



## مطالعه خواص مکانیکی مواد تابعی پایه رزینی ساخته شده به روش گریز از مرکز

محسن مرادی<sup>1</sup>، مسعود فرحناکیان<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد

\* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، farahnakian@pmc.iaun.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 شهریور 1398

پذیرش: 25 آبان 1398

ارائه در سایت: تیر 1399

## کلیدواژگان:

مواد تابعی پایه رزینی

گریز از مرکز

پردازش تصویر

استحکام خمشی

به عنوان یک تعریف ساده از مواد با خواص تابعی، مواد کامپوزیتی با ریز ساختار ناهمگن می‌باشند که از دو یا چند جز تشکیل شده‌اند. خواص این مواد از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند. روش گریز از مرکز، یکی از روش‌های مفید در ساخت این گونه مواد است که پارامترهای مختلف این فرایند بر روی شیب توزیع مواد تقویت کننده مؤثر می‌باشند. در این تحقیق، از پودرهای مس، آهن، کاربید سیلیسیم و آلومینا به عنوان تقویت کننده و از رزین پلی استر، به عنوان ماده پایه استفاده شده است. برای ساخت مواد با خواص تابعی، مواد تقویت کننده با نسبت‌های حجمی مشخص، با رزین مخلوط شده و در قالب چرخان ریخته می‌شود. ذرات با توجه به نیروی گریز از مرکز درون رزین موقعیت‌دهی می‌شوند. عکسبرداری از نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری انجام گرفته و با استفاده از پردازش تصویر، توزیع ذرات مورد بررسی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی قطعات ساخته شده از آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM D790 استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت چرخش قالب یکی از پارامترهای مهم تأثیر گذار بر روی حرکت ذرات تقویت کننده می‌باشد. بطوریکه که افزایش سرعت چرخشی قالب از 250 دور بر دقیقه به 500 دور بر دقیقه، موجب افزایش شیب توزیع مواد تقویت کننده شده است. نتایج حاصل از آزمون خمش بر روی مواد با خواص تابعی مشاهده می‌شود که افزایش استحکام و حجم ذرات تقویت کننده، موجب افزایش استحکام و مدول مواد با خواص تابعی شده است.

## Study on the mechanical properties of functionally graded material made by centrifugal method

Mohsen Moradi, Masoud Farahnakian\*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

\* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, farahnakian@pmc.iaun.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
Received 20 September 2019  
Accepted 16 November 2019  
Available July 2020

## Keywords:

Functional Graded Material  
Centrifugal Method  
Image Processing  
Flexural Strength

## Abstract

A simple definition of functional graded material (FGM) includes composite with inhomogeneous micro-structure that made by at least two components. The properties of FGMs vary along the the material thickness. The centrifugal procedure is a useful method to fabricate a FGM material. Different parameters of centrifugal method effect on the distribution of the reinforcement material. In this study, copper, iron, SiC and alumina powders were used as reinforcements and a polyester resin employed as the matrix. In manufacturing process of mentioned materials, powders with specific volumetric ratio, mixed with the resin and poured into the rotary mold. By attention to centrifugal force, powder particles found specific position in the resin. Captured images from the surface of fabricated FGM tubes and distribution of particles were analysed by image processing. Three point bending tests were used to measure the strength of material according to ASTM D790 standard. The results showed that the rotational speed of mold is the most effective parameter on the distribution of reinforcement particles. Therefore, by increasing the speed from 250 to 500 rpm, slope of distribution of reinforcement particles increased. The results of the bending test showed that employment of reinforcement particles with more strength and volume led to increase the strength and module of fabricated FGMs.

## 1- مقدمه

سازنده بستگی دارند. مواد با خواص تابعی، مواد کامپوزیتی با ساختار غیرهمگن هستند که دارای خواص ترمومکانیکی تابعی پیوسته از مکان می‌باشند [1، 2]. روش‌های مختلفی برای ساخت مواد با خواص تابعی زمینه پلیمری وجود دارد، به عنوان مثال، ریخته‌گری گرانشی [3]، پرس داغ [4]، گریز از مرکز [5]، تخلیه الکتریکی [6]، پرتو افکنی فرابنفش [7]، لایه نشانی به کمک

مواد هدفمند یا مواد با خواص تابعی<sup>1</sup>، مواد کامپوزیت پیشرفته‌ای هستند که به علت تعداد فازهای مختلف دارای ساختار پیچیده‌ای می‌باشند. خواص گرمایی و مکانیکی کامپوزیت‌ها به ساختار مواد سازنده و نحوه قرار گرفتن مواد

<sup>1</sup> Functionally graded material

Please cite this article using:

M. Moradi, M. Farahnakian, Study on the mechanical properties of functionally graded material made by centrifugal method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 10- 18, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

افزایش می‌یابد.

با توجه به اهمیت روش گریز از مرکز در ساخت این نوع مواد و به صورت متقارن، در طی سال‌های 2006 تا 2009 هشمی و همکارانش در جهت کشف روابطی در زمینه ساخت این نوع مواد به طور بهینه، تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها مدلی ارائه کردند که نحوه توزیع ذرات را بر حسب سرعت گریز از مرکز، در زمان‌های مشخصی پیش‌بینی می‌کند. اما مدل ارائه شده تنها برای اکسید کلسیم کربنات با اندازه ده تا بیست میکرومتر صادق بود. وی به این موضوع اشاره کرده که برای ارائه یک مدل جامع برای پیش‌بینی جایگاه ذرات تقویت کننده در رزین نیاز به آزمایش‌های متعددی در دامنه‌های مختلف با مواد مختلف است [14]. استبیک در سال 2012 نیز با ارائه شرایط بهینه برای ساخت مواد با خواص تابعی با استفاده از پودرهای مس، آهن، زغال سنگ و گرافیت با استفاده از روش گریز از مرکز، گام مؤثری در زمینه ساخت این نوع از کامپوزیت‌ها برداشت [15].

