

تأثیر نوع و ضخامت لایه مغزی در خواص مکانیکی و هدایت حرارتی پانل عایق ساختمانی ساخته شده با تخته تراشۀ جهت دار صنوبر

محراب مدهوشی^{۱*}، رسول باقری سراجی^۲، تقی طبرسا^۳

۱. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد، فرآورده‌های چندسازه چوبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳. استاد گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

چکیده

یکی از مباحث مهم در ساختمان، صرفه‌جویی انرژی همراه با تأمین مقاومت کافی در کل سازه است. در این زمینه، پانل‌های عایق ساختمانی به دلیل مزیت‌هایی مانند سازه‌های مستحکم، عایق بودن، صرفه‌جویی اقتصادی در ساخت و حفظ انرژی، همواره گزینه مناسبی به شمار می‌روند. هدف این تحقیق، بررسی خواص مکانیکی و هدایت حرارتی پانل‌های عایق ساختمانی ساخته شده با لایه رویی تخته تراشۀ جهت دار صنوبر و دو نوع لایه مغزی پلی‌استایرن منبسط شده و هوا (بدون لایه مغزی) با دو ضخامت لایه مغزی ۲ و ۴ سانتی‌متر است. تخته تراشۀ جهت دار با توجه دستی تراشه‌های صنوبر به صورت سه لایه عمود بر هم و با استفاده از چسب فنل فرمالدهید ساخته شد. در ادامه پانل‌های عایق ساختمانی ساخته شدند و برای کلاف دورتادور لایه مغزی پانل‌ها از چوب ماسیو استفاده شد. در ادامه پانل‌های عایق ساختمانی و نمونه‌های آزمایشی در ابعاد استاندارد تهیه شد و آزمون‌های خمشی، فشار موازی الیاف، مقاومت انفصالی خط چسب و هدایت حرارتی انجام گرفت. تحلیل آماری و نتایج نشان داد که با تغییر نوع لایه مغزی هوا به پلی‌استایرن، همه مقاومت‌های مکانیکی پانل عایق ساختمانی افزایش یافتند. افزایش ضخامت لایه مغزی نیز تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی پانل عایق ساختمانی داشت. به علاوه، نتایج نشان داد که نوع لایه مغزی در ضریب هدایت حرارتی تفاوت معنی‌داری نداشت، اما افزایش ضخامت لایه مغزی ممکن است تأثیر مثبتی در کاهش ضریب هدایت حرارتی در هر دو پانل با لایه مغزی هوا و پلی‌استایرن داشته باشد. **واژه‌های کلیدی:** پانل عایق ساختمانی، تخته تراشۀ جهت دار، پلی‌استایرن منبسط شده، مقاومت مکانیکی، هدایت حرارتی.

مقدمه

ساختمانی بیش از پیش توجه شود [۱، ۲]. برای این منظور می‌توان از فرآورده‌های مهندسی شده چوب در ساخت ساختمان استفاده کرد که افزون بر تأمین مقاومت کافی، وزن به نسبت کمی دارند که به تبع آن وزن کلی سازه نیز کاهش خواهد یافت [۳]. این فرآورده‌ها پیشرفت چشمگیری داشته‌اند و علاوه بر عناصر سازه‌ای باربر مهم مانند تیرهای لایه‌ای و مقاطع، امروزه به صورت پانل‌های

امروزه، توسعه شهرنشینی و افزایش سرعت ساخت و ساز سبب شده که در ساخت ساختمان‌های مسکونی و تجاری به مواردی مانند ذخیره انرژی و عایق کردن همراه با تأمین مقاومت‌های مکانیکی با ضریب اطمینان کافی در مواد

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۱۷۳۳۴۲۷۱۷۶

ساندویچی استفاده می‌شوند که حجم ماده اولیه در آنها به‌طور چشمگیری کاهش یافته است [۴].

این پانل‌های عایقی با نام تجاری «پانل عایق ساختمانی» (SIP^۱) کاربرد زیادی در ساختمان‌های چوبی دارند [۲]؛ مشابه دیگر ساختمان‌ها که انواع دیگری از این پانل‌ها با لایه‌های سطحی متنوع به‌کار می‌روند و عملکرد مقاومتی به‌نسبت خوبی نیز دارند. در لایه‌های سطحی این پانل‌ها از مواد مختلف مانند تخته سیمان‌های ساخته‌شده بر پایه اکسید منیزیم [۵] و مواد کم‌هزینه و گرمانرم شیشه و پلی‌پروپیلن [۶] می‌توان استفاده کرد. در این پانل‌ها برای مصارف سازه‌ای با تحمل نیروی زیاد مانند سیستم سقف و کف، برای لایه مغزی به‌طور معمول از مواد پرتراکم مانند پلی‌اورتان، پلی‌استایرن، پشم سنگ و پشم شیشه استفاده می‌شود، ولی در صورتی که تحمل نیروی زیاد ضرورتی نداشته باشد، مانند دیوارهای پوششی، می‌توان لایه مغزی را به‌صورت کنگره‌ای یا حتی فقط با هوا ساخت [۸، ۹]. بیشترین ماده به‌کاررفته به‌عنوان مغزی، مواد فوم‌شکل مانند پلی‌استایرن منبسط‌شده و پلی‌استایرن اکستروژده هستند. هرچند تنها در ۵ درصد از موارد از پلی‌اورتان نیز استفاده می‌شود و استفاده بسیار محدودی از فوم ایزوسیانات نیز گزارش شده است [۱۰، ۱۱]. همچنین باید تحقیقات بیشتری برای لایه‌های سطحی و مغزی این نوع پانل‌ها صورت بگیرد تا بتوان به استانداردی جهانی برای پانل عایق ساختمانی دست یافت.

