



Experimental and Numerical Investigation of Tensile and Flexural Behavior of Wood-Plastic Composites Based on Changes in Wood Powder Amount

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mahoori S.M.¹ BSc,
Golmakani M.E.*¹ PhD,
Tavasoli Farshe A.² PhD

How to cite this article

Mahoori S.M, Golmakani M.E, Tavasoli Farshe A. Experimental and Numerical Investigation of Tensile and Flexural Behavior of Wood-Plastic Composites Based on Changes in Wood Powder Amount. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):1053-1061.

¹Mechanical Engineering Department, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

²Agricultural Department, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran. Postal Code: 9187144123

Phone: -

Fax: -

m.e.golmakani@mshdiau.ac.ir

Article History

Received: May 28, 2018

Accepted: August 24, 2019

ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

In this research, the mechanical behavior of composites made with polyethylene matrix and wood powder reinforcement have been investigated. In order to improve the mechanical properties, the wood powder has been added to polyethylene at three levels of 30, 40 and 50 wt.%. The material was mixed using an internal mixer Haake and then the material was removed from the mixer and was granulated by a crushing machine. Finally, the granules were molded using an injection molding machine and tensile test specimens were made according to ASTM D638 standard and bending test specimens were made according to ASTM D790 standard. After preparing the specimens, a tensile and flexural test performed on them. The results of the mechanical tests show that the amount of elastic modulus increased with increasing the amount of wood powder so that the highest amount of elastic modulus was observed in the specimens containing 50 wt.% wood powder. Also, the highest strength in the tensile test was observed at the level of 30 wt.% of the wood weight and the highest flexural strength was in the 50% level of wood weight. Also, mechanical tests were simulated using Abaqus software.

Keywords Polyethylene; Wood Powder; Experimental Investigation; Mechanical Properties

CITATION LINKS

[1] Glass fiber reinforced polymer-clay nanocomposites: Processing, structure and hygrothermal effects on mechanical properties [2] Impact characterization of epoxy LY556/E-glass fibre/nano clay hybrid nano composite materials [3] Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon nanotubes [4] Study of mechanical properties of wood dust reinforced epoxy composite [5] Experimental Investigation of Jute Fiber Reinforced Nano Clay Composite [6] Effect of temperature, duration and speed of pre-mixing on the dispersion of clay/epoxy nanocomposites [7] Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite [8] Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing [9] Impact and hardness properties of areca fiber-epoxy reinforced composites [10] Thermosetting polymer and nano clay based natural fiber bio-composites [11] On adhesive properties of nano-silica/epoxy bonded single-lap joints [12] Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites [13] Analysis of dry sliding wear behaviour of rice husk filled epoxy composites using design of experiment and ANN [14] Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites [15] Evaluation of flexural properties of composite materials made of lignocellulosic material and heavy polyethylene wastes by dry dry / hot press [16] Effect of nano zinc oxide on physical and mechanical properties of wood plastic composites [17] Numerical modeling of bending behavior of intra-ply hybrid composites using finite element method [18] Mechanical performance of wood fibre-waste plastic composite materials [19] Study behavior creep composites made mixes particle board and medium density Fiber Board-Recycled from HDPE waste and effect water fiber board absorption on composites [20] Mechanical properties of wood-plastic composite made from particleboard and MDF wastes and polyethylene (HDPE) wastes [21] Investigation on the mechanical properties of polyethylene/date palm wood flour composite: The effect of filler content and type

بررسی تجربی و عددی رفتار کششی و خمشی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک بر مبنای تغییرات مقدار آرد چوب

سیدمهران ماهوری MSc

گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

محمداسماعیل گل‌مکانی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

افشین توسلی‌فرشه PhD

گروه کشاورزی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده

در این تحقیق رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته شده با ماتریس پلی‌اتیلن و تقویت‌کننده پودر چوب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا به منظور رسیدن به خواص مکانیکی بهتر، پودر چوب در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ وزنی به پلی‌اتیلن افزوده شده است. این مواد با استفاده از دستگاه مخلوطکن داخلی مخلوط شده و پس از خروج مواد از مخلوطکن این مواد به وسیله دستگاه خردکن به صورت گرانول در آمدند و در نهایت گرانول‌ها با استفاده از دستگاه تزریق، قالبگیری شده و نمونه‌های آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D638 و نمونه‌های آزمون خمش مطابق با استاندارد ASTM ساخته شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها آزمون کشش و خمش روی آنها انجام شد. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان می‌دهد که مقدار مدول الاستیسیته با افزایش مقدار پودر چوب افزایش یافته به طوری که بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ وزنی پودر چوب دیده شده است. همچنین بیشترین مقاومت در آزمون کشش در سطح ۳۰٪ وزنی چوب و بیشترین مقاومت خمشی در سطح ۵۰٪ وزنی چوب اتفاق افتاده است. همچنین آزمون‌های مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد.

کلیدواژه‌ها: پلی‌اتیلن، پودر چوب، بررسی تجربی، خواص مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

*نویسنده مسئول: m.e.golmakani@mshdiau.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف هر روز به‌طور چشمگیری افزایش یافته و در خیلی از موارد نتایج بهتری را به همراه داشته است. از آنجایی که کامپوزیت‌ها متناسب با اهداف خاصی ساخته می‌شوند، لازم است تا اطلاعاتی در رابطه با مواد سازنده کامپوزیت‌ها و همچنین اطلاعاتی در رابطه با خواصی که کامپوزیت‌ها از خود نشان می‌دهند، در دسترس باشد. با توجه به مصرف روزافزون مواد پلاستیکی و کاربردهای وسیع آن در زمینه‌های مختلف و افزایش مداوم ضایعات پلاستیکی و اثرات نامطلوب آنها در محیط زیست و طبیعت و مسائل اقتصادی، مانند افزایش قیمت پلاستیک‌ها و کاهش وابستگی به صنایع پتروشیمی، باعث شده است که مجامع علمی، بهداشتی و صنعتی جهان در صد یافتن راه‌حل‌های مناسب در جهت رفع و کاهش میزان اینگونه از ضایعات از طریق بازیافت و همچنین ساخت

چوب پلاستیک‌ها برآیند. با توجه به گستردگی استفاده از کامپوزیت‌ها و به‌خصوص کامپوزیت چوب پلاستیک، یافتن خواص مکانیکی این مواد و همچنین تغییرات آنها با توجه به نحوه تغییر در مقدار مواد سازنده حائز اهمیت است، زیرا با داشتن این خواص و همچنین دانستن این موضوع که کامپوزیت مورد نظر برای چه منظوری استفاده می‌شود، می‌توان با ایجاد تغییراتی در مواد تقویت‌کننده با هزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه خواص مکانیکی مناسب با کارکرد آن را به دست آورد.

