



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الزراعية

قسم الهندسة الريفية

نمذجة وتقييم فعالية تحلية المياه المالحة بالطاقة الشمسية اعتماداً على نموذج

تصميمي لمقطر عمودي انتشاري أحادي التأثير

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة الريفية

تخصص هندسة ريفية

إعداد المهندسة: وداد علي أسعد

إشراف

المشرف المشارك

د. م. أمينة فارس

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

المشرف العلمي

د. م. إيهاب جناد

أستاذ مساعد في قسم الهندسة الريفية

كلية الهندسة الزراعية

جامعة دمشق

2024

قرار لجنة الحكم، وتوقيعات لجنة المناقشة، Approval Page

قدمت هذه الأطروحة استكمالاً لمتطلبات نيل درجة الدكتوراه في قسم الهندسة الريفية من كلية الهندسة الزراعية جامعة دمشق.

This thesis has been submitted in partial fulfillment of the requirements for the PhD degree in Rural Engineering Department of at the Faculty of Agricultural Engineering, Damascus University.

نوقشت هذه الأطروحة في جلسة علنية في كلية الهندسة الزراعية بجامعة دمشق بتاريخ 2024/8/8

لجنة الحكم

- أ.د. وجيه ناعمة الأستاذ في قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق عضواً
- د. يوسف مرعي الأستاذ المساعد في قسم الهندسة المائية-كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق عضواً
- د. إيهاب جناد الأستاذ المساعد في قسم الهندسة الريفية -كلية الهندسة الزراعية -جامعة دمشق عضواً ومشرفاً
- د. محمود عبد اللطيف المدرس في قسم الهندسة الريفية كلية الهندسة الزراعية -جامعة دمشق عضواً
- د. طارق كنيانة المدرس في قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-السويداء - جامعة دمشق عضواً

The Board of Examiners

This thesis was discussed and approved on: 8/8/2024 at the Faculty of Agriculture Engineering -Damascus University

Prof. Dr. Wajih Naimeh

Member

Dr. Youssef Marai

Member

Dr. Ihab Jnad

Supervisor

Dr. Mahmoud abdulateef

Member

Dr. Tareq Konaina

Member

تصريح

أصرح بأنّ هذا البحث الموصوف في هذه الرسالة تحت عنوان: "نمذجة وتقييم فعالية تحلية المياه المالحة بالطاقة الشمسية اعتماداً على نموذج تصميمي لمقطر عمودي انتشاري أحادي التأثير" لم يسبق أن قُدم للحصول على أية درجة من جامعة أخرى، وغير مُقدم حالياً. لذلك فإن كافة الأعمال والنتائج المذكورة هي جهودي الشخصية، ويتوجيه من المشرفين العلميين الدكتور إيهاب جناد والدكتورة أمينة فارس، وأية معلومات أو نتائج أخرى ذُكرت في الرسالة قد نُسبت إلى مصادرها ومؤلفيها في النص وضمن قائمة المراجع.

المرشح:

وداد علي أسعد

Declaration

This is hereby declared that this work: "**Modeling and Evaluation the Effectiveness of Solar Saline Desalination based on a Designed Model of Vertical Diffusion-Type Still of Mono-Effect**" It has not been previously submitted to any other university for any degree and is not presently under submission. As a result, all the work and findings mentioned in this thesis are solely my efforts, conducted under the supervision of my scientific supervisors, Dr. Ihab Jnad and Dr. Amina Fares. Any additional information or results mentioned within the thesis have been appropriately attributed to their respective sources and authors within the text and in the reference list.

Candidate:

Wedad Ali Asaad

شهادة:

نشهد بأن العمل الموصوف في هذه الرسالة هو نتيجة بحث علمي قامت به المرشحة ووداد علي أسعد تحت إشراف الدكتور إيهاب جناد الأستاذ المساعد في قسم الهندسة الريفية، كلية الهندسة الزراعية، جامعة دمشق، بالاشتراك مع الدكتورة أمينة فارس الأستاذ المساعد في قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، وأن أية مراجع أخرى بُحِثت في هذه الرسالة موثقة بالنص. كما نشهد بأن هذا البحث لم يسبق أن قُبل للحصول على أي شهادة وهو غير مُقدم حالياً للحصول على شهادة أخرى.

المشرف المشارك

د. أمينة فارس

المشرف العلمي

د. إيهاب جناد

المرشح

وداد علي أسعد

Certificate

It is hereby certified that the work described in this Thesis:

is the result of the author's own investigations (**Wedad Ali Asaad**) under the supervision of **Dr. Ihab Jnad** from the Rural Engineering Department, Faculty of Agriculture Engineering, Damascus University, and **Dr. Amina Fares** from Department of General Mechanics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus university. Any references to other research work have been duly acknowledged in the text. And it is hereby certified this work has not been submitted for any other degree.

Candidate

Wedad Ali Asaad

Supervisor

Dr. Ihab Jnad

Co-Supervisor

Dr. Amina Fares

شكر وتقدير

أتقدم بالشكر الجزيل لكل صاحب فضل في إنجاز هذا العمل، الذي يعد ثمرة تعاون وثيق بين كلية الهندسة الزراعية-جامعة دمشق وكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق، وبفضل المساعدة التي تلقيتها من قسم الهندسة الريفية أمكن لهذه الدراسة أن تُتجز وتُرى النور.

أقدم خالص شكري وامتناني للمُشرفين العلميين الدكتور إيهاب جناد والدكتورة أمينة فارس على توجيهاتهما وإشرافهما المتواصل على مراحل البحث، ومساهمتهما الكبيرة في إنجاز هذه الدراسة من خلال تقديم الإرشاد والتوجيه بحكمة ومد يد العون والمساعدة في كل وقت، كما أتقدم بالشكر والامتنان للدكتور طارق كنيانة على دعمه ومساعدته في إنجاز هذه الأطروحة. كل الشكر والتقدير للجنة الحكم الذين شاركوا خبراتهم العلمية في تقييم العمل، كنتم مصدر إلهام ودعم لا يضاهاى، وبفضلكم أصبحت هذه التجربة لا تُنسى.

كل الشكر والتقدير لرئيس قسم الهندسة الريفية الدكتور أحمد قباطي والدكتور محمود عبد اللطيف لتقديمهما المساعدة العلمية والعملية خلال مراحل الدراسة. أتقدم بالشكر للهيئة العامة للتقانة الحيوية في كلية الهندسة الزراعية جامعة دمشق على المساعدة في إجراء التحاليل.

كل الشكر والتقدير لكل من زرع في نفسي الثقة والإلهام وبذل جهداً وأعطى من وقته لتقديم المساعدة في

إنجاز هذا العمل.

إهداء

إلى من علمني العطاء بلا مقابل

إلى معلمي وقدوتي

إلى الغائب الحاضر دائماً

أبي رحمه الله

إلى من وضعت الجنة بين قدميها

إلى صاحبة القلب الكبير والحنون

إلى من لا توفيهما الكلمات والحروف حقها في البر والإحسان

أمي الغالية

سنشد عضدك بأخيك

إلى رفاق الدرب الطويل

إخوتي

مهند، محمد، أحمد، محمود، عدنان

إلى من آمن بقدراتي وشجعني على المضي قدماً

إلى من ترسمن بابتسامتهن أملاً

أخواتي الرائعات

هبة، هديل، هزار، نور

إلى شريك دربي ورفيق أيامي

إلى السند المتين الذي لا يميل ولا يحيد

زوجي المهندس حسين

إلى من أمدني بالحب والتقدير

إلى الرائعين اللذين وقفوا بجانبني

عائلتي الحنونة

عمي أبو حسين وزوجته

إلى الأصدقاء الرائعين اللذين كانوا عوناً

المهندسة رحمة الدريعي والمهندس محمد دنكاوي

فهرس المحتويات

رقم الصفحة	العنوان	رقم الفقرة
8	فهرس المحتويات	
12	قائمة الجداول	
13	قائمة الأشكال والرسوم البيانية	
16	قائمة الصور	
17	قائمة المعادلات	
19	قائمة الرموز	
22	الملخص	
24	التعريفات والمصطلحات المستخدمة	
25	الفصل الأول: الإطار العام للبحث	1
25	المقدمة	1.1
28	نسبة الأملاح في المياه	2.1
29	طرائق تحلية المياه المالحة	3.1
30	التقطير بالطاقة الشمسية	4.1
31	أنواع المقطرات الشمسية	5.1
32	مبدأ عمل المقطر العمودي الانتشاري متعدد التأثيرات	6.1
33	اختيار التقنية المناسبة لتحلية المياه المالحة	7.1
35	الفصل الثاني	2
35	الإشكالية البحثية	1.2
35	تساؤلات البحث	2.2
36	فرضيات البحث	3.2
36	مسلمات البحث	4.2
36	أهداف البحث	5.2
37	أهمية البحث	6.2
37	مبررات البحث	7.2

38	مصطلحات البحث	8.2
39	محدوديات البحث	9.2
40	الفصل الثالث: الدراسة المرجعية	3
40	الدراسات السابقة	1.3
46	الفصل الرابع: مناهج البحث وأدواته	4
46	موقع التجربة	1.4
46	فترة تنفيذ التجربة	2.4
46	تصميم التجربة	3.4
47	التحليل الحراري	4.4
47	التحليل الحراري للاقط الشمسي المسطح	1.4.4
50	التحليل الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	2.4.4
56	خوارزمية التصميم	5.4
58	مصدر المياه	6.4
59	قياس درجات الحرارة	7.4
61	قياس سرعة الرياح	8.4
62	قياس شدة الإشعاع الشمسي	9.4
62	قياس حجم المياه المقطرة	10.4
63	قياسات نوعية المياه	11.4
63	قياس الرقم الهيدروجيني PH	1.11.4
63	قياس الناقلية الكهربائية EC والملوحة	2.11.4
64	قياس تركيز الكالسيوم Ca	3.11.4
65	قياس القساوة TH	4.11.4
65	قياس تركيز البوتاسيوم K	5.11.4
65	قياس تركيز الصوديوم Na	6.11.4
65	قياس تركيز الكلور Cl	7.11.4
65	التحليل الجرثومي للمياه	8.11.4
66	التحليل الاحصائي	12.4

67	دراسة الجدوى الاقتصادية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	13.4
69	الفصل الخامس: النتائج والمناقشة	5
69	الحسابات الحرارية للاقط الشمسي المسطح	1.5
69	تنفيذ اللاقط الشمسي المسطح	2.5
71	الحسابات الحرارية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	3.5
71	تصميم صفيحة المبخر	1.3.5
73	تصميم صفيحة المكثف	2.3.5
74	تصميم المبادل الحراري الإضافي للمكثف	3.3.5
75	تصميم خزان تجميع المياه المقطرة والمياه المالحة في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	4.3.5
75	النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	5.3.5
77	مقارنة درجة حرارة الوسط المحيط مع درجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة الحرارة داخل اللاقط الشمسي المسطح	4.5
79	مقارنة درجات حرارة اللاقط الشمسي المسطح مع درجات حرارة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	5.5
80	درجة حرارة الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح ودرجة حرارة السطح الماص	6.5
81	مقارنة كمية الطاقة الحرارية الواصلة للسطح للماص في اللاقط الشمسي المسطح Q_L وكمية الطاقة المفيدة Q_u وكمية الطاقة الضائعة Q_L	7.5
83	تقييم كفاءة اللاقط الشمسي المسطح	8.5
84	درجة حرارة التكاثف والتبخر داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	9.5
85	تقييم كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	10.5
86	نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	11.5
87	تقييم كفاءة المبادل الحراري الإضافي	12.5
88	تأثير العوامل المناخية في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	13.5
88	تأثير درجة حرارة الوسط المحيط في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	1.13.5
89	تأثير سرعة الرياح في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	2.13.5

90	تأثير الرطوبة الجوية في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	3.13.5
91	تأثير شدة الإشعاع الشمسي في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	4.13.5
92	تقييم تأثير التحلية بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في نوعية مياه	14.5
92	تقييم أثر التحلية في الرقم الهيدروجيني PH للمياه	1.14.5
93	تقييم أثر التحلية في الناقلية الكهربائية EC للمياه	2.14.5
94	تقييم أثر التحلية في مجموع المواد الصلبة المنحلة TDS للمياه	3.14.5
95	تقييم أثر التحلية في تركيز الكالسيوم Ca للمياه	4.14.5
96	تقييم أثر التحلية في القساوة TH للمياه	5.14.5
97	تقييم أثر التحلية في تركيز البوتاسيوم K للمياه	6.14.5
97	تقييم أثر التحلية في تركيز الصوديوم Na للمياه	7.14.5
98	تقييم أثر التحلية في تركيز الكلور Cl للمياه	8.14.5
99	تقييم أثر التحلية في المواصفات الجرثومية للمياه	9.15.5
100	الفصل السادس: التحليل الإحصائي	6
100	مقارنة الإنتاجية النظرية مع الإنتاجية التجريبية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	1.6
102	تأثير بعض العوامل في إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	2.6
103	الفصل السابع: الجدوى الاقتصادية	7
103	دراسة الجدوى الاقتصادية للنموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	1.7
104	الفصل الثامن: الخاتمة	8
104	الاستنتاجات	1.8
106	التوصيات والمقترحات	2.8
107	مراجع البحث	
113	ملاحق البحث	
113	المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م. ق. س 2007/45)	
116	الملخص باللغة الإنجليزية	

قائمة الجداول

رقم الجدول	العنوان	رقم الصفحة
1	التركيز الملحية لمياه المصادر المائية	29
2	المعطيات الافتراضية لتصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	57
3	نتائج الحسابات النظرية التصميمية للاقط الشمسي المسطح	69
4	نتائج الحسابات النظرية لكميات الطاقة الحرارية	71
5	نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المبخر	72
6	نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المكثف	73
7	نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف	74
8	مقارنة النوعية الجرثومية في المياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع الحد المسموح به وفق (م. ق س 2007/45)	99
9	نتائج التحليل الإحصائي لتقييم النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع النموذج التجريبي	101
10	تأثير العوامل المدروسة على إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	102
11	تكاليف المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	103

قائمة الأشكال والرسوم البيانية

رقم الشكل	العنوان	رقم الصفحة
1	توزيع مشاريع تحلية المياه في الوطن العربي 2020-2023	27
2	المقطر الشمسي التقليدي والمقطر الشمسي الفعال	28
3	تصنيف طرائق تحلية المياه المالحة	30
4	رسم تخطيطي لمقطر عمودي انتشاري متعدد التأثير	33
5	مسقط رأسي للنموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	47
6	التوازن الحراري داخل اللاقط الشمسي المسطح	48
7	التوازن الحراري داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	51
8	خوارزمية تصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	58
9	درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة ودرجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمان التقطير	78
10	متوسطات درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة ودرجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح	78
11	درجات الحرارة عند مدخل ومخرج اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمان التقطير	79
12	درجات الحرارة مدخل ومخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمان التقطير	80
13	درجة حرارة الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح ودرجة حرارة السطح الماص للاقط الشمسي المسطح والإشعاع الشمسي كتابع لزمان التقطير	81
14	كمية الطاقة الواصلة للسطح للماص وكمية الطاقة المعطاة للهواء وكمية الطاقة الضائعة كتابع لزمان التقطير	82
15	متوسط كمية الطاقة الواصلة للسطح للماص وكمية الطاقة المعطاة للهواء وكمية الطاقة الضائعة خلال التجارب	82
16	كفاءة اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمان التقطير	83
17	متوسط كفاءة اللاقط الشمسي المسطح مقارنة مع متوسط إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	84

85	درجة حرارة التبخر ودرجة حرارة التكاثف كتابع لزمن التقطير	18
85	متوسط درجة حرارة التبخر ومتوسط درجة حرارة التكاثف خلال التجارب	19
86	متوسط كمية المياه المقطرة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المقيسة خلال التجارب	20
87	نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير خلال التجارب	21
88	متوسط درجة حرارة المياه المقطرة خلال التجارب	22
89	درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير	23
90	سرعة الرياح المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير	24
91	الرطوبة الجوية المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير	25
92	الإشعاع الشمسي ومنحني إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير	26
93	متوسط الرقم الهيدروجيني PH للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به ضمن (م. ق. س 2007/45)	27
94	متوسط الناقلية الكهربائية EC للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به ضمن (م. ق. س 2007/45)	28
95	متوسط مجموع المواد الصلبة المنحلة TDS في المياه قبل وبعد التقطير حسب مصدر المياه المستخدم في التجربة	29
95	نسبة تحلية المياه المالحة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	30
96	متوسط تركيز Ca للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	31

96	متوسط TH للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به ضمن (م. ق. س 2007/45)	32
97	متوسط تركيز K للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	33
98	متوسط تركيز Na للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به ضمن (م. ق. س 2007/45)	34
98	متوسط تركيز Cl للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به ضمن (م. ق. س 2007/45)	35
101	مقارنة كمية المياه المقطرة المقيسة مع كمية المياه المحسوبة كتابع لزمن التقطير	36

قائمة الصور

رقم الصفحة	العنوان	رقم الصورة
59	مقياس درجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح	1
59	ثيرموكبل لقياس درجة حرارة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	2
60	مقياس درجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	3
60	مقياس درجة الحرارة الزئبقي	4
61	مقياس درجة حرارة المياه	5
61	مقياس درجة حرارة الوسط المحيط والرطوبة الجوية	6
62	مقياس سرعة الرياح	7
62	أسطوانة قياس حجم المياه	8
64	مقياس الناقلية الكهربائية للمياه	9
64	مقياس الرفراكتومتر	10
70	مراحل تنفيذ اللاقط الشمسي المسطح	11
70	اللاقط الشمسي المسطح المستخدم في التجربة	12
72	انبوب توزيع المياه المالحة	13
72	صفحة المبخر	14
73	مراحل تنفيذ صفحة المكثف	15
74	صفحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف	16
75	مراحل تنفيذ خزانات المياه	17
76	مراحل تنفيذ الهيكل الخشبي	18
76	النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع اللاقط الشمسي المسطح	19

قائمة المعادلات

رقم الصفحة	العنوان	رقم المعادلة
48	زاوية الورود اليومية للإشعاع الشمسي	1
48	زاوية الانحراف	2
49	توازن الطاقة في اللاقط الشمسي	3
49	مركبات الطاقة الضائعة Q_{cond} ، Q_{conv} و Q_r	4-5
49	الطاقة المفيدة	6
50	الضياع الحراري بالحمل والإشعاع	7
50	الطاقة الحرارية المفيدة للاقط الشمسي	8
50	الطاقة الحرارية المفيدة من أجل واحدة المساحة للاقط الشمسي	9
50	عامل انتزاع الحرارة F_R	10
50	كفاءة اللاقط الشمسي المسطح	11
51	كمية الطاقة الحرارية اللازمة للتبخير	12
52	كمية الطاقة الحرارية اللازمة للتكاثف	13
52	معدل انتقال الحرارة بالتوصيل بين صفيحة المبخر وصفيحة المكثف	14
52	معدل انتقال الحرارة بالتبخير من السطح الأمامي لصفيحة المبخر	15
53	الحرارة الكامنة للتبخير	16
53	معدل الكتلة المنتشرة على السطح	17
53	الضغط الكلي داخل المقطر	18
53	ضغط بخار الماء عند درجة الحرارة T_1	19
53	ضغط بخار الماء عند درجة الحرارة T_2	20
53	انتشارية بخار الماء في الهواء	21
53	معدل انتقال الحرارة بالتكثيف على سطح صفيحة المكثف	22
54	معدل انتقال الحرارة بالإشعاع بين صفيحة المبخر وصفيحة المكثف	23
54	مساحة صفيحة المبخر والمكثف	24
54	معامل انتقال الحرارة الكلي	25

54	رقم رينولدز	26
54	رقم براندل	27
55	رقم نوسلت	28
55	معامل انتقال الحرارة بالحمل	29
55	نسبة الأداء الحراري للمقطر	30
55	التوازن الحراري لصفحة المبخر	31
55	التوازن الحراري لصفحة المكثف	32
56	السعة الحرارية	33
63	كمية الأملاح الذائبة	34
63	كمية الأملاح الذائبة في حال نسبة ملوحة عالية	35
64	نسبة التخفيض في الأملاح	36
65	قياس الكالسيوم	38-37
65	قياس القساوة	39
65	قياس البوتاسيوم	40
65	قياس الصوديوم	41
66	معامل ارتباط بيرسون	42
66	جذر متوسط مربع الخطأ	43
66	جذر متوسط مربع الخطأ المعايير	44
66	معامل كفاءة النموذج ناش ساتكليف	45
66	مؤشر يلموت	46
67	عامل التقسيط	47
68	تكلفة الطاقة الكهربائية	48
68	تكلفة إنتاج الليتر	49

قائمة الرموز:

الرمز	المعنى	الوحدة
MSF	التبخير الومضي متعدد المراحل	
MED	التقطير متعدد التأثير	
VC	التقطير بطريقة البخار المضغوط	
RO	التناضح العكسي	
ED	الدليزة الكهربائية	
NTU	وحدة قياس العكارة بمادة النيفلو	
ϕ	زاوية خط العرض	درجة
ω	زاوية ارتفاع الشمس	درجة
δ	زاوية الانحراف	درجة
I	معدل الإشعاع الشمسي الساقط	W/m^2
A_c	مساحة اللاقط الشمسي	m^2
Q_{cond}	معدل الضياع الحراري بالتوصيل	W
Q_{conv}	معدل الضياع الحراري بالحمل	W
Q_r	معدل الضياع الحراري بالإشعاع	W
Q_p	معدل الضياع الحراري بالانعكاس	W
τ	معامل النفوذية للزجاج العلوي	
ρ	معامل الانعكاس للسطح الماص	
α	معامل الامتصاص للسطح الماص	
U_L	معامل انتقال الحرارة الكلي	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
T_c	درجة الحرارة في اللاقط الشمسي	$^\circ C$
T_a	درجة حرارة الهواء الخارجي	$^\circ C$
F_R	عامل انتزاع الحرارة	
η_c	كفاءة اللاقط الشمسي	%
$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي	kg/s

J/kg. °C	السعة الحرارية للمائع	C_p
°C	فرق درجات الحرارة	ΔT
W/m.°C	معامل التوصيل الحراري	K
m	البعد بين صفيحتي المبخر والمكثف	ΔY
kJ/kg	الحرارة الكامنة لتبخير الماء	L
kg/m ² .s	معدل الكتلة المنتشرة على السطح	D
MN/m ²	الضغط الكلي داخل المقطر	P_T
MN/m ²	ضغط بخار الماء عند درجة الحرارة T_1	P_W
MN/m ²	ضغط بخار الماء عند درجة الحرارة T_2	P_{W+1}
g/mol	الوزن الجزيئي للماء	M_w
J/K	ثابت الغازات العام	R
m ² /s	انتشارية بخار الماء في الهواء	ζ
W/m ² .K ⁴	ثابت ستيفان وبولتزمان	σ
	اشعاعية سطح الصفيحة	ε
m	السماكة	λ
W/m ² .°C	معامل انتقال الحرارة الخارجي	h_{out}
W/m ² .°C	معامل انتقال الحرارة الداخلي	h_{in}
	عدد براندل	Pr
	عدد رينولدز	Re
	عدد نوسلت	Nu
kg/m ³	الكثافة	ρ
m/s	سرعة التدفق	v
N.s/m ²	اللزوجة	μ
m/s	سرعة الرياح	V
	المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (2007 /45)	(م.ق. س 2007/45)
	الرقم الهيدروجيني	PH
μS/Cm	الناقلية الكهربائية	EC

ppm	مجموع المواد الصلبة المنحلة	TDS
ppm	القساوة	TH
	معامل ارتباط بيرسون	R
	جذر متوسط مربع الخطأ	$RMSE$
	جذر متوسط مربع الخطأ المعياري	$NRMSE$
	معامل كفاءة النموذج ناش ساتكليف	EF
	مؤشر يلموت	D
	القيم المقيسة	O_i
	القيم النظرية	P_i
	متوسط القيم النظرية	$\bar{P}$
	متوسط القيم المقيسة	$\bar{O}$
	عدد القيم	N
S,P	معدل الفائدة السنوية	I
سنة	عمر المنشأة	N
S,P	تعرفة الطاقة الكهربائية	C
kWh	كمية الطاقة المستخدمة	W
S.P	التكاليف الثابتة السنوية	D_c
L/year	استطاعة المقطر السنوية	M

الملخص:

نُفذ البحث في قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية-جامعة دمشق خلال العامين 2020-2021 بهدف تصميم وتقييم فعالية مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير مزود بلاقط شمسي مسطح تبلغ إنتاجيته التصميمية 5 [L/day] ودراسة تأثير بعض العوامل في فعالية المقطر (درجة حرارة الوسط المحيط، والإشعاع الشمسي، وسرعة الرياح، والرطوبة الجوية، ودرجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح، ودرجة حرارة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير). زُوِدَ المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بمبادل حراري إضافي ضمن خزان المكثف مزود بزعانف خارجية وذلك لدراسة تأثيره في درجة حرارة التكاثف. قُورنت كمية المياه المقطرة المقيسة مع القيم النظرية المحسوبة في فترات مختلفة من العامين 2020-2021، كما قُورنت بعض المواصفات الكيميائية والجرثومية للمياه (الرقم الهيدروجيني PH، والناقلية الكهربائية EC، ومجموع المواد الصلبة المنحلة TDS، وتركيز بعض العناصر مثل الكالسيوم Ca والصوديوم Na، والتعداد العام للجراثيم) قبل وبعد التحلية مع الحد المسموح به وفق المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م. ق. س 2007/45) وذلك لتحديد صلاحية المياه للاستهلاك. أظهرت نتائج الدراسة النظرية أنّ حجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير اللازم لتأمين كمية مياه 5 [L/day] هو $0.25 \text{ [m}^3\text{]}$ ومساحة اللاقط الشمسي المسطح هي $0.64 \text{ [m}^2\text{]}$ ، حيث سُجِلَت أعلى قيمة لكمية المياه المقطرة خلال شهر تموز بمتوسط 4.8 [L/day] وهذا يعادل 96% من القيمة التصميمية، وبلغ متوسط إنتاجيته خلال شهري حزيران وآب قيمة 4.2 [L/day] وهذا يعادل 84% من القيمة التصميمية، حيث راح متوسط أعلى كفاءة للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بين 81.6% و93.8% خلال أشهر حزيران وتموز وآب. بلغ معامل ارتباط بيرسون (r) بين كمية المياه المقطرة المحسوبة بواسطة النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وكمية المياه المقطرة المقيسة تجريبياً 0.99 أما معامل كفاءة النموذج ناش ساتكليف (EF) فبلغ 0.95، وهذا يدل على تقارب كبير بين كمية المياه المحسوبة نظرياً وكمية المياه المقيسة تجريبياً، حيث يشير ذلك إلى أنّ محاكاة النموذج النظري التصميمي مع النموذج التجريبي عالية الدقة، لذلك يُعد

حجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المُصمم لهذا البحث وسيلة مناسبة للحصول على كمية المياه المراد الحصول عليها.

بينت نتائج الدراسة أنّ مساحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف بلغت $0.04 \text{ [m}^2\text{]}$ ، حيث ساهم المبادل الحراري الإضافي في الحفاظ على درجة حرارة التكاثف ضمن خزان المكثف بمتوسط $30 \text{ [C}^\circ\text{]}$ وهي تماثل القيمة التصميمية النظرية، وبالتالي يُعد المبادل الحراري الإضافي للمكثف وسيلة مناسبة في تحسين أداء المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير. بلغ متوسط الرقم الهيدروجيني (PH) لعينات المياه بعد التحلية 6.93، كما بلغ متوسط الناقلية الكهربائية (EC) للمياه بعد التحلية $196.6 \text{ [}\mu\text{S/Cm]}$ ، وراوحت مجموع المواد الصلبة المنحلة (TDS) في عينات المياه بعد التحلية بين 91.4% و 94.3، وقد بلغ متوسط الكالسيوم (Ca) في المياه بعد التحلية 11.3 [ppm] وبلغت قيمة متوسط القساوة (TH) للمياه بعد التحلية 120 [ppm] أما متوسط الصوديوم (Na) في المياه بعد التحلية بلغ 6.2 [ppm] . بينت النتائج أنّ مواصفات المياه بعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كانت حسب الحدود المسموح بها في المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م. ق. س 2007/45)، وبالتالي فإن المياه صالحة للاستخدام من حيث الصفات المدروسة.

بلغ معامل الارتباط بين إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وشدة الإشعاع الشمسي 0.91 وهذا يدل على ارتباط قوي فزيادة الإنتاجية ترتبط بزيادة الإشعاع الشمسي، لذلك فإنّ اللاقط الشمسي المسطح الذي أُستخدم في البحث كان وسيلة جيدة لتأمين الطاقة الحرارية اللازمة لحدوث التقطير.

الكلمات المفتاحية: مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير، لاقط شمسي مسطح، مبادل حراري إضافي، الإشعاع الشمسي، مواصفة قياسية لمياه الشرب.

التعريفات والمصطلحات المستخدمة:

- **الملوحة:** هي الكمية الإجمالية للمواد الصلبة مقدرة بـ [g] الموجودة في [liter] 1 من الماء أو في [kg] 1 بمعنى (جزء بالألف).
- **عملية التحلية:** هي طريقة لتحويل المياه المالحة إلى مياه خالية من الأملاح وصالحة للاستخدام عن طريق فصل الأملاح الذائبة (هائل، 2018).
- **تحلية المياه بالتقطير:** هي رفع درجة حرارة المياه المالحة إلى درجة حرارة الغليان وتكوين بخار الماء الذي يتم تكثيفه بعد ذلك إلى ماء ومن ثم معالجته ليكون ماءً صالحاً للشرب أو الري.
- **المقطرات الانتشارية:** هي المقطرات التي تقل فيها المسافة بين الغطاء وسطح الماء المالح حتى تتلاشى الحرارة المنقولة بالحمل الحراري الحر ويتم التبخير بالانتشار بين الجريئات (فارس، 2021).
- **الانتشار:** هو انتقال مكون كيميائي موجود ضمن مزيج من المركبات الكيميائية نتيجة تدرج التركيز الجزيئي لهذا المكون من أماكن التركيز المرتفع لأماكن التركيز المنخفض فإذا وجد خليط غير منظم التركيز من غازين فإنه يحدث انتشار حتى تتوازن الكتلة (حبيب، 2016).
- **المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:** عبارة عن جهاز يعتمد مبدأ تقطير المياه المالحة بالطاقة الشمسية كمصدر حرارة خارجي لتسخين المياه والتأثير الواحد يمثل بصفيحتين إحداها صفيحة المبخر والأخرى صفيحة المكثف.