سلمی همکاران در سال 2017 رفتار خستگی مواد مرکب تابعی پله‌ای را بررسی کردند. آن‌ها مواد مرکب ساده و با خواص تابعی با شش لایه توسط روش دستی با فیبر شیشه ساختند و منحنی‌های رفتار خستگی برای هر دو مواد مرکب را ترسیم کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مواد مرکب تابعی 17 درصد بهبود رفتار خستگی در مقایسه با مواد مرکب ساده دارد [16]. پاراسال و همکاران در سال 2018 توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز به ساخت مواد مرکب تابعی با استفاده از مواد پرکننده‌های طبیعی (دانه‌های سیب بنگال، دانه‌های صابون و ماربولو با اندازه متوسط دو میلی‌متر) پرداختند و اثر وزنی مواد پرکننده را بر روی خواص مکانیکی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استحکام مواد مرکب تابعی تا 34 درصد نسبت به پلی‌استر خالص افزایش می‌یابد [17].

سینگ و سیدهارتا روشی برای ساخت مواد مرکب تابعی بر مبنای پلاستیک‌های ترموپلاست ابداع کردند. آن‌ها دستگاه تزریق پلاستیکی ساختند که قالب‌ها حول یک محور قابلیت چرخش دارند. آن‌ها میله‌هایی از جنس پلی‌بوتالین با 15 و 30 درصد وزنی فیبر شیشه ساختند. نتایج آن‌ها نشانگر توزیع یکنواخت و پیوسته مواد تابعی بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که استحکام کششی مواد مرکب تابعی برای درصد وزن‌های 15 و 30 درصد، به ترتیب 11 تا 27 درصد نسبت به پلی‌بوتالین خالص افزایش دارد [18]. بنابراین در این پژوهش، با توجه به مزایای فرایند گریز از مرکز در تولید مواد با خواص تابعی نسبت

لیزر [8]، که هر کدام دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به صورت عمده برای ساخت مواد با خواص تابعی و متقارن به کار رفته است، روش گریز از مرکز است. معمولاً قطعات گریز از مرکز شده عاری از عیب‌هایی مانند تخلخل‌های انقباضی یا گازی می‌باشند. موادی با چگالی پایین مانند سرباره، اکسیدها و همچنین گازهایی که باعث ایجاد حفره می‌شوند، روی سطح آمده و توسط عملیات ماشین‌کاری به سادگی بر طرف شود.

ایده ساخت مواد با خواص تابعی اولین بار در موسسه ویشینسکی در سال 1944 مطرح شد [9]. از سال 1987 تا به امروز، تحقیق و توسعه بر روی این نوع مواد ادامه دارد. در سال 1990 چندین پژوهشگر شروع به تحقیق در زمینه ساخت مواد با خواص تابعی زمینه پلیمری، با استفاده از روش گریز از مرکز کردند، که منجر به ساخت اولین نوع از این کامپوزیت‌ها با استفاده از این روش شد [10].

فاناباشی در سال 1997 تحقیقاتی را در زمینه ساخت این مواد به روش گریز از مرکز عمودی، به طور بهینه انجام داد [11]. در این تحقیق از پودر نیکل به عنوان تقویت کننده و رزین اپوکسی به عنوان ماده پایه استفاده کرد. وی دریافت که افزایش نیروی گریز از مرکز باعث نزدیک شدن ذرات به سطح ماده شده و این تغییر باعث افزایش رسانایی در سطح نسبت به سطح داخل کامپوزیت ساخته شده، می‌شود. تأثیر وابستگی، درصد حجمی ذرات تقویت کننده و نحوه توزیع آن‌ها در رزین، بر روی سختی کامپوزیت‌های ساخته شده در سال 2000، توسط محقق دیگری مورد بررسی قرار گرفت [12].

در این پژوهش از پودر کاربید سیلیسیم به عنوان ماده تقویت کننده و از رزین اپوکسی به عنوان ماده پایه استفاده شد. نمونه‌ها با در نظر گرفتن درصد مواد تقویت کننده بین ده تا بیست درصد حجمی رزین و با استفاده از روش گریز از مرکز ساخته شدند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش حجم ذرات کاربید سیلیسیم موجود در مواد با خواص تابعی ساخته شده، سختی افزایش می‌یابد.

در سال 2002، تحقیقی [13] بر روی تأثیر حضور فیبرهای کربن در سه اندازه کوتاه، میانه و بلند به ترتیب با اندازه‌های 82، 145 و 325 میکرومتر، در سرعت‌های 500، 1000، 2000 و 5000 دور بر دقیقه، بر روی رسانایی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت ساخته شده، انجام شد. در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش طول فیبرهای کربن، رسانایی بهبود پیدا می‌کند و همچنین با بهبود شیب مواد در کامپوزیت‌های ساخته شده، انعطاف‌پذیری

نسبت‌های مشخص درون ظرف جداگانه‌ای، توسط دستگاه همزن با یکدیگر در زمان‌های ثابت، مخلوط شده و سپس هاردنر به آن اضافه شد. پس از آن مخلوط با حجم مشخص توسط قیف درون قالب در حال چرخش ریخته شد. نمونه‌ها برای مدت زمان 30 دقیقه تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرند. شماتیکی از این فرایند در شکل 1 نشان داده شده است. پس از آن قالب متوقف شده و نمونه‌ها از درون قالب خارج شدند. نمونه‌ها پس از خارج شدن از درون قالب، در مدت زمان مشخص به منظور یافتن استحکام کافی در دمای محیط قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها در امتداد سطح مقطع عرضی پولیش کاری شده و سپس، توسط میکروسکوپ نوری به منظور بررسی ریزساختار مورد عکس برداری قرار داده شدند، (شکل 2).

از رزین پلی‌استر به دلیل در دسترس بودن، سهولت استفاده، شفاف بودن و قیمت مقرون به صرفه استفاده شد. با توجه به تابعی بودن ماهیت مواد مورد آزمایش، از چهار نوع پودر فلزی و اکسیدی، آهن، مس، کاربید سیلیسیم و فیوزد آلومینا<sup>1</sup> (نارنجی رنگ) در اندازه‌های مختلف با ویژگی‌های متفاوت استفاده شده است که جزئیات آن در جدول‌های 1 و 2 بیان گردیده است.