ایده اول ساخت این پانل‌ها توسط آزمایشگاه فرآورده‌های جنگلی آمریکا در سال ۱۹۳۵ مطرح شد. در سال ۱۹۹۰ این مرکز پانلی با نام تجاری SIP همراه با فوم عایق، سخت و محکم را تولید کرد و به‌عنوان یک برند تجاری در خانه‌های چوبی به ثبت رساند [۱۲، ۱۳]. در این پانل ساندویچی سه‌لایه، لایه‌های سطحی وظیفه تأمین انواع مقاومت و لایه مغزی با ضخامت به‌نسبت زیاد وظیفه حفظ انرژی را دارند. با توجه به ارائه گزارش سازمان ملی ارزیابی آمریکا، ساختمان

ساخته‌شده با پانل عایق ساختمانی در برابر نیروهای خمشی و برشی مقاومت بیشتری از ساختمان معمولی دارند و ساختمان‌های ساخته‌شده با آنها در مقابل زلزله و توفان مقاومت‌های خوبی از خود نشان داده‌اند. همچنین، از جنبه اقتصادی، ساخت خود این پانل‌ها به‌نسبت سریع است و استفاده از این پانل‌ها سبب کاهش هزینه و افزایش سرعت ساخت ساختمان می‌شود [۱۴]. استفاده از این نوع پانل عایق ساختمانی به‌دلیل امکان افزایش وسعت پنجره و به‌تبع آن کنترل بهتر نور در روز، دارای چهار برابر ذخیره انرژی بیشتری نسبت به ساختمان‌های سنتی است و صرفه‌جویی انرژی بیشتری برای خانه‌های مسکونی در آب‌وهوای نیمه‌خشک را ممکن می‌کند [۱۰]. هرچند باید به این نکته توجه داشت که این پانل‌ها به‌دلیل انتشار گازهای فنولیک در داخل فضای ساختمان (مانند همه فرآورده‌های چوبی متصل‌شده با رزین‌های فنولیک) ممکن است برای سلامت زیان داشته و اثرهای منفی زیست‌محیطی نیز داشته باشند. به همین دلیل استفاده از یک لایه پوششی هرچند نازک مانند گچ تأثیر بسزایی برای ممانعت از انتشار گازهای آلاینده دارد [۱، ۲]. به همین دلیل در تحقیقات خارج از کشور، استفاده از مواد طبیعی مانند کف به‌جای تخته‌تراشه جهت دار پیشنهاد شده است و تحلیل نتایج مطابق آیین‌نامه‌های ایزو نشان داد این مواد اثرهای منفی زیست‌محیطی کمتری دارد [۱۵]؛ هرچند در داخل کشور دسترسی به منابع مشابه کف با محدودیت‌ها و چالش‌هایی همراه است.

در زمینه عملکرد حرارتی، نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که دیوار ساخته‌شده با پانل عایق ساختمانی با لایه مغزی پلی‌استایرن منبسط‌شده ۳۱ درصد عملکرد حرارتی بهتری در مقایسه با دیوار ساخته‌شده با چوب ماسیو دارد [۱۱]. این در حالی است که امروزه در حدود ۴۰ درصد انرژی مصرفی ایران در بخش ساختمان (مسکونی، تجاری و صنعتی) استفاده می‌شود [۲، ۱۶] که بخش زیادی از آن صرف سیستم گرمایشی و سرمایشی می‌شود و در این

هدایت حرارتی پانل عایق ساختمانی ساخته شده با تخته تراشه جهت دار صنوبر و دو نوع لایه مغزی پلی استایرن منبسط شده و هوا در ضخامت های مختلف است تا به عنوان اولین تحقیق در داخل کشور پتانسیل استفاده از آن در ساختمان سازی مشخص شود.

مواد و روش ها

مواد

مواد استفاده شده و متغیرهای مورد نظر در این تحقیق به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آورده شده است.

زمینه، پوشش ساختمان تأثیر چشمگیری بر مقدار مصرف انرژی یا حفظ آن دارد.

نوع پوشش ها و همچنین نوع لایه مغزی این پانل ها بر عملکرد در برابر آتش آنها نیز تأثیر می گذارد [۱۶]. حضور لایه گچی تا حدودی می تواند سرعت تخریب ناشی از آتش را کاهش دهد (هرچند در سازوکار عملکردی در برابر آتش، خود این لایه ممکن است تا حدودی خطر جداشدگی داشته باشد) و نوع لایه مغزی پلی اورتان نسبت به لایه مغزی پلی استایرن منبسط شده عملکرد بهتری دارد. هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی خواص مکانیکی و

جدول ۱. مواد استفاده شده

ردیف	نوع ماده	شرکت تولیدکننده	کشور تولیدکننده
۱	روکش صنوبر	دهکده روکش آمل	ایران
۲	چوب نراد	-	روسیه
۳	چسب فنول	عایق الکتریک	ایران
۴	چسب پلی اورتان	Akfix	ترکیه
۵	پلی استایرن منبسط شده (EPS)	میهن پانل	ایران

جدول ۲. متغیرهای بررسی شده در تحقیق

کد	نوع لایه مغزی		ضخامت لایه مغزی (cm)	
	A (هوا)	P (پلی استایرن)	۲	۴
A2	*		*	
A4	*			*
P2		*	*	
P4		*		*

ساخت تخته تراشه جهت دار صنوبر

در مرحله بعد، به منظور ساخت تخته تراشه جهت دار، تراشه ها به چسب فنل فرمالدهید (با مواد جامد ۶۸ درصد) در دستگاه چسب زن و با درصد اختلاط ۷ آغشته شدند و یک تخته اولیه با استفاده از یک قالب چوبی به ابعاد ۶۰×۳۵ سانتی متر تشکیل شد. برای تشکیل یک، تراشه ها به صورت ریزش دستی و جهت دهی شده در داخل سینی مخصوص به صورت سه لایه مجزا و به نسبت مساوی شکل دهی شدند، به طوری که تراشه های لایه های سطحی در جهت طول تخته و تراشه های لایه های میانی در جهت عمود بر این محور قرار گرفتند. سپس با قرار دادن فویل

برای این منظور، ابتدا روکش های به نسبت خشک صنوبر با ضخامت ۰/۴ میلی متر از کارخانه دهکده روکش آمل، خریداری و به آزمایشگاه منتقل شد و سپس با قیچی مخصوص به رشته های نهایی به ابعاد ۱۰×۲ سانتی متر تبدیل شد. تراشه های تهیه شده به مدت ۷ ساعت در آن با دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا رطوبت آنها خارج شود. سپس، تراشه های خشک شده در داخل نایلون های دولایه برای جلوگیری از تبادل رطوبتی با محیط و همچنین برای استفاده در مراحل بعدی ذخیره شدند.