1. الفصل الأول: الإطار العام للبحث

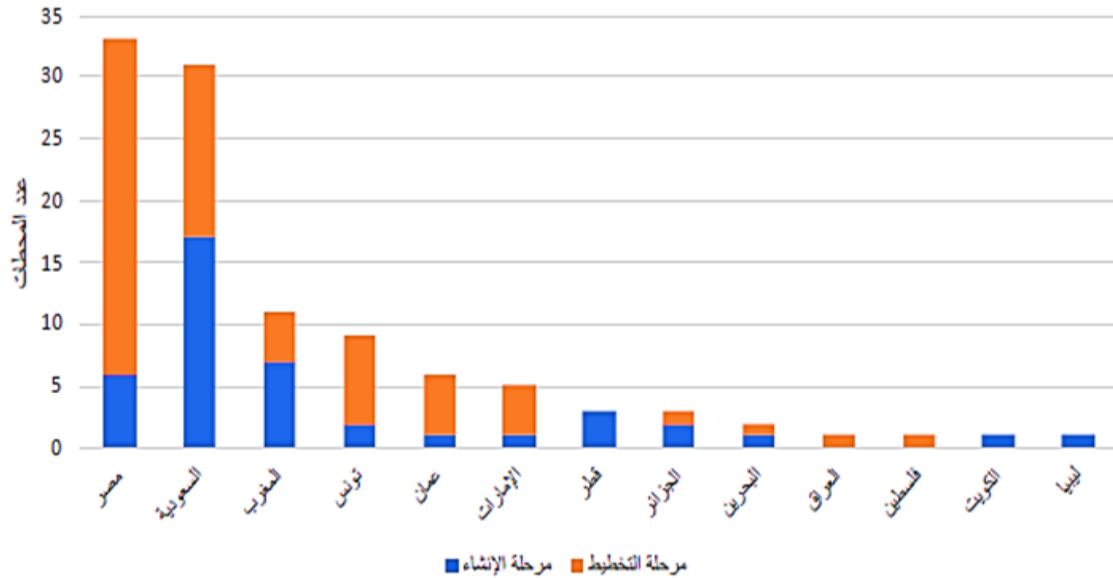
1.1 المقدمة:

يغطي الماء 75% من سطح الأرض وتشكل كافة موارد المياه العذبة في العالم المتوفرة في البحيرات والجداول والأنهار أقل من 1% من إجمالي مخزون الأرض من الماء (جبور، 2001)، حيث يواجه العالم نقصاً متزايداً في كمية المياه المتاحة الضرورية لتلبية حاجات الأفراد المختلفة نتيجة التزايد السكاني والتطور الزراعي والصناعي والتغيرات المناخية، وحسب التصنيفات العالمية يتصف وضع الموارد المائية بالهرج إذا قلّ نصيب الفرد عن $1000 \text{ m}^3/\text{year}$ ويصبح الوضع متأزماً إذا قلّ نصيب الفرد عن $500 \text{ m}^3/\text{year}$ (الدباغ وفرج، 1997)، وقد أشار (البنك الدولي، 2020) إلى أنّ نصيب الفرد من المياه العذبة خلال الفترة الممتدة بين 1961 و2020 م، حيث انخفض من 13632 m^3 إلى 5500 m^3 سنوياً، أما في الوطن العربي فقد انخفض نصيب الفرد من المياه العذبة من 1238 m^3 إلى 251 m^3 سنوياً، وفي سورية انخفض نصيب الفرد من المياه العذبة خلال هذه الفترة من 1501 m^3 إلى 343 m^3 سنوياً. أشارت (الفاو، 2021) أنّ أكثر من 733 مليون شخص في العالم يعاني من إجهاد مائي مرتفع وهو ما يمثل نحو 10% من سكان العالم، كما ارتفع عدد الأشخاص الذين يعيشون في مناطق تعاني من ندرة المياه بين عامي 2018 و2020 بشكل حاد من 6 إلى 7% من سكان العالم. من جهة أخرى تعاني السواحل العربية من ظاهرة تداخل مياه البحر مع المياه الجوفية التي تُعد من أهم المشاكل التي تواجه الخزانات الجوفية الواقعة في الشريط الساحلي حيث تعرّف هذه الظاهرة على أنّها دخول مياه البحار والمحيطات إلى طبقات المياه الجوفية العذبة، التي يمكن أن تؤدي إلى تلوث مصادر المياه الجوفية، ويزداد التسرب عند حدوث خلل في الاتزان المائي بسبب هبوط مستوى المياه الجوفية كنتيجة للاستهلاك المفرط لهذا المصدر مما يؤدي إلى تأثر مخزون المياه الجوفية بالمنطقة كما ونوعاً (المنفود، 2023). برزت مشكلة تلوث المياه بالملوثات الفيزيائية أو الكيميائية أو الجرثومية حيث أشارت (منظمة الصحة العالمية، 2023) أنّ ما لا يقل عن 1,7 مليار شخص في العالم يستخدم مياه الشرب من مصادر ملوثة بالبراز، وذلك يؤدي لانتقال الأمراض مثل الإسهال والكوليرا والزحار والتيفوئيد وشلل الأطفال، وتسبب موت ما يُقدّر بنحو 5050000 شخص ناجمة عن الإسهال كل عام.

تُعد سورية بلداً محدود الموارد المائية وتقع معظم أراضيها ضمن المناطق الجافة وشبه الجافة التي تعاني من انخفاض معدلات الهطول المطري وقلة تسرب المياه للتربة وتغذية المياه الجوفية والضح المتزايد الذي يؤدي لانخفاض منسوب المياه الجوفية وازدياد ملوحتها (جبور، 2001). قُدر معدل الوصول إلى مياه الشرب الآمنة في سورية قبل الأزمة بنسبة 92% في المجتمعات الريفية و98% في المراكز الحضرية من خلال سبعة أنظمة مياه رئيسية تخدم أكبر ثماني مدن في القطر وتمثل 80% من إجمالي إمدادات المياه فيه، إلا أن كافة مرافق المياه الأساسية تعرضت لأضرار شديدة بين عامي 2011 و2021، مما أدى لانخفاض الإنتاج السنوي العام للمياه بحلول عام 2019 بنسبة 40% مقارنة بمستويات ما قبل الأزمة من 1700 مليون $[m^3]$ في عام 2010 إلى 1020 مليون $[m^3]$ في عام 2019، كما انخفضت حصص المياه اليومية للفرد بنسبة 36% في المناطق الحضرية وبنسبة 25% في المناطق الريفية حيث تبلغ حصة الفرد في اليوم 30 ليتراً وهي كمية منخفضة (اليونيسف، 2022).

تحتاج البلدان العربية إلى استثمارات هائلة للقيام بمد أنابيب نقل المياه وبناء الخزانات ومحطات الضخ وذلك لمواجهة مشكلة انخفاض منسوب المياه الجوفية والتوسع في استغلال المياه السطحية وتدهور نوعيتها (الدباغ وفرج، 1997)، لذلك كان لابد من البحث في تنمية الموارد المائية كاستخدام تحلية المياه المالحة المتوفرة في العالم بنسبة كبيرة وذلك بهدف الحصول على مياه صالحة للاستخدام، ولكن مازالت هذه التقنية محدودة بسبب ارتفاع تكاليفها المتعلقة بشكل كبير بأسعار الطاقة (رشيدة، 2010)، وقد تضاعفت الجهود العالمية منذ عام 2003 لتحلية مياه البحر وازدادت الطاقة الإنتاجية للمياه المحلاة في منطقة البحر الأبيض المتوسط من 4 ملايين $[m^3/day]$ إلى 12 مليون $[m^3/day]$ في عام 2013 (برنامج الأمم المتحدة، 2017)، وتتركز محطات التحلية بشكل كبير بالمنطقة العربية حيث تمثل إنتاجيتها 60% من الطاقة الإنتاجية العالمية، وتُعد السعودية من أبرز المنتجين للمياه المحلاة حيث يصل عدد منظومات التحلية فيها إلى 30 وتشمل 139 محطة بسعة إنتاجية تبلغ 7.5 مليون $[m^3/day]$ وطاقة إنتاجية تبلغ 2.3 مليار $[m^3/year]$ ، تليها الإمارات العربية المتحدة حيث تصل عدد محطات التحلية فيها إلى 70 بطاقة إنتاجية تبلغ 1.7 مليار $[m^3/year]$ ، ومن المتوقع أن تنمو مشاريع تحلية المياه في المنطقة العربية

بمعدل 7-9% سنوياً، ويوجد في المنطقة العربية حالياً 107 مشروعاً لتحلية المياه قيد التشغيل أو المخطط لها بين عامي 2020 و 2030 (الفاو، 2022)، كما هو موضح في الشكل (1).

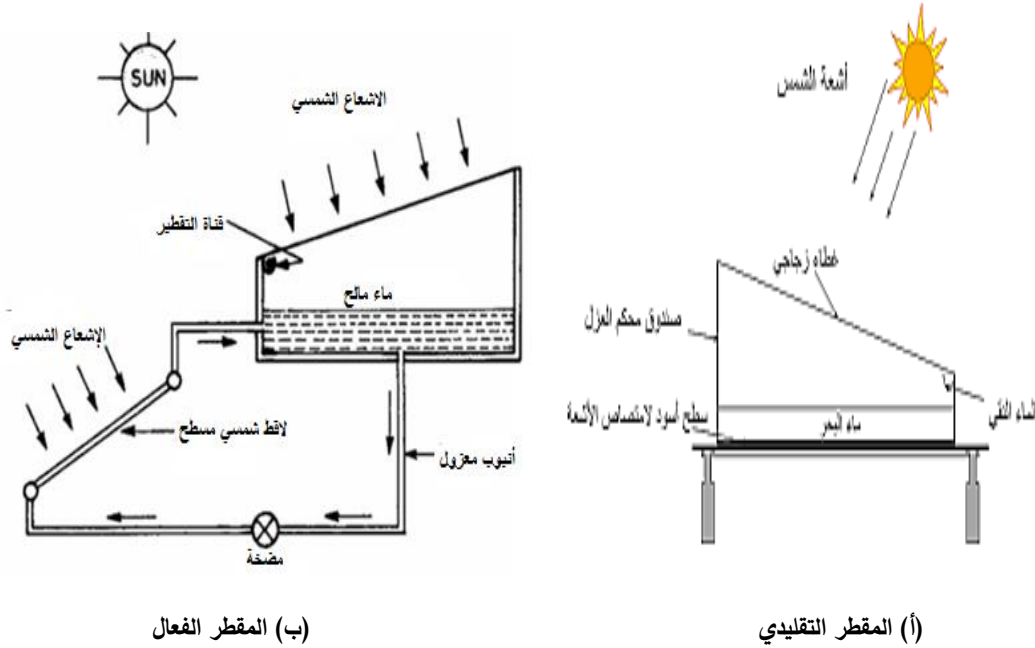


الشكل (1) توزيع مشاريع تحلية المياه في الوطن العربي 2020-2030 م

(المصدر: الفاو، 2022)

أصبحت المصادر التقليدية كالبتترول والغاز محدودة في الوقت الحالي لذلك كان لابد من تطبيق أنظمة الطاقات المتجددة الصديقة للبيئة ومنها الطاقة الشمسية، وتُعد سورية غنية بالطاقة الشمسية ويمكن الاعتماد عليها كمصدر للطاقة لتحلية المياه المالحة والحصول على مياه صالحة للاستخدام بأقل كلفة ممكنة حيث تراوح ساعات الجو المشمس سنوياً بين 2820-3270 ساعة (حبيب، 2016).

تُصنف المقطّرات الشمسية بشكلٍ عام إلى مقطّرات شمسية تقليدية (passive solar still) كما هو مبين في الشكل (2-أ) ومقطّرات شمسية فعّالة (active solar still) يضاف لها عادة عناصر خارجية مثل اللاقطات الشمسية أو المركّزات الشمسية كما هو مبين في الشكل (2-ب).



الشكل (2) المقطر الشمسي التقليدي والفعال

المرجع: (فارس، 2021)

2.1 نسبة الأملاح في المياه:

تُعد أهم الأملاح الذائبة في المياه كلور الصوديوم وثاني كربونات الكالسيوم والمغنيزيوم، سلفات الكالسيوم والمغنيزيوم إضافة لعدد من العناصر الموجودة بكميات قليلة، حيث يختلف تركيب المياه المالحة الجوفية عن تركيب المياه السطحية ومياه البحر، وتُعد المياه السطحية ذات ملوحة منخفضة مقارنة بمياه البحر، وتتمثل بأملاح الكالسيوم والمغنيزيوم التي تسبب قساوة المياه، لذلك تُعد إزالة قساوتها أبسط من إزالة قساوة مياه البحر التي تتطلب مجهوداً أكبر لإزالة جميع أنواع الأملاح وما يترتب عنها من ترسبات داخل أجهزة التقطير.

يوضح الجدول (1) التراكيز الملحية للمصادر المائية، حيث يُوضع بالحسبان عند تصميم وحدات التقطير تركيز الأملاح في المياه وما قد تسببه من ترسبات تؤدي لخفض الناقلية الحرارية للأنايب ونقص مقطعها الداخلي أو انسداد في الأغشية مما يقلل المردود (العظمة والعجة. 2003).

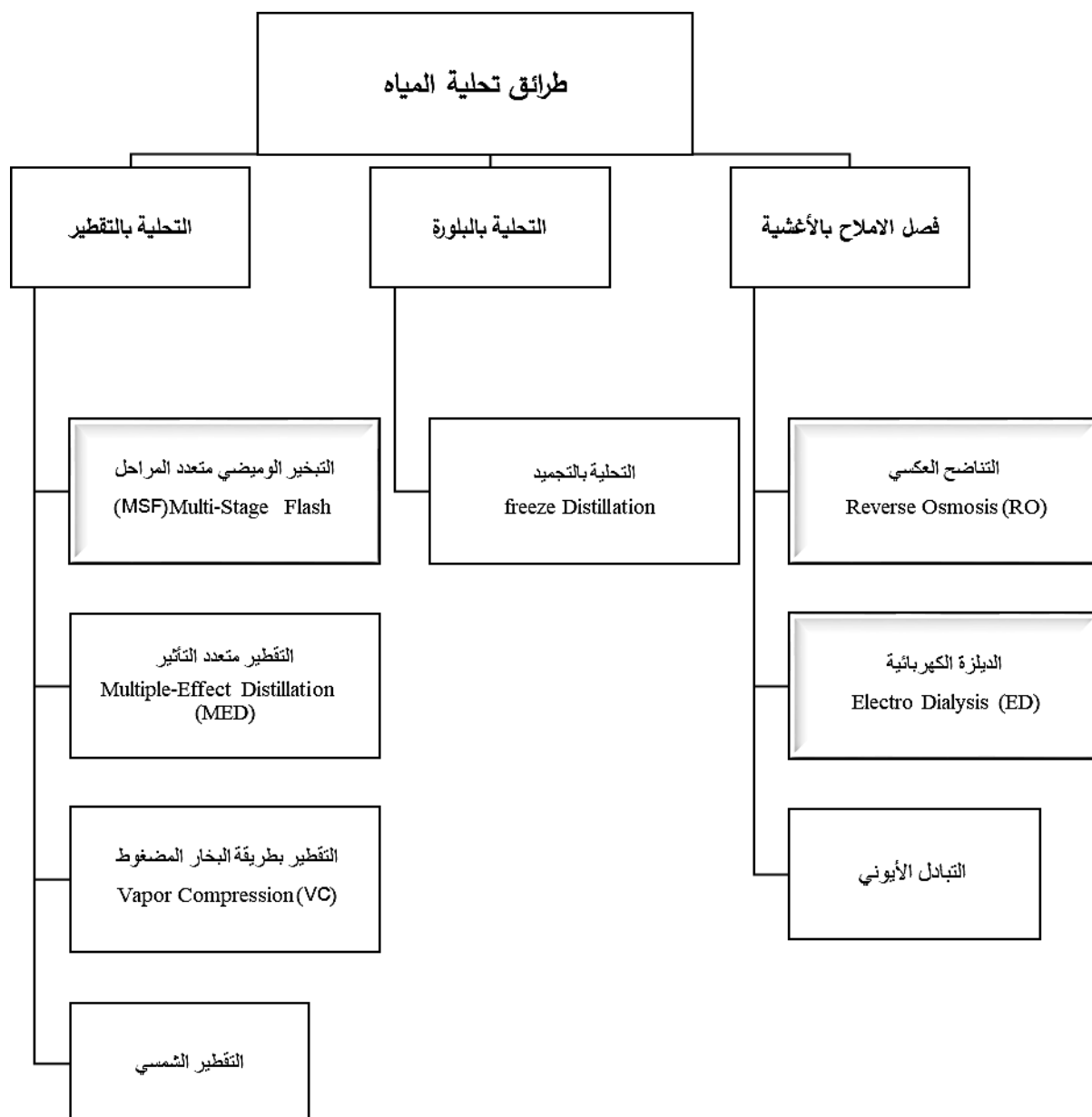
الجدول (1) التراكيز الملحية لمياه المصادر المائية

التراكيز الملحية للعناصر [ppm]						المصدر المائي
Na ⁺	Mg ⁺²	Ca ²⁺	CL ⁻	So ₄ ²⁻	Hco ₃ ⁻	
446	24	95	700	219	103	مياه جوفية
7	8	32	3	6	132	أنهار
7	7	31	9	13	114	بحيرات
10561	1272	400	18980	2649	142	البحر

(المصدر: العظمة والعجة، 2003)

3.1 طرائق تحلية المياه المالحة:

تُصنف طرائق تحلية المياه المالحة وفقاً لمبدأ التحلية إلى ثلاث فئات رئيسية وهي التحلية بالتقطير والترشيح والتبلور، وتُعد طريقة تحلية المياه المالحة بالتقطير من أقدم عمليات التحلية التي تم استخدامها لإنتاج المياه المحلاة، وتُستخدم طريقة التحلية بالتقطير الطاقة الحرارية أو الميكانيكية وتشمل هذه الطريقة التقطير متعدد التأثيرات (MED) والتقطير الومضي متعدد المراحل (MSF) وطريقة التقطير البخار المضغوط (VC). يتم حالياً دراسة بدائل أخرى للتحلية بالتقطير كالتقطير الشمسي والتقطير بالترطيب وإزالة الرطوبة، أما بالنسبة للتقطير بالترشيح فيُعد التناضح العكسي (RO) أكثر تقنيات التحلية بالترشيح استخداماً، ويتم استخدام الفرز الكهربائي بالأغشية، والديزة (ED) والتبادل الأيوني أيضاً لإنتاج الماء، ولكن لتحلية المياه منخفضة الملوحة، أما التحلية بالتبلور فهي مبدأ التحلية بالتجميد، ويوضح الشكل (3) تصنيف طرائق تحلية المياه المالحة (Curto et al., 2021).



الشكل (3) تصنيف طرائق تحلية المياه المالحة

(المصدر: المعالج وبوقشة، 2003)

4.1 التقطير بالطاقة الشمسية

تُعد عملية تقطير المياه بالطاقة الشمسية من أقدم الطرائق التي استعملت للحصول على المياه العذبة، وتصنف الطرائق المستخدمة في عملية تقطير المياه بالطاقة الشمسية وفقاً لطريقة استخدامها للطاقة الشمسية كما يلي:

1. تحلية مباشرة:

يتم استخدام أشعة الشمس مباشرة لرفع درجة حرارة الماء ومن ثم تبخيره وتكثيفه كما في المقطرات الصندوقية والمقطر الانتشاري.

2. تحلية غير مباشرة:

يتم استخدام مصادر طاقة حرارية أو ميكانيكية أو كهربائية في هذه الطرائق، ولكن من حيث المبدأ يتم استخدام الطاقة الشمسية للحصول على المصدر الحراري أو الميكانيكي أو الكهربائي اللازم لعمل هذه الطرائق (الكبة وفاضل، 1987؛ حبيب، 2016).

5.1 أنواع المقطرات الشمسية:

يوجد تصاميم مختلفة للمقطرات الشمسية ويمكن تصنيف هذه المقطرات وفق عدة معايير:

أولاً: تصنيف المقطرات الشمسية من حيث التأثير:

1. مقطر أحادي التأثير.

2. مقطر ثنائي التأثير.

3. مقطر متعدد التأثير.

تمتاز هذه المقطرات بإنتاجية عالية مقارنة مع الأنواع البسيطة لنفس وحدة الطاقة الساقطة عملياً ويرجع السبب في ذلك إلى استغلال الطاقة الكامنة المتولدة من تكثيف البخار التي تُفقد في المحيط الخارجي في المقطرات البسيطة، حيث تمرر الأبخرة في مبادل حراري لتسخين المياه المالحة الداخلة إلى المقطر من الحرارة المنطلقة من تكثيف هذه الأبخرة وهذه المقطرات ذات تصميم معقد ومرتبعة الكلفة وتحتاج إلى مهارة في التشغيل والصيانة (حبيب، 2016).

ثانياً: تصنيف المقطرات الشمسية من حيث الشكل وآلية العمل:

1. المقطر الصندوقي، وله أشكال مختلفة (فارس، 2021):

➤ المقطر الشمسي الصندوقي ذو الغطاء الشفاف أحادي الميل.

➤ المقطر الشمسي الصندوقي ذو الغطاء الشفاف ثنائي الميل.

➤ المقطر الصندوقي المدرج.

➤ المقطر الصندوقي التعاقبي.

➤ مقطر فتيل التجميع والتبخير.

2. المقطر العمودي.

3. المقطر الانتشاري، وله أشكال مختلفة (Seleem, 2016):

➤ المقطر الانتشاري الصفائحي العمودي.

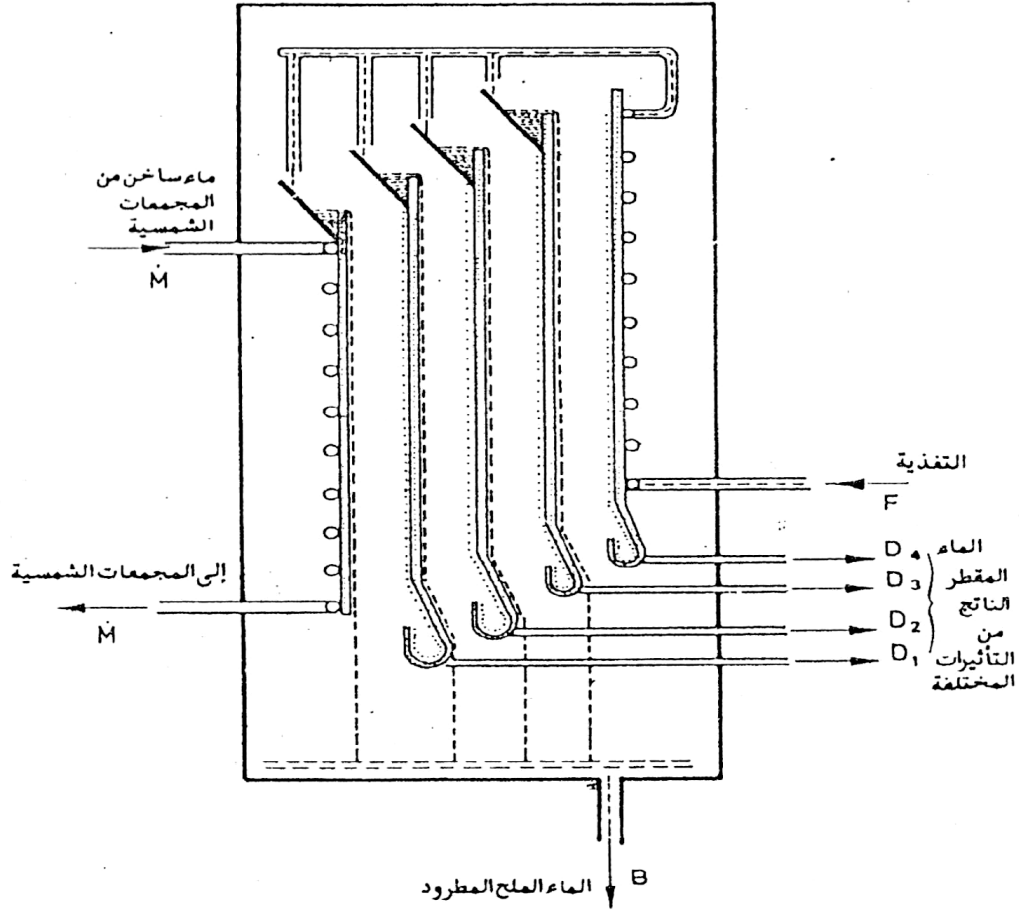
➤ المقطر الانتشاري الصفائحي المائل.

➤ المقطر الانتشاري الأنبوبي.

6.1 مبدأ عمل المقطر العمودي الانتشاري متعدد التأثيرات:

يبين الشكل (4) مقطراً عمودياً ذا أربعة تأثيرات يتكون من خمس صفائح معدنية جيدة التوصيل، تُسخن الصفيحة الأولى التي تُسمى صفيحة المبخر بماء ساخن من لاقط شمسي أو أي مصدر آخر للحرارة، وتبرد الصفيحة التالية التي تُسمى صفيحة المكثف بماء التغذية المالح الذي يجري على شكل طبقة رقيقة جداً على سطح الصفيحة. يتم تسخين التأثير الأول من خلال التغذية الجارية على السطح الخلفي للصفيحة الأولى، الأمر الذي يساعد على تبخير جزء من التغذية مقداره D_1 عند درجة الحرارة المتوسطة T_1 ، ويتجه البخار الناتج بالانتشار إلى السطح الأمامي للصفيحة الثانية حيث يتكاثف بملامسة سطح الصفيحة عند درجة حرارة متوسطة T_2 أقل من درجة الحرارة T_1 ، وتُعرف هذه العملية من إنتاج البخار على الصفيحة الأولى وتكثيفه على الصفيحة الثانية بالتأثير الأول للمقطر الانتشاري. أما في التأثير الثاني فتُستخدم الحرارة المفقودة من البخار عند تكاثفه على السطح الأمامي للصفيحة الثانية لتسخين مياه التغذية الجارية على السطح الخلفي للصفيحة الثانية، فينتج بخار بمعدل D_2 ، وينتقل البخار الناتج إلى الصفيحة الثالثة بالانتشار حيث يتكاثف عند ملامسة السطح الأمامي للصفيحة عند درجة حرارة متوسطة T_3 أقل من T_2 ، وتعرف عملية التبخير والتكثيف بين الصفيحة الثانية والثالثة بالتأثير الثاني، وتتكرر هذه

العملية في باقي التأثيرات حتى التأثير الأخير. ويُجمَع ناتج التكثيف في التأثيرات المختلفة D خارج المقطر (Seleem, 2016)، (فارس، 2021).



الشكل (4) رسم تخطيطي لمقطر عمودي انتشاري متعدد التأثير

(المصدر: فارس، 2021)

7.1 اختيار التقنية المناسبة لتحلية المياه المالحة:

يعتمد اختيار التقنية المناسبة لتحلية المياه على عدة عوامل هي:

1. طبيعة المياه الخام: إنّ نسبة ملوحة المياه تشكل عاملاً أساسياً في اختيار طريقة التحلية المناسبة فكلما ارتفعت نسبة الأملاح كلما صعب التحكم في تحليتها، وقد أثبت نظام الأغشية جدارته في تحلية المياه شبه المالحة بينما نظام تقطير المياه هو الأنسب لتحلية مياه البحر.

2. كميات المياه المطلوب تحليتها: يتطلب إنتاج كميات كبيرة من المياه المحلاة توفير الطاقة اللازمة بأقل التكاليف، لذلك فإنّ النظام المزدوج لإنتاج المياه والكهرباء يُعد وسيلة مناسبة للاستفادة من الطاقة الحرارية التي تنتجها محطات الكهرباء في تحلية مياه البحر.
3. توافر الخبرات المناسبة: يواجه تشغيل محطات تحلية المياه صعوبات عديدة لقلة الخبرات الفنية خصوصاً في استخدام التقنيات الحديثة، وتلعب كفاءة التشغيل والصيانة دوراً أساسياً في تخفيض تكاليف إنتاج المياه.
4. توافر قطع الغيار: إن توفير قطع الغيار من مصادر مختلفة يؤدي إلى المنافسة بين المصنعين والاحتكار والتحكم في الأسعار.
5. موقع مصدر المياه المالحة: يحدد الموقع أسلوب التخلص من المحلول الملحي المركز الناتج عن عمليات التحلية إذ يتم التخلص منه بإعادته إلى البحر، ويشكل التخلص منه بعيداً عن البحر مضاعفات سلبية على البيئة خصوصاً في تملح التربة وتسرب المياه المالحة إلى طبقات المياه الجوفية (الدباغ وفرج، 1997).

2 الفصل الثاني:

1.2 الإشكالية البحثية:

يُعد المقطّر الشمسي الصندوقي وسيلة جيدة وبسيطة ومنخفضة الكلفة للحصول على الماء المقطّر من المياه المالحة، ولكنه يعاني من تأخر فترة بدء الإنتاج إلى ساعات عديدة بعد شروق الشمس، وانعدام الإنتاج الليلي (أحمد وعباس، 2008)، كما يعاب عليه قلة إنتاجيته وتأتي هذه الإنتاجية المنخفضة بسبب الاعتماد على التحلية أحادية المرحلة ووجود ضياعات متعددة (عبد الكريم وصندوق، 2014)، كما تزداد احتمالية التآكل الناتجة عن ترسب الأملاح على الأسطح الداخلية لأجهزة التقطير وخاصة التي تعمل عند درجات حرارة عالية حيث يؤدي ذلك للتآكل وانسداد الأنابيب وتكون قشور من كربونات الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنيزيوم ويؤدي ذلك لقلة كفاءة عمليات التبادل الحراري وزيادة استهلاك الطاقة فتقل كفاءة وحدة التحلية (اسلام، 1999)، لذلك بدأت الأبحاث لتطوير المقطّرات الانتشارية المدروسة في البحث.

2.2 تساؤلات البحث:

1. هل ستتوافق الدراسة النظرية للبحث مع الدراسة التصميمية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير؟
2. هل سيكون المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المُصمم في هذا البحث قادر على إنتاج الكمية التصميمية من المياه؟
3. هل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وسيلة مناسبة للحصول على ماء مقطر على مدار العام؟
4. هل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وسيلة مناسبة للحصول على ماء خالي من الشوائب؟
5. هل سيكون اللاقط الشمسي المسطح مصدراً جيداً للحصول على الطاقة الحرارية اللازمة للمقطر؟
6. هل سيكون المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير طريقة اقتصادية للحصول على ماء مقطر؟

3.2 فرضيات البحث:

تمتاز المقطرات الانتشارية بالعمل عند درجات حرارة منخفضة نسبياً أقل من درجة حرارة غليان الماء، كما أنّ بخار الماء المتشكل داخل المقطر الانتشاري يُستفاد منه في عملية التكاثف عند نفس درجة الحرارة المُتكوّن عندها بخار الماء، الأمر الذي يقلّل من تكوين الرواسب وقلة تشكل الأملاح على أسطح المبخرات، ويقلّل من احتمال التآكل بالصدأ ويقلّل أيضاً من معدل فقدان الحرارة إلى الوسط المحيط.

يمكن أن تكون تحلية المياه المالحة أحد الحلول لحل مشكلة انخفاض كميات المياه المتاحة للشرب في المناطق الريفية في سورية والتي تعاني من مشكلة في الحصول على المياه.

4.2 مسلمات البحث:

زاد الوعي لندرة المياه ولمصادر الطاقة التقليدية كالبتروك والحاجة لتطبيق أنظمة الطاقات المتجددة الصديقة للبيئة في ظل أزمة الطاقة الحالية، وأهمية البحث عن تكنولوجيا بسيطة لتأمين مياه عذبة خالية من الملوثات الجرثومية بأسعار مقبولة في البلدان النامية وفي المناطق البعيدة عن شبكات المياه، إضافة لضرورة الاستفادة من توافر الطاقة الشمسية في سورية على مدار العام، مما يسمح بالاستخدام الفعال للتقنيات الشمسية المتوافرة حالياً لذلك فإنّ التوجه لاستخدام الطاقة الشمسية لتحلية المياه المالحة في سورية وخاصة في المناطق النائية يُعدّ حلاً مناسباً.

تحتاج المقطرات الشمسية العمودية الانتشارية إلى مساحة أرضية أقل من المساحة المطلوبة للمقطرات الشمسية الصندوقية، كما تعطي المقطرات الشمسية العمودية الانتشارية إنتاجية أكبر مقارنة مع إنتاجية المقطرات الشمسية الصندوقية التي تستخدم نفس كمية الحرارة، كما تمتاز المقطرات الشمسية العمودية الانتشارية بقلة حاجتها للتيار الكهربائي مقارنة بالنقطير الوميضي لذلك تلاقي إقبالاً أكبر للتطبيق في المناطق النائية والريفية (Morin, 1993).

5.2 أهداف البحث:

1. بناء نموذج رياضي لتصميم مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير.
2. تصميم وبناء مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير.

3. التحقق من كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من حيث الإنتاجية.
4. مقارنة النموذج الرياضي بالنموذج التجريبي المقترح.
5. دراسة الكفاءة الاقتصادية للنموذج التجريبي المقترح.

6.2 أهمية البحث:

أُجري العديد من الدراسات في العالم حول مستقبل الوضع المائي وللبحث عن مصادر مائية جديدة غير المصادر التقليدية لتُساعد في تلبية الطلب المتزايد على المياه حيث كان لابد من الاهتمام بتنمية الموارد المائية كحصاد مياه الأمطار، وتغذية الطبقات المائية الجوفية، ومعالجة مياه الصرف الصحي، وتحلية مياه البحر، ومن ناحية أخرى كان لابد من ترشيد استهلاك المياه بتوعية الناس من جهة وتطبيق نتائج الأبحاث العلمية وحماية المياه من التلوث (المعالج وبوقشة، 2003)، وفي هذا السياق يبدو أنّ الاتجاه نحو تحلية مياه البحر المالحة والمياه الجوفية المالحة أحد الحلول الواعدة لمشكلة نقص المياه وتلبية الحاجات المتزايدة نتيجة التزايد الكبير في أعداد السكان، خاصةً في منطقتنا العربية التي تعاني من صعوبات متزايدة في تأمين المياه اللازمة خاصةً مع توافر كميات كبيرة من المياه المالحة (الياسري، 2022)، كما أن تحلية المياه والحصول على الماء المقطر سيكون حلاً مناسباً لتأمين المياه للشرب وللزراعة وللإستخدامات في المجالات الأخرى مثل الصناعات الغذائية والكيميائية وغيرها، كما أنّ التوجه للطاقة الشمسية سيخفف عبء التكاليف عن محطات الطاقة الكهربائية، لذلك فإن البحوث في مجال تحلية المياه المالحة تُعد مهمة لتوفير المياه.

