



بررسی تجربی اثر لیگنین‌زدایی چوب‌های رایج در ایران بر عملکرد مولد بخار خورشیدی سطحی

علی امیری جاغرق^{۱*}، جعفر جماعتی^۱، حمید نیازمند^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، فردوسی مشهد، مشهد، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

چکیده

استفاده از جاذب‌های چوبی، یکی از روش‌های موثر در تولید مستقیم بخار خورشیدی شناخته شده‌است، با این حال تنها چوب‌های با فرآوری بالا گزینه‌ی مناسب این سیستم‌ها هستند. از این‌رو این پژوهش با بررسی اثر حذف لیگنین از جاذب چوبی بر عملکرد مولد بخار به دنبال این هدف است که طیف گسترده‌تری از چوب‌ها به عنوان جاذب سطحی مطرح شوند. در این مطالعه تجربی شش نمونه چوب درختان رایج در کشور ایران با استفاده از محلول ۲٫۵ مولار NaOH و ۰٫۴ مولار Na₂SO₃ لیگنین‌زدایی شد. در اثر لیگنین‌زدایی میکروکانال‌های بزرگتری در بافت چوب ایجاد شده و تخلخل تمامی نمونه‌ها تقریباً به ۰٫۷۶ افزایش می‌یابد. در مولد سطحی با جاذب چوب صنوبر طبیعی کربن‌دهی شده، نرخ تبخیر ۳٫۶۳ kg/m²hr به دست آمد که ۱۰۱ درصد افزایش نسبت به مولد حجمی نشان می‌دهد. چوب‌هایی که نرخ تبخیر اولیه آن‌ها پایین است، پس از عملیات لیگنین‌زدایی با افزایش قابل توجهی در نرخ تبخیر مواجه می‌شوند. بیشترین افزایش نرخ تبخیر در چوب سپیدار سرخ مشاهده شد که با ۲۵ درصد افزایش، به ۳٫۳۵ kg/m²hr رسید. یکی از مشکلات جدی مولدهای بخار سطحی، رسوب نمک روی سطح جاذب است. در این پژوهش پس از لیگنین‌زدایی، رسوب نمک روی هیچ‌یک از نمونه‌ها مشاهده نشد.

کلمات کلیدی: مولد بخار خورشیدی سطحی؛ جاذب چوبی؛ لیگنین‌زدایی؛ نرخ تبخیر؛ بازده تبخیر.

Experimental Investigating the effects of delignification of common woods in Iran on the performance of Interfacial solar steam generators

A. Amiri-Jaghargh^{1,*}, J. Jamaati¹, H. Niazmand²

¹Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

²Prof., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

The use of wood absorbers has been recognized as an effective method for the direct production of solar steam. However, only highly processed wood is suitable for such systems. Thus, the present study aims to investigate the impact of delignification on the performance of wooden absorbers in interfacial solar steam generators, with the goal of expanding the range of wood that can be used as surface adsorbents. In this experimental study, six wood samples from Iran were treated with lignin removal solvent (2.5 M NaOH and 0.4 M Na₂SO₃). After delignification, the porosity of all the samples increased to approximately 0.76, providing larger microchannels in the wood tissues. For an interfacial solar steam generator equipped with a carbonized natural poplar wood absorber, evaporation rate of 3.63 kg/m²hr was achieved, which was a 101% improvement compared to a volumetric solar steam generator. The delignification process had a significant impact on woods with naturally low evaporation rates, with the highest increase in evaporation rate observed in red poplar wood (25 %), reaching a rate of 3.35 kg/m²hr. Furthermore, no salt deposition was observed on any of the samples after delignification, which is a significant issue in interfacial solar steam generators.

Keywords: Interfacial solar steam generator; Wooden absorber; Delignification; Evaporation rate.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۳۳۴۳۴۳۰۱۰

آدرس پست الکترونیک: amirizj@gmail.com a.amiri@razi.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه چالش کمبود آب آشامیدنی بخش قابل توجهی از جهان را تحت تاثیر قرار داده‌است که برای رفع آن، تصفیه و شیرین سازی آب راه‌حلی اساسی شناخته می‌شود. با وجود فراوانی آب شور در سطح زمین، شیرین‌سازی آب با روش‌هایی چون تبخیر-تقطیر، الکترودیالیز و اسمز معکوس علاوه بر هزینه‌ی تمام شده بالا، مشکلات زیست محیطی را نیز در پی دارد [۱]. در این شرایط، استفاده از آب‌شیرین‌کن خورشیدی راهکاری است که می‌تواند علاوه بر رفع نیاز بشر به آب شیرین، در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز بسیار مؤثر باشد.

مولد بخار یک بخش اساسی از دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. با توجه به پایین بودن بازده تبدیل تابش خورشیدی به گرما و همچنین اتلافات زیاد در این وسیله، تلاش‌های زیادی برای بهبود نرخ تبخیر و افزایش بازده انرژی در آن انجام پذیرفته است. مولدهای بخار در دو نوع حجمی و سطحی وجود دارند. در مولدهای بخار حجمی، تابش خورشیدی موجب گرم شدن تمام حجم آب موجود در مخزن مولد بخار می‌شود. این مسئله با اتلافات حرارتی زیادی از بدنه دستگاه همراه است. در سیستم‌های تبخیر حجمی می‌توان با استفاده از نانو سیالات، جذب تابش خورشیدی در مولد را تا حد زیادی بهبود داد. به این منظور از نانوذرات مختلفی از قبیل نانوذره طلا [۲]، نانوذره کربنی [۳]، نانوذرات ترکیبی تیتانیوم اکسید/نقره [۴] و نانوذرات کربنی/اکسید آهن [۵] استفاده شده است. جین و همکاران [۶] نشان دادند، با افزایش غلظت نانوذرات می‌توان بازده تبخیر را تا حد زیادی بهبود داد. در این مطالعه با افزایش غلظت نانوذرات طلا از صفر تا ۱۲/۷۵ ppm بازده تبخیر از ۱۵ درصد به ۸۰ درصد افزایش یافت.

از سوی دیگر، در مولدهای بخار سطحی با افزودن یک ماده شناور روی سطح آب، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به گرما تنها در سطح مشترک آب و هوا انجام می‌شود. قاسمی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ برای اولین بار روش تبخیر سطحی را معرفی کردند. آنها با معرفی ماده‌ای گرافیتی با قابلیت شناوری در سطح آب، انتقال آب به سطح و نیز جذب نور، توانستند بازده تبخیر را تا مقدار ۸۵ درصد در شدت تابش 10 kW/m^2 افزایش دهند. در این پژوهش ضریب هدایت حرارتی ماده جاذب به عنوان یک پارامتر مهم مطرح شد که می‌تواند مانع اتلاف حرارت به توده سیال شود.

سیستم‌های تبخیری سطحی بر اساس نوع ماده جاذب استفاده شده، به سه دسته مواد نیمه‌هادی، مواد رسانا و مواد ترکیبی تقسیم می‌شود. مطالعه قاسمی و همکاران [۷] نمونه‌ای از کاربرد مواد نیمه‌هادی به عنوان ماده جاذب است. در مواد جاذب رسانا از نانوذرات فلزی استفاده می‌شود که با کمک خاصیت تشدید پلاسمون سطحی، باعث بهبود جذب تابش خورشیدی می‌شوند. در این زمینه می‌توان به مطالعه ژو و همکاران [۸] اشاره کرد که با پوشش‌دهی یک لایه متخلخل با نانوذرات آلومینیوم به بازده تبخیری ۸۸/۴ درصد در شدت تابش 4 kW/m^2 دست یافتند. در روش ترکیبی از مزیت‌های هر دو دسته قبلی بهره گرفته می‌شود. به عنوان مثال ژو و همکاران [۹]، از پوشش نانوذرات طلا روی لایه‌ای متخلخل از جنس آلومینا استفاده شد. به این ترتیب با بهره‌گیری از خاصیت تشدید پلاسمونی طلا به همراه ویژگی حبس نور در ساختار متخلخل آلومینا، آن‌ها توانستند در شدت تابش 4 kW/m^2 به بازده تبخیری ۹۰ درصد دست یابند. یانگ و همکاران [۱۰] با ساخت یک غشای ترکیبی از نانولوله‌های کربنی و دی‌سولفید مولیبدن موفق به ثبت بازده تبخیری ۹۲ درصد در شدت تابش 5 kW/m^2 شدند.

