

# شبیه‌سازی عددی تاثیر تعداد پله بر عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی

فاطمه علی پناه<sup>۱</sup>، نادر رهبر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* صندوق پستی: ۳۵۱۹۶۹۷۹۵۱، پست الکترونیکی: rahbar@semnaniau.ac.ir

## چکیده

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی جریان سیال در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با فرض حالت پایدار، جریان آرام و هوا به عنوان گاز ایده آل و تراکم ناپذیر است. شبیه‌سازی عددی فرایند با استفاده از نرم افزار فلوئنت انجام گرفته است. از الگوریتم سیمپل برای محاسبه ی ارتباط بین فشار و سرعت و نیز برای انفصال ترم های جابجایی و درون‌یابی فشار از طرح های بالادست استفاده شده است. پارامترهای موثر بر عملکرد و بهره وری دستگاه، عبارت از فاصله بهینه بین سطح شیشه و آب، تعداد گردابه ها و ضریب انتقال حرارت جابجایی می باشند. لازم به ذکر است این تحقیق در حالت های چهار، پنج، شش، هفت، هشت، نه، ده و دوازده پله ای شبیه سازی شده است. مهمترین نتیجه بدست آمده در این پژوهش و بررسی های انجام گرفته بر روی تعداد پله های متفاوت در یک آب‌شیرین‌کن با ابعاد مشخص، افزایش انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش تولید آب شیرین بوده است. که این روند صعودی با افزایش تعداد پله تا تعداد هشت پله رخ داده است. بیشترین تولید آب شیرین ۲۳۲ میلی‌لیتر بر مترمکعب در هر ساعت در حالت ۸ پله‌ای بوده است.

## کلید واژگان

آب‌شیرین‌کن پلکانی، شبیه‌سازی عددی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، تولید آب شیرین

## The Effect of Number of Steps on the Performance of a Cascade Type Solar Still

F. Alipanah<sup>1</sup>, N. Rahbar<sup>2\*</sup>

1- Department of mechanical engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\* P.O.B. 3519697951 Semnan, Iran, rahbar@semnaniau.ac.ir

## Abstract

The purpose of this study is to simulate fluid flow in a weir-type cascade solar still, assuming steady-state and air being the ideal gas and incompressible. The commercial software FLUENT is used for numerical simulation of the process. SIMPLE algorithm is used to calculate the relationship between pressure and velocity. In addition, first order upwind method is applied for separation of displacement and interpolation of pressure. Numerical simulations are performed for Solar Still with four to ten and also with twelve steps. Results of investigations on a Solar Still with different number of steps, in which the height of the steps is constant value of 2 cm, show that increasing the number of steps causes to increase water production up to eight steps. Furthermore, the highest rate of water production was 232 ml/m<sup>3</sup>hr for solar still with eight steps.

Keywords: Cascade type solar still, numerical simulation, convective heat transfer coefficient, water productivity.

آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی که خود بر پایه دمایی و به روش تقطیری کار می‌کنند، می‌تواند بهترین روش و گزینه انتخابی برای شیرین کردن آب های شور باشد.

جهت بررسی نحوه عملکرد و پارامترهای موثر بر روی راندمان آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، از دو روش تحلیل تجربی و شبیه‌سازی عددی که خود به دو روش تحلیل نظری و دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> دسته بندی می‌شوند، استفاده می‌گردد. مزیت بسیار مهمی که روش دینامیک سیالات محاسباتی را نسبت به روش های دیگر متمایز کرده و دارای اهمیت بسیاری در تحلیل عملکرد دستگاه‌ها می‌باشد، این است که در این روش به سادگی می‌توان نحوه حرکت جریان، وضعیت سرعت‌ها و فشار سیال را داخل دستگاه مشاهده نمود. همچنین می‌توان عوامل مخرب یا مفید در عملکرد دستگاه را شناسایی و برای رفع این مشکلات یا بهبود محاسن مدل تلاش نمود. از طرف

