



جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

الرقم الترتيبي:

الرقم التسلسلي:

رسالة مقدمة لنيل درجة دكتوراه علوم

تخصص: فيزياء طاقوية

من اعداد الطالب: تخة محمد

تحت عنوان:

دراسة تجريبية ونظرية لتحسين أداء المقطر الشمسي البسيط (دراسة خاصة بمنطقة ورقلة)

نوقشت وأجيزت علنا بتاريخ: 2022/11/15

أمام اللجنة المكونة من:

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ التعليم العالي	ستونور الدين
ممتحنا	جامعة مصطفى بن بولعيد - باتنة 2	أستاذ التعليم العالي	بن موسى حسين
ممتحنا	جامعة الشهيد حمة الأخضر - الوادي	أستاذ محاضر - أ.	عطية محمد الهادي
ممتحنا	وحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة-غرداية	أستاذ بحث - أ.	خليفة عبد الكريم
مشرفا ومقررا	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ التعليم العالي	بشكي جمال
مشرفا مساعدا	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ التعليم العالي	بوقطاية حمزة

السنة الجامعية: 2021-2022

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

(قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

صدق الله العظيم

من هذا المنطلق القويم نهدي هذا العمل المتواضع:

إلى أمي وأبي

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة.. ونصح الأمة.. إلى نبي الرحمة ونور العالمين..

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في انجاز هذا العمل، إلى إخوتي وأخواتي كل باسمه وإلى

زوجتي وأبنائي وكل من ساندني وساعدني في هذا البحث

إلى العائلات الكريمة (تخة وسويسي وعواريب).

إلى كل الزملاء والأصدقاء.

إلى كل الأساتذة الكرام

كلمة شكر

تم بحمد الله تعالى إتمام هذا العمل الذي يندرج في إطار الحصول على شهادة دكتوراه علوم، تخصص فيزياء طاقوية بكلية الرياضيات وعلوم المادة بجامعة قاصدي مرباح بورقلة، وبالتعاون مع مخبر تطوير الطاقات الجديدة والمتجددة بالمناطق الجافة والصحراوية L.E.N.R.E.Z.A بداية ومن باب من لم يشكر الناس لم يشكر الله، نشكر الله ونحمده حمدا كثيرا مباركا على هذه النعمة الطيبة والنافعة نعمة العلم والبصيرة. أود أن أتوجه بالشكر الجزيل إلى الأستاذ المشرف على هذه الأطروحة، الأستاذ الدكتور "بشكي جمال" الذي كان نعم الداعم والموجه في مختلف جوانب هذا العمل، وخلال مختلف مراحل. وبالإضافة إلى ذلك، فإن النصائح التي قدمها لي كانت دائما واضحة ودقيقة، كما أود أيضا، أن أشكر الأستاذ الدكتور "بوقطاية حمزة" على مساعدته في الإشراف على هذا العمل، والذي كان داعما لنا في جميع مراحل هذا البحث فله مني أسمى عبارات الشكر والتقدير.

كما أتقدم بالشكر الجزيل للأستاذ الدكتور "بن طويلة عمر" والأستاذ الدكتور "سوداني محمد البار" للتدقيق اللغوي في اللغة الإنجليزية واللذين ساهما في نشر هذا البحث.

كما أتقدم بالشكر الجزيل لكل أعضاء لجنة المناقشة كل باسمه، وأخص بالذكر الأساتذة: بن موسى حسين وعطية محمد الهادي وخليفة عبد الكريم لتكبدهم معاناة السفر وقبولهم مناقشة هذا العمل، وأشكر جزيل الشكر الأستاذ ستو نور الدين الذي قبل رئاسة هذه اللجنة.

وكذلك نشكر كل من ساعد على إتمام هذا البحث وقدم لنا العون ومد لنا يد المساعدة وزودنا بالمعلومات اللازمة لإتمام هذا البحث نذكر منهم "شراي رضا" و "الزين عبد الله" وكل مسؤولي المخبر والعاملين به ونخص بالذكر "حوتي أحمد" و "قادير محمد".

وإلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات فلهم منا كل الشكر والتقدير.

تخة محمد

الملخص:

في مجال تحلية المياه في المناطق الصحراوية تم اقتراح مجموعة من النماذج التي بها تحسينات لمقطر شمسي بسيط ذو حوض وميل واحد، وانقسمت التحسينات إلى نوعين؛ الأول كان في تبريد المكثف والنوع الثاني تم على تسخين المبخر، والتجارب عددها خمسة وأجريت في منطقة ورقلة ذات المناخ الصحراوي الجاف. ثم أن الدراسة بشقيها التجريبي والنظري أكدت أن إضافة مبخر مضخة حرارية لتكثيف البخار وعدم تعرض هذا المكثف لأشعة الشمس هو أفضل تركيب لزيادة إنتاجية الماء النقي، ويليه التحسين الذي أضيف للمبخر بطبقة من الاسفنج الأسود، ثم يأتي بعد ذلك التحسين الذي كان قد استخدم فيه زجاج ذو سُمْك صغير. وأثبتت أحد التجارب أن تبريد الهواء بجوار الوجه الخارجي للغطاء الزجاجي له أثر كبير في زيادة كمية الماء المقطر. وأخيرا كانت تجربة استخدام طبقتين من الزجاج إجراء ليس له فائدة في زيادة الإنتاجية. وختاما يمكن تلخيص الدراسة في إجراء يجمع بين تبريد المكثف وتسخين المبخر بدون تبادل حرارة بين هذين العنصرين بشكل مباشر، وأن يقتصر انتقال الحرارة بينهما بالبخار المتواجد داخل خلية التقطير.

الكلمات المفتاحية: خلية التقطير، التقطير الشمسي، المقطر الشمسي البسيط، الإشعاع الشمسي، انتقال الحرارة، التكثيف، التبخير، المضخة الحرارية.

Abstract :

In the field of water desalination in desert areas, several models with improvements have been proposed with simple one-slope solar still. The improvements are divided into two types. The first was dealt with the cooling of the condenser and the second type dealt with heating the evaporator. There have been five experiments all conducted in the region of Ouargla with a dry desert climate. The study, both experimental and theoretical, confirmed that adding a heat pump evaporator that is not exposed to direct sunlight to condense the steam and not exposing this condenser to sunlight is the best combination to increase the productivity of pure water. The second best in the rank is covering the evaporator with a layer of black sponge. The other best is using a non-thick glass. One of the experiments proved that cooling the air next to the outer side of the glass cover has a significant effect in increasing the amount of distilled water. Finally, It was also noted that using two layers of glass had had no benefit in increasing productivity. To sum it up, the overall idea of the present study was in combining the two procedures: cooling the condenser and heating the evaporator without direct heat exchange between the two. The heat transfer between these two procedures is limited to the steam inside the distillation cell.

Keywords: cell distillation, solar distillation, simple solar still, solar radiation, heat transfer, condensation, evaporation, heat pump.

فهرس العناوين

I	إهداء
II	تشكرات
III	ملخص
IV	فهرس العناوين
X	فهرس الأشكال
XVII	فهرس الجداول
XVIII	قائمة الرموز والمصطلحات
1	المقدمة العامة

الفصل الأول: دراسة عامة حول الماء

8	مقدمة الفصل الأول
8	(1) مشكلة المياه الصالحة للشرب في العالم
9	(2) نسب المستهلكين للمياه
9	(3) الحلول المقترحة لحل مشكلة نقص المياه وتلوثها
11	(4) أهم الإجراءات المتبعة لتوفير مياه الشرب والمياه الآمنة
15	(5) مشكلة نقص المياه في الجزائر
15	(6) المخزون المائي الجوي والحلول المقترحة لحل مشكلة نقص المياه في الجزائر
17	(7) محطات تحلية مياه البحر في الجزائر
17	(8) كمية الأمطار المتساقطة في الجزائر
19	(9) استغلال الطاقة الشمسية لإنتاج المياه حسب وجهة النظر الاقتصادية
19	(10) التحليل الفيزيائي وكيميائي للمياه

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول المقطرات الشمسية

25	(1) مقدمة الفصل الثاني
25	(2) تصنيف التحسينات على المقطر الشمسي البسيط
27	(3) النوع الأول: تقطير بدرجات حرارة عالية (High temperature)
27	(1-3) مقطرات تعمل بالطاقة الشمسية مع مُجمِّع لוחي مستوي
27	(1-1-3) المقطر الشمسي المرتبط بطبقة مستوية موازية للمبخر مع مُجمِّع لוחي مستوي
28	(2-1-3) المقطر الشمسي المرتبط بطبقة مستوية متعامدة مع المبخر بوجود مُجمِّع لוחي مستوي

29	..... (3-1-3) مقطر يعمل بالتدوير الطبيعي للماء
30	..... (4-1-3) مقطر يعمل بالتدوير القسري للماء
32	..... (5-1-3) المقطر الشمسي بمسترجع مع مُجمِّع لוחي مستوي
33	..... (6-1-3) مقطر يعمل بتأثير مزدوج مع مُجمِّع لוחي مستوي
35	..... (2-3) المقطرات الشمسية المرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ
37	..... (1-2-3) مقطرات شمسية تعمل بالتأثير المزدوج ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ
38	..... (2-2-3) مقطرات شمسية تعمل بمسترجع ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ
39	..... (3-3) مقطرات شمسية مرتبطة بمجمع أنبوبي مفرغ
40	..... (4-3) مقطرات شمسية مرتبطة بأنايب حرارة
42	..... (5-3) مقطرات شمسية مرتبطة ببركة شمسية
43	..... (6-3) مقطرات شمسية مرتبطة بنظام هجين (PV/T)
45	..... (7-3) مقطرات شمسية تعمل بنظام تقطير متعدد الطبقات
46	..... (8-3) مقطرات شمسية تعمل بنظام تقطير متعدد التأثير
49	..... (9-3) مقطرات شمسية تعمل بفقااعات الهواء
50	..... (10-3) مقطرات شمسية هجينة
52	..... (4) النوع الثاني: مقطرات تعمل بتطبيق التسخين المسبق (Pre-heated)
54	..... (5) النوع الثالث: مقطرات تعمل بالإنتاج الليلي (Nocturnal)
56	..... (6) النوع الرابع: تقطير بتبريد المكثف بدرجات حرارة منخفضة (Low temperature)
57	..... (1-6) تصنيف المقطرات حسب نوعية المكثف
57	..... (1-1-6) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات مدمجة (Built-in condensers)
69	..... (2-1-6) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات خارجية (External condensers)
79	..... (3-1-6) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات داخلية (Internal condensers)
84	..... (7) خلاصة الفصل الثاني

الفصل الثالث: الظواهر الفيزيائية الأساسية في عملية التقطير

91	..... مقدمة الفصل الثالث
91	..... (1) التبخير
91	..... (1-1) تعريف عام للظاهرة

91	..... (2-1) آلية التبخير
94	..... (3-1) قوة الشد وتأثيرها في تكوين الفقاعات
96	..... (4-1) تجربة Nukyama " " للغليان البَرْكي
99	..... (5-1) ائزان القوى على فقاعة البخار
100	..... (6-1) حالات الفقاعة بعد التحرر من السطح الساخن
101	..... (7-1) آلية تشكـل فقاعات البخار
102	..... (2) التكتيف
102	..... (1-2) تعريف عام لظاهرة التكتيف
103	..... (2-2) التكتيف النقطي والتكتيف الغشائي
104	..... (3-2) التطبيقات العملية لظاهرة التكتيف
106	..... (4-2) التكتيف فوق السطوح الباردة (نظرية نوسلت)
107	..... (5-2) نظرية نوسالت في التكتيف الغشائي
108	..... (6-2) التكتيف على السطوح الشاقولية
113	..... (7-2) التكتيف على سطح مائل
114	..... (8-2) التكتيف على سطوح الأنايب الأفقية
117	..... (3) الإشعاع الحراري
117	..... (1-3) تعريف الإشعاع الحراري
117	..... (2-3) مفاهيم وتعريف لمقادير فيزيائية
119	..... (3-3) قانون "ستيفان- بولتزمان"
119	..... (4-3) طيف الإشعاعات الكهرومغناطيسية
119	..... (5-3) الجسم الأسود
119	..... (6-3) قانون "بلانك"
120	..... (7-3) قانون " كيرشوف " (الامتصاص - الانبعاث)
120	..... (8-3) استقبال الجسم للإشعاع (الانعكاس - الامتصاص - الامرار)
121	..... (4) الإشعاع الشمسي
121	..... (1-4) الشمس
122	..... (2-4) الأرض
122	..... (3-4) المعالم الفضائية لتحديد موقع الشمس
123	..... (4-4) الزوايا المحددة للمواضع النسبية للنقاط الثلاثة
123	..... (5-4) العلاقات الرياضية التي تربط بين الزوايا

الفصل الرابع: دراسة التوازن الطاقوي في مختلف المقطرات الشمسية

- 132 (1) مقدمة الفصل الرابع
- 132 (2) الفرضيات المُبَسَّطَة لوضع معادلات التوازن
- 132 (3) النموذج الصفري للمقطر البسيط (بدون تحسينات - الشاهد)
- 132 (1-3) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (SSS)
- 133 (2-3) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (SSS)
- 137 (4) النموذج الأول للمقطر الشمسي البسيط (وجود مضخة حرارية للتكثيف)
- 138 (1-4) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (HP)
- 139 (2-4) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (HP)
- 143 (5) النموذج الثاني للمقطر البسيط (بوجود تحسينات - وجود سُمْك أقل في الزجاج)
- 143 (1-5) فرضيات على المستويات الحرارية
- 144 (2-5) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (LTG)
- 146 (6) النموذج الثالث للمقطر البسيط (بوجود تحسينات - وجود طبقتين من الزجاج)
- 146 (1-6) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (DLG)
- 147 (2-6) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (DLG)
- 151 (7) النموذج الرابع للمقطر البسيط (بوجود تحسينات - وجود سطح أسود من الإسفنج)
- 152 (1-7) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (BSS)
- 152 (2-7) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (BSS)
- 156 (8) النموذج الخامس للمقطر البسيط (بوجود تحسينات - بوجود مروحة فوق الزجاج)
- 156 (1-8) فرضيات على المستويات الحرارية
- 158 (2-8) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (FOG)

الفصل الخامس: الدراسة التجريبية لتحسين مردودية المقطرات الشمسية

- 162 (1) مقدمة الفصل الخامس
- 162 (2) النماذج الأولية للأجهزة التجريبية
- 163 (3) أجهزة القياس المستعملة في التجارب
- 164 (4) الأدوات المستعملة في التجارب
- 165 (5) التجارب العملية لتحسين أداء المقطرات الشمسية
- 165 (1-5) التجربة الأولى: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في التكثيف)
(SSS-HP) المقطر البسيط بميل واحد بوجود مضخة حرارية للتكثيف.
- 165 (1-1-5) وصف التجربة الأولى

167	.....(2-1-5) الظروف الجوية الخاصة باليوم الذي تمت فيه التجربة الأولى
167	.....(3-1-5) تغيرات الإشعاع الشمسي والمقادير الحرارية خلال يوم التجربة الأولى
171	.....(4-1-5) الحمل والتبخير في شريط التكتيف في المقطر المزود بمضخة حرارية (PH)
172	.....(5-1-5) تفسير التغيرات والنتائج الخاصة بالتجربة الأولى
173	(2-5) التجربة الثانية: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في سُمْك الزجاج)
	(SSS-LTG) المقطر البسيط بميل واحد بوجود سُمْك أقل في الزجاج.
173	.....(1-2-5) وصف التجربة الثانية
174	.....(2-2-5) الظروف الجوية الخاصة بالأيام الذي تمت فيه التجربة الثانية
174	.....(3-2-5) منحنيات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الثانية
175	.....(4-2-5) مقارنة درجات الحرارة في كل مقطر شمسي الخاصة بالتجربة الثانية
176	.....(5-2-5) مقارنة درجات الحرارة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في السُمْك
176	.....(6-2-5) مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا في المقطرين الشمسين المختلفين في السُمْك
177	.....(7-2-5) النتائج المستخلصة من التجربة الثانية
178	(3-5) التجربة الثالثة: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في عدد طبقات الزجاج)
	(SSS-DLG) المقطر البسيط بميل واحد بوجود طبقتين من الزجاج
178	.....(1-3-5) وصف التجربة الثالثة
179	.....(2-3-5) الظروف الجوية الخاصة بالأيام التي تمت فيها التجربة الثالثة
179	.....(3-3-5) تغيرات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الثالثة
180	.....(4-3-5) مقارنة درجات الحرارة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في عدد طبقات الزجاج
182	.....(5-3-5) مقارنة مستويات درجات الحرارة للأجزاء المتماثلة في المقطرين المختلفين في عدد طبقات الزجاج
184	.....(6-3-5) مقارنة كمية الماء المُجمَّعة تجريبيا والمحسوبة نظريا في مقطري مختلفين في عدد طبقات الزجاج
184	.....(7-3-5) النتائج المستخلصة من التجربة الثالثة
185	(5-4) التجربة الرابعة: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في طبيعة السطح الأسود)
	(SSS-BSS) المقطر البسيط بميل واحد بوجود سطح أسود من الإسفنج.
185	.....(1-4-5) وصف التجربة الرابعة
185	.....(2-4-5) الظروف الجوية الخاصة بالأيام التي تمت فيها التجربة الرابعة
186	.....(3-4-5) تغيرات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الرابعة
187	.....(4-4-5) مقارنة درجات الحرارة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في طبيعة السطح الأسود

187	5-4-5) مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا في مقطرين مختلفين في طبيعة السطح الأسود...
188	5-4-5) مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا في مقطرين مختلفين في طبيعة السطح الأسود...
189	5-4-6) النتائج المستخلصة من التجربة الرابعة.....
190	5-5) التجربة الخامسة : (تأثير سرعة الهواء الجو المحيط بالمقطر على كمية الماء المقطر) (SSS- FOG) المقطر البسيط بميل واحد بوجود مروحة فوق الزجاج.
190	5-5-1) وصف التجربة الخامسة.....
190	5-5-2) الظروف الجوية الخاصة بالأيام الذي تمت فيه التجربة الخامسة.....
191	5-5-3) منحنيات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الخامسة.....
192	5-5-4) مقارنة درجات الحرارة بين الماء والزجاج في السرعات المختلفة.....
193	5-5-5) تأثير سرعة الهواء الجوي على كمية الماء المقطر المجمعة.....
194	5-5-6) مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا عند سرعات مختلفة للهواء.....
195	5-5-7) النتائج المستخلصة من التجربة الخامسة.....
195	6) دراسة المردود الطاقوي الخاص بالتجارب.....
195	6-1) تعريف.....
196	6-2) طريقة العمل.....
197	تفسير المنحنيات والنتائج المستخلصة.....

187 الخاتمة العامة

199 النتائج.....

202 التوصيات.....

207 الملاحق

فهرس الأشكال

الفصل الأول: دراسة عامة حول الماء

13	.....خطوات الخمس للمنهج متعدد المراحل من HWTS	الشكل (1-1)
14	.....مخطط يوضح المنهج المتعدد المراحل HWTS المصدر	الشكل (2-1)
18	.....خريطة تبين المخزون المائي الجوي بالجزائر	الشكل (3-1)

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول المقطرات الشمسية

26	.....تصنيف المقطرات الشمسية التي تخضع لتحسينات حسب (Kabeel et al. 2016) - (Sampathkumar et al. 2010) - (Tiwari et al. 2008)....	الشكل (1-2)
27	.....مقطع عرضي لمقطر شمسي يعمل بمسترجع مع وجود مُجَمِّع لوجي مستوي. (Yadav and Prasad. 1995).....	الشكل (2-2)
28	.....رسم تخطيطي للتأثيرات المتعددة (مُجَمِّع لوجي مستوي + طبقة مستوية موازية للمبخر) (Kiatsiriroat et al. 1987)	الشكل (3-2)
29	.....رسم تخطيطي لنظام تقطير لمقطر يعمل بالتدوير الطبيعي للماء. (Lawrence and Tiwari. 1990).....	الشكل (4-2)
31	.....رسم تخطيطي لمقطر شمسي مدمج مع مجمع لوجي مستوي. (Tiwari and Dhiman. 1991).....	الشكل (5-2)
32	.....مقطع عرضي لمقطر شمسي يعمل بمسترجع مع وجود مُجَمِّع لوجي مستوي (Tiwari and Sinha. 1993).....	الشكل (6-2)
33	.....رسم تخطيطي لنظام تقطير يعمل بتأثير مزدوج على المقطر الشمسي. (Kumar Sanjeev and Tiwari. 1999).....	الشكل (7-2)
33	.....تغيرات إنتاجية الماء للحوض العلوي والحوض السفلي (Kumar Sanjeev and Tiwari. 1999).....	الشكل (8-2)
34	.....عرض تخطيطي لأنظمة ذو أحواض مزدوجة مختلفة. (Tiwari and Sinha. 1993)	الشكل (9-2)
35	.....رسم تخطيطي للمقطر الشمسي المرتبط بمُرَكِّز قطع مكافئ (Zeinab and Ashraf. 2007).....	الشكل (10-2)
36	.....نظام تقطير باستعمال مُرَكِّز قطع مكافئ. (Bhagwan Prasad and Tiwari. 1996)	الشكل (11-2)
37	.....نظام تقطير يعمل بالتأثير المزدوج ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ (Sanjay Kumar and Sinha. 1996)	الشكل (12-2)
38	.....تغيرات الإنتاج اليومي بدلالة سُمْك الماء لنظام يعمل بمسترجع ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ (Sanjay Kumar and Sinha. 1996)	الشكل (13-2)

39	رسم تخطيطي لمجمع الأنبوب المفرغ أوينز-إينوي	الشكل (2-14)
.....	..... (Tiwari et al. 2007) .....	.....
40	إجمالي الناتج اليومي للمقطرات الشمسية المستعملة	الشكل (2-15)
.....	..... (Tiwari et al. 2007) .....	.....
41	رسم التخطيطي لنوع الانتشار متعدد التأثير مقترناً بمجمع الطاقة الشمسية لأنابيب الحرارة	الشكل (2-16)
.....	..... (Hiroshi Tanaka et al. 2004) .....	.....
43	رسم التخطيطي لبركة شمسية مصغرة مدمجة مع مقطرين شمسين (حوض بسيط-حوض مدرج)	الشكل (2-17)
.....	..... (Velmurugan et al. 2009) .....	.....
44	رسم تخطيطي لمقطرات شمسية مرتبطة بنظام هجين (PV/T)	الشكل (2-18)
.....	..... (Shiv Kumar and Tiwari. 2009) .....	.....
46	رسم التخطيطي لمقطر شمسي يعمل بنظام تقطير متعدد الطبقات	الشكل (2-19)
.....	..... (Ahmed et al. 2009) .....	.....
47	رسم التخطيطي لمقطرات شمسي يعمل بنظام تقطير متعدد التأثير	الشكل (2-20)
.....	..... (Adel M Abdel Dayem. 2006) .....	.....
48	رسم تخطيطي لمحطة تحلية المياه بالطاقة الشمسية	الشكل (2-21)
.....	..... (Ali M. El-Nashar. 2003) .....	.....
49	رسم التخطيطي لمقطر شمسي يعمل بفقاعات الهواء	الشكل (2-22)
.....	..... (Pandey. 1984) .....	.....
50	رسم التخطيطي لمقطر شمسي يعمل بفقاعات الهواء	الشكل (2-23)
.....	..... (Gyorgy Mink et al. 1998) .....	.....
51	رسم التخطيطي لمقطر شمسي هجين	الشكل (2-24)
.....	..... (Mathioulakis and Belessiotis. 2003) .....	.....
52	رسم التخطيطي لمقطر يعمل بتطبيق التسخين المسبق مع تدفق الماء فوق الغطاء الزجاجي	الشكل (2-25)
.....	..... (Tiwari et al. 1985) .....	.....
54	رسم التخطيطي لمقطر يعمل بتطبيق التسخين المسبق	الشكل (2-26)
.....	..... (Ashok Kumar and Tiwari. 1990) .....	.....
55	حوض تقطير مزدوج مع تدفق مياه تسخين ثابتة (Gupta et al)	الشكل (2-27)
56	رسم التخطيطي لمقطر شمسي أنبوبي مزود بعلبة معدنية سوداء	الشكل (2-28)
.....	..... (Tiwari and Ashok Kumar) .....	.....
57	تخطيط لوحدة تقطير أحادية الميل بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (2-29)
.....	..... (Fath and ELsherbiny. 1993) .....	.....
58	تخطيط لوحدة تكثيف بسقف ثابت من اقتراح	الشكل (2-30)

.....	(Fatani, Zaki, and Al-Turki 1994)	
59	تخطيط لوحدة تكثيف بسقف ثابت مع الانتقالات الحرارية من اقتراح	الشكل (31-2)
.....	(Fatani and Zaki. 1995)	
59	تخطيط لوحدة تقطير شمسي ذات تأثيرين من اقتراح	الشكل (32-2)
.....	(Fath Hassane E.S. 1996)	
60	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بغرفة تكثيف مزدوجة من اقتراح	الشكل (33-2)
.....	(Tiwari et al. 1997)	
61	مقطر بحوض مزود بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (34-2)
.....	(El Bahi and Inan. 1999)	
61	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (35-2)
.....	(Rene et al. 2000)	
62	مقطر بحوض مزود بمكثف مدمج ومساحة تبخر إضافية	الشكل (36-2)
.....	(Fath and Hosny. 2002)	
63	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (37-2)
.....	(Hassan et al. 2004)	
64	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (38-2)
.....	(Madhlopa and Johnstone. 2009)	
64	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (39-2)
.....	(Madhlopa and Johnstone. 2009)	
65	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (40-2)
.....	(Reddy et al. 2009)	
66	تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح	الشكل (41-2)
.....	(Bechki et al. 2010)	
67	رسم تخطيطي للمقطر الشمسي متعدد التأثيرات من اقتراح	الشكل (42-2)
.....	(Xiong et al. 2013)	
68	تخطيط لوحدة تقطير شمسي مع قسم منفصل لتكثيف البخار من اقتراح	الشكل (43-2)
.....	(Bhardwaj et al. 2015)	
68	حوض أحادي ذو ميل مزدوج مرتبط بخلية تكثيف من اقتراح	الشكل (44-2)
.....	(Belhadj et al. 2015)	
69	تخطيط يوضح آلية سحب البخار من المقطر باستخدام مضخة	الشكل (45-2)
.....	(Kabeel et al. 2016)	
70	عرض تخطيطي للمقطر الشمسي الكهروحراري من اقتراح	الشكل (46-2)
.....	(Nijegorodov et all. 1994)	

70	.....	الشكل (47-2) مخطط للمقطر الشمسي يعمل بالتكثيف القسري من اقتراح (Nijgorodov et al. 1994)
71	.....	الشكل (48-2) عرضي تخطيطي تجريبي لمقطر شمسي بمكثف خارجي من اقتراح (Mohamad et al. 1994)
72	.....	الشكل (49-2) عرض تخطيطي تجريبي لمقطر شمسي بمكثف خارجي من اقتراح (Haddad et al. 2000)
72	.....	الشكل (50-2) عرض تخطيطي لمقطر شمسي بمكثف خارجي بعنفات من اقتراح (Al-Kharabsheh and Yogi Goswami. 2003)
73	.....	الشكل (51-2) عرض تخطيطي لمقطر شمسي بمكثف خارجي من اقتراح (Hacene et al.2010)
74	.....	الشكل (52-2) وحدة شمسية محمولة أحادية الحوض مزودة بعاكس ومكثف خارجي (Monowe et al. 2011)
75	.....	الشكل (53-2) مقطر شمسي مفرغ ومزود بمكثف خارجي (Gnanadason et al. 2011)
75	.....	الشكل (54-2) مقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Ahmed HM. 2012)
76	.....	الشكل (55-2) مقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Husham. 2012)
77	.....	الشكل (56-2) مقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Kabeel et al. 2014)
78	.....	الشكل (57-2) صورة للتركيب التجريبي لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Kabeel et al. 2014)
78	.....	الشكل (58-2) صورة للتركيب التجريبي لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Almuhanna 2014)
79	.....	الشكل (59-2) مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Kerfah et al. 2016)
80	.....	الشكل (60-2) مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Refalo, Ghirlando, and Abela 2016)
80	.....	الشكل (61-2) مخطط لمقطر شمسي مدرج مرتبط بمكثف خارجي (El-Samadony et al. 2015)
81	.....	الشكل (62-2) مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Ahmed ST et al. 1988)
82	.....	الشكل (63-2) مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Khalifa et al. 1999)
83	.....	الشكل (64-2) مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Khalifa et al. 1999)
83	.....	الشكل (65-2) أنابيب تبريد مع ترتيب قناة تصريف المياه المكثفة (Kumar et al. 2008)
84	.....	الشكل (66-2) مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Rabah et al. 2012)

الفصل الثالث: الظواهر الفيزيائية الأساسية في عملية التقطير

92	..... اتجاه انتقال الحرارة (من السائل للبخار داخل الفقاعة)	الشكل (1-3)
93	..... وجود طبقة قريبة من السطح الساخن درجة حرارتها أكبر من درجة حرارة التشبع	الشكل (2-3)
98	..... تأثير البلل السطحي على زاوية التصاق الفقاعة	الشكل (3-3)
100	..... منحني غليان الماء عند الضغط الجوي (Bergman et al. 2011)	الشكل (4-3)
102	..... اتزان القوى على فقاعة البخار	الشكل (5-3)
108	..... عمود التقطير وملحقاته	الشكل (6-3)
109	..... التكتيف الغشائي فوق سطح شاقولي	الشكل (7-3)
109	..... أنواع التكتيف مصنفة حسب التلامس بين البخار والمنطقة الباردة	الشكل (8-3)
112	..... سريان التكتيف الغشائي على سطح شاقولي	الشكل (9-3)
116	..... غشاء على أنبوب أفقية	الشكل (10-3)
117	..... غشاء على سطح مائل	الشكل (11-3)
118	..... غشاء على أنبوب أفقي	الشكل (12-3)
120	..... سمك غشاء التكتيف ومعامل انتقال الحرارة حول أنبوب أفقي	الشكل (13-3)
121	..... تعريف الاتجاه \vec{ox} والزاوية المحسمة $d\Omega$	الشكل (14-3)
122	..... طيف الإشعاعات الكهرومغناطيسية	الشكل (15-3)
124	..... استقبال الإشعاع	الشكل (16-3)
126	..... الزوايا الستة $(\phi, \lambda), (\omega, \delta), (h, \Psi)$ المحددة للمواضع النسبية للنقاط الثلاث في الفضاء	الشكل (17-3)

الفصل الرابع: دراسة التوازن الطاقوي في مختلف المقطرات الشمسية

133	..... تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي بدون تحسينات	الشكل (1-4)
135	..... مخطط يوضح الإشعاعات الحرارية المارة عبر مختلف أجزاء المقطر (SSS)	الشكل (2-4)
138	..... تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (HP) بوجود تحسينات (تكتيف بمضخة حرارية)	الشكل (3-4)
144	..... تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي (LTG) بوجود تحسينات - وجود سُمْك أقل في الزجاج	الشكل (4-4)
147	..... تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (DLG) بوجود تحسينات (بوجود طبقتين من الزجاج)	الشكل (5-4)
150	..... مخطط يوضح الإشعاعات الحرارية المارة عبر مختلف أجزاء المقطر (DLG) بوجود تحسينات (بوجود طبقتين من الزجاج)	الشكل (6-4)
152	..... تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (BSS) بوجود تحسينات (استعمال طبقة من الإسفنج)	الشكل (7-4)
155	..... مخطط يوضح الإشعاعات الحرارية المارة عبر مختلف أجزاء المقطر (BSS) بوجود تحسينات (وجود سطح من الإسفنج الأسود)	الشكل (8-4)
157	..... تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي (FOG) بوجود تحسينات - وجود سُمْك أقل في الزجاج	الشكل (9-4)

الفصل الخامس: الدراسة التجريبية لتحسين مردودية المقطرات الشمسية

164	أجهزة القياس المستعملة في التجارب.....	الشكل (5-1)
165	الأدوات المستعملة في التجارب.....	الشكل (5-2)
166	نظرة عامة للتجربة الأولى باستعمال المقطر (SSS) و (HP)	الشكل (5-3)
166	المقطر الشمسي البسيط (SSS) بدون تحسينات.....	الشكل (5-4)
167	المقطر الشمسي الثاني (HP): بوجود تحسينات (التكثيف بمضخة حرارية)	الشكل (5-5)
168	تغيرات كمية الماء المنتج ومقدار الإشعاع الشمسي الكلي يوم 30 أبريل 2018 (التجربة 1)	الشكل (5-6)
168	تغيرات كمية الماء المنتج التجريبي والنظري يوم 30 أبريل 2018 (التجربة 1)	الشكل (5-7)
169	تغيرات الفرق في درجة الحرارة للمقطرين (التجربة 1)	الشكل (5-8)
170	تغيرات كمية الحرارة المنتقلة بين الماء والغطاء الزجاجي في المقطر الشاهد (SSS) (التجربة 1)	الشكل (5-9)
170	تغيرات درجات الحرارة في مختلف مستويات المقطرين (التجربة 1)	الشكل (5-10)
171	تغيرات الكفاءة الطاقوية في المقطرين (التجربة 1)	الشكل (5-11)
171	تغيرات رقم Nusselt في المقطرين (التجربة 1)	الشكل (5-12)
173	مخطط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (LTG) بوجود تحسينات (سُمْك أقل في الزجاج) (التجربة 2)	الشكل (5-13)
174	تغيرات الإشعاع الشمسي (التجربة 2)	الشكل (5-14)
175	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) (التجربة 2)	الشكل (5-15)
175	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الثاني (LTG) (التجربة 2)	الشكل (5-16)
176	مقارنة تغيرات درجات الحرارة في المقطرين (SSS) و (LTG) (التجربة 2)	الشكل (5-17)
177	تغيرات كمية الماء المجمعة تجريبيا والمحسوبة نظريا الخاصة بالتجربة الثانية (التجربة 2)	الشكل (5-18)
178	مخطط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (DLG) (التجربة 3)	الشكل (5-19)
179	صور توضيحية للتجربة الثالثة.....	الشكل (5-20)
180	تغيرات الإشعاع الشمسي (التجربة 3)	الشكل (5-21)
180	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) (التجربة 3)	الشكل (5-22)
181	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الثاني (DLG) (التجربة 3)	الشكل (5-23)
181	مقارنة تغيرات درجات الحرارة في المقطرين (SSS) و (DLG) (التجربة 3)	الشكل (5-24)
182	مقارنة تغيرات درجات حرارة السطح الأسود في المقطرين (SSS) و (DLG) (التجربة 3)	الشكل (5-25)
183	مقارنة تغيرات درجات حرارة الماء المالح في المقطرين (SSS) و (DLG) (التجربة 3)	الشكل (5-26)
183	مقارنة تغيرات درجات حرارة السطح الداخلي للزجاج في (SSS) و (DLG) (التجربة 3)	الشكل (5-27)
184	تغيرات كمية الماء المجمعة تجريبيا والمحسوبة نظريا الخاصة بالتجربة الثالثة.....	الشكل (5-28)
186	تركيب المقطر في التجربة الرابعة والمزدوجات الحرارية داخله (التجربة 4)	الشكل (5-29)
186	تغيرات الإشعاع الشمسي (التجربة 4)	الشكل (5-30)
187	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) (التجربة 4)	الشكل (5-31)
187	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الثاني (BSS) (التجربة 4)	الشكل (5-32)

188	.....	تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) والثاني (BSS) (التجربة 4)	الشكل (5-33)
188	.....	تغيرات كمية الماء المجمعة تجريبيا والمحسوبة نظريا (التجربة 4)	الشكل (5-34)
191	.....	تركيب المقطر والمزدوجات الحرارية داخله في المقطر (FOG) (التجربة 5)	الشكل (5-35)
191	.....	تغيرات الإشعاع الشمسي مع تغيير سرعة الهواء (التجربة 5)	الشكل (5-36)
192	.....	مقارنة درجات الحرارة للماء بين مختلف السرعات (التجربة 5)	الشكل (5-37)
192	.....	مقارنة درجات الحرارة للزجاج بين مختلف السرعات (التجربة 5)	الشكل (5-38)
193	.....	تأثير سرعة الهواء على كمية الماء المقطر المجمعة تجريبيا لمختلف السرعات (التجربة 5)	الشكل (5-39)
193	.....	تأثير سرعة الهواء على كمية الماء المقطر المجمعة نظريا لمختلف السرعات (التجربة 5)	الشكل (5-40)
194	.....	تغيرات كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا، السرعة 0,0م/ثا (التجربة 5)	الشكل (5-41)
194	.....	تغيرات كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا، السرعة 1,5م/ثا (التجربة 5)	الشكل (5-42)
196	.....	تغيرات كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا، السرعة 3.0م/ثا (التجربة 5)	الشكل (5-43)
198	.....	مقارنة المردود الطاقوي في التجارب الخمسة	الشكل (5-44)

فهرس الجداول

الفصل الأول: دراسة عامة حول الماء

14	.....	جدول (1-1) الوضعيات الأربع لحل المشاكل المتعلقة بنقص المياه الصالحة للشرب.....
16	.....	جدول (2-1) المنشآت الخاصة بإنتاج الماء حسب تاريخ الإنجاز.....
17	.....	جدول (3-1) المنشآت الخاصة بإنتاج الماء بتحلية مياه البحر إلى غاية 2016.....
18	.....	جدول (4-1) تقسيم المناطق المناخية في الجزائر حسب تساقط الأمطار.....
21	.....	جدول (5-1) تركيز المواد المسموح به في الماء الصالح للشرب.....
21	.....	جدول (6-1) مواصفات منظمة الصحة العالمية لماء الشرب الخاصة/ تركيز المكوّن بوحدة.....
22	.....	جدول (7-1) تركيز الأملاح الشوارد الكيميائية في مياه منطقة ورقلة.....

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول المقطرات الشمسية

50	جدول (1-2) الناتج اليومي للماء المقطر حسب طريقة التقطير بفقاعات الهواء.....
----	-------	---

الفصل الرابع: دراسة التوازن الطاقوي في مختلف المقطرات الشمسية

136	.....	جدول (1-4) بعض الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة في المقطر.....
137	.....	جدول (2-4) المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث.....
142	.....	جدول (3-4) قيمة C_t من أجل أسطوانة دائرية بدلالة رقم Prandtl.....
143	.....	جدول (4-4) القيم المتوسطة للماء والبخار بجوار الشريط المتكاثف.....
145	.....	جدول (5-4) بعض الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة في المقطر (LTG).....
145	.....	جدول (6-4) المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث.....
158	.....	جدول (7-4) يوضح عوامل الامتصاصية والإمرارية والانعكاسية حسب زاوية ورود الإشعاع.....
159	.....	جدول (8-4) ترتيب وعدد المستويات الحرارية في النماذج المقترحة في الدراسة.....

الفصل الخامس: الدراسة التجريبية لتحسين مردودية المقطرات الشمسية

172	.....	جدول (1-5) رقم Nusselt لشريط التكتيف على أنبوب أسطواني أفقي في المقطر (PH)....
184	.....	جدول (2-5) لحظة الانقلاب لكل مستوي في المقطرين ((SSS و (DLG) الخاصة بالتجربة الثالثة.....
197	.....	جدول (3-5) النتائج الخاصة بأعظم قيمة للمردود الطاقوي.....

قائمة الرموز والاصطلاحات

الرموز	الاصطلاحات (الرموز اللاتينية)	الوحدة
A	المساحة.....	m^2
a	الانتشارية الحرارية.....	m^2/s
C_p	الحرارة النوعية.....	$J / (Kg. ^\circ C)$
d_s	الكثافة المتوسطة للشمس.....	Kg / m^3
d_{terre}	الكثافة المتوسطة للأرض.....	Kg / m^3
e_x	سُمك الطبقة القشرية.....	m
g	تسارع الجاذبية الأرضية.....	m / s^2
G	التدفق الإشعاعي الشمسي الساقط على السطح الزجاجي.....	W/m^2
h_x	معامل الانتقال الحراري الموضعي.....	$W/m^2 . K$
\bar{h}	معامل الانتقال الحراري المتوسط.....	$W/m^2 . K$
h	معامل الحمل الحراري.....	$W/m^2 . K$
h'	زاوية الارتفاع الشمس.....	بالدرجات $^\circ$
h_{fg}	أنتالبي التبخر الخاص بالماء.....	J / Kg
H_c	توقيت الغروب.....	h
H_l	توقيت الشروق.....	h
H_w	الحرارة الكامنة للتبخير.....	J / Kg
K	معامل الانتقال الكتلي.....	m/s
L	طول الصفيحة المستوية.....	m
M	الانبعاثية الإشعاعية للسطح الباث.....	W/m^2
M_a	الكتلة المولية للهواء.....	g/mol
m_{terre}	كتلة الأرض الظاهرية.....	Kg
m_s	كتلة الشمس.....	Kg
\dot{m}	التدفق الكتلي.....	Kg/m^3
N	عدد الجسيمات.....	—
n	عدد المولات.....	$mole$

Pa	.....	الضغط الجزئي للغاز	P_g
Pa	.....	الضغط الجزئي للبخر	P_v
Pa	.....	الضغط الجزئي للغاز عند الارتفاع	$P_g(L)$
Pa	.....	الضغط الجزئي للغاز عند السطح الحر للماء	$P_g(0)$
Pa	.....	الضغط الجوي	P_{atm}
Pa	.....	الضغط الجزئي للبخر المشبع	$P_{vap(Sat)}$
W	.....	الاستطاعة الحرارية	Q
W	.....	الطاقة المشعّة للشمس	Q_s
$J/mol.K$	.....	ثابت الغازات المثالية	R
-	.....	رقم رايلي (RAYLEIGH) لانتقال الحرارة بالحمل الحر	Ra
m	.....	القطر المتوسط للشمس	R_s
-	.....	الرطوبة النوعية	r^s
m	.....	نصف قطر دوران المدار الإهليجي	r
h	.....	المدى النهاري	S_0
s	.....	الزمن	t
$^{\circ}C$	.....	درجة الحرارة	T
h	.....	الزمن الشمسي الحقيقي	TSV
m/s	.....	السرعة	U
m^3	.....	الحجم	V

الرموز الإغريقية

-	.....	معامل الامتصاص الإشعاعي	α
-	.....	معامل الانبعاث الإشعاعي للسطح الباث	ϵ
-	.....	معامل الإمرار الحراري	τ
$W/m.^{\circ}C$	.....	التوصيلية الحرارية	λ
بالدرجات $^{\circ}$	.....	زاوية خط الطول	λ'
$Pa.s$	.....	اللزوجة التحريكية	μ
Kg/m^3	.....	الكتلة الحجمية	ρ
-	.....	معامل الانعكاس الحراري	ρ

$W/m^2 \cdot K^4$	..... ثابت ستيفان-بولتزمان	σ
-	..... الرطوبة النسبية	Ψ'
° بالدرجات	..... زاوية السَّمْت الشمسي	Ψ
-	..... درجة التشبع	Γ
° بالدرجات	..... زاوية دائرة العرض	φ
° بالدرجات	..... زاوية ميل الشمس	δ
° بالدرجات	..... زاوية الساعة الشمسية (الزاوية الزمنية)	ω
° بالدرجات	..... سَمْت الرأس	θ_s
-	..... المردود الطاقوي	η

الدليل السفلي

-	..... الوسط الخارجي (المحيط Ambiente)	a
-	..... الهواء الرطب داخل خلية التقطير	ah
-	..... حوض الماء المالح (Bassin)	b
-	..... التبادل الحراري بالحمل بين الغطاء الزجاجي والهواء	$c, g - a$
-	..... التبادل الحراري بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي	$c, w - g$
-	..... التبادل الحراري بالحمل بين الغطاء الزجاجي والماء	$c, b - w$
-	..... المنتشر (diffusion)	$diff$
-	..... المباشر (direct)	dir
-	..... الغطاء الزجاجي (glass)	g
-	..... التبادل الحراري بالتبخير بين الماء و الغطاء الزجاجي	$ev, w - g$
-	..... الضياعات الحرارية عبر الطبقات السفلية (البوليستيران)	$loss1$
-	..... الضياعات الحرارية عبر الطبقات الجانبية العوازل الخشبية	$loss2$
-	..... التبادل الحراري بالإشعاع بين الغطاء الزجاجي و الهواء	$r, g - a$
-	..... التبادل الحراري بالإشعاع بين الماء و الغطاء الزجاجي	$r, w - g$
-	..... القبة السماوية	sky
-	..... الكلي (Total)	t
-	..... الماء (Water)	w

الاختصارات (حسب الظهور في الفصول)

المعنى بالإنجليزية	المعنى بالعربية	الاختصار
Household Water Treatment and Safe Storage	تنقية المياه المنزلية والتخزين الآمن	HWTS
Solar Disinfection	تعقيم المياه بالطاقة الشمسية	SODIS
Flate Plate Collector	مُجمِّع لوحى مستوي	FPC
Compound Parabolic Concentration	تقطير شمسي مرتبط بمُرَكِّز قطع مكافئ مركب	CPC
Direct Steam Generation	توليد البخار المباشر	DSG
Evacuated Tube Collectors	مجمعات الأنابيب المفرغة	ETC
Vertical Multiple Effect Diffusion	التأثير متعدد الانتشار الشاقولي	VMED
Shallow Solar Pond	البركة الشمسية العميقة	SSP
The Energy Payback Times	وقت استرداد التكلفة الطاقوية	EPBT
The Multiple Condensation-Evaporation Cycle	الدورة المتعددة تكثيف-تبخير	MCEC
Gained Output Ratio	نسبة المخرجات المكتسبة	GOR
Double-Condensing chamber Solar still	مقطر شمسي بغرفة تكثيف مزدوجة	DCS
Phase Change Material	مادة متغيرة الطور	PCM
Forced Condensing Technique	تقنية التكثيف القسري	FCT
Packed Bed Storage Tank	خزان معبأ كمكثف خارجي	PBST
Simple Solar Still	المقطر الشمسي البسيط	SSS
Simple Solar Still with Heat Pump	المقطر الشمسي البسيط بوجود مضخة حرارية	SSS-HP
Simple Solar Still with Less Thickness in Glass	المقطر الشمسي البسيط بوجود سُمْك أقل في الزجاج	SSS-LTG
Simple Solar Still with Double Layer of Glass	المقطر الشمسي البسيط بوجود طبقتين من الزجاج	SSS-DLG
Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge	الشمسي البسيط بوجود سطح أسود من إسفنج	SSS-BSS
Simple Solar Still with a Fan Over Glass	الشمسي البسيط بوجود مروحة فوق الزجاج	SSS-FOG

المقدمة العامة

تمهيد: تعتبر المياه مورد أساسي في الطبيعة وهي تلعب دورًا رئيسيًا في تطوير الاقتصاد وبالتالي فهي ضرورية لرفاهية أي أمة. ويعتبر عدم توفر مياه الشرب من المشاكل الرئيسية التي تواجهها الدول النامية في جميع أنحاء العالم. حيث يوجد حوالي 97% من المياه في العالم في المحيط، وحوالي 2% من المياه في العالم مخزنة في الوقت الحاضر على شكل جليد في المنطقة القطبية، بينما 1% فقط من المياه العذبة متاحة لاحتياجات النباتات والحيوانات والإنسان (Vinothkumar and Kasturibai. 2008)¹.

واليوم، ترجع معظم المشكلات الصحية إلى عدم توفر مياه الشرب النظيفة. وفي العقود الأخيرة، تتلقى معظم أجزاء العالم أمطارًا غير كافية مما يؤدي إلى زيادة ملوحة المياه. وبتزايد تلوث موارد المياه بشكل كبير بسبب عدد من العوامل بما في ذلك النمو السكاني والتصنيع والتحضر، إلخ. وقد أثرت هذه الأنشطة سلبيًا على جودة المياه في المناطق الريفية والزراعة. على الصعيد العالمي، حيث تقضي 200 مليون ساعة كل يوم، معظمها من قبل الإناث، لجمع المياه من مصادر بعيدة وملوثة في كثير من الأحيان. كذلك في العالم يموت 3,575 مليون شخص كل عام بسبب أمراض متعلقة بالمياه، ولا يزال أغلبية سكان الريف غير مدركين لعواقب شرب المياه غير المعالجة.

تخلية المياه هي أقدم تقنية يستخدمها الناس لتنقية المياه في العالم. تم اختراع تقنيات مختلفة لتخلية المياه من وقت لآخر وتم قبولها من قبل الناس دون معرفة العواقب البيئية المستقبلية لها. وتستخدم تقنيات التخلية الرئيسية مثل التقطير بضغط البخار، والتناضح العكسي والتحليل الكهربائي. ولكن في السنوات الأخيرة، تأثرت معظم دول العالم بشكل كبير بأزمة الطاقة بسبب الاعتماد الشديد على مصادر الطاقة التقليدية (محطات توليد الطاقة بالفحم، والوقود الأحفوري، وما إلى ذلك)، والتي أثرت بشكل مباشر على البيئة والنمو الاقتصادي في هذه البلدان. إن المناخ المتغير هو أحد التحديات الرئيسية التي يواجهها العالم بأسره اليوم. وقد أكد الارتفاع التدريجي في متوسط درجات الحرارة العالمية، وزيادة مستوى سطح البحر وذوبان الأنهار الجليدية والصفائح الجليدية الملحة لمعالجة هذه المشكلات. ومن جهة أخرى لا يمكن حل جميع هذه المشاكل إلا من خلال الاستخدام الفعال لموارد الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح والكتلة الحيوية والمد والجزر والطاقة الحرارية الأرضية، إلخ.

إن الطاقة الشمسية متوفرة بكثرة في معظم المناطق الريفية والحضرية، وبالتالي فإن التقطير الشمسي هو الحل الأفضل وخاصة المناطق الريفية، حيث إنها تقنية بسيطة واقتصادية أكثر من الطرق الأخرى المتاحة. حيث أن حوض المقطر الشمسي يكون به مياه غير نقية ويتم تمرير أشعة الشمس عبر الغطاء الزجاجي لتسخين الماء في الحوض ويتبخر الماء. نظرًا لأن الماء داخل المقطر يتبخر، فإنه يترك جميع الملوثات والميكروبات في الحوض. ثم يتكثف بخار الماء المنقى على الجانب الداخلي من الزجاج، ويتم جمعه في حاوية مغلقة (Tiwari et al. 2008)².

¹ Vinothkumar K, Kasturibai R. Performance study on solar still with enhanced condensation. Desalination 2008;230:51-61.

² Tiwari GN, Tiwari AK. Solar distillation practice for water desalination systems. New Delhi: Anamaya Publishers; 2008.

الإشكالية الرئيسية: ومن بين أهم المشاكل المتعلقة بتوفير الماء الصالح للشرب هي توفر الطاقة اللازمة لتنقيته ونقله وتخزينه. ونظرا لاستنزاف الطاقات التقليدية كطاقة النفط والفحم الحجري، وحتى الطاقات الفعالة وذات المردود العالي كالطاقة النووية، وجب البحث عن مصادر لطاقة دائمة أو لها دورة تُجَدَّدُ فيها، ومن بين تلك الطاقات الواعدة هي الطاقة الشمسية بشكلها الحراري والمتمثل في الإشعاع الحراري، وشكلها الكهربائي والمتمثل في الفعل الكهروضوئي، وفي هذا البحث سوف يدرس النوع الحراري من الطاقة الشمسية لإنتاج المياه الصالحة للشرب؛ وتكون هذه المياه إما نقية تماما (بالتقطير) أو صافية من بعض الأملاح المعدنية التي كانت ذائبة فيها، وبعدها تعالج للحصول على مياه قابلة للشرب.

أهداف الدراسة: وفي هذه الدراسة يتم التركيز على المقطرات الشمسية والتي تعتمد على الفعل الحراري الناتج من الإشعاع الحراري الشمسي، وكذلك لتحسين فعالية كل مقطر، واستنتاج المقطر الأكثر فعالية. وقد تمت هذه الدراسة على الجانب النظري والجانب التجريبي، ومحاكاة النظري بالتجربي للحصول على نماذج رياضية تربط كمية الماء المنتج بالتغيرات الداخلية والخارجية الداخلة في تشغيل المَقْطَرِ الشمسي، ويمكن كذلك اخضاع النماذج الرياضية المستخدمة في الجانب النظري والتجربي لاختبار صدقية التطبيق وذلك باستخدام برنامج محاكاة المسمى MATLAB.

المنهج المتبع في الدراسة والأدوات المستخدمة: الجانب التجريبي تطرق لمقارنة بعض النماذج التجريبية المصنعة محليا والمحسنه والمضاف لها تركيبة تساعد في زيادة الكفاءة الطاقوية والإنتاجية معا، ومن بين تلك التجارب المختارة خمس تجارب. وقد اعتمدت الدراسة على تسميات مختصرة لأجهزة التقطير لتسهيل التعامل معها في هذا البحث. فمثلا المقطر الشمسي البسيط نرزم له (SSS) وهي اختصارا للعبارة التالية: **Simple Solar Still**، والتجارب التي تم فيها التحسين كما يلي:

الفرضيات والأسئلة المطروحة في الدراسة: أول تجربة تمت على المقطر البسيط بميل واحد بوجود مضخة حرارية للتكثيف (SSS-HP)¹. وكانت التركيبة المضافة عبارة عن مضخة حرارية بها مبخر لمائع التبريد يمتص الحرارة من البخار ليحوّله إلى سائل، وبالتالي المضخة ساهمت بهذا المبخر كمكثف ثاني بعد الزجاج الشفاف الذي نعتبره مكثفا أساسيا في المقطر. وكانت النتائج في هذه التجربة ذات أهمية كبيرة من حيث الزيادة في إنتاجية الماء، ومنه يمكن اعتبار هذا التحسين قابل للتنفيذ في المخابر والمصالح التي تحتاج ماء مقطرا بكميات كبيرة وبدون تكلفة طااقوية تذكر. حيث أن الطاقة الشمسية الحرارية تغذي مبخر المقطر وتقوم بتسخينه، والطاقة الشمسية الكهربائية بدورها تغذي ضاغط المضخة الحرارية².

¹ Simple Solar Still with Heat Pump

² (أكثر تفاصيل في الفصل الخامس الصفحات 165-172).

ثان تجربة تمت على المقطر البسيط بميل واحد بوجود سُمك أقل في الزجاج (SSS-LTG)¹. وكان السؤال المطروح في هذه التجربة: ما هو تأثير سُمك الزجاج في إنتاجية الماء المقطر؟ ومنتظر من النتائج أن السُمك الأقل يسمح بمرور إشعاع حراري أكبر وبالتالي يتم تسخين المبخر بكمية حرارة ممتصة أكبر، وكذلك السُمك الأقل للزجاج يسمح للزجاج بالتخلص بكمية أكبر من حرارة البخار لتحويله لسائل، ومنه يمكن اعتبار أن سُمك الزجاج له تأثير مزدوج على المبخر من جهة والمكثف من جهة أخرى، وأن السُمك الأقل هو الأفضل لإنتاجية أكبر، لكن يجب مراعاة هشاشة الزجاج وعدم المبالغة في تقليل قيمة سُمك الزجاج، والبحث عن حل وسط بين إنتاجية أكبر وصلابة مقبولة للجهاز².

ثالث تجربة أجريت على المقطر البسيط بميل واحد بوجود طبقتين من الزجاج (SSS-DLG)³. وكان الهدف هو معرفة تأثير الفراغ الموجود بين طبقتي الزجاج، والسؤال الثاني كان مطروحا على إمكانية تأثير تحريك الماء في الوسط البيئي بين طبقتي الزجاج. والتجربة الثانية سوف تجيب على شق مهم من الأسئلة المطروحة في هذا التساؤل، ومن المفترض أن زيادة السمك تؤثر بالسلب على إنتاجية الماء فكيف بإضافة طبقة ثانية من الزجاج للمكثف، ومن حيث المبدأ فإن الزجاج المزدوج سوف يصبح عائقا أمام مرور الإشعاع الشمسي وعازلا للحرارة المنزوعة من البخار لتحويله لسائل، وسوف يتم في هذه التجربة تمرير الماء بين الطبقتين لنقل كمية إضافية من الحرارة والنتائج المتوقعة تنص على أن المقطر بطبقة واحدة تكون إنتاجيته أكبر من المقطر بطبقتين. وحسب الفرضية لا ينصح باستخدام هذا التحسين لأنه لم يضيف إنتاجية وكان مكلفا وغير عملي⁴.

التجربة الرابعة تطرقت لتركيبة بسيط يتمثل في المقطر البسيط بميل واحد بوجود سطح أسود من الإسفنج (SSS-BSS)⁵. حيث تم وضع طبقة من الاسفنج الملون بالأسود على المبخر، ومنه أصبح الاسفنج يقوم بدور المبخر فيمتص الإشعاع الحراري، ويوزع الحرارة على الماء السائل فيتحول إلى بخار. وحسب الفرضية فإن الاسفنج له كفاءة كبيرة في نقل الحرارة للماء وتبخيره وذلك بفضل المسامات والوسط ذو الثقوب الذي يتميز به الاسفنج. ومن جهة أخرى تكون إنتاجية المقطر المدعوم بالإسفنج أكبر منها بدون اسفنج، ولذلك حسب ما سبق ينصح باستخدام هذا الاجراء لتحسين أداء المقطر، ومن الممكن استخدام أي مادة ذات ثقوب وتضاريس على المبخر كالرمل والزجاج والقماش الملون بالأسود، وهذه التجربة سوف تؤكد أو تنفي صحة هذه الفرضية⁶.

¹ Simple Solar Still with Less Thickness in Glass

² (أكثر تفاصيل في الفصل الخامس الصفحات 173-177)

³ Simple Solar Still with Double Layer of Glass

⁴ (أكثر تفاصيل في الفصل الخامس الصفحات 178-184)

⁵ Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge

⁶ (أكثر تفاصيل في الفصل الخامس الصفحات 185-189)

وآخر تجربة تمت على المقطر البسيط بميل واحد بوجود مروحة فوق الزجاج (SSS-FOG)¹. والتركيب في هذه التجربة يعتمد على مروحة تشتغل بالطاقة الشمسية الكهربائية موضوعة فوق الزجاج في الحافة العلوية، والسؤال كان يتمحور على دور سرعة الهواء الناتج من المروحة، هل للسرعة تأثير على إنتاجية الماء؟ ومن المفترض أن التجارب سوف تصل إلى النتيجة التالية: أنه كلما زادت السرعة زادت الإنتاجية، وأن عملية التبريد لها تأثير واضح على كفاءة المقطر².

التجارب الخمسة تفصيلها موضحة في الفصل الخامس، وملخصة بالنتائج في آخر هذه الأطروحة. أما عن الجانب النظري فقد اهتم بكل أشكال انتقال الحرارة (حمل وتوصيل وإشعاع)، وأهم الإجراءات الحرارية التي تحدث في خلية التقطير وهي التبخير والتكثيف والإشعاع الشمسي والحراري، وبما أنّ المقدارين الفيزيائيين الحرارة والكتلة مقدارين تَوْسِيعِيَيْن (Extensives) وجب دراسة ميزان حفظ هذين المِقْدَارَيْن (Energy and mass balance)، والربط بينهما لِمَعْرِفَةِ تأثير كل عامل في فعالية المَقْطَرِّ، وهذا من أجل جعل التأثير يكون إِيْجَابِيًّا بقدر الإمكان. أما عن الجانب التجريبي فيعطي فكرة عما يَحْدُث من ظواهر فيزيائية، ويُمكنُنَا من وضع معادلات رياضية تعبر عن هذه الظواهر وتفسيرها، وبما تم الوصول إليه في الجانب النظري من تفسير ومقارنة. ولإثبات التوقعات النظرية ووضع النماذج الرياضية؛ كان لزاما قياس المُنْتِجَات والثوابت تجريبيا ومعرفة تأثيرها على مردود المَقْطَرِّ.

وهذا ما سيتناوله هذا البحث بالاستعانة بمقطين شمسيين بسيطين وحيدى الميل، وفي كل مرة نعتد أحد المقطين شاهد (conventionnel) على التجربة والثاني به تحسين (Active) ونقارن بين الجهازين في الأداء والإنتاجية. وقد تمت الدراسة على مستوى وحدة البحث بمخبر الطاقات المتجددة للمناطق الجافة والصحراوية (LENREZAS)³ بكلية الرياضيات وعلوم المادة بجامعة قاصدي مرباح بورقلة (الجنوب الشرقي الجزائري). ومنطقة ورقلة تتميز بمقادير جوية خاصة من بينها (إشعاع شمسي معتبر، طول مدة الشمس، درجة حرارة الهواء المحيط معتبرة.....). وللمنطقة الموقع الجغرافي التالي: دائرة عرض 31.93° شمالا و 5.30° شرقا و 140 متر ارتفاع عن سطح البحر، وذات مناخ صحراوي جاف بارد شتاء وحار صيفا.

مبررات اختيار الموضوع: وبعد عرض مفصل للأهداف الرئيسية والفرضيات في الفقرات السابقة، يمكن أن نلخص الأهداف في هدف أساسي وهو: إنشاء خلية تقطير شمسي دائمة لتزويد مخابر الفيزياء والكيمياء بجامعة ورقلة بالماء المقطر اللازم للأجهزة التي تستعمل في البحث العلمي وحصص الأعمال التطبيقية من قبل الطلبة، والاستغناء عن شراء الماء المقطر لتزويد هذه المخابر بشكل دائم، والتقليل من التكلفة الاقتصادية للتزويد بالماء⁴.

¹ Simple Solar Still with a Fan Over Glass

² (أكثر تفاصيل في الفصل الخامس الصفحات 190-195)

³ Laboratory of new and renewable energies in dry desert areas (Laboratoire des Energies Nouvelles et Renouvelables En Zones Arides Sèches)

⁴ (لمزيد من التفاصيل أنظر الصفحة 198- الخاتمة)

هيكل وخطة الدراسة: يحتوي هذا البحث إجمالاً على خمس فصول حيث أن الفصل الأول المعنون بـ (دراسة عامة حول الماء) يتطرق للماء ومشكلة توافره ومواصفات ماء الشرب ونسب استهلاكه حسب كمية الماء في اليوم، والحلول المقترحة لمشكلة نقص المياه وتلوثها، وانتهت الدراسة بنموذج عن الجزائر والتي تتميز بتعدد مناخاتها وكذا المشاكل المتعلقة بالماء التي تعاني منها. أما الفصل الثاني ذو العنوان التالي: (دراسات سابقة حول المقطرات الشمسية) فيحوي تفاصيل لأنواع المقطرات الشمسية وبالرسومات التخطيطية لكل نوع من الأنواع المقترحة، ولكي تكون الدراسة ذات مرجعية سابقة تم تصنيف الدراسات السابقة حسب نوع التحسين الذي تم على المقطرات، والأنواع الأساسية هي أربع؛ النوع الأول: مقطرات تعمل بتسخين المبخر بدرجات حرارة عالية، والثاني: مقطرات تعمل باستخدام الماء المسخن مسبقاً، والثالث: مقطرات تعمل بالإنتاج الليلي، والرابع: مقطرات تعمل بتبريد المكثف بدرجات حرارة منخفضة¹. والدراسة اعتمدت على 65 نموذج سابق موزعة على الأنواع الأربع. والفصل الثالث كان تحت عنوان: (الظواهر الفيزيائية الأساسية في عملية التقطير)، ويحوي هذه الفصل على دراسة نظرية لأهم النظريات المساهمة في عمل المقطر، ونذكر من تلك الظواهر التبخير والتكثيف والإشعاع الشمسي والحراري. والفصل الرابع الذي عُنونَ بـ (دراسة التوازن الطاقوي في مختلف المقطرات الشمسية)، واهتم هذا الفصل بالدراسة النظرية للمقطر الشمسي البسيط وحيد الميل والتحسينات التي تمت عليه بشكل نظري، حيث يستعرض هذا الفصل مختلف العلاقات النظرية للتوازن الحراري والكتلي في المقطرات محل الدراسة. وفي الفصل الخامس والذي اُختيرَ له العنوان التالي: (الدراسة التجريبية لتحسين مردودية المقطرات الشمسية)، والذي اهتم بتفصيل موسع للتجارب التي تمت على المقطرات الخمس لمعرفة تأثير التراكيب المختلفة في المقطرات من خلال سلاسل التجارب ومناقشتها واستخلاص النتائج منها. وفي الأخير الخروج بخلاصة عامة للجانب النظري والتجريبي في الخاتمة.

الصعوبات التي واجهت البحث: يمكن تصنيف الصعوبات إلى نوعين، النوع الأول يتمثل في صعوبة ضبط النماذج التجريبية من حيث التشابه بين الجهاز الشاهد والذي تم عليه التحسين في كل تجربة. أما النوع الثاني من الصعوبات فقد كان في النماذج النظرية وشبه التجريبية المقتبسة من المراجع والشك في صديقتها، ولإزالة هذا الشك يجب التأكد من أحد المقادير الفيزيائية الداخلة في تشغيل جهاز التقطير، ويبدو أن درجة الحرارة لمختلف المستويات الحرارية يمكن التحقق منها باستخدام برنامج MATLAB أو FORTRAN لاختبار صدقية النماذج المقترحة من المراجع ومقارنتها بالنتائج التجريبية، والتحقق يعتمد على الطرق العددية لحل المعادلات التفاضلية مثل الطرق التالية:

(Runge-Kutta 4th Order Method to Solve Differential Equation)

(Euler Method for solving differential equation)

أنظر الشكل (1-2) الصفحة 26- الفصل الثاني¹

الفصل الأول

دراسة عامة حول الماء

المحتوى:

- (1) مشكلة المياه الصالحة للشرب في العالم
- (2) نسب المستهلكين للمياه
- (3) الحلول المقترحة لحل مشكلة نقص المياه وتلوثها
- (4) أهم الإجراءات المتبعة لتوفير مياه الشرب والمياه الآمنة
- (5) مشكلة نقص المياه في الجزائر
- (6) المخزون المائي الجوي والحلول المقترحة لحل مشكلة نقص المياه في الجزائر
- (7) محطات تحلية مياه البحر في الجزائر
- (8) استغلال الطاقة الشمسية لإنتاج المياه حسب وجهة النظر الاقتصادية
- (9) كمية الأمطار المتساقطة في الجزائر
- (10) التحليل الفيزيائي وكيميائي للمياه

مقدمة الفصل الأول:

هذا الفصل يعتبر مقدمة لتعريف الماء وضرورته في الحياة والمشاكل المترتبة عن نقصه، وحسب التعريف فإن الماء مادة شفافة عديمة اللون والرائحة، وهو المكوّن الأساسي للجداول والبحيرات والبحار والمحيطات وكذلك للسوائل في جميع الكائنات الحيّة، وهو أكثر المركّبات الكيميائيّة انتشاراً على سطح الأرض. يتألّف جزيء الماء من ذرّة أكسجين مركزية ترتبط بها ذرّتا هيدروجين على طرفيها برابطة تساهميّة بحيث تكون صيغته الكيميائيّة H_2O ، وعند الظروف القياسية من الضغط ودرجة الحرارة يكون الماء سائلاً؛ أمّا الحالة الصلبة فتتشكّل عند نقطة التجمّد، وتدعى بالجليد؛ أمّا الحالة الغازية فتتشكّل عند نقطة الغليان، وتسمّى بخار الماء.

إنّ الماء هو أساس وجود الحياة على كوكب الأرض، وهو يغطّي 71% من سطحها، وتمثّل مياه البحار والمحيطات أكبر نسبة للماء على الأرض، حيث تبلغ حوالي 96.5%. وتتوزّع النسب الباقية بين المياه الجوفيّة وبين جليد المناطق القطبيّة (1.7% لكليهما)، مع وجود نسبة صغيرة على شكل بخار ماء معلق في الهواء على هيئة سحب (غيوم)، وأحياناً أخرى على هيئة ضباب أو ندى، بالإضافة إلى الزخات المطريّة أو الثلجيّة. تبلغ نسبة الماء العذب حوالي 2.5% فقط من الماء الموجود على الأرض، وأغلب هذه الكميّة (حوالي 99%) موجودة في الكتل الجليديّة في المناطق القطبيّة، في حين تتواجد 0.3% من الماء العذب في الأنهار والبحيرات وفي الغلاف الجوّي.

أما في الطبيعة، فتتغيّر حالة الماء بين الحالات الثلاثة للمادة على سطح الأرض باستمرار من خلال ما يعرف باسم الدورة المائيّة (أو دورة الماء)، والتي تتضمّن حدوث تبخّر ونتح (نتح تبخّري) ثم تكثيف فهطول ثم جريان لتصل إلى المصبّ في المسطّحات المائيّة.

1) مشكلة المياه الصالحة للشرب في العالم:

إن الحاجة لإيجاد مصادر للمياه الصالحة للشرب في العالم في تزايد مستمر، وذلك راجع لنقص المياه الجوفية، وخاصة في المناطق الجافة، والمناطق شبه الجافة، ونجده في المناطق الحضرية مطروحا بشكل واضح وذلك راجع لأسلوب الحياة وتزايد عدد السكان في هذه المناطق.

وبما أن مياه الأمطار لا تتساقط بشكل مستمر، وذلك يرجع دائماً للجفاف والتصحر، وهذا الوضع يؤدي للبحث عن مصادر للمياه لا تنفذ حتى وإن كانت مالحة، مثل المياه الجوفية، والتفكير منصب كذلك في الطرق التي تجعل المياه المالحة (brackish water) صالحة للشرب (potable- drinkable)، فمثلا مياه منطقة ورقلة لها خصائص بعيدة عن المقاييس المتفق عليها في منظمة الصحة العالمية، كمية الملوحة فيها تقدر من 1500 إلى 2000 (p.p.m)¹.

¹ (p.p.m) : part per million

ونزع الأملاح من هذه المياه غير الصالحة للشرب يتم بطرق تقليدية باستعمال الطاقة الكهربائية أو الحرارية. ومن أجل تحديد المشاكل، والتغلب عليها يجب توفير كمية كافية من المياه في المناطق التي تشكو نقصاً فيه، وخاصة المناطق الجافة. وقد شكّل الحصول على مصدر نقي من مياه الشرب أمراً مهماً لنشوء الحضارات عبر التاريخ. وفي العقود الأخيرة، سجلت حالات شحّ في المياه العذبة في مناطق عديدة من العالم، ولقد قدّرت إحصاءات الأمم المتحدة أنّ حوالي مليار شخص على سطح الأرض لا يزالون يفتقرون الوسائل المتاحة للوصول إلى مصدر آمن لمياه الشرب، وأنّ حوالي 2.5 مليار يفتقرون إلى وسيلة ملائمة من أجل تطهير المياه.

(2) نسب المستهلكين للمياه: (تستثنى منها مياه الري) هي:

يعرّف ماء الشرب بأنّه الماء الصالح للاستخدام والاستهلاك البشري في الأمور الأساسية كالشرب والاستخدامات المنزلية الأساسية. يمكن تحويل الماء غير الصالح للشرب وجعله صالحاً بالترشيح أو بالتقطير أو بوسائل معالجة أخرى. بالتعريف: يدعى الماء غير الصالح للشرب والصالح للاستخدام المنزلي لأموال النظافة باسم "مصدر ماء آمن" (أو مياه مأمونة)، وهي مياه يمكن تعقيمها بعد استخدامها بواسطة معالجة كيميائية بالكلور أو الأوزون أو الأشعة فوق البنفسجية. تحدّد جودة الماء وملاءمته للاستخدام عادةً بإجراء التحاليل الكيميائية الموافقة في المختبرات المختصة بذلك. ونسب المستهلكين للمياه تقسم كما يلي:

8% من المستهلكين يستغلون 5L/ per /jour.