7.2 مبررات البحث:

توجد مناطق مختلفة في سورية وخاصة في المناطق الريفية تعاني من نقص المياه وانقطاع الكهرباء لذلك كان لابد من البحث عن وسيلة لتأمين مياه شرب نقية وخالية من الملوثات تلبي الاحتياجات المنزلية، لذلك فإن تحلية المياه بالطاقة الشمسية سيكون حلاً مناسباً لحل مشكلة نقص المياه. توجد تصاميم مختلفة لأنظمة تحلية المياه بالطاقة الشمسية لكن المشكلة تكمن في انخفاض كفاءتها وارتفاع تكاليفها.

يهدف هذا البحث إلى بناء نموذج رياضي لتصميم مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير مزود بلاقط شمسي مسطح بإنتاجية تصميمية تبلغ [L/day] 5 وحساب الأبعاد التصميمية لكافة أجزاء المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، وتنفيذه بتصميم بسيط وكلفة منخفضة ويمكن استخدامه للسكان في المناطق النائية والبعيدة عن شبكات التغذية الكهربائية. وقد تركزت معظم الدراسات على المقطرات الشمسية الصندوقية وتحسين كفاءتها لذلك توجهت هذه الدراسة للمقطرات العمودية الانتشارية لتقييم كفاءتها حيث لا توجد حتى الآن دراسات محلية حول تصميم هذا النوع من المقطرات.

8.2 مصطلحات البحث:

- **زاوية خط العرض الجغرافي ϕ :** هي الزاوية المحصورة بين خطين أحدهما يصل النقطة المدروسة مع مركز الأرض، والثاني هو مسقط النقطة على خط الاستواء.
- **الزاوية الساعية ω :** هي وحدة قياس الوقت بدلالة الزاوية بحيث تُعد كل 1 ساعة هي 15° وبالتالي 24 ساعة هي 360°، وتُقاس من وقت الظهر الشمسي بحيث تكون موجبة قبل الظهر وسالبة بعد الظهر.
- **زاوية الانحراف δ :** هي الزاوية التي يصنعها الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض مع دائرة خط الاستواء، وتراوح قيمة هذه الزاوية بين 23.45° و -23.45°.
- **نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير P_R :** تعبر عن نسبة الحرارة المستخدمة في التبخير إلى الحرارة المستخدمة من مصدر حرارة خارجي.
- **عامل انتزاع الحرارة F_R :** هو النسبة بين الطاقة المعطاة للمائع الساخن إلى الطاقة المفيدة المكتسبة من اللاقط الشمسي المسطح.
- **الناقلية الكهربائية:** تشير إلى قابلية الماء على إمرار التيار الكهربائي، وتعتمد هذه القيمة على تركيز الشوارد الذائبة الموجودة في الماء ودرجة حرارة الماء أثناء القياس.
- **كفاءة اللاقط الشمسي:** هي كمية الحرارة المفيدة التي يقدمها اللاقط الشمسي المسطح بالنسبة للإشعاع الشمسي الوارد، وتقدر كنسبة مئوية، وتشير إلى مدى فعالية اللاقط الشمسي في تحويل الطاقة الشمسية لطاقة حرارية.

➤ **كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:** هي كمية المياه التي يتم الحصول عليها عندما يتكاثف بخار الماء ويتحول لماء نقي خلال الزمن، وتقاس كنسبة مئوية، وتحدد كفاءة المقطر العلاقة بين كمية الطاقة الشمسية وكمية المياه المقطرة التي ينتجها المقطر.

9.2 محدوديات البحث:

تناول البحث فكرة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ولم يتم التطرق لدراسة تأثيرات متعددة أو دراسة تأثير مسافات مختلفة بين صفيحتي التأثير، كما تم دراسة تأثير تحلية المياه باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في بعض الموصفات الكيميائية والجراثومية التي وردت ضمن الموصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م.ق.س 2007/45).

الفصل الثالث: الدراسة المرجعية

1.3 الدراسات السابقة:

بدأ (Dunkle, 1961) فكرة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري متعدد التأثير حيث درس مقطراً بخمسة تأثيرات واستخدم غاز الهيدروجين بدلاً من الهواء بين الصفائح لكنه صادف عدة مشاكل في بحثه بسبب عدم الدقة بين الأقسام حيث لم يكن البعد موحداً كما أنّ قراءات درجات الحرارة لم تكن دقيقة فلم تكن نتائج بحثه التجريبية متوافقة مع الدراسة النظرية التي قدّمها. كما أجرى (Cooper and Appleyard, 1967) تجربة لمقطر عمودي انتشاري ذي أربع صفائح مزود بغطاء زجاجي حيث تم الاستفادة مباشرة من أشعة الشمس في تبخير المياه المالحة الجارية على الصفيحة الأولى للتأثير الأول وانتشار بخار الماء في الفراغ، وتكاثفه على السطح البارد للصفيحة الثانية وهكذا، حيث ذكر الباحثان أنّ الإنتاجية زادت عن طريق إنقاص الفراغ بين الأقسام وزيادة عدد التأثيرات. من جهة أخرى وجد (Elsayed et al., 1984) أنّ إنتاجية المقطر العمودي الانتشاري تزداد مع زيادة الأشعة الشمسية الواردة والحد من سماكة فجوات الانتشار وزيادة عدد التأثيرات حيث استخدم في تجربته 10 تأثيرات، وقد استخدم غاز الهيليوم بدلاً من الهواء بي التأثيرات، وتوصل من خلال بحثه إلى أنّ زيادة معدل التغذية يقلل من أداء المقطر. درس (El-Sebaei, 2000) تأثير سرعة الرياح على إنتاجية كلّ من المقطر الشمسي الصندوقي والمقطر العمودي في مصر، ووجد أنّ الإنتاجية تزداد بزيادة سرعة الرياح وأنّ القيمة المثالية لسرعة الرياح هي 8 [m/s] شتاءً. كما قدم (Tanaka and Nakatake, 2004) دراسة في اليابان لمقطر شمسي عمودي انتشاري ذي 4 تأثيرات بينها فجوات بسماكة 3-5 [mm]، وتمّ وصل المقطر مع لاقط شمسي مسطح ذي أنابيب نحاسية مساحته 2 [m²]، فبلغ معدل الإنتاجية 21.8 [kg/m².day] عندما كانت شدة الاشعاع الشمسي في التجربة 22.4 [MJ/m².day]، لكن الجهاز واجه مشكلة في إمكانية الخلط بين الماء المالح والماء المقطر لاستخدامه الصفائح بشكلٍ مائل الأمر الذي سبب مشكلة ترسب الأملاح.

صمم (Kalogirou, 2005) مقطراً شمسياً صندوقياً تكوّن من حوض ذي قاعدة سوداء اللون وغطاء زجاجي مائل بزاوية محددة حسب الموقع الجغرافي ليتكاثف بخار الماء المالح المتصاعد من الحوض على سطحه الداخلي، ثم تم تجميع

المياه المتكثفة على جوانب الغطاء الزجاجي ضمن قنوات، وقد راوحت كمية المياه المنتجة بهذا الأسلوب بين $[L/m^2]$ 1 و 4 بكفاءة تصل إلى 50% اعتماداً على عدة عوامل منها تصميم المقطر وأخرى تتعلق بالظروف الجوية مثل درجة الحرارة وشدة الإشعاع الشمسي.

قام (Chandak et al., 2009) بتصميم مقطر انتشاري متعدد التأثير لإنتاج المياه المقطرة باستخدام 4 تأثيرات باستخدام مركبات الطاقة الشمسية لتوليد البخار، وكانت الإنتاجية التي تم الحصول عليها أكبر بـ 2.4 مرة مقارنة بتأثير واحد للتقطير، وقد انخفضت درجة الحرارة في كل تأثير لاحق إلى $[^{\circ}C]$ 25، وتوصلت الدراسة إلى أن المقطر متعدد التأثير باستخدام المركبات الشمسية يُعد أداة فعالة لتوليد المياه المقطرة، حيث ساهم المركز الشمسي في رفع الإنتاجية قرابة ثمانية لترات لكل متر مربع من المساحة في ظروف تشغيل مماثلة، ولكن التصميم استغرق وقتاً طويلاً للتسخين فقد بدأ توليد البخار بعد الساعة 11:00 صباحاً فقط.

أجرى (Tanaka, 2009) دراسة لمقطر عمودي انتشاري متعدد التأثير ذي 6 تأثيرات بلغت المسافة الفاصلة بين الصفائح المتتالية $[mm]$ 5، ووجد أن إنتاجية هذا المقطر هي أفضل من إنتاجية المقطر الصندوقي بمقدار 5.5 مرة حيث بلغت الإنتاجية اليومية $[kg/m^2.day]$ 13.3 وذلك عندما كان الإشعاع الشمسي على سطح الغطاء الزجاجي $[MJ/m^2.day]$ 20.2-22.9. كما قام (Flendrig et al., 2009) بتصميم مقطر شمسي صندوقي بلغت مساحة حوضه $[m^2]$ 1.34، حيث قيم أداء المقطر من حيث الإنتاجية وجودة المياه المقطرة في الهند في تجربته التي استمرت 5 أيام، حيث بلغ متوسط إنتاجية المقطر الشمسي $[L/day]$ 3، وانخفض مجموع المواد الصلبة المنحلة TDS من $[ppm]$ 2925 إلى $[ppm]$ 40، والرقم الهيدروجيني PH من 9.6 إلى 5.5، والناقلية الكهربائية EC من $[μs/Cm]$ 6130 إلى $[μs/Cm]$ 26، والعكارة من $[NTU]$ 394 إلى $[NTU]$ 0.4. إضافة لما سبق أجرى (Mayere, 2011) دراسة عن نظام بسيط لتحلية المياه بالطاقة الشمسية باستخدام غرف ترطيب تجفيف باستخدام لاقط شمسي، حيث تم ضخ الهواء في غرف ترطيب لينتقل لغرف تجفيف، ويُبرّد بإدخال الماء المالح الذي يتبخر بدوره ويتكاثف، حيث استطاع هذا النموذج إنتاج أكثر من $[kg/hr]$ 20 من المياه، ووجد الباحث أن هذه الطريقة ذات كفاءة عالية حيث كانت شدة الإشعاع الشمسي $[W/m^2]$ 1000، وبلغت درجة حرارة المياه المالحة نحو $[^{\circ}C]$

100. هذا وقد قام (هاشم، 2012) بتصميم ودراسة أداء المقطر الشمسي العمودي في العراق، حيث صنع مقطرين شمسيين لهما الشكل والقياس نفسه أحدهما ذو جانب تبخيري واحد والآخر ذو جانبيين، وقد بلغ بعدا المقطر 0.4×0.4 ، وغطى كل جانب بقطعة قماش قطني سوداء مبللة بالماء المالح المراد تقطيره، وزُود كلا المقطرين بمراة خارجية لتوجيه أشعة الشمس نحو السطح الماص، وقد تمت التجربة خلال الأشهر (حزيران، تموز، آب، أيلول، تشرين الأول وتشرين الثاني) من عام 2011، وقد أظهرت القياسات أنّ الإنتاجية اليومية للمقطر ذي الجانبين تفوقت على الإنتاجية اليومية للمقطر ذي الجانب الواحد بنسبة 18.6%، كما أنّ تجمع الأملاح على قطعة القماش أدى إلى انخفاض كفاءة امتصاص وتوزيع المياه بشكل متساوي، وبالتالي لابدّ من إجراء عملية الصيانة بتبديل القماش أو تنظيفه.

قام (Abdullah, 2013) بمقارنة الأداء التجريبي لمقطرين شمسيين أحدهما مقطر صندوقي متدرج مساحته $[m^2]$ 0.5 مزود بسخان شمسي لتأمين الهواء الساخن تحت القاعدة المتدرجة، والآخر مقطر شمسي صندوقي ذو غطاء مائل، وقد أظهرت النتائج أن إنتاجية المياه للمقطر المتدرج أعلى بنسبة 112% مقارنةً بالمقطر الثاني وذلك بسبب الحرارة الإضافية التي يوفرها السخان الشمسي، كما ساهم استخدام الألمنيوم كمادة تخزين حرارية في المحافظة على درجة حرارة التشغيل مرتفعة بما يكفي لإنتاج الماء المقطر أثناء عدم وجود أشعة الشمس. كما درس (Huang et al., 2014) مقطراً شمسياً عمودياً انتشارياً متعدد التأثيرات مزود بلاقط شمسي أنبوبي مفرغ مساحة امتصاصه $[m^2]$ 0.92، والمسافة بين التأثيرات $[mm]$ 6 واستمرت فترة التجربة 6 ساعات في تايوان، حيث كانت إنتاجية مقطر ذي 20 تأثير أعلى من مقطر ذي 10 تأثيرات بنسبة 32% لكن الجهاز واجه مشاكل في فقدان الحرارة. يضاف إلى ما سبق الدراسة التي أجراها (Ahsan et al., 2014) في ماليزيا وبنغلاديش على جودة مياه المقطر الشمسي، حيث أخذت قياسات الرقم الهيدروجيني PH، والناقلية الكهربائية EC، والملوحة والزرنيخ، ومجموع المواد الصلبة الذائبة الكلية TDS، والاشريشيا القولونية للمياه قبل وبعد التقطير، واستخدمت عينات مياه من مصادر مختلفة (مياه البحر، ومياه البرك، والمياه الجوفية الملوثة بالزرنيخ وعينات المياه المالحة الاصطناعية)، وراوحت قيم الرقم الهيدروجيني PH بين 6.5 و 7.5، أما الناقلية الكهربائية EC فراوحت بين $[μs/Cm]$ 155 و 355، وراوح

متوسط نسبة خفض الأملاح والزرنيخ في عينات المياه بين 24 و 99%، كما انخفضت الاشريشيا القولونية بنسبة تزيد عن 80%، وتوصلت الدراسة إلى أنّ معظم القيم المدروسة ضمن المعايير المقبولة للمياه حسب منظمة الصحة العالمية.

أجرى (عليوي، 2015) دراسة في العراق لتحسين أداء مقطّر شمسي بسيط أحادي التأثير مزدوج الميل وذلك من خلال تكبير أبعاد المقطّر نسبة لحوضه، وقد ساعد ذلك على زيادة مساحة سطح التكتيف فضلاً عن إمكانية ربط ألواح عاكسة للأشعة الشمسية مع قاعدة المقطّر تقوم بعكس جزء من الأشعة الشمسية الساقطة عليه والمساهمة في التسخين الإضافي لحوض التقطير، حيث تمّ تصنيع مقطّرين شمسيين أحدهما بالتصميم التقليدي والآخر بالتصميم المقترح، أُجريت التجربة خلال الفترة الممتدة بين شهري شباط وتموز من عام 2002، وتحت ظروف مُناخية مختلفة وقد أظهرت النتائج إمكانية تحسين إنتاجية المقطّر الشمسي بمقدار 18-24%. وقام (Seleem, 2016) بتجربة لتقييم أداء المقطر العمودي الانتشاري وحيد التأثير مزود بلاقط شمسي، حيث استخدم نمطين من المقطرات أحدهما بصفحة مسطحة وآخر بصفحة متعرجة (مع وبدون النسيج المبلل)، بلغ معدل تغذية المياه المالحة قرابة $0.0211 \text{ [kg/m}^2\text{.s]}$ ، وتوصل بدراسته إلى أنّ أكثر العوامل التي تؤثر على المردود هي زيادة درجة حرارة الصفحة الساخنة حيث بلغت في التجربة حوالي $55-90 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ، وانخفاض معدل التغذية، وقد تضمنت المقطرات فجوات هوائية بسماكة $5-10 \text{ [mm]}$. هذا وقد قام (حبيب، 2016) بدراسة نظرية وتجريبية في ريف جبلة في سورية لتحديد القيم المثلى لسماكة الفجوة للمقطر العمودي الشمسي، حيث زود المقطر بغطاء زجاجي لامتصاص الإشعاع الشمسي مباشرة واستمرت التجارب من شهر تموز حتى شهر تشرين الثاني، وتوصل من خلال دراسته إلى أنّ البعد المثالي بين الصفحة الماصة والغطاء الزجاجي هو 7 [mm] حيث يكون الإنتاج جيد والمشاكل التصميمية قليلة، وأنّ انخفاض السماكة إلى 5 [mm] يقلل من إنتاجية المقطر، كما وجد أنّ زاوية التوجيه المناسبة للمقطر هي 45° .

قام (شحود، 2018) بمقارنة حوضين لتقطير المياه بالطاقة الشمسية في سورية حيث وضع حواجز قماشية ضمن أحد الحوضين لزيادة مساحة سطح التبخير وتم قياس المردود الانتاجي والحراري لعملية التقطير قبل وضع الحواجز

القماشية وبعدها، حيث ازداد المردود الإنتاجي بمقدار 10% بينما ازداد المردود الحراري بمقدار 1.6 % نتيجة استخدام الحواجز القماشية.

قدم (جورج ويونس، 2019) دراسة تجريبية في سورية لمقارنة مقطرين رُود أحدهما بلاقط شمسي مسطح بهدف تحسين إنتاجيته، حيث أظهرت نتائج البحث أنّ إضافة اللاقط الشمسي المسطح تؤدي إلى تحسين إنتاجية المقطر الساعية وتسريع عملية تبخير الماء المالح، حيث بلغت أعلى قيمة لنسبة زيادة الإنتاجية اليومية 207% مقارنةً بالمقطر دون اللاقط الشمسي، وقام (Abdel-Salam, 2019) بدراسة المقطر الشمسي في جامعة عين شمس في مصر حيث صمم مقطراً شمسياً صندوقياً بأبعاد $7.5 \times 100 \times 100$ [Cm] من الحديد المجلفن بسماكة 3 [mm] فتوصل من خلال تجربته إلى أنّ أعلى إنتاجية للمقطر الشمسي بلغت 5210 [mL/hr] عند ملوحة مياه [ppm] 15000 في شهر نيسان، بينما بلغ الحد الأدنى لإنتاجية المقطر 2468 [mL/hr] عند ملوحة مياه 35000 [ppm] في شهر كانون الثاني، وقد كانت قيمة متوسط الرقم الهيدروجيني PH للمياه قبل التحلية 9.06 بينما بلغت بعد التحلية 7.42، وقد كانت قيمة متوسط الناقلية الكهربائية للمياه قبل التحلية أكثر من 20000 [ds/m] بينما بلغت بعد التحلية 0.15 [ds/m].

قام (Hoque and Abir, 2019) بدراسة في بنغلاديش صمم فيها مقطراً شمسياً من صفائح الفولاذ مساحته $[m^2]$ 0.21، حيث كانت كمية مياه الحوض بمقدار 3، 3.5، 4 و 4.5 [L] من المياه الاصطناعية بتركيز [ppm] (2000 و 5000 و 8000) من المواد الصلبة الذائبة الكلية، وقد أظهرت الدراسة انخفاض إنتاج المياه مع زيادة كمية مياه الحوض وأن الكمية المتلى التي تزداد عندها إنتاجية المقطر هي 3.5 [L]، وتوصلت الدراسة لوجود علاقة عكسية بين تركيز الملح وإنتاج المياه العذبة، وتمت تغذية المقطر بمياه البحر حيث بلغ متوسط إنتاجيته $[L/m^2.day]$ 2.38 بكفاءة تخفيض بلغت 99.87%، 99.83%، 99.78% و 99.81% للعكارة والكلوريد ومجموع المواد الصلبة الذائبة والتوصيل الكهربائي على التوالي. هذا وقد قام (Sharon et al., 2020) بدراسة تأثير عدد من العوامل على أداء المقطر الشمسي العمودي الانتشاري متعدد التأثير مزود بغطاء زجاجي للحصول على الطاقة الشمسية بشكل مباشر عن طريق صفيحة امتصاص سوداء، وقد أظهرت نتائج الدراسة أنّ ارتفاع درجة حرارة

صفحة الامتصاص له تأثير إيجابي على إنتاجية المقطر، كما أدت زيادة سرعة الرياح فوق الغطاء الزجاجي إلى تقليل الإنتاجية بسبب زيادة فقد الحرارة من لوحة الامتصاص، وأن عدد التأثيرات الأكثر فعالية في التأثير على إنتاجية المقطر هو 3 تأثيرات، وقد بلغ المتوسط السنوي لإنتاجية المقطر نحو $11.13 \text{ [kg/m}^2\text{.d]}$.

أجرى (Mouhoumed *et al.*, 2022) دراسة عن إنتاجية مقطر شمسي صندوق أحادي الميل ودراسة نوعية المياه المقطرة التي أنتجت من مصدرين أحدهما بلغت ملوحته 3670 [mg/L] والآخر مياه البحر في جيبوتي، حيث أظهرت النتائج التجريبية أن الإنتاجية التراكمية للمقطر الشمسي تتخفّض عند زيادة الملوحة، كما درست جودة المياه بعد التقطير عن طريق قياس مجموع المواد الصلبة المنحلة TDS، والناقلية الكهربائية EC، والرقم الهيدروجيني PH، وقساوة المياه TH والكلوريدات، وتمت مقارنتها بمعايير منظمة الصحة العالمية لمياه الشرب، حيث بلغت نسبة التخفيض في المياه المقطرة لكل من مجموع المواد الصلبة المنحلة TDS، والناقلية الكهربائية EC، وقساوة الماء TH والكلوريدات 98%، وبلغ متوسط الرقم الهيدروجيني PH للمياه المقطرة 4.5 وهي لا تقع ضمن معايير منظمة الصحة العالمية لمياه الشرب.

إنّ معظم الأبحاث توجهت لدراسة المقطرات الشمسية الصندوقية وتحسين كفاءتها ولكن واجهت هذه المقطرات مشكلة الترسبات الملحية وتشكل القشور على الأسطح الداخلية التي قللت من كفاءة التبادل الحراري إضافة للضياعات الحرارية بالحمل نتيجة تعرض هذه المقطرات للعوامل الجوية، ولم تُقدم الأبحاث السابقة خوارزمية رياضية لتصميم المقطرات العمودية الانتشارية، لذلك كان لابد من إجراء هذا البحث في دمشق لتصميم وتقييم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من خلال مراقبة إنتاجيته خلال فترات مختلفة من العام ودراسة العوامل المؤثرة على إنتاجيته من الماء المقطر وتحسين كفاءته من خلال إضافة مبادل حراري لضبط درجة الحرارة اللازمة لحدوث التكاثف، إضافةً لدراسة نوعية المياه المقطرة التي ينتجها المقطر وتحديد صلاحيتها للاستخدام.

الفصل الرابع: مناهج البحث وأدواته

1.4 موقع التجربة:

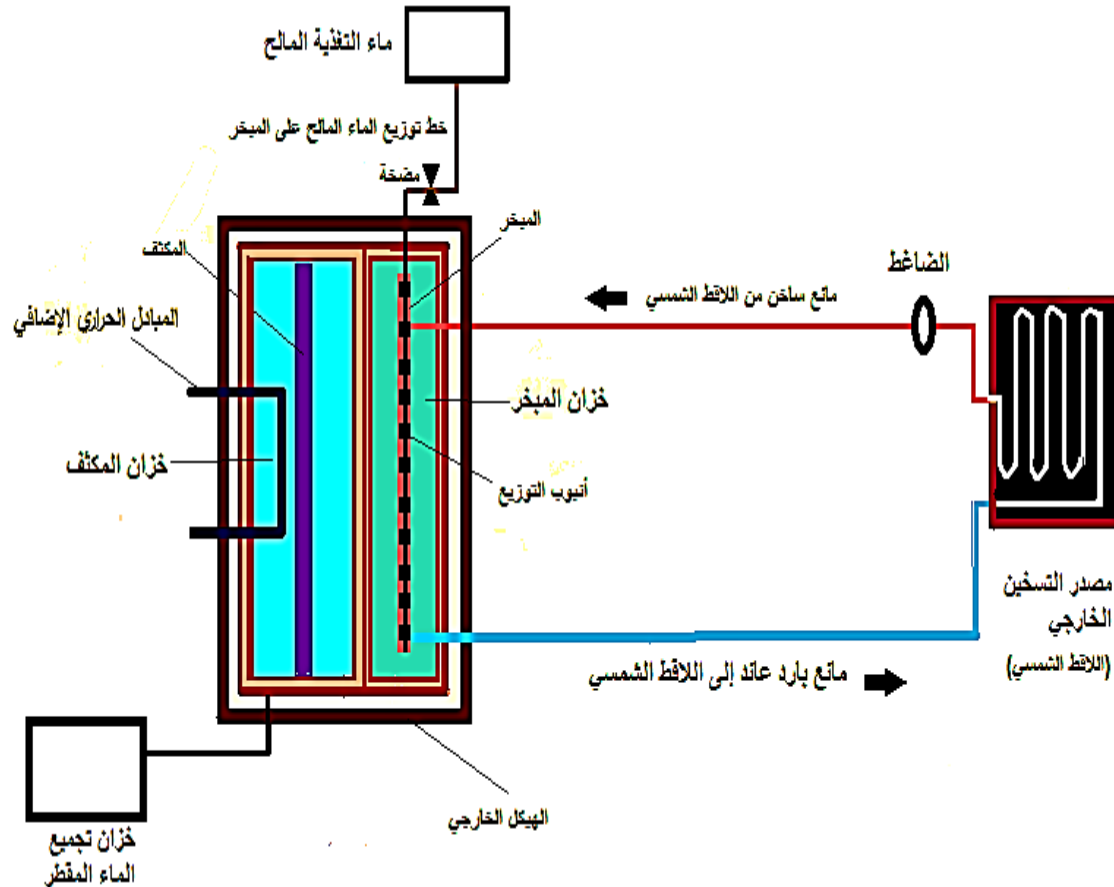
نُفذ البحث في قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية جامعة دمشق، حيث وُضع المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح على سطح مبنى قسم الهندسة الريفية، كما أُجريت تحاليل المياه في مخبر قسم الهندسة الريفية ومخبر الهيئة العامة للتقانة الحيوية في كلية الهندسة الزراعية.

2.4 فترة تنفيذ التجربة:

بدأت الدراسة النظرية لتصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وبناء النموذج الرياضي التصميمي خلال العام 2019، ونفذت الدراسة التجريبية ابتداءً من شهر أيلول من العام 2020، واستمرت حتى شهر تشرين الأول من العام 2021، واستمرت كل تجربة مدة 5 ساعات، وذلك من الساعة 9:00 صباحاً إلى 14:00، حيث تزداد شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الوسط المحيط حتى بلوغ الذروة عند فترة الظهيرة مما يسرع من عملية التبخر والتكاثف.

3.4 تصميم التجربة:

يبين الشكل (5) مسقطاً أفقياً للنموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المُصمم للدراسة، حيث تضمن المقطر صفيحتي المبخر والمكثف اللذين يمثلان تأثيراً واحداً، وزُودت كلتا الصفيحتين بخزان مستقل لتجميع المياه سواء المالحة أو المقطرة، كما زُود المقطر بهيكل خارجي، ووُصلت صفيحة المبخر مع اللاقط الشمسي المسطح من خلال أنبوب توصيل نحاسي ويتحكم ضاغط هواء بمرور الهواء بين اللاقط الشمسي المسطح والمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير. زُود المقطر بالماء المالح ضمن خزان المبخر وتم تدوير الماء المالح من خلال مضخة لتوزيع المياه على سطح صفيحة المبخر عن طريق أنبوب توزيع مثقب، كما تم إضافة مبادل حراري إضافي لخزان المكثف مزود بزعانف خارجية.



الشكل (5) مسقط أفقي للنموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

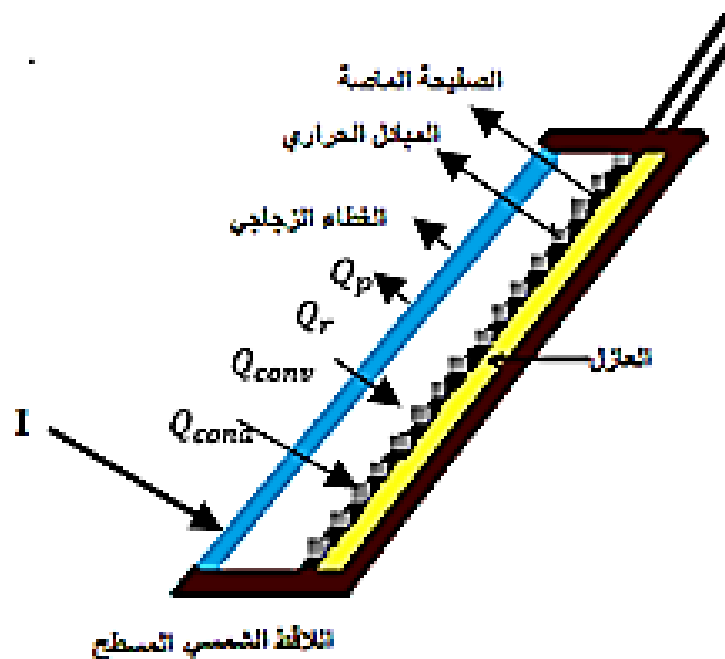
(المصدر: الباحث)

4.4 التحليل الحراري:

يتأثر أداء المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بعدة متغيرات تتعلق بالتصميم والتشغيل والظروف الجوية، لذلك فإن حسابات انتقال الحرارة تكون ضرورية لتحديد حجم المقطر، ومن ناحية أخرى لتحديد مساحة اللاقط الشمسي المسطح المستخدم لتأمين كمية الطاقة الحرارية المطلوبة للمقطر المستخدم في البحث.

1.4.4 التحليل الحراري للاقط الشمسي المسطح:

إن المصدر الأساسي للطاقة الحرارية في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير هو اللاقط الشمسي المسطح الذي يعتمد على الإشعاع الشمسي وهو عامل متغير على طول اليوم والشهر والسنة في موقع محدد، لذلك لا بد من معرفة تغير هذا المصدر لمعرفة كمية الطاقة الواردة للصفحة الماصة. يوضح الشكل (6) التوازن الحراري ضمن اللاقط الشمسي المسطح حيث أن هناك صيغ تصف كل عملية انتقال حراري.



الشكل (6) التوازن الحراري داخل اللاقط الشمسي المسطح

المرجع: (فارس، 2021)

حُسبت زاوية الورود اليومية للإشعاع الشمسي ومعدلها الشهري للحصول على زاوية اللاقط الشمسي وذلك من المعادلة (1) (فارس، 2016):

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (1)$$

حيث:

θ : زاوية الورود اليومية للإشعاع الشمسي [درجة].

ϕ : زاوية خط العرض الجغرافي [درجة].

β : زاوية ميل السطح المدروس مع المستوى الأفقي [درجة].

δ : زاوية الانحراف [درجة].

ω : الزاوية الساعية [درجة].

حُسبت زاوية الانحراف δ من المعادلة (2) (فارس، 2016):

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} (284 + N) \right) \quad (2)$$

N: رقم اليوم بالسنة

يُعطى توازن الطاقة في اللاقط الشمسي بالمعادلة (3) (فارس، 2016):

$$IA_c = Q_u + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_r + Q_p \quad (3)$$

حيث:

I : معدل الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الامتصاص $[W/m^2]$.

A_c : مساحة اللاقط الشمسي $[m^2]$.

Q_u : معدل الطاقة المفيدة المعطاة للهواء (وسيط النقل الحراري في اللاقط الشمسي) $[W]$.

Q_{cond} : معدل الضياع الحراري بالتوصيل من السطح الماص $[W]$.

Q_{conv} : معدل الضياع الحراري بالحمل من السطح الماص $[W]$.

Q_r : معدل الضياع الحراري الناتج عن إعادة إشعاع الأمواج طويلة الموجة من السطح الماص $[W]$.

Q_p : معدل الضياع الحراري بالانعكاس من السطح الماص $[W]$.

