

مدلسازی ریاضی آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای و بررسی اثر پارامترهای

هندسی بر میزان تولید آن

آرش میرعبدالله لواسانی

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران مرکز، دانشگاه آزاد
اسلامی، تهران، ایران
arashlavasani@iauctb.ac.ir

پریسا آذری

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران مرکز،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
parisaazari@gmail.com

نادر رهبر

استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان،
دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
nrabar@gmail.com

چکیده

در این تحقیق با تدوین یک کد کامپیوتری به کمک نرم‌افزار متلب، به مدلسازی ریاضی یک آب شیرین کن خورشیدی نوع حوضچه‌ای ساده پرداخته شده است. در این مدلسازی تغییرات دما با زمان در اجزای مختلف آب شیرین کن شامل پوشش شیشه‌ای، آب و کف تشتک به دست آمده و همچنین اثر تغییر عمق آب و مساحت تشتک بر میزان تولید آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش مساحت تشتک آب شیرین کن، میزان تولید آب سیستم بر واحد مساحت آن، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق آب در تشتک آب شیرین کن، میزان تولید آب سیستم کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مدلسازی ریاضی، آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای، تولید آب

فهرست علائم (در صورت لزوم)

C_p : گرمای ویژه هوا ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	σ : ثابت بولتزمن $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ 5.67×10^{-8}
$h_{cwg}, h_{cga}, h_{cwb}$: ضرایب انتقال حرارت جابجایی $\frac{W}{m^2 \cdot K}$	ρ : چگالی هوا $\frac{kg}{m^3}$
h_{rij} : ضریب انتقال حرارتی تابشی $\frac{W}{m^2 \cdot K}$	μ : لزجت دینامیکی $\frac{kg}{ms}$
h_{fg} : گرمای نهان تبخیر آب $\frac{J}{kg}$	ϵ : ضریب گسیل اجزای هواگرمن
I : تابش خورشیدی $\frac{W}{m^2}$	T_a : دمای هوا (K)
k : هدایت حرارتی $\frac{W}{m \cdot K}$	P_g : فشار جزئی در دمای آب تشتک $\frac{N}{m^2}$
k_i : هدایت حرارتی کف تشتک $\frac{W}{m \cdot K}$	P_w : فشار جزئی در دمای شیشه $\frac{N}{m^2}$
L : طول آب شیرین کن (m)	U_b : ضریب افت حرارت کف تشتک $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
m : دبی جرمی آب تولید شده $\frac{L}{m^2 \cdot h}$	V_{wind} : سرعت باد $\frac{m}{s}$
T_g, T_b, T_w : دمای متوسط اجزای هواگرمن (K)	L : طول آب شیرین کن (متر)
α_b : ضریب جذب کف تشتک	W : عرض آب شیرین کن (متر)

α_g : ضریب جذب شیشه
 X_w : عمق آب (cm)

