



موسسه آموزش عالی جابجی



به نام آن که جان را فکرت آموخت چراغ دل به نور جان برافروخت

بدینوسیله گواهی می گردد مقاله با عنوان زیر:

پیش بینی هوشمندانه عملکرد حرارتی دو نوع هواگر مکن خورشیدی با بهره گیری از شبکه عصبی مصنوعی

مریم زمانیان ، عباس روحانی ، خسرو جعفرپور

در دومین همایش ملی جریان سیال، انتقال حرارت و جرم که در تاریخ پانزدهم بهمن ماه یکهزار و سیصد و نود و چهار در محل هتل آسمان اصفهان برگزار گردید، ارائه و در لوح فشرده همایش نیز به چاپ رسیده است.

دکتر سید غلامرضا اعتماد

دبیر همایش



پیش‌بینی هوشمندانه عملکرد حرارتی دو نوع هواگر مکن خورشیدی با بهره‌گیری از شبکه عصبی

مصنوعی

مریم زمانیان*^۱، عباس روحانی^۲، خسرو جعفرپور^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

m.zamaniah@stu.um.ac.ir

arohani@um.ac.ir

kjafarme@shirazu.ac.ir

چکیده:

یکی از روش‌های استفاده از انرژی خورشیدی استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی است. در این پژوهش یک جمع‌کننده خورشیدی هوایی با دو نوع پوشش شیشه‌ای پله‌ای و تخت ارزیابی شد. جمع‌کننده‌های مورد نظر در معرض مستقیم تابش خورشید مورد بررسی قرار گرفتند. این پژوهش به منظور ارزیابی قابلیت مدل شبکه عصبی پرسپترون در مدلسازی و پیش‌بینی کارایی حرارتی جمع‌کننده‌ها تحت تاثیر پارامترهای ورودی، جریان جرمی سیال ورودی، دمای هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده، دمای صفحه جاذب، ضخامت آن، تخلخل صفحه جاذب و شید خورشید، انجام شد. آزمایش‌ها در سه تکرار در فواصل زمانی ۱۱ تا ۱۳ بعد از ظهر، با متوسط تابش خورشیدی 1040 Wm^{-2} انجام گرفت. مقادیر بدست آمده از آزمایشات با مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مقایسه شدند. با توجه به ضریب تبیین بدست آمده برای پوشش شیشه‌ای تخت (۰/۹۸) و پله‌ای (۰/۹۹) می‌توان گفت که کاربرد شبکه عصبی مصنوعی روشی دقیق برای پیش‌بینی عملکرد حرارتی جمع‌کننده‌های هوایی خورشیدی می‌باشد.

کلمات کلیدی: جمع‌کننده خورشیدی هوایی تخت، شبکه عصبی مصنوعی، عملکرد حرارتی.

۱- مقدمه:

انرژی خورشید به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر بر روی زمین می‌باشد که علاوه بر سازگاری با محیط زیست همیشه در قسمت اعظمی از سطح کره زمین یافت می‌شود و انسان همواره برای مهار این انرژی و استفاده بهینه از آن تلاش کرده است. یکی از روش‌ها برای استفاده از انرژی خورشیدی، جمع‌کننده‌های خورشیدی می‌باشد. جمع‌کننده‌های خورشیدی با سیال کاری هوا از لحاظ ساخت و نگهداری ساده هستند. عدم خوردگی مسیر عبور هوا، عدم نشت هوا، رسانایی صفحه جاذب و عدم یخ‌زدگی سیال از جمله مزایای جمع‌کننده‌های خورشیدی با سیال کاری هوا نسبت به جمع‌کننده‌های خورشیدی با سیال خنک‌کننده آب می‌باشد. مهم‌ترین مشکل این جمع‌کننده‌ها پایین بودن ضریب انتقال گرما بین صفحه جاذب و هوا است که باعث کاهش بازده گرمایی آن می‌شود [۱۸]. تاکنون در جمع‌کننده‌های هوایی خورشیدی دو نوع جاذب تخت و متخلخل بکار گرفته شده است. از معایب اصلی جاذب‌های غیر متخلخل تخت نقصان انتقال گرمای کامل بین جاذب و سیال بوده که منجر به پایین آمدن بازده گرمایی جمع‌کننده می‌گردد. در حقیقت در این جمع‌کننده‌ها لایه‌های زیرین هوا که از روی صفحه جاذب عبور می‌کند در طول مسیر با هوا در تماس بوده و با بالا رفتن دمای آن در مسیر، انتقال گرما از صفحه جاذب به سیال کاهش

می‌یابد. در نتیجه دمای صفحه جاذب بالا رفته و انتقال گرما به پوشش شیشه‌ای از طریق همرفت و تابش افزایش می‌یابد که این امر موجب افت گرمایی بیشتر می‌گردد. این نوع صفحات جاذب برای استفاده در جمع‌کننده‌های با جریان طبیعی یا آزاد مناسب هستند، زیرا افت فشار کمی ایجاد می‌کند و مانع حرکت سیال نمی‌گردند [۹] در جمع‌کننده‌های از نوع متخلخل هوای عبوری از جمع‌کننده از میان خلل و فرج صفحه جاذب عبور کرده و باعث ارتقاء کیفیت انتقال گرما بین جاذب و سیال می‌گردد. همچنین به خاطر تماس هوای خنک بر روی صفحه جاذب و عبور هوا تحت عامل مکش باعث کاهش ضایعات گرمایی به طریقه‌ی همرفتی و تابشی می‌گردد [۱۰]. صفحات جاذب متخلخلی که تاکنون در تحقیقات متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است عبارتند از: جاذب‌های ساخته شده از ورقه‌های آلومینیومی بریده شده [۷]، تورهای سیمی، [۴، ۱۱] خرده‌های شیشه [۸]، صفحاتی از جنس الیاف مصنوعی سیاه [۳] و پارچه ضخیم کتانی سیاه [۲۷]. همچنین ورقه‌های فلزی سوراخدار و شیاردار می‌باشد [۳]. مزیت صفحه جاذب متخلخل نسبت به غیر متخلخل این است که اتلاف انرژی گرمایی به محیط به دلیل نفوذ و جذب تابش خورشیدی در عمق صفحه جاذب کمتر است [۹]. مطالعاتی که Whillier (۱۹۶۴) بر روی جمع‌کننده‌های با سیال کاری هوا از نوع معمولی انجام داد، مشخص شد که استفاده از یک لایه پوشش شفاف برای افزایش بازده جمع‌کننده از لحاظ اقتصادی ضروری است، مگر اینکه ضریب انتقال گرما بین صفحه جاذب و هوای عبوری از $\frac{Btu}{hr.ft^2.F}$ تجاوز کند [۲۵].

Zomorodian et al. (۲۰۰۱) در پژوهشی یک جمع‌کننده با جاذب متخلخل از جنس پارچه ضخیم کتانی سیاه را مورد استفاده قرار دادند. پوشش شیشه‌ای این جمع‌کننده بصورت شکافدار با آرایش پله‌ای بود که فواصل عمودی بین شیشه‌ها ۳، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد این جمع‌کننده بالا است که علت آن بالا بودن انتقال گرما از جاذب متخلخل به هوا و کاهش تلفات گرمایی از قسمت فوقانی با به‌کار بردن پوشش شکافدار ذکر گردید [۲۷].