تجمع عادة مركبات الضياع الحراري الثلاثة Q_{cond} ، Q_{conv} و Q_r في مصطلح واحد يسمى الطاقة الضائعة Q_L تمثله المعادلة (4):

$$Q_L = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_r \quad (4)$$

على اعتبار أن الطاقة الضوئية الواصلة للسطح الماص هي عبارة عن I_T : الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الماص $[W/m^2]$ مضروباً بمعاملين هما:

τ : معامل النفوذية للزجاج العلوي

ρ : معامل الانعكاس للسطح الماص

بالتعويض نحصل على المعادلة (5) (فارس، 2016):

$$\tau I_T A_c = Q_u + Q_L + \rho \tau I_T A_c \quad (5)$$

وباعتبار أن α : معامل الامتصاص للسطح الماص لذلك تكون الطاقة المفيدة ممثلة بالمعادلة (6):

$$Q_u = (\tau \alpha) I_T A_c - Q_L \quad (6)$$

حيث:

Q_L : تتضمن مختلف أشكال الضياع الحراري بالتوصيل والحمل والاشعاع وتُعطى بالمعادلة (7):

$$Q_L = U_L A_c (T_c - T_a) \quad (7)$$

حيث:

U_L : معامل انتقال الحرارة الكلي للسطح الماص $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

T_c : درجة الحرارة السطح الماص في اللاقط الشمسي $[^\circ C]$.

T_a : درجة حرارة الهواء الخارجي $[^\circ C]$.

من خلال المعادلتين (6) و (7) تُعطى الطاقة الحرارية المفيدة للاقط الشمسي المسطح بالمعادلة (8) (Tiwari et al., 2016):

$$Q_u = (\tau\alpha) I_T A_c - U_L A_c (T_c - T_a) \quad (8)$$

وبالتالي الطاقة المفيدة من أجل واحدة المساحة للاقط الشمسي تُعطى بالمعادلة (9) (فارس، 2016):

$$Q_u = (\tau\alpha) I_T - U_L (T_c - T_a) \quad (9)$$

حُسب عامل انتزاع الحرارة F_R من المعادلة (10) (Kalogiro, 2009):

$$F_R = \frac{m_a C_p (T_c - T_a)}{(\tau\alpha) I_T A_c - U_L A_c (T_c - T_a)} \quad (10)$$

وحُسبت كفاءة اللاقط الشمسي المسطح من المعادلة (11) (Tiwari et al., 2016):

$$\eta_c = \frac{Q}{I_T A_c} \quad (11)$$

2.4.4 التحليل الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يوضح الشكل (7) مراحل انتقال الحرارة في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ضمن 5 مراحل

هي:

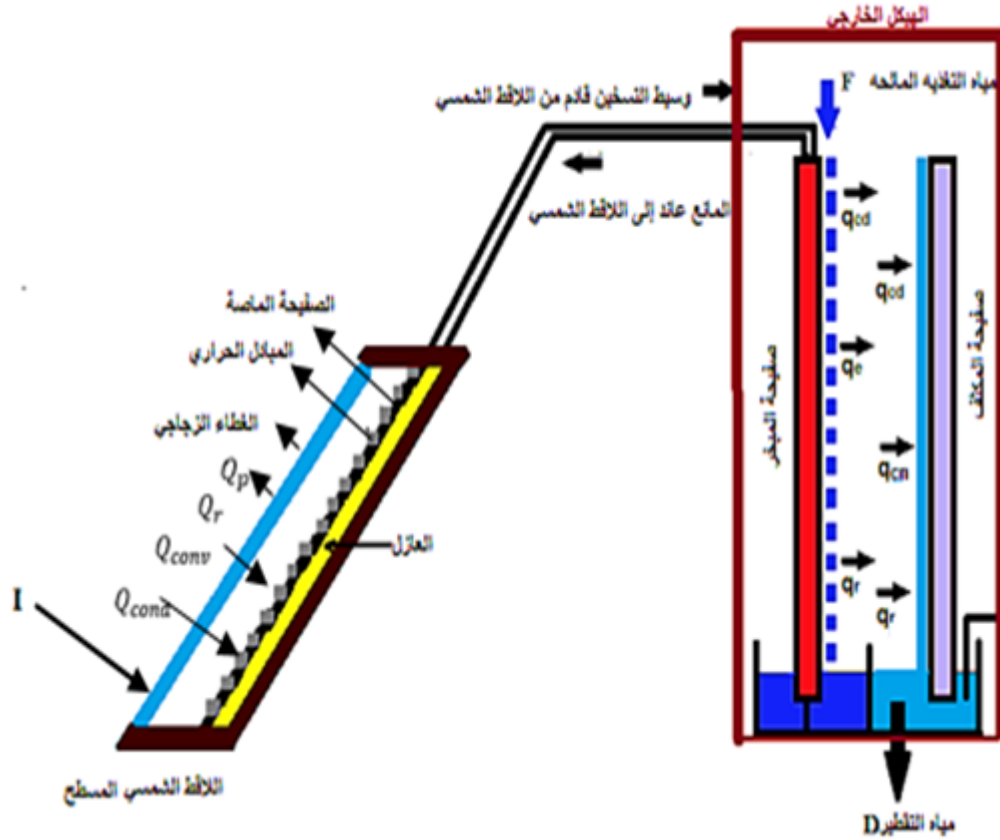
1. من خلال صفيحة المبخر (أول صفيحة عمودية).

2. من خلال طبقة الماء المالح المناسب على صفيحة المبخر.

3. من خلال فجوة الانتشار بين صفيحة المبخر وصفيحة المكثف.

4. من خلال طبقة الماء المتكاثف على صفيحة المكثف.

5. من خلال صفيحة المكثف (الصفيحة العمودية الثانية).



الشكل (7) التوازن الحراري ضمن المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

المرجع: (فارس، 2021)

على اعتبار أن الهواء يصل للمبخر بدرجة حرارة أقل من درجة حرارة خروجه من اللاقط الشمسي المسطح، حيث تم اعتبار أن درجة حرارة الهواء الساخن التصميمية التي سيؤمنها اللاقط الشمسي المسطح لصفيحة المبخر [°C] 70 بهدف الحصول على نوعية جيدة للمياه، وقد حُسبت كمية الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة المبخر من

المعادلة (12) مقدرة بـ [W] (موسى وعبد الزهرة، 2005):

$$Q_e = m_a \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (12)$$

حيث:

m_a : معدل التدفق الكتلي للماء المالح على صفيحة المبخر [kg/s].

C_p : السعة الحرارية [J/kg.°C].

ΔT : فرق درجات الحرارة [°C].

صُممت صفيحة المكثف عند درجة حرارة ثابتة باعتبار أنَّ الحرارة التي سيتم التكاثف عندها هي [°C] 30، والمكثف المُستخدم عبارة عن مبادل حراري مزود بخزان مائي يؤمن ثبات درجة حرارة التكاثف المطلوبة خلال مرحلة العمل، وقد زُوِدَ خزان المكثف بمبادل حراري إضافي يحافظ على درجة حرارة التكاثف. هذا وقد حُسِبَت كمية الطاقة الحرارية اللازمة للتكاثف من المعادلة (13):

$$Q_{cn} = m_c \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

حيث:

m_c : كتلة بخار الماء المراد تكثيفها [kg/s].

حُسِبَ معدل انتقال الحرارة بالتوصيل بين صفيحة المبخر وصفيحة المكثف وفق قانون فورييه (المعادلة 14) (حبيب، 2016):

$$q_{cd} = \frac{K}{\Delta Y} \Delta T \quad (14)$$

حيث:

K : التوصيل الحراري لخليط بخار الماء مع الهواء في الفراغ بين صفيحتي المبخر والمكثف [W/m. °C]

ΔY : البعد بين صفيحتي المبخر والمكثف [m]

حُسِبَ معدل انتقال الحرارة بالتبخير من السطح الأمامي لصفيحة المبخر باتجاه صفيحة المكثف من المعادلة (15) (Seleem, et al., 2015):

$$q_e = D \cdot L \quad (15)$$

حيث:

L : الحرارة الكامنة لتبخير الماء [kJ/kg]، وحُسِبَت كمية الحرارة الكامنة اللازمة لتبخير 1 kg من الماء عند درجة حرارة T من المعادلة (16).

D : معدل الكتلة المنتشرة على السطح $[kg/m^2.s]$ ، وحُصبت من قانون ستيفن وفقاً للمعادلة (17) (Seleem, 2016):

$$L = 2501670 - 2389 T_W \quad (16)$$

$$D = \frac{10^6 \zeta M_w P_T}{R(T + 273) \Delta Y} \ln \left| \frac{P_T - P_{W+1}}{P_T - P_W} \right| \quad (17)$$

حيث:

ζ : انتشارية بخار الماء في الهواء $[m^2/s]$.

M_w : الوزن الجزيئي للماء $[g/mol]$.

P_T : الضغط الكلي داخل المقطر $[MN/m^2]$.

P_{W+1} ، P_W : ضغط بخار الماء عند درجتَي حرارة T_1 ، T_2 على التوالي $[MN/m^2]$.

R : ثابت الغازات العام $8314.34 [J/K]$ لكل جزيء.

T : درجة حرارة الخليط $[^\circ C]$.

ΔY : المسافة في اتجاه انتشار الكتلة $[m]$.

حُصبت الضغوط P_T ، P_W و P_{W+1} من المعادلات (18، 19، 20):

$$p_T = 10^{(-3.2154 + 3.13619 \times 10^{-2} \times T_T - 1.22512 \times 10^{-4} \times T_T^2 + 3.6384 \times 10^{-7} \times T_T^3 - 5.67607 \times 10^{-10} \times T_T^4)} \quad (18)$$

$$p_W = 10^{(-3.2154 + 3.13619 \times 10^{-2} \times T_W - 1.22512 \times 10^{-4} \times T_W^2 + 3.6384 \times 10^{-7} \times T_W^3 - 5.67607 \times 10^{-10} \times T_W^4)} \quad (19)$$

$$p_{W+1} = 10^{(-3.2154 + 3.13619 \times 10^{-2} \times T_{W+1} - 1.22512 \times 10^{-4} \times T_{W+1}^2 + 3.6384 \times 10^{-7} \times T_{W+1}^3 - 5.67607 \times 10^{-10} \times T_{W+1}^4)} \quad (20)$$

وحُصبت انتشارية بخار الماء في الهواء من المعادلة (21) (فارس، 2021):

$$\zeta = \frac{0.911 \times 10^{-9}}{P_T} \times \frac{(T + 273)^{2.5}}{T + 518} \quad (21)$$

كما حُصِب معدل انتقال الحرارة بالتكثيف على سطح صفيحة المكثف من المعادلة (22) (السيد وآخرون، 1994):

$$q_{cn} = q_e + D \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (22)$$

حُصِب معدل انتقال الحرارة بالإشعاع بين صفيحة المبخر وصفيحة المكثف من المعادلة (23) (Tiwari et al., 2016):

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (23)$$

حيث:

σ : ثابت ستيفان وبولتزمان وقيمته $5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$.

ε_1 و ε_2 اشعاعية سطح صفيحتي المبخر والمكثف على التوالي.

حُسبت مساحة صفيحتي المبخر والمكثف من المعادلة (24):

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} \quad (24)$$

وحُسب معامل انتقال الحرارة الكلي U لكلٍ من صفيحتي المبخر والمكثف من المعادلة (25) (Tiwari et al., 2016):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{out}} + \frac{\delta}{k} + \frac{1}{h_{in}}} \quad (25)$$

حيث:

U : معامل انتقال الحرارة الكلي $[\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$.

k : التوصيل الحراري $[\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}]$.

δ : سماكة الصفيحة $[\text{m}]$.

h_{in} ، h_{out} : معامل انتقال الحرارة الخارجي والداخلي على التوالي $[\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$.

تم حساب h_{in} و h_{out} بالاعتماد على عدد رينولدز Re وعدد براندل Pr وعدد نوسلت Nu ، وحُسبت قيم هذه

الأعداد وفقاً للمعادلات (26) و(27) و(28) و(29) (Tiwari et al., 2016):

$$Re = \frac{p \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (26)$$

$$pr = \frac{c_p \cdot \mu}{K} \quad (27)$$

$$Nu = \frac{h_c \cdot d}{k} \quad (28)$$

$$h_c = 5.7 + 3.8v \rightarrow (for 0 < v < 5 m.s^{-1}) \quad (29)$$

حيث:

ρ : كثافة وسيط التسخين والتبريد $[kg/m^3]$.

v : سرعة التدفق $[m/s]$.

μ : اللزوجة الحركية $[N.s/m^2]$.

d : قطر هيدروليكي $[m]$.

v : سرعة الرياح $[m/s]$.

حُسِبَت فعالية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري على أساس إنتاجيته من الماء المقطر بالنسبة لواحدة المساحة، كما حُسِبَت نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير P_R من المعادلة (30) (السيد وآخرون، 1994):

$$P_R = \frac{\Sigma q_e}{M C_p (T_{C,i} - T_{C,o})} \quad (30)$$

حيث:

M : كمية مياه التغذية $[kg]$.

$T_{C,i}$ و $T_{C,o}$: درجة حرارة مخرج ومدخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير على التوالي $[^\circ C]$.

يُعطى التوازن الحراري لصفحة المبخر بالمعادلة (31) (السيد وآخرون، 1994):

$$(M.C_p)_w \cdot \frac{dT}{dt} + Q_u = F.C_p \cdot \Delta T + q_{cd} + q_e + q_r \quad (31)$$

ويُعطى التوازن الحراري لصفحة المكثف بالمعادلة (32) (السيد وآخرون، 1994):

$$q_f = F.C_p(T_w - T_f) \quad (32)$$

حيث:

M : معدل تدفق الهواء الساخن على سطح المبخر [kg/s].

ΔT : فرق درجتي حرارة دخول وخروج الهواء من وإلى المبخر أو المكثف [°C].

F : معدل التغذية بالماء البارد [kg/s].

حُصِبَت السعة الحرارية من المعادلة (33) (Eames et al., 2007):

$$C_p = 1000 \times [4.2101 - 0.0022 \times T_i + 5 \times 10^{-5} \times T_i^2 - 3 \times 10^{-7} \times T_i^3] \quad (33)$$

حسبت كمية الطاقة الحرارية اللازمة للتبريد للمبادل الحراري الإضافي من المعادلة (14)، وُصِّمَت أبعاد المبادل

الحراري الإضافي للمكثف بالاعتماد على المعادلات من (24) إلى (29).

5.4 خوارزمية التصميم:

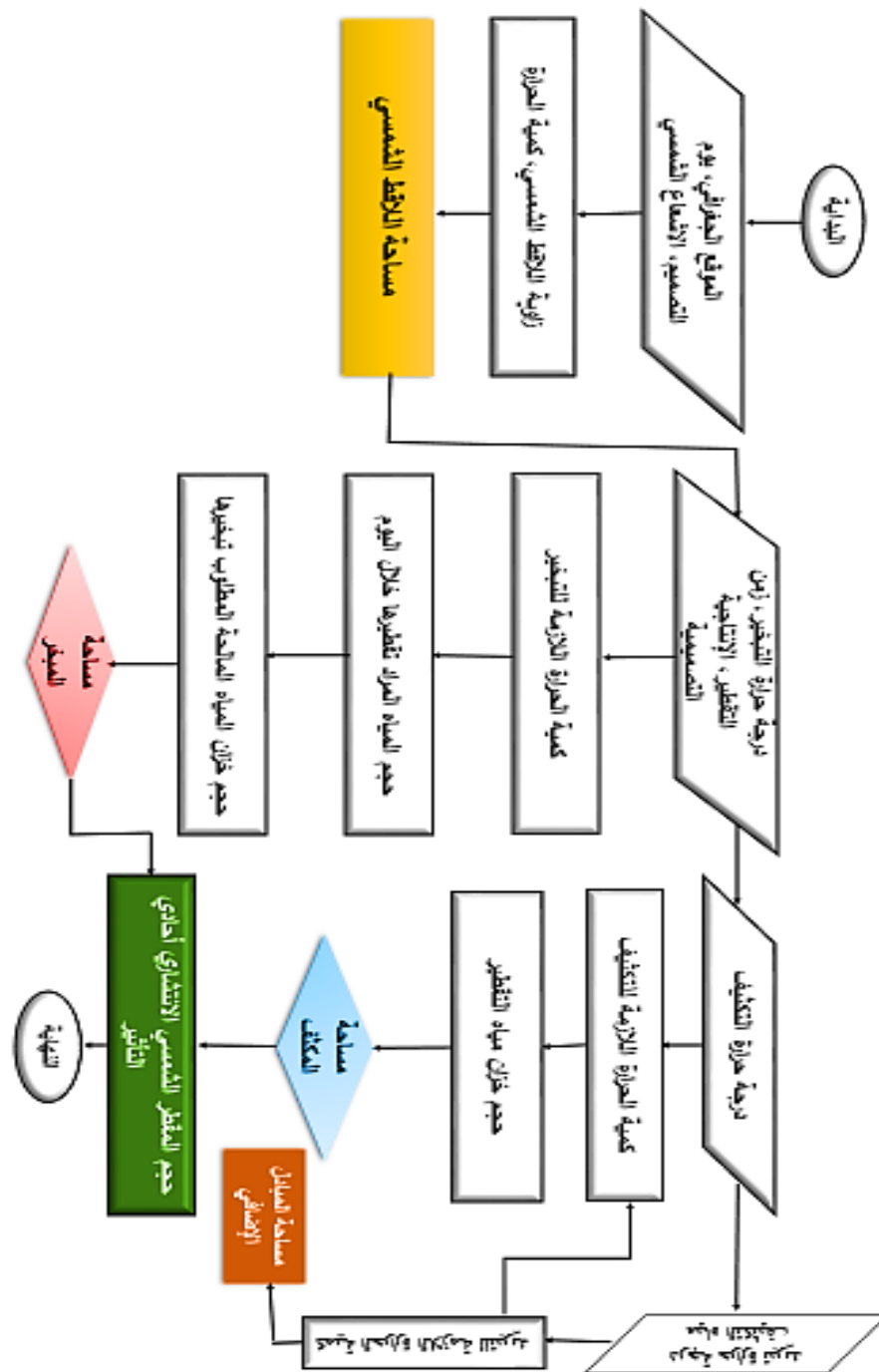
تم اعداد نموذج رياضي لتصميم مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير مزود بلاقط شمسي مسطح تبلغ إنتاجيته التصميمية [L/ day] 5 باستخدام الحاسوب لما يوفره من سرعة عالية في معالجة البيانات وإعطاء المعلومات المطلوبة للتصميم، حيث تم إدخال جميع معادلات التصميم ضمن برنامج Excel من أجل حساب كميات الطاقة الحرارية اللازمة للتبخير والتكاثف ومعاملات الانتقال الحراري، وحساب الأبعاد التصميمية لجميع أجزاء المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث أُعْتِمِدَ في التصميم النظري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير واللاقط الشمسي المسطح والمبادل الحراري الإضافي للمكثف على عدد من المعطيات الافتراضية الموضحة في الجدول (2)، وُحِدَت هذه المعطيات على أساس يوم التصميم وذلك في شهر آذار، وموقع الدراسة الذي يتضمن خط عرض الموقع ودرجة حرارة الوسط المحيط والإشعاع الشمسي.

أُستخدِم برنامج Excel للحصول على خوارزمية تصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح التي يمثلها الشكل (8)، حيث تم اتباع هذه الخوارزمية وإجراء الحل التكراري للحصول على القيم المثالية لحجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وتحديد مساحة صفيحتي المبخر والمكثف ومساحة اللاقط الشمسي المسطح التي تؤمن الحصول على الإنتاجية التصميمية التي صُمم المقطر على أساسها ومساحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف، وقد أُستخدِم برنامج AUTOCAD من أجل تصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.

الجدول (2) المعطيات الافتراضية لتصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

المعطيات	الوحدة	القيمة
الموقع (خط العرض)	درجة	33.3
شدة الاشعاع الشمسي	W/ m ²	1000
درجة حرارة الوسط المحيط	°C	25
سرعة الرياح	m/s	2
زمن التقطير الكلي	hr	5
كمية المياه المالحة	Liter	5
الانتاجية التصميمية	L/day	5
تدفق المياه المالحة	L/s	0.00028
المسافة بين صفيحة المبخر و صفيحة المكثف	Cm	1.5
درجة حرارة اللاقط	°C	70
كفاءة اللاقط الشمسي المسطح	%	70
درجة حرارة التبخر	°C	60
درجة حرارة التكاثف	°C	30

الشكل (8) خوارزمية تصميم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير



6.4 مصدر المياه:

أُستخدِمت مياه من مناطق مختلفة في ريف دمشق تعاني من مشكلة في نوعية المياه من حيث وجود الأملاح والتلوث وهي صحنايا، والكسوة، وقطنا، وضاحية الأسد وجرمانا، إضافة لتحضير عينات مخبرياً بنسب ملوحة عالية راوحت بين [3000 و 9400 ppm].

7.4 قياس درجات الحرارة:

أُستخدِمت في هذه الدراسة عدة مقاييس موجودة في قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية جامعة دمشق لأخذ القراءات المتعلقة بدرجات الحرارة المطلوب قياسها كل منها حسب الحاجة لاستخدامه.

أُخذ قياس درجة الحرارة عند مدخل ومخرج اللاقط الشمسي المسطح بوساطة مقياس حرارة رباعي مزود بشاشة رقمية الصورة (1) وتبلغ دقة هذا المقياس 0.2 درجة، حيث وُضعت الحساسات عند مدخل ومخرج اللاقط الشمسي المسطح وأُخذت القراءات من بداية الساعة 9:00 صباحاً وحتى الساعة 14:00 وذلك بداية كل ساعة من ساعات التجربة.



الصورة (1) مقياس درجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح

أُخذ قياس درجة الحرارة عند مدخل ومخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بوساطة ثيرموكبل كهربائي مزود بشاشة رقمية الصورة (2) وتبلغ دقة هذا المقياس 0.01 درجة، حيث وُضعت الحساسات عند مدخل ومخرج المقطر الشمسي وأُخذت القراءات خلال بداية كل ساعة من ساعات التجربة.



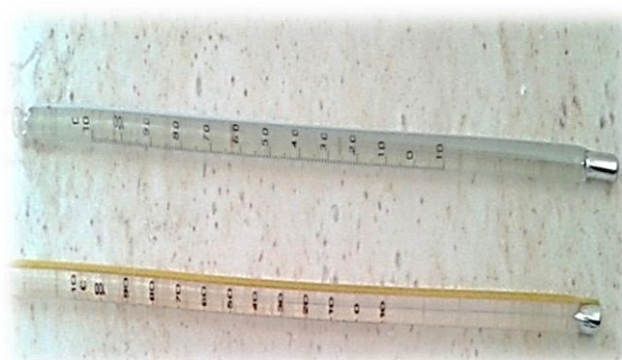
الصورة (2) ثيرموكبل لقياس درجة حرارة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

أُخذ قياس درجة الحرارة والضغط داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من خلال مقياس مزود بشاشة رقمية الصورة (3) وتبلغ دقة هذا المقياس % 0.1 درجة، حيث وُضع الحساس ضمن فوهة مخصصة لأخذ القراءة ويعطي قراءتي درجة الحرارة والضغط داخل المقطر مباشرة، حيث أُخذت القراءات خلال كل ساعة من ساعات التجربة.



الصورة (3) مقياس درجة الحرارة والضغط داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

أُخذ قياس درجة حرارة المياه البدائية بواسطة مقياس درجة حرارة زئبقي الصورة (4)، كما قيست درجة حرارة المياه المالحة داخل خزان المقطر ودرجة حرارة المياه المقطرة في خزان تجمع مياه التقطير من خلال مقياس حرارة (ثيرموكبل) مزود بشاشة رقمية ومسبر معدني تبلغ دقته % 1 درجة، ونُظفت جميع المقاييس بالكحول والماء المقطر الصورة (5).



الصورة (4) مقياس درجة الحرارة الزئبقي



الصورة (5) مقياس درجة حرارة المياه

أُخذ قياس درجة حرارة الوسط المحيط من خلال مقياس درجة حرارة مزود بشاشة رقمية وحساس يعطي بشكل مباشر قراءة درجة حرارة الوسط المحيط والرطوبة الجوية الصورة (6) وتبلغ دقة المقياس 4%، حيث أُخذت القراءات بداية كل ساعة من ساعات التجربة.



الصورة (6) مقياس درجة الحرارة الوسط المحيط والرطوبة الجوية

8.4 قياس سرعة الرياح:

أُخذ قياس سرعة الرياح بوساطة مقياس الرياح الموجود في قسم الهندسة الريفية وهو مقياس الكتروني مزود بشاشة رقمية ومروحة صغيرة الصورة (7) وتبلغ دقة هذا المقياس 1%، حيث أُخذت القراءات خلال بداية كل ساعة من ساعات التجربة.



الصورة (7) مقياس سرعة الرياح

9.4 قياس شدة الإشعاع الشمسي:

أُستخدِم موقع ([http://: GLOBAL SOLAR ATLAS](http://GLOBAL SOLAR ATLAS)) للحصول على قراءات شدة الإشعاع الشمسي لأيام التجارب.

10.4 قياس حجم المياه المقطرة:

قُيِّمَت كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من خلال قياس كمية المياه المقطرة، حيث تم قياس حجم المياه المقطرة التي تم تجميعها من خزان المكثف من خلال أسطوانة مدرجة وذلك في قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية الصورة (8)، وذلك لمقارنة القيم المقاسة لكمية المياه المقطرة مع القيم النظرية المحسوبة.



الصورة (8) أسطوانة قياس حجم المياه

11.4 قياسات نوعية المياه:

تضمنت القياسات الخاصة بنوعية المياه بعضاً من المؤشرات الكيميائية والجراثومية حسب ما ذكر في الموصافة القياسية السورية لمياه الشرب (2007/45) ومقارنتها مع الحدود المسموح بها ضمن هذه الموصافة (هيئة الموصافات والمقاييس العربية السورية، 2007) الموضحة بالملحق (1)، حيث أُخذت قياسات المياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح.

أُجريت قياسات تحديد مواصفات المياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في مخبر أبحاث قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية جامعة دمشق وفي مخبر الهيئة العامة للتقانة الحيوية.

1.11.4 قياس الرقم الهيدروجيني PH:

أُستخدم جهاز PH الكهربائي لقياس الرقم الهيدروجيني PH لعينات المياه ويحتوي الجهاز على قطبين زجاجيين متصلين عن طريق دائرة كهربائية لقياس فرق الكمون الكهربائي مدرج بقيم PH ويؤلف كل قطب نصف خلية كهربائية حيث يتم معايرة الأقطاب ثم أخذ القراءات (APHA, 1998).

2.11.4 قياس الناقلية الكهربائية والملوحة:

عُينت الناقلية الكهربائية وهي مقلوب المقاومة الكهربائية ووحدتها $[\mu\text{S}/\text{Cm}]$ ويمكن بدلالة الناقلية الكهربائية لمحلول معرفة كمية الأملاح الذائبة فيه من المعادلة (34) ومن خلال المعادلة (35) إذا كانت كمية الأملاح مرتفعة (APHA, 1998).

$$\text{كمية الأملاح } \text{mg/L} = \text{الناقلية الكهربائية } \mu\text{S/Cm} \times 640 \quad (34)$$

$$\text{كمية الأملاح } \text{mg/L} = \text{الناقلية الكهربائية } \mu\text{S/Cm} \times 800 \quad (35)$$

وتوضح الصورة (9) مقياس الناقلية الكهربائية الموجود في قسم الهندسة الريفية.

قُدرت نسبة التخفيض في كمية الأملاح الكلية من خلال المعادلة (36):

$$(36) \quad \text{نسبة التحلية} = \frac{\text{كمية الأملاح قبل التحلية} - \text{كمية الأملاح بعد التحلية}}{\text{كمية الأملاح قبل التحلية}}$$



الصورة (9) مقياس الناقلية الكهربائية للمياه

قيس مجموع المواد المنحلة الصلبة (TDS) في المياه من خلال جهاز الرفراكتومتر الموجود في قسم الهندسة الريفية الصورة (10) وتبلغ دقة هذا المقياس 0.2.



الصورة (10) مقياس الرفراكتومتر

3.11.4 قياس تركيز الكالسيوم Ca:

أُستخدِمت طريقة المعايرة بمحلول الفيرسينات (EDTA) لقياس تركيز عنصر الكالسيوم (Ca) في المياه، حيث تمتاز هذه المادة بقدرتها على تعقيد بعض الكاتيونات الذائبة وربطها داخل بنائها الجزيئي بقوة تختلف حسب الكاتيون المتحد. وحسب تركيز الكالسيوم (Ca) من خلال المعادلتين (37) و (38) (APHA, 1998 and Buurman, 1996).

$$Ca^{+2}_{meq/l} = \frac{\text{حجم الفرسينات اللازمة المعايرة} \times \text{عياريتها} \times 1000}{\text{الحجم المأخوذ}} \quad (37)$$

$$Ca^{+2}_{mg/L} = Ca^{+2}_{meq/L} \times 20.04 \quad (38)$$

4.11.4 قياس القساوة TH:

حُسِبَت القساوة TH (CaCO₃) من المعادلة (39) (APHA, 1998) و (Buurman *et al.*, 1996):

$$CaCO_3 = Mg^{+2}_{mg/L} \times 4.118 + Ca^{+2}_{mg/L} \times 2.497 \quad (39)$$

5.11.4 قياس تركيز البوتاسيوم K:

أُستخدِم جهاز الفلام فوتومتر لقياس تركيز البوتاسيوم (K) في المياه، حيث رُسم المنحني القياسي بعد أخذ القراءات

وَحُدِدَت قيمة (K) من المعادلة (40) (APHA, 1998) و (Buurman *et al.*, 1996):

$$K_{meq/L} = \frac{\text{التركيز من الخط البياني}}{\text{الوزن المكافئ للبوتاسيوم}} \quad (40)$$

6.11.4 قياس تركيز الصوديوم Na:

أُستخدِم جهاز الفلام فوتومتر لقياس تركيز الصوديوم (Na) حيث رُسم المنحني القياسي بعد أخذ القراءات وَحُدِدَت

قيمة (Na) من المعادلة (41) (APHA, 1998 and Buurman *et al.*, 1996):

$$Na_{meq/L} = \frac{\text{التركيز من الخط البياني}}{\text{الوزن المكافئ للصوديوم}} \quad (41)$$

7.11.4 قياس تركيز الكلور CL:

أُستخدِمَت طريقة مور لتقدير الكلور (CL) من خلال ترسيب شوارد الكلور الذائبة بواسطة نترات الفضة (AgNO₃)

والحصول على راسب أبيض من كلور الفضة، وقد أُستخدِم محلول كرومات البوتاسيوم في المعايرة (Dhyan *et al.*, 1999).

8.11.4 التحليل الجرثومي للمياه:

أُجِري التحليل الجرثومي للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في

مخبر شركة سكاى فود في ريف دمشق، وقورنت النتائج مع الحدود المسموح بها ضمن المواصفة القياسية السورية

لمياه الشرب (م. ق. س 2007/45) (الملحق 1)، حيث قُدرَ تعداد بكتيريا الكوليفورم والاشريشيا كولي والتعداد العام. أُستخدِمَ وسط الآغار ترجيتول لاكتوز Lactose Tergitol agar (LTA) لتقدير تعداد بكتيريا الكوليفورم والتحصين عند درجة حرارة [°C] 37 مدة 24-48 ساعة، وقد أُستخدِمَ وسط (م. ف. س ميديوم) (M.F.C-medium) لتعداد الاشريشيا كولي، وتمّ التحصين عند درجة حرارة [°C] 44.5 مدة 24 ساعة، كما أُستخدِمَ وسط الآغار المغذي (PCA) Plate count agar لتقدير التعداد العام، والتحصين عند درجة حرارة [°C] 37 مدة 24-48 ساعة، وبعد التحصين أُجريَ تعداد للمستعمرات المتشكلة.

12.4 التحليل الاحصائي:

أُستخدِمت عدة مؤشرات إحصائية لتقييم كفاءة النموذج المقترح تصميمه مع النموذج التصميمي من خلال مقارنة كمية المياه المحسوبة نظرياً مع كمية المياه المقيسة، وهذه المؤشرات هي معامل ارتباط بيرسون (r)، وجذر متوسط مربع الخطأ ($RMSE$)، وجذر متوسط مربع الخطأ المعياري ($NRMSE$)، ومعامل كفاءة النموذج ناش ساتكليف (EF)، ومؤشر يلموت (d) وقد حسبت قيم هذه المؤشرات من المعادلات (42) و (43) و (44) و (45) و (46) (Legates and McCabe, 1999):

$$r = \frac{\sum(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(P_i - \bar{P})^2}} \quad (42)$$

$$NRMES = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (43)$$

$$RMES = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \times 100 \quad (44)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (45)$$

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (46)$$

حيث:

O_i القيم المقيسة.