## ۱- مقدمه

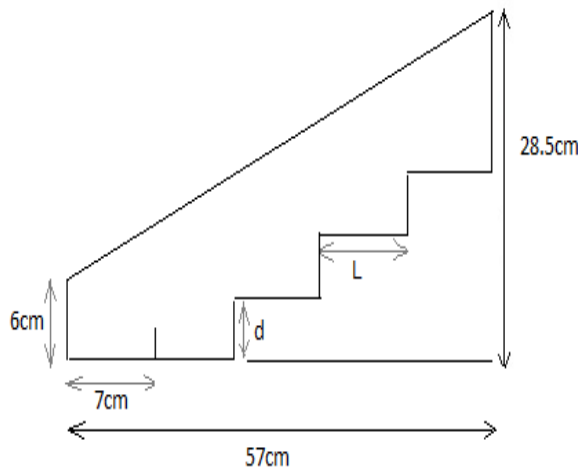
هوای پاک و آب آشامیدنی سالم، دو جزء بسیار مهم برای زندگی می‌باشند. از آنجایی که بسیاری از مناطق جهان از جمله مناطق ساحلی، دور دست و خشک از کمبود آب آشامیدنی رنج می‌برند، همچنین این مناطق منابع کافی برای تولید توان الکتریکی جهت شیرین کردن آب ندارند، برای اینگونه مناطق باید به دنبال تکنیک و تکنولوژی مناسب جهت شیرین کردن آب بود. روش های گوناگون شیرین کردن آب بر دو پایه ی دما و غشاء مانند روشهای تقطیر، اسمز معکوس، روش الکترو دیالیز و غیره می‌باشند. یک روش تقطیر مناسب بایستی دارای ویژگی هایی نظیر مصرف انرژی پایین، کیفیت و راندمان بالا، سهولت استفاده، ارزان و پاک بودن انرژی مورد استفاده برای شیرین کردن آب و... باشد. بنابراین با توجه به ویژگی های نامبرده، روش تقطیری می‌تواند روشی مناسب‌تر برای شیرین کردن آب باشد. در صورتی که منطقه‌ای از نظر داشتن انرژی خورشیدی غنی باشد، استفاده از

2. Computational Fluid Dynamic (CFD)

## ۲- بیان مسئله

## ۲-۱- شرح فیزیک مسئله

هندسه محفظه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل مطرح شده در این تحقیق یک آبشیرین کن پلکانی است که طول و ارتفاع کل آن به ترتیب ۵۷/۵۷ و ۰/۲۸۵ متر می‌باشند. آبشیرین کن مورد نظر از تعدادی پله به طول  $L$  و ارتفاع  $d$  و یک پوشش شیشه ای تشکیل شده که بطور کامل نسبت به محیط بیرون آب بندی شده است. دمای بالا و پایین به صورت ثابت  $T_w$  و  $T_g$  فرض می‌شوند. جهت بررسی تاثیر تعداد پله‌ها بر روی کارایی آبشیرین کن، ۸ حالت مختلف در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مشخصات مربوط به این حالت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک آبشیرین کن خورشیدی پله ای

جدول ۱: ابعاد دقیق آبشیرین کن مورد مطالعه

ردیف	تعداد پله (n)	L (cm)	d (cm)
۱	۴	۱۲/۵	۲
۲	۵	۱۰	۲
۳	۶	۸/۳۳	۲
۴	۷	۷/۱۴	۲
۵	۸	۶/۲۵	۲
۶	۹	۵/۵۵	۲
۷	۱۰	۵	۲
۸	۱۲	۴/۱۶	۲

## ۲-۲- روابط حاکم

انتقال جرم و حرارت در آبشیرین کن های خورشیدی، ناشی از جابجایی طبیعی داخل محفظه به علت نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و غلظت بخار ایجاد شده در سیال می باشد. در این پژوهش معادلات بقاء با استفاده از روابط فشار و سرعت نوشته شده و هوای مرطوب بصورت گاز ایده آل تراکم ناپذیر فرض شده است. برای جریان طبیعی ناپایدار، آرام و دو بعدی، معادلات بقای جرم، ممنت، بقای انرژی و نفوذ جرم در مختصات دکارتی به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۱]:

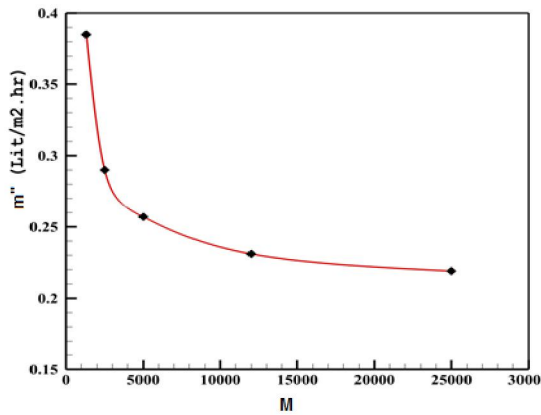
دیگر روش تحلیل عددی نسبت به روش تحلیل تجربی به دلیل تغییر ساده‌ی پارامترهایی نظیر ابعاد هندسه، شرایط مرزی، ضخامت شیشه و مکان تحلیل به صرفه‌تر بوده و می‌تواند در تحقیق عملکرد سیستم های انرژی با تغییر جزءهای مختلف بسیار به ما کمک کند [۱].