Sotudeh (۲۰۰۲) در تحقیقی به بررسی جهت وزش باد بر عملکرد یک جمع‌کننده بدون پوشش با منافذ شکاف مانند پرداخت. در این تحقیق مشخص شد که بیشترین کارایی گرمایی جمع‌کننده هنگامی است که جهت وزش باد عمود بر راستای شیارها باشد و کمترین مقدار آن با وزیدن باد در امتداد شیارها رخ می‌دهد. این تفاوت تأثیری در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد در بازده جمع‌کننده را شامل می‌شود [۲۱].

Razavikhosroshahi (۲۰۰۳) با استفاده از نرم افزار Fluent به بررسی عددی انتقال گرما در صفحات مشبک همراه با مکش در جریان موازی پرداخت. وی بیان کرد که عملکرد گرمایی این صفحات وابسته به شش پارامتر بدون بعد است که یکی از آنها $x = \frac{t}{D}$ می‌باشد که نشان دهنده نسبت ضخامت صفحه به قطر سوراخ‌ها است. افزایش این پارامتر نشان دهنده افزایش سطح انتقال گرما درون سوراخ می‌باشد و باعث انتقال گرما بیشتر درون صفحه شده و کارایی گرمایی صفحه را افزایش می‌دهد [۱۹].

Zomorodian & Barati (۲۰۱۰) برای بالا بردن ضریب انتقال گرما بین صفحه جاذب و هوا از صفحه جاذب متخلخل با سه تخلخل متفاوت با ضخامت ۱/۲۵ mm از نوع صفحه سوراخدار آلومینیومی استفاده کردند و

برای کاهش تلفات گرمایی از قسمت فوقانی یک لایه پوشش مورد استفاده قرار دادند نتایج تحقیق آن‌ها دو تخلخل بهتر ۰/۰۱۷۷ و ۰/۰۳۱۴ برای صفحات جاذب را مشخص کرده است [۲۸].

Kalogirou et al (۱۹۹۹) در پژوهشی یک شبکه عصبی مصنوعی را به منظور پیش‌بینی انرژی مفید استخراج شده از سیستم‌های ترموسیفونی گرمایشی خورشیدی آبی خانگی و افزایش دمای آب ذخیره شده مورد آموزش قرار دادند. نتایج بیانگر این بود که آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی مناسب می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد این سیستمها تحت هر شرایط آب و هوایی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

Benli (۲۰۱۳) در تحقیقی از شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی رابطه غیر خطی پیچیده بین عملکرد حرارتی و پارامترهای ورودی دو نوع جمع‌کننده خورشیدی هوایی با دو نوع جاذب مختلف، استفاده کرد. مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایش بیانگر این بود که مدل LM توانایی شناخت رابطه بین ورودی‌ها و خروجی را دارد. همچنین تحلیل خطای آماری بیانگر این بود که مدل LM با ۳ نرون در لایه مخفی حالت بهینه انتخاب شد زیرا در این حالت ماکزیمم ضریب تبیین برای دو نوع جمع‌کننده ۰/۹۹۷۱ و ۰/۹۹۸۵ و مینیمم مقدار RMSE به ترتیب ۰/۰۴۱۸ و ۰/۰۲۶۲ بدست آمد که رضایت بخش می‌باشد [۵].

Sharma et al. (۲۰۱۲) در پژوهشی، مروری بر کاربرد تکنیک‌های هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی خورشیدی داشتند [۲۲] برای مثال کاربرد ANN در پیش‌بینی تابش خورشیدی جهانی در مناطقی که ابزار اندازه‌گیری مستقیم کاربرد ندارد [۲]، در کاربردی دیگر رفتار ساختمان از طریق شبیه‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی ANN و ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آسایش حرارتی و مصرف انرژی در ساختمان مسکونی، مورد بررسی قرار گرفت [۱۷]، استفاده از منطق فازی برای کنترل عملکرد صفحه غلتان محرک به عنوان یک دستگاه تنظیم‌کننده برای اطمینان و تضمین شدت روشنایی مورد انتظار، به منظور توسعه و طراحی کنترل‌کننده فازی برای کنترل موقعیت صفحه غلتان با توجه به تابش خورشیدی در دسترس، [۱۶] و نمونه‌هایی از کاربرد ANN در سیستم‌های خورشیدی در این پژوهش است.

در نتیجه می‌توان گفت تکنیک‌های هوش مصنوعی برای بهبود قابل توجه در بهره‌وری و پیش‌بینی مجموعه‌ای بهینه از متغیرهای عملیاتی برای طراحی سیستم‌های انرژی خورشیدی مناسب‌اند که در این سیستمها حوزه‌های بسیاری برای استفاده ترکیبی از این روش‌ها با دیگر تکنیک‌های بهینه‌سازی به منظور بهبود عملکرد سیستم وجود دارد. همچنین به منظور صرفه‌جویی در چرخه زندگی (LCS) و ارزیابی چرخه حیات (LCA) سیستم‌های انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از اجرای این روش و بعد از آموزش، مدل ANN توانایی پیش‌بینی نتایج رضایت بخش برای داده‌های ناشناخته شده را دارد.

اهداف این پژوهش به منظور ارزیابی قابلیت مدل شبکه عصبی پرسپترون در مدل‌سازی و پیش‌بینی کارایی حرارتی جمع‌کننده‌ها تحت تاثیر پارامترهای ورودی، جریان جرمی سیال ورودی، دمای هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده، دمای صفحه جاذب، ضخامت آن، تخلخل صفحه جاذب و شید خورشید، انجام شد.

آزمایش‌ها در سه تکرار در فواصل زمانی ۱۱ تا ۱۳ بعد از ظهر، با متوسط تابش خورشیدی 1040 Wm^{-2} انجام گرفت.

۲- مواد و روش‌ها:

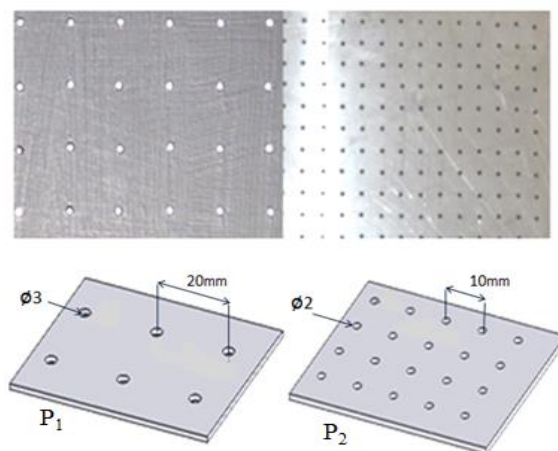
در این مطالعه دو نوع کلکتور خورشیدی هوایی مورد آزمایش قرار داده شد که تاثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد حرارتی جمع‌کننده به کمک شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۱- مشخصات هواگرمکن‌های مورد استفاده:

جهت ساخت دستگاه ابتدا چارچوب نگهدارنده صفحه جاذب به عنوان بدنه‌ی اصلی جمع‌کننده و کانال خروج هوا، ساخته شدند و سپس صفحه جاذب نصب گردید. پوشش شیشه‌ای درون چارچوب ساخته شده قرار گرفت و قسمت‌های مختلف دستگاه درزبندی شد و سطوح تحتانی و جانبی آن کاملاً عایق‌بندی گردید. کانال خروجی دستگاه برای توزیع یکنواخت هوا به شکل مخروط ناقص با مقطع مستطیلی ساخته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده توسط زمردیان و براتی (۲۰۱۰)، در تحقیق حاضر دو تخلخل $P_1 = 0.177$ و $P_2 = 0.314$ برای صفحات جاذب متخلخل آلومینیومی در نظر گرفته شد تا تاثیر تخلخل بر بازده بررسی شود همچنین صفحات با ابعاد $110 \times 75 \text{ cm}$ و ضخامت $2/5 \text{ mm}$ مورد استفاده قرار گرفتند (قطر منافذ 2 mm و به فاصله 1 cm ($P_1 = 0.314$) و در نوع دیگر منافذ به قطر 3 mm و به فاصله 2 cm ($P_2 = 0.177$) در نظر گرفته شدند) همچنین آرایش منافذ در هر دو جاذب از نوع مربعی بود (شکل ۱). در این صفحات تخلخل هر صفحه از رابطه زیر به دست می‌آید [۱].

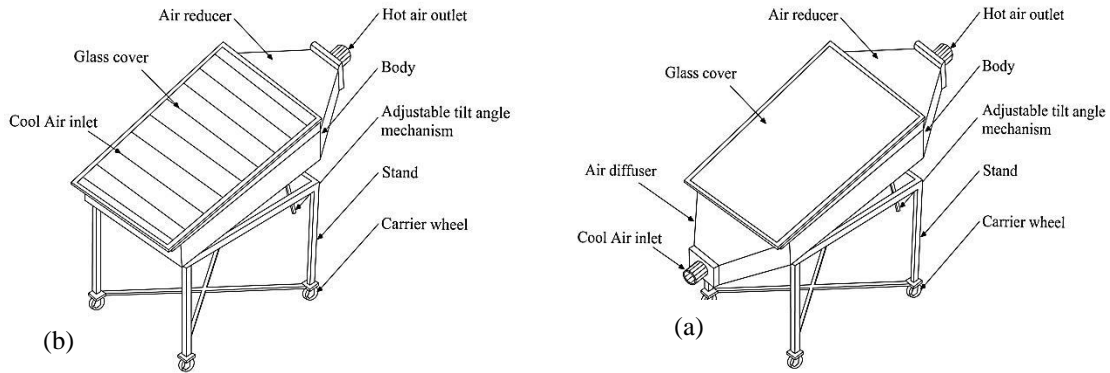
$$\sigma = \frac{A_{hole}}{A_{plate}} = \frac{\pi D^2}{4P^2} \quad (1)$$

که در آن D : قطر سوراخ (cm)، P : گام تکرار سوراخ‌ها است (cm)، σ : تخلخل صفحه جاذب، A_{hole} : سطح احاطه شده هر سوراخ (cm^2)، A_{plate} : سطح کل صفحه جاذب (cm^2).



شکل ۱. صفحات جاذب با دو تخلخل متفاوت

برای اندازه گیری دمای صفحه جاذب، هوای ورودی و هوای خروجی کلکتور از حسگر حرارتی هوشمند از نوع SMT- ۱۶۰ با دقت ± 0.5 درجه سلسیوس استفاده گردید.



شکل ۲. نمایی کلی از جمع کننده خورشیدی هوایی. (a) پوشش شیشه ای تخت، (b) پوشش شیشه ای پله ای

دبی جرمی هوا یکی از کمیت های مهم جهت محاسبه بازده گرمایی جمع کننده های خورشیدی می باشد. برای اندازه گیری این کمیت از دبی سنج توربینی Lutron مدل YK-۲۰۰۱AL ساخت کشور تایوان با دقت 0.1 متر بر ثانیه استفاده شد. باید توجه داشت که با استفاده از دبی سنج سرعت هوای ورودی بر حسب متر بر ثانیه بدست می آید که برای تبدیل آن به دبی جرمی از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\dot{m} \left(\frac{kg}{m^3.s} \right) = V \left(\frac{m}{s} \right) * A_1 (m^2) * \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) / A_2 (m^2) \quad (2)$$

که در آن \dot{m} : دبی جرمی هوای ورودی بر حسب $(kgm^{-3}s^{-1})$ ، V : سرعت هوای ورودی بر حسب (ms^{-1}) ، A_1 : سطح محفظه عبوری هوا در محل نصب دبی سنج (m^2) ، A_2 : سطحی از جاذب که مورد ارزیابی قرار می گیرد (m^2) و ρ : دانسیته هوای ورودی (kgm^{-3}) .

برای مکش هوای ورودی در این جمع کننده، مکنده گریز از مرکز Parma با دور 1400 rpm و ساخت ایتالیا با سرعت ثابت مورد استفاده قرار گرفت. برای تغییر دور موتور و ایجاد دبی های مختلف ترانس مبدل^۱ مدل SF۱۵۰-۰۰۱۵، ساخت کشور کره و با توان 1.5 KW مورد استفاده قرار گرفت. همچنین اندازه گیری تابش خورشیدی در زمان آزمایش با استفاده از یک دستگاه شید سنج Cassela ساخت کشور انگلستان صورت گرفت. دامنه این شیدسنج 0 تا 2000 وات بر متر مربع می باشد که حساسیت آن یک میلی وات بر مترمربع است. آزمایش هر روز از ساعت 11 تا 13 بعد از ظهر صورت می گرفت. فن دستگاه از ساعت $10:30$ برای رسیدن به حالت پایدار روشن شده و هر آزمایش با توجه به ثابت زمانی جمع کننده به مدت 30 دقیقه انجام می شد. بعد از آماده سازی جمع کننده آزمایش ها در شرایط طبیعی انجام شد. مناسب ترین زاویه

قرارگیری جمع کننده و شیدسنج طبق رابطه (۱) و با توجه به اینکه شیراز بر روی عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی قرار دارد، ۴۵ درجه تعیین و تنظیم شد [۹].

$$\alpha = 15 + \text{عرض جغرافیایی محل} \quad (۳)$$

که در آن α زاویه قرار گیری جمع کننده و شیدسنج می باشد.

بازده جمع کننده از رابطه (۴)، با تقسیم انرژی جذب شده توسط هوای عبوری از جمع کننده بر انرژی تابش خورشیدی رسیده به سطح جمع کننده که توسط شیدسنج اندازه گیری شد، بدست می آید و بدین روش که در هر دبی آزمایشی از میانگین داده های سه تکرار مربوط به آن دبی استفاده گردید [۶]. میانگین دمای هوای ورودی، دمای صفحه جاذب، و هوای گرم خروجی از آن با استفاده از حسگرها بدست آمد.

$$EF = \dot{m} c_p \frac{(T_o - T_i)}{G_T} \quad (۴)$$

که در آن

EF : بازده جمع کننده، \dot{m} : دبی جرمی در واحد سطح جمع کننده ($kg s^{-1} m^{-2}$)، c_p : ظرفیت گرمایی ویژه هوا ($J kg^{-1} °C^{-1}$)، G_T : میزان شار تابشی بر روی صفحه جمع کننده ($W m^{-2}$)، T_o : دمای هوای خروجی از جمع کننده ($°C$) و T_i : دمای هوای ورودی به جمع کننده ($°C$).