جدول 1 جزئیات مواد تقویت کننده

Table 1 Characteristics of particles

چگالی	میانگین قطر دایروی (μm)	نسبت طول به عرض	مواد
7/87	34/30	1/53	آهن
4	34/18	1/93	فیوزد آلومینا
3/2	34/57	1/83	کاربید سیلیسیم
8/94	20/79	1/84	مس

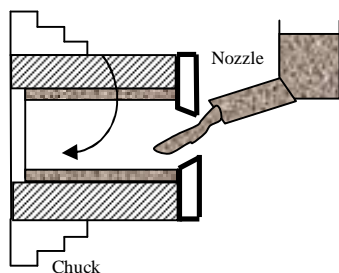


Fig. 1 Schematic and actual views of centrifugal method to make a FGM

شکل 1 نمای شماتیک و واقعی از فرایند ساخت مواد با خواص تابعی به روش گریز از مرکز

به دیگر فرایندها، مطالعه، بررسی و ساخت مواد با خواص تابعی زمینه پلیمری به صورت تک جزئی و توسط روش گریز از مرکز، انجام گردید. سپس چگونگی روند تأثیرگذاری پارامترهای سرعت چرخشی قالب و درصد حجمی بر روی کامپوزیت‌های تولید شده مورد مطالعه قرار گرفت. برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی قطعات ساخته شده از آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM D790 استفاده شد.

## 2- مواد و آزمایش‌ها

### 2-1- معادلات حاکم بر روش گریز از مرکز

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به صورت عمده برای ساخت مواد با خواص تابعی و متقارن به کار رفته، روش گریز از مرکز است. حرکت ذرات در یک سیال تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز، از قانون استوک تبعیت می‌کند که به شرح زیر است:

$$V = \frac{[\rho_1 - \rho_2]G \times g \times D}{18 \times \mu} \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho_1$ ،  $\rho_2$ ،  $G$ ،  $g$ ،  $D$ ،  $\mu$  و  $V$  به ترتیب چگالی ذرات، چگالی رزین، بزرگی نیروی گریز از مرکزی، شتاب گریز از مرکز، قطر ذرات، ویسکوزیته جریان و سرعت حرکت ذرات در رزین است. در این رابطه  $G$ ، از رابطه (2) قابل محاسبه است:

$$G = 2 \times D_t \times N^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق  $D_t$  قطر قالب و  $N$  سرعت چرخش قالب است. طبق روابط بالا با تغییر در هر پارامتر، سرعت حرکت ذرات در رزین ممکن است تغییر کند که به تبع آن نحوه آرایش ذرات نیز تغییر خواهد کرد [15].

### 2-2- تجهیزات آزمایش

در این مطالعه، از یک دستگاه تراش ساخت تبریز برای ایجاد نیروی گریز از مرکز استفاده شد. برای انجام آزمایش قالب به صورت استوانه‌ای توخالی یک سر بسته، به ابعاد  $40 \times 100 \times 70$  که به ترتیب معرف قطر داخلی، قطر خارجی، طول قالب می‌باشند. از سه‌نظام دستگاه تراش برای بستن و مهار قالب استفاده شد. به منظور جلوگیری از چسبیدن مواد و همچنین راحت خارج شدن قطعات ساخته شده، از واکس مخصوص، قبل از ریختن مواد به درون قالب استفاده شد. قالب از جنس تفلون می‌باشد، به طوری که هیچ گونه واکنشی با واکس و مواد ریخته شده درون قالب ندارد.

از پلی‌استر با درصد حجمی 83 درصد، شتاب دهنده با درصد حجمی 5 درصد و هاردنر با درصد حجمی 12 درصد استفاده شد. در ابتدا رزین و مواد تقویت کننده در هر مرحله با

<sup>1</sup> Fused Alumina

جداسازی و ایجاد تصویر باینری اشاره کرد. در شکل 3 نمونه‌ای از گزارش تهیه شده حاصل از انجام بررسی ریز ساختار مواد ساخته شده، با پردازش تصویر نشان داده شده است. تصویری از انجام مرحله جداسازی به منظور محاسبه درصد حضور دانه‌های مشکی رنگ که با رنگ قرمز نمایش داده شده است، در شکل 3 نشان داده شده است.

#### 2-4- طراحی آزمایش

برای ساخت مواد با خواص تابعی زمینه رزینی تک جزئی، از رزین پلی استر با به عنوان زمینه و از پودر مواد تقویت کننده شامل کاربید سیلیسیم، مس، فیوزد آلومینا و آهن که جزئیات آن‌ها طبق جدول 2 است، استفاده شده است. این تقویت کننده‌ها در نسبت‌های 12، 24 و 36 درصد حجمی رزین و در سه دامنه سرعت چرخشی 250، 355، و 500 دور بر دقیقه استفاده شده‌اند. دورها بر اساس آزمایش‌های اولیه انتخاب شدند. بدین ترتیب که از سرعت‌های خیلی کم به سرعت‌های خیلی زیاد، آزمایش‌های اولیه انجام شدند. در سرعت‌های خیلی پایین (کمتر از 250 دور بر دقیقه)، پودرها بر اثر نیروی کم گریز از مرکز، توزیع یکسان پیدا می‌کردند و ماده تابعی ایجاد نمی‌شد. همچنین در سرعت‌های خیلی بالا (بیشتر از 500 دور بر دقیقه) بر اثر نیروی گریز از مرکز زیاد، تمام پودرها به سمت دیواره حرکت می‌کردند. بنابراین بین این دو سرعت، سه سطح از سرعت انتخاب شد.

پودر مواد تقویت کننده در هر مرحله با نسبت‌های حجمی و سرعت‌های چرخشی ذکر شده درون قالب ریخته شده است. سرعت دوران و مدت زمان چرخش قالب برای تمام نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. به ازای هر سرعت چرخشی با نسبت‌های حجمی ذکر شده، برای هر ماده تقویت کننده، سه نمونه ساخته شده است. تعداد و جزئیات نمونه‌های تک جزئی ساخته طبق جدول 3 می باشد.