شکل ۱. نمونه‌هایی از پانل‌های ساخته شده

آزمون خمش

آزمون خمش سه نقطه‌ای، مطابق استاندارد (اصلاح شده) ASTM E1803 و توسط دستگاه Instron آزمایشگاه مکانیک چوب دانشگاه تهران انجام گرفت. طول و عرض نمونه‌ها به ترتیب ۶۰ و ۵ سانتی‌متر و ضخامت در دو اندازه ۴ و ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مقادیر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته خمشی براساس روابط موجود محاسبه شد.

آزمون مقاومت انفصالی خط چسب

این آزمون مطابق استاندارد ASTM D1037-12 و توسط دستگاه Schenk ساخت آلمان و در آزمایشگاه مکانیک چوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام گرفت و نمونه‌ها در ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر با ضخامت‌های ۴ و ۶ سانتی‌متر انتخاب شدند (شکل ۲). حداکثر تنش و مقاومت انفصالی خط چسب مطابق روابط مربوطه محاسبه شد.



شکل ۲. نمونه‌های آزمون‌های انفصالی

آلومینیومی در دو طرف کیک و همچنین با استفاده از شابلون ۱۰ میلی‌متر، کیک تشکیل شده ابتدا تحت پیش‌پرس و سپس پرس اصلی گرم قرار گرفت. برای پرس اصلی، از دستگاه OTT ساخت آلمان با دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس، مدت ۱۰ دقیقه و فشار ۳۰ بار استفاده شد. در ادامه، به منظور تکمیل مرحله انعقاد رزین، تخته‌ها به مدت یک هفته در فضای آزمایشگاه در داخل گیره‌های دستی قرار گرفتند تا از تغییرات ابعادی آنها جلوگیری شود.

ساخت پانل عایق ساختمانی

در این مرحله تخته‌تراشه‌های جهت‌دار ساخته شده به اندازه‌های مورد نظر برش خوردند و برای صفحات دو طرف پانل عایق ساختمانی آماده شدند. برای کلاف دورتادور لایه مغزی، از چوب نراد با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد که با منگنه و چسب پلی‌وینیل استات به هم متصل شدند. ابعاد کلاف‌ها و نمونه‌ها با توجه به نوع آزمون‌های مورد نظر متفاوت بود. برای نمونه‌های پانل عایق ساختمانی با لایه مغزی پلی‌استایرن، فوم منبسط شده با ضریب فشردگی زیاد، توسط دستگاه صفحه‌بر برش داده شد و درون کلاف‌های چوبی قرار گرفت. برای نمونه‌های هوا، لایه‌های مغزی بدون هیچ‌گونه ماده خاصی در نظر گرفته شدند.

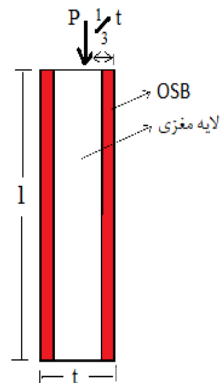
به منظور ایجاد اتصال صفحات تخته‌تراشه جهت‌دار به کلاف‌های چوبی و مغزی‌های پلی‌استایرن، از چسب با پایه پلی‌اورتان با نام تجاری Akfix P645 استفاده شد که توسط کاردک به شکل لایه‌های نازک روی سطح تخته‌تراشه جهت‌دار مالیده شد و قطعات پانل عایق ساختمانی به یکدیگر متصل شدند. قطعات ساخته شده توسط گیره دستی به مدت یک هفته در فضای آزمایشگاه نگهداری شدند. شکل ۱ نمونه‌ای از پانل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

آزمون فشار محوری

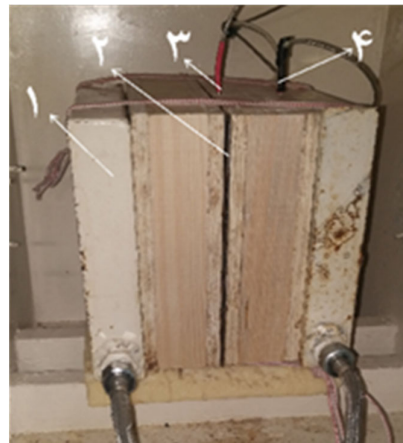
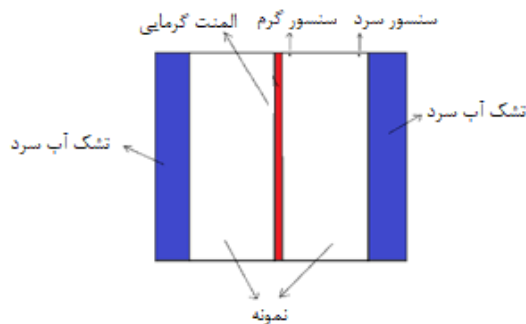
این آزمون مطابق استاندارد (اصلاح شده) ASTM E1803 و توسط دستگاه Instron در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام گرفت. فک مخصوصی برای این منظور طراحی و بر یک سوم ضخامت بالایی نمونه اعمال شد. به علت محدودیت در دستگاه، ابعاد نمونه به تناسب اندازه‌های ذکر شده در استاندارد کوچک شد و در نهایت نمونه به ابعاد 40×20 سانتی متر و با ضخامت‌های ۴ و ۶ سانتی متر آزمون شد (شکل ۳).

