

بررسی تأثیر افزایش تعداد پله‌ها و افزودن بافل در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی

فروغ درانی، محمد رضا سردشتی بیرجندی، فرهاد شهرکی*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده: امروزه استفاده از انواع انرژی‌های تجدید شذنی با توجه به مشکل‌های سوخت‌های فسیلی از جمله آلودگی محیط‌زیست و هزینه‌های اقتصادی آن، اهمیت زیادی پیدا کرده است. استفاده از انرژی خورشیدی با توجه به فراوانی و در دسترس بودن این انرژی و قابلیت ذخیره و تبدیل آن به صورت‌های دیگر انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، یک آب شیرین کن پلکانی در حالت دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار کامسول (Comsol) شبیه‌سازی شده است. همچنین افزایش تعداد پله‌ها و افزودن تعدادی بافل گرمایی برای افزایش میزان آب شیرین تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شد. میزان خطای میانگین برای آب شیرین تولیدی و دمای آب شور به دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی، به ترتیب ۱۱/۷۸ و ۱/۷۵ درصد می‌باشد. نتیجه‌های نشان می‌دهد هر چه تعداد پله‌ها افزایش یابد، میزان آب شیرین تولیدی افزایش خواهد یافت. افزون‌بر این افزودن ۳ بافل به ارتفاع ۰/۳ سانتی‌متر نسبت به حالت موجود دستگاه، میزان آب شیرین تولیدی را ۹/۶۵٪ افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: آب شیرین کن پلکانی، شبیه‌سازی عددی، Comsol، بافل گرمایی.

KEYWORDS: Stepped Solar Still, Numerical Simulation, Comsol, Thermal Fins.

مقدمه

در دهه‌های اولیه قرن بیست و یکم میلادی بحران آب یکی از مهم‌ترین بحران‌های کشورهای جهان خواهد بود [۱]. از مجموع کل آب‌های جهان، ۹۷/۴ درصد آن را آب شور دریاها و اقیانوس‌ها تشکیل می‌دهد که به دلیل شوری در عمل قابل استفاده نیستند. ذخایر آب شیرین تنها ۲/۶ درصد کل حجم ذخایر آب‌های سطح زمین را تشکیل می‌دهد که بخش بیش‌تر آن به صورت یخ در قطب‌های کره زمین و یخچال‌های طبیعی و آب‌های زیرزمینی وجود دارد. به این ترتیب، از مجموع آب‌های کره زمین تنها ۰/۱۴ درصد آن قابل استفاده بوده و در واقع، حیات آدمی وابسته به همین مقدار ناچیز آب است. ملاحظه می‌شود به‌رغم این که بخش بیش‌تر سطح زمین را آب پوشانده، تنها بخش ناچیزی از آن برای بشر قابل استفاده می‌باشد [۲]. شیرین‌سازی آب شامل روش‌های بسیار متنوع و گوناگونی می‌باشد. انرژی مورد نیاز واحدهای شیرین‌سازی آب می‌تواند از گرمای به دست آمده از سوخت‌های فسیلی و یا گرمای اضافی به علت واکنش در راکتورهای هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیری مانند انرژی امواج اقیانوس‌ها و یا انرژی خورشیدی تأمین نمود. امروزه استفاده از انواع انرژی‌های تجدید شذنی با توجه به گران شدن سوخت‌های فسیلی که مصرف آن‌ها باعث آلودگی در محیط‌زیست می‌شود اهمیت زیادی پیدا کرده است. استفاده از انرژی خورشیدی

در دهه‌های اولیه قرن بیست و یکم میلادی بحران آب یکی از مهم‌ترین بحران‌های کشورهای جهان خواهد بود [۱]. از مجموع کل آب‌های جهان، ۹۷/۴ درصد آن را آب شور دریاها و اقیانوس‌ها تشکیل می‌دهد که به دلیل شوری در عمل قابل استفاده نیستند. ذخایر آب شیرین تنها ۲/۶ درصد کل حجم ذخایر آب‌های سطح زمین را تشکیل می‌دهد که بخش بیش‌تر آن به صورت یخ در قطب‌های کره زمین و یخچال‌های طبیعی و آب‌های زیرزمینی وجود دارد. به این ترتیب، از مجموع آب‌های کره زمین تنها ۰/۱۴ درصد آن قابل استفاده بوده و در واقع، حیات آدمی وابسته به همین مقدار ناچیز آب است. ملاحظه

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: fshahraki@eng.usb.ac.ir

پژوهشگران زیادی مطالعه‌های تجربی و همچنین نظری با استفاده از شبیه‌سازی و مدل‌سازی درباره آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انجام داده‌اند. در ادامه با توجه به موضوع مورد بررسی، پژوهش‌های انجام شده در زمینه آب‌شیرین‌کن‌های پلکانی تشریح شده است.

سدینتی و همکاران در سال ۲۰۰۸ میلادی یک آب‌شیرین‌کن پلکانی شیب‌دار را در لاس وگاس طراحی و ساختند و آن‌ها در این پژوهش آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری آب شیرین‌کن‌های پلکانی ۲۰٪ بیش‌تر از نوع حوضچه‌ای است [۶].

آقایی زوری و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی تحلیل انرژی و انرژی یک آب‌شیرین‌کن پله‌ای را انجام داده‌اند. مطالعه آن‌ها بر مبنای شبیه‌سازی عددی بود. در پژوهش آن‌ها، تأثیر پارامترهای مانند شدت جریان، ضخامت آب، شدت تابش خورشیدی، دمای محیط و دمای آب ورودی بر روی راندمان‌های انرژی و انرژی سامانه مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین راندمان انرژی و انرژی به ازاء شدت جریان 0.065 kg/min به دست آمده می‌شود. بیش‌ترین بازگشت ناپذیری در صفحه جاذب رخ می‌دهد که حدود ۸۵ درصد بازگشت ناپذیری‌های کل سامانه را به خود اختصاص می‌دهد [۷].

مفتاح و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی، عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور افزایش عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی، تغییرهای بر روی آن ایجاد نمودند، که از جمله می‌توان به منعکس‌کننده‌های درونی و بیرونی، مواد جذب‌کننده و کندانسور بیرونی اشاره نمود. به منظور مقایسه عملکرد سامانه آب شیرین‌کن پیش و پس از اعمال تغییرها از مدل تعادل انرژی استفاده نمودند. با کمک پارامترهایی از جمله اختلاف دما بین آب شور و پوشش شیشه‌ای، بهره‌وری سامانه، کارایی سامانه و ضریب انتقال گرما، تأثیر تغییرهای اعمال شده بررسی شد. بهره‌وری روزانه سامانه پس از اصلاح از $6/9$ به $8/9$ کیلوگرم در متر مربع افزایش یافته است. سرانجام مشخص شد عملکرد گرمایی سامانه اصلاح شده به مراتب از سامانه موجود پیشین بهتر و بالاتر می‌باشد [۸].

در سال ۲۰۱۷ میلادی، کابل و همکاران اثر استفاده از نانو مواد را بر روی بهره‌وری آب شیرین‌کن پلکانی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از اکسید مس به عنوان ماده نانوذره‌ها انتخاب نمودند. این نانوذره‌های سیاه رنگ به پله آب شیرین‌کن افزوده شد است تا عملکرد خورشیدی را افزایش دهد. نتیجه‌ها نشان

با توجه به فراوانی و در دسترس بودن این انرژی و قابلیت ذخیره و تبدیل آن به صورت‌های دیگر انرژی مورد توجه قرار گرفته است. کشور ما بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته و در منطقه‌ای است که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین نقاط جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد. میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات بر متر مربع در سال تخمین زده شده است که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است که این خود گواه بر این است که کشورمان از پتانسیل انرژی خورشیدی بالایی برخوردار می‌باشد [۳]. شرایط خشکسالی به‌ویژه در سالیان اخیر در مناطق گوناگون ایران به ویژه جنوب کشور منجر به کاهش دسترسی به آب آشامیدنی شده است. در این مناطق عموماً آب شیرین به صورت جاری وجود نداشته و تامین آب به روش حفر چاه‌های بسیار عمیق امکان پذیر است. این موضوع افزون‌بر هزینه‌های گزاف، مشکل غیر بهداشتی و شور بودن آب‌های زیر زمینی را نیز در بر دارد. روش متداولی که برای تامین آب شرب در مناطق خشک به کار گرفته می‌شود استفاده از سامانه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی می‌باشد. اساس کار این گونه سامانه‌ها بر مبنای چرخه‌ای است که در طبیعت طی می‌شود؛ یعنی آب شور به واسطه انرژی گرمایی خورشید تبخیر و سپس پس از سرد شدن تقطیر شده که قطره‌های به دست آمده عاری از هرگونه نمک یا مواد معدنی یا میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. این سامانه نسبت به سایر فرایندهای متعارف آب شیرین‌کن شامل نانو صافی و اسمز وارون، تقطیر چند مرحله‌ای و غیره دارای تکنولوژی ساده‌تر، ارزان‌تر و دارای سازگاری بیش‌تر با شرایط اقلیمی ایران می‌باشد [۳].