#### 2-5- آزمون خمش سه نقطه

پس از بررسی پارامترهای مؤثر در ساخت مواد با خواص تابعی، تعدادی از نمونه‌های ساخته شده را مورد آزمون خمش سه نقطه، در دو حالت بارگذاری، F در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز (شکل 4- الف) و B در جهت نیروی گریز از مرکز مطابق (شکل 4- ب) قرار گرفتند. ابعاد نمونه‌ها در امتداد محور لوله‌های ساخته شده طبق استاندارد ASTM D790 بریده شدند [19].

به منظور اندازه‌گیری میزان استحکام کامپوزیت‌های مورد

#### جدول 2 مشخصات مکانیکی مواد

Table 2 Mechanical properties of materials

مواد	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
آهن	120	210
کاربید سیلیسیم	170	450
مس	195	117
آلومینا	350	320

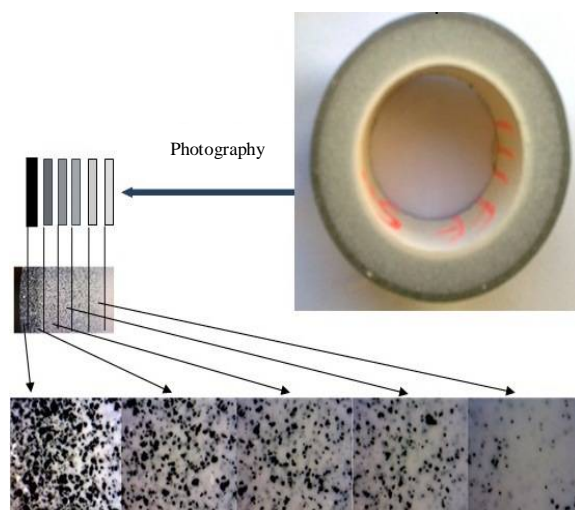


Fig. 2 A schematic view of photography steps of samples.

شکل 2 شماتیکی از مراحل عکسبرداری از یک نمونه ساخته شده

#### 2-3- پردازش تصویر

سریع‌ترین و دقیق‌ترین راه برای بدست آوردن اطلاعات کمی از ریزساختار با پردازش تصویر ممکن می‌گردد. از جمله مقادیری که در این سیستم اندازه‌گیری می‌شوند، می‌توان به کسر حجمی فازها، اندازه دانه‌ها، اندازه ذرات، فاصله آزاد بین ذرات مشابه یا فازهای ثانویه، نسبت مساحت سطوح به حجم اجزای میکروسکوپی، چگونگی توزیع ذرات در زمینه، شکل ذرات و چگونگی قرارگیری ذرات، فازها و دانه‌ها نسبت به یکدیگر اشاره نمود. در این زمینه، نرم‌افزارهای آنالیز تصویر مختلفی، با امکانات و قابلیت‌های متفاوت در سطح دنیا تولید شده و در حال گسترش هستند.

در این مطالعه برای مشخص کردن توزیع ذرات به منظور بررسی تأثیر سرعت چرخشی قالب از روش پردازش تصویر استفاده شد. بدین منظور از نرم‌افزار تخصصی پردازش تصاویر متالوگرافی (MIP) استفاده شد.

روند انجام پردازش شامل مراحل مختلفی است که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به کالیبراسیون، ناحیه پردازشی،

### 3-1- توزیع ذرات

مطابق جدول 3، سی و شش نمونه ساخته شد. در این قسمت نتایج حاصل از توزیع ذرات پودر مواد تقویت کننده پرداخته می‌شود. همچنین داده‌های حاصل از پردازش تصویر برای مشخص کردن توزیع ذرات به منظور بررسی تأثیر سرعت چرخشی قالب نیز مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به حجم زیاد داده‌ها، فقط نمونه‌هایی در ادامه ارائه می‌شوند که توزیع ذرات شیب یکنواختی در امتداد شعاع استوانه داشته باشند. تصاویر و نمودارها، توزیع مواد در نمونه‌های ساخته شده از ذرات آهن و آلومینا با بیست و چهار درصد حجمی و نمونه‌های مس و کاربید سیلیسیم با دوازده درصد حجمی برای سرعت‌های مختلف در در شکل‌های 5 تا 8 گزارش شده‌اند.

با توجه به رابطه (1)، قانون استوک که در مورد سرعت حرکت یک ذره، در یک سیال تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز می‌باشد، شش پارامتر تأثیرگذار روی حرکت ذره در یک سیال تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز را معرفی می‌کند. با توجه به این که سه پارامتر ویسکوزیته جریان، چگالی رزین و شتاب گرانشی زمین در این تحقیق ثابت می‌باشد. تأثیر سه پارامتر اندازه بزرگی نیروی گریز از مرکز، چگالی و قطر ذرات روی حرکت ذرات در رزین مورد بحث قرار می‌گیرد. از آنجایی که بزرگی نیروی گریز از مرکز با توجه به رابطه (2)، به دو پارامتر قطر و تعداد دوران قالب وابسته می‌باشد. با توجه به ثابت بودن قطر قالب در حین آزمایش‌ها، تعداد پارامترهای تأثیرگذار بر روی حرکت ذره در این تحقیق به سه پارامتر تعداد دوران قالب، قطر و چگالی ذره تغییر می‌یابد. به طوریکه با افزایش هر یک از پارامترهای تأثیر گذار فوق موجب افزایش سرعت حرکت ذره در رزین می‌شود.

با توجه به شکل‌های 5 تا 8 که مربوط به مواد با خواص تابعی تک جزئی، می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دوران قالب و به تبع آن افزایش نیروی گریز از مرکز، شیب توزیع مواد تقویت کننده افزایش می‌یابد. اما از آنجایی که قانون استوک در مورد یک ذره، صادق است، به همین دلیل با افزایش تعداد ذرات، نیاز به معادلات پیچیده‌تری برای پیش بینی توزیع مواد در طول مواد با خواص تابعی ساخته شده می‌باشد که در تحقیقات محققان پیشین نیز به همین نکته اشاره شده که برای ارائه یک مدل جامع برای پیش‌بینی جایگاه ذرات تقویت کننده در مواد با خواص تابعی، نیاز به آزمایش‌های متعدد برای هر اندازه ذره می‌باشد [14].