هرچند در این روش‌ها امکان دستیابی به راندمان تبخیر بالا میسر است، اما فرآیند تولید ماده جاذب نیازمند فن‌آوری‌های خاص برای ساخت محیط متخلخل، یون‌زدایی از سطح، موج دهی، فرآیندهای شیمیایی و پوشش‌دهی است [۹-۱۰]. پیچیدگی‌های این مراحل و هزینه‌ی بالای آن‌ها مانعی در مسیر تجاری‌سازی این نوع از جاذب‌ها است. به همین دلیل توجه بسیاری از محققین به استفاده از مواد طبیعی به عنوان بستر ماده جاذب جلب شد.

از میان مواد طبیعی، چوب ارزان قیمت، غیر سمی و با قابلیت زیست‌فروپاشی است که دارای ویژگی‌هایی مناسب به عنوان جاذب خورشیدی است. سطح چوب تابش خورشیدی را جذب و به گرما تبدیل می‌کند. از طرفی رسانندگی حرارتی پایینی داشته، مانند عایق حرارتی عمل می‌کند. آوندهای چوب نیز به عنوان میکروکانال‌هایی طبیعی، موجب انتقال آب از مخزن به سطح جاذب می‌شوند.

ژوو و همکاران [۱۱] برای بهبود جذب تابش خورشیدی، با استفاده از یک چراغ الکی سطح چوب را کربن‌دهی کردند. مولد بخار خورشیدی ساخته شده توسط آن‌ها در شدت تابش

چندجداره پوشش‌دهی شده بود استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند در صورت عدم پوشش‌دهی، لیگنین‌زدایی بازده تبخیری را کاهش می‌دهد. به نحوی که با تابش ماوراء بنفش در یک بازه ۲۴ ساعته، بازده تبخیری چوب طبیعی و چوب لیگنین‌زدایی شده به ترتیب ۴۲/۲ و ۳۸/۱ درصد گزارش شد. این در حالی است که بازده تبخیری جاذب پوشش‌دهی شده ۵۱/۱ درصد بود. چن و همکاران [۲۱] با استفاده از یک حلال یونکتیک عمیق^۵، بخشی از لیگنین چوب صنوبر را حذف کرده و توسط شعله سطح آن را کربن‌دهی کردند. مولد بخار سطحی به کمک این جاذب به بازده تبخیر ۸۹ درصد و نرخ تبخیر ۱,۳ kg/m²h در شدت تابش ۱ kW/m² دست یافت.

غفوریان و همکاران [۲۲] با استفاده از جاذب چوب صنوبر لیگنین‌زدایی شده با پوشش نانوذرات آهن/پالادیوم، یک مولد بخار سطحی ساختند که بازده تبخیر آن در شدت تابش ۳ kW/m² در مقایسه با مولد بخار حجمی مشابه، ۱۰۳ درصد بیشتر بود. آن‌ها نشان دادند با استفاده از یک جاذب دو لایه که لایه بالایی آن مشابه قبل و لایه پایینی فوم پلی‌استایرن بود، بهبود بازده تبخیر تا ۱۶۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. سونگ و همکاران [۲۳] با پوشش نانوذرات اکسید آهن سیاه روی سطح چوب باسود^۶ که از درختان بومی آمریکای شمالی است، یک جاذب دو لایه طراحی کردند. آن‌ها با لیگنین‌زدایی از چوب به آن خاصیت فوق‌آب‌دوستی دادند، در حالی که پوشش اکسید آهن سیاه آب‌گریز است. با کمک این جاذب دو لایه، تبخیر طولانی مدت آب با نرخ تبخیر ۱,۳ kg/m²h در شدت تابش ۱ kW/m²، بدون از کار افتادن آن در اثر رسوب نمک ممکن شد.

وونگ و همکاران [۲۴] با استفاده از چوب لیگنین‌زدایی شده با پوشش اکسید گرافن احیا شده با پلی‌پایرول^۷، توانستند به بازده تبخیری ۹۳/۱ درصد و نرخ تبخیر ۱,۴۹ kg/m²h در شدت تابش ۱ kW/m² دست پیدا کنند. ژانگ و همکاران [۲۵] با استفاده از جاذبی از جنس بامبو با پوشش نانوذرات تانتالم/آهن، موفق شدند، در شدت تابش ۱ kW/m²، به نرخ تبخیر ۱,۱۵۲ kg/m²h دست پیدا کنند. شن و همکاران [۲۶]

۱ kW/m² دارای بازده تبخیر ۷۲ درصد بود. لیو و همکاران [۱۲] با پوشش‌دهی سطح چوب با نانوذرات نیمه‌هادی سلنید آهن-مس^۱ تبدیل انرژی تابشی خورشید به حرارت را بهبود دادند. آن‌ها با این تکنیک به بازده تبخیر ۸۶/۲ درصد در شدت تابش ۵ kW/m² دست یافتند. لی و همکاران [۱۳] عملکرد انواع مختلف چوب را به عنوان ماده جاذب بررسی کردند. در این مطالعه برای بهبود جذب تابش خورشیدی، سطح چوب با استفاده از یک صفحه داغ با دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس کربن‌دهی شد. چوب صنوبر در شدت تابش ۱۰ kW/m² بیشترین بازده تبخیری را به میزان ۸۶/۷ درصد به خود اختصاص داد. آن‌ها همچنین با پاشش گرافیت روی سطح چوب صنوبر، به بازده تبخیری ۸۹ درصد در همان شدت تابش دست یافتند. استفاده از خاصیت تشدید پلاسمون سطحی در جاذب‌های بخار خورشیدی نیز موثر است. ژوو و همکاران [۱۴] با پوشش‌دهی سطح چوب با نانوذرات پالادیوم، توانستند بازده تبخیری ۸۵ درصد را در شدت تابش ۱۰ kW/m² ثبت کنند. بخش‌زحمتکش و همکاران [۱۵] جاذب‌هایی تک‌لایه و دو لایه با استفاده از چوب صنوبر ساختند که یک لایه از نانوذرات اکسید آهن سیاه و یا نانولایه‌های طلا روی آن پوشش داده شده بود. آن‌ها نشان دادند، به لطف اثر ترکیبی پلاسمون سطحی در نانوذرات طلا و توانایی جذب نور مرئی در نانوذرات اکسید آهن سیاه، جاذب دو لایه قادر به دستیابی به راندمان تبخیر ۸۸,۷ درصد و نرخ تبخیر ۳,۷۶ kg/m²h در شدت تابش ۳ kW/m² است.

ساختار چوب از سلولز^۲، شبه‌سلولز^۳ و لیگنین^۴ تشکیل شده است [۱۶]. سلولز و شبه‌سلولز آب‌دوست هستند، در حالی که لیگنین آب‌گریز است [۱۷]. اگر لیگنین که دارای خواص آب‌گریز است از چوب حذف شود، چوب آب‌دوست‌تر از قبل شده و ظرفیت انتقال آب آن بهبود می‌یابد [۱۸]. حذف لیگنین همچنین می‌تواند باعث افزایش فضاهاى خالی در چوب و در نتیجه کاهش رسانندگی حرارتی آن شود [۱۹]. جی‌ژانگ و همکاران [۲۰] برای ساخت جاذب مولد بخار از چوب صنوبر لیگنین‌زدایی شده که سطح آن با نانولوله‌های کربنی

⁶ Basswood

⁷ Polypyrrole-reduced graphene oxide

¹ CuFeSe₂

² Cellulose

³ Hemicellulose

⁴ Lignin

⁵ Deep eutectic solvent (DES)

چنین تمایز ساختاری باعث می‌شود که این چوب‌ها در مقابل اصلاحات شیمیایی به شدت واکنش‌پذیرتر باشند. علاوه بر این، بیشتر چوب‌های سخت دارای مقدار لیگنین کمتری هستند [۲۸]. حذف و یا اصلاح لیگنین از چوب می‌تواند ساختار و ترکیبات شیمیایی چوب را تغییر دهد و به عنوان یک استراتژی مهندسی قدرتمند عمل کند. چوبی که تقریباً تمام لیگنین آن حذف شده است، ساختار ناهمسانگرد و متخلخل چوب طبیعی را حفظ می‌کند؛ اما نانو حفره‌های بیشتری در دیواره‌های سلولی آن مشاهده می‌شود؛ همچنین، لیگنین زدایی بسته به میزان و تراکم لیگنین، رنگ چوب را نیز تغییر می‌دهد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مواد

با توجه به تنوع اقلیم‌های موجود در کشور ایران، گونه‌های متنوعی از درختان در آن وجود دارند. با اولویت قرار دادن میزان فراوانی و صرفه اقتصادی، درختان توت، کاج، صنوبر، زبان گنجشک، سپیدار سفید و سپیدار سرخ برای مطالعه انتخاب و توسط آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه فردوسی مشهد به صورت الوار از جنگل‌های سطح کشور تهیه شد. برای فرآیند لیگنین زدایی از محلول سدیم هیدروکسید^۲ و سدیم سولفیت^۳ استفاده شد.