شوما و همکاران^[1]، با انجام تحقیقی بر کامپوزیت پایه پلیمر با تقویت‌کننده الیاف شیشه و نانورس دریافتند که با افزایش مقدار نانورس تا ۳ درصد وزنی مقدار مقاومت در برابر کشش افزایش یافته و با اضافه کردن نانورس بیش از ۳ درصد وزنی شاهد کاهش مقاومت در برابر کشش خواهیم بود. تست دیگری که انجام شد، تست خمش سه نقطه است که نشان می‌دهد با افزایش مقدار نانورس مقدار مقاومت خمشی افزایش می‌یابد.

سیواسار/وانان و همکاران^[2]، در ابتدا ذرات نانورس با درصدهای از قبل تعیین شده را با رزین به روش التراسونیک مخلوط کردند و بعد از آماده شدن نمونه‌ها، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی از آنها تصویربرداری کردند که این تصاویر برای نمونه حاوی ۴ درصد وزنی نانورس با توجه به مسیر حرکت ترک‌ها و لبه‌داربودن سطح بیانگر تردبودن نمونه کامپوزیتی است؛ همچنین در این تصاویر، تراکمی مشاهده نشد که نشان‌دهنده پیوند خوب میان اپوکسی و نانورس باشد.

ایسلام و همکاران^[3]، ماتریس اپوکسی را با نانولوله‌های کربنی و نانورس تقویت کردند و پس از آماده سازی نمونه‌ها تست خمش و ضربه انجام شد که نتایج تست خمش نشان می‌دهد که مقاومت خمشی با افزودن نانوذرات بهبود یافته است و همچنین نتایج تست مشخص کرد که نمونه‌های تقویت شده با نانوذرات می‌تواند انرژی بیشتری را در تست ضربه نسبت به نمونه شاهد جذب کند و همین‌طور مساحت منطقه آسیب‌دیده کمتری داشته باشد.

کومار و همکاران^[4]، بر اثر تقویت‌کننده‌های طبیعی روی ماتریس پلیمری کار کردند که به این منظور، رزین اپوکسی به‌عنوان ماده زمینه و پودر چوب درخت سندی به‌عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از آماده شدن نمونه‌ها، تست خمش و کشش روی آنها انجام شد. نتایج تست‌ها نشان داد که با افزایش مقدار تقویت‌کننده تا ۱۰ درصد وزنی مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت، افزایش پیدا می‌کند و برای نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتر ذرات چوب خواص ذکر شده کاهش می‌یابد؛ به طوری که کمترین خواص در ۱۵ درصد وزنی تقویت‌کننده اتفاق می‌افتد؛ به‌جز مدول الاستیسیته که کمترین مقدار آن در نمونه فاقد تقویت‌کننده دیده شد.

دیپک و همکاران^[5]، پلی‌استری به‌عنوان ماده زمینه و کف هندی و نانورس به‌عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار دادند. بعد از ساخت نمونه‌ها تست کشش، تست فشار و تست ضربه روی آنها

تقویت‌کننده در ماتریس اپوکسی قرار گرفت. پس از ساخت نمونه‌ها تست ضربه روی آنها انجام گرفت که نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت کامپوزیت‌های دارای آرکا با افزایش حجم قطعات افزایش پیدا کرده است.

دیپک و همکاران^[10]، تاثیر استفاده از پوسته نارگیل و نانورس را به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در پلی‌استر بررسی کردند. نتایج حاصل از آن بیانگر این است که با افزایش مقدار نانورس مقدار مقاومت کششی و مقدار انرژی ضربه و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین خواص مکانیکی در همه نمونه‌های حاوی نانورس مشابه هم بوده و تاییدکننده این موضوع است. این کامپوزیت اگرچه نسبت به خیلی از کامپوزیت‌های رایج خواص ضعیف‌تری دارد، ولی در مقایسه با کامپوزیت‌های چوب و برخی پلاستیک‌ها خواص بهتری از خود نشان می‌دهد و همچنین از دیگر مزایای آن می‌توان به صرفه‌بودن و سازگاری بیشتر با محیط زیست اشاره نمود. در تحقیقی که زو و همکاران^[11] انجام دادند، تاثیر نانوسیلیکا به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان می‌دهند که با افزودن مقدار ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی نانوسیلیکا به اپوکسی مقاومت چسبندگی تا ۲۰٪ افزایش پیدا می‌کند و حتی در نمونه‌هایی که در رطوبت ۱۰۰٪ برای سه هفته قرار گرفته بودند، مشاهده شد که این مقاومت حفظ شده است. همچنین نتایج تست‌های خستگی نشان دادند که نمونه‌های با مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی نانوسیلیکا طول عمر بیشتری در مقایسه با اپوکسی خالص دارند.

بوپالان و همکاران^[12]، تاثیرات استفاده از پوسته موز و کنف هندی به‌عنوان تقویت‌کننده اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد که بیشترین میزان مقاومت در تست کشش، ضربه و خمش در نمونه‌ای است که حاوی مقادیر برابر تقویت‌کننده پوسته موز و کنف بوده است. سپس تست بررسی دمای کاهش وزن و تخریب حرارتی روی نمونه‌ها انجام شد که نتایج آن نشان داد، نمونه‌ای که حاوی مقادیر برابر تقویت‌کننده پوسته موز و کنف بوده، خواص حرارتی بهتری از خود نشان می‌دهد.