بازده و راندمان آب شیرین‌کن‌های خورشیدی به پارامترهای زیادی همچون شدت نور خورشید، دمای محیط، سرعت باد، دمای آب و غیره بستگی دارد؛ بنابراین هر چه راندمان آب شیرین‌کن بالا باشد، میزان تولید آب تازه بیش‌تر خواهد بود؛ اما از آن جا که هزینه ساخت آب شیرین‌کن برای بررسی پارامترهای گوناگون بر روی آن بالا است، در نتیجه مدل‌سازی و شبیه‌سازی آن می‌تواند کمک شایانی به کاهش هزینه‌ها و ساخت یک دستگاه بهینه کند [۵،۴]. در این مقاله به شبیه‌سازی آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی^۱ موجود در دانشگاه سیستان و بلوچستان با نرم‌افزار Comsol پرداخته شده است. همچنین به بررسی تأثیر دو پارامتر افزایش تعداد پله‌ها و اضافه نمودن بافل گرمایی بر روی سطح پله، بر میزان تولید آب تازه از آب شیرین‌کن پرداخته شده است.

(۱) Stepped Solar Still

انرژی گرمایی پرداختند. آن‌ها به منظور ادامه شیرین‌سازی آب پس از غروب خورشید، از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان منبع ذخیره انرژی گرمایی بهره گرفتند تا در زمانی که خورشید غروب می‌کند همچنان بتوانند به شیرین‌سازی آب ادامه دهند. آزمایش‌ها در چهار حالت انجام گرفت: حالت اول در حالت ساده، حالت دوم تنها با استفاده از فن مکنده و چگالنده، حالت سوم همراه با استتاریک اسید به عنوان تغییر فاز دهنده و حالت چهارم هم‌زمان از ماده تغییر فاز دهنده و چگالنده استفاده نمودند. نتیجه‌ها نشان داد که استفاده سه حالت دیگر نسبت به حالت ساده میزان آب شیرین افزایش یافته است [۱۵].

گشایشی و همکاران در سال ۱۴۰۰، به بررسی آزمایشگاهی اثر شیب پوشش شیشه‌ای با سطوح تخت و محدب صفحه جاذب در بازدهی آب شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. آن‌ها زاویه شیب پوشش شیشه‌ای را برای پنج درجه متفاوت مورد بررسی قرار دادند و بقیه پارامترهای طراحی را ثابت نگاه داشتند. نتیجه‌ها نشان داد که میزان متوسط تولید آب شیرین در حالت صفحه جاذب محدب بیش‌تر از حالت صفحه جاذب تخت می‌باشد. در مورد زاویه شیب پوشش شیشه‌ای، هر چه زاویه شیب بیش‌تر شود، باعث کاهش ضریب انتقال گرما می‌شود [۱۶].

گشایشی و همکاران در سال ۱۴۰۰، به بهبود بازدهی آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با استفاده از پارافین/اکسید گرافن پرداختند. آن‌ها از اکسید گرافن با غلظت‌های گوناگون حجمی در پارافین به عنوان مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمودند. نتیجه‌های پژوهش نشان داد که بازده آب شیرین‌کن خورشیدی با پارافین/اکسید گرافن به طور متوسط ۲۵٪ در مقایسه با آب شیرین‌کن خورشیدی که تنها از پارافین استفاده می‌کرد، بهره‌وری بیش‌تر دارد [۱۷].

در سال ۱۴۰۰، بن سعید و همکاران عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی همراه با سامانه مخزن ذخیره انرژی گرمایی نهان با استفاده از نمک گلوبر به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در مخزن گرمایی را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در ساعت‌های آفتابی میزان آب شیرین در دستگاه بدون مخزن گرمایی از دستگاه با مخزن گرمایی بیش‌تر می‌باشد و در ساعت‌های پس از غروب آفتاب، میزان آب شیرین تولید شده به کمک دستگاه با مخزن گرمایی به میزان چشمگیری از دستگاه بدون مخزن گرمایی بیش‌تر می‌باشد [۱۸]. همان‌گونه که اشاره شده فعالیت محدودی در زمینه شبیه‌سازی و محاسبه‌های عددی در زمینه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی پلکانی انجام پذیرفته است. اما هیچ پژوهشی به بررسی افزودن بافل به پله

می‌دهد با افزودن نانوذره‌ها، افزایش سرعت انتقال گرما و دمای آب شور می‌شود. همچنین نتیجه‌ها نشان می‌دهد ۱۶٪ میزان تقطیر در حالت استفاده از نانوذره‌ها برای آب شیرین‌کن نسبت به آب شیرین‌کن معمولی بیش‌تر می‌باشد [۹].

شادی و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی، عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی از جنس فلز مس را در مناطق گرمسیری مطالعه نمودند. آن‌ها با هدف افزایش عملکرد سامانه، از سینی‌های شیب‌دار استفاده نمودند. ضریب انتقال گرما جابه‌جایی، تبخیر و تابش، بهره‌وری آب و بازده سامانه را برای هر ساعت محاسبه نمودند. بر اساس نتیجه‌ها، بیش‌ترین بهره‌وری ساعتی برای سامانه ۶۰۵ میلی‌لیتر بر متر مربع در ساعت می‌باشد [۱۰]. به تازگی استفاده از ماده تغییر فاز (PCM) برای بهبود عملکرد گرمایی آب شیرین‌کن مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد هر چند که آب شیرین‌کن با ماده تغییر فاز عملکرد گرمایی پایین‌تری دارند ولی امکان تولید آب شیرین را حتی شب هنگام که خورشید غروب کرده است را نیز فراهم می‌آورد [۱۱].

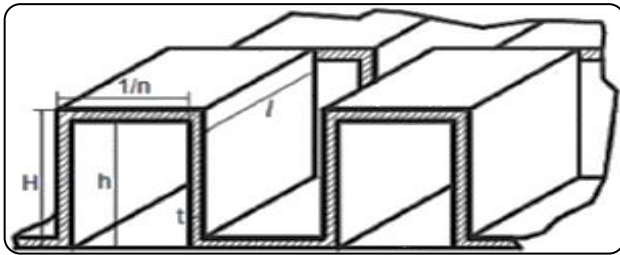
کشتگر و همکاران توانستند تأثیر دو پارامتر سرعت باد و ضخامت شیشه را با استفاده از روش دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای، مورد بررسی قرار دهند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد از یک متر بر ثانیه به شش متر بر ثانیه، ۱۴/۴٪ بهره‌وری آب شیرین‌کن افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش ضخامت شیشه از ۴ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر، بهره‌وری آب شیرین‌کن ۳/۵٪ افزایش می‌یابد [۱۲].

در سال ۲۰۲۰ میلادی، عبدالله و همکاران یک آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را با افزودن آینه‌ها و افزایش سطح بازتاب‌کننده به صورت تجربی و نظریه مورد بررسی قرار دادند. این تغییر افزایش زیادی در سطح تبخیر در معرض تابش خورشید را فراهم نمود. نتیجه‌ها نشان می‌دهد با افزایش آینه، میزان بهره‌وری آب شیرین ۵۸٪ افزایش می‌یابد [۱۳].

