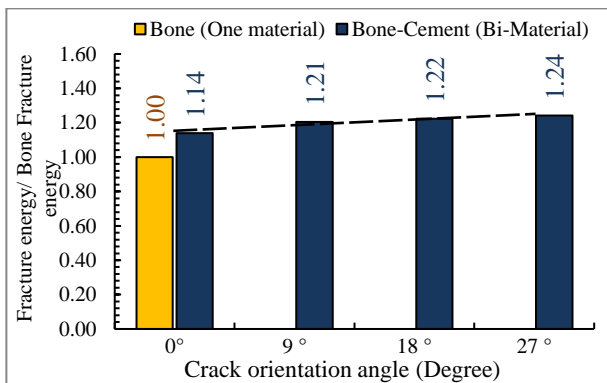


Fig. 11 Variations of Fracture energy versus the loading angle in the tested specimens.

شکل 11 تغییرات انرژی شکست نمونه های دو ماده ای استخوان-سیمان نسبت به نمونه استخوان تک ماده ای.

شکل 12 منحنی تغییرات انرژی شکست مود برشی بی بعد شده بر حسب انرژی شکست مود کششی بی بعد شده را در حالت های مختلف مود ترکیبی نشان می دهد. نشان می دهد که در آن  $E_s$  و  $E_t$  به ترتیب مؤلفه های متناظر با انرژی شکست نمونه های دو ماده ای استخوان - سیمان در حالت های مختلف

همچنین روند تغییرات بار بحرانی ناشی از تغییر مود شکست نشان می دهد که در قطعات سیمان- استخوان، با تغییر مود شکست از حالت کششی به برشی، میزان بار شکست به مقدار 13 درصد افزایش پیدا کرده است.

شکل 8 منحنی تغییرات بار شکست بر حسب زاویه بارگذاری نمونه های دو ماده ای استخوان-سیمان را نشان می دهد که بر اساس آن روند تغییرات بار شکست با افزایش زاویه بارگذاری و تغییر مود شکست از مود کششی به مود برشی نمونه های دو ماده ای با دقت خوبی به صورت خطی می باشد.

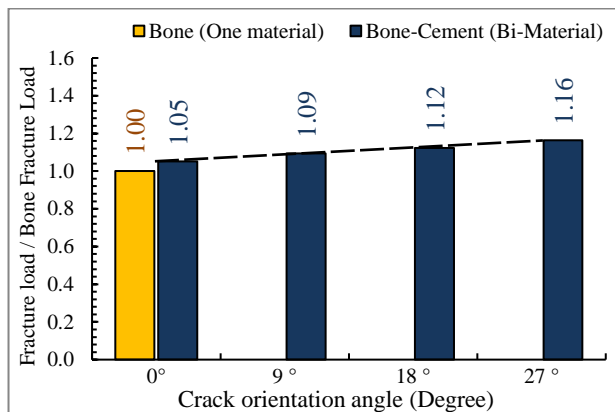


Fig. 8 Variations of Fracture load versus loading angle in the tested specimens.

شکل 8 تغییرات بار-شکست بر حسب زاویه بارگذاری

شکل 9 منحنی تغییرات نیروی شکست مود برشی بی بعد شده بر حسب نیروی شکست مود کششی بی بعد شده را نشان می دهد که در آن  $F_s$  و  $F_t$  به ترتیب مؤلفه های متناظر با بار شکست نمونه های دو ماده ای استخوان - سیمان در حالت های مود کششی و برشی بوده و  $F_b$  نیز بار شکست قطعه تک ماده ای بافت اسفنجی استخوان در حالت مود I (کشش خالص) می باشد. با توجه به زاویه بارگذاری هر یک از حالت های آزمایش شده قطعه دیسک برزیلی، مقادیر  $F_s$  و  $F_t$  که وابسته به نسبت نیروهای کشش و برش هستند محاسبه می شود. محور افقی این نمودار داده های کشش خالص و محور عمودی این نمودار متناظر با بیشترین زاویه بارگذاری یا بیشترین حالت برش در نمونه های دیسک برزیلی می باشد. بر اساس این شکل یک رابطه تقریباً خطی برای بار شکست حالت های مختلف مود ترکیبی کششی - برشی به دست می آید که با معادله (1) قابل بیان می باشد.