P_i : القيم النظرية.

$\bar{O}$ و $\bar{P}$: متوسط القيم النظرية والمقاسة على التوالي.

n : عدد القيم.

حُسب معامل الارتباط بين العوامل المقاسة خلال التجارب وهي (شدة الاشعاع الشمسي، ودرجة حرارة الوسط المحيط، وسرعة الرياح، والرطوبة الجوية وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير) وذلك لتحديد تأثيرها في فعالية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.

13.4 دراسة الجدوى الاقتصادية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

تضمنت دراسة الجدوى الاقتصادية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير دراسة تكلفة الإنتاج التي ترتبط بنوعية مياه التغذية وحاجتها للمعالجة، وتكلفة كمية الطاقة المطلوبة، واليد العاملة، حيث حُددت التكلفة الثابتة DC من خلال دراسة التكلفة الإنشائية للمقطر التي شملت تكلفة المعدات والتجهيزات الرئيسية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، واللاقط الشمسي المسطح من أنابيب، وخزانات، ومضخة، ومبادلات حرارية، وصمامات، ووصلات، وأسلاك كهربائية، وعازل حراري (الصوف الزجاجي والستريبور) وأجهزة مراقبة مثل الحساسات الحرارية، وضغط، وهيكل خارجي، وقواعد تثبيت، إضافة لتكاليف التشغيل والصيانة واليد العاملة التي قُدرت كنسب مئوية من التكلفة الثابتة.

حُسب عامل التقسيط a الذي يشير إلى القسط الشهري خلال فترة العمر الافتراضي للجهاز من المعادلة (47) (عبد الله، 2017):

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (47)$$

حيث:

i : معدل الفائدة السنوية¹.

n : عمر المنشأة.

¹ تشمل الفائدة السنوية التكاليف المباشرة وغير المباشرة للمقطر (بشار، 2017)

حُسبت تكلفة القدرة الكهربائية من خلال المعادلة (48):

$$A = c \times w \times f \times t \quad (48)$$

حيث:

c : تعرفه واحدة القدرة الكهربائية [S.P].

w : كمية القدرة المستخدمة [kWh].

f : عامل المنشأة.

t : عدد ساعات التشغيل السنوية.

حُدِدت تكلفة إنتاج اللتر الواحد بناءً على التكلفة الثابتة السنوية المقدرة على أساس عدد ساعات العمل خلال

العام وكمية المياه المقطرة التي تعبر عن استطاعة الجهاز، وذلك من خلال المعادلة (49):

$$C_p = \frac{D_c}{(m) \times (f)} \quad (49)$$

حيث:

D_c : التكاليف الثابتة السنوية [S.P].

m : استطاعة المقطر السنوية [L/year].

حُدِدت نسبة ربح إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من خلال مقارنة تكلفة إنتاج اللتر

الواحد من المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع سعر لتر المياه في السوق المحلية.

الفصل الخامس: النتائج والمناقشة

1.5 الحسابات الحرارية للاقط الشمسي المسطح:

يبين الجدول (3) نتائج الحسابات النظرية التصميمية للاقط الشمسي المسطح، حيث بلغت كمية الطاقة الحرارية المفيدة اللازمة لرفع درجة الحرارة في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير [W] 640، وقد بلغت مساحة اللاقط الشمسي المسطح (A_c) التي تؤمن هذه الطاقة [Cm²] 6400.

الجدول (3) نتائج الحسابات النظرية التصميمية للاقط الشمسي المسطح

البيانات	الرموز	الواحدة	القيمة المحسوبة
معامل انتقال الحرارة الكلي	U_L	W/m ² . °C	22.2
كمية الطاقة الحرارية المفيدة للاقط الشمسي	Q_u	W	640
مساحة اللاقط الشمسي المسطح	A_c	Cm ²	6400

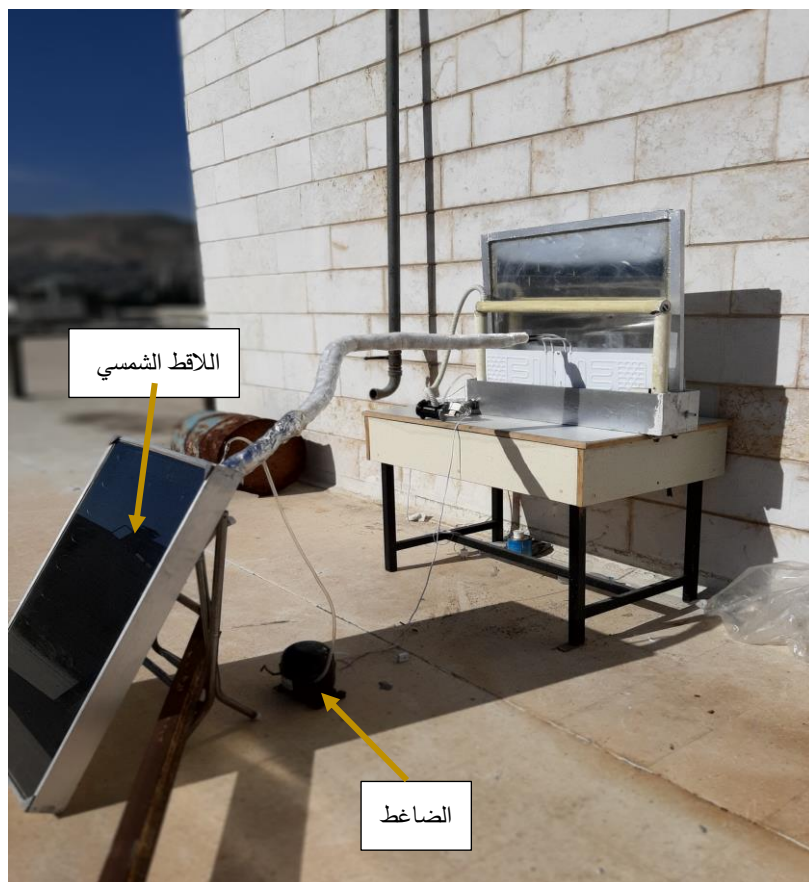
2.5 تنفيذ اللاقط الشمسي المسطح:

صُمم اللاقط الشمسي المسطح بأبعاد [Cm] 100×64، باستخدام هيكل خارجي من الخشب مزود بغطاء زجاجي سماكته [mm] 3، كما أُستخدِمت صفيحة ماصة من الألمنيوم لنقله الجيدة للحرارة ولوزنه الخفيف ولانعكاسيته الجيدة للأشعة كما أنه لا يصدأ بلغت سماكتها [mm] 0.5 وطليت باللون الأسود غير اللامع لزيادة امتصاص الأشعة الشمسية، وثُبت مبادل حراري من الألمنيوم على الصفيحة الماصة، ثم عُزلت جوانب اللاقط الشمسي بالستريوبور كما عُزل اللاقط الشمسي من الأسفل بالصوف الزجاجي، وعُزل أنبوب النقل الحراري المصنوع من النحاس والذي يصل بين اللاقط الشمسي المسطح والمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بالصوف الزجاجي، وتوضح الصورة (11) مراحل تنفيذ اللاقط الشمسي المسطح المستخدم في التجربة. وُضع اللاقط الشمسي المسطح على سطح بناء قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية جامعة دمشق وتوضح الصورة (12) اللاقط الشمسي المسطح حيث ثُبت باتجاه الجنوب بزاوية ميلان 45° بحيث تكون الأشعة الشمسية الساقطة على سطحه عموديةً خلال فترة التجربة.



الهيكل الخشبي مع الصفحة الماصة والمبادل الحراري

الصورة (11) مراحل تنفيذ اللاقط الشمسي المسطح



الصورة (12) اللاقط الشمسي المسطح المستخدم في التجربة

3.5 الحسابات الحرارية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يبين الجدول (4) نتائج الحسابات النظرية التصميمية لكميات الطاقة الحرارية وفقاً للنموذج الرياضي، حيث بلغت كمية الطاقة الحرارية اللازمة للتبخير $656 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ، بينما بلغت كمية الطاقة الحرارية اللازمة للتكاثف $656.13 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ، وبناءً على هذه القيم صُممت مساحة صفيحتي المكثف والمبخر وذلك من أجل حساب حجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.

الجدول (4) نتائج الحسابات النظرية لكميات الطاقة الحرارية

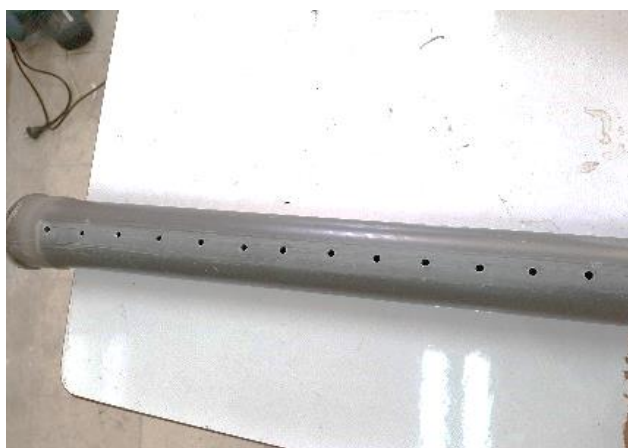
البيانات	الرموز	الواحدة	القيمة المحسوبة
معدل انتقال الحرارة بالتوصيل	q_{cond}	W/m^2	20
كمية الحرارة الكامنة للتبخير	L	kJ/kg	2358.33
الانتشارية	ζ	m^2/s	1981×10^7
معدل الكتلة المنتشرة على السطح	D	$\text{kg/m}^2.\text{s}$	0.00028
معدل انتقال الحرارة بالتبخير	q_e	W/m^2	656
معدل انتقال الحرارة بالإشعاع	q_r	W/m^2	80
معدل انتقال الحرارة بالتكاثف	q_{cn}	W/m^2	656.13

1.3.5 تصميم صفيحة المبخر:

يبين الجدول (5) نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المبخر، حيث بلغت مساحة صفيحة المبخر (A_e) $2000 \text{ [Cm}^2\text{]}$ وصُممت صفيحة المبخر بأبعاد $45 \times 45 \text{ [Cm]}$ وفقاً للطاقة المطلوبة للتبخير، لذلك تم اختيار مبادل حراري مصنوع من الألمنيوم مزود بفتحتين للوصل مع مدخل ومخرج اللاقط الشمسي المسطح. تُبَتَّ المبخَر ضمن خزان الماء المالح المراد تقطيره ووضع الأنبوب الذي يمر خلاله الماء المالح المراد تقطيره فوق صفيحة المبخَر وقد نُقِبَ بأقطار تتناسب مع معدل مياه التغذية كما توضح الصورة (13)، وتمت عملية التغذية بالماء المالح بالاعتماد على مضخة تغذية تصريفها يؤمن انسياب المياه على سطح المبخَر على شكل طبقة رقيقة جداً الصورة (14) صفيحة المبخَر.

الجدول (5) نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المبخر

البيانات	الرمز	الواحدة	القيمة
معدل التدفق الكتلي	m	L/s	0.000285
معامل انتقال الحرارة الداخلي	h_i	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	101.08
معامل انتقال الحرارة الخارجي	h_o	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	1922.2
معامل انتقال الحرارة الكلي	U	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	80.56
أبعاد صفيحة المبخر	d_e	Cm	45
مساحة صفيحة المبخر	A_e	Cm^2	2000



الصورة (13) أنبوب توزيع المياه المالحة



الصورة (14) صفيحة المبخر

2.3.5 تصميم صفيحة المكثف:

يبين الجدول (6) نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المكثف، حيث يُلاحظ أنَّ مساحة صفيحة المكثف المطلوبة (A_{cn}) هي $7300 \text{ [Cm}^2\text{]}$ وأبعادها D_c هي $85 \times 85 \text{ [Cm]}$ ، لذلك صُمم المكثف على شكل صفيحة مربعة الشكل مصنوعة من الألمنيوم وذلك لثقلته الحرارية الجيدة وخفة وزنه، وقد تُثبت صفيحة المكثف من خلال قاعدة خشبية وغمر جزء منها في خزان المكثف، وتوضح الصورة (15) مراحل تنفيذ صفيحة المكثف في مخبر قسم الهندسة الريفية.

الجدول (6) نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المكثف

البيانات	الرمز	الوحدة	القيمة
معدل التدفق الكتلي	D	kg/s.m^2	0.00028
معامل انتقال الحرارة الداخلي	h_i	$\text{W/m}^2.^\circ\text{C}$	51.03
معامل انتقال الحرارة الخارجي	h_o	$\text{W/m}^2.^\circ\text{C}$	45
معامل انتقال الحرارة الكلي	U	$\text{W/m}^2.^\circ\text{C}$	29.99
أبعاد صفيحة المكثف	d_c	Cm	85
مساحة صفيحة المكثف	A_{cn}	Cm^2	7300



تثبيت صفيحة المكثف ضمن خزان المكثف



تجهيز صفيحة المكثف باطار خشبي

الشكل (15) مراحل تنفيذ صفيحة المكثف

3.3.5 تصميم المبادل الحراري الإضافي للمكثف:

يبين الجدول (7) نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف، حيث يُلاحظ أنَّ مساحة صفيحة المبادل الحراري المطلوبة (A_a) تساوي $400 \text{ [Cm}^2\text{]}$ وأبعادها D_a هي $20 \times 20 \text{ [Cm]}$ ، لذلك صُمم المبادل على شكل صفيحة مربعة الشكل مصنوعة من الألمنيوم غُمِرت ضمن خزان المكثف وزُودت بزعانف خارجية للاتصال مع الوسط الخارجي يتم إخراجها عن طريق الهيكل الخشبي، وقد صُمِمت الزعانف بنفس أبعاد المبادل الحراري الإضافي لزيادة سطح التبادل الحراري الصورة (16).

الجدول (7) نتائج الحسابات النظرية لتصميم صفيحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف

البيانات	الرمز	الواحدة	القيمة
معدل التدفق الكتلي	$\dot{m}$	kg/s	0.00014
معامل انتقال الحرارة الداخلي	h_i	$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	151.5
معامل انتقال الحرارة الخارجي	h_o	$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	15
معامل انتقال الحرارة الكلي	U	$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	11.32
أبعاد صفيحة المبادل الحراري الإضافي	d_a	Cm	20
مساحة صفيحة المبادل الحراري الإضافي	A_a	Cm^2	400



الصورة (16) صفيحة المبادل الحراري الإضافي للمكثف

4.3.5 تصميم خزان تجمع المياه المقطرة والمياه المالحة في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري

أحادي التأثير:

حَسَبَ حجم خزان المياه المالحة بناءً على مساحة صفيحة المبخر والكمية المطلوب تقطيرها، لذلك كانت أبعاد الخزان $90 \times 10 \times 5$ [Cm] حيث تم اختيار خزان مصنوع من الصاج المطلي بمادة مقاومة للصدأ، وزود الخزان بفتحة تصريف للماء المالح، كما حُسب حجم خزان الماء المقطر بما يتوافق مع مساحة صفيحة المكثف والكمية المطلوب الحصول عليها، لذلك كانت أبعاد خزان المكثف $90 \times 15 \times 10$ [Cm]، وصُمم خزان المكثف من الصاج المطلي بمادة مقاومة للصدأ وزُود الخزان بفتحة تصريف للماء المقطر، وعُزل الخزانات بالستريبور والفوم لمنع انتقال الحرارة بين الخزائين، وتوضح الصورة (17) مراحل تنفيذ الخزائين.



عزل الخزائين بالستريبور والفوم

طلاء الخزائين

تنفيذ الخزائين

الصورة (17) مراحل تنفيذ خزانات المياه

5.3.5 النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

بلغ حجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير 0.25 m^3 ، ووُصلت صفيحة المبخر مع اللاقط الشمسي المسطح من خلال أنبوب نحاسي معزول بالصوف الزجاجي ويتحكم بعمله ضاغط هواء، وزُود المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بهيكل خارجي من الخشب المعزول تم تصميمه بما يتناسب مع حجم المقطر وتوضح الصورة (18) مراحل تنفيذ الهيكل الخشبي في منشرة كلية الهندسة الزراعية.



الصورة (18) مراحل تنفيذ الهيكل الخشبي

تُثبت المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير على قاعدة خشبية، وتبين الصورة (19) النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح وهيكل خشبي، وقد وُضع المقطر الشمسي على سطح بناء قسم الهندسة الريفية في كلية الهندسة الزراعية، حيث أُجريت تجارب تقييم كفاءة المقطر خلال العامين 2020-2021، وبدأت كل تجربة من الساعة 9:00 صباحاً حتى الساعة 14:00 ظهراً.



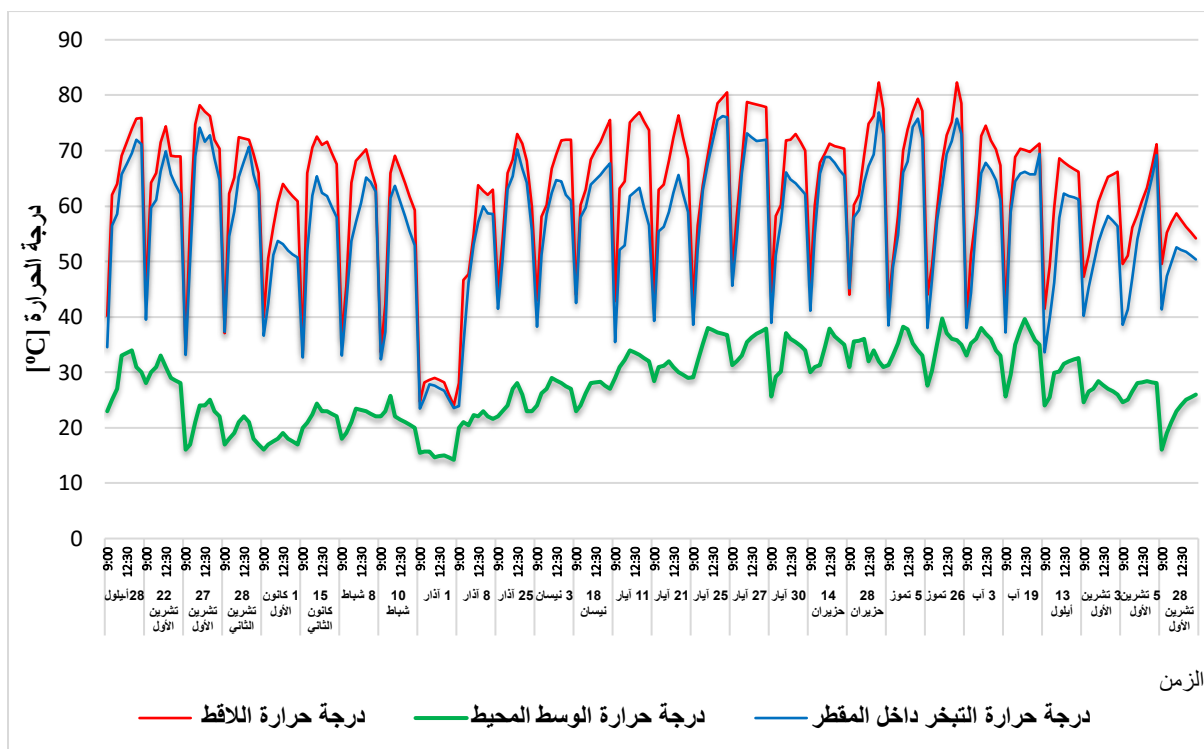
الصورة (19) النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بالهيكل الخارجي مع اللاقط الشمسي المسطح

4.5 مقارنة درجة حرارة الوسط المحيط مع درجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري

أحادي التأثير ودرجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح:

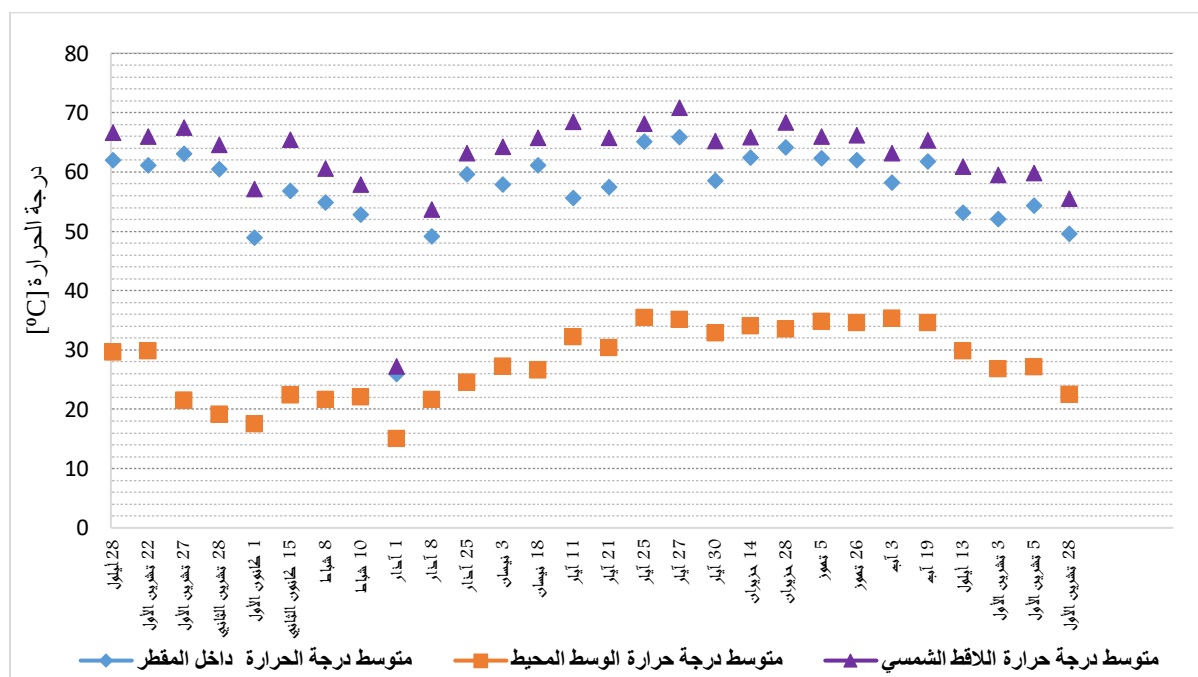
يبين الشكل (9) درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة ودرجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمن التقطير، كما يبين الشكل (10) متوسطات درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة ودرجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح خلال التجارب، حيث لوحظ أن درجة حرارة الوسط المحيط راوحت بين $[14.2 \text{ و } 39.7 \text{ } ^\circ\text{C}]$ وسُجلت قيمة أعلى متوسط خلال الأشهر (أيار، وحزيران، وتموز، وآب وأيلول) بينما راوحت درجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بين $[23.5 \text{ و } 76.9 \text{ } ^\circ\text{C}]$ وسُجلت قيمة أعلى متوسط خلال أشهر (حزيران، تموز، آب وأيلول) بينما راوحت درجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح بين $[24 \text{ و } 82.3 \text{ } ^\circ\text{C}]$ وسُجلت قيمة أعلى متوسط خلال أشهر (حزيران، وتموز، وآب وأيلول)، وبالتالي فإن درجة الحرارة داخل كلٍ من اللاقط الشمسي المسطح والمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط في جميع أيام الدراسة عدا الأيام التي كان الجو فيها غائماً وهي (12 كانون الأول، و1 آذار، و28 تشرين الأول).

بينت الدراسة أنّ درجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير التي ساعدت على حدوث عملية التبخر لم تصل لدرجة حرارة الغليان ولكن كانت كافية لحدوث التبخر وهذا ما ساهم في تقليل حدوث ترسبات ملحية في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.



الشكل (9) درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة ودرجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة حرارة اللافظ

الشمسي المسطح كتابع لزمن التقطير



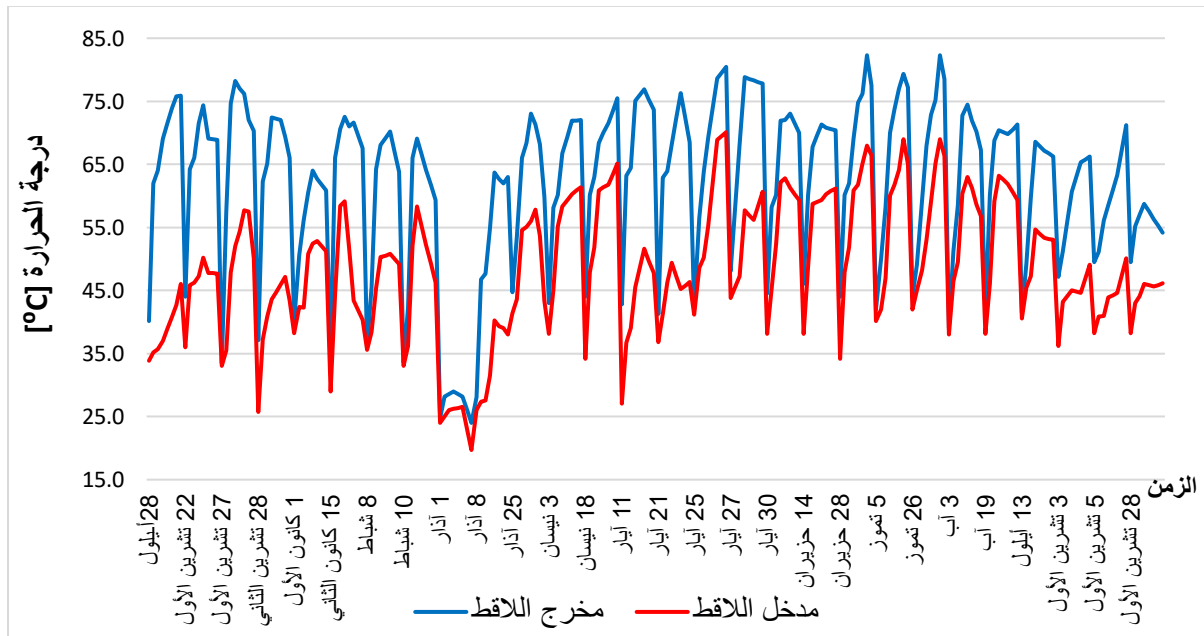
الشكل (10) متوسطات درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة ودرجة الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة

حرارة اللافظ الشمسي المسطح

5.5 مقارنة درجات حرارة اللاقط الشمسي المسطح مع درجات حرارة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري

أحادي التأثير:

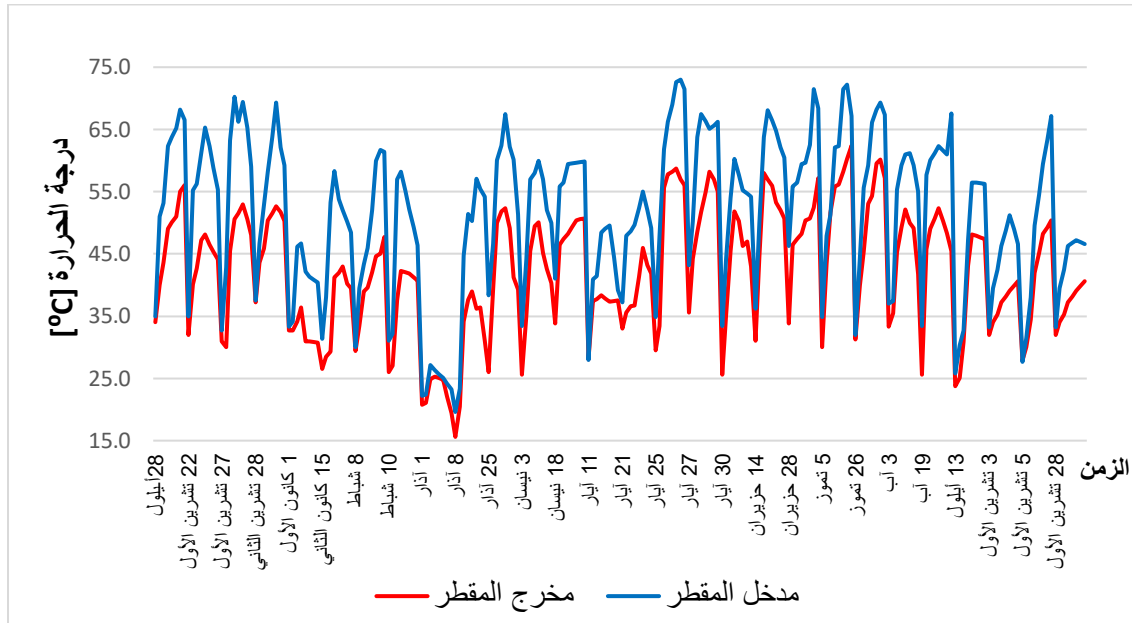
يبين الشكل (11) درجات الحرارة المسجلة عند مدخل ومخرج اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمن التقطير، حيث راوحت قيم درجات الحرارة عند مخرج اللاقط الشمسي المسطح بين 24°C و 82.3°C ، أما عند مدخله كانت درجات الحرارة بين 17.9°C و 70.1°C ، وقد بلغ متوسط درجة الحرارة التي استطاع اللاقط الشمسي المسطح تأمينها خلال التجارب بين 55°C و 70.7°C عدا الأيام التي كان الجو فيها غائماً، وبالتالي ساهم اللاقط الشمسي المسطح في رفع درجات الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.



الشكل (11) درجة الحرارة عند مدخل ومخرج اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمن التقطير

يبين الشكل (12) درجات الحرارة المسجلة عند مدخل ومخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير حيث راوحت قيم درجات الحرارة المسجلة عند مخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بين 15.6°C و 62.4°C ، أما عند مدخله كانت درجات الحرارة بين 19.6°C و 73°C ، حيث إن هناك تقارب بين درجات الحرارة المسجلة عند مخرج اللاقط الشمسي المسطح ومدخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وبالتالي فإن العزل بالصوف الزجاجي للأنبوب النحاسي الذي وصل بين اللاقط الشمسي

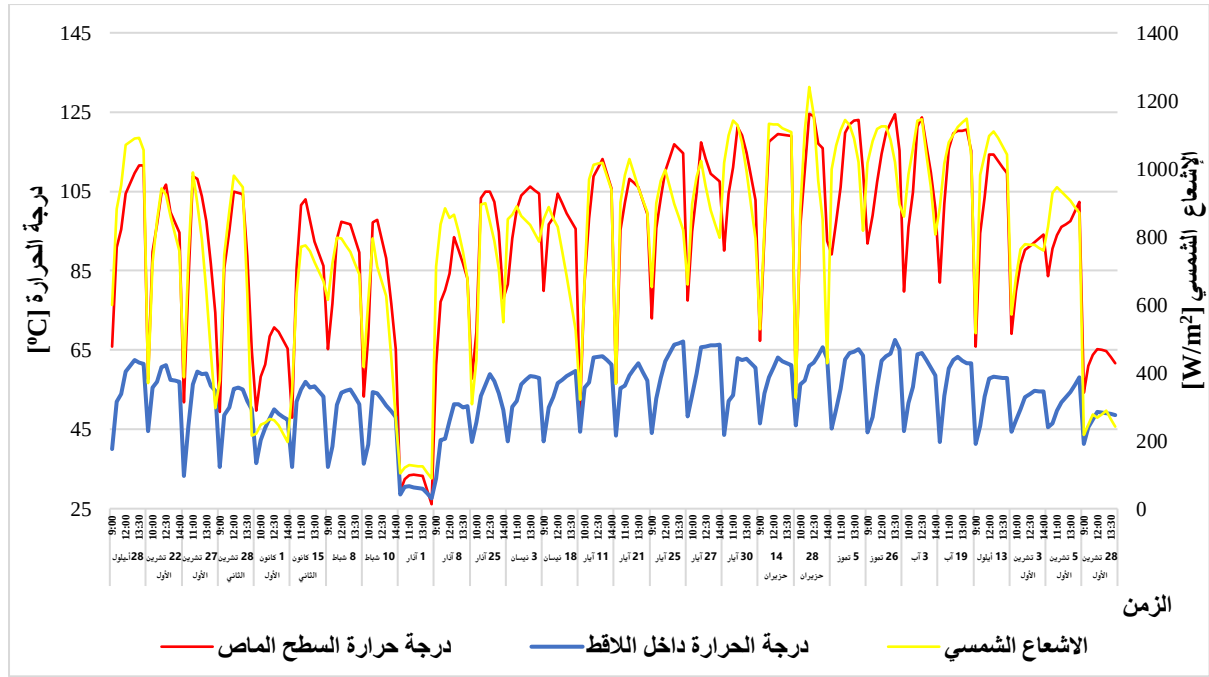
والمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وسيلة جيدة للحد من الضياعات الحرارية، كما لوحظ انخفاض في درجات الحرارة المسجلة عند مخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير حيث استخدمت هذه الحرارة في تبخير الماء المالح المراد تقطيره داخل المقطر.