در سال ۱۳۹۹، درانی و همکاران به شبیه‌سازی آب شیرین‌کن پلکانی با نرم‌افزار کامسول پرداختند. آن‌ها همچنین تأثیر عمق آب شور روی پله‌ها بر میزان تولید آب شیرین خروجی از آب شیرین‌کن مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش عمق آب شور میزان آب شیرین تولیدی کاهش یافت [۱۴].

در سال ۱۳۹۹، گشایشی و ادیبی طوسی به بررسی آزمایشگاهی آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با چگالنده بیرونی و منبع ذخیره

(۱) Phase Change Material



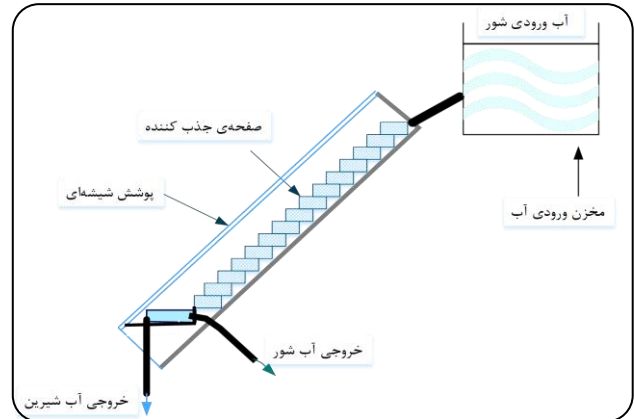
شکل ۲ - بافل آف استریپ

از متداولترین نوع بافل‌هایی که در این مبدل‌ها استفاده می‌شود، می‌توان به بافل‌های آف استریپ^۱ اشاره کرد. نمای از این نوع بافل را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد. این نوع بافل با راندمان انتقال گرمایی و فشردگی و همینطور قابلیت اطمینان بالا در حجم بسیار بالا در مبدل‌هایی برای سامانه‌های خنک کن در هواپیما، اتومبیل‌ها و سامانه‌های خنک‌کاری استفاده می‌شود. بافل‌های آف استریپ دارای کارایی بیش‌تری از بافل‌های پینی برای انتقال گرما می‌باشند، همچنین به لحاظ استحکام و قابلیت اطمینان در سطح بالاتری از بافل‌های سوراخ‌دار قرار دارند [۱۹].

ساختار پلکانی صفحه جذب‌کننده از آب شیرین‌کن پلکانی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، طول کف پله ۵ سانتی‌متر و ارتفاع بند پله ۰/۵ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به این محدودیت طول کف پله و ارتفاع بند، هدف افزودن بافل به کف پله و بررسی نرخ انتقال گرما می‌باشد. همچنین اثر تغییرهای ارتفاع بافل و تعداد بافل بر نرخ انتقال گرما و میزان تولید آب شیرین مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمای از افزودن بافل به کف پله در شکل ۴ نمایش داده شده است.

دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای

یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین زمینه‌هایی که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسبه‌ای متصل می‌کند، روش دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای می‌باشد. در روش دینامیک سیال‌های محاسبه‌ای معادله‌های دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیال‌ها به معادله‌های جبری تبدیل شده و با کمک روش‌های عددی موجود محاسبه می‌شوند. با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان‌های کوچک‌تر و اعمال شرایط مرزی برای گره‌های مرزی با اعمال تقریب‌های مناسب، دستگاه معادله‌های جبری به دست می‌آید که با حل این دستگاه معادله‌ها، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر تعیین می‌شود [۲۰].



شکل ۱ - نمای از آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی

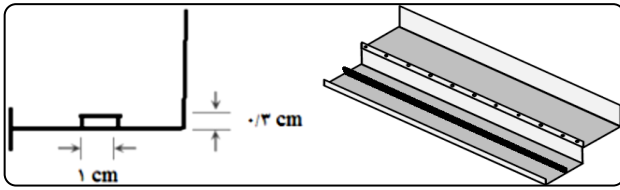
و نیز افزایش تعداد پله بر روی آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش، پس از شبیه‌سازی عددی آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی به وسیله نرم‌افزار Comsol و بررسی تأثیر استفاده از بافل گرمایی بر روی پله و تأثیر افزایش تعداد پله‌ها در راستای بهبود عملکرد این نوع آب شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌پردازد.

آب شیرین‌کن پلکانی

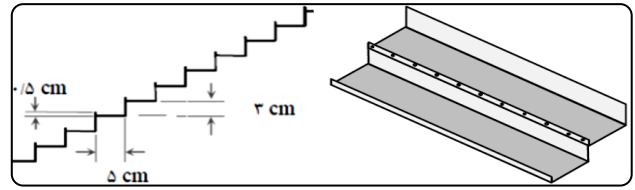
آب شیرین‌کن‌های چند حوضچه‌ای و پله‌ای نمونه خوبی از آب شیرین‌کن‌های مایل هستند، در این دستگاه‌ها میزان تولید آب شیرین در طول روز و زمانی که پرتو خورشید به زمین می‌رسد بیش‌تر است ولی تولید آن‌ها در شب تقریباً صفر است.

در آب شیرین‌کن‌های پلکانی به علت فاصله کم شیشه و پلکان، فضای خالی سریع‌تر اشباع می‌شود و بنابراین راندمان آن‌ها برای تولید آب شیرین نسبت به سایر آب شیرین‌کن‌های بالاتر است. از دیگر برتری این نوع آب شیرین‌کن است که زاویه آن نسبت به نور خورشید قابل تنظیم است و می‌توان آن را در هر عرض جغرافیایی طوری تنظیم کرد که نسبت به نور خورشید بیش‌ترین دریافت را داشته باشد. این دستگاه قابلیت تولید آب شیرین و آب گرم را به طور هم‌زمان دارا می‌باشد. در شکل ۱ نمای عرضی از آب شیرین‌کن پلکانی به نمایش گذاشته شده است. همان‌گونه در شکل ۱ نشان داده شده است، در این دستگاه آب از بالا روی پله‌ها به صورت یک لایه نازک جریان می‌یابد و از پایین دستگاه بیرون می‌رود. در آب شیرین‌کن‌های پلکانی به دلیل فاصله کم شیشه و صفحه جذب‌کننده فضای خالی محفظه به سرعت اشباع شده و در نتیجه بازده این دستگاه‌ها برای تولید آب شیرین در طول روز نسبت به دیگر دستگاه‌ها بالاتر می‌باشد.

(1) Off strip



شکل ۴ - نمایی از افزودن یک بافل به کف پله آب شیرین کن



شکل ۳ - ساختار پلکانی صفحه جذب کننده از آب شیرین کن پلکانی

که ρ_v دانسیته گاز بر حسب kg/m^3 ، u_v سرعت گاز بر حسب m/s و μ_v گرانیوی دینامیکی گاز بر حسب $Pa.s$ می‌باشد.

(ج) شرط مرزی و شرط اولیه

در ادامه برای این قسمت شرط مرزی به صورت مشخص نمودن میزان شدت جریان آب شور ورودی در نظر گرفته شده است و سرعت جریان در $t = 0$ برابر صفر فرض شده است.

مدل دیگری که برای این فرایند مورد استفاده می‌باشد، معادله انتقال گرما در سیال^۱ می‌باشد. در این مدل معادله انرژی برای سیال‌های موجود در فرایند مورد بررسی و حل قرار می‌گیرد [۲۲]:

معادله انرژی

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

با توجه به این که در فرایند تبخیر و چگالش، تغییر فاز صورت می‌پذیرد از معادله‌های زیر در حل معادله انرژی استفاده شده است.

$$C_p = \theta C_{p,phase1} + (1 - \theta) C_{p,phase2} + L \frac{d\alpha}{dT} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{\theta \rho_{phase1} C_{p,phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2} C_{p,phase2}}{\theta C_{p,phase1} + (1 - \theta) C_{p,phase2}} \quad (7)$$

در معادله‌های بالا C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال‌ها بر حسب $(j/kg.K)$ ، $C_{p,phase1}$ ظرفیت ویژه فاز یک (مایع)، $C_{p,phase2}$ ظرفیت ویژه فاز دو (گاز)، ρ دانسیته سیال‌ها بر حسب (kg/m^3) ، ρ_{phase1} دانسیته فاز یک (مایع)، ρ_{phase2} دانسیته فاز دو (گاز)، α جزئی از فاز مایع که به فاز گاز تغییر فاز داده است، θ و $(1 - \theta)$ به ترتیب جزیی از فاز مایع و جزیی از فاز گاز پس از تغییر فاز صورت گرفته می‌باشند و L آنتالپی تبخیر و بر حسب (j/kg) می‌باشند.