در آبشیرین کن‌های پلکانی به علت فاصله کم شیشه و پلکان، فضای خالی سریع‌تر اشباع می‌شود و لذا راندمان آن‌ها برای تولید آب شیرین نسبت به سایر آبشیرین کن‌ها بالاتر است. از دیگر مزایای این نوع آبشیرین کن آن 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. از جمله تحقیقاتی که بر روی آبشیرین کن های خورشیدی انجام شده است می‌توان به تحقیقاتی نظیر موارد زیر اشاره داشت.

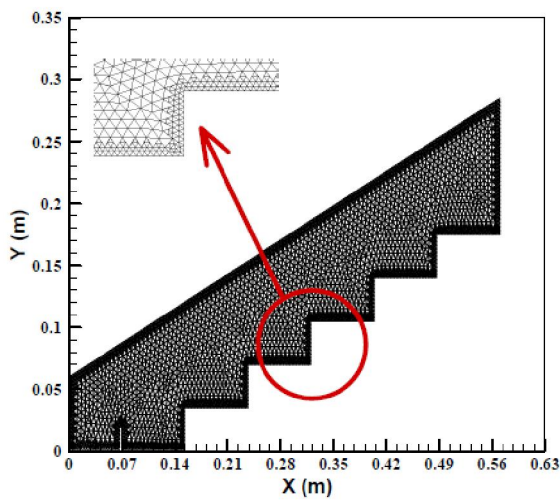
ولمورگان و همکاران [۲] به بررسی آبشیرین کن پلکانی پرداخته و برای عملکرد بهتر از ۵۰ سینی با ارتفاع مختلف استفاده کردند. آنان برای بالا بردن بهره‌وری، اسفنج، تیغه و سنگریزه در حوضچه بکار برده و به راندمان بسیار بالاتری نسبت به حالت اولیه رسیدند. تبریزی و همکاران [۳،۴] مدلی از آبشیرین کن پلکانی مجتمع شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی مانند پارافین در زیر صفحه جاذب را بررسی کرده تا در زمانی که نور خورشید وجود ندارد، دمای دستگاه برای تولید آب مقطر به اندازه کافی بالا باشد. همچنین تبریزی و همکارانش [۵،۶] نرخ جریان آب بر عملکرد و بهره‌وری آبشیرین کن پلکانی در یک روز خاص مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش نرخ جریان باعث کاهش بهره‌وری روزانه می‌شود. رادھووان [۷] کارایی یک آبشیرین کن پلکانی را که با یک منبع ذخیره انرژی حرارتی ترکیب شده بود، مورد مطالعه قرار داده است.

از جمله مطالعاتی که به روش حل عددی انجام گرفته می‌توان به تحقیق آقای چوئیخ و همکاران [۸] اشاره نمود. آنان به بررسی آنالیز عددی برای جریان جابجایی منتج شده از اثرات ترکیبی بویانسی پخش جرم و حرارت در محفظه ششیدار پرداختند. احمد و همکاران [۹] یک مدل ریاضی را برای یک آبشیرین کن خورشیدی با تقطیر چندمرحله‌ای جهت افزایش و بهبود بهره‌وری آبشیرین کن خورشیدی ساده، پیشنهاد دادند. آنان همچنین از نرم‌افزار فلونتت برای شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال حرارت و از نرم‌افزار نسترن برای تجزیه و تحلیل جریان سیال درون آبشیرین کن استفاده کردند. شوخو و همکاران [۱۰] به بررسی و آنالیز عددی یک آبشیرین کن تخت پرده‌دار و به کمک نرم‌افزار فلونتت پرداختند، همچنین توزیع انتقال حرارت میانگین و محلی، توزیع سرعت و دما از دیگر بررسی آن‌ها بوده است. نتایج برای محاسبه ضریب کالبرن و ضریب اصطکاک نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز این مقادیر افزایش می‌یابد. رهبر و ابوالفضلی [۱۱] به حل عددی یک آبشیرین کن ساده تک‌شبه پرداختند. آنان در این تحقیق یک مدل برای بدست آوردن تقریبی میزان تولید آبشیرین کن ارائه داده‌اند.

تعداد و ارتفاع پله بر روی ساختار جریان درون آبشیرین کن تاثیر خواهد گذاشت و به نظر می‌رسد مقداری بهینه برای تعداد پله وجود خواهد داشت و با بررسی مطالعات گذشته روشن است که تا به امروز پژوهش‌های انجام گرفته بر روی آبشیرین کن پلکانی با روش حل عددی به منظور بررسی تاثیر تعداد و ابعاد پله در آبشیرین کن خورشیدی صورت نگرفته است. از این رو در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به حل عددی جریان سیال درون یک آبشیرین کن خورشیدی پلکانی پرداخته شود.