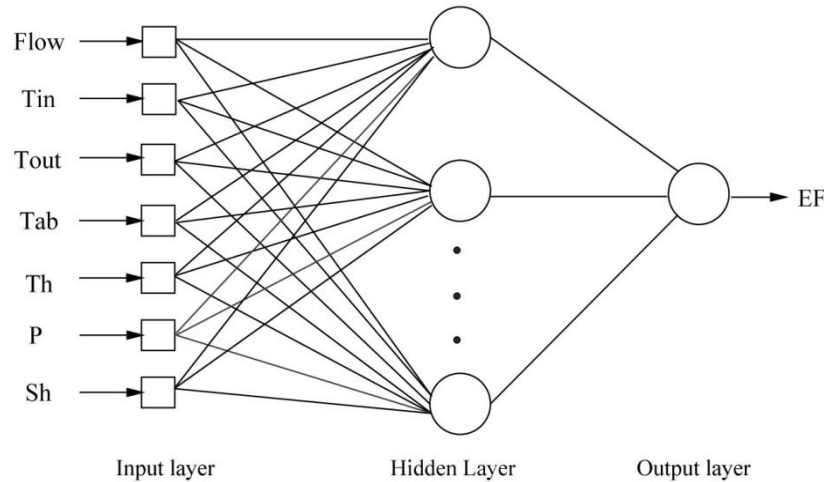
۲-۲- مدل شبکه عصبی: در ابتدا داده های موجود به طور تصادفی به سه دسته مجموعه آموزش ۸۰ درصد کل داده ها (کل داده ها برای یک نوع جمع کننده ۷۲ عدد می باشد)، مجموعه اعتبار سنجی ۱۰ درصد و مجموعه تست ۱۰ درصد کل داده ها تقسیم بندی شدند.

برای مدل سازی از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) استفاده شد که این نوع شبکه عصبی با دریافت بردار ورودی (شامل دبی هوای عبوری از کلکتور، دمای هوای ورودی و خروجی، دمای جاذب، ضخامت و تخلخل صفحه جاذب و شید خورشید) بردار خروجی EF (بازده) را تولید می کند. هدف اتخاذ پارامترهای صحیح شبکه به منظور دستیابی به خروجی واقعی است که تا جای ممکن نزدیک به خروجی مطلوب متناظر با خود باشد [۲۴]. در آموزش شبکه از الگوریتم $Backpropagation (BP)$ و نوع $Levenberg-Marquardt (LM)$ استفاده شده است. کد کامپیوتری این الگوریتم در محیط برنامه نویسی $MATLAB$ تهیه شد. برای ارزیابی قابلیت شبکه عصبی در پیش بینی عملکرد حرارتی از معیارهای متوسط قدرمطلق درصد خطا ($MAPE^1$)، ریشه متوسط مربعات خطا ($RMSE^2$) و ضریب تبیین معادله خطی رگرسیونی بین مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه عصبی و مقادیر واقعی آنها استفاده شد [۲۰].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (d_{ji} - p_{ji})^2}{nm}} \quad (۵)$$

$$MAPE = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left| \frac{d_{ji} - p_{ji}}{d_{ji}} \right| \times 100 \quad (۶)$$

در اینجا d_{ji} مؤلفه i ام از خروجی واقعی مربوط به نرون j ام، p_{ji} مؤلفه i ام از خروجی پیش‌بینی شده توسط شبکه مربوط به نرون j ام، \bar{d} و \bar{p} به ترتیب متوسط خروجی‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط شبکه و n و m به ترتیب تعداد نرون‌ها و تعداد متغیرهای خروجی هستند.



شکل ۳. ساختار شبکه MLP

۳- نتایج و بحث:

برای رسیدن به بهترین ساختار شبکه عصبی مصنوعی با توجه به ثابت بودن تعداد ورودی‌ها، تعداد لایه‌های پنهان [۱۳]، تعداد نرون‌های خروجی و توابع فعال‌سازی هر نرون تعداد نرون‌های لایه مخفی مورد تغییر قرار گرفت. بر اساس قضیه تقریب عمومی، شبکه عصبی با یک لایه مخفی و با تعداد کافی نرون در آن لایه قادر به تقریب هر تابع پیوسته دلخواه است [۱۳]، یک لایه مخفی برای شبکه عصبی انتخاب شد. تعداد نرون‌های لایه مخفی با استفاده از روش آزمون و خطا بدست آمد. اگر تعداد نرون‌ها در لایه مخفی کافی نباشد، شبکه قادر به یادگیری خوب نخواهد شد. عکس این مسئله منجر به تضعیف ویژگی تعمیم‌پذیری شبکه می‌شود [۲۶]. نتایج نشان داد که شبکه عصبی MLP با ۱۰ نرون در لایه مخفی قادر به یادگیری عملکرد حرارتی در طول زمان است (با در نظر گرفتن $\alpha = 0.9, \eta = 0.01, \text{epoch} = 1000$). برای رسیدن به عملکرد بهتر و تسریع در همگرایی شبکه از عامل ممنوم (α) استفاده شد [۱۱]. به دلیل اثرات متقابل این دو پارامتر در عملکرد شبکه، پیدا کردن مقادیر بهینه آنها مشکل می‌باشد [۲۳]. مقادیر بهینه پارامترهای نیز از طریق آزمون و خطا انتخاب شدند.

با در نظر گرفتن تعداد نرون‌های بهینه در مرحله آموزش^۴، نتایج بدست آمده از داده‌های مرحله آموزش، مرحله اعتبار^۵، مرحله آزمایش^۶ و کل^۷، بهترین مدل‌های شبکه عصبی برای کلکتور با پوشش شیشه‌ای تخت و پوشش شیشه‌ای پله‌ای مشخص شد.

^۴ Train

^۵ Validation

^۷ Test

۳-۱- تحلیل آماری نتایج شبکه عصبی: در جدول ۱ نتایج حاصل از پیش بینی شبکه عصبی آموزش دیده بر مبنای پارامترهای ورودی آورده شده است. هدف از این مرحله ارزیابی ویژگی تعمیم پذیری و شایستگی مدل عصبی انتخاب شده است. بنابراین مدل با استفاده از مجموعه داده‌هایی غیر از مجموعه داده-های آموزش مدل (مجموعه داده‌های آزمون) ارزیابی می‌شود. با توجه به جدول می‌توان گفت نتایج مربوط به جمع کننده خورشیدی با پوشش شیشه‌ای پله‌ای مطلوبتر است زیرا دارای ماکزیمم مقدار ضریب تبیین (R^2) و مینیمم مقدار معیارهای خطای RMSE و MAPE می‌باشد.

