



Improving the performance of office wastepaper fiber-based polymeric gypsum fiberboards: Analysis of physical and mechanical properties

Arqavan Doost^{1*} | Ali Bayatkashkoli² | Saeedreza Farrokh Payam³

1. Corresponding author, Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol Iran. Email: arqavan.doost@uoz.ac.ir

2. Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir

3. Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: farrokhpayam@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 09 November 2024

Revised: 12 December 2024

Accepted: 05 January 2025

Published online: 05 March 2025

Keywords:

Fiber panels,

Mechanical properties,

Polymeric gypsum fiber board,

Waste paper fibers.

We investigated the mechanical and physical properties of polymer-reinforced gypsum fiberboards to develop a new generation of lightweight gypsum fiber panels with standard and improved properties. Polymeric gypsum fiberboards exhibit high moisture resistance, and various products have been introduced to the market. To prepare the samples, the grout method was used, incorporating office wastepaper fibers and additives such as cement, modified hydrated lime, perlite, polyvinyl alcohol, and polyvinyl acetate resin powder into the gypsum matrix. In the first stage, compressive strength, bending strength, and water absorption (surface and total) tests were performed as the main standard tests. In the second stage, polymeric gypsum fiberboards were produced under the optimal conditions determined from the first stage. The optimal conditions were selected based on the first-stage results, and the selected materials were combined. The results showed that treatments containing polyvinyl alcohol and cement exhibited the highest compressive and bending strength, while the combination of gypsum and hydrated lime resulted in the lowest total and surface water absorption. Overall, gypsum fiberboards containing cement, coated lime, and polyvinyl alcohol proved to be the best treatment in terms of physical properties (surface and total water absorption: 28% and 29%, respectively), mechanical properties (compressive strength: 3.28 MPa, bending strength: 3.32 N/mm²), and thermal resistance (as confirmed by FTIR and TGA-DTA). These fiberboards meet the minimum standard characteristics and can be used as lightweight polymeric gypsum fiberboards.

Cite this article: Doost, A., Bayatkashkoli, A., Farrokh Payam, S.R. (2025). Improving the performance of office wastepaper fiber-based polymeric gypsum fiberboards: Analysis of physical and mechanical properties. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (4), 377-390. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.384904.1318>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.384904.1318>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

بهبود عملکرد گچ‌برگ پلیمری بر پایه الیاف کاغذ باطله اداری: تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

ارغوان دوست^{۱*} | علی بیات کشکولی^۲ | سعیدرضا فرخ پیام^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: arqavan.doost@uoz.ac.ir
 ۲. گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir
 ۳. گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: farrokhpayam@uoz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش، هدف بررسی و تحلیل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی گچ‌برگ‌های تقویت‌شده پلیمری به‌منظور توسعه نسل جدیدی از پانل‌های لیفی گچی سبک با ویژگی‌های استاندارد و بهبود یافته بود. گچ‌برگ‌های پلیمری از مقاومت زیادی در برابر رطوبت برخوردار بوده و محصولات متنوعی از آن در بازار معرفی و عرضه شده‌اند. برای تهیه نمونه‌ها، از روش دوغاب استفاده شد و الیاف کاغذ باطله اداری و مواد افزودنی نظیر سیمان، آهک هیدراته اصلاح شده، پرلیت، پودر رزین پلی‌وینیل الکل و پلی‌وینیل استات به ماتریس گچی افزوده شد. در مرحله اول، آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و جذب آب (سطحی و کلی) به‌عنوان اصلی‌ترین آزمون‌های استاندارد انجام گرفت. در مرحله دوم، گچ‌برگ‌های پلیمری تحت شرایط بهینه حاصل از مرحله اول تولید شدند. شرایط بهینه براساس نتایج آزمون‌های مرحله اول انتخاب و ترکیب شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمارهای حاوی پلی‌وینیل الکل و سیمان بیشترین مقاومت فشاری و خمشی را از خود نشان دادند در حالی که ترکیب گچ و آهک هیدراته اصلاح شده کمترین جذب آب سطحی و جذب کلی را داشتند. به‌طور کلی، ترکیب گچ‌برگ حاوی سیمان، آهک پوشش‌دار شده و پلی‌وینیل الکل بهترین تیمار از نظر ویژگی‌های فیزیکی (جذب آب سطحی و جذب آب کلی به ترتیب ۲۸ و ۲۹ درصد)، مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب ۳/۲۸ مگاپاسکال و ۳/۳۲ نیوتن بر میلی متر مربع)، طیف‌سنجی مادون قرمز و TGA-DTA (مقاومت به حرارت زیاد) می‌باشد و با توجه به داشتن حداقل ویژگی‌های استاندارد می‌توان از آن به‌عنوان گچ‌برگ پلیمری سبک‌سازی شده استفاده نمود.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

کلیدواژه:

الیاف کاغذ باطله،

پانل‌های لیفی،

گچ‌برگ پلیمری لیفی،

ویژگی‌های مکانیکی.

استناد: دوست؛ ارغوان، بیات کشکولی؛ علی، فرخ‌پیام؛ سعیدرضا (۱۴۰۳). بهبود عملکرد گچ‌برگ پلیمری بر پایه الیاف کاغذ باطله اداری: تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.384904.1318>. ۳۷-۳۹۰، (۴) ۷۷، نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2025.384904.1318>



۱. مقدمه

استفاده از مصالح سبک و مقاوم مانند آجر و بلوک، یکی از الزامات ساخت‌وساز صنعتی محسوب می‌شود. فرآورده‌های چوبی که با اتصال مواد معدنی مانند سیمان و گچ تولید می‌شوند، می‌توانند به‌خوبی نیاز صنعت را برآورده کنند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی، به‌دلیل ویژگی‌های برجسته همچون هزینه‌های اقتصادی، زیست‌تخریب‌پذیری و دسترسی به منابع تجدیدپذیر، به‌عنوان مصالح ساختمانی با آینده‌ای نویدبخش مطرح شده‌اند [۱].

پیشرفت و توسعه پانل‌های چوب‌گچ در هر کشور، وابسته به تأمین مواد اولیه مورد نیاز آنها، یعنی چوب یا سایر مواد لیگنوسلولزی و مواد معدنی است. در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، به‌دلیل رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضا برای فرآورده‌های مرکب چوبی، در کنار محدودیت منابع جنگلی، استفاده از منابع جایگزین مانند پسماندهای کشاورزی برای تولید این کامپوزیت‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است [۲]. گچ به‌صورت خام و فرآوری‌شده استفاده می‌شود. آندودها، صفحات، بلوک و قطعات فرآوری‌شده با پرکننده‌های الیاف طبیعی و مصنوعی و مواد افزودنی متنوع جهت بهبود ویژگی‌های مصرفی به بازار عرضه می‌شود. در ایران، گچ‌برگ (صفحات گچی لیفی تحت عنوان کناف) در مناطق مختلف تولید می‌شود، اما اخیراً گچ‌برگ‌های پلیمری و یا گچ‌های پلیمری به بازار معرفی شده‌اند و تولید این محصولات توسط شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع مصالح ساختمانی در حال توسعه و پیشرفت است. این نوع محصولات که دارای مقاومت نسبی در برابر رطوبت هستند، نیاز روزافزون بازار مصالح ساختمانی را می‌توانند تأمین کنند. در حال حاضر، گچ‌برگ‌های پلیمری در رقابت نزدیک با گچ‌برگ‌های معمولی قرار دارند و مانند تخته فیبر و تخته خرده‌چوب، بازار رقابتی خاص خود را دارند. بهبود کیفیت این محصولات، کلید موفقیت در این رقابت اقتصادی است و دستیابی به فناوری‌های نوین و بومی‌سازی این محصولات، ساختار اقتصادی آنها را تقویت خواهد کرد.