با توجه به این که در سامانه تبخیر و چگالش هم‌زمان صورت می‌پذیرند، معادله انرژی هم‌زمان برای تغییر فاز مایع به گاز و عکس آن حل خواهد شد.

الف) فرضیه‌ها

به منظور تحلیل نتیجه‌ها و ساده‌سازی معادله‌های فرضیه‌های

معادله‌های حاکم بر مسئله

در سامانه مورد بررسی با توجه به این که جریان دو فاز می‌باشد و به دلیل پایین بودن سرعت جریان و مهم بودن سطح مشترک دو فاز و عدد رینولدز پایین، جریان مورد نظر مدل جریان آرام دو فازی انتخاب شده است. این مدل بر اساس سطح مشترک دو فاز عمل می‌کند. در این مدل معادله‌های پیوستگی و مومنتوم به صورت هم‌زمان برای دو فاز حل خواهد شد. در ادامه به این معادله‌ها که در نرم‌افزار Comsol تعریف شده است و همچنین شرایط مرزی و شرط اولیه برای هر یک از معادله‌ها، اشاره می‌شود.

برای فاز مایع

برای فاز مایع معادله‌های پیوستگی و مومنتوم (ناویر-استوکس) تراکم ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شود [۲۱].

الف) معادله پیوستگی

$$\nabla u_L = 0 \quad (1)$$

ب) معادله مومنتوم

$$\rho_L \frac{\partial u_L}{\partial t} + \rho_L (u_L \cdot \nabla) u_L = \nabla \cdot [-\rho_L + \mu_L (\nabla u_L + (\nabla u_L)^T)] + \rho_L g \quad (2)$$

در این معادله ρ_L دانسیته مایع بر حسب kg/m^3 ، u_L سرعت مایع بر حسب m/s و μ_L گرانیوی دینامیکی مایع بر حسب $Pa.s$ می‌باشد.

برای فاز گاز

معادله‌های پیوستگی و ناویر-استوکس به صورت زیر بیان شده است.

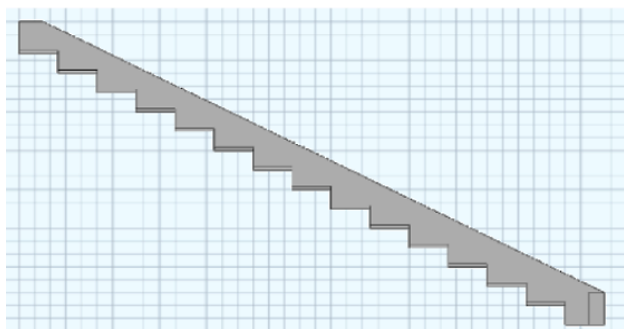
الف) معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \nabla \cdot (\rho_v u_v) = 0 \quad (3)$$

ب) معادله ناویر استوکس

$$\rho_v \frac{\partial u_v}{\partial t} + \rho_v (u_v \cdot \nabla) u_v = \nabla \cdot [-\rho_v + \mu_v (\nabla u_v + (\nabla u_v)^T)] + \rho_v g \quad (4)$$

(۱) Heat transfer in fluid



شکل ۵ - هندسه رسم شده مدل در ژئومتری

هندسه مدل

در قسمت ژئومتری^۱ رسم هندسه مدل دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی مورد مطالعه انجام شده است [۵]. زاویه دستگاه با سطح افق ۳۰ درجه می‌باشد و سطح مقطع آن ۱ متر مربع بوده و فاصله سطح شیشه با پلکان دستگاه ۰/۰۵ متر می‌باشد. ارتفاع هر پله ۰/۰۳ متر و عرض ۰/۰۵ متر می‌باشد. بر روی هر پله یک بند به ارتفاع ۰/۰۰۵ متر تعبیه شده است. شکل ۵ هندسه رسم شده مدل را نشان می‌دهد.

شبکه‌بندی

در این قسمت از مدل‌سازی به شبکه‌بندی یا همان مش بندی مدل می‌پردازیم. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی ایجاد شبکه‌بندی مناسب برای حل معادله‌های اساسی حاکم بر سامانه می‌باشد. می‌توان با یک مش بندی مناسب به همگرا شدن حل معادله‌ها کمک زیادی کرد ولی در صورتی که مش بندی به شکل اصولی انجام نپذیرد باعث ایجاد ناپایداری و یا عدم همگرایی خواهد شد. حالت‌های گوناگونی برای شبکه‌بندی مدل‌ها وجود دارد که در این مقاله با توجه به هندسه مدل از شبکه‌های ساختار نیافته مثلثی استفاده کردیم. دلیل استفاده از این نوع مش بندی این است که چون ساختار نیافته می‌باشد زاویه‌ها را به خوبی پوشش می‌دهد و با توجه به ریزتر بودن به سایر مش بندی‌ها تعداد گره بیش‌تری ایجاد کرده، که این خود در نزدیک شدن نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌سازی به داده‌های تجربی بسیار مؤثر می‌باشد. از آن جا که دمای سطح مشترک بین دو فاز و میزان آب شیرین تولیدی از اهمیت زیادی برای ما برخوردار بود شبکه‌بندی بر روی سطح مشترک دو فاز و سطح شیشه ریزتر از سایر نقطه‌ها انجام گرفته است. شبکه‌بندی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی در شکل ۶ نشان داده شده است.

زیر در نظر گرفته شده است.

ویژگی‌های فیزیکی سیال ثابت، حالت ناپایا، جریان آرام، حالت دوبعدی برای دو فاز آب-مخلوط هوا و بخار آب، هر فاز به طور جداگانه و پیوسته فرض شده و دو فاز تنها به روش سطح مشترک‌شان به هم مرتبط شده اند و دیواره‌های جانبی آدیباتیک فرض شده است.

(ب) شرایط مرزی و شرط اولیه

انتقال گرما از صفحه به آب و وارد شدن پرتوهای خورشید به درون محفظه، موجب گرم شدن آب می‌شود. تبخیر آب باعث می‌شود بخار آب تولید شده به درون هوای خشک محفظه نفوذ کرده و موجب پیدایش هوای مرطوب شود. از سوی اختلاف دمای بین سطح آب شور و پوشش شیشه‌ای و تغییر چگالی بخار آب باعث چرخش هوای مرطوب در فضای محفظه می‌شود. این انتقال گرما به صورت جابه‌جایی طبیعی صورت می‌پذیرد. انتقال گرما به شکل جابه‌جایی طبیعی به صورت یک شرط مرزی در سامانه اعمال شده است. که معادله آن به صورت زیر می‌باشد.

$$-n \cdot (-k\nabla T) = h_{air} \cdot (T_{int} - T) \quad (8)$$

در این معادله h_{air} ضریب انتقال گرما جابه‌جایی هوا و T_{int} دمای محفظه دستگاه می‌باشد که تقریباً بین ۴ الی ۵ درجه سلسیوس فرض می‌شود.

انتقال گرما تابشی نیز به صورت یک شرط مرزی اعمال شده است. که معادله (۹) در ادامه آورده شده است.

$$-n \cdot (-k\nabla T) = \varepsilon \sigma (T_{amb} - T) \quad (9)$$

در این معادله ε ضریب گذر، σ ثابت استفان بولتزمن $(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 k^4})$ و T_{amb} دمای محیط بر حسب درجه سلسیوس می‌باشد.

به دلیل نداشتن دمای کف پله‌ها از شار گرمایی ثابت که میزان آن مشخص بود، استفاده شده است.

$$-n \cdot (-k\nabla T) = q_0 \quad (10)$$

در این معادله q_0 شار گرمایی ثابت بر حسب W/m^2 می‌باشد دیگر شرط مرزی دمای شیشه است که در هر مرحله از مدل‌سازی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.

$$T = T_0 \quad (11)$$

شرط اولیه آب شیرین کن مربوط به دمای آب شور ورودی به دستگاه آب شیرین کن در $t = 0$ به عنوان شرط اولیه فرض شده است.