جدول ۱. شاخص‌های عملکردی داده‌های مجموعه آموزش، اعتبار، آزمایش و کل برای بهترین مدل‌های تخمین زده شده

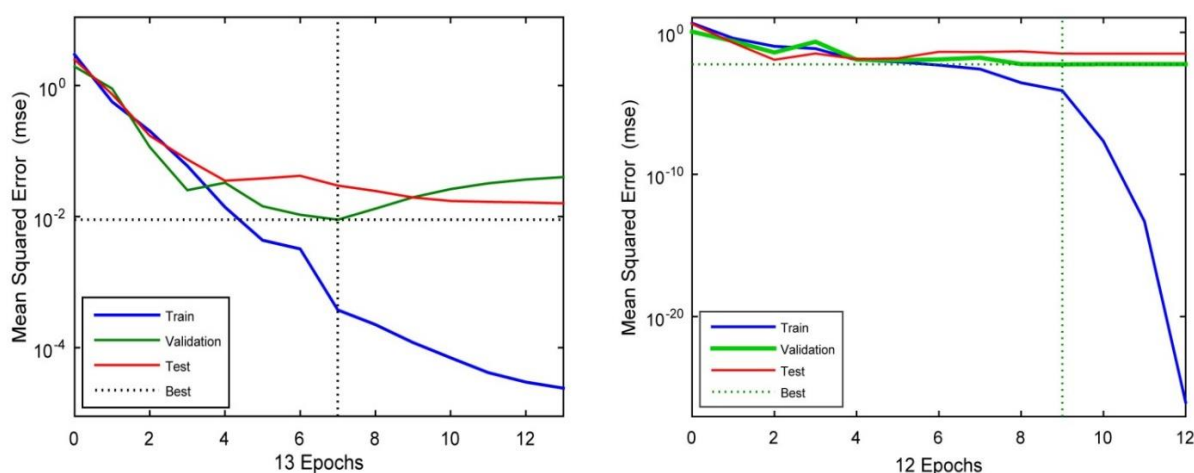
نوع کلکتور	شاخص‌ها	آموزش	اعتبار	آزمایش	کل
	R^2	۰/۹۹۹۰	۰/۹۷۹۴	۰/۹۴۰۷	۰/۹۸۹۸
پوشش شیشه ای تخت	RMSE	۰/۰۰۵۸	۰/۰۲۸۲	۰/۰۵۱۳	۰/۰۱۹۰
	MAPE(%)	۰/۸۷۷۹	۵/۷۲۹۴	۷/۹۹۸۱	۲/۰۴۱۸
	R^2	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۰۷	۰/۹۵۶۲	۰/۹۹۱۴
پوشش شیشه ای پله ای	RMSE	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۲۸	۰/۰۵۴۷	۰/۰۱۸۶
	MAPE(%)	۰/۳۴۱۳	۳/۸۹۰۰	۴/۶۰۷۹	۱/۱۰۱۱

داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه از نظر آماری با هم مقایسه شدند. نتایج عملکرد مدل شبکه عصبی بر حسب مقادیر p در سه مرحله آموزش، معتبرسازی و آزمون در جدول ۲ آورده شده است، می‌توان گفت در تمام موارد $P\text{-value} > 0.7$ می‌باشد، بنابراین بین میانگین، واریانس و توزیع آماری داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد این نتایج نشان می‌دهند که می‌توان به چنین شبکه‌هایی اطمینان کرد زیرا قابلیت تعمیم پذیری شبکه عصبی آموزش دیده قابل قبول می‌باشد. همچنین بر اساس مقدار ضریب تبیین (R^2) برای هر سه مرحله کاری شبکه می‌توان الگوی تغییرات عملکرد حرارتی کلکتور را به کمک شبکه عصبی تخمین زد بعلاوه با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که پوشش شیشه‌ای پله‌ای مناسب‌تر است.

جدول ۲. مقادیر p مقایسات آماری میانگین، واریانس، توزیع و R^2 بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط ANN

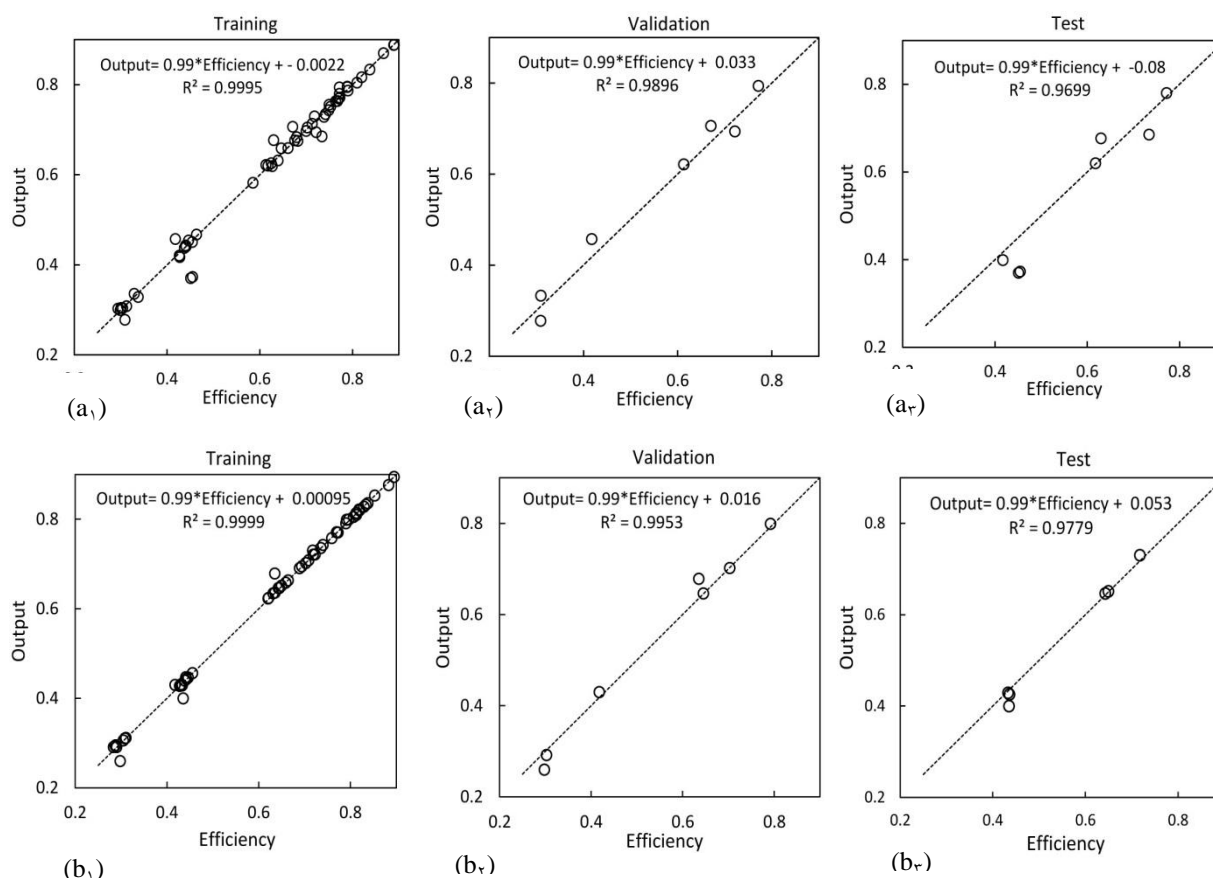
Test phase			Validation phase			Train phase				
Distribution	Variance	Mean	Distribution	Variance	Mean	Distribution	Variance	Mean		
۰.۴۲۳۲	۰.۶۶۶۷	۰.۷۷۰۱	۰.۹۹۹۸	۰.۹۶۴۲	۰.۹۳۰۰	۰.۹۹۸۷	۰.۹۷۲۸	۰.۹۸۱۴	P	Flat cover
		۰.۹۴۰۷			۰.۹۷۹۴			۰.۹۹۹۰	R^2	
۰.۴۲۳۲	۰.۵۳۰۴	۰.۸۷۴۳	۰.۸۸۲۷	۰.۸۷۰۰	۰.۹۸۸۶	۰.۹۹۸۷	۰.۹۵۴۶	۰.۹۹۸۶	P	Slatt cover
		۰.۹۵۶۲			۰.۹۹۰۸			۰.۹۹۹۸	R^2	