۱- مقدمه

متداولترین و ارزانتترین نوع فن‌آوری نمک زدایی خورشیدی، حوضچه‌های خورشیدی می‌باشند. از این نوع آب شیرین‌کن خورشیدی به دلیل ساده بودن می‌توان به صورت تکی در منازل و یا در موارد فوریت بهره برد. همچنین انرژی‌های تجدیدپذیر همانند باد و خورشید در نواحی دوردست نیز به راحتی در دسترس می‌باشند. بنابراین بهترین انتخاب برای شیرین نمودن آب استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌باشد. این وسایل از تکنولوژی بسیار ساده استفاده کرده، بنابراین از سایر وسایل و امکانات تصفیه آب مقرون به صرفه تر می‌باشند. اقدامات مختلفی توسط محققان در سراسر دنیا در زمینه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی نوع حوضچه‌ای انجام شده است. برای مثال پانچال و همکاران به مطالعه مروری در مورد روش‌های مختلف افزایش تولید در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از پره و یا مواد جاذب انرژی در ساختار آب شیرین‌کن سبب بالا رفتن میزان تولید و بازدهی آب شیرین‌کن می‌شود [۱]. ابوحنبله و همکاران مطالعاتی را بر روی عملکرد آب شیرین‌کن حوضچه‌ای با مکعب‌های اسفنجی با ابعاد مختلف انجام دادند. در شرایط یکسان، میزان تولید آب شیرین‌کنی که در ساختار آن از مکعب‌های اسفنجی استفاده شده بود، ۱۸ تا ۲۷۳ درصد نسبت به آب شیرین‌کن نوع معمولی افزایش داشت [۲]. محمد ال هراشه و همکاران در یک کار تجربی مطالعاتی را بر روی یک نمونه آب شیرین‌کن که در ساختار آن از مواد ذخیره‌کننده انرژی (PCM) استفاده شده و با یک کلکتور خورشیدی ترکیب شده بود، انجام دادند. پوشش شیشه‌ای آب شیرین‌کن آنها دوجداره بوده و آب برای خنک‌کاری شیشه بین دوجداره آن جریان داشت. در تحقیق مذکور، اثر نرخ جریان آب گرم سیرکوله شده، نرخ آب خنک‌کاری و سطح آب تشتک بر نرخ تولید آب مطالعه شد. نتایج نشان داد که مقدار بهینه آب خنک‌کاری ۱۰ میلی‌لیتر در ثانیه بوده و در این حالت میزان تولید نیز بیشینه بوده است [۳]. اسریواستاوا و همکاران در یک کار تحقیقاتی به مطالعه یک آب شیرین‌کن حوضچه‌ای که در کف تشتک آن از پره‌های متخلخل استفاده شد پرداختند. نتایج نشان داد که نرخ تبخیر در این نوع آب شیرین‌کن بالا رفته و بنابراین میزان تولید افزایش می‌یابد. همچنین نتایج تجربی نشان داد که با کاهش عمق آب در تشتک، میزان تولید افزایش می‌یابد [۴]. اصفهانی و همکاران به مطالعه تئوری و آنالیز عددی یک آب شیرین‌کن حوضچه‌ای ساده پرداختند. در اقدام آنها یک معادله جدید بر اساس آنالوژی چیلتون-کلبورن برای تخمین میزان تولید آب شیرین‌کن پیشنهاد شد که با مدل‌های موجود شناخته شده مطابقت داشت. همچنین نتایج نشان داد که روند تولید آب همیشه مشابه روند تغییر ضریب انتقال حرارت جابجایی است [۵]. اسریتار و همکاران در یک کار تجربی برای افزایش نرخ تولید آب در آب شیرین‌کن حوضچه‌ای ساده از تعبیه پره و اسفنج در تشتک آب شیرین‌کن استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با استفاده از اسفنج میزان تولید ۱۵ درصد و با استفاده از پره میزان تولید ۴۵/۵ درصد افزایش می‌یابد [۶].

نافی و همکاران به مطالعه تجربی اثر مواد گراول سیاه و لاستیک سیاه به عنوان مواد ذخیره‌کننده انرژی در افزایش نرخ تولید آب در آب شیرین‌کن حوضچه‌ای نوع ساده پرداختند. برای مطالعه تجربی اثر ضخامت لاستیک و اندازه ذرات گراول، چهار آب شیرین‌کن ساخته شد. نتایج نشان داد که لاستیک سیاه با ضخامت ۱۰ میلیمتر تولید را ۲۰ درصد افزایش داده و همچنین ذرات گراول با اندازه ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر تولید را ۱۹ درصد افزایش می‌دهد [۷]. در اقدام دیگری آبیبار و همکاران به مطالعه پارامتری یک آب شیرین‌کن حوضچه‌ای تک‌شیبه پرداختند. اثر عمق آب در تشتک و زاویه پوشش شیشه‌ای بر تولید سیستم مطالعه شد. نتایج نشان داد که با انتخاب عمق آب بهینه و زاویه مناسب برای آب شیرین‌کن، میزان تولید آب سیستم افزایش می‌یابد [۸]. فاداتاره و همکاران یک مطالعه تجربی را بر روی اثر عمق آب بر روی میزان انتقال حرارت و جرم در یک آب شیرین‌کن حوضچه‌ای تک‌شیبه انجام دادند. نمونه آزمایشگاهی آب شیرین‌کن از پلکسی‌گلس ساخته شد و اثر عمق آب از ۲