روت و همکاران^[13]، نشان دادند که مقاومت کششی هر نمونه با افزایش مقدار تقویت‌کننده پوسته برنج کاهش پیدا می‌کند. سپس دانسیته نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و نتایج آن نشان داد که با افزایش مقدار تقویت‌کننده پوسته برنج مقدار دانسیته نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

علمری و^[14]، نانورس و نانولوله‌های کربنی و نانوسلیکون را به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در رزین اپوکسی انتخاب کردند و سپس تاثیرات قرارگرفتن در آب را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که نمونه اپوکسی خالص و نمونه‌های اپوکسی تقویت‌شده بعد از قرارگرفتن در آب در مقایسه با نمونه‌های خشک مقاومت خمشی کمتری از خود نشان می‌دهند. همچنین مشاهده می‌شود که افزودن نانوذرات به اپوکسی در حالتی که نمونه‌ها در آب قرار گرفته‌اند، باعث بهبود در خواص مکانیکی نمونه نسبت به اپوکسی

انجام شد که نتایج حاصل بیانگر این است که با افزایش مقدار نانورس مقدار مقاومت کششی و مقدار انرژی ضربه و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این کامپوزیت اگرچه نسبت به خیلی از کامپوزیت‌های رایج خواص ضعیف‌تری دارد، ولی در مقایسه با کامپوزیت‌های چوب و برخی پلاستیک‌ها خواص بهتری از خود نشان می‌دهد و همچنین از دیگر مزایای آن می‌توان به صرفه‌بودن و سازگاری بیشتر با محیط زیست اشاره نمود.

در تحقیقی دیگری که /ان‌جی/ و همکاران^[6] انجام دادند، اپوکسی به‌عنوان ماده زمینه و نانورس به‌عنوان ماده تقویت‌کننده انتخاب شد. مقدار ۲ درصد وزنی نانورس با اپوکسی در شرایط مختلف پیش‌مخلوط شده و عملیات پخت روی نمونه‌ها انجام شد. در ادامه به‌منظور بررسی تاثیرات پیش‌مخلوط کردن در دماهای متفاوت از روش پرتونگاری اشعه ایکس استفاده شده که نتایج آن نشان داد عمل پیش‌مخلوط کردن در دما، سرعت و زمان‌های متفاوت، تاثیری مثبت بر پراکندگی ذرات نانورس در اپوکسی دارد. ولی تاثیر سرعت مخلوط‌کن در پراکندگی نانورس بیشتر از درجه حرارت در زمان پیش مخلوط است و در نهایت پراکندگی و توزیع مناسب در دمای ۱۲۰°C و ۲۴۰۰۰ دور بر دقیقه به‌دست آمد. در تحقیق دیگری که توسط چن و همکاران^[7] صورت گرفت، رزین اپوکسی به‌عنوان ماده زمینه و تقویت‌کننده نانورس به‌مقدار ۱، ۳، ۴، ۵ و ۷ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی همگن بودن و نحوه پراکندگی تقویت‌کننده در نمونه‌ها با عکس‌برداری توسط میکروسکوپ الکترونی صورت گرفت که تصاویر نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ۳ و ۴ درصد وزنی نانورس سبب خوشه‌های مشابه دارند و پراکندگی آنها یکنواخت است. از طرف دیگر نتایج تست کشش نشان داد که نمونه‌های حاوی نانورس مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه اپوکسی خالص از خود نشان می‌دهند. همچنین مشاهده شد که نمونه‌های حاوی ۵ درصد وزنی نانورس بیشترین مقاومت کششی را از خود نشان داده و بعد از آن با اضافه‌شدن مقادیر بیشتر نانورس به نمونه مقدار مقاومت کششی کاهش می‌یابد.

یاسین و همکاران^[8]، از رزین اپوکسی به‌عنوان ماده زمینه و نانورس به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. در این مطالعه از مخلوط‌کن سه رول به‌منظور مخلوط کردن رزین و تقویت‌کننده استفاده شده است. پس از ساخت نمونه‌ها روی آنها تصویربرداری انجام شد که نتایج نشان داد که با افزودن ۱۰ درصد وزنی نانورس تنها ۳٪ دانسیته نسبت به اپوکسی خالص افزایش یافته که این مقدار قابل توجهی نیست همچنین با توجه به تست کشش محوری انجام‌شده، می‌توان گفت که با افزایش مقدار نانورس، مقدار مقاومت کاهش پیدا می‌کند ولی مقدار مدول الاستیسیته با افزایش نانورس افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری که با افزودن ۱ و ۱۰ درصد وزنی نانورس به رزین به‌ترتیب به‌مقدار ۲۵ و ۸۰٪، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری که توسط سرینیواسا و باراث^[9] صورت گرفت، پوسته میوه آرکا به‌عنوان ماده

محصول نهایی می‌شود. از این رو آرد چوب را قبل از اختلاط با پلی‌اتیلن، در خشک‌کن دارای جریان هوا موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۰°C قرار داده تا هرگونه رطوبت اضافی خارج شود.

فرآیند اختلاط با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی اچ‌بی‌آی سیستم ساخت شرکت آمریکایی هک انجام شد. دمای اختلاط ۱۷۰°C و سرعت اختلاط ۶۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد و کل زمان اختلاط تا رسیدن به گشتاور ثابت ۱۰ دقیقه بوده است. مانیتور دستگاه قادر است تا منحنی‌های دما، زمان، گشتاور-زمان و اطلاعاتی از این دست را به‌کاربر نشان دهد. با توجه به منحنی گشتاور-زمان نمایش داده‌شده روی مانیتور دستگاه، ابتدا پلی‌اتیلن داخل محفظه دستگاه ریخته شده و پس از ۲ دقیقه ذوب شدن و رسیدن به گشتاور ثابت، مالٹیک‌اندريد اضافه شد و پس از گذشت ۵ دقیقه، آرد چوب درون محفظه ریخته شد و تا رسیدن به گشتاور ثابت، عملیات اختلاط به‌طور مستمر انجام شد. عملیات وزن‌کردن نمونه‌ها با توجه به مقادیر و نسبت‌های وزنی، دقیقاً قبل از فرآیند اختلاط مواد انجام گرفت. درصد وزنی اجزای کامپوزیت‌های ساخته‌شده با ذکر شماره اختصاری به‌کاررفته برای هر تیمار در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳) مقدار ترکیبات هر تیمار (برحسب درصد)

شماره تیمار	آرد چوب	پلی‌اتیلن	سازگارکننده
۱	۳۰	۷۰	۳
۲	۴۰	۶۰	۳
۳	۵۰	۵۰	۳

مواد، پس از خروج از دستگاه مخلوط‌کن خنک و سخت شده سپس با استفاده از دستگاه خردکن نیمه‌صنعتی ویزر مدل WG-200 Ls به گرانول تبدیل شد. شکل ۱ گرانول‌های آماده‌شده را نشان داده است.