الشكل (12) درجة الحرارة عند مدخل ومخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمان التقطير

6.5 درجة حرارة الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح ودرجة حرارة السطح الماص:

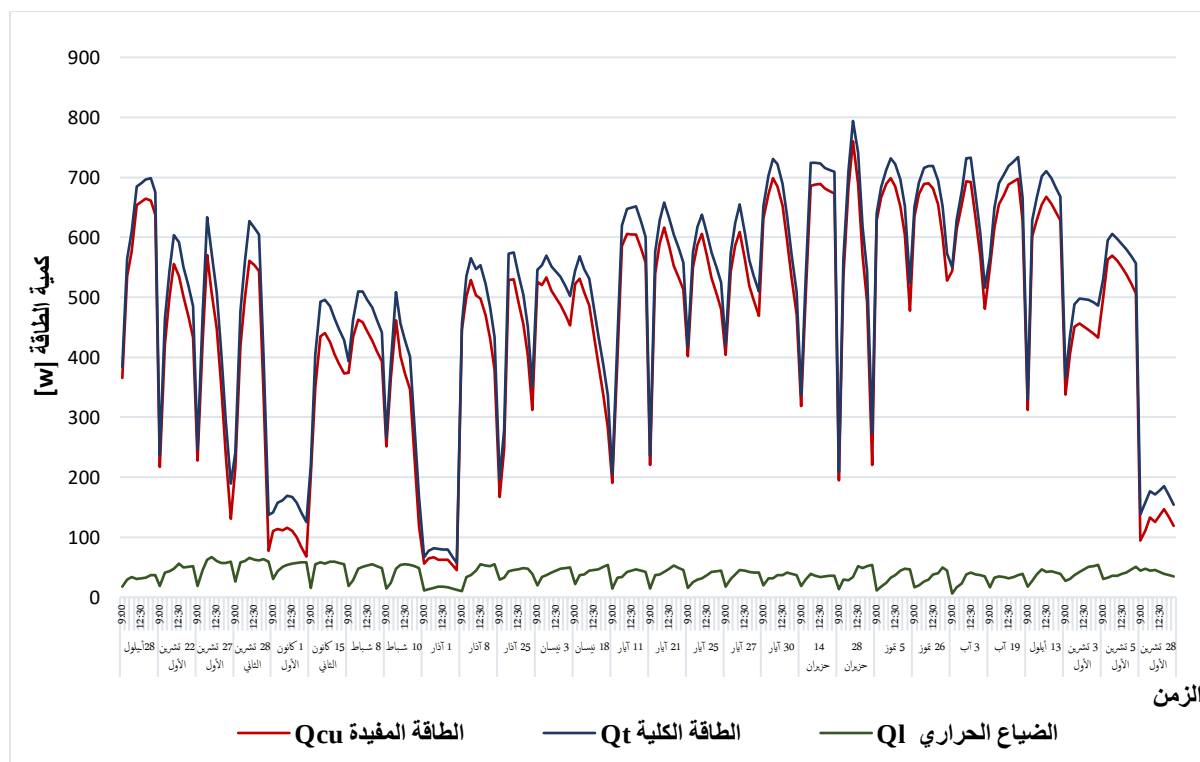
يبين الشكل (13) درجة حرارة الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح ودرجة حرارة السطح الماص للاقط الشمسي المسطح والإشعاع الشمسي كتابع لزمان التقطير، حيث لوحظ أن درجة حرارة سطح الامتصاص بدأت بالتزايد من الساعة 9:00 صباحاً لتصل ذروتها بين الساعة 12:00-13:00 ظهراً ثم تبدأ بالتناقص تدريجياً، كما تبين أن درجة حرارة السطح الماص ارتبطت بالإشعاع الشمسي ومسقطه على السطح، فكلما زادت شدة الإشعاع الشمسي زادت درجة حرارة السطح الماص وبالتالي زادت درجة حرارة الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح.



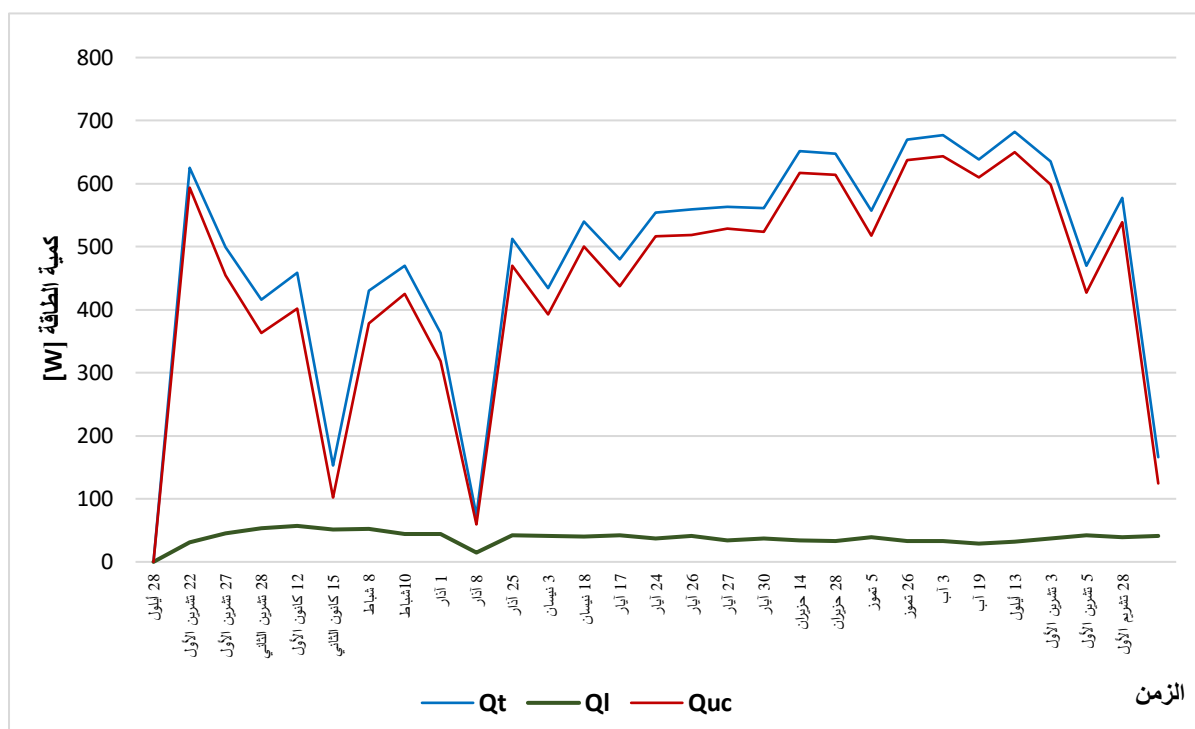
الشكل (13) درجة حرارة الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح ودرجة حرارة السطح الماص للاقط الشمسي المسطح والإشعاع الشمسي كتابع لزمان التقطير

7.5 مقارنة كمية الطاقة الحرارية الواصلة للسطح للماص في اللاقط الشمسي المسطح Q_t وكمية الطاقة المفيدة Q_u وكمية الطاقة الضائعة Q_L :

يبين الشكل (14) كمية الطاقة الحرارية الكلية Q_t التي تصل للسطح الماص في اللاقط الشمسي المسطح وكمية الطاقة المفيدة المعطاة للهواء Q_u وكمية الطاقة الضائعة Q_L كتابع لزمان التقطير، حيث ازدادت كمية الطاقة الحرارية الكلية Q_t ، وكمية الطاقة المفيدة المعطاة للهواء Q_u في بداية كل تجربة لتصل لذروتها خلال الفترة 12:00-13:00 ظهراً. كما يبين الشكل (15) متوسط كميات الطاقة Q_t ، Q_u و Q_L خلال التجارب حيث راح متوسط كمية الطاقة المفيدة المعطاة للهواء Q_u [W] 300 و 650 خلال جميع التجارب عدا الأيام التي كان الجو فيها غائماً، كما تبين أن الضياعات الحرارية خلال جميع التجارب كانت قليلة حيث راوحت في المجال 5-13% من كمية الطاقة الكلية Q_t .



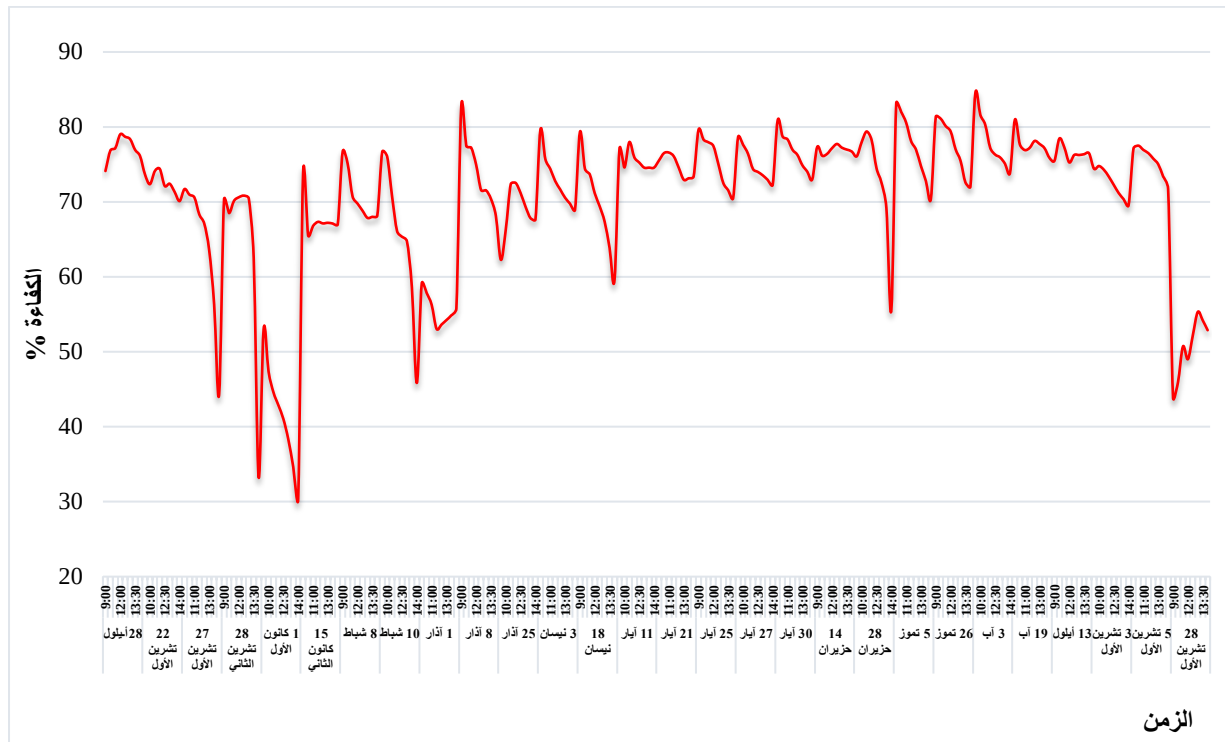
الشكل (14) كمية الطاقة الواصلة للسطح للماص وكمية الطاقة المغطاة للهواء وكمية الطاقة الضائعة كتابع لزمن التقطير



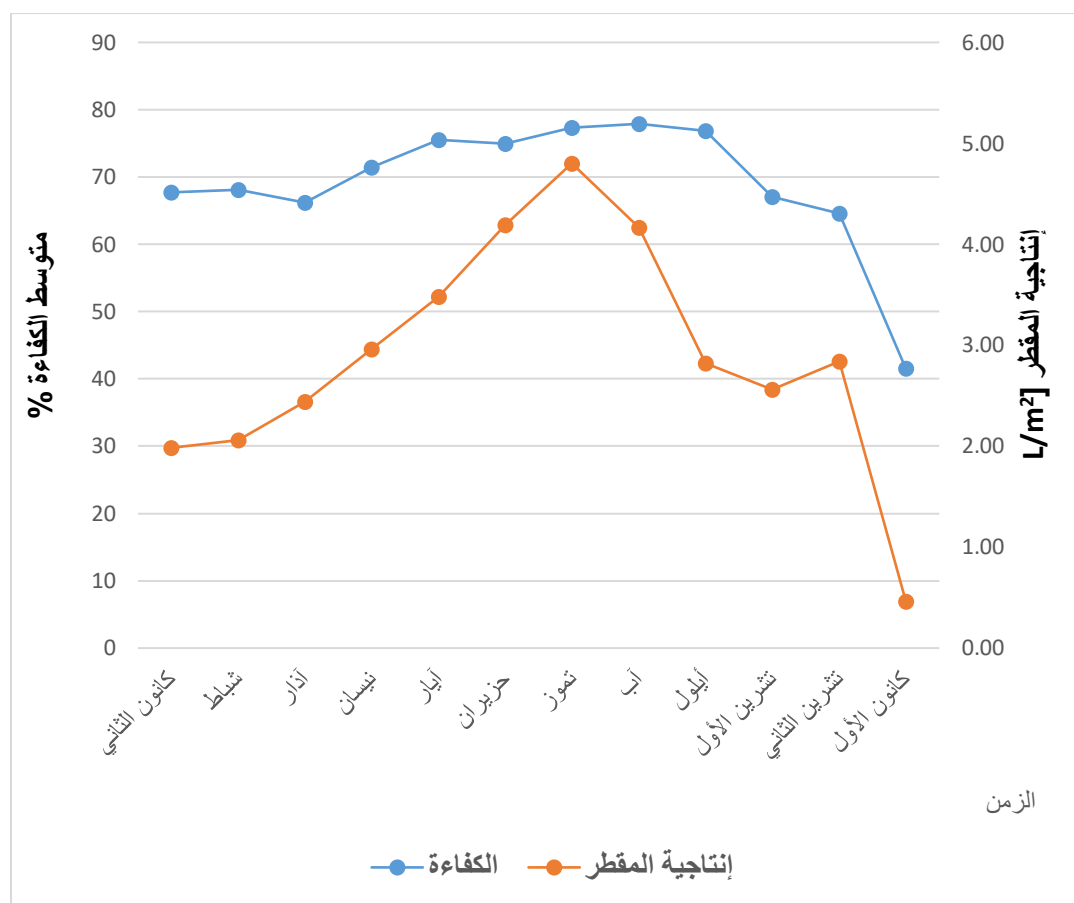
الشكل (15) متوسط كمية الطاقة الواصلة للسطح للماص وكمية الطاقة المغطاة للهواء وكمية الطاقة الضائعة خلال التجارب

8.5 تقييم كفاءة اللاقط الشمسي المسطح:

يبين الشكل (16) كفاءة اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمن التقطير، حيث راوحت كفاءة اللاقط الشمسي المسطح بين 30.4 و84.5%، وبلغت قيمة أعلى كفاءة للاقط الشمسي المسطح خلال شهري تموز وآب، ويبين الشكل (17) متوسط كفاءة اللاقط الشمسي المسطح مقارنةً مع متوسط إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير خلال التجارب حيث بلغ أعلى متوسط لإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير عند متوسط أعلى كفاءة للاقط الشمسي المسطح وهي 75% خلال شهر تموز، كما بلغت كفاءة اللاقط الشمسي المسطح في معظم التجارب 70% عدا الأيام التي كان فيها الجو غائماً، مما يدل على توافق الكفاءة التجريبية مع الكفاءة التصميمية للاقط الشمسي المسطح.



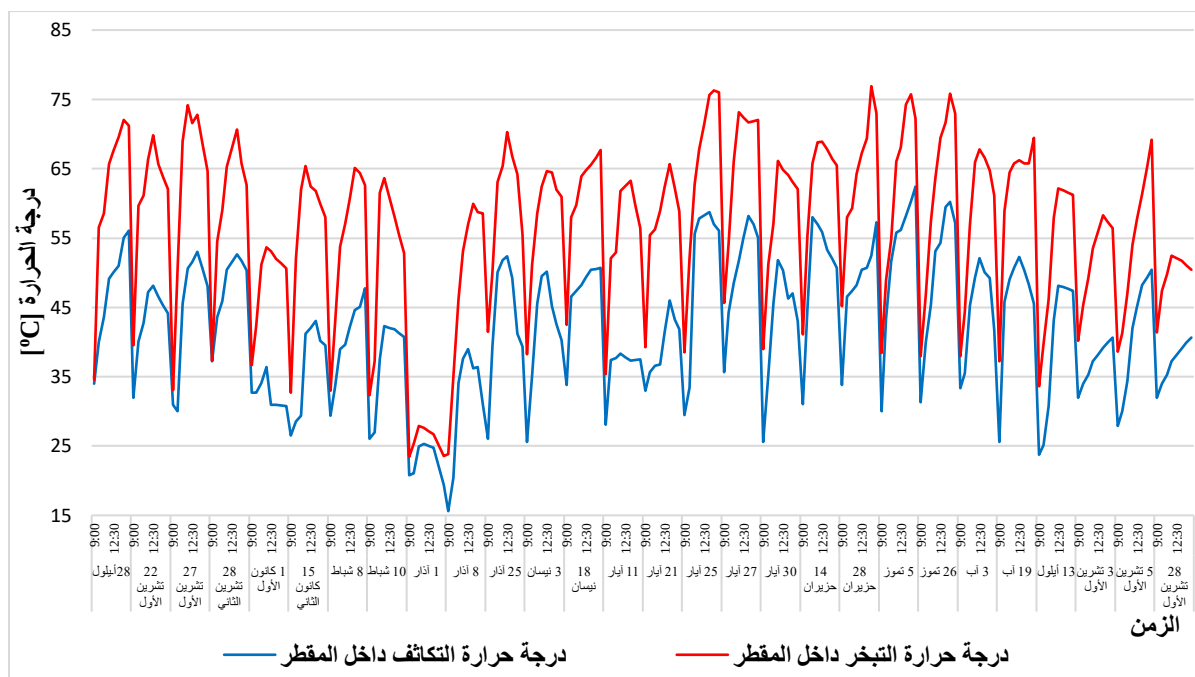
الشكل (16) كفاءة اللاقط الشمسي المسطح كتابع لزمن التقطير



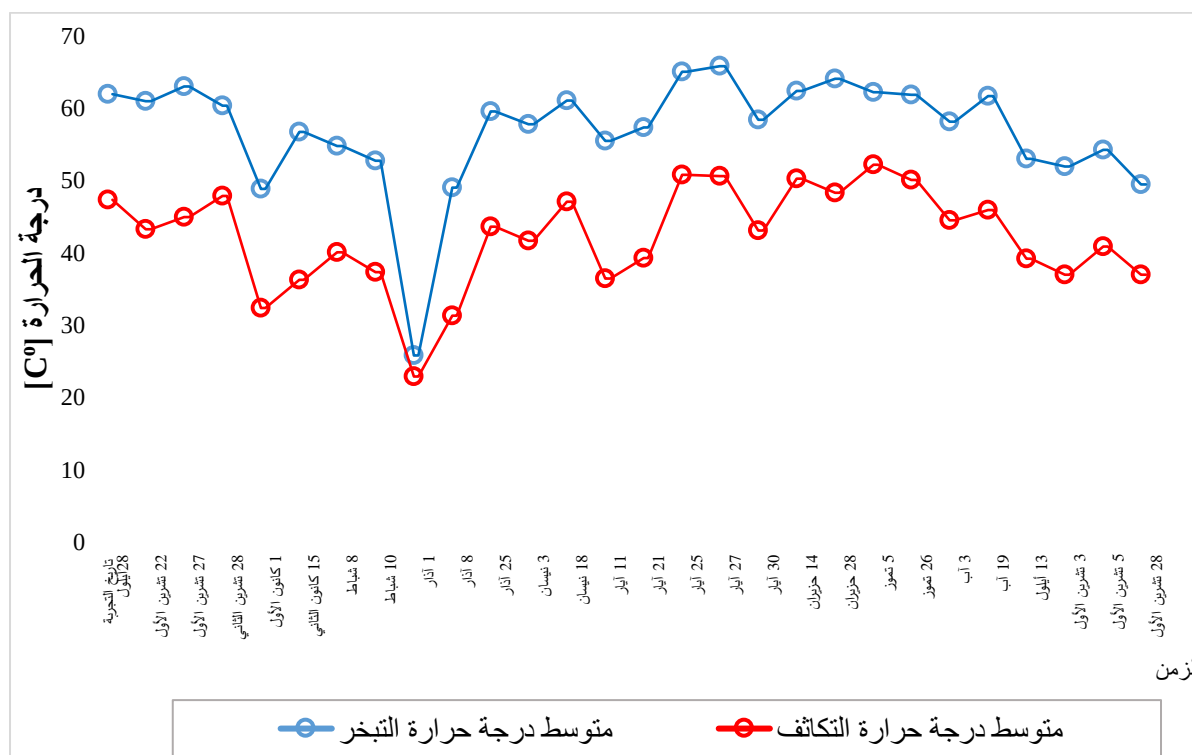
الشكل (17) متوسط كفاءة اللاقط الشمسي المسطح مقارنة مع متوسط إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

9.5 درجة حرارة التكاثف والتبخر داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يبين الشكل (18) درجات حرارة التبخر والتكاثف المسجلة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير، حيث راوحت قيم درجات حرارة التبخر بين $[23.5 \text{ } ^\circ\text{C}]$ و $[76.9 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ، أما درجات حرارة التكاثف راوحت بين $[15.6 \text{ } ^\circ\text{C}]$ و $[62.4 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ، ولُوَحِظَ من الشكل (19) الذي يبين متوسط درجة حرارة التكاثف والتبخر خلال التجارب أنّ متوسط درجة حرارة التبخر تراوح بين $[50 \text{ } ^\circ\text{C}]$ و $[60 \text{ } ^\circ\text{C}]$ ، وأن متوسط درجة حرارة التكاثف راح بين $[^\circ\text{C}]$ 25 و 50 عدا الأيام التي كان الجو فيها غائماً، حيث إنّ درجة حرارة التبخر لم تصل لدرجة حرارة الغليان، وأن بخار الماء قد تكاثف عند قيم متقاربة من حرارة التبخر، وهذا ما ساعد في تقليل حدوث ترسبات ملحية داخل أجزاء المقطر، وانعكس ذلك على فترات الصيانة التي كانت شهرية للتأكد من عدم وجود ترسبات ملحية تقلل من كفاءة التبادل الحراري.



الشكل (18) درجة حرارة التبخر ودرجة حرارة التكاثف كتابع لزمن التقطير

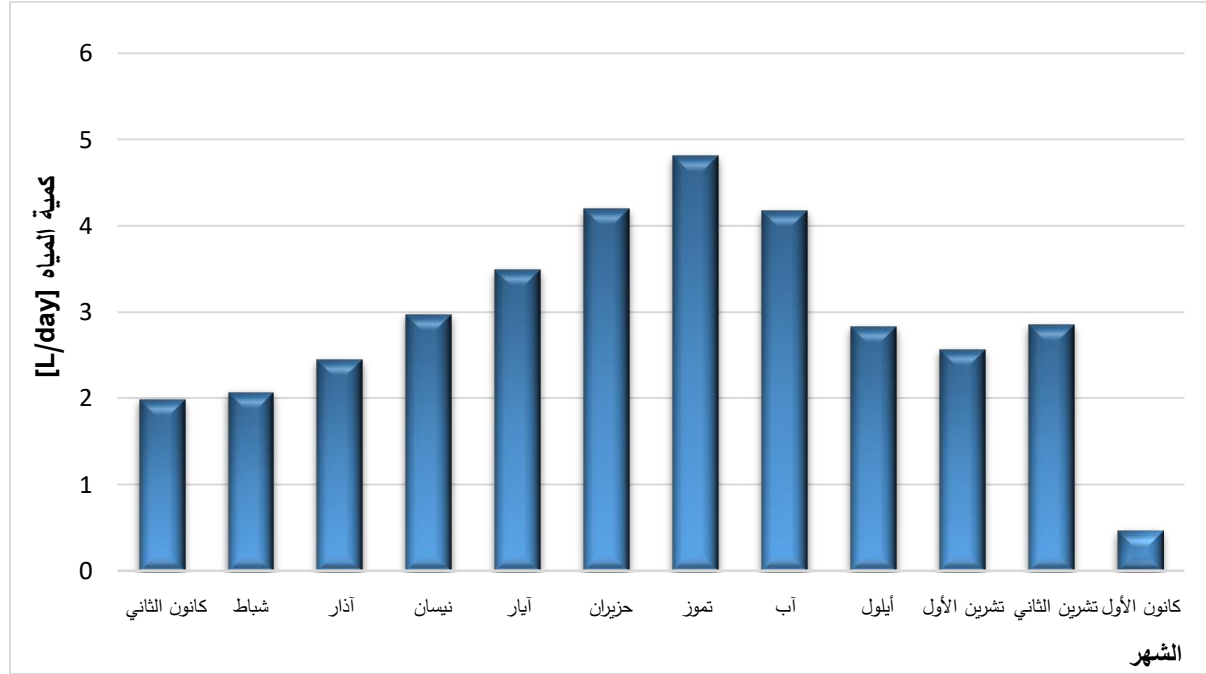


الشكل (18) متوسط درجة حرارة التبخر ومتوسط درجة حرارة التكاثف خلال التجارب

10.5 تقييم كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يبين الشكل (20) متوسط كمية المياه المقطرة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المقيسة خلال التجارب، حيث سجلت أعلى قيمة لكمية مياه المقطرة خلال شهر تموز بمتوسط [4.8 L/day] وهذا يعادل

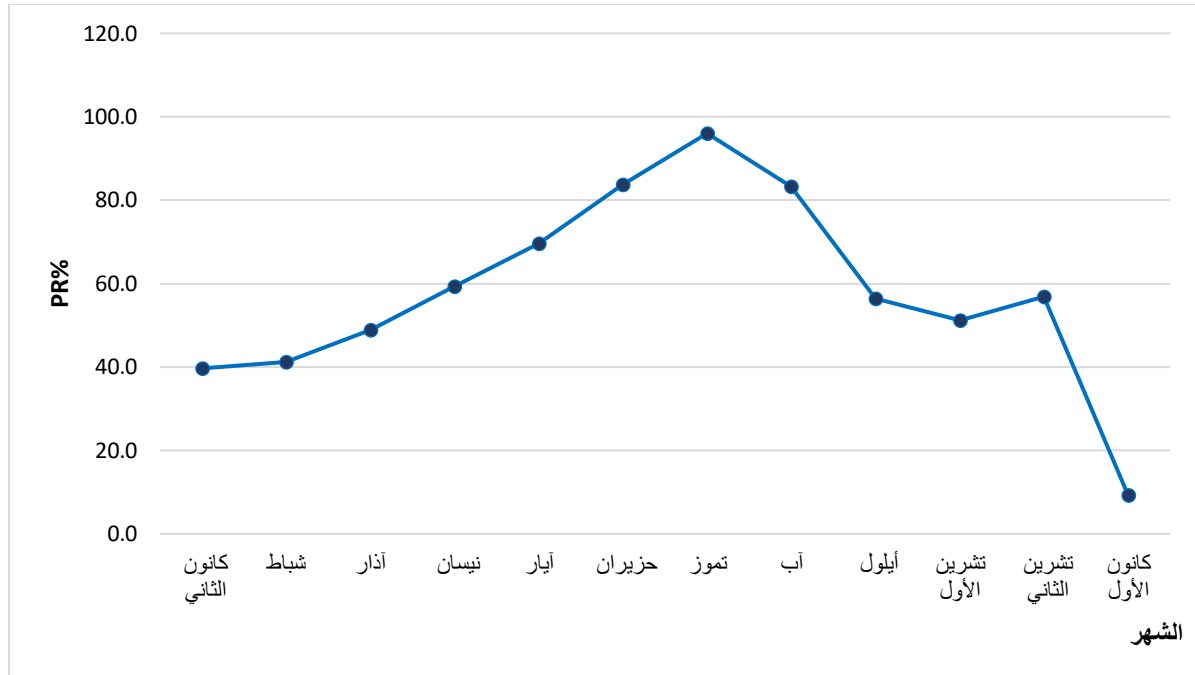
96% من القيمة التصميمية، وبلغ متوسط إنتاجيته خلال شهري حزيران وآب قيمة [L/day] 4.2 وهذا يعادل 84% من القيمة التصميمية، أما أقل قيمة لكمية المياه المقيسة كانت خلال شهر كانون الأول بمتوسط [L/day] 0.46 وذلك نتيجة للعوامل المناخية غير المناسبة.



الشكل (20) متوسط كمية المياه المقطرة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المقيسة خلال التجارب

11.5 نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

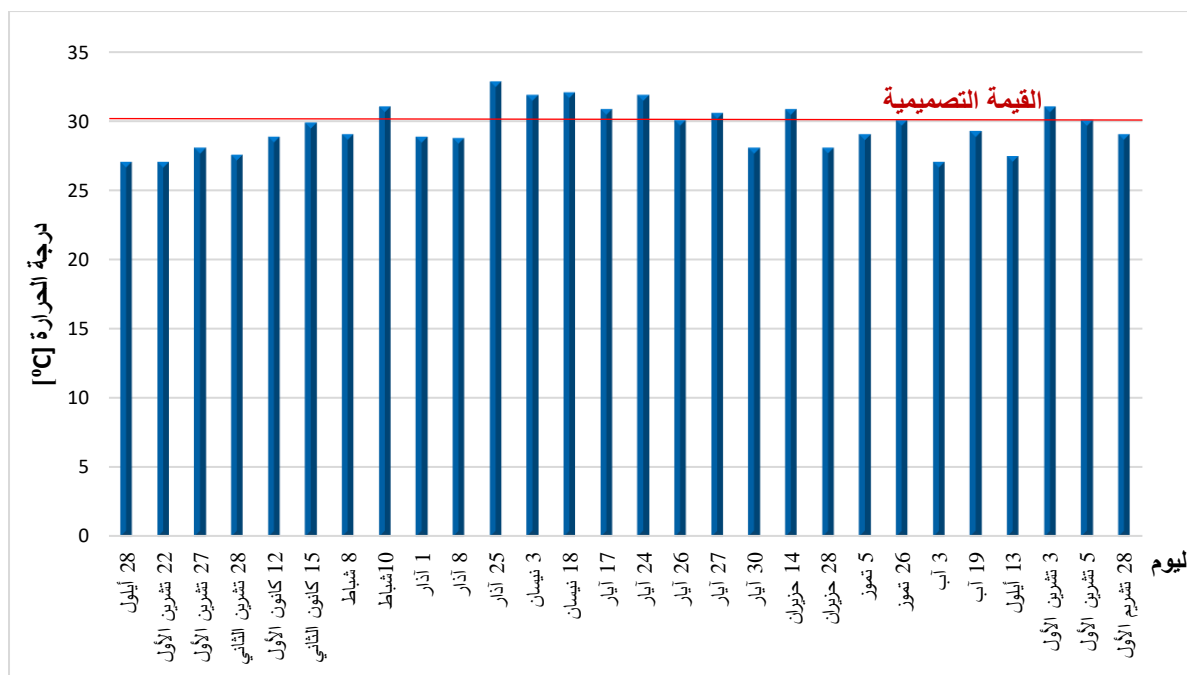
يظهر الشكل (21) نسبة الأداء الحراري P_R للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير خلال التجارب، حيث بلغت نسبة الأداء الحراري P_R في شهر تموز 96%، أما خلال شهري حزيران وآب بلغت 83%، كما بلغت أدنى P_R خلال شهر كانون الأول بنسبة 9.3%، حيث تباينت P_R تبعاً لاختلاف شدة الاشعاع الشمسي ودرجة حرارة الوسط المحيط وهذا يتفق مع ما توصل إليه (Abed et al., 2017).



الشكل (21) نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير خلال التجارب

12.5 تقييم كفاءة المبادل الحراري الإضافي:

يبين الشكل (22) متوسط درجة حرارة المياه المقطرة خلال التجارب، حيثراوح متوسط درجة حرارة المياه في خزان المكثف بين 27°C و 32°C خلال التجارب، وبالتالي توافقت القيمة التجريبية لدرجة حرارة التكاثف مع القيمة التصميمية، أي أن صفيحة المبادل الحراري الإضافي في خزان المكثف ساهمت في التحكم بدرجة حرارة المياه ضمن المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.