ترکیبات تشکیل‌دهنده گچ‌پلیمری شامل موادی نظیر پرلیت، آهک هیدراته، اسیدسیتریک، اسید استتاریک و سایر اسیدهای چرب، پلی‌وینیل‌الکل و پلیمرهای مناسب دیگر است [۳، ۴]. همچنین تخته‌های گچی شامل ذرات آلی هستند که وظایف مختلفی را بر عهده دارند. کیفیت پایین گچ‌برگ می‌تواند به‌دلیل چسبندگی ضعیف گچ به چوب باشد، اما با افزودن سیمان به ماتریس می‌توان این مشکل را بهبود بخشید [۵]. علاوه بر این، برای سبک‌سازی این محصولات از الیاف طبیعی و مصنوعی مانند الیاف لیگنوسلولزی، کرک، پشم و الیاف پلیمری نظیر آکریلیک و پلی‌پروپیلن استفاده می‌شود. سبک‌سازی این پانل‌ها به‌ویژه در پروژه‌های بلندمرتبه‌سازی و انبوه‌سازی ضروری است. الیاف کاغذ باطله، به‌ویژه در مراحل پیشرفته‌تر بازیافت، به‌عنوان ماده‌ای ارزان‌قیمت و در دسترس برای کاهش دانسیته گچ‌برگ‌ها استفاده می‌شود.

براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۲۷۸۶، گچ‌برگ‌هایی که دانسیته آن‌ها در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارند، به‌عنوان تخته‌های سبک‌سازی‌شده طبقه‌بندی می‌شوند. دانسیته بلوک‌های گچی در سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی می‌شود، به‌طوری که دانسیته متوسط بین ۰/۸ تا ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دانسیته زیاد بین ۱/۱ تا ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. استاندارد ملی شماره ۵۰۳۲، دسته‌بندی دیگری برای بلوک‌های گچی تعریف می‌کند که براساس آن، دانسیته این بلوک‌ها به دو دسته کمتر و بیشتر از ۰/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب تقسیم می‌شود. در این طبقه‌بندی، صفحات گچی روکش‌دار لیفی قرار می‌گیرند که علاوه بر آن، نوع دیگری از این صفحات با دانسیته افزایش‌یافته برای مصارف خاص نیز وجود دارد.

سبک‌سازی این صفحات عمدتاً از طریق استفاده از الیاف انجام می‌شود. صفحات گچی روکش‌دار لیفی از گچ ساختمانی مسلح‌شده با الیاف پراکنده تشکیل شده‌اند که این الیاف ممکن است از جنس مواد معدنی یا غیر معدنی باشند. این صفحات معمولاً به‌صورت صاف و مستطیلی تولید شده و برای بهبود ویژگی‌های آنها از مواد افزودنی و پرکننده‌های مختلف استفاده می‌شود. سطوح، لبه‌ها و انتهای این صفحات بسته به نوع کاربردهای آنها، ممکن است متفاوت باشد. تولید صفحات گچی روکش‌دار لیفی معمولاً به‌صورت پیوسته و در مقیاس صنعتی انجام می‌شود، به‌طوری که افزودنی‌ها و پرکننده‌ها به‌منظور بهبود ویژگی‌های تکمیلی به ساختار آنها اضافه می‌شود.

تحقیقات متنوعی در خارج کشور در زمینه ساخت گچ‌برگ پلیمری انجام شده است. کامپوزیت تخته‌گچ از مواد لیگنوسلولزی به‌صورت ترکیب ملات گچ با خرده‌ریزه لیگنوسلولزی و جدیداً به‌صورت دوغاب در ایران ساخته شده است. اما درباره گچ‌برگ پلیمری

با دانسیته کم هنوز گزارشی منتشر نشده است. در این راستا، گچ‌برگ‌هایی با کربنات کلسیم اصلاح شده، سولفات‌ها و نشاسته جهت کاهش جذب آب و افزایش مقاومت مکانیکی ساخته شدند. بیشترین مقاومت فشاری را گچ‌برگ‌های با ۵ درصد الیاف رنگ‌بری نشده و نشاسته تاپیوکا و کمترین جذب آب را گچ‌برگ‌های دارای کربنات کلسیم اصلاح شده با اسید استئاریک داشتند [۶].

افزودنی‌های پلیمری مانند مشتقات سلولزی محلول در آب با غلظت ۱/۵ درصد وزنی، زمان گیرش گچ را تغییر می‌دهند [۷]. کامپوزیت پلیمر-گچ متشکل از گچ و استایرن، با وجود رزین پلیمریزه شده ویژگی‌هایی مانند غیر قابل نفوذ بودن در برابر آب و استحکام مکانیکی بالا به نمونه می‌دهد [۸].

مقاومت به ضربه، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته گچ‌های تجاری (همی هیدرات سولفات کلسیم) اصلاح شده با پلی‌وینیل‌استات بهبود یافتند. مقاومت خمشی نمونه‌ها با افزایش نسبت پلی‌وینیل‌استات در گچ از ۲/۵ به ۱۰ درصد کاهش و همچنین میزان جذب آب آن با افزایش درصد پلی‌وینیل‌استات کاهش می‌یابد [۳]. افزودن پلیمرهایی مانند اتیلن-وینیل‌استات، ترپلیمر وینیل‌استات، وینیل‌لورات، وینیل‌کلراید و وینیل‌استات باعث استحکام ساختاری و ریزساختار یکنواختی در گچ می‌شود [۴]. مقاومت فشاری و خمشی کامپوزیت‌های گچی با افزودن آئرول و مواد پلیمری کاهش می‌یابد، ولی محصول به‌دست آمده سازگار با محیط‌زیست می‌باشد. استفاده از حجم‌دهنده‌ها به میزان ۱۰ درصد، باعث کاهش مقاومت خمشی به میزان ۱۰ درصد و افزایش مقاومت فشاری به میزان ۴ درصد می‌شود [۹].

گچ‌برگ‌های ساخته شده با الیاف کنف دارای استحکام خمشی و کششی زیاد می‌باشند. بیشترین استحکام مکانیکی در گچ-برگ‌های دارای ۴ درصد الیاف کنف با طول ۵۰ میلی‌متر به‌دست آمد، ولی افزایش بیش از ۴ درصد الیاف کنف و همچنین الیاف بلند تأثیر منفی بر استحکام داشت [۱۰]. الیاف کنف رطوبت‌پذیرند و تأثیر منفی بر گیرش گچ دارند و با آغشته کردن این الیاف به مشتقات مبتنی بر پلی‌وینیل‌استات، کوپلیمر استایرن-اکریلیک و دی‌فیل‌متان دی‌ایزوسیانات پلیمری گچ‌برگ‌هایی تولید شدند که تقریباً ۳۰ درصد مقاومت خمشی بهتری نسبت به نمونه شاهد داشتند. اثر مثبت مواد اشباع بر روی این الیاف کنف با استفاده از آنالیز FTIR (طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه) و TG/DTA (آزمون‌های وزن‌سنجی حرارتی-آنالیز حرارتی افتراقی) تأیید شد [۱۱]. تحقیقات دیگر نیز پلی‌وینیل‌الکل به‌همراه ترکیبات گوگردی را جهت بهبود ویژگی‌های مکانیکی و جذب آب گچ پلیمری پیشنهاد داده است [۱۲].

افزودن الیاف به تخته‌های گچی، هرچند برخی از ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و دانسیته را کاهش می‌دهد، اما این کاهش وزن و سبک‌سازی باید در محدوده استانداردهای تخته‌گچ باشد. محدوده استاندارد برای مقاومت فشاری بتن گچی با دانسیته ۰/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بیشتر از ۳/۵ مگاپاسکال (INSO 5032)، مقاومت فشاری اندود گچی برای تولید قطعات گچی لیفی و نصب آنها ۲ نیوتن بر میلی‌متر مربع (مگاپاسکال) (ISIRI 12015-1)، مقاومت خمشی برای صفحات روکش دار گچی لیفی با دانسیته بیشتر از یک گرم بر سانتی‌متر مکعب بیشتر از ۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع (INSO 14478-2) (البته برای گچ‌برگ‌های بدون روکش و سبک‌سازی شده کمتر خواهد بود) و یا ۲۵۰ نیوتن برای روکش دار (INSO 14818) (بدون روکش و سبک‌سازی شده کمتر) و همچنین برای اندود گچی برای تولید قطعات گچی لیفی و نصب آنها ۱ نیوتن بر میلی‌متر مربع (ISIRI 12015-1) است. در این میان، استفاده از افزودنی‌ها و مواد معدنی نظیر سیمان و پرلیت، به‌منظور جلوگیری از افت کیفیت و حفظ معیارهای استاندارد مکانیکی و فیزیکی ضروری است.