نمودار همگرایی شبکه عصبی برای پیش بینی عملکرد حرارتی کلکتور با پوشش شیشه ای تخت و پله ای در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا یا RMSE از مقدار ۱۰ برای کل مجموعه آموزش و آزمایش و اعتبار به تدریج با افزایش تکرارها کمتر می شود و بعد از ۷ و ۹ تکرار به ترتیب برای پوشش های شیشه ای تخت و پله ای برای داده های اعتبار مقدار ریشه میانگین مربعات خطا رو به افزایش می رود. افزایش تعداد تکرارهای الگوریتم برای کل مجموعه آموزش موجب کاهش مقدار ریشه میانگین مربعات خطا می شود در حالی که از تکرار هفتم و نهم به بعد ادامه تکرار بی فایده خواهد بود بلکه موجب افزایش مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در مجموعه اعتبار می شود.



شکل ۴. نمودار همگرایی شبکه عصبی برای پیش بینی عملکرد حرارتی کلکتور با پوشش شیشه ای تخت و پله ای. mse مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و Epochs: تعداد تکرارها. (a) پوشش شیشه ای تخت. (b) پوشش شیشه ای پله ای

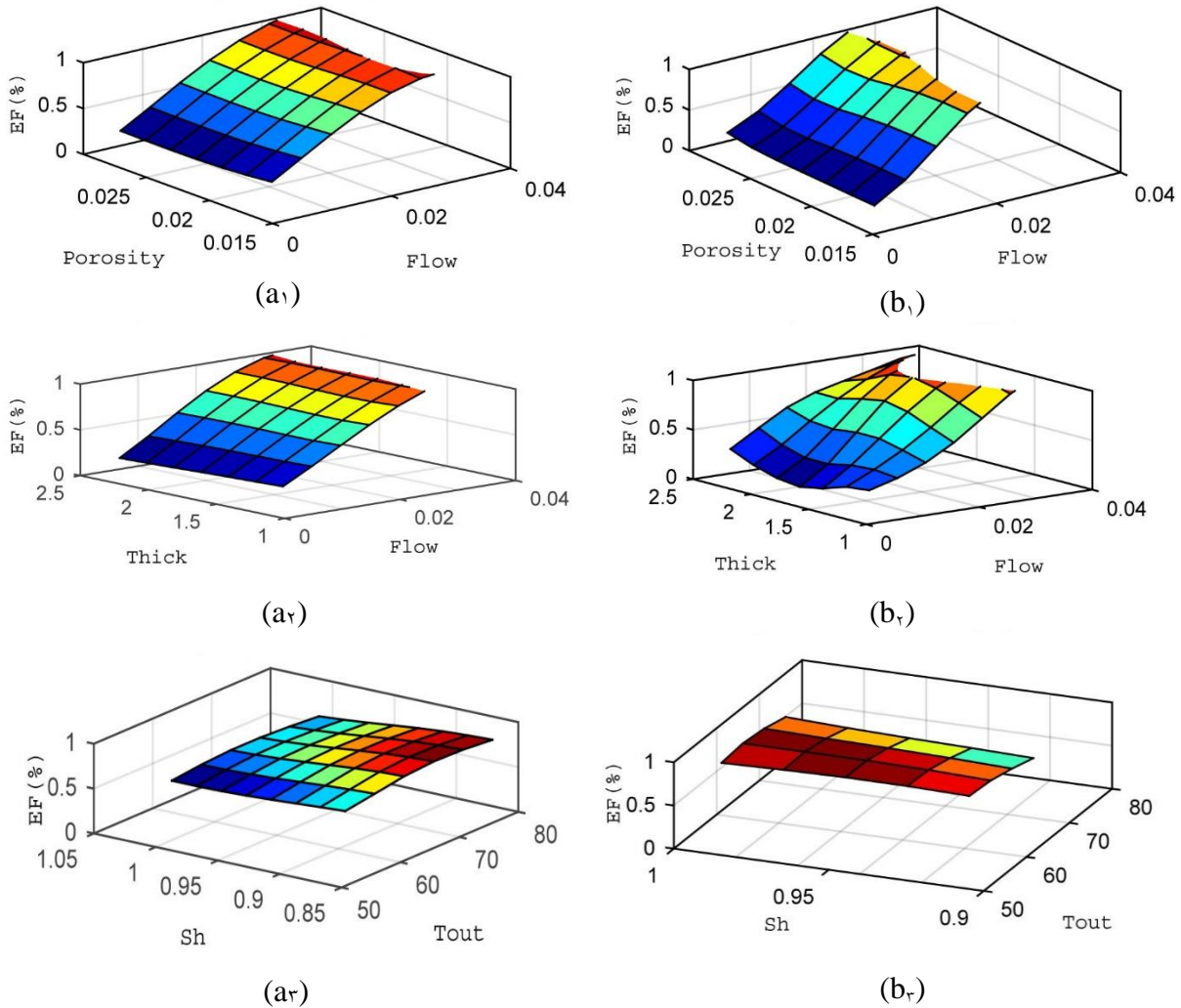
شکل ۵ ضرایب تبیین و همچنین رابطه خطی رگرسیونی بین مقادیر عملکرد حرارتی واقعی کلکتور هوایی با پوشش شیشه ای تخت و پوشش شیشه ای پله ای در مقابل عملکرد حرارتی پیش بینی شده برای این دو حالت را توسط شبکه عصبی نشان می دهد. بهترین نتایج بر اساس این دو معیار زمانی بدست می آید که معادله خطی ما بین عملکرد واقعی و عملکرد پیش بینی شده توسط شبکه علاوه بر داشتن ضریب تبیین بالا دارای کمترین عرض از مبدا (نزدیک به صفر) و شیب نزدیک به یک باشد (Efficiency = $1/0.00$ Output = $0/0.00$). کاملاً واضح است که ضرایب تبیین بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی در هر مورد بسیار بالا می باشد ($R^2 > 0/9$). همچنین معادله خطی رگرسیونی مابین آنها دارای شیب های نزدیک به واحد و عرض از مبداهای نسبتاً کوچکی هستند، بنابر این می توان به چنین شبکه هایی اطمینان داشت. ارزیابی توانایی تکنیک شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک روش جایگزین در پیش بینی عملکرد حرارتی واقعی کلکتور هوایی خورشیدی نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی توانایی بالایی در فراهم کردن پیش بینی های مطمئن و دقیق از عملکرد حرارتی دارد.



شکل ۵. رابطه بین مقادیر عملکرد واقعی و پیش بینی شده برای کلکتور با پوشش شیشه‌ای پله‌ای در مراحل (از سمت چپ) آموزش، اعتبار و آزمایش شبکه برای الگوریتم آموزش. Output: مقدار عملکرد حرارتی پیش‌بینی شده توسط شبکه و Efficiency: عملکرد واقعی. a. پوشش شیشه‌ای تخت b. پوشش شیشه‌ای پله‌ای.