سرعت چرخش قالب یکی از پارامترهای مهم تأثیرگذار بر روی حرکت ذرات تقویت کننده می‌باشد. بطوری که در مواد با

آزمایش از رابطه (3)، گزارش شده در استاندارد استفاده شد.  $L, F, b$  و  $d$  به ترتیب نیرو، فاصله بین دو راس تکیه‌گاه‌ها، عرض و ضخامت نمونه می‌باشند.

$$\sigma = \frac{3 \times f \times l}{2 \times b \times d^2} \quad (3)$$

برای اندازه گیری مدول خمشی از رابطه 4 استفاده شده است و در آن  $L, m, E, b$  و  $d$  به ترتیب مدول الاستیسیته، ضریب شیب خط مماس بر نمودار نیرو-جابجایی، فاصله بین دو راس تکیه‌گاه، عرض نمونه و ضخامت نمونه مورد آزمایش می‌باشند.

$$E = \frac{m \times L^3}{4 \times b \times d^3} \quad (4)$$

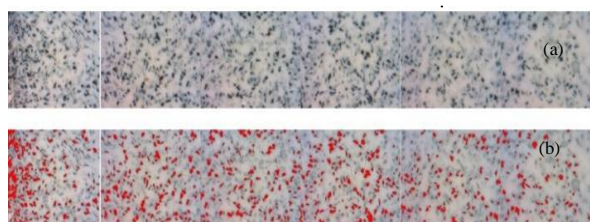


Fig. 3 a) Microscopic photo of microstructure. b) Result of image processing software to separate desired particles

شکل 3 الف) تصویری از ریز ساختار گرفته شده توسط میکروسکوپ، ب) مرحله جداسازی توسط نرم افزار پردازش تصویر

### جدول 3 پارامترهای آزمایش و سطوح آن‌ها

Table 3 The experimental parameters and their levels.

پارامترها	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
مواد تقویت کننده	آهن	کاربید سیلیسیم	مس	آلومینا
نسبت حجمی (%)	12	24	36	-
سرعت چرخشی (rev/min)	250	355	500	-

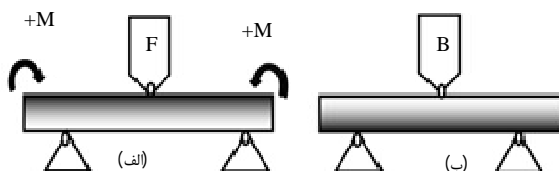


Fig. 4 Comparison of two different loading procedure in Flexural test of the FGM

شکل 4 مقایسه دو نوع بارگذاری الف) F در B در آزمون خمش

### 3- تحلیل نتایج

در این قسمت در ابتدا نتایج حاصل از پردازش تصویر بر روی نمونه‌های ساخته شده ارائه می‌شود و در ادامه به ارائه نتایج حاصل از آزمون خمش پرداخته می‌شود.



نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار مواد با خواص تابعی ساخته شده، نشان می‌دهد که هر ذره با توجه به شکل هندسی و ساختاری منحصر به فرد، یک مدل توزیع ذرات منحصر به فرد را دارا می‌باشد.

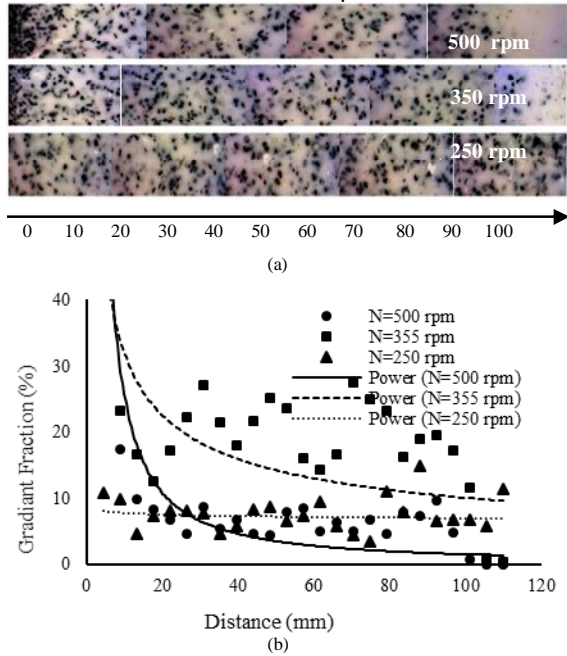


Fig. 7 a) Composite microstructure, b) volumetric variation resin-SiC powder with 12% in different speeds.

شکل 7 الف) ریزساختار کامپوزیت، ب) تغییرات حجمی رزین- پودر کاربید سیلیسیم با 12 درصد حجمی در امتداد شعاع استوانه در سرعت‌های مختلف

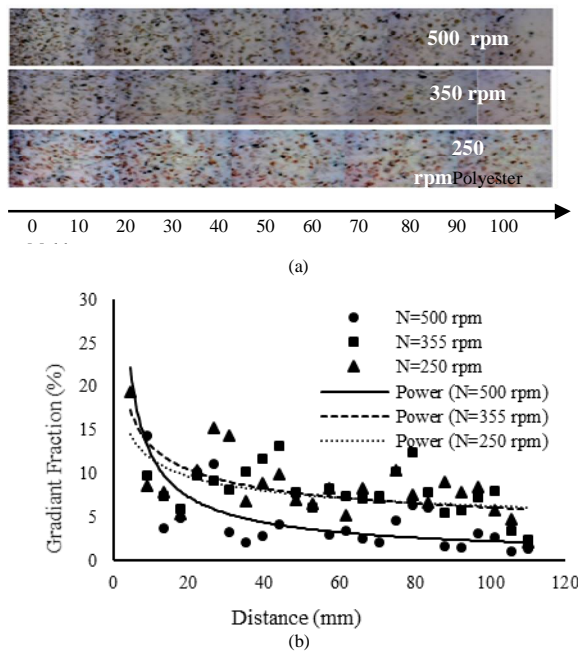


Fig. 8 a) Composite microstructure, b) volumetric variation resin-Alumina powder with 24% in different speeds.