(1) Geometry

جدول ۱ - دمای آب خروجی محاسبه شده برای المان‌های متفاوت در یک مرحله از مدل‌سازی

تعداد المان	دمای آب خروجی محاسبه شده (°C)	میزان خطا %
۳۷۷۷	۳۳۲/۸۴	-۰/۳۶
۴۰۲۴	۳۳۲/۸۸	-۰/۳۵
۴۴۵۷	۳۳۳/۰۹	-۰/۲۹
۴۸۵۸	۳۳۳/۱۱	-۰/۲۸
۵۳۶۲	۳۳۳/۳۰	-۰/۲۲
۵۴۹۲	۳۳۳/۳۹	۰/۲
۵۹۴۰	۳۳۳/۴۲	-۰/۱۹
۸۰۹۳	۳۳۳/۸۰	-۰/۷۵
۹۱۸۹	۳۳۴/۰۹	-۰/۰۱
۹۴۹۵	۳۳۴/۲۳	-۰/۵۴
۱۰۴۱۳	۳۳۴/۳۱	-۰/۷۷
۱۱۲۸۱	۳۳۴/۴۶	-۰/۱۲
۱۲۱۳۳	۳۳۴/۶۱	-۰/۱۶

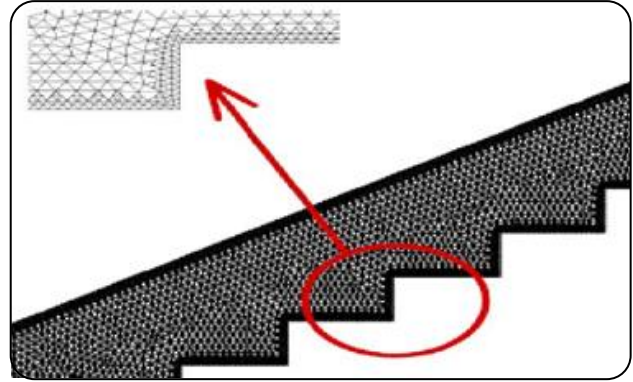
جدول ۲ - شرایط مرزی و شرایط اولیه آب شیرین کن

شرایط اولیه	میزان شدت جریان آب شور ورودی در لحظه $t = 0$	$1.67 \times 10^{-8} \frac{kg}{min}$
	سرعت جریان در لحظه $t = 0$	$u_L = u_v = 0$
شرایط مرزی	دمای آب شور ورودی به دستگاه در لحظه $t = 0$	$T_0 = 306.95 K$
	دمای شیشه	$T_0 = 318.55 K$

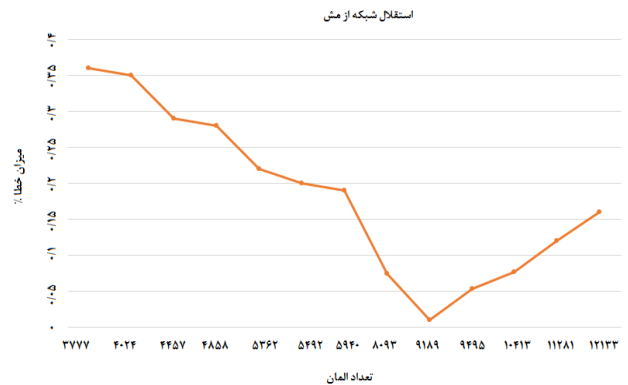
تبخیر، m_{ew} شدت جریان آب شیرین تولیدی، m_w شدت جریان آب شور ورودی، C_w ظرفیت گرمایی آب، T_{ini} دمای آب ورودی و T_{amb} دمای محیط می‌باشند. به دلیل آن که دمای آب ورودی با دمای محیط برابر فرض شده است، عبارت دوم در مخرج کسر صفر خواهد شد.

شبیه‌سازی و نتیجه‌ها

برای تحلیل از یک سامانه سخت افزاری با پردازنده ۲/۴ گیگاهرتز پنج هسته‌ای و حافظه رم ۶ گیگابایت استفاده شده است. با توجه به محدودیت سخت افزاری، می‌بایست برای شبیه‌سازی دستگاه در طول یک روز، تحلیل را به مرحله‌های یک ساعته تقسیم کرد. در زمان حل، معادله‌های گسسته شده بقاء تا زمان همگرایی به صورت متوالی حل می‌شوند. در این شبیه‌سازی، در مدت ۷۰۰ ثانیه، حل همگرا شده است. همچنین شرایط مرزی و شرایط اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار در جدول ۲ گزارش شده است.



شکل ۶ - شبکه‌بندی مدل به شکل مثلی ساختار نایافته



شکل ۷ - نمودار استقلال مش از شبکه برای دمای آب خروجی

استقلال مش از شبکه

برای بررسی استقلال مش از شبکه با توجه به داشتن دمای آب خروجی تجربی برای تعداد المان‌های متفاوت که در جدول ۱ و در شکل ۷ نمایش داده شده است، شبکه‌بندی انجام شد که سرانجام برای تعداد المان ۹۱۸۹ کم‌ترین مقدار خطا برای دمای آب خروجی محاسبه شده با دمای آب خروجی تجربی به دست آمد. دمای تجربی ۳۳۴/۰۵ درجه سلسیوس می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خطای مورد نظر از تعداد المان ۸۰۹۳ به تعداد المان ۹۱۸۹ به میزان محسوسی کاهش یافته می‌یابد ولی این خطا از تعداد المان ۹۱۸۹ به تعداد المان ۹۴۹۵ کم‌تر تغییر می‌کند، به این دلیل تعداد المان ۹۱۸۹ مناسب‌ترین مش‌بندی انتخاب می‌شود.

بازده دستگاه

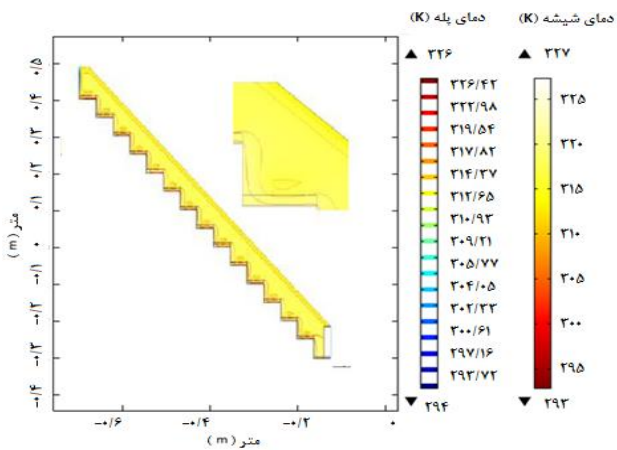
بازده آب شیرین‌کن‌های غیرفعال از معادله زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$\eta = \frac{\sum m_{ew} \cdot h_{fg}}{\sum I(t) \cdot A_p + m_w \cdot C_w (T_{ini} - T_{amb})} \quad (12)$$

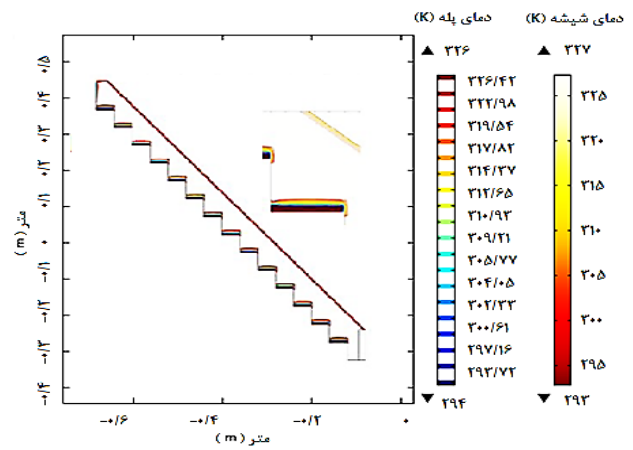
در این معادله $I(t)$ میزان تابش، A_p سطح تبخیر کننده، h_{fg} آنتالپی

جدول ۳ - دمای آب شور تجربی و دمای آب شور به دست آمده برای شدت جریان آب شور با نرخ ورودی 0.2 (kg/min)