شکل ۱) گرانول‌های آماده‌شده با استفاده از دستگاه خردکن

سپس، به‌منظور ساخت نمونه‌های آزمونی استاندارد، گرانول‌ها به دستگاه قالب‌گیری تزریقی منتقل شدند. برای این کار از دستگاه تزریق نیمه‌صنعتی ساخت شرکت ایمن ماشین تهران موجود در

خالص در همان شرایط می‌شود. همچنین نشان داد که نمونه‌های حاوی ۱ درصد وزنی از تقویت‌کننده خواص بهتری را نسبت به سایر مقادیر از خود نشان می‌دهند.

نجفی و همکاران^[15]، خواص خمشی مواد مرکب ساخته‌شده از ضایعات مواد لیگنوسلولزی و پلی‌اتیلن ضایعاتی را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور، چهار نوع پرکننده لیگنوسلولزی خاکاره چوب، خاک سنباده امدی‌اف، خاکاره تخته خرده چوب و پوسته برنج بعد از ساخت نمونه‌ها تحت آزمایش خمش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته مواد مرکب ساخته‌شده از پرکننده‌های خاک سنباده امدی‌اف و خاکاره تخته خرده چوب بیش از سایر پرکننده‌های لیگنوسلولزی است.

رسولی و همکاران^[16] اثر نانواکسید روی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چندسازه چوب-پلی‌اتیلن را مورد بررسی قرار داده و متوجه شدند که استفاده از نانواکسید روی به میزان ۲ و ۴% به‌طور معنی‌داری موجب کاهش مقاومت‌های خمشی و کششی شده است.

۲- آزمایش

۲-۱- مواد

در این تحقیق ماده زمینه پلی‌اتیلن سنگین تهیه‌شده از شرکت بازرگانی پتروشیمی اراک با کد ۵۲۱۸ و شاخص جریان مذاب ۱۸g/10min است که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. همچنین آرد چوب نراد به‌عنوان تقویت‌کننده پودری در ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت.

در این تحقیق، مالٹیک‌اندريد پیوندشده با پلی‌اتیلن به‌عنوان عامل سازگارکننده مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات آن در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۱) مشخصات پلی‌اتیلن استفاده‌شده

چگالی (gr/cm ³)	شاخص جریان مذاب (g/10min)	شاخص جریان مذاب بعد از بازیافت (g/10min)
۰/۹۵۶	۱۸	۳۵/۰۴

جدول ۲) مشخصات پلی‌اتیلن پیوندخورده با مالٹیک‌اندريد

مقدار انیدرید پیوند خورده (wt%)	چگالی (gr/cm ³)	شاخص جریان مذاب (g/10min)
۱	۰/۹۶۵	۷

۲-۲- روش ساخت

ابتدا آرد چوب برای یکنواختی اندازه ذرات و رسیدن به اندازه مورد نظر با دستگاه الک ارتعاشی طبقه‌بندی شد. آرد چوب نراد عبورکرده از مش ۶۰ و باقیمانده روی الک با مش ۸۰ به‌عنوان آرد در نظر گرفته شد. خشک‌بودن آرد چوب در هنگام اختلاط با پلیمرهای گرمانرم بسیار مهم است؛ زیرا حضور رطوبت در آن و تولید بخار هنگام فرآوری و قالب‌گیری باعث ایجاد حباب و لایه‌لایه شدن در

هم مطابق با آیین‌نامه D790 استاندارد ASTM با استفاده از دستگاه اینسترون مدل ۴۴۸۶ روی نمونه‌ها انجام شد.

۲-۴- شبیه‌سازی تست کشش

نمونه تست کشش که مطابق با شکل و ابعاد آیین‌نامه D638 استاندارد ASTM ساخته شده است، به دلیل تقارن در بارگذاری و هندسه به صورت نیمه‌متقارن و سه‌بعدی و به روش اکستروژن در نرم‌افزار آباکوس طراحی شد و چون نمونه بر اثر بارگذاری قابلیت تغییر شکل دارد، نوع آن تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شد.

به منظور تعریف خواص مواد دو فاز الاستیک و پلاستیک برای کامپوزیت چوب پلاستیک در نظر گرفته شد. به منظور تعریف خواص ماده در ناحیه الاستیک، ماده به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته شده و مدول یانگ و ضریب پواسون، متناسب با خواص هر نمونه وارد شد. به منظور تعریف خواص ماده در ناحیه پلاستیک، ابتدا تنش تسلیم و در مقابل آن عدد صفر به عنوان کرنش پلاستیک متناظر با تنش تسلیم وارد شده و در سطر بعد تنش بزرگ‌تر از تنش تسلیم را وارد کرده و در مقابل آن کرنش پلاستیک متناظر با آن قرار داده شد. منحنی‌های تنش-کرنش عموماً از طریق آزمایش کشش به دست می‌آیند که به خاطر پدیده گلوبی شدن محدود هستند. به منظور رفع این مشکل منحنی تنش-کرنش مهندسی با استفاده از روابط بسیار ساده‌ای به منحنی تنش-کرنش حقیقی تبدیل می‌شوند. مقدار تنش حاصل از تست کشش با استفاده از رابطه ۱ و کرنش حاصل از تست کشش با استفاده از رابطه ۲ به مقادیر تنش و کرنش حقیقی تبدیل شدند و همچنین با استفاده از رابطه ۳ مقدار کرنش پلاستیک حاصل شد.

$$\sigma_{True} = \sigma_{Num}(1 + \epsilon_{Num}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{True} = \ln(1 + \epsilon_{Num}) \quad (2)$$

$$\epsilon_p = \epsilon_{True} - \frac{\sigma_{True}}{E} \quad (3)$$

در روابط ۱، ۲ و ۳، σ_{True} تنش حقیقی و ϵ_{True} کرنش حقیقی و ϵ_{Num} برابر کرنش مهندسی (کرنش حاصل از تست کشش) و همچنین ϵ_p کرنش پلاستیک هستند.