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های چوب

الوارها توسط دستگاه برش فارسی‌بر فستول مدل KS120 به اندازه‌های مورد نیاز در نمونه‌های آزمایشگاهی بریده شد. برای دستیابی به ابعاد دقیق‌تر، از برش لیزی توسط دستگاه CMA1390 با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر استفاده شد. برای انجام آزمایشات نمونه‌ها به صورت استوانه‌های دایروی با قطر و ارتفاع به ترتیب ۳۶ و ۱۰ میلی‌متر آماده شدند.

۳-۳- فرآوری نمونه‌های چوب

۳-۳-۱- لیگنین زدایی

روش‌های مختلفی برای لیگنین زدایی وجود دارد که بر کیفیت لیگنین استخراج شده تاثیر می‌گذارد. البته در این مطالعه هدف حذف لیگنین از بافت چوب است و از لیگنین استخراجی

با استفاده از یک حلال یوتکتیک عمیق از چوب درخت بالسا که بومی آمریکای لاتین است، لیگنین زدایی کرده و سطح آن را با پلی‌پایرول سیاه پوشش‌دهی کردند. آن‌ها نشان دادند، مولد بخار سطحی که با این جاذب کار می‌کند، در شدت تابش 1 kW/m^2 دارای نرخ تبخیر $1.94 \text{ kg/m}^2\text{h}$ و راندمان تبخیر ۸۳/۴ درصد است. هو و همکاران [۲۷] با لیگنین زدایی از چوب بالسا و سپس اشباع آن با پلی‌وینیل الکل و پوشش‌دهی با نانولایه‌های مکسین^۱ جاذبی ساختند که در شدت تابش 1 kW/m^2 نرخ تبخیر $4.31 \text{ kg/m}^2\text{h}$ را ثبت کرد. مولد بخار آن‌ها قادر بود محلول آب نمک ۱۵ درصد وزنی را به مدت ۱۰۰ ساعت با نرخ $4.24 \text{ kg/m}^2\text{h}$ تبخیر کند.

بررسی مقالات در دسترس نشان می‌دهد با حذف لیگنین از ساختار چوب، عملکرد تبخیری مولدهای بخار خورشیدی سطحی بهبود می‌یابد؛ اما باید توجه داشت در چوب‌های مختلف، درصد لیگنین و حتی ترکیب شیمیایی آن متفاوت است [۲۸]. بر اساس بهترین دانش نویسندگان، در مقالات موجود به طور معمول یک نوع چوب رایج در هر منطقه به عنوان جاذب انتخاب شده و اثر پارامترهایی چون پوشش‌دهی، لیگنین زدایی و استفاده از نانوسیالات بر راندمان تبخیری مولد بخار مطالعه شده است. مرور مقالات نشان می‌دهد، اطلاعات قابل توجهی در زمینه اثر لیگنین زدایی از چوب‌های مختلف بر راندمان تبخیر وجود ندارد؛ بنابراین در این مطالعه برای اولین بار شش چوب رایج در کشور ایران به عنوان ماده جاذب مولد بخار خورشیدی سطحی انتخاب و اثر لیگنین زدایی بر مشخصات چوب‌ها و همچنین بازده تبخیری به صورت تجربی بررسی شده است.

۲- ساختار چوب و لیگنین زدایی

چوب و پوست درختان حاوی مقدار بسیار زیادی لیگنین است. ترکیب لیگنین در گونه‌های مختلف درختان و حتی در یک گونه که در مناطق جغرافیایی مختلف می‌روید، متفاوت است. ساختار و ترکیب شیمیایی چوب‌های نرم و چوب‌های سخت تفاوت دارد. برخی از چوب‌های سخت، مانند صنوبر، دارای ساختار چوبی نسبتاً سست هستند که در مقایسه با چوب‌های نرم، توسط سلول‌های الیافی با قطر بزرگ‌تر ساخته شده‌اند.

³ Na₂SO₃

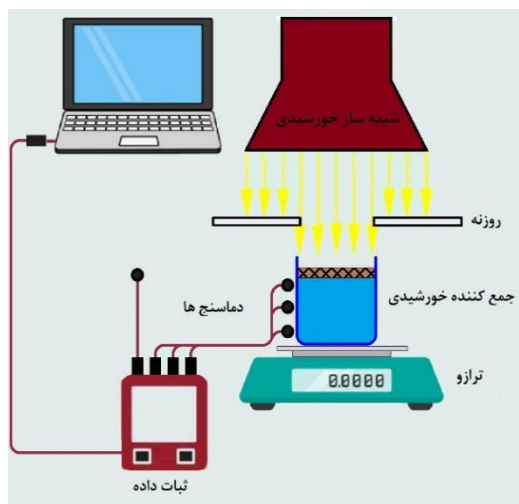
¹ MXenes

² NaOH

حاوی آب نمک ۳/۵ درصد وزنی بوده و جاذب چوبی روی سطح آن شناور است.



شکل ۱- فرآوری چوب کاج، از راست به چپ: چوب طبیعی، پس از لیگنین زدایی، پس از عملیات حرارتی



شکل ۲- شماتیک بستر آزمایش

برای اندازه‌گیری نرخ تبخیر در طول آزمایش، از یک ترازوی دیجیتال ساخت شرکت کرن^۱ با دقت دهم میلی‌گرم استفاده شد که توانایی ارسال داده به دیتالاگر را دارد. برای اندازه‌گیری افزایش دمای آب در طول آزمایش سه حسگر در ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلیمتری از کف بشر و برای اندازه‌گیری دمای هوا یک حسگر بیرون از بشر نصب شد. این سنسورها از نوع DS18B20 با دقت کمتر از ۰/۵ درجه سلسیوس و رزولوشن ۰/۱ درجه هستند. حسگرهای دما توسط حسگر PT100 کلاس AA در محدوده دمایی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس کالیبره شدند. بعلاوه از آن‌جا که این حسگرها در معرض تابش هستند، برای جلوگیری از جذب

استفاده‌ای نمی‌شود. به منظور انجام عملیات لیگنین زدایی، نمونه‌های چوب در محلول ۲/۵ مولار سدیم هیدروکسید و ۰/۴ مولار سدیم سولفیت قرار گرفته و به مدت ۱ ساعت در حمام اولتراسونیک موج‌دهی شد. سپس این مجموعه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق رها شد تا لیگنین موجود در چوب تا حد زیادی در محلول حل شود. پس از آن برای شستشو و حذف محلول و لیگنین باقی‌مانده در چوب، نمونه‌ها درون آب دیونیزه قرار داده شد و به مدت ۱ ساعت در حمام اولتراسونیک موج‌دهی شد. در نهایت با قرار دادن در دستگاه آون، نمونه‌ها خشک شده و آماده انجام آزمایشات شدند.

۳-۲- عملیات حرارتی روی سطح نمونه‌ها

سطح چوب در شرایط طبیعی و بویژه پس از لیگنین زدایی جذب نور بالایی ندارد. بنابراین برای افزایش حرارت جذب در مولدهای بخار خورشیدی سطحی، بهتر است ضریب جذب تابشی سطح چوب بهبود یابد. به این منظور از روش‌های گوناگونی مانند کربن‌دهی با شعله، سطح داغ و یا لیزر، پوشش‌دهی با فلزاتی مانند طلا و پوشش‌دهی با نانوذرات استفاده می‌شود. با توجه به سادگی و ارزانی فرآیند و همچنین تاثیر قابل توجه آن بر خاصیت جذب نور، در این پژوهش از روش کربن‌دهی با سطح داغ استفاده شد. روش انجام عملیات حرارتی به این صورت است که یک صفحه از جنس آهن گالوانیزه با دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ ثانیه روی سطح چوب طبیعی قرار می‌گیرد. این فرآیند باعث می‌شود، سطح چوب به خوبی کربن‌دهی شده و ضریب جذب نور آن افزایش یابد. شکل ۱ تغییرات ظاهری نمونه چوب کاج را در اثر لیگنین زدایی و کربن‌دهی نشان می‌دهد.