شکل 8 الف) ریزساختار کامپوزیت، ب) تغییرات حجمی رزین- پودر آلومینا با 24 درصد حجمی در امتداد شعاع استوانه در سرعت‌های مختلف

خواص تابعی تک جزئی مشاهده می‌شود که افزایش سرعت چرخشی قالب از 250 دور بر دقیقه به 500 دور بر دقیقه، موجب افزایش شیب توزیع مواد تقویت کننده شده است.

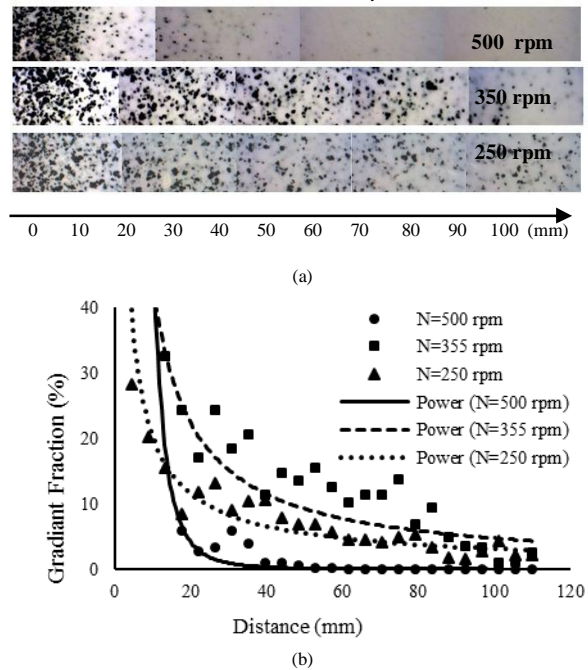


Fig. 5 a) Composite microstructure, b) volumetric variation resin-Iron powder with 24% in different speeds.

شکل 5 الف) ریزساختار کامپوزیت، ب) تغییرات حجمی رزین- پودر آهن با 24 درصد حجمی در امتداد شعاع استوانه در سرعت‌های مختلف

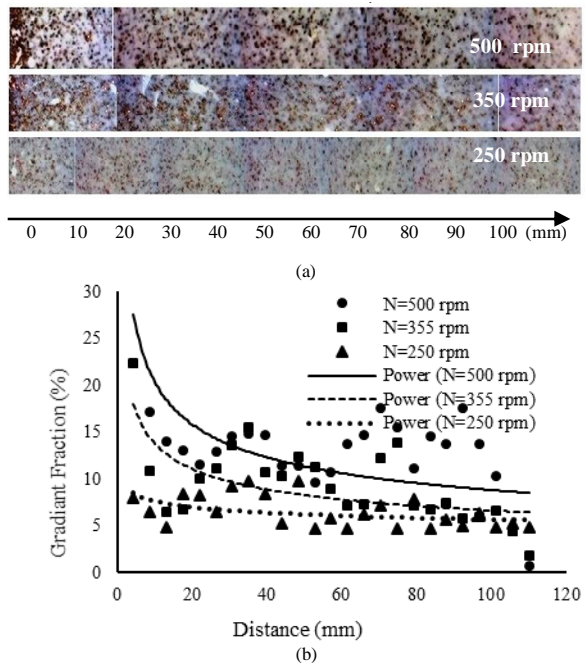


Fig. 6 a) Composite microstructure, b) volumetric variation resin-Cu powder with 12% in different speeds.

شکل 6 الف) ریزساختار کامپوزیت، ب) تغییرات حجمی رزین- پودر مس با 12 درصد حجمی در امتداد شعاع استوانه در سرعت‌های مختلف

با توجه به بیشتر بودن چگالی پودر مس نسبت به پودرهای دیگر مورد استفاده در این پژوهش، با بررسی ریز ساختار مواد با خواص تابعی تک جزئی ساخته شده، مشاهده می‌شود، که به دلیل ریز بودن اندازه ذرات مس، افزایش حجم ذرات موجب افزایش برخورد بین ذرات و عدم تشکیل شیب مناسب در مواد با خواص تابعی تک جزئی شده است.

با توجه میزان چگالی ذرات آهن < آلومینا > کاربید سیلیسیم، به دلیل داشتن اندازه دانه‌های تقریباً یکسان، کاهش چگالی ذرات تقویت کننده موجب کاهش شیب توزیع ذرات شده است. همچنین افزایش حجم ذرات تقویت کننده در مواد با خواص تابعی آهن، موجب بهبود شیب توزیع مواد تقویت کننده شده است. این امر در مواد با خواص تابعی کاربید سیلیسیم و آلومینا، به دلیل داشتن چگالی پایین ذرات تقویت کننده، نتیجه عکس داشته است.

### 3-2- استحکام خمشی

نمونه‌هایی که دارای شیب یکسان تری از ذرات تقویت کننده در امتداد شعاع داشتند، تحت آزمون خمش قرار گرفتند. بدین منظور، نمونه با ذرات تقویت کننده مس در سرعت 500 دور بر دقیقه، نمونه با ذرات تقویت کننده آهن در سرعت 355 دور بر دقیقه، نمونه با ذرات تقویت کننده کاربیدسیلیسیم در سرعت 500 دور بر دقیقه و نمونه با ذرات تقویت کننده آلومینا در سرعت 355 دور بر دقیقه انتخاب شدند. شکل‌های 9 و 10 استحکام خمشی و مدول خمشی را در دو حالت بارگذاری F و بارگذاری B نشان می‌دهند.