26% من المستهلكين يستغلون 5 إلى 20L/per/jour.

50% من المستهلكين يستغلون 20 إلى 40L/ per /jour.

16% من المستهلكين يستغلون أكثر من 40L/ per /jour.

أقل كمية مقدرة والضرورية للحياة هي 40 L/ per /day، ومنه ينتج أن 84 % من سكان المعمورة يعانون نقصاً في حاجتهم الضرورية للمياه.

(3) الحلول المقترحة لحل مشكلة نقص المياه وتلوثها:

يجب أن تكون الحلول الطبيعية قدر الإمكان، ونستطيع أن نحدد أربعة حلول لذلك حسب حاجة الإنسان للمياه:

وجود أو عدم وجود مصادر للمياه الطبيعية (مياه البحر-مياه الشطوط-المياه الجوفية المالحة...)

وجود أو عدم وجود مصدر حراري (نفت-غاز طبيعي-أخشاب وبقايا نباتية...)

وبالتعريف: يشار إلى المياه غير الصالحة للشرب والناجمة بعد الاستهلاك البشري لها باسم المياه الرمادية، وهي التي يمكن معالجتها بسهولة نسبياً، في حين أنّ تعبیر المياه السوداء يشير إلى مياه الصرف الصحي التي تتطلب معالجة شاملة، مع

الإشارة إلى وجود اختلاف في تعريف هذه المسميات وذلك حسب القوانين المنظمة لكل بلد. عند غياب المعالجة الكافية والرقابة الحكومية تحدث حالات تلوث للمياه على مستوى فردي وصناعي، خاصة في الدول النامية، حيث أبرز تقرير سنة 2002 أنّ 90 % من مياه الصرف تترك بلا معالجة لتصب في الجداول والأنهار الجارية أو تترك لترشح إلى المياه الجوفية لتلوثها.

ومن جهة أخرى يعد توفير المياه الصالحة للشرب من خلال المعالجة المركزية في البلدان النامية من العمليات الصعبة للغاية. حيث أن أنظمة التوزيع تحتاج إلى عمليات التشغيل والصيانة المستمرة وقد يحصل تلوث مياه الشرب أثناء التوزيع أو التداول في المنازل في كثير من الأحيان. ولذلك فإن المعالجة لمياه الشرب على مستوى المنزل عن طريق استخدام طرق بسيطة وفعالة وتنقية المياه المنزلية والتخزين الآمن (Household Water Treatment and Safe Storage -HWTS) مع خيارات مثل الغليان، والترشيح، والمعالجة بالكلور وتعقيم المياه بالطاقة الشمسية (Solar Disinfection -SODIS) يمكنه أن يقلل إلى حد كبير من حالات الأمراض التي تنقلها المياه.

مزايا عملية SODIS- HWTS :

1. غير مكلفة نسبيا وفعالة من حيث التكلفة.
2. مستقلة عن النظم المؤسسية أو النظم المركزية.
3. يمكن نشرها بشكل أسرع من أنظمة معالجة المياه والشرب المركزية والمحلية.
4. يُحسّن جودة المياه بيولوجيا ويقلل من خطر التلوث بين المعالجة والاستخدام.
5. مجموعة واسعة ومتاحة من التقنيات ذات التكلفة البسيطة، والتي من الممكن أن يختار المستهلكون التقنيات الملائمة لهم.

عيوب عملية SODIS- HWTS :

1. من الصعب المراقبة لعمليات التشغيل والصيانة الصحيحة للتقنيات.
2. ارتفاع المسؤولية الذاتية المطلوبة من المجتمعات المنزلية.
3. ينبغي توفير المعرفة الخاصة بالصيانة والتشغيل لنظام المعالجة للمجتمع المنزلي.
4. قد تكون المياه المعالجة أقل جودة من تلك التي يوفرها نظام المعالجة المصمم والمشغل والمصان بشكل جيد للمجتمع المحلي.

4) أهم الإجراءات المتبعة لتوفير مياه الشرب والمياه الآمنة:

4-1) حماية مصدر المياه:

المخاطر التي قد تهدد نوعية مياه الشرب عند مصدرها أو نقطة جمعها تشمل:

- سوء اختيار الموقع أو ضعف الحماية؛
- ضعف البناء والانشاءات وتدهور أو تهاك البنية التحتية؛
- وانعدام المعرفة الخاصة بأمور النظافة والصرف الصحي في المجتمع؛

الإجراءات التي يمكن اتخاذها على مستوى المجتمع المحلي للقضاء على هذه المخاطر تشمل ما يلي:

- تنظيف المنطقة حول مصدر المياه بشكل منتظم. نقل المراحيض بعيدا عن مجرى النهر ومصادر المياه؛
- بناء الاسوار لمنع الحيوانات من الدخول في مصادر المياه المفتوحة؛
- تبطين الآبار لمنع المياه السطحية من تلويث المياه الجوفية؛
- بناء المجاري السليمة لمياه الصرف الصحي حول الصنابير والآبار؛

4-2) عملية الترسيب:

الترسيب هو عملية المعالجة الفيزيائية المستخدمة للحد من عكارة الماء. والمواد العالقة في الماء مثل الجسيمات من الرمال والطين، ومواد أخرى يمكن إزالتها بشكل كبير ببساطة عن طريق ترسيب الماء. ويمكن القيام بذلك عن طريق استخدام مستودع أو خزان طبيعي، بركة ترسيب، أو خزان كبير.

يمكن تسريع عملية الترسيب من خلال استخدام مواد التخثير. هذه المواد طبيعية (مثل المورينجا) واصطناعية (مثل منقي المياه...). المواد الكيميائية التي تؤدي إلى تغيير الشحنات الكهربائية للمواد العالقة. وهذا يسمح للجزيئات للانضمام معا، وبالتالي زيادة كتلتها بحيث تترسب في قاع الإناء. وغالبا ما تلتصق البكتيريا والفيروسات على أسطح الجسيمات، ولذلك فإن إزالة الجسيمات من خلال الترسيب سوف يخفض بشكل ملحوظ تركيزات البكتيريا¹.

مركز توفير المياه وتقنيات الصرف الصحي: وهو مركز متخصص في تقنيات الصرف الصحي وتوفير المياه بأقل تكلفة

وله فروع في 17 دولة عبر العالم.

¹Source :The Centre for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST)

4-3) الترشيح:

يستخدم الترشيح عادة بعد الترسيب لإزالة العكارة ومسببات الأمراض. الترشيح هو عملية فيزيائية تتضمن مرور المياه من خلال وسط ترشيح. تزيل المرشحات مسببات الأمراض بعدة طرق. وتشمل هذه التصفية الجسيمات أو مسببات الأمراض الكبيرة مثل الديدان والتي تصبح محجوزة في الفراغات الصغيرة بين حبيبات وسط الترشيح، حيث تلتصق مسببات الأمراض في وسط المرشح. ويعتمد كذلك على بعض العمليات البيولوجية حيث تموت مسببات الأمراض طبيعياً أو بسبب الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في المرشح التي تلتهم وتستهلك مسببات الأمراض.

وهناك أنواع مختلفة من المرشحات التي يتم استخدامها على المستوى المنزلي في جميع أنحاء العالم، ومنها:

- المرشحات النسيجية (مرشحات القماش)؛
- المرشحات الرمل الحيوية؛
- مرشحات الرمل الحيوية المحسنة لإزالة الزرنيخ؛
- مرشحات السيراميك-مرشحات الشمعة؛ مرشحات الفضة الغروية؛
- مرشحات الأغشية (مثل مرشحات سيليلوز القش)؛
- المرشحات الرملية والمرشحات السيراميك هي الأكثر شيوعاً كأوساط للترشيح؛

وبالرغم من كثرة تنوع المرشحات فإن المرشحات النسيجية تستخدم أيضاً في كثير من الأحيان؛

4-4) التطهير والبسترة:

يعرف التطهير بأنه تدمير الجدار الخلوي لخلايا الكائنات الدقيقة بالأوكسدة. والتطهير يشمل إضافة المواد الكيميائية مثل الكلور. كما يمكن عمل التطهير بالأشعة فوق البنفسجية، مثل ضوء الشمس الطبيعي أو الأشعة فوق البنفسجية الاصطناعية. والطرق الأكثر شيوعاً المستخدمة من قبل المنشآت المنزلية في جميع أنحاء العالم لتطهير مياه الشرب هي التطهير بالكلور والتطهير باستخدام الطاقة الشمسية (SODIS).

يمكن للحرارة أيضاً قتل الكائنات الحية الدقيقة وتسمى هذه العملية البسترة. البسترة لها تقريبا نفس تأثير التطهير. الأساليب الأكثر شيوعاً لتطهير المياه بالبسترة هي الغليان والتعقيم الشمسي أو البسترة الشمسية، حيث أن العكارة المرتفعة تساعد الكائنات الحية الدقيقة لتختبئ من مواد التطهير الكيميائية وتختبئ من الأشعة فوق البنفسجية الطبيعية والاصطناعية ولذلك خفض العكارة بالترسيب والترشيح قبل المعالجة بالتطهير ضروري لتحسين فعالية طرق التطهير سابقة الذكر.

4-5) التخزين الآمن:

الأسر المنزلية تبذل الكثير من العمل لجمع ونقل ومعالجة مياه الشرب الخاصة بها. ليصبح الماء آمناً للشرب فإنه يجب تخزينه وتداوله بصورة صحيحة للحفاظ عليه آمناً. لو تم تخزين المياه بصورة غير آمنة فإن نوعية المياه المعالجة سوف تصبح أسوأ من مياه المصدر ويمكن أن يتسبب ذلك في الإصابة بالأمراض. التخزين الآمن يعني الحفاظ على المياه المعالجة بعيداً عن مصادر التلوث، واستخدام وعاء نظيف ومغطي. وهذا يعني أيضاً استعمال حاويات مياه الشرب بطريقة ما لا تنقل العدوى من شخص لآخر. يجب استخدام أوعية للماء لا تسمح للأيدي، والكؤوس من لمس الماء، حتى لا يصبح الماء ملوثاً مرة أخرى.

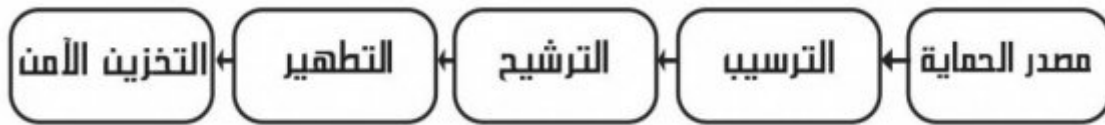
هناك العديد من التصميمات لخزانات المياه في جميع أنحاء العالم. وينبغي أن يشمل وعاء التخزين الآمن الصفات التالية:

- غطاء قوي ومحكم أو وسيلة تغطية؛
- الصنبور أو فتحة ضيقة لخروج الماء؛
- قاعدة مستقرة حتى لا ينقلب؛
- أن تكون دائمة وقوية؛
- لا ينبغي أن تكون شفافة (النظر من خلالها)؛
- سهولة التنظيف؛

وفيما يتعلق بالتخزين الآمن للمياه فإن التطهير بالكلور لديه ميزة على غيرها من الطرق، لأن الكلور المتبقي (يبقي الأثر التطهيري فترة بعد التطهير لوجود الكلور في الماء).

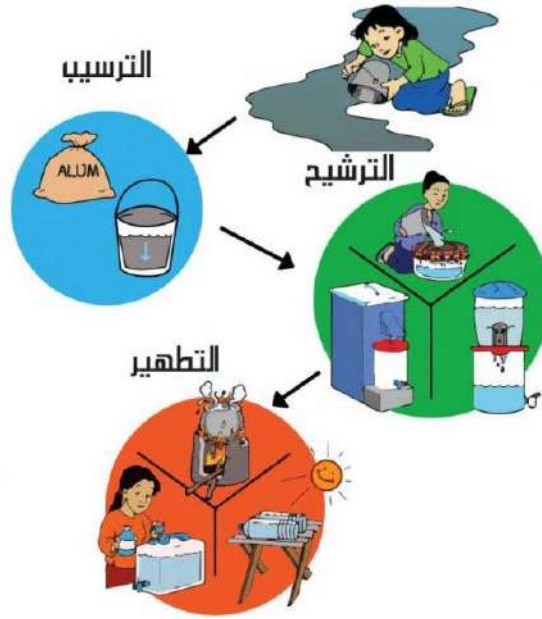
تلخيص خطوات المعالجة المنزلية والتخزين الآمن:

هو منهج متعدد المراحل، وهناك العديد من الخطوات التي تسهم جميعها في المعالجة والتخزين الآمن (مقتبس من CAWST 2009):



الشكل (1-1): الخطوات الخمس للمنهج المتعدد المراحل من HWTS

إن استخدام منهج متعدد المراحل هو أفضل وسيلة للحد من مخاطر شرب المياه غير آمنة. يجب متابعة العملية مرحلة فمرحلة وليس فقط الاعتماد على تقنية واحدة لتحسين نوعية المياه. كلا من المجتمع وانظمة معالجة المياه المنزلية تتبع نفس مراحل المعالجة للمياه. والفرق الوحيد هو في حجم النظم التي تستخدم من قبل المجتمعات المحلية مقارنة بالمنازل.



الشكل (1-2): مخطط يوضح المنهج المتعدد المراحل HWTS المصدر (CAWST 2008).

وفي حالة وجود مياه مالحة يمكن الاعتماد على أحد الأربعة وضعيات موضحة في الجدول (1-1)

جدول (1-1): الوضعيات الأربعة لحل المشاكل المتعلقة بنقص المياه الصالحة للشرب.

وجود أو عدم وجود مصدر حراري		أربع وضعيات حسب السكان المستهلكين للمياه
عدم وجود	وجود	
الوضعية 2: استخدام التقطير الشمسي. استغلال طاقة الرياح.	الوضعية 1: استخدام التقطير الشمسي. استخدام الإنبيق الحراري.	وجود
الوضعية 4: استغلال الرطوبة الجوية. استغلال طاقة الرياح.	الوضعية 3: استغلال الرطوبة الجوية. استخدام الإنبيق الحراري.	عدم وجود

الحالة الأولى: وجود المصدر الحراري والمصدر المائي؛ في هذه الحالة نستعمل الطرق التقليدية للتقطير الحراري فقط،

وعدم اللجوء لطرق اقتصادية لاستغلال الطاقة، وذلك راجع لوجود الطاقة بشكل وافر.

الحالة الثانية: وجود المصدر المائي فقط، في هذه الحالة نستعمل الطاقة الشمسية، وإضافة لذلك استعمال طاقة الرياح

لضغط بخار الماء ميكانيكياً.

الحالة الثالثة: وجود المصدر الحراري وعدم وجود المصدر المائي، من الممكن التقاط رطوبة الهواء الجوي، وخاصة في أوقات الليالي المشبعة بالرطوبة، هذا النوع من الالتقاط يتم بتكثيف بخار الماء الموجود في الهواء الرطب، وباستعمال محلول استرطابي-ماص للرطوبة-.

الحالة الرابعة: في هذه الحالة لا وجود للمصدر المائي ولا الحراري، نستعمل كذلك التقاط الرطوبة الجوية في الليالي الرطبة ومن الممكن إضافة طاقة الرياح للضغط الميكانيكي لبخار الماء أو لتحفيز السائل استرطابي.

5) مشكلة نقص المياه في الجزائر:

تنقسم موارد المياه في الجزائر إلى قسمين، النوع الأول مياه السدود وهي من مياه الأمطار المتساقطة موسمياً، ونادراً ما تتساقط في غير مواسمها كفصل الصيف الذي يشهد جفافاً لسنوات عديدة؛ والنوع الثاني من المياه الجوفية التي تعتبر خزان ضخم يقدر بـ: مليار وثلاثة مائة مليون متر مكعب (1.3 Milliard m^3)، ورغم حجم هذا الخزان الكبير تبقى تكلفة استخراج المياه كبيرة، لأنها تعتمد عادة على الطاقة الكهربائية المنتجة من النفط (عموماً الطاقات الأحفورية). وإذا طرحنا المشكلة حسب المناخ والموقع الجغرافي؛ فيعتبر الشمال الجزائري منطقة عاجزة عن تلبية حاجيات السكان، بحيث أن المورد الأساسي هو مياه الأمطار المتذبذبة السقوط. ولا تملك المنطقة الشمالية في الجزائر احتياطي من المياه الجوفية ما عدا الآبار غير العميقة والتي عادة تكون ملوثة، ولا أنهار كبيرة يُعتمد عليها كمورد للمياه العذبة، فكل الأنهار ضيقة وغير صالحة حتى للإبحار، بل هي في أحسن الأحوال وديان كاذبة تُملأ شتاءً وتجف صيفاً. أما الجنوب الجزائري فيسوده الإقليم الصحراوي الحار صيفاً والبارد شتاءً والجاف على مدى السنة، لكن الموقع الجغرافي لهذه المنطقة يجعل المياه الجوفية تتسرب من منطقة الأطلس الصحراوي وكذا سلاسل الأطلس الجبلية في المغرب الأقصى، مما يجعلها خزان ضخم بالمياه يقدر بـ: (0.6 Milliard m^3).

6) المخزون المائي الجوي والحلول المقترحة لحل مشكلة نقص المياه في الجزائر:

للتغلب على مشكلة نقص المياه كان لزاماً أن يُنشأ على مستوى التراب الجزائري عدد كاف من السدود، وتكون في مناطق ذات نسبة تساقط للأمطار كافية كالشمال الذي يسوده إقليم البحر الأبيض المتوسط المُمطر شتاءً في أغلب الأحيان. وكذلك إنشاء محطات تصفية المياه الملوثة والمصرفة لاسترجاعها، وتدعيم القاعدة الصناعية بمصانع لتنقية المياه المالحة كمياه البحر، أو الاعتماد على التجربة الليبية في تحويل المياه الجوفية الجنوبية إلى الشمال لتلبية حاجات السكان والمساحات الزراعية الخصبة، عندها يقع التكامل بين الشمال والجنوب. وبالنسبة لسياسة تسير الموارد المائية في الجزائر فهي تميل إلى تشييد السدود بالدرجة الأولى، ثم إلى تنقية المياه المالحة.

ومن بين أهم المنشآت في هذا الميدان موضحة في الجدول (1-2)

جدول (1-2): المنشآت الخاصة بإنتاج الماء حسب تاريخ الإنجاز، المصدر : (Kehal 2001)¹

الموقع	عدد الوحدات	الإنتاج م ³ /اليوم	أسلوب التقطير	تاريخ الإنشاء
سكيكدة	1	1440	بسيط	1971
سكيكدة	2	720	بسيط	1971
سكيكدة	-	1440	تبادل أيوني	1971
عناية	2	960	تبادل أيوني	1971
عناية	2	3600	تبادل أيوني	1973
غزوات	1	840	تبادل أيوني	1974
أرزيو (وهران)	6	3888	الاستقطاب الكهربائي	1975
أرزيو (وهران)	-	960	تبادل أيوني	1975
حاسي مسعود (ورقلة)	6	1000	الاستقطاب الكهربائي	1975
حاسي مسعود (ورقلة)	2	110	الاستقطاب الكهربائي	1976
قاسي الطويل (ورقلة)	1	55	الاستقطاب الكهربائي	1977
أرزيو	1	350	الضغط الحراري	1978
عناية	3	14180	المتعدد	1978
حاسي مسعود (ورقلة)	2	350	الاستقطاب الكهربائي	1978
بلعباس	-	1500	تبادل أيوني	1978
حوض بركاوي (ورقلة)	1	55	الاستقطاب الكهربائي	1979
حاسي مسعود (ورقلة)	2	300	الاستقطاب الكهربائي	1979
روض البافل	1	25	الاستقطاب الكهربائي	1979
أرزيو (وهران)	1	960	المتعدد (5 طوابق)	1979
عناية	2	144	تبادل أيوني	1979
عناية	2	576	تبادل أيوني	1979
حاسي الرمل (الأغواط)	3	792	الأمموز العكسي	1979
عناية	2	6240	تبادل أيوني	1980
غرداية	-	960	الأمموز العكسي	1980
أرزيو	1	960	المتعدد (6 طوابق)	1980
مستغاثم	-	57600	الأمموز العكسي	1980
روض البافل	2	300	الاستقطاب الكهربائي	1981
بسكرة	-	864	الأمموز العكسي	1981
عناية	1	1800	تبادل أيوني	1981
رغاية	-	160	تبادل أيوني	1982

¹ Kehal, Salim. 2001. "Retrospective et perspective du dessalement en Algérie." *Desalination* 136 (1-3): 35-42

7) محطات تحلية مياه البحر في الجزائر:

والجزائر تملك ساحل يبلغ طوله 1.622 كم، فقد بدأت الجزائر في تحلية مياه البحر لتوفير مياه الشرب للمدن والبلدات الواقعة على بعد 60 كم من الساحل. وفي عام 2016، كانت البلاد تضم 11 محطة كبيرة لتحلية المياه قادرة على إنتاج ما يصل إلى 2.21 مليون متر مكعب من المياه المحلاة يوميا كما هو موضح في الجدول (1-3). وسيؤدي تشغيل محطتين إضافيتين إلى رفع الطاقة الإنتاجية الإجمالية إلى 2,3 مليون متر مكعب في اليوم بحلول عام 2020. حسب المصدر:

Safar-Zitoun M, 2018. Plan National Secheresse Algerie: Deuxième Version. Convention des Nations Unies de Lutte contre la Désertification.

جدول (1-3): المنشآت الخاصة بإنتاج الماء بتحلية مياه البحر إلى غاية 2016.

المصدر: GIZ/BGR/OSS, 2016. Projet CREM: Etude d'évaluation du secteur de l'eau en Algérie

المحطات	كبيرة	صغيرة	الإجمالي
العدد	9	21	30
القدرة الإنتاجية (مليون متر مكعب/ اليوم)	1 410 000	57 500	1 467 500
الإنتاج (مليون متر مكعب/ السنة)	514.6	21	535.6

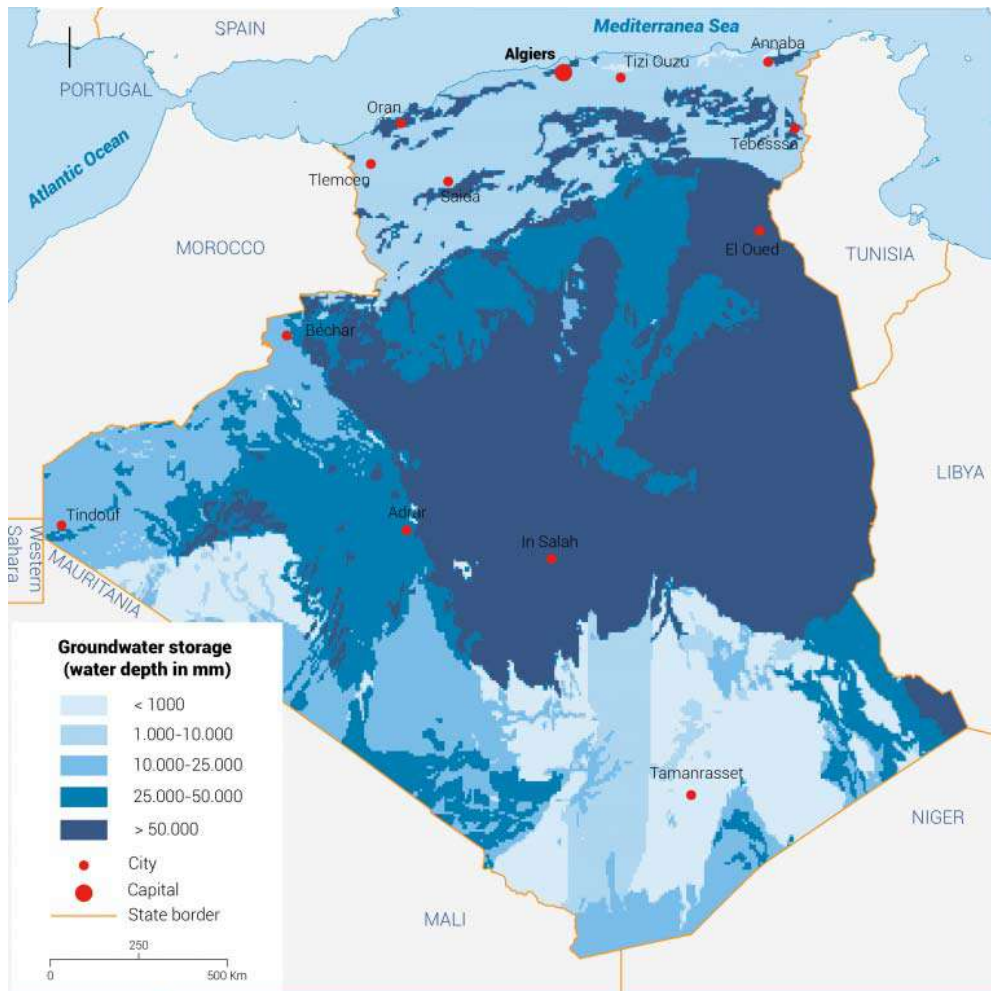
8) كمية الأمطار المتساقطة في الجزائر: $L/m^2/year$

إن كمية المياه المتساقطة سنويا هي التي تحدد مدى العجز أو الاكتفاء بالماء ، فمثلا المنطقة الساحلية يسجل فيها معدل أكثر من $2000mm/year$ ($L/m^2=mm$)¹ ، أما في شمال الصحراء فالمعدل أقل من $100mm/year$ ، وبالنسبة للشرق الجزائري فهو أكبر نسبة من الغرب، وذلك راجع إلى سلسلة الأطلس التلي التي تحصر السحب الآتية بفعل الرياح الغربية من المحيط الأطلسي محملة بالأمطار وهي من النوع العالي والمتوسط الارتفاع، أما فيما يخص الاختلاف في المناخ الناتج من الفروق الواضحة في الأقاليم ، فقد قُسمت منطقة الجزائر إلى 22 منطقة كما هو مبين في الجدول (1-4) :

¹ ويقصد بالوحدة mm لحساب تساقط الأمطار ب : $1 L/m^2=100000 mm^3/1000000 mm^2=1 mm$

جدول (1-4): تقسيم المناطق المناخية في الجزائر حسب تساقط الأمطار

ب: مم/سنة	غرب	وسط	شرق
الساحل	400	700	900
الأطلس التلي (السهول)	500	450	700
الأطلس التلي (مرتفعات)	600	1000-700	-
الهضاب العليا (التلية)	-	-	400
الهضاب العليا (السهوب)	50	250	-
السهوب	-	-	-
الأطلس الصحراوي	200	200	700-400
شمال الصحراء	50	150-50	150
الصحراء	أقل من 50		



الشكل (1-3): خريطة تبين المخزون المائي الجوي بالجزائر

9) استغلال الطاقة الشمسية لإنتاج المياه حسب وجهة النظر الاقتصادية:

نظرا لاستنزاف الطاقات التقليدية كطاقة النفط والفحم الحجري، وحتى الطاقات الفعالة وذات المردود العالي كالطاقة النووية، وجب البحث عن مصادر للطاقة دائمة أو لها دورة مُجَدِّدٌ فيها، ومن بين تلك الطاقات الواعدة هي الطاقة الشمسية بشكلها الحراري والمتمثل في الإشعاع الحراري، وشكلها الكهربائي والمتمثل في الفعل الكهروضوئي، وفي هذا البحث سوف يدرس النوع الحراري من الطاقة الشمسية لإنتاج المياه الصالحة للشرب؛ وتكون هذه المياه إما نقية تماما (بالتقطير) أو صافية من بعض الأملاح المعدنية التي كانت ذائبة فيها، وبعدها تعالج للحصول على مياه قابلة للشرب. وفي هذه الدراسة يتم التركيز على المقطرات الشمسية والتي تعتمد على الفعل الحراري الناتج من الإشعاع الحراري الشمسي، وكذلك لتحسين فعالية كل مقطر، واستنتاج المقطر الأكثر فعالية. وقد تمت هذه الدراسة على الجانب النظري والجانب التجريبي، ومحاكاة النظري بالتجربي للحصول على نماذج رياضية تربط كمية الماء المنتج بالمتغيرات الداخلية والخارجية الداخلة في تشغيل المُقَطِّر الشمسي. وكل التجارب العملية لهذا البحث تمت في مخبر تطوير الطاقات الجديدة المتجددة في المناطق الصحراوية (LENRZAS)-قسم الفيزياء-كلية الرياضيات وعلوم المادة - بجامعة ورقلة (الجنوب الشرقي الجزائري).

الجانب النظري يهتم بكل أشكال انتقال الحرارة (حمل وتوصيل وإشعاع)، و أشكال انتقال الكتلة (حمل و انتشار جزيئي)، والربط بين ظاهري انتقال الحرارة والكتلة، وكذلك دراسة تطبيقات نظرية الهواء الرطب في التقطير الشمسي، وبما أنَّ المِقدارين الفيزيائيين الحرارة والكتلة مقدارين تَوْسِيعَيْن (Extensives) وجب دراسة ميزان حفظ هذين المِقدَارَيْن، والربط بينهما لمَعْرِفَةِ تأثير كل عامل في فعالية المُقَطِّر، وذلك لِجَعْلِ التأثير يكون إِيْجَابِيًا بقدر الإمكان. والجانب التجريبي يعطي فكرة عما يَحْدُثُ من ظواهر فيزيائية، ومُكِنُّنَا من وضع معادلات رياضية تعبر عن هذه الظواهر وتفسيرها، وبما تم الوصول إليه في الجانب النظري من تفسير ومقارنة. ولإثبات التوقعات النظرية ووضع النماذج الرياضية؛ كان لزاما قياس المُنْتَغِيَاتِ والثوابت تَجْرِيْبِيًا ومعرفة تأثيرها على مردود المُقَطِّر. واستعمل في التجارب مياه منطقة ورقلة كمياه جوفية ذات الخواص التالية:

10) التحليل الفيزيائي-كيميائي للمياه:

يحتوي الماء على الكثير من العناصر المعدنية التي تمنح الجسم الصحة والقوة، ويعتبر شرب الماء النقي الصحي هو من أبسط حقوق الإنسان، فمن حقه تناول الماء الصالح للشرب والخالي من الملوثات والكائنات الحية الدقيقة التي تسبب له الأمراض، فصحة الإنسان هي أبرز ما اهتمت به منظمة الصحة العالمية، لذلك وضعت الكثير من المعايير التي تضبط جودة ماء الشرب.

10-1) الخصائص الطبيعية لمياه الشرب:

- اللون: يجب أن يكون اللون مقبولاً لا يتجاوز 50 وحدة بمقياس الكوبالت البلايني¹؛
- الطعم: أن يكون مقبولاً مستساغاً؛
- الرائحة: الماء الصحي المخصص للشرب لا رائحة له أي الرائحة معدومة؛
- العكارة: يجب أن يكون صافياً فالحد الأقصى للعكارة في المياه المعالجة 5 وحدات، وفي المياه الجوفية 52 وحدة مقاسة بجهاز جاكسون².
- الأكسجين المذاب عند درجة 25 مئوية 5-8 ملغم/ لتر؛
- ثاني أكسيد الكربون المذاب عند درجة 25 مئوية 2-3 ملغم/ لتر؛
- درجة التوصيل الكهربائي عند 18 مئوية 0.0004 ميكرو سيمنس؛
- درجة التوصيل الحراري عند 40.8 مئوية 1.555 وات/ متر. درجة؛
- معامل الانكسار الضوئي عند 20 مئوية 1.33 وحدة؛
- الضغط البخاري عند 20 مئوية 17.62 مليمت زئبق؛
- الحرارة النوعية عند 1 مئوية 1.00 كيلو جول/ كغم. درجة؛
- الحرارة النوعية عند 20 مئوية 0.99 كيلو جول/ كغم. درجة؛
- الكثافة عند 4 مئوية 1.00 غ/ سم³؛
- الكثافة عند 20 مئوية 0.99823 غ/ سم³؛
- درجة التجمد صفر درجة مئوية.
- درجة الغليان 100 درجة مئوية.
- الحرارة الكامنة للتبخير عند 20 مئوية 584.9 غ. كالوري/غرام.
- التوتر السطحي عند 20 مئوية 72.75 داین/سم.

10-2) المواد السامة والكيماوية:

يجب أن يخلو الماء من العناصر السامة والمواد الكيماوية، ولكن إذا ظهرت مع الفحص يجب ألا تتجاوز الحدّ المسموح.

¹ هو معيار لوني يُسمى بجمعية : Platinum Cobalt (Pt/Co).

² يُطلق على الأداة المستخدمة لقياسها مقياس النيفيلومتر أو مقياس العكارة، والذي يقيس شدة الضوء المنتشرة عند 90 درجة عندما يمر شعاع من الضوء عبر عينة من الماء.

كانت الوحدة المستخدمة سابقاً هي JTU (وحدات التعكر لجاكسون (Jacson Turbidity Unit))

والجداول التالية تلخص المقادير المسموح بها لكي يكون الماء صالح للشرب.

جدول (1-5): تركيز المواد المسموح به في الماء الصالح للشرب بـ mg/L :

المادة	التركيز	المادة	التركيز
المغنسيوم	150	الرصاص	1
الكالسيوم	200	الزرنيخ	50
الرقم الأيدروجيني	9.2-6.5	الزنك	15
النحاس	5.1	فينول	200
المنجنيز	5.0	كبريتات	400
الحديد	1	كلوريدات	600
النترات (أقصى حد)	45	السانيد	50
الفلوربات (أقصى حد)	8	الزئبق	100-0
		الكادميوم	10.0

جدول (1-6): مواصفات منظمة الصحة العالمية لماء الشرب الخاصة/ تركيز المكوّن بوحدة (mg/L) :

المادة	التركيز	المادة	التركيز	المادة	التركيز
كوبلت	0	المواد الصلبة المعلقة	0 NTU	اللون	15 TCU
الفوسفور	0	الأمونيوم	0	المواد الصلبة الذائبة	1000
نترات معين بالنيتروجين	10	نيتروجين نشادري (أمونيا)	0	نتريت معين بالنيتروجين	0
النترات	0	عسر الماء	500	العكارة	PH5
النتريت	0	الأكسجين المذاب	0	الأس الهيدروجيني	8.5 - 6.5
الكلوريد	250	الصوديوم	200		
فلوريد	1.5	كبريتيد	0	كبريتات	400
الومنيوم	0.2	سيانيد	0.1	بورون	0

0	نيكل	0	باريوم	0.05	أرسنك
0	الفينولات	0.001	زئبق	0.005	كادميوم
5	زنك	0.01	سليسيوم	0.05	كروميوم
10	خماسي كلورو الفينول	0.01	سداسي كلورو البنزين	0 BOD	حدود الآسجين الحيوي
10	بنزين	0	النفط والبتترول	1	نحاس
30	ميثوكسي الكلور	0	مجموع المبيدات	0.3	حديد
0.1	منغنيز	0	المبيدات الفردية	0.05	رصاص
1	ثنائي كلورو ثنائي فينيل ثلاثي كلورو الإيثان	0.03	ألدلين والديلدرين (المبيدات الحشرية)	3	ليندين (جاما) سداسي كلور حلقي (الهكسان)
				0	المنظفات

جدول (1-7): تركيز الأملاح الشوارد الكيميائية في مياه منطقة ورقلة

المجموع	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	K ⁺	HCO ₃ ⁻	قساوة	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻
2961	---	38	749	19	103	106	249	107	625	965

تركيز الأملاح في مياه منطقة ورقلة يقدر بـ: 2,961 g/L حسب المصدر: (Bouhekima et al. 1998)¹
مقدار الحموضة (PH): متوسط الحموضة يقدر بـ: 6.8

ملاحظة: تقاس قساوة الماء بحساب مجموع تركيز كل من شوارد الصوديوم و البوتاسيوم، وتعرف بأنها: سعة استهلاك

الماء للصابون الذي يحوي أحد المُركَّبَيْن التاليين R-COONa ، R-COOK

ووحدة القياس هي: 5µg/L = (درجة فرنسية) 1 °F .

خلاصة الفصل الأول: تعد تقنيات تنقية الماء ضرورية ومهمة لتوفير الماء الصالح للشرب والاستخدام اليومي

للمجتمعات السكانية، وخاصة إذا كانت هذه التقنيات بسيطة وغير مكلفة. من هذا المنطلق يمكن تدعيم التجمعات السكانية التي تعاني من نقص الماء بأجهزة تقطير شمسي مدعمة بتحسينات لتوفير كميات من المياه مع توفر اشعاع شمسي كاف لتشغيل هذه الأجهزة. في هذه الدراسة سوف يتم التطرق لبعض التحسينات في أجهزة تقطير ذات حوض، وذلك بإضافة تركيبات للمبخر أو المكثف من أجل الوصول إلى أفضل تركيب، والفصول المتبقية بما تفاصيل أكثر في هذا الموضوع.

¹ Bouhekima, B, B Gros, R Ouahes, and M Diboun. 1998. "Performance study of the capillary film solar distiller." *Desalination* 116 (2-3): 185-192.

المراجع:

- Bouchekima, B, B Gros, R Ouahes, and M Diboun. 1998. "Performance study of the capillary film solar distiller." *Desalination* 116 (2-3): 185-192.
- DE SON, LIGNES DIRECTRICES EN VUE. "PLAN NATIONAL SECHERESSE ALGERIE".
- Kehal, Salim. 2001. "Retrospective et perspective du dessalement en Algérie." *Desalination* 136 (1-3): 35-42

الفصل الثاني

دراسات سابقة حول المقطرات الشمسية

المحتوى: دراسة تفصيلية لمختلف التحسينات التي تمت على أنواع المقطرات الشمسية، والتحسينات هي:

- (1) النوع الأول: مقطرات تعمل بتسخين المبخر بدرجات حرارة عالية.
- (2) النوع الثاني: مقطرات تعمل باستخدام الماء المسخن مسبقاً.
- (3) النوع الثالث: مقطرات تعمل بالإنتاج الليلي.
- (4) النوع الرابع: مقطرات تعمل بتبريد المكثف بدرجات حرارة منخفضة.

1) مقدمة الفصل الثاني:

إن تقنية التقطير الشمسي تقنية بسيطة واقتصادية أكثر من الطرق الأخرى المتاحة لتنقية المياه. حيث أن حوض المقطر الشمسي يكون به ماء غير نقي ويتم تمرير أشعة الشمس عبر الغطاء الزجاجي لتسخينه في الحوض وبعدها يتبخر هذا الماء. وبما أن الماء داخل المقطر يتبخر، فإنه يترك جميع الملوثات والميكروبات في الحوض. يتكثف بخار الماء المنقى على الجانب الداخلي من الزجاج، ويتم جمعه في حاوية مغلقة، ويوجه للاستهلاك إما بشكل ماء نقي للاستخدامات المخبرية أو للشرب وغير ذلك. وقد تم تطوير العديد من أنظمة التقطير الشمسي على مر السنين باستخدام المبدأ أعلاه لتنقية المياه في أجزاء كثيرة من العالم. يستعرض هذا الفصل التطورات التكنولوجية لمختلف أنظمة التقطير الشمسي الحالية التي طورها العديد من الباحثين مع بعض التفاصيل، مثل مبدأ التشغيل والزيادة المحققة في الكفاءة الحرارية وكمية الماء المنتجة ومقارنتها بالمقطر الشمسي التقليدي بدون إضافات. تمتد المراجعة أيضًا إلى النمذجة الحرارية لبعض أنظمة التقطير الشمسي الحالية، والدراسات المقارنة لمختلف المقطرات الشمسية، وما زالت الدراسات مستمرة في البحث والتطوير إلى يومنا هذا.

2) تصنيف التحسينات على المقطر الشمسي البسيط:

تصنف أنظمة التقطير الشمسي حسب التحسينات التي تتم على هذه الأجهزة لزيادة إنتاجيتها من الماء النقي، وحيث تؤثر عوامل عديدة على أداء المقطر مثل عمق المياه في الحوض، مادة الحوض، سرعة الرياح، الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة المحيطة وزاوية الميل. سيتم تحديد إنتاجية كل نوع من الطاقة الشمسية من خلال فرق درجة الحرارة بين الماء في الحوض والسطح الداخلي للغطاء الزجاجي. في المقطر العادي بدون تحسينات، يتم استقبال الإشعاع الشمسي مباشرة بواسطة ماء الحوض حيث أن الإشعاع الشمسي هو المصدر الوحيد للطاقة لرفع درجة حرارة الماء وبالتالي فإن التبخر سوف يؤدي إلى تعقيم للإشعاع مما يجعل إنتاجية المقطر تنخفض؛ هذا هو العيب الرئيسي في المقطرات الشمسية العادية. ومن أجل التغلب على المشكلة المذكورة أعلاه، تم تطوير العديد من المقطرات الشمسية. ومنه يجب توفير طاقة حرارية إضافية للحوض من خلال مصدر خارجي لزيادة معدل التبخر وبالتالي تحسين إنتاجيته أو بسحب حرارة من المكثف.

وقد أعتمد على كل من (Sampathkumar et al. 2010)¹ و (Kabeel et al. 2016)² في مراجعات خاصة

بالتحسينات على مستوى المبخرات والمكثفات على الترتيب، و التصنيف على النحو التالي (Tiwari et al. 2008)³ :

- (1) تقطير بتسخين المبخر بدرجات حرارة عالية - ويتم بتغذية الماء الساخن في الحوض من لوحة تجميع شمسية.
 - (2) مقطرات تعمل باستخدام التسخين المسبق - ويتم بإدخال الماء الساخن في الحوض بمعدل تدفق ثابت.
 - (3) مقطرات تعمل بالإنتاج الليلي - ويعمل بتغذية الماء الساخن في الحوض مرة واحدة في اليوم.
 - (4) تقطير بتبريد المكثف بدرجات حرارة منخفضة - ويتم في هذا النوع تبريد المكثف بتبادل حراري مع مصدر بارد.
- لا يمكن التنبؤ بأداء المقطر الشمسي أو تحسينه من خلال بعض العوامل التي لا يمكن التحكم فيها مثل كثافة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة وسرعة الرياح. ولكن هناك بعض العوامل مثل عمق المياه وزاوية الغطاء الزجاجي

¹ Sampathkumar, K, TV Arjunan, P Pitchandi, and P Senthilkumar. 2010. "Active solar distillation—A detailed review." Renewable and sustainable energy reviews 14 (6):1503-1526.

² Kabeel, AE, ZM Omara, FA Essa, and AS Abdullah. 2016. "Solar still with condenser—A detailed review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (C):839-857.

³ Tiwari, GN, and Anil Kumar Tiwari. 2008. Solar distillation practice for water desalination systems: Anshan Pub.

ومواد التصنيع ودرجة حرارة الماء في الحوض وسمك العازل الحراري، كل هذه العوامل تؤثر بشكل مباشر على أداء المقطر الشمسي والتي يمكن تعديلها لتحسين الأداء. مثلاً يمكن زيادة الأداء عن طريق تقليل عمق المياه وبالتالي زيادة معدلات التبخر. كما أن فرق درجة الحرارة بين الماء في الحوض وغطاء الزجاج المكثف له تأثير مباشر على إنتاجية الماء. حيث أن زيادة درجة حرارة الماء في الحوض يمكن أن تزيد من الفرق في درجة الحرارة بين سطح التبخر وسطح التكثيف. ومنه لتحقيق معدل تبخر وتكثيف أفضل، يمكن رفع درجة حرارة الماء في الحوض عن طريق التغذية بالطاقة الحرارية من بعض المصادر الخارجية.

(3) النوع الأول: تقطير بدرجات حرارة عالية (High temperature):

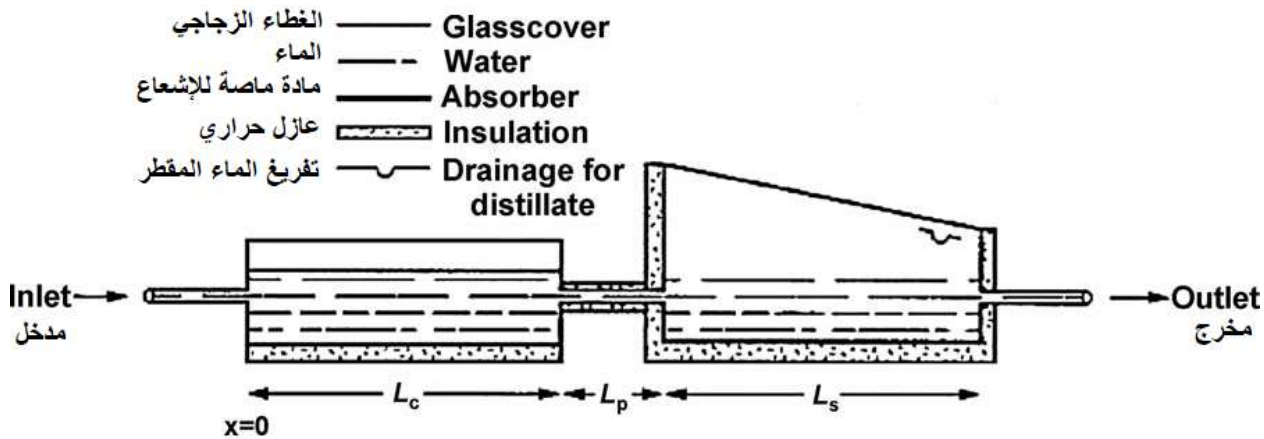
من المعروف أن درجة حرارة الماء تزداد عن طريق توفير طاقة حرارية إضافية، لذلك يمكن استخدام مُجمِّعات الإشعاع الشمسي لتسخين الماء (Solar radiation collectors for heating water). ولتحسين عملية التبخر في المقطرات بدرجات حرارة عالية يمكن رفع درجة الحرارة من المجال (20-50) درجة مئوية إلى (70-80) درجة مئوية. والشكل (2-1) يلخص كل الأنواع التي تعتمد على هذه الطريقة.

(3-1) مقطرات تعمل بالطاقة الشمسية مع مُجمِّع لוחي مستوي:

تعمل المقطرات الشمسية المقترنة بمجمع لוחي مستوي (FPC – Flat Plate Collector) إما في وضع التدوير القسري أو وضع التدوير الطبيعي للماء. في وضع التدوير القسري، يتم استخدام المضخة لتزويد المياه. أما وضع التدوير الطبيعي، يتدفق الماء بسبب الاختلاف في كثافة الماء حسب ما وصفه الباحث (Sampathkumar et al. 2010) ¹.

(3-1-1) المقطر الشمسي المرتبط بطبقة مستوية موازية للمبخر مع مُجمِّع لוחي مستوي:

درس (Yadav et al. 1995) ² تجريبياً المقطر الشمسي المرتبط بمُجمِّع لוחي مستوي موازي لطبقة المبخر. الرسم التخطيطي في الشكل (2-2) يظهر تفاصيل التركيب. يتكون المُجمِّع بشكل أساسي من صفيحة مستوية متوازية ملاصقة للمبخر مع وجود فجوة هوائية تمثل خلية التقطير، يتدفق من خلالها الماء عبر ألياف ماصة، وبعدها يتم تجميع الماء المقطر في أسفل خلية التقطير.



الشكل (2-2): رسم تخطيطي للتأثيرات المتعددة (مُجمِّع لוחي مستوي + طبقة مستوية موازية للمبخر)

(Yadav and Prasad. 1995)

¹ Sampathkumar, K, TV Arjunan, P Pitchandi, and P Senthilkumar. 2010. "Active solar distillation—A detailed review." Renewable and sustainable energy reviews 14 (6):1503-1526.

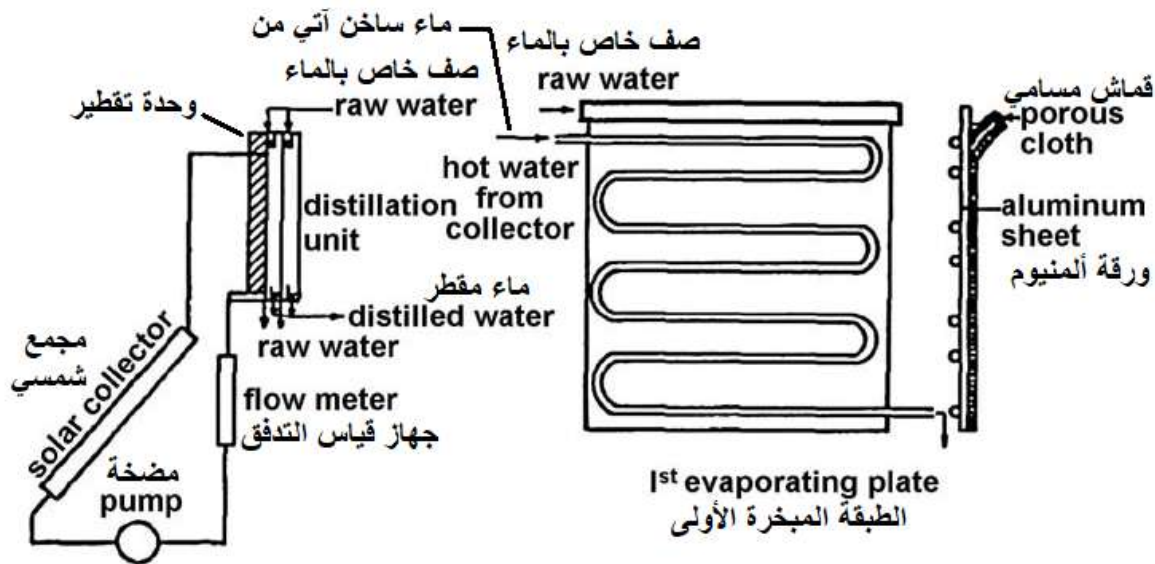
² Yadav, YP, and AS Prasad. 1995. "Performance analysis of a high temperature solar distillation system." Energy conversion and management 36 (5):365-374.

حيث في الرسم التخطيطي يوجد لوح زجاجي فوق جهاز الامتصاص، ويتم وضع المجموعة بأكملها في صندوق خشبي. الجزء العلوي من اللوحة (المتنصة للإشعاع) يتم تلوينها بواسطة طلاء أسود غير براق قبل وضع الغطاء الزجاجي فوق اللوحة المتنصة للإشعاع. ويتم توصيل مخرج المُجَمِّع بالجهاز بواسطة أنبوب مغطى بعازل. يمكن تدوير المياه بين المُجَمِّع وخلية التقطير إما عن طريق مضخة (نظام دوران قسري) أو عن طريق وضع المُجَمِّع فوق هيكل داعم على ارتفاع بحيث يوفر تدفقاً مناسباً للدوران الطبيعي للماء. أظهرت النتائج أن هناك ارتفاع كبير في نواتج التقطير عندما يقترن المقطر بطبقة مستوية موازية للمبخر، ويمكن التوصية باستعمال هذا النظام باعتباره فعالاً من حيث التكلفة.

3-1-2) المقطر الشمسي المرتبط بطبقة مستوية متعامدة مع المبخر بوجود مُجَمِّع لوحي مستوي:

قام الباحث (Kiatsiriroat et al. 1987)¹ مع فريق بحثه بتحليل التأثير المتعدد على المقطر الشمسي العمودي المقترن بلوح تجميع الطاقة الشمسية المستوي كما هو موضح في الشكل (2-3)؛ تتكون وحدة التقطير من "n" صفيحة عمودية متوازية مع اللوحة الأولى المعزولة في جانبها الأمامي واللوحة الأخيرة معرضة للجو المحيط.

كل لوحة في العلب مغطاة بقطعة قماش مبللة على جانب واحد، يتم تمديد قطعة القماش للأعلى للتغذية بالماء والأسفل لإعادة تدويره للأعلى، ومن الممكن اخراج الماء الزائد إلى أسفل اللوحة بدون تدوير. يتم تبريد اللوحة الأخيرة عن طريق الهواء أو الماء. وجد الباحث أن ناتج التقطير يزداد بشكل طفيف عندما يزيد رقم الصفيحة عن 5، ويزداد بنحو 34% و15% عندما تكون أرقام ألواح التبخير 1 و6 على التوالي.



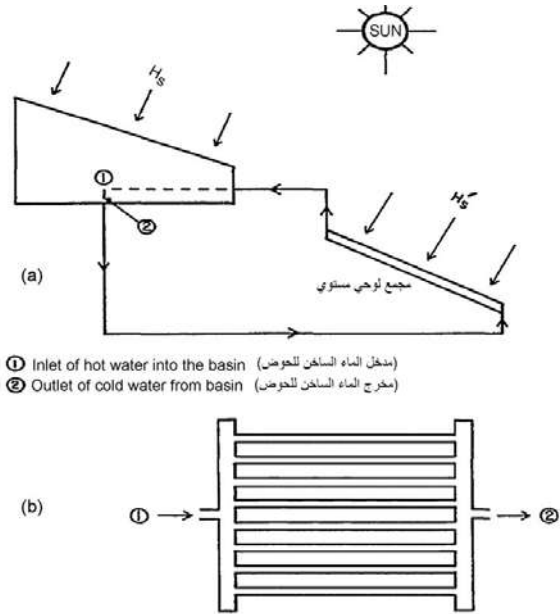
الشكل (2-3): رسم تخطيطي للتأثيرات المتعددة (مُجَمِّع لوحي مستوي + طبقة مستوية موازية للمبخر)

(Kiatsiriroat et al. 1987)

¹ Kiatsiriroat, T, SC Bhattacharya, and P Wibulswas. 1987. "Performance analysis of multiple effect vertical still with a flat plate solar collector." Solar & wind technology 4 (4):451-457..

3-1-3) مقطر يعمل بالتدوير الطبيعي للماء:

كان عمل الأجهزة الحرارية الشمسية تحت وضع التدوير الذاتي بفعل الحرارة (الترموسيفون-thermosiphon) أكثر فائدة من وضع الدوران القسري وذلك بسبب بساطته وموثوقيته وتكلفته المادية المنخفضة. تمت دراسة نظرية على أحواض أحادية للتقطير الشمسي مقترنة بمجمع لוחي مستوي باستعمال مبادل حراري. والفضل يعود لدراسات قام بها كل من (Lawrence et al. 1990)¹ وتظهر النتائج أن كفاءة المقطر الشمسي المُعَدَّل أقل من كفاءة المقطر الشمسي البسيط وأن الانتاجية اليومية تتناقص مع زيادة عمق المياه، بينما بالنسبة إلى الطاقة الشمسية فالمقطر المُحَسَّن يكون العكس، ونظام التقطير موضح في الشكل (2-4).



الشكل (2-4): رسم تخطيطي لنظام تقطير

(a) لمقطر يعمل بالتدوير الطبيعي للماء.

(b) تصميم المبادل الحراري.

(Lawrence and Tiwari. 1990)

درس (Yadav 1991)² أداء مقطر شمسي مرتبط بمجمع لוחي مستوي باستخدام وضع (الترموسيفون-thermosiphon) ووضع الدوران القسري للظروف المناخية في نيودلهي. وجد الباحث أن النظام الذي يستخدم وضع الدوران القسري يعطي محصولاً أعلى بنسبة 5-10% من نظام الترموسيفون ولوحظ تحسن بنسبة 30-35% في الانتاجية مقارنة باستخدام جهاز التقطير الشمسي البسيط. تم تحقيق هذه التجارب في 2-3 أيام.

ودرس (Yadav 1993b)³ في بحث آخر أداء نظام تقطير شمسي لتسخين المبخر بدرجة حرارة عالية. وكشفت الدراسة أنه من المفيد النظر في معامل انتقال الحرارة بالتبخير المعتمد على درجة الحرارة عند تقييم أداء التقطير بدرجة حرارة عالية.

من جهة أخرى أجرى الباحث (Tiris et al. 1998)⁴ تجارب على مجموعتين شمسيين مستويين مدججين مع وحدة تجميع شمسية من نوع الحوض. من خلال دراستهم المجمع الشمسي المُحَسَّن يعطي متوسط زيادة بنسبة 100% في الانتاجية مقارنة مع المقطر الشمسي البسيط ذو الحوض. وكان الحد الأقصى للإنتاج 2.575 لتر/م² للحوض البسيط و 5,18 لتر/م² يوميًا للنظام المُحَسَّن، بينما يبلغ الإشعاع الشمسي 24,343 ميغا جول/م² يوميًا.

¹ Lawrence, SA, and GN Tiwari. 1990. "Theoretical evaluation of solar distillation under natural circulation with heat exchanger." Energy Conversion and Management 30 (3):205-213.

² Yadav, YP. 1991. "Analytical performance of a solar still integrated with a flat plate solar collector: thermosiphon mode." Energy conversion and management 31 (3):255-263.

³ Yadav, YP. 1993b. "Transient performance of a high temperature solar distillation system." Desalination 91 (2):145-153.

⁴ Tiris, C, M Tiris, Y Erdalli, and M Sohmen. 1998. "Experimental studies on a solar still coupled with a flat-plate collector and a single basin still." Energy conversion and management 39 (8):853-856.

تم إجراء اختبارات من طرف (Badran, Al-Hallaq, et al. 2005)¹ على مقطرات شمسية بسيطة معززة بمجمع لוחي مستوي وباستخدام ماء الصنبور ومياه مالحة. ووجدوا أن كمية الماء المقطر المنتجة زادت بنسبة 231% في حالة ماء الصنبور كتغذية وبنسبة 52% في حالة الماء المالح. قدم (Badran and Al-Tahaineh 2005)² دراسة توضح تأثير دمج مجمع لוחي مستوي على إنتاجية المقطر الشمسي. وأظهرت النتائج أن الحد الأقصى الناتج هو من أجل عمق أقل للمياه في الحوض (أقل من 2سم). كما أدت الزيادة في عمق المياه إلى انخفاض الإنتاجية بشكل واضح، في حين وُجد أن الإنتاجية تتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي.

3-1-4) مقطر يعمل بالتدوير القسري للماء:

يتم استخدام مضخة لتدوير المياه من الحوض عبر هذا المجمع المستوي إلى الحوض. وقد تم إجراء العديد من الأبحاث بهذه الطريقة وأولها كان من طرف (Rai et al. 1983)³ ووجدوا أن إنتاجية المقطر المحسّن أكبر بـ 24% من المقطر البسيط بدون تحسينات. ويوضح (Rai et al. 1983) في الشكل (2-5) رسم تخطيطي لمقطر شمسي مرتبط مع مجمع لוחي مستوي تحت وضع التدوير القسري للماء (Rai et al. 1990)⁴. وقد درس (Rai et al) تجريبياً مختلف أنماط العمليات في حوض مقطر شمسي أحادي الميل مقترناً بمجمع لוחي مستوي. من دراستهم تبين أن الإنتاجية اليومية للماء تتناقص مع زيادة تركيز الملح، حيث تزيد إضافة الملح من التوتر السطحي وبالتالي تقلل من معدلات التبخر. ولوحظ أفضل أداء في حوض له دوران قسري وقطن قماش من الجوت (القنب الهندي) يطفو فوق مياه الحوض ومصبوغ بكمية صغيرة من الصباغ الأسود، ووجدت أيضاً أن معدلات التقطير زادت بنسبة 30%. ويعتبر العزل الحراري للقاعدة مهم لزيادة إنتاجية المقطر الشمسي، أما كفاءة المقطر فتزداد مع زيادة المساحة الفعالة للمبدل الحراري كما أفاد (Tiwari and Dhiman 1991)⁵. وأظهرت دراستهم التجريبية أنه هناك زيادة بنسبة 12% فقط في الإنتاجية إذا كان طول المبادل الحراري يختلف من 6.0 إلى 12.0 متر، وتراوحت الزيادة في الكفاءة الطاقوية الإجمالية للنظام من 15% إلى 19%.

لاحظ (Kumar et al. 1998)⁶ أن درجة حرارة الماء والكفاءة الحرارية انخفضت مع زيادة مساحة الحوض بسبب السعة التخزينية الكبيرة للكتلة المائية في الحوض وعمق المياه. وزادت الإنتاجية مع زيادة عدد المجمعات كما هو متوقع، بسبب زيادة نقل الحرارة من المجمع اللوحي إلى الحوض والعدد الأمثل للمجمعات لتحقيق أقصى قدر من الإنتاجية هو 8 أمتار مربعة نظراً لأن الزيادة في كسب الحرارة تكون أقل من خسارتها بعد ذلك. (Kumar et al. 2000)⁷ اقترح أنه للحصول على الحد الأقصى من الإنتاج السنوي للماء، يكون الميل الأمثل للمجمع اللوحي المستوي هو 20° وميل الغطاء الزجاجي الثابت هو 15° للظروف المناخية لنيودلهي.

¹ Badran, Ali A, Ihmad A Al-Hallaq, Imad A Eyal Salman, and Mohammad Z Odat. 2005. "A solar still augmented with a flat-plate collector." *Desalination* 172 (3):227-234.

² Badran, OO, and HA Al-Tahaineh. 2005. "The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity." *Desalination* 183 (1-3):137-142.

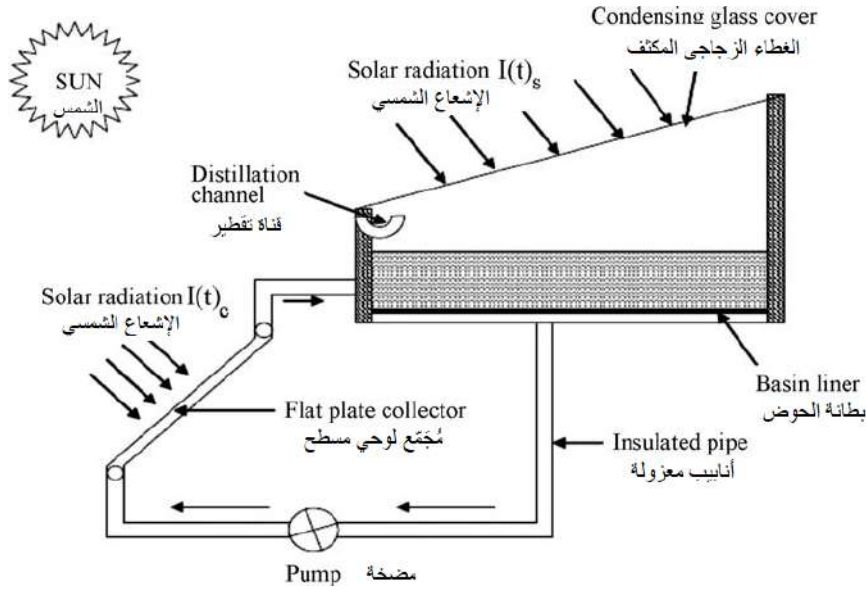
³ Rai, SN, and GN Tiwari. 1983. "Single basin solar still coupled with flat plate collector." *Energy Conversion and Management* 23 (3):145-149

⁴ Rai, SN, DK Dutt, and GN Tiwari. 1990. "Some experimental studies of a single basin solar still." *Energy conversion and Management* 30 (2):149-153.

⁵ Tiwari, GN, and NK Dhiman. 1991. "Performance study of a high temperature distillation system." *Energy Conversion and Management* 32 (3):283-291.

⁶ Kumar, Sanjeev, and GN Tiwari. 1998. "Optimization of collector and basin areas for a higher yield for active solar stills." *Desalination* 116 (1):1-9.

⁷ Kumar, Sanjeev, GN Tiwari, and HN Singh. 2000. "Annual performance of an active solar distillation system." *Desalination* 127 (1):79-88.



الشكل (2-5): رسم تخطيطي لمقطر شمسي مدمج مع مجمع لוחي مستوي (Tiwari and Dhiman, 1991)

استنتج (Tiwari et al. 2003)¹ أن معاملات نقل الحرارة الداخلية يجب تحديدها باستخدام درجة حرارة الجدار الداخلي للغطاء الزجاجي. وتعتمد هذه المعاملات بشكل أساسي على شكل الغطاء الزجاجي، ولوحظ تأثير واضح لمادة الغطاء وفرق درجة الحرارة بين الماء والجدار الداخلي للغطاء الزجاجي.

باستعمال الحسابات العددية وجد (Singh et al. 2004)² أن العائد السنوي يكون عند أقصى حد له عندما يكون ميل الغطاء الزجاجي مساوياً لخط عرض المكان والميل الأمثل للمجمع اللوحي المستوي هو 28.58° ، أما الغطاء الزجاجي ميله الأمثل 18.58° من أجل الظروف المناخية لنيودلهي. واستنتج كل من (Tripathi et al. 2005)³ أن معامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري بين الماء وغطاء التكثيف الداخلي يعتمد بشكل كبير على عمق الماء في الحوض. كما لوحظ أنه تم الحصول على إنتاجية أكبر خلال الساعات العظمى للإشعاع مقارنة بالوقت المتبقي من النهار حيث العمق في المجال (0.10 - 0.15 متر) وسبب ذلك هو تأثير التخزين الحراري.

أجرى كل من (Dimri et al. 2008)⁴ تحليلاً نظرياً وتجريبياً لمقطر شمسي بمواد غطاء تكثيف مختلفة مدمجاً مع مجمع لוחي مستوي. وقد أشارت النتائج إلى أن الإنتاجية مرتبطة ارتباطاً مباشراً بالتوصيل الحراري لهذه المواد؛ حيث أنه عند مقارنة الزجاج بالبلاستيك وجد أن الزجاج يعطي كمية من الماء أكبر من البلاستيك، وذلك بسبب التوصيلية الحرارية العالية للزجاج.

¹ Tiwari, GN, SK Shukla, and IP Singh. 2003. "Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature." Desalination 154 (2):171-185.

² Singh, HN, and GN Tiwari. 2004. "Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions." Desalination 168:145-150.

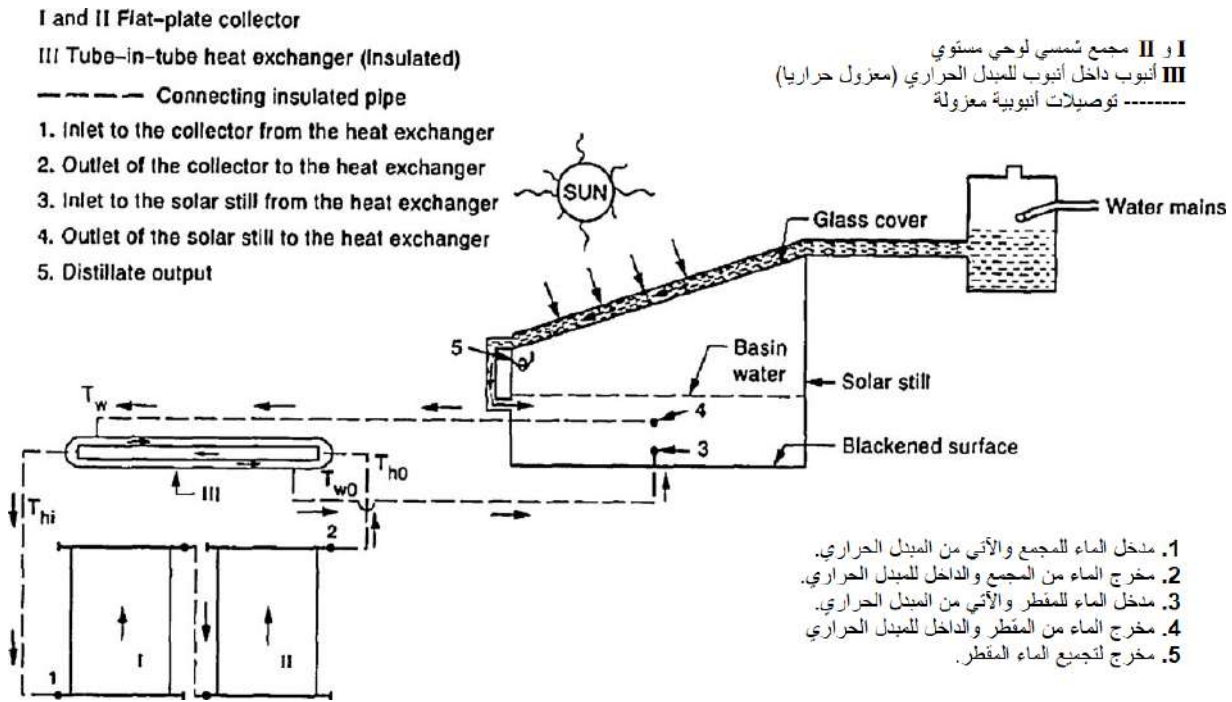
³ Tripathi, Rajesh, and GN Tiwari. 2005. "Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation." Desalination 173 (2):187-200.

⁴ Dimri, Vimal, Bikash Sarkar, Usha Singh, and GN Tiwari. 2008. "Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation." Desalination 227 (1-3):178-189.

3-1-5) المقطر الشمسي بمسترجع مع مُجمِّع لוחي مستوي:

يتم تحقيق معدلات تبخير أعلى، عندما يكون المقطر الشمسي يعمل في درجات حرارة عالية من خلال توفير حرارة من مصدر خارجي للحوض. وبالتالي فإن الغطاء الزجاجي سوف يستقبل حرارة تبخر كامنة في المقابل، تزداد درجة حرارة الغطاء الزجاجي، ويقل فرق درجة الحرارة بين الغطاء الزجاجي وماء الحوض. ويؤدي هذا إلى تبخير منخفض وبالتالي إنتاج منخفض. ولتقليل درجة حرارة الزجاج، يتم تدوير الماء البارد بتدفق منخفض فوق الغطاء الزجاجي. تنتقل الحرارة من الزجاج إلى المياه المتدفقة والتي بدورها تحافظ على فرق درجة الحرارة كبيراً. علاوة على ذلك، إذا كانت درجة حرارة المياه المتدفقة عند المخرج أعلى من درجة حرارة ماء الحوض، فيمكن عندئذ تغذية الحوض للحصول على إنتاج أكبر. يُعرف هذا النظام باسم نظام التقطير الشمسي بمسترجع ويظهر تخطيط للمقطع العرضي في الشكل (2-6).

لاحظ (Tiwari et al. 1993)¹ استناداً إلى دراسة تجريبية على مقطرات شمسية بمسترجع أن المقطر الشمسي بمسترجع وبدون مُجمِّع له كفاءة حرارية أكبر من المقطر الشمسي بمسترجع وبوجود مُجمِّع، وتزيد الكفاءة الحرارية مع زيادة تدفق الماء.



الشكل (2-6): مقطع عرضي لمقطر شمسي يعمل بمسترجع مع وجود مُجمِّع لוחي مستوي (Tiwari and Sinha. 1993)

درس (Singh et al. 1993)² الأداء الحراري لنظام التقطير الشمسي بمسترجع الذي عمل تحت الظروف المناخية لنيودلهي. استنتج المؤلفون أن: (1) هناك تحسن كبير في الأداء العام بسبب تدفق المياه فوق الغطاء الزجاجي. (2) الماء الساخن المتوفر بسبب المسترجع لا يضيف قيمة كبيرة لإنتاج الماء. (3) الكفاءة الكلية للمقطرات الشمسية (بوجود مُجمِّع

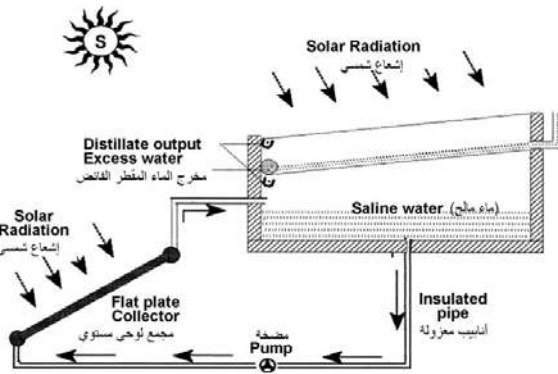
¹ Tiwari, GN, and S Sinha. 1993. "Parametric studies of active regenerative solar still." Energy conversion and management 34 (3):209-218.

