

Effects of wollastonite on fire-retarding and some physical properties of beech wood (*Fagus orientalis* L.)

Azar Haghghi Poshtiri^{*1}, Hamid Reza Taghiyari²

1. Corresponding Author, Visiting lecturer, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: haghghi1986@gmail.com
2. Associate Prof., Faculty of Materials Engineering and Interdisciplinary Sciences, Shahid Rajaei Teacher Training University (SRTTU), Tehran, Iran. E-mail: htaghiyari@yahoo.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.13.2025
Revised: 03.24.2025
Accepted: 03.24.2025

Keywords:
Beech,
Bethel method,
Fire-Retarding properties,
Volumetric swelling,
Wollastonite

ABSTRACT

Background and Objectives: Fire is one of the most important wood destructive elements, causing irreparable damage. Fire retardancy of combustible materials such as wood is a mechanism in which the building materials of wood are protected from exposure to oxygen atmospheres, or reduction of heat transfer; this would ultimately delay the ignition time. The compounds that have been found to be most effective in producing flame retardance are compounds containing bromine, chlorine, phosphorous, or a combination of two or more of the compounds. Many of these compounds may affect other properties in wood. For example, fire retardants in wood often increase water absorption, cause color changes, or lead to wood degradation. Generally, if treatment with a particular fire-retardant leads to an increase in resistance to decay, and to an improvement in the dimensional stability of wood, it is considered the best. This study aims to investigate the possibility of using wollastonite as a fire-retardant in improving the fire resistance properties and dimensional stability in beech wood, as well as determining the optimal level of its consumption.

Materials and Methods: Beech (*Fagus orientalis* L.) wood was used in this study for examination. Impregnation of the specimens was carried out with wollastonite suspension at four consumption levels of 4, 6.3, 10, and 12%, using the Bethel method (full-cell process). Five fire-retarding properties were measured, including weight loss (%), time to onset of ignition (s), duration of flame after removing the piloted ignition (s), duration of glow after removing the piloted ignition (s), and the burnt area (%). Water absorption and volumetric swelling of the specimens were also measured.

Results: The results showed that fire-retarding properties were improved as the concentration of wollastonite suspension increased. The best results in terms of improving the fire properties were observed in specimens impregnated with wollastonite suspensions of 10 and 12%; these two consumptions were statistically grouped together in most of the fire properties measured. Furthermore, the treated wood specimens showed a decreasing trend in volumetric swelling with the increase in the consumption of wollastonite suspension, though the decreasing values were not statistically significant (6.3, 10, and 12 percent).

Conclusion: It was concluded that impregnation with wollastonite at 10% consumption would provide the optimum results in beech wood to be recommended to the industry. Depending on the type of wood application, and taking into account the economic aspects, other wollastonite consumptions of wollastonite suspension (even 6.3%) can also be used to improve fire properties and dimensional stability to a favorable extent in beech wood. Therefore, it can be concluded that wollastonite can be recommended as a flame retardant in wood protection.

Cite this article: Haghghi Poshtiri, Azar, Taghiyari, Hamid Reza. 2025. Effects of wollastonite on fire-retarding and some physical properties of beech wood (*Fagus orientalis* L.). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (4), 117-132.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2025.22107.2089

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر ولاستونیت بر میزان کندسوزکنندگی و برخی از خواص فیزیکی چوب راش (*Fagus orientalis* L.)

آذر حقیقی پشتیری^{۱*}، حمیدرضا تقی‌باری^۲

۱. نویسنده مسئول، مدرس مدعو، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: haghighi1986@gmail.com
۲. دانشیار دانشکده مهندسی مواد و علوم میان‌رشته‌ای، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. رایانامه: htaghiyari@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: آتش در زمره مهم‌ترین عوامل مخرب چوب محسوب می‌شود که می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد. کندسوز کردن مواد اشتعال‌پذیر مانند چوب، عملی است که در آن عناصر تشکیل‌دهنده چوب را از تماس با اکسیژن هوا مصون داشته و یا انتقال حرارت را کند کرده و در نهایت آستانه شعله‌وری آن را به تأخیر می‌اندازد. مؤثرترین مواد کندسوزکننده که تاکنون معرفی شده‌اند، ترکیباتی شامل برم، کلر، فسفر و یا مخلوطی از این ترکیبات هستند. بسیاری از این ترکیبات ممکن است روی سایر ویژگی‌های چوب نیز تأثیرگذار باشند. برای مثال، استفاده از کندسوزکننده‌ها، اغلب موجب افزایش جذب آب، تغییر رنگ و یا پوسیدگی قارچی چوب می‌شود. به‌طورکلی، کندسوزکننده‌ای برتر محسوب می‌شود که مقاومت در برابر پوسیدگی و ثبات ابعاد چوب را نیز بهبود بخشد. پژوهش پیش‌رو، با هدف بررسی اثر ولاستونیت به‌عنوان کندسوزکننده بر بهبود مقاومت به آتش و ثبات ابعاد چوب راش و هم‌چنین تعیین سطح بهینه غلظت آن انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵	مواد و روش‌ها: در این پژوهش اشباع نمونه‌های چوب راش (<i>Fagus orientalis</i> L.) با ولاستونیت به روش بتل در چهار غلظت ۴، ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد انجام شد. ویژگی‌های مقاومت به آتش نمونه‌های مورد مطالعه با پنج معیار: کاهش وزن، دمای اشتعال، دوام شعله، دوام گدازش و سطح سوخته، جذب آب و واکنشیدگی حجمی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.
واژه‌های کلیدی: چوب راش، روش بتل، واکنشیدگی حجمی، ولاستونیت، ویژگی‌های کندسوزکنندگی	یافته‌ها: نتایج نشان دادند که با افزایش غلظت ولاستونیت، مقاومت به آتش نمونه‌های تیمار شده افزایش یافت و بهترین نتایج در نمونه‌های تیمار شده با غلظت‌های ۱۰ و ۱۲ درصد مشاهده شد؛ ولی، اختلاف آماری معنی‌داری میان این دو غلظت در ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مشاهده نشد. هم‌چنین، براساس نتایج، واکنشیدگی حجمی نمونه‌های تیمار شده با افزایش غلظت ولاستونیت، روند کاهشی داشت که از نظر آماری معنادار نبود.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج آزمون خوشه‌ای، غلظت بهینه ولاستونیت ۱۰ درصد اعلام شد که برای استفاده در بخش صنعت پیشنهاد می‌شود. به‌طورکلی، بسته به نوع کاربرد چوب و صرفه اقتصادی حفاظت، امکان استفاده از ولاستونیت در سطوح مختلف غلظت (حتی ۶۳ درصد) نیز وجود دارد و می‌تواند ویژگی‌های مقاومت به آتش و ثبات ابعاد چوب را نسبت به نمونه تیمار نشده بهبود بخشد.