شکل ۲: بررسی استقلال از شبکه برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی (M = تعداد المان)



شکل ۳: شبکه مورد استفاده در مدل سازی عددی

#### ۴- اعتبار سنجی نتایج حل عددی

به منظور اعتبارسنجی روند حل، یک آب‌شیرین‌کن ساده (شکل ۴) شبیه سازی و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج آب‌شیرین‌کن ساده ابوالفضلی و رهبر [۱۳]، مقایسه شده است (جدول ۳). مقایسه نتایج نشان می‌دهد که حداکثر خطا ۸٫۴ درصد بوده و تطابق خوبی بین آن‌ها وجود دارد.

#### ۴- تحلیل نتایج

در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته شده است. از آنجاکه هدف از انجام پژوهش‌هایی از این دست، بهینه‌سازی در جهت افزایش میزان تولید می‌باشد، در این پژوهش تاثیر پارامتر تعداد پله روی میزان تولید دستگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه ساختار جریان آب‌شیرین‌کن در حالت‌های مختلف بررسی شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (۲)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\rho}{\rho_0} g_y \quad (۳)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۴)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (۵)$$

در این مدل‌سازی شرایط هوا به صورت کاملا اشباع فرض گردیده است. به منظور محاسبه ی نرخ تولید آب شیرین با فرض مساوی بودن نرخ تبخیر از روی سطح آب با نرخ تقطیر آب روی پوشش سرد از معادله ی (۶) و نیز برای محاسبه عدد ناسلت از معادله (۷) استفاده شده است [۱۲].

$$m'' = -\rho D_{AB} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (۶)$$

$$Nu = \frac{h_c l}{k} \quad (۷)$$

### ۳- حل عددی

#### روند حل

در این تحقیق حل معادلات ذکر شده با شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم افزار فلونت ورژن ۱۴ بر روی یک آب‌شیرین‌کن پلکانی با ابعاد داده شده در شکل ۱ صورت می‌گیرد. از الگوریتم سیمپل برای محاسبه ی ارتباط بین فشار و سرعت و نیز برای انفصال ترم های جایجایی و درونیایی فشار از طرح های بالادست<sup>۱</sup> و PRESTO استفاده شده است. مشخصات هوای مرطوب از جمله ظرفیت گرمایی، ویسکوزیته و قابلیت هدایت گرمایی بر اساس مقادیر داده شده در جدول ۲ مدل شده‌اند. جدول ۲: شرایط هوای مرطوب وابسته به درجه حرارت [۱۱]

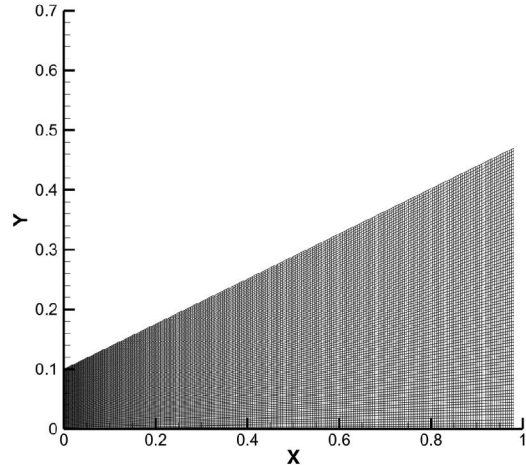
متغیر	معادله حاکم
ظرفیت حرارتی	$C_p = 999.2 + 0.1434 \times T_1 + 1.101 \times 10^{-4} \times T_1^2 - 6.758 \times 10^{-8} \times T_1^3$
دانسیته	$\rho = 353.44 / (T_1 + 273.15)$
رسانایی	$K = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} \times T_1$
لزجت	$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \times 10^{-8} \times T_1$
دمای متوسط	$T_1 = (T_g + T_w) / 2$

به منظور بررسی استقلال جواب‌ها از شبکه و از بین بردن خطای ناشی از درشتی شبکه، حل عددی برای چند شبکه با تعداد سلول های مختلف ۱۳۰۰، ۲۵۰۰، ۵۰۰۰، ۱۲۰۰۰، ۲۵۰۰۰ انجام شده است. شکل ۲ بررسی استقلال جواب‌ها از شبکه را برای آب‌شیرین‌کن پلکانی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، شبکه ای با تعداد المان ۱۲۰۰۰ که درصد خطای نتایج آن با شبکه‌ای به تعداد المان ۲۵۰۰۰ کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد و به منظور انجام پروسه حل انتخاب شده است. همچنین جهت بالا بردن دقت جواب‌ها، شبکه موردنظر در نزدیکی دیواره‌ها ریز شده است. شکل ۳ شبکه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

1. First Order Upwind

شکل ۵: بررسی تاثیر تعداد پله بر روی میزان تولید در حالت ارتفاع ثابت دو سانتی‌متر برای پله‌ها (تعداد پله =  $n$ )