۳-۴- بستر آزمایش

شماتیک بستر آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در این سامانه از یک شبیه‌ساز نور خورشید دارای یک لامپ زنون ۱۶۰۰ وات با دمای تابش ۶۰۰۰ کلوین ساخت شرکت نانو شرق ابزار توس، برای تولید تابش مصنوعی نور خورشید استفاده شده‌است. از یک بشر شیشه‌ای با ارتفاع و قطر به ترتیب ۷۰ و ۳۸ میلی‌متر به عنوان گیرنده نور استفاده شد که

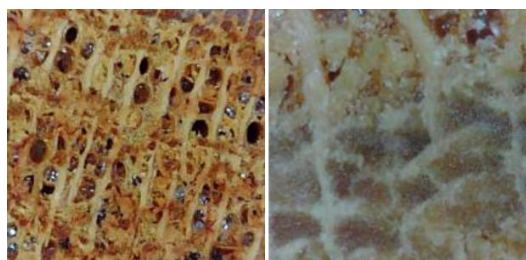
^۱ Kern

۴- بحث در نتایج

در این پژوهش عملکرد یک مولد بخار سطحی که از چوب طبیعی به عنوان ماده جادب استفاده می‌کند، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌است. با هدف بهبود جذب نور و افزایش آب‌رسانی، لیگنین موجود در چوب حذف شد.

۴-۱- مورفولوژی چوب پس از لیگنین زدایی

پس از لیگنین زدایی، بافت چوب تغییرات قابل توجهی می‌کند. رنگ تمامی نمونه‌ها پس از لیگنین زدایی تیره‌تر می‌شود (شکل ۱). علاوه بر رنگ، بافت چوب نیز تغییر زیادی می‌کند. در شکل ۴ تصویر میکروسکوپی بافت سطح چوب قبل و بعد از لیگنین زدایی نشان داده شده‌است. مطابق این شکل، طی فرآیند لیگنین زدایی بخش عمده صمغ موجود در سطح چوب حذف شده است و کانال‌های بزرگ‌تری خودنمایی می‌کنند. با توجه به آب‌گریز بودن لیگنین، این عمل موجب بهبود خاصیت آب‌دوستی چوب می‌شود. البته چوب در حالت طبیعی نیز دارای ساختاری متخلخل است. در شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع چوب طبیعی درختان کاج، سپیدار، صنوبر و توت نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود علاوه بر آن‌ها که شکل و اندازه‌ی آن‌ها در درختان مختلف متفاوت است، بافت چوب نیز تخلخل بالایی دارد.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی سطح مقطع چوب: سمت راست قبل و سمت چپ بعد از لیگنین زدایی

با این حال، طی عملیات لیگنین زدایی، به علت حذف بخش عمده‌ی لیگنین موجود در بافت چوب و همچنین بخشی از شبه سلولز آن، قطر میکروکانال‌ها افزایش یافته و آب‌رسانی بهتری اتفاق می‌افتد. این مطلب به خوبی در شکل ۶ [۱۹]

نور و افزایش ناخواسته دما، قسمت بالای آن‌ها با پوشش سیلیکونی به رنگ سفید در آمد. برای کاهش اتلافات حرارتی، اطراف بشر عایق کاری شد.

شدت تابش در کلیه آزمایشات 3.3 kW/m^2 است. برای کنترل و تنظیم تابش، شدت نور توسط پیرانومتر CMP کنترل شده و با استفاده از یک روزنه که در بالای نمونه قرار دارد، تنظیم می‌شود. این پیرانومتر ساخت شرکت کیپ و زونن^۱ بوده و دارای دقت یک وات بر متر مربع در محدوده طول موج ۲۰۰-۲۸۰۰ نانومتر است. در طول آزمایش داده‌های حسگرها و ترازو با استفاده از دیتالاگر اردوینو ساخت شرکت مهندسی یگانه تجهیز ویرا، جمع‌آوری و برای رایانه ارسال و ثبت می‌شود. بعلاوه برای این‌که محفظه آزمایش از انعکاس نور محیطی در امان باشد و کمترین تاثیر را از محیط اطراف بپذیرد، توسط دو پوشش محافظت شد. تصویر بستر آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده‌است.

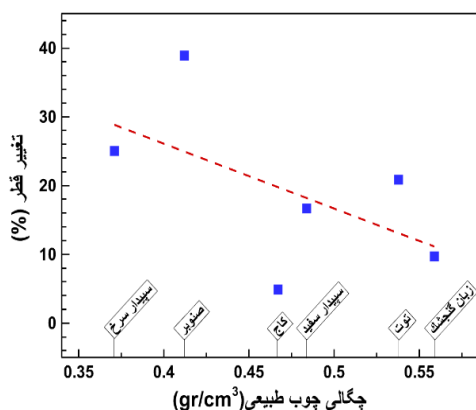
هر آزمایش در مدت زمان ۴۰ ثانیه انجام می‌شود؛ اما برای رفع نوسانات ناشی از اختلالات محیطی و پایا شدن سیستم، داده‌برداری در بازه ۵ تا ۳۵ ثانیه انجام می‌گرفت.



شکل ۳- تصویر بستر آزمایش

^۱ Kipp & Zonen Co.

درصد بیشترین و چوب کاج با ۴/۹ درصد کمترین کاهش قطر را تجربه کرده است. عدم قطعیت این داده‌ها در کلیه حالات کمتر از ۰/۰۴ درصد است. به طور کلی می‌توان گفت در چوب‌های با چگالی پایین، استحکام چوب بیشتر تحت تاثیر لیگنین زدایی قرار می‌گیرد و تغییر قطر بیشتری اتفاق می‌افتد. به همین دلیل در کاربردهای عملی لازم است، این چوب‌ها توسط یک قاب نگهدارنده مهار شوند تا از تغییر شکل چوب جلوگیری شود.



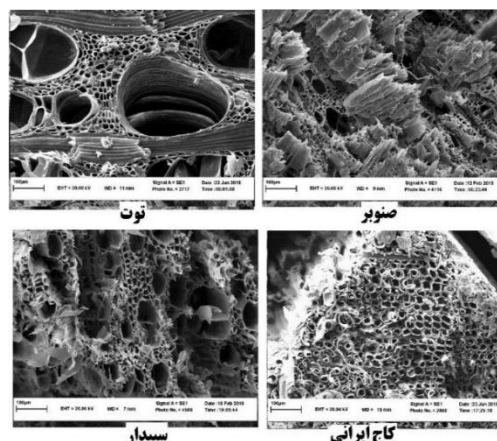
شکل ۷- درصد تغییر قطر نمونه‌ها پس از لیگنین زدایی

۴-۲-۲- تاثیر بر جرم و چگالی نمونه‌ها

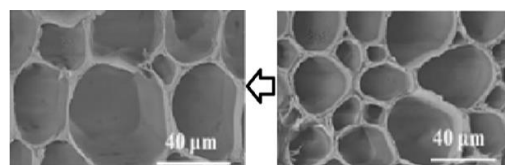
درصد کاهش جرم نمونه‌ها در اثر لیگنین زدایی در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مقایسه از نمونه‌های با حجم یکسان استفاده شده است. از آنجا که مقدار لیگنین موجود در چوب‌های مختلف متفاوت است، کاهش جرم نمونه‌ها در اثر لیگنین زدایی تفاوت دارد. چوب درخت توت با ۲۲/۷ درصد بیشترین، و چوب درخت صنوبر با ۱۱/۲ درصد کمترین کاهش جرم را نشان می‌دهد. عدم قطعیت این داده‌ها در کلیه حالات کمتر از ۰/۰۰۴ درصد است. هرچند که داده‌ها پراکندگی زیادی دارند اما به طور کلی می‌توان گفت در چوب‌های با چگالی بالاتر، کاهش جرم بیشتری اتفاق می‌افتد.

با کاهش جرم چوب در اثر لیگنین زدایی، چگالی آن کاهش یافته و خاصیت شناوری آن بهبود می‌یابد. با توجه به اهمیت پارامتر شناوری در انتخاب ماده جاذب در مولدهای بخار خورشیدی سطحی، لیگنین زدایی چوب را به نامزد بهتری

نشان داده شده است.