کارایی گچ‌برگ‌های پلیمری به‌ویژه در صورتی که بتوانند ویژگی‌های چندمنظوره‌ای مانند مقاومت در برابر رطوبت و استحکام مطلوب را ارائه دهند، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. هدف اصلی این تحقیق، دستیابی به این ویژگی‌های بهینه در گچ‌برگ‌های پلیمری است و برای این منظور، باید توازن دقیق میان کاهش دانسیته و حفظ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ایجاد شود. چالش اصلی در بهینه‌سازی ویژگی‌های یک کامپوزیت این است که بهبود یک خاصیت نباید منجر به آسیب سایر ویژگی‌ها شود. هرچند در سال‌های اخیر ارتباط میان فاز پرکننده الیاف کاغذ با ماده زمینه معدنی گچ بررسی شده است، اما این تحقیق به‌طور خاص به ارزیابی گچ پلیمری با تأثیر افزودنی‌های جدیدی مانند پرلیت، سیمان، پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌وینیل‌استات در ترکیب‌های نوین پرداخته و تأثیر این مواد بر ویژگی‌های نهایی کامپوزیت و برهم‌کنش آنها با فازهای اصلی را بررسی خواهد کرد.

۲. روش شناسی پژوهش

در این پژوهش، برای بهبود عملکرد گچ‌برگ، از گچ، الیاف کاغذ باطله و مواد پلیمری به‌عنوان افزودنی‌ها استفاده شد. مواد اصلی شامل گچ (امید سمنان) و الیاف کاغذ باطله (مخلوط کاغذ باطله اداری) بودند. کاغذ باطله اداری به ابعاد کوچک‌تر خرد شد و بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب در همزن آزمایشگاهی با ۱۲۰ دور در دقیقه و سپس در کوبنده آزمایشگاهی با ۳۰۰۰ دور در دقیقه حلاجی، و بعد از جداسازی و یکنواختی پراکندگی الیاف در گچ‌برگ استفاده شد. سوسپانسیون الیاف به رنگ سفید با pH برابر ۸/۱، گراماژ ۴۰ تا ۸۰ گرم بر متر مربع، خاکستر ۰/۸ تا ۱ درصد و طول الیاف ۰/۷ تا ۰/۸ میلی‌متر بود. همچنین مواد افزودنی شامل سیمان، آهک هیدراته اصلاح‌شده (با اسید سیتریک)، پرلیت، رزین پلی‌وینیل‌استات و پلی‌وینیل‌الکل از برندهای استاندارد معتبر تهیه و استفاده شدند. این تحقیق در دو مرحله طراحی شد که مرحله اول شامل هفت تیمار ۱- گچ خالص (G1)، ۲- گچ به‌همراه الیاف کاغذ باطله (GF2)، ۳- گچ، الیاف و پرلیت (GFP3)، ۴- گچ، الیاف و سیمان (GFC4)، ۵- گچ، الیاف و پلی‌وینیل‌استات (GFAC5)، ۶- گچ، الیاف و پلی‌وینیل‌الکل (GFAI6) و ۷- گچ، الیاف و آهک هیدراته اصلاح‌شده با اسید سیتریک (GFLC7) بود. تیمارهای مرحله دوم براساس تجزیه و تحلیل آماری مرحله اول و مطابقت با محدوده‌های استاندارد شامل چهار تیمار: ۸- گچ، الیاف، سیمان و پلی‌وینیل‌الکل (GFCA18)، ۹- گچ، الیاف، سیمان، پرلیت، آهک اصلاح شده یا پوشش‌دار شده با اسیدسیتریک و پلی‌وینیل‌الکل (GFCLC10)، ۱۰- گچ، الیاف، سیمان و آهک پوشش‌دار (GFCLC10) و ۱۱- گچ، الیاف، سیمان، آهک پوشش‌دار و پلی‌وینیل‌الکل (GFCLC11) بود.

نسبت آب به گچ برای تولید دوغاب ۰/۶ در نظر گرفته شد [۴]. افزودنی‌ها به‌میزان ۵ درصد وزنی گچ به مخلوط اضافه شدند. الیاف کاغذ باطله به مقدار کافی اضافه گردید تا دانسیته تحت‌گچ مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۲۷۸۶ در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار گیرد.

برای آزمایش‌های مکانیکی مانند مقاومت خمشی و فشاری، قالب‌های استاندارد مطابق با استاندارد ملی ایران تهیه شدند. دوغاب گچ تا زمان تکمیل فرآیند گیرایش در قالب‌ها باقی می‌ماند و پس از آن تحت‌گچ از قالب خارج می‌شود. تخته‌ها ابتدا در هوای آزاد و سپس در خشک‌کن در دمای 40 ± 2 درجه سانتی‌گراد براساس استاندارد شماره ۲-۱۴۴۷۸ تا زمانی که به جرم ثابت برسد، خشک شدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها تحت شرایط آزمون برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، خمشی و جذب آب قرار گرفتند.

آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۱۰ در ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر مطابق استاندارد INSO 5482 انجام شدند. در این آزمون، نیرو به‌صورت پیوسته و بدون ضربه با نرخ ثابت، در محدوده $103/13$ تا 275 کیلو پاسکال بر ثانیه بر نمونه‌ها اعمال گردید. آزمون مقاومت خمشی طبق استاندارد INSO 14478-2 برای نمونه‌هایی با ضخامت کمتر از ۲ سانتی‌متر به ابعاد ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متر انجام شد. فرمول محاسبه مقاومت خمشی براساس استاندارد INSO 14478-2 به صورت رابطه یک است:

$$F_m = \frac{3F_{max}L_1}{2bt^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

F_{max} : حداکثر نیرو برحسب نیوتن، L_1 : طول دهانه (فاصله بین مرکز تا مرکز تکیه‌گاه‌ها)، b : عرض و t : ضخامت آزمون برحسب میلی‌متر.

آزمون جذب آب سطحی و کلی نیز براساس استاندارد INSO 14478-2 به‌ترتیب با نمونه‌هایی به ابعاد ۱۲/۵ در ۱۲/۵ سانتی‌متر به مدت ۳۰ دقیقه غوطه‌وری و با نمونه‌هایی به ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر به مدت ۲ ساعت غوطه‌وری در آب انجام شد. همچنین، دانسیته، زمان گیرش و pH همه نمونه‌ها مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۲۷۸۶ به‌عنوان آزمون پایه مورد بررسی قرار گرفت. در روش طیف‌سنجی مادون قرمز FTIR، از دستگاه طیف‌سنجی Bruker مدل TENSOR 27 استفاده شد. برای تهیه نمونه، ۱۵ میلی‌گرم از پودر تیمار با ۴۰۰ میلی‌گرم برمید پتاسیم به‌دقت ترکیب و به شکل یک قرص نازک آماده گردید. این قرص در دستگاه قرار گرفت تا طیف‌سنجی در بازه طول موجی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ عکس سانتی‌متر (بر سانتی‌متر) انجام شود. این روش امکان بررسی شدت طیف جذب شده و میزان جذب طیف اشعه در طول موج‌های مختلف را فراهم می‌آورد و اطلاعات ارزشمندی از

گروه‌های عاملی موجود و تغییرات آنها را ارائه می‌دهد.

در آزمون‌های وزن‌سنجی حرارتی (TGA) و آنالیز حرارتی افتراقی (تفاضلی) (DTA) که تحت عنوان کلی "آزمون وزن‌سنجی گرمایی (TGA-DTA)" انجام شد، نمونه‌های ۴۰ میلی‌گرمی با استفاده از دستگاه TGA مدل STA PT 1600 ساخت شرکت LINSEIS کشور آلمان و در بازه دمایی ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شدند. فرآیند گرمادهی با سرعت ۱۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و در محیطی با اتمسفر نیتروژن (حاوی ۹۹/۵ درصد نیتروژن و ۰/۵ درصد اکسیژن) صورت گرفت. در این آزمایش، کاهش وزن نمونه‌ها (TGA)، دمای ذوب و بلورینگی (DTA)، به‌همراه پایداری حرارتی، وضعیت تبلور، تخریب حرارتی و ناخالصی‌های موجود مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده‌ها به‌صورت نمودارهای تغییرات وزن TGA و یا تغییرات اختلاف دما DTA نسبت به دما ثبت شدند. پیک‌های تیز نشان‌دهنده ساختار بلوری و ذوب، و پیک‌های پهن بیانگر تجزیه حرارتی و واکنش‌های شیمیایی می‌باشند. در نهایت، تجزیه و تحلیل واریانس یک‌طرفه و مقایسه میانگین به روش کمترین اختلاف معنی‌داری (LSD) با استفاده از نرم‌افزار SPSS در سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

دانشیته، زمان گیرش و pH دوغاب در جدول ۱ برای تمامی تیمارها ذکر شده است.