آزمون هدایت حرارتی

این آزمون با استفاده از دستگاه آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران مطابق استاندارد ASTM C177 انجام گرفت. ابعاد نمونه استاندارد 20×20 سانتی متر در دو ضخامت ۴ و ۶ سانتی متر در نظر گرفته شد و برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی هر بار دو نمونه در داخل دستگاه در یک محیط ایزوله قرار گرفت. سطح مقطع بالایی یکی از این نمونه‌ها توسط مته سوراخ شد تا حسگرهای حرارتی در داخل نمونه قرار گیرند (شکل ۴).



شکل ۳. آزمون فشار محوری روی پانل‌های عایق ساختمانی



شکل ۴. نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی: ۱. تشک آب سرد؛ ۲. المنت گرمایی؛ ۳. حسگر گرم؛ ۴. حسگر سرد.

$$A = \text{مساحت سطح نمونه (m}^2\text{)}$$

تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و آزمون فاکتوریل کامل به وسیله نرم‌افزار SPSS انجام گرفت و با استفاده از روش تجزیه واریانس، تأثیر مستقل و متقابل متغیرها ارزیابی و با استفاده از نرم‌افزار اکسل نمودارهای مورد نظر رسم شد.

نتایج و بحث

نتایج کلی مقادیر محاسبه شده نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

مقدار ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها از طریق رابطه

زیر محاسبه شد:

$$K = \frac{q \Delta X}{A \Delta t} \quad (1)$$

K = مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی جسم (W/m.k)

q = عدد نشان داده شده توسط دستگاه وات‌متر. چون

صفحه فلزی بر سطح دو نمونه برخورد دارد، مقدار q بر

دو تقسیم می‌شود (W)

ΔX = فاصله میان دو حسگر سرد و گرم (m)

Δt = اختلاف دمای میان حسگر سرد و گرم برحسب

کلین (K)

جدول ۳. میانگین مقادیر اندازه‌گیری خواص مکانیکی و ضریب هدایت حرارتی پانل‌های عایق ساختمانی

پلی‌استایرن		هوا		نوع لایه مغزی
۴	۲	۴	۲	ضخامت (cm)
۱۷/۴۱	۱۳/۸۴	۱۲/۱۲	۱۰/۶۹	مقاومت خمشی (MPa)
۲۷۱۷	۴۳۰۴	۲۷۴۱	۳۴۷۴	مدول خمشی (MPa)
۱/۱۷۴	۰/۹۷۹	۰/۹۶۷	۰/۷۶۳	تنش فشار محوری (MPa)
-۰/۳۱۳	-۰/۲۶۷	-۰/۲۷	-۰/۲۲	مقاومت انفضالی خط چسب (MPa)
-۰/۰۵۳۳	-۰/۰۵۷۸	-۰/۰۵۹	-۰/۰۷۰۹	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)

آزمون خمش

اما مدول الاستیسیته برای نمونه با ضخامت ۴ سانتی‌متر به ۲۷۲۹/۱۶ مگاپاسکال و برای نمونه با ضخامت ۲ سانتی‌متر به ۳۸۸۹/۳۳ مگاپاسکال (با افزایش ۴۲/۵۱ درصد) می‌رسد (شکل ۵ ب).

مطابق جدول آنالیز واریانس (جدول ۴) اثر متقابل نوع لایه مغزی و ضخامت لایه مغزی بر مقاومت خمشی معنادار است. مقاومت خمشی در پانل‌های با لایه مغزی به ضخامت ۲ سانتی‌متر (۱۳/۸۴ مگاپاسکال) در مقایسه با پانل‌های با لایه مغزی پلی‌استایرن با ضخامت ۴ سانتی‌متر (۱۷/۴۱ مگاپاسکال) ۲۵/۷۹ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۵ الف). همچنین مقاومت خمشی در نمونه‌های با لایه مغزی هوا و ضخامت ۴ سانتی‌متر (۱۲/۱۲۶ مگاپاسکال) در مقایسه با لایه مغزی ۲ سانتی‌متر، ۱۳/۴۷ درصد کاهش می‌یابد و به ۱۰/۶۹ مگاپاسکال می‌رسد.

با توجه به جدول آنالیز واریانس (جدول ۴)، مقاومت خمشی پانل عایقی مورد نظر تحت تأثیر معنی‌دار نوع لایه مغزی است و مقدار آن در پانل با لایه مغزی هوا (۱۱/۴۱ مگاپاسکال) در مقایسه با پانل با لایه مغزی پلی‌استایرن (۱۵/۶۲ مگاپاسکال)، ۳۶/۸۹ درصد کاهش یافته است (شکل ۵ الف). درباره تأثیر نوع ماده مغزی بر مقدار مدول الاستیسیته، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، هرچند در پانل‌های با لایه مغزی پلی‌استایرن بیشتر از پانل‌های با لایه مغزی هوا بود (شکل ۵ ب).

نتایج همچنین نشان داد (جدول ۴) که ضخامت لایه مغزی ۴ سانتی‌متر و ۲ سانتی‌متر به ترتیب دارای مقاومت خمشی ۱۴/۰۵ و ۱۲/۹۸ مگاپاسکال (کاهش ۸/۲۴ درصد) است، هرچند این اختلاف معنی‌دار نیست (شکل ۵ الف).