$$\frac{F_s}{F_b} = -1.11 \left( \frac{F_t}{F_b} \right) + 1.17 \quad (1)$$

شکل 10 نشان دهنده انرژی شکست (به دست آمده از سطح زیر نمودار بار-جابه جایی تا لحظه شکست) نمونه ها می باشد. بر اساس نتایج حاصل از این شکل، مقدار انرژی شکست قطعات دو ماده ای استخوان-سیمان استخوانی از مقدار انرژی شکست حالت کشش خالص ماده استخوان بیشتر است. همچنین انرژی شکست بیشتری در مودهای ترکیبی کششی- برشی مشاهده می شود.

شکل 11 منحنی تغییرات انرژی شکست بر حسب زاویه بارگذاری نمونه های دو ماده ای استخوان-سیمان را نشان می دهد که بر اساس آن روند تغییرات انرژی شکست با افزایش زاویه بارگذاری و تغییر مود شکست از مود کششی به مود برشی نمونه های دو ماده ای با دقت خوبی به صورت خطی می باشد.

$$E = (-8 \times 10^{-5})F^2 + 0.026F - 1.77 \quad (3)$$

در شکل 14 الگوی شکست نمونه‌های استخوان-سیمان نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شکست در هر دو مود کششی و برشی در فصل مشترک دو ماده رخ داده است. در نتیجه اتصال ایجاد شده بین دو ماده (بافت اسفنجی استخوان مهره- سیمان استخوانی هیدروکسی آپاتیت) از نوع اتصال نسبتاً ضعیف می‌باشد که باعث رشد ترک در امتداد فصل مشترک دو ماده می‌گردد و شکست به داخل یکی از دو ماده منحرف نمی‌شود. شکست قطعه در حالت زاویه صفر بارگذاری به صورت بازشدگی و جدایش عمودی دو ماده نیم‌دایره‌ای شکل می‌باشد و حال آنکه با چرخش زاویه ترک و در مود برشی بارگذاری مسیر شکست به صورت لغزش دو نیم‌دایره بر روی یکدیگر می‌باشد. با توجه به نوع اتصال ضعیف مشاهده شده در این تحقیق در حالت‌های کششی و برشی بارگذاری، لازم است که از روش‌هایی برای افزایش استحکام اتصال سیستم دو ماده‌ای سیمان- استخوان در کاربردهای عملی استفاده گردد. یکی از روش‌های پیشنهادی افزایش سطح تماس بین دو ماده می‌باشد. این کار با افزایش زیری در فصل مشترک قسمت چسبنده استخوان، ایجاد حالت زیگزگ و یا طرح کنگره‌دار در فصل مشترک که هم باعث افزایش سطح تماس سیمان با استخوان و هم ایجاد قفل مکانیکی بین دو ماده می‌شود قابل انجام است.

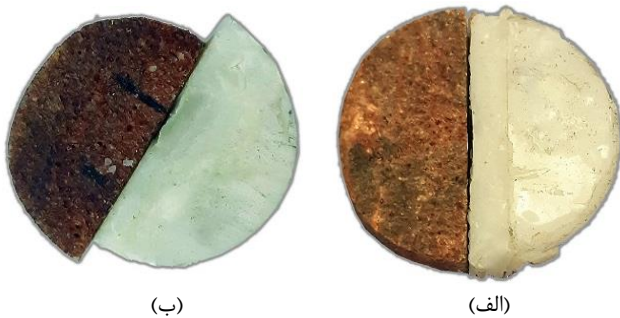


Fig. 14 Interface failure pattern of bone-cement specimens under different pure modes I and II.