جدول ۱. دانشیته، زمان گیرش (ویکات) و pH دوغاب مراحل اول و دوم

شماره تیمار	علامت اختصاری	pH دوغاب	زمان گیرش (دقیقه)	دانشیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱	G1	۱۱/۶	۲۵	۱
۲	GF2	۱۰/۸	۱۶	۰/۶۷
۳	GFP3	۷/۴	۱۴	۰/۶۶
۴	GFC4	۱۱/۹	۱۸	۰/۷۱
۵	GFAc5	۷/۰۷	۲۲	۰/۷۰
۶	GFAI6	۱۰/۴۴	۱۱	۰/۷۲
۷	GFLc7	۷/۳	۱۶۰	۰/۷۱
۸	GFCAl8	۱۱/۸	۱۶	۰/۷۴
۹	GFCPLcAl9	۱۱/۹	۱۵۵	۰/۷۲
۱۰	GFCLc10	۱۰/۸	۱۵۰	۰/۷۱
۱۱	GFCLcAl11	۱۲	۱۴۵	۰/۷۲

pH دوغاب و به‌دنبال آن نیز زمان گیرش تیمار با الیاف و افزودنی‌هایی مانند پرلیت، پلی‌وینیل استات و پلی‌وینیل کاهش یافت، ولی با افزودن اسیدسیتریک به‌صورت آهک پوشش‌دار، زمان گیرش تقریباً تا هفت برابر افزایش یافت و دوغاب در زمان بیشتری سخت و پایدار شد. همچنین تغییرات اندک دانشیته تیمارها با افزودنی‌های متفاوت در محدوده مقدار دانشیته گچ‌برگ‌های با دانشیته کم اجتناب‌ناپذیر بود.

میانگین ویژگی‌های مورد ارزیابی تیمارهای مرحله اول شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب سطحی و جذب آب کلی به شرح جدول ۲ می‌باشد. هیچ کدام از ماشین‌های آزمون مقاومت فشاری (دو دستگاه در دسترس) قادر به شکست و رسم نمودار شکست دو نمونه GFAI6 و GFLc7 نشدند و این ماشین‌ها ظرفیت اسمی اعمال نیرو تا ۲۰۰ تن یا ۲۵ هزار نیوتن را داشتند. قابل ذکر است این موضوع به‌معنی استحکام یا ضعیف بودن نمونه‌ها نمی‌باشد و مقاومت این نمونه‌ها نسبت به ظرفیت اولیه ماشین‌های آزمون کمتر یا زیادتر است از این‌رو حداقل مقدار استاندارد (INSO 5032) یعنی ۳/۵ مگاپاسکال برای این تیمارها به‌دلیل ظرفیت پایین ماشین در نظر گرفته شد.

جدول ۲. میانگین (انحراف معیار) ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی تیمارهای مرحله اول

تیمار	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	جذب آب سطحی (درصد)	جذب آب کلی (درصد)
G1	۶/۵۰ (±۰/۶۰)	۲/۸۲ (±۰/۳۲)	۴۷/۷۵ (±۰/۹۷)	۴۰/۸۱ (±۴/۷۴)
GF2	۴/۶۰ (±۲)	۳/۴۶ (±۰/۶۹)	۴۷/۹۳ (±۱/۹۳)	۵۲/۴۰ (±۵/۹۵)
GFP3	۲/۳۰ (±۰/۹۹)	۲/۶۲ (±۰/۲۵)	۶۲/۷۳ (±۰/۴۶)	۶۱/۹۵ (±۵/۲۹)
GFC4	۵/۹۸ (±۰/۴۰)	۳/۰۳ (±۰/۶۳)	۴۵/۵۶ (±۰/۵۹)	۵۷/۳۲ (±۳/۸۴)
GFAc5	۲/۰۴ (±۰/۲۵)	۳/۸۸ (±۰/۱۳)	۵۲/۷۰ (±۰/۷۰)	۵۷/۶۰ (±۴/۲۳)
GFAI6	۳/۵ ≤	۵/۷۹ (±۰/۹۴)	۶۹/۳۸ (±۲/۳۷)	۷۲/۶۱ (±۱/۰۳)
GFLc7	۳/۵ ≤	۱/۶۵ (±۰/۱۵)	۳۱/۰۴ (±۱/۲۹)	۳۶/۰۸ (±۰/۹۵)

مقاومت فشاری نمونه‌ها با الیاف پرکننده و مواد افزودنی کاهش یافته است، ولی مقدار این کاهش در نمونه GFC4 به دلیل وجود سیمان بسیار اندک بوده است. حداکثر نیرو قبل از ترک، شکست یا لهیدگی و توانایی در مقابل تغییر شکل نمونه GFAI6 در برابر نیروهای خمشی بیشتر از بقیه نمونه‌ها و در نمونه GFLc7 کمتر از همه نمونه‌ها است. نقش پلی‌وینیل الکل و آهک اصلاح شده در افزایش و کاهش مقاومت خمشی کاملاً مشهود است. تحقیقات دیگر نیز بهبود مقاومت خمشی به دلیل وجود الیاف [۱۰] و مواد افزودنی پلیمری [۱۱] را نشان می‌دهد.

کمترین میزان جذب آب سطحی با میانگین ۳۱/۰۴ درصد مربوط به GFLc7 به دلیل وجود آهک پوشش‌دار است و بیشترین میزان جذب آب سطحی با میانگین ۶۹/۳۸ درصد مربوط به نمونه GFAI6 با توجه به وجود پلی‌وینیل الکل (که تمایل زیادی به جذب آب بعد از سخت شدن دارند)، به دست آمده است. کمترین و بیشترین میزان جذب آب کلی نیز مشابه جذب آب سطحی تیمارها به ترتیب با میانگین ۳۶/۰۸ و ۷۲/۶۱ درصد مربوط به نمونه‌های GFLc7 و GFAI6 است. بنابراین نمونه‌هایی که بیشترین جذب آب را دارند به دلیل ضعف در ساختار و وجود مواد جاذب آب، مناسب استفاده در شرایط مرطوب نیستند ولی نمونه‌هایی که کمترین جذب آب را دارند به دلیل بهینه‌سازی ترکیب مواد و تقویت ساختار ماتریس گچ در محیط‌های مرطوب عملکرد بهتری خواهند داشت.

نتایج تجزیه و تحلیل آماری مقادیر مقاومت فشاری، خمشی، جذب آب سطحی و جذب آب کلی نشان داد که تیمارها در سطح اطمینان ۹۵ درصد با همدیگر اختلاف معنی‌داری دارند و مواد افزودنی بکار رفته در تولید گچ‌برگ در افزایش و کاهش یکی از ویژگی‌ها مؤثر بوده‌اند. بنابراین می‌توان مقایسه میانگین ویژگی‌های مورد ارزیابی را با روش کمترین اختلاف معنی‌داری بین تیمارها انجام داد. نتایج نشان می‌دهد که تمامی افزودنی‌های انتخاب شده برای مرحله دوم نسبت به موادی که انتخاب نشده‌اند در سطح ۹۵ درصد با همدیگر اختلاف معنی‌داری دارند.