زمان (hr)	میزان تابش $[\Delta] \text{ (W/m}^2\text{)}$	دمای محیط $(^\circ\text{C})$ $[\Delta]$	دمای آب شور $(^\circ\text{C})$ $[\Delta]$	دمای آب شور به دست آمده $(^\circ\text{C})$	میزان خطا %
۸-۹	۵۹۸	۳۲/۸۵	۳۶/۹	۴۰/۹۶	۹/۹
۹-۱۰	۷۸۶	۳۳/۸	۴۴/۱	۴۷/۴۸	۷/۱
۱۰-۱۱	۹۱۱	۳۴/۹۵	۴۹/۳	۵۱/۳۷	۴
۱۱-۱۲	۹۷۸	۳۵/۳	۵۳/۴	۵۳/۸۱	۰/۷۶
۱۲-۱۳	۱۰۰۱/۵	۳۵/۲۵	۵۵/۵	۵۶/۲۶	۱/۳
۱۳-۱۴	۹۹۰/۵	۳۵/۱۵	۵۷/۵	۵۸/۵۹	۱/۸
۱۴-۱۵	۹۳۲/۵	۳۴/۱۵	۵۷/۹	۵۸/۷۶	۱/۴
۱۵-۱۶	۸۰۳/۵	۳۲/۷	۵۳/۹	۵۴/۸۴	۱/۷
۱۶-۱۷	۶۰۶/۵	۳۱/۵	۴۷/۸	۴۸/۷۱	۱/۸
۱۷-۱۹	۳۷۳/۵	۳۰/۵۵	۴۰/۶	۴۲/۵۸	۴/۶
۱۸-۱۹	۱۲۸	۲۹/۱	۳۳/۵	۳۷/۵۳	۱۰/۷



شکل ۹ - پروفایل دمایی در پایان فرایند



شکل ۸ - پروفایل دمایی در شروع فرایند

نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی

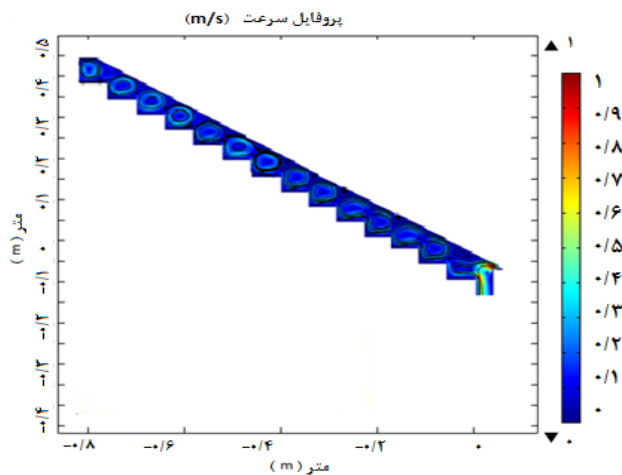
در جدول ۳ مقایسه‌ای بین دمای آب شور تجربی و دمای آب شور به دست آمده برای شدت جریان آب شور با نرخ ورودی 0.2 (kg/min) نشان داده شده است. داده‌ها از ساعت ۸ صبح تا ۱۹ پس از ظهر جمع آوری شده است.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود دمای آب به دست آمده در بعضی ساعت‌ها مانند ساعت‌های نخستین یا انتهایی اختلاف دمای کمتری با داده‌های تجربی دارند. این امر به دلیل شرایط اولیه محیط است که نخست به صورت کامل به نرم‌افزار داده شده است. بنابراین از میزان تابش خورشید به صورت میانگین ساعتی استفاده شده است. همان‌گونه که داده‌های تجربی و داده‌ها شبیه‌سازی شده نشان می‌دهند، با افزایش شدت آفتاب میزان آب شیرین تولیدی افزایش می‌یابد و هر چه به ساعت‌های پس از ظهر

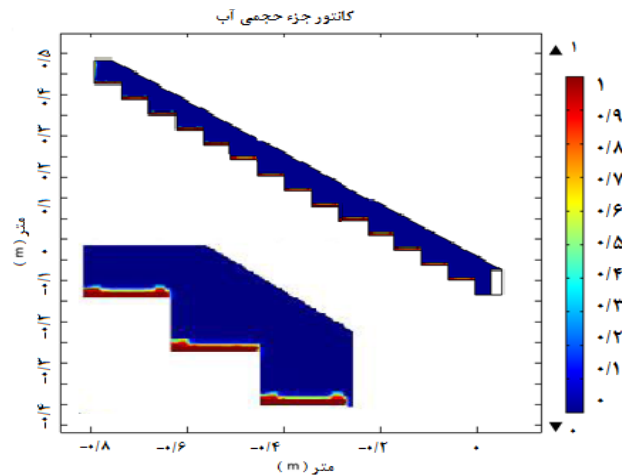
نزدیک می‌شویم با توجه به کاهش شدت تابش خورشید میزان آب تولیدی کاهش می‌یابد. با این حال دمای آب به دست آمده انطباق خوبی با مقدار تجربی آن دارد و مقدار میانگین خطا برای دما به دست آمده از مقدار تجربی آب برابر با 4.1% می‌باشد؛ که دلیل این امر مسیر حل و تفاوت‌های انتقال گرما با حالت تجربی است. در جدول ۳ مقدارهای میانگین ساعتی دمای محیط و میزان تابش خورشید نشان داده شده است. در شبیه‌سازی به دلیل نداشتن دمای آب ورودی به دستگاه آب شیرین‌کن و دمای کف پله‌ها، به ترتیب از دمای محیط و میزان تابش خورشید استفاده شده است. پروفایل دمایی نخست و انتهای فرایند در یک مرحله از شبیه‌سازی در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در نخست فرایند دمای آب شور ورودی روی پله‌ها پایین است و با گذشت زمان و افزایش میزان

جدول ۴ - میزان آب شیرین تولیدی تجربی و آب تولیدی به‌دست آمده برای شدت جریان آب شور با نرخ ورودی 0.2 (kg/min)

زمان (hr)	میزان آب شیرین تولیدی تجربی (kg/hr)	میزان آب شیرین تولیدی به‌دست آمده (kg/hr)	درصد خطا
۸-۹	۰/۰۹۵	۰/۳۱۴	۷۲
۹-۱۰	۰/۱۹۱	۰/۴۲۹	۵۵/۵
۱۰-۱۱	۰/۳۸۸	۰/۵۲۴	۲۵/۹
۱۱-۱۲	۰/۴۸۸	۰/۵۲۲	۶/۵
۱۲-۱۳	۰/۶	۰/۶۲۷	۴/۳
۱۳-۱۴	۰/۶۸۸	۰/۶۸۸	۰
۱۴-۱۵	۰/۶۶	۰/۶۳۵	۳/۹۳
۱۵-۱۶	۰/۵۳۳	۰/۵۳۹	۱/۱۱
۱۶-۱۷	۰/۱۷۷	۰/۴	۵۵/۵۷
۱۷-۱۸	۰/۰۹۳	۰/۳۰۷	۶۹/۷
۱۸-۱۹	-	۰/۲۳	-



شکل ۱۱ - پروفایل سرعت برای آب شیرین کن



شکل ۱۰ - کانتور جزء حجمی آب در یک مرحله شبیه‌سازی

در ادامه کانتور جزء حجمی آب برای یک مرحله از شبیه‌سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فاز مایع و بخار به‌طور کامل از هم جدا بوده و فصل مشترک آن‌ها مشخص است. مایع تنها بر روی پله‌ها و سطح‌های شیشه‌ای وجود دارد و فضای بین پله‌ها و سطح شیشه را بخار فرا می‌گیرد. در شکل ۱۱ نیز پروفایل سرعت و مسیر حرکت جریان برای آب شیرین کن نشان داده شده است.