² Singh, AK, and GN Tiwari. 1993. "Thermal evaluation of regenerative active solar distillation under thermosyphon mode." Energy conversion and management 34 (8):697-706.

ومسترجع) أقل من تلك الخاصة بالمقطرات الشمسية (بدون مُجمِّع ومسترجع) في أي عمق مشترك للمياه لأن المجمعات اللوحية المستوية تعمل عند درجة حرارة أعلى وتسبب انخفاض في فرق درجة الحرارة بين الماء والغطاء الزجاجي. لاحظ (Tiwari et al. 1996)¹ أن الكفاءة الحرارية اللحظية للنظام تتناقص مع زيادة مساحة المُجمِّع، بسبب ارتفاع نطاق درجة حرارة التشغيل لنظام التقطير. (Zurigat et al. 2004)² أثبت أن سُمك الماء في الغطاء الزجاجي العلوي ومعدل تدفق الماء لهما تأثير هامشي على إنتاجية المقطر الشمسي بمسترجع.

3-1-6) مقطر يعمل بتأثير مزدوج مع مُجمِّع لוחي مستوي:

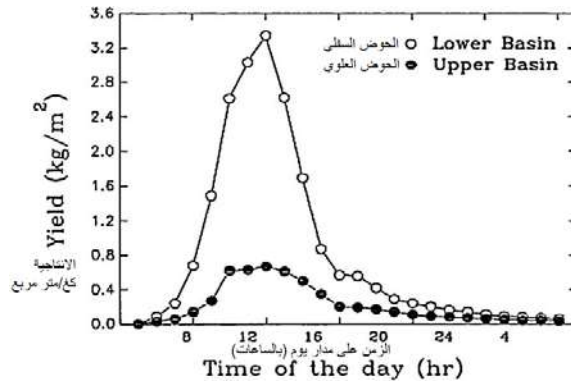
درجة حرارة الزجاج هي عامل رئيسي آخر يؤثر على أداء التقطير الشمسي، ويزداد معدل التبخر مع انخفاض درجة حرارة الزجاج. وعندها يكون معدل تبخير الماء من سطح الماء أعلى من معدل انتقال الحرارة من الغطاء الزجاجي إلى البيئة المحيطة عن طريق الحمل الحراري وعمليات الإشعاع. إذا كان من الممكن زيادة فقد الحرارة من الغطاء الزجاجي إلى المحيط، فيمكن زيادة الكفاءة الإجمالية لوحدة التقطير بشكل كبير، كما



الشكل (2-7): رسم تخطيطي لنظام تقطير يعمل بتأثير

مزدوج على المقطر الشمسي

(Kumar Sanjeev and Tiwari. 1999)



الشكل (2-8): تغيرات إنتاجية الماء للحوض العلوي

والحوض السفلي

(Kumar Sanjeev and Tiwari. 1999)

في حالة المقطرات الشمسية ذات الأحواض المزدوجة.

ويمكن الحصول على ذلك من خلال تدفق الماء فوق الغطاء الزجاجي لنقل الحرارة بسرعة عبر الغطاء الزجاجي السفلي ثم تكثيف الماء المتبخر على الغطاء الزجاجي العلوي كمنتج للماء المقطر، وكل هذا موضح في الشكل (2-8).

لاحظ (Tiwari et al. 1992)³ من الدراسة التجريبية التي قام بها أن هناك زيادة بحوالي 20% و 30% في الإنتاجية، حيث أن درجة حرارة دخول الماء للحوض مساوية لدرجة حرارة المحيط لمقطر شمسي بسيط و آخر مُحسَّن على الترتيب. إذا زادت درجة حرارة المدخل، يزداد الناتج من الحوض العلوي ولكن الناتج من الحوض السفلي ينخفض بشكل ملحوظ بسبب انخفاض في قيمة الفرق في درجة الحرارة بين الزجاج والماء في الحوض السفلي. قام كل من (Bapeshwararao et

¹ Tiwari, GN, Sanjay Kumar, PB Sharma, and M Emran Khan. 1996. "Instantaneous thermal efficiency of an active solar still." Applied Thermal Engineering 16 (2):189-192.

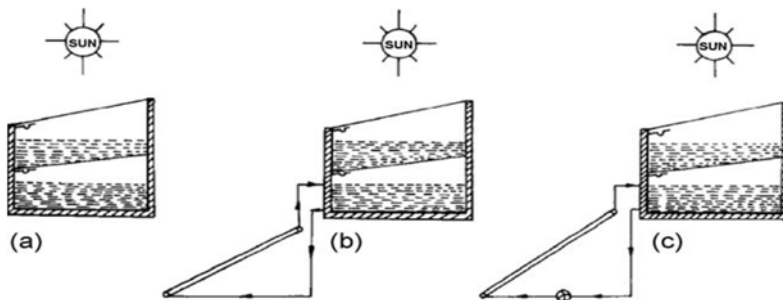
² Zurigat, Yousef H, and Mousa K Abu-Arabi. 2004. "Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit." Applied thermal engineering 24 (7):1061-1072.

³ Tiwari, GN, and SA Lawrence. 1992. "Thermal evaluation of high temperature distillation under an active mode of operation." Desalination 85 (2):135-145.

al. 1983)¹ من خلال التحليل النظري أن نواتج التقطير تزداد مع زيادة درجة حرارة الماء في كلا الحوضين، فإن الاعتماد على درجة حرارة ماء الحوض السفلي يظهر تأثيراً أكبر من تلك الخاصة بالجزء العلوي، وزيادة ملحوظة في كفاءة النظام المُحسّن أكثر من المقطر الشمسي البسيط في جميع الحالات.

ودرس (Tiwari and Sharma 1991)² التقطير الشمسي مزدوج التأثير باستخدام مبادل حراري. أظهرت الدراسة أن هناك زيادة بحوالي 30% في الانتاجية بسبب تدفق المياه عبر الحوض العلوي وهناك زيادة غير معتبرة في الكفاءة مع زيادة طول المبادل الحراري.

تم إجراء تجارب من طرف (Sanjeev et al. 1999)³ على أداء مقطر شمسي مزدوج التأثير مع تدفق ماء في مجمع لوحي مستوي. أظهرت النتائج أن ارتفاع انتاج الماء في الحوض السفلي إلى قيمة قصوى 3,34 كجم/م²/سا في منتصف النهار ويرجع ذلك إلى ارتفاع درجة حرارة الماء 95 درجة مئوية في ذلك الوقت كما هو موضح في الشكل (2-9). وعند زيادة كمية الماء، تنخفض درجة حرارته في الحوض السفلي مما يؤدي إلى انخفاض الإنتاجية والكفاءة. ويزداد الانتاج اليومي مع زيادة مساحة المجمع اللوحي، لأن الطاقة الحرارية في الحوض تزداد مع زيادة مساحة المجمع. وقد درس كذلك الباحثان (Kumar and Tiwari 1996)⁴ أداء المقطر الشمسي ذو التأثير الفردي والمزدوج مع وبدون تدفق الماء فوق الغطاء الزجاجي، وأظهرت الدراسة أن تعديل تدفق المياه فوق الغطاء الزجاجي عملية صعبة، ويجب ان يكون التدفق (10 مل/دقيقة) لكي يحقق إنتاجية مقبولة.



الشكل (2-9): عرض تخطيطي لأنظمة ذو أحواض مزدوجة مختلفة (a) مقطر شمسي بدون مُجمِّع

(b) مقطر شمسي مقترناً بمُجمِّع في وضع التيرموسيفون (c) مقطر شمسي مقترناً بالمُجمِّع في وضع الدوران القسري

(Yadav. 1996)

أجرى (Yadav 1989)⁵ التجارب على مقطر شمسي بحوض مزدوج مرتبط بمجمع لوحي مستوي في وضع الترموسيفون وبمجمع في وضع الدوران القسري كما في الشكل (2-10). أظهرت النتائج أن الحوض الشمسي المزدوج الذي كان مقترناً بالمجمع اللوحي المستوي يعمل بشكل أفضل في وضع الدوران القسري مقارنة بوضع الترموسيفون؛ ومع ذلك هذه العروض أفضل من تلك التي ينتجها الحوض المزدوج بدون مجمع.

¹ Bapeshwararao, VSV, U Singh, and GN Tiwari. 1983. "Transient analysis of double basin solar still." Energy conversion and Management 23 (2):83-90.

² Tiwari, GN, and SB Sharma. 1991. "Analytical study of double-effect distillation under active mode of operation." Energy 16 (6):951-958.

³ Sanjeev, Kumar, and GN Tiwari. 1999. "Optimization of daily yield for an active double effect distillation with water flow." Energy conversion and management 40 (7):703-715.

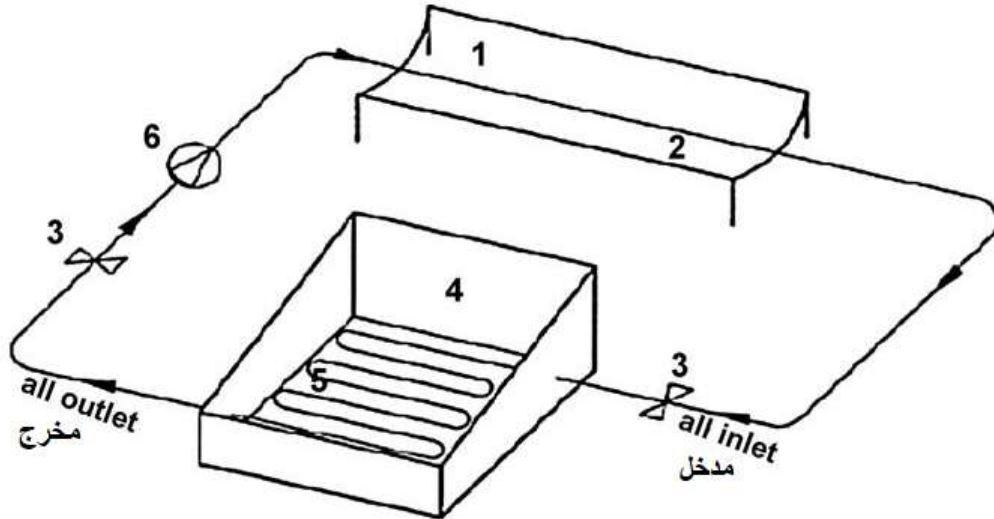
⁴ Kumar, Sanjay, and GN Tiwari. 1996. "Performance evaluation of an active solar distillation system." Energy 21 (9):805-808.

⁵ Yadav, YP. 1989. "Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector." Desalination 71 (2):151-164.

3-2) المقطرات الشمسية المرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ:

يظهر الرسم التخطيطي للمقطر الشمسي المرتبط بمُرَكِّز على شكل قطع مكافئ في الشكل (2-10). يركز المكثف على شكل مكافئ أو المجمع الشمسي للإشعاع الشمسي الساقط على سطح كبير ويركز على ممتص صغير أو منطقة استقبال. يتأثر أداء المكثفات بشكل كبير بآلية تتبع الشمس. يجب أن تحرك آلية التتبع المجمعات على مدار اليوم للحفاظ على تركيزهم على أشعة الشمس لتحقيق أعلى كفاءة. تصل هذه الأنواع من المجمعات الشمسية إلى درجة حرارة أعلى مقارنة بمجمعات الألواح المستوية نظرًا لتقليل مساحة فقد الحرارة.

تم استخدام أنواع مختلفة من مُرَكِّز على مر السنين بناءً على التطبيقات. لتحقيق إنتاجية أعلى، تعتمد الزيادة في التقطير الشمسي بزيادة درجة حرارة الماء في الحوض. ويتم توفير الماء أو الزيت إلى أنبوب الاستقبال عبر وضع الدوران الطبيعي أو وضع الدوران القسري. وجد (Singh et al. 1996)¹ تحليلًا لدرجة حرارة الماء المقطر الشمسي مع مجمعات لوحية مستوية ومركز قطع مكافئ من خلال وضع الدوران الطبيعي.



الشكل (2-10): رسم تخطيطي للمقطر الشمسي المرتبط بمُرَكِّز قطع مكافئ (Zeinab and Ashraf. 2007)

(1) قطع مكافئ، (2) خط أنابيب بها زيت، (3) صمامات (4) عمود شمسي (5) مبادل حراري للزيت (6) مضخة .

أظهرت النتائج أن كفاءة النظام مع المُجَمَّعات اللوحية أعلى من المُرَكِّزات قطع مكافئ حيث أن معامل نقل الحرارة بالتبخير أعلى في المُجَمَّعات اللوحية. حيث قام (García-Rodríguez et al. 1999)² بدراسة تجريبية لنظام تقطير متعدد التأثيرات المقترن بمُرَكِّز قطع مكافئ من أجل تحلية مياه البحر واقترح ما يلي:

(1) يبلغ إنتاج الطاقة السنوي حوالي 23% للمُرَكِّز شمال-جنوب أكبر من مُرَكِّز شرق-غرب.

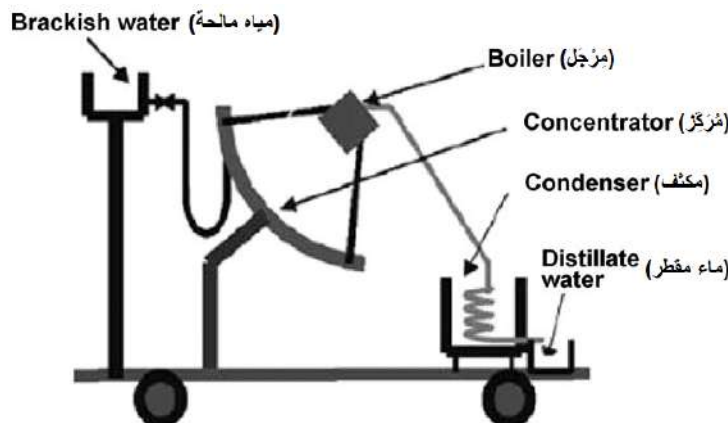
(2) زاوية الميل الأفضل للمُرَكِّز هي 29° والزيادة في الإنتاجية بلغت 12% أكبر من المُرَكِّز الأفقي من أجل درجة

حرارة الزيت الحراري عند (المدخل=300°C / مخرج=225°C) .

¹ Singh, SK, VP Bhatnagar, and GN Tiwari. 1996. "Design parameters for concentrator assisted solar distillation system." Energy Conversion and Management 37 (2):247-252.

² García-Rodríguez, L, and C Gómez-Camacho. 1999. "Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector." Desalination 122 (2-3):195-204.

(3) المتوسط السنوي لوقت التشغيل اليومي هو حوالي 12 ساعة/يوم في المناطق الساحلية في جنوب إسبانيا. من جهة أخرى قدم (Scrivani et al. 2007)¹ مفاهيم لاستخدام محطات تركيز الطاقة الشمسية لإنتاج المياه ومعالجتها ومعالجة المياه الملوثة، ويمكن استخدام هذه المفاهيم لمعالجة وترشيح المياه الملوثة في المناطق القاحلة، حيث تكون أنظمة التنقية التقليدية باهظة الثمن وغير عملية. كذلك أجرى كل من (Abdel-Rehim et al. 2007)² دراسة تجريبية ونظرية لنظام تحلية المياه بالطاقة الشمسية مقترنة بمُرَكِّز قطع مكافئ شمسي من خلال أنبوب بؤري ومبادل حراري بسيط كما هو موضح في الشكل (2-10). تظهر النتائج أنه مع مرور الوقت، تزداد جميع درجات الحرارة وتبدأ في الانخفاض بعد الساعة 4.00 مساءً. ورغم أن قيم درجات الحرارة للنظام المعدل أعلى من القيم في النظام بدون تعديل زادت إنتاجية المياه العذبة بمعدل 18٪. صمم (Chaouchi et al. 2007)³ وبنى وحدة صغيرة لتحلية المياه بالطاقة الشمسية مزودة بمُرَكِّز قطع مكافئ الشكل (2-11). أظهرت النتائج أن الحد الأقصى من الكفاءة يتوافق مع الحد الأقصى من الإشعاع الشمسي الذي يتم الحصول عليه حتى الساعة 14:00. في تلك الساعة، كانت الغلاية تقريباً في وضع أفقي، مما يزيد من سطح نقل الحرارة المعرض للشمس. انتهت الدراسة التجريبية والنظرية بمتوسط خطأ نسبي قدره 42٪ لمعدل تدفق نواتج التقطير. ويرجع ذلك إلى العيوب في هندسة القطع المكافئ، والمتابعة اليدوية للشمس وخاصةً تغير إمالة النظام أثناء النهار، والذي لا يجعل من الممكن دائماً إبقاء سطح الامتصاص مغطى بالماء المالح المعالج. اقترح الباحثون (García-Rodríguez et al. 1999)⁴ دراسة تقييمية لتطبيق توليد البخار المباشر في قطع مكافئ شمسي باستخدام مُرَكِّزات متعددة التأثيرات من أجل التقطير. كانت النتائج التي تم الحصول عليها مفيدة في إيجاد أنسب الظروف التي يمكن أن نحسن من استخدام الطاقة الشمسية بدل الطاقات التقليدية في تحلية المياه.



الشكل (2-11): نظام تقطير باستعمال مُرَكِّز قطع مكافئ (Bechir Chaouchi et al. 2007)

¹ Scrivani, A, T El Asmar, and U Bardi. 2007. "Solar trough concentration for fresh water production and waste water treatment." Desalination 206 (1-3):485-493.

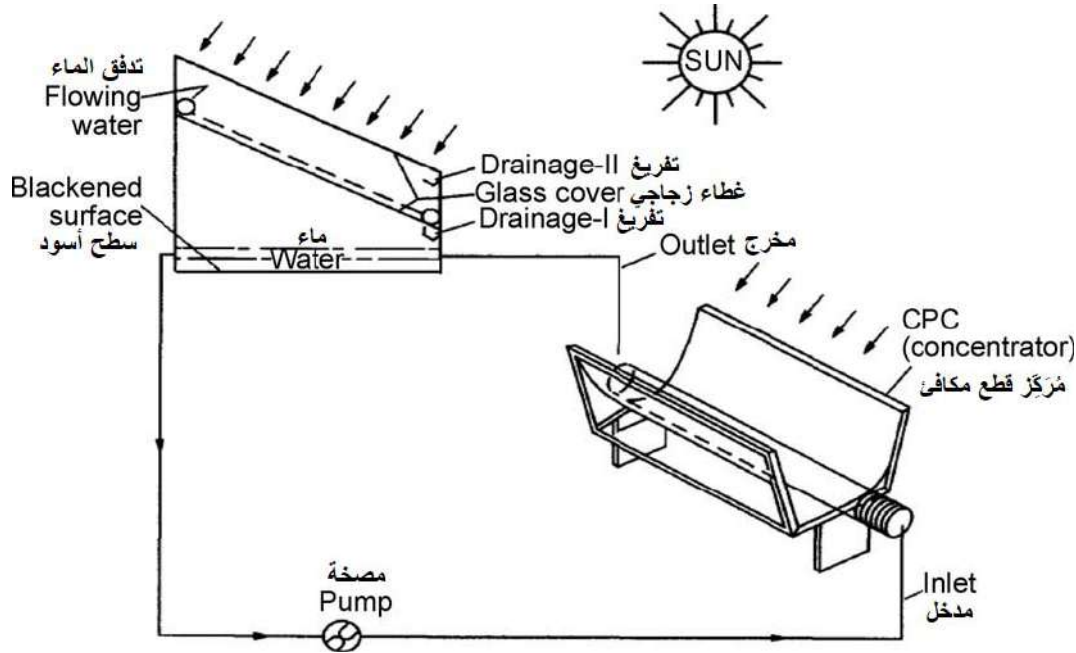
² Abdel-Rehim, Zeinab S, and Ashraf Lasheen. 2007. "Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt." Desalination 217 (1-3):52-64.

³ Chaouchi, Bechir, Adel Zrelli, and Slimane Gabsi. 2007. "Desalination of brackish water by means of a parabolic solar concentrator." Desalination 217 (1-3):118-126.

⁴ García-Rodríguez, L, and C Gómez-Camacho. 1999. "Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector." Desalination 122 (2-3):195-204

3-2-1) مقطرات شمسية تعمل بالتأثير المزدوج ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ:

قدم (Prasad et al. 1996)¹ تحليلاً للتأثير المزدوج لوحدة تقطير شمسي مرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ مركب (CPC- compound parabolic concentration) في وضع الدوران القسري كما هو موضح في الشكل (2-12).



الشكل (2-12): نظام تقطير يعمل بالتأثير المزدوج ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ

(Bhagwan Prasad and Tiwari. 1996)

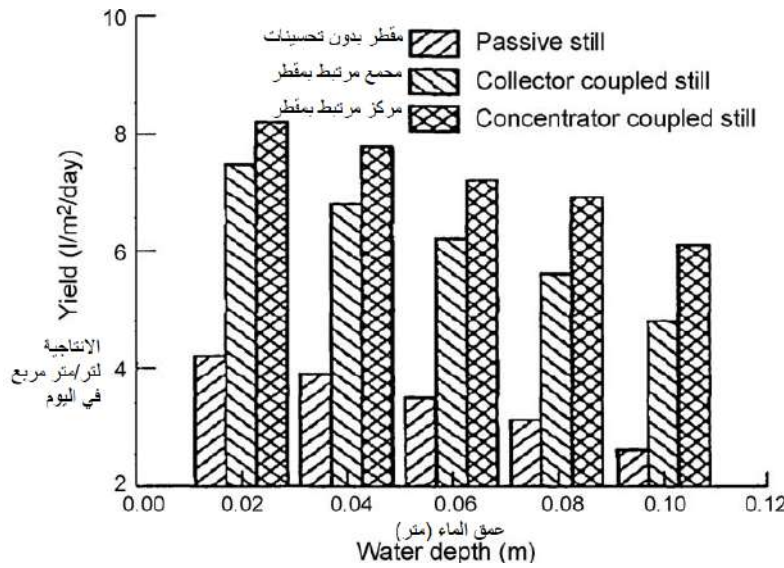
واستنتج المؤلفون ما يلي:

- (1) يوجد زيادة في درجة حرارة الماء في الحوض السفلي بالمقارنة مع التقطير ذو التأثير الأحادي، بسبب انخفاض في فقدان الحرارة من الزجاج السفلي لوجود طبقة زجاجية فوقه تمنع الانتقال الحراري وتعمل كعازل.
- (2) يوجد نقصان في الإنتاج لكل ساعة في الحوض السفلي بسبب الفرق في درجة الحرارة المنخفض بين الماء والزجاج. ومع ذلك، يزداد الناتج الإجمالي بسبب إعادة استخدام حرارة التبخر الكامنة في الحوض العلوي.
- (3) يزداد الإنتاج لكل ساعة في الحوض السفلي مع زيادة سرعة التدفق بسبب انخفاض درجة حرارة الزجاج. يرجع ذلك إلى حقيقة أن درجة حرارة الغطاء الزجاجي السفلية تنخفض بسبب الانتقال السريع للحرارة الكامنة للتبخير.
- (4) معامل نقل الحرارة بالتبخير هو دالة مرتبطة بدرجات حرارة النظام. أما معاملات انتقال الحرارة بالحمل فهي لا تختلف عن الإشعاع بشكل كبير.

¹ Prasad, Bhagwan, and GN Tiwari. 1996. "Analysis of double effect active solar distillation." Energy conversion and management 37 (11):1647-1656.

3-2-2) مقطرات شمسية تعمل بمسترجع ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ:

يتم تدفق المياه فوق الغطاء الزجاجي لتقليل درجة حرارة الزجاج للمقطرات الشمسية، ثم يتم نقل الحرارة من الزجاج إلى المياه المتدفقة والتي بدورها تحافظ على فرق كبير في درجة الحرارة بين الماء والزجاج. يساعد هذا التأثير في استرجاع جزء من الحرارة وتحقيق إنتاجية أعلى في إنتاج الماء. ومن بين الذين أجروا تحليلاً تجريبياً لعملية استرجاع الحرارة من الزجاج نجد (Kumar and Sinha 1996)¹، وكانت المقطرات المستعملة ذات انحدار مزدوج مقترنة بمُرَكِّز قطع مكافئ أسطواني غير متبوع للشمس (ثابت) وبوجود مضخة كهربائية، ويعمل النظام في وضع دوران قسري لتجنب لتريغ. لاحظ المؤلفون أن المُرَكِّز المرتبط بالمقطر يعطي أقصى إنتاجية في جميع مقادير العمق ماء الحوض والمقارنة في الشكل (2-13).



الشكل (2-13): تغيرات الإنتاج اليومي بدلالة سُمك الماء لنظام يعمل بمسترجع ومرتبطة بمُرَكِّز قطع مكافئ (Sanjay Kumar and Sinha. 1996)

المقطر الشمسي الذي يعمل بمسترجع والذي يساعده المُرَكِّز يتمتع بكفاءة حرارية أعلى بكثير من المقطرات التي تعمل بمسترجعات لوحية مستوية، حيث أن المسترجعات تساعد على استرجاع الحرارة مهما كان مقدار عمق المياه واستنتجوا أن هناك فقدًا حراريًا أقل في المُرَكِّز مقارنة بالمسترجعات اللوحية المستوية. من التحليل السابق، فإن الزيادة في معدل تدفق الماء البارد فوق الغطاء الزجاجي تزيد أيضًا من الكفاءة الحرارية الكلية، تليها زيادة كبيرة في إنتاجيتها للماء.

درس (Garcia-Rodriguez et al. 2002)² ومن معه من باحثين التحليل الشامل لاستخدام الطاقة الشمسية في تقطير مياه البحر في ظل الظروف المناخية الإسبانية. لقد أخذوا في الاعتبار مُجمعات الطاقة الشمسية التالية للتحليل: الأحواض الشمسية اللوحية المتدرجة، المُجمعات اللوحية المستوية، مُجمعات الأنابيب المفرغة، المُجمعات قطع مكافئة المركبة لتوليد البخار المباشر (Direct steam generation-DSG). وتمت مقارنة كل المُجمعات بمعايير منها: إنتاج المياه العذبة

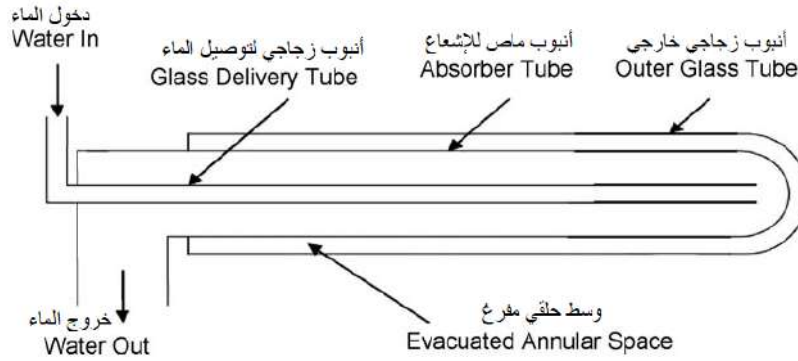
¹ Kumar, Sanjay, and S Sinha. 1996. "Transient model and comparative study of concentrator coupled regenerative solar still in forced circulation mode." Energy conversion and management 37 (5):629-636.

² Garcia-Rodriguez, Lourdes, Ana I Palmero-Marrero, and Carlos Gómez-Camacho. 2002. "Comparison of solar thermal technologies for applications in seawater desalination." Desalination 142 (2):135-142.

من وحدة تحلية ما، وإنتاج المياه العذبة التي يمكن تحقيقها إذا تم ربط مضخة الحرارة بهذه الوحدة، مساحة المجمع المستعملة. وأظهرت النتائج أن توليد البخار المباشر من القطع المكافئ كان تقنية واعدة لتحلية مياه البحر بمساعدة الطاقة الشمسية.

3-3) مقطرات شمسية مرتبطة بمجمع أنبوبي مفرغ:

مُجمِّع الإشعاع الشمسي الأنبوبي المفرغ ذو فعالية أكبر من المجمعات اللوحية المستوية لأغراض تسخين المياه. تشتهر مجمعات الأنابيب المفرغة (Evacuated Tube Collectors-ETC) بكفاءتها الطاقوية العالية عند مقارنتها بالمجمعات اللوحية الشمسية المستوية. في المجمعات اللوحية المستوية، تكون أشعة الشمس متعامدة مع المجمع عند الظهيرة فقط، وبالتالي من المحتمل دائماً أن تنعكس نسبة من أشعة الشمس التي تصطدم بسطح المجمع. ولكن في المجمع الأنبوبي المفرغ ونظراً لشكله الأسطواني، تكون أشعة الشمس متعامدة على سطح الزجاج معظم اليوم. ومنه تقلل الأنابيب المفرغة بشكل كبير من فقدان الحرارة حيث يوجد فراغ في الأنابيب. في الشكل (2-14) رسم توضيحي للمجمع الأنبوبي المفرغ أوينز-إلينويز (Owens-Illinois).



الشكل (2-14): رسم تخطيطي لمجمع الأنبوب المفرغ أوينز-إلينويز (Owens-Illinois)

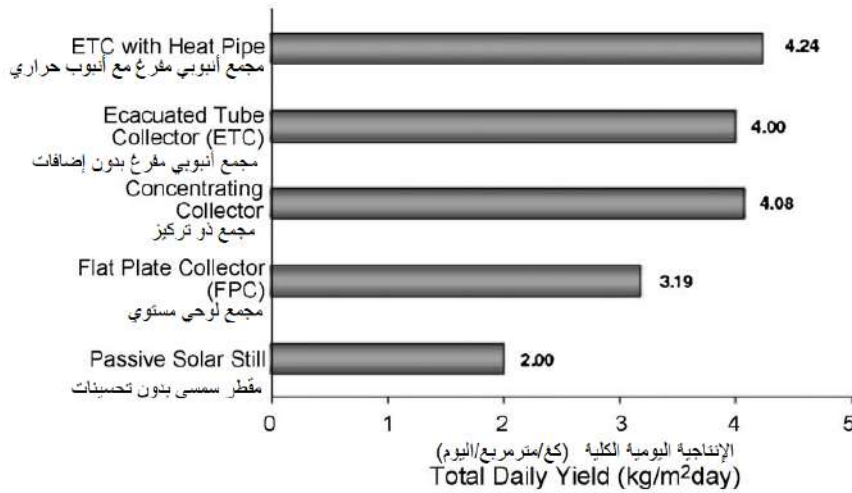
(Tiwari et al. 2007)

يتكون مجمِّع (Owens-Illinois) من أنبوبين متحد المحور مع وجود فراغ بين السطح الخارجي للأنبوب الداخلي والسطح الداخلي للأنبوب الخارجي. يتم طلاء السطح الخارجي للأنبوب الداخلي بطلاء أسود. يدخل السائل الناقل للحرارة من خلال أنبوب زجاجي صغير القطر ويخرج من نفس نهاية الأنبوب من خلال الفراغ بين أنبوب التوصيل وأنبوب الامتصاص الملون بالأسود (والذي يتم غلقه من طرف واحد). يتم تفريغ الحيز بين الأنبوب المغلف والأنبوب الزجاجي الخارجي المصنوع من زجاج البورسيليكات (borosilicate glass) لتقليل فقد الحمل الحراري.

طور (Tiwari et al. 2007)¹ النماذج الحرارية لجميع أنواع المجمعات الشمسية المدججة مع المقطرات الشمسية بالاعتماد على معادلات توازن الطاقة من حيث درجة حرارة الزجاج الداخلي والخارجي. ويوضح الشكل (2-15)، إجمالي العائد اليومي للمقطرات الشمسية المستعملة: (FPC) مجمع التركيز، مجمعات الأنابيب المفرغة (ETC) و (ETC) مع أنابيب حرارة. توصل المؤلفون للنقاط التالية:

¹ Tiwari, GN, Vimal Dimri, Usha Singh, Arvind Chel, and Bikash Sarkar. 2007. "Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system." International Journal of Energy Research 31 (15):1465-1482.

- (1) القيم القصوى لمعامل انتقال الحرارة الكلي للمقطرات الشمسية المُحسَّنة المدمجة مع المجمع اللوحي المستوي، والمُرَكَّز، والمجمع الأنبوبي المفرغ، و ETC مع أنابيب حرارة هي: (43,86,67,76) واط/متر/كلفن على التوالي.
- (2) الكفاءة الحرارية الإجمالية للمقطرات الشمسية المستعملة والمدمجة مع FPC، والمُرَكَّز، و ETC و ETC مع أنابيب حرارة هي 13.14 و 17.57 و 17.22 و 18.26 % على التوالي.
- (3) متوسط إجمالي الكفاءة الحرارية (5.6-19.1) % والكفاءة الطاقوية (0.25-0.85) % للمقطرات الشمسية. إذا تم أخذ الطاقة الخارجة من FPC في الاعتبار، فإن متوسط كفاءة الطاقة الناتجة من المقطرات الشمسية يختلف في المجال (0.59-1.82) %.



الشكل (2-15): إجمالي الناتج اليومي للمقطرات الشمسية المستعملة (Tiwari et al. 2007)

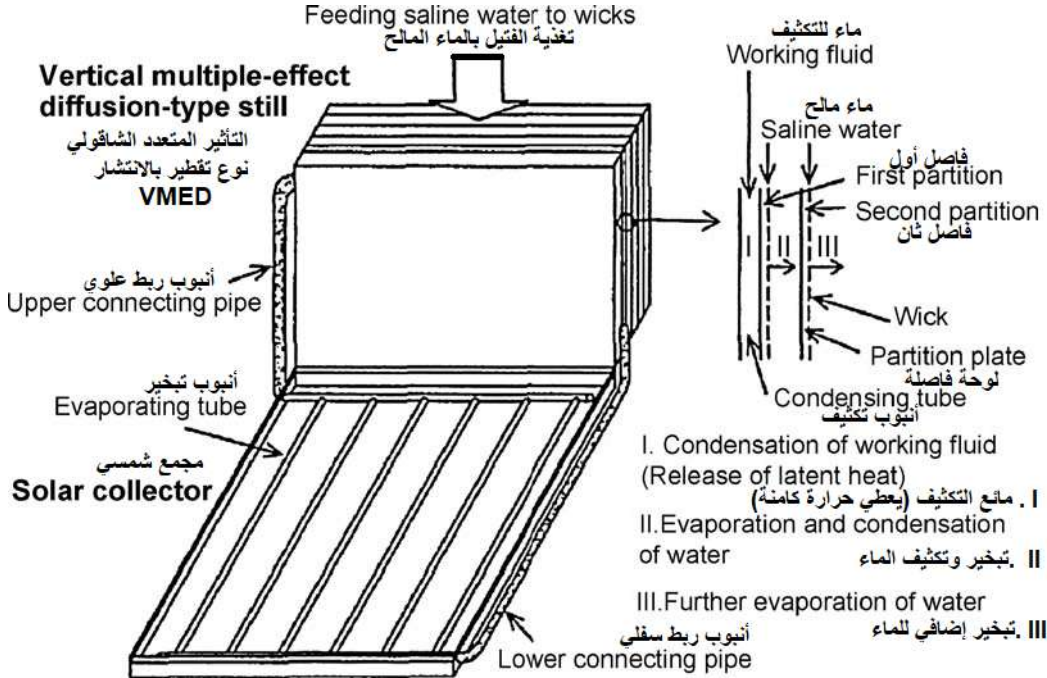
3-4) مقطرات شمسية مرتبطة بأنابيب حرارة:

اقترح (Tanaka et al. 2004)¹ تصميمًا حديثًا مركب من عدة طبقات انتشار متعددة التأثير، والمقطر الذي يتكون من مجمّع شمسي مع أنابيب حرارية بإضافة خلايا متوازية موضوعة بشكل شاقولي مدعومة بألياف لحمل الماء المالح. نسمي هذه التركيبة التأثير متعدد الانتشار الشاقولي (Vertical Multiple Effect Diffusion-VMED)، يتكون المُجمّع الشمسي من غطاء زجاجي ولوحة مستوية بها أنابيب تبخير، مطلية بمادة لامتصاص الإشعاع لونها أسود، مع وجود فجوة هوائية بينهما تعمل كعازل حراري للأنابيب. يتم توصيل الأنابيب النحاسية بأول خلية شاقولية لتدوير مائع التشغيل، يعود مائع التشغيل للأنابيب النحاسية من أعلى المُجمّع الشمسي. تعمل الخلية الشاقولية الأولى بتسخين الخلايا الأخرى لتبخير الماء في الخلية الثانية، وهكذا يتم تسخين الخلية الثالثة إلى غاية انتقال الحرارة إلى الخلية الأخيرة.

المقطر (VMED) يتكون من خلايا شاقولية ومتوازية مع فجوات هوائية ضيقة بينها، والجزء العلوي على اتصال مع فتائل مبللة بمحلول ملحي، ويتم تغذية الفتائل بالمياه المالحه باستمرار. يتم عزل السطح الأمامي ل (VMED) والسطح السفلي للمُجمّع الشمسي. ينتقل الإشعاع الشمسي من خلال الغطاء الزجاجي ويمتص على مستوى لوحة المُجمّع، ويتم

¹ Tanaka, Hiroshi, and Yasuhito Nakatake. 2004. "A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector." Desalination 160 (2):195-205.

تسخين وتبخير الإيثانول في أنابيب النحاس المتصلة بخلايا التقطير. يمر بخار الإيثانول عبر أنابيب التوصيل فيتبخر ويلامس الخلية الأولى ويخرج منها متكاثف على هيئة سائل ويعود للمُجمّع الشمسي بفعل الجاذبية. تنتقل الحرارة الكامنة لتبخير الإيثانول إلى (VMED) ويتم نقلها لخلايا التقطير لإنتاج الماء في كل خلية كما هو موضح في الشكل (2-16).



الشكل (2-16): رسم التخطيطي لنوع الانتشار متعدد التأثير مقترناً بمجمع الطاقة الشمسية لأنابيب الحرارة (Hiroshi Tanaka et al. 2004)

لاحظ المؤلفون من الدراسات التجريبية أنه:

- (1) من الممكن طي المُجمّع الشمسي و (VMED) أو فصله عند حملها، بحيث يكون من السهل حمل ما تبقى وتكلفة الشحن ستكون رخيصة جداً.
 - (2) من المتوقع نظرياً أنه عند استعمال 10 خلايا تقطير بفجوة انتشار لها سمك يساوي 5 مم يكون الإنتاج 19,2 كغ/م² وعند استخدام فجوة سمكها 3 مم ينتج المقطر 21,8 كغ/م² في يوم مشمس والإشعاع الشمسي اليومي البالغ 24.4 ميغا جول/م² في اليوم.
 - (3) إنتاجية الجهاز المقترح أكبر بنسبة 13٪ من إنتاجية المقطر (VMED) المقترن بالحوض.
- وجد (Tanaka et al. 2004)¹ أن الزاوية المثلى للمجمع الشمسي هي 26° عندما تكون ثابتة طوال السنة إذا تم استخدام المقطر المقترح عند خط عرض 26° شمالاً. تبلغ الإنتاجية اليومية الإجمالية للزاوية المثلى 9٪ و 17٪ أكبر بالنسبة للزوايا الخاصة بالانقلابين الصيفي أو الشتوي على الترتيب. تزداد الإنتاجية مع انخفاض سُمك فجوات الانتشار في الخلايا.

¹ Tanaka, Hiroshi, and Yasuhito Nakatake. 2004. "A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector." Desalination 160 (2):195-205

أجرى (Tanaka et al. 2005)¹ تجارب على المقطر الشمسي (VMED) باستخدام مُجمّع شمسي لأنابيب حرارية، وكانت النتائج التجريبية لمعدلات الإنتاج الإجمالية للتأثير المتعدد حوالي 93٪، مما يشير إلى أن أنابيب الحرارة قادرة على نقل حرارة كافية لتبخير الماء.

3-5) مقطرات شمسية مرتبطة ببركة شمسية:

البركة الشمسية هي بركة تم بناؤها صناعياً حيث تُحدث ارتفاع كبير في درجات الحرارة بالحمل الحراري، وتُستخدم الأحواض الشمسية لتجميع وتخزين الطاقة الشمسية، وفي تطبيقات حرارية مختلفة مثل تدفئة البيوت البلاستيكية، والتسخين عند معالجة الألبان، وإنتاج الطاقة لتحلية المياه، وقد تم إجراء هذه المراجعة التفصيلية للبركة الشمسية بواسطة (Velmurugan (Velmurugan et al. 2008)². حيث حلل (Velmurugan et al. 2007)³ في بحث آخر نظرياً وتجريبياً البركة الشمسية المصغرة (mini solar pond) بمساعدة الطاقة الشمسية وباستخدام مكعب إسفنجي. وأوضحت النتائج أن متوسط الزيادة في الإنتاجية عند دمج البركة مع المقطر تصل إلى 27.6٪ وعند دمج البركة والإسفنج مع مقطر تبلغ 57.8٪. درس (Velmurugan, Mandlin, et al. 2009)⁴ تأثير زيادة الأملاح في المقطرات الشمسية المدججة مع بركة شمسية صغيرة. وتم استخدام النفايات الصناعية كمشغل للسخان الشمسي من نوع أحادي الانحدار ذو حوض بسيط والحوض الشمسي المتدرج. البركة الشمسية المصغرة موصولة بالمجمعات لتعزيز الإنتاجية وتم اختبارها كذلك بشكل فردي. يظهر الشكل (2-17) الرسم التخطيطي التركيب التجريبي. وتبين النتائج أنه تم الحصول على أقصى إنتاجية بنسبة 100٪ عندما تم دمج أحادي الانحدار ذو حوض بسيط مع الحصى والإسفنج.

وتزداد الإنتاجية مع زيادة الأشعاع الشمسي وفرق درجة حرارة بين الزجاج والماء، وتنخفض مع زيادة سرعة الرياح. ومن جهة أخرى بحث (Velmurugan, Pandiarajan, et al. 2009)⁵ تجريبياً إمكانية تعزيز إنتاجية المقطرات الشمسية عن طريق توصيل بركة شمسية مصغرة ومقطر شمسي متدرج وآخر ذو حوض بسيط على التسلسل. وتم استخدام الحصى والإسفنج لزيادة الإنتاجية. تُظهر النتائج التي توصلوا إليها أن الحد الأقصى للإنتاجية وصل إلى نسبة 78٪ عند استخدام الإسفنج في المقطر المتدرج، ووجدوا أيضاً أن الإنتاجية أثناء الليل تحسنت أيضاً عند استخدام الحصى في هذه المقطرات. درس (Al Hawaj et al. 1994)⁶ حوضاً شمسياً يساعد على تحلية مياه البحر متعددة التأثير في بيئة قاحلة وقد أوصى باستخدام النسبة المثلى للمساحة. قام (Lu et al. 2001)⁷ بدراسة تحلية المياه باستخدام أحواض شمسية متدرجة، ولاحظ

¹ Tanaka, Hiroshi, Yasuhito Nakatake, and Masahito Tanaka. 2005. "Indoor experiments of the vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector." *Desalination* 177 (1-3):291-302.

² Velmurugan, V, and K Srithar. 2008. "Prospects and scopes of solar pond: a detailed review." *Renewable and sustainable energy reviews* 12 (8):2253-2263.

³ Velmurugan, V, and K Srithar. 2007. "Solar stills integrated with a mini solar pond—analytical simulation and experimental validation." *Desalination* 216 (1-3):232-241.

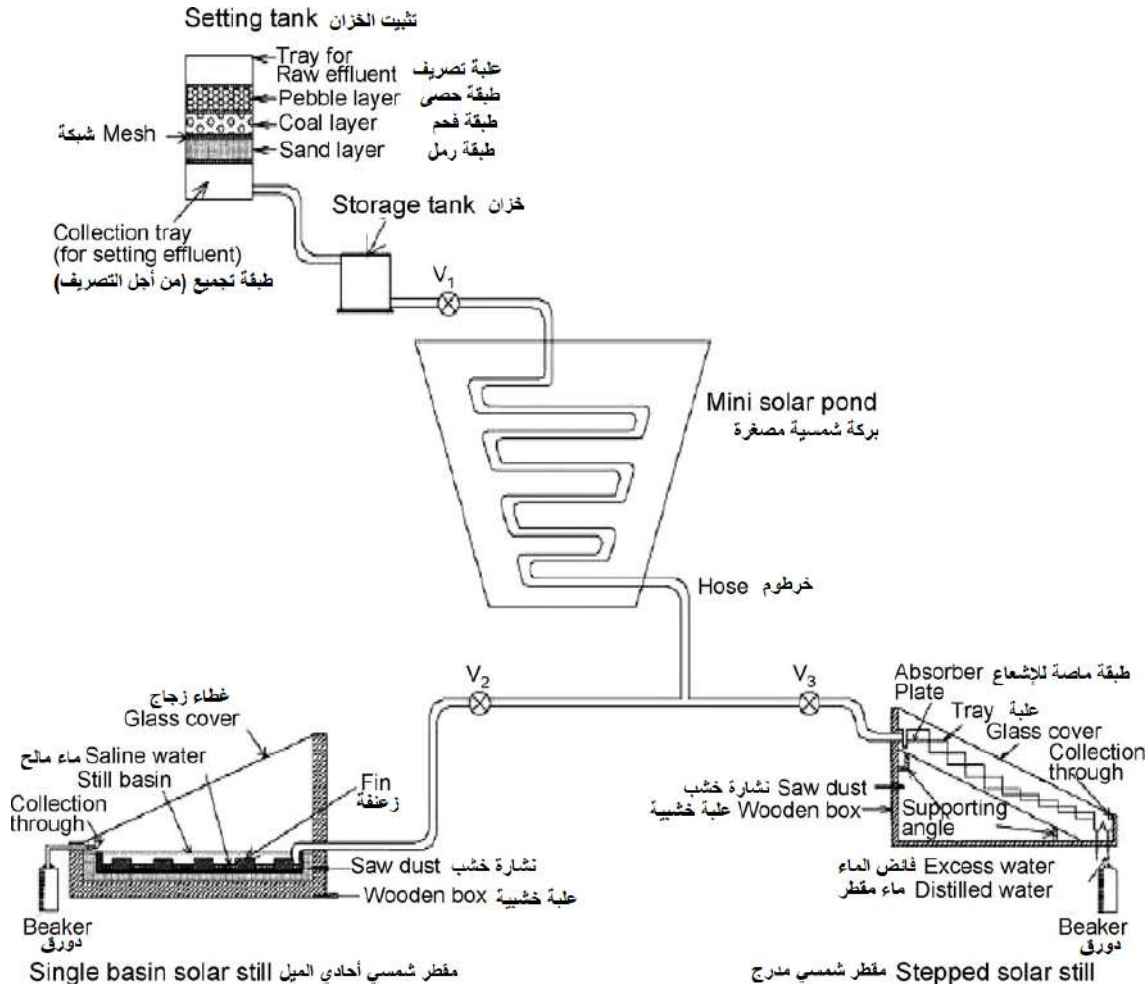
⁴ Velmurugan, V, J Mandlin, B Stalin, and K Srithar. 2009. "Augmentation of saline streams in solar stills integrating with a mini solar pond." *Desalination* 249 (1):143-149.

⁵ Velmurugan, V, S Pandiarajan, P Guruparan, L Harihar Subramanian, C David Prabakaran, and K Srithar. 2009. "Integrated performance of stepped and single basin solar stills with mini solar pond." *Desalination* 249 (3):902-909.

⁶ Al Hawaj, Osamah, and MA Darwish. 1994. "A solar pond assisted multi-effect desalting system." *Desalination* 99 (1):119-135.

⁷ Lu, Huanmin, John C Walton, and Andrew HP Swift. 2001. "Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds." *Desalination* 136 (1-3):13-23.

أن وحدة التقطير تنتج كميات لا بأس بها من الماء المقطر النقي. يبلغ إجمالي مستوى المواد الصلبة الذائبة كالأملح وغيرها في الماء المنتج حوالي 2-3 مغ/لتر. حيث لاحظ أنه لا يوجد تأثير كبير لظروف التشغيل على جودة نواتج التقطير. درس تجريبياً (El-Sebail et al. 2008)¹ من أجل تحسين إنتاجية المقطرات الشمسية بحوض بسيط ذات انحدار واحد مدمجاً مع البركة الشمسية العميقة (Shallow Solar Pond-SSP) ووجدوا أن متوسط القيم السنوية للإنتاجية اليومية وكفاءة المقطر مع (SSP) كانت أعلى من تلك التي تم الحصول عليها بدون (SSP) بنسبة 52.36% و 43.80% على التوالي.



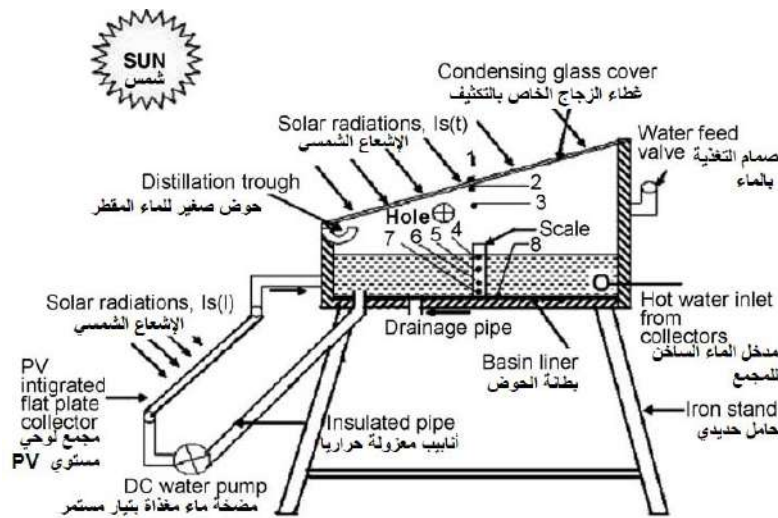
الشكل (2-17): رسم التخطيطي لبركة شمسية مصغرة مدمجة مع مقطرين شمسين (حوض بسيط-حوض مدرج) (Velmurugan et al. 2009)

3-6) مقطرات شمسية مرتبطة بنظام هجين (PV/T):

المشكلة التي تواجه الخلايا الكهروضوئية العادية هي أن معظم الإشعاع الشمسي الذي تمتصه الخلية الشمسية لا يتحول إلى كهرباء. والطاقة الزائدة التي لا تمتصها الخلية الشمسية تزيد من درجة حرارة الخلية الكهروضوئية وتقلل من

¹ El-Sebail, AA, MRI Ramadan, S Aboul-Enein, and N Salem. 2008. "Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond." Energy conversion and Management 49 (10):2839-2848.

كفاءتها. وكذلك يقلل الدوران الطبيعي أو القسري لوسيط التبريد من درجة حرارة الخلية، ويمكن استعمال السوائل في ذلك. وغالبًا ما يتم تطبيق نظام التبريد للخلايا الكهروضوئية. وهذه الطريقة هي أحد الإضافات التي يمكن أن تقدمها الأنظمة الكهروضوئية لتسخين أنظمة حرارية أخرى، حيث نسميها النظام الهجين (PV/T). ومن ثم فإن هذه الأنظمة، بالإضافة إلى تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء، تجمع الطاقة الحرارية المتبقية وتوفر كلاً من الحرارة والكهرباء في أشكال قابلة للاستخدام. وأجرى كل من (Kumar and Tiwari 2008)¹ دراسة تجريبية للسخان الشمسي الهجين الكهروضوئية/الحرارية (PV/T) ووجدوا أن المحصول زاد بأكثر من 3.5 مرات من التقطير الشمسي بدون تحسينات. ويظهر الشكل (2-18) رسم تخطيطي لمقطر شمسي بسيط مرتبط بنظام هجين (PV/T).



الشكل (2-18): رسم تخطيطي لمقطرات شمسية مرتبطة بنظام هجين (PV/T)

(Shiv Kumar and Tiwari. 2009)

حاول الباحثان (Kumar et al. 2009a)² تقدير معاملات انتقال الحرارة الداخلية للنظام الهجين الشمسي (PV/T) لمناخ نيودلهي. لاحظ المؤلفان أن متوسط القيم السنوية لمعامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري للمقطر بدون نظام هجين وآخر بنظام هجين (PV/T) هي 0.78 و 2.41 واط/م². كلفن، على التوالي عند عمق الماء 0.05 م.

قدم (Kumar et al. 2009b)³ تحليل لتكلفة دورة الحياة للمقطرات الشمسية أحادي الانحدار بوجود نظام هجين

(PV/T) واقترحوا ما يلي:

(1) أقل تكلفة لكل كيلوغرام من الماء المقطر الذي تم الحصول عليه من مقطر شمسي بدون نظام هجين وبوجود نظام هجين (PV/T) تقدر بـ 0.70 روبية 1.93 روبية على التوالي. وتعتبر هذه الأنظمة اقتصادية مقارنة بتكلفة المياه المعبأة في الصناعة، والتي تكلف حوالي 10 روبية لكل كيلوغرام في السوق الهندي للمستهلكين.

¹ Kumar, Shiv, and Arvind Tiwari. 2008. "An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still." International Journal of Energy Research 32 (9):847-858.

² Kumar, Shiv, and GN Tiwari. 2009a. "Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still." Solar Energy 83 (9):1656-1667.

³ Kumar, Shiv, and GN Tiwari. 2009b. "Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still." Applied energy 86 (10):1995-2004.

(2) يتم معالجة وتصليح المقطرات الشمسية بدون نظام هجين وبوجود نظام هجين (PV/T) في فترات زمنية في نطاق 1.1-6.2 سنة و 3.3-23.9 سنة على التوالي، وسعر بيع الماء المقطر بالرؤيئة. 2-10 رؤيئة لكل كيلوغرام، لذلك فإن هذه المقطرات الشمسية مقبولة عند استخدامها لإنتاج الماء الصالح للشرب.

(3) يقدر وقت استرداد التكلفة الطاقوية (The energy payback times -EPBT) للمقطرات الشمسية بدون نظام هجين وبوجود نظام هجين (PV/T) بـ 2.9 سنة و 4.7 سنة على التوالي.

3-7) مقطرات شمسية تعمل بنظام تقطير متعدد الطبقات:

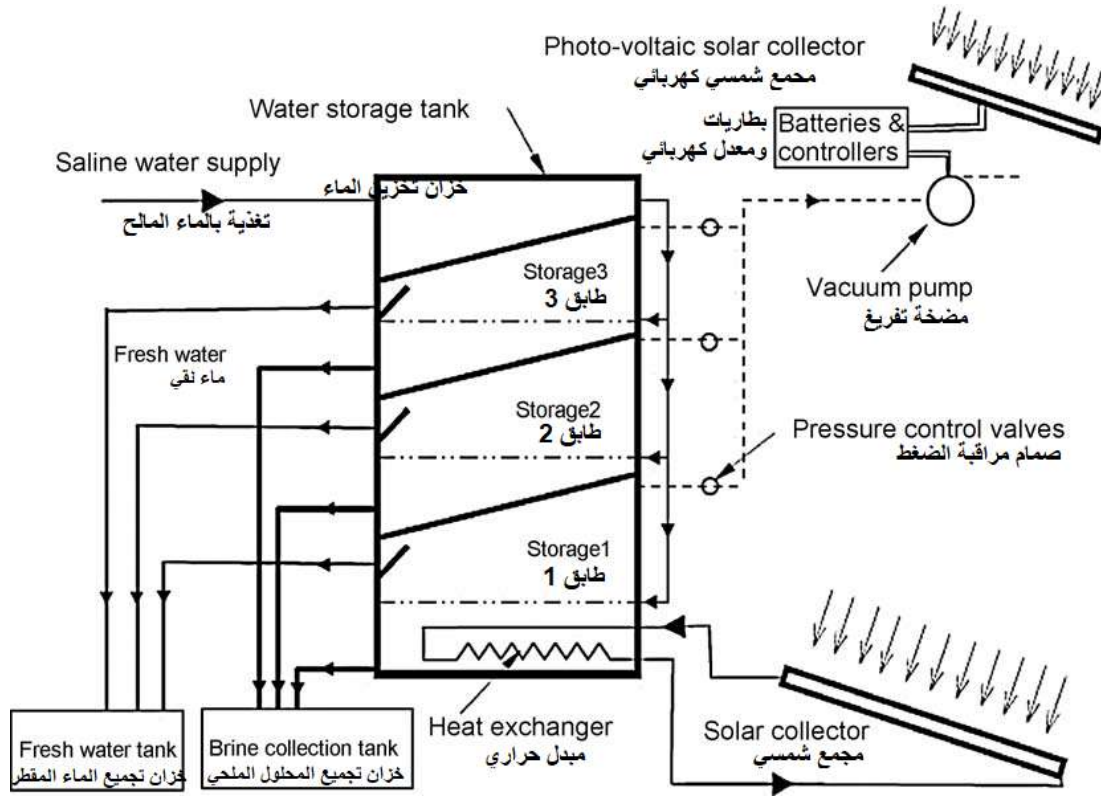
طور كل من (Nishikawa et al. 1998)¹ واختبر نظام تقطير ثلاثي التأثير (ذو ثلاث طبقات تقطير) بدون استخدام الطاقة الشمسية. وعند استخدام الطاقة الشمسية تم الحصول على أعلى أداء تقطير قدره 73.6 كغ/يوم وهو ما يعادل 9.44 كغ/م² من الماء العذب المقطر في حالة الإشعاع الشمسي البالغ 13.85 ميغا جول/م² في اليوم الأول (108.3 ميغا جول)، وكانت الحرارة الكامنة الكلية للتقطير (178.8 ميغا جول) حوالي 1.7 مرة من الإشعاع الشمسي. الباحثون (Ahmed et al. 2009)² قاموا بتصميم وتصنيع نظام التقطير الشمسي متعدد المراحل، والذي يتكون من ثلاث مراحل تقطير مكدسة فوق بعضها البعض، ومعزولة بعناية عن البيئة الخارجية باستخدام طبقات من الخشب والصوف الصخري ورقائق الألمنيوم لمنع أي خسارة حرارية للبيئة المحيطة. يتم تثبيت الطبقات الثلاث فوق بعضها البعض والحفاظ على إحكام جيد بينها لمنع أي تسرب للبخار عبر الأسطح الملامسة. يستخدم المُجمَع الشمسي لتزويد النظام بالحرارة من خلال الطبقة السفلية، والتي يتم الحفاظ عليها عند ضغط أقل من الضغط الجوي عن طريق مبادل حراري. يتم استخدام مضخات تفرغ تعمل بالطاقة الشمسية لإخلاء الغازات غير القابلة للتكثيف من المراحل الثلاث.

يوضح الشكل (2-19) مخططاً توضيحياً للمقطرات الشمسية المفرغة ومتعددة المراحل. يتم تغذية المياه المالحة في كل مرحلة من الخزانات الموجودة في الجزء العلوي. يتكثف البخار المتولد في المرحلة الدنيا على السطح السفلي للمرحلة الوسيطة، مما يعطي حرارته للمياه المالحة في المرحلة المتوسطة، و ثم يتكثف البخار المتولد في المرحلة المتوسطة عند السطح السفلي للمرحلة العليا مما يعطي حرارته إلى الماء المالح في المرحلة العليا. يتم تسخين المياه التي يتم تغذيتها مسبقاً بالحرارة عن طريق تكثيف البخار المتولد في المرحلة العليا، والذي يتكثف في قاع خزان مياه التغذية. يظل الضغط داخل كل مرحلة من المراحل الثلاث أقل من المرحلة السابقة. تستخدم مجموعة من الصمامات للتحكم بالفراغ داخل المراحل المختلفة. وقد بينت النتائج أنه تم الحصول على الحد الأقصى لإنتاج الطاقة الشمسية في الطبقة الأولى وهو 6 كغ/م²/يوم، 4.3 كغ/م²/يوم في الطبقة الثانية و 2 كغ/م²/يوم في الطبقة الثالثة عند ضغط الفراغ 0.5 بار. في الواقع، إجمالي إنتاجية الطاقة الشمسية يتأثر بشدة بتغيير الضغط الداخلي، حيث انخفضت الإنتاجية مع زيادة الضغط وذلك بسبب انخفاض معدلات التبخر عند قيم الضغط الأعلى.

¹ Nishikawa, H, T Tsuchiya, Y Narasaki, I Kamiya, and H Sato. 1998. "Triple effect evacuated solar still system for getting fresh water from seawater." Applied thermal engineering 18 (11):1067-1075.

² Ahmed, MI, M Hrairi, and AF Ismail. 2009. "On the characteristics of multistage evacuated solar distillation." Renewable Energy 34 (6):1471-1478.

فحص (Shatat et al. 2010)¹ تجريبياً أداء تحلية المياه بنظام المتعدد المراحل متصلاً بأنبوب حراري لمُجمَع الطاقة الشمسية بأنبوب مفرغ. تظهر نتائج الاختبارات أن النظام ينتج حوالي 9 كغ/يوم من المياه العذبة وكفاءة تجميع الطاقة الشمسية تبلغ حوالي 68%. ومن جهة أخرى طور (Schwarzer et al. 2009)² نظام تحلية شمسي متعدد المراحل مع استعادة الحرارة. وأظهرت النتائج أن النظام ينتج حوالي 15-18 لتر/م²/يوم، وهو أعلى 5-6 مرات من جهاز التقطير التقليدي البسيط.



الشكل (2-19): رسم التخطيطي لمقطر شمسي يعمل بنظام تقطير متعدد الطبقات (Ahmed et al. 2009)

3-8) مقطرات شمسية تعمل بنظام تقطير متعدد التأثير:

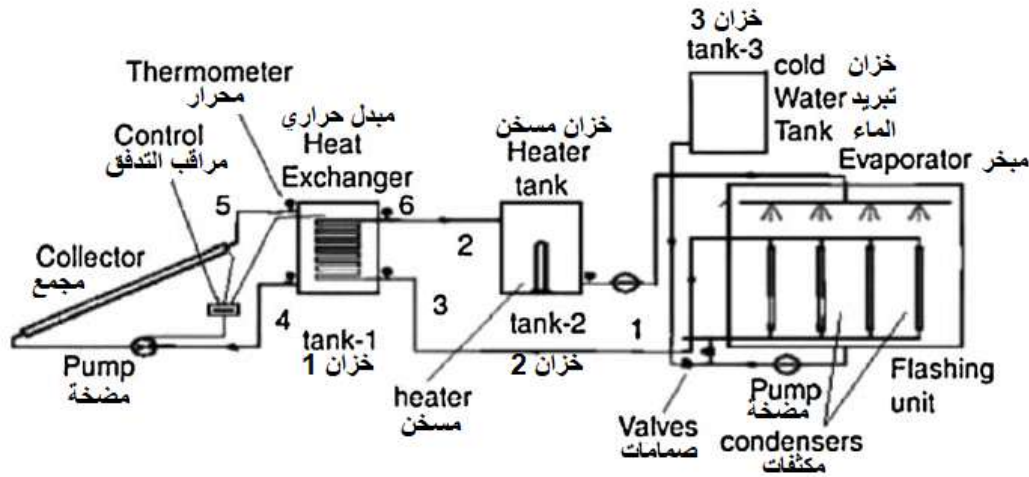
إن نظام التقطير المتعدد يعتمد بشكل مباشر على (الدورة المتعددة تكثيف-تبخير- multiple condensation- evaporation cycle). وتعتبر الطاقة الشمسية المستخدمة فعالة لإنتاج المياه المحلاة عند درجة حرارة منخفضة نسبياً تصل إلى 70 درجة مئوية. وأظهر (Dayem 2006)³ تجريبياً وعددياً أداء وحدة التقطير الشمسي البسيط. تتكون وحدة التقطير الأساسية من مرطبات الهواء (مبخرات- evaporators) ومزيلات الرطوبة (مكثفات- condensers) أي نظام (humidifiers- dehumidifiers). لا يوجد جدار يفصل بين العضوين. يتم تمرير المحلول الملحي عبر خزان التخزين الساخن (Tank-2)

¹ Shatat, Mahmoud IM, and Khamid Mahkamov. 2010. "Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modelling." Renewable energy 35 (1):52-61.

² Schwarzer, Klemens, E Vieira da Silva, Bernhard Hoffschmidt, and T Schwarzer. 2009. "A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production." Desalination 248 (1-3):204-211.

³ Dayem, Adel M Abdel. 2006. "Experimental and numerical performance of a multi-effect condensation-evaporation solar water distillation system." Energy 31 (14):2710-2727.

حيث ترتفع درجة حرارته، ثم يمر من خلال المبخرات حيث يتم مرور بخار الماء والحرارة على تيار هوائي معاكس، مما يقلل من درجة حرارة المحلول الملحي. يتم تسخين الهواء وترطيبه في وقت واحد حيث تقل رطوبة الهواء المشبع في جانب المكثف. على الجانب الآخر، يتكون المبخر من أنبوبين أفقيين بهما فتحات صغيرة على الجانب السفلي من الأنبوب. تعمل الثقوب كمحقتن، وتقوم بحقن الماء المالح الساخن لزيادة معدل التبخر. يعطي الشكل (2-20) تخطيطاً للنظام. أوضحت النتائج أن النظام يمكن أن يعمل بشكل مستمر وأن إنتاجية الماء المقطر عالية بالنسبة لدرجة الحرارة المتوسطة للمجموع التي تبلغ 50 درجة مئوية، وتم استنتاج مساحة المُجمَع المثلى المقدرة 6 أمتار مربعة بناءً على دورة حياة النظام، وعلى توفير الطاقة الشمسية. أجرى كل من (Hongfei et al. 2002)¹ دراسة تجريبية لحالة مقطر شمسي حيث تم تدوير الطاقة وتعزيز تبخر الفيلم المتساقط وتجديده. بناءً على النتائج التجريبية، وجد المؤلفون أن أداء الوحدة يزيد بحوالي مرتين إلى ثلاث مرات عن تلك الخاصة بأحواض الطاقة الشمسية التقليدية.



الشكل (2-20): رسم التخطيطي لمقطرات شمسي يعمل بنظام تقطير متعدد التأثير
(Adel M Abdel Dayem. 2006)

درس كل من (Hou et al. 2008)² عملية التحلية الهجينة باستخدام الطاقة الشمسية (التربيط-إزالة التربيط) (humidifiers-dehumidifiers) باستخدام وحدة تقطير من نوع الحوض. تم رفع نسبة الانتاج لهذا النظام بمقدار 2-3 مرة على الأقل من خلال إعادة استخدام المياه التي تم تدويرها. درس (Gräter et al. 2001)³ تجريبياً التأثير المتعدد للتحلية الهجينة (بالطاقة الشمسية/الطاقة الأحفورية) (hybrid solar/fossil desalination) للمياه قليلة الملوحة. أظهرت النتائج أن استعادة الحرارة من المخرج إلى المقطر لا يوجد لها تأثير على نوعية نواتج التقطير ولكن نسبة المخرجات المكتسبة (Gained Output Ratio-GOR) تزداد بشكل كبير. ويزيادة مناطق التبخر والتكثيف المثبتة داخل التقطير، يمكن زيادة ناتج التقطير بأكثر من 50% و GOR بنسبة 60%.

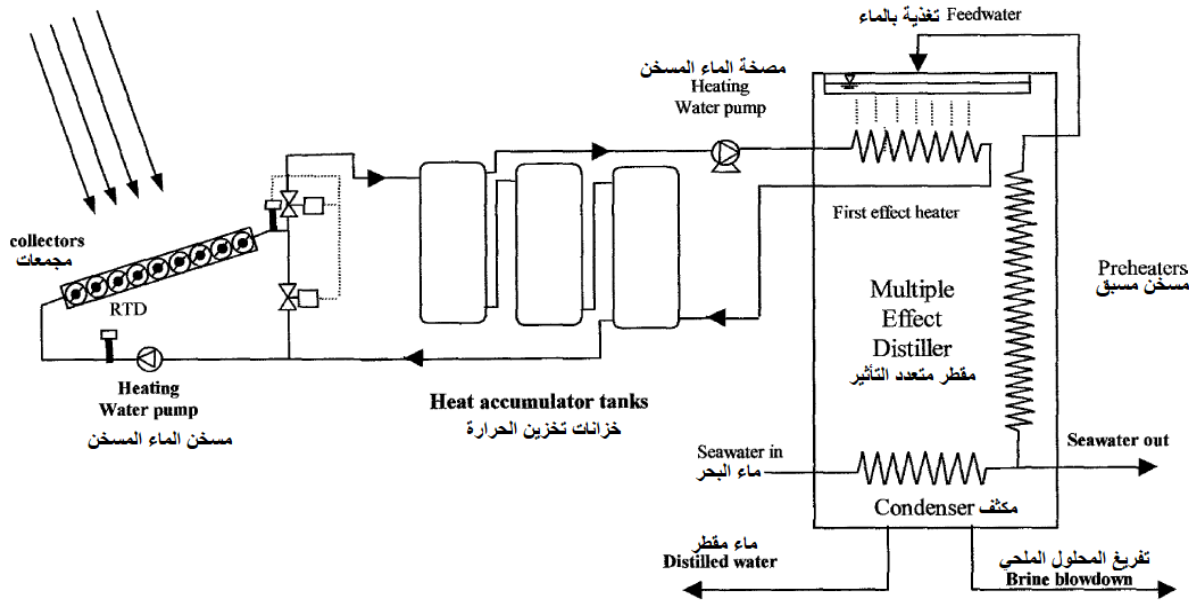
¹ Hongfei, Zheng, and Ge Xinshi. 2002. "Steady-state experimental study of a closed recycle solar still with enhanced falling film evaporation and regeneration." Renewable energy 26 (2):295-308.

² Hou, Shaobo, and Hefei Zhang. 2008. "A hybrid solar desalination process of the multi-effect humidification dehumidification and basin-type unit." Desalination 220 (1-3):552-557

³ Gräter, Frieder, Michael Dürrbeck, and Jürgen Rheinländer. 2001. "Multi-effect still for hybrid solar/fossil desalination of sea-and brackish water." Desalination 138 (1-3):111-119.

قدم (Garg et al. 2003)¹ تصميمًا تجريبيًا ومحاكاة حاسوبية لـ (humidifiers-dehumidifiers) وتحلية المياه بالطاقة الشمسية، ووضع نموذجًا يفيد في تقدير ناتج محطة التقطير والمكونات المختلفة للنظام مثل سخان المياه الشمسي وغرفة الترطيب وغرفة التكتيف.

درس (El-Nashar 2003)² التأثير المتعدد لمحطة تحلية المياه بالطاقة الشمسية حيث وجد أن ترسب الغبار وتأثيراته على الأداء يعتمد بشدة على المواسم على مدار السنة، ويجب تعديل وتيرة التنظيف بالنفث وفقًا لذلك. كما هو موضح في الشكل (21-2).



الشكل (21-2): رسم تخطيطي لمحطة تحلية المياه بالطاقة الشمسية. (Ali M. El-Nashar. 2003)

قد طور أيضا (Zhang et al. 2003)³ نظام تحلية شمسي مصمم بوجود مُجمَع شمسي وتم اختباره في ظل ظروف مناخية عملية. أظهرت النتائج أن الناتج يزيد بحوالي مرتين إلى ثلاث مرات عن إنتاج الطاقة الشمسية التقليدية ذات الأحواض الأحادية الانحدار التي تحت نفس الظروف.

أجرى (Bacha et al. 2003)⁴ التحقق التجريبي من وحدة التقطير لمحطة تحلية باستخدام مبدأ دورة (التكتيف-التبخير) المتعدد بالطاقة الشمسية. وتظهر النتائج أن هذا المبدأ هو الاختيار الأحسن، لأنه يسمح بمعاملات تبادل أعلى، وكذلك فإن اختيار المجمع الشمسي الملائم سوف يعطي أداء عالي الكفاءة لعملية التقطير.