نتایج مرحله اول نشان می‌دهد که در گچ‌برگ‌های سبک‌سازی شده، وجود سیمان و پلی‌وینیل الکل به ترتیب مقاومت فشاری (۵/۹۸ مگاپاسکال) و خمشی (۵/۷۹ مگاپاسکال) را تا بیشتر از حد استاندارد (INSO 5032 and 14478-2) افزایش می‌دهد. همچنین وجود آهک اصلاح شده با اسیدسیتریک، مقدار آب سطحی و کلی را به‌طور قابل توجهی نسبت به سایر نمونه‌های سبک‌سازی شده و حتی نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد (جدول ۲). بنابراین جهت تقویت ساختار گچ‌برگ و بهبود استحکام آن از موادی مانند سیمان و پلی‌وینیل الکل و جهت محافظت در برابر رطوبت و افزایش دوام نمونه در شرایط مرطوب از آهک پوشش‌دار می‌توان استفاده نمود. مواد افزودنی، تأثیرگذاری مثبتی از نظر هر یک از ویژگی‌های مورد بررسی داشته‌اند و در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری با همدیگر دارند اما گچ‌برگ‌های پلیمری بهینه شده باید تمامی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز را با همدیگر در حد استاندارد و حتی بیشتر از محدوده استاندارد داشته باشد. از این‌رو ترکیب شرایطی که دارای موادی مانند سیمان، پلی‌وینیل الکل و آهک اصلاح شده با اسید سیتریک (GFAI8، GFCLc10، GFCLc11 و GFCLc10) برای مرحله دوم انتخاب شدند تا بتوانند هم‌افزایی مثبت را در ویژگی‌های گچ‌برگ ایجاد کنند. میانگین ویژگی‌های مورد ارزیابی تیمارهای مرحله دوم به شرح جدول ۳ می‌باشد. ماشین‌های آزمون مقاومت فشاری قادر به شکست و رسم نمودار شکست نمونه GFAI8 نشدند.

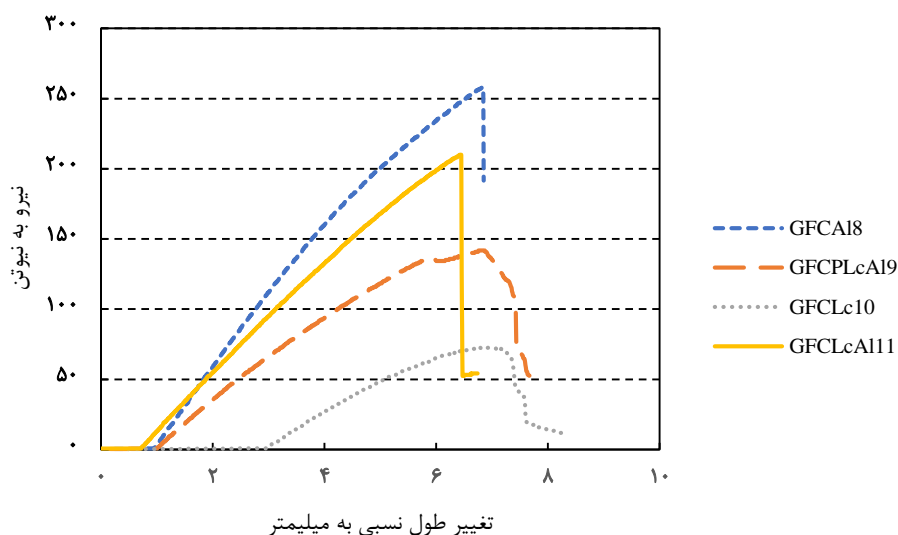
جدول ۳. میانگین (انحراف معیار) ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی تیمارهای مرحله دوم

تیمار	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	جذب آب سطحی (درصد)	جذب آب کلی (درصد)
GFCAl8	۳/۵ ≤	۳/۸۵ (±۰/۷۸)	۷۰/۴۱ (±۱/۶۷)	۷۲/۴۱ (±۲/۰۷)
GFCPLcA19	۲/۲۴ (±۰/۰۹)	۲/۰۷ (±۰/۳۵)	۲۵/۱۵ (±۲/۶۲)	۵۳/۶۲ (±۰/۸۵)
GFCLc10	۲/۹۱ (±۰/۳۴)	۱/۴۰ (±۰/۱۸)	۵۶/۲۳ (±۱/۷۶)	۶۲/۱۷ (±۶/۰۴)
GFCLcA11	۳/۲۸ (±۰/۲۵)	۳/۳۲ (±۰/۵۲)	۲۸/۰۴ (±۴/۵۹)	۲۹/۳۴ (±۰/۲۹)

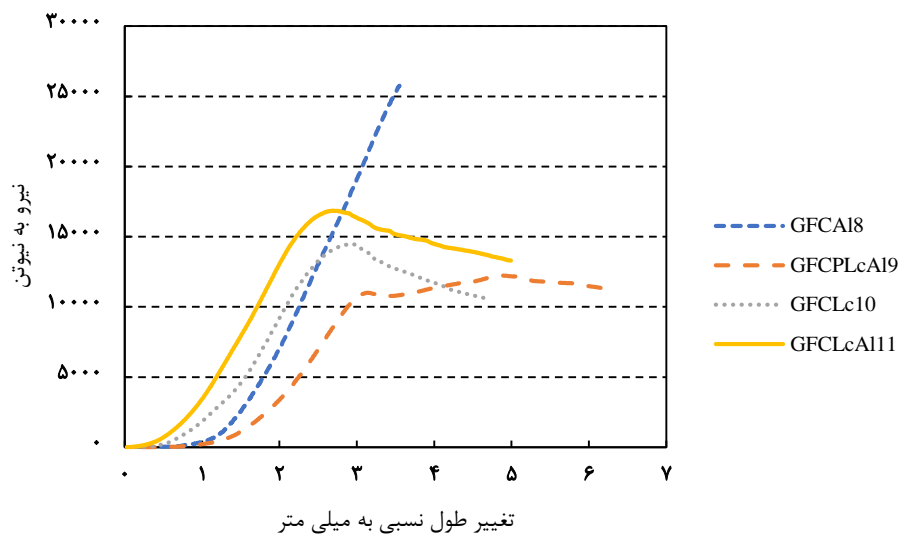
به‌طور کلی، حداکثر مقاومت فشاری و خمشی مربوط به نمونه‌های GFCAl8 و GFCLcA11 است که ترکیبی از گچ، الیاف کاغذ باطله، سیمان، پلی‌وینیل الکل و یا آهک پوشش‌دار دارند. در مقابل، کمترین مقاومت فشاری و خمشی مربوط به تیمار GFCLc10 است که ترکیبی از گچ، الیاف کاغذ باطله، سیمان و آهک هیدراته اصلاح شده دارد. پلی‌وینیل الکل نقش مهمی در ایجاد استحکام در نمونه‌های تحت بار خمشی و فشاری داشته است (جدول ۳). کمترین مقدار جذب آب سطحی و جذب آب کلی (در حدود ۲۸ و ۲۹ درصد) مربوط به نمونه‌های با ترکیب گچ، الیاف، پلی‌وینیل الکل، سیمان و آهک هیدراته اصلاح شده (تیمار GFCLcA11) بوده است. بیشترین مقدار جذب آب سطحی و جذب آب کلی (در حدود ۷۰ و ۷۲ درصد) در نمونه‌ای با ترکیب گچ، الیاف، پلی‌وینیل الکل و سیمان (تیمار GFCAl8) ثبت شده که تمایل بیشتری به جذب آب دارد (جدول ۳). نمودارهای شکست نمونه‌های مرحله دوم مربوط به مقاومت خمشی و فشاری اختلاف بین تیمارها و نحوه شکست آنها را نشان می‌دهد (شکل‌های ۱ و ۲).

نحوه شکست نمونه‌های خمشی و فشاری تیمارها همانند شکست نمونه خمشی GFCAl8 و نمونه فشاری GFCLcA11 که در شکل ۳ نشان داده شده است، می‌باشد.

بنابراین براساس نتایج مرحله دوم، ترکیب بهینه مواد می‌تواند گچ، الیاف، پلی‌وینیل الکل، سیمان و آهک پوشش‌دار (مانند تیمار GFCLcA11) باشد که دارای کمترین مقدار جذب آب، بالاترین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری مناسبی است. این تیمار (GFCLcA11) برای استفاده در محیط‌های مرطوب و کاربردهای نیازمند مقاومت مکانیکی مناسب است.