شکل 14 الگوی شکست فصل مشترک نمونه‌های استخوان-سیمان در مودهای (الف) کششی خالص و (ب) برشی خالص

### 5- نتیجه‌گیری

استفاده از سیمان استخوانی یکی از روش‌ها جهت تقویت استخوان‌های آسیب‌دیده می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مفاهیم مکانیکی، مقاومت شکست فصل مشترک سیستم دو ماده‌ای سیمان هیدروکسی آپاتیت- بافت اسفنجی استخوان مهره گاو حاوی یک ترک مرکزی در فصل مشترک دو ماده، به کمک نمونه دیسک برزلی در چهار زاویه ترک 0 تا 27 درجه بررسی شده است تا رفتار شکست نمونه‌ها در حالت‌های مختلف مود ترکیبی مورد مطالعه قرار گیرد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده موارد زیر است:

- بار شکست ساختار سیمان- استخوان حداقل 5 درصد و حداکثر 18 درصد بیشتر از بار شکست بافت اسفنجی استخوان مهره می‌باشد؛ همچنین انرژی شکست ساختار سیمان- استخوان نیز حداقل 6 و حداکثر 23 درصد بیشتر از انرژی شکست استخوان می‌باشد.
- با تغییر مود شکست از مود بازشدگی به مود برشی، افزایش مقدار بار شکست مشاهده می‌شود. مقدار بار شکست ساختار استخوان-سیمان در مود برشی 6 درصد بیشتر از بار شکست در مود بازشدگی است.

مود کششی و برشی بوده و  $E_b$  نیز انرژی شکست قطعه تک‌ماده‌ای بافت اسفنجی استخوان در حالت مود I خالص می‌باشد. مجدداً مشاهده می‌گردد که یک رابطه تقریباً خطی برای انرژی شکست مود ترکیبی بی‌بعد شده نمونه‌های دو ماده‌ای دیسک برزلی استخوان مهره- رزین هیدروکسی آپاتیت حاصل می‌گردد که با معادله (2) بیان می‌گردد. همچنین بر اساس شکل‌های 9 و 12، شکست برشی به نیرو و انرژی بیشتری برای شروع شکست در مقایسه با بارگذاری مود کششی خالص نیاز دارد. در نتیجه اتصال بررسی شده در فصل مشترک دو ماده‌ای سیستم استخوان-سیمان در برابر شکست مود II عملکرد مناسب‌تری دارد.

$$E_s/E_b = -1.09(E_t/E_b) + 1.25 \quad (2)$$

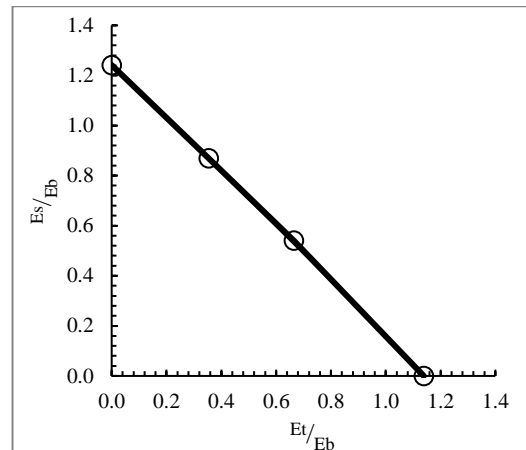


Fig. 12 Fracture energy envelope ( $E_s/E_b - E_t/E_b$ ) obtained for the tested Brazilian disc specimens made of bi-material bone - cement  
شکل 12 منحنی انرژی شکست نمونه‌های دو ماده‌ای آزمایش شده استخوان- سیمان هیدروکسی آپاتیت در حالت‌های مختلف مود ترکیبی