استناد: حقیقی پشتیری، آذر، تقی‌یاری، حمیدرضا (۱۴۰۳). اثر ولاستونیت بر میزان کندسوزکنندگی و برخی از خواص فیزیکی چوب راش (*Fagus orientalis* L.). نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۱ (۴)، ۱۱۷-۱۳۲.

DOI: 10.22069/JWFST.2025.22107.2089



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

فرآورده‌های چوبی به‌عنوان ماده مهندسی در ساختمان و مبلمان کاربردهای متنوعی دارند. چوب به‌رغم ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند در دسترس بودن، تنوع، قیمت کم، تجدیدشوندگی، استحکام و بسته به وزن، ابعاد و ...، دارای ویژگی‌های نامطلوبی هم‌چون ناپایداری در برابر آتش، آبدوستی و ناپایداری ابعاد نیز می‌باشد (۱ و ۲). کندسوز کردن مواد اشتعال‌پذیر مانند چوب برای حفاظت در برابر آتش، عملی است که در آن عناصر تشکیل‌دهنده چوب را از تماس با اکسیژن هوا مصون می‌نماید و یا انتقال حرارت را کند کرده و در نهایت آستانه شعله‌وری را به تأخیر می‌اندازد. مکانیسم عملکرد این مواد به چند طریق زیر انجام می‌شود: ۱- محدود کردن رادیکال‌های آزاد، ۲- افزایش سرعت تشکیل لایه زغال، ۳- رقیق نمودن گازهای قابل اشتعال، ۴- تولید کف در محیط گرم و ایجاد مانع در رسیدن اکسیژن و گرما به سطح قابل اشتعال، ۵- کاهش تولید دود، ۶- جلوگیری از سوختن بدون شعله و گسترش آتش... هم‌چنین، خاصیت انتقال گرمای ذرات نانوسیلور باعث شده تجمع گرما در یک نقطه کاهش یافته و در نتیجه خواص کندسوزکنندگی در نمونه‌های اشباع‌شده با این ماده افزایش یابد (۳).

مؤثرترین مواد کندسوزکننده عبارتند از: ترکیباتی شامل برم، کلر، فسفر، آنتیموان، بور، نیتروژن، سیلیکون و روی و یا ترکیبی از این عناصر که معمولاً همراه با فسفر یا ترکیبات هالوژنی استفاده می‌شوند از دیگر کندسوزکننده‌های معمول، هیدروکسیدهای فلزی و عموماً ترکیبات دارای آلومینیوم و یا منیزیم هستند. آمونیم پلی‌فسفات ترکیبی از فسفر- نیتروژن است که به‌منظور کندسوزکردن چوب مورد استفاده قرار گرفته است، ولی این ماده به دلیل نم‌پذیری ممکن است برای مصارف بیرونی مناسب نباشد (۴ و ۵). بسیاری

از این ترکیبات ممکن است روی سایر ویژگی‌های چوب نیز تأثیرگذار باشند. برای مثال کندسوزکنندگی اغلب موجب افزایش جذب آب، تغییر رنگ و یا پوسیدگی تدریجی چوب می‌شود. هم‌چنین این‌گونه اصلاحات می‌تواند موجب کاهش مقاومت قارچی، مقاومت مکانیکی و کاهش چسب و رنگ‌پذیری شود، در صورتی‌که عمده‌ترین کاربرد چوب‌های کندسوز در مصارف بیرونی است. در نتیجه کندسوزکننده مطلوب باعث بهبود مقاومت در برابر پوسیدگی و پایداری ابعاد چوب نیز خواهد شد (۴ و ۶).

فناوری نانو از مباحث علمی نوین است که کاربردهای متنوعی در همه رشته‌ها پیدا کرده است. از جمله تأثیرات این مواد بر خواص چوب و فرآورده‌های آن می‌توان به: افزایش پایداری در برابر رطوبت (۷ و ۸) پرتوهای فرابنفش (۹)، مقاومت در برابر عوامل مخرب زیستی (۱۰) و انواع ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مانند سختی (۷) اشاره کرد. برای این مقاصد از انواع مختلف نانو ذرات فلزی و معدنی مانند مس، روی، اکسید سیلیسیوم و غیره استفاده شده است. تاکنون نانو ذرات مقاوم به آتش به‌طور عمده در تولید پلاستیک‌ها استفاده شده‌اند (۱۱)، اما تاکنون پژوهش‌های اندکی در خصوص استفاده از این ترکیبات در چوب و فرآورده‌های لیگنوسولوزی صورت گرفته است.

ولاستونیت به‌عنوان یک ترکیب کلسیم متاسیلیکاتی با فرمول CaSiO_3 در دهه ۱۹۵۰ شناخته شد و به‌سرعت برای کاربردهای متعددی در پلاستیک‌ها، رنگ‌ها، محصولات مقاوم در برابر سائیدگی و سرامیک و متالورژی معرفی شد (۹). ویژگی‌های اصلی و مهم ولاستونیت که آن را برای استفاده در صنعت پلاستیک مناسب ساخته است شامل: رنگ سفید، جذب رطوبت اندک، پایداری حرارتی مناسب، ضریب انبساط حرارتی اندک، سختی نسبتاً زیاد (در

واکشیدگی ضخامت و جذب آب کاهش یافت، ولی پایداری حرارتی، درصد کریستالی شدن و مقاومت در برابر آتش چندسازه با افزایش درصد ولاستونیت در هر دو اندازه آن افزایش یافت (۱۲).

هدف از این مطالعه بررسی اثر ولاستونیت و تعیین سطح بهینه استفاده از این ماده به‌عنوان کندسوزکننده در بهبود ویژگی‌های مقاومت به آتش و ثبات ابعاد چوب راش می‌باشد. با توجه به فراوانی و قیمت اندک این ماده معدنی در ایران، استفاده از ولاستونیت در حفاظت چوب مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. راش، یکی از مهم‌ترین گونه‌های درختی غالب در نواحی میان‌بند شمال ایران است. چوب راش سخت، بادوام متوسط، مقاوم در برابر فشار، ضربه، سایش و خراشیدگی است و به‌آسانی پرداخت می‌شود. تمام این ویژگی‌ها راش را به چوبی ایده‌آل برای تولید مبلمان و مصنوعات داخل ساختمان، تولید کابینت آشپزخانه، روکش و فرآورده‌های چوبی تبدیل می‌کنند. از این رو، افزایش مقاومت به آتش و بهبود ثبات ابعاد این چوب بسیار دارای اهمیت است.

مواد و روش‌ها

ولاستونیت مورد استفاده در پژوهش حاضر از شرکت تولیدی محصولات معدنی و صنعتی ورد ایران تهیه شد. ترکیبات موجود و نسبت اختلاط ساختار ولاستونیت در جدول ۱ خلاصه شده است.