شکل ۱. نمودار شکست اعمال بار خمشی

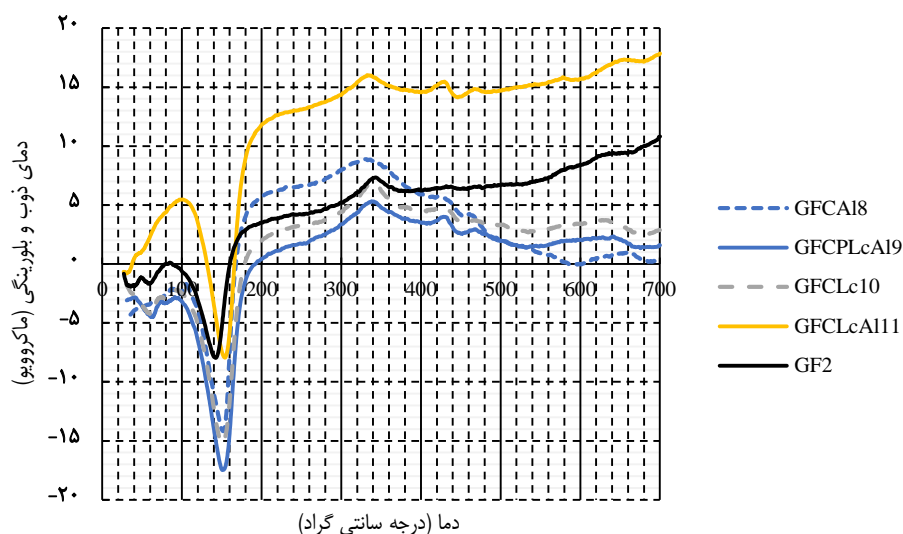


شکل ۲. نمودار شکست اعمال بار فشاری (مقاومت فشاری نمونه GFCAI8 بیشتر از ظرفیت اسمی دستگاه آزمون)



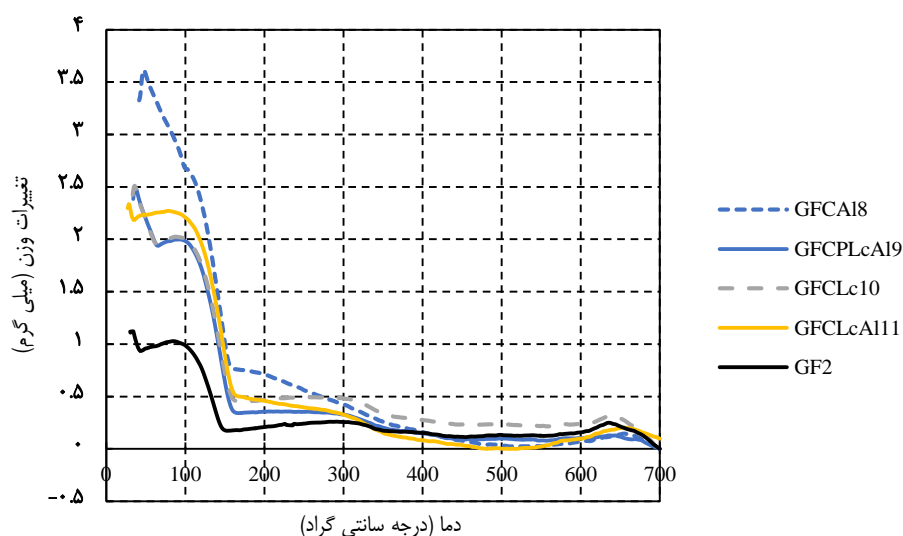
شکل ۳. نحوه شکست نمونه‌های خمشی (GFCAI8) و فشاری (GFCLcA111)

قابل ذکر است که تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های مورد بررسی، اختلاف معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد را در بین تیمارها نشان می‌دهد. مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌ها با روش LSD نیز تفاوت تیمارها را با همدیگر در سطح ۹۵ درصد نشان می‌دهد. مقایسه میانگین ویژگی‌های تیمار انتخاب شده (GFCLcA111) از نظر مقاومت فشاری با تیمار GFCPLcA19، از نظر مقاومت خمشی با تیمار GFCPLcA19 و GFCLc10، از نظر جذب آب سطحی با تیمار GFCAI8 و GFCLc10 و از نظر جذب آب کلی با همه تیمارها در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد. آزمون وزن‌سنجی گرمایی (TGA-DTA)، تأثیر مواد افزودنی بر ساختار گچ‌برگ‌های تولید شده را بیان می‌کند. شکل ۴ منحنی DTA تیمارها را نشان می‌دهد.



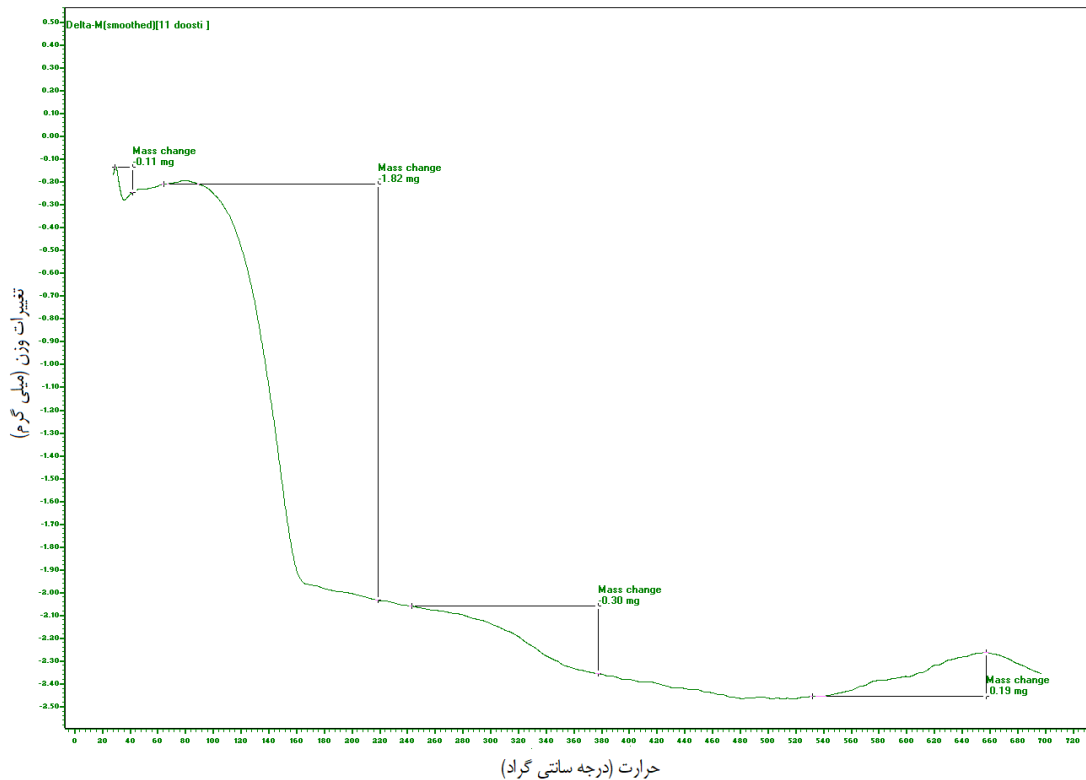
شکل ۴. منحنی DTA تیمارهای مختلف به همراه نمونه شاهد شامل گچ و الیاف (GF2)

آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) نشان می‌دهد که دمای ذوب و بلورینگی تیمارها و همچنین پایداری حرارتی، وضعیت تبلور، تخریب حرارتی و ناخالصی‌های موجود در تیمارها یک فرآیند گرماگیر است. منحنی‌های DTA نشان می‌دهند که نقطه ذوب گچ‌برگ‌های پلیمری در حدود ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد و نقطه بلورینگی در محدوده ۱۶۰-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد (شکل ۴). لازم به ذکر است که تیمار GFCLcA111، که ترکیبی از گچ، الیاف، سیمان، آهک پوشش‌دار شده و پلی‌وینیل الکل است، نسبت به سایر تیمارها با محدوده بلورینگی بیشتر، از شرایط بهتری برخوردار بودند. در صورتی که نقطه بلورینگی تیمارهای مورد بررسی (از مرحله ذوب به سرد شدن) در دمای بالاتری باشد، افزودنی‌های موجود در تیمار به انسجام و بلورینه شدن مواد به فرآیند سرد شدن در دمای بیشتر کمک می‌کنند. نقطه ذوب و مراحل پایانی منحنی DTA نمونه شاهد و GFCLcA111 تقریباً مشابه می‌باشند، در صورتی که نقطه ذوب این مواد نیز بیشتر باشد، از مقاومت حرارتی بیشتری نیز برخوردار خواهند بود. آزمون‌های وزن‌سنجی حرارتی (TGA) کاهش وزن مواد بر حسب میلی‌گرم را در فرآیند افزایش دما تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در سه مرحله نشان می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۵. منحنی TGA تیمارها (شاهد GF2 شامل گچ و الیاف)

شکل ۶ کاهش وزن نمونه GFCLcA11 را نشان می‌دهد.