تأثیر افزایش تعداد پله

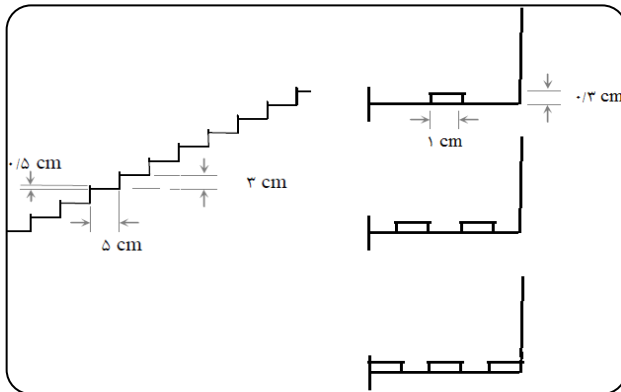
با توجه به این که در قسمت پیش مدل آب شیرین کن را با داده آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده است و از صحت مدل‌سازی اطمینان خاطر داریم در این قسمت به بررسی تأثیر افزایش تعداد پله بر تولید

تابش خورشید دمای آب شور بر روی پله‌ها افزایش یافته و سبب تبخیر آب شور و تولید آب شیرین خواهد شد. برای بهتر دیده شدن تغییرهای دمایی آب شور بر روی پله‌ها پروفایل دمایی فرایند در شکل ۹ نشان داده شده است.

در جدول ۴ آب تولیدی تجربی و آب تولیدی به‌دست آمده از شبیه‌سازی برای شدت جریان آب شور با نرخ ورودی 0.2 (kg/min) مشخص شده است. همان‌گونه مشخص است با افزایش ساعت روز و نزدیک شدن به ظهر تولید آب شیرین به شدت افزایش یافته است که این امر بسیار طبیعی است. با مقایسه این میزان آب تولیدی با مقدار تجربی می‌توان مشخص نمود که میزان آب تولیدی از نتیجه‌های نرم‌افزاری همپوشانی خوبی با نتیجه‌های آزمایشگاهی دارد و به طوری که میانگین خطای به‌دست آمده مقدار $26/77\%$ می‌باشد.

جدول ۵ - بررسی افزایش تعداد پله بر روی میزان تولید آب شیرین

حالت‌های گوناگون آب شیرین کن	میزان تولید آب شیرین (kg/hr)
پله ۱۵	۳/۶۹۶۲
پله ۱۶	۴/۰۰۶۷
پله ۱۷	۴/۲۵۸۷
پله ۱۸	۴/۶۰۰۷
پله ۱۹	۴/۹۴۲۷
پله ۲۰	۵/۱۰۴۷



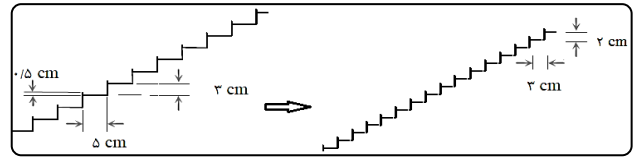
شکل ۱۴ - نمایی از افزودن و افزایش تعداد بافل‌ها بر روی پله

تأثیر افزودن بافل

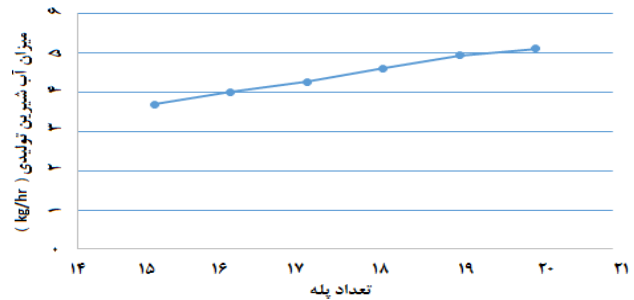
در این قسمت به بررسی افزودن بافل (آف استریپ) بر روی پله پرداخته شده است. این مقایسه آب شیرین کن ۱۵ پله در چهار حالت بدون بافل، گذاشتن یک بافل، گذاشتن دو بافل و گذاشتن سه بافل بر روی پله انجام گرفته شده است. بافل‌ها در سه ارتفاع ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ سانتی‌متر انتخاب شده است. در شکل ۱۴ نمایی از افزودن و افزایش بافل‌هایی به ارتفاع ۰/۳ سانتی‌متر بر روی پله را نمایش می‌دهد. در جدول ۶ و شکل ۱۵ نتیجه‌های به‌دست آمده این بررسی نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ نشان داده شده است، هرچه ارتفاع بافل و تعداد بافل افزایش یابد میزان آب شیرین تولیدی افزایش خواهد یافت. دلیل آن میزان گرمای منتقل شده از کف به آب شور می‌باشد که باعث تبخیر بیش‌تر آب شور می‌شود. زیرا سطح پله به همراه بافل مساحت بیش‌تری نسبت به سطح پله بدون بافل دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به شبیه‌سازی آب شیرین کن خورشیدی به وسیله نرم‌افزار Comsol پرداخته و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است. همچنین عملکرد واحد در برابر افزایش میزان پله‌ها و نیز افزودن بافل‌ها با اندازه‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۲ - نمای از افزایش تعداد پله روی آب شیرین خورشیدی



شکل ۱۳ - افزایش تعداد پله بر روی میزان تولید آب شیرین

آب شیرین در کل روز پرداخته شده است. شرایط مرزی و شرایط اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار نیز همانند قسمت پیش در جدول ۲ اشاره شده است. منظور این است که عرض و ارتفاع پله‌ها کوچک‌تر می‌شود هر چند تعداد پله‌ها افزایش می‌یابد. آب شیرین کن موجود که داده‌های آن برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، تعداد ۱۵ پله دارد. با توجه به ارتفاع و عرض پله و با توجه به محدودیت ساخت، تعداد پله‌ها تا زمانی که ارتفاع پله ۲ سانتی‌متر و عرض ۳ سانتی‌متر برسد، افزایش می‌دهیم. این افزایش پله مرحله به مرحله از یک پله تا پنج پله خواهد بود. در شکل ۱۲ نمایی از افزایش تعداد پنج پله با توجه به محدودیت ساخت، را نشان می‌دهد. در جدول ۵ و نیز شکل ۱۳ بررسی تأثیر افزایش تعداد پله‌ها (از یک پله تا پنج پله) بر روی میزان تولید آب شیرین نشان داده شده است. برای این منظور نخست میزان کل آب شیرین تولیدی در یک روز را با تعداد ۱۵ پله محاسبه می‌شود. سپس با همان شرایط عملیاتی میزان آب شیرین تولیدی را با ۱۶ پله محاسبه می‌شود. این بررسی تا ۲۰ پله ادامه خواهد داشت. همان‌گونه مشخص است با افزایش تعداد پله‌ها میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد. یعنی هرچه تعداد حالت‌ها بیش‌تر می‌شود به همان اندازه راندمان بالاتر می‌رود و تولید آب بیش‌تر می‌شود. علت را می‌توان افزایش سطح تماس پله با آب شور دانست زیرا از ارتفاع پله کاسته می‌شود و در مجموع عرض پله‌ها افزایش می‌یابد و همچنین نزدیک شدن فاصله بین پله‌ها به شیشه ذکر نمود. همان‌گونه که مشخص است در حالتی که پنج پله به دستگاه اضافه می‌شود، میزان آب شیرین تولیدی نسبت به حالت اولیه دستگاه ۳۸/۱٪ افزایش خواهد داشت.

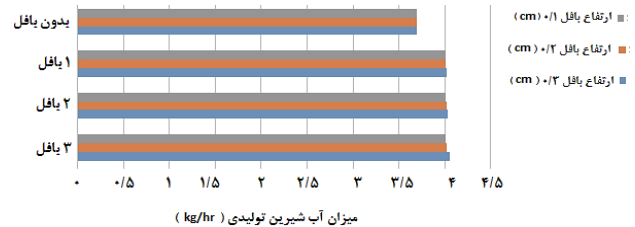
جدول ۶- مقایسه‌ای بین تعداد و ارتفاع‌های گوناگون بافل‌ها بر تولید آب شیرین به‌دست آمده

میزان تولید آب (kg/hr)	بدون بافل	۱ بافل	۲ بافل	۳ بافل
ارتفاع بافل ۰/۳ (cm)	۳/۶۹۶۲	۴/۰۲۴۷	۴/۰۳۳۷	۴/۰۵۳۲
ارتفاع بافل ۰/۲ (cm)	۳/۶۹۶۲	۴/۰۱۱۲	۴/۰۱۸۷	۴/۰۲۱۷
ارتفاع بافل ۰/۱ (cm)	۳/۶۹۶۲	۴/۰۰۸۲	۴/۰۰۹۷	۴/۰۱۱۲

در حالت ۲۰ پله‌ای نسبت به ۱۵ پله حالت موجود، ۳۸/۱٪ افزایش داشته است.