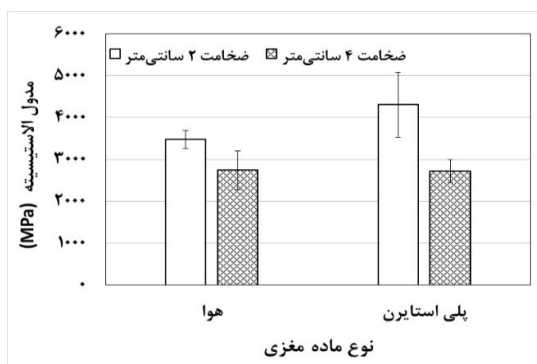
اول منحنی تنش-کرنش افزایش می یابد. افزایش ضخامت لایه مغزی تا حدی مقاومت خمشی نمونه ها را افزایش داد که ویژگی مثبت و مهمی است. به طور کلی، در ضخامت بزرگ تر لایه مغزی مترکم تر و سخت تر خواهد بود و تحمل بار بیشتری از خود نشان خواهد داد [۴، ۱۷]. اما در مقابل مدول الاستیسیته نمونه ها در ضخامت بیشتر کاهش یافت که دلیل احتمالی آن، محدودیت های آزمایش و دشواری دستیابی به نمونه های طولی تر در ضخامت های بیشتر و افزایش تأثیر نیروهای برشی است [۴، ۱۳].

در پانل های عایق ساختمانی مطالعه شده، وجود لایه مغزی پلی استایرن و به تبع آن وجود خط چسب بیشتر، سبب افزایش سطح چسبندگی می شود که خود می تواند عامل تقویت کننده در افزایش مقاومت خمشی نمونه ها در نظر گرفته شده و در نتیجه تنش در کل پانل یکنواخت تر اعمال شود [۵، ۹]. یکی از عوامل تأثیرگذار در مدول الاستیسیته مواد، توانایی میزان جابه جایی یا تغییر ابعاد در ماده است که در این تحقیق، با تغییر نوع لایه مغزی از هوا به پلی استایرن، امکان جابه جایی ماده در زیر بار و تغییر شکل آن و به عبارت دیگر رفتار الاستیک نمونه در ناحیه

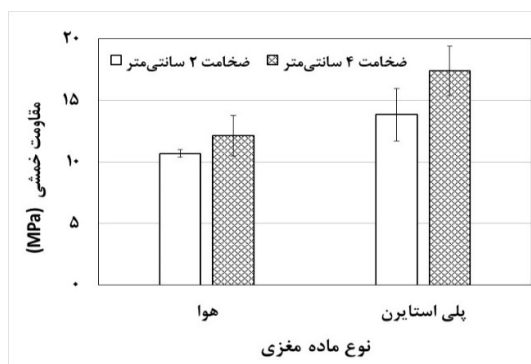
جدول ۴. تجزیه واریانس اثر عوامل مختلف بر خواص پانل های عایق ساختمانی

منبع تغییرات	خواص نمونه ها	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	sig
لایه مغزی	مقاومت خمشی	۱	۵۳/۲۵۷	۵۳/۲۵۷	۳۲/۳	۰/۰۰۳**
	مدول الاستیسیته خمشی	۱	۴۸۷۶۳۰/۰۸	۴۸۷۶۳۰/۰۸	۲/۹۳	۰/۱۸۷ ^{ns}
	تنش فشار محوری	۱	۰/۱۳۴	۰/۱۳۴	۳/۵	۰/۰۹۷ ^{ns}
	مقاومت انفصالی خط چسب	۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۱۶/۱۵	۰/۰۰۴**
	ضریب هدایت حرارتی	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۹۴/۶	۰/۰۰**
ضخامت	مقاومت خمشی	۱	۳/۴۳۵	۳/۴۳۵	۴/۳۶	۰/۳۰۳ ^{ns}
	مدول الاستیسیته خمشی	۱	۴۰۳۷۹۶۰/۰۸	۴۰۳۷۹۶۰/۰۸	۲۵/۱۲	۰/۰۰۳**
	تنش فشار محوری	۱	$۶/۱۲ \times 10^{-۵}$	$۶/۱۲ \times 10^{-۵}$	۰/۰۰۲	۰/۰۹۷ ^{ns}
	مقاومت انفصالی خط چسب	۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۱۸/۳۶	۰/۰۰۳**
	ضریب هدایت حرارتی	۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۵۳/۸	۰/۰۰**
لایه مغزی * ضخامت	مقاومت خمشی	۱	۱۸/۷۵	۱۸/۷۵	۱۲/۷	۰/۰۲۳**
	مدول الاستیسیته خمشی	۱	۵۴۶۵۶۰/۰۸	۵۴۶۵۶۰/۰۸	۱/۵۲	^{ns} ۰/۱۶۵
	تنش فشار محوری	۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۳/۱۶	۰/۱۱۳ ^{ns}
	مقاومت انفصالی خط چسب	۱	$۲/۱۳ \times 10^{-۵}$	$۲/۱۳ \times 10^{-۵}$	۰/۰۷	^{ns} ۰/۷۹
	ضریب هدایت حرارتی	۱	$۴/۱۴ \times 10^{-۵}$	$۴/۱۴ \times 10^{-۵}$	۳۹/۸۱	۰/۰۰**
خطا	مقاومت خمشی	۸	۲۲/۷	۲/۸۲۷		
	مدول الاستیسیته خمشی	۸	۱۸۶۸۸۰۶	۲۳۳۶۰۰/۷۵		
	تنش فشار محوری	۸	۰/۳۰۴	۰/۰۳۸		
	مقاومت انفصالی خط چسب	۸	۰/۰۰۲	۰		
	ضریب هدایت حرارتی	۸	$۸/۳۳ \times 10^{-۶}$	$۱/۰۴ \times 10^{-۶}$		
کل	مقاومت خمشی	۱۲	۲۳۹۱/۰۸۵			
	مدول الاستیسیته خمشی	۱۲	۱۳۸۳۵۴۵۸۳			
	تنش فشار محوری	۱۲	۱۱/۸۷۵			
	مقاومت انفصالی خط چسب	۱۲	۰/۸۸۸			
	ضریب هدایت حرارتی	۱۲	۰/۰۴۴			

** معنی داری در سطح ۰/۰۱، ^{ns}: معنی دار نبودن



(ب)



(الف)

شکل ۵. اثر نوع و ضخامت لایه مغزی بر الف) مقاومت خمشی؛ ب) مدول الاستیسیته پانل عایق ساختمانی.