سانتیمتر تا ۱۲ سانتیمتر بر میزان انتقال جرم و حرارت مورد بررسی قرار گرفت. بالاترین بازده آب شیرین‌کن مذکور بین ۱۰ تا ۳۴ درصد تغییر نمود. نتایج نشان داد که با افزایش عمق آب تشتک، میزان تولید آب کاهش می‌یابد [۹]. بیشتر اقداماتی که در زمینه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی نوع حوضچه‌ای انجام شده به صورت تجربی بوده است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار متلب به تدوین یک کد کامپیوتری به جهت مدلسازی ریاضی آب شیرین‌کن نوع حوضچه‌ای پرداخته شده که با استفاده از آن می‌توان به بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله عمق آب در آب شیرین‌کن و مساحت تشتک آب شیرین‌کن بر میزان تولید سیستم پرداخت

۲- روش‌شناسی

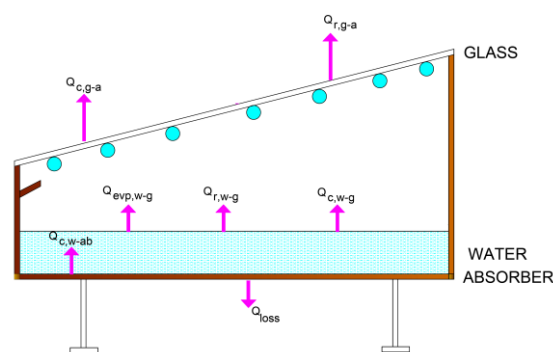
با ایجاد تغییراتی در ساختار آب شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌توان میزان تولید آب در آنها را افزایش داد. از جمله این اقدامات تغییر در میزان آب موجود در تشتک آب شیرین‌کن و همچنین تغییر ابعاد آب شیرین‌کن می‌باشد. در این تحقیق با مدلسازی ریاضی آب شیرین‌کن نوع حوضچه‌ای به کمک نرم‌افزار متلب، تغییرات دما در اجزای مختلف آب شیرین‌کن و همچنین اثر پارامترهای مختلف از جمله تغییر مساحت و همچنین عمق آب موجود در تشتک آب شیرین‌کن بر روی میزان تولید آب سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- معادلات حاکم

آب شیرین‌کن تحت بررسی در این مقاله شامل یک پوشش شیشه‌ای، آب و تشتک می‌باشد. پس از اعمال موازنه انرژی بر روی اجزای تشکیل دهنده آب شیرین‌کن، معادلات مربوطه به شرح زیر خواهند بود:

جدول ۱: مشخصات آب شیرین‌کن مدلسازی شده [۹]

طول	۱/۷۶ متر
عرض	۰/۸۵ متر
ϵ_g	۰/۹
ϵ_w	۰/۹
ϵ_b	۰/۱



شکل ۱: طرحواره آب شیرین‌کن نوع حوضچه‌ای

معادله توازن حرارتی برای شیشه:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{m_g c_{pg} A_g} (\alpha_g I(t) - h_{cg-a}(T_g - T_a) - h_{rg-a}(T_g - T_a) + h_{rw-g}(T_w - T_g) + h_{cw-g}(T_w - T_g) + h_{evp} A_g A_w (T_w - T_g)) \quad (1)$$