شکل ۵- تصویر SEM سطح مقطع چوب‌های مورد مطالعه با مقیاس ۱۰۰ میکرومتر



شکل ۶- تصویر SEM میکروکانال‌های بافت چوب صنوبر قبل (راست) و بعد (چپ) از لیگنین زدایی با مقیاس ۴۰ میکرومتر [۱۹]

۴-۲-۴- اثر لیگنین زدایی بر خواص فیزیکی نمونه‌ها

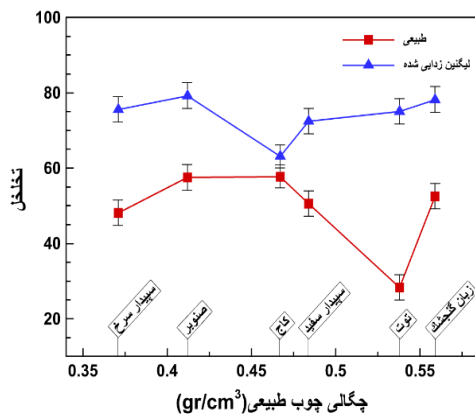
۴-۲-۱- تاثیر بر قطر نمونه‌ها

قطر اولیه همه نمونه‌ها برابر با ۳/۶ سانتی‌متر بوده است. حضور لیگنین به طور فیزیکی فراساختار ایجاد شده بین سلولز و همی‌سلولز را تقویت می‌کند. تشکیل پیوندهای لیگنین-کربوهیدرات کمپلکس^۱ نیز احتمالاً در این زمینه تاثیرگذار است [۲۹]. با حذف لیگنین از فضای بین بافتی و کاهش استحکام چوب، حجم آن بویژه در راستای عمود بر آوندها (قطر نمونه‌ها) کاهش می‌یابد. البته تغییر قطر در جهات مختلف متفاوت است و نمونه‌ها از شکل دایره کامل خارج می‌شوند. درصد تغییر قطر متوسط پس از عملیات لیگنین زدایی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس، چوب صنوبر با ۳۸/۹

^۱ lignin-carbohydrate complex (LCC) linkages

در این رابطه m_a ، m_b ، V و ρ_w به ترتیب جرم نمونه خشک، جرم نمونه تر، حجم نمونه و چگالی آب است. در محاسبه تخلخل چگالی آب خالص 998 kg/m^3 است.

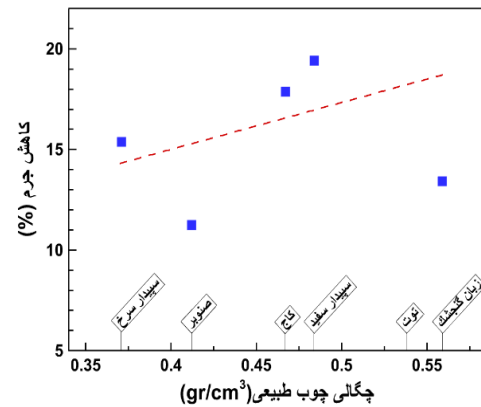
میزان تخلخل نمونه‌ها قبل و بعد از لیگنین زدایی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. صرف‌نظر از چوب درخت کاج که تخلخل آن پس از لیگنین زدایی تنها ۹ درصد تغییر کرده‌است، تخلخل دیگر نمونه‌ها افزایش قابل توجهی داشته‌است. با حذف لیگنین، همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده‌است، قطر میکروکانال‌های موجود در چوب افزایش می‌یابد. علاوه بر آن در فضای بین بافتی نیز میکروحفره‌هایی ایجاد می‌شود [۱۹] که در مجموع باعث افزایش تخلخل چوب می‌شود. چوب درخت توت با ۱۶۵ درصد افزایش تخلخل، بیشترین تاثیر را از فرآیند لیگنین زدایی پذیرفته‌است.



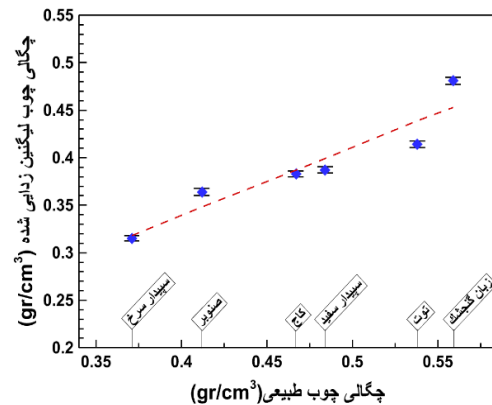
شکل ۱۰- تخلخل چوب قبل و بعد از لیگنین زدایی

مطابق شکل ۱۰ هرچه تخلخل نمونه‌ها قبل از لیگنین زدایی کمتر باشد، تاثیر بیشتری از این عملیات می‌پذیرند. به نحوی که صرف‌نظر از تخلخل چوب در حالت طبیعی، پس از لیگنین زدایی تخلخل تمامی نمونه‌ها در محدوده نزدیک به هم قرار می‌گیرد. اگر از چوب کاج که رفتار متفاوتی نشان داده‌است صرف‌نظر کنیم، به طور متوسط تخلخل نمونه‌ها پس از لیگنین زدایی در حدود ۰٫۷۶ است. چوب صنوبر با تخلخل ۰٫۷۹ بیشترین تخلخل را پس از لیگنین زدایی کسب کرده‌است.

برای این منظور تبدیل می‌کند. مطابق شکل ۹ پس از لیگنین زدایی، چوب درخت توت با ۲۳ درصد و چوب درخت صنوبر با ۵٫۲ درصد به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین کاهش چگالی را تجربه کرده‌اند.



شکل ۸- درصد کاهش جرم چوب در اثر لیگنین زدایی



شکل ۹- تغییرات چگالی چوب لیگنین زدایی شده

۴-۲-۳- تاثیر بر تخلخل نمونه‌ها

با داشتن جرم نمونه‌های خشک و تر می‌توان تخلخل چوب را محاسبه کرد. برای اطمینان از اشباع شدن چوب در حالت تر، لازم است نمونه‌ها حداقل به مدت ۱۲ ساعت در آب دیونیزه غوطه‌ور شوند. تخلخل چوب از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۹].

$$\phi = \frac{m_b - m_a}{V\rho_w} \quad (1)$$

دمای توده آب ۱۳/۶ درجه سلسیوس است که ۱۵/۳۱ درصد نسبت به تبخیر حجمی بهبود یافته است. لیگنین‌زدایی از چوب درخت زبان گنجشک بیشترین تاثیر را بر دمای توده آب می‌گذارد. برای این چوب دمای توده آب ۱۲/۷ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که ۲۰/۸۷ درصد نسبت به تبخیر حجمی کاهش نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیشتر گفته شد، در اثر لیگنین‌زدایی تخلخل چوب افزایش می‌یابد. این مطلب باعث کاهش رسانندگی حرارتی چوب و در نتیجه افزایش کمتر دمای توده آب می‌شود. در مطالعه چن و همکاران [۲۱]، رسانندگی چوب صنوبر در اثر لیگنین‌زدایی ۳۷/۵ درصد کاهش یافته است. شکل ۱۱ همچنین گویای آن است که در صورت استفاده از چوب درخت سپیدار سرخ، لیگنین‌زدایی تاثیری بر تغییرات دمایی توده آب نداشته است. این در حالی است که به لحاظ انتقال حرارت، چوب درخت سپیدار سفید بیشترین تاثیر را از لیگنین‌زدایی پذیرفته است؛ به نحوی که افزایش دمای توده آب پس از لیگنین‌زدایی ۱۵ درصد نسبت به چوب طبیعی کاهش پیدا کرده است.

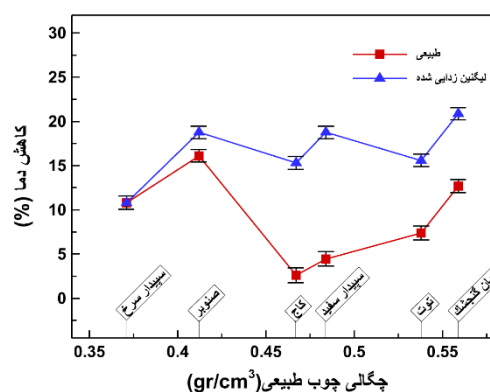
باید توجه داشت که لیگنین‌زدایی، علاوه بر کاهش رسانندگی حرارتی، موجب بهبود آب‌دوستی چوب و هم‌زمان افزایش قطر میکروکانال‌های موجود در ساختار آن می‌شود. در نتیجه قدرت آب‌رسانی چوب افزایش می‌یابد. قبل از لیگنین‌زدایی در برخی نمونه‌ها مانند چوب درختان کاج و سپیدار سفید، آب کافی برای تبخیر به سطح چوب نرسیده و حرارت تابشی دریافتی صرف افزایش دما می‌شود؛ اما در نمونه‌هایی مانند چوب درخت صنوبر که به لحاظ ساختاری در حالت طبیعی از تخلخل کافی برخوردار است، آب‌رسانی به صورت مناسبی انجام می‌شود. در این حالت حرارت دریافتی صرف تبخیر آب شده و افزایش دمای کمتری تجربه می‌شود. این در حالی است که پس از لیگنین‌زدایی و بهبود خاصیت آب‌رسانی چوب، افزایش دمای توده آب در بیشتر نمونه‌ها تقریباً یکسان و در حدود ۱۳ درجه سلسیوس می‌باشد.