لایه مغزی پلی استایرن و ضخامت ۴ سانتی‌متر بزرگ‌تر از

مقدار آن در سایر نمونه‌ها به دست آمد.

وجود لایه مغزی پلی استایرن و به تبع آن وجود خط

چسب بیشتر را می‌توان دلیل افزایش مقاومت انفصالی

خط چسب در نمونه‌های با لایه مغزی پلی استایرن دانست

[۹]. در نمونه با لایه مغزی هوا، حضور فقط کلاف دور

سبب می‌شود تا مقاومت کمتری نسبت به نمونه با لایه

مغزی پلی استایرن به وجود آید. همچنین تمرکز تنش در

نمونه‌های با لایه مغزی ۴ سانتی‌متر به علت ارتفاع بیشتر،

نسبت به نمونه با لایه مغزی ۲ سانتی‌متر کمتر است و

به علت دور بودن تمرکز تنش سبب می‌شود که نمونه با

ضخامت لایه مغزی ۴ سانتی‌متر دارای مقاومت انفصالی

خط چسب بزرگ‌تری باشد [۴، ۱۳].

مقاومت انفصالی خط چسب

با توجه به نتایج آنالیز واریانس (جدول ۴) نوع لایه مغزی بر

مقاومت انفصالی خط چسب تأثیر معنی‌داری دارد و مقدار آن

در پانل‌های با لایه مغزی پلی استایرن از ۰/۲۹ مگاپاسکال به

۰/۲۵ مگاپاسکال در نمونه‌های با لایه مغزی هوا می‌رسد

(کاهش ۱۳/۸ درصد) (شکل ۶ الف). اثر ضخامت لایه مغزی

بر مقاومت انفصالی خط چسب نیز معنی‌دار است (جدول ۴)

و پانل‌های با ضخامت لایه مغزی ۴ سانتی‌متر و ۲ سانتی‌متر

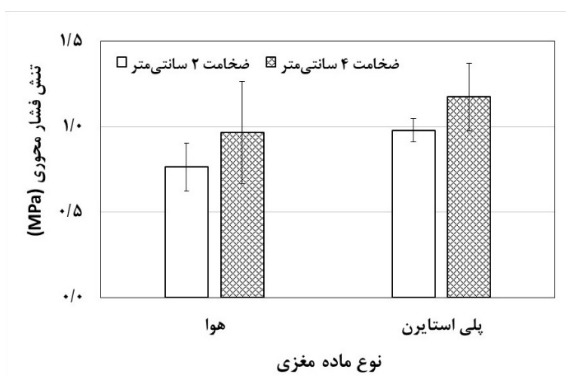
به ترتیب دارای مقادیر ۱۴/۰۵ و ۱۲/۹۸ مگاپاسکال (کاهش

۸/۲۴ درصدی) هستند (شکل ۶ الف).

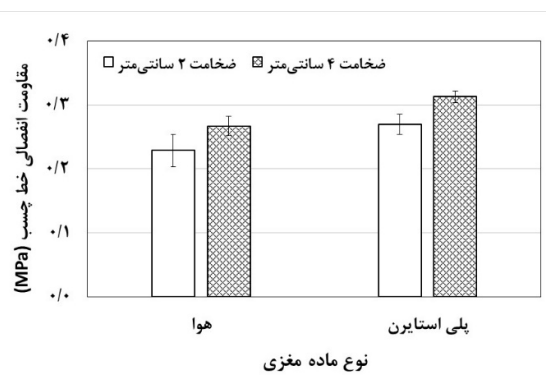
نوع لایه مغزی و ضخامت لایه مغزی بر مقاومت

انفصالی خط چسب به طور همزمان تأثیر معناداری ندارند

(جدول ۴). هرچند مقدار این مقاومت در نمونه‌های با



(ب)



(الف)

شکل ۶. اثر نوع و ضخامت لایه مغزی بر الف) مقاومت انفصالی خط چسب؛ ب) تنش فشار محوری پانل عایق ساختمانی.

آزمون فشار محوری

با توجه به جدول آنالیز واریانس (جدول ۴) نوع لایه مغزی بر تنش فشار محوری تأثیر معنی داری ندارد. هرچند مقدار آن در پانل با لایه مغزی پلی استایرن و هوا به ترتیب ۱/۰۷۶۹ و ۰/۸۶۴ مگاپاسکال (کاهش ۱۹/۷۶ درصد) برآورد شد. همچنین مطابق نتایج آنالیز واریانس، ضخامت لایه مغزی بر تنش فشار محوری تأثیر معنی داری نداشت. مقدار این تنش در پانل با لایه مغزی با ضخامت ۴ و ۲ سانتی متر، به ترتیب ۱/۰۷۰۵ و ۰/۸۷۱ مگاپاسکال (کاهش ۱۸/۶۳ درصد) محاسبه شد.

در همین زمینه، جدول آنالیز واریانس (جدول ۴) نشان می دهد که نوع لایه مغزی و ضخامت آن بر تنش فشار محوری تأثیر متقابل معناداری ندارند. مقدار این تنش در پانل با لایه مغزی هوا به ضخامت ۴ سانتی متر ۰/۹۶۷ مگاپاسکال است و زمانی که از لایه مغزی ۲ سانتی متری استفاده شد، این ویژگی ۲۱ درصد کاهش یافت و به ۰/۷۶۳ مگاپاسکال رسید. به همین ترتیب، مقدار این تنش در پانل با لایه مغزی پلی استایرن به ضخامت ۴ سانتی متر ۱/۱۷۴ مگاپاسکال برآورد شد و در ضخامت ۲ سانتی متر به ۰/۹۷۹۱ مگاپاسکال (کاهش ۱۶/۶ درصد) رسید (شکل ۶ ب).