ضریب انتقال حرارت شیشه با هوای مجاور آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$h_{cg-a} = 5.7 + 3.8 v_{wind} \quad (2)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی بین دو صفحه عبارتست از [۹]:

$$h_{rij} = \left(\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right)^{-1} \sigma (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و آب نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$h_{cw-g} = 0.884 \left[T_w - T_g + \frac{(p_w - p_g)(T_w + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - p_w} \right]^{1/3} \quad (4)$$

$$P_w = \exp \left[25.317 - \left(\frac{5144}{273 + T_w} \right) \right] \quad (5)$$

$$P_g = \exp \left[25.317 - \left(\frac{5144}{273 + T_g} \right) \right]$$

همچنین ضریب انتقال حرارت مربوط به تبخیر آب عبارتست از [۹]:

$$h_{evp} = 16.273 \times 10^{-3} \times h_{cw-g} \frac{(p_w - p_g)}{(T_w - T_g)} \quad (6)$$

معادله موازنه حرارتی برای آب:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{m_w c_{pw} A_w} (\alpha_w I(t) + h_{cw-b}(T_w - T_b) - h_{rw-g}(T_w - T_g) - h_{cw-g}(T_w - T_g) - h_{evp}(T_w - T_g)) \quad (7)$$

معادله موازنه حرارتی برای کف تشتک:

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{m_b c_{pb} A_b} (\alpha_b I(t) - h_{cw-b}(T_w - T_b) - U_b(T_b - T_a)) \quad (8)$$

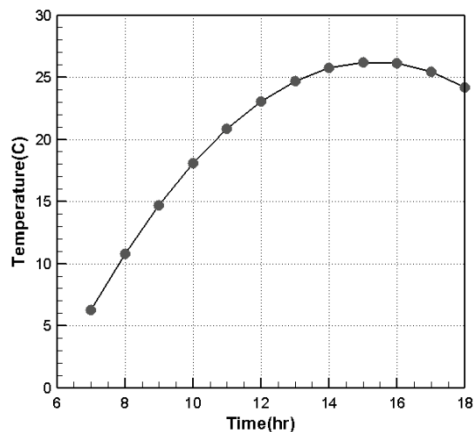
$$U_b = \frac{1}{\frac{X}{k_i} + \frac{1}{h_w}} \quad (9)$$

میزان تولید آب بر واحد مساحت آب شیرین کن به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۹].

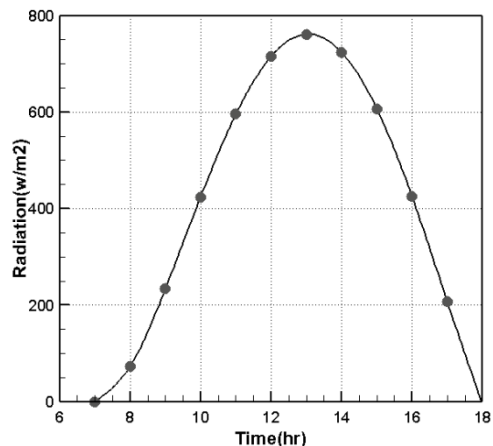
$$m = \left(\frac{h_{ev}(T_w - T_g)}{h_{fg}} \right) * 3600 \quad (10)$$

۲-۲-۲- اعتبارسنجی، نمودارها و نتایج

در این تحقیق با تدوین یک کد کامپیوتری به کمک نرم افزار متلب، به مدلسازی ریاضی یک آب شیرین کن نوع حوضچه‌ای پرداخته شده است. با استفاده از این کد می‌توان به بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله عمق آب و مساحت تشتک آب شیرین کن بر روی میزان تولید آب سیستم پرداخت. در شکل زیر نمودار تغییرات تابش خورشیدی و دمای هوای محیط با زمان که در این مدلسازی از آن استفاده شده است، قابل مشاهده است.

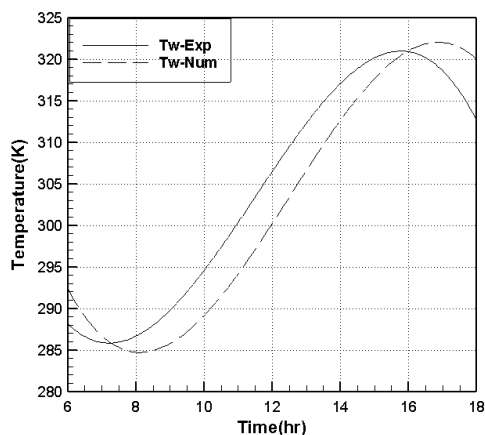


شکل ۳: تغییرات دمای هوای محیط بر حسب زمان [۹]