یکی از ویژگی‌های اساسی کامپوزیت‌های زمینه رزینی تقویت شده با پودر این است که در این نوع کامپوزیت‌ها توزیع مواد تقویت کننده در طول ماده یکسان می‌باشد. به همین دلیل دارای خواص مکانیکی یکسانی در کل ساختار خود می‌باشند. پارامترهای مختلفی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه رزینی تقویت شده با پودر ذرات تأثیرگذار هستند که می‌توان به درصد حجمی مواد تقویت کننده، اندازه ذرات تقویت کننده، نسبت طول به عرض ذرات تقویت کننده، مدول و استحکام ذرات تقویت کننده، چسبندگی اجزا تشکیل دهنده و چقرمگی رزین اشاره کرد. نحوه تأثیرگذاری پارامترهای مؤثر بر تغییرات خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه رزینی در جدول 4 ذکر گردیده است.

اما در مواد با خواص تابعی شیب دار بودن توزیع مواد در طول کامپوزیت، موجب تغییر در خواص مکانیکی این نوع

کامپوزیت‌ها در حالات مختلف بارگذاری می‌شود [20]. با توجه به شکل 9، در حالت بارگذاری B نسبت به حالت F میزان مواد تقویت کننده در سطح کامپوزیت‌های ساخته شده کاهش یافته و میزان رزین موجود در سطح افزایش یافته است. این موضوع باعث ایجاد چنین اختلافی بین دو حالت بارگذاری شده است. در حالت F طرفی که تحت تنش فشاری است ذرات تقویت کننده بیشتری نسبت به حالت B دارد و همین امر باعث افزایش استحکام خمشی F نسبت به B می‌شود. همانطور که در شکل 9 مشخص است، استحکام خمشی رزین خالص، بیشتر از استحکام مواد با خواص تابعی تقویت شده با پودر ذرات در حالت B می‌باشد. در حالت B، مواد تقویت کننده در لایه زیرین تحت تنش کششی می‌باشند. وجود مواد تقویت کننده در لایه زیرین باعث کاهش افزایش طول تا نقطه شکست می‌شود. این موضوع موجب کاهش استحکام مواد با خواص تابعی تقویت شده نسبت به رزین خالص در حالت B شده است [13].

در حالت F که ذرات تقویت کننده تحت تنش فشاری هستند، استحکام مواد کامپوزیت ساخته شده با مواد تقویت کننده سرامیکی (آلومینا و کاربیدسیلیسیم) از مواد ساخته شده با مواد فلزی (آهن و مس) بیشتر می‌باشد. دلیل این امر همانطور که در جدول 4 آمده است، بیشتر بودن استحکام مواد سرامیکی از مواد فلزی تحت تنش فشاری می‌باشد.

جدول 4 پارامترهای تأثیرگذار بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه رزینی [20]

Table 4 The effective parameters in the mechanical properties of composite based on resin [20]

استحکام	خاصیت مکانیکی		پارامتر مؤثر
	ضریب شدت تنش	مدول	
ثابت	افزایش	افزایش	افزایش حجم ذرات
کاهش	ثابت	ثابت	افزایش اندازه ذرات
افزایش	افزایش	-	افزایش نسبت طول به عرض افزایش
افزایش	افزایش	افزایش	استحکام و مدول ذرات
افزایش	ثابت	ثابت	بهبود چسبندگی
کاهش	افزایش	کمترین کاهش	چقرمگی ماتریس

سیلیسیم، به دلیل داشتن اندازه دانه‌های تقریباً یکسان، کاهش چگالی ذرات تقویت کننده موجب کاهش شیب توزیع ذرات شده است. همچنین افزایش حجم ذرات تقویت کننده در مواد با خواص تابعی آهن، موجب بهبود شیب توزیع مواد تقویت کننده شده است. این امر در مواد با خواص تابعی کاربید سیلیسیم و فیوزد آلومینا، به دلیل داشتن چگالی پایین ذرات تقویت کننده، نتیجه عکس داشته است.

در نتایج حاصل از آزمون خمش بر روی مواد با خواص تابعی تک جزئی، مشاهده می‌شود که افزایش استحکام و حجم ذرات تقویت کننده، موجب افزایش استحکام و مدول مواد با خواص تابعی، شده است. نتایج حاصل از آزمون خمش نشان می‌دهد که ساختار شیب دار مواد تقویت کننده در طول ساخت مواد با خواص تابعی، تأثیر مهمی بر مدول و استحکام داشته است.

### 5- فهرست علائم

- $b$  عرض نمونه (m)  
 $d$  ضخامت نمونه (m)  
 $D$  قطر ذرات (m)  
 $D_t$  قطر قالب (m)  
 $E$  مدول الاستیسیته ( $\text{Nm}^{-2}$ )  
 $g$  شتاب گریز از مرکز ( $\text{ms}^{-2}$ )  
 $G$  بزرگی نیروی گریز از مرکزی (N)  
 $f$  نیرو (N)  
 $L$  فاصله بین دو راس تکیه گاه (m)  
 $m$  ضریب شیب خط مماس بر نمودار نیرو-جابجایی  
 $N$  سرعت چرخش قالب ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $V$  سرعت حرکت ذرات در رزین ( $\text{ms}^{-1}$ )

### علائم یونانی

- $\mu$  ویسکوزیته جریان ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )  
 $\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )  
 $\sigma$  استحکام کامپوزیت (N)

### 6- مراجع

- [1] Moosaie, A. and Panahi Kalus, H., "Exact solution of steady nonlinear heat conduction in exponentially graded cylindrical and spherical shells with temperature-dependent properties", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 301 – 306, 2016.  
 [2] Ranjbar, J. and Alibeigloo, A., "Analysis of sandwich cylindrical shell with FGM core subjected to thermal shock". In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 175-182, 2014.