حدود Mohs (۴/۵)، خاصیت قلیایی بالا و تجزیه و تفکیک به‌وسیله‌ی اسیدهای معدنی می‌باشد (۱۲). همچنین این ماده غیرقابل اشتعال و غیرقابل احتراق بوده و برخلاف نانوذرات هیدروکسید فلزی، سرطان‌زا نمی‌باشد.

لویت و همکاران (۲۰۰۹)، در بررسی اثر ولاستونیت به‌عنوان پرکننده در ساخت نانوکامپوزیت مشاهده نمودند که نانولولاستونیت با کاهش دمای کریستالی شدن در ماده زمینه، باعث بهبود پایداری حرارتی شد (۱۱). مای و میلیتز (۲۰۰۴)، در بررسی اثر تیمار چوب با ترکیبات مختلف سیلیکون معدنی گزارش کردند که سیلیکات قلیایی دوام چوب را افزایش داد و همچنین به دلیل آب‌دوستی و مقدار pH بالا، جذب آب را افزایش و مقاومت چوب را کاهش داد. چوب تیمار شده با تتراآلکوکسی‌سیلان‌ها افزایش ثبات ابعاد را نشان داد (۱۳). جانشو و همکاران (۲۰۰۷) در بررسی اثر ترکیب رزین اوره‌فرمالدئید حاوی نانو SiO_2 بر برخی ویژگی‌های چوب صنوبر (*Populus tomentosa*) گزارش کردند که اصلاح جذب آب چوب صنوبر را کاهش و مقاومت به آتش و سختی را افزایش دادند (۷). خسرویان (۲۰۰۹) در بررسی اثر ولاستونیت در ابعاد میکرو و نانو بر خواص مکانیکی، فیزیکی، حرارتی و ریخت‌شناسی چندسازه چوب پلاستیک دریافتند که با افزایش غلظت میکرو و نانولولاستونیت در چندسازه،

جدول ۱- ترکیبات و فرمول ولاستونیت مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Table 1. The compounds and formulation of the wollastonite used in the present project.

SO ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	ترکیبات ولاستونیت Wollastonite Compounds
0.05	0.16	1.39	0.04	0.22	2.79	3.95	46.96	39.77	نسبت اختلاط (%) Mixing ratio (%)

چینی قرار گرفته و در کوره‌ای با دمای 720°C به مدت ۷ ساعت گرمادهی شدند تا به خاکستر تبدیل شوند و متعاقباً خاکستر نمونه‌ها توزین گردید.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی: به منظور اندازه‌گیری جذب آب و واکنشیدگی حجمی مطابق استاندارد ASTM ۴۴۴۶-۲۰۰۲، نمونه‌های چوبی در ابعاد $20 \times 20 \times 20$ میلی‌متر با تعداد تکرار ۱۰ عدد برای هر تیمار تهیه شدند. سپس به مدت ۲ ماه در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند تا رطوبت آن‌ها به رطوبت تعادل محیط آزمایشگاه (۶/۵۵٪) نزدیک شود.

اشباع نمونه‌های چوبی: اشباع نمونه‌ها به روش بتل، (خلاً) مقدماتی به میزان ۰/۵- اتمسفر به مدت ۱۵ دقیقه، غوطه‌وری با محلول حفاظتی با حفظ خلاً مقدماتی، اعمال فشار ۳ اتمسفر به مدت ۲ ساعت، زه‌کشی محلول حفاظتی و در نهایت خلاً نهایی به میزان ۰/۵- اتمسفر و به مدت ۵ دقیقه انجام شد. پس از اتمام مراحل فوق، نمونه‌ها از سیلندر خارج و به مدت ۴ هفته در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند تا به رطوبت تعادل با محیط (۶/۵۵٪) برسند و ماده حفاظتی در چوب تثبیت گردد. سپس نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری مقدار جذب ولاستونیت توزین شدند. نتایج مربوط به ماندگاری و افزایش وزن نمونه‌ها پس از اشباع و رسیدن به رطوبت تعادل در جدول ۲ آورده شده است.

ارزیابی مقاومت در برابر آتش: نمونه‌های چوبی مطابق استاندارد ISO ۱۱۹۲۵ در ابعاد $150 \times 100 \times 9$ میلی‌متر با تعداد تکرار ۷ عدد برای هر تیمار جهت انجام آزمون مقاومت به آتش تهیه شدند.

به منظور انجام آزمون مقاومت به آتش از دستگاهی با تأییدیه سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران به شماره ۳۴۰۷ استفاده شد. قبل از انجام آزمون مقاومت به آتش، وزن اولیه نمونه‌ها با ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. پس از استقرار هر نمونه در دستگاه، دهانه نازل آتش با زاویه 45° و به فاصله ۵ میلی‌متر از سطح و ۳۰ میلی‌متر از لبه پایین نمونه‌ها قرار گرفت و آزمون مقاومت به آتش با فشار ثابت گاز خروجی به مدت ۱۲۰ ثانیه انجام شد. پس از اتمام آزمون، وزن نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری و کاهش وزن نمونه به‌عنوان شاخص مقاومت به آتش در نظر گرفته شد. علاوه بر این، زمان رسیدن به نقطه اشتعال، دوام شعله بعد از برداشتن نازل آتش، دوام گدازش بعد از برداشتن نازل آتش و مساحت سطح سوخته اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری درصد خاکستر نمونه‌های چوبی مطابق استاندارد ۹۳-om-۲۱۱ T، ابتدا نمونه‌های آزمونی به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ نگهداری شدند. سپس وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم، اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خشک‌شده در بوته

جدول ۲- مقادیر میانگین جذب و افزایش وزن در نمونه‌های اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار سطح غلظت.

Table 2. Mean values of retention and weight gain of wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption.

12	10	6.3	4	غلظت ولاستونیت (%) Wollastonite consumption (%)
0.551 (0.037)	0.573 (0.026)	0.599 (0.011)	0.595 (0.012)	ماندگاری (g/cm^3) Retention (g/cm^3)
81.27 (6.88)	83.86 (4.95)	86.79 (4.03)	85.72 (5.73)	افزایش وزن (%) Weight gain (%)