۴-۴- اثر لیگنین‌زدایی بر عملکرد تبخیری چوب

پس از گذشت ۵ دقیقه از شروع آزمایش، فرآیند تبخیر پایا می‌شود. در این حالت می‌توان با تقسیم کاهش جرم آب بر زمان تغییر، به ازای مساحت سطح نمونه، یک نرخ تبخیر ویژه برای هر چوب تعریف کرد. در شکل ۱۰ نرخ تبخیر نمونه‌های

۴-۳- اثر لیگنین‌زدایی بر تغییر دمای آب مخزن

یکی از مزیت‌های اصلی روش تبخیر سطحی، محلی‌سازی گرمای دریافتی از خورشید و تمرکز آن در سطح با هدف افزایش نرخ تبخیر است. در غیاب چوب به عنوان جاذب، حرارت تابشی دریافتی، در کل حجم توزیع شده و باعث افزایش دمای توده سیال به میزان ۱۶ درجه سلسیوس می‌شود. با افزودن چوب، تابش دریافتی در سطح چوب جذب شده و بخشی بیشتری از آن صرف تبخیر آب می‌شود؛ در نتیجه دمای توده سیال نسبت به قبل (۱۶ درجه سلسیوس) کاهش پیدا می‌کند. درصد کاهش دما در اثر استفاده از چوب‌های مختلف در دو حالت طبیعی و لیگنین‌زدایی شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- اثر چوب بر درصد کاهش دمای توده آب

برای چوب درخت کاج دمای توده آب ۱۵/۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که نسبت به حالت تبخیر حجمی تنها ۲/۶۱ درصد کاهش را نشان می‌دهد؛ اما برای چوب درخت صنوبر افزایش دمای توده آب به میزان ۱۳/۴ درجه است که معادل ۱۶/۱۱ درصد کاهش نسبت به حالت تبخیر حجمی می‌باشد. علت این رفتار، متفاوت بودن رسانندگی حرارتی، به علت تفاوت در تخلخل چوب و همچنین مقدار لیگنین موجود در ساختار آن است.

در صورت لیگنین‌زدایی از چوب جاذب، حرارت جذب شده از تابش دریافتی با موفقیت بیشتری محلی‌سازی شده و سهم کمتری از آن صرف افزایش دمای توده آب می‌شود. در این حالت برای جاذب از جنس چوب درخت کاج، افزایش

شامل صنوبر و زبان گنجشک، پس از عملیات لیگنین زدایی با کاهش نرخ تبخیر مواجه شده‌اند. در چوب‌هایی مانند سپیدار سرخ به علت کوچک بودن میکروکانال‌های موجود در بافت چوب، آبرسانی مناسبی به سطح اتفاق نمی‌افتد و نرخ تبخیر پایین است. در اثر لیگنین زدایی، از یک طرف قطر میکروکانال‌ها افزایش یافته و از طرف دیگر خاصیت آبدوستی چوب بهبود می‌یابد؛ در نتیجه توانایی آبرسانی چوب افزایش یافته و نرخ تبخیر زیاد می‌شود؛ اما در چوب‌هایی مانند صنوبر، قطر میکروکانال‌های موجود در بافت چوب در حالت طبیعی در اندازه مناسب و بهینه‌ای قرار دارد. به طوری که مطابق شکل ۱۰ بیشترین نرخ تبخیر را در میان نمونه‌های آزمایش شده کسب کرده است. در اثر لیگنین زدایی، قطر میکروکانال‌ها به بیش از مقدار بهینه افزایش یافته و در نتیجه خاصیت موئینگی آن‌ها کاهش می‌یابد. در این شرایط نرخ تبخیر ۲٫۸ درصد کاهش پیدا کرده است.

یکی از پارامترهای مهم در تعیین عملکرد مولدهای بخار، بازده تبخیری است که مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود [۳۰].

$$\eta = \frac{m h_{fg}}{IA} \quad (2)$$

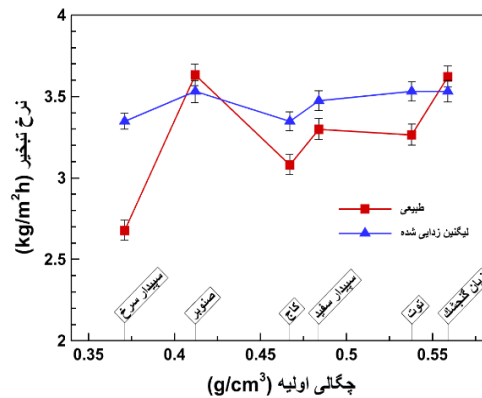
در این رابطه \dot{m} ، h_{fg} و A به ترتیب جرم تبخیر، انتالپی تبخیر، چگالی شدت نور و سطح تبخیر است. انتالپی تبخیر آب خالص در فشار یک اتمسفر برابر 2257 kJ/kg بوده و چگالی شدت نور نیز $3/3 \text{ kW/m}^2$ اعمال شده است.

جدول ۱- بازده تبخیری قبل و بعد از لیگنین زدایی (%)

لیگنین زدایی شده		طبیعی		
بازده	% افزایش	بازده	% افزایش	
-	-	-	۳۴٫۳	بدون چوب
۸۵٫۵	۶۳٫۶	۴۸٫۴	۵۰٫۹	سپیدار سرخ
۸۵٫۵	۶۳٫۶	۷۰٫۷	۵۸٫۵	کاج
۹۵٫۶	۶۷٫۱	۸۰٫۹	۶۲٫۰	توت
۹۲٫۵	۶۶٫۰	۸۲٫۸	۶۲٫۷	سپیدار سفید
۹۵٫۶	۶۷٫۱	۱۰۰٫۶	۶۸٫۸	زبان گنجشک
۹۵٫۶	۶۷٫۱	۱۰۱٫۳	۶۹٫۰	صنوبر

بازده تبخیری برای نمونه‌های آزمایش شده در حالت طبیعی و بعد از لیگنین زدایی در جدول ۱ آورده شده است.

مختلف قبل و بعد از لیگنین زدایی نشان داده شده است. در شرایط عدم استفاده از جاذب چوبی (مولد بخار خورشیدی حجمی) نرخ تبخیر برابر $1/805 \text{ kg/m}^2\text{h}$ می‌باشد. با اضافه کردن چوب به سیستم، نرخ تبخیر افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند؛ به نحوی که برای چوب سپیدار سرخ با افزایش $48/41$ درصدی به $2/678 \text{ kg/m}^2\text{h}$ می‌رسد. این پارامتر برای چوب صنوبر با $10/27$ درصد افزایش $2/632 \text{ kg/m}^2\text{h}$ است.



شکل ۱۲- اثر لیگنین زدایی بر نرخ تبخیر

تأثیر لیگنین زدایی بر نرخ تبخیر نمونه‌ها متفاوت است. چوب‌هایی که نرخ تبخیر اولیه آن‌ها پایین است، پس از عملیات لیگنین زدایی افزایش قابل توجهی در نرخ تبخیر آن‌ها ایجاد می‌شود. به عنوان مثال در چوب سپیدار سرخ، لیگنین زدایی باعث افزایش ۲۵ درصدی نرخ تبخیر و رسیدن آن به $3/347 \text{ kg/m}^2\text{h}$ شده است. افزایش نرخ تبخیر در اثر لیگنین زدایی در دیگر مطالعات نیز تایید شده است. در مطالعه غفوریان و همکاران [۲۲] نرخ تبخیر چوب گردو و راش در اثر لیگنین زدایی به ترتیب حدود ۲۵ و ۴۲ درصد افزایش یافته است. در مطالعه سونگ و همکاران [۲۳] در اثر لیگنین زدایی از چوب باسوود پوشش دهی شده با نانوذرات اکسید آهن سیاه نرخ تبخیر در حدود ۲۴ درصد افزایش یافته است؛ هرچند که در صورت عدم پوشش دهی، لیگنین زدایی از این چوب باعث کاهش ۳۸ درصدی نرخ تبخیر می‌شود. در مطالعه هی و همکاران [۳۰]، نرخ تبخیر از چوب باسوود پوشش دهی شده با نانوتیوب‌های کربنی در اثر لیگنین زدایی ۲۰ درصد افزایش یافته است.