¹ Garg, HP, Rajendra Singh Adhikari, and Rakesh Kumar. 2003. "Experimental design and computer simulation of multi-effect humidification (MEH)-dehumidification solar distillation." Desalination 153 (1-3):81-86.

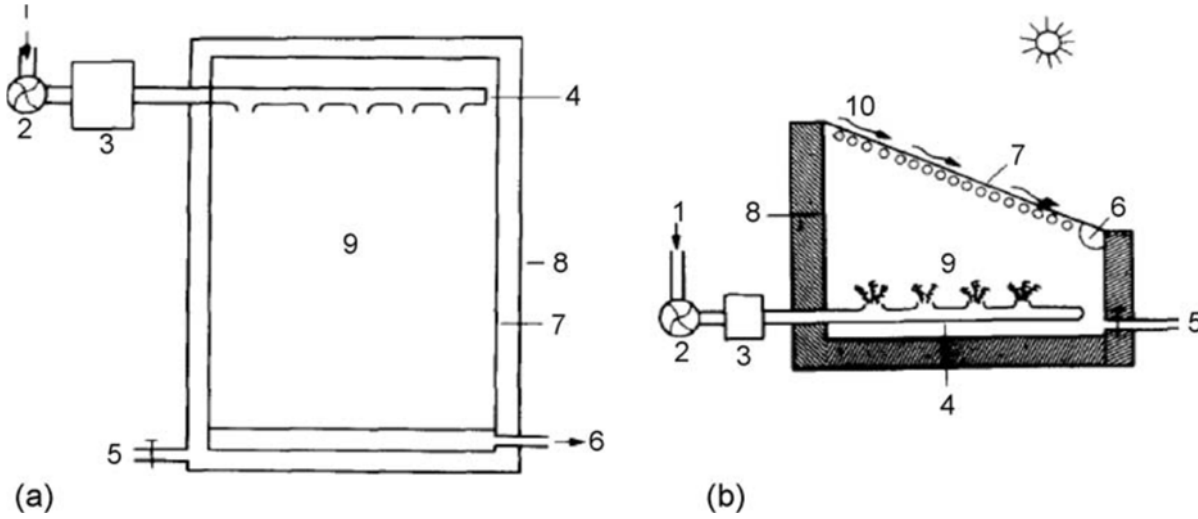
² El-Nashar, Ali M. 2003. "Effect of dust deposition on the performance of a solar desalination plant operating in an arid desert area." Solar energy 75 (5):421-431.

³ Zhang, Lianying, Hongfei Zheng, and Yuyuan Wu. 2003. "Experimental study on a horizontal tube falling film evaporation and closed circulation solar desalination system." Renewable energy 28 (8):1187-1199.

⁴ Bacha, H Ben, T Damak, M Bouzguenda, and AY Maalej. 2003. "Experimental validation of the distillation module of a desalination station using the SMCEC principle." Renewable Energy 28 (15):2335-2354.

9-3) مقطرات شمسية تعمل بفقااعات الهواء:

أفاد (Pandey 1984)¹ عن تأثير التجفيف لفقااعات الهواء وتبريد الغطاء الزجاجي بشكل قسري في التقطير الشمسي، أن إنتاج الفقااعات للهواء الجاف والمتزامن مع تبريد الزجاج تعطي أعلى زيادة، حيث تليها فقااعات من الهواء الجاف وحده وتلقائياً، الشكل (22-2) يوضح النظام المستخدم، والنتائج مدونة في الجدول (1-2):



الشكل (22-2): رسم التخطيطي لمقطر شمسي يعمل بفقااعات الهواء (Pandey. 1984)

صمم (Mink, Aboabboud, et al. 1998)² وأجرى تجارب على المقطر الشمسي بضغط الهواء مع إعادة تدوير الحرارة. أظهرت النتائج أنه تم تحقيق زيادة قدرها ثلاثة أضعاف في الإنتاج مقارنةً بالنوع الذي به حوض في نفس المنطقة وبنفس الإشعاع.

قدم (Mink, Horvath, et al. 1998)³ اختبار الأداء على الهواء المضغوط في المقطر الشمسي متعدد التأثير، مع إعادة تدوير الطاقة الحرارية التي تتكون من غرفة التبخر العلوية وغرفة التكتيف السفلية. أشارت النتائج التجريبية إلى أنه يمكن تحسين الأداء بشكل أكبر عن طريق زيادة سرعة تيار الهواء في الغرفة السفلية عن طريق تقليل مساحة المقطع العرضي. كما هو موضح في الشكل (23-2).

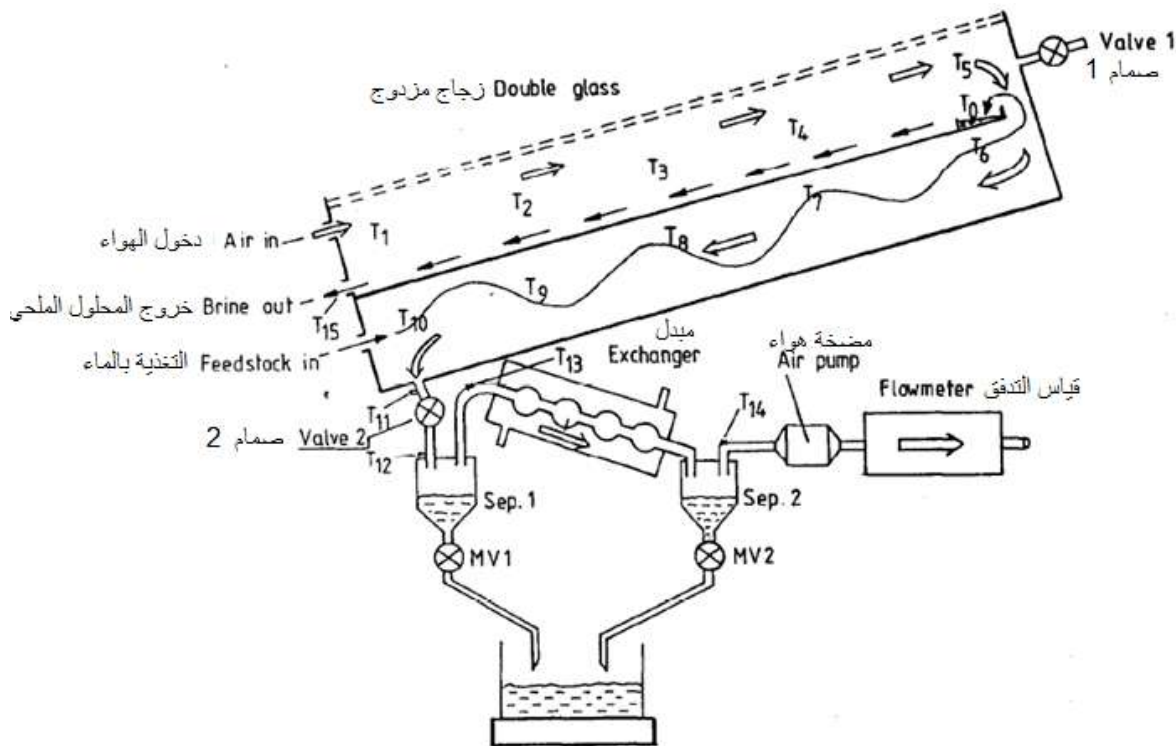
¹ Pandey, GC. 1984. "Effect of dried and forced air bubbling on the partial pressure of water vapour and the performance of solar still." Solar energy 33 (1):13-18.

² Mink, György, Mohamed M Aboabboud, and Etienne Karmazsin. 1998. "Air-blown solar still with heat recycling." Solar energy 62 (4):309-317.

³ Mink, G, L Horvath, EG Evseev, and AI Kudish. 1998. "Design parameters, performance testing and analysis of a double-glazed, air-blown solar still with thermal energy recycle." Solar Energy 64 (4-6):265-277.

جدول (1-2): الناتج اليومي للماء المقطر حسب طريقة التقطير بفقايعات الهواء (Pandey. 1984)

N°	Process معالجة	Distillat water (L/m ² .day) ماء مقطر (لتر/م ² .يوم)		Ration النسبة	Per cent increase in distillate output الزيادة في الماء المقطر
		Exp still تقطير تجريبي	Ref still تقطير تقليدي		
1	تشكيل فقاعات من الهواء المحيط	1.981	1.849	1.071	7.1
2	تشكيل فقاعات من الهواء المحيط بعد التجفيف	2.216	1.659	1.335	33.5
3	تشكيل فقاعات من الهواء المحيط بعد التجفيف + تبريد الغطاء الزجاجي	2.608	1.767	1.475	47.5
4	تبريد الغطاء الزجاجي فقط	1.790	1.372	1.305	30.5



الشكل (2-23): رسم التخطيطي لمقطر شمسي يعمل بفقايعات الهواء (Gyorgy Mink et al. 1998)

10-3) مقطرات شمسية هجينة:

بإمكان المقطرات الشمسية الهجينة إنتاج المياه المحلاة والساخنة من نفس النظام. تتمتع هذه الأنواع من التصميمات بمزايا تأهلها للاستخدام بشكل واسع. قام (Voropoulos et al. 2001)¹ بالتركيب التجريبي لهذه المقطرات المقترنة بمُجمَّعات الاشعاع الشمسي كما في الشكل (2-24). وتظهر النتائج أن: (1) تبلغ إنتاجية النظام الهجين حوالي ضعف إنتاجية النظام بدون مُجمَّعات.

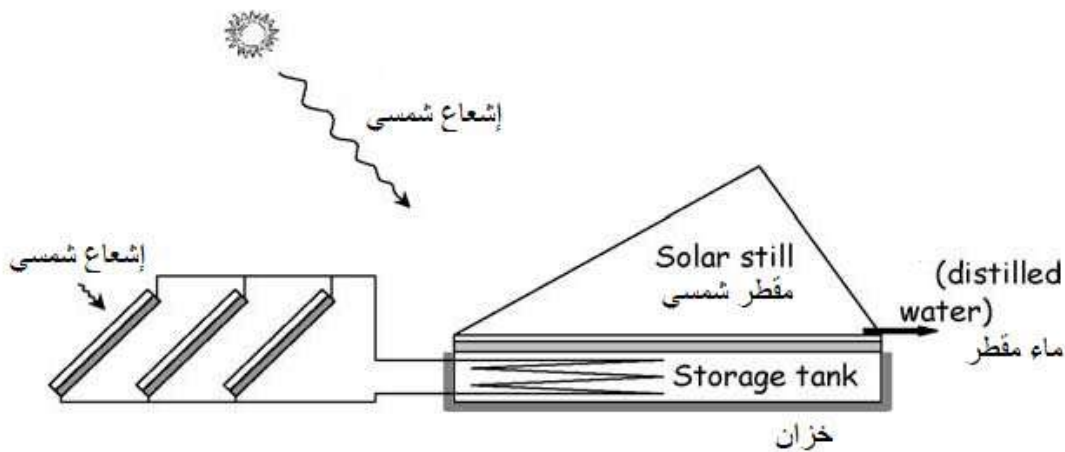
¹ Voropoulos, K, E Mathioulakis, and V Belessiotis. 2001. "Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors." Desalination 138 (1-3):103-110.

(2) تم الحصول على زيادات لا بأس بها في إنتاجية الماء المقطر أثناء النهار وأثناء التشغيل الليلي للنظام، حيث وصلت إلى ثلاثة أضعاف إنتاجية النظام الشمسي غير المهجين.

(3) يؤدي التسخين المستمر لمياه الحوض إلى معدلات إنتاج أعلى في جميع فترات التشغيل نتيجة للاختلافات الكبيرة بين درجات حرارة الماء والغطاء، خاصة في الليل.

درس (Voropoulos et al. 2003)¹ انتقالات الطاقة في المقطر الشمسي المهجين وخلص إلى أن هذه الطريقة يمكن أن تكون طريقة قيمة لتحسين أداء نظام التقطير، حيث استخدم أثناء تصميمها منشآت تقطير لتقييمها من خلال اختبار قصير المدى. وتم إثبات صحة النماذج الرياضية من خلال إدخال البيانات التجريبية على النماذج، والتي من خلالها يتم تحديد قيم المعاملات المميزة لعملية التقطير. وباستخدام القيم المحددة تجريبياً، وجد أن النماذج قادرة على التنبؤ، ويعتبر الناتج النظري للمياه طوال فترة الاختبار دقيق وقريب للإنتاج الحقيقي بدقة متناهية.

درس (Mathioulakis et al. 2003)² إمكانيات استخدام المقطر الشمسي البسيط من خلال دمجها في مصادر متعددة، والاستخدامات المتنوعة للحرارة، ولاحظ أن تصميم هذه الأنظمة يعتمد على مصادر الحرارة المتاحة والاستهلاك المتوقع لاستخدام الماء الساخن. وقد أجرى (Voropoulos et al. 2004)³ دراسة تجريبية لمحطة هجينة لتحلية المياه بالطاقة الشمسية ونظام تسخين المياه. تظهر النتائج أنه يمكن زيادة إنتاج المقطر الشمسي البسيط بشكل كبير إذا اقترن بحقل تجميع الطاقة الشمسية وخزان المياه الساخنة. انخفض إنتاج الماء المقطر تدريجياً، عندما تمت زيادة توفير الطاقة من خلال سحب الماء الساخن. وقد طور (Bacha et al. 2007)⁴ نموذجاً رياضياً لإعطاء القدرة على تقدير الأداء المتوقع للنظام في ظل ظروف مناخية معينة، مما يسمح باختيار حلول لإنشاء تصميم مناسب فيما يتعلق باستخدام الحرارة لأغراض التدفئة وغيرها.



الشكل (2-24): رسم التخطيطي لمقطر شمسي هجين (Mathioulakis and Belessiotis. 2003)

¹ Voropoulos, K, E Mathioulakis, and V Belessiotis. 2003. "Solar stills coupled with solar collectors and storage tank—analytical simulation and experimental validation of energy behavior." *Solar Energy* 75 (3):199-205

² Mathioulakis, E, and V Belessiotis. 2003. "Integration of solar still in a multi-source, multi-use environment." *Solar energy* 75 (5):403-411.

³ Voropoulos, K, E Mathioulakis, and V Belessiotis. 2004. "A hybrid solar desalination and water heating system." *Desalination* 164 (2):189-195.

⁴ Bacha, H Ben, T Dammak, AA Ben Abdallah, AY Maalej, and H Ben Dhia. 2007. "Desalination unit coupled with solar collectors and a storage tank: modelling and simulation." *Desalination* 206 (1-3):341-352.

(4) النوع الثاني: مقطرات تعمل بتطبيق التسخين المسبق (Pre-heated):

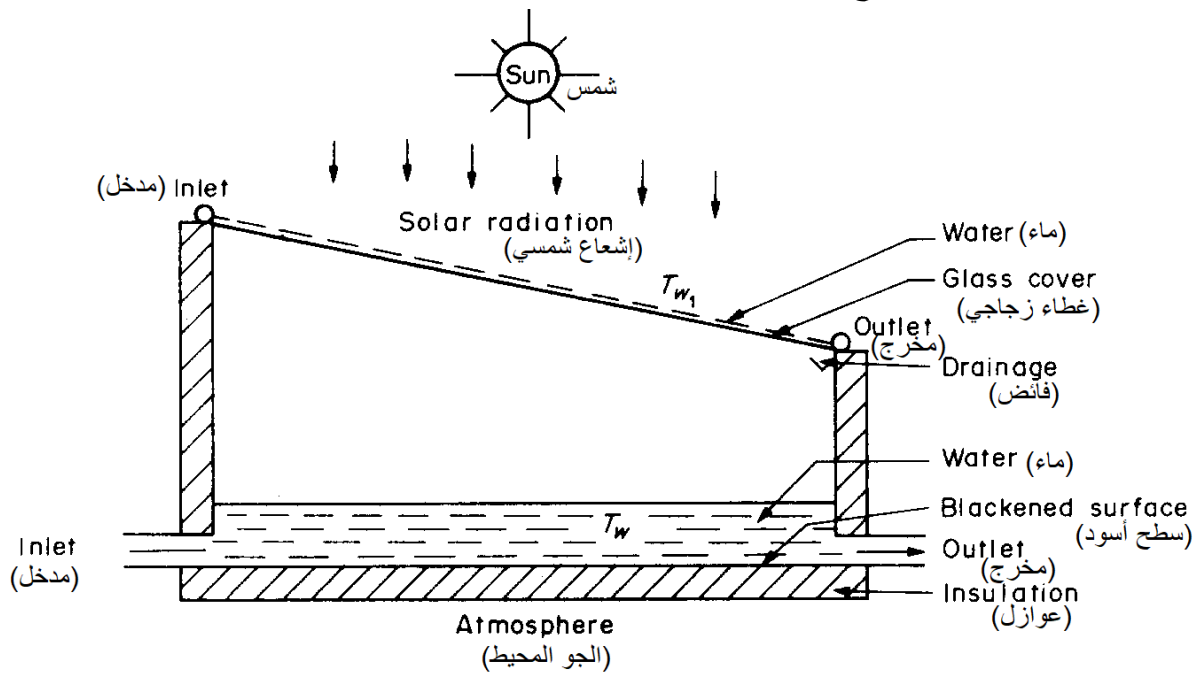
في هذه الطريقة، يتم استخدام الماء المسخن مسبقاً لزيادة درجة حرارة الماء في الحوض. المياه الساخنة الضائعة والمتاحة من مصادر مختلفة مثل الصناعات الورقية والصناعات الكيماوية ومحطات الطاقة الحرارية وصناعات تجهيز الأغذية وغيرها، ويمكن استخدامها لزيادة الإنتاجية. يتم توفير الماء الساخن مباشرة للحوض أو من خلال المبادلات الحرارية. وقد اقترح (Proctor 1973)¹ تقنية استخدام الحرارة الضائعة في التقطير الشمسي ووجد أن الإنتاجية زادت 3.2 مرة مقارنة بالمقطرات العادية. وعرض كذلك (Sodha et al. 1981)² نتائج تجريبية في استخدام المياه الساخنة مسبقاً في التقطير. وهذه التجارب أخضعت لنمطين:

(1) تدفق المياه الساخنة مسبقاً من محطات الطاقة الحرارية يكون بمعدل ثابت.

(2) تغذية المياه الساخنة مسبقاً يتم الحصول عليها من محطات الطاقة الحرارية مرة واحدة في اليوم.

وأظهرت النتائج أن مدة التقطير الشمسي، وعمق المياه في الحوض، ودرجة حرارة الماء الداخل، والإشعاع الشمسي هي العوامل التي تؤثر على أداء المقطر، حيث التغذية بالماء الساخن بمعدلات ثابتة تعطي إنتاجية أعلى بالمقارنة مع الماء الساخن الذي يتم الحصول عليه مرة واحدة فقط في اليوم.

درس (Tiwari et al. 1985)³ تأثير تدفق المياه على الغطاء الزجاجي لحوض تقطير شمسي مع تدفق متقطع من المياه الساخنة مسبقاً للحوض كما هو موضح في الشكل (2-25).



الشكل (2-25): رسم التخطيطي لمقطر يعمل بتطبيق التسخين المسبق مع تدفق الماء فوق الغطاء الزجاجي

(Tiwari et al. 1985)

¹ Rahim, Nabil Hussain A. 1995. "Utilization of a forced condensing technique in a moving film inclined solar desalination still." Desalination 101 (3):255-262. doi: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(95\)00028-Z](https://doi.org/10.1016/0011-9164(95)00028-Z).

² Sodha, MS, Ashvini Kumar, and GN Tiwari. 1981. "Utilization of waste hot water for distillation." Desalination 37 (3):325-342.

³ Tiwari, GN, and HP Garg. 1985. "Effect of water flow over the glass cover of a single basin solar still with an intermittent flow of waste hot water in the basin." Energy Conversion and Management 25 (3):315-322.

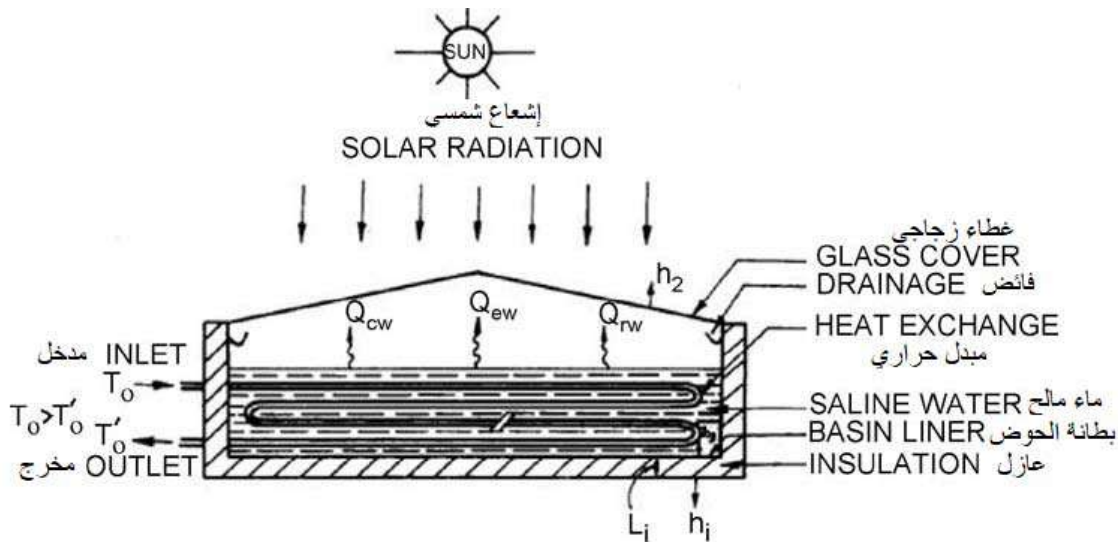
واستنادًا إلى الدراسة التجريبية، أوضح الباحثان النقاط التالية:

- (1) تظل درجة حرارة الماء المتدفق فوق الغطاء الزجاجي أقل من درجة الحرارة المحيطة ودرجة حرارة الغطاء الزجاجي.
 - (2) مع تدفق المياه الساخنة مسبقًا خلال ساعات النهار حيث الشمس غير ساطعة، يمكن أن يكون للمقطر أعلى إنتاج للمياه، وذلك بسبب وجود المياه الساخنة مسبقًا.
 - (3) زيادة الإنتاجية مع زيادة معدل التدفق الكتلي للمياه الداخلة للحوض.
 - (4) زيادة الإنتاجية مع زيادة درجة حرارة المياه الداخلة للحوض.
 - (5) الإنتاجية أفضل بالنسبة لتدفقات المياه الساخنة مسبقًا خلال ساعات الشمس غير الساطعة، من إنتاجية التدفق المستمر للمياه الساخنة وفي درجات حرارة منخفضة عند الدخول. ولكن في حالة ارتفاع درجات حرارة الماء الداخل، يكون التدفق المستمر للمياه أفضل في الإنتاجية.
- ودرس (Ashok Kumar and Tiwari. 1990)¹ استخدام الماء الساخن في التقطير الشمسي مزدوج الميل من خلال مبادل حراري الشكل (2-26). لاحظ الباحثان أن معامل انتقال الحرارة بالتبخير يعتمد كثيرًا على درجة الحرارة، وينصحون باستخدام المياه الساخنة مسبقًا بدرجة حرارة عالية وأثناء ساعات النهار.
- حلل (Yadav 1993a)² أداء المقطرات الشمسية ذات الحوض المزدوج الانحدار في الزجاج المقرونة بمبادل حراري. بناءً على التحليل، لاحظ الباحث النقاط التالية:
- (1) كفاءة مقطر بحوض شمسي مزدوج الميل في الزجاج مقترنًا بمبادل حراري، أكبر بكثير مقارنةً بذلك الذي بدون مبادل حراري.
 - (2) باعتبار كفاءة المقطر بحوض ومزدوج الانحدار مقترن بمبادل حراري تكون كبيرة، فإن هذا المقطر يعتبر بديل للمقطر البسيط، وذلك لسبب بساطة التركيب وخاصة إذا توفرت المياه الساخنة مسبقًا. واقترح (Yadav et al. 1998)³ أن المقطرات الشمسية يجب أن تدمج مع مُجمّع أنبوبي للإشعاع الشمسي لتعزيز الإنتاجية.

¹ Kumar Ashok, Tiwari GN. Use of waste hot water in double slope solar still through heat exchanger. Energy Conversion and Management 1990;30(2):81- 89.

² Yadav, YP. 1993a. "Performance analysis of a solar still coupled to a heat exchanger." Desalination 91 (2):135-144.

³ Yadav, YP, and BP Yadav. 1998. "Transient analytical solution of a solar still integrated with a tubular solar energy collector." Energy conversion and Management 39 (9):927-930.



الشكل (2-26): رسم التخطيطي لمقطر يعمل بتطبيق التسخين المسبق (Ashok Kumar and Tiwari. 1990)

(5) النوع الثالث: مقطرات تعمل بالإنتاج الليلي (Nocturnal):

الإنتاج الليلي هو عملية يقوم بها المقطر الشمسي في غياب ضوء الشمس. ويمكن تحقيق ذلك إما عن طريق استخدام الطاقة الشمسية المخزنة خلال النهار ليعمل بها في الليل أو توفير الحرارة الضائعة من مصادر مختلفة. يتم تسخين الماء خلال ساعات سطوع الشمس ويتم تخزين معظم الطاقة الحرارية المكتسبة بواسطة كتلة الماء. ثم يتم استخدام هذه الطاقة المخزنة في الغالب أثناء ساعات سطوع أقل أو غياب تام للإشعاع شمسي، وتعرف بالتقطير الليلي، وكما سبق ذكره يمكن تحقيق ذلك أيضاً عن طريق تغذية بالماء الساخن المتاح من خلال أي مصدر خارجي (بخلاف الطاقة الشمسية) في الصباح أو المساء لزيادة الإنتاج (Tiwari et al. 2008) ¹.

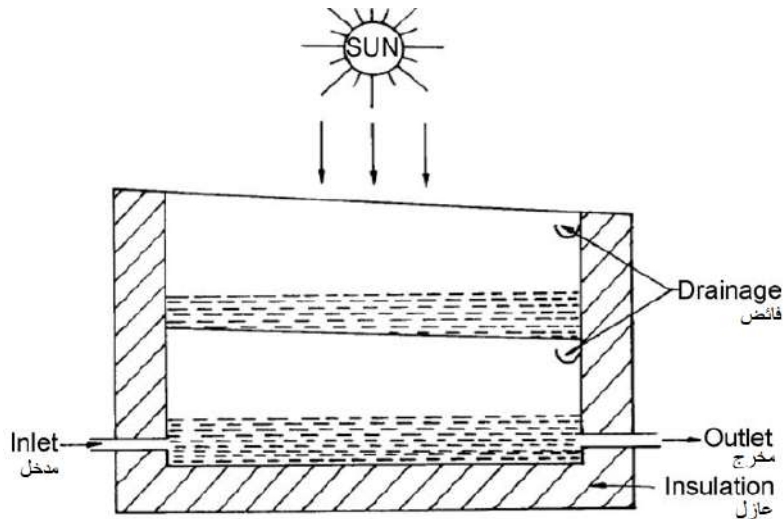
أجرى (Tiwari 1985) ² تجارب على مقطر شمسي يشبه للمقطر الموضح في الشكل (2-27) مع تدفق متقطع للمياه الساخنة في حوض أثناء ساعات النهار. لاحظ الباحث ما يلي:

- (1) أن الناتج يزداد مع زيادة درجة حرارة الماء الداخل ويظل كما هو في حالة انعدام التدفق.
 - (2) في حالة التدفق المستمر والثابت للمياه خلال ساعات الشمس الساطعة، يمكن أن يكون هناك إنتاج أعلى.
- كما قدم (Gupta et al. 1988) ³ من جهة أخرى تقريراً فيه تحليل عن تأثير التدفق المتقطع للمياه الساخنة إلى الحوض السفلي بمعدل ثابت خلال ساعات النهار، وقد حقق التركيب الموضح في الشكل (2-25).

¹ Tiwari, GN, and Anil Kumar Tiwari. 2008. Solar distillation practice for water desalination systems: Anshan Pub.

² Tiwari, GN. 1985. "Performance of solar still with intermittent flow of waste hot water in the basin." Desalination 52 (3):345-357.

³ Gupta, RA, SN Rai, and GN Tiwari. 1988. "Transient analysis of double basin solar still with intermittent flow of waste hot water in night." Energy conversion and management 28 (3):245-249.



الشكل (2-27): حوض تقطير مزدوج مع تدفق مياه تسخين ثابتة (Gupta et al)

وتظهر النتائج ما يلي:

- (1) في البداية تكون درجة حرارة الأغشية الزجاجية أكبر من درجة حرارة الماء في الحوضين السفلي والعلوي. وسرعان ما ينعكس الوضع بعد يومين. ثم يتم الوصول إلى حالة شبه مستقرة في حوالي 5 أيام ويصبح التبخر كبيراً.
- (2) يزداد الإنتاج مع زيادة درجة حرارة الماء الساخن في المدخل، بينما تظل العوامل الأخرى ثابتة.
- (3) الإنتاجية اليومية تزداد مع معدل تدفق المياه الساخنة، بشرط أن تكون درجة حرارة الماء الساخن الداخل أكبر من قيمتها الحرجة التي تبدأ عندها نسبة الزيادة في الإنتاج.
- (4) إذا كانت درجات حرارة الماء الساخن الداخل أقل من القيمة الحرجة، فإن إنتاجية الماء تنخفض مع زيادة معدل تدفق المياه. لذلك، اقترحوا استخدام مُعَدِّل للتدفق في الأعلى، ويسمح بالتدفق فقط عندما تكون درجة الحرارة أعلى من القيمة الحرجة.

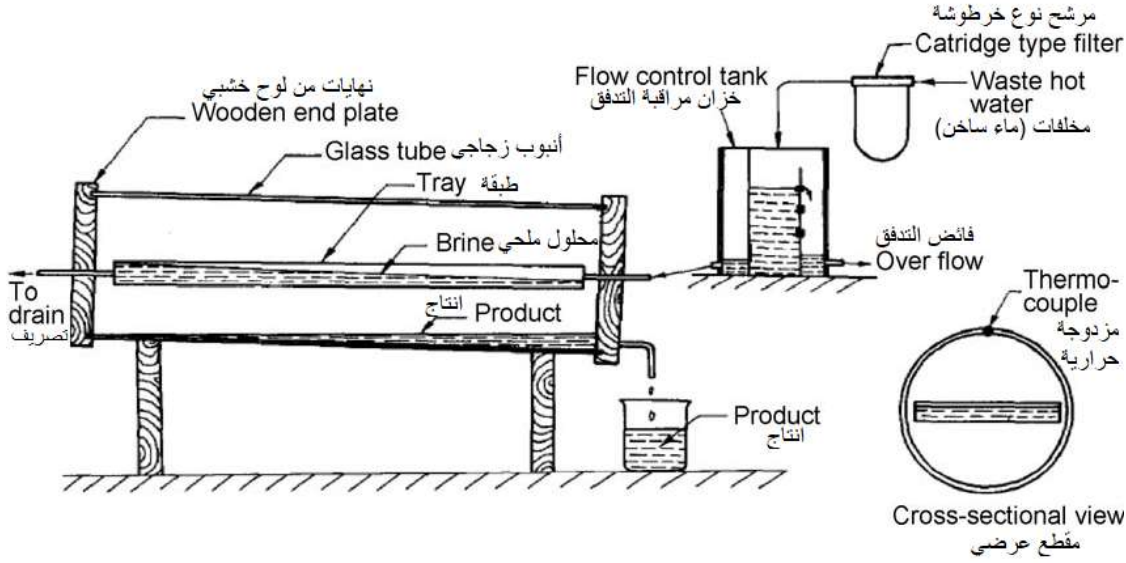
الأبحاث التي أجراها (Onyegegbu 1986)¹ تمت دراسة الإنتاج الليلي للمقطرات من نوع الحوض تجريبياً لعمق 0.178 متر و 0.076 متر، وأشارت النتائج إلى أن التقطير الليلي، في المتوسط، يمثل 78٪ من إجمالي الإنتاج اليومي من عمق 0.178 متراً بينما يمثل حوالي 50٪ من إجمالي الإنتاج اليومي للعمق البالغ 0.076 متر.

درس (Tiwari et al. 1988)² تجريبياً التصميم الأنبوبي للمقطر الشمسي الذي اقترحه سابقاً كل من (Tleimat and Howe). المقطر يتألف من علبة معدنية سوداء (black metallic tray) مستطيلة الشكل أبعادها كما يلي:

(0.1 م × 1.1 م × 0.0127 م) موضوعة على المستوى القطري لأنبوب زجاجي أسطواني كما هو موضح في الشكل (2-28).

¹ Onyegegbu, SO. 1986. "Nocturnal distillation in basin-type solar stills." Applied energy 24 (1):29-42.

² Tiwari, GN, and Ashok Kumar. 1988. "Nocturnal water production by tubular solar stills using waste heat to preheat brine." Desalination 69 (3):309-318.



الشكل (2-28): رسم التخطيطي لمقطر شمسي أنبوبي مزود بعلبة معدنية سوداء (Tiwari and Ashok Kumar)

- طول وقطر الأنبوب الزجاجي أكبر بقليل من طول وعرض العلب المعدنية. أثناء التشغيل، يتم غلق نهايات الأنبوب الزجاجي برؤوس خشبية مغلقة (gasketed wooden heads). تم تثبيت الدرج والأنبوب الزجاجي بإمالة طفيفة بالنسبة للمستوى الأفقي ولكن في الاتجاه المعاكس لحركة الماء. يتبخر الماء المالح الذي يتم تغذيته من أحد الأطراف جزئياً، ويتم تفريغ الجزء المتبقي من خلال الطرف الآخر للأنبوب. ويتدفق الماء المتكثف على الجدران الداخلية للغطاء الزجاجي إلى أسفل ويتم إزالته من أحد الأطراف في أسفل الأنبوب الزجاجي. بناءً على الدراسة، وجد الباحثان أن:
- (1) متوسط درجة حرارة الماء المالح مستقلة عن معدل التدفق، بينما تعتمد درجة حرارة المخرج على طول المقطر.
 - (2) الناتج اليومي من التقطير أعلى من الناتج الخاص بالمقطر الشمسي العادي لنفس الشروط المناخية.
 - (3) يظل المعامل الكلي لا تتقال الحرارة الداخلي ثابتاً بالنسبة لتغيرات درجة حرارة الماء المالح على عكس المقطر الشمسي العادي.
 - (4) نقاوة الماء في المقطر الأنبوبي أحسن من المقطر العادي، ويمكن استخدامه في المختبرات الكيميائية، إلخ.

(6) النوع الرابع: تقطير بتبريد المكثف بدرجات حرارة منخفضة (Low temperature):

كل الأنواع السابقة من المقطرات كانت تعتمد على رفع درجة الحرارة لزيادة التبخير، أما المقطرات التي تندرج تحت هذا النوع فتعتمد على خفض درجة حرارة المكثف لزيادة عملية التكثيف. حيث أن حرارة التكثيف ترفع درجة حرارة الزجاج بدرجة كبيرة. ونتيجة لذلك، فإن العائد خلال فترة الشمس الأقصى للشمس أقل بكثير مما هو متوقع. من بين منحني الشمس الشمسي ومنحنى العائد المستمر، هناك تأخر زمني محدد يمكن أن يُعزى إلى ارتفاع درجات حرارة الزجاج. لمدة ساعة واحدة بعد الشروع في ذروة الشمس، على الرغم من إنتاج أبخرة مشبعة داخل جهاز التقطير في هذه الذروة، لا يحدث التكثيف لأن درجة حرارة الزجاج أعلى بكثير من درجة حرارة التكثيف لبخار الهواء.

6-1) تصنيف المقطرات حسب نوعية المكثف:

قدم الباحثون العديد من الجهود لعمل تصميمات مختلفة من المقطرات الشمسية لتحسين أدائها. ولقد استنتجوا أن المدمجة منها مع مكثف إضافي هي أكثر فعالية. يمكن تقسيم المكثفات إلى ثلاثة أنواع أساسية؛ المكثفات المدمجة والمكثفات الخارجية والمكثفات الداخلية. فمثلا المدمجة تمت دراسة 15 نموذج والخارجية 16 نموذج، أما الداخلية فالنماذج المدروسة قليلة وهي 06 نماذج، وفي العموم تكون الدراسة على أساس الموقع، والعائد اليومي من الماء، ونسبة التحسين (زيادة الإنتاجية بالنسبة للمقطر الشمسي العادي)، والكفاءة والملاحظات في التجربة. ويمكن تصنيف المقطرات حسب ما سبق كما يلي إلى ثلاث حسب ما قدمه الباحث (Kabeel et al. 2016):¹

- (1) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات مدمجة (Built-in condensers).
- (2) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات داخلية (External condensers).
- (3) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات خارجية (Internal condensers).

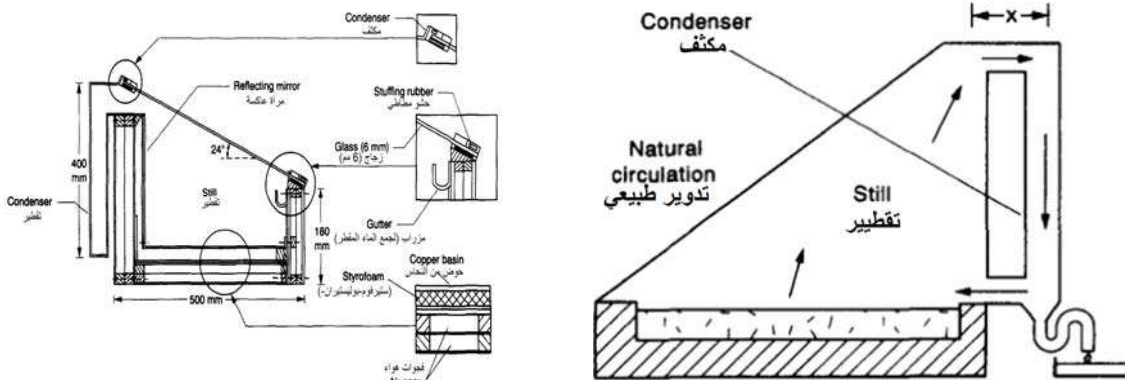
6-1-1) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات مدمجة (Built-in condensers).

جميع المقطرات المندرجة تحت نوع المقطرات التي تعمل بمكثفات مدمجة، نجد بها المكثف مرتبط بالمقطر، وهي مرتبة حسب التسلسل الزمني لباحثين قاموا بتطويرها.

أولا: نموذج مكثف مدمج للباحث (Fath and ELsherbiny) سنة 1993

قام (Fath et al. 1993)² بتحليل لتأثير مكثف مدمج على أداء التقطير الشمسي أحادي الميل. يوضح الشكل (2-29) المكثف المقترح، والموضوع في المنطقة المظللة في الجهة الجنوبية. يرجع انتقال بخار الماء من المقطر إلى المكثف إلى واحد أو أكثر من العوامل التالية: (1) الانتشار، (2) نسبة الترقية، (3) الدوران الطبيعي. بالمقارنة مع مقطر بدون مكثف، تمت زيادة الناتج إلى ما يقرب من 70٪ عند استخدام مكثف في وضع الدوران الطبيعي.

حيث عرف نسبة الترقية بالكسر التالي: [حجم الماء المقطر \ (حجم الماء المقطر + الحجم الماء المالح)].



الشكل (2-29): تخطيط لوحدة تقطير أحادية الميل بمكثف مدمج من اقتراح

(Fath and ELsherbiny. 1993)

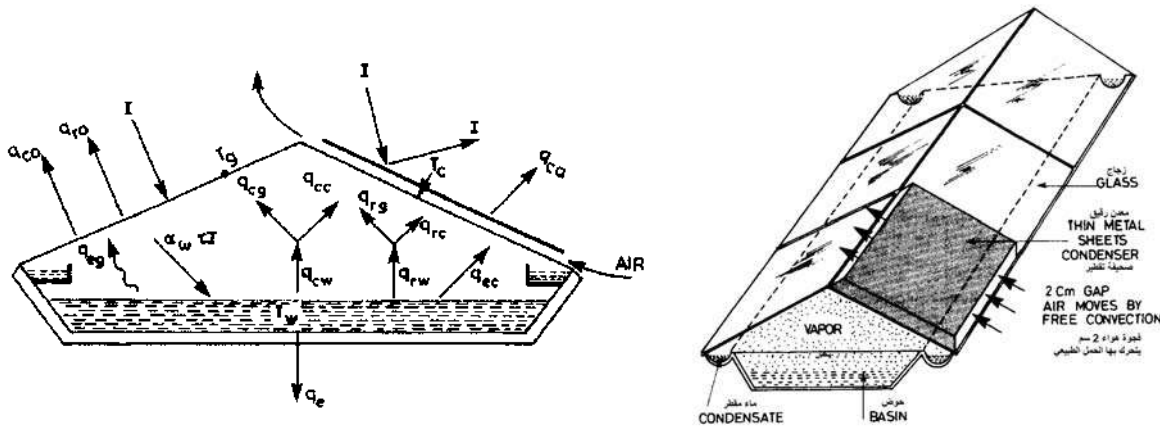
¹ Kabeel, AE, ZM Omara, FA Essa, and AS Abdullah. 2016. "Solar still with condenser—A detailed review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (C):839-857.

² Fath, Hassan ES, and Samy M Elsherbiny. 1993. "Effect of adding a passive condenser on solar still performance." Energy Conversion and Management 34 (1):63-72.

ولوحظ من النتائج أن تحريك جزء من البخار إلى المكثف المدمج يقلل من الضغط داخل المبخر وتكوين قطرات الماء على سطح الزجاج الداخلي، لكن هذا يؤدي لانخفاض انعكاس وامتصاص الإشعاع الشمسي، وبالتالي يتم عزل الإشعاع وامتصاصه من طرف الماء، ويتم أيضاً خفض درجة حرارة الزجاج وتحسين التبخر. وتقليل ميل الغطاء الزجاجي أدى إلى استقبال الوحدة لكمية أكبر من الإشعاع الشمسي في وقت أقل؛ كما تم تحسين درجة حرارة الماء ومعدل التبخر.

ثانياً: نموذج مكثف مدمج للباحث (Fatani and Zaki) سنة 1995

في الدراسة التي قام بها (Fatani et al. 1995)¹ تم تحسين إنتاج المقطرات ذات الأعماق الملحية التي تصل إلى 5سم، وساعدت زيادة مساحة التكتيف في تحفيز عملية التبخر، وبالتالي تحسين الإنتاجية. تم قياس إنتاج المقطر المدمج مع لوح تكتيف مبرد بالهواء مصنوع من صفائح الألمنيوم بفجوات لها بعد 2سم. أظهرت القياسات فرقاً ملحوظاً بين درجات حرارة الغطاء الزجاجي ولوحة التكتيف.

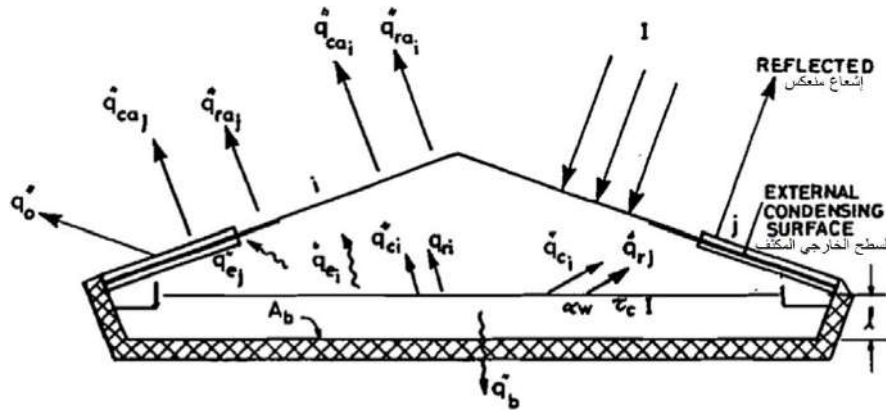


الشكل (2-30): تخطيط لوحدة تكتيف بسقف ثابت من اقتراح (Fatani et al. 1994)²

قام (Fatani and Zaki. 1995) بربط الجهاز بمكثف مدمج لتحسين الانتاج وقاموا بفحص النظام تحليلياً نظرياً. والشكل (2-31) يوضح الانتقالات الحرارية في الجهاز. والتحليل درس المكثفات من حيث نوع تصنيعها والمقادير المرتبطة بها ولم يقتصر على سمات المكثف الخاصة فقط. واستند التحليل كذلك إلى بيانات الأرصاد الجوية الفعلية. وأظهرت النتائج أن تحسين الانتاج يعتمد على كل من المحلول الملحي ومساحة السطح المخصصة للتبريد المكثف. ويتم تحسين الإنتاجية لمستويات المحلول الملحي حتى 10سم. بينما فوق هذا المستوى، لا يؤدي انتقال الحرارة الإضافية من الجهاز إلى تحسين الإنتاجية اليومية بشكل كبير. كان الانتاج اليومي حوالي 3.8 لتر/م² عند عمق الماء 0.3سم ونسبة المكثف إلى مساحة الحوض تساوي 0.4.

¹ Fatani, AA, and GM Zaki. 1995. "Analysis of roof type solar stills with assisting external condensers." International journal of solar energy 17 (1):27-39.

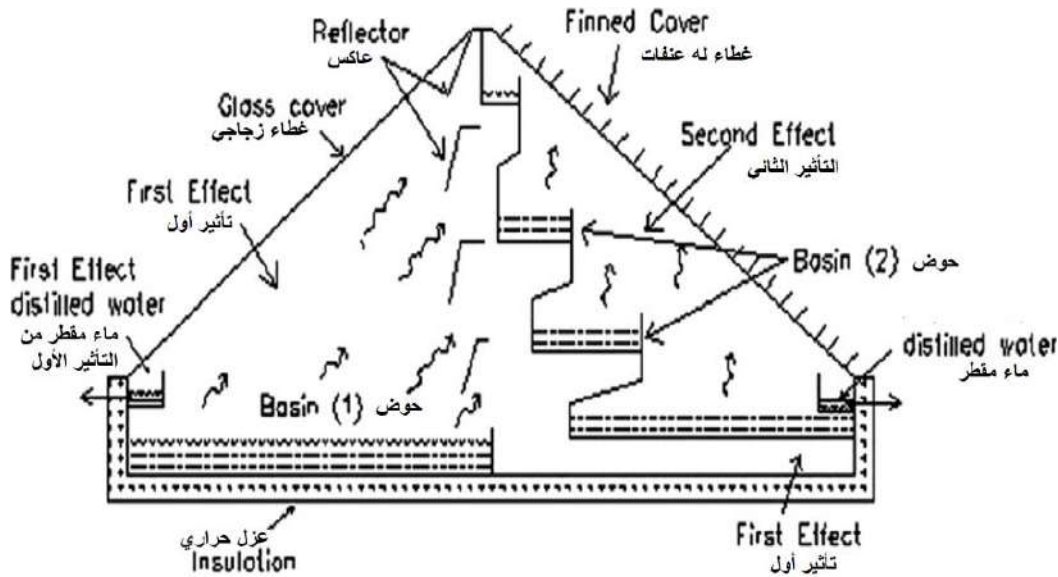
² Fatani, AA, GM Zaki, and A Al-Turki. 1994. "Improving the yield of simple basin solar stills as assisted by passively cooled condensers." Renewable energy 4 (4):377-386.



الشكل (2-31): تخطيط لوحدة تكثيف بسقف ثابت مع الانتقالات الحرارية من اقتراح (Fatani and Zaki. 1995)

ثالثاً: نموذج مكثف مدمج للباحث (Fath Hassane E.S) سنة 1996

في جهاز تقطير بسيط بدون تحسينات، يكون السطح الداخلي للغطاء الزجاجي متاحاً فقط للتكثيف، ويكون فرق درجة الحرارة بين الداخل والخارج صغيراً جداً، وبالتالي، يكون معدل التكثيف أقل. هذه الوضعية تجعل المقطر غير كفء. يمكن زيادة معدلات التكثيف من خلال توفير مساحة إضافية للتكثيف. وهذا يسبب زيادة في قيم الحرارة بالتبخير. استنتج (Fath 1996)¹ أداء وحدة تقطير شمسي ذات تأثيرين (الأول جنوبي و الثاني شمالي). في دراسته، تم السماح للبخار من الجهة الأولى (الجنوبية) بتسخين الجهة الثانية (الشمالية) كما في الشكل (2-32). يحتوي غطاء التأثير الثاني على سطح خارجي مزود بزعانف للحفاظ على الغطاء عند درجة حرارة المحيط أو بالقرب منها. لوحظ أن الإنتاجية اليومية 10.7 كغ/م² للوحدة تحت الظروف المناخية لمدينة الظهران بالمملكة العربية السعودية.



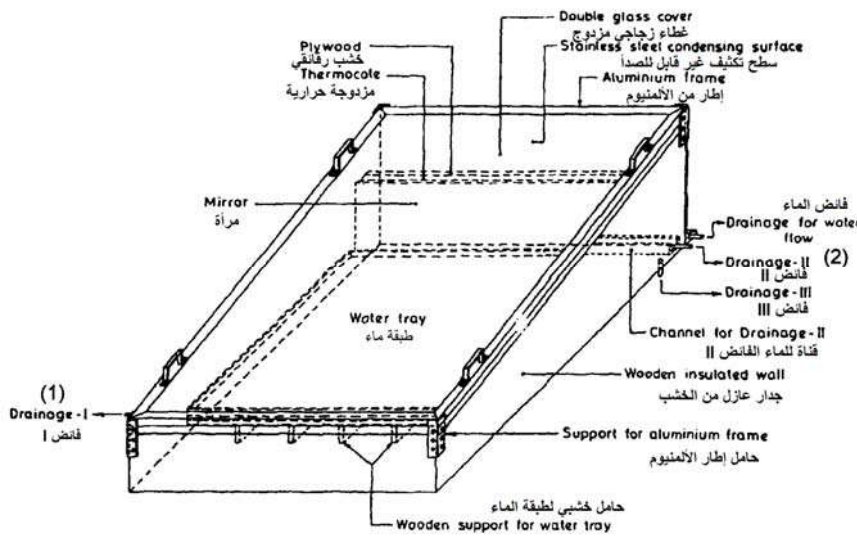
الشكل (2-32): تخطيط لوحدة تقطير شمسي ذات تأثيرين من اقتراح

(Fath Hassane E.S. 1996)

¹ Fath, Hassan ES. 1996. "High performance of a simple design, two effect solar distillation unit." Desalination 107 (3):223-233.

رابعاً: نموذج مكثف مدمج للباحث (Tiwari) سنة 1997

تم تصميم مقطر شمسي بغرفة تكثيف مزدوجة (Double-condensing chamber solar still-DCS) واختباره بواسطة (Tiwari et al. 1997)¹، ويظهر الرسم التخطيطي لهذه الدراسة في الشكل (2-33). في هذا التصميم، يتشكل البخار في الغرفة الأولى بعد تسخين الماء بواسطة الإشعاع الشمسي. بعد ذلك، يدخل البخار إلى الغرفة الثانية من خلال فتحة تهوية يتم توفيرها في الجزء العلوي من الجدار الفاصل للمقطر الشمسي كما هو موضح في الشكل. يتكثف البخار المنقول على سطح التكثيف المعدني في الخلف على الجهة الشمالية. يتكثف البخار أيضاً على السطح الداخلي للغطاء الزجاجي المزدوج. تمت مقارنة الانتاج اليومي من (DCS) والمقطر الشمسي التقليدي. ولوحظ أنه كان هناك تحسن كبير في الإنتاج اليومي بسبب فرق ضغط البخار الأقصى بين غرفتي التكثيف في يوم صافٍ.



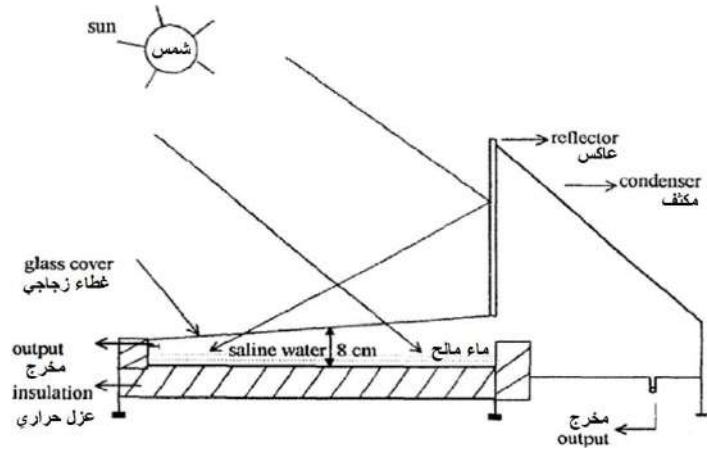
الشكل (2-33): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بغرفة تكثيف مزدوجة من اقتراح (Tiwari et al. 1997)

خامساً: نموذج مكثف مدمج للباحث (El Bahi and Inan) سنة 1999

تم فحص تأثير دمج مقطر به حوض أحادي بميل أحادي (4 درجات) مع مكثف على أداءه بشكل تجريبي بواسطة (El-Bahi et al. 1999)²، والشكل (2-34) يوضح مخططاً لهذا النظام. المقطرات أنتجت كميات يومياً تصل إلى 7 لتر/م² وكفاءة تبلغ 75٪ خلال أشهر الصيف. وأوضحت الدراسة أن وحدة التقطير الشمسية المعدلة من نوع الحوض مناسبة لمنزل واحد لتزويده بالمياه العذبة المقطرة من البحر أو المياه المالحة. وأن هذا المقطرات المقترحة سهلة الانشاء من مواد محلية ولا تتطلب تشغيلاً أو صيانة معقدة.

¹ Tiwari, GN, A Kupfermann, and Shruti Aggarwal. 1997. "A new design for a double-condensing chamber solar still." Desalination 114 (2):153-164.

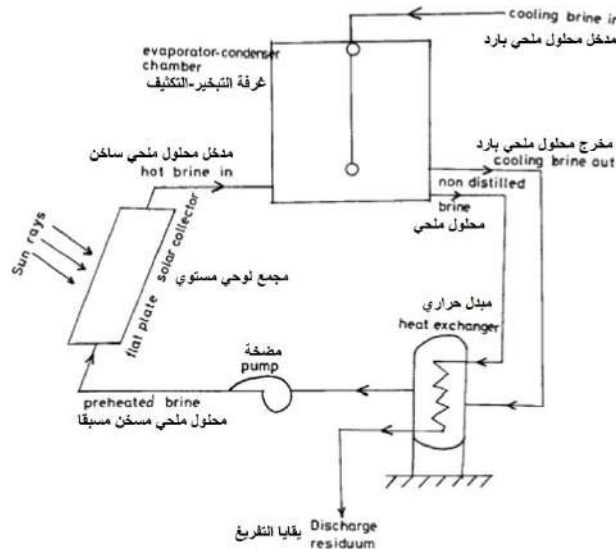
² El-Bahi, A, and D Inan. 1999. "A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser." Desalination 123 (1):79-83.



الشكل (2-34): مقطر بحوض مزود بمكثف مدمج من اقتراح (El Bahi and Inan, 1999)

سادسا: نموذج مكثف مدمج للباحث (Rene) سنة 1999

تم توقع عمليات انتقال الحرارة والكتلة في مقطر شمسي بواسطة (Tchinda et al. 2000)¹، والشكل (2-35) يبين هذا المقطر مصنوع من طبقة مستوية مسخنة مقرونا بمكثف ومبخر. ووجدوا أن معدل انتقال الكتلة الخاصة بالتكثيف يزداد عندما يصبح المبادل الحراري أكثر برودة.



الشكل (2-35): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح (Rene et al. 2000)

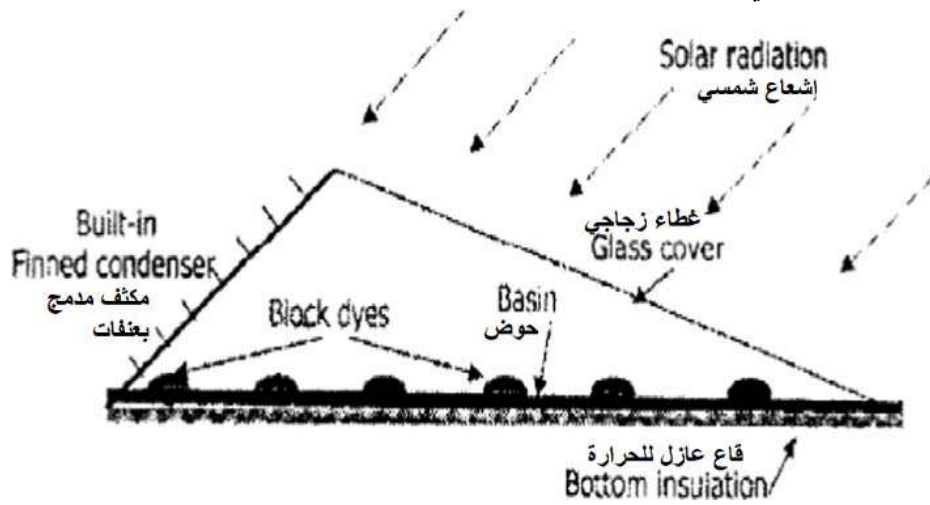
سابعا: نموذج مكثف مدمج للباحث (Fath and Hosny) سنة 2002

درس نظريا (Fath et al. 2002)² أداء حوض أحادي المنحدر مع وجود مكثف إضافي مدمج فيه من الجهة الجنوبية على شكل زعانف (Built-in finned condenser)، التركيب مبين في الشكل (2-36). ووضعت هذه الزعانف موازية

¹ Tchinda, René, Ernest Kaptoum, and Donatien Njomo. 2000. "Heat and mass transfer processes in a solar still with an indirect evaporator-condenser." Energy conversion and management 41 (1):93-107.

² Fath, Hassan E. S., and H. M. Hosny. 2002. "Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser." Desalination 142 (1):19-27. doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00422-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00422-2).

لأشعة الشمس وقت الظهيرة، وأغلب الوقت تكون في المنطقة المظللة. ويمكن زيادة السعة الحرارية لزعانف المكثف والمساحة السطحية لامتناس أكبر مقدار من الحرارة. يتم تعزيز التبخر عن طريق إضافة زوائد مصبوعة بالأسود في الحوض لزيادة امتصاص الإشعاع الشمسي وزيادة مساحة سطح التبخر. تم التوصل لأكثر العوامل تأثيراً في عملية التقطير وهو شدة الإشعاع الشمسي، والعزل الحراري منه عزل القاعدة، والسعة الحرارية لمادة الحوض، ومساحة سطح التبخر، والتأثير الداخلي للمكثف. وتم التوصل لتأثير أقل لعوامل أخرى مثل مادة المكثف، وكتلته، والانبعاث الخارجي، ومساحة السطح، وزاوية الغطاء، وسرعة الرياح. ومن جهة أخرى تم دراسة تأثير التبريد الفوري المتكرر للغطاء الزجاجي (مرة واحدة كل ساعة) كمعامل تشغيل إضافي ووجد أن له تأثير ضعيل. تم الجمع بين العوامل ذات التأثير الأكبر معاً ووجد أنها تنتج عائداً يبلغ حوالي 55% على حالة مقطر شمسي بدون تحسين.

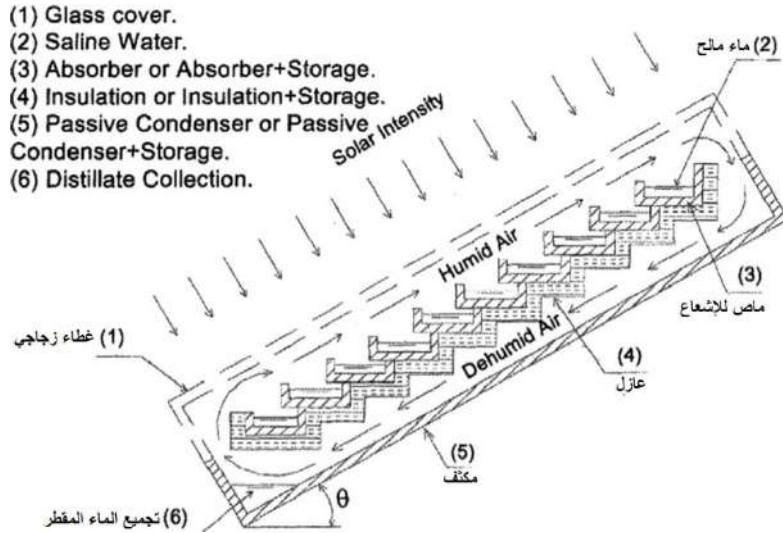


الشكل (2-36): مقطر بحوض مزود بمكثف مدمج ومساحة تبخر إضافية (Fath and Hosny. 2002)

ثامنا: نموذج مكثف مدمج للباحث (Hassan) سنة 2004

أجرى (Fath et al. 2004)¹ دراسة عددية لاستقصاء الأداء الحراري العابر لمقطر شمسي مزود بألية مزدوجة (مرطبة/مزيلة للرطوبة) (humidifying/dehumidifying) والتي تستعمل الدوران الطبيعي من المبخر لمكثف داخلي، كما في الشكل (2-37). وأظهرت النتائج استمرار الإنتاجية إلى حوالي 5.1 كغ/م² في اليوم. بالإضافة إلى بساطته، يعتبر الدوران الطبيعي أكثر اقتصاداً وأقل تعقيداً من الناحية الفنية من الدوران القسري.

¹ Hassan ESF, Samy E, Ahmad G. A naturally circulated humidifying /dehumidifying solar still with a built-in passive condenser. Desalination 2004;169:129-49.

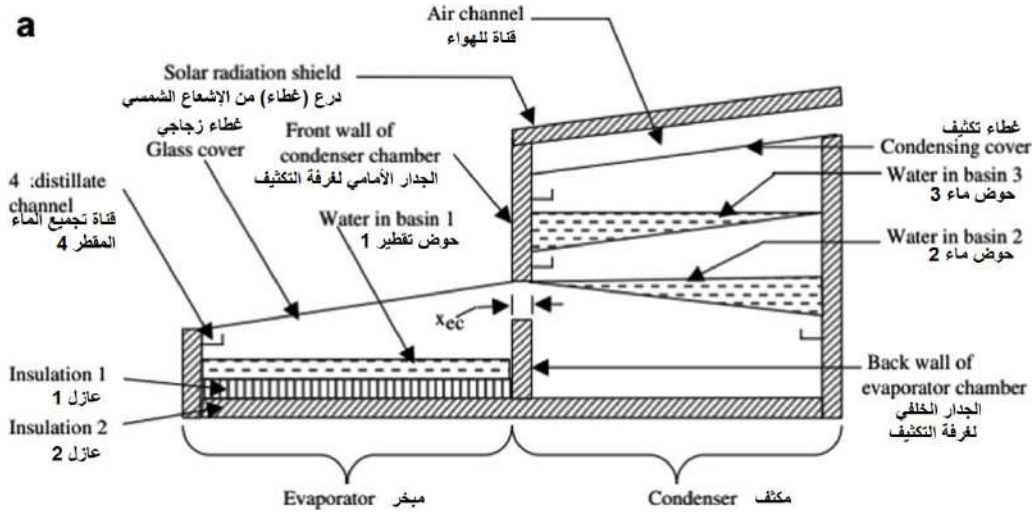


الشكل (2-37): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح (Hassan et al. 2004)

تاسعا: نموذج مكثف مدمج أول للباحث (Madhlopa and Johnstone) سنة 2009

تم بواسطة (Madhlopa et al. 2009)¹ تصميم نموذج لمقطر شمسي مع مكثف مدمج وتم تقييم أدائه ، ويظهر الرسم التخطيطي لهذا التركيب في الشكل (2-38). يحتوي النظام على حوض أول (حوض 1) في غرفة التبخر وحوضين آخرين (2 و 3) في غرفة المكثف. وضع غطاء زجاجي فوق حوض المبخر (حوض 1) وغطاء تكثيف معتم فوق الحوض 3. الجزء العلوي من غطاء التكثيف محمي من الإشعاع الشمسي للحفاظ على الغطاء بارداً نسبياً. يتكثف بخار الماء الناتج من تأثير المبخر الأول تحت الغطاء الزجاجي بينما يتدفق الباقي إلى المكثف، بسبب الانتشار، وبعد ذلك يتم تكثيفه تحت بطانة الحوض 2، وهكذا ينتقل جزء من الحرارة لبطانة الحوض 3 بعد تكثف البخار عليه. وقد تم تقييم أداء النظام ومقارنته بأداء المقطر التقليدي تحت نفس الظروف المناخية، وأشارت النتائج إلى أن نواتج التقطير أعلى بنسبة 62٪ من إنتاجية النوع التقليدي. ساهمت تأثيرات التبخير الأولى والثانية والثالثة بنسبة 60٪ و22٪ و18٪ من إجمالي ناتج التقطير على التوالي. وأكد أن سرعة الرياح لها تأثير ضعيف على نواتج التقطير.

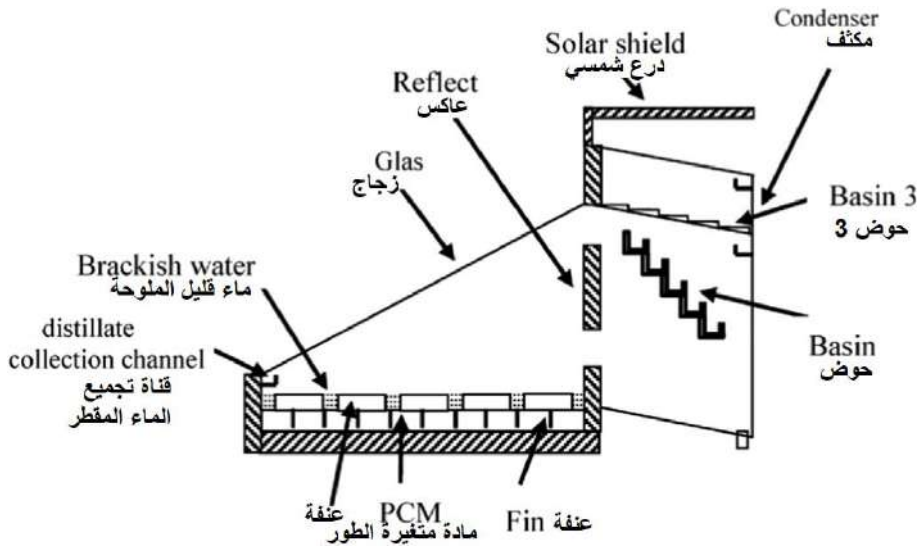
¹ Madhlopa A, Johnstone C. Numerical study of a passive solar still with separate condenser. Renew. Energy 2009;34:1668–1677.



الشكل (2-38): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح (Madhlopa and Johnstone. 2009)

عاشرا: نموذج مكثف مدمج ثان للباحث (Madhlopa and Johnstone) سنة 2009

بواسطة (Al-Hamadani et al. 2013)¹ تم تحسين أداء جهاز التقطير الشمسي ذو ميل واحد، والتركيب موضح في الشكل (2-39)، وقد تم استخدام حوض لامتناص الاشعاع به عنفات (Block shaped fins)، وتحتها قطع من مادة متغيرة الطور (Phase change material-PCM). التأثيرات الناتجة من كتلة الماء (10 و 20 و 30 كغ) وكتلة PCM (10 و 20 و 30 كغ) تم تجربتها على إجمالي إنتاجية المقطرات. وأشارت النتائج إلى أن تكتيف المقطر الشمسي قد زاد باستخدام مكثف ثانٍ على الجانب المظلل جهة الشمال. حيث تم حجب المكثف الثانوي ليبقى سطحه بارداً. بالإضافة إلى ذلك، فإن الإنتاجية اليومية للمقطرات المعدلة (5.71 كغ/م²) أعلى قليلاً من الإنتاجية العادية (4.295 كغ/م²) في جميع الأيام. وبالتالي، يفضل التقطير في الأيام المشمسة.

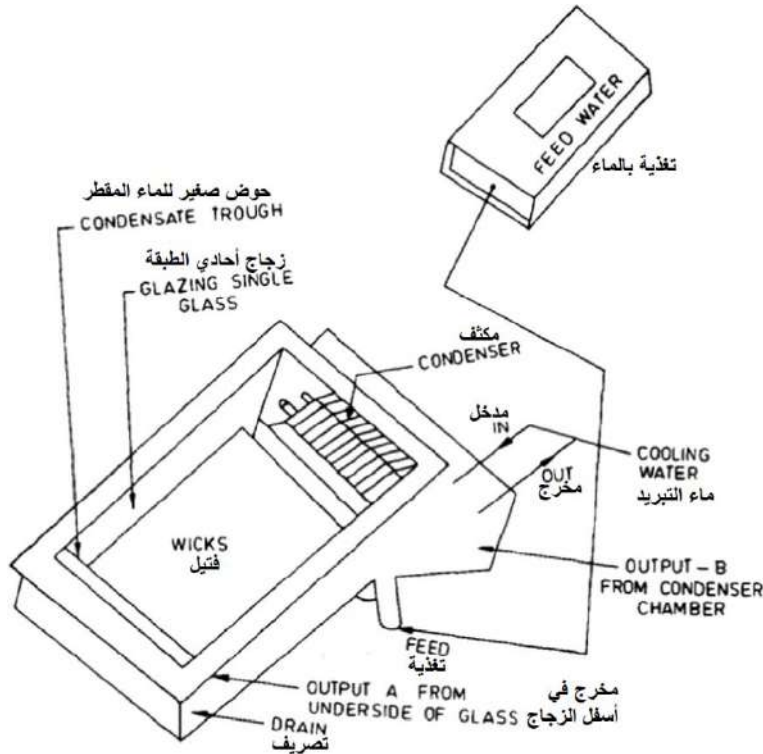


الشكل (2-39): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح (Madhlopa and Johnstone. 2009)

¹ Al-Hamadani, Ali AF, and SK Shukla. 2013. "Performance of single slope solar still with solar protected condenser." Distributed Generation & Alternative Energy Journal 28 (2):6-28.

حادي عشر: نموذج مكثف مدمج للباحث (Reddy) سنة 2009

في المقطر الشمسي التقليدي، الماء يتكثف تحت الغطاء الزجاجي، ومنه ترتفع درجة حرارته. خاصة خلال فترة الإشعاع الشمسي القصوى، تكون درجة حرارة الزجاج أعلى من نقطة الندى لخليط الهواء والبخار داخل خلية التقطير. وبالتالي، فإن نواتج هذه الأنواع من المقطرات منخفضة. ومن ثم درس (Reddy et al. 1983)¹ ومن معه بشكل تجريبي أداء مقطر مع مكثف مدمج، كما في الشكل (2-40) لقد أبقوا درجة حرارة الزجاج منخفضة. وكان الإنتاج أعلى من المقطر بدون مكثف.