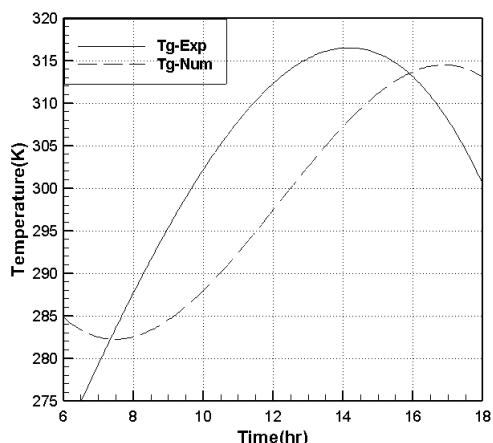


شکل ۲: تغییرات شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان [۹]

در این تحقیق برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از کد کامپیوتری با نتایج موجود، از مقاله فاداتاره و همکاران [۹] استفاده شده است. برای این کار دما در اجزای مختلف آب شیرین کن مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج مقاله شماره [۹] مقایسه شده است. نمودار تغییرات دما در پوشش شیشه‌ای آب شیرین کن تحت بررسی در این تحقیق در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است. میزان خطا بین نتایج تجربی و عددی در این صفحه حداکثر ۵/۶ درصد است. همچنین نمودار تغییرات دما با زمان برای آب درون تشتک در شکل شماره ۵ مشاهده می‌گردد. میزان خطا بین نتایج تجربی و عددی در این صفحه حداکثر ۲/۲ درصد است.



شکل ۵: تغییرات دمای آب درون تشتک بر حسب زمان

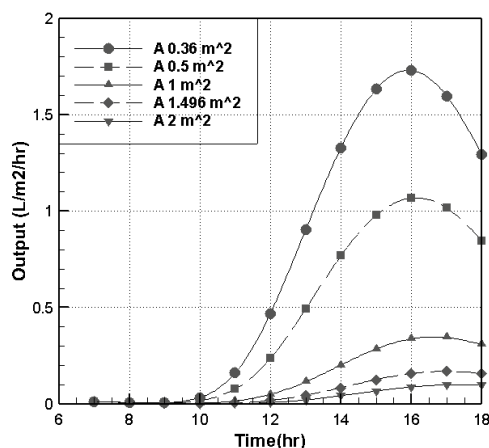


شکل ۴: تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای بر حسب زمان

در این تحقیق اثر تغییر ابعاد آب شیرین کن خورشیدی بر روی میزان تولید آب مورد بررسی قرار گرفته است. برای همین منظور ابعاد آب شیرین کن مربوطه مطابق با جدول شماره ۲ تغییر داده شده و اثر تغییر مساحت آب شیرین کن بر روی میزان خروجی آب سیستم بررسی شده است.

جدول ۲: تغییرات ابعاد آب شیرین کن در دست مطالعه

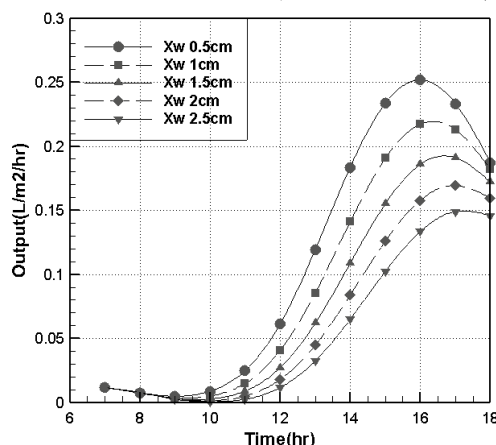
عرض (متر)	طول (متر)	مساحت تشتک (مترمربع)
۰/۶	۰/۶	۰/۳۶
۰/۵	۱	۰/۵
۱	۱	۱
۰/۸۵	۱/۷۶	۱/۴۹۶
۱	۲	۲