• با افزودن بافل بر روی پله میزان آب شیرین تولیدی نیز افزایش می‌یابد. با توجه محدودیت ساخت و جلوگیری از رسوب بر روی پله تنها افزودن ۳ بافل بر روی پله مورد بررسی قرار گرفته شده است. میزان آب تولیدی در حالتی که ۳ بافل ۰/۱ سانتی‌متری تقریباً ۸/۵٪ بیش‌تر از نسبت به حالتی که پله بافل ندارد می‌باشد.

• افزون‌بر افزودن بافل‌ها، اندازه ارتفاع هر بافل نیز بر روی آب شیرین تولیدی مورد بررسی قرار گرفته شده است. به طوری که میزان آب شیرین تولیدی در حالت ۳ بافل ۰/۳ سانتی‌متری که تقریباً ۹/۶۵٪ بیش‌تر از حالتی است که پله بافل ندارد. علت این امر نیز گرمای منتقل شده در حالت داشتن بافل به سطح آب شور بیش‌تر خواهد بود. زیرا سطح پله به همراه بافل مساحت بیش‌تری نسبت به سطح پله بدون بافل دارند.



شکل ۱۵ - تأثیر افزودن بافل بر میزان تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن

نتیجه‌های به‌دست آمده به شرح زیر است:

• نتیجه‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شد، میزان آب شیرین تولیدی و دمای آب شور به‌دست آمده برای شدت جریان آب شور ورودی ۰/۲ (kg/min) انطباق خوبی با داده‌های تجربی داشتند. میزان خطای میانگین برای آب شیرین تولیدی و دمای آب شور به‌دست آمده از نرم‌افزار با مقدارهای تجربی ۱۱/۷۸ و ۱/۷۵ درصد می‌باشد.

• با توجه به امکان ساخت و نزدیک شدن پله‌ها به شیشه، آب شیرین‌کن موجود که ۱۵ پله دارد، به ترتیب یک پله، دو پله تا پنج پله به آن اضافه می‌شود. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش پله‌ها میزان آب شیرین تولیدی افزایش می‌یابد. میزان آب شیرین تولیدی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

مراجع

- [1] Paykary M., Merabani A., "Water Treatment Fundamental", 3th Ed., Arkan Danesh Publications, Isfahan, (2009).
- [2] Bebran P., Honarbakhsh N., Water Crisis in Iran and the World, *Strategy Quarterly*, **16(48)**: 193-212 (2008).
- [3] Amidpour M., Zamen, M., Sofari, S.M., New Combination of Solar Chimney for Power Generation and Seawater Desalination, *Desalination and Water Treatment*, **51**: 40-42 (2013).

[۴] ضامن م، رضاخانی ن، رجبی م، زینالی دانالو م.ع.ا، ارزیابی عملکرد سامانه ترکیبی آب گرم‌کن/آب شیرین‌کن خورشیدی خانگی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۴: ۹۱ تا ۱۰۲ (۱۳۹۴).

- [5] Dashtban M. [Experimental and Theoretical Investigation of Thermal Efficiency of a Cascade Solar Still](#), M.Sc. Thesis, The University of Sistan & Baluchestan, (2009).
- [6] Sadineni S., [Theory and experimental investigation of a weir-type inclined solar still](#), *Energy*, **33**(1): 71-80 (2008).
- [7] Aghaei H., Tabrizi F., Sarhaddi F., Hashmatnezhad F., [Comparison between Energy and Exergy Efficiencies in a Weir Type Cascade Solar Still](#), *Desalination*, **325**: 113-121 (2013).
- [8] Muftah A.F., Sopian K., Alghoul M.A., [Performance of basin Type Stepped Solar Still Enhanced with Superior Design Concepts](#), *Desalination*, **435**: 198-209 (2017).
- [9] Kabeel A.E., Omara Z.M., Essa F.A., Abdullah A.S., Arunkumar T., Sathyamurthy R., [Augmentation of a Solar Still Distillate Yield via Absorber Plate Coated with Black Nanoparticles](#), *Alexandria Engineering Journal*, **56**(4): 433-438 (2017).
- [10] Shadi M., Abujazar S., Fatihah S., Lotfy E.R., Kabeel A.E., Sharil S., [Performance Evaluation of Inclined Copper-Stepped Solar Still in a Wet Tropical Climate](#), *Desalination*, **425**: 94-103 (2018).
- [11] Vigneswaran V.S., Kumaresan G., Dinakar B.V., Karthick Kamal K., Velraj R., [Augmenting the Productivity of Solar Still using Multiple PCMs as Heat Energy Storage](#), *Journal of Energy Storage*, **26**: 101-019 (2019).
- [12] Keshtkar M., Eslami M., Jafarpur K., [Effect of Design Parameters on Performance of Passive basin Solar Stills Considering Instantaneous Ambient Conditions: A Transient CFD Modeling](#), *Solar Energy*, **201**: 884-907 (2020).
- [13] Abdullah A.S., Younes M.M., Omara Z.M., Essa F.A., [New Design of Trays Solar Still with Enhanced Evaporation Methods – Comprehensive Study](#), *Solar Energy*, **203**: 164-174 (2020).
- [۱۴] درانی ف.، حسینی س.م.، سردشتی بیرجندی م.ر.، شهرکی ف.، بررسی تأثیر عمق آب شور در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از نرم افزار Comsol، *نشریه علوم و مهندسی جداسازی*، **۱۲(۲): ۵۸ تا ۷۰** (۱۳۹۹).
- [۱۵] گشایشی ح.ر.، ادیبی طوسی س.س.، بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی و منبع ذخیره انرژی گرمایی، *مجله مهندسی مکانیک*، **۹۲(۳): ۱۹۵ تا ۲۰۳** (۱۳۹۹).
- [۱۶] گشایشی ح.ر.، ادیبی طوسی س.س.، رستمی م.، جعفری ا.، بررسی آزمایشگاهی اثر شیب پوشش شیشه‌ای با سطوح تخت و محدب صفحه جاذب در بازدهی آب شیرین کن خورشیدی، *مجله مهندسی مکانیک*، **۹۴(۱): ۱۹۹ تا ۲۰۷** (۱۴۰۰).
- [۱۷] گشایشی ح.ر.، ادیبی طوسی س.س.، رستمی م.، جعفری ا.، پژوهش آزمایشگاهی برای بهبود بازدهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از پارافین/اکسید گرافن، *مجله مهندسی مکانیک*، **۹۵(۲): ۲۶۹ تا ۲۷۳** (۱۴۰۰).
- [۱۸] بن سعید ا.، عزیز ش.، پیغمبر زاده س.م.، طراحی، ساخت و بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با سامانه مخزن ذخیره انرژی گرمای نهان با استفاده از نمک گلوبر، *مجله مهندسی مکانیک*، **۹۷(۴): ۳۰۴ تا ۳۹۵** (۱۴۰۰).
- [19] Das P.K., Ghosh I., [Thermal Design of Multistream Plate Fin Heat Exchangers – A State-of-the-Art Review](#), *Heat Transfer Engineering*, **33**: 284-300 (2012).

- [20] Rai V., Pratap A., Kumar H., Khatri R., [Modelling and Performance Enhancement of Single Slope Solar Still using CFD](#), *Energy Procedia*, **109**: 447–455 (2017).
- [21] Setoodeh N., Rahimi R., Ameri A., [Modeling and Determination of Heat Transfer Coefficient in a basin Solar Still using CFD](#), *Desalination*, **268(1–3)**: 103–110 (2011).
- [22] Kazemi M.R., [CFD Simulation of Seawater Purification using Direct Contact Membrane Desalination \(DCMD\) System](#), *Desalination*, **443**: 323-332 (2018).
- [23] Tiwari A.K., Tiwari G.N., [Thermal Modeling based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still: The Effect of Water Depths](#), *Desalination*, **207**: 84–204 (2007).