مقادیر مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) و تنش σ_y و σ_{num} و کرنش (ϵ_p) از تست کشش گرفته شده و در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴) خواص مواد برای هر تیمار

تیمار	E (Mpa)	ϵ_p	σ_{num} (Mpa)	σ_y (Mpa)	ν
۱	۲۲۴۴/۶۶۶۷	۰/۰۲۴۳	۱۹/۴۰۶۷	۱۴/۶۱۰۰	۰/۳۴۲۲
۲	۳۴۹۸/۷۵۰۰	۰/۰۰۸۸	۱۸/۵۴۰۰	۱۳/۸۳۰۰	۰/۴۳۲۰
۳	۴۷۵۶/۵۰۰۰	۰/۰۰۳۷	۱۷/۱۱۷۵	۱۴/۷۵۰۰	۰/۴۴۴۵

در ماژول اینتراکشن با استفاده از قید کوپلینگ حرکت سطحی که در فک دستگاه تست کشش قرار گرفته، به حرکت یک نقطه در آن سطح مقید شد. در ادامه، به منظور اعمال شرایط مرزی، یک سمت نمونه که در فک ثابت دستگاه قرار می‌گیرد، فاقد حرکت و برای سطح دیگر جابه‌جایی تعریف شد. مقدار این جابه‌جایی‌ها از تست

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. دمای سیلندر تزریق در هر ناحیه ۱۵۵، ۱۶۵ و 170°C ، فشار تزریق ۱۰۰Mpa و زمان دوره تزریق کمتر از ۷۵ ثانیه در نظر گرفته شد. عملیات خنک کردن قالب با آب سرد انجام شد و نمونه‌ها پس از ۲ دقیقه از قالب بیرون آورده شدند. طراحی قالب دستگاه تزریق به گونه‌ای بود که در هر بار تزریق، نمونه‌های استاندارد برای آزمون‌های کشش و خمش به دست آمد. شکل ۲، نمونه ساخته شده مطابق با آیین‌نامه D638 استاندارد ASTM برای تست کشش و شکل ۳ نمونه ساخته شده مطابق با آیین‌نامه D790 استاندارد ASTM برای تست خمش را نشان داده است.



شکل ۲) نمونه آزمون کشش مطابق با آیین‌نامه ASTM D638



شکل ۳) نمونه آزمون خمش مطابق با آیین‌نامه ASTM D790

۲-۳- تست‌های مکانیکی

آزمون کشش مطابق با آیین‌نامه D638 استاندارد ASTM روی نمونه‌ها انجام شد. دستگاه مورد استفاده برای انجام تست کشش، دستگاه اینسترون مدل ۴۴۸۶، موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران بوده است (شکل ۴).

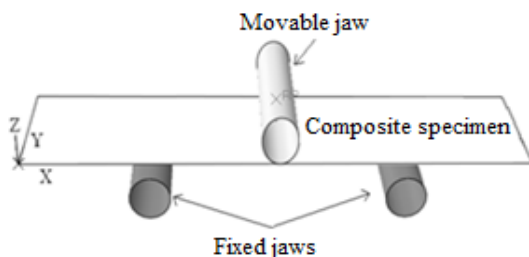


شکل ۴) دستگاه اینسترون مدل ۴۴۸۶

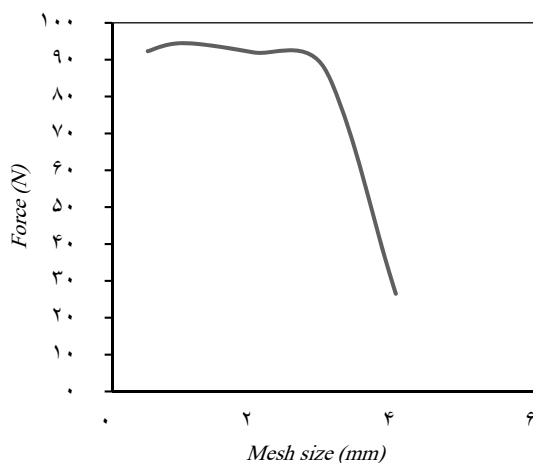
به منظور محاسبه ضریب پواسون روی نمونه‌های تست کشش کرنش سنج دوجبهته تی‌ام‌ال ساخت ژاپن نصب شد. آزمون خمش

است. در ادامه دو پایه مشابه پایه‌هایی که در تست خمش، نمونه روی آنها قرار گرفته و یک وسیله اعمال‌کننده بار که به شکل استوانه است، مطابق با ابعاد و شکل موجود در استاندارد طراحی شد. نوع تماس فک متحرک بالایی، با سطح نمونه و همچنین نوع تماس تکیه‌گاه‌ها با نمونه در ماژول اینتراکشن با حالت سطح به سطح تعریف شد. در ادامه با استفاده از قید جسم صلب فک‌های نگهدارنده زیرین و فک متحرک بالایی از نوع صلب در نظر گرفته شده و حرکت آنها به حرکت یک نقطه محدود شد. در ماژول بارگذاری و در قسمت شرایط مرزی فک‌های نگهدارنده زیرین که حرکتشان به یک نقطه محدود شده بود، فاقد حرکت در نظر گرفته شدند و مقدار عددی جابه‌جایی فک متحرک بالایی، وارد شد. مقدار جابه‌جایی فک متحرک از تست عملی به دست آمده است. شماتیک نحوه قرارگیری نمونه در فک‌ها در تست خمش در شکل ۶ نشان داده شده است.

به منظور تعیین سایز مش‌ها، نمودار حساسیت به سایز برای مش‌بندی رسم شد، در این نمودار محور عمودی بیانگر مقدار نیرو و محور افقی نشان‌دهنده سایز مش‌ها است. با توجه به این نمودار در نهایت سایز مش‌ها ۱mm انتخاب شد. نمودار ۲ حساسیت به سایز مش را در تست خمش نشان داده است. نمونه با المان شش‌وجهی به صورت منظم و یکنواخت المان‌بندی شد. شکل ۷، نمونه شبیه‌سازی شده تست خمش را نشان داده است.