الشكل (2-40): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح (Reddy et al. 2009)

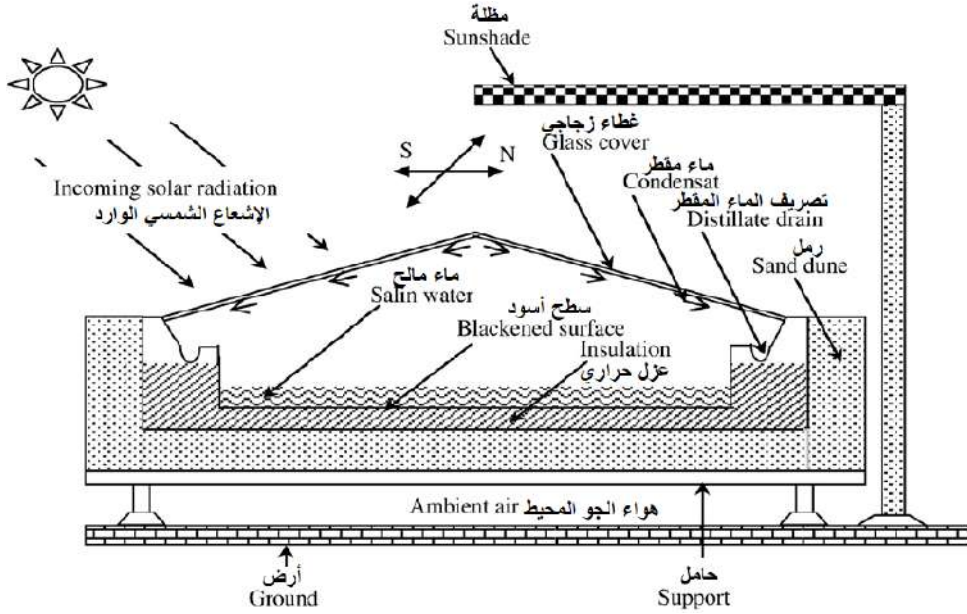
ثاني عشر: نموذج مكثف مدمج للباحث (Bechki) سنة 2010

تم إنشاء مقطر شمسي ذو حوض مزدوج الميل بجامعة ورقلة بالجزائر من طرف الباحث (Bechki et al. 2010)²، ووضعه في اتجاه مواجه للجنوب والشمال لتلقي أقصى قدر من الإشعاع الشمسي. بدأت جميع التجارب في الساعة 8:00 صباحًا وانتهت الساعة 7:00 مساءً حسب الوقت المحلي. بدأ الإجراء التجريبي بتنظيف الأتربة من الأغشية الزجاجية الخارجية للجهاز. وتم توصيل خزان التغذية المحتوي على المياه قليلة الملوحة المحلية بتركيز حوالي 3 غ/لتر بقناة في قاع المقطر. وأثناء العمليات، تم إجراء قياسات شدة الإشعاع الشمسي ودرجات حرارة الأسطح الداخلية للأغشية الزجاجية الشمالية والجنوبية والمياه في الحوض بانتظام. كما تم رصد درجة الحرارة المحيطة وسرعة الرياح. وتم جمع المياه

¹ Reddy, MS, DJ Navin Chandra, HK Sehgal, SP Sabberwal, Ashok Kumar Bhargava, and DS Jither Chandra. 1983. "Performance of a multiple-wick solar still with condenser." Applied Energy 13 (1):15-21.

² Bechki, D., H. Bouguettaia, J. Blanco-Galvez, S. Babay, B. Boucekima, S. Boughali, and H. Mahcene. 2010. "Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria." Desalination 260 (1):65-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.066>.

المنتجة من المكثفات الزجاجية الشمالي والجنوبي من الغطاء في قنوات منفصلة. حيث أن المكثف الشمالي مغطى لتبريده والجنوبي بدون غطاء لإعطاء فرصة لمرور الإشعاع. والدراسة شملت كذلك دور العازل الرملي حول المبخر. كما هو موضح في الشكل (2-41).



الشكل (2-41): تخطيط لوحدة تقطير شمسي بمكثف مدمج من اقتراح (Bechki et al. 2010)

استنتج الباحث ما يلي:

- (1) بلغ متوسط الإنتاج اليومي للمقطر الشمسي التقليدي حوالي 6.01 لتر/م².
- (2) تم تحسين هذه الكمية إلى 8.03 لتر/م²، عن طريق إضافة غلاف رملي جاف كعازل حول المبخر.
- (3) كان وقت التظليل الجزئي الأمثل من الساعة 12:00 إلى 13:00.
- (4) أدى إجراء التظليل المتقطع للغطاء الزجاجي الشمالي للشمس إلى تحسن إضافي بنسبة 12% في الإنتاج اليومي.
- (5) على الرغم من أن التقطير الشمسي قد تم التحقيق فيه على نطاق واسع من قبل العديد من الباحثين. وعلى حد الباحث، لا يوجد عمل منشور يدرس تأثير تبريد المكثف عن طريق التظليل على ناتج التقطير. لذلك يُقترح أن المزيد من البحث حول هذا الموضوع يستحق المزيد من الاستكشاف.

ثالث عشر: نموذج مكثف مدمج للباحث (Xiong) سنة 2013

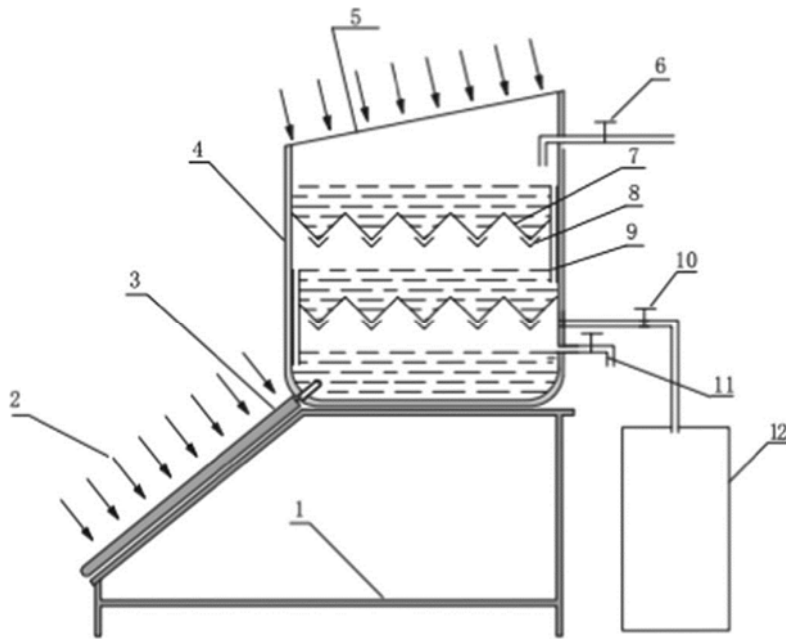
تم تنفيذ جهاز شمسي جديد متعدد التأثيرات مع سطح تكثيف محسن بواسطة (Xiong et al. 2013)¹، يظهر الرسم التخطيطي لنظام التقطير الشمسي متعدد التأثيرات في الشكل (2-42). وبالمقارنة مع التقطير الشمسي التقليدي، فإن التصميم الجديد له ميزتان رئيسيتان:

- (1) تطبيق طبقة متموجة تحمل حوض أعلاها وتحتها أحواض على شكل حرف V، لتجميع الماء المتكثف.

¹ Xiong, Jianyin, Guo Xie, and Hongfei Zheng. 2013. "Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface." Energy conversion and management 73:176-185.

(2) التسخين المتزامن من الأسفل بمُجمِّع لוחي مستوي مُفَرَّغ، ومن الأعلى بالإشعاع المباشر على حوض متموج مطلي بالأسود. وهذا ما يزيد من إنتاجية المياه العذبة.

تم إجراء اختبار ميداني لدراسة الخصائص الفيزيائية في المقطر بدلالة درجة الحرارة. وقد لوحظ أن الجهاز قادر على إنتاج مياه عذبة ليس فقط في النهار، ولكن أيضًا في الليل حيث الاستهلاك الليلي حوالي 40% من إجمالي إنتاج المياه. وخلصوا إلى أنه عندما تكون درجة حرارة البداية مرتفعة نسبيًا، يمكن أن تصل الكفاءة الطاقوية إلى 0.91 وكفاءة تحلية المياه الإجمالية إلى 1.86. ولقد طوروا نموذجًا عدديًا يعطي تنبأ لعمليات انتقال الحرارة والكتلة في المجمع الشمسي. ووجدوا أيضًا توافقًا جيدًا بين تنبؤ النموذج والبيانات التجريبية التي توضح فعالية النموذج المقترح.



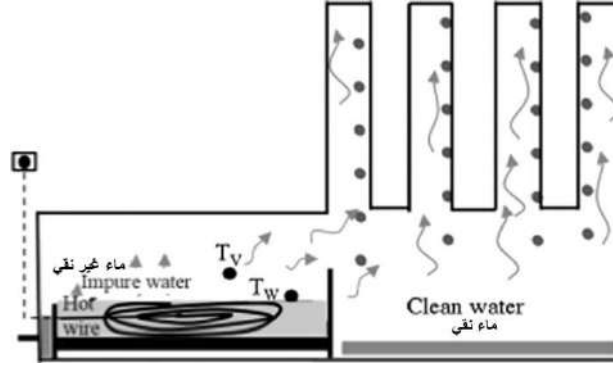
الشكل (2-42): رسم تخطيطي للمقطر الشمسي متعدد التأثيرات من اقتراح (Xiong et al. 2013)

(1) حامل؛ (2) أشعة الشمس. (3) مُجمِّع أنبوب مُفَرَّغ. (4) خزان المياه. (5) غطاء زجاجي. (6) صمام مياه البحر. (7) طبقة متموجة (8) أحواض على شكل حرف V؛ (9) أنبوب توصيل؛ (10) صمام المياه العذبة. (11) صمام التدفق الزائد؛ و (12) خزان للمياه العذبة.

رابع عشر: نموذج مكثف مدمج للباحث (Bhardwaj) سنة 2015

اقترح (Bhardwaj et al. 2015)¹ زيادة إنتاج المياه عن طريق زيادة مساحة التكثيف للمقطرات الشمسية. ويوضح الشكل (2-43) تخطيطًا لحوض التقطير مع قسم منفصل لتكثيف البخار بتجميع المكثفات. أجريت التجارب داخل المختبر وتحت الشمس. في التجارب المعملية التي أجريت عند مدخلات طاقة ثابتة تبلغ 625 واط/م²، زاد إنتاج الماء بأكثر من 65% مع زيادة مساحة سطح التكثيف بمقدار 7.5 مرة. وفي التجارب التي أجريت تحت الشمس، تمت زيادة إنتاج الماء بأكثر من 50% عند استخدام مساحة إضافية للتكثيف والتي تكون أكبر بـ 7.5 مرة بالمقارنة مع مقطر بدون مساحة تكثيف إضافية.

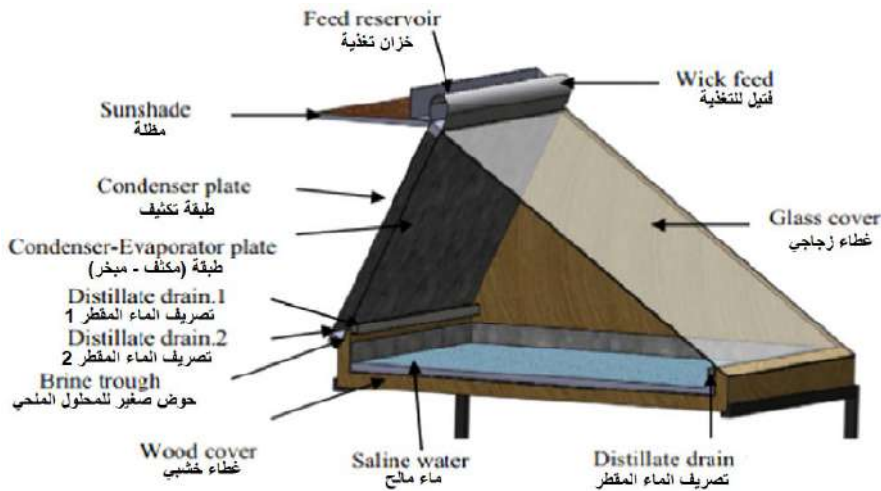
¹ Bhardwaj, R, MV Ten Kortenaar, and RF Mudde. 2015. "Maximized production of water by increasing area of condensation surface for solar distillation." Applied energy 154:480-490.



الشكل (2-43): تخطيط لوحدة تقطير شمسي مع قسم منفصل لتكثيف البخار من اقتراح (Bhardwaj et al. 2015)

خامس عشر: نموذج مكثف مدمج للباحث (Belhadj) سنة 2015

تم التحقيق عددياً في تأثير دمج خلية تكثيف إلى وحدة تقطير شمسية أحادية الحوض ومزدوجة الميل من قبل الباحث (Belhadj et al. 2015)¹ كما هو موضح في الشكل (2-44). والتركيب يعمل كما يلي: جزء من البخار الناتج يتكثف على الوجه الداخلي للغطاء الزجاجي ويتكثف الباقي على الوجه الداخلي المعدني، حيث أن هذه الطبقة المعدنية تقوم بتبخير ماء يغذى من الأعلى، ومن ثم يتم تكثيفه على طبقة أخرى مبردة بالهواء الخارجي. في هذه الدراسة تم حساب الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة ودرجات حرارة مكونات النظام المختلفة. ولإعطاء فكرة عن مردودية هذا النظام تم تقييم أداء النظام ومقارنته بأداء النظام التقطير الشمسي التقليدي الذي تحت نفس ظروف الأرصاد الجوية. كان للنموذج الأولي المقترح ناتج يومي يبلغ 7.15 كغ/م²، وأظهرت نتائجهم أن إنتاجية النظام كانت أعلى بحوالي 60٪ من إنتاجية النوعين التقليدي والشعيري، والشعيري الذي يعتمد على شريط شعيري لتحريك الماء. وبلغت مساهمات الغطاء الزجاجي واللوح المعدني ولوحه المكثف 43٪ و18٪ و39٪ من إجمالي ناتج التقطير على التوالي.

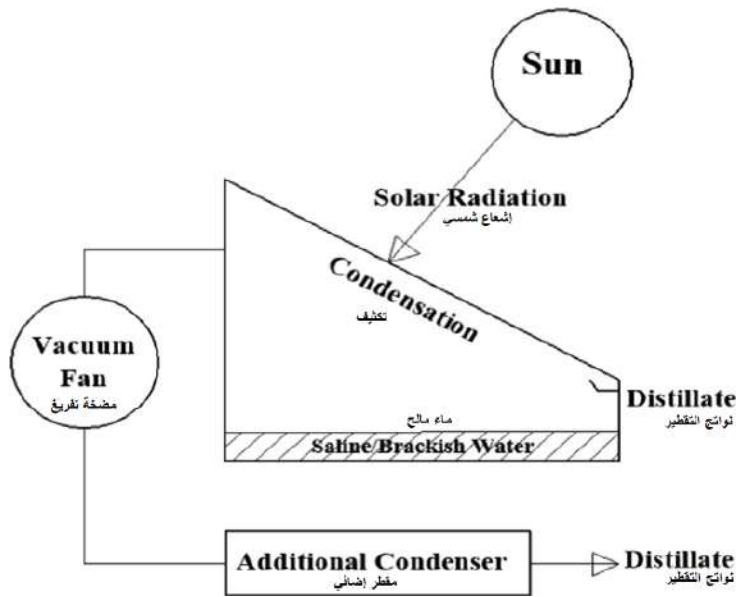


الشكل (2-44): حوض أحادي ذو ميل مزدوج مرتبط بخلية تكثيف من اقتراح (Belhadj et al. 2015).

¹ Belhadj, Mohamed Mustapha, Hamza Bouguettaia, Yacine Marif, and Moussa Zerrouki. 2015. "Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria." Energy Conversion and Management 94:245-252.

6-1-2) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات خارجية (External condensers).

جميع المقطرات المُدرّجة تحت هذا العنوان والتي تعمل بمكثفات خارجية، هي مقطرات مرتبطة بالمكثفات وبمضخة لسحب البخار. وعندما تكون ظروف التكثيف جيدة يمكن أن تجعل تبخر الماء المالح يكون أسرع. ومن جهة أخرى وجد معظم الباحثين أن قيم درجة حرارة الزجاج في المقطر المرتبط بمكثف خارجي أقل من القيم في المقطر بدون مكثف خارجي، وكذلك درجة حرارة ماء الحوض تكون أعلى. وبالتالي، فإن العمل بالمكثفات الخارجية طريقة لها تأثير كبير على إنتاجية المقطر وكفاءته الطاقوية، والشكل (2-45) يعطي فكرة عامة لتكثيف هذه المقطرات. الأبحاث التي أجريت في هذا المجال مرتبة حسب التسلسل الزمني لباحثين قاموا بتطويرها.



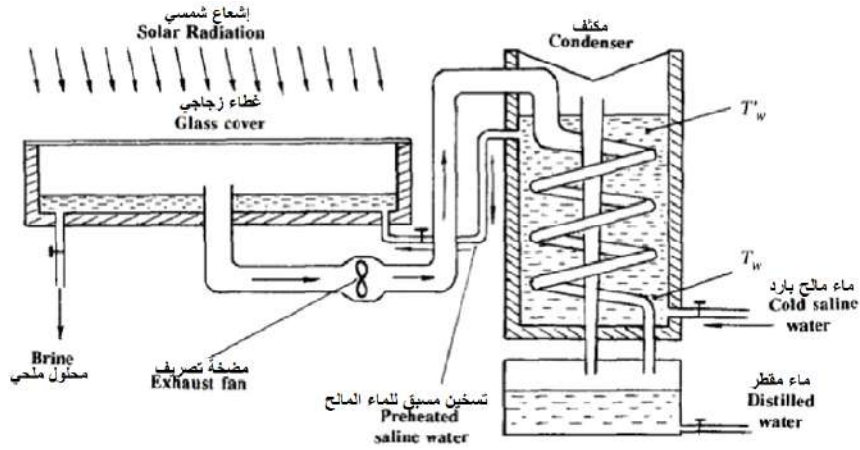
الشكل (2-45): تخطيط يوضح آلية سحب البخار من المقطر باستخدام مضخة (Kabeel et al. 2016)¹

أولاً: نموذج مكثف خارجي للباحث (Nijegorodov) سنة 1994

درس (Nijegorodov et al. 1994)² تأثير إضافة مكثف خارجي على أداء مقطر شمسي بدون ميل، حيث أن الزجاج وضع بشكل أفقي، والهدف من هذا الزجاج حجز البخار. يتم سحب وتحريك الهواء المشبع ببخار الماء بواسطة مضخة منخفضة الطاقة إلى أنبوب مغمور في وسط مائي بارد. وهذا الماء البارد بدوره يعتبر ماء تغذية لحوض التبخير. ويمكن تغذية الجهاز بالطاقة الكهربائية لتبخير الماء المالح، بما يسمى بالطريقة الكهروحرارية الشمسية لتنقية المياه بالتقطير (The solar thermal-electrical method was described to purify water by distillation)، ويعتبر التركيب المكون من الأنبوب وماء التغذية البارد مكثف خارجي. والمخطط في الشكل (2-46) يوضح التركيبة التجريبية لهذا المقطر. وتزداد الكفاءة الحرارية للمقطر بأكثر من ضعف الكفاءة الحرارية للمقطر بدون إضافات وتحسينات في المقطر التقليدي.

¹ Kabeel, AE, ZM Omara, FA Essa, and AS Abdullah. 2016. "Solar still with condenser—A detailed review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (C):839-857.

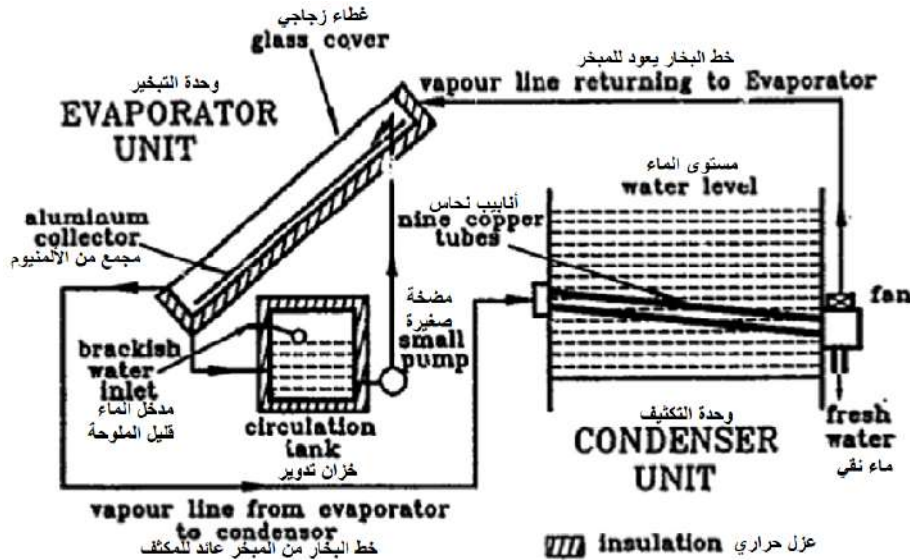
² Nijegorodov, Nikolai, Pushpendra K Jain, and Stig Carlsson. 1994. "Thermal-electrical, high efficiency solar stills." Renewable energy 4 (1):123-127.



الشكل (2-46): عرض تخطيطي للمقطر الشمسي الكهروحراري من اقتراح (Nijegorodov et al. 1994).

ثانيا: نموذج مكثف خارجي للباحث (Rahim) سنة 1995

اقترح (Rahim 1995)¹ تقنية التكثيف القسري (Forced condensing technique-FCT) في تحلية المياه بالطاقة الشمسية وبشريط مائل متحرك (moving film inclined solar desalination)، كما هو موضح في الشكل (2-47). المقطر الشمسي يتكون من أربعة أجزاء رئيسية. ينتقل بخار الماء المتشكل في وحدة التبخير (Evaporator unit) ويتكثف في وحدة تكثيف منفصلة (Condenser unit) والتي لها درجة حرارة أقل بكثير من وحدة التبخير، ووحدة التبخير تتغذى بالماء من خزان التدوير (Circulation tank) المزود بمضخة. النتائج التي تم الحصول عليها تشير إلى أن الكفاءة الحرارية حوالي 70% والكلية بلغت القيمة 60%.

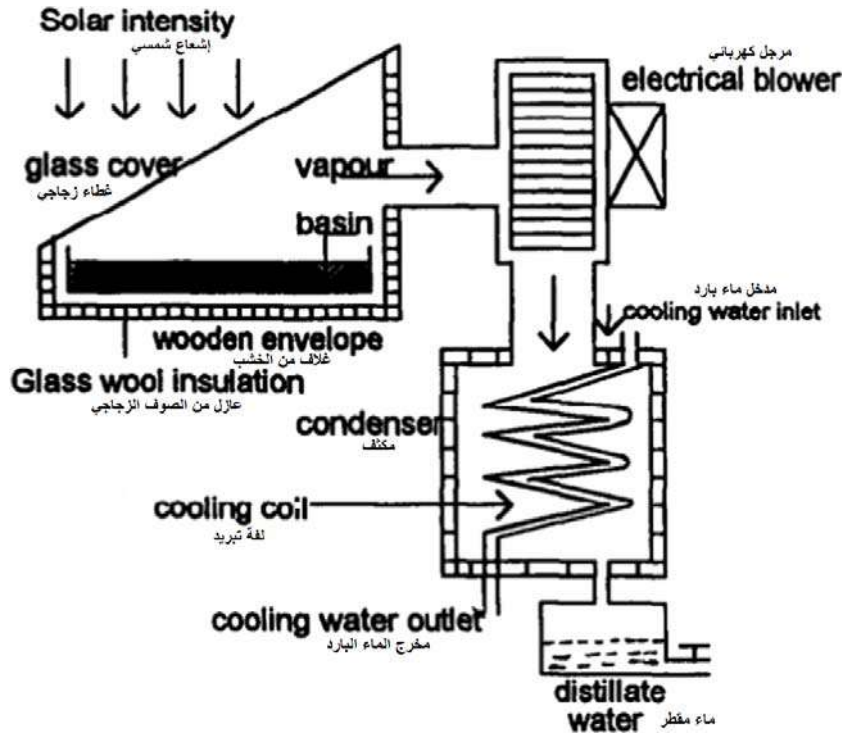


الشكل (2-47): مخطط للمقطر الشمسي يعمل بالتكثيف القسري من اقتراح (Nijegorodov et al. 1994).

¹ Rahim, Nabil Hussain A. 1995. "Utilization of a forced condensing technique in a moving film inclined solar desalination still." Desalination 101 (3):255-262. doi: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(95\)00028-Z](https://doi.org/10.1016/0011-9164(95)00028-Z).

ثالثاً: نموذج مكثف خارجي للباحث (Mohamad) سنة 1994

تم تقديم بواسطة الباحث (Abu-Qudais et al. 1996)¹ نماذج نظرية وتجريبية لأداء نوعين من المقطرات الشمسية. النوع الأول بمكثف زجاجي بدون إضافات والثاني بمكثف خارجي كما هو موضح في الشكل (2-48). تم إجراء مقارنات بين الإنتاجية والكفاءة في ظروف متنوعة ومختلفة. أظهرت النتائج أن الإنتاجية والكفاءة كانت أكبر بكثير بالنسبة للنوع المزود بالمكثف الخارجي. وبلغت الزيادة في النسبة المئوية للكفاءة المحققة باستخدام مكثف خارجي 47٪.



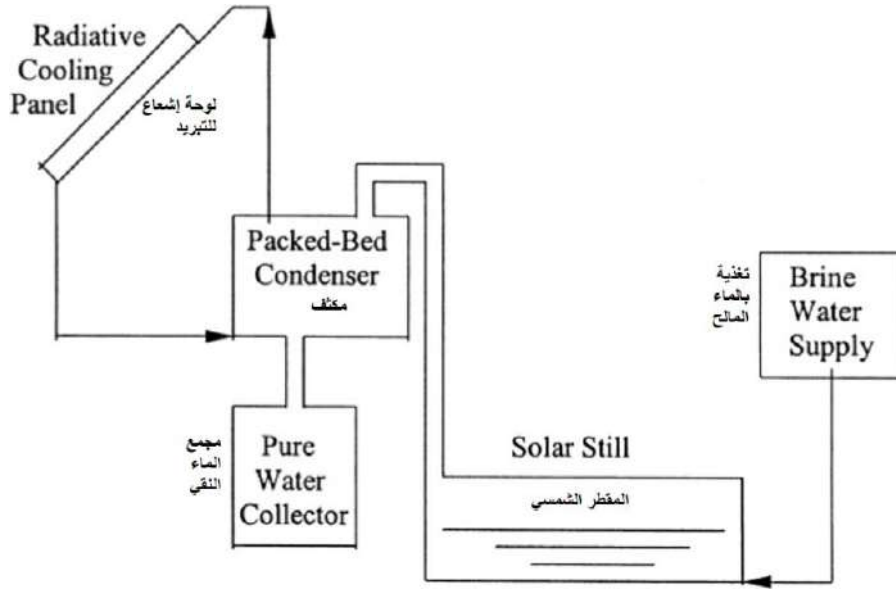
الشكل (2-48): عرضي تخطيطي تجريبي لمقطر شمسي بمكثف خارجي من اقتراح (Mohamad et al. 1994).

رابعاً: نموذج مكثف خارجي للباحث (Haddad) سنة 2000

تم تحسين أداء مقطر شمسي من طرف الباحث (Haddad et al. 2000)²، وقد تم ذلك باستخدام خزان معبأ كمكثف خارجي (Packed bed storage tank-PBST)، الشكل (2-49) يوضح التركيب التجريبي. حيث يتم تبريد المكثف أثناء الليل باستخدام لوحة تبريد إشعاعية عن طريق تدوير الماء النقي في المكثف ولوحة التبريد. في نهاية عملية التبريد، يصل الخزان المعبأ إلى درجة حرارة منخفضة. ومن ثم عند بداية التشغيل، يُمْتَصُّ البخار الناتج عن الإشعاع الشمسي بشكل طبيعي بواسطة المكثف المعبأ ويتكثف بداخله. ووجدوا أن استمرار زيادة الإشعاع الشمسي تؤدي لزيادة الإنتاجية، ومع ذلك، فإن الكفاءة تنخفض. إلى جانب ذلك، لا تؤثر درجة حرارة المنخفضة للخزان بشكل كبير.

¹ Abu-Qudais, Mohamad, and Othman N Othman. 1996. "Experimental study and numerical simulation of a solar still using an external condenser." Energy 21 (10):851-855.

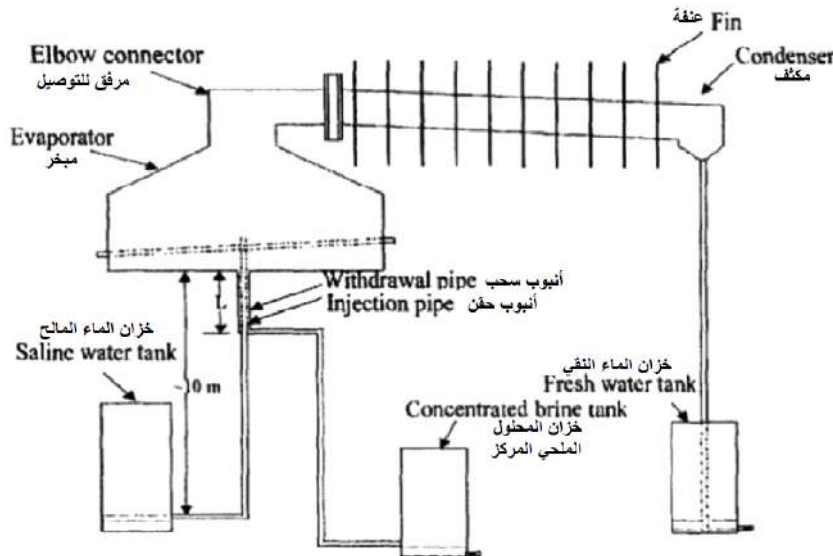
² Haddad, OM, MA Al-Nimr, and A Maqableh. 2000. "Enhanced solar still performance using a radiative cooling system." Renewable Energy 21 (3-4):459-469.



الشكل (2-49): عرض تخطيطي تجريبي لمقطر شمسي بمكثف خارجي من اقتراح (Haddad et al. 2000).

خامسا: نموذج مكثف خارجي للباحث (Al-Kharabsheh) سنة 2003

قدم (Al-Kharabsheh et al. 2003)¹ تحليلا نظريا واستنبط نتائج تجريبية أولية لنظام مبتكر لتحلية المياه باستخدام أشعة شمسية، حيث المقطر يعطي درجات حرارة منخفضة عند مكثف خارجي مزود بعنفات تبريد. واستخدم في النظام عوامل طبيعية من بينها (الجاذبية والضغط الجوي) لخلق فراغ، ويمكن في هذا الجهاز تبخير الماء بسرعة عند درجات حرارة منخفضة وبطاقة أقل من التقنيات التقليدية المعروفة. ويتكون النظام من جهاز تبخير متصل بمكثف، كما هو موضح في الشكل (2-50). وأظهرت النتائج أن الانتاج يمكن أن يصل إلى 6.5 كغ/م² في اليوم، وبالمقارنة مع النظام بدون مكثف يصل الإنتاج في الأنظمة التقليدية إلى 3-4 كغ/م² في اليوم فقط.



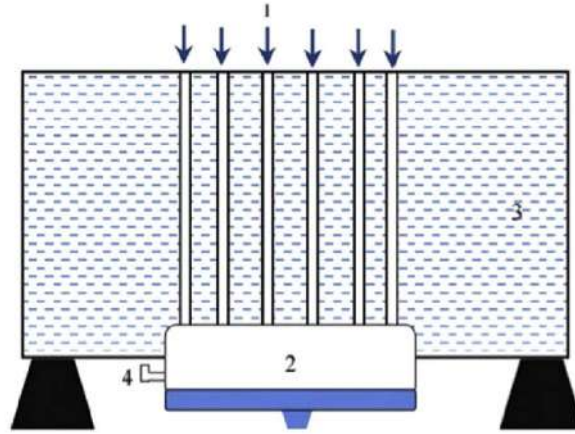
الشكل (2-50): عرض تخطيطي لمقطر شمسي بمكثف خارجي بعنفات من اقتراح

(Al-Kharabsheh and Yogi Goswami. 2003).

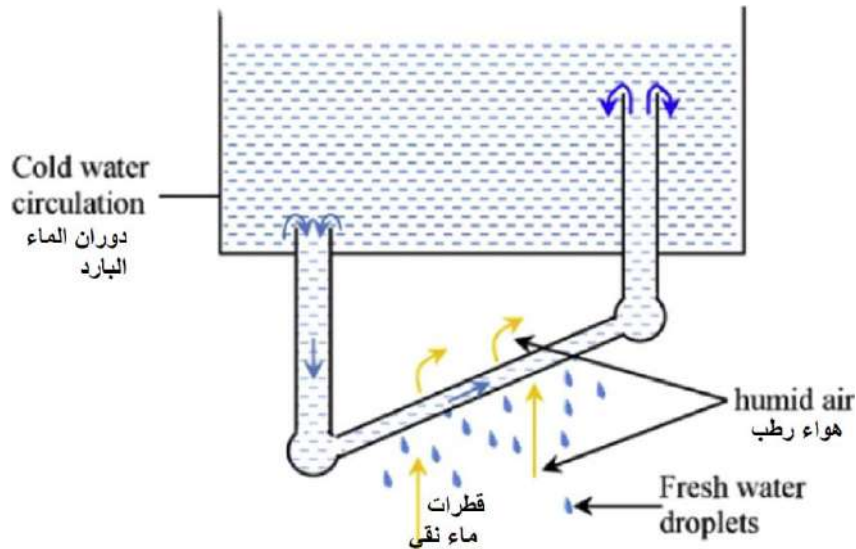
¹ Al-Kharabsheh, S, and D Yogi. 2003. "Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat." Desalination 156 (1-3):323-332.

سادسا: نموذج مكثف خارجي للباحث (Mahmoudi) سنة 2010

طور الباحث (Mahmoudi et al. 2010)¹ نموذجًا رياضيًا لمكثف مقترح من أجل تعزيز أداء نظام تحلية البحر يعمل بالنظام (رطوبة-إزالة الرطوبة) (humidifiers-dehumidifiers). وتم استخدام ري المحاصيل الزراعية بالماء الخاص بتبريد المكثف. وصمم الباحث نظامين: نظام تبريد يتكون من مكثف مغمور في حوض مائي ونظام آخر به مكثف خارجي متصل بحوض ماء يوضع فوق المكثف، الشكل (2-51). وأشارت النتائج إلى وجود معدلات تكثيف كبيرة بالنسبة للمكثف الذي يتكون من أنابيب ذات أقطار صغيرة، مع انخفاض كبير في درجة الحرارة المكثف.



1. Gas mixture . خليط غازي
2. Fresh water tank . خزان الماء النقي
3. Cold water . ماء بارد
4. Discharge point . نقطة تفريغ

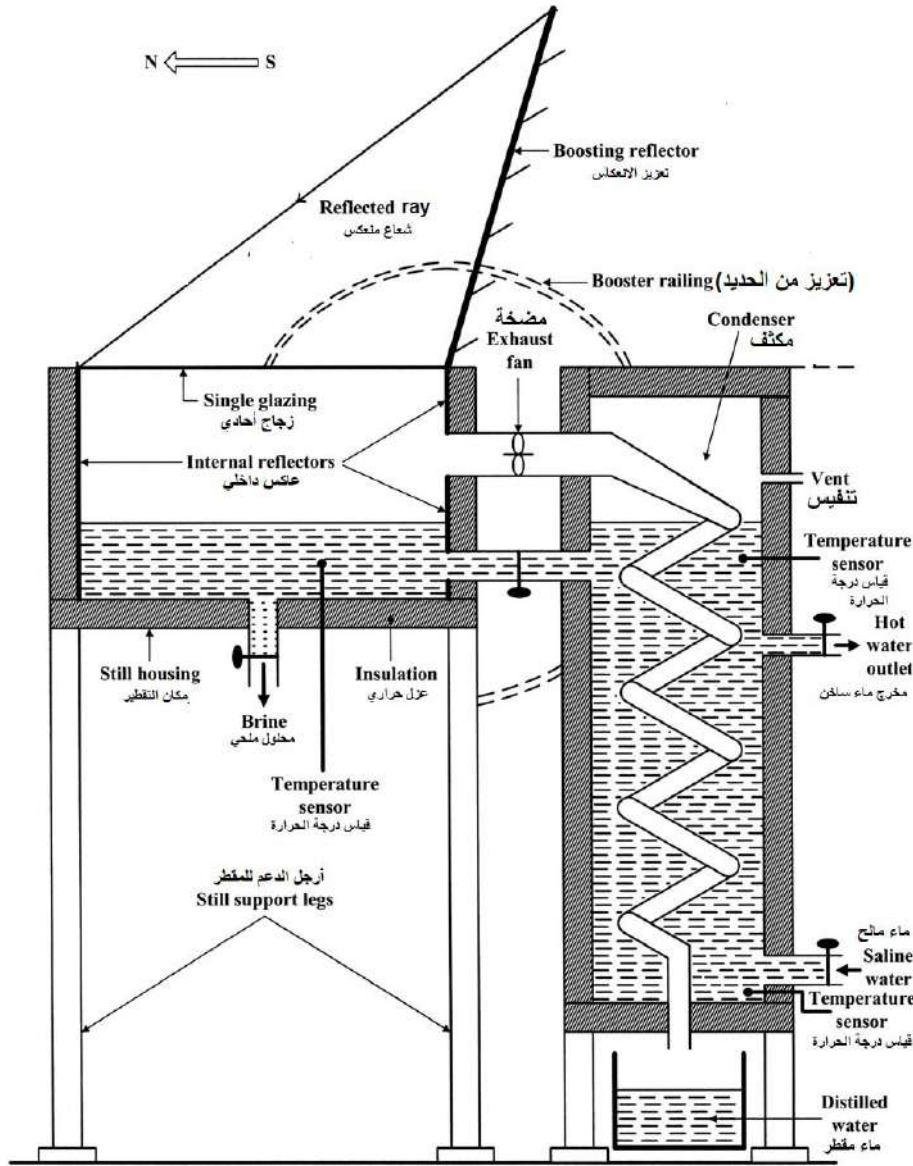


الشكل (2-51): عرض تخطيطي لمقطر شمسي بمكثف خارجي من اقتراح (Hacene et al.2010).

¹ Mahmoudi, Hacene, Nawel Spahis, Sabah A Abdul-Wahab, Shyam S Sablani, and Mattheus FA Goosen. 2010. "Improving the performance of a Seawater Greenhouse desalination system by assessment of simulation models for different condensers." Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (8):2182-2188.

سابعاً: نموذج مكثف خارجي للباحث (Monowe) سنة 2010

صمم (Monowe et al. 2011)¹ تصميمًا لمقطر شمسي كهروحراري محمول معزز بعاكس خارجي ومكثف خارجي. أنظر الشكل (2-52). المقطر يقلل من فقدان الحرارة الكامنة للتكثيف إلى الجو المحيط، وتتراكم تلك الحرارة الكامنة للتكثيف في المكثف ويمكن استخدامها لتسخين المياه المالحة مسبقًا للأغراض المنزلية أو لتشغيل المقطر أثناء الليل. أظهرت النتائج أن الكفاءة يمكن أن تصل إلى 77٪ إذا تم استخدام المياه المالحة المسخنة للأغراض المنزلية، ويمكن أن تصل إلى 85٪ إذا تم استخدام المياه المالحة المسخنة مسبقًا للتشغيل أثناء أوقات الليل.

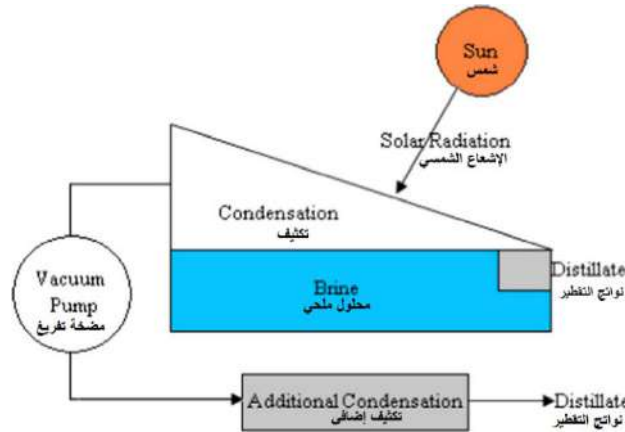


الشكل (2-52): وحدة شمسية محمولة أحادية الحوض مزودة بعاكس خارجي ومكثف خارجي (Monowe et al. 2011)

¹ Monowe, P, M Masale, N Nijegorodov, and V Vasilenko. 2011. "A portable single-basin solar still with an external reflecting booster and an outside condenser." Desalination 280 (1-3):332-338.

ثامنا: نموذج مكثف خارجي للباحث (Gnanadason) سنة 2011

قام (Gnanadason et al. 2011)¹ بتصنيع واختبار مقطر شمسي مفرغ بمضخة، والذي يتكون من حوض أحادي بسيط، الشكل (2-53) يوضح تخطيطا للتجربة. ويمكن أن يختلف معدل إنتاج الماء المقطر باختلاف تصميم جهاز التقطير الشمسي والمواد المستعملة في امتصاص الإشعاع وعمق الماء وتركيز الملح والضغط المنخفض بداخل المقطر. كانت الكفاءة أعلى بالنسبة للمقطر الشمسي ذو حوض المصنوع من النحاس ويمكن زيادتها عن طريق خلط الجسيمات النانومترية (nanoparticles) بالماء داخل جهاز التقطير. لقد قدم المقطر الشمسي تحت ضغط منخفض أداء أكبر عند مقارنته بعمل مقطر لا يعمل بالضغط المنخفض وتحت نفس الظروف المناخية. حسب الباحثين يوفر هذا النظام حاجيات أسرة مكونة من 5 أشخاص. حيث كان إجمالي استهلاك المياه حوالي 7.5 لتر/يوم. من المتوقع أن يوفر هذا التصميم الفعال للمجتمعات الريفية من حيث التكلفة تحويل المياه قليلة الملوحة إلى مياه صالحة للشرب.



الشكل (2-53): مقطر شمسي مفرغ ومزود بمكثف خارجي (Gnanadason et al. 2011).

تاسعا: نموذج مكثف خارجي للباحث (Ahmed HM) سنة 2012

أجريت التجارب لمدة 24 ساعة خلال أيام من الفصول الثلاث (الصيف والخريف والشتاء) للتحقق من تأثير دمج المكثفات الخارجية في حوض شمسي أحادي الميل من قبل (Ahmed 2012b)². وتم الوصول لزيادة بنسبة 15-30% في إنتاج المياه عند استخدام هذه المكثفات الخارجية. والشكل (2-54) يوضح جانبا من المقطر.



الشكل (2-54): مقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Ahmed HM. 2012).

¹ Gnanadason, M Koilraj, P Senthil Kumar, S Rajakumar, and MH Syed Yousuf. 2011. "Effect of nanofluids in a vacuum single basin solar still." International Journal of Advanced Engineering Research and Studies 1:171-177.

² Ahmed, Husham M. 2012b. "Seasonal performance evaluation of solar stills connected to passive external condensers." Scientific Research and Essays 7 (13):1444-1460.

عاشرا: نموذج مكثف خارجي للباحث (Husham) سنة 2012

تم إجراء اختبارات تجريبية من طرف (Ahmed 2012a)¹ للتحقق من تأثير دمج مكثفات خارجية وربطها بالمقطرات الشمسية التقليدية. يتكون النظام التجريبي المقترح من ثلاث مقطرات شمسية. الأول تقليدي ليس به إضافات، وتم استخدامه كمرجع للمقارنة. في المقطر الثاني تم توصيل مكثفين بالتوازي ليكونا في الجزء العلوي خلف المقطر (الجهة الشمالية)، كما في الشكل (2-55) a. أما المقطر الثالث، تم توصيل مكثفين بالتوازي في الأجزاء العلوية والسفلية خلف المقطر، كما في الشكل (2-55) b. ووجد أن المكثفات المتصلة فقط بالجزء العلوي تنتج زيادة قدرها 15.1% من معدل إنتاج الماء المقطر. والمكثفات المتصلة بالأجزاء العلوية والسفلية تنتج زيادة قدرها 30.54% في معدل إنتاج الماء المقطر. وهذا يؤكد أنه كلما كانت مساحة الاتصال بين المقطر والمكثف كبيرة كانت الإنتاجية كبيرة.



a

b

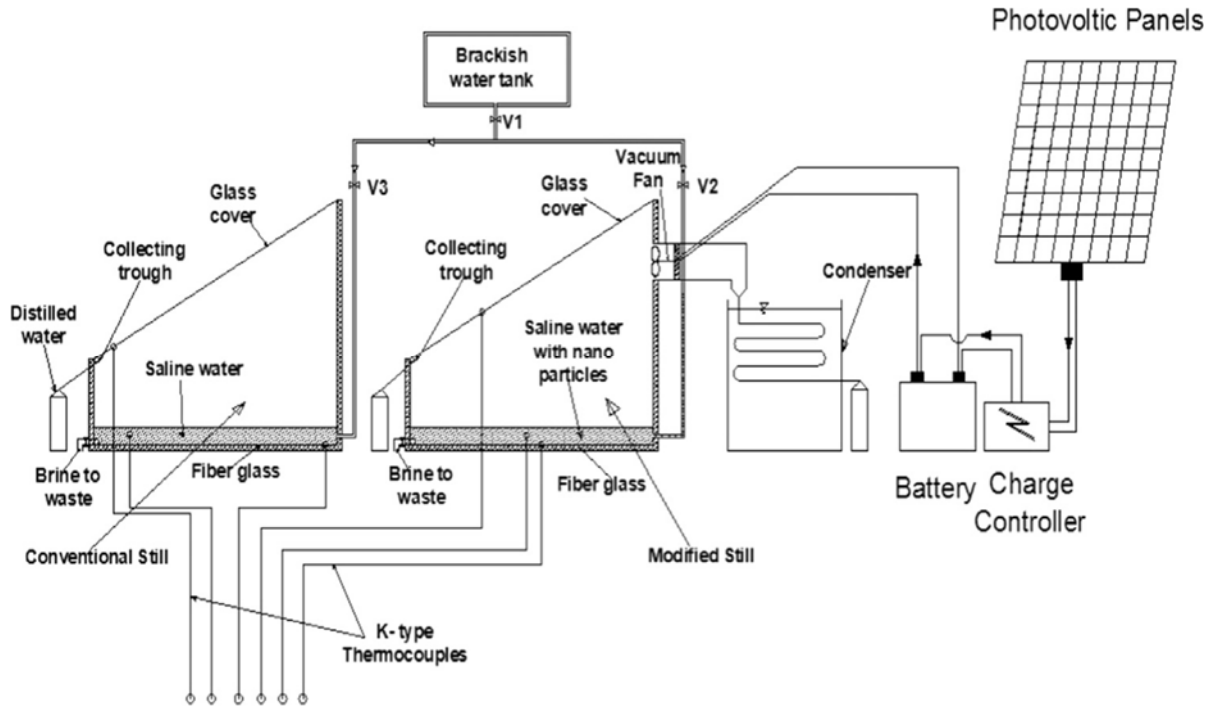
الشكل (2-55): مقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Husham, 2012).

الحادي عشر: نموذج أول لمكثف خارجي للباحث (Kabeel-1) سنة 2014

تم تنفيذ تعديلات على تصميم مقطر شمسي ذو حوض واحد بواسطة (Kabeel et al. 2014a)² لتحسين أداءه من خلال زيادة إنتاجية الماء المقطر. يتكون الإعداد بشكل أساسي من خزان مياه مالحة، ومقطر أول ذو حوض عادي وآخر معدل مدمجاً مع وحدة تكثيف (مكثف خارجي) مرتبط بواسطة مروحة تفرغ منخفضة الطاقة. يوضح الشكل (2-56). تكوين النظام. وقد أجروا الدراسة التجريبية لتعزيز الإنتاجية من خلال توفير الفراغ وأيضاً عن طريق خلط جزيئات أكسيد الألومنيوم النانومترية (The aluminum oxide-water nanofluid) مع مياه حوض المقطر الأول. أوضحت النتائج أن دمج المقطر الشمسي مع المكثف الخارجي زاد من إنتاجية الماء المقطر بنحو 53.2%. إلى جانب ذلك، أدى استخدام مائع أكسيد الألومنيوم النانومترية إلى تحسين إنتاجية المياه بحوالي 116% عندما تم دمجها مع المكثف الخارجي.

¹ Ahmed, Husham M. 2012a. "Experimental investigations of solar stills connected to external passive condensers." Journal of Advanced Science and Engineering Research 2 (1):1-11.

² Kabeel, AE, ZM Omara, and FA Essa. 2014a. "Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach." Energy conversion and management 78:493-498.



الشكل (2-56): مقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Kabeel et al. 2014).

الثاني عشر: نموذج ثان لمكثف خارجي للباحث (Kabeel-2) سنة 2014

في دراسة أخرى، (Kabeel et al. 2014b)¹ أجرى تعديلات تجريبية على مقطرات شمسية تقليدية لتعزيز إنتاجية الماء المقطر. تظهر الصورة في الشكل (2-57) المخطط التجريبي للدراسة. وقد قام بدراسة تأثيرات استخدام أنواع مختلفة من الجسيمات النانومترية على أداء التقطير الشمسي. قام بفحص الجسيمات النانومترية لأكاسيد الألومنيوم وأكاسيد النحاس. وقد أجريت التجارب بتركيزات مختلفة من الوزن الجزيئي للجسيمات النانومترية في ماء الحوض مع وبدون توفير فراغ. تم إجراء البحث لمجموعة من التراكيز تبدأ من 0.02% إلى 0.2% بخطوة 0.02%. أظهرت النتائج أن استخدام جزيئات أكسيد النحاس النانومترية زاد من إنتاجية التقطير بحوالي 133.64% و 93.87% مع وبدون تشغيل المروحة على التوالي. من ناحية أخرى، أدى استخدام جزيئات أكسيد الألومنيوم النانومترية إلى تحسين نواتج التقطير بنسبة 125.0% و 88.97% مع تشغيل المروحة وبدونها على التوالي مقارنةً بالطراز التقليدي.

¹ Kabeel, AE, ZM Omara, and FA Essa. 2014b. "Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum." Energy conversion and management 86:268-274



الشكل (2-57): صورة للتركيب التجريبي لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Kabeel et al. 2014).

الثالث عشر: نموذج مكثف خارجي للباحث (Almuhanna) سنة 2014

تمت دراسة وتحليل الأداء الحراري لمقطر شمسي بميل واحد مرتبط بمكثف خارجي مزود بمياه مبردة من نظام تبريد تحت الظروف المناخية الحارة والرطبة، بواسطة (Almuhanna 2014)¹، أنظر الشكل (2-58). وجد أن متوسط الإنتاجية اليومية للمياه المقطرة قد زاد من 5.94 إلى 9.23 لتر/م² مما أعطى معدل زيادة قدره 55.41%. بالإضافة إلى ذلك، أدى استخدام المكثف إلى زيادة الكفاءة الحرارية بنسبة 30.1% مقارنةً بالمقطر بدون مكثف.

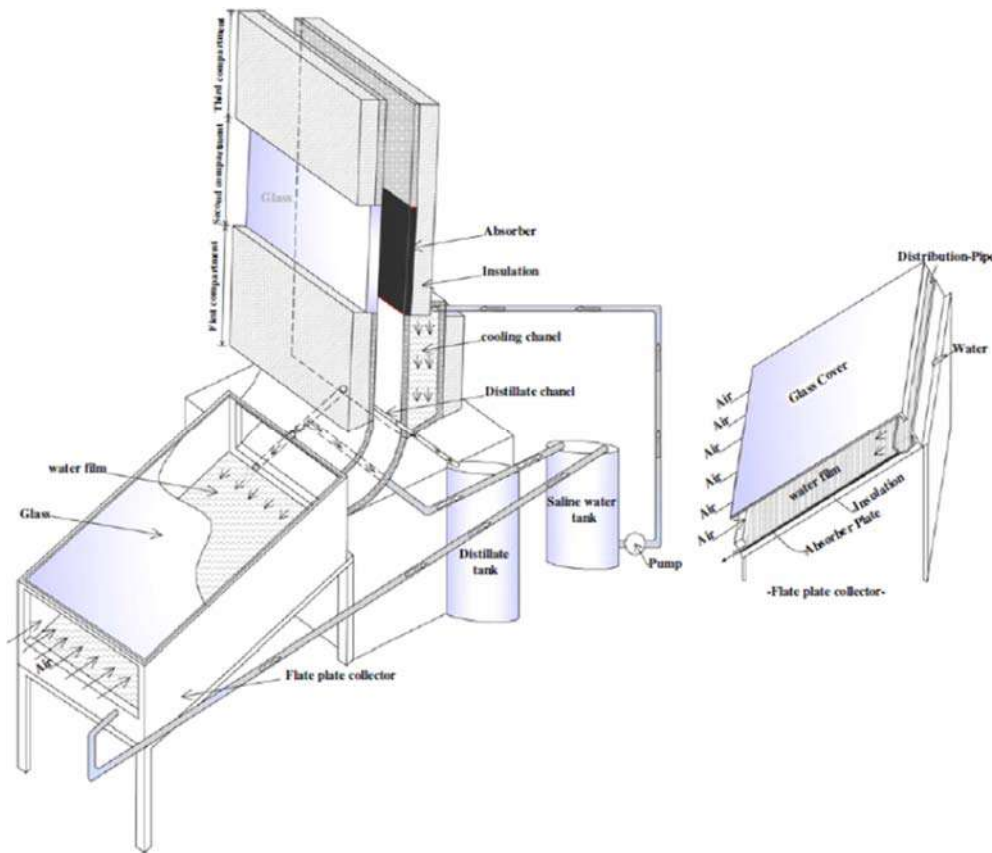


الشكل (2-58): صورة للتركيب التجريبي لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Almuhanna 2014).

¹ Almuhanna, Emad A. 2014. "Evaluation of single slop solar still integrated with evaporative cooling system for brackish water desalination." Journal of Agricultural Science 6 (1):48.

الرابع عشر: نموذج مكثف خارجي للباحث (Kerfah) سنة 2016

تم التحقق في التحليل الحرارو-اقتصادي (The thermal-economic analysis) لمقطر شمسي بواسطة الباحث (Kerfah et al. 2016)¹. ويظهر نظام التقطير الخاص بهم في الشكل (2-59). قاموا بالتحقق في تأثير منطقة المُجمِّع ومنطقة غرفة التكثيف على إنتاجية وتكلفة الماء المقطر. استخدموا طريقة (Liu Jordan) لإجراء محاكاة على النظام وفقاً لبيانات الأرصاد الجوية للجزائر العاصمة (الجزائر). توصلت نتائجهم إلى أن مساحة سطح المُجمِّع تؤثر بشكل كبير على الإنتاجية. نتيجة لذلك، تراوح متوسط الإنتاجية السنوية من 482.35 لتراً إلى 2083.65 لتراً لكل من 2م² و 10م² لمجمع الإشعاع الشمسي على التوالي. في المقابل، انخفضت تكلفة لتر من الماء المقطر مع زيادة مساحة سطح المُجمِّع الشمسي. بالإضافة إلى ذلك، انخفضت إنتاجية الإنتاج عند زيادة مساحة غرفة التكثيف.



الشكل (2-59): مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Kerfah et al. 2016).

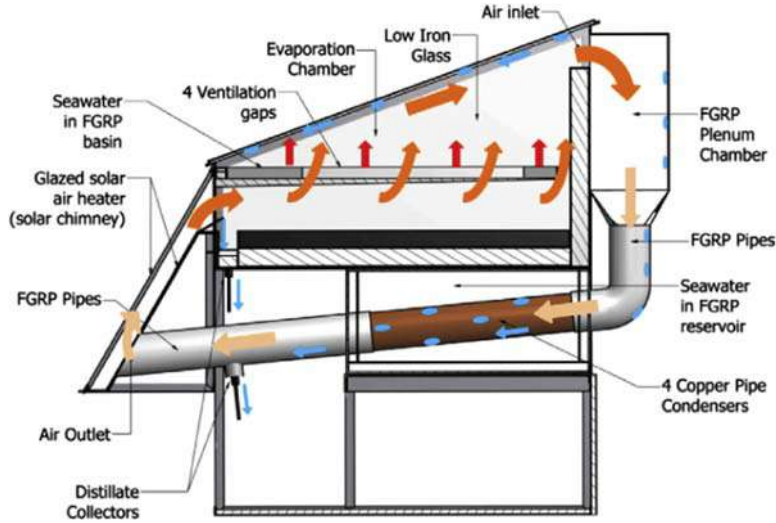
الخامس عشر: نموذج مكثف خارجي للباحث (Refalo) سنة 2016

استخدم (Refalo et al. 2016)² مكثفات على شكل أنبوب شاقولي موضوع خلف المقطر في الجهة الشمالية لتعزيز إنتاجية التقطير الشمسي، أنظر الشكل (2-60)، حيث تتكون المكثفات في المقطرات الشمسية لتنقية مياه البحر من

¹ Kerfah, Rabah, Abdekader Zaaoui, and Belkheir Noura. 2016. "Thermal-economic analysis of modular solar still under Algerian climatic conditions: effect of collector and condensation chamber area." *Desalination and Water Treatment* 57 (12):5215-5221.

² Refalo, Paul, Robert Ghirlando, and Stephen Abela. 2016. "The use of a solar chimney and condensers to enhance the productivity of a solar still." *Desalination and Water Treatment* 57 (48-49):23024-23037.

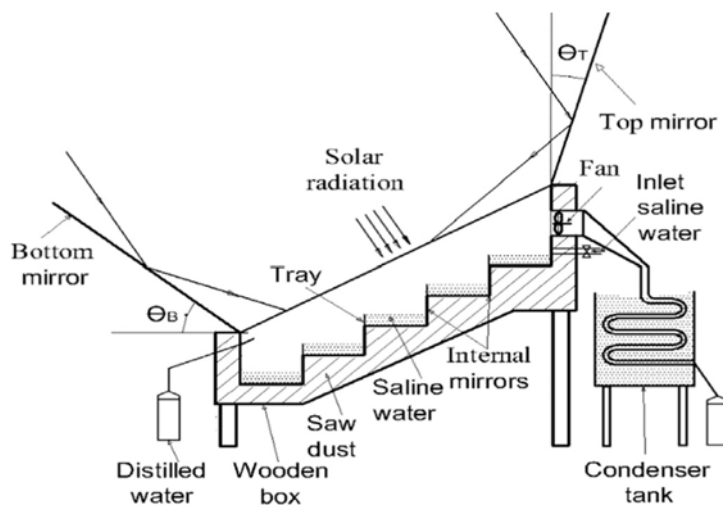
مجموعة من الأنابيب. حيث يتم تمرير بخار الماء عبر عدد من القنوات المغمورة في مياه البحر. وجدوا أن المكثفات المبردة بالماء خارجيًا حسنت التكثيف، وذلك بفصل وتحويل عملية التكثيف من حجرة التبخر إلى المكثفات الخارجية. بالإضافة إلى ذلك، عند مقارنة الكفاءة بناءً على مساحة المبخر الفعلية (الحوض)، لوحظ أن أداء المقطر الشمسي مع هذه المكثفات كان أفضل بنسبة 8.8٪.



الشكل (2-60): مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف خارجي (Refalo, Ghirlando, and Abela 2016).

السادس عشر: نموذج مكثف خارجي للباحث (El-Samadony) سنة 2015

درس (El-Samadony et al. 2015)¹ أداء حوض أحادي الميل مع وجود مكثف خارجي من الناحية النظرية. الرسم التخطيطي لهذه الدراسة مبين في الشكل (2-61). حيث تم وضع مرآتين عاكستين واحدة في الأعلى والثانية في الأسفل، لكي يصبح الإشعاع مركز على الحوض بشكل مُدرَّج وجعل المكثف الخارجي في الجهة الشمالية المظللة بالمرآة العلوية. وبين خلية التبخير والمكثف الخارجي وضعت مروحة لسحب البخار لجهة المكثف.



الشكل (2-61): مخطط لمقطر شمسي مدرج مرتبط بمكثف خارجي (El-Samadony et al. 2015).

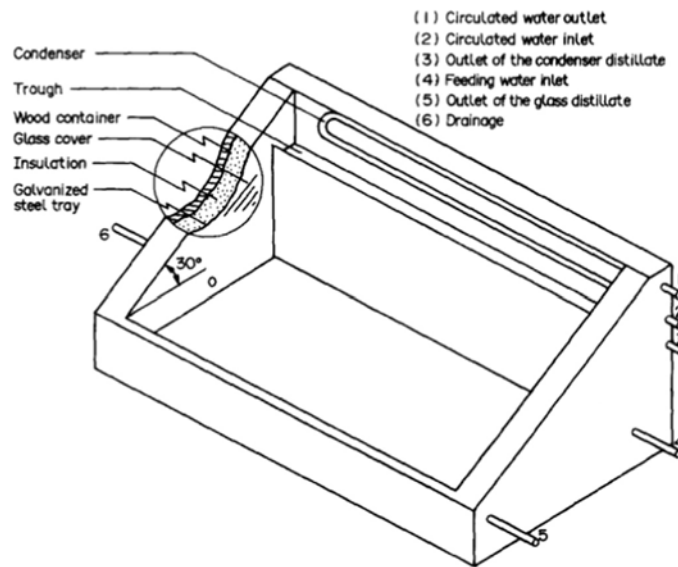
¹ El-Samadony, YAF, AS Abdullah, and ZM Omara. 2015. "Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser." Experimental heat transfer 28 (4):392-404.

يتم تعزيز التبخر عن طريق إضافة صباغ أسود في الحوض المدرج لتحسين امتصاص الإشعاع الحراري وزيادة مساحة سطح التبخر. تم العثور على العوامل الأكثر تأثيراً وهي شدة الإشعاع الشمسي، وفعالية العزل الأساسي، ومساحة سطح التبخر، والتأثير الداخلي للمكثف. مقارنة بالمقطرات التقليدية، كانت إنتاجية جهاز التقطير المدرج مع المكثف أعلى بحوالي 66% من مثيلاتها التقليدية. كما أظهرت النتائج أن تركيب الموجهات الداخلية والخارجية (العلوية والسفلية) يؤدي إلى زيادة درجة حرارة الزجاج (حوالي 9 درجات مئوية عن التقطير التقليدي) وبالتالي يرفع مقاومة التكثيف. وكانت درجة حرارة الماء المالح أعلى منها في المقطر التقليدي بحوالي 16 درجة مئوية. لذلك، عندما تم استخدام كل من الموجهات والمكثف الخارجي، تزداد إنتاجية المياه للسخان المدرج بحوالي 165%.

6-1-3) مقطرات شمسية تعمل بمكثفات داخلية (Internal condensers).

أولاً: نموذج أول لمكثف داخلي للباحث (Ahmed ST) سنة 1988

أجريت دراسة تجريبية لمعرفة تأثير استخدام مكثف داخلي على أداء المقطر الشمسي أحادي الميل بواسطة الباحث (Ahmed 1988)¹. تم اختبار طريقتين مختلفتين للتجارب على الحوض. تم استخدام الأول لتكثيف بخار الماء بدون مكثف إضافي. بينما تم استخدام الثاني بإضافة مكثف كما هو موضح في الشكل (2-62)، كان المقطر مع مكثف داخلي مزدوج التأثير. حيث كانت مساحة قاعدتها الفعالة 0.4 م² ويميل الغطاء بمقدار 30 درجة على الأفق. أظهرت النتائج أن دمج مكثف داخلي مع مقطر شمسي يحسن أدائه. حيث كانت الزيادة في الإنتاجية من 5.5 كغ/م² في اليوم الأول إلى 5.9 كغ/م² في اليوم الثاني.



الشكل (2-62): مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Ahmed ST et al. 1988).

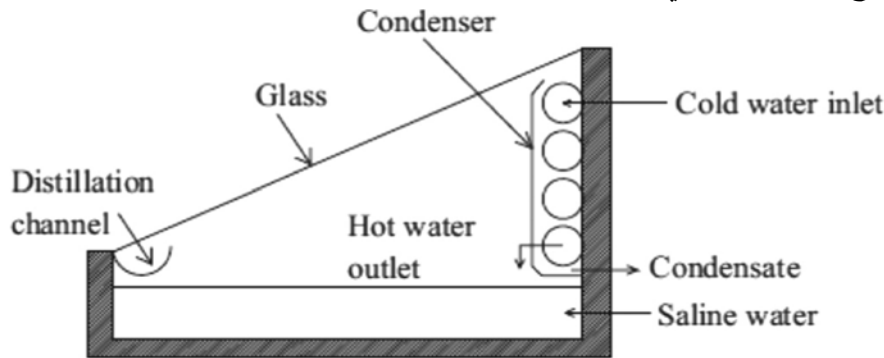
¹ Ahmed, ST. 1988. "Study of single-effect solar still with an internal condenser." Solar & wind technology 5 (6):637-643.

ثانيا: نموذج ثان لمكثف داخلي للباحث (Ahmed ST) سنة 1988

اقترح (Ahmed 1988)¹ نموذجا رياضيا ثابتا للمقطر الشمسي الموضح في الشكل (2-62) بإضافة مبخر مسامي ومكثف داخلي . إن الجمع بين العزل، والتبخير المسامي، والتكثيف الداخلي، ودوران السوائل بالحرارة هي السمة الرئيسية لهذا النظام. أظهرت المحاكاة سلوك العوامل؛ مثل درجة الحرارة المحيطة ودرجة حرارة المكثف وسرعة الرياح وشدة الإشعاع الشمسي. وكانت الكفاءة في المجال (17.1 - 21.3) % ومعدل نواتج التقطير (1.51-1.89) كغ/م² في اليوم. لدرجة حرارة محيطية تبلغ 25 درجة مئوية وسرعة رياح 10 م/ثانية وشدة إشعاع 500 وات/م².

ثالثا: نموذج مكثف داخلي للباحث (Khalifa) سنة 1999

أجرى (Khalifa et al. 1999)² تعديلات تجريبية على المقطرات الشمسية التقليدية لتعزيز إنتاجية الماء المقطر باستخدام مكثف داخلي، الشكل (2-63) يوضح التركيب التجريبي، وقد تم صنع المكثف الداخلي من أنابيب نحاسية بقطر 10 مم بطول 1.2 متر (ثمانية ممرات). تم تحليل جودة المياه المتكثفة ووجدت أنها قابلة للمقارنة مع معايير جودة المياه بالمقارنة مع مياه الأمطار والمياه المعدنية. تؤدي زيادة التبريد على سطح الجدار الداخلي إلى تعزيز عملية التكثيف. أشارت نتائجهم إلى أن الكفاءة اليومية مع المكثف الداخلي كانت حوالي 54%.



الشكل (2-63): مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Khalifa et al. 1999).

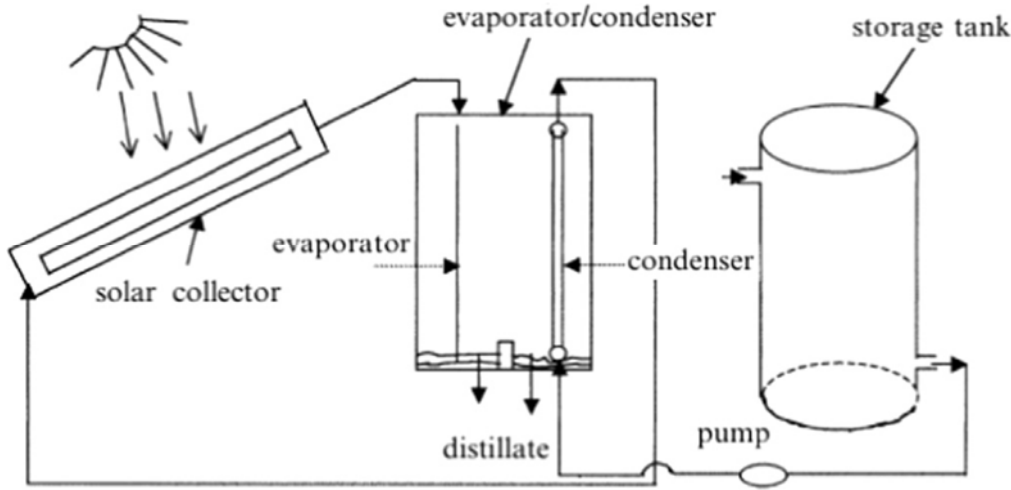
رابعا: نموذج مكثف داخلي للباحث (Kudish Avraham) سنة 2003

أجرى (Kudish et al. 2003)³ تطوير واختبار نظام تحلية شمسي يتكون من مجمع شمسي مقترن بغرفة تبخير/تكثيف. وتم تصنيع جميع المكونات من مواد بوليميرية كما هو موضح في الشكل (2-64)، وكان الهدف تطوير نموذج محاكاة لنظام تحلية المياه والتحقق من صحته عن طريق المقارنة البنينة مع القياسات التجريبية لهذا النظام. وجد أن نظام التحلية بالطاقة الشمسية قادر على إنتاج ما يزيد عن 11 كغ/م² من نواتج التقطير في اليوم عندما تكون الفجوة بين أسطح المبخر والمكثف 2 سم.

¹ Ahmed, ST. 1988. "Study of single-effect solar still with an internal condenser." Solar & wind technology 5 (6):637-643.

² Khalifa, A-JN, AS Al-Jubouri, and MK Abed. 1999. "An experimental study on modified simple solar stills." Energy conversion and management 40 (17):1835-1847.

³ Kudish, Avraham I, Efim G Evseev, Gerd Walter, and Thomas Priebe. 2003. "Simulation study on a solar desalination system utilizing an evaporator/condenser chamber." Energy conversion and management 44 (10):1653-1670.



الشكل (2-64): مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Khalifa et al. 1999).

خامسا: نموذج مكثف داخلي للباحث (Kumar) سنة 2008

قام (Kumar and Bai 2008)¹ بدراسة أداء المقطر الشمسي مع التكثيف المُحسَّن. في هذا الصدد، تم تصميم وبناء وحدة شمسية من نوع الحوض (0.5 م²). إلى جانب ذلك، أُجريت دراسة الأداء على عينات مختلفة مثل مياه الصنبور ومياه البحر. تم لحام أنبوب ألومنيوم بطول 72 سم وقطر 0.5 سم بثلاث لفات على جدران سطح الحديد لترتيب قناة التبريد كما هو موضح في الشكل (2-65). ويحدث التكثف بسبب اختلاف درجة الحرارة ليس فقط على السطح الزجاجي ولكن أيضاً على الجدران الجانبية الأربعة التي يمكن تبريدها عن طريق تدوير الماء من خلال أنابيب مثبتة على سطح الجدار لتعزيز الكفاءة. تم الحصول على البيانات في حالتين؛ أولاً المقطر الشمسي الذي يعمل بالتكثيف على الجدران الجانبية والثاني يعمل دون تكثف على الجدران الجانبية. أظهرت النتائج التجريبية أن أقصى إنتاج يومي كان حوالي 1.4 لتر/م² وكفاءته كانت حوالي 30٪ مع متوسط اشعاع شمسي 28 ميغا جول/يوم.

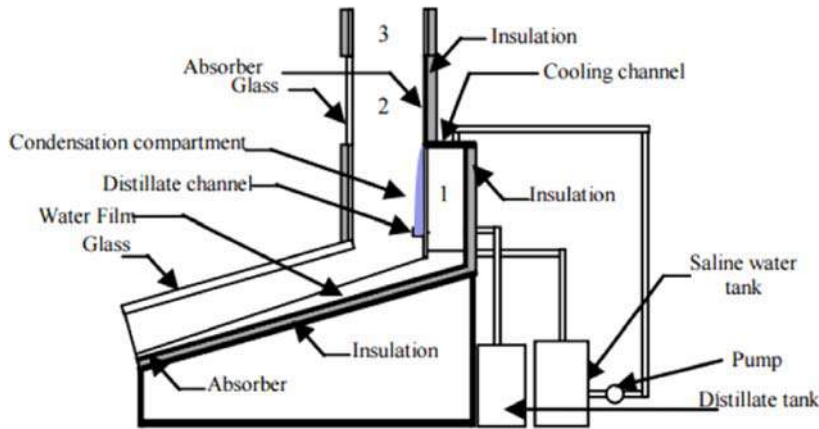


الشكل (2-65): أنابيب تبريد مع ترتيب قناة تصريف المياه المكثفة (Kumar et al. 2008).