شکل ۶: تغییرات میزان تولید آب بر حسب زمان با تغییر مساحت تشتک آب شیرین کن

همانطور که از شکل شماره ۶ مشاهده می‌گردد با افزایش مساحت تشتک آب شیرین کن، میزان تولید آب سیستم بر واحد مساحت آن، کاهش می‌یابد. میزان تولید آب در حالتی که مساحت تشتک 0.36 مترمربع است به طور متوسط 33 درصد نسبت به حالتی که مساحت تشتک 2 مترمربع است، افزایش داشته است. علت افزایش تولید آب بر واحد مساحت آب شیرین کن در ابعاد کوچکتر آن، افزایش اختلاف دما بین پوشش شیشه‌ای و آب درون حوضچه و در نتیجه افزایش انتقال حرارت بین شیشه و آب می‌باشد.

به منظور بررسی اثر عمق آب موجود در تشتک آب شیرین کن، مقادیر عمق آب بین مقادیر 0.5 ، 1 ، 1.5 ، 2 و 2.5 سانتیمتر تغییر داده شده و میزان تولید آب بر واحد مساحت تشتک با گذشت زمان به دست آمده است. همانگونه از شکل شماره ۷ مشاهده می‌گردد با افزایش عمق آب در تشتک آب شیرین کن، میزان تولید آب سیستم کاهش می‌یابد. میزان افزایش تولید آب در حالتی که عمق آب در حوضچه آب شیرین کن 0.5 سانتیمتر است نسبت به حالتی که عمق آب 2.5 سانتیمتر است به طور متوسط $3/8$ درصد افزایش دارد. دلیل افزایش میزان تولید آب با کاهش عمق آب موجود درون حوضچه، افزایش ضریب انتقال حرارت تبخیر به دلیل کاهش حجم آب موجود در حوضچه و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌باشد.



شکل ۷: تغییرات میزان تولید آب بر حسب زمان با تغییر عمق آب در تشتک آب شیرین کن

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک آب شیرین کن خورشیدی نوع حوضچه‌ای با استفاده از نرم‌افزار متلب مدل‌سازی ریاضی شده است. با استفاده از مدل ریاضی مذکور، دما در اجزای مختلف آب شیرین کن قابل محاسبه بوده و همچنین اثر پارامترهای مختلف مانند مساحت تشتک آب شیرین کن و همچنین عمق آب موجود در تشتک بر روی میزان آب تولیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج

نشان می‌دهد که با کاهش مساحت تشتک آب شیرین‌کن، میزان تولید آب سیستم بر واحد مساحت آن، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق آب در تشتک آب شیرین‌کن، میزان تولید آب سیستم کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Panchal, H. and I. J. D. Mohan (2017). "Various methods applied to solar still for enhancement of distillate output.", *Journal of Desalination*, **415**: 76-89.
- [2] Rababa'h, H. M. J. E. c. and Management (2003). "Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin.", *Energy conversion and management*, **44**(9): 1411-1418.
- [3] Al-harashsheh, M., et al. (2018). "Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM.", *Applied thermal engineering*, **128**: 1030-1040.
- [4] Srivastava, P. K. and S. J. D. Agrawal (2013). "Winter and summer performance of single sloped basin type solar still integrated with extended porous fins.", *Journal of Desalination*, **319**: 73-78.
- [5] Rahbar, N. and J. A. J. E. Esfahani (2013). "Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis.", *Journal of Energy*, **49**: 289-297.
- [6] Velmurugan, V., et al. (2008). "Single basin solar still with fin for enhancing productivity.", *Energy conversion and management*, **49**(10): 2602-2608.
- [7] Nafey, A., et al. (2001). "Solar still productivity enhancement.", *Energy conversion and management*, **42**(11): 1401-1408.
- [8] Aybar, H., et al. (2009). "Simulation of a solar still to investigate water depth and glass angle. " *Desalination and Water Treatment*, **7**: 35-40.
- [9] M. K. Phadatare, et al. (2007), "Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still," *Desalination*, **217**: 267-275.