* اعداد داخل پرانتز بیانگر انحراف معیار است

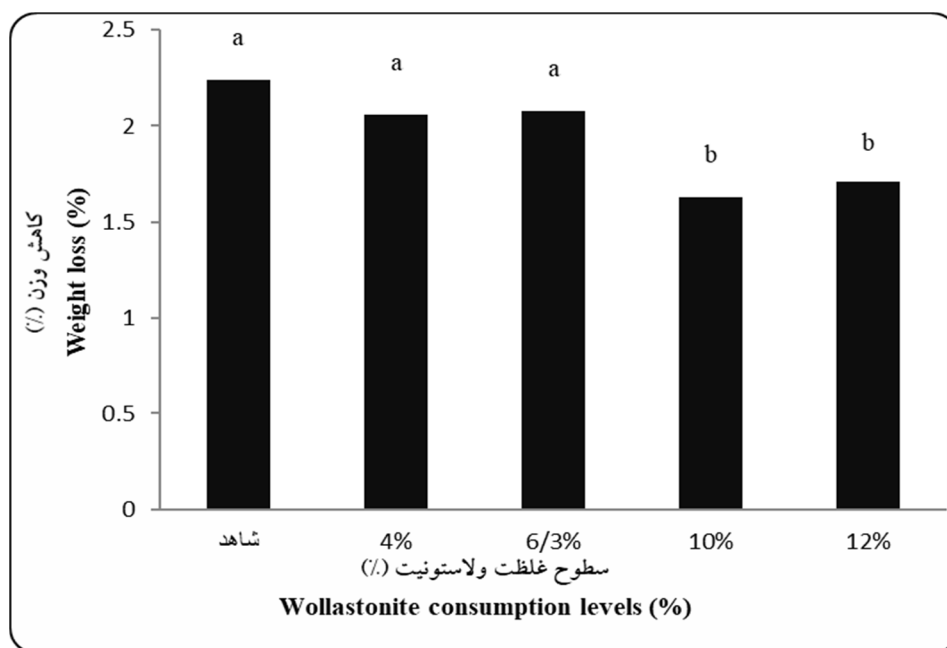
* Numbers in brackets are the standard deviation

معنی‌دار می‌باشد. نتایج نشان دادند که با افزایش میزان غلظت از کاهش وزن نمونه‌ها کاسته شد و مقاومت به آتش آن‌ها افزایش یافت. اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر این ویژگی به همراه گروه‌بندی دانکن در شکل ۱ نشان داده شد. کم‌ترین میزان کاهش وزن در نمونه‌های اشباع‌شده با دو غلظت ۱۰ و ۱۲ درصد مشاهده گردید که در مقایسه با نمونه‌های شاهد به ترتیب به میزان ۲۷/۳۴ و ۲۳/۷۶ درصد کاهش یافت و از نظر آماری هر دو در یک گروه قرار گرفته‌اند.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های مربوط به مقاومت به آتش نمونه‌های چوبی در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی تحت آزمایش فاکتوریل به کمک تحلیل واریانس و گروه‌بندی میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن مورد تحلیل قرار گرفت. همه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (ویرایش ۱۶) انجام شد.

نتایج

کاهش وزن ناشی از سوختن: اثر غلظت ولاستونیت بر کاهش وزن، در سطح خطای آماری ۵ درصد

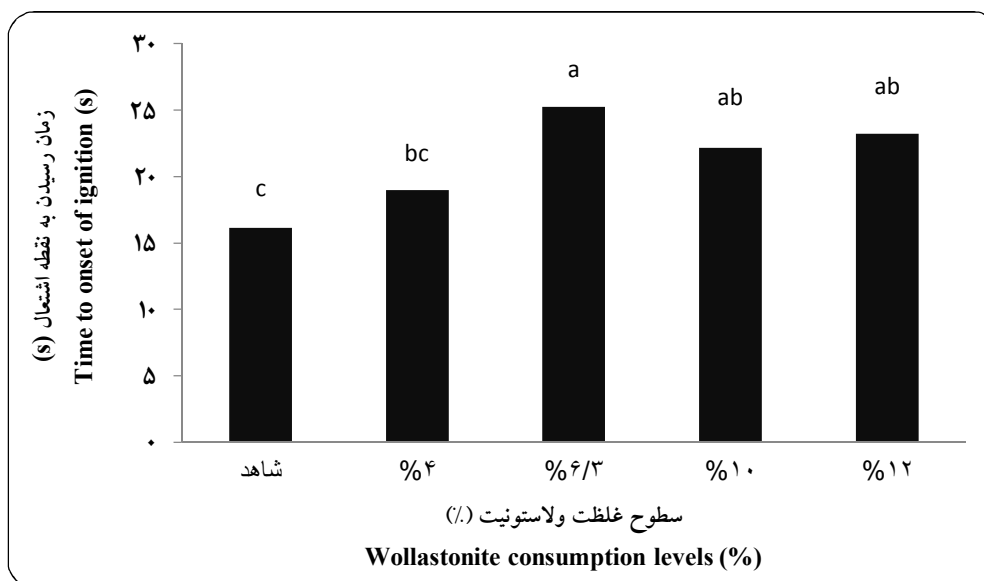


شکل ۱- مقادیر میانگین کاهش وزن نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 1. Mean values of weight loss in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters are the Duncan multiple range test).

داده شد. در نمونه‌های اشباع‌شده با غلظت ۶/۳ درصد در مقایسه با نمونه‌های شاهد، زمان رسیدن به نقطه اشتعال به میزان ۹/۰۹ ثانیه معادل ۵۶/۲۹ درصد تأخیر داشت و بین سه غلظت ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد.

نقطه اشتعال: نتایج تحلیل آماری نشان داد که اثر غلظت ولاستونیت بر زمان رسیدن به نقطه اشتعال در سطح خطای آماری ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر زمان رسیدن به نقطه اشتعال به همراه گروه‌بندی دانکن در شکل ۲ نشان

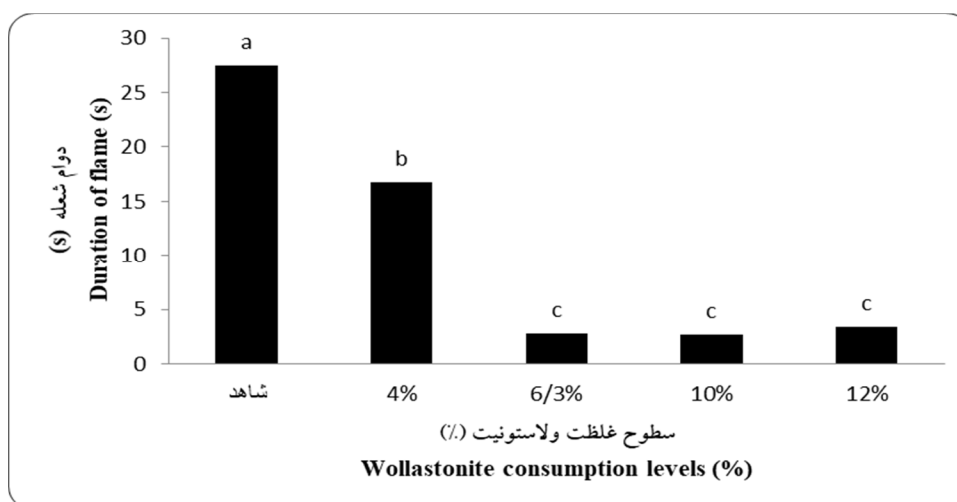


شکل ۲- مقادیر میانگین زمان رسیدن به نقطه اشتعال در نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 2. Mean values of time to onset of ignition in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters are the Duncan multiple range test).