شکل‌های ۶ الی ۱۳ خطوط جریان را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش تعداد پله‌ها سعی در انفعال گردابه اصلی دارند که این مهم در شکل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۳ به خوبی قابل مشاهده است. همانطور که قبلاً اشاره شد در حالت‌های هفت، هشت و ده پله‌ای با ارتفاع ۲ سانتی‌متر میزان تولید، بیشترین مقدار خود را داشته است. این امر با توجه به شکل‌های مذکور و خطوط جریان، تعداد و نظم گردابه‌ها قابل توجیه می‌باشد. هر چه تعداد گردابه‌ها اضافه شود، زمان رسیدن بخار از سطح آب به شیشه کمتر شده و در نتیجه انتظار می‌رود میزان تقطیر و خروجی دستگاه افزایش یابد. همانطور که در شکل مورد نظر مشخص است در حالت‌های ۷، ۸ و ۱۰ پله‌ای، تعداد و نظم گردابه‌ها از سایر موارد بیشتر بوده و با توجه به تعداد و نظم گردابه‌ها میزان تولید افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان

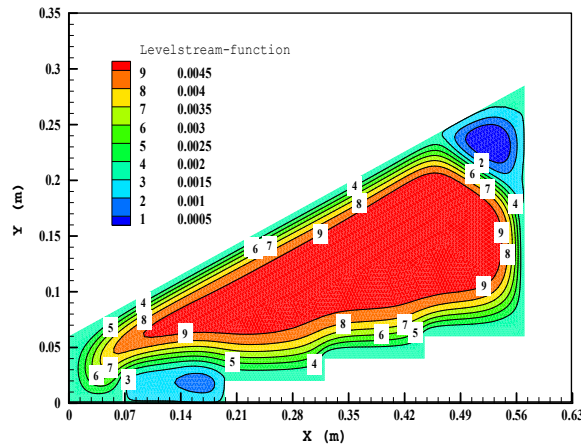


شکل ۴: شبکه مورد استفاده در مدل‌سازی عددی آب‌شیرین‌کن ساده

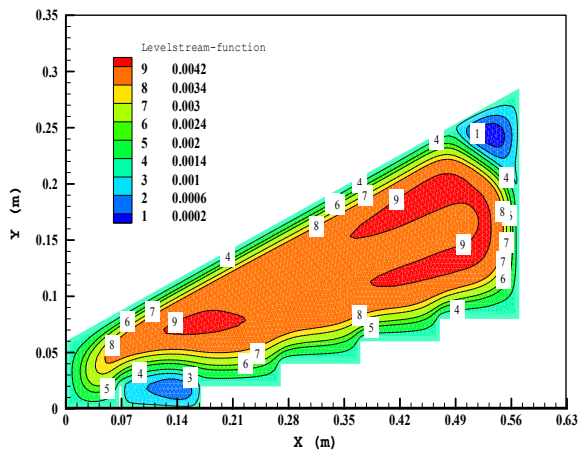
جدول ۳: مقایسه نتایج بین تحقیق حاضر با مقاله [۱۳]

ردیف	$T_w$	$T_g$	Nu کار محقق	Nu کار حاضر	خطا
۱	۴۰	۳۰	۱۵/۲۹	۱۶/۳۰	۶،۶
۲	۵۰	۴۰	۱۵/۴۶	۱۵/۹۳	۳
۳	۶۰	۵۰	۱۵/۶۸	۱۷	۸،۴
۴	۷۰	۶۰	۱۵/۵۳	۱۵/۷۶	۱،۵

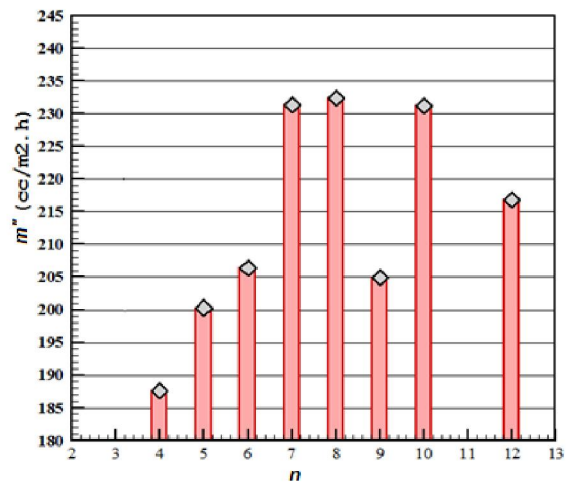
شکل ۵ تاثیر تعداد پله را بر روی میزان تولید نشان می‌دهد که دمای آب شیشه، دمای ۱۴ ساعت در آزمایش در نظر گرفته شده است. این دما این دلیل انتخاب شده است که در این ساعت از روز حالت اشباع بالا و خا کمتر می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با ثابت گرفتن ارتفاع پله میزان دو سانتی‌متر، تولید آب‌شیرین‌کن در حالت‌های هفت، هشت و ده پله‌ها به بیشترین حد خود رسیده است. در این حالت‌ها تولید آب شیرین حدود ۲۳۲ میلی‌لیتر بر مترمکعب در هر ساعت خواهد بود. همانطور که در آینده خواهیم دید، علت آن منظم‌تر شدن ساختار گردابه‌ها درون محفظه می‌باشد.