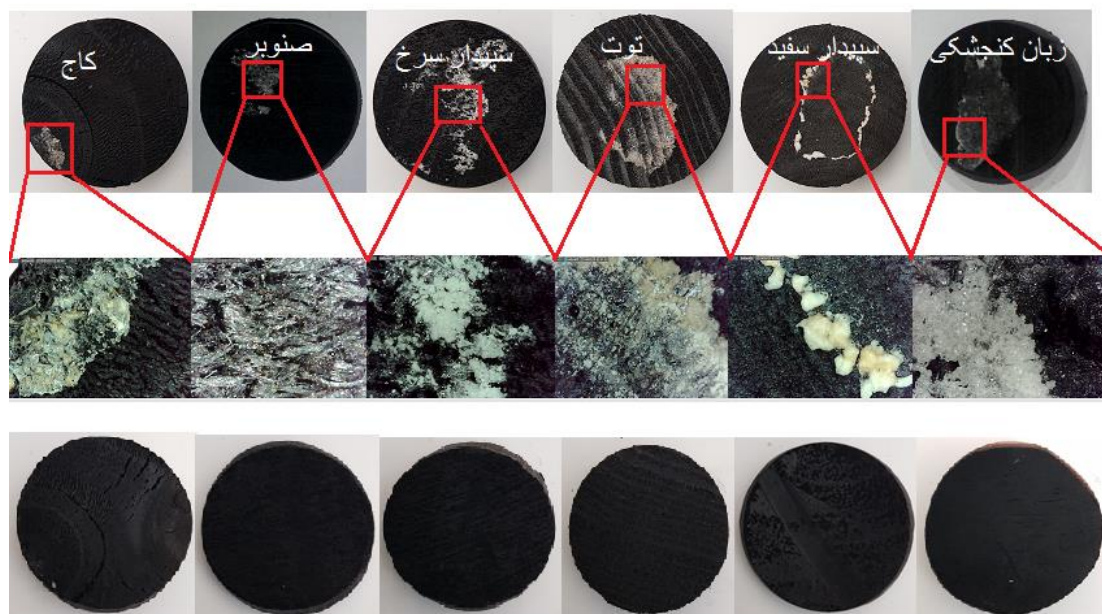
این در حالی است که چوب‌های با نرخ تبخیر اولیه بالا،

تبخیری تمامی گونه‌های چوب در یک محدوده قرار گرفته که به طور میانگین برای نمونه‌های آزمایش شده برابر ۶۵/۷ درصد است؛ بنابراین به نظر می‌رسد، در اثر لیگنین‌زدایی، عملکرد مولد بخار سطحی تا حد زیادی مستقل از نوع چوب استفاده شده در ماده جاذب است؛ که در مطالعه غفوریان و همکاران [۲۲] نیز نتیجه‌گیری مشابه‌ای انجام شده است.

۴-۵- اثر لیگنین‌زدایی بر بر پایداری عملکرد سیستم

یکی از الزامات مولد بخار خورشیدی، عملکرد پایدار آن در طول زمان است. با تبخیر آب دریا از سطح جاذب، نمک آن روی چوب باقی می‌ماند. شکل ۱۲ به خوبی نشان می‌دهد در تمامی نمونه‌های چوب طبیعی، نمک روی سطح چوب رسوب کرده است. رسوب نمک باعث بسته شدن میکروکانال‌های موجود در چوب و کاهش توانایی آبرسانی آن می‌شود. از طرف دیگر با رسوب کردن نمک، ضریب جذب سطح کاهش پیدا کرده و حرارت کمتری برای تبخیر آزاد می‌شود.

همچنین بازده تبخیری در حالت بدون جاذب (مولد بخار حجمی) نیز که برابر ۳۴/۳ درصد است، در جدول گزارش شده است. در مطالعه غفوریان و همکاران [۲۲] بازده تبخیر حجمی آب دریای عمان در شدت تابش‌های مختلف گزارش شده است. برون‌یابی آن نتایج، بازده تبخیری را در چگالی شدت تابش 33.2 kW/m^2 برابر ۳۳/۲ درصد برآورد می‌کند که به نتایج ارائه شده در این مطالعه بسیار نزدیک است. برای درک بهتر اثر استفاده از ماده جاذب و تاثیر نوع چوب بر بازده تبخیری، درصد بهبود عملکرد مولد بخار سطحی نسبت به مولد بخار حجمی در هر دو حالت چوب طبیعی و چوب لیگنین‌زدایی شده در مقابل آن ذکر شده است. بیشترین بازده تبخیری مربوط به چوب صنوبر طبیعی با مقدار ۶۹ درصد است که با مطالعه چن و همکاران [۲۱] تطابق دارد. این مقدار پس از لیگنین‌زدایی به ۶۷/۱ درصد کاهش یافته است. این رفتار توسط جی‌ژانگ و همکاران [۲۰] نیز گزارش شده است. در آن پژوهش در اثر لیگنین‌زدایی از چوب صنوبر بازده تبخیری ۴/۱ درصد کاهش یافته است. نکته جالب این‌که پس از لیگنین‌زدایی، بازده



شکل ۱۲- رسوب نمک روی سطح جاذب در اثر تبخیر آب شور بالا: چوب طبیعی وسط؛ بزرگ‌نمایی نمک رسوب کرده پایین:

چوب لیگنین‌زدایی شده

نکته بسیار حائز اهمیت این که پس از لیگنین‌زدایی، مطابق شکل ۱۲ در هیچ‌یک از موارد، دیگر رسوب نمک روی نمونه مشاهده نشد. لیگنین‌زدایی با افزایش قطر میکروکانال‌های

مجموع این عوامل به تدریج نرخ تبخیر را کاهش داده و عملکرد تجهیز را تضعیف می‌کند؛ بنابراین برای کارکرد دائمی مولد بخار، لازم است سطح چوب به طور مرتب نمک‌زدایی شود.

با افزایش ۲۵ درصدی، نرخ تبخیر آن به $۳,۳۴۷ \text{ kg/m}^2\text{h}$ رسید.

۶) پس از لیگنین‌زدایی از چوب، در هیچ‌یک از موارد، رسوب نمک روی نمونه‌ها مشاهده نشد؛ بنابراین لیگنین‌زدایی عملکرد دائمی مولد بخار سطحی را تضمین می‌کند.

مراجع

- [1] Kumm M, Guillaume JHA, de Moel H, Eisner S, Flörke M, Porkka M, Siebert S, Veldkamp TIE, Ward PJ (2016) The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Sci Rep* 6: 38495.
- [2] Amjad MM, Raza G, Xin Y, Pervaiz S, Xu J, Du X, Wen D (2017) Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids. *Appl Energy* 206: 393-400.
- [3] Ghafurian MM, Niazmand H, Tavakoli Dastjerd F, Mahian O (2019) A study on the potential of carbon-based nanomaterials for enhancement of evaporation and water production. *Chem. Eng. Sci.* 207(2): 79-90.
- [4] Li H, He Y, Liu Z, Huang Y, Jiang B (2017) Synchronous steam generation and heat collection in a broadband Ag@TiO₂ core-shell nanoparticle-based receiver. *Appl. Therm. Eng.* 121: 617-627.
- [۵] غفوریان مم، نیازمند ح، اکبری ز، بخش‌زحمتکش ب (۱۳۹۸) بررسی عملکرد نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت) و نانوصفات گرافن در تولید بخار خورشیدی. مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۹(۲): ۱۸۱-۱۹۶.
- [6] Jin H, Lin G, Bai L, Zeiny A, Wen D (2016) Steam generation in a nanoparticle-based solar receiver. *Nano Energy* 28: 397-406.
- [7] Ghasemi H, Ni G, Marconnet AM, Loomis J, Yerci S, Miljkovic N, Chen G (2014) Solar steam generation by heat localization. *Nat. Commun.* 5: 4449.
- [8] Zhou L, Tan Y, Wang J, Xu W, Yuan Y, Cai W, Zhu S, Zhu J (2016) 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. *Nat. Photonics* 10: 393.
- [9] Zhou L, Tan Y, Ji D, Zhu B, Zhang P, Xu J, Gan Q, Yu Z, Zhu J (2016) Self-assembly of highly efficient, broadband plasmonic absorbers for solar steam generation. *Sci. Adv.* 2(4): e1501227.
- [10] Yang X, Yang Y, Fu L, Zou M, Li Z, Cao A, Yuan Q (2018) An Ultrathin Flexible 2D Membrane Based on Single-Walled Nanotube-MoS₂ Hybrid Film for High-Performance Solar Steam Generation. *Adv. Funct. Mater.* 28(3): 1704505.
- [11] Xue G, Liu K, Chen Q, Yang P, Li J, Ding T, Duan J, Qi B, Zhou J (2017) Robust and Low-cost Flame-