¹ Kumar, K Vinoth, and R Kasturi Bai. 2008. "Performance study on solar still with enhanced condensation." Desalination 230 (1-3):51-61.

سادسا: نموذج مكثف داخلي للباحث (Kerfah) سنة 2012

أجرى (Kerfah et al. 2012)¹ نمذجة ومحاكاة لوحدة تقطير مكونة من مستوي لمياه متدفقة على المبخر، ويتم تبريدها وإعادة لها للمبخر بعد مرورها على المكثف، كما في الشكل (2-66). تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام بيانات الطقس (10 سنوات) في منطقة بوزريعة (الجزائر). لقد توصلوا إلى أن الحد الأقصى لمتوسط الكفاءة اليومية لغرفة التكثيف يتم تسجيله خلال شهر مايو. كما أن الإشعاع الشمسي هو العامل الرئيسي المؤثر على النظام.



الشكل (2-66): مخطط لمقطر شمسي مرتبط بمكثف داخلي (Rabah et al. 2012).

(7) خلاصة الفصل الثاني:

تعد تقنيات الطاقة الشمسية واستخدامها أمراً مهماً ومفيداً للغاية للدول النامية والدول المتقدمة للحفاظ على احتياجاتها من الطاقة. ويعد استخدام الطاقة الشمسية في عملية التحلية من أفضل تطبيقات الطاقة المتجددة. والمقطرات الشمسية تحظى بشعبية كبيرة خاصة في المناطق الريفية، وهي صديقة للطبيعة والنظام البيئي. تمت مراجعة أهم الأنواع والتطورات المختلفة في أنظمة التقطير الشمسي التي تم تحسينها بالتحليل النظري والرؤية المستقبلية لتلك البحوث. ومن خلال المناقشة أعلاه في الأنواع المختلفة للتحسينات على المقطرات الشمسية، يمكن استنتاج النتائج التالية:

أولاً: درجة حرارة الغطاء

عندما يظل الغطاء الزجاجي معرض للشمس يكتسب درجات حرارة عالية نسبياً، فإنه يفقد المزيد من الطاقة في البيئة المحيطة. وبالتالي، فإن الناتج من الماء النقي يصبح منخفضاً، مما يتسبب في انخفاض الكفاءة الإجمالية. للتغلب على المشكلة الناجمة عن ارتفاع درجات الحرارة للغطاء الزجاجي، تم اقتراح العديد من التحسينات. أحدها هو السماح للماء بالتدفق فوق اللوح الزجاجي. يتم بعد ذلك إزالة بعض الحرارة عن طريق الماء، وبالتالي خفض درجة حرارة الزجاج. ومع ذلك، فإن الزيادة في المحصول ليست كبيرة لأن جزءاً من الإشعاع الشمسي الوارد ينعكس ولا يمر للمبخر. الاقتراح الآخر هو استخدام المكثف. نظراً لأن التكثيف يحدث في المكثف، تنخفض درجة حرارة الزجاج بشكل كبير.

¹ Kerfah, Rabah, El ghalia Filali, and Zeghmati Belkacem. 2012. "Modelling and simulation of a modular solar still constituted of a streaming plate collector and a condensation chamber." *Mechanika/Mechanics* 18 (1):49-55.

ثانيا: زاوية ميل الغطاء

وجد أن أقصى ناتج سنوي للمقطر الشمسي عندما يكون ميل الغطاء الزجاجي المكثف مساوياً لخط عرض المكان.

ثالثا: مساحة المكثف

يؤدي توفير مساحة إضافية للتكثيف إلى زيادة معدل التكثيف بالإضافة إلى زيادة معدل التبخر في الحوض.

رابعا: استخدامات أخرى للمكثف

يمكن استخدام المكثفات إما لتسخين المياه مسبقاً أو لتوفير الماء الساخن أو كليهما حسب المتطلبات.

خامسا: فرق درجة الحرارة بين التبخر والتكثيف

تعتمد كفاءة عملية التكثيف بشكل أساسي على اختلاف درجة الحرارة بين منطقة التبخر ومنطقة التكثيف.

يعمل المكثف كمنص للحرارة وتحويل بخار الماء إلى سائل باستمرار في المقطر ويحافظ على الضغط المنخفض.

سادسا: سرعة الهواء بجوار المكثف

تؤدي زيادة سرعة الهواء بجوار المكثف إلى زيادة أداء النظام. ومع ذلك، هناك حد يمكن الوصول إليه لا يفيد في زيادة تحفيز تبخر الماء وعملية التكثيف في منطقة المكثف ومن ثم يقل إنتاج وكفاءة النظام.

سابعا: درجة حرارة جوانب المكثف

تحدث زيادة في التكثيف بسبب اختلاف درجة الحرارة بين السطح الزجاجي والمبخر، وتحدث أيضاً على الجدران الجانبية الأربعة للمكثف، والتي يمكن تبريدها عن طريق تدوير المياه من خلال أنابيب مثبتة على سطح الجدار لتعزيز الكفاءة. ولوحظ أن زيادة التبريد تؤدي إلى تحسين عملية التكثيف.

ثامنا: تأثير ربط مكثف خارجي

درجات حرارة الزجاج ومياه الحوض في المقطرات الشمسية المرتبطة مع مكثف خارجي أقل من درجات الحرارة في المقطرات التقليدية. ويرجع ذلك أساساً إلى استخدام مروحة منخفضة الاستهلاك لتحريك بخار الماء من المبخر إلى المكثف. بالإضافة إلى ذلك، تقلل تشبع البخار بجوار المبخر وتترك فرصة لتشكيل بخار جديد من المبخر.

تاسعا: طبيعة سطح التكثيف

كمية الماء الناتج من المقطر يرتبط مباشرة بالتوصيل الحراري لمواد غطاء التكثيف؛ ويعطي النحاس عائداً أكبر مقارنةً بالزجاج والبلاستيك بسبب الموصلية الحرارية العالية. والمقطرات الشمسية المقترنة بـ FPC (مُجَوِّع لוחي مستوي - Flat Plate Collector) مع وضع الدوران القسري تعطي إنتاجية أعلى من تلك الخاصة (Thermosiphon)

عاشرا: وضع الدوران الطبيعي وتأثيره على الناتج والكفاءة

المقطرات الشمسية ذات الميل المزدوج والتي في وضع الدوران الطبيعي تعطي ناتجا أعلى مقارنةً بالتي ليس فيها تدوير في عملية تسخين الماء. لكن الكفاءة عكس ذلك؛ حيث أن المقطرات في وضع التدوير الطبيعي أقل من المقطرات التقليدية، وذلك يرجع لمساحة الامتصاص الإشعاعي عند المقطرات المحسنة.

مراجع الفصل الثاني:

- Abdel-Rehim, Zeinab S, and Ashraf Lasheen. 2007. "Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt." *Desalination* 217 (1-3):52-64.
- Abu-Qudais, Mohamad, and Othman N Othman. 1996. "Experimental study and numerical simulation of a solar still using an external condenser." *Energy* 21 (10):851-855.
- Ahmed, Husham M. 2012a. "Experimental investigations of solar stills connected to external passive condensers." *Journal of Advanced Science and Engineering Research* 2.11-1:(1)
- Ahmed, Husham M. 2012b. "Seasonal performance evaluation of solar stills connected to passive external condensers." *Scientific Research and Essays* 7 (13):1444-1460.
- Ahmed, MI, M Hrairi, and AF Ismail. 2009. "On the characteristics of multistage evacuated solar distillation." *Renewable Energy* 34 (6):1471-1478.
- Ahmed, ST. 1988. "Study of single-effect solar still with an internal condenser." *Solar & wind technology* 5 (6):637-643.
- Al-Hamadani, Ali AF, and SK Shukla. 2013. "Performance of single slope solar still with solar protected condenser." *Distributed Generation & Alternative Energy Journal* 28 (2):6-28.
- Al-Kharabsheh, S, and D Yogi. 2003. "Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat." *Desalination* 156.332-323:(3-1)
- Al Hawaj, Osamah, and MA Darwish. 1994. "A solar pond assisted multi-effect desalting system." *Desalination* 99 (1):119-135.
- Almuhanna, Emad A. 2014. "Evaluation of single slop solar still integrated with evaporative cooling system for brackish water desalination." *Journal of Agricultural Science* 6 (1):48.
- Bacha, H Ben, T Damak, M Bouzguenda, and AY Maalej. 2003. "Experimental validation of the distillation module of a desalination station using the SMCEC principle." *Renewable Energy* 28 (15):23.2354-35
- Bacha, H Ben, T Dammak, AA Ben Abdalah, AY Maalej, and H Ben Dhia. 2007. "Desalination unit coupled with solar collectors and a storage tank: modelling and simulation." *Desalination* 206 (1-3):341-352.
- Badran, Ali A, Ihmad A Al-Hallaq, Imad A Eyal Salman, and Mohammad Z Odat. 2005. "A solar still augmented with a flat-plate collector." *Desalination* 172 (3):227-234.
- Badran, OO, and HA Al-Tahaine. 2005. "The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity." *Desalination*.142-137:(3-1) 183
- Bapeshwararao, VSV, U Singh, and GN Tiwari. 1983. "Transient analysis of double basin solar still." *Energy conversion and Management* 23 (2):83-90.
- Bechki, D., H. Bouguettaia, J. Blanco-Galvez, S. Babay, B. Bouchekima, S. Boughali, and H. Mahcene. 2010. "Effect of partial intermittent shading on the performance of a simple basin solar still in south Algeria." *Desalination* 260 (1):65-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.066>.
- Belhadj, Mohamed Mustapha, Hamza Bouguettaia, Yacine Marif, and Moussa Zerrouki. 2015. "Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria." *Energy Conversion and Management* 94:245-252.
- Bhardwaj, R, MV Ten Kortenaar, and RF Mudde. 2015. "Maximized production of water by increasing area of condensation surface for solar distillation." *Applied energy* 154:480-490.
- Chaouchi, Bechir, Adel Zrelli, and Slimane Gabsi. 2007. "Desalination of brackish water by means of a parabolic solar concentrator." *Desalination* 217 (1-3):118-126.
- Dayem, Adel M Abdel. 2006. "Experimental and numerical performance of a multi-effect condensation–evaporation solar water distillation system." *Energy* 31 (14):2710-2727.
- Dimri, Vimal, Bikash Sarkar, Usha Singh, and GN Tiwari. 2008. "Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation." *Desalination* 227 (1-3):178-189.
- El-Bahi, A, and D Inan. 1999. "A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser." *Desalination* 1.83-79:(1) 23

- El-Nashar, Ali M. 2003. "Effect of dust deposition on the performance of a solar desalination plant operating in an arid desert area." *Solar energy* 75 (5):421-431.
- El-Samadony, YAF, AS Abdullah, and ZM Omara. 2015. "Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser." *Experimental heat transfer* 28 (4):392-404.
- El-Sebaili, AA, MRI Ramadan, S Aboul-Enein, and N Salem. 2008. "Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond." *Energy conversion and Management* 49 (10):2839-2848.
- Fatani, AA, and GM Zaki. 1995. "Analysis of roof type solar stills with assisting external condensers." *International journal of solar energy* 17 (1):27-39.
- Fatani, AA, GM Zaki, and A Al-Turki. 1994. "Improving the yield of simple basin solar stills as assisted by passively cooled condensers." *Renewable energy* 4 (4):377-386.
- Fath, Hassan E. S., and H. M. Hosny. 2002. "Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser." *Desalination* 142 (1):19-27. doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00422-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00422-2).
- Fath, Hassan ES. 1996. "High performance of a simple design, two effect solar distillation unit." *Desalination* 107 (3):223-233.
- Fath, Hassan ES, Samy Elsherbiny, and Ahmad Ghazy. 2004. "A naturally circulated humidifying/dehumidifying solar still with a built-in passive condenser." *Desalination* 169 (2):129-149.
- Fath, Hassan ES, and Samy M Elsherbiny. 1993. "Effect of adding a passive condenser on solar still performance." *Energy Conversion and Management* 34 (1):63-72.
- García-Rodríguez, L, and C Gómez-Camacho. 1999. "Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector." *Desalination* 122 (2-3):195-204.
- Garcia-Rodriguez, Lourdes, Ana I Palmero-Marrero, and Carlos Gómez-Camacho. 2002. "Comparison of solar thermal technologies for applications in seawater desalination." *Desalination* 142 (2):135-142.
- Garg, HP, Rajendra Singh Adhikari, and Rakesh Kumar. 2003. "Experimental design and computer simulation of multi-effect humidification (MEH)-dehumidification solar distillation." *Desalination* 153 (1-3):81-86.
- Gnanadason, M Koilraj, P Senthil Kumar, S Rajakumar, and MH Syed Yousuf. 2011. "Effect of nanofluids in a vacuum single basin solar still." *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies* 1:171-177.
- Gräter, Frieder, Michael Dürbeck, and Jürgen Rheinländer. 2001. "Multi-effect still for hybrid solar/fossil desalination of sea-and brackish water." *Desalination* 138 (1-3):111-119.
- Gupta, RA, SN Rai, and GN Tiwari. 1988. "Transient analysis of double basin solar still with intermittent flow of waste hot water in night." *Energy conversion and management* 28 (3):245-249.
- Haddad, OM, MA Al-Nimr, and A Maqableh. 2000. "Enhanced solar still performance using a radiative cooling system." *Renewable Energy* 21 (3-4):459-469.
- Hongfei, Zheng, and Ge Xinshi. 2002. "Steady-state experimental study of a closed recycle solar still with enhanced falling film evaporation and regeneration." *Renewable energy* 26 (2):295-308.
- Hou, Shaobo, and Hefei Zhang. 2008. "A hybrid solar desalination process of the multi-effect humidification dehumidification and basin-type unit." *Desalination* 220 (1-3):552-557.
- Kabeel, AE, ZM Omara, and FA Essa. 2014a. "Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach." *Energy conversion and management* 78:493-498.
- Kabeel, AE, ZM Omara, and FA Essa. 2014b. "Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum." *Energy conversion and management* 86:268-274.
- Kabeel, AE, ZM Omara, FA Essa, and AS Abdullah. 2016. "Solar still with condenser—A detailed review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (C):839-857.

- Kerfah, Rabah, El ghalia Filali, and Zeghmami Belkacem. 2012. "Modelling and simulation of a modular solar still constituted of a streaming plate collector and a condensation chamber." *Mechanika/Mechanics* 18 (1):49-55.
- Kerfah, Rabah, Abdekader Zaaraoui, and Belkheir Noura. 2016. "Thermal-economic analysis of modular solar still under Algerian climatic conditions: effect of collector and condensation chamber area." *Desalination and Water Treatment* 57 (12):5215-5221.
- Khalifa, A-JN, AS Al-Jubouri, and MK Abed. 1999. "An experimental study on modified simple solar stills." *Energy conversion and management* 40 (17):1835-1847.
- Kiatsirirot, T, SC Bhattacharya, and P Wibulswas. 1987. "Performance analysis of multiple effect vertical still with a flat plate solar collector." *Solar & wind technology* 4 (4):451-457.
- Kudish, Avraham I, Efim G Evseev, Gerd Walter, and Thomas Priebe. 2003. "Simulation study on a solar desalination system utilizing an evaporator/condenser chamber." *Energy conversion and management* 44 (10):1653-1670.
- Kumar, K Vinoth, and R Kasturi Bai. 2008. "Performance study on solar still with enhanced condensation." *Desalination* 230 (1-3):51-61.
- Kumar, Sanjay, and S Sinha. 1996. "Transient model and comparative study of concentrator coupled regenerative solar still in forced circulation mode." *Energy conversion and management* 37 (5):629-636.
- Kumar, Sanjay, and GN Tiwari. 1996. "Performance evaluation of an active solar distillation system." *Energy* 21 (9):805-808.
- Kumar, Sanjeev, and GN Tiwari. 1998. "Optimization of collector and basin areas for a higher yield for active solar stills." *Desalination* 116 (1):1-9.
- Kumar, Sanjeev, GN Tiwari, and HN Singh. 2000. "Annual performance of an active solar distillation system." *Desalination* 127 (1):79-88.
- Kumar, Shiv, and Arvind Tiwari. 2008. "An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still." *International Journal of Energy Research* 32 (9):847-858.
- Kumar, Shiv, and GN Tiwari. 2009a. "Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still." *Solar Energy* 83 (9):1656-1667.
- Kumar, Shiv, and GN Tiwari. 2009b. "Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still." *Applied energy* 86 (10):1995-2004.
- Lawrence, SA, and GN Tiwari. 1990. "Theoretical evaluation of solar distillation under natural circulation with heat exchanger." *Energy Conversion and Management* 30 (3):205-213.
- Lu, Huanmin, John C Walton, and Andrew HP Swift. 2001. "Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds." *Desalination* 136 (1-3):13-23.
- Madhlopa, A., and C. M. Johnstone. 2009. "Numerical study of a passive solar still with separate condenser." *Renewable Energy* 34:1668-1677. doi: 10.1016/j.renene.2008.12.032.
- Mahmoudi, Hacene, Nawel Spahis, Sabah A Abdul-Wahab, Shyam S Sablani, and Mattheus FA Goosen. 2010. "Improving the performance of a Seawater Greenhouse desalination system by assessment of simulation models for different condensers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (8):2182-2188.
- Mathioulakis, E, and V Belessiotis. 2003. "Integration of solar still in a multi-source, multi-use environment." *Solar energy* 75 (5):403-411.
- Mink, G, L Horvath, EG Evseev, and AI Kudish. 1998. "Design parameters, performance testing and analysis of a double-glazed, air-blown solar still with thermal energy recycle." *Solar Energy* 64 (4-6):265-277.
- Mink, György, Mohamed M Aboabboud, and Etienne Karmazsin. 1998. "Air-blown solar still with heat recycling." *Solar energy* 62:317-309:(4)
- Monowe, P, M Masale, N Nijegorodov, and V Vasilenko. 2011. "A portable single-basin solar still with an external reflecting booster and an outside condenser." *Desalination* 280 (1-3):332-338.

- Nijegorodov, Nikolai, Pushpendra K Jain, and Stig Carlsson. 1994. "Thermal-electrical, high efficiency solar stills." *Renewable energy* 4 (1):123-127.
- Nishikawa, H, T Tsuchiya, Y Narasaki, I Kamiya, and H Sato. 1998. "Triple effect evacuated solar still system for getting fresh water from seawater." *Applied thermal engineering* 18 (11):1067-1075.
- Onyegegbu, SO. 1986. "Nocturnal distillation in basin-type solar stills." *Applied energy* 24 (1):29-42.
- Pandey, GC. 1984. "Effect of dried and forced air bubbling on the partial pressure of water vapour and the performance of solar still." *Solar energy* 33 (1):13-18.
- Prasad, Bhagwan, and GN Tiwari. 1996. "Analysis of double effect active solar distillation." *Energy conversion and management* 37 (11):1647-1656.
- Proctor, D. 1973. "The use of waste heat in a solar still." *Solar energy* 14 (4):433-449.
- Rahim, Nabil Hussain A. 1995. "Utilization of a forced condensing technique in a moving film inclined solar desalination still." *Desalination* 101 (3):255-262. doi: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(95\)00028-Z](https://doi.org/10.1016/0011-9164(95)00028-Z).
- Rai, SN, DK Dutt, and GN Tiwari. 1990. "Some experimental studies of a single basin solar still." *Energy conversion and Management* 30 (2):149-153.
- Rai, SN, and GN Tiwari. 1983. "Single basin solar still coupled with flat plate collector." *Energy Conversion and Management* 23 (3):145-149.
- Reddy, MS, DJ Navin Chandra, HK Sehgal, SP Sabberwal, Ashok Kumar Bhargava, and DS Jither Chandra. 1983. "Performance of a multiple-wick solar still with condenser." *Applied Energy* 13 (1):15-21.
- Refalo, Paul, Robert Ghirlando ,and Stephen Abela. 2016. "The use of a solar chimney and condensers to enhance the productivity of a solar still." *Desalination and Water Treatment* 57 (48-49):23024-23037.
- Sampathkumar, K, TV Arjunan, P Pitchandi, and P Senthilkumar. 2010. "Active solar distillation— A detailed review." *Renewable and sustainable energy reviews* 14 (6):1503-1526.
- Sanjeev, Kumar, and GN Tiwari. 1999. "Optimization of daily yield for an active double effect distillation with water flow." *Energy conversion and management* 4.715-703:(7) 0
- Schwarzer, Klemens, E Vieira da Silva, Bernhard Hoffschmidt, and T Schwarzer. 2009. "A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production." *Desalination* 248 (1-3):204-211.
- Scrivani, A, T El Asmar ,and U Bardi. 2007. "Solar trough concentration for fresh water production and waste water treatment." *Desalination* 206 (1-3):485-493.
- Shatat, Mahmoud IM, and Khamid Mahkamov. 2010. "Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modelling." *Renewable energy* 35 (1):52-61.
- Singh, AK, and GN Tiwari. 1993. "Thermal evaluation of regenerative active solar distillation under thermosyphon mode." *Energy conversion and management* 34 (8):6.706-97
- Singh, HN, and GN Tiwari. 2004. "Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions." *Desalination* 168:145-150.
- Singh, SK, VP Bhatnagar, and GN Tiwari. 1996. "Design parameters for concentrator assisted solar distillation system." *Energy Conversion and Management* 37 (2):247-252.
- Sodha, MS, Ashvini Kumar, and GN Tiwari. 1981. "Utilization of waste hot water for distillation." *Desalination* 37 (3):325-342.
- Tanaka, Hiroshi, and Yasuhito Nakatake. 2004" .A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector." *Desalination* 160 (2):195-205.
- Tanaka, Hiroshi, Yasuhito Nakatake, and Masahito Tanaka. 2005. "Indoor experiments of the vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector." *Desalination* 177 (1-3):291-302.

- Tchinda, René, Ernest Kaptoum, and Donatien Njomo. 2000. "Heat and mass transfer processes in a solar still with an indirect evaporator–condenser." *Energy conversion and management* 41 (1):93-107.
- Tiris, C, M Tiris, Y Erdalli, and M Sohmen. 1998. "Experimental studies on a solar still coupled with a flat-plate collector and a single basin still." *Energy conversion and management* 39 (8):853-856.
- Tiwari, GN. 1985. "Performance of solar still with intermittent flow of waste hot water in the basin." *Desalination* 52 (3):345-357.
- Tiwari, GN, and NK Dhiman. 1991. "Performance study of a high temperature distillation system." *Energy Conversion and Management* 32 (3):283-291.
- Tiwari, GN, Vimal Dimri, Usha Singh, Arvind Chel, and Bikash Sarkar. 2007. "Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system." *International Journal of Energy Research* 31 (15):1465-1482.
- Tiwari, GN, and HP Garg. 1985. "Effect of water flow over the glass cover of a single basin solar still with an intermittent flow of waste hot water in the basin." *Energy Conversion and Management* 25 (3):315-322.
- Tiwari, GN, and Ashok Kumar. 1988. "Nocturnal water production by tubular solar stills using waste heat to preheat brine." *Desalination* 69 (3):309-318.
- Tiwari, GN, Sanjay Kumar, PB Sharma, and M Emran Khan. 1996. "Instantaneous thermal efficiency of an active solar still." *Applied Thermal Engineering* 16 (2):189-192.
- Tiwari, GN, A Kupfermann, and Shruti Aggarwal. 1997. "A new design for a double-condensing chamber solar still." *Desalination* 114 (2):153-164.
- Tiwari, GN, and SA Lawrence. 1992. "Thermal evaluation of high temperature distillation under an active mode of operation." *Desalination* 85 (2):135-145.
- Tiwari, GN, and SB Sharma. 1991. "Analytical study of double-effect distillation under active mode of operation." *Energy* 16 (6):951-958.
- Tiwari, GN, SK Shukla, and IP Singh. 2003. "Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature." *Desalination* 154 (2):171-185.
- Tiwari, GN, and S Sinha. 1993. "Parametric studies of active regenerative solar still." *Energy conversion and management* 34 (3):209-218.
- Tiwari, GN, and Anil Kumar Tiwari. 2008. *Solar distillation practice for water desalination systems*: Anshan Pub.
- Tripathi, Rajesh, and GN Tiwari. 2005. "Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation." *Desalination* 173 (2):187-200.
- Velmurugan, V, J Mandlin, B Stalin, and K Srithar. 2009. "Augmentation of saline streams in solar stills integrating with a mini solar pond." *Desalination* 249 (1):143-149.
- Velmurugan, V, S Pandiarajan, P Guruparan, L Harihara Subramanian, C David Prabakaran, and K Srithar. 2009. "Integrated performance of stepped and single basin solar stills with mini solar pond." *Desalination* 249 (3):902-909.
- Velmurugan, V, and K Srithar. 2007. "Solar stills integrated with a mini solar pond—analytical simulation and experimental validation." *Desalination* 216 (1-3):232-241.
- Velmurugan, V, and K Srithar. 2008. "Prospects and scopes of solar pond: a detailed review." *Renewable and sustainable energy reviews* 12 (8):2253-2263.
- Voropoulos, K, E Mathioulakis, and V Belessiotis. 2001. "Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors." *Desalination* 138 (1-3):103-110.
- Voropoulos, K, E Mathioulakis, and V Belessiotis. 2003. "Solar stills coupled with solar collectors and storage tank—analytical simulation and experimental validation of energy behavior." *Solar Energy* 75 (3):199-205.
- Voropoulos, K, E Mathioulakis, and V Belessiotis. 2004. "A hybrid solar desalination and water heating system." *Desalination* 164 (2):189-195.

- Xiong, Jianyin, Guo Xie, and Hongfei Zheng" .2013 .Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface." *Energy conversion and management* 73:176-185.
- Yadav, YP. 1989. "Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector." *Desalination* 71 (2):151-164.
- Yadav, YP. 1991. "Analytical performance of a solar still integrated with a flat plate solar collector: thermosiphon mode." *Energy conversion and management* 31 (3):255-263.
- Yadav, YP. 1993a. "Performance analysis of a solar still coupled to a heat exchanger." *Desalination* 91 (2):135-144.
- Yadav, YP. 1993b. "Transient performance of a high temperature solar distillation system." *Desalination* 91 (2):145-153.
- Yadav, YP, and AS Prasad. 1995. "Performance analysis of a high temperature solar distillation system." *Energy conversion and management* 36 (5):365-374.
- Yadav, YP, and BP Yadav. 1998. "Transient analytical solution of a solar still integrated with a tubular solar energy collector." *Energy conversion and Management* 39 (9):927.930-
- Zhang, Lianying, Hongfei Zheng, and Yuyuan Wu. 2003. "Experimental study on a horizontal tube falling film evaporation and closed circulation solar desalination system." *Renewable energy* 28 (8):1187-1199.
- Zurigat, Yousef H, and Mousa K Abu-Arabi. 2" .004Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit." *Applied thermal engineering* 24 (7):1061-1072.

الفصل الثالث

الظواهر الفيزيائية الأساسية

في عملية التقطير

المحتوى: الفصل يحوي أهم الظواهر الداخلة في عملية

التقطير

(1) التبخير

(2) التكثيف

(3) الإشعاع الحراري

(4) الإشعاع الشمسي

مقدمة الفصل الثالث:

إن جهاز التقطير يعتمد في مبدأه على ظاهرتين أساسيتين وهما عمليتي التبخير والتكثيف مع مجموعة أخرى من الظواهر كالانتقال الحراري بجميع أنماطها، لذلك لفهم ما يحدث يجب إضافة ظواهر أخرى مكملة لعمل خلية التقطير، فالإشعاع الشمسي هو ظاهرة لا بد منها لعمل المقطر الشمسي، حيث عند امتصاص الإشعاع الحراري الشمسي من طرف السطح الأسود ومنه يسخن السطح ليتم بعدها تبخير الماء الملامس لهذا السطح. عملية التبخير تعتبر عملية مركبة من ظاهرتين، الظاهرة الأولى حرارية وهي تحول الطور من السائل إلى البخار، والظاهرة الثانية ميكانيكية والمتمثلة في ظهور فقاعات بخار والتي تسمى ظاهرة الغليان، يتصاعد البخار متوجها للزجاج الذي يعمل عمل مكثف، الزجاج له درجة حرارة أقل من درجة حرارة البخار المتصاعد فتقع له إسالة وتشكل قطرات، ومنه فإن عملية التكثيف مركبة من ظاهرتين الأولى حرارية وهي الإسالة التي تمثل تحول طور البخار إلى طور سائل، أما الظاهرة الثانية هي ظاهرة ميكانيكية وهي ظاهرة التقطير. ومنه يمكن الوصول إلى النتيجة التالية: لفهم عملية التقطير يجب التفصيل في الظواهر الأساسية والتي هي:

التبخير والتكثيف والإشعاع الحراري والإشعاع الشمسي بشكل عام.

(1) التبخير**(1-1) تعريف عام لظاهرة التبخير:**

تعد ظاهرة التبخير من بين الظواهر الأساسية في الفيزياء، تحوي هذه الظاهرة نوعا من التعقيد لارتباطها باليتين أساسيتين الأولى تحتاج إلى حرارة عالية ألا وهي التبخر، بينما تحتاج الثانية إلى عمل ميكانيكي وهي آلية الغليان، وتتم ظاهرة التبخر عادة في الجزء العلوي أو السطح الحر للسائل بعكس ظاهرة التكثيف، وللإلمام بهذه الظاهرة يجب القيام بدراسة مكثفة لكل من عملية التبخر التي تكون بطيئة نوعا ما وتحدث تلقائيا عند أي درجة حرارة وضغط، وآلية الغليان التي تتطلب فترة زمنية قصيرة وتحدث تحت درجة حرارة وضغط معين كذلك وتتضمن هذه الأخيرة مجموعة من المراحل تم تلخيصها في مخطط "Nukyama" ويعتبر الغليان المنبع الأساسي لفهم سلوك تشكل الفقاعات وتأثير ما يسمى بقوة الشد السطحي على هذه الأخيرة، وفي موضوعنا هذا سنتطرق إلى دراسة مكثفة لكل من هاتين الآليتين على حدى وبما أن آلية التبخر هي المبدأ المهم لعملية التبخير فيجب إعطاء نبذة مفصلة على هذه العملية كما هو مفصل من طرف الباحث (Burmeister 1993)¹ كالتالي:

¹ Burmeister, Louis C. 1993. *Convective heat transfer*. John Wiley & Sons.

1-2) آلية التبخير: بما أن آلية التبخير آلية معقدة نوعا ما فانه لدراسة هذه الظاهرة يجب التطرق إلى

مجموعة من تعاريف ومعطيات وفرضيات أعطيت استنادا لتجارب سابقة وهي كالتالي:

التعريف 1: في حالة أنبوب به سائل ساخن مغمور في مكان به سائل بارد نلاحظ تشكل فقاعات من بخار الماء على السطح الساخن.

التعريف 2: يتلقى السائل حرارة من السطح الساخن المحيط به عن طريق الحمل الحراري.

التعريف 3: ينتقل جزء من الحرارة من السائل إلى الفقاعات حيث تعمل على زيادة آلية التبخير من سطح الفقاعة إلى الفقاعة بذاتها.

التعريف 4: لكي يتم تحرير الفقاعة من القوى التي تربطها بالسطح الساخن للأنبوب وبذلك صعودها إلى أعلى يجب أن تكون قوة الشد السطحي كافية بين الفقاعة والسائل.

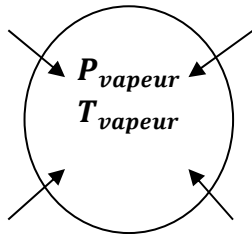
التعريف 5: عملية التبخير تحدث بوجود سطح ساخن مهما كان شكله، والأشكال الخاصة والتي محل دراسة هي سطح خارجي لأنبوب أو سطح مستوي.

التعريف 6: عملية التبخير التي تحدث في الجهاز المنتج للماء المقطر تعتمد عموما على سطح ساخن مستوي على شكل حوض لونه أسود غير براق ماص للإشعاع الشمسي الحراري.

التعريف 7: حسب التجارب العملية في أجهزة إنتاج الماء المقطر بالإشعاع الشمسي التي تسمى اختصارا المقطرات الشمسية، أثبتت هذه التجارب أن عملية الغليان تكون دون درجة حرارة الغليان بما يسمى بالغليان الدوني، والذي سوف يشرح بإسهاب في الفقرات اللاحقة.

فرضية كلفن: وهي إن تكون درجة حرارة التشبع داخل الفقاعة T_{vapeur} أقل من درجة حرارة السائل

المحيط بها $T_{liquide}$ كشرط لحدوث هذه الظاهرة. ($T_l > T_v$)



$P_{liquide}$
 $T_{liquide}$

$P_{liquide} > P_{vapeur}$
 $\Rightarrow T_{liquide} > T_{vapeur}$

ومنه الحرارة تنتقل من السائل إلى البخار



الشكل (3-1): اتجاه انتقال الحرارة (من السائل للبخار داخل الفقاعة)

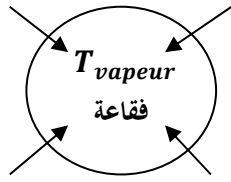
تفسير فرضية كلفن: يمكن لفرضية كلفن التحقق، إذ أن الطبيعة الكروية للفقاعة تتسبب في إيجاد قوى سطحية للسائل على الفقاعة، بحيث يكون ضغط التشبع داخل الفقاعة أقل من ضغط السائل المحيط بها. ونتيجة لذلك تكون درجة حرارة تشبع البخار داخل الفقاعة أقل من تلك للسائل المحيط بها، مما يتسبب في تدفق الحرارة من السائل المحيط بالفقاعة إلى الفقاعة ذاتها.

التعريف 8: تتحكم طبيعة ونسيج وخشونة السطح بالنسبة للسطح الخارجي للأنبوب أو السطح المستوي

الساخنين في إنتاج الفقاعات، حيث كلما زادت الخشونة زادت النتوءات والتضاريس ونفس الشيء فإن هناك فعالية للمادة المصنوع منها السطح الساخن.

التعريف 9: لقد وجدت طبقة من السائل قريبة من السطح الساخن درجة حرارتها أعلى من درجة التشبع.

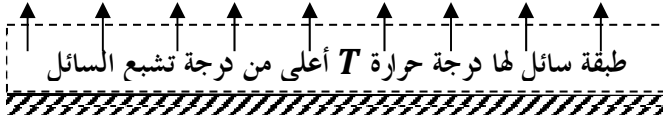
وتقل درجة حرارة تسخين هذه الطبقة كلما زادت درجة خشونة السطح. أما في التقطير الشمسي فتبقى درجة حرارة السائل أقل أو تساوي درجة حرارة السطح المستوي الساخن وذلك لأن الغليان يحدث قبل الوصول لدرجة التشبع، والذي يسمى بالغليان الدوني.



سائل له درجة
حرارة تشبع
 $T_{liquide}$

$$T > T_{liquide}$$

ومنه الحرارة تنتقل من طبقة السائل إلى السائل المحيط بالفقاعة



الشكل (2-3): وجود طبقة قريبة من السطح الساخن درجة حرارتها أكبر من درجة حرارة التشبع

التعريف 10: يتم انتقال الحرارة في عملية التبخير عن طريق خليط من انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي من السائل إلى داخل الفقاعة، ويتولد حمل قسري إضافي من تدفق الفقاعات إلى السطح الحر للسائل.

التعريف 11: وإذا كان فرق درجة الحرارة بين السطح الساخن (أنبوب أو سطح مستوي) والسائل المغلي بسيطاً، فإن الفقاعات تتشكل ببطء، ويكون معدل انتقال الحرارة من السائل للفقاعات مساوياً للحمل الحر الناتج من حركة الفقاعات.

عبارة رقم **Nusselt**: بالنسبة لحمل حر على أنبوب أفقي قطره الخارجي D_0 رقم Nusselt يساوي ما يلي:

$$Nu = 0,47(Gr.Pr)^{0,25} \quad (1 - 3)$$

$$\Rightarrow \frac{h_c \cdot D_0}{k_f} = 0,47 \left(\left(\frac{D_0^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu_f^2} \right) \left(\frac{\mu_f C_f}{k_f} \right) \right)^{0,25} \quad (2 - 3)$$

رقم Prandtl يعطى كما يلي:

$$Pr = \frac{\mu_f C_f}{k_f} = \frac{(\mu_f / \rho_f)}{(k_f / \rho_f \cdot C_f)} = \frac{\nu_f}{a_f} = \frac{\text{الانتشارية الحركية}}{\text{الانتشارية الحرارية}} \quad (3 - 3)$$

رقم Grashof يعطى كما يلي:

$$Gr = \frac{D_0^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu_f^2} = \frac{D_0^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu_f^2 / \rho_f^2} = \frac{g \cdot D_0^3}{\nu_f^2} \beta \cdot \Delta T \quad (4 - 3)$$

حيث جداء رقم Grashof ورقم Prandtl يعطي رقم Rayleigh:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \left(\frac{g \cdot D_0^3}{\nu_f^2} \beta \cdot \Delta T \right) \left(\frac{\nu_f}{a_f} \right) = \frac{g \cdot D_0^3}{a_f \cdot \nu_f} \beta \cdot \Delta T \quad (5 - 3)$$

حيث في المعادلة (2 - 3) يعبر المقدار h_c عن معامل الانتقال الحراري بالحمل الحر، و β هو معامل التمدد الحراري وكل الخواص الطبيعية يتم تقديرها عند درجة الحرارة المتوسطة للشريط، وتساوي:

$$T_f = \frac{(T_s + T_l)}{2}$$

يمكن حساب كمية البخار المنتج من الفقاعات المتصاعدة بالعلاقة التالية:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ev} &= h_c (T_s - T_{sat}) = \dot{m}_v L_{ev} \\ \dot{m}_v &= \frac{h_c (T_s - T_{sat})}{L_{ev}} \end{aligned} \quad (6 - 3)$$

3-1 قوة الشد وتأثيرها في تكوين الفقاعات:

تعريف قوة الشد: يتأثر أي جزيء من الجزيئات الموجودة داخل السائل إلى مجموعة من قوى الجذب في كل الاتجاهات، وتكون محصلة هذه القوى صفر، أما الجزيئات الموجودة على السطح الحر للسائل فإنها تتعرض للقوى فعالة تسمى قوى التماسك واتجاهها عمودي على سطح الحر للسائل، وبما أن قوة الجزيئات الموجودة على السطح الحر تكون أعلى من تلك الموجودة داخل السائل، لذا يتطلب لتحريك هذه الأخيرة من داخل السائل إلى السطح الحر للسائل عملاً ضد هذه القوى العمودية على سطح السائل.

ومنه نستخلص أن مفهوم الشد السطحي: هو العمل اللازم بذله لتحريك الجزيئات من داخل السائل إلى

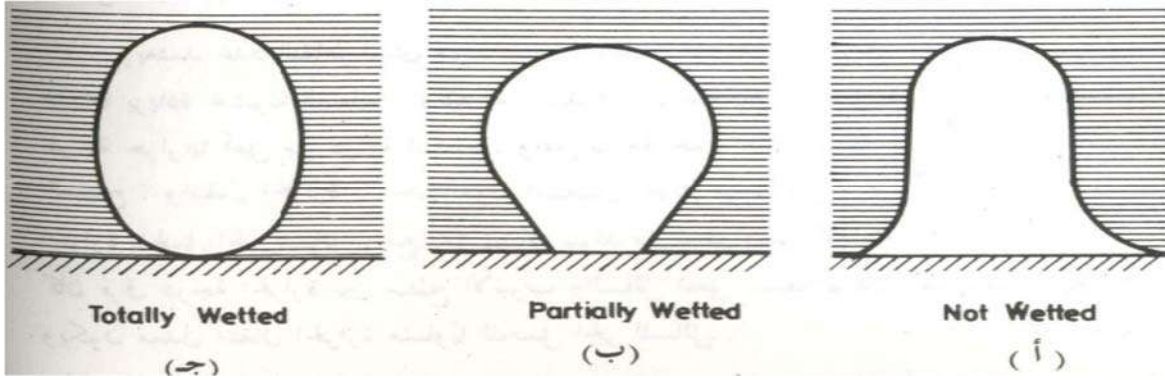
سطحه، والعمل محسوب لوحدة المساحات، وبالتالي يمكن استنتاج أن وحدة الشد السطحي: $\frac{N \cdot m}{m^2} = \frac{N}{m}$.

وفي ظاهرة الغليان يتأثر معدل انتقال الحرارة بطبيعة سطح التسخين وقوة الشد السطحي، والجدول التالي به مقدار الشد السطحي σ للماء الملامس للهواء محسوب بالوحدة (N/m) حسب درجة الحرارة:

48,9	37,8	32,2	26,7	21,1	15,6	10,0	4,4	0,0	$T(^{\circ}C)$
0,0680	0,0699	0,0709	0,0718	0,0725	0,0735	0,0741	0,0750	0,0756	الشد السطحي

أما تأثير قوة الشد السطحي على تكوين الفقاعة ونموها يشير على القدرة الترتيبية للسائل مع السطح وهذا يؤثر على زاوية التلامس بين الفقاعة والسطح كما هو موضح في الشكل (3-3)، ومن الدراسات السابقة وجد أن قوة الشد السطحي للماء الملامس للهواء تساوي $0,0720 N/m$ عند درجة حرارة الغرفة، أما معظم المواد العضوية تتراوح قوة شدتها السطحي ما بين $0,0030N/m \rightarrow 0,0020$ عند درجة حرارة الغرفة. وقوة الشد السطحي لمعظم السوائل الملامسة للأجسام المعدنية تختلف عن قيمتها عند ملامستها للهواء، ومنه معدل تبخر الماء أكبر من ذلك للمواد العضوية عند نفس الظروف. وفي حالة ما إذا كانت قيمة قوة الشد السطحي σ للسائل منخفضة، فإنه يميل إلى ترطيب السطح بحيث تندفع الفقاعة بواسطة السائل، وترتفع ويقوم السائل بقصها ويتحول شكلها إلى بيضاوي أو كروي كما هو موضح في الشكل (3-3 ج) مرطب كلياً. وفي حالة السوائل ذات قوة الشد السطحي متوسط، فإن السطح يكون مرطب جزئياً ويمكن أن يكون هناك توازن لحظي بين الفقاعة والسطح الساخن كما في الشكل (3-1 ب)، بحيث يجب تكوين فقاعات أكبر قبل أن تستطيع قوة الطفو من تحريرها من السطح، أما بالنسبة للشكل (3-1 أ) والذي يكون فيه السطح الساخن جاف وغير مرطب وتعمل القوى الهيدروستاتيكية بمقاومة فعل الطفو.

تكوّن الفقاعة كما هو موضح في الشكل (3-3 ج) يعطي معدل انتقال حرارة كبير مقارنة بأشكال الفقاعة (3-3 أ)، (3-3 ب)



الشكل (3-3): تأثير البلل السطحي على زاوية التصاق الفقاعة.

4-1 تجربة "Nukyama" للغليان البرّكي: لقد قام الباحثون بالعديد من الدراسات والتجارب حول آلية الغليان والباحث "Nukyama" أول من حدد أنواع الغليان من خلال قيامه بعدة تجارب مخبرية حيث قام بقياس الفيض الحراري المنتقل في سلك أفقي مسخن كهربائياً مغمور في حوض مائي في درجة حرارة التشبع، وقد توصل "Nukyama" إلى معرفة أربعة أنواع من الغليان كما هو موضح في الشكل (3-4).

1-4-1 تفسير المنحني: ينقسم المنحني إلى أربعة مناطق محددة حيث تمثل كل منطقة نوع من أنواع الغليان وهذه الأنواع هي: غليان الحمل الحر الطبيعي والغليان المنوي والغليان الانتقالي والغليان الغشائي

- المنطقة I غليان الحمل الحراري الطبيعي (بين نقطة البداية والنقطة A): وفي هذا المنطقة تكون درجة الحرارة الزائدة أقل من خمس درجات مئوية ($\Delta T_{excess} < 5^\circ\text{C}$) وصولاً إلى النقطة (A) في شكل (3-5)، وتكون درجة حرارة سطح السلك (T_s) أعلى بضع درجات فقط من درجة حرارة السائل المشبع المحيط (T_{sat}) وترجع حركة الماء في هذه المنطقة إلى تيارات الحمل الطبيعي فقط، ولن يبدأ نشوء الفقاعات إلا عند النقطة (A) التي تشير إلى بداية الغليان المنوي. (Tadrist et al. 2020)¹

- المنطقة II الغليان المنوي المنفصل (بين نقطة A والنقطة B): يتم هذا النوع من الغليان عندما يكون الفيض الحراري ($5^\circ\text{C} < \Delta T_{excess} < 30^\circ\text{C}$) وتنقسم هذه المرحلة إلى قسمين: القسم الأول ممثل بالخط-A) وفيها تتشكل فقاعات منفردة تنفصل عن سطح التسخين وتبتدد وتختفي قبل الوصول إلى السطح السائل الحر، وتحدث إثارة وتقليب ناتج عن انحباس السائل إلى السطح الساخن وهو مسؤول بشكل أساسي إلى زيادة قيمة معامل انتقال الحرارة (Rabhi et al. 2021)².

¹ Tadrist, Lounès, Hervé Combeau, Mohammed Zamoum, and Mohand Kessal. 2020. "Experimental study of heat transfer at the transition regime between the natural convection and nucleate boiling: Influence of the heated wall tilt angle on the onset of nucleate boiling (ONB) and natural convection (ONC)." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 151: 119388.

² Rabhi, Achref, Ioanna Aslanidou, Konstantinos Kyprianidis, and Rebei Bel Fdhila. 2021. "Onset of Nucleate Boiling Model for Rectangular Upward Narrow Channel: CFD Based Approach." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 165: 120715.

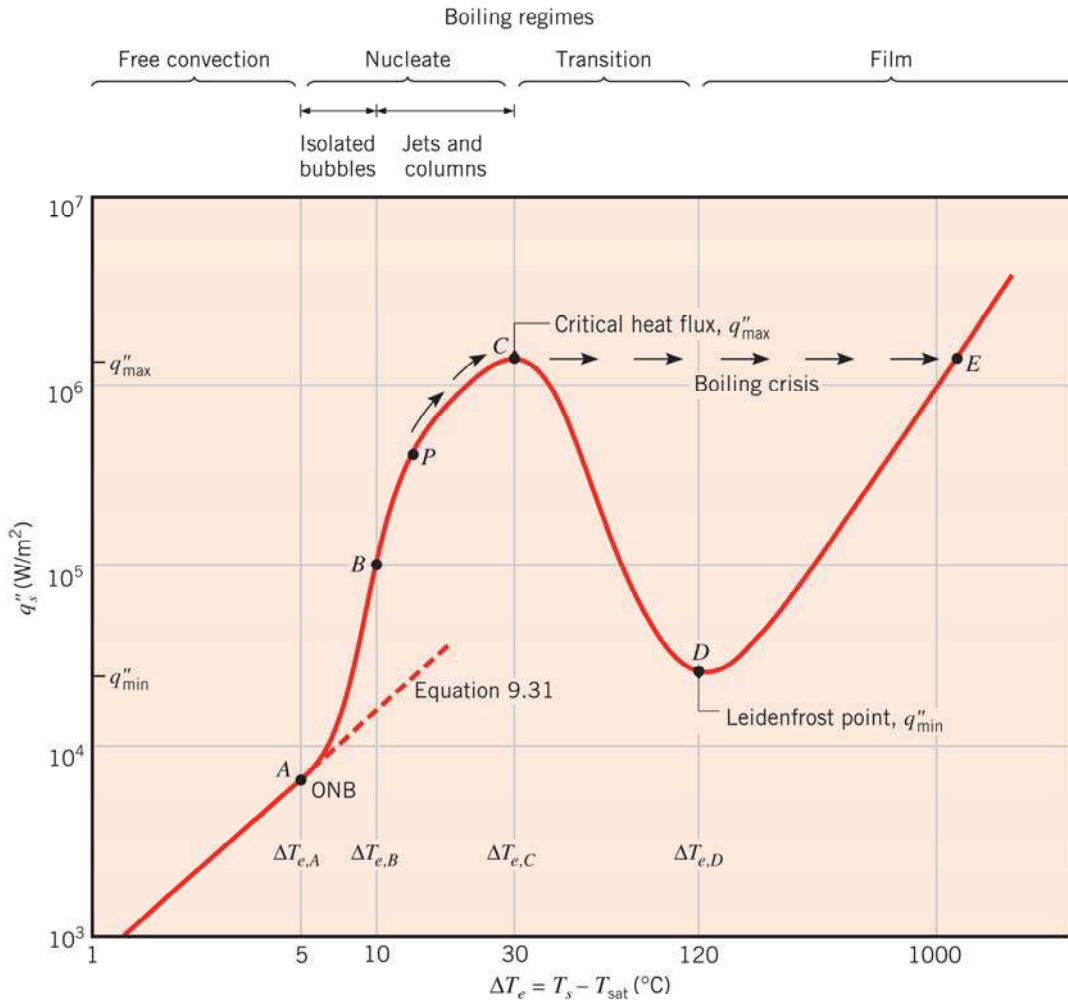
- المنطقة III الغليان المنوى المتصل (بين نقطة B النقطة C): أما بالنسبة للقسم الثاني الممثل بالخط (B-C) فعند ارتفاع درجة الحرارة الزائدة إلى ما بعد النقطة B تتشكل أعمدة من الفقاعات بمعدل متزايد صاعدة باتجاه سطح الماء لتحرر البخار إلى المحيط الخارجي. وفيه يصل الفيض الحراري إلى أعلى قيمة له عند النقطة (C) وتسمى هذه النقطة بالنقطة الفيض الحراري الأقصى أو الفيض الحراري الحرج (q''_{max})، ويتميز الغليان المنوى بمعامل انتقال حرارة عالي نسبيا خاصة عند القيم المنخفضة لدرجة الحرارة الزائدة (Raut et al. 2022)¹.

- المنطقة IV الغليان الانتقالي (بين نقطة C والنقطة D):

يحدث هذا الغليان عند درجات الحرارة ($120^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$) ، والممثل بالخط (C-D) وتسمى هذه المرحلة بمرحلة الغليان الانتقالي أو الغليان الغشائي الغير مستقر وهذا راجع إلى أن الغليان في هذه المرحلة يكون متقلب من غليان منوى إلى غليان غشائي والعكس حيث تكون هناك زيادة في درجة الحرارة الزائدة ΔT_{excess} إلى ما بعد النقطة C، وينخفض الفيض الحراري وذلك لتشكيل عدد كبير من الفقاعات مما يؤدي إلى تغطية جزء كبير من السطح الساخن بغشاء من البخار ويعمل هذا الغشاء بمثابة عازل وبالتالي يحصل تباطؤ في عملية نقل الحرارة من السطح الساخن إلى الماء وعند بلوغه إلى النقطة D يجل الغليان الغشائي محل الغليان النووي بشكل تام (Nishant Ranjan Sinha et al. 2020)².

¹ Raut, Harshal S., Amitabh Bhattacharya, and Atul Sharma. 2022. "Sustaining nucleate boiling in zero gravity using asymmetric sinusoidal base-plate oscillation." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184: 122262.

² Nishant Ranjan Sinha, Kumar, Durgesh Ranjan, Nirbhay Kumar, Md Qaisar Raza, and Rishi Raj. 2020. "Simultaneous audio-visual-thermal characterization of transition boiling regime." *Experimental Thermal and Fluid Science* 118: 110162.



الشكل (3-4): منحني غليان الماء عند الضغط الجوي (Bergman et al. 2011)¹

– المنطقة V الغليان الغشائي (بين نقطة D والنقطة E): تتم هذه المرحلة ما بعد النقطة D ويصبح السطح الساخن مغطى بالكامل بواسطة غشاء بخاري ثابت ومستقر ويبلغ عندها الفيض الحراري قيمته الدنيا (q''_{min}) وتسمى نقطة "Leidenfrost" وأطلقت تكريماً للباحث "Leidenfrost" وفي سنة 1756 لاحظ هذا الباحث قطرات من الماء الملاصقة لغشاء البخار فوق سطح الساخن تتحرك حوله ثم تغلي وتبتعد ببطء، أي ارتفاع لدرجة الحرارة السطح إلى ما بعد نقطة D سيؤدي إلى زيادة الفيض الحراري تبعاً لمقدار درجة الحرارة الزائدة ΔT_{excess} وراجع سبب هذه الزيادة إلى ارتفاع معدل انتقال الحرارة خلال الغشاء نتيجة الإشعاع الحراري المنبعث من السطح الساخن (Chen et al. 2021)².

1-4-2) أنواع الغليان: هناك نوعان رئيسيان من الغليان وهما الغليان البركي والغليان القسري:

¹ Bergman, Theodore L, Frank P Incropera, David P DeWitt, and Adrienne S Lavine. 2011. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.

² Chen, Lin, Fengchu Jin, Jiahua Li, Yanchao Lv, Qingyang Wang, Deyin Zheng, Haizhen Xian, and Jun Lin. 2021. "Hybrid model of thin film boiling: Insights into the unique behavior and ultrahigh heat flux." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 179.121702

1-2-4-1) الغليان البركي (Pool Boiling):

يحدث هذا الغليان في وعاء في حالة غياب تدفق السوائل السائبة، وأي حركة للسائل ترجع إلى تيارات الحمل الطبيعي وحركة الفقاعات الناشئة تحت تأثير الطفو (Wang et al. 2021)¹.

2-2-4-1) الغليان الحمل الحراري القسري (Forced Convection Boiling):

يحدث هذا النوع من الغليان في السوائل المدفوعة والتي تتدفق بالجلملة، فوق الأسطح الساخنة أو داخل أنبوب ساخن أيضا باستخدام وسائل خارجية مثل المضخة، ويتأثر هذا النوع من الغليان بتيارات الحمل الحراري القسري، أو الحمل الحراري الطبيعي وزيادة لذلك تأثيرات الغليان البركي. ويصنف الغليان أيضا حسب درجة حرارة السائل:

3-2-4-1) الغليان شبه المبرد أو الغليان الدوني (Subcooled Boiling):

في هذه الحالة تكون درجة حرارة السائل اقل من درجة حرارة التشبع، وعليه فان الفقاعات المتشكلة لدى السطح قد تتكاثف وتختفي في السائل.

4-2-4-1) الغليان المشبع (Saturated Boiling):

وفي هذه الحالة تكون درجة حرارة السائل مساوية لدرجة حرارة التشبع، وفيه تحرر الفقاعات من السطح السائل إلى المحيط الخارجي (Liu et al. 1991)².

3-4-1) النقاط الحرجة في منحنى الغليان: يوجد نقاط حرجة في المنحنى وهي

1-3-4-1) الفيض الحراري الحرج: تقع قيمة الفيض الحراري القصوى أو الفيض الحراري الحرج (q''_{max})

عند النقطة (C) الموضحة في الشكل (3-5) لحرق، و عند هذه النقطة يبدأ الانتقال من الغليان المنوي إلى الغليان الغشائي وتكون العملية خلف هذه النقطة غير مستقرة إلى أن يبلغ النقطة E التي تكون ذات درجة حرارة عالية وهي عادة فوق درجة انصهار السلك وإذا كان هذا المعدن غير محدد بهذه النقطة فان السلك سوف ينصهر ، ولهذا السبب يطلق على النقطة (C) بنقطة الاحتراق ولتجنب هذه الظاهرة يجب أيضا تصميم معدات للغليان تمتلك درجة انصهار عالية (Calus et al. 1974)³.

¹ Wang, Chenglong, Panxiao Li, Dalin Zhang, Wenxi Tian, Suizheng Qiu, G. H. Su, and Jian Deng. 2021. "Experimental study on the influence of heating surface inclination angle on heat transfer and CHF performance for pool boiling." *Nuclear Engineering and Technology*.

² Liu, Z, and RHS Winterton. 1991. "A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation." *International journal of heat and mass transfer* 34 (11): 2759-2766.

³ Calus, WF, and DJ Leonidopoulos. 1974. "Pool boiling—binary liquid mixtures." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17 (2): 249-256.

1-4-3-2) الفيض الحراري الأدنى: تعتبر قيمة الفيض الحراري الأدنى بداية الغليان الغشائي الذي يحدث عند نقطة "Leidenfrost" ، وعليه يكون تحديد الفيض الحراري الأدنى ضروريا في تصميم أسطح التسخين، ويعود سبب ذلك إلى أن تدني قيمة الفيض الحراري إلى اقل من هذه النقطة سيؤدي إلى تفكك الغشاء ومن ثم تبريد سطح التسخين مسببا بذلك إعادة بدء الغليان المنوي (Cai et al. 2020)¹.

1-5) اتزان القوى على فقاعة البخار: لوحظ من التجارب أن الفقاعات لا تكون دوما في توازن ديناميكي حراري بسائل المحيط، أي أن البخار داخل الفقاعة لا يكون له نفس درجة حرارة السائل، ويمكن دراسة ذلك على فقاعة بخار كروية كما هو موضح في الشكل (3-6)، حيث أن قوى الضغط على الفقاعة يجب أن يتوازن بالشد السطحي عند السطح البيني بخار-سائل (He et al. 2020)² بالعلاقة التالية:

$$\pi r^2 (P_v - P_l) = 2\pi r \sigma \quad (7-3)$$

$$(P_v - P_l) = \frac{2\sigma}{r} \quad (8-3)$$

حيث:

P_v : يمثل الضغط البخار داخل فقاعة.

σ : شد السطحي لسطح بيني بخار-سائل

P_l : يمثل ضغط السائل فوق سطح الفقاعة

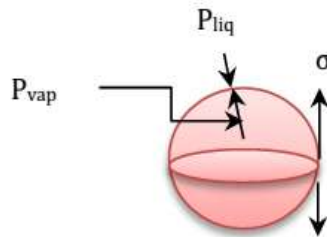
r : نصف قطر الفقاعة

قوة الضغط = قوة الشد السطحي

Pressure force = Surface tension force

$$\pi r^2 (P_{vap} - P_{liq}) = 2\pi r \sigma$$

$$P_{vap} - P_{liq} = 2\sigma/r$$



شكل (3-5): اتزان القوى على فقاعة البخار

¹ Cai, Chang, Issam Mudawar, and Hong Liu". 2020. Mechanistic method to predicting minimum heat flux point wall temperature in saturated pool boiling." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 156: 119854.

² He, Hui, Liang-ming Pan, Lie Wei, Mu-hao Zhang, and Ding-fei Zhang. 2020. "On the importance of non-equilibrium effect in microchannel two-phase boiling flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 149: 119185.

1-6 حالات الفقاعة بعد التحرر من السطح الساخن:

حالة 1 (ثبات حجم الفقاعة): بمعنى أن الفقاعة لا تنمو ولا تنهار ويحدث هذا في حالة اتزان الضغط ($P_L = P_V$) ودرجة الحرارة ($T_L = T_V$) أي أن درجة الحرارة داخل الفقاعة يساوي درجة حرارة التشبع.

حالة 2 (نقصان حجم الفقاعة): إذا كانت درجة حرارة السائل T_L أقل من درجة حرارة البخار T_V ، أي أن ($T_V > T_L$) ومنه ستنتقل الحرارة من داخل الفقاعة إلى السائل فيتكاثف بعض البخار داخلها مما يؤدي إلى انهيار الفقاعة.

حالة 3 (زيادة حجم الفقاعة): إذا كانت درجة حرارة السائل T_L أعلى من درجة حرارة البخار T_V يعني ($T_V < T_L$)، ومنه ستنتقل الحرارة من السائل إلى داخل الفقاعة فينمو حجمها ويزداد ثم ترتفع إلى السطح الحر للسائل.

الحالة الأكثر حدوثاً هي الحالة 1، أما الحالة 3 يطلق عليها اسم الحالة شبه المستقرة، ولقد تم ملاحظة هذه الحالة عملياً، ونسب إليها نمو الفقاعة بعد انفصالها من السطح الساخن في مناطق الغليان المُنَوَّى. ويمكن مشاهدة عدة مراحل لآلية الغليان إذا غمرنا سلكاً نحاسياً أفقياً (يسخن من أحد أطرافه) في محلول إيزوبروبانول، وبسبب وجود التدرج أو الانحدار الحراري نتيجة تسخين طرف واحد من السلك فمكنا أن نلاحظ عدة مراحل متزامنة للغليان. ويمكن التحكم في درجة حرارة الطرف الآخر بحيث تكون درجة حرارة السطح هناك أعلى قليلاً من درجة حرارة بدن السائل بحيث يتولد غليان بالحمل الحر عند هذا الطرف. وتزداد درجة الحرارة بطبيعة الحال كلما اتجهنا إلى ناحية الطرف المسخن، وبالتالي يمكن أن تتولد في هذه المنطقة عملية غليان مُنَوَّى. ومع زيادة درجة الحرارة بعد تجاوز هذه المنطقة يمكن للغليان أن يتحول تدريجياً على طول السلك الساخن إلى مرحلة الغليان الغشائي عند الطرف الساخن. وبزيادة درجة حرارة السطح تدريجياً، عن طريق زيادة التسخين عند مقطع الغليان المُنَوَّى، يمكن أن تبدأ الفقاعات المنفصلة في الالتحام، بعد ذلك يتحول الغليان إلى النوع الانتقالي، وفي النهاية عند ارتفاع درجة الحرارة إلى مستوى معين يصبح المقطع مغطى تماماً بغشاء من البخار، بعد ذلك يبدأ البخار في الانطلاق من السطح الساخن على هيئة فقاعات كبيرة الحجم (He et al. 2020)¹.

للحصول على شكل (3-5) عن طريق الزيادة التدريجية في درجة حرارة سطح سلك نحاسي T_s مثلاً. إذا رفعت درجة الحرارة T_s ببطء ثم ثبتت، فمن الممكن الوصول إلى أي نقطة من المنحني في هذا الشكل. أما إذا تم رفع قيمة الطاقة الكهربائية المستخدمة في تسخين السلك النحاسي S ببطء، فإنه لا يمكن الاحتفاظ

¹ He, Hui, Liang-ming Pan, Lie Wei, Mu-hao Zhang, and Ding-fei Zhang. 2020. "On the importance of non-equilibrium effect in microchannel two-phase boiling flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 149: 119185.

بنقط متزنة بين النقطتين C و D. وفي مثل هذه الحالة، فإن زيادة الفيض الحراري عن قيمته الحرجة عند النقطة D سوف يؤدي إلى انتقال تدميري سريع إلى نقطة الغليان العشوائي، عندها يمكن أن تصل قيمة فائض الحرارة إلى درجة كافية لصهر سطح الغليان.

1-7) آلية تشكل فقاعات البخار: تعتبر آلية تشكل فقاعات البخار ونموها من أساسيات ظاهرة الغليان وتحدث هذه آلية عند انتقال الحرارة من سائل إلى السطح البيني للسائل والبخار، وإذا ظل ضغط السائل ثابت، فمن معادلة ائزان الفقاعة الكروية نلاحظ أن ضغط ودرجة حرارة البخار داخل الفقاعة ينخفضان، وبالتالي ينتج فرق في درجة الحرارة بين السائل والبخار، مع انفصال الفقاعة عن السطح الساخن وارتفاعها، وكلما ارتفعت أكثر تناقصت درجة حرارة السائل. وعند وصول الفقاعة إلى منطقة تكون فيها درجة الحرارة داخلها أكبر من درجة حرارة السائل المحيط بما كما تنتقل الحرارة إلى خارج الفقاعة مما يؤدي إلى انهيارها، فمن الممكن أن تصل عملية نمو الفقاعة إلى حالة ائزان عند أحد المواضع داخل السائل. أما إذا كان السائل محمي بدرجة كافية، فإن الفقاعات تكون لديها الفرصة للوصول إلى سطح السائل الحرق قبل أن تنهار. وقد وقع الباحثون في جدل وخلاف على آلية تكون الفقاعات بدقة على السطح الساخن، وقد وجدت عوامل عدة تؤثر على شكل الفقاعات ونموها وانتقال الحرارة في الغليان. وهذا جعل مهمة الوصول إلى معادلة أو معادلتين بسيطتين لتفسير هذه الظاهرة أمرا عسيرا للغاية. أما هذه العوامل فهي كما يلي:

1- طبيعة السطح وتوزيع الفقاعات.

2- الخواص الطبيعية للمائع، مثل قوة الشد السطحي ومعامل التمدد ومعامل اللزوجة.

3- تأثير فرق درجة الحرارة على تولد الفقاعات وانطلاقها.

قبل تقديم علاقات معينة لحساب انتقال الحرارة بوساطة آلية الغليان، يمكن أن يقترح مراجعة ما سبق ذكره وربطه بما يمكن ملاحظته من مشاهدة تجرية بسيطة للغليان. وكمثال عن ذلك، يمكن أن نشاهد ما يحدث مثلا في عملية الغليان داخل قدر مملوء بالماء فوق موقد منزلي حتى نحصل على الإحساس اللازم لتفهم عملية الغليان (Van den Bergh et al. 2022)¹.

¹ Van den Bergh, W. J., J. Dirker, C. N. Markides, and J. P. Meyer. 2022. "Influence of non-steady transient heat flux on flow boiling heat transfer and pressure drop in horizontal pipes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 182: 121927.

(2) التكثيف

1-2) تعريف عام لظاهرة التكثيف: يوجد المائع في الطبيعة على هيئة بخار، أو سائل، وتسمى عملية تحويل المائع من الطور السائل إلى الطور البخاري بالتبخير، في حين تسمى عملية تحويل البخار إلى سائل بالإسالة. ومن هنا يمكن القول إن عملية التكثيف هي عمليتين، عملية حرارية تتمثل في الإسالة وعملية ميكانيكية تتمثل في التقطير. و هناك تماثل بين كميات الحرارة المتبادلة في كل من عمليتي التبخر والإسالة لوحدة الكتل من مائع ما، و عند ثبوت الضغط فإن تحول المائع النقي من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية يتم عند درجة حرارة محددة، تسمى بدرجة حرارة التشبع أو درجة حرارة اتزان هذا الضغط، و لما كان انتقال الحرارة مرتبط بعملية تحويل البخار إلى سائل يتم عادة عند ضغط ثابت أو شبه ثابت في العمليات الصناعية لذلك فإن عملية تبخير المركبات المفردة و تكثيفها يتم عادة عند درجة حرارة ثابتة أي إيزوتارمية، و في حالة عزل البخار بعد تكونه و منع الاتصال بينه و بين السائل، فإن كمية الحرارة المنتقلة إلى البخار سوف تؤدي حتما إلى تحميته. أثناء عملية التحمية، يكون سلوك البخار مشابها للغازات الأخرى (Poredoš et al. 2022)¹ (Cao et al. 2022)². أما إذا كانت العملية تتضمن تكثيف خليط من عدة أبخرة، بدلا من بخار مفرد، فإن التغيير لا يتم من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة عند درجة حرارة ثابتة رغم تثبيت الضغط. وتختلف المعالجة العامة للخليط من الأبخرة في بعض الجوه، عن المعالجة الخاصة بالمركبات المفردة، وسوف تتم دراسة هذا الموضوع لاحقا على أساس قاعدة الأطوار التي وضعها ويلارد جيسس. (Le et al. 2022; Park et al. 2022)³.

أما معدلات انتقال الحرارة أثناء عملية التكثيف فتختلف تبعا لإتباع أي من الآليتين الفيزيائيتين، واللتين سوف يتم ذكرهما لاحقا. ونعني بذلك التكثيف النقطي والتكثيف الغشائي. ويتأثر معامل التكثيف الغشائي بتضاريس السطح الذي تتم عليه عملية التكثيف، وبوضع المكثف أفقيا كان أم شاقوليا. وعلى الرغم من التعقيدات الواضحة في عملية التكثيف إلا أنه يجب دراستها دراسة رياضية مباشرة.

2-2) التكثيف النقطي والتكثيف الغشائي: لتعريف هذين النوعين من التكثيف لدينا المفاهيم التالية:

المفهوم 1: عندما يلامس بخار نقي مشبع سطحاً بارداً، وليكن سطحاً خارجياً لأنبوب مثلاً، فإن هذا البخار تقع له إسالة ويكون نقطة من السائل على سطح الأنبوب.

¹ Poredoš, Primož, Nada Petelin, Boris Vidrih, Tilen Žel, Qiuning Ma, Ruzhu Wang, and Andrej Kitanovski. 2022.

"Condensation of water vapor from humid air inside vertical channels formed by flat plates." *iScience* 25 (1): 103565.

² Cao, Yuanwei, and Rafael Macián-Juan. 2022. "Numerical investigation of vapor bubble condensation in subcooled quiescent water." *Nuclear Engineering and Design* 388: 111621.

³ Le, Q. T., S. J. Ormiston, and H. M. Soliman. 2022. "Detailed modeling of laminar film condensation from zeotropic binary mixtures in a vertical tube." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 186: 122440.

Park, Il Woong, Si Hyuk Yang, and Yeon-Gun Lee. 2022. "Degradation of condensation heat transfer on a vertical cylinder by a light noncondensable gas mixed with air-steam mixtures." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 130: 105779.

المفهوم 2: من المحتمل ألا تكون هناك التصاق لنقاط السائل على السطح البارد لذا فبدلاً من أن تنتشر النقاط على سطح الأنبوب على هيئة غشاء من السائل، نجد أنها تنزلق وتسقط تاركة سطحه المعدني مكشوفاً، وهكذا. أي أن السطح تتكون عليه نقاط متتابعة من البخار المكثف. وتسمى عملية التكثيف هذه بالتكثيف النقطي.

المفهوم 3: في معظم الحالات سرعان ما يتكون غشاء تكثيفي يمكن تمييزه بوضوح، في هذه الحالة فإن أي بخار إضافي يتجه نحو السطح البارد لا بد له أن يسال على الغشاء المتكثف (السائل الذي يغطي السطح)، بدلاً من أن يتكثف مباشرة على سطح الأنبوب البارد. مثل هذه الآلية يطلق عليها آلية التكثيف الغشائي.

المفهوم 4: لا توجد علاقة فيزيائية بين آليتي التكثيف النقطي والتكثيف الغشائي وبين كمية البخار المتكثفة لكل وحدة مساحة من السطح البارد. وعليه فمن الخطأ الاعتقاد بأن التكثيف الغشائي هو مرحلة انتقالية من التكثيف النقطي.

المفهوم 5: بسبب تكون الغشاء السائل (نواتج التكثيف) وعزله لسطح الأنبوب من عملية التكثيف. ومن ثم يكون معامل انتقال الحرارة في عملية التكثيف النقطي من أربعة إلى ثمانية أمثال مثيله في عملية التكثيف الغشائي.

المفهوم 6: من المعروف أن بخار الماء هو البخار الوحيد النقي الذي يمكنه أن يتكثف بطريقة التكثيف النقطي في ظل توافر شروط معينة لحدوثه. مثل هذه الشروط موضحة بأعمال كل من (درو - Drew) و (ناجل - Nagle) و (سميث - Smith). وتتوفر هذه الشروط بالدرجة الأولى بسبب وجود أوساخ على السطح، أو باستعمال ملوثات تلتصق بالسطح. ولقد قام (ناجل - Nagle) بتحديد أنواع المواد التي تحت على حدوث التكثيف النقطي لبخار الماء، على الرغم من أن استعمال مثل هذه المواد قد ينتج عنه وجود شوائب في البخار.