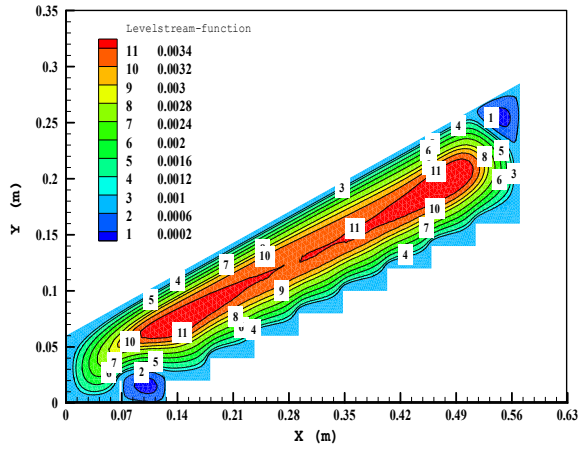


شکل ۶: خطوط جریان در آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده با ارتفاع ۲ سانتی‌متر

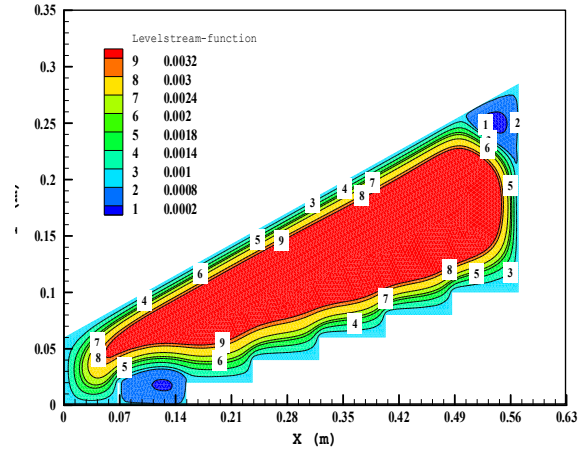


شکل ۷: خطوط جریان در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پنج پله‌ای با ارتفاع ۱ سانتی‌متر

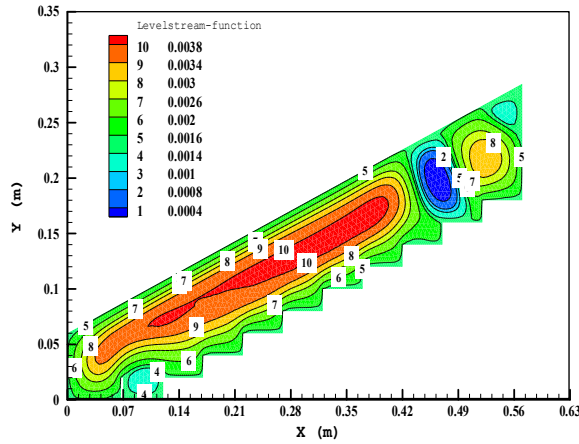




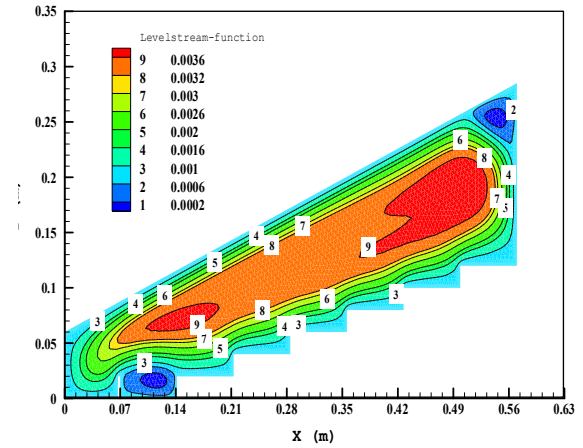
شکل ۱: خطوط جریان در آب‌سیرین‌کن خورشیدی نه پله‌ای با ارتفاع ۲ سانتی‌متر