شکل 13 رابطه بین بار شکست و انرژی شکست نمونه‌های دو ماده‌ای استخوان-سیمان استخوانی آزمایش شده را نشان می‌دهد. بر اساس برازش منحنی به داده‌های این شکل مشاهده می‌گردد که رابطه بار شکست و انرژی شکست نمونه‌ها از یک معادله درجه دو (مطابق معادله 3) تبعیت می‌کند:

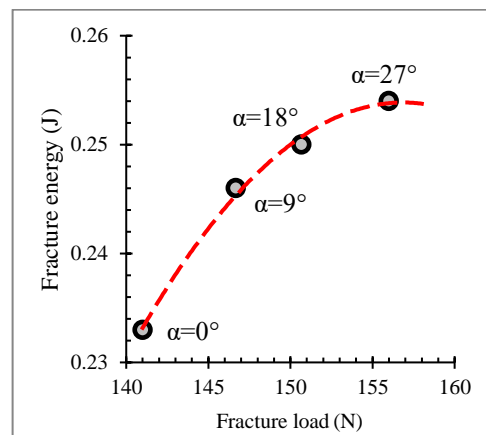


Fig. 13 Relation between the fracture energy and corresponding fracture load of bi-material bone - cement Brazilian disc specimens  
شکل 13 رابطه بین انرژی شکست و بار شکست در قطعات دو ماده‌ای استخوان- سیمان