المفهوم 7: يحدث التكثيف النقطي أيضاً في حالة تكثيف عدة مركبات آتياً كخليط غير قابل للمزج، كما هو الحال في بخار الماء لهيدروكربونات. وعادة ما يحدث في فترات عديدة، أثناء تشغيل مكثفات البخار، أن تبدأ آلية التكثيف بالنوع الغشائي، ثم تعود في مراحل متأخرة إلى التكثيف الغشائي مرة أخرى.

المفهوم 8: لصعوبة التحكم في نوعية آلية التكثيف فإنه ليس من المألوف في حسابات التكثيف أن تستخدم القيم العالية لمعاملات انتقال الحرارة، والتي يمكن الحصول عليها أثناء تجارب التكثيف النقطي.

فرضيات:

فرضية 1: من الطبيعي أن يكون ضغط التبخر في بدن البخار أعلى من ضغط تبخر السائل المتكثف الأبرد والملاصق لسطح الأنبوب ويكون فرق الضغط بين بدن البخار وغشاء التكثيف بمثابة الجهد اللازم لدفع البخار بمعدل عال من بدن البخار نحو غشاء التكثيف.

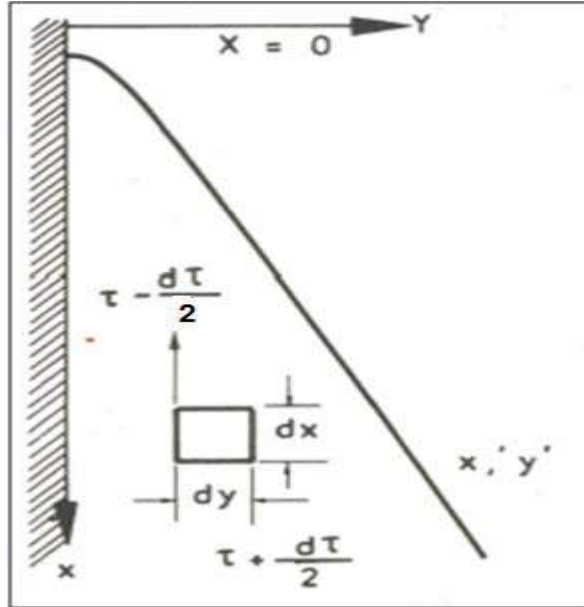
فرضية 2: أما عن مقاومة انتقال الحرارة بالانتشار من بدن البخار إلى سطح التكثيف، فقد وجد أنها صغيرة بالنسبة إلى مقاومة سُمك الغشاء المتكثف. وفي الواقع فإن الحالة الأخيرة هي التي تحدد مدى فعالية المقاومة، بالإضافة إلى أن سرعة انتقال حرارة التكثيف خلال هذا الغشاء هي التي تحدد معامل التكثيف.

فرضية 3: الشكل النهائي لمعادلة معامل التكثيف الذي يمكن الحصول عليه من خلال التحليل البعدي لعملية التكثيف، حيث يكون متوسط معامل التكثيف \bar{h} دالة في خصائص الغشاء المتكثف $k, \rho, g, L, \Delta T, L_{ev}$ وتمثل L_{ev} الحرارة الكامنة للتبخير. ولقد استطاع نوسلت Nusselt أن يستنبط العلاقات النظرية لآلية التكثيف الغشائي، وكانت النتائج التي توصل إليها على درجة عالية من التطابق مع نتائج التجارب العملية.

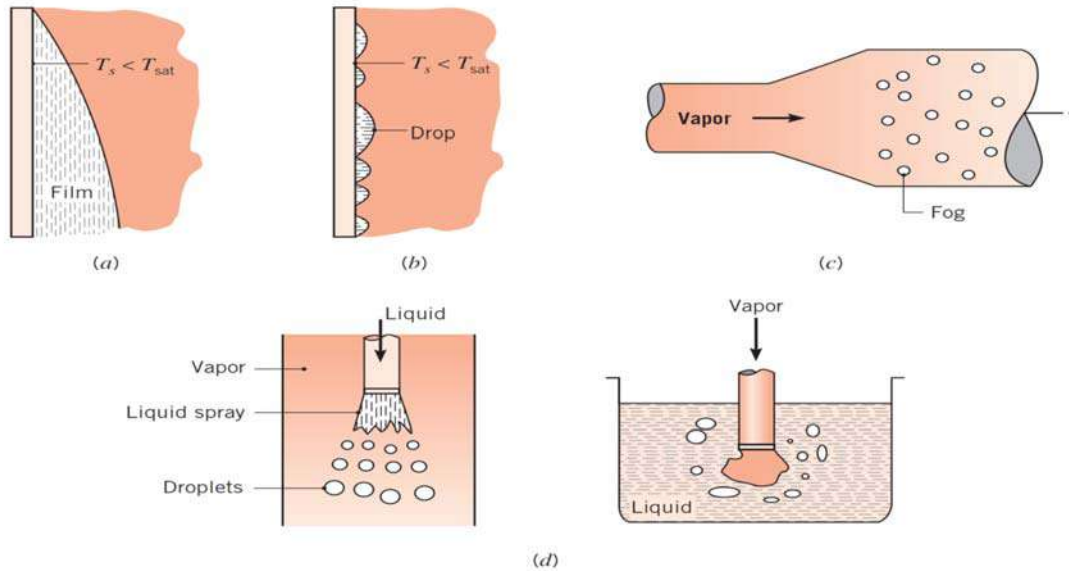
نتيجة: ومما سبق سوف يتم التعرض في هذا الفصل لحسابات المكثفات تحت ظروف عديدة، اعتماداً على معاملات الانتقال الحراري الملازمة لآلية التكثيف الغشائي فقط. ومن حسن الحظ، أن ظاهرة التكثيف الغشائي يسهل تحليلها رياضياً، وأن طبيعة التكثيف على سطح بارد يمكن اعتبارها ذاتية الانتشار.

3-2) التطبيقات العملية لظاهرة التكثيف: من المؤلف في الصناعات الكيميائية أن يتم فصل خليط من السوائل عن طريق إزالة المركبات ذوات درجات الغليان المنخفضة عن ذوات درجات حرارة الغليان العالية بالتقطير. وفي حالة المحاليل عديدة المركبات، فإن كلا منها يكون ذا ضغط جزئي محدد بالإضافة إلى أن أكثر تلك المركبات تطايراً لا يمكن أن يفصل بالغليان عن بقية المحلول دون أن يحمل معه بعضاً من المركبات الأثقل ذوات درجات الغليان العالية. وتكون نسبة المركبات الأثقل في هذه الحالة -أي التي تحمل في بداية غليان المحلول - أقل من تلك الموجودة في المحلول الأصلي قبل بداية الغليان. وإذا تم تكثيف البخار الناتج من الغليان في هذه الحالة، وتم غلي ناتج التكثيف عند درجات أقل من تلك المطلوبة للمحلول الأصلي، فإن نسبة المركبات المتطايرة في ناتج الغليان سوف تزداد. وتتابع عمليات الغليان والتكثيف على هذا النمط، يمكن الحصول على كميات نقية من المركب الأكثر تطايراً. وبناء على ذلك، فإن عملية فصل المركبات بالتقطير تبدأ بالغليان الجزئي ثم بتكثيف للأبخرة الناتجة عن الغليان.

4-2) التكثيف فوق السطوح الباردة (نظرية نوسلت): عندما يتكثف بخار ما على سطح شاقولي بارد، فإن نواتج التكثيف تكوّن غشاءً على السطح، كما هو موضح في الشكل (3-7)، ومع استمرار عملية التكثيف يستمر انتقال الحرارة إلى السطح عبر هذا الغشاء بالتوصيل (Kotcioglu et al. 1993).¹



الشكل (3-7): التكثيف الغشائي فوق سطح شاقولي



الشكل (3-8): أنواع التكثيف مصنفة حسب التلامس بين البخار والمنطقة الباردة

(a) تكثيف شريطي على سطح بارد شاقولي، (b) تكثيف نقطي على سطح بارد شاقولي، (c) تكاثف متجانس أو تشكيل ضباب ناتج من نقصان الضغط نتيجة للتوسع، (d) تلامس مباشر بين البخار وسائل بارد

¹ Kotcioglu, I., A. Y. Uyarel, K. Kaygusuz, S. Gullapoglu, and I. Dincer. 1993. "An approach to heat and mass transfer analysis during film condensation inside a vertical tube." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 20 (2)

تفسير الشكل (3-8): نلاحظ أنواعاً من عمليات التكثيف، حيث الأنواع (a) و (b) يحتاجان لسطح بارد، أما النوع (c) ينتج بسبب انخفاض الضغط الذي بدوره يسبب انخفاض في درجة الحرارة، لكن النوع (d) فهو ناتج من تلامس البخار بسائل بارد إما يتم بضخ السائل أو ضخ البخار.

أما في حالة وجود سطح بارد يمكن افتراض أن نزول الغشاء من أعلى السطح إلى أسفله يتم على شكل انسياب رقائقي، ويؤثر سُمك هذا الغشاء تأثيراً كبيراً في معدل التكثيف، إذ أن الحرارة المنتقلة إلى السطح البارد من عملية التكثيف تواجه مقاومة أثناء مرورها خلال سُمك الغشاء المتكون، وغالباً ما تكون مقاومة هذا الغشاء لا تتقال حرارة التكثيف عالية جداً بالنسبة لبقية المقاومات، ويكون هذا الغشاء دالة في سرعة التدفق عبر الغشاء، و التي تتغير بتغير زاوية ميل السطح عن الوضع الشاقولي، حيث إن قوة التدفق تكون تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية بالدرجة الأولى وفي حالة كون السطح البارد شاقولي، فإن سُمك الغشاء يزداد من أعلى السطح البارد إلى أسفله، و لهذا السبب فإن معامل تكثيف البخار فوق سطح شاقولي يتناقص من القمة إلى القاع. وللحصول على معامل عالٍ للتكثيف يجب ألا يكون ارتفاع السطح كبيراً جداً. وسرعة التدفق لكميات متساوية من نواتج التكثيف دالة في لزوجة نواتج التكثيف، بمعنى أنه كلما انخفضت اللزوجة السُمك الغشاء. وحيث إن لزوجة السوائل تقل قيمتها بزيادة درجة الحرارة. فإن معامل التكثيف يزداد بزيادة درجة حرارة التكثيف (Deng et al. 2022)¹.

2-5) نظرية نوسالت في التكثيف الغشائي: ولقد أجرى نوسلت Nusselt في عام 1916م دراسة تحليلية لعملية التكثيف سابقة الذكر باستخدام الفرضيات التالية:

الفرضية 1: الحرارة المنتقلة إلى السطح البارد أثناء التكثيف هي الحرارة الكامنة للتبخير L_{ev} فقط (أو بمعنى آخر الإسالة).

الفرضية 2: إزالة نواتج التكثيف الغشائي من على السطح تتم بواسطة التدفق الرقائقي فقط، وتنتقل الحرارة خلال الغشاء بالتوصيل.

الفرضية 3: يكون سُمك غشاء التكثيف عند أي مقطع دالة في متوسط سرعة التدفق، وبالإضافة إلى كمية نواتج التكثيف المارة عند هذا المقطع.

الفرضية 4: تكون سرعة كل طبقة من طبقات الغشاء على حدى دالة في العلاقة بين قوة القص الناتجة من الاحتكاك وثقل الغشاء.

¹ Deng, Zilong, Shangwen Gao, He Wang, Xiangdong Liu, and Chengbin Zhang. 2022. "Visualization study on the condensation heat transfer on vertical surfaces with a wettability gradient." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184: 122331.

الفرضية 5: كمية نواتج التكثيف تتناسب طرديًا مع كمية الحرارة المنقولة إلى السطح، والتي تعتمد بدورها على سُمك الغشاء وفرق درجة الحرارة بين البخار والسطح البارد.

الفرضية 6: يكون سُمك الغشاء على درجة كبيرة من النحافة، بحيث يكون تدرج درجة الحرارة خلاله خطيًا.

الفرضية 7: تقاس الخواص الفيزيائية لنواتج التكثيف عند متوسط درجة حرارة الغشاء.

الفرضية 8: يكون السطح البارد نظيفًا وناعمًا نسبيًا.

الفرضية 9: تكون درجة حرارة سطح المعدن البارد ثابتة.

الفرضية 10: يمكن إهمال تأثير درجة تقوس الغشاء.

ملاحظة: التكثيف يحدث على سطح شاقولي أو مائل بزاوية كما هو الحال في مكثف المقطر الشمسي، والمكثف في هذا الجهاز هو الزجاج الشفاف الذي يكون مائلًا بزاوية لكي يقوم بدورين في آن واحد، الدور الأول هو إسالة البخار لكونه سطحًا باردًا والدور الثاني هو تحريك القطرات المتشكلة على سطحه وإيصالها لمنطقة تجميع الماء المقطر.

2-6) التكثيف على السطوح الشاقولية: يمكن التعبير عن معدل الحرارة التي تمر خلال البخار إلى السطح

البارد عبر نواتج التكثيف، والموضح في الشكل (3-9)، لكل وحدة مساحات كالتالي:

$$\frac{Q_t}{A} = \frac{k(T_v - T_s)}{\delta} = L_{ev} \dot{m} = h(T_v - T_s) \quad (1 - 3)$$

حيث L_{ev} تمثل الحرارة الكامنة للتبخير (للإسالة) لوحدة الكتلة، \dot{m} كمية نواتج التكثيف المتكونة بالنسبة لوحدة المساحات، δ هو سُمك غشاء التكثيف عند النقطة ذات الإحداثيات x و y ، كما هو موضح في الشكل (4.2)، بينما بقية الرموز تحمل المعاني الدالة عليها كما هو مبين في الرموز. ويقدر معدل تكثيف البخار

بالمعادلة الآتية:

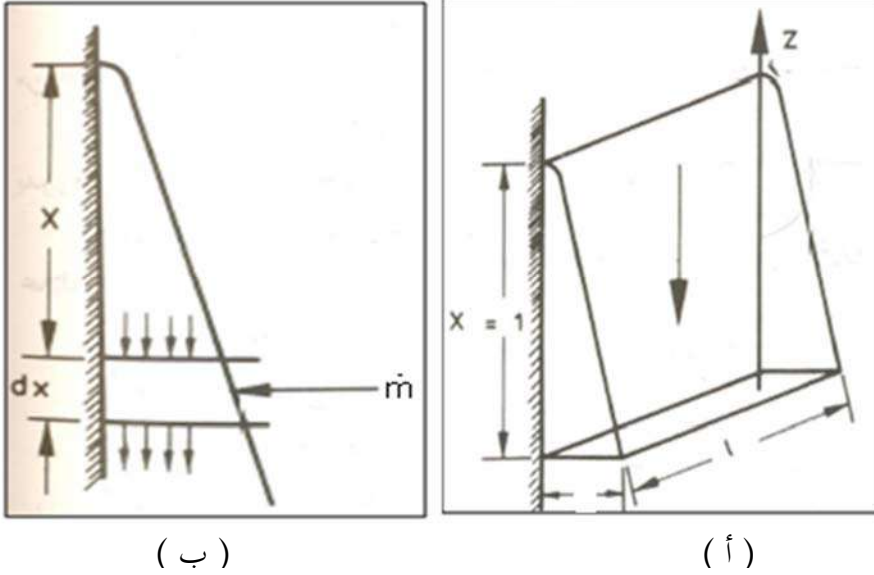
$$\dot{m} = \frac{k(T_v - T_s)}{L_{ev} \delta} = \frac{k \cdot \Delta T}{L_{ev} \delta} \quad (2 - 3)$$

يتدفق السائل نازلًا على السطح الشاقولي بسرعة تتغير قيمتها من الصفر، عند السطح البيني للغشاء والسطح البارد وتزداد أفقيًا في اتجاه السطح البيني للبخار ووسط الغشاء الخارجي، كما تزداد السرعة أيضًا في الاتجاه الشاقولي، كلما اتجهنا من أعلى السطح البارد إلى أسفله.

لندرس مثالًا، مكعبًا صغيرًا من السائل ذو وحدة عمق $dz = 1$ ، وبالتالي يكون حجمه مساويًا $1 \cdot dx \cdot dy$ ، وموجود داخل الغشاء المتحرك كما في الشكل (3-9)، وتوجد على جانب المكعب المواجه للسطح البارد الشاقولي قوة مماسية مؤثرة شاقوليا إلى أعلى، وتحاول أن تحافظ على وضع المكعب في مكانه. أما على الجانب

المقابل والبعيد عن السطح البارد، فتوجد قوة مماسية بسبب زيادة سرعة السائل تؤثر شاقولياً لأسفل. فإذا رمزنا إلى محصلة القوى الشاقولية المتجهة لأعلى، والمؤثرة على المكعب بالرمز τ ، فإن القوتين لوحدة السطح المؤثرتين على وجهي المكعب هما:

$$\tau + \frac{d\tau}{2} \quad \tau - \frac{d\tau}{2} \quad (3-3)$$



الشكل (3-9): سريان التكثيف الغشائي على سطح شاقولي

على التوالي، وتتعاقد محصلة القوى المماسية لأعلى مع القوة الجاذبية الأرضية المؤثرة لأسفل كشرط لحدوث الاتزان على المكعب.

$$\rho g(dx dy \cdot 1) - \left(\tau - \frac{d\tau}{2}\right)(dx \cdot 1) + \left(\tau + \frac{d\tau}{2}\right)(dx \cdot 1) = 0 \quad (4-3)$$

وبالنسبة لوحدة المساحات $dx dz = 1$ فإن

$$\rho \cdot g = -\frac{d\tau}{dy} \quad (5-3)$$

ومن المؤلف أن يُعبّر عن جهد القص بالمعادلة التالية

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (6-3)$$

وينتج أن

$$\frac{d\tau}{dy} = \mu \frac{d^2u}{dy^2} = -\rho \cdot g \quad (7-3)$$

وباعتبار أن قيمة $\frac{\rho}{\mu}$ ثابتة ينتج أن

$$\frac{d^2u}{dy^2} = -\rho g / \mu = -\frac{g}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)} = -\frac{g}{\nu} \quad (8-3)$$

وبالتكامل مرتين ينتج أن

$$u = -\frac{g}{2\nu}y^2 + C_1 y + C_2 \quad (9 - 3)$$

حيث كلاً من C_1, C_2 ثابتين ويتحتم إيجاد قيمتهما، وبما أن السائل يلاصق السطح فإن سرعة التدفق في اتجاه السطح $u = 0$ عند السطح $y = 0$ ومنها ينتج أن قيمة الثابت $C_2 = 0$ أما على الحدود الخارجية للغشاء (السطح البيني للبخار والسائل) فلا توجد قوى مماسية (قص)، ومن تعريف جهد القص، وعندما تكون $y = \delta$ ينتج أن

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_{y=\delta} = 0 = -\frac{g}{\nu}\delta + C_1, \quad C_1 = \frac{g}{\nu}\delta \quad (10 - 3)$$

وبالتالي تكون السرعة عند أي نقطة تساوي

$$u = \frac{g}{\nu}\left(\delta \cdot y - \frac{y^2}{2}\right) \quad (11 - 2)$$

$$u = \frac{g}{\nu}\delta^2\left(\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)^2\right) = \frac{g}{\nu}\delta^2\left(\eta - \frac{1}{2}(\eta)^2\right) \quad (12 - 3)$$

وعلى مسافة مقدارها x مقاسة من قمة السطح الشاقولي حيث يبدأ التكثيف، فإن السرعة المتوسطة للتدفق يمكن أن يُعبّر عنها كالتالي باعتبار عرض السطح يساوي $L = 1$

$$\bar{u} = \frac{1}{\delta \cdot 1} \int_0^\delta u(1 \cdot dy) = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta u dy = \frac{g}{3\nu}\delta^2 \quad (13 - 3)$$

والتدفق الحجمي للسريان الشاقولي عبر السطح $dz \cdot dy = 1 \cdot dy$ معرف بالشكل:

$$Q_v = \int_0^\delta u dy dz = \int_0^\delta u dy = \bar{u} \cdot (\delta \cdot 1) = \frac{g}{3\nu}\delta^3 \quad (14 - 3)$$

حيث $(\delta \cdot 1)$ يمثل سطح انتقال الحجم شاقولياً.

إذا زادت المسافة لتصبح $x + dx$ كما هو بالشكل (9-3)، فمن المتوقع أن تزداد كمية البخار المتكثف، ويمكن عن طريق استخدام قيمة \bar{u} من المعادلة (13-3)، وضربها في ρ ، ثم إجراء تفاضل بالنسبة إلى x ، أن

تُحدّد قيمة زيادة التكثيف في المسافة من x إلى $x + dx$

$$d(Q_m) = d(\rho \cdot Q_v) = d\left(\frac{\rho g}{3\nu}\delta^3\right) = \frac{\rho g}{\nu}\delta^2 d\delta \quad (15 - 3)$$

هذه الزيادة في كمية البخار المتكثف يتم استخلاصها من بدن البخار، ويتم تكثيفها على سطح الغشاء.

$$\frac{d(Q_m)}{dz \cdot dx} = \frac{d(\rho \cdot Q_v)}{1 \cdot dx} = \dot{m} \Rightarrow d(Q_m) = \dot{m} \cdot dx \quad (16 - 3)$$

يمكن تعريف \dot{m} كمية نواتج التكثيف المتكونة على وحدة المساحات، وعن طريق المعادلة (3 - 2) بدلالة الحرارة المنقولة أثناء التكثيف كما يلي:

$$\dot{m} = \frac{k(T_v - T_s)}{L_{ev} \delta} \quad (17 - 3)$$

وبالتعويض عن \dot{m} في المعادلة (3 - 15) بالقيمة الناتجة من المعادلة (3 - 2) نحصل على الآتي:

$$\frac{k(T_v - T_s)}{L_{ev} \delta} dx = \frac{\rho g}{v} \delta^2 d\delta \quad (18 - 3)$$

$$(T_v - T_s) dx = \left(\frac{\rho g L_{ev}}{kv} \right) \delta^3 d\delta \quad (19 - 3)$$

وبتكامل هذه المعادلة في حدود ضيقة للتكامل، مع اعتبار أن قيمة كل من $(T_v - T_s)$ ، ρ ، L_{ev} ، v ، k ، ثابتة ، وعندما تصبح $x = 0$ لدينا $\delta = 0$ فإن:

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\rho g L_{ev}}{kv} \right) \delta^4 = (T_v - T_s) x + cte ; \quad cte = 0 (x = 0 ; \delta = 0)$$

وينتج أن

$$\delta = \left(\left(4 \frac{kv}{\rho g L_{ev}} \right) (T_v - T_s) x \right)^{\frac{1}{4}} \quad (20 - 3)$$

وتكون قيمة معامل انتقال الحرارة عبر طبقة التكثيف على بعد مسافة x من قمة السطح البارد لكل وحدة مساحات بينية والموضحة بالمعادلة (3 - 1)، كما يلي:

$$\frac{Q_t}{A} = \frac{k(T_v - T_s)}{\delta} = L_{ev} \dot{m} = h(T_v - T_s) \quad (21 - 3)$$

$$\frac{Q_t}{A} = h(T_v - T_s) \Rightarrow h = h_x = \frac{\frac{Q_t}{A}}{(T_v - T_s)} = \frac{k}{\delta} \quad (22 - 3)$$

وبالتعويض عن قيمة δ من المعادلة (3 - 20) ينتج أن:

$$h_x = \frac{k}{\left(\left(4 \frac{kv}{\rho g L_{ev}} \right) (T_v - T_s) x \right)^{\frac{1}{4}}} = \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{4v(T_v - T_s)} \right)^{1/4} \frac{1}{x^{1/4}}$$

$$h_x = \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{4v(T_v - T_s)} \right)^{1/4} \frac{1}{x^{1/4}} \quad (23 - 3)$$

أما كمية الحرارة المنقولة عبر سمك غشاء التكثيف من قمة السطح الشاقولي إلى x ، فتكون كالتالي

$$Q_x = \int_0^x h_x (T_v - T_s) dx = \int_0^x \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{4v(T_v - T_s)} \right)^{1/4} (T_v - T_s) x^{-1/4} dx$$

$$Q_x = \frac{4^{3/4}}{3} \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{v} \right)^{1/4} [(T_v - T_s) x]^{3/4} \quad (24 - 3)$$

وبالتالي فإن قيمة متوسط معامل انتقال الحرارة بين النقطتين المذكورتين هي:

تذييل الرموز بالحرف يعني أن القيمة للخاصية المعنية قد تم حسابها عند درجة حرارة الغشاء والتي يمكن حسابها كالتالي

$$\begin{aligned}\bar{h}_\ell &= \frac{1}{\ell} \int_0^\ell h_x dx = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell \frac{dQ_x}{(T_v - T_s)} = \frac{1}{(T_v - T_s)\ell} \int_0^\ell dQ_x = \frac{(Q_x)_{x=\ell}}{(T_v - T_s)\ell} \\ \Rightarrow \bar{h}_\ell &= \left(\frac{4}{3}\right)^{3/4} \frac{\left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu}\right)^{1/4} [(T_v - T_s)\ell]^{3/4}}{(T_v - T_s)\ell} \\ \bar{h}_\ell &= 0.943 \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu (T_v - T_s)\ell}\right)^{1/4} \quad (25 - 3)\end{aligned}$$

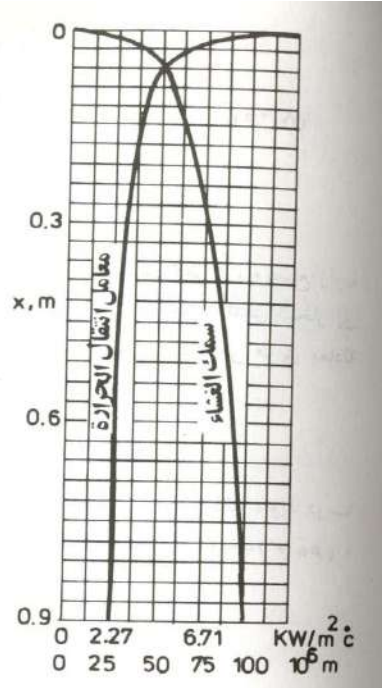
كل القيم الخاصة المعنية قد تم حسابها عند درجة حرارة الغشاء T_f والتي يمكن حسابها كالتالي

$$T_f = \frac{1}{2}(T_v + T_s) \quad (26 - 3)$$

وكذلك نرمز للفرق بين درجة حرارة البخار والسطح البارد بـ: $\Delta T = (T_v - T_s)$

يجدر الإشارة إلى أنه قد أهملت قيمة الجهد الناتج عن مرور البخار المشبع فوق السطح البيني للبخار وغشاء التكتيف. وسوف يتبع هذا الأسلوب فيما يأتي من تحليلات. ويمكن في أي الأحوال إضافة مثل هذا الجهد إلى التحليل السابق، وفي الحقيقة يكون مقدار هذا الجهد ذو قيمة صغيرة، ولا يؤثر كثيراً في مجرى الحسابات، والتغير الذي يطرأ على كل من سُمك غشاء التكتيف ومعامل انتقال الحرارة المحلي يتضح من الشكل (3 - 10)، ويبدو فيه أن شكل المنحنيات يشابه سُمك الغشاء وعند تطبيق المعادلة (3 - 20) من أجل السمك δ والمعادلة (3 - 23) من أجل معامل انتقال الحرارة المحلي (Zhu et al. 2021; Dai et al. 2017)¹.

¹ Zhu, Shaolong, Xiaoqin Zhi, Chenjie Gu, Kai Wang, and Limin Qiu. 2021. "Enhancing heat transfer performance of nitrogen condensation on vertical plate with microstructure." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 172: 121219.



الشكل (3-10) : غشاء على أنبوب أفقية.

(7-2) التكثيف على سطح مائل: إذا درسنا مكعباً من السائل يميل بزاوية مقدارها α على الوضع الشاقولي

كما في الشكل (3-11) وتكون مركبة قوة الجاذبية التي تؤثر على المكعب في اتجاه السطح، تساوي

$\rho g \sin \alpha$ ، وبالتالي تصبح المعادلة (3-4) كما يلي:

$$\rho g \sin \alpha (dy dx \cdot 1) - \left(\tau - \frac{d\tau}{2} \right) (dx \cdot 1) + \left(\tau + \frac{d\tau}{2} \right) (dx \cdot 1) = 0 \quad (27 - 3)$$

وبالنسبة لوحدة المساحات $dx dz = 1$

$$\rho g \sin \alpha = -\frac{d\tau}{dy} = \frac{d}{dy} \left(\mu \left(\frac{du}{dy} \right) \right) \quad (28 - 3)$$

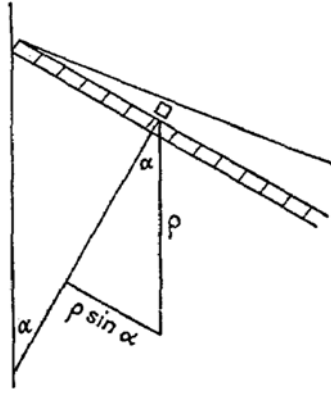
وتصبح المعادلة (3-8) كالتالي

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = -\frac{g\rho}{\mu} \sin \alpha \quad (29 - 3)$$

وبعد اجراء التكامل على المعادلة (3-29) تتحول إلى المعادلة (3-30)، والتي لا تختلف كثيراً عن

المعادلة (3-9) بحيث أن الحالة الشاقولية $\alpha = 90^\circ$

$$u = -\frac{g}{2\nu} y^2 \sin \alpha + C_1 y + C_2 \quad (30 - 3)$$



الشكل (3-11): غشاء على سطح مائل

وعند بداية عملية التكتيف على السطح البارد، حيث تكون $y = 0$ لا توجد أية سرعات بطول السطح، فإن

$$\begin{aligned} u = 0 & , \quad C_2 = 0 \\ y = \delta & , \quad (du/dy) = 0 \end{aligned}$$

وينتج أن

$$C_1 = \frac{g\delta}{2\nu} \sin \alpha$$

وتصير المعادلة (3-13) كالتالي

$$\bar{u} = \frac{g\delta^2}{3\nu} \sin \alpha \quad (2-31)$$

وأيضًا المعادلة (3-25) تصبح

$$\bar{h}_\ell = 0.943 \left[\frac{k^3 \rho g L_{ev} \sin \alpha}{\nu \Delta T \cdot \ell} \right]^{1/4} \quad (3-32)$$

8-2) التكتيف على سطوح الأنابيب الأفقية: إذا درسنا مكعبًا أبعاده بالنسبة لوحدة الأطوال $z = 1$

موجود عند نصف قطر r ، ويصنع زاوية مقدارها α مع الشاقول، كما هو موضح بالشكل (3-12)، فيمكن

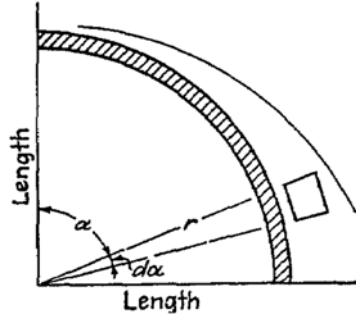
حساب معدل تدفق البخار إلى غشاء التكتيف خلال المساحة $ds = dz \cdot r \cdot d\alpha = 1 \cdot r \cdot d\alpha$ ، عندما يكون

سُمك الغشاء يساوي δ ، عن طريق معادلة انتقال الحرارة بالتوصيل، والمعادلات مقتبسة من كتاب

(Kern et al. 1950)¹ كما يلي:

$$\dot{m}(dx.1) = \frac{k(T_v - T_s)}{L_{ev}\delta} r \cdot d\alpha \quad (3-33)$$

¹ Kern, Donald Quentin, and Donald Q Kern. 1950. *Process heat transfer*. Vol. 5. McGraw-Hill New York.



الشكل (3-12) : غشاء على أنبوب أفقي.

نتيجة لعملية التكتيف، فلا بد أن نتوقع زيادة في سمك الغشاء الساقط على السطح المائل، وإذا درسنا

كمية تفاضلية من نواتج التكتيف، فإن الزيادة خلال مساحة التكتيف $r \cdot d\alpha$ تكون مساوية لـ $Q_m = (\rho \bar{u} \delta)$ ،

تصبح المعادلة (3-16) كالتالي:

$$d(\rho \bar{u} \delta) = \frac{\rho g}{3\nu} d(\delta^3 \sin \alpha) = \dot{m} \cdot dx \quad (3-34)$$

وبالتعويض في المعادلة (3-18) نحصل على

$$\frac{k(T_v - T_s)}{L_{ev} \delta} r \cdot d\alpha = \frac{\rho g}{3\nu} d(\delta^3 \sin \alpha) \quad (3-35)$$

$$\left(\frac{3\nu k(T_v - T_s) r}{\rho g L_{ev}} \right) \cdot d\alpha = \delta d(\delta^3 \sin \alpha) \quad (3-36)$$

وبالترميز للثابت M :

$$M = \left(\frac{3\nu k(T_v - T_s) r}{\rho g L_{ev}} \right) \quad (3-37)$$

$$M \cdot d\alpha = \delta d(\delta^3 \sin \alpha) \quad (3-38)$$

وبإجراء عملية التفاضل نحصل على

$$\begin{aligned} M \cdot d\alpha &= \delta(3\delta^2 \sin \alpha d\delta + \delta^3 \cos \alpha d\alpha) \\ \Rightarrow M \cdot d\alpha &= (3\delta^3 \sin \alpha d\delta + \delta^4 \cos \alpha d\alpha) \end{aligned} \quad (3-39)$$

وبفرض أن $Z = \Psi^4 = \delta^4 / M$ وبالتعويض في المعادلة (39.2) نحصل على ما يلي

$$d\alpha = \left(\frac{3}{4} \sin(\alpha) \right) dz + (z \cos(\alpha)) d\alpha$$

$$\frac{3}{4} \sin(\alpha) \frac{dz}{d\alpha} + z \cos(\alpha) - 1 = 0 \quad (3-40)$$

وهذه المعادلة تفاضلية خطية، ويكون حلها كالاتي

$$Z = \frac{1}{\sin^{4/3} \alpha} \left(\frac{4}{3} \int \sin^{1/3} \alpha d\alpha \right) + C_3 \quad (2-41)$$

وعندما تكون $\alpha = 0$ تصبح $C_3 = 0$ والحل يصبح

$$Z = \frac{4}{3} \frac{1}{\sin^{4/3} \alpha} \int \sin^{1/3} \alpha d\alpha \quad (3-42)$$

ويمكن تعيين قيمة هذا التكامل لقيم متغيرة من α باستخدام الطرق البيانية، وبالتعويض في المعادلة (2 - 40) ينتج أن:

$$\delta = \Psi M^{1/4} = \Psi \left[\frac{3vk(T_v - T_s)r}{\rho g L_{ev}} \right]^{1/4} \quad (43 - 3)$$

وكما هو واضح في المعادلة (2 - 22) فإن:

$$h_x = k/\delta$$

نتيجة: ويتناقص سُمك طبقة التكتيف قليلا بزيادة الزاوية α من صفر إلى 5° ثم يزداد السمك بعد ذلك بزيادة α بانتظام إلى أن تتبعر طبقة التكتيف إلى نقط متناثرة. وأثناء التزايد المنتظم للغشاء، تكون قيمة معامل انتقال الحرارة المحلي عند أي نقطة كالتالي:

$$h_\alpha = \frac{k}{\delta} = \frac{1}{\Psi} \left[\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{3v(T_v - T_s)r} \right]^{1/4} \quad (44 - 3)$$

وتصبح القيمة المتوسطة لمعامل انتقال الحرارة كجزء محصور بين الزاويتين α_1 ، α_2 كما يلي:

$$\bar{h}_\alpha = \frac{k}{M^{1/4}(\alpha_2 - \alpha_1)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{\Psi} \quad (45 - 3)$$

وباستخدام إحدى الطرق البيانية، وبالتعويض عن قيمة D_0 للقطر الخارجي للأنبوب، نحصل على القيمة التالية لمعامل انتقال الحرارة لمجال الزاوية من صفر إلى 90°

$$\bar{h}_{D_0} = 0,860 \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{v(T_v - T_s)D_0} \right)^{1/4} \quad (46 - 3)$$

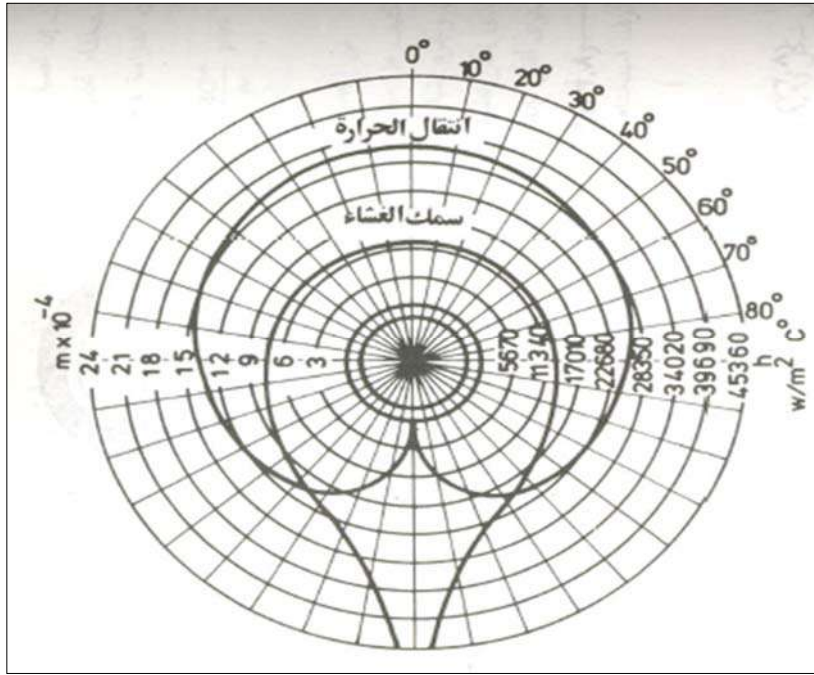
لمجال الزاوية من 90° إلى 180°

$$\bar{h}_{D_0} = 0,589 \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{v(T_v - T_s)D_0} \right)^{1/4} \quad (47 - 3)$$

وبفرض وجود تماثل بين نصف الأنبوب يصبح متوسط قيمة معامل انتقال الحرارة، على محيط الأنبوب كله كالتالي:

$$\bar{h}_{D_0} = 0,725 \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{v(T_v - T_s)D_0} \right)^{1/4} \quad (48 - 3)$$

ويوضح الشكل (3-13) التغيير في سُمك الطبقة الغشائية لنواتج التكتيف، ومعامل انتقال الحرارة لبخار الماء على سطح أنبوب أفقي، ويعتمد معامل انتقال الحرارة على مقاومة غشاء التكتيف لانتقال الحرارة بالتوصيل، كما سبق ذكره



الشكل (3-13) : سمك غشاء التكثيف ومعامل انتقال الحرارة حول أنبوب أفقي

(3) الإشعاع الحراري

3-1) تعريف الإشعاع الحراري: انتقال الحرارة بالإشعاع يتم بين سطحين، سطح باث و سطح ماص للإشعاعات الكهرومغناطيسية، بعكس ما يحدث في التوصيل والحمل، الإشعاعات الكهرومغناطيسية تنتشر بدون وجود وسط مادي ناقل للحرارة فهي تنتشر حتى في الفراغ المثالي (Huetz-Aubert et al. 1982; Vauge 1983)¹.

3-2) مفاهيم وتعريف لمقادير فيزيائية: (Poggi 2007)²

3-2-1) مصدر الإشعاع الكهرومغناطيسي: هو كل جسم له درجة حرارة T، قادر على بث (بعث) أمواج كهرومغناطيسية، وتميز نوعين في دراسة الإشعاع، مصادر نقطية لا تملك أبعاد (عبارة عن نقط مادية كالنجوم)، وأجسام ذات أبعاد (لها هندسة بعدية كالشمس - كروية-).

3-2-2) التدفق الطاقوي (power):

هو الطاقة المنبثة في وحدة الزمن في كل الاتجاهات، ونسميها الاستطاعة Q:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad ; \quad [\dot{Q}]_{SI} = \frac{J}{s} = W \quad (49 - 3)$$

¹ Huetz-Aubert, M, and JF Sacadura. 1982. "Mesure des émissivités et des réflectivités monochromatiques directionnelles des matériaux opaques." *Revue de Physique Appliquée* 17 (4): 251-260.

² Poggi, Philippe. 2007. "Intégration des systèmes énergétiques à sources renouvelables dans les réseaux électriques insulaires." Université Pascal Paoli.

3-2-3) شدة الإشعاع لمصدر نقطي (Intensity):

هي الاستطاعة المُنْبَعِثَة في اتجاه \vec{OX} معرف بالزاويتين (θ, Ψ) ، في لحظة ما بالنسبة لوحدة الزاوية المجسمة:

$$I_{ox} = I(\theta, \Psi) = \frac{d\dot{Q}}{d\Omega} \quad ; \quad [I_{ox}]_{SI} = W/st \quad (50 - 3)$$

3-2-4) الاستطاعة الإشعاعية لمصدر ذو أبعاد (Luminance):

هي الاستطاعة المُنْبَعِثَة في اتجاه \vec{OX} معرف بالزاويتين (θ, Ψ) ، في لحظة ما بالنسبة لوحدة الزاوية المجسمة ووحدة السطح الباعث والعمودي على الاتجاه \vec{OX} :

$$L_{ox} = L(\theta, \Psi) = \frac{d^2\dot{Q}}{\cos(\theta) d\Omega dS_{emi}} = \frac{dI_{ox}}{\cos(\theta) dS_{emi}} \quad ;$$

$$[L_{ox}]_{SI} = \frac{W}{st.m^2} \quad (51 - 3)$$

3-2-5) الانبعاثية الإشعاعية لمصدر ذو أبعاد (Emittance):

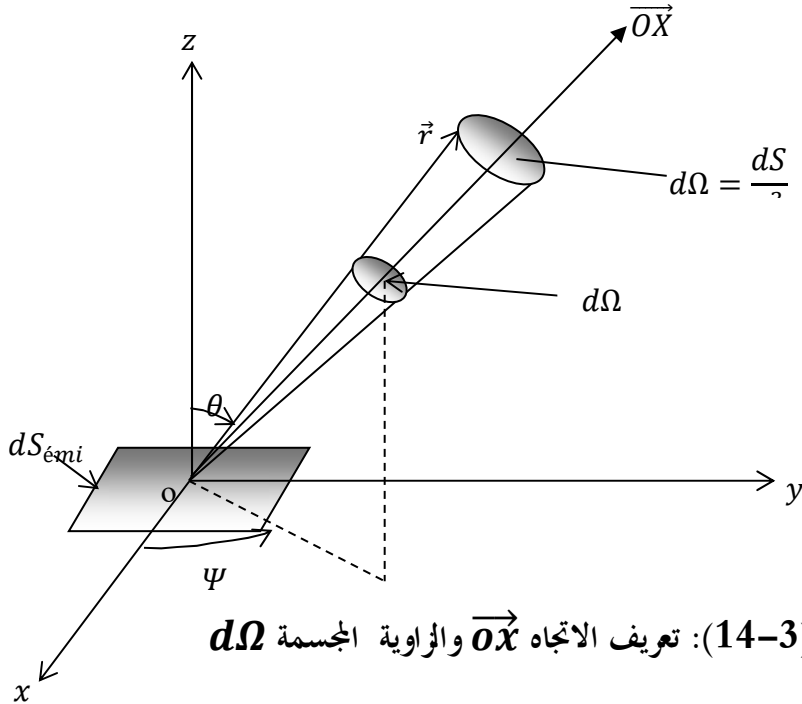
هي الاستطاعة المُنْبَعِثَة في نصف الفضاء (نصف كروي) على وحدة مساحة السطح الباعث للإشعاع: وتقاس بـ:

$$M = \frac{d\dot{Q}}{dS_{emi}} \quad ; \quad [M]_{SI} = \frac{W}{m^2} \quad (52 - 3)$$

3-2-6) الاستنارة الإشعاعية لجسم مُسْتَقْبِل للإشعاع (Illumination):

هي مقدار الاستطاعة الواردة للجسم على وحدة سطحه:

$$E = \frac{d\dot{Q}}{dS_{res}} \quad ; \quad [E]_{SI} = \frac{W}{m^2} \quad (53 - 3)$$



3-3 قانون "ستيفان-بولتزمان":

الطاقة M التي تُشع من سطح باث، تتناسب مع درجة حرارته المطلقة (T مقاسة بـ K مرفوعة إلى القوة 4).

قانون "ستيفان-بولتزمان" يعبر عن التدفق الحراري المُنبث من السطح الباث:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

بحيث: M الانبعاثية الإشعاعية للسطح الباث ($[M]_{SI} = W/m^2$)

ε معامل الانبعاث الإشعاعي للسطح الباث (بدون وحدة).

σ ثابت "ستيفان-بولتزمان" ($\sigma = 5.669 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$).

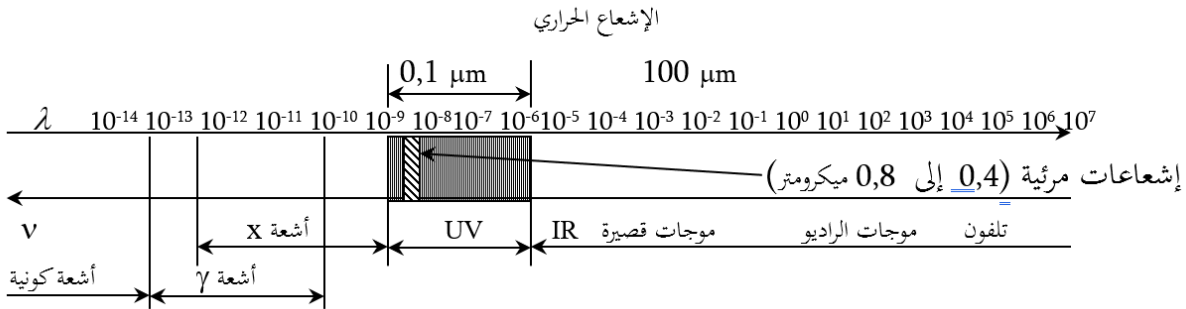
3-4 طيف الإشعاعات الكهرومغناطيسية:

تقسم الأمواج الكهرومغناطيسية إلى عدة أنواع حسب طول الموجة: أمواج هرتيزية، ضوئية، حرارية،

إشعاع X ، جاما γ والكونية. هذه الأمواج تُركَّب طيف الإشعاعات الوحيدة اللون (monochromatic)،

لها تواتر ν وطول موجة λ وسرعة c في الوسط ذو قرينة انكسار n ، ونعرف c_0 سرعتها في الفراغ

($c_0 = 2.99 \times 10^8 m/s$)، والعلاقة بين السرعة هي: $c = c_0/n$.



الشكل (3-15): طيف الإشعاعات الكهرومغناطيسية

3-5 الجسم الأسود:

يعتبر الجسم الأسود جسماً مثالياً في ظاهرة الإشعاع الكهرومغناطيسي، فهو يمتص (أو يبث) كل الإشعاعات

(له معامل انبعاث $\varepsilon = 1$ ومعامل امتصاص $\alpha = 1$)، ومنه يعتبر معياراً للمقارنة بين الأجسام الباثّة والماصة

للإشعاع.

3-6 قانون "بلانك":

هذا القانون يعطي العلاقة بين الانبعاثية الإشعاعية الوحيدة اللون للجسم الأسود M_λ^0 ، وطول الموجة

λ ، ودرجة حرارته المطلقة T ، ويعبر عنها بالقانون:

$$M = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \Rightarrow M = \frac{3.741 \cdot 10^{-16} \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{0.014388}{\lambda T}\right) - 1} \quad (W/m^2 \cdot m)$$

حيث: $h = 6.6255 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ ، ويسمى ثابت بلانك. و $k = 1.3805 \cdot 10^{-23} J/K$ ، ويسمى ثابت بولتزمان.

$$c_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot K = 14388 \mu\text{m} \cdot K \quad , \quad c_1 = 3.741 \cdot 10^{-16} W \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

ملاحظات:

- (1) الإشعاع الحراري مَحْصُور في المَجَال من $0,1 \mu\text{m}$ إلى $100 \mu\text{m}$.
 - (2) الإشعاع المَرْتَبِي مَحْصُور في المَجَال من $0,4 \mu\text{m}$ إلى $0,8 \mu\text{m}$.
 - (3) إذا اعتبرنا الشمس جسم أسود، درجة حرارتها $5780 K$ ، تبث كل الإشعاعات الكهرومغناطيسية وفي كل الاتجاهات، ويصل إلى الأرض $\frac{1}{5000000000}$ من هذه الإشعاعات.
 - (4) بالنسبة للشمس: طول المَوْجَة من أجل إشعاع أعظم $\lambda_{max} = 0,5 \mu\text{m}$ حسب قانون "فيان" الأول
للاتزياح $\lambda_{max} T = 2898 \mu\text{m}$.
 - (5) مَجَال المَوْجَات التطبيقية للشمس هو: $[0,5 \lambda_{max} = 2,5 \mu\text{m} \quad , \quad 0,5 \lambda_{max} = 0,25 \mu\text{m}]$ ،
حسب قانون (كسر الانبعاثية الكلية في مَجَال معطى $F_{\lambda_1-\lambda_2} = 0,956$ ¹).
 - (6) كسر الانبعاثية الكلية في المَجَال المَرْتَبِي $F_{0,4-0,8} = 0,46$.
 - (7) تبث الشمس 95,6 % في المَجَال $[0,25, 2,5]$ ، وتبث 46% في المَجَال المَرْتَبِي $[0,4, 0,8]$.
- (7-3) قانون " كيرشوف " (الامتصاص - الانبعاث):

ينص هذا القانون على أن: خاصيتي الامتصاص والانبعاث لجسم ما في حالة التوازن الإشعاعي، لهما نفس التأثير على سطح من هذا الجسم، أي معامل الامتصاص والانبعاث الوحيد اللون (طول موجة وحيد λ) وفي اتجاه ما (\overline{OX}) متساويين: $\epsilon_{OX,\lambda} = \alpha_{OX,\lambda}$.

(8-3) استقبال الجسم للإشعاع (الانعكاس - الامتصاص - الامرار):

عند استقبال جسم للإشعاع، فإن الاستطاعة الواردة له Q_{inc} تتوزع على ثلاث أجزاء: الشكل (3-3)

(16)

$$(1) \text{ جزء يمر عبر الجسم } Q_{tra} \text{ ، ومعامل الامرار: } \tau = \frac{Q_{tra}}{Q_{inc}}$$

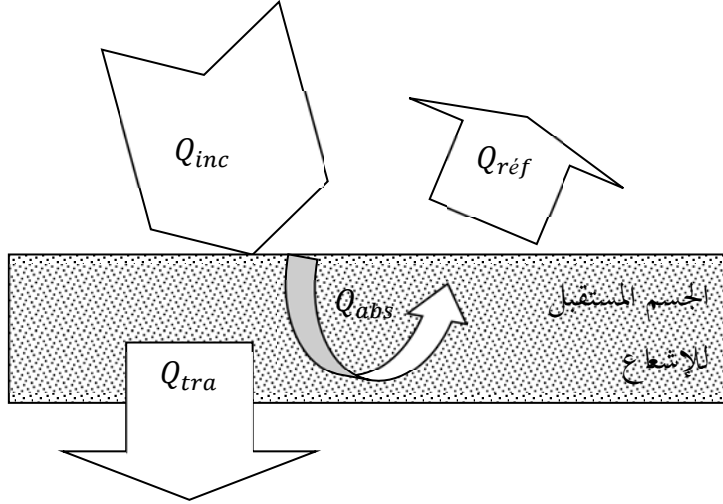
¹ كسر الانبعاثية الكلية في المَجَال $[\lambda_1, \lambda_2]$ يعطى بالعلاقة: $F_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}^0 d\lambda}{\sigma T^4} = F_{0-\lambda_2} - F_{0-\lambda_1}$ ، ويحسب بالجدول.

$$(2) \text{ جزء يمتص عبر الجسم } Q_{abs}, \text{ ومعامل الامتصاص: } \alpha = \frac{Q_{abs}}{Q_{inc}}$$

$$(3) \text{ جزء ينعكس عبر الجسم } Q_{réf}, \text{ ومعامل الانعكاس: } \rho = \frac{Q_{réf}}{Q_{inc}}$$

العلاقة بين المعاملات:

$$\tau + \alpha + \rho = 1 \text{ ، معناه: } Q_{inc} = Q_{tra} + Q_{abs} + Q_{réf}$$



الشكل (3-16): إستقبال الإشعاع

ملاحظات:

- (1) السطوح العتمة للأجسام الرمادية والحقيقية، لها إمرارية معدومة ($\tau_{opaque} = 0$)، ولها خواص إشعاعية مستقلة عن طول الموجة واتجاه الإشعاع الوارد لها، ونكتب: $\tau = \rho = 1 - \alpha$.
- (2) نعتبر الصفائح المعدنية (المنيوم، نحاس ...) أجسام رمادية لها سطوح عتمة.
- (3) نعتبر البلاستيك و صفائح الزجاج أجسام رمادية لها سطوح شفافة (معامل الامرار له قيمة معتبرة).
- (4) كل السطوح المظلمة باللون الأسود أو أصل لوئها أسود (وغير براق)، نعتبرها سطوحا لأجسام سوداء مثل السطوح السوداء في المقطرات الشمسية.
- (5) تستقبل الأرض من الإشعاع الشمسي ما قيمته: $1,98 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ أي $1381 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (قيست سنة 1950)، وسنة 1960 حسنت هذه القيمة بـ $1353 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ، والمستخدمة حاليا في الدراسات هي القيمة: $E = (1367 \pm 6) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ، ويسمى "الثابت الشمسي" أو الاستنارة الإشعاعية للأرض خارج الغلاف الجوي.

(4) الإشعاع الشمسي

1-4 الشمس: ☼

الشمس هي نجم كروي الشكل، مادته من البلازما (مادة متأينة كلياً) له ضغط يتناقص من المركز إلى السطح الخارجي، وفي السطح يتفاعل الهيليوم تفاعلاً حرارياً-نووي (He أو جسيمات α)، وينتج عنه طاقة معظمها

إشعاع كهرومغناطيسي ، تتوزع وتنتشر في مجال كبير لطول الموجات $m \in [10^{-10}, 10^4]$ ، والطاقة المشعة حوالي $Q_s = 3,8 \cdot 10^{26} W$ ، وهي ثابتة على مدى عشرات السنين الشمس لها قطر متوسط يساوي $2R_s = 1,39 \cdot 10^9 m$ (109 أطول من قطر الأرض) ، وكتلة في حدود $m_s = 2 \cdot 10^{30} kg$ (333 432 مرة من كتلة الأرض) ، وكثافة متوسطة $1,41$ ($\cong 3,88$ مرة أقل من كثافة الأرض).

$$d_s = \left(\frac{m_s}{\frac{4}{3} \pi R_s^3} \right) = \frac{333\,432 \cdot m_{terre}}{\frac{4}{3} \pi (109 R_{terre})^3} = \frac{333\,432}{(109)^3} \left(\frac{m_{terre}}{\frac{4}{3} \pi R_{terre}^3} \right) = \frac{1}{3,88} d_{terre}$$

حركة الشمس: تدور الشمس حول نفسها في 27 يوما أرضيا، وتحتل موقعا وسطا في مجرة درب التبانة¹ من حيث بعدها عن مركز وحدود المجرة.

2-4 الأرض:

كوكب الأرض نعتبره كروي الشكل محاط بغلاف جوي، ومتأثر بضغط الهواء المتناقص مع الارتفاع عن سطح البحر. والأرض ذات قطر $2R_{terre} = 12752293m$ ، وكتلة $m_{terre} = 6 \cdot 10^{24} kg$ ، وكثافة 5.51 .

حركة الأرض: لها حركة معقدة فهي تدور حول نفسها في 23 ساعة و 56 دقيقة و 4 ثوان و $100 \setminus 91$ ، بسرعة زاوية تقارب $5.5 \cdot 10^{-5} rad/s$ وحول الشمس في 365 يوم و 9 ساعات و 10 دقائق ، بسرعة زاوية $7.3 \cdot 10^{-5} rad/s$. محور القطبين (الشمالي و الجنوبي) مائلين بزاوية 23,45 بالنسبة لناظم المدار الإهليجي².

نصف قطر دوران المدار الإهليجي r الذي تصنعه حركة الأرض حول الشمس:

$$r = a \frac{1-e^2}{1+e \cdot \cos \theta} \quad \text{بحيث: } a = 1,50 \cdot 10^{11} m \text{ المسافة المتوسطة؛ و } e = 0,017 \text{ الانحراف عن مركز المدار.}$$

3-4 المعالم الفضائية لتحديد موقع الشمس:

لتحديد موقع الشمس نستعمل معلم أرضي أول \mathcal{R} مرتبط بمركز الأرض، ومعلم أرضي ثانٍ \mathcal{R}' مرتبط بالمنطقة قيد الدراسة فيكون لدينا ثلاثة نقاط في الفضاء: مركز الأرض نرمز له بـ "O" ، والشمس (نعتبرها نقطة بعدها عن الأرض) نرمز لها بـ "S" ، والمنطقة قيد الدراسة بـ "M" .

وللربط بين النقاط الثلاث نحتاج إلى ست زوايا في معلمين للإحداثيات الكروية (الأول $\mathcal{R}(x, y, z)$ والثاني $\mathcal{R}'(x', y', z')$).

¹ مجرة درب التبانة: (المجرة التي تنتمي لها المجموعة الشمسية المحلية)

² إذا كان المدار دائري: نسبة الطاقة الواصلة للأرض هي $\frac{1}{5.10^9} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{R_{terre}}{r} \right)^2 = \frac{\pi \cdot (R_{terre})^2}{4\pi r^2} = \frac{E(\text{tot} - \text{réc})_s}{Q_s}$

4-4) الزوايا المحددة للمواقع النسبية للنقاط الثلاثة: موضحة في الشكل (3-17)

خط الطول λ ودائرة العرض φ : تحددان موقع المنطقة المدروسة M بالنسبة لمركز الأرض O .

$\lambda = 0 = 360^\circ$ بالنسبة لخط جرينيتش، $\varphi = 0$ لخط الاستواء، $\varphi = +90^\circ$ للقطب الشمالي، و $\varphi = -90^\circ$ للقطب الجنوبي.

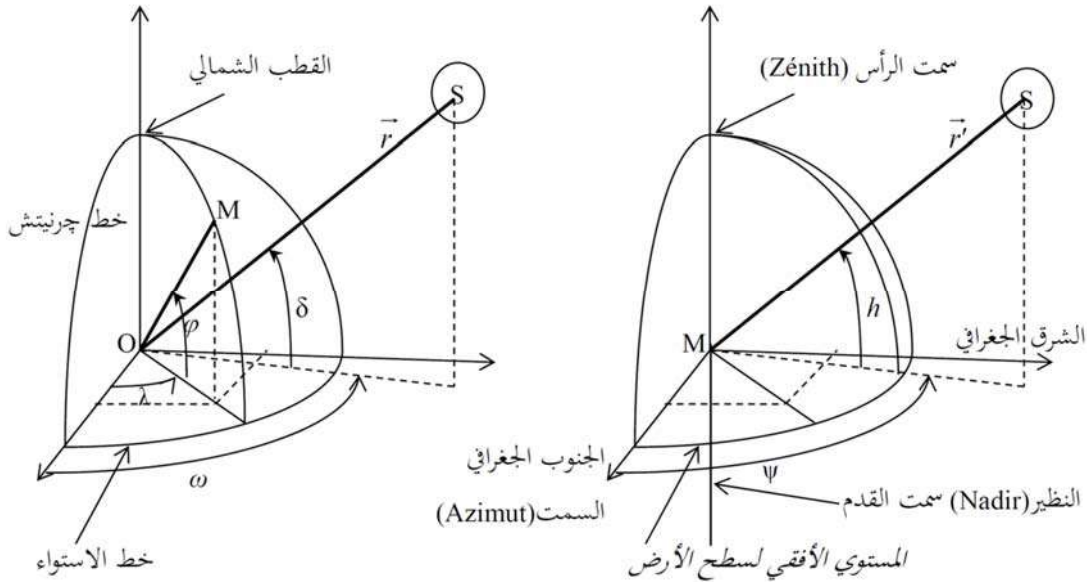
الانحراف الشمسي δ والزوايا الزمنية ω : تحددان موقع الشمس S بالنسبة لمركز الأرض O .

$\delta = 0$ في الاعتدالين (الريبيعي: 21 مارس والخريفي: 23 ديسمبر)، $\delta = 23,45^\circ$ في الانقلابين (الشتوي:

22 ديسمبر والصيفي: 22 جوان). $\omega = 0$ عند الزوال، $\omega = +\omega_{max}$ عند الشروق و $\omega = -\omega_{max}$ عند الغروب.

السمت ψ والارتفاع الشمسي h : تحددان موقع الشمس S بالنسبة للمنطقة المدروسة M .

$h = 0$ عند الشروق والغروب و $h = h_{max} = 90^\circ - \varphi + \delta$ عند الزوال.



الشكل (3-17): الزوايا الستة $(\lambda, \varphi), (\delta, \omega), (\psi, h)$ المحددة للمواقع النسبية للنقاط الثلاثة في الفضاء

4-5) العلاقات الرياضية التي تربط بين الزوايا:

شعاع موضع الشمس بالنسبة للمعلم الأول: نعتبر $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ أساس للمعلم الأول، نعرف شعاع الوحدة \vec{s} المحمول على شعاع الموضع $\vec{OS} = r$ ، يعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{s} = \frac{\vec{r}}{r} = (\cos\delta \sin\omega) \vec{i} + (\cos\delta \cdot \cos\omega) \vec{j} + (\sin\delta) \vec{k}$$

شعاع موضع الشمس بالنسبة للمعلم الثاني: نعتبر $\mathcal{R}'(M, \vec{i}', \vec{j}', \vec{k}')$ أساس للمعلم الثاني، نعرف شعاع الوحدة \vec{s}' المحمول على شعاع الموضع $\vec{MS} = r'$ ، يعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{s}' = \frac{\vec{r}'}{r'} = (\cosh \cdot \cos\psi) \vec{i}' + (\cosh \cdot \sin\psi) \vec{j}' + (\sinh) \vec{k}'$$

الأساس $\mathcal{R}'(M, \vec{i}', \vec{j}', \vec{k}')$ بدلالة الأساس $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ بمخططات مساعِدة نصل للعلاقات التالية: مع أخذ النقطة M تنتمي لخط چرنيتش $\lambda = 0$ لتسهيل الحسابات.

$\vec{i}' = (\sin\varphi) \vec{i} - (\cos\varphi) \vec{k}$; $\vec{j}' = \vec{j}$; $\vec{k}' = (\cos\varphi) \vec{i} + (\sin\varphi) \vec{k}$
الارتفاع الشمسي h : نطابق بين مركبات الشعاعين s و s' بعد تعويض عبارات الأشعة $(\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}')$ في s' فينتج ما يلي:

$$\sinh = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad ; \quad \sin\Psi = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cosh}$$

سمت الرأس θ_s : هي زاوية متممة للارتفاع الشمسي أي: $\theta_s = 90^\circ - h$ ، و $\cos\theta_s = \sinh$

الزاوية الزمنية الأعظمية ω_{\max} : توافق انعدام قيمة الارتفاع الشمسي (عند الشروق والغروب):

عند الشروق: $\omega_L = \omega_{\max} = \arctg(-\operatorname{tg}\delta \operatorname{tg}\varphi)$ ، عند الغروب: $\omega_c = -\omega_{\max} = -\arctg(-\operatorname{tg}\delta \operatorname{tg}\varphi)$

توقيت الشروق H_l : لحظة شروق الشمس $H_l = 12 - \left(\frac{\omega_{\max}}{15}\right)$

توقيت الغروب H_c : لحظة غروب الشمس $H_c = 12 + \left(\frac{\omega_{\max}}{15}\right)$

المدى النهاري S_0 : هي المدة بين الشروق والغروب $S_0 = H_c - H_l = 2\left(\frac{\omega_{\max}}{15}\right)$

ملاحظة: العدد 15: هو 15 درجة لكل ساعة عند التحرك (شرق-غرب) على نفس دائرة العرض، أي 1 درجة لـ 4 دقائق، أي مسافة 111 كم (شرق-غرب) لكل درجة عند دائرة خط الاستواء $\varphi = 0$ ، و 96 كم عند دائرة العرض المارة عبر مدينة ورقلة $\varphi = 30.75^\circ$.

2-5-4) المعالم الزمنية:

إن دوران الأرض حول الشمس غير منتظم، ومتغير على مدار السنة، فيعطي حسابات ونتائج غير صحيحة بالنسبة للحظة الزوال، أي 12h:00 في كل أيام السنة، لذلك نستخدم معالم زمنية.

الزمن المحلي: هو اللحظة الزمنية في المنطقة قيد الدراسة TL .

الفرق الزمني المحلي: ΔT هو الفارق الزمني بالساعات بين چرنيتش والمنطقة M المتفق عليه لضبط التوقيت.

الزمن العالمي: TU هو الزمن عند خط چرنيتش ($\lambda = 0$).

وهو يعطى بالعلاقة: $TU = TL \pm \Delta T$ ، إشارة موجبة منطقة في شرق چرنيتش وسالبة منطقة في غرب چرنيتش.

الزمن الشمسي المتوسط: إن المدى النهاري النظري متناظر بالنسبة للزوال، ونسمي لحظة مرور الشمس على

الزوال ب: الزمن الشمسي المتوسط TSM في المنطقة M: ويعطى بالعلاقة $TSM = TU \pm \frac{\lambda}{15}$

الدالة الزمنية للتصحيح: ونرمز لها بـ ET لها عدة علاقات من بينها: حيث $(x = 2\pi.n_j / 366)$ ¹

$$ET = 0,0002 - 0,4197\cos(x) + 3,2265\cos(2x) + 0,0963\cos(3x) \\ + 7,3569\sin(x) + 9,3912\sin(2x) + 0,3361\sin(3x)$$

¹ n_j هو عدد الأيام محسوبة من 1 جانفي إلى اليوم قيد الدراسة، مثلاً n_j من أجل 21 مارس تساوي $n_j =$

80=21+28+31

الزمن الشمسي الحقيقي:

هو اللحظة الحقيقية للشمس بالنسبة لخط جرينيتش والمتوافقة مع الزمن المحلي TL في المنطقة قيد الدراسة M

$$TSV = TSM + ET \quad \text{، ويعطى } (midi \text{ solaire vrai} = 12 \text{ h} : 00 \text{ TSV})$$

$$\omega_{vri} = 15(TSV - 12) \quad \text{الزاوية الزمنية الحقيقية: تعطى بالعلاقة التالية:}$$

خلاصة الفصل الثالث:

جميع الظواهر المدروسة في هذا الفصل لها تأثير في عمل المقطر، حيث أن التبخير ينتج بخار الماء على مستوى المبخر والمكثف ينتج الماء السائل وتبقى الأملاح مترسبة في الحوض، وكل ذلك بوجود إشعاع شمسي يمتصه السطح الأسود على مستوى الحوض. نوع التبخير الذي يحدث في المبخر تحت درجة حرارة الغليان حيث يسمى بالغليان الدوني (Subcooled boiling)¹ والذي يحدث بدون فقاعات وبوجود سطح ساخن. أما عملية التكثيف التي تحدث بوجود سطح بارد من الزجاج أو أي معدن آخر، والسطح البارد يمكن أن يكون مستويا أفقيا أو مائلا أو على شكل أسطوانة، وتختلف العلاقات الخاصة بالانتقال الحراري من شكل إلى آخر حسب البراهين الرياضية التي وضعها Nusselt، وهي كما يلي:

- معامل الانتقال الحراري بالحمل على مستوى شاقولي²:

$$\bar{h}_\ell = 0.943 \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu (T_v - T_s) \ell} \right)^{1/4}$$

- معامل الانتقال الحراري بالحمل على مستوى مائل بزاوية (α) ³:

$$\bar{h}_\ell = 0.943 \left[\frac{k^3 \rho g L_{ev} \sin \alpha}{\nu \Delta T \cdot \ell} \right]^{1/4}$$

- معامل الانتقال الحراري بالحمل على سطوح الأنايب الأفقية⁴:

$$\bar{h}_{D_0} = 0,725 \left(\frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu (T_v - T_s) D_0} \right)^{1/4}$$

أما الإشعاع الشمسي ينقسم إلى مباشر ومنتشر ومجموعهما يسمى الكلي، ويمكن تعريفه على أنه الاستنارة الإشعاعية لجسم مُسْتَقْبِل للإشعاع (Illumination)، والجسم المُسْتَقْبِل للإشعاع هو سطح الأرض ويحسب تجريبيا بجهاز (Solarimètre)، وقيمتها لها التأثير المباشر على كمية الماء المنتج من أجهزة التقطير، وهذا ما يتم دراسته تجريبيا في الفصل الخامس.

¹ لتفاصيل أكثر أنظر التعريف 7 في الصفحة 94 في نفس الفصل.

² لتفاصيل أكثر أنظر المعادلة (3-25)، والبرهان من الصفحة 111 إلى 115 في نفس الفصل

³ لتفاصيل أكثر أنظر المعادلة (3-32)، والبرهان من الصفحة 116 إلى 117 في نفس الفصل

⁴ لتفاصيل أكثر أنظر المعادلة (3-48)، والبرهان من الصفحة 117 إلى 119 في نفس الفصل

- Bergman, Theodore L, Frank P Incropera, David P DeWitt, and Adrienne S Lavine. 2011. *Fundamentals of heat and mass transfer*: John Wiley & Sons.
- Burmeister, Louis C. 1993. *Convective heat transfer*: John Wiley & Sons.
- Cai, Chang, Issam Mudawar, and Hong Liu". 2020. "Mechanistic method to predicting minimum heat flux point wall temperature in saturated pool boiling." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 156:119854. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119854>.
- Calus, WF, and DJ Leonidopoulos. 1974. "Pool boiling—binary liquid mixtures." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17 (2):249-256.
- Cao, Yuanwei, and Rafael Macián-Juan. 2022. "Numerical investigation of vapor bubble condensation in subcooled quiescent water." *Nuclear Engineering and Design* 388:111621. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111621>.
- Chen, Lin, Fengchu Jin, Jiahua Li, Yanchao Lv, Qingyang Wang, Deyin Zheng, Haizhen Xian, and Jun Lin. 2021. "Hybrid model of thin film boiling: Insights into the unique behavior and ultrahigh heat flux." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 179:121702. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121702>.
- Dai, Chunhui, Yong Li, Zhiguo Wei, Shaodan Li, Qi Xiao, and Xu Hu. 2017. "Research of Interfacial Shear effects on Heat Transfer Characteristics of Complete Condensation in Vertical Tube." *Energy Procedia* 142:3882-3887. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.292>.
- Deng, Zilong, Shangwen Gao, He Wang, Xiangdong Liu, and Chengbin Zhang .2022 . "Visualization study on the condensation heat transfer on vertical surfaces with a wettability gradient." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184:122331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122331>.
- He, Hui, Liang-ming Pan, Lie Wei, Mu-hao Zhang, and Ding-fei Zhang. 2020. "On the importance of non-equilibrium effect in microchannel two-phase boiling flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 149:119185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2.019.119185>
- Huetz-Aubert, M, and JF Sacadura. 1982. "Mesure des émissivités et des réflectivités monochromatiques directionnelles des matériaux opaques." *Revue de Physique Appliquée* 17 (4):251-260.
- Kern, Donald Quentin, and Donald Q Kern. 1950. *Process heat transfer*. Vol. 5: McGraw-Hill New York.
- Kotcioglu, I., A. Y. Uyarel, K. Kaygusuz, S. Gullapoglu, and I. Dincer. 1993. "An approach to heat and mass transfer analysis during film condensation inside a vertical tube." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 20 (2):265-277. doi: [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(93\)90054-Y](https://doi.org/10.1016/0735-1933(93)90054-Y).
- Le, Q. T., S. J. Ormiston, and H. M. Soliman. 2022. "Detailed modeling of laminar film condensation from zeotropic binary mixtures in a vertical tube." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 186:122440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122440>.
- Liu, Z, and RHS Winterton. 1991. "A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation." *International journal of heat and mass transfer* 34 (11):2759-2766.
- Nishant Ranjan Sinha, Kumar, Durgesh Ranjan, Nirbhay Kumar, Md Qaisar Raza, and Rishi Raj. 2020. "Simultaneous audio-visual-thermal characterization of transition boiling regime." *Experimental Thermal and Fluid Science* 118:110162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110162>.