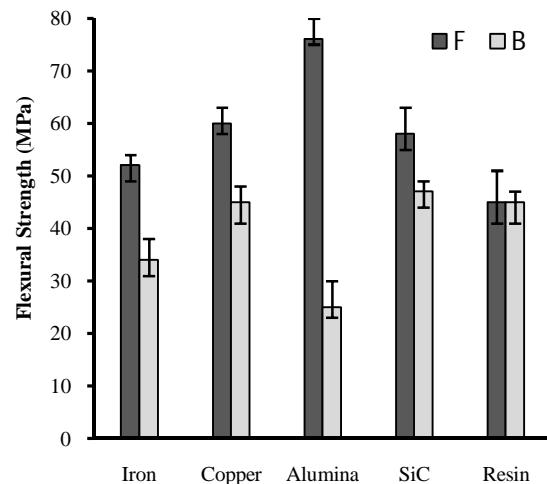


Fig. 9 Comparison of flexural strength of manufactured FGMs

شکل 9 مقایسه استحکام خمشی مواد ساخته شده

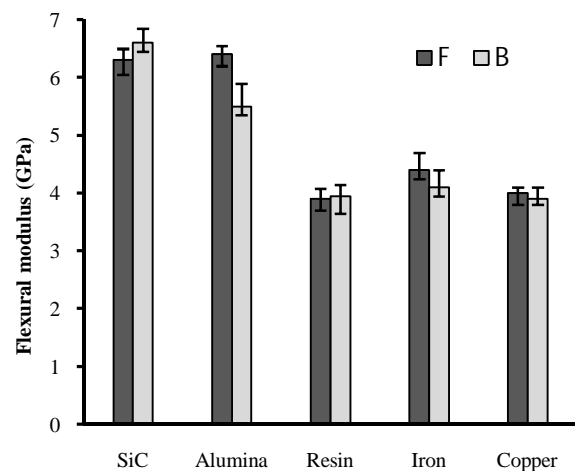


Fig. 10 Comparison of flexural modulus of manufactured FGMs

شکل 10 مقایسه مدول خمشی مواد ساخته شده

در نتایج حاصل از آزمون خمش بر روی مواد با خواص تابعی تک جزئی، مشاهده می‌شود که افزایش استحکام و حجم ذرات تقویت کننده، موجب افزایش استحکام و مدول مواد با خواص تابعی شده است. نتایج حاصل از آزمون خمش نشان می‌دهد که ساختار شیب دار مواد تقویت کننده در طول ساخت مواد با خواص تابعی، تأثیر مهمی بر مدول و استحکام داشته است.

### 4- نتیجه گیری

سرعت چرخش قالب یکی از پارامترهای مهم تأثیر گذار بر روی حرکت ذرات تقویت کننده می‌باشد. بطوریکه در مواد با خواص تابعی مشاهده می‌شود که افزایش سرعت چرخشی قالب از 250 دور بر دقیقه به 500 دور بر دقیقه، موجب افزایش شیب توزیع مواد تقویت کننده شده است.

با توجه میزان چگالی ذرات آهن < فیوزد آلومینا > کاربید



- functionally graded polymer composites” composites science and technology 2000; 61: 557-563.
- [13] Tsotra, P. and Friedrich, K., “Electrical and mechanical properties of functionally graded epoxy-resin/carbon fibre composites” Composites part A, Vol.34, pp. 75-82, 2002
- [14] Hashmi, SAR. and Dwivedi, U.K., “Simulation of compositional profile in functionally graded materials” polymer engineering and science, Vol.28, pp. 1660-1666, 2006
- [15] Stabik, J., Dybowska, A., Chomiak, M., “Polymer composites filled with powders as polymer graded materials” Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, Vol. 43, pp. 153-161, 2012.
- [16] Selmy, A. I., Abd El-baky, M. A., Ghazy, M. R., Kamel, M., “Flexural Fatigue Performance of Glass Fiber/ Epoxy Step-Wise Functionally and Non-Functionally Graded Composites of Different Structures”, Intern. Polymer Processing Vol. 27, pp. 289-303, 2017.
- [17] Prasad, L., Singh, G., Pokhriyal, M., “A Comparative Study on Physical and Mechanical Behaviour of Functionally Graded Composite Materials reinforced with Natural Fillers”, Materials Today: Proceedings 5 16990–16994, 2018.
- [18] Singh, A.K., Siddhartha., “Mechanical and thermo-mechanical peculiarity of functionally graded materials-based glass fiber-filled polybutylene terephthalate composites” Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 37(6) 410–426, 2018.
- [19] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM ASTM D790-15e2, West Conshohocken, PA, 2015.
- [20] Moloney, AC., and Kausch, HH., “Parameters determining the strength and toughness of particulate filled epoxide resins” Journal of materials science, Vol. 22, pp. 381-393, 1987
- [3] Butcher, RJ., Rousseau, C-E. and HV. Tippur, HV., “A functionally graded particulate composite: preparation, measurements and failure analysis” Acta Materialia, Vol. 47, pp. 259-268, 1999.
- [4] Krumova, M., Klingshirn, C. Hauptert, F. Friedrich, K., “Micro hardness studies on functionally graded polymer composites” Composites Science and Technology. Vol. 61, pp. 557-563, 2001.
- [5] Dobrzański, LA., Kloc-Ptaszna, A., Dybowska, G., Matula, E. Gordo, JM., “Torralba. Effect of WC concentration on structure and properties of the gradient tool materials” Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 20, pp. 91-94, 2007.
- [6] Lee, JH., Lee, SJ., Khang, G. and Lee, HB., “The effect of fluid shear stress on endothelial cell adhesiveness to polymer surfaces with wettability gradient”. Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 230, pp. 84-90, 2000.
- [7] Desilles, N., Lecamp, L., Lebaudy, P., and Bunel, C., “Gradient structure materials from homogeneous system induced by UV photopolymerization” Polymer. Vol. 44, pp. 6159-6167, 2003.
- [8] Chung, H. and Das, S., “Processing and properties of glass bead particulate-filled functionally graded Nylon-11 composites produced by selective laser sintering” Material Science and Engineering A. Vol. 437, pp. 226-234, 2006.
- [9] Stabik, J. and Dybowska, A., “Methods of preparing polymeric gradient composites” Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. Vol. 25, pp. 67-70, 2007
- [10] Funabashi, M. and T. Kitano, T., “Moulding of short-fiber filled epoxy resin composites using centrifugal force” Proceedings of the 67th jsme spring ann meeting, yokohama japan. 1990
- [11] Funabashi, M., “Gradient composites of nickel coated carbon fibre filled epoxy resin moulded under centrifugal force” Composites Part A, Vol. 28, pp. 731-737, 1997.
- [12] Krumova, M., Klingshirn, C., Hauptert, F. and Friedrich, K., “Micro hardness studies on