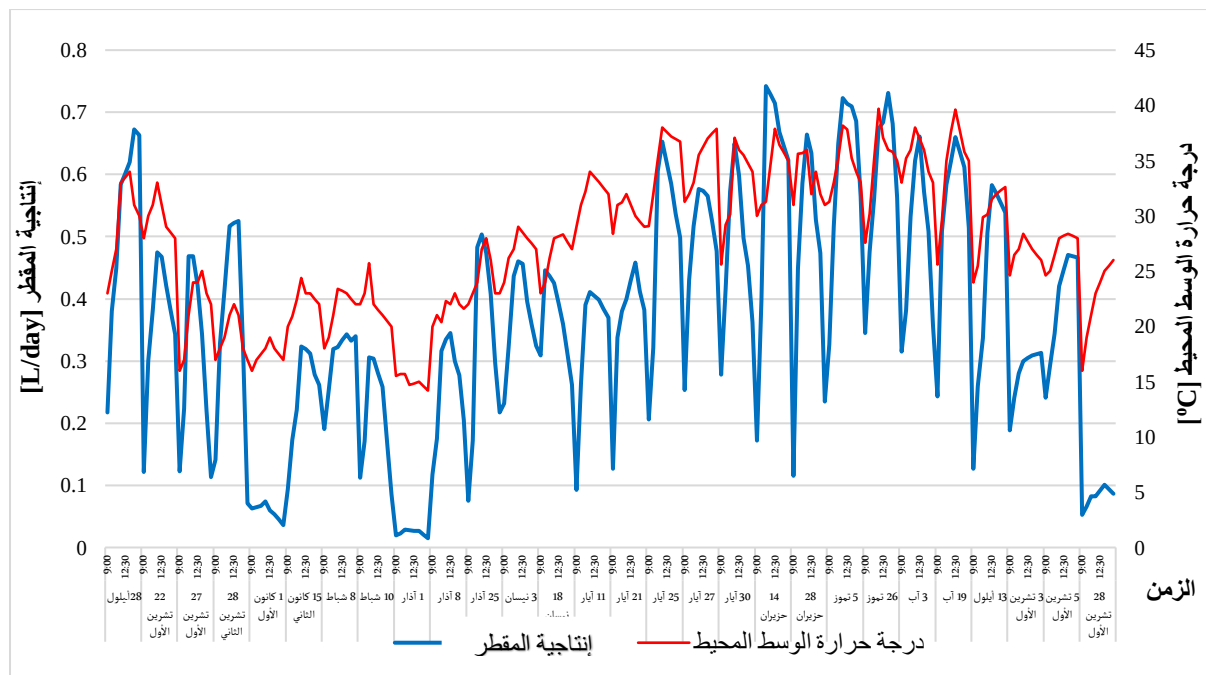


الشكل (22) متوسط درجة حرارة المياه المقطرة خلال التجارب

13.5 تأثير العوامل المناخية في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

1.13.5 تأثير درجة حرارة الوسط المحيط في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

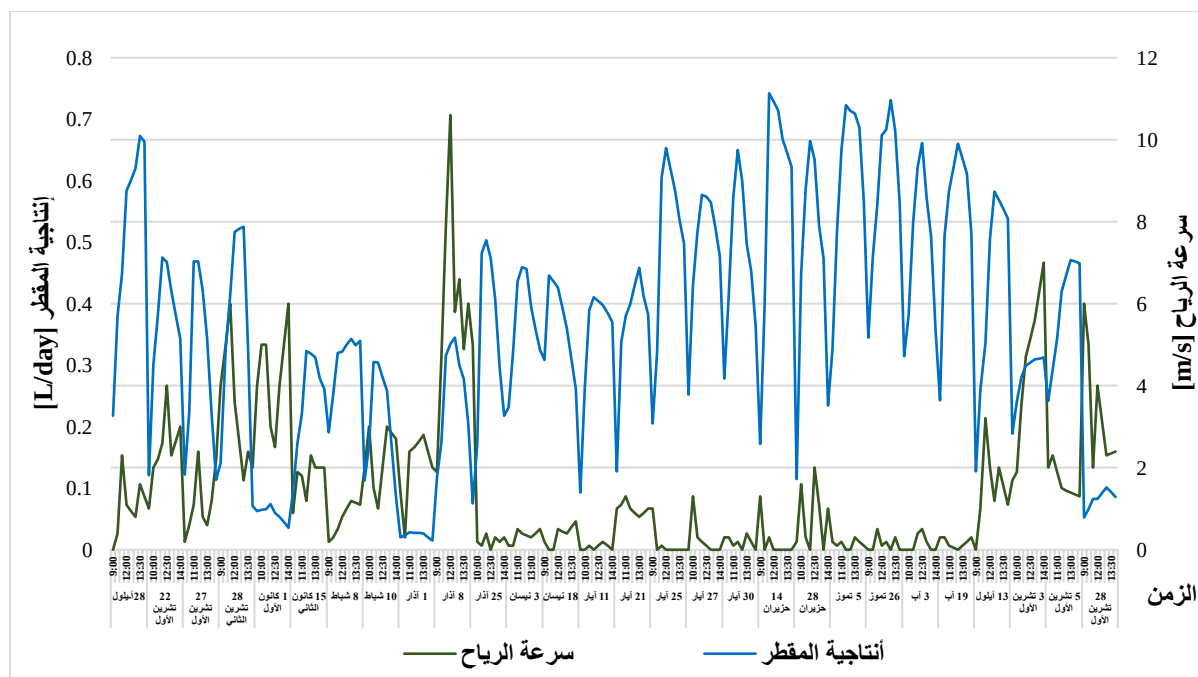
يبين الشكل (23) درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير، حيث بلغت أعلى إنتاجية للمقطر عند متوسط درجة حرارة تتراوح بين 29.7 و 35.3 $^{\circ}\text{C}$ ، وهي أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط التصميمية 25 $^{\circ}\text{C}$ ، أما بالنسبة للأيام التي انخفضت فيها درجة حرارة الوسط المحيط عن درجة الحرارة التصميمية كان هناك انخفاض كبير في إنتاجية المقطر الشمسي، وبالتالي هناك تأثير مهم لدرجة حرارة الوسط المحيط على إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث أثرت درجة حرارة الوسط المحيط بشكل مباشر على أداء اللاقط الشمسي المسطح نتيجة لانخفاض معدل التبادل الحراري بالحمل داخل اللاقط.



الشكل (23) درجة حرارة الوسط المحيط المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير

2.13.5 تأثير سرعة الرياح في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

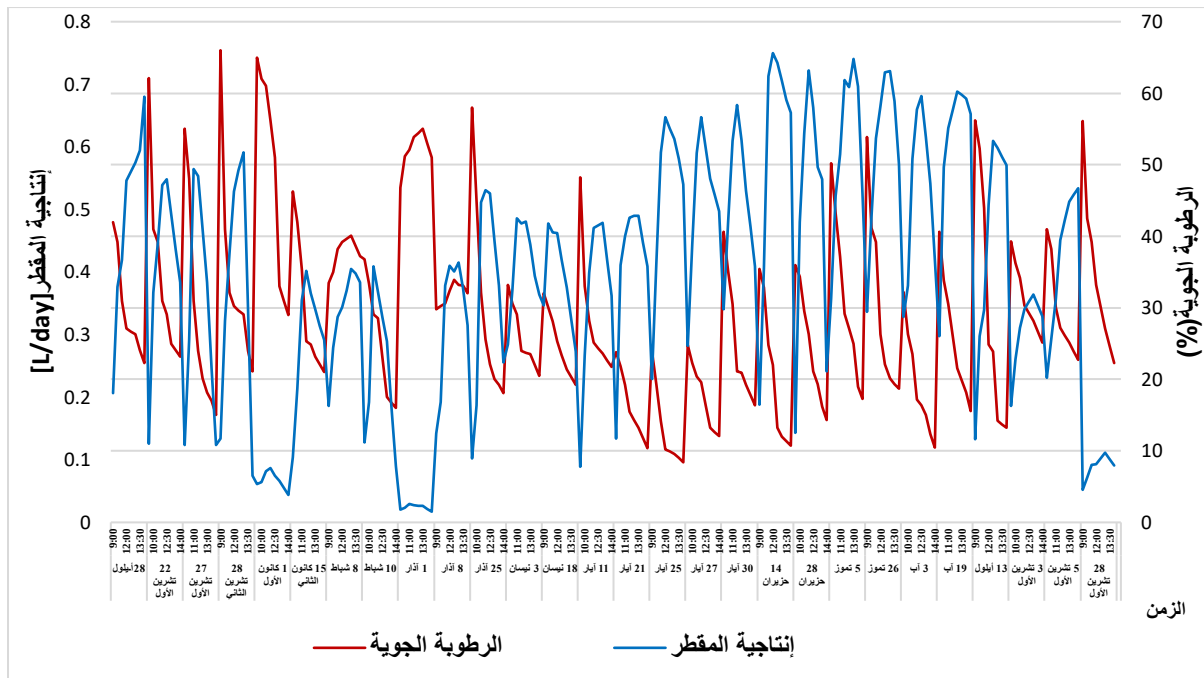
يبين الشكل (24) سرعة الرياح المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من المياه المقطرة المقيسة كتابع لزمن التقطير، حيث تراوح متوسط سرعة الرياح خلال أيام التجارب بين 0.3 و 6 [m/s]، وبالتالي لم يُلاحظ تأثير لسرعة الرياح خلال التجارب على إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.



الشكل (24) سرعة الرياح المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمن التقطير

3.13.5 تأثير الرطوبة الجوية في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

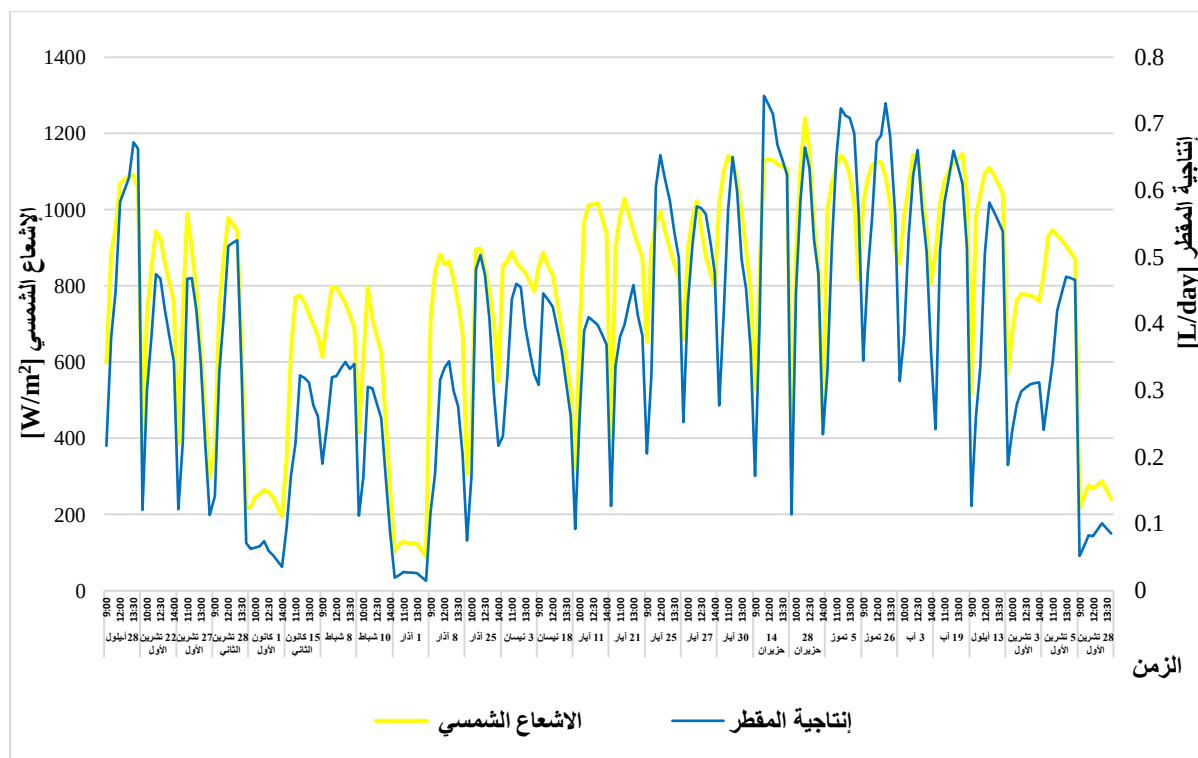
يبين الشكل (25) الرطوبة الجوية وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من المياه المقطرة المقيسة كتابع لزمن التقطير، حيث تناقصت قيمة الرطوبة بشكل تدريجي بين بداية ونهاية كل تجربة، كما لم يُلاحظ تأثير للرطوبة الجوية على إنتاجية المقطر، عدا الأيام التي زاد فيها متوسط أعلى رطوبة جوية عن 51% حيث انخفضت إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير نتيجة لانخفاض درجة حرارة تشبع الهواء داخل اللاقط الشمسي المسطح وهذا يتوافق مع ما أشار إليه (koffi et al., 2009) في تجربته حول المقطر الشمسي السلبي.



الشكل (25) الرطوبة الجوية المقيسة وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع التقطير

4.13.5 تأثير شدة الإشعاع الشمسي في كفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يبين الشكل (26) شدة الإشعاع الشمسي المُسجلة خلال فترة التجارب ومنحني إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من المياه المقطرة المقيسة كتابع لزمن التقطير، حيث بلغت ذروة الإشعاع الشمسي بين الساعة 12:00 والساعة 13:00 ظهراً، ورافق ذلك زيادة في كمية المياه المقطرة، وقد سجلت أعلى إنتاجية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير خلال الأشهر (حزيران، وتموز، وآب وأيلول) التي تراكمت مع زيادة شدة الإشعاع الشمسي حيث راح متوسط شدة الإشعاع الشمسي بين 976.9 و 1065 $[W/m^2]$ وتوافقت هذه القيمة مع القيمة التصميمية، لذلك فإن للإشعاع الشمسي تأثير طردي على زيادة إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وعلى كفاءة اللاقط الشمسي المسطح وهذا يتفق مع ما توصل إليه (Santos et al., 2017).

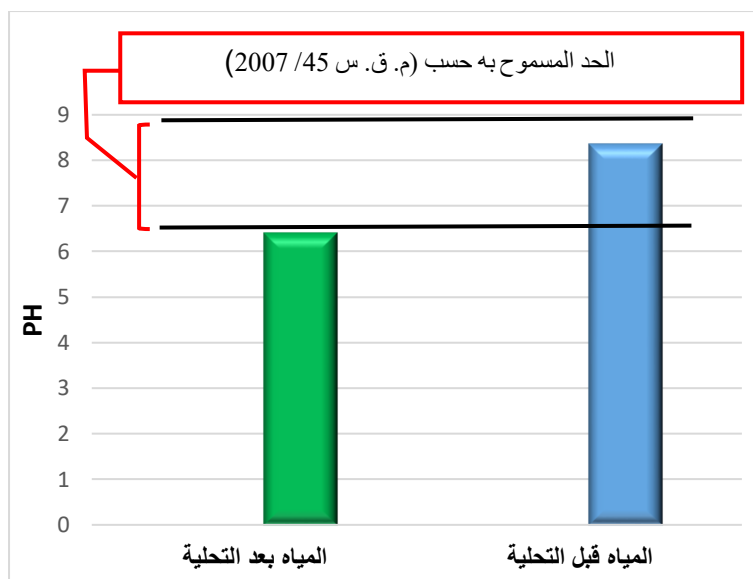


الشكل (26) الإشعاع الشمسي وإنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير كتابع لزمان التقطير

14.5 تقييم تأثير التحلية بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في نوعية المياه:

1.14.5 تقييم أثر التحلية في الرقم الهيدروجيني PH للمياه:

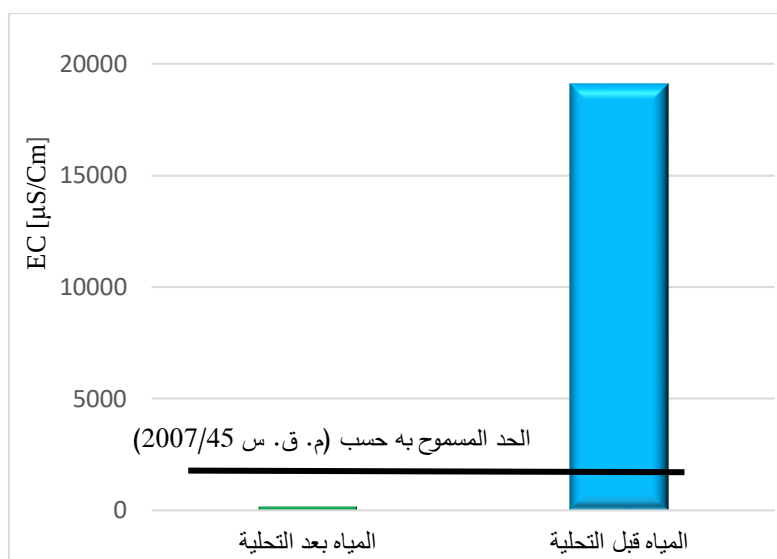
يبين الشكل (27) متوسط الرقم الهيدروجيني PH للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث بلغت قيمة متوسط PH للمياه قبل التحلية 8.37 أما بعد التحلية 6.39 وهي ضمن الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007/45)، حيث ساهمت عملية التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في خفض PH للمياه بنسبة 23.6% وهي أعلى من النسبة التي حققتها طريقة تحلية المياه بمقطر صندوقي كما توصل (Abdel-Salam, 2019).



الشكل (27) متوسط الرقم الهيدروجيني PH للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007/45)

2.14.5 تقييم أثر التحلية في الناقلية الكهربائية EC للمياه:

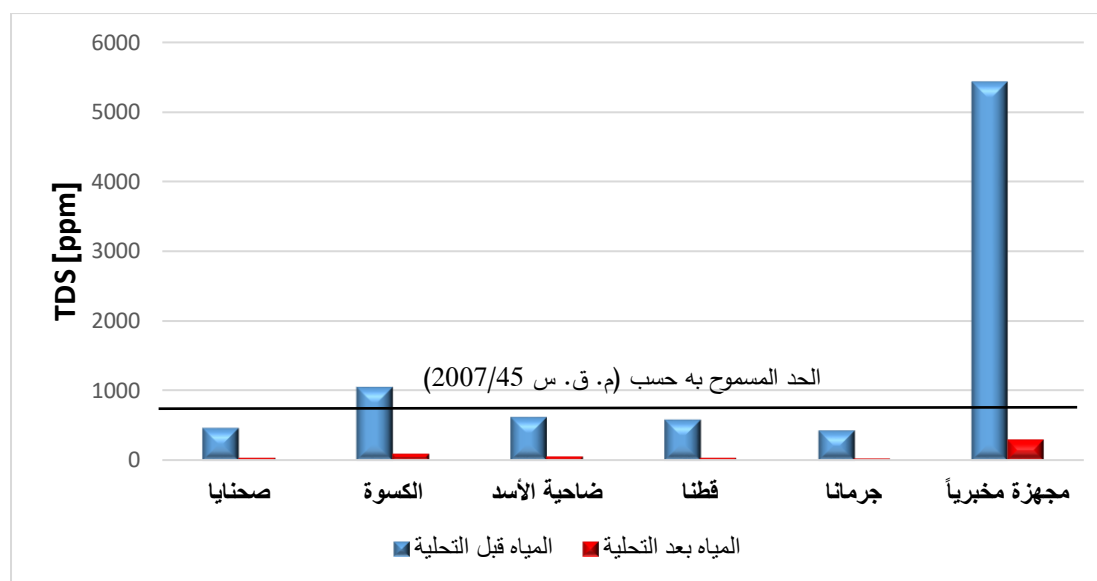
يبين الشكل (28) متوسط الناقلية الكهربائية (EC) للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007 / 45)، حيث بلغت قيمة متوسط EC للمياه قبل التحلية $19100 \mu\text{S}/\text{Cm}$ أما بعد التحلية $169.6 \mu\text{S}/\text{Cm}$ وتوافقت هذه القيمة مع الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007 / 45)، حيث ساهمت عملية التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في خفض الناقلية الكهربائية EC للمياه بنسبة 99%، وهذا يتفق مع الدراسة التي قدمها (Hoque and Abir, 2019).



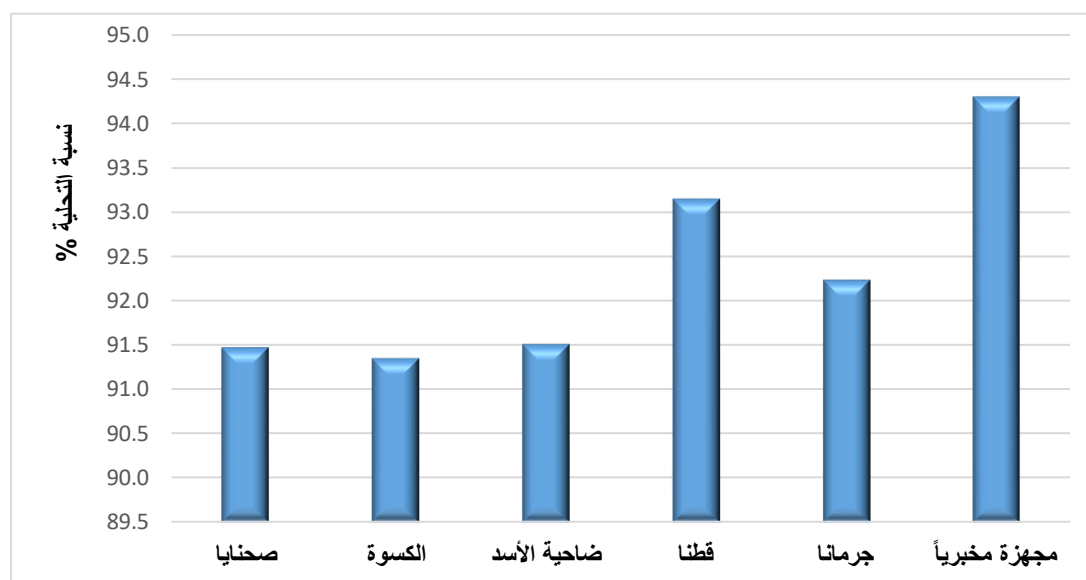
الشكل (28) متوسط الناقلية الكهربائية (EC) للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007/45)

3.14.5 تقييم أثر التحلية في مجموع المواد الصلبة المنحلة TDS في الماء :

يبين الشكل (29) متوسط مجموع المواد الصلبة المنحلة (TDS) في الماء قبل وبعد التقطير باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير حسب مصدر المياه المستخدم في التجربة مقارنة مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007/45)،، حيثراوح متوسط TDS في المياه بعد التحلية [ppm] بين 33 و288، وهي ضمن الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007/45)، ويبين الشكل رقم (30) نسبة تحلية المياه المالحة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث ساهمت تحلية المياه بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في خفض TDS في المياه وراوحت نسبة التخفيض بين 91.4 و94.3 بمتوسط قدره 92.3%.



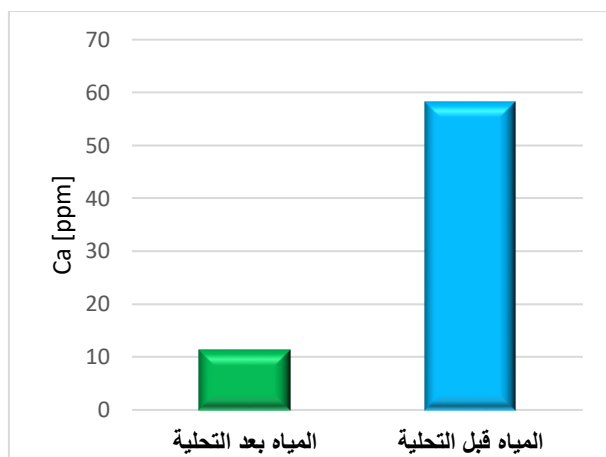
الشكل (29) متوسط مجموع المواد الصلبة المنحلة (TDS) في الماء قبل وبعد التقطير حسب مصدر المياه المستخدم في التجربة



الشكل (30) نسبة تحلية المياه المالحة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

4.14.5 تقييم أثر التحلية في تركيز الكالسيوم (Ca) في الماء :

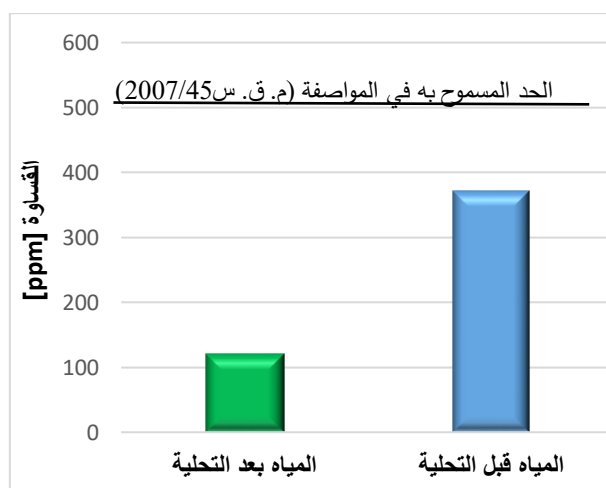
يبين الشكل (31) متوسط تركيز الكالسيوم (Ca) في الماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث بلغت قيمة متوسط (Ca) في الماء قبل التحلية 58.25 [ppm] أما بعد التحلية فبلغت 11.3 [ppm]، أي أنّ تحلية الماء بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ساهمت في خفض تركيز (Ca) في المياه بمتوسط 80.6%.



الشكل (31) متوسط تركيز الكالسيوم Ca للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

5.14.5 تقييم أثر التحلية في القساوة TH للماء :

يبين الشكل (32) متوسط القساوة (TH) للماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنةً مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007/45)، حيث بلغت قيمة متوسط TH في الماء قبل التحلية 732 [ppm] أما بعد التحلية 120 [ppm]، وهي ضمن الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007/45)، أي أنّ تحلية الماء بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ساهمت في خفض القساوة TH في الماء بمتوسط 67.7%.

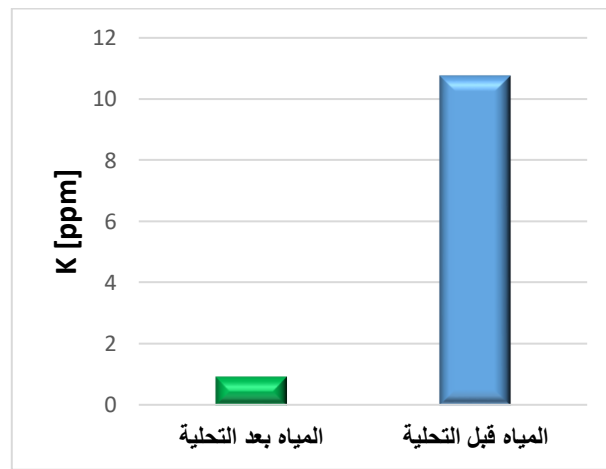


الشكل (32) متوسط TH للماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنةً مع الحد المسموح به

وفق (م. ق. س 2007/45)

6.14.5 تقييم أثر التحلية في تركيز البوتاسيوم K للماء :

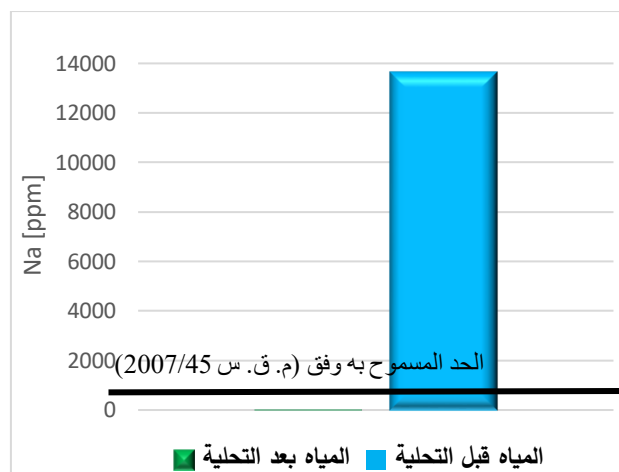
يبين الشكل (33) متوسط تركيز البوتاسيوم (K) للماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث بلغت قيمة متوسط K في الماء قبل التحلية [ppm] 10.75 أما بعد التحلية فبلغت [ppm] 0.9، أي أنّ تحلية الماء بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ساهمت في خفض تركيز K في الماء بنسبة 91.6%.



الشكل (33) متوسط تركيز K للمياه قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

7.14.5 تقييم أثر التحلية المياه في تركيز الصوديوم Na للماء :

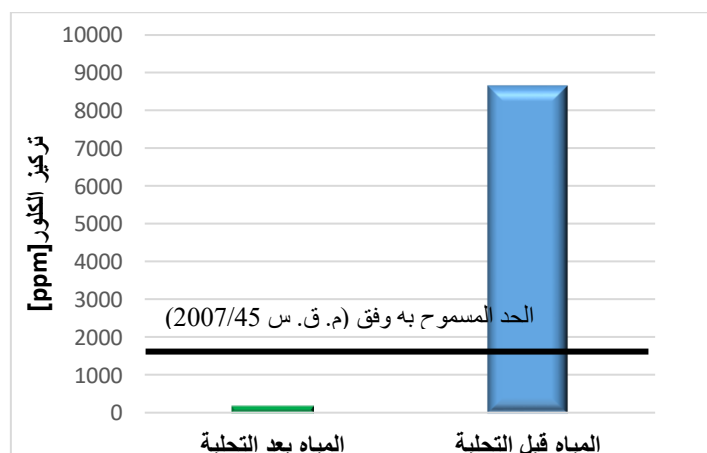
يبين الشكل (34) متوسط تركيز الصوديوم Na في الماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 45 / 2007)، حيث بلغت قيمة متوسط الصوديوم في الماء قبل التحلية [ppm] 13650 أما بعد التحلية فبلغت [ppm] 6.2، وهي ضمن الحد المسموح به حسب (م. ق. س 45 / 2007)، أي أنّ تحلية الماء بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ساهمت في خفض تركيز الصوديوم Na في الماء بنسبة 100%.



الشكل (34) متوسط تركيز Na للماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007/45)

8.14.5 تقييم أثر التحلية في تركيز الكلور CL للمياه:

يبين الشكل (35) متوسط تركيز الكلور (CL) في الماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007 /45)، حيث بلغت قيمة متوسط CL في المياه قبل التحلية 8650 [ppm] وبعد التحلية فبلغت 159.5 [ppm]، وهي ضمن الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007 /45)، أي أنّ تحلية الماء بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ساهمت في خفض تركيز Cl في الماء بنسبة 98.2%.



الشكل (35) متوسط تركيز CL للماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مقارنة مع الحد المسموح به ضمن (م. ق. س 2007/45)

9.14.5 تقييم أثر التحلية في المواصفات الجرثومية للمياه:

يبين الجدول (8) مقارنة النوعية الجرثومية في الماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع الحد المسموح به وفق (م. ق س 2007/45)، حيث لوحظ أن أعداد القولونيات الكلية والايشريشيا كولي والتعداد العام في الماء بعد التحلية ضمن الحد المسموح به حسب (م. ق. س 2007/45)، حيث ساهمت تحلية الماء بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في تحسين نوعية المياه الجرثومية وبالتالي أصبح الماء صالحاً للاستهلاك.