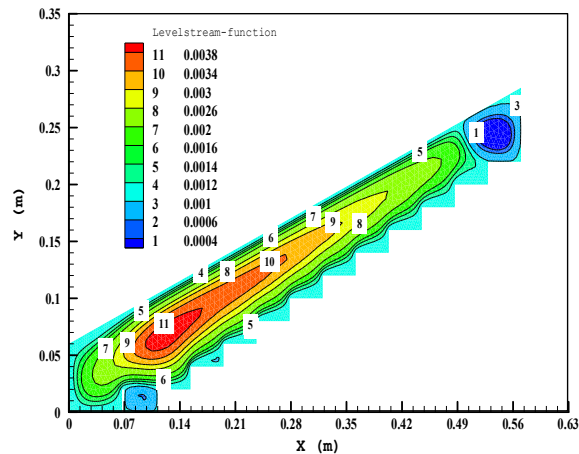
شکل ۸: خطوط جریان در آب‌سیرین‌کن خورشیدی سس پله‌ای با ارتفاع ۱ متر



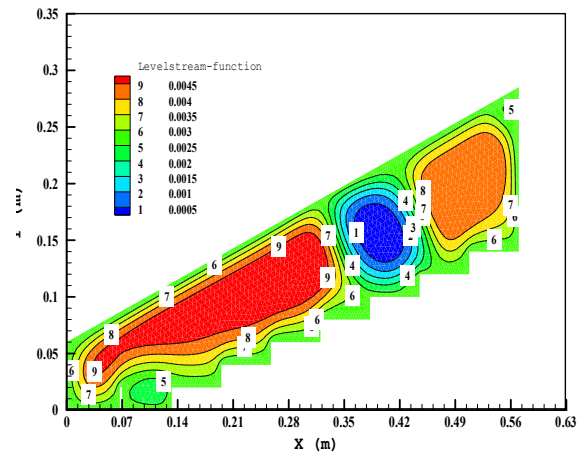
شکل ۱۱: خطوط جریان در آب‌سیرین‌کن خورشیدی ده پله‌ای با ارتفاع ۱ سانتی‌متر



شکل ۹: خطوط جریان در آب‌سیرین‌کن خورشیدی یازده پله‌ای با ارتفاع ۱ سانتی‌متر



شکل ۱۰: خطوط جریان در آب‌سیرین‌کن خورشیدی دوازده پله‌ای با ارتفاع ۱ سانتی‌متر



شکل ۱۰: خطوط جریان در آب‌سیرین‌کن خورشیدی هشت پله‌ای با ارتفاع ۱ سانتی‌متر

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن شرایط هوای مرطوب، حالت پایدار و آرام، انتقال جرم و جابجایی طبیعی داخل یک آب شیرین کن پلکانی در حالت دو بعدی شبیه‌سازی عددی شده است. همچنین تاثیر تعداد پله بر روی راندمان آب شیرین کن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل به شرح زیر می باشند:

- شبیه‌سازی عددی به روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند با دقت مناسب میزان خروجی دستگاه را پیش بینی کند.
- افزایش تعداد پله با ارتفاع ثابت تا تعداد پله‌های ده بجز حالت نه پله‌ای باعث افزایش میزان تولید خواهد شد.
- افزایش تعداد پله باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش تولید آب شیرین خواهد شد.
- بیشترین تولید آب شیرین در حالت ۸ پله‌ای و به میزان ۲۳۲ میلی‌لیتر بر مترمکعب در هر ساعت رخ داده است که می‌توان بهترین تعداد پله برای این آب شیرین کن در نظر گرفت.

### ۶- فهرست علائم

$C$	تمرکز جزءها ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$D_{AB}$	ضریب پخش دوتایی ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$g$	شتاب جاذبه ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطح آب و شیشه ( $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$k$	ضریب هدایت حرارتی ( $\text{w}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$l$	ارتفاع متوسط (m)
$m''$	مقدار آب شیرین ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$Nu$	عدد ناسلت
$p$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ )
$q$	نرخ انتقال گرما (w)
$T$	دما (K)
$u$	مولفه ی سرعت سیال در راستای افق ( $\text{ms}^{-1}$ )
$v$	مولفه ی سرعت سیال در راستای عمود ( $\text{ms}^{-1}$ )

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$\alpha$	ضریب نفوذ حرارت ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )
$\nu$	گرانروی سینماتیکی ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )

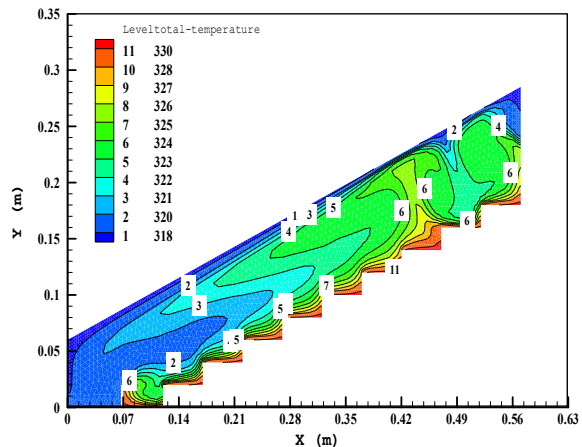
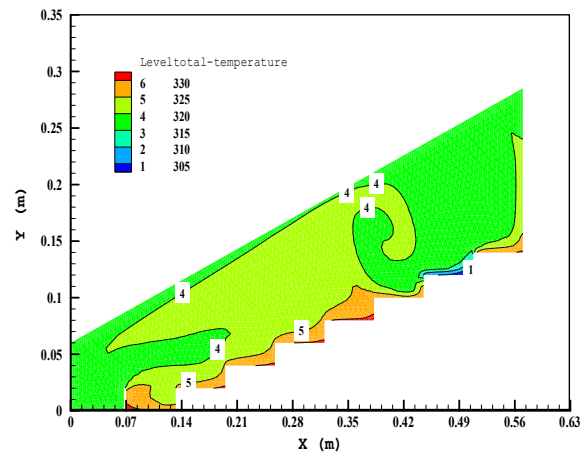
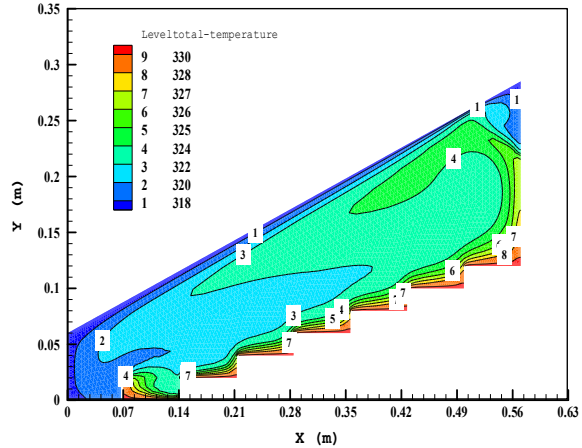
### زیرنویس‌ها

$g$	پوشش شیشه‌ای
$i$	خاصیت متوسط
$w$	آب شور

### ۷- مراجع

- [1] M. Rahman, H.F. Öztop, A. Ahsan, M. Kalam, and Y. Varol, "Double-diffusive natural convection in a triangular solar collector," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 39, pp. 264-269, 2012.
- [2] V. Velmurugan, K. Naveen Kumar, T. Noorul Haq, and K. Srithar, "Performance analysis in stepped solar still for effluent desalination," Energy, vol. 34, pp. 1179-1186, 2009.

شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ تغییرات دما در آب شیرین کن در حالت‌های هفت، هشت و ده پله ای که بیشترین بهره‌وری داشته اند را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود در مرکز گردابه‌ها تغییر در مقدار دمای هوای مرطوب ناحیه بوده اما در اثر بدیده تقطع و تبخیر، تغسبات سه بعدی، دما،



شکل ۱۶: تغییرات دمای سکون برحسب کلون در آب شیرین کن خورشیدی ده پلکانی با ارتفاع ۲ سانتی متر

- [3] M. Dashtban and F.F. Tabrizi, "Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage," *Desalination*, vol. 279, pp. 415-422, 2011.
- [4] F.F. Tabrizi, M. Dashtban, and H. Moghaddam, "Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system," *Desalination*, vol. 260, pp. 248-253, 2010.
- [5] F. Farshchi Tabrizi, M. Dashtban, H. Moghaddam, and K. Razzaghi, "Effect of water flow rate on internal heat and mass transfer and daily productivity of a weir-type cascade solar still," *Desalination*, vol. 260, pp. 239-247, 2010.
- [6] F.B. Ziabari, A.Z. Sharak, H. Moghadam, and F.F. Tabrizi, "Theoretical and experimental study of cascade solar stills," *Solar Energy*, vol. 90, pp. 205-211, 2013.
- [7] A.M. Radhwan, Transient performance of stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage, *Desalination* 171 (2004) 61-76.
- [8] R.Chouikh, L.Ben Snoussi, A.Guizani, Numerical study of the heat and mass transfer in inclined glazing cavity: Application to a solar distillation cell, *Renewable Energy* 32 (2007) 1511-1524
- [9] M.I. Ahmed, M. Hrairi, and A. F. Ismail, "On the characteristics of multistage evacuated solar distillation," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1471-1478, 2009.
- [10] S. Xu, X. Ling, and H. Peng, "Simulation of Heating Cell in a New Integrated Solar Plate-fin Desalination Unit by Fluent," 2011.
- [11] N. Rahbar and J. Esfahani, "Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis," *Energy*, vol. 49, pp. 289-297, 2013.
- [12] Cengel YA. Heat and mass transfer: a practical approach. 3rd ed. New York: Mc Graw Hill; 2006.
- [13] N. Rahbar, J. A.Esfahani, Estimation of convective heat transfer coefficient in a single-slope solar still: a numerical study, *Desalination and Water Treatment* 2012,50(1-3):387-96