شکل ۶. سه مرحله کاهش وزن و یک مرحله نهایی افزایش جزئی وزن در دماهای زیاد مربوط به تیمار GFCLcA11

هر دو منحنی DTA و TGA برای تیمارهای مورد بررسی سه محدوده یا فرآیند مشابه را نمایش می‌دهند که این محدوده‌ها مربوط به ساختار مواد تشکیل‌دهنده گچ‌برگ‌های پلیمری در این پژوهش هستند. در منحنی DTA، سه فرآیند مشاهده می‌شود که مرتبط با محدوده‌های بلورینگی، ذوب مواد تشکیل‌دهنده تیمارها و اکسیداسیون فلزات هستند. در منحنی TGA، علاوه بر سه ناحیه کاهش وزن ناشی از آب، گچ و سایر مواد موجود در گچ، یک ناحیه افزایش و کاهش جزئی در دمای بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به تجزیه حرارتی و واکنش‌های شیمیایی ناخالصی‌هایی مانند فلزات نیز مشاهده می‌شود (شکل‌های ۵ و ۶). نوسانات جزئی در افزایش و کاهش وزن در انتهای فرآیند حرارتی احتمالاً به تبدیل کربنات فلز به اکسید فلز مربوط می‌شود [۱۳]. گچ حاوی ناخالصی‌هایی نظیر سیلیس، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم، اکسید منیزیم، کلریدها (به‌صورت سدیم کلرید) و آهک است که اکسید فلزات در این افزایش جزئی وزن نقش اساسی دارند (INSO 5029, 2017). منحنی TGA برای تیمارها نشان می‌دهد که سه ناحیه کاهش وزن در تمامی تیمارها مشابه است، با این حال، روند کاهش وزن در تیمار GFCLcA11 و نمونه شاهد به‌طور قابل توجهی نزدیک به یکدیگر است. جدول ۴ مقدار کاهش وزن TGA هر مرحله از تیمارها را در فرآیند افزایش دما به‌طور دقیق نشان می‌دهد.

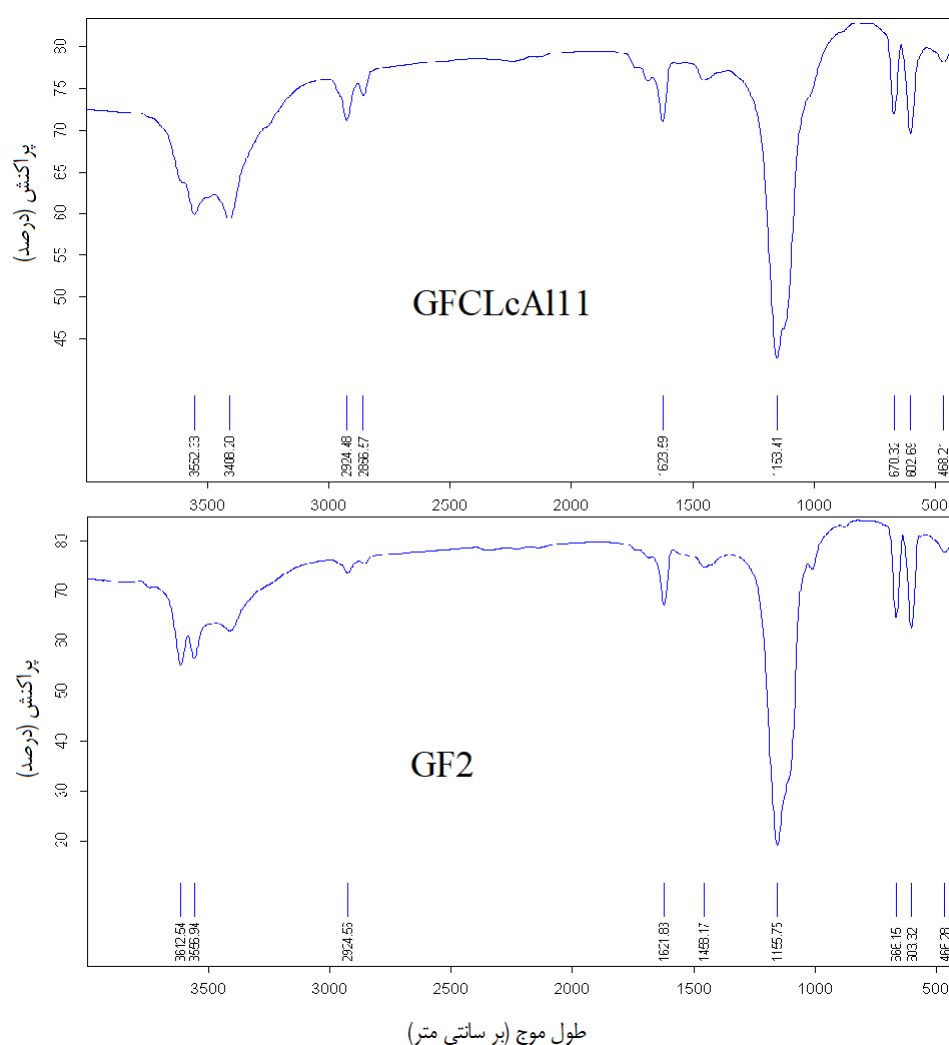
جدول ۴. درصد کاهش وزن در هر یک از مراحل منحنی TGA به‌دلیل افزایش دما

تیمار	مرحله ۱ (درصد)	مرحله ۲ (درصد)	مرحله ۳ (درصد)، کاهش بیش از
۸	۶/۱۳	۱۲/۹۳	۰/۸۰
۹	۳/۴۰	۱۱	۱/۵۳
۱۰	۳/۳۳	۱۰/۴۰	۲/۷۳
۱۱	۰/۷۳	۱۲/۱۳	۲
شاهد	۱/۳۳	۵/۴۰	۲/۲۰

نمودارهای طیف‌سنجی FTIR به روش عبوری نمونه‌ها نیز وجود این فلزات را تأیید می‌کند. به این ترتیب، اکسید کلسیم و سایر اکسیدهای فلزی در دماهای بسیار بالا، نزدیک به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به افزایش وزن جزئی می‌شوند، زیرا کربنات فلز به اکسید فلز تبدیل می‌شوند [۱۳]. همچنین، نمودارهای طیف‌سنجی عبوری تیمارها تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند، اما شدت و ضعف جذب گروه‌های عاملی در طول موج‌های مختلف متغیر است.

طیف‌سنجی عبوری نمونه GFCLcA111 و شاهد (GF2) در شکل ۷ نشان‌دهنده پنج نوسان متوالی است که از طول موج‌های بیشتر به کمتر مرتب شده‌اند. این نوسانات در نمونه GFCLcA111 به وجود گروه‌های عاملی زیر مربوط می‌شوند: ۱- گروه هیدروکسیلی (O-H)، ۲- گروه کربوکسیلی (COOH)، ۳- آلکان (C-H)، ۴- کتون‌ها یا کربونیل‌های غیر اشباع آلفا و بتا (α, β -C=C) (unsaturated ketone)، ۵- اترهای آلیفاتیک (C-O) و ۶ فلزات.

در تیمار شاهد (GF2)، گروه کربوکسیلی مشاهده نمی‌شود، در حالی که سایر گروه‌ها در این طول موج‌ها حاضر هستند. شدت جذب گروه‌های عاملی، به جز اثر آلیفاتیکی، در تیمار GFCLcA111 تقریباً مشابه نمونه شاهد (GF2) است.