با تحلیل آماری نتایج بدست آمده از تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی حرارتی جمع‌کننده خورشیدی هوایی، می‌توان گفت که پارامترهای دبی هوای ورودی، پوشش شیشه‌ای، تخلخل و ضخامت اثر بسیار معنی‌داری ($p = 0/01$) بر روی راندمان نشان دادند. با بررسی کلی نمودارهای شکل ۶ می‌توان گفت در دبی‌های پایین (دبی کمتر از $0/01 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) راندمان برای دونمودار با دو پوشش متفاوت تقریباً یکی است که نتیجه می‌شود در دبی‌های پایین نوع پوشش تأثیر چندانی بر بازدهی کلکتور ندارد. اما با دقت در نمودار در می‌یابیم که در دبی‌های بالا کلکتور با پوشش پله‌ای تغییرات راندمان کمینه و بیشینه بیشتر از حالتی است که پوشش از نوع تخت باشد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که در حالتی که پوشش از نوع پله‌ای است به طور میانگین اختلاف دمای هوای ورودی و قسمتهای مختلف جاذب بیشتر از حالتی است که پوشش تخت می‌باشد به عبارت دیگر هوای ورودی از قسمتهای مختلف پوشش پله‌ای به طور یکنواخت‌تر جاذب را خنک می‌کند. همچنین در حالت پوشش پله‌ای چون هوا از شکافهای بین شیشه‌ها وارد جمع‌کننده می‌شود در نتیجه شیشه‌ها خنک شده و گرمای جذب شده به وسیله آنها منتقل می‌شود. لذا با مقایسه با پوشش

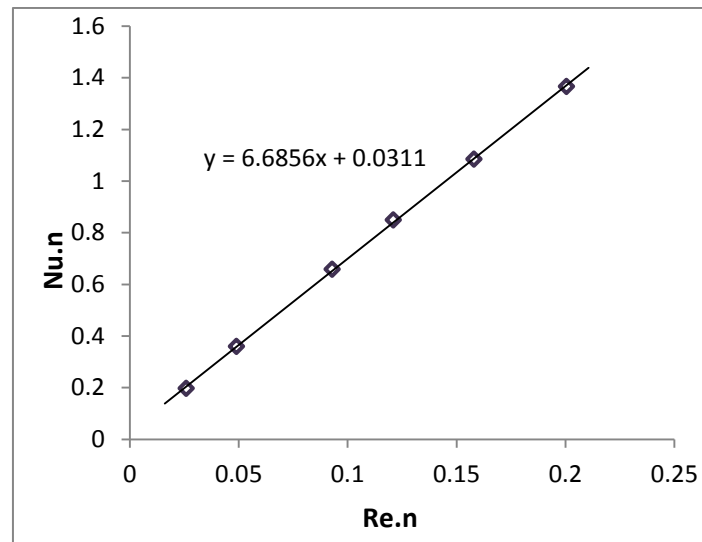
تخت می توان گفت چون جاذب و شیشه ها در حالت پلهای خنک تر می گردند، تلفات حرارتی جابجایی و تابشی هم به طبع آن کمتر شده و راندمان بیشتری بدست می آید.



شکل ۶. تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد حرارتی جمع کننده خورشیدی هوایی (a) جمع کننده با پوشش شیشه ای تخت، (b) جمع کننده با پوشش شیشه ای پلهای

با توجه به نمودارهای بدست آمده می توان گفت با افزایش دبی راندمان جمع کننده افزایش یافته است. علت افزایش راندمان در دبی های بالا متأثر از انتقال گرمای بهتر از جاذب به سیال به علت تماس حجم بیشتری از هوا با جاذب و بالا رفتن ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) که باعث کاهش دمای جاذب و اختلاف آن با دمای هوای محیط می گردد، می باشد. این کاهش دما باعث کاهش تلفات حرارتی از طریق تابش و همرفت شده و همین امر عامل افزایش راندمان می باشد.

همچنین نمودار تغییرات عدد ناسلت^۸ نسبت به رینولدز در شکل ۷ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت مربوط به سیال انتقال دهنده گرما زیاد شده که حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی h با افزایش دبی جرمی هوا می‌باشد همانطور که قبلاً نیز به همین نتیجه رسیده بودیم.



شکل ۷. تغییرات عدد ناسلت به ازای تغییرات عدد رینولدز

جالب توجه است که تغییرات عدد ناسلت با رینولدز بصورت خطی است [۱۴].

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (7)$$

V : سرعت جریان هوا بر روی کلکتور (ms^{-1}), L : طول مشخصه سطح مورد نظر (m), ν : لزجت سینماتیکی سیال ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (8)$$

h : ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), L : طول مشخصه سطح مورد نظر (m), k : ضریب رسانایی گرما ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

راندمان جاذب با تخلخل کمتر در دبی‌های پائین‌تر، بالاتر می‌باشد. در حقیقت تخلخل بیشتر و دبی کم باعث می‌شود تا بیشتر هوا از قسمت‌های پایین جاذب عبور کند و دمای قسمت‌های نزدیک به خروجی هوای گرم بالا رود. به عبارتی دیگر جاذب با تخلخل کمتر در دبی‌های کم بهترین انتقال گرما و کمترین تلفات حرارتی را داشته است و این در اثر عبور یکنواخت‌تر هوا از جاذب می‌باشد. اما با افزایش دبی، عبور هوا از جاذب یکنواخت‌تر گشته و عامل تخلخل تأثیر گذارتر بوده است. به عبارت دیگر بالا بودن راندمان صفحه جاذب با تخلخل بیشتر در دبی‌های بالا می‌تواند ناشی از تأثیر تخلخل بالای این صفحه باشد که این امر ناشی از تماس بیشتر هوا با جاذب است. بعلاوه ماکزیمم راندمان در حالتی که ضخامت صفحه جاذب بیشینه است

^۸ Nusselt Number

اتفاق می‌افتد. در حقیقت در ضخامت ماکزیمم، جرم بیشتری از ماده (آلومینیوم) بر اثر تابش خورشید گرم می‌شود و یا به عبارت دیگر هوای عبوری از جاذب در حین عبور از آن مسافت بیشتری از منافذ صفحه جاذب عبور کرده و همچنین جرم بیشتری از جاذب را پوشش می‌دهد و صفحه را خنک می‌کند، در نتیجه هوای خروجی از آن گرمتر می‌گردد. مطابق نتایج بدست آمده از نمودارها، با افزایش اختلاف دمای خروجی از جمع‌کننده و محیط به ازای واحد تابش خورشیدی، مقدار راندمان حرارتی در هر دو جمع‌کننده کاهش یافته است که مربوط به دبی‌های کم هوا می‌باشد. در حقیقت با افزایش دبی جرمی هوا، اختلاف درجه حرارت هوای خارج شده از صفحه جاذب نسبت به دمای هوای محیط در همه جمع‌کننده‌ها کاهش یافته که منجر به کاهش اختلاف دمای هوای خروجی از صفحه جاذب و محیط به ازای واحد تابش خورشیدی و افزایش راندمان حرارتی کلکتور می‌گردد.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات و نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی، در کل می‌توان گفت کلکتور با پوشش شیشه‌ای پله‌ای عملکرد حرارتی بیشتری دارد.