شاهد ۹۰/۰۲ درصد کاهش یافت. اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر دوام شعله بعد از برداشتن نازل آتش به همراه گروه‌بندی دانکن در شکل ۳ نشان داده شد. سه غلظت ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد اختلاف آماری معناداری نشان ندادند.

دوام شعله: بر اساس نتایج، اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر دوام شعله بعد از برداشتن نازل آتش در سطح خطای آماری ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. کم‌ترین میزان دوام شعله در نمونه‌های اشباع‌شده با غلظت ۱۰ درصد مشاهده شد که در مقایسه با نمونه‌های

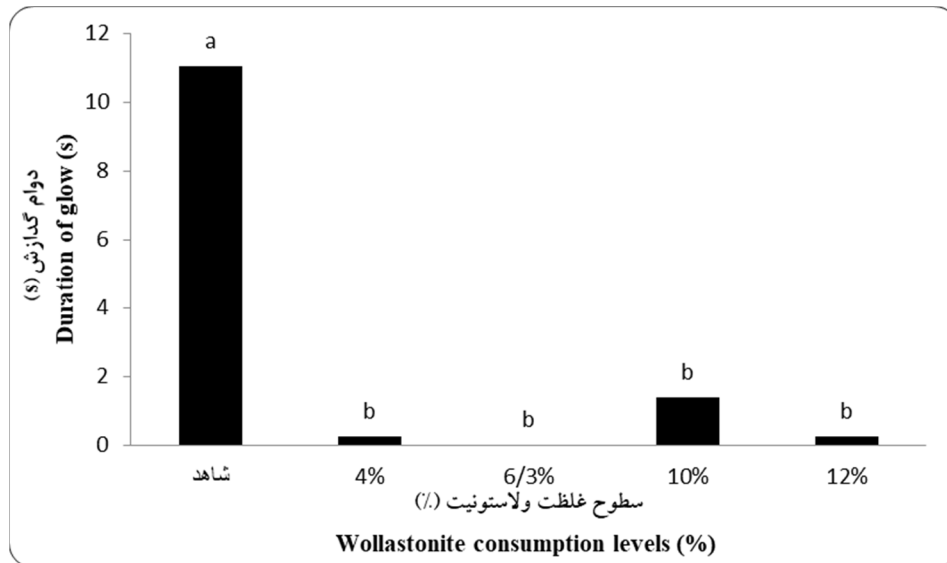


شکل ۳- مقادیر میانگین دوام شعله بعد از برداشتن نازل آتش در نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 3. Mean values of duration of flame after removing the piloted ignition in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters on each column are the Duncan multiple range test).

کندسوزکننده بر دوام گدازش بعد از برداشتن نازل آتش به همراه گروه‌بندی دانکن در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که بین چهار غلظت ۴، ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد از نظر دوام گدازش اختلاف معناداری وجود ندارد.

اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر دوام گدازش بعد از برداشتن نازل آتش در سطح خطای آماری ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. دوام گدازش در نمونه‌های اشباع‌شده با ولاستونیت در تمامی سطوح غلظت به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت. اثر غلظت ماده

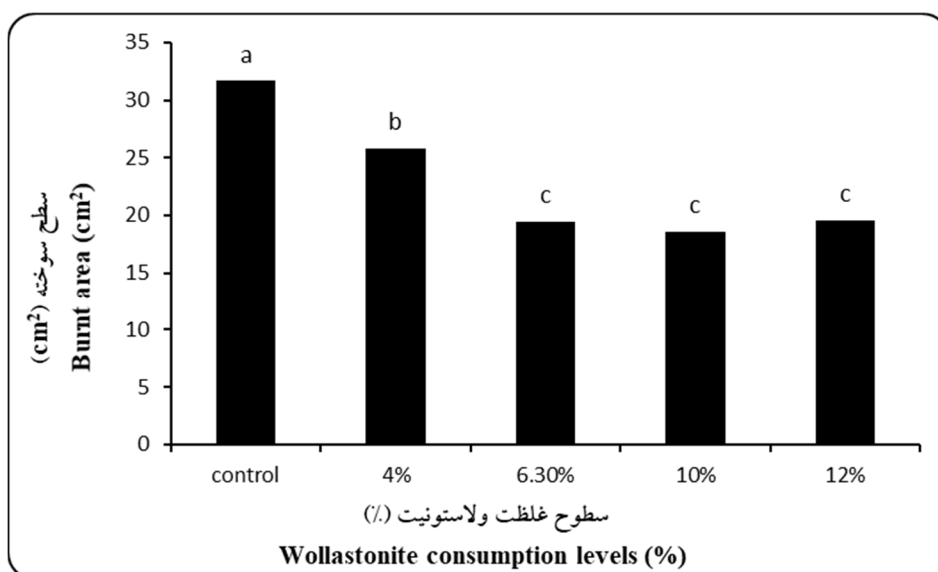


شکل ۴- مقادیر میانگین دوام گدازش بعد از برداشتن نازل آتش در نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 4. Mean values of duration of glow after removing the piloted ignition in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters are the Duncan multiple range test).

نمونه‌های شاهد ۴۱/۲۳ درصد کاهش یافت. اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر سطح سوخته به همراه گروه‌بندی دانکن در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که بین سه غلظت ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد از نظر ویژگی مورد اندازه‌گیری اختلاف معناداری وجود ندارد.

سطح سوخته: بر اساس نتایج حاصل از تحلیل آماری، اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر سطح سوخته در سطح خطای ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. سطح سوخته در نمونه‌های اشباع‌شده با ولاستونیت در تمامی سطوح غلظت، تقریباً به‌طور یکسان کاهش یافت، به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار آن در نمونه‌های اشباع‌شده با غلظت ۱۰ درصد مشاهده شد که در مقایسه با

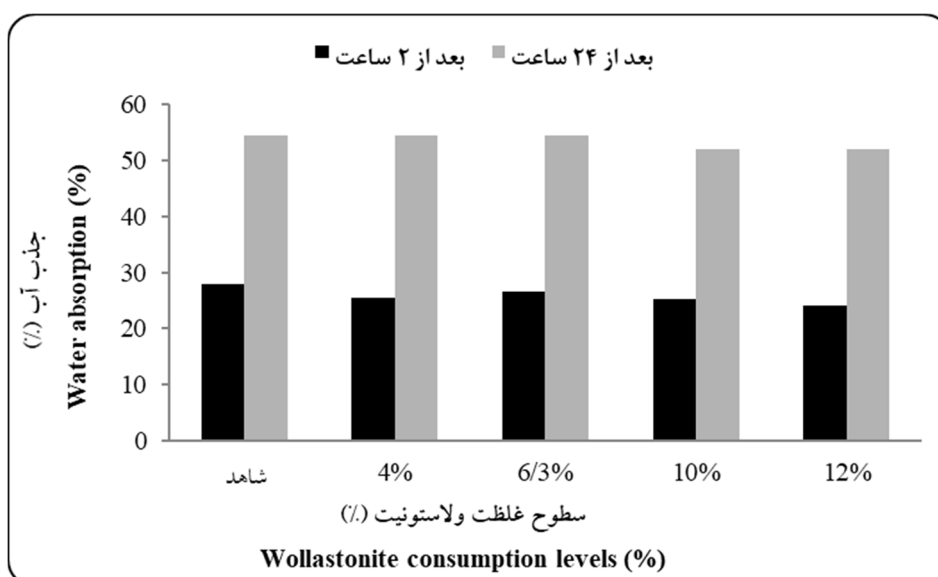


شکل ۵- مقادیر میانگین سطح سوخته در نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 5. Mean values of burnt area in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters are the Duncan multiple range test).