موجود در چوب و بهبود آب‌رسانی، موجب می‌شود نمک باقی مانده از تبخیر در آب بصورت محلول باقی مانده و به سمت توده آب بازگردد. این یکی از مهم‌ترین اثرات لیگنین‌زدایی است که ضامن عملکرد پایدار مولد بخار خورشیدی است.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش اثر حذف لیگنین بر عملکرد مولد بخار خورشیدی سطحی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. به این منظور از یک دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی استفاده شد. نمونه های چوب از شش درخت رایج در کشورمان یعنی درختان سپیدار سرخ، سپیدار سفید، صنوبر، زبان گنجشک، کاج و توت تهیه و در ابعاد مناسب آماده‌سازی شد. فرآیند لیگنین‌زدایی با استفاده از محلول ۲٫۵ مولار NaOH و ۰٫۴ مولار Na₂SO₃ انجام پذیرفت. از مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) قطر نمونه‌ها پس از عملیات لیگنین‌زدایی کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین تغییر قطر در بین نمونه‌های بررسی شده مربوط به چوب صنوبر و کاج بود که به ترتیب ۳۸٫۹ و ۴٫۹ درصد کاهش یافت.
- ۲) جرم نمونه‌ها پس از لیگنین‌زدایی کاهش می‌یابد. در بین نمونه‌های مورد بررسی، چوب درخت توت با ۲۲٫۷ درصد بیشترین و چوب درخت صنوبر با ۱۱٫۲ درصد کمترین کاهش جرم را داشته است.
- ۳) تخلخل نمونه‌ها در اثر لیگنین‌زدایی افزایش می‌یابد. صرف نظر از چوب درخت کاج که تخلخل آن پس از لیگنین‌زدایی تنها ۹ درصد تغییر کرده است، تخلخل دیگر نمونه‌ها افزایش قابل توجهی داشته است. چوب درخت توت با ۱۶۵ درصد افزایش در تخلخل بیشترین تاثیر را از فرآیند لیگنین‌زدایی پذیرفته است. صنوبر با تخلخل ۰٫۷۹ بیشترین تخلخل را پس از لیگنین‌زدایی کسب کرده است.
- ۴) هرچه تخلخل نمونه‌ها قبل از لیگنین‌زدایی کمتر بوده است، تاثیر بیشتری از این عملیات گرفته‌اند. به طور متوسط تخلخل نمونه‌ها پس از لیگنین‌زدایی تقریباً برابر و در حدود ۰٫۷۶ است.
- ۵) چوب‌هایی که نرخ تبخیر اولیه آن‌ها پایین است، مانند سپیدار سرخ و کاج، پس از عملیات لیگنین‌زدایی افزایش قابل توجهی در نرخ تبخیر آن‌ها ایجاد شد. بیشترین افزایش نرخ تبخیر در چوب سپیدار سرخ مشاهده شد که

- [21] Chen Z, Dang B, Luo X, Li W, Li J, Yu H, Liu S, Li S (2019) Deep Eutectic Solvent-Assisted In Situ Wood Delignification: A Promising Strategy To Enhance the Efficiency of Wood-Based Solar Steam Generation Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11(29): 26032–26037.
- [22] Ghafurian MM, Niazmand H, Goharshadi EK, Bakhsh Zahmatkesh B, Moallemi AE, Mehrkhal R, Mahian O (2020) Enhanced solar desalination by delignified wood coated with bimetallic Fe/Pd nanoparticles. *Desalination* 493: 114657.
- [23] Song L, Zhang XF, Wang Z, Zheng T, Yao J (2021) Fe₃O₄/polyvinyl alcohol decorated delignified wood evaporator for continuous solar steam generation. *Desalination* 507(1): 115024.
- [24] Wong MY, Zhu Y, Ho TC, Pan A, Tso CY (2023) Polypyrrole-reduced graphene oxide coated delignified wood for highly efficient solar interfacial steam generation. *Appl. Therm. Eng.* 219(D): 119686.
- [25] Zhang P, Piao X, Guo H, Xiong Y, Cao Y, Yan Y, Wang Z, Jin C (2023) A multi-function bamboo-based solar interface evaporator for efficient solar evaporation and sewage treatment. *Ind. Crops Prod.* 200(B): 116823.
- [26] Shen F, Xu J, Yan J, Wu S, He C, Li W, Hu J, Zhang Y, Tian D, Shen F (2023) Facile fabrication of functionalized wood evaporator through deep eutectic solvent delignification for efficient solar-driven water purification. *J. Environ. Chem. Eng.* 11(6): 111234.
- [27] Hu C, Li W, Zhao HY, Li C, Ma ZY, Hao L, Pang Y, Yu ZZ, Li X (2023) Salt-resistant wood-based solar steam generator with top-down water supply for high-yield and long-term desalination of seawater and brine water. *Chem. Eng. J.* 460: 141622.
- [28] Li J, Chen C, Zhu JY, Ragauskas AJ, Hu L (2021) In Situ Wood Delignification toward Sustainable Applications. *Acc. Mater. Res.* 2(8): 606-620.
- [29] Wang J, Minami E, Asmadi M, Kawamoto H (2021) Effect of delignification on thermal degradation reactivities of hemicellulose and cellulose in wood cell walls. *J. Wood Sci.* 67:19.
- [30] He Y, Li H, Guo X, Zheng R (2019) Delignified wood-based highly efficient solar steam generation device via promoting both water transportation and evaporation. *BioResources* 14(2): 3758-3767.
- treated Wood for High-performance Solar Steam Generation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9(17): 15052-15057.
- [12] Liu H, Chen C, Wen H, Guo R, Williams NA, Wang B, Chen F, Hu L (2018) Narrow Bandgap Semiconductor Decorated Wood Membrane for High efficiency Solar-assisted Water Purification. *J. Mater. Chem.* 6(39): 18839-18846.
- [13] Li T, Liu H, Zhao X, Chen G, Dai J, Pastel G, Jia C, Chen C, Hitz E, Siddhartha D, Yang R, Hu L (2018) Scalable and Highly Efficient Mesoporous Wood-Based Solar Steam Generation Device: Localized Heat, Rapid Water Transport. *Adv. Funct. Mater.* 28(16): 1707134.
- [14] Zhu M, Li Y, Chen F, Zhu X, Dai J, Li Y, Yang Z, Yan X, Song J, Wang Y, Hitz E, Luo W, Lu M, Yang B, Hu L (2018) Plasmonic Wood for High-Efficiency Solar Steam Generation. *Adv. Energy Mater.* 8(4): 1701028.
- [15] Bakhsh Zahmatkesh B, Niazmand H, Goharshadi EK (2023) Synergistic effect of Fe₃O₄ nanoparticles and Au nanolayer in enhancement of interfacial solar steam generation. *Mater. Res. Bull.* 162: 112178.
- [16] Song J, Chen C, Zhu S, Zhu M, Dai J, Ray U, Li Y, Kuang Y, Li Y, Quispe N, Yao Y, Gong A, Leiste UH, Bruck HA, Zhu JY, Vellore A, Li H, Minus ML, Jia Z, Martini A, Li T, Hu L (2018) Processing Bulk Natural Wood into a High-performance Structural Material. *Nature* 554: 224-228.
- [17] Kopacic S, Ortner A, Guebitz G, Kraschitzer T, Leitner J, Bauer W (2018) Technical Lignins and Their Utilization in the Surface Sizing of Paperboard. *Ind. Eng. Chem. Res.* 57(18): 6284-6291.
- [18] Mredha MTI, Pathak SK, Cui J, Jeon I (2019) Hydrogels with Superior Mechanical Properties from the Synergistic Effect in Hydrophobic–Hydrophilic Copolymers. *Chem. Eng. J.* 362(15): 325-338.
- [19] Li Y, Fu Q, Yu S, Ya M, Berglund L (2016) Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *Biomacromolecules* 17: 1358-1364.
- [20] Ge-Zhang S, Yang H, Mu H (2023) Interfacial solar steam generator by MWCNTs/carbon black nanoparticles coated wood. *Alexandria Eng. J.* 63: 1-10.