- [17] Kavanagh, J.L. and Pavier, M.J., "Rock interface strength influences fluid-filled fracture propagation pathways in the crust," *Journal of Structural Geology*, Vol. 63, pp. 68-75, 2014.
- [18] Aliha, M.R.M. and Mousavi, S.S., "Sub-Sized Short Bend Beam Configuration for the Study of Mixed-Mode Fracture," *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 225, 2020.
- [19] Mirsayar, M. and Park, P., "Modified maximum tangential stress criterion for fracture behavior of zirconia/veneer interfaces," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol. 59, pp. 236-240. 2016.
- [20] Gladius, L., "Apparent Fracture Toughness of Acrylic Bone Cement: Effect of Test Specimen Configuration and Sterilization Method," *Biomaterials* Vol. 20, pp. 69-78, 1999.
- [21] Bokam, P. Germaneau, A. Rigoard, P. Vendevre, T. and Valle, V., "Evaluation of Fracture Properties of Cancellous Bone Tissues Using Digital Image Correlation/Wedge Splitting Test Method," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* Vol. 102, 2020.
- [22] Mirsayar, M. Shi, X. and Zollinger, D. "Evaluation of interfacial bond strength between Portland cement concrete and asphalt concrete layers using bi-material SCB test specimen," *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 293-306, 2017.
- [23] Ajdani, A., Ayatollahi, M. R., Akhavan-Safar, A., & da Silva, L. F. M. "Mixed mode fracture characterization of brittle and semi-brittle adhesives using the SCB specimen," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 101, 102629, 2020.
- [24] Aliha, M. R. M., Kucheki, H. G., & Mirsayar, M. "Mixed Mode I/II Fracture Analysis of Bi-Material Adhesive Bonded Joints Using a Novel Short Beam Specimen," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 11, pp. 5232, 2021.
- [25] Mirsayar, M., "A modified maximum tangential stress criterion for determination of the fracture toughness in bi-material notches-Part 1: Theory," *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 2, No. 4, pp. 277-282, 2014.
- نمودارهای بار-جابجایی نمودارها نشان دهنده رفتار ترد نمونه‌های آزمایش شده می‌باشد. از این بین نمونه‌های استخوان-سیمان، رفتاری تردتر از رفتار استخوان دارند.
- بررسی الگوی گسیختگی در نمونه‌های استخوان-سیمان نشان دهنده گسترش ترک در فصل مشترک دو ماده بوده و در تمامی مودها چنین رفتاری مشاهده گردید. افزایش سطح تماس بین دو ماده از طریق ایجاد حالت زیگزاگ و یا طرح کنگره در قسمت استخوان می‌تواند باعث افزایش استحکام سیستم دو ماده‌ای گردد.
- 6-مراجع**
- [1] Yan, J. Clifton, K. Mecholsky, J. and Gower, L., "Effect of Temperature on the Fracture Toughness of Compact Bone," *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, no. 7, 2007.
- [2] Lin, J.T. Lane, J.M., "Nonmedical management of osteoporosis," *Curr Opin Rheumatol*. Vol. 14, pp. 441-6, 2002.
- [3] Galibert, P. Deramond, H. Rosat, P. Le Gars, D., "Preliminary note on the treatment of vertebral angioma by percutaneous acrylic Vertebroplasty," *Neurochirurgie*, pp. 33-166, 1987.
- [4] Tam, L.E. Pilliar, R.M., "Fracture toughness of dentin/resin-composite adhesive interfaces," *J Dent Res*, 1993.
- [5] Khajotia, S. Dhuru, V. Fournelle, R. and Mckinney, M., "Fracture Toughness and Load Relaxation of Dentin Bonding Resin Systems," *Dental Materials* Vol. 13, no. 3, 1997.
- [6] Tan, H. Ao, H. Ma, R. and Tang, T., "Quaternised Chitosan-Loaded Polymethylmethacrylate Bone Cement: Biomechanical and Histological Evaluations," *Journal of Orthopaedic Translation* Vol. 1, no. 1, pp. 57-66, 2013.
- [7] Souza, M. DeMunck, J. Pongprueksa, P. VanEnde, A. and VanMeerbeek, B., "Correlative Analysis of Cement-Dentin Interfaces Using an Interfacial Fracture Toughness and Micro-Tensile Bond Strength Approach," *Dental Materials* Vol. 32, no. 12, 1575-85, 2016.
- [8] Tong, J., Wong, K.Y., and Lupton, C., "Determination of Interfacial Fracture Toughness of Bone-Cement Interface Using Sandwich Brazilian Disks," *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 74, no. 12, pp. 1904-16, 2007.
- [9] MohammadAliha, M. Moosavi, A. MehriKhansari, N. and Safarabadi, M., "Effects of alumina and hydroxyapatite nanoparticles on fracture toughness of PMMA based dental composite," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 9-16, 2015.
- [10] Soares, J.B. Tang, T.X., "Bimaterial Brazilian specimen for determining interfacial fracture toughness," *Eng Fract Mech*, 1998.
- [11] Carrera, C.A. Chen, Y.C. Li, Y. Rudney, J. Aparicio, C. and Fok, A., "Dentin-Composite Bond Strength Measurement Using the Brazilian Disk Test," *Journal of Dentistry* Vol. 52, pp. 37-44, 2016.
- [12] Banks-Sills, L. and Schwartz, J., "Fracture testing of Brazilian disk sandwich specimens," *International journal of fracture*, Vol. 118, No. 3, pp. 191-209, 2002.
- [13] Pang, H.L.J. Bong, S.N. Shi, X.Q. and Wang, Z.P., "Mixed mode fracture toughness characterization for interface and interlayer cracks in adhesive bonded joints," In *International Symposium on Electronic Materials and Packaging*, Cat. No. 00EX458, pp. 197-200, 2000.
- [14] Ryoji, Y. JinQiao, L. Jin-Quan, X. Toshiaki, O. and Tomoyoshi, O. "Mixed mode fracture criteria for an interface crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 47, No. 3, pp. 367-377, 1994.
- [15] Banks-Sills, L. Travitzky, N. and Ashkenazi, D., "Interface fracture properties of a bimaterial ceramic composite," *Mechanics of Materials*, Vol. 32, No. 12, pp. 711-722, 2000.
- [16] Asdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, M., & Aliha, M. R. M. "The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete," *Composites Communications*, 100684, 2021.