که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت ولاستونیت میزان جذب آب نمونه‌های اشباع‌شده با این ماده کاهش یافت، ولی از نظر آماری اختلاف معناداری با نمونه‌های شاهد نشان نداد.

جذب آب: اثر غلظت ولاستونیت بر جذب آب بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در سطح خطای ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. شکل ۶ اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر درصد جذب آب بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب را نشان می‌دهد. همان‌گونه

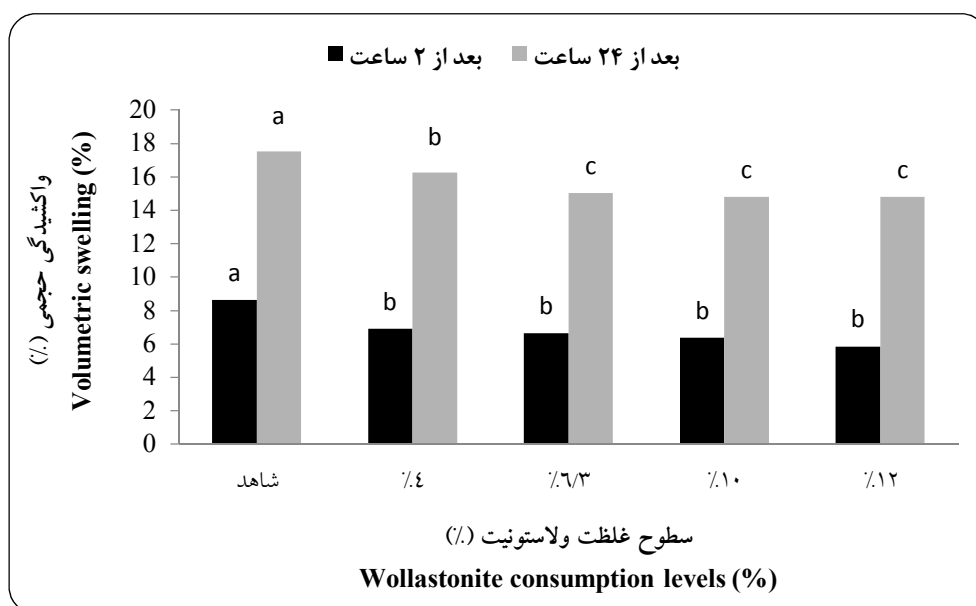


شکل ۶- مقادیر میانگین جذب آب بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار سطح غلظت.

Figure 6. Mean values of water absorption after 2 and 24 hours dipping in water in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption.

با نمونه‌های شاهد کاهش یافت. واکنش‌دهی حجمی بعد از ۲ و ۲۴ ساعت، در نمونه‌های اشباع‌شده با غلظت ۱۲ درصد، در مقایسه با نمونه‌های شاهد به ترتیب کاهش ۳۲/۳۴ و ۱۵/۴۴ درصدی در این ویژگی را نشان می‌دهد، ولی بین غلظت‌های ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده نشد.

واکنش‌دهی حجمی: شکل ۷ اثر غلظت ولاستونیت بر واکنش‌دهی حجمی بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب را نشان می‌دهد. اثر غلظت ولاستونیت بر واکنش‌دهی حجمی بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب، در سطح خطای آماری ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. بر اساس نتایج، واکنش‌دهی حجمی نمونه‌های اشباع‌شده با ولاستونیت در مقایسه

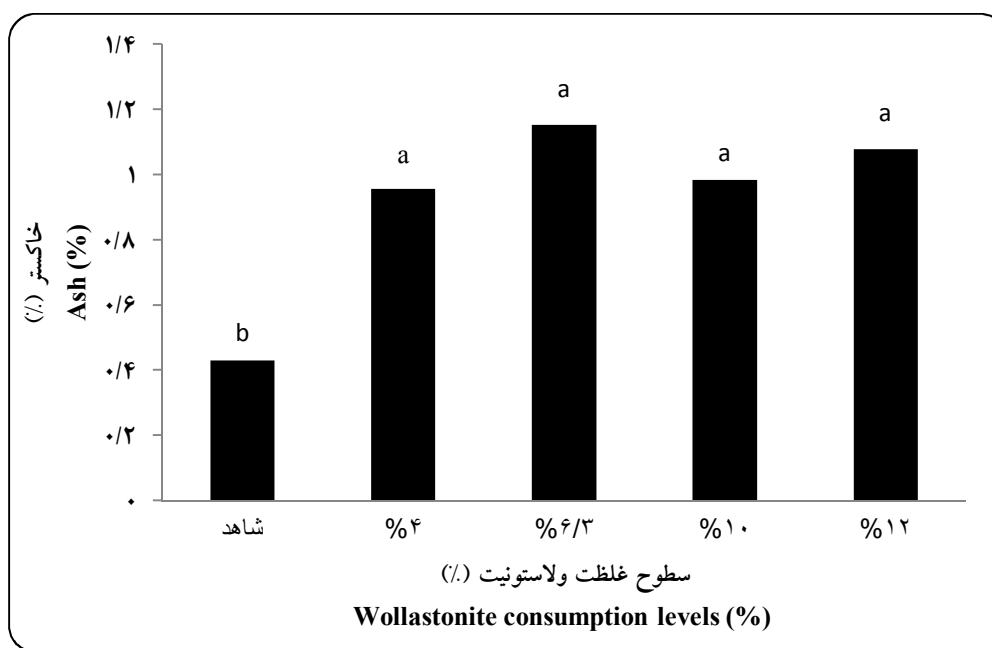


شکل ۷- مقادیر میانگین واکنش‌دهی حجمی بعد از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 7. Mean values of volumetric swelling after 2 and 24 hours of dipping in water in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters on each column are the Duncan multiple range test).

شد که در مقایسه با نمونه‌های شاهد ۱۶۸ درصد افزایش یافت. چهار غلظت ۴، ۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد اختلاف آماری معنی‌داری نشان ندادند.