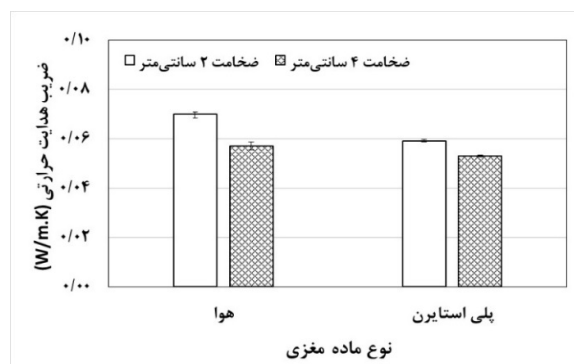
سازوکار رفتار پانل در مقابل بار فشار محوری، ارتباط نزدیک با مقاومت خط چسب و همچنین سطح مقطع زیر بار دارد [۹]. به همین دلیل، الگوی تغییرات مقدار این تنش از الگوی تغییرات مقاومت انفصالی خط چسب تبعیت می کند و همان بحث ارائه شده برای این ویژگی تعمیم پذیر است. بنابراین باید توجه داشت که با تغییر ضخامت لایه مغزی از ۲ به ۴ سانتی متر به دلیل ثابت بودن دیگر ابعاد نمونه، سطح مقطع زیر بار افزایش می یابد و نیرو و تنش فشاری بیشتری برای شکستن آن لازم است. در همین زمینه، لایه مغزی پلی استایرن مقاومت فشاری بیشتری را در مقایسه با لایه مغزی هوا به وجود می آورد [۳].

آزمون هدایت حرارتی

مطابق نتایج آنالیز واریانس (جدول ۴) نوع لایه مغزی بر ضریب هدایت حرارتی پانل تأثیر معنی داری دارد و از ۰/۰۵۶۲ وات بر مترکلون در پانل با لایه مغزی پلی استایرن به ۰/۰۶۴۴ وات بر مترکلون در نمونه با لایه مغزی هوا می رسد (افزایش ۱۴/۴۳ درصد). همچنین مشخص شد (جدول ۴) که ضریب هدایت حرارتی در دو ضخامت لایه مغزی اختلاف معنی داری دارد و مقدار آن در پانل با ضخامت لایه مغزی ۴ و ۲ سانتی متر به ترتیب ۰/۰۵۵ و ۰/۰۶۵ وات بر مترکلون است که ۱۶/۱۶ درصد افزایش می یابد. به عبارت دیگر، افزایش ضخامت تأثیر بسزایی بر کاهش ضریب هدایت حرارتی پانل دارد و سبب افزایش خواص عایقی آن می شود (شکل ۷).

اثر متقابل نوع لایه مغزی و ضخامت آن (جدول ۴)، بر ضریب هدایت حرارتی معنادار است. ضریب هدایت حرارتی پانل با لایه مغزی هوا و ضخامت ۴ و ۲ سانتی متر، به ترتیب ۰/۰۵۷۸ و ۰/۰۷ وات بر مترکلون اندازه گیری شد که ۱۷/۴ درصد افزایش یافته است. ضریب هدایت حرارتی پانل با لایه مغزی پلی استایرن و ضخامت ۴ و ۲ سانتی متر نیز به ترتیب ۰/۰۵۳۳ و ۰/۰۵۸ وات بر مترکلون محاسبه شد که ۹/۶۶ درصد افزایش یافته است (شکل ۷).

به طور کلی، پانل با لایه مغزی پلی استایرن به دلیل ضریب هدایت حرارتی کمتر آن نسبت به هوا، خواص عایق حرارتی بهتری را از خود نشان می دهد که مطابق با توصیه مقررات ملی ساختمان ایران مبحث ۱۹ است [۱۸]. همچنین هر دو نمونه لایه مغزی با ضخامت ۴ سانتی متر، دارای ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به نمونه با ضخامت لایه مغزی ۲ سانتی متری است. بنابراین به طور کلی می توان گفت لایه مغزی پلی استایرن با ضخامت بیشتر عایق بهتری در برابر انتقال حرارت است و از نظر ذخیره انرژی می تواند در اولویت باشد. این موضوع در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است [۱۰].



شکل ۷. اثر نوع و ضخامت لایه مغزی بر ضریب هدایت حرارتی پانل عایق ساختمانی

توجه به این تحقیق می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از لایه مغزی پلی‌استایرن به علت افزایش سطح تماس چسب با لایه سطحی، سبب می‌شود تا مقاومت‌های مکانیکی پانل بزرگ‌تر از نمونه با لایه مغزی هوا باشد. همچنین افزایش ضخامت لایه مغزی پانل، سبب افزایش مقاومت‌های مکانیکی مطالعه‌شده (به جز مدول الاستیسیته) می‌شود. به‌طور کلی، پانل ساخته‌شده با لایه مغزی پلی‌استایرن و ضخامت بیشتر، ضریب هدایت حرارتی کمتری در مقایسه با پانل لایه مغزی هوا دارد و در حفظ انرژی اولویت بیشتری می‌تواند داشته باشد. هرچند مشکلات احتمالی زیست‌محیطی و ایمنی آن باید در نظر گرفته شود. در همین زمینه، پانل‌های با لایه مغزی هوا و ضخامت‌های بیشتر به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی به نسبت کم (عایق حرارتی مطلوب) و مقاومت‌های مکانیکی تا حدودی کمتر از لایه مغزی پلی‌استایرن، در موارد کاربردی که اعمال نیروی کمتری ضروری است به‌عنوان انتخاب مناسب و اقتصادی می‌تواند مطرح شود.