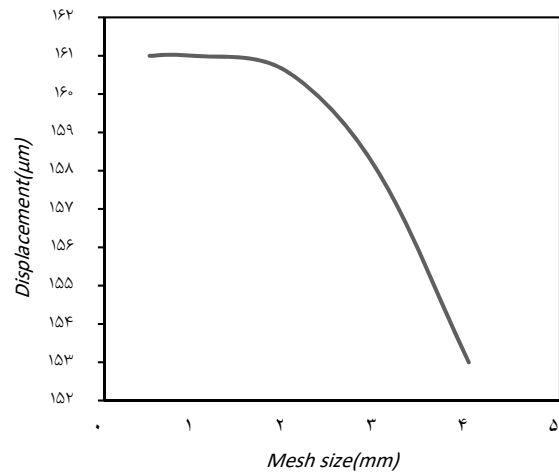


شکل ۶) شماتیک نحوه قرارگیری نمونه در فک‌ها در تست خمش [17]



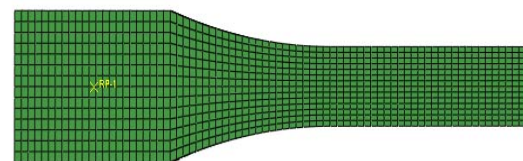
نمودار ۲) حساسیت به سایز مش در تست خمش

آزمایشگاهی کشش و متناسب با هر تیمار، حاصل شده است. در ادامه، به منظور تعیین سایز مش‌ها نمودار حساسیت به سایز مش‌بندی رسم شد، در این نمودار محور عمودی بیانگر مقدار جابه‌جایی و محور افقی نشان‌دهنده سایز مش‌ها است. نمودار حساسیت به سایز مش برای تست کشش در نمودار ۱ نشان داده شده است.



نمودار ۱) نمودار حساسیت به سایز مش در تست کشش

برای رسم این نمودار در نمونه مربوط به تیمار یک، فقط سایز مش‌ها تغییر داده شد و جابه‌جایی متناظر با هر سایز ثبت شد. این نمودار نشان می‌دهد که تغییر سایز مش‌ها تا ۲mm منجر به ایجاد تغییرات زیادی در نتایج شده است؛ ولی برای سایز مش‌های ۲mm و کمتر، تغییرات در نتایج، مقدار اندکی است؛ بنابراین با توجه به این موضوع سایز مش‌ها ۱mm انتخاب شد. در نهایت، نمونه با المان شش‌وجهی به صورت منظم و یکنواخت المان‌بندی شده و تحلیل مساله با نرم‌افزار آباکوس انجام شد. شکل ۵ نمونه مش‌بندی شده تست کشش را نشان داده است.

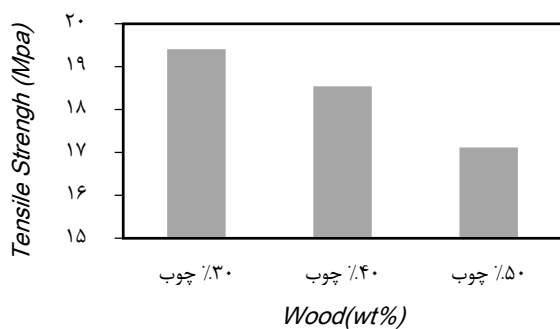


شکل ۵) نمونه شبیه‌سازی شده تست کشش

۲-۵- شبیه‌سازی تست خمش

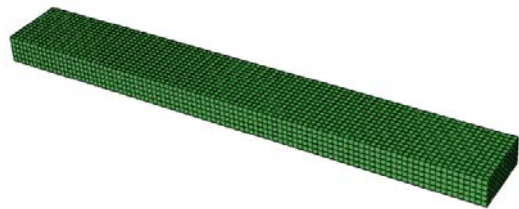
نمونه کامپوزیت چوب پلاستیک مطابق با شکل و ابعاد آیین‌نامه D790 استاندارد ASTM برای تست خمش در نرم‌افزار آباکوس طراحی شد و چون نمونه بر اثر بارگذاری قابلیت تغییر شکل دارد نوع آن تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شد. رفتار هر نمونه مطابق با جدول ۴ و به روش شبیه‌سازی تست کشش در نرم‌افزار ثبت شده

۴۰ و ۵۰٪ اثر معنی‌داری در سطح اعتماد آماری ۹۵٪ داشته است. گروه‌بندی دانکن نیز برای اثر مقدار چوب بر مدول الاستیسیته هر سطح از مقادیر چوب را در یک گروه مجزا قرار داد، به نحوی که نمونه‌های دارای ۵۰٪ چوب نراد بیشترین مقدار مدول الاستیسیته را داشته‌اند. همچنین نتایج حاصل از تست کشش نشان داده است که در نمونه حاوی ۳۰٪ ذرات چوب مقاومت کششی برابر با ۱۹/۴۰۷ Mpa بوده که با تغییر مقدار ذرات چوب به ۴۰ و ۵۰٪ مقدار مقاومت کششی به ترتیب به ۱۸/۵۴۰ و ۱۷/۱۱۸ Mpa رسیده است. با توجه به مقادیر حاصل از تست کشش افزودن ذرات چوب در هر سه سطح موجب کاهش مقاومت کششی شده است. در مواد مرکبی چوبی، با مقادیر بالای الیاف، پلاستیک نقش چسب را برای اتصال ذرات چوبی به یکدیگر ایفا می‌کند [20]. این حالت منجر به ایجاد اتصال مکانیکی بین ذرات چوب و پلاستیک می‌شود. عدم ایجاد اتصال شیمیایی به دلیل طبیعت غیرقطبی پلاستیک و طبیعت قطبی الیاف چوبی است [21]. این موضوع به دلیل قرارگرفتن مقادیر چوب در بین پلی‌اتیلن بوده که منجر به ازمگسیختگی این پلیمر و کاهش مقدار کرنش شده است. از طرفی با افزودن مقادیر بیشتر آرد چوب، مقادیر کرنش به‌طور چشمگیری کاهش داشته است؛ بنابراین با توجه به رابطه $E\epsilon = \sigma$ ، اگرچه مقدار مدول الاستیسیته افزایش داشته ولی کاهش شدید مقدار کرنش در نهایت منجر به کاهش مقاومت کششی شده است. نمودار ۴، تغییرات مقاومت کششی بر مبنای تغییرات مقدار آرد چوب را نشان داده است. بررسی نتایج تجزیه واریانس در مقاومت کششی نشان داد که تغییرات مقدار چوب در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ اثر معنی‌داری نداشته است.