شکل ۷. طیف‌سنجی عبوری FTIR نمونه GFCLcA111 و شاهد (GF2)

شرایط بهینه تیمار GFCLcA111 در مقایسه با سایر تیمارها به دلیل وجود گروه‌های عاملی، به ویژه کتون‌های اشباع نشده است که پیوندهای مؤثری را در ماتریس گچ‌برگ ایجاد می‌کند. علاوه بر این، شدت جذب گروه عاملی C-O در این تیمار بیشتر از نمونه شاهد (GF2) و حتی سایر تیمارها، به جز تیمار GFCA18، می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

کامپوزیت‌های پلیمری مبتنی بر ماتریس گچی به دلیل وزن کم، عایق بودن و قیمت مناسب مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما دارای معایبی همچون مقاومت کم در برابر فشار و خمش و جذب آب بالا دارند. هر کدام از مواد افزوده شده می‌تواند یکی از ویژگی‌های مورد نیاز گچ‌برگ را بهبود بخشد. الیاف، ویژگی‌های مکانیکی و مواد افزودنی پلیمری و معدنی مانند سیمان، آهک هیدراته، پرلیت، پلی‌وینیل استات و پلی‌وینیل الکل، علاوه بر خواص مکانیکی، بر خواص فیزیکی صفحات گچ‌برگ تأثیر معنی‌دار مثبتی داشته است. به‌طور خاص، ترکیب گچ با الیاف کاغذ باطله و پلی‌وینیل الکل به دلیل ایجاد پیوندهای قوی‌تر بیشترین مقاومت خمشی و فشاری را از خود نشان داد.

افزودن این پلیمرها ریزساختار گچ پلیمری را یکنواخت نمود ولی باعث کاهش استحکام فشاری گچ‌برگ شد. اما تحقیقات نشان می‌دهد مقدار مصرف افزودنی مانند پلی‌وینیل استات بر مقاومت مکانیکی و جذب آب مؤثر است. به‌عنوان مثال با افزایش ۲/۵ درصدی پلی‌وینیل استات در گچ تجاری (همی هیدرات سولفات کلسیم)، ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت بهبود واضحی را نشان داد، اما با افزایش نسبت پلی‌وینیل استات در گچ از ۲/۵ به ۱۰ درصد، مقاومت خمشی و جذب آب کاهش یافتند [۳]. افزایش مقاومت مکانیکی به دلیل افزودن پلی‌وینیل الکل و پلی‌وینیل استات و متعاقباً افزایش جذب آب و به‌عبارتی اثرات معکوسی که بر روی گچ‌برگ پلیمری دارند، در این تحقیق نیز مشخص است (جدول ۲).

نمونه‌هایی که حاوی آهک هیدراته اصلاح‌شده با اسید سیتریک بودند، کمترین میزان جذب آب سطحی و کلی را نشان دادند. در این پژوهش، اثرات منفی پلی‌وینیل الکل بر روی افزایش مقدار جذب آب با افزودن آهک پوشش‌دار برطرف شده است و ترکیب شرایط بهینه مانند تیمار GFCLcA111 به دست آمده است که هم ویژگی‌های مکانیکی و هم جذب آب مناسبی داشته است. آزمون وزن‌سنجی گرمایی (TGA-DTA) نیز نشان می‌دهد که این نمونه در دمای بیشتر، بلورینگی و مقاومت حرارتی بیشتری را نسبت به تیمارهای دیگر دارد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند مبنایی برای بهبود فرمولاسیون‌های فعلی و توسعه صفحات گچی پلیمری با ویژگی‌های اصلاح شده و بهینه باشد. در تحقیقات آینده، الیاف متنوع در دسترس و ترکیبات پلیمری مناسب یا مواد افزودنی ارزان قیمت را می‌توان در گچ‌برگ‌های پلیمری با دانسیته کم استفاده نمود و اثرات آنها بر زمان گیرش، ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی را بررسی نمود.

۵. منابع

- [1] Pecas, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: a review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66.
- [2] Karade, S.R. (2010). Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1323-1330.
- [3] Najim, T.S., Al-Zubaidy, A.A., & Yassin, S. A. (2011). Physical and mechanical properties of polymer-gypsum composite. In: Proceedings of First Polymers/Composites Symposium, May 5-6 Al-Mustansiria University, Baghdad, Iraq, pp. 1-13.
- [4] Gomes, C.E.M., Sousa, A.K.D., Araujo, M.E.S.O., Ferreira, S.B., & Fontanini, P. (2019). Mechanical and Microstructural Properties of Redispersible Polymer-Gypsum Composites. *Materials Research*, 22(3), e20180119.
- [5] Deng, Y.H., & Furuno, T. (2001). Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers. *Journal of Wood Sciences*, 47, 445-450.
- [6] Chalak, S.R., Farrokh Payam, S.R., Bayatkashkoul, A., & Rahdar, H.A. (2024). Rengforcement the microstructure of gypsum board composite with modified calcium carbonate, sulfonate and starch in order to reduce water absorption and increase mechanical Strengthening. *Journal of Forest and Wood Products*, 76 (4), 341-353. (In Persian)

- [7] Mucha, M., Mroza, P., & Kocemba, A. (2016). Polymer composites based on gypsum matrix. In AIP Conference Proceedings III International Conference on "Times of Polymers and Composites": From Aerospace to Nanotechnology. June 19–23 Naples, Italy, 1736 (1), DOI: 10.1063/1.4949694
- [8] Gazineu, M.H.P., Dos Santos, V.A., Hazin, C.A., De Vasconcelos, W.E., & Dantas, C.C. (2011). Production of polymer-plaster composite by gamma irradiation. *Progress in Nuclear Energy*, 53(8), 1140-1144.
- [9] Ciemnicka, J., Prałat, K., Koper, A., Makomaski, G., Majewski, Ł., Wojcicka, K., & Buczkowska, K.E. (2021). Changes in the strength properties and phase transition of gypsum modified with microspheres, aerogel and HEMC polymer. *Materials*, 14(13), 3486.
- [10] Trocinski, A., Wieruszewski, M., Bartkowiak, M., Dziurka, D., & Mirski, R. (2024). The Influence of Hemp Fibers (*Cannabis sativa* L.) on the Mechanical Properties of Fiber–Gypsum Boards Reinforcing the Gypsum Matrix. *Polymers*, 16(18), 2644.
- [11] Trocinski, A., Dziurka, D., Thomas, M., & Mirski, R. (2024). Physico-Mechanical Characteristics of Gypsum–Fiber Boards Manufactured with Hydrophobically Impregnated Fibers. *Materials*, 17(18), 4555.
- [12] Chun, H., Xian, X., Hu, X. & Liu, X. (2014). Improvement on mechanical strength and water absorption of gypsum modeling material with synthetic polymers. *Ceramics International*, 40, 14899–14906.
- [13] Liu, A., Zeng, W., Zhu, Z., Zhuo, S., Liu, X., He, C., & Qian, R. (2024). Determination and study of correlations of relative sensitivity factors in metal and metal oxide samples by glow discharge mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 205, 111249.
- [14] Gypsum – Gypsum Blocks Definitions, Requirements and Test Methods, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.10, INSO 2786, 2013.
- [15] Gypsum Concrete- Specifications, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.10, INSO 5032, 2014.
- [16] Gypsum Binders and Gypsum Plaster Part 1: Requirements, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ICS, 91.100.10; 01.040.91, ISIRI 12015, 2013.
- [17] Gypsum – Gypsum Board with Fibrous Reinforcement Definitions, Requirements and Test Methods – part 2: Gypsum Fibre Boards, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.10, INSO 14478-2, 2013.
- [18] Gypsum – Gypsum Plasterboards Definitions, Requirements and Test Methods, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.10; 01.040.91, INSO 14818, 2013.
- [19] Gypsum – Gypsum Plasters and Gypsum Concrete – Physical Test Methods, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.15, INSO 5482, 2023.
- [20] Gypsum – Gypsum, Gypsum Concrete and Gypsum Panel Products, Chemical Analysis- Test Methods, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.10, INSO 5029, 2017.