خاکستر: بر اساس نتایج، اثر غلظت ماده کندسوزکننده بر خاکستر در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد (شکل ۸). بیش‌ترین میزان خاکستر در نمونه‌های اشباع‌شده با غلظت ۶/۳ درصد از این ماده مشاهده

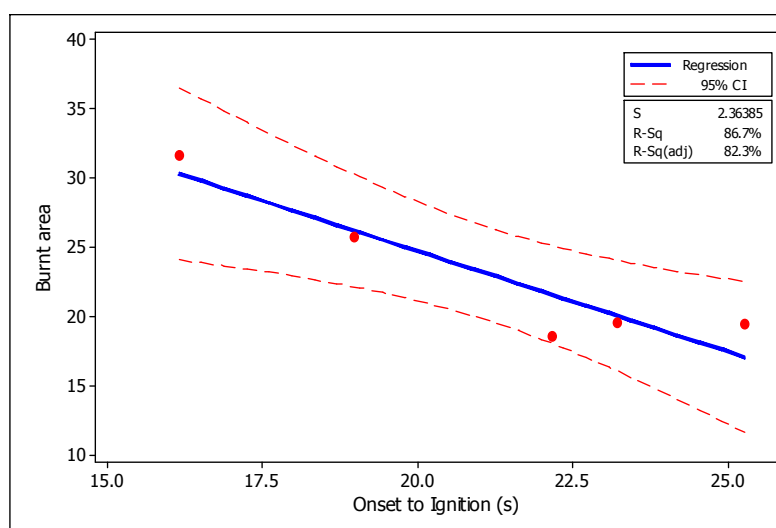


شکل ۸- مقادیر میانگین درصد خاکستر در نمونه‌های شاهد و اشباع‌شده با ولاستونیت در چهار غلظت (حروف انگلیسی بیانگر گروه‌بندی دانکن است).

Figure 8. Mean values of ash percentage in the control and wollastonite-impregnated specimens for four levels of consumption (the letters on each column are the Duncan multiple range test).

روکشی^۳ نیز همبستگی بالا میان خواص مورد بررسی در پژوهش کنونی را نشان می‌دهد به شکلی که روند کاملاً مشخصی در میان خواص مشاهده گردید (شکل ۱۰).

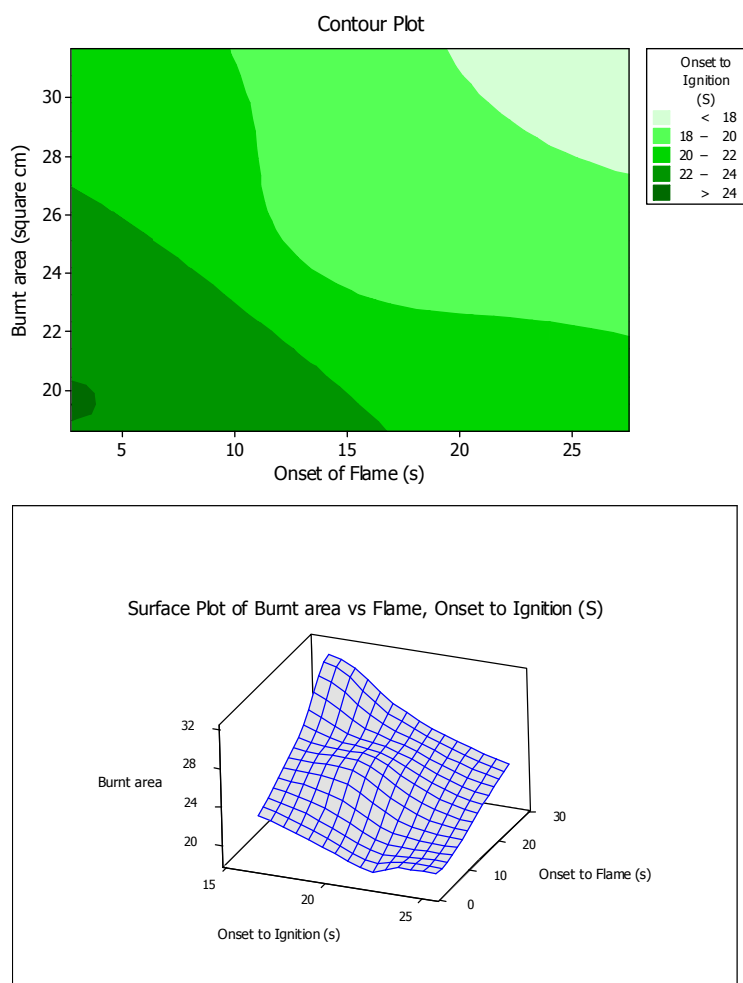
منحنی خط برازش^۱ بیانگر همبستگی بالا (بیش از ۸۰٪) و در بسیاری از موارد معنادار میان خواص کندسوزکنندگی بود (شکل ۹). نمودار ترازه^۲ و نمودار



شکل ۹- منحنی خط برازش میان زمان نقطه اشتعال و مساحت سطح سوخته.

Figure 9. Fitted-line plot among the onset to ignition and burnt area.

- 1- Fitted-line plot
- 2- Contour plot
- 3- Surface plot



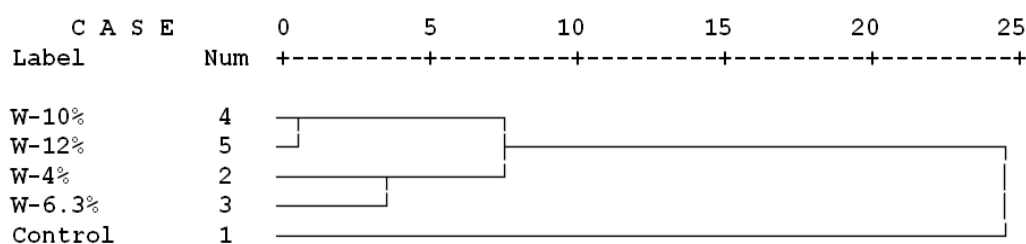
شکل ۱۰- نمودارهای ترازه و روکشی میان خواص مختلف بررسی شده در پژوهش حاضر.

Figure 10. Contour and surface plots among different properties investigated in the present project.

خواص کندسوزکنندگی و ثبات ابعاد چوب راش می‌شوند، ولی تأثیرشان نسبت به غلظت‌های ۱۰ و ۱۲ درصد کم‌تر است. از سوی دیگر، با توجه به خوشه‌بندی یکسان تیمارهای ۱۰ و ۱۲ درصد می‌توان دریافت که استفاده از این ماده در هر دو غلظت مذکور، تأثیر نسبتاً یکسانی به وجود می‌آورد. با توجه به اهمیت کاهش هزینه‌های مصرف مواد اولیه در صنعت و هزینه مصرف درصدهای بالاتر و لاستونیت و نظر به شباهت زیاد تیمارهای ۱۰ و ۱۲ درصد براساس نتیجه آزمون خوشه‌ای، غلظت ۱۰ درصد برای صنعت پیشنهاد می‌شود.