نمودار ۴) تغییرات مقدار مقاومت کششی بر مبنای تغییرات مقدار آرد چوب

مقایسه نیروی شکست در تست کشش، برای حالت‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که بین مقادیر نیرو در این دو حالت تفاوت وجود دارد که این تفاوت ممکن است به دلیل تنظیم نمونه تست در فک‌های دستگاه باشد؛ زیرا اگر نمونه به‌طور نادرست تنظیم شده باشد، در نتایج تست تا حدودی خطا ایجاد می‌کند. این وضعیت با دقت در هنگام بستن نمونه‌ها به حداقل می‌رسد، ولی به‌طور کامل از بین نمی‌رود و در شبیه‌سازی نرم‌افزاری شرایط کاملاً به‌صورت ایده‌آل بوده، بنابراین



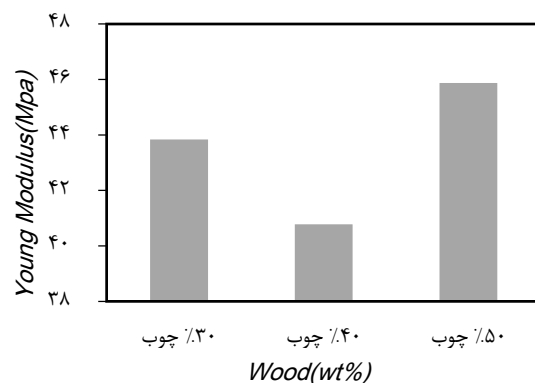
شکل ۷) نمونه شبیه‌سازی شده تست خمش

۲-۶- تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از تکنیک تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. تاثیر عامل متغیر بر خواص مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ (سطح معنی‌داری ۵٪) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از نرم‌افزار اسپاس‌اس استفاده شد.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نتایج حاصل از تست کشش نشان می‌دهد که در نمونه حاوی ۳۰٪ ذرات چوب مقدار مدول الاستیسیته، ۲۲۴۴/۶۶۶۷ Mpa است که این مقدار مدول در نمونه‌های حاوی ۴۰ و ۵۰٪ ذرات چوب به ترتیب به مقادیر ۳۴۹۸/۷۵۰ و ۴۷۵۷/۵۰۰ Mpa می‌رسد. در نمودار ۳، تغییرات مدول الاستیسیته بر مبنای تغییرات مقدار آرد چوب نمایش داده شده است.



نمودار ۳) مقادیر مدول الاستیسیته بر مبنای تغییرات مقدار آرد چوب

با توجه به اینکه مقادیر افزودن ذرات چوب موجب افزایش مدول الاستیسیته در هر سه سطح شده است و از آنجایی که مواد لیگنوسولوزی دارای مدول الاستیسیته بالاتری هستند، بنابراین میزان مدول الاستیسیته ماده مرکب با افزودن آرد چوب به پلی‌اتیلن افزایش می‌یابد [18]. بالارفتن مدول، معرف کمترشدن تغییر شکل ماده مرکب تحت بار است که در سازه‌های مهندسی که باید بار زیادی را بدون تغییر شکل تحمل کنند، عامل مثبتی به‌شمار می‌آید [19]. از این رو افزایش مدول الاستیسیته با توجه به رابطه $E = \sigma / \epsilon$ و کاهش کرنش در نمونه‌ها با افزایش مقدار آرد چوب نیز قابل توجیه است. بررسی نتایج تجزیه واریانس در مدول الاستیسیته نشان داد که تغییرات مقدار چوب در سه سطح ۳۰،

در تست خمش برای دو حالت تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

جدول ۶) نتایج تست خمش در حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

تیمار	درصد آرد چوب	نیرو در تست آزمایشگاهی (KN)	نیرو در شبیه‌سازی (KN)	درصد اختلاف
۱	۳۰	۰/۱۰۳۴	۰/۰۹۴۱	۸/۹
۲	۴۰	۰/۰۹۷۴	۰/۰۸۷۹	۹/۷
۳	۵۰	۰/۰۹۶۱	۰/۰۸۷۸	۸/۶

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته‌شده با ماتریس پلی‌اتیلن و تقویت‌کننده پودر چوب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا به‌منظور رسیدن به خواص مکانیکی بهتر، پودر چوب در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی به پلی‌اتیلن افزوده شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تست کشش و خمش روی آنها انجام شد. نتایج تست‌های مکانیکی نشان داد که مقدار مدول الاستیسیته با افزایش مقدار پودر چوب افزایش یافته به طوری که بیشترین مقدار مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد وزنی ذرات چوب دیده شده است همچنین بیشترین مقاومت در تست کشش و خمش به ترتیب در سطوح ۳۰ و ۵۰ درصد وزنی ذرات چوب اتفاق افتاده است. همچنین تست‌های مکانیکی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد که بررسی نتایج نشان‌دهنده وجود اختلاف بین مقادیر نیرو حاصل از تست عملی و شبیه‌سازی است که این اختلاف به دلیل ایده‌آل بودن نتایج در حالت شبیه‌سازی و وقوع خطا در تست‌های مکانیکی است. از آنجا که این اختلاف کمتر از ۱۰٪ است، می‌توان گفت که نتایج شبیه‌سازی نتایج تست آزمایشگاهی را تایید می‌کند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

فهرست علائم

E	مدول الاستیسیته (Mpa)
σ_{True}	تنش حقیقی (Mpa)
σ_{Num}	تنش مهندسی (Mpa)
ϵ_{True}	کرنش حقیقی
ϵ_{Num}	کرنش مهندسی
ϵ_p	کرنش پلاستیک

منابع

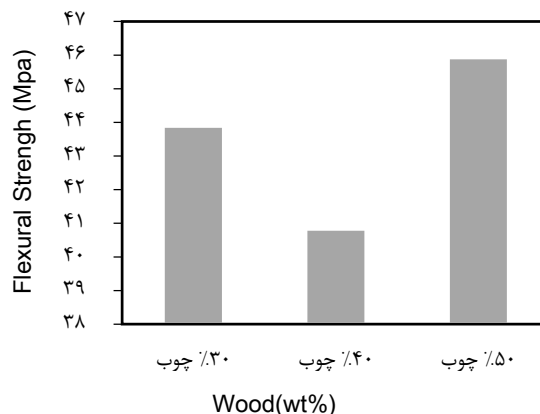
1- Sharma B, Mahajan S, Chhibber R, Mehta R. Glass fiber reinforced polymer-clay nanocomposites: Processing,

خطاهای انسانی در آن وجود ندارد. در جدول ۵، مقادیر نیرو منجر به شکست در تست کشش برای دو حالت تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