۴- نتیجه گیری:

کاربرد شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی رابطه عملکرد حرارتی دو نوع کلکتور هوایی خورشیدی و متغیرهای ورودی با موفقیت صورت گرفت. مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حاصل از آزمایشات بیانگر این بود که این مدل توانایی پیش‌بینی رابطه اساسی بین متغیرهای ورودی و عملکرد حرارتی کلکتور را دارا می‌باشد. همچنین آنالیز آماری خطاها، قابلیت اطمینان و دقت این مدل را نشان می‌دهد. ضرایب تبیین این مدل برای کلکتور با پوشش تخت ۰/۹۸ و برای کلکتور با پوشش پله‌ای ۰/۹۹ بدست آمد که مطلوب است. نتایج حاکی از آن است که نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و کاربرد الگوریتم Backpropagation می‌توانند به طور دقیق برای پیش‌بینی عملکرد جمع‌کننده‌های خورشیدی هوایی مورد استفاده قرار گیرند که این مدل راه‌حل‌های سریعتر و ساده‌تری نسبت به روشهای محدود آزمایشگاهی برای تخمین عملکرد حرارتی سیستم‌های خورشیدی بدست می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت این امکان وجود دارد که شبکه عصبی مناسبی را برای مدل کردن سیستم‌های خورشیدی آموزش دهیم که بتواند برای پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های تحت شرایط آب و هوایی طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

۴- منابع:

۱. Arulanandam, S. J. (۱۹۹۰). A numerical investigation of unglazed transpired plate solar collectors under zero wind conditions. M. Sc. dissertation, Waterloo University, Ontario, Canada.
۲. Alawi, S., Hinai, H. (۱۹۹۸). An ANN based approach for predicting global solar radiation in locations with no direct measurement instrumentation, *Renewable Energy*, ۱۴, ۱۹۹-۲۰۴.
۳. Bansal, N. K., Bottcher, A. & Uhleman, R. (۱۹۸۳). Performance of plastic solar air heating collector with a porous absorber. *Energy Research*, ۷, ۳۷۰-۳۸۴.
۴. Beckman, W. A. (۱۹۶۸). Radiation and convection heat transfer in a porous bed. *ASME J. Eng. For Power*, ۹۰, ۵۱-۵۴.
۵. Benli, H. (۲۰۱۳). Determination of thermal performance calculation of two different types solar air collectors with the use of artificial neural networks, *International Journal of Heat and Mass Transfer* ۶۰, ۱-۷.
۶. Biondi, P., Cicala, L. & Farina, G. (۱۹۸۸). Performance analysis of solar air heater of conventional design. *Solar Energy*, ۳, ۵۰-۶۴.
۷. Chiou, J. P., Duffie, J. A. & El-Wakil, M. M. (۱۹۶۵). A slit and expanded aluminium foil matrix solar collector. *Solar Energy*, ۹, ۷۳-۹۰.
۸. Collier, R. K. (۱۹۷۹). The characterization of crushed glass as a transpired air heating solar collector material. In: Proc. I.S.E.S., Silver Jubilee Congress, Atlanta, GA, ۱, pp. ۲۶۴-۲۶۸.
۹. Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (۱۹۹۱). *Solar Engineering of Thermal Processes* (۲nd ed.). John Wiley & Sons, New York. ۹۱۸p.
۱۰. Fechner, H. & Bucek, O. (۱۹۹۸). Investigations on several series produced collectors. *Renewable Energy*, ۲۸, ۲۹۳-۳۰۲.
۱۱. Gupta, M. M., Jin, J., Homma, N., ۲۰۰۳. *Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
۱۲. Hamid, Y. H. & Beckman, W. A. (۱۹۷۱). Performance of air-cooled radiatively heated screen matrices. *J. of Engineering for power*, ۹۳, ۲۲۱-۲۲۴.
۱۳. Haykin, S. (۱۹۹۹). *Neural networks: A comprehensive foundation*. McMillan College Publishing Company, New York
۱۴. Incropera, F. P. and D. P. Dewitt. ۱۹۹۶. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Willey & Sons, New York. ۹۲۰p.
۱۵. Kalogirou, S. A. Panteliou, S. Dentsoras, A. (۱۹۹۹). Artificial neural networks used for the performance prediction of a thermosiphon solar water heater, *Renewable Energy* ۱۸ (۱۹۹۹) ۷۶-۸۸.
۱۶. Lah, M.T., Zupancic, B., Peternej, J. (۲۰۰۶). Daylight illuminance control with fuzzy logic, *Solar Energy*, ۸۰ ۳۰۷-۳۲۱.
۱۷. Magnier, L., Haghghat, F. (۲۰۱۰) Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network, *Building and Environment*, ۴۵ (۲۰۱۰) ۷۳۹-۷۴۶
۱۸. Mohamad, A. A. (۱۹۹۷). High efficiency solar air heater. *Solar Energy*, ۶۰(۲), ۷۱-۷۶.
۱۹. Razavikhosroshahi, A. (۲۰۰۳). Numerical simulation study on heat transfer of porous absorber solar air collector with parallel airflow. M. Sc. dissertation, Shiraz University, Department of Mechanical Engineering, Shiraz, Iran. (In Farsi)
۲۰. Rohani, A., Abbaspour-Fard, M.H., and Abdolahpour, S.(۲۰۱۱). Prediction of tractor repair and maintenance costs using artificial neural network. *Expert System Applications* ۳۸, ۸۹۹۹-۹۰۰۷.
۲۱. Sotudeh, A. (۲۰۰۲). Numerical ۲-D simulation of airflow along heat transfer from porous absorber under suction with different angle. M. Sc. dissertation, Shiraz University, Department of Mechanical Engineering, Shiraz, Iran. (In Farsi)
۲۲. Sharma, N., Chauhan, M. K., Kumar, R. (۲۰۱۲). Applications of artificial neural network in solar thermal systems: a review, *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering YMCA University of Science & Technology, Faridabad, Haryana.*
۲۳. Vakil-Baghmisheh, M. T., Pavešic, N., ۲۰۰۱. Back-propagation with declining learning rate. *Proceeding of the ۱۰th Electrotechnical and Computer Science Conference, Portorož, Slovenia. Vol B*, ۲۹۷-۳۰۰.
۲۴. Vakil-Baghmisheh, M.T. (۲۰۰۲). *Farsi Character Recognition Using Artificial Neural Networks*. Dissertation, University of Ljubljana.
۲۵. Whillier, A. (۱۹۶۴). Performance of black-painted solar air heaters of conventional design. *Solar Energy*, ۸(۱), ۳۱-۳۷.

۲۶. Wang Y.M., Elhag T.M.S. ۲۰۰۷. A comparison of neural network, evidential reasoning and multiple regression analysis in modeling bridge risks. *Expert Systems with Applications*, ۳۲: ۳۳۶-۳۴۸.
۲۷. Zomorodian, A. A., Woods, J. L. & Raoufat, M. H. (۲۰۰۱). Performance characteristics of a transpired solar air heater. *Iran Agricultural Research*, ۲۰, ۱۳۹-۱۵۴. (In Farsi)
۲۸. Zomorodian, A. & Barati, M. (۲۰۱۰). Efficient solar air heater with perforated absorber for crop drying. *J. Agr. Sci. Tech*, ۱۲, ۵۶۹-۵۷۷.