آزمون خوشه‌ای^۱، بر مبنای همه خواص کندسوزکنندگی و فیزیکی مورد بحث در پژوهش کنونی، نشان داد که تیمار شاهد به‌طور کامل در خوشه‌ای جداگانه قرار گرفت (شکل ۱۱). این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه و لاستونیت بر خواص اندازه‌گیری شده در پژوهش کنونی است. از میان تیمارهای اشباع با و لاستونیت، غلظت‌های ۴ و ۶/۳ درصد و ۱۰ و ۱۲ درصد در خوشه یکسانی قرار گرفتند (شکل ۱۱) که نشان‌دهنده تأثیر مشابه این تیمارها است. درواقع، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که غلظت‌های ۴ و ۶/۳، با وجودی که باعث بهبود

1- Cluster analysis



شکل ۱۱- آزمون خوشه‌ای میان پنج تیمار شاهد و نمونه‌های اشباع‌شده با ۴، ۶/۳، ۱۰ و ۱۲٪ ولاستونیت بر مبنای تمام ویژگی‌های کندسوزکنندگی، جذب آب، واکنشیدگی حجمی، و درصد خاکستر (میزان مصرف ولاستونیت = W).

Figure 11. Cluster analysis among the five treatments of control, 4, 6.3, 10, and 12% Wollastonite-impregnated specimens based on all of the fire-retarding, water absorption, volumetric swelling, and ash percentage properties (W = wollastonite consumption level).

به یک میزان مشاهده شد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج مای و میلیتز (۲۰۰۴) و هم‌چنین جانشو و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون خوشه‌ای در این پژوهش، غلظت ۱۰ درصد ولاستونیت به‌عنوان غلظت بهینه برای حصول بهترین نتایج با کم‌ترین هزینه جهت استفاده در بخش صنعت پیشنهاد می‌شود. به‌طورکلی، بسته به نوع کاربرد چوب و در نظر گرفتن صرفه اقتصادی حفاظت آن، امکان استفاده از ولاستونیت در سطوح مختلف غلظت (حتی ۶/۳ درصد) نیز وجود دارد و می‌تواند ویژگی‌های مقاومت به آتش و ثبات ابعاد چوب را به میزان مطلوبی نسبت به نمونه تیمار نشده بهبود بخشد؛ بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که ولاستونیت، قابلیت استفاده به‌عنوان یک ماده کندسوزکننده در حفاظت چوب را داراست.

سپاسگزاری

نگارندگان از شرکت تولید فرآورده‌های صنعتی و معدنی ورد که ماده ولاستونیت را برای پژوهش کنونی، اهدا نمودند، صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، امکان استفاده از ولاستونیت به‌عنوان ماده کندسوزکننده برای افزایش مقاومت به آتش و بهبود ثبات ابعاد چوب راش (*Fagus orientalis L.*) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ولاستونیت، مقاومت به آتش نمونه‌های اشباع‌شده افزایش یافت. بهترین نتایج مقاومت به آتش، در نمونه‌های تیمارشده با غلظت‌های ۱۰ و ۱۲ درصد مشاهده شد و در اغلب ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، این دو غلظت از لحاظ آماری در یک گروه قرار گرفتند. دلیل بهبود خواص کندسوزکنندگی این است که ولاستونیت به‌عنوان لایه‌ای غیرقابل اشتعال در مقابل آتش عمل کرده و نفوذ آتش به لایه‌های درونی‌تر چوبی را تأخیر می‌اندازد. افزون بر این، نتایج نشان داد که در نمونه‌های اشباع‌شده با ولاستونیت در تمامی غلظت‌ها، جذب آب اندازه‌گیری شده پس از ۲ و ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب، کاهش یافت، ولی اختلاف آماری معنی‌داری با نمونه‌های شاهد نشان نداد. درحالی‌که واکنشیدگی حجمی نمونه‌های تیمارشده با افزایش غلظت ولاستونیت کاهش یافت و این کاهش در سطوح مختلف غلظت (۶/۳، ۱۰ و ۱۲ درصد) تقریباً

منابع

1. Papadopoulos, A. N. (2010). Chemical modification of solid wood and wood raw material for composites production with linear chain carboxylic acid anhydrides: a brief review modified wood composites. *BioResources*. 5 (1), 1-8.
2. Khadiran, T., Jasmani, L., & Rusli, R. (2023). Application of nanomaterials for wood protection. Wood chapter in the book "Emerging nanomaterials: opportunities and challenges in forestry sectors". Springer Nature. ISBN 978-3-031-17377-6. 362p.
3. Taghiyari, H. T. (2011). Fire-retarding properties of nano-silver in solid woods. Springer: *Wood Science and Technology*. DOI 10.1007/s00226-011-0455-6.
4. Stark, N. M., White, R. H., Mueller, S. A., & Osswald, T. A. (2010). Evaluation of various fire retardants for use in wood flour-polyethylene composites. *Polymer Degradation and Stability*. 95, 1903-1910.
5. Kawalerczyk, J., Walkiewicz, J., Dziurka, D., & Mirski, R. (2023). Nanomaterials to improve fire properties in wood and wood-based composite panels. Wood chapter in the book "Emerging Nanomaterials: Opportunities and Challenges in Forestry Sectors". Springer Nature. ISBN 978-3-031-17377-6. 362p.
6. Parsapajouh, D., Faezipour, M., & Taghiyari, H. (2009). Industrial Timber Preservation, 4th Ed., Tehran University Publications, 657p. [In Persian]
7. Jinshu, S. H., Jianzhang, L., Wenrui, Z. H., & Derong, Z. H. (2007). Improvement of wood properties by urea-formaldehyde resin and nano-SiO₂. *Front. For. China*. 2 (1), 104-109.
8. Mantanis, G. I., & Papadopoulos, A. N. (2010). Reducing the thickness swelling of wood-based panels by applying a nanotechnology compound, *Eur. J. Wood Prod.* DOI 10.1007/s00107-009-0401-6.
9. Virta, R. L. (2001). Wollastonite: A versatile industrial mineral, In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey, 2p.
10. Kartal, S. N., Green, F., & Clausen, C. A. (2009). Do the unique properties of nanometals affect leachability of efficacy against fungi and termites, *International Bio*.
11. Luyt, A. S., Dramicanin, M. D., Antic, Z., & Djokovic, V. (2009). Morphology, mechanical and thermal properties of composites of polypropylene and nanostructured wollastonite filler. *Polymer testing*. 28, 348-356.
12. Khosravian, B. (2009). Evaluation of mechanical, physical, thermal, and morphological properties of hybrid composites and nano-hybrid composites polypropylene/wood flour/wollastonite. Ms. Thesis. Tehran University. 103p. [In Persian]
13. Mai, C., & Militz, H. (2004). Modification of wood with silicon compounds inorganic silicon compounds and sol-gel systems: a review. *Wood Science and Technology*. 37, 339-348.