جدول ۵) نتایج تست کشش در حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

تیمار	درصد آرد چوب	نیرو در تست آزمایشگاهی (KN)	نیرو در شبیه‌سازی (KN)	درصد اختلاف
۱	۳۰	۰/۷۷۶۲	۰/۸۵۲۳	۹/۸
۲	۴۰	۰/۷۳۸۵	۰/۸۰۹۳	۹/۶
۳	۵۰	۰/۶۹۴۳	۰/۷۶۳۰	۹/۸

نتایج حاصل از تست خمش نشان داد که در سطح ۳۰ درصد وزنی ذرات چوب مقاومت خمشی برابر با $43/837 \text{Mpa}$ است که با تغییر مقدار ذرات چوب به ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی، مقدار مقاومت خمشی به ترتیب برابر $40/780 \text{Mpa}$ و $45/873 \text{Mpa}$ شده است. با توجه به این مقادیر، کمترین مقاومت خمشی در سطح ۴۰ درصد وزنی چوب و بیشترین مقاومت خمشی در ۵۰ درصد وزنی چوب دیده می‌شود. نمودار ۵، تغییرات مقاومت خمشی به نسبت تغییرات مقدار آرد چوب را نشان داده است.



نمودار ۵) تغییرات مقدار مقاومت خمشی بر مبنای تغییرات مقدار آرد چوب

بررسی نتایج تجزیه واریانس در مقاومت خمشی نشان داد که تغییرات مقدار چوب در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ اثر معنی‌داری در سطح اعتماد آماری ۹۵٪ داشته است. گروه‌بندی دانکن نیز برای اثر مقدار ذرات چوب بر مقاومت خمشی، سه سطح آرد چوب را در دو گروه مجزا قرار داد، به نحوی که سطوح حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی ذرات چوب در گروه اول با کمترین مقدار مقاومت خمشی و سطح ۵۰ درصد وزنی ذرات چوب در گروه دوم با بیشترین مقدار مقاومت خمشی قرار گرفته است.

مقایسه نیروی شکست در تست خمش، برای حالت‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که بین مقادیر نیرو در این دو حالت تفاوت وجود دارد که این تفاوت ناشی از ایده‌آل بودن تست در حالت شبیه‌سازی و وجود خطاهای انسانی در تست آزمایشگاهی است. در جدول ۶، مقادیر نیرو منجر به شکست

- 13- Rout A, Satapathy A. Analysis of dry sliding wear behaviour of rice husk filled epoxy composites using design of experiment and ANN. *Procedia Engineering*. 2012;38:1218-1232.
- 14- Alamri H, Low IM. Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites. *Materials & Design*. 2012;42:214-222.
- 15- Najafi A, Faezipour M, Khademi Islam H, Kazemi Najafi S, Homs SAH. Evaluation of flexural properties of composite materials made of lignocellulosic material and heavy polyethylene wastes by dry dry / hot press. *Iranian Wood and Paper Science Research*. 2007;26:109-120. [Persian]
- 16- Rasouli D, Mashkour M, hojati Z. Effect of nano zinc oxide on physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 2017;8(1):15-24. [Persian]
- 17- Tehrani Dehkordi M. Numerical modeling of bending behavior of intra-ply hybrid composites using finite element method. *Journal of Science and Technology of Composites (JSTC)*. 2016;2(4):59-66.
- 18- Jayaraman K, Bhattacharyya D. Mechanical performance of woodfibre-waste plastic composite materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 2004;41(4):307-319.
- 19- Mostafazadeh Marzenaki M, Najafi S, Chaharmahali M, Hajihassani R. Study behavior creep composites made mixes particle board and medium density Fiber Board-Recycled from HDPE waste and effect water fiber board absorption on composites. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 2009;24(2 suppl 31):194-205.
- 20- Chaharmahali M, KAZEMI NS, Tajvidi M, Poudinehpour M. Mechanical properties of wood-plastic composite made from particleboard and MDF wastes and polyethylene (HDPE) wastes. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*. 2005;20(2 Suppl 23):271-284. [Persian]
- 21- Mirmehdi S, Omidvar A, Madhoushi M, Shakeri A. Investigation on the mechanical properties of polyethylene/date palm wood flour composite: The effect of filler content and type. *Journal of Wood and Forest Science and Technology Reaserch*. 2011;18(4):77-92. [Persian]
- structure and hygrothermal effects on mechanical properties. *Procedia Chemistry*. 2012;4:39-46.
- 2- Sivasaravanan S, Bupesh Raja VK, Manikandan. Impact characterization of epoxy LY556/E-glass fibre/nano clay hybrid nano composite materials. *Procedia Engineering*. 2014;97:968-974.
- 3- Islam ME, Mahdi TH, Hosur MV, Jeelani S. Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon nanotubes. *Procedia Engineering*. 2015;105:821-828.
- 4- Kumar R, Kumar K, Sahoo P, Bhowmik S. Study of mechanical properties of wood dust reinforced epoxy composite. *Procedia Materials Science*. 2014;6:551-556.
- 5- Deepak K, Prabhakar Vattikuti SV, Venkatesh B. Experimental Investigation of Jute FiberReinforcedNano Clay Composite. *Procedia Materials Science*. 2015;10:238-242.
- 6- Ngo TD, Ton-That MT, Hoa SV, Cole KC. Effect of temperature, duration and speed of pre-mixing on the dispersion of clay/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 2009;69(11-12):1831-1840.
- 7- Chan MI, Lau KT, Wong TT, Ho MP, Hui D. Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite. *Composites Part B: Engineering*. 2011;42(6):1708-1712.
- 8- Yasmin A, Abot JL, Daniel IM. Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing. *Scripta Materialia*. 2003;49(1):81-86.
- 9- Srinivasa CV, Bharath KN. Impact and hardness properties of areca fiber-epoxy reinforced composites. *Journal of Material Environment Science*. 2011;2(4):351-356.
- 10- Deepak K, Reddy NS, Naidu TS. Thermosetting polymer and nano clay based natural fiber bio-composites. *Procedia Materials Science*. 2015;10:626-631.
- 11- Zhou H, Liu HY, Zhou H, Zhang Y, Gao X, Mai YW. On adhesive properties of nano-silica/epoxy bonded single-lap joints. *Materials & Design*. 2016;95:212-218.
- 12- Boopalan M, Niranjanaa M, Umopathy MJ. Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*. 2013;51:54-57.