الجدول (8) مقارنة النوعية الجرثومية في الماء قبل وبعد التحلية باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع الحد

المسموح به وفق (م. ق س 2007/45)

الحد المسموح به وفق (م. ق. س 2007/45) [مستعمرة / mL 100]	المياه بعد التحلية [مستعمرة / mL100]	المياه قبل التحلية [مستعمرة / mL100]	القرينة التحليلية
0	0	إيجابي	القولونيات الكلية
0	0	إيجابي	الايشريشيا كولي
200	0	10000	التعداد العام

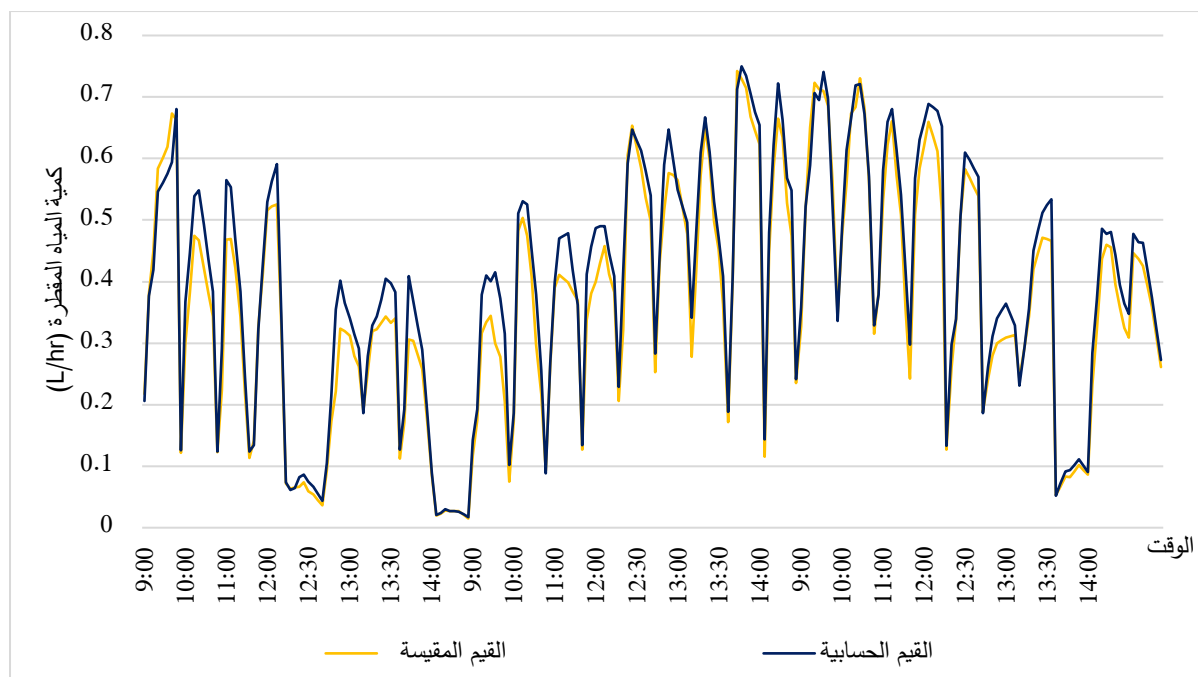
الفصل السادس: التحليل الإحصائي

1.6 مقارنة الإنتاجية النظرية مع الإنتاجية التجريبية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي

التأثير:

يبين الشكل (36) مقارنة بين كمية المياه المقطرة باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المقيسة مع كمية المياه المحسوبة نظرياً كتابع لزمن التقطير، حيث تبين وجود تقارب كبير بين القيم، ويبين الجدول (9) نتائج التحليل الإحصائي لتقييم النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع النموذج التجريبي، حيث بلغ معامل ارتباط بيرسون r ومعامل ناش ساتكليف EF ومعامل يلموت d قيمة قريبة من 1 وهذا يدل على توافق تام بين النموذجين، كما بلغ جذر متوسط مربع الخطأ $RMSE$ قيمة 0.04 وهي قريبة من الصفر ويشير ذلك لأداء جيد للنموذج التصميمي وقد بلغ جذر متوسط مربع الخطأ المعايير $NRMSE$ قيمة تتراوح بين 10-20% و يدل ذلك على تقييم جيد للنموذج.

أكدت النتائج أنّ محاكاة النموذج النظري التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع النموذج التجريبي عالية الدقة، لذلك فإن الدراسة التجريبية توافقت مع الدراسة النظرية التي قدمها البحث، وأنّ المعطيات المفروضة التي تمّ تصميم المقطر على أساسها كانت مناسبة للحصول على كمية المياه المطلوبة، لذلك يُعد حجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المصمم لهذا البحث وسيلة مناسبة للحصول على كمية المياه المراد الحصول عليها.



الشكل (36) مقارنة كمية المياه المقطرة المقيسة مع كمية المياه المحسوبة كتابع لزمن التقطير

الجدول (9) نتائج التحليل الإحصائي لتقييم النموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع النموذج التجريبي

المؤشر الإحصائي	الرمز	القيمة	التقييم
معامل ارتباط بيرسون	r	0.99	جيد جداً
جذر مربع الخطأ	$RMSE$	0.04	جيد جداً
جذر متوسط مربع الخطأ المعايير	$NRMES$	11.5	جيد
معامل ناش ساتكليف	EF	0.95	جيد جداً
مؤشر يلموت	D	0.99	جيد جداً

2.6 تأثير بعض العوامل المدروسة في إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يبين الجدول (10) معامل الارتباط بين إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وعددٍ من العوامل، حيث سُجل أعلى معامل ارتباط بين الإنتاجية وشدة الإشعاع الشمسي وبلغت قيمته 0.91 وهو معامل ارتباط قوي فكلما ازدادت شدة الإشعاع الشمسي زادت الإنتاجية وهذا يتفق مع ما توصل له (Huang et al., 2014)، كما بلغ معامل الارتباط بين درجة حرارة التكاثف داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير والإنتاجية 0.82 حيث ارتبط التكاثف بالحرارة التي استطاع المبادل الحراري الإضافي تأمينها، كما بلغ معامل الارتباط بين إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير ودرجة حرارة الوسط المحيط 81%، كما كان هناك ارتباط متوسط مع درجة حرارة اللاقط الشمسي المسطح الذي ارتبطت كفاءته بالظروف المناخية التي اختلفت على مدار العام.

بلغ معامل الارتباط بين إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وسرعة الرياح -0.43 وهو ارتباط ضعيف حيث لم تؤثر سرعة الرياح على الإنتاجية عدا الأيام التي ساهمت فيها الرياح بتبريد صفيحة المبادل الحراري الإضافي. بلغ معامل الارتباط بين إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير والرطوبة الجوية -0.59 وهو ارتباط ضعيف حيث لم تؤثر الرطوبة الجوية على الإنتاجية.

الجدول (10) تأثير العوامل المدروسة على إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

معامل الارتباط	تأثير العامل المدروس على إنتاجية المقطر
0.64	درجة الحرارة عند مدخل اللاقط الشمسي المسطح
0.68	درجة الحرارة عند مخرج اللاقط الشمسي المسطح
0.76	درجة الحرارة عند مدخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير
0.82	درجة الحرارة عند مخرج المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير
0.74	درجة حرارة التبخر داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير
0.82	درجة حرارة التكاثف داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير
0.81	درجة حرارة الوسط المحيط
0.91	الإشعاع الشمسي
-0.59	الرطوبة الجوية
-0.43	سرعة الرياح

الفصل السابع: الجدوى الاقتصادية

1.7 دراسة الجدوى الاقتصادية للنموذج التصميمي للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير:

يبين الجدول (11) تكاليف المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح حيث بلغت التكلفة التأسيسية للاقط الشمسي المسطح [S.P] 2,270,000، بينما بلغت التكلفة التأسيسية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير [S.P] 2,823,000، في حين بلغت تكلفة الطاقة والتشغيل 1,520,152 [S.P]، وبالتالي بلغت التكاليف الكلية السنوية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح 6,613,152 [S.P].

الجدول (11) تكاليف المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير

المكونات	التكلفة التأسيسية للجهاز [S.P]	تكلفة التشغيل والطاقة [S.P]
اللاقط الشمسي المسطح	2,270,000	1,520,152
المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير	2,823,000	
التكلفة الكلية للجهاز [S.P]	6,613,152	

بلغت كمية المياه التي ينتجها المقطر سنوياً [L] 1055 خلال 1800 ساعة تشغيل في السنة، وبالتالي تكلفة إنتاج اللتر الواحد من الماء المقطر بالنسبة للتكلفة الكلية للجهاز هي [S.P] 1240، وبمقارنة تكلفة إنتاج لتر من المياه باستخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير مع سعر المياه المعدنية في السوق المحلية التي تبلغ [S.P] 2500، فالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير حقق توفير مقداره [S.P] 1260 للتر الواحد، وبالتالي التوفير في تكلفة كمية المياه المنتجة خلال العام هو [S.P] 1,330,135، إذاً فنسبة الربح التي يحققها المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير من إنتاجيته للماء المقطر بالنسبة لتكلفته الكلية هي 50%.

الفصل الثامن: الخاتمة

1.8 الاستنتاجات:

- أسهم البحث في إعداد خوارزمية تصميم مقطر شمسي عمودي انتشاري أحادي التأثير مزود بلاقط شمسي مسطح بلغت إنتاجيته التصميمية $[5 \text{ L/day}]$ وفقاً لنموذج رياضي أعد لهذا النوع من المقطرات.
- أسهم البحث في تحديد حجم المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المناسب لتأمين الإنتاجية التصميمية للمياه التي بلغت $[5 \text{ L/day}]$ حيث بلغ $[0.25 \text{ m}^3]$.
- ساهم اللاقط الشمسي المسطح في رفع درجات الحرارة داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير، حيث بلغ متوسط كفاءة اللاقط الشمسي المسطح 70% في معظم التجارب عدا الأيام التي كان فيها الجو غائماً.
- لم تصل درجة حرارة التبخر في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير لدرجة حرارة الغليان ولكن كانت كافية لحدوث التبخر، حيث ساهم ذلك في عدم حدوث ترسبات كلسية داخل المقطر وهذا ما انعكس على تقليل تكاليف الصيانة للمقطر.
- أظهرت الدراسة أنّ اللاقط الشمسي المسطح وسيلة مناسبة لتأمين الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة الحرارة في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.
- بلغ متوسط كمية المياه المقطرة في شهر تموز $[4.8 \text{ L/m}^2]$ وهذا يعادل 96% من القيمة التصميمية، وبلغ متوسط إنتاجيته خلال شهري حزيران وآب قيمة $[4.2 \text{ L/m}^2]$ وهذا يعادل 84% من القيمة التصميمية.
- بلغت نسبة الأداء الحراري للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في شهر تموز 96%، وخلال شهري حزيران وآب 83%، كما بلغت أدنى قيمة خلال شهر كانون الأول 9.3%.
- بلغ أعلى متوسط لكفاءة المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير 93.8% خلال شهر تموز، كما سجل متوسط الكفاءة خلال شهري تموز وآب 81.2%، وكانت أقل قيمة لمتوسط الكفاءة 3.7% في الأيام التي كانت فيها الطقس غائماً.

- أسهم المبادل الحراري الإضافي في التحكم بدرجة الحرارة ضمن خزان المكثف في المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.
- بينت الدراسة أن انخفاض درجة حرارة الوسط المحيط عن القيمة التصميمية $[25^{\circ}\text{C}]$ أثرت على إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بشكل عكسي، أما سرعة الرياح والرطوبة الجوية لم تسجل أي تأثير على إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.
- سجلت أعلى إنتاجية للمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير خلال الأشهر (حزيران، وتموز، وآب وأيلول)، فلإشعاع الشمسي تأثير طردي على زيادة كفاءة اللاقط الشمسي المسطح وبالتالي إنتاجية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير.
- ساهمت عملية تحلية المياه بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في تحسين نوعية المياه بالنسبة لبعض المواصفات الفيزيائية والكيميائية لتصبح ضمن الحدود المسموح في ضمن المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م.ق.س 2007/45).
- تصلح طريقة تحلية المياه بالمقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير باستخدام اللاقط الشمسي المسطح للحصول على مياه مطابقة للحدود المسموح بها ضمن المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م.ق.س 2007/45)، وذلك من خلال خفض قيم التعداد العام وتعداد بكتيريا الكوليفورم والاشريشيا كولي وجعلها صالحة للشرب وذلك خلال 5 [ساعات].
- بينت الدراسة أن المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير المزود بلاقط شمسي مسطح وسيلة بسيطة التصميم وذات تكلفة اقتصادية مقبولة بلغت $[6,613,152 \text{ S.P}]$.

2.8 التوصيات والمقترحات:

1. متابعة العمل التجريبي بتزويد المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بجهاز تسخين إضافي من أجل استمرارية العمل على مدار العام وذلك في الأيام الغائمة.
2. متابعة العمل التجريبي لتقييم فعالية المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير وذلك على أعماق مختلفة للمياه المالحة ضمن الخزان.
3. متابعة العمل التجريبي باستخدام أنابيب شمسية مفرغة كمصدر للطاقة الحرارية.
4. متابعة العمل التجريبي بتزويد المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير بخلايا شمسية وذلك لتأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل ضاغط اللاقط الشمسي.
5. دراسة تأثير إجراء عملية تفريغ للضغط داخل المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير على الإنتاجية.
6. متابعة العمل التجريبي والتحقق من جودة المياه المقطرة من حيث مواصفات أخرى ضمن المواصفة القياسية السورية.
7. يمكن استخدام المقطر الشمسي العمودي الانتشاري أحادي التأثير في المناطق التي تعاني من وجود مياه جوفية مالحة وذلك لتأمين المياه الصالحة للاستخدام المنزلي.
8. إمكانية الاستفادة من الطاقة الحرارية الضائعة في عمليات التبريد والتكييف باستخدام مضخة حرارية.

مراجع البحث

1. أحمد، صباح، وعباس، خليل. (2008). تحسين تقطير المياه باستخدام سخان ماء شمسي منزلي. مجلة الهندسة والتكنولوجيا. مج: 26. عدد: 5. صص: 263-272. بغداد: العراق.
2. الأسدي، جاسم، محمد، أحمد، وهاشم، عقيل. (2013). أنواع المقطرات الشمسية السلبية. مجلة أبحاث ميسان. مج: 9. عدد: 18. صص: 82-79. البصرة: العراق. جامعة البصرة.
3. اسلام، احمد مدحت. (1999). الماء سائل الحياة، خواصه تنقيته، تحليلته تلوثه في الوطن العربي - حرب المياه. ص: 195. دار الفكر العربي.
4. برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP). (2017). المبادئ التوجيهية المحدثة لمنع وتخفيف التلوث من أنشطة تحلية مياه البحر، مشروع القرار IG.23/13. تيرانا، ألبانيا 17-20 كانون الأول.
5. البنك الدولي. (2020). بيانات الإحصاءات المائية. مؤشرات التنمية في العالم. <https://data.albankaldawli.org>.
6. جبور، الياس. (2001). الجفاف، آثاره في الجمهورية العربية السورية وكيفية الحد منه. الزراعة والمياه بالمناطق الجافة في الوطن العربي. عدد 21. صص: 28-42. دمشق: سورية.
7. حبيب، سومر. (2016). دراسة تجريبية لتحسين أداء المقطر الانتشاري الشمسي. ماجستير. شعبة قسم هندسة القوى الميكانيكية. كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية، جامعة تشرين. اللاذقية: سورية. ص: 116.
8. الدباغ، تيسير، وفرج، أحمد بلحاج، (1997). الموارد المائية غير التقليدية-أهمية تطوير تقنية تحلية المياه ودورها في مواجهة شح المياه في الوطن العربي. ندوة مصادر المياه واستخداماتها في الوطن العربي.
9. جورج، رامي، ويونس، روان. (2019). تحسين إنتاجية المقطر الصندوقي الشمسي بإضافة لاقط شمسي مسطح تجريبياً. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية سلسلة العلوم الهندسية. مج: 43. عدد: 1. صص: 498-499. اللاذقية: سورية. جامعة تشرين.

10. رشيدة، ذوادي. (2010). دراسة مقطر شمسي ذي مكثف مظلّل جزئياً بفعل الاحتباس الحراري الشمسي في المناطق القاحلة. ماجستير. كلية العلوم والتكنولوجيا وعلوم المادة-جامعة قاصدي مرباح بورفلة. قسم علوم المادة. الجزائر. ص: 83.
11. السيد، مصطفى، فتحي، قدری، ومجاهد، إبراهيم. (1994). النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية. ص: 725. مركز النشر العلمي، جامعة الملك عبد العزيز. جدة.
12. شحود، محسن. (2018). تصميم حوض لتقطير المياه باستخدام الطاقة الشمسية. تقرير عن عمل تقني. ص: 15. هيئة الطاقة الذرية. الجمهورية العربية السورية.
13. عبد الكريم، رامي، وصندوق، عباس. (2014). استخدام الطاقات المتجددة في تقنيات التحلية والتناضح العكسي المغذى من الألواح الكهروضوئية. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية. مجلد: 30. عدد: 1. ص: 298-306. دمشق: سورية. جامعة دمشق.
14. عبد الله، بشار. (2017). تصميم وتصنيع نموذج تجريبي مطور لتحلية المياه بالطاقة الشمسية. ماجستير. قسم الطاقة. كلية الهندسة الميكانيكية. جامعة حلب. حلب: سورية. ص: 93.
15. العظمة، معن، والعجة، غسان. (2003). مبادئ تحلية المياه المالحة. ص: 232. المركز العربي للتعبير والترجمة والنشر.
16. عليوي، وسام حميد. (2015). تحسين إنتاجية المقطر الشمسي التقليدي أحادي التأثير مزدوج الميل بواسطة تعديل بسيط في التصميم. Journal of Engineering. مج: 21. عدد: 8. ص: 50-60. مركز التدريب والمعامل-الجامعة التكنولوجية. البصرة، العراق.
17. فارس، أمينة. (2016). أنظمة التسخين الشمسي. دمشق: سورية. منشورات جامعة دمشق، كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية. ص: 295.
18. فارس، أمينة. (2021). أنظمة التركيز الشمسي وتوليد الكهرباء. دمشق: سورية. منشورات جامعة دمشق، كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية. شعبة الطاقات المتجددة. ص: 275.

19. الفاو. (2021). العوامل الاجتماعية والاقتصادية للطلب على الأراضي والمياه.
20. الفاو. (2022). واقع وتحديات وفاق تحلية المياه في المنطقة العربية. ندوة 2022/10/22. المجلس الوزاري العربي المشترك للمياه والزراعة.
21. الكبة، الياس، وفاضل، سهيل، (1987). مبادئ الطاقة الشمسية وتطبيقاتها. ط: 3. ص: 277. دار الحداثة للطباعة والنشر.
22. المعالج، محمد، وبوقشة، صالح (2003). واقع وآفاق تحلية المياه في الوطن العربي ومدى إمكانية استخدام الطاقات المتجددة. ص: 61. جامعة الدول العربية، إدارة برامج العلوم والبحث العلمي.
23. منظمة الصحة العالمية. (2023). حقائق حول مياه الشرب. <https://www.who.int/ar/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
24. المنفود. محمد. (2023). دراسة مدى تداخل مياه البحر مع مياه الآبار الجوفية بمنطقة قصر الأخيار لليبيا.
- مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية. عدد: 4. ج: 2. ص: 1169-1178.
25. موسى، عدنان، وعبد الزهرة، حيان عبد الكريم، (2005). مبادئ التبريد والتكييف. عمان: الأردن. ص: 471. هيئة التعليم التقني.
26. هاشم، عقيل. (2012). المقطر الشمسي العمودي. مجلة أبحاث البصرة. عدد: 38. ج: 3. ص: 16-25. البصرة: العراق. <http://www.basra-sciencejournal.org>.
27. هائل، أحلام. (2018). دراسة التحويل الحراري عبر زجاج المقطر الشمسي. ماجستير أكاديمي. شعبة قسم الفيزياء. كلية العلوم الدقيقة. جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي. الجزائر. ص: 77.
28. هيئة المواصفات والمقاييس العربية السورية. (2007). المواصفة القياسية السورية المعدلة لمياه الشرب رقم 45/. وزارة الصناعة، دمشق، سورية.
29. الياسري، حسين قاسم. (2022). واقع تحلية المياه في دول الخليج العربي دراسة في جغرافية الموارد المائية. مجلة القادسية للعلوم الإنسانية. مج: 25. عدد: 2. ص: 835-876.

30. اليونيسف. (2022). الجمهورية العربية السورية، تأثير الوصول إلى الكهرباء على الاحتياجات الإنسانية.

ورقة عمل مكتب اليونيسف في سورية بالتعاون مع مديرية مياه الشرب في وزارة الموارد المائية.

31. Abdel-Salam, M. F. (2019). Improving the productivity of solar still by using tilted wick. **Biological Engineering**. Vol: 36. No: 1. P-P: 357-374. Ain Shams: Egypt. Faculty of Agriculture. Ain Shams University.
32. Abdullah, A. S. (2013). Improving the performance of stepped solar still. **Desalination**. Vol: 319. P-P: 60-65. Tanta: Egypt. Faculty of Engineering, Tanta University.
33. Abed, F. M, Kassim, M. S, and Rahi1, M. R. (2017). Performance improvement of a passive solar still in a water desalination. **International Journal of Environmental Science and Technology**. Vol: 14. I: 6. P-P: 1277-1284. Iraq.
34. Ahsan, A., Syuhada, N. A., Jolhi, E. and Darain K. M. (2014). Assessment of Distillate Water Quality Parameters Produced by Solar Still for Potable Usage. Fresenius environmental bulletin. Vol: 23. No: 3a .P-P: 859-866.
35. Ahsan, A., Syuhada, N. A., Jolhi, E. and Darain K. M. (2014). Assessment of Distillate Water Quality Parameters Produced by Solar Still for Potable Usage. **Fresenius environmental bulletin**. Vol: 23. No: 3a .P-P: 859-866. Malaysia.
36. APHA. (1998). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. APHA/WWA-WEF, Washington DC.
37. Buurman, P., Van Langer, B., and Velthrost, E. J. (1996). **Manual for Soil and Water Analysis Backhuys Publishers**, Leiden, The Netherland.
38. Chandak, A., Somani, S. K., and Deepak D. (2009). Design, development and testing of multi effect distiller/evaporator using scheffler solar concentrators. **Journal of Engineering Science and Technology**. Vol: 4. No: 3. P: 9. School of Engineering, Taylor's University College. India.
39. Cooper, P.I, and Appleyard, J. A. (1967). The construction and performance of a three effect, wick-type, tilted solar still. **Sun at Work**. Vol: 12. P-P: 4-8.
40. Curto, D, Franzitta, V, and Guercio, A. (2021). A Review of The Water Desalination Technologies. **Applied Sciences**. Vol: 11. P: 670.
41. Dhyan, S., Chhonkar, P. K. and Pandey, R. N. (1999). **Soil, Plant and Water Analysis-Amethood Manual**. IARI. New Delhi.
42. Dunkle. R. (1961). Solar water distillation: the roof type still and a multiple-effect diffusion still. **Int. Dev, Heat Transf Americal Society of Mechanical Engineer Proceedings**. Vol: 5. P-P: 895-902. New York.

43. Eames, I. W., Maidment, G.G., Lalezari, A. K. (2007). A theoretical and experimental investigation of a small-scale solar-powered barometric desalination system. **Applied Thermal Engineering**. Vol: 27. I: 11-12. P-P: 1951-1959.
44. Elsayed, M., Fathalah, K., Shams, J., and Sabbagh, J. (1984). Performance of Multiple. Effect Diffusion Stills. **Desalination**. Vol: 51. P-P: 183-199. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(84\)85005-5](https://doi.org/10.1016/0011-9164(84)85005-5).
45. El-Sebaei, A. A. (2000). Effect of wind speed on some designs of solar stills. **Energy Conversion and Management**. Vol: 41. No: 6. P-P: 523-538. Tanta University.
46. Flendrig, L.M., Shah, B., Subrahmaniam, N., Ramakrishnan, V. (2009). Low cost thermoformed solar still water purifier for D&E countries. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**. Vol: 34. I: 1-2. P-p: 50-54.
47. Hoque. A and Abir. A. (2019). Solar still for saline water desalination for low-income coastal areas. **Applied Water Science**. Vol: 9. No: 4. DOI: 10.1007/s13201-019-0986-9.
48. <https://GLOALSOLARATLAS.info/>
49. Huang, B. J., Chong, T. L., and Chang, H. S (2014). Solar Distillation System Based on Multiple-Effect Diffusion Type Still. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**. Vol: 2. I: 1. P-P: 41-50.
50. Kalogiro. S. (2009). **Solar energy engineering, processes and system**. 1sted. P: 756. Cyprus University of Technology
51. Kalogirou, S. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. **Progress in Energy and Combustion Science**. P: 242-281. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>
52. Koffi, B .K, Konan, D. K, N'guessan, R. K, Saraka, J. K, Tanoh. A, Kouacou, M. A, Z. Yeo, Koffi, M., and Koua, A. A. (2009)Modelling of Solar Still for Production of Pure Water in the Abidjan Zones. **Research Journal of Physics**. Vol: 3. P-P: 5-13.
53. Legates, D., and McCabe, G. (1999). Evaluating the Use of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. **Water Resources Research**, Vol: 35. No: 1. P-P: 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.
54. Mayere, abdualkarim. (2011). **Solar Power Desalination**. Phd Thesis. p: 199. University of Nottingham.
55. Morin, O. J. (1993). Design and Operating Comparison of MSF and MED Systems, **Desalination**. Vol: 93. P: 69.
56. Mouhoumed, E., Abdillahi Mohamed, M. and Ibrahim Igueh, A. (2022). Study of Different Parameters Affecting the Productivity of Solar Still for Seawater Desalination under

- Djiboutian Climate. **Energy and Power engineering** .Vol: 14. No: 6. P-P: 201-216. DOI: 10.4236/epe.2022.146011.
57. Santos, A., Hernández, E., and Ramírez, Z. (2017). Experimental Evaluation of a Single Slope Solar Still. **TECCIENCIA**. Vol: 12 .No: 22. P-P: 63.7.
58. Seleem, A., Mortada, M., ElMorsi, M., and Younan, M. (2015). Parametric Study of Vertical Diffusion Still for Water Desalination. **Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering**. Vol: 9. No: 2. P-P: 319-324. World Academy of Science.
59. Seleem, Amr. (2016). **Development of Vertical Diffusion Solar Still Utilizing Folded Sheets Technology**. Thesis Master. Mechanical Power Engineering. The American University in Cairo. P: 70.
60. Sharon, H., Reddy, K. S., and Gorjian, S. (2020). Parametric investigation and year round performance of a novel passive multi-chamber vertical solar diffusion still. **Energy, Exergy and enviro-Economic Aspects, Sol. Energy**. Vol: 211. P-P: 831-846. [https://DOI.org/10.1016/j.solener.2020.10.016](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.016).
61. Tanaka, H. (2009). Experimental Study of Vertical Multiple-Effect Diffusion Solar Still Coupled with Flat Plate Reflector. **Desalination**. Vol: 249. I: 1. P-P: 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.10.022>
62. Tanaka, H. and Nakatake, Y. (2004). A Vertical Multiple-Effect Diffusion-Type Solar Still Coupled With a Heat-Pipe Solar Collector. **Desalination**. Vol: 160, P-P: 195-205. DOI: 10.1016/S0011-9164(04)90009-4.
63. Tiwari G. N, Shyam A. T. (2016). **Handbook of Solar Energy Theory, Analysis and Applications**. p: 761. DOI: 10.1007/978-981-10-0807-8

ملاحق البحث

الملحق (1)

المواصفة القياسية السورية لمياه الشرب (م. ق. س 2007/45)

العنصر	الواحدة	الحد المسموح به	الحد الأقصى المسموح به
الرقم الهيدروجيني	-	6.5-9	أقل من 8 عند التعقيم بالكلور
الناقلية الكهربائية	μS	1500	2000
مجموع المواد الصلبة المنحلة	mg/L	900	1200
الملوحة	%	-	-
الكالسيوم	Ppm	-	-
البوتاسيوم	Ppm	-	-
الصوديوم	Ppm	200	300
الكلور	Ppm	300	500
القساوة	Ppm	500	700
القولونيات الكلية	(مستعمرة/ 100 mL)	0	
الاشريشيا كولي	(مستعمرة/ 100 mL)	0	
التعداد العام	(مستعمرة/ 100 mL)	200	



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الزراعية

قسم الهندسة الريفية

نمذجة وتقييم فعالية تحلية المياه المالحة بالطاقة الشمسية اعتماداً على نموذج

تصميمي لمقطر عمودي انتشاري أحادي التأثير

رسالة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة الزراعية

تخصص الهندسة الريفية

إعداد المهندسة: وداد علي أسعد

إشراف

المشرف المشارك

د. م. أمينة فارس

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

المشرف العلمي

د. م. إيهاب جناد

أستاذ مساعد في قسم الهندسة الريفية

كلية الهندسة الزراعية

جامعة دمشق

2024

**Syrian Arab Republic
Damascus University
Faculty of Agriculture
Department of Rural Engineering**



**Modeling and Evaluation the Effectiveness of Solar Saline
Desalination Based on Designed Model of Vertical Diffusion-Type
Still of Mono-effect**

**A dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the degree of
(Ph.D.) in Rural Engineering**

by

Wedad Ali Asaad

Supervision

Supervisor

Dr. Ihab Jnad

Assistant Professor

Department of Rural Engineering

Faculty of Agriculture Engineering

Damascus University

Co-supervisor

Dr. Amina Fares

Assistant Professor

Department of General Mechanics

**Faculty of Mechanical and
Electrical Engineering**

Damascus University

2024

Abstract:

This research has carried out in the department of rural engineering at faculty of agricultural engineering- Damascus university during years 2020-2021 with the aim of designing and evaluating effectiveness of a single-effect diffusion vertical solar still equipped with a flat solar collector with a nominal productivity of 5 [L/day] and investigating the effect of some factors on the effectiveness of the still: (ambient temperature, solar radiation, speed of wind, air humidity, temperature of flat solar collector and temperature of single-effect diffusive vertical solar still). The single-effect diffusion vertical solar still was equipped with an additional heat exchanger within the condenser tank with external fins in order to study its effect on the temperature of condensation. The measured quantity of distilled water has compared with the calculated values at different periods of the years 2020-2021. Some of chemical and bacterial specifications of the like (PH, electrical conductivity (EC), percentage of total salts (TDS), concentration of some elements such as calcium (Ca), sodium (Na), and the General bacterial count) before desalination were compared with the permissible limit within the Syrian standard specification for drinking water (45/2007) in order to determine the suitability of the water for consumption. According to the design algorithm the size of a single-effect diffusion vertical solar still to produce water of 5 [L/day] was 0.25 [m³] and the area of the flat solar collector was 0.64 [m²]. The highest value for amount of distilled water was recorded during July, with an average 4.8 [L/ day], which was equivalent to 96% of the design value, and its average productivity during June and August was 4.2 [L/ day] and this was equivalent to 84% of the design value. The highest average efficiency of a single diffusion vertical solar still ranged between 81.6 and 93.8% during June, July and August. Pearson correlation coefficient (r) between the amount of distilled water calculated by the designed model of a single-effect diffusion vertical solar still and the amount measured of distilled water was 0.99, while Nash-Sutcliffe efficiency factor (EF) of the model was 0.95. These values indicate to a good convergence between the designed value of water amount and its value that extracted from the still, and this in turn proves that the simulation of the model was high accurate, so the size of the single-effect diffusion vertical solar still designed for this research was considered an appropriate means to obtain the desired amount of water.

The area of the additional heat exchanger of the condenser is 0.04 [m²]. This additional heat exchanger contribute to maintain the temperature of condensation within the

condenser tank at an average value of 30 [C°], which was similar to the designed value. Therefore, the additional heat exchanger for the condenser was considered an appropriate means of improving Performance of a single-effect diffusion vertical solar still. The average pH of the water samples after desalination was 6.93, and the average EC value of the water after desalination was 169.6 [μS/Cm]. The percentage of total salt reduction in the water samples after desalination ranged between 91.4 and 94.3%. Additionally, the average calcium content in the water after desalination was 11.3 [ppm]. The average hardness value of the water after desalination was 120 [ppm], while the average sodium content was 6.2 [ppm]. The results indicated that water specifications after desalination using a single-effect diffusion vertical solar still met the permissible limits set by the Syrian standard for drinking water (45/2007). Therefore, the water was suitable to use according to the investigated factors. The correlation coefficient between the productivity of the single-effect diffusive vertical solar still and the intensity of solar radiation was 0.91. This indicates a good correlation, as increasing productivity was linked to increasing solar radiation. Therefore, the flat solar still that was used in the research is a good way to get the thermal energy necessary for distillation to occur.

Keywords: Single-Effect Diffusion Vertical Solar Still, Flat Panel Solar Collector, Additional Heat Exchanger, Solar Radiation, Standard Specification for Drinking Water.