به همین ترتیب، در صورت استفاده از هوا به‌عنوان لایه مغزی، استفاده از ضخامت‌های بیشتر برای پانل‌ها به دلیل عایق بودن بهتر در مقابل انتقال حرارت انتخاب مناسب‌تری محسوب می‌شود، زیرا افزایش ضخامت تأثیر بسزایی بر ضریب هدایت حرارتی نمونه دارد. براساس قانون مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۱۸]، پلی‌استایرن و هوا عایق‌های بسیار خوبی هستند و در همین زمینه با افزایش ضخامت لایه مغزی عبور گرما از پانل کندتر صورت می‌گیرد و نشان‌دهنده عایق بودن بهتر آن است، اما ممکن است به‌علت مشکل تجمع گرما در سطح و در صورت افزایش حرارت، احتمال آتش‌سوزی بیشتر شود.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، ساخت و بررسی خواص مکانیکی و حرارتی پانل عایق ساختمانی با استفاده از تخته‌تراشه جهت‌دار صنوبر در لایه رویی و پلی‌استایرن منبسط‌شده در لایه مغزی بود تا بتوان آن را به‌صورت صنعتی معرفی و در ساخت ساختمان‌های موجود در ایران اعم از بتن، فلزی و چوبی استفاده کرد. به‌طور کلی، با

References

- [1]. Aditya, L., Mahlia, T.M.I., Rismanchi, B., Ng, H.M., Hasan, M.H., Metselaar, H.S.C., Muraza, Oki, and Aditya, H.B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73: 1352-1365.
- [2]. Madhoushi, M. (2016) *Green Building Biomaterials*. Iranian Students Booking Agency.
- [3]. Jacques, E., Makar, J. (2019). Behavior of structural insulated panels subjected to short-term axial loads. *Journal of Structural Engineering*, 145(11): 4019-4118.

- [4]. Jacques, E., and Makar, J. (2019). Behaviour of structural insulated panels (SIPs) subjected to short-term out-of-plane transverse loads. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(9): 858-869.
- [5]. Smakosz, L., and Tejchman, J. (2014). Evaluation of strength, deformability and failure mode of composite structural insulated panels. *Materials and Design*, 54: 1068-1082.
- [6]. Mousa, M.A., and Uddin, N. (2012). Structural behavior and modeling of full-scale composite structural insulated wall panels. *Engineering Structures* 41: 320-334.
- [7]. Vaidya, A., Uddin, N., and Vaidya, U. (2010). Structural characterization of composite structural insulated panels for exterior wall applications. *Journal of Composites for Construction*, 14 4): 464-469.
- [8]. Villasmil, W., Fischer, L.J., and Worlitschek, J. (2019). A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103: 71-84.
- [9]. Ghofrani, M., Pishan, S., and Talaei, A. (2014). The effect of core type and skin on the mechanical properties of lightweight sandwich panels. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28 (4): 720-731.
- [10]. Hester, N., Li, K., Schramski, J.R., and Crittending, J. (2012). Dynamic modeling of potentially conflicting energy reduction strategies for residential structures in semi-arid climates. *Journal of Environmental Management*, 97: 148-153.
- [11]. Panjehpour, M., Ali, A.A., and Voo, Y.L. (2013). Structural insulated panels: past, present, and future. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 3(1): 2-8.
- [12]. Akay, M., and Hanna, R. (1990). A comparison of honeycomb-core and foam-core carbon-fibre/epoxy sandwich panels. *Composites*, 21(4): 325-331.
- [13]. Basunbul, I.A., Saleem, M., and Sulaimani Al, G.J. (1991). Flexural behavior of ferrocement sandwich panels. *Cement and Concrete Composites*, 13: 21-28.
- [14]. Kermany, A., and Hairstans, R. (2006). Racking performance of structural insulated panels. *Journal of Structural Engineering*, 11: 1806-1812.
- [15]. Batouli, S.M., and Zu, Y. (2013). Comparative life-cycle assessment study of kenaf fiber-based and glass fiber-based structural insulation panels. *Int. Conf. Construction and Real Estate Management*, 377-388.
- [16]. Hopkin, D.J., Lennon, T., El-Rimawi, J., and Silberschmidt, V. (2011). Full-scale natural fire tests on gypsum lined structural insulated panel (SIP) and engineered floor joist assemblies. *Fire Safety Journal*, 46: 528-542.
- [17]. Erickson, M.D., Kallmeyer, A.R., and Kellogg, K.G. (2005). Effect of temperature on the low-velocity impact behavior of composite sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 7: 245-264.
- [18]. National Building Regulations. (2011). Topic 19 Energy Consumption Saving. Ministry of Housing and Urban Development, 172 p.

Effect of type and thickness of core on mechanical properties and thermal conductivity transfer of SIP made of poplar OSB

M. Madhoushi*; Assoc. Prof., Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran.

R. Bagheri Seraj; M.Sc. Graduated in Wood Composites, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran.

T. Tabarsa; Prof., Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran.

(Received: 24 March 2020, Accepted: 15 July 2020)

ABSTRACT

One of the most important issues in a building is energy saving with adequate resistance throughout the structure. In this regard, structural insulation panels (SIPs) have always been considered as viable options because of their advantages such as providing robust structures, insulation, economical construction and energy conservation. The purpose of this study was to investigate the mechanical properties and thermal conductivity of building SIP made with poplar OSB as skin layers and two types of core layers (expanded polystyrene and air) in two thicknesses of 2 and 4 cm. OSB was made by hand-justified poplar strands in three layers perpendicular to each other using phenol-formaldehyde glue. Then the SIPs were made and the solid wood was used as a frame for core layer of panels. Then, SIPs and test samples were prepared in standard dimensions followed by experimental testing of bending, compression parallel to fibers, withdrawal strength of adhesive line, and heat transfer. Statistical analysis and the results showed that by changing the core type from air to polystyrene all mechanical strengths of the building insulation panels increased. Increasing the thickness of the core layer also had a positive effect on the mechanical properties of the building insulation panels. Moreover, the type of core layer of air and polystyrene had no significant effect in the thermal conductivity, however, increasing the thickness of core layer had a positive effect on increasing the thermal resistance in both types of panels.

Keywords: Extended polystyrene, Mechanical properties, OSB, Structural insulation panel (SIP), Thermal conductivity.

* Corresponding Author, Email: madhoushi@gau.ac.ir, Tel: +981732427176