- Park, Il Woong, Si Hyuk Yang, and Yeon-Gun Lee. 2022. "Degradation of condensation heat transfer on a vertical cylinder by a light noncondensable gas mixed with air-steam mixtures." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 130:105779. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105779>.
- Poggi, Philippe. 2007. "Intégration des systèmes énergétiques à sources renouvelables dans les réseaux électriques insulaires." Université Pascal Paoli.
- Poredoš, Primož, Nada Petelin, Boris Vidrih, Tilen Žel, Qiuming Ma, Ruzhu Wang, and Andrej Kitanovski. 2022. "Condensation of water vapor from humid air inside vertical channels formed by flat plates." *iScience* 25 (1):103565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103565>.
- Rabhi, Achref, Ioanna Aslanidou, Konstantinos Kyprianidis, and Rebei Bel Fdhila. 2021. "Onset of Nucleate Boiling Model for Rectangular Upward Narrow Channel :CFD Based Approach." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 165:120715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120715>.
- Raut, Harshal S., Amitabh Bhattacharya, and Atul Sharma. 2022. "Sustaining nucleate boiling in zero gravity using asymmetric sinusoidal base-plate oscillation." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184:122262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122262>.
- Tadrist, Lounès, Hervé Combeau, Mohammed Zamoum, and Mohand Kessal. 2020. "Experimental study of heat transfer at the transition regime between the natural convection and nucleate boiling: Influence of the heated wall tilt angle on the onset of nucleate boiling (ONB) and natural convection (ONC)." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 151:119388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119388>.
- Van den Bergh, W. J., J. Dirker, C. N. Markides, and J. P. Meyer. 2022. "Influence of non-steady transient heat flux on flow boiling heat transfer and pressure drop in horizontal pipes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 182:121927. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121927>.
- Vauge, Perrin de Brichambaut. 1983. "Le gisement solaire-Evaluation de la ressource énergétique." *Ciel et Terre* 99:62.
- Wang, Chenglong, Panxiao Li, Dalin Zhang, Wenxi Tian, Suizheng Qiu, G. H. Su, and Jian Deng. 2021. "Experimental study on the influence of heating surface inclination angle on heat transfer and CHF performance for pool boiling." *Nuclear Engineering and Technology*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.07.033>.
- Zhu, Shaolong, Xiaoqin Zhi, Chenjie Gu, Kai Wang, and Limin Qiu. 2021. "Enhancing heat transfer performance of nitrogen condensation on vertical plate with microstructure." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 172:121219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121219>.

الفصل الرابع

دراسة التوازن الطاقي في مختلف المقطرات الشمسية

المحتوى: دراسة نظرية للتوازن الحراري للنماذج التجريبية

النموذج الصفري (SSS): المقطر الشمسي البسيط بميل واحد (المقطر الشاهد بدون تحسينات).
(Simple Solar Still)

النموذج 1 (SSS-HP): المقطر البسيط بميل واحد بوجود مضخة حرارية للتكثيف (التجربة 1)
(Simple Solar Still with Heat Pump)

النموذج 2 (SSS-LTG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود سُمْك أقل في الزجاج (التجربة 2)
(Simple Solar Still with Less Thickness in Glass)

النموذج 3 (SSS-DLG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود طبقتين من الزجاج (التجربة 3)
(Simple Solar Still with Double Layer of Glass)

النموذج 4 (SSS-BSS): المقطر البسيط بميل واحد بوجود سطح أسود من إسفنج (التجربة 4)
(Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge)

النموذج 5 (SSS-FOG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود مروحة فوق الزجاج (التجربة 5)
(Simple Solar Still with a Fan Over Glass)

1) مقدمة الفصل الرابع:

الدراسة النظرية للنماذج التجريبية التي سوف تدرس في الفصل الرابع تحتاج لفرضيات لوضع معادلات التوازن الطاقوي لمستويات درجة الحرارة المرتبطة بكل نموذج. ولدينا الفرضيات التالية:

2) الفرضيات المُبَسَّطَة لوضع معادلات التوازن:

- فرضية 1:** توزيع درجة الحرارة منتظم في السطح الأسود والماء والغطاء الزجاجي وأي مستوى آخر، حيث يمكن اعتبار أن درجة الحرارة لا تتغير من نقطة إلى أخرى، يعني لا يوجد أي تدرج لدرجة الحرارة في أي مستوى.
- فرضية 2:** لا يوجد ضياع حراري في حواف خلية التقطير. وجميع هذه الانتقالات أصلها توصيل، وبالتالي نعتبر أن توصيلية المواد المُصنَّع منها الحواف الأفقية والشاقولية لها قيم صغيرة لا تؤثر في نقل الحرارة.
- فرضية 3:** الانتقال الحراري عبر المواد المُصنَّع منها السطح الأسود تكون بالتوصيل فقط، والانتقال الحراري في الماء يكون بالحمل فقط. كذلك يمكن اعتبار حركة جزيئات الماء مهملة.
- فرضية 4:** المستويات الحرارية الأساسية في المقطر البسيط هي ثلاث مستويات وهي: السطح الأسود، الماء، الغطاء الزجاجي، ويمكن أن يزداد عدد المستويات حسب النموذج المقترح.
- فرضية 5:** في كل مستوى يمكن وضع معادلة للتوازن الحراري كما يلي (Tosun 2007):

$$\left(\text{Rate of } q \right)_{\text{accumulation}} = m C \frac{dT}{dt} = \left(\text{Rate of } q \right)_{\text{in}} - \left(\text{Rate of } q \right)_{\text{out}} + \left(\text{Rate of } q \right)_{\text{generation}}$$

فرضية 6: في كل مستوى يمكن اعتبار التوالد الحراري معدوم، أي يمكن كتابة ما يلي: $\left(\text{Rate of } q \right)_{\text{generation}} \approx 0$

3) النموذج الصفري للمقطر البسيط (بدون تحسينات – الشاهد)

Simple Solar Still (SSS)

هذا النموذج يخص المقطر البسيط ذو ميل واحد وبدون تحسينات، ونسميه الشاهد أي يشهد على أن غيره من المقطرات

بها تحسينات، ونرمز لهذا المقطر بالرمز: (SSS) اختصاراً لـ Simple Solar Still

وله ثلاث مستويات لدرجة الحرارة، وهي:

المستوى 1: السطح الأسود أو ما يسمى بطانة الحوض، ونرمز له بالرمز b اختصاراً لـ black surface.

المستوى 2: الماء أو الماء المالح وهو يقوم مقام المبخر، ونرمز له بالرمز w اختصاراً لـ water.

المستوى 3: الزجاج أو الغطاء الزجاجي وهو يقوم مقام المكثف، ونرمز له بالرمز g اختصاراً لـ glass cover.

والشكل (1-4) يوضح هذه المستويات، وكيفية تركيب المزدوجات الحرارية في النقاط المخصصة لكل مستوى.

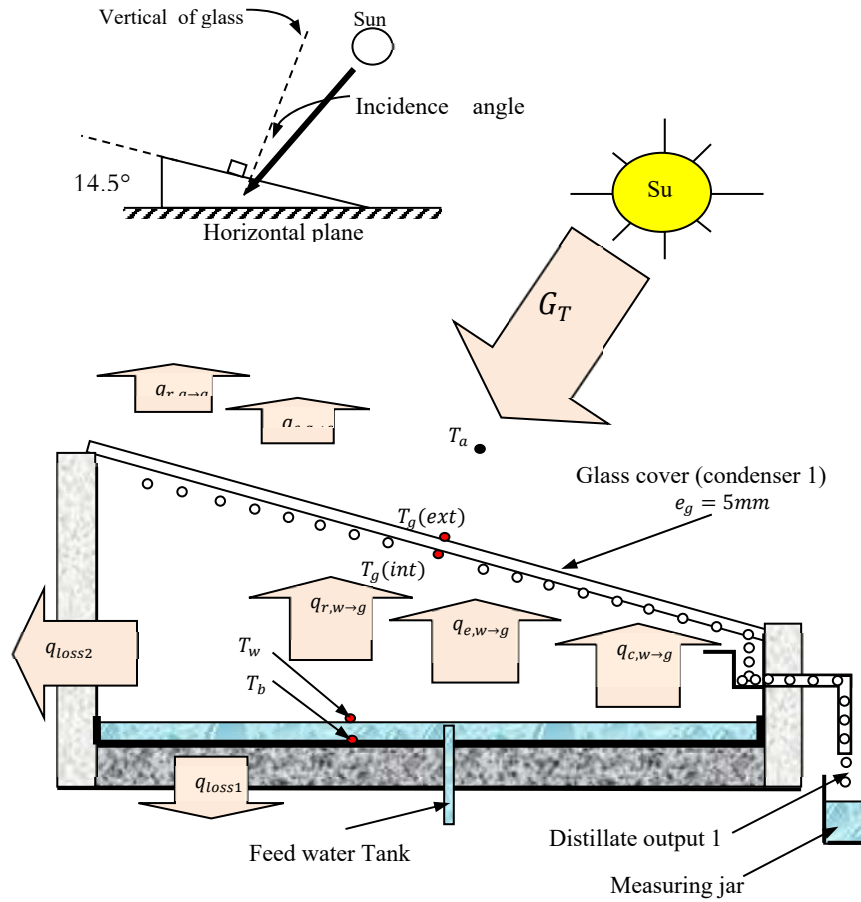
3-1) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (SSS): مبدأياً يمكن اعتبار الترتيب التصاعدي لقيم درجات

الحرارة كل لحظة، كما يلي $T_g < T_w < T_b$ ، لكن يمكن أن يحدث في التجارب أن يختل هذا التوازن أو أن يتساوى مستويين

في درجة الحرارة، وهذا حسبما تمليه التجربة من ظواهر كالضياع في الحرارة في أحد المستويات، أو تأثير مستوى حراري

على مستوى آخر. يمكن اعتبار درجة حرارة الغطاء الزجاجي T_g هي درجة الحرارة المتوسطة بين الوجه الداخلي والوجه الخارجي:

$$T_g = \frac{(T_{g(int)} + T_{g(ext)})}{2} \quad (1 - 4)$$



الشكل (1-4): تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي بدون تحسينات

2-3) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (SSS): مجموعة كبيرة من الباحثين وضعوا

نماذج رياضية على شكل معادلات تفاضلية لدرجة الحرارة بالنسبة للزمن، ومن هؤلاء نجد

(Rahbar et al. 2015; Edalatpour et al. 2015; Omara et al. 2013)

1-2-3) المعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية في النموذج (SSS):

المستوى 1 : التوازن الحراري على مستوى السطح الأسود (الأسود الماص للإشعاع)

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{loss1} + q_{loss2}) \quad (2 - 4)$$

المستوى 2 : التوازن الحراري على مستوى الماء (مبخر المقطر)

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} \quad (3 - 4)$$

المستوى 3: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي (مكثف المقطر)

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g (1 - \rho_g) G_T + (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} - (q_{r,g \rightarrow a} + q_{c,g \rightarrow a}) \quad (4 - 4)$$

(2-2-3) التدفق الكنتلي والمقادير الحرارية في النموذج (SSS):

- كمية الماء المقطر بالنسبة لوحدة الزمن ووحدة المساحة:

$$\frac{dm_d}{dt} = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{\bar{H}_{e1}} = \dot{m}_{d1}(w \rightarrow g) \quad (5 - 4)$$

- الحرارة الكامنة للتبخير الخاصة بالماء محسوبة من طرف

(Fath et al. 2002; Ben Halima et al. 2014) بالعلاقة:

$$\bar{H}_{e1} = (2501,67 - 2,389 \cdot T_{m1}) \cdot 10^3 \quad (6 - 4)$$

حيث أن درجة الحرارة المتوسطة في خلية التقطير هي $T_{m1} = \frac{T_w + T_g}{2}$

(3-2-3) العبارات الخاصة بالمقادير الحرارية في النموذج (SSS):

- كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{r,w \rightarrow g} = \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_g^4) \quad ; \quad \varepsilon_w \approx 0,9 \quad (7 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{c,w \rightarrow g} = h_{c,w \rightarrow g} (T_w - T_g) \quad (8 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{e,w \rightarrow g} = h_{e,w \rightarrow g} (T_w - T_g) \quad (9 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين السطح الأسود والماء:

$$q_{c,b \rightarrow w} = h_{c,b \rightarrow w} (T_b - T_w) \quad (10 - 4)$$

- كمية الحرارة الضائعة بالتوصيل من السطح الأسود للوسط الخارجي حسب

(Madhlopa et al. 2009; Ben Halima et al. 2014)

$$q_{loss1} = U_{b1} (T_b - T_a) \quad ; \quad U_{b1} = \left(\frac{e_b}{k_b} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (11 - 4)$$

$$q_{loss2} = U_{b2} (T_b - T_a) \quad ; \quad U_{b2} = \left(\frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (12 - 4)$$

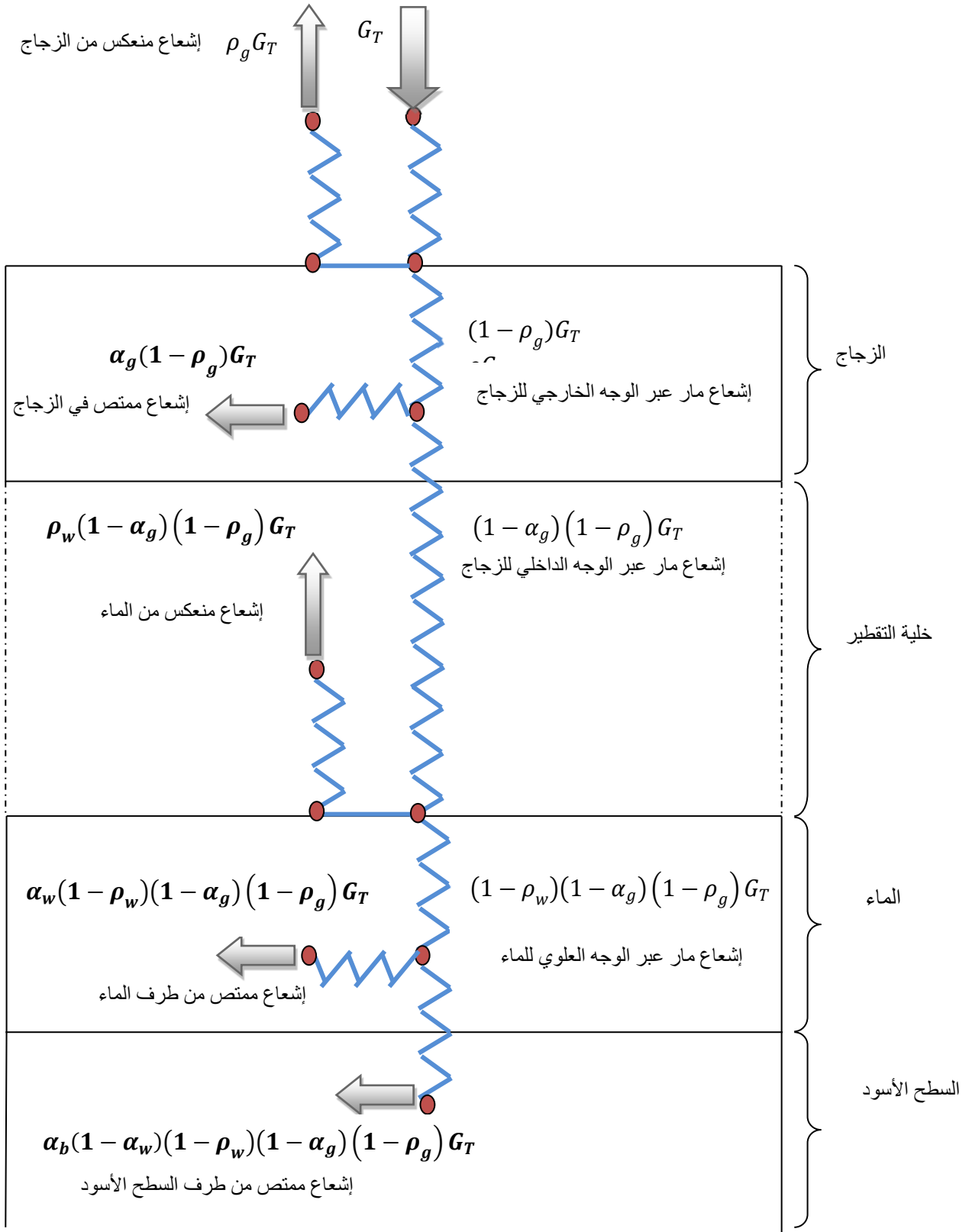
حيث المقادير التالية: k_b, k_1, k_2, k_3, k_4 هي عبارة عن التوصيلية الحرارية لمختلف المواد التي تدخل في تركيب حواف

المقطر، لكن حسب الفرضية 2 فإن قيم هذه الانتقالات مهملة، أي ما معناه q_{loss1}, q_{loss2} ويمكن الإشارة لقيم سُمك

كل مادة e_b, e_1, e_2, e_3, e_4 مع الكتلة السطحية و الحرارة النوعية المتوسطة في الجدول (4-1) التالي :

ولفهم المعادلات (4 - 4)، (3 - 4)، (4 - 4) والتي بها المقدار G_T لدينا الشكل (4-2) يوضح مقدار الاشعاع

المتص في كل مستوى على حدى.



الشكل (2-4): مخطط يوضح الإشعاعات الحرارية المارة عبر مختلف أجزاء المقطر (SSS)

الجدول (1-4) : بعض الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة في المقطر

حيث نرسم بنقطة ■ للمواد الداخلة في تركيب الحواف، وبنقطة ○ للمستويات الأساسية في المقطر.

Materials	(e) thickness mm	(m) Specific mass, kg/m ²	average Specific heat, (C) J/kg. K
○ Aluminum plate	$e_b = 3$	$m_b = 7,629$	$C_b = 897$
○ Water	$e_w = 10$	$m_w = 10,000$	$C_w = 3958 - 52,3 T + 0,837 T^2$
○ Glass	$e_g = 5$	$m_g = 11,937$	$C_g = 753$
■ Polystyrene insulation	$e_1 = 40$	$m_1 = 1.655$	$C_1 = 1400$
■ Galvanized iron plate	$e_2 = 1$	$m_2 = 5,939$	$C_2 = 449$
■ Aluminum foil	$e_3 = 3$	$m_3 = 0.166$	$C_3 = 897$
■ Wood	$e_4 = 30$	$m_4 = 48.318$	$C_4 = 2300$

- كمية الحرارة الضائعة بالحمل من الغطاء الزجاجي إلى الهواء الخارجي حسب الباحثين:

(Madhlopa et al. 2009; Ben Halima et al. 2014)

$$q_{c,g \rightarrow a} = h_{c,g \rightarrow a}(T_g - T_a); \begin{cases} h_{c,g \rightarrow a} = 2,8 + 3V_a & \text{if } V_a \leq 5 \text{ m/s} \\ h_{c,g \rightarrow a} = 6,15V_a^{0,8} & \text{if } V_a > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (13 - 4)$$

3-2-4) معاملات انتقال الحرارة بين المستويات الحرارية في النموذج (SSS):

ويمكن إيجاد معاملات متعددة ومختلفة حسب نمط الانتقال والمستويات الحرارية، وهي:

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي (Rahmani et al. 2017)

$$h_{c,w \rightarrow g} = 0,884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273,15)}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (14 - 4)$$

معامل الانتقال الحراري بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$h_{e,w \rightarrow g} = 16,273 \cdot 10^{-3} h_{c,w \rightarrow g} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (15 - 5)$$

حيث P_w, P_g ضغط البخار عند الغطاء الزجاجي و الماء على الترتيب، حسب ما أعطاه الباحثين

(Edalatpour et al. 2015; Feilizadeh et al. 2016)

$$P(T) = \exp \left(25,317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right) \quad (16 - 5)$$

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، والعلاقات كما وصفها الباحث:

(Ben Halima et al. 2014)

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,54 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^4 < Ra_w < 10^7 \quad (17 - 4)$$

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,15 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \text{ if } 10^7 < Ra_w < 10^{11} \quad (18 - 4)$$

- رقم رايلي Rayleigh للانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، حسب (Xie et al., 2015)

$$Ra_w = g \frac{e_w^3}{\nu_w \cdot a} \beta_w (T_b - T_w) ; \beta_w = \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\Delta \rho_w}{\Delta T} \right)_P \quad (19 - 4)$$

- الإشعاع الحراري الممتص في المستويات الثلاث في المقطر البسيط:

(Edalatpour et al. 2015; Feilizadeh et al. 2016)

الممتص في الغطاء الزجاجي: $\alpha_g(1 - \rho_g)G_T$

الممتص في الماء: $\alpha_w(1 - \rho_g)(1 - \alpha_g)G_T$

الممتص في السطح الأسود: $\alpha_b(1 - \rho_g)(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_w)G_T$

حيث المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث (الامتصاصية α والانعكاسية ρ) مدونة في الجدول (2-4)

الجدول (2-4): المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث

Materials	(Absorptivity) α	(Reflectivity) ρ
Basin liner	$\alpha_b = 0,95$	$\rho_b = 0,05$
Water	$\alpha_w = 0,05$	$\rho_w = 0,05$
Glass	$\alpha_g = 0,0475$	$\rho_g = 0,05$

- الكفاءة الطاقوية للمقطر البسيط:

(Prakash et al. 2015; Rahmani et al. 2015)

$$\eta_1 = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{G_T} ; \text{ in type (SSS) ;} \quad (20 - 4)$$

4) النموذج الأول للمقطر الشمسي البسيط (وجود مضخة حرارية للتكثيف)

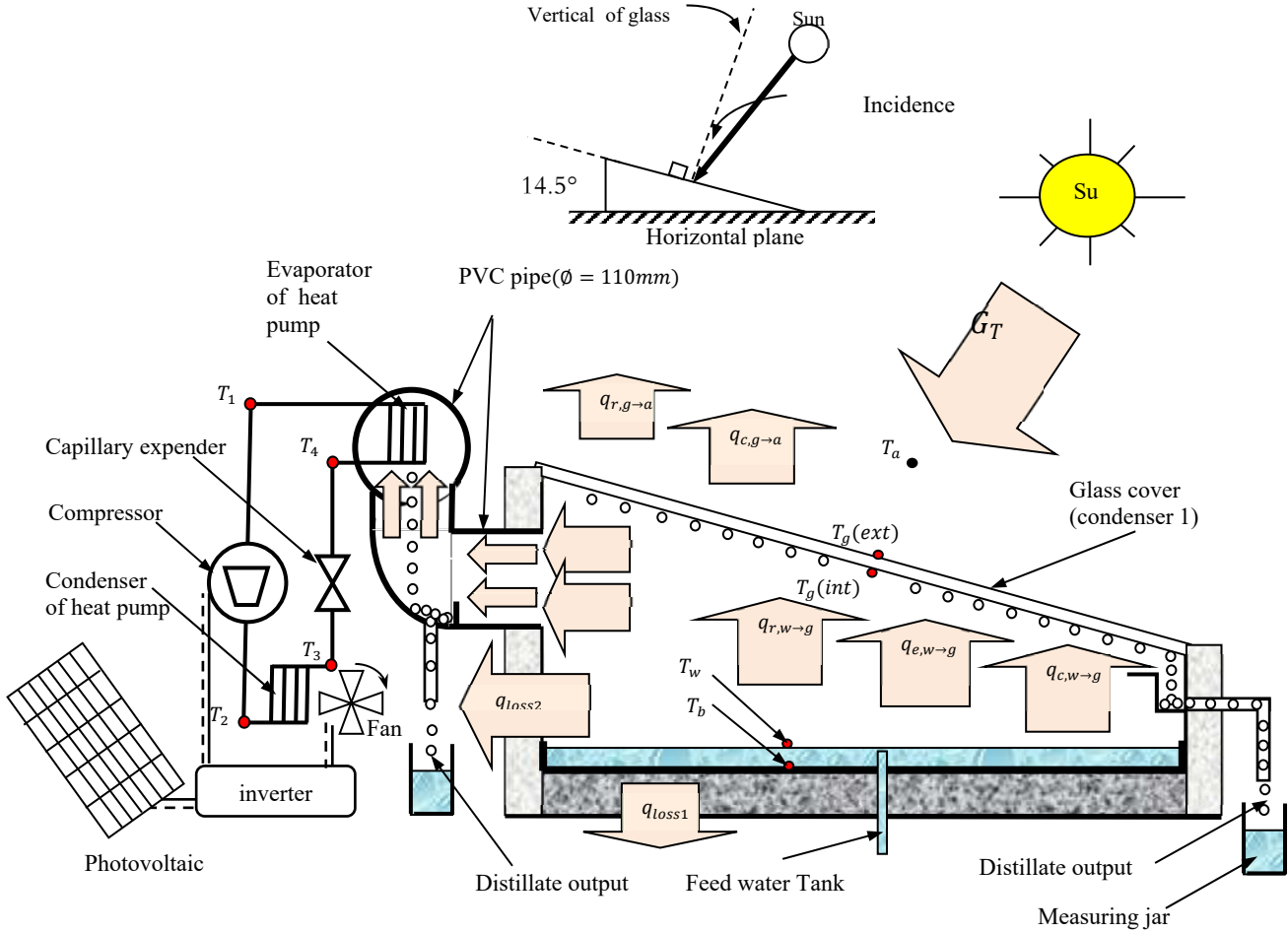
Simple Solar Still with Heat Pump (SSS-HP)

هذا النموذج يخص المقطر البسيط ذو ميل واحد وبوجود تحسينات، وبه مضخة حرارية حيث أن مبخرها مدمج خلف خلية التقطير ومكثفها يتبادل الحرارة مع الهواء الخارجي.

ونرمز لهذا المقطر بالرمز: (SSS-HP) اختصارا لـ Simple Solar Still with Heat Pump

ونختصر العبارة (SSS-HP) إلى (HP) في جميع فقرات هذا الفصل. وله أربع مستويات لدرجة الحرارة، وهي:

- المستوى 1: السطح الأسود أو ما يسمى بطانة الحوض، و نرزم له بالرمز b اختصارا لـ black surface .
- المستوى 2: الماء أو الماء المالح وهو يقوم مقام المبخر، ونرزم له بالرمز w اختصارا لـ water .
- المستوى 3: الزجاج أو الغطاء الزجاجي و هو يقوم مقام المكثف 1، و نرزم له بالرمز g اختصارا لـ glass cover .
- المستوى 4: مبخر المضخة الحرارية وهو يقوم مقام المكثف 2، ونرزم له بالرمز f اختصارا لـ refrigeration .
- والشكل (3-4) يوضع هذه المستويات، وكيفية تركيب المزدوجات الحرارية في النقاط المخصصة لكل مستوي.



الشكل (3-4): تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (HP)

بوجود تحسينات (تكثيف بمضخة حرارية)

(1-4) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (HP):

يمكن اعتبار الترتيب التصاعدي لقيم درجات الحرارة كل لحظة، كما يلي: $T_f < T_g < T_w < T_b$ ، لكن يمكن أن يحدث في التجارب أن يختل هذا التوازن أو أن يتساوى مستويين في درجة الحرارة، وهذا حسب ما تمليه التجربة من ظواهر

كالضياء في الحرارة في أحد المستويات، أو تأثير مستوي حراري على مستوي آخر. ويمكن اعتبار درجة حرارة الغطاء الزجاجي T_g هي درجة الحرارة المتوسطة بين اللوجه الداخلي والوجه الخارجي حسب العلاقة التالية: $T_g = \frac{(T_{g(int)} + T_{g(ext)})}{2}$

4-2) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (HP):

يمكن وضع نماذج رياضية على شكل معادلات تفاضلية لدرجة الحرارة بالنسبة للزمن.

4-2-1) المعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية في النموذج (HP):

المستوى 1: التوازن الحراري على مستوى السطح الأسود (الأسود الماص للإشعاع)، وهو نفس مستوي النموذج الشاهد:

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{loss1} + q_{loss2}) \quad (21 - 4)$$

المستوى 2: التوازن الحراري على مستوى الماء (مبخر المقطر)، ويختلف عن الشاهد في الحد الأخير:

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} - (q_{e,w \rightarrow f} + q_{c,w \rightarrow f}) \frac{A_f}{A_w} \quad (22 - 4)$$

المستوى 3: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي (مكثف 1 للمقطر)، ولا يختلف عن الشاهد:

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g (1 - \rho_g) G_T + (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} - (q_{r,g \rightarrow a} + q_{c,g \rightarrow a}) \quad (23 - 4)$$

المستوى 4: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي (مكثف 2 للمقطر)، ولا يوجد هذا المستوى في الشاهد:

$$m_f C_f \frac{dT_f}{dt} = (q_{e,w \rightarrow f} + q_{c,w \rightarrow f}) \frac{A_f}{A_w} - \dot{m}_f \cdot q_L \quad (24 - 4)$$

ولفهم حدود المعادلات (4-21)، (4-22)، (4-23) والتي بها المقدار G_T لدين الشكل (4-2) يوضح مقدار

الإشعاع الممتص في كل مستوى على حدى. وهذه الحدود لا تختلف عن الحدود الموجودة في معادلات التوازن الحراري

للمقطر (SSS) وذلك راجع لان مبخر المضخة لا يتعرض لأشعة الشمس، وهذا واضح في المعادلة (4-24) التي لا تحوي المقدار G_T .

4-2-2) التدفق الكتلي والمقادير الحرارية في النموذج (HP):

- كمية الماء المقطر بالنسبة لوحدة الزمن ووحدة المساحة، والكمية تختلف عن الشاهد بإضافة الحد الأخير:

$$\frac{dm_d}{dt} = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{\bar{H}_{e1}} + \frac{q_{e,w \rightarrow f}}{\bar{H}_{e2}} = \dot{m}_{d2}(w \rightarrow g) + \dot{m}_{d2}(w \rightarrow f); \text{ in type (SSS - HP)} \quad (25 - 4)$$

- الحرارة الكامنة للتبخير الخاصة بالماء محسوبة من طرف (Fath et al., 2002; Ben Halima et al., 2014) بالعلاقة:

$$\bar{H}_{e1} = (2501,67 - 2,389 \cdot T_{m1}) \cdot 10^3 ; \bar{H}_{e2} = (2501,67 - 2,389 \cdot T_{m2}) \cdot 10^3 \quad (26 - 4)$$

وكمية الماء المقطر تختلف عن الشاهد (SSS) بإضافة الحد $\frac{q_{e,w \rightarrow f}}{H_{e2}}$.

حيث أن درجة الحرارة المتوسطة في خلية التقطير بين الماء والمكثف 1 هي $T_{m1} = \frac{T_w + T_g}{2}$.

ودرجة الحرارة المتوسطة في خلية التقطير بين الماء والمكثف 2 هي $T_{m2} = \frac{T_w + T_f}{2}$.

4-2-3) العبارات الخاصة بالمقادير الحرارية في النموذج (HP):

- كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع بين الماء والغطاء الزجاجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$q_{r,w \rightarrow g} = \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_g^4) ; \quad \varepsilon_w \approx 0,9 \quad (27 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$q_{c,w \rightarrow g} = h_{c,w \rightarrow g} (T_w - T_g) \quad (28 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$q_{e,w \rightarrow g} = h_{e,w \rightarrow g} (T_w - T_g) \quad (29 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين السطح الأسود والماء، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$q_{c,b \rightarrow w} = h_{c,b \rightarrow w} (T_b - T_w) \quad (30 - 4)$$

- كمية الحرارة الضائعة بالتوصيل من السطح الأسود للوسط الخارجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$q_{loss1} = U_{b1} (T_b - T_a) ; \quad U_{b1} = \left(\frac{e_b}{k_b} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (31 - 4)$$

$$q_{loss2} = U_{b2} (T_b - T_a) ; \quad U_{b2} = \left(\frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (32 - 4)$$

حيث المقادير التالية: k_b, k_1, k_2, k_3, k_4 هي عبارة عن التوصيلية الحرارية لمختلف المواد التي تدخل في تركيب حواف المقطر، لكن حسب الفرضية 2 فإن قيم هذه الانتقالات مهملة، أي ما معناه q_{loss1}, q_{loss2} ويمكن الإشارة لقيم سُمك كل مادة e_b, e_1, e_2, e_3, e_4 مع الكتلة السطحية والحرارة النوعية المتوسطة في الجدول (4-1) الموجود في الفقرة المخصصة للنموذج الشاهد.

- كمية الحرارة الضائعة بالحمل من الغطاء الزجاجي إلى الهواء الخارجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$q_{c,g \rightarrow a} = h_{c,g \rightarrow a} (T_g - T_a) ; \quad \begin{cases} h_{c,g \rightarrow a} = 2,8 + 3V_a & \text{if } V_a \leq 5 \text{ m/s} \\ h_{c,g \rightarrow a} = 6,15V_a^{0,8} & \text{if } V_a > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (33 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين الماء والمكثف 2، ولا يوجد هذا المقدار في نموذج الشاهد (SSS):

$$q_{c,w \rightarrow f} = h_{c,w \rightarrow f} (T_w - T_f) \quad (34 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالتبخير بين الماء والمكثف 2، ولا يوجد هذا المقدار في نموذج الشاهد (SSS):

$$q_{e,w \rightarrow f} = h_{e,w \rightarrow f} (T_w - T_f) \quad (35 - 4)$$

4-2-4) معاملات انتقال الحرارة بين المستويات الحرارية في النموذج (HP):

ويمكن إيجاد معاملات متعددة ومختلفة حسب نمط الانتقال والمستويات الحرارية، وهي:

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$h_{c,w \rightarrow g} = 0,884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273,15)}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (36 - 4)$$

- معامل الانتقال الحراري بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$h_{e,w \rightarrow g} = 16,273 \cdot 10^{-3} h_{c,w \rightarrow g} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (37 - 4)$$

حيث P_g, P_w ضغط البخار عند الغطاء الزجاجي و الماء على الترتيب، حسب ما أعطاه الباحثين

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,54 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^4 < Ra_w < 10^7 \quad (38 - 4)$$

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,15 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^7 < Ra_w < 10^{11} \quad (39 - 4)$$

- رقم رايلي Rayleigh للانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، حسب (Xie et al. 2015)

$$Ra_w = g \frac{e_w^3}{\nu_w \cdot a} \beta_w (T_b - T_w) ; \beta_w = \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\Delta \rho_w}{\Delta T} \right)_p \quad (40 - 4)$$

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الماء والمكثف 2، ولا يوجد في نموذج الشاهد، وذلك حسب العلاقات التي

وضعها (Rahmani et al. 2017; Kreith et al. 1999)

$$h_{c,w \rightarrow f} = \frac{Nu_c k_l}{d_f} ; d_f = 0,01m \quad (41 - 4)$$

- رقم نوسالت Nusselt للانتقال الحراري بالحمل بين الماء والمكثف 2، حسب (Churchill and Usagi, 1972)

$$Nu_c = ((Nu_\ell)^{15} + (Nu_t)^{15})^{1/15} \quad (42 - 4)$$

حيث Nu_t و Nu_ℓ نوسالت الرقائقي والمضطرب على الترتيب ولهما العبارات التالية:

$$\text{laminar Nusselt} : Nu_\ell = \frac{2f}{\left(1 + \frac{2f}{0,772 \bar{C}_\ell Ra^{1/4}}\right)} ; \bar{C}_\ell = \frac{0,671}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (43 - 4)$$

- رقم رايلي Rayleigh للانتقال الحراري بالحمل بين الماء و المكثف 2، حسب : (Xie et al., 2015)

$$Ra_l = g \frac{d^3}{\nu a} \beta (T_w - T_f) ; \beta = \frac{1}{\rho_l} \left(\frac{\Delta \rho_l}{\Delta T} \right)_p ; d = 0,01m \quad (44 - 4)$$

$$\begin{cases} f = 0,8 & \text{if } Ra_l > 10^{-2} \\ f = 1 - \frac{0.13}{(0,772 \bar{C}_t Ra_l^{\frac{1}{4}})^{0,16}} & \text{if } 10^{-10} < Ra_l < 10^{-2} \end{cases} \quad (45 - 4)$$

$$\text{turbulent Nusselt : } Nu_t = \bar{C}_t Ra_l^{1/3} \quad (46 - 4)$$

والجدول (3-4) يوضح قيمة \bar{C}_t من أجل أسطوانة دائرية بدلالة رقم Prandtl

الجدول (3-4): قيمة \bar{C}_t من أجل أسطوانة دائرية بدلالة رقم Prandtl

Pr	0,010	0,022	0,100	0,710	2,000	6,000	50	100	2000
\bar{C}_t	0,077	0,810	0,900	0,103	0,108	0,109	0,100	0,097	0,088

- معامل الانتقال الحراري بالتبخير بين الماء و المكثف²، ولا يوجد في النموذج الشاهد (SSS)، وذلك حسب العلاقات التي وضعها (Rahmani et al. 2017; Kreith et al. 1999):

$$h_{e,w \rightarrow f} = \frac{Nu_e k_l}{d} \quad (47 - 4)$$

- رقم Nuselt للتبخير بين الماء ومبخر المضخة، حيث تتشكل طبقة من الماء المقطر وتنقل الحرارة في سريان رقائقي حسب ما اوضحه الباحثان (Bergaman et al., 2011; Pesce et al., 2007):

$$Nu_e = 0,729 \left(\frac{g(\rho_l - \rho_v) H_{e2} d^3}{\nu_l k_l (T_w - T_f)} \right)^{1/4} \quad (48 - 4)$$

حيث الجاذبية الأرضية والكتلة الحجمية للبخر والماء معرفة بالعلاقات التالية:

$$g = 9,81 \text{m/s}^2 \quad d = 0,01 \text{m} ; \rho_l \gg \rho_v = \frac{P_v}{\bar{R} T_v} ; \bar{R} = 461,91 \text{J/kg.K}$$

يمكن اعتبار درجة حرارة الشريط المتكاثف بالعلاقة التالية:

$$T_{film} = \frac{T_{m2} + T_w}{2} = \frac{\left(\frac{T_w + T_f}{2} \right) + T_w}{2} = \frac{3T_w + T_f}{4} ; T_f \approx \frac{T_1 + T_4}{2}$$

وفي الجدول (4-4) بعض القيم المتوسطة للماء والبخر بجوار الشريط المتكاثف.

- الإشعاع الحراري الممتص في المستويات الأربع في المقطر البسيط، ولا يختلف عن الشاهد (SSS):

$$\alpha_g (1 - \rho_g) G_T : \text{المتص في الغطاء الزجاجي}$$

$$\alpha_w (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) G_T : \text{المتص في الماء}$$

$$\alpha_b (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) G_T : \text{المتص في السطح الأسود}$$

حيث المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث مدونة في الجدول (2-4) الخاص بنموذج الشاهد¹ (SSS).

- الكفاءة الطاقوية للمقطر البسيط حسب الباحثين

(Prakash et al. 2015; Rahmani et al. 2015)

$$\eta_2 = \frac{q_{e,w \rightarrow g} + q_{e,w \rightarrow f}}{G_T} ; \text{in type (HP)} \quad (49 - 4)$$

¹ الجدول (2-4) في الصفحة 126 بالفقرة (3-2-4) في نفس الفصل

الجدول (4-4): القيم المتوسطة للماء والبخار بجوار الشريط المتكاثف

Properties	Symbol	As function : T_{film} or $T_w(^{\circ}C)$	Unite
Coefficient of expansion	β_l, β_w	$= 0,00136 - 0,00141. \exp(-T/107,38407)$	1/K
Density	ρ_l, ρ_w	$= 1002,6 - 0,505. 10^{-1}T - 0,38. 10^{-2}T^2$	kg/m ²
Dynamic viscosity	μ_l, μ_w	$= 2,4952.10^{-4} + 0,0022. \exp(-T/2,96771)$	kg/m. s
Kinematic viscosity	ν_l, ν_w	$= 2,6415.10^{-7} + 1,5169. \exp(-T/29,3238)$	m ² /s
Prandtl Number	Pr_l, Pr_w	$= 12,501 - 0,261 T + 1,577. 10^{-3}T^2$	-
Specific heat	$C_{p,l}, C_{p,w}$	$= 3958 - 52,3 T + 0,837 T^2$	J/kg. K
Thermal conductivity	k_l, k_w	$= 0,71652 - 0,1910. \exp(-T/6,44589)$	W/m. K
Thermal diffusivity	a_l, a_w	$= \nu/Pr$	m ² /s

5) النموذج الثاني للمقطر البسيط (بوجود تحسينات- وجود سُمك أقل في الزجاج)

Simple Solar Still with Less Thickness in Glass (SSS-LTG)

هذا النموذج يخص المقطر البسيط ذو ميل واحد وبوجود تحسينات، و التحسينات هي تغيير سُمك الزجاج، حيث أن

$$e_g = 4mm \text{ و } e_g = 5mm \text{ شاهد به سمك}$$

ونرمز لهذا المقطر بالرمز: (SSS-LTG) اختصارا ل

Simple Solar Still with Less Thickness in Glass

ونختصر العبارة (SSS-LTG) إلى (LTG) في جميع فقرات هذا الفصل.

وهو لا يختلف عن المقطر الشاهد (SSS) في عدد المستويات الحرارية، وهي ثلاث مستويات :

المستوى 1: السطح الأسود أو ما يسمى بطانة الحوض، ونرمز له بالرمز b اختصارا ل black surface.

المستوى 2: الماء أو الماء المالح وهو يقوم مقام المبخر، ونرمز له بالرمز w اختصارا ل water .

المستوى 3: الزجاج أو الغطاء الزجاجي وهو يقوم مقام المكثف، ونرمز له بالرمز g اختصارا ل glass cover .

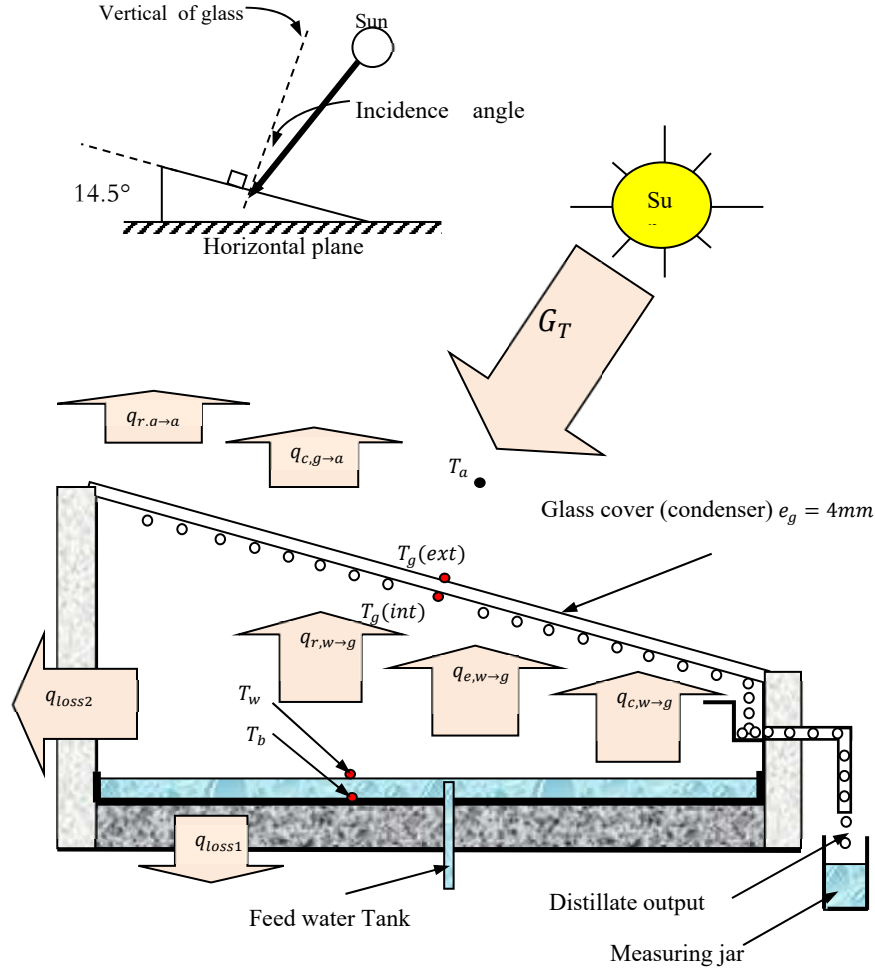
والشكل (1-4) يوضح هذه المستويات، وكيفية تركيب المزدوجات الحرارية في النقاط المخصصة لكل مستوي.

5-1) فرضيات على المستويات الحرارية:

نعتبر الترتيب التصاعدي لقيم درجات الحرارة كل لحظة، كما يلي:

$$T_g < T_w < T_b$$

لكن يمكن أن يحدث في التجارب أن يحتل هذا التوازن أو أن يتساوى مستويين في درجة الحرارة، وهذا حسبما تمليه التجربة من ظواهر كالضياع في الحرارة في أحد المستويات، أو تأثير حراري على مستوى آخر.



الشكل (4-4): تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي (LTG)

بوجود تحسينات - وجود سُمْك أقل في الزجاج

2-5) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (LTG):

مجموعة كبيرة من الباحثين وضعوا نماذج رياضية على شكل معادلات تفاضلية لدرجة الحرارة بالنسبة للزمن، وبنفس التحليل نحصل على المعادلات التفاضلية الخاصة بهذا المقطر.

1-2-5) المعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية في النموذج (LTG):

المستوى 1: التوازن الحراري على مستوى السطح الأسود (الأسود الماص للإشعاع)

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{loss1} + q_{loss2}) \quad (50 - 4)$$

المستوى 2: التوازن الحراري على مستوى الماء (مبخر المقطر)

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} \quad (51 - 4)$$

المستوى 3: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي (مكثف المقطر)

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g (1 - \rho_g) G_T + (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} - (q_{r,g \rightarrow a} + q_{c,g \rightarrow a}) \quad (52 - 4)$$

ولفهم حدود المعادلات (4 - 50)، (4 - 51)، (4 - 52) والتي بها المقدار G_T لدينا الشكل (4-2) يوضح مقدار الاشعاع الممتص في كل مستوى على حدى، حيث ان المقادير لا تختلف عن المقطر الشاهد (SSS). وكذلك بالنسبة للتدفق الكتلي والمقادير الحرارية والعبارات الخاصة بالمقادير الحرارية الموجودة في معادلات التوازن، ومعاملات انتقال الحرارة بين المستويات الحرارية، كل ما سبق له نفس الطرح الرياضي الخاص بالمقطر (SSS).

الجدول (4-5): بعض الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة في المقطر (LTG)

حيث نرسم بنقطة ◦ للمواد الداخلة في تركيب الحواف، وبنقطة ■ للمستويات الأساسية في المقطر.

Materials	(e) thickness mm	(m) Specific mass, kg/m ²	average Specific heat, (C) J/kg. K
◦ Aluminum plate	$e_b = 3$	$m_b = 7,629$	$C_b = 897$
◦ Water	$e_w = 10$	$m_w = 10,000$	$C_w = 3958 - 52,3 T + 0,837 T^2$
◦ Glass	$e_g = 4$	$m_g = 11,937$	$C_g = 753$
■ Polystyrene insulation	$e_1 = 40$	$m_1 = 1.655$	$C_1 = 1400$
■ Galvanized iron plate	$e_2 = 1$	$m_2 = 5,939$	$C_2 = 449$
■ Aluminum foil	$e_3 = 3$	$m_3 = 0.166$	$C_3 = 897$
■ Wood	$e_4 = 30$	$m_4 = 48.318$	$C_4 = 2300$

الجدول (4-6): المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث

Materials	(absorptivity) α	(reflectivity) ρ
Basin liner	$\alpha_b = 0,95$	$\rho_b = 0,05$
Water	$\alpha_w = 0,05$	$\rho_w = 0,05$
Glass	$\alpha_g = 0,04$	$\rho_g = 0,05$

الكفاءة الطاقوية للمقطر البسيط (LTG):

(Prakash et al. 2015; Rahmani et al. 2015)

$$\eta_1 = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{G_T} ; \text{ in type (SSS - LTG) ;} \quad (53 - 4)$$

6) النموذج الثالث للمقطر البسيط (بوجود تحسينات- وجود طبقتين من الزجاج)

Simple Solar Still with Double Layer of Glass (SSS- DLG)

هذا النموذج يخص المقطر البسيط ذو ميل واحد وبوجود تحسينات، والتحسينات هي وجود طبقتين من الزجاج، لكل طبقة سمك $e_g = 5mm$.

ونرمز لهذا المقطر بالرمز: (SSS-DLG) اختصاراً لـ

Simple Solar Still with Double Layer of Glass

ونختصر العبارة (SSS- DLG) إلى (DLG) في جميع فقرات هذا الفصل.

وهو يختلف عن المقطر الشاهد (SSS) في عدد المستويات الحرارية، وهي خمس مستويات:

المستوى 1: السطح الأسود أو ما يسمى بطانة الحوض، ونرمز له بالرمز b اختصاراً لـ black surface.

المستوى 2: الماء أو الماء المالح وهو يقوم مقام المبخر، ونرمز له بالرمز w اختصاراً لـ water.

المستوى 3: الغطاء الزجاجي الداخلي ويقوم مقام المكثف، ونرمز له بالرمز $g(i)$ اختصاراً لـ internal glass.

المستوى 4: ماء التبريد بين الطبقتين، ونرمز له بالرمز $w(c)$ اختصاراً لـ cooling water.

المستوى 5: الغطاء الزجاجي الخارجي، ونرمز له بالرمز $g(e)$ اختصاراً لـ external glass.

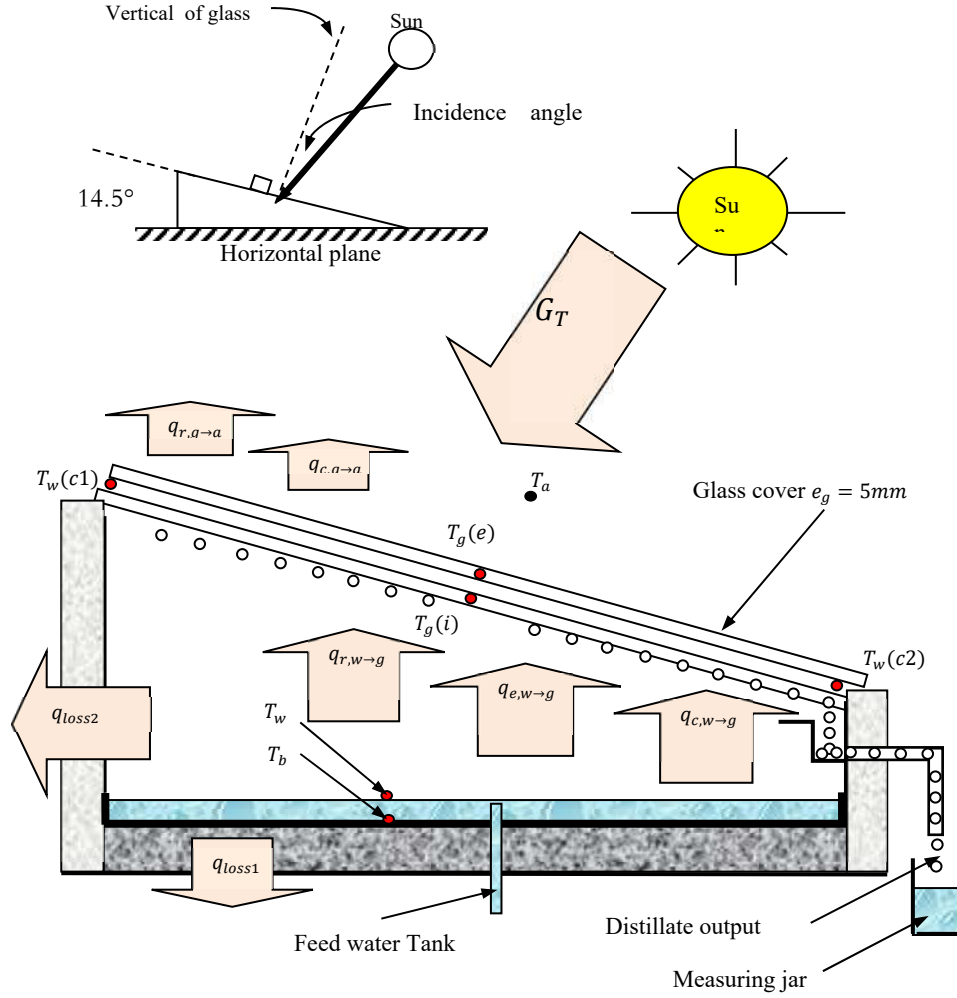
والشكل (4-6) يوضح هذه المستويات، وكيفية تركيب المزدوجات الحرارية في النقاط المخصصة لكل مستوي.

6-1) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (DLG):

يمكن أن نعتبر الترتيب التصاعدي لقيم درجات الحرارة كل لحظة، كما يلي: $T_b < T_w < T_{g(i)} < T_{w(c)} < T_{g(e)}$ ، بين الطبقتين فراغ سمكه $e_c = 1cm$ يملأ هذا الفراغ بالماء التبريد لنقل الحرارة من الزجاج الداخلي الذي يعمل عمل مكثف، ماء التبريد يدور في دورة مغلقة مدعومة بمبدل حراري ومضخة تعمل بالطاقة الشمسية. وكذلك نحسب درجة حرارة ماء التبريد انطلاقاً من معرفة درجة حرارة المدخل والمخرج بالنسبة للفراغ بين الطبقتين الزجاجيتين حسب العلاقة التالية:

$$T_w(c) = \frac{T_w(c1) + T_w(c2)}{2} \quad (4 - 54)$$

مع اهمال قيمة الإشعاع بين الطبقتين الزجاجيتين: $q_{r,i \rightarrow e} \approx 0$ ، وهذا الحد موجود في المعادلة (4 - 57).



الشكل (4-5): تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (DLG)

بوجود تحسينات (بوجود طبقتين من الزجاج)

2-6) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (DLG):

يمكن وضع نماذج رياضية على شكل معادلات تفاضلية لدرجة الحرارة بالنسبة للزمن.

1-2-6) المعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية في النموذج (DLG):

المستوى 1: التوازن الحراري على مستوى السطح الأسود (الأسود الماص للإشعاع والمسؤول عن التبخير)

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g)^2 (1 - \rho_w) (1 - \alpha_w)^2 G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{loss1} + q_{loss2}) \quad (55 - 4)$$

المستوى 2: التوازن الحراري على مستوى الماء (مبخر المقطر)

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \alpha_w) (1 - \rho_w) (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g)^2 G_T + q_{c,b \rightarrow w} - (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} \quad (56 - 4)$$

المستوى 3: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي الداخلي (مكثف المقطر)

$$m_g C_g \frac{dT_{g(i)}}{dt} = \alpha_g (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) (1 - \rho_g) G_T + (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} - (q_{r,i \rightarrow e} + q_{c,i \rightarrow e}) \quad ; \quad q_{r,i \rightarrow e} \approx 0 \quad (\text{مهمل}) \quad (57 - 4)$$

المستوى 4: التوازن الحراري على مستوى ماء التبريد

$$m_w C_w \frac{dT_{w(c)}}{dt} = \alpha_w (1 - \alpha_g) (1 - \rho_g) G_T + q_{c,i \rightarrow e} \quad (58 - 4)$$

المستوى 5: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي الخارجي (مدعم لمكثف المقطر)

$$m_g C_g \frac{dT_{g(e)}}{dt} = \alpha_g (1 - \rho_g) G_T + (q_{r,i \rightarrow e} + q_{c,i \rightarrow e}) - (q_{r,g \rightarrow a} + q_{c,g \rightarrow a}) \quad (59 - 4)$$

ولفهم حدود المعادلات (4-55)، (4-56)، (4-57)، (4-58)، (4-59) والتي بها المقدار G_T لدينا الشكل

(4-7) يوضح مقدار الاشعاع الممتص في كل مستوى على حدى.

6-2-2) التدفق الكتلي والمقادير الحرارية في النموذج (DLG):

- كمية الماء المقطر بالنسبة لوحدة الزمن ووحدة المساحة:

$$\frac{dm_d}{dt} = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{\bar{H}_{e1}} = \dot{m}_{d1}(w \rightarrow g(i)) \quad (60 - 4)$$

- الحرارة الكامنة للتبخير الخاصة بالماء محسوبة من طرف

(Fath et al. 2002; Ben Halima et al. 2014) بالعلاقة:

$$\bar{H}_{e1} = (2501,67 - 2,389 \cdot T_{m1}) \cdot 10^3 \quad (61 - 4)$$

حيث أن درجة الحرارة المتوسطة في خلية التقطير هي $T_{m1} = \frac{T_w + T_{g(i)}}{2}$

6-2-3) العبارات الخاصة بالمقادير الحرارية في النموذج (DLG):

- كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{r,w \rightarrow g} = \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_{g(i)}^4) \quad ; \quad \varepsilon_w \approx 0,9 \quad (62 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{c,w \rightarrow g} = h_{c,w \rightarrow g} (T_w - T_{g(i)}) \quad (63 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{e,w \rightarrow g} = h_{e,w \rightarrow g} (T_w - T_{g(i)}) \quad (64 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين السطح الأسود والماء:

$$q_{c,b \rightarrow w} = h_{c,b \rightarrow w} (T_b - T_w) \quad (65 - 4)$$

- كمية الحرارة الضائعة بالتوصيل من السطح الأسود للوسط الخارجي حسب

(Madhlopa et al., 2009; Ben Halima et al., 2014)

$$q_{loss1} = U_{b1}(T_b - T_a) \quad ; \quad U_{b1} = \left(\frac{e_b}{k_b} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (66 - 4)$$

$$q_{loss2} = U_{b2}(T_b - T_a) \quad ; \quad U_{b2} = \left(\frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (67 - 4)$$

حيث المقادير التالية: k_b, k_1, k_2, k_3, k_4 هي عبارة عن التوصيلية الحرارية لمختلف المواد التي تدخل في تركيب حواف المقطر، لكن حسب الفرضية 2 فإن قيم هذه الانتقالات مهملة، أي ما معناه q_{loss1}, q_{loss2} ويمكن الإشارة لقيم q_{loss1}, q_{loss2} كل مادة e_b, e_1, e_2, e_3, e_4 مع الكتلة السطحية و الحرارة النوعية المتوسطة في الجدول (4-1).

- كمية الحرارة الضائعة بالحمل من الغطاء الزجاجي إلى الهواء الخارجي حسب الباحثين: (Ben Halima et al. 2014; Madhlopa et al. 2009)

$$q_{c,g \rightarrow a} = h_{c,g \rightarrow a}(T_g - T_a) ; \begin{cases} h_{c,g \rightarrow a} = 2,8 + 3V_a & \text{if } V_a \leq 5 \text{ m/s} \\ h_{c,g \rightarrow a} = 6,15V_a^{0,8} & \text{if } V_a > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (68 - 4)$$

- كمية الحرارة الضائعة بالحمل من الوسط بين الطبقتين الزجاجيتين إلى ماء التبريد:

$$q_{c,i \rightarrow e} = h_c(T_{w(c2)} - T_{w(c1)})$$

حيث h_c هو معامل الانتقال الحراري بالحمل ويحسب من المعادلة (4-58)، وليس له علاقة مرجعية ويحتاج لنمذجة شبه تجريبية لحسابه.

$$q_{c,i \rightarrow e} = h_c(T_{w(c2)} - T_{w(c1)}) = m_w C_w \frac{dT_{w(c)}}{dt} - \alpha_w(1 - \alpha_g)(1 - \rho_g)G_T$$

6-2-4) معاملات انتقال الحرارة بين المستويات الحرارية في النموذج (DLG):

ويمكن إيجاد معاملات متعددة ومختلفة حسب نمط الانتقال والمستويات الحرارية، وهي:

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي (Rahmani et al. 2017):

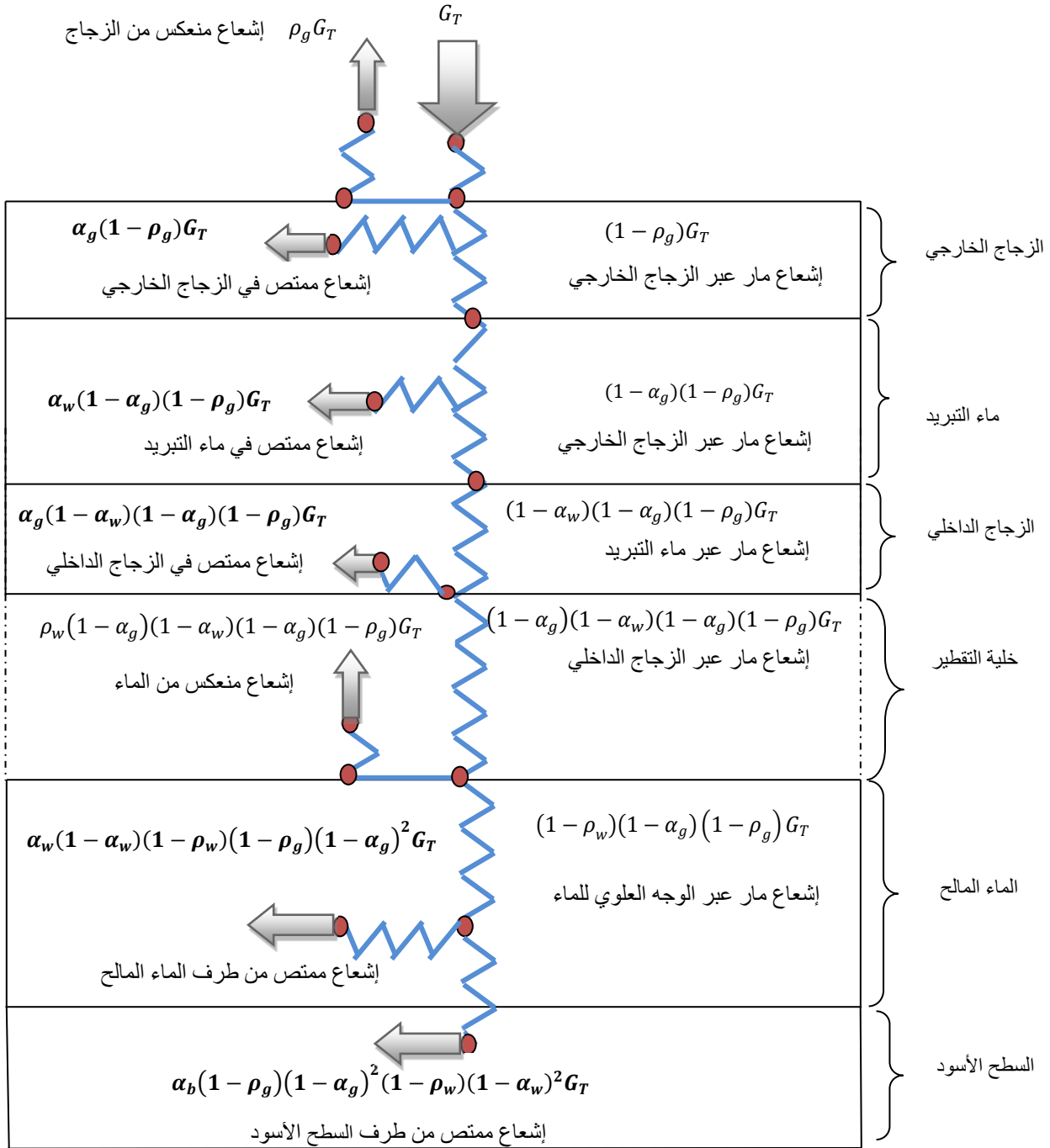
$$h_{c,w \rightarrow g} = 0,884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273,15)}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (69 - 4)$$

معامل الانتقال الحراري بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$h_{e,w \rightarrow g} = 16,273 \cdot 10^{-3} h_{c,w \rightarrow g} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (70 - 4)$$

حيث P_w, P_g ضغط البخار عند الغطاء الزجاجي و الماء على الترتيب، حسب ما أعطاه الباحثين (Edalatpour et al. 2015; Feilizadeh et al. 2016)

$$P(T) = \exp \left(25,317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right) \quad (71 - 4)$$



الشكل (6-4): مخطط يوضح الإشعاعات الحرارية المارة عبر مختلف أجزاء المقطر (DLG)

بوجود تحسينات (بوجود طبقتين من الزجاج)

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، والعلاقات كما وصفها الباحث:

(Ben Halima et al. 2014)

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,54 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^4 < Ra_w < 10^7 \quad (72 - 4)$$

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,15 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^7 < Ra_w < 10^{11} \quad (73 - 4)$$

- رقم رايلي Rayleigh للانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، حسب (Xie et al. 2015)

$$Ra_w = g \frac{e_w^3}{\nu_w \cdot a} \beta_w (T_b - T_w) ; \beta_w = \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\Delta \rho_w}{\Delta T} \right)_p \quad (74 - 4)$$

- الإشعاع الحراري الممتص في المستويات الخمسة في المقطر البسيط (DLG): (Feilzadeh et al. 2016):

المتص في الغطاء الزجاجي الخارجي: $\alpha_g(1 - \rho_g)G_T$.

- المتص في ماء التبريد: $\alpha_w(1 - \alpha_g)(1 - \rho_g)G_T$.

- المتص في الغطاء الزجاجي الداخلي: $\alpha_g(1 - \alpha_w)(1 - \alpha_g)(1 - \rho_g)G_T$.

- المتص في الماء المالح: $\alpha_w(1 - \rho_w)(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_w)(1 - \alpha_g)(1 - \rho_g)G_T$.

ومنه يصبح الحد الموجود في المعادلة (4 - 56): $\alpha_w(1 - \alpha_w)(1 - \rho_w)(1 - \rho_g)(1 - \alpha_g)^2 G_T$.

- المتص في السطح الأسود: $\alpha_w(1 - \alpha_w)(1 - \rho_w)(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_w)(1 - \alpha_g)(1 - \rho_g)G_T$.

ومنه يصبح الحد الموجود في المعادلة (4 - 55): $\alpha_b(1 - \rho_g)(1 - \alpha_g)^2 (1 - \rho_w)(1 - \alpha_w)^2 G_T$.

حيث المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث (الامتصاصية α والانعكاسية ρ) مدونة في الجدول (4-2).

- الكفاءة الطاقوية للمقطر البسيط:

$$\eta_1 = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{G_T} ; \text{ in type (DLG) ;} \quad (75 - 4)$$

7) النموذج الرابع للمقطر البسيط (بوجود تحسينات - وجود سطح أسود من الإسفنج)

Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge (SSS-BSS)

هذا النموذج يخص المقطر البسيط ذو ميل واحد وبوجود تحسينات، و التحسينات هي وجود سطح أسود له سمك

$$e_s = 1cm, \text{ وله طبقة واحدة من الزجاج ذات سمك } e_g = 5mm.$$

ونرمز لهذا المقطر بالرمز: (SSS- BSS) اختصارا لـ

Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge

ونختصر العبارة (SSS- BSS) إلى (BSS) في جميع فقرات هذا الفصل.

وهذا النوع يختلف عن المقطر الشاهد (SSS) في عدد المستويات الحرارية، وهي أربع مستويات:

المستوى 1: السطح الأسود أو ما يسمى بطانة الحوض، ونرمز له بالرمز b اختصارا لـ black surface.

المستوى 2: طبقة الاسفنج الملونة بالأسود، وتقوم بدور المبخر ونرمز لها بالرمز s اختصارا لـ sponge.

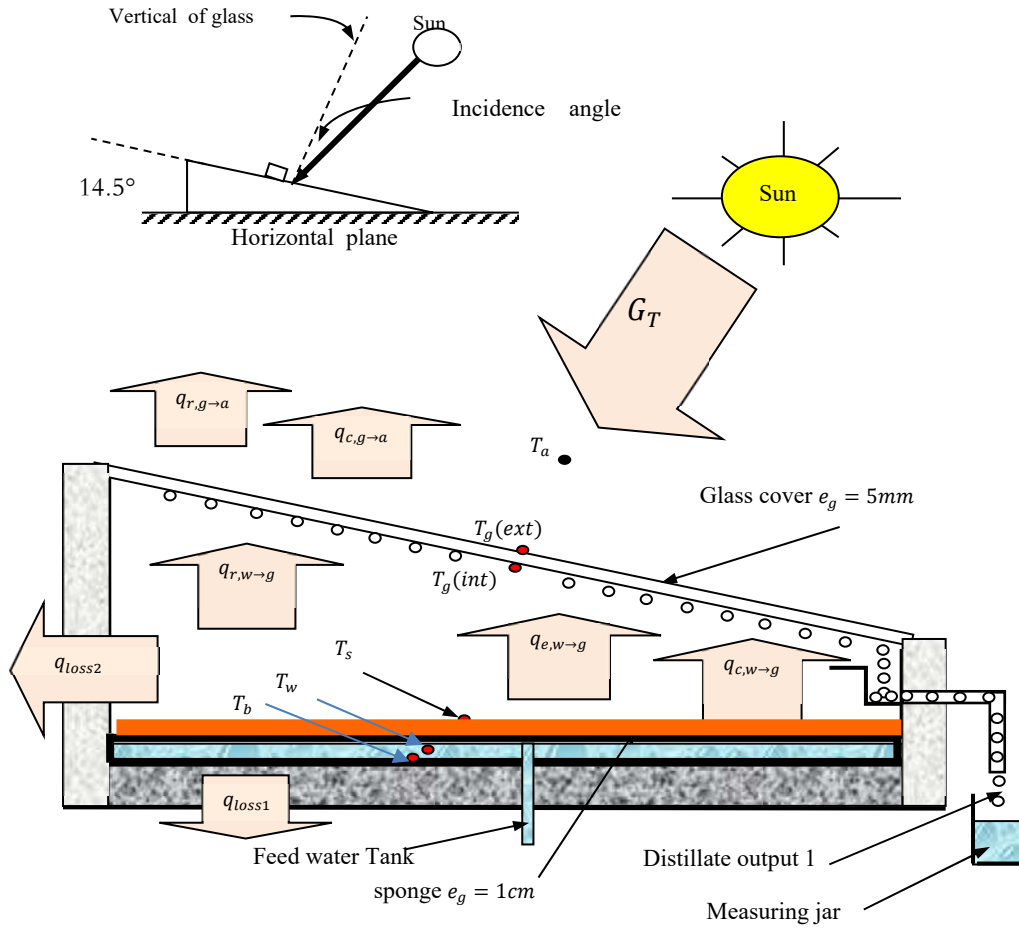
المستوى 3: الماء أو الماء المالح، ونرمز له بالرمز w اختصارا لـ water.

المستوى 4: الغطاء الزجاجي ويقوم مقام المكثف، ونرمز له بالرمز $g(i)$ اختصاراً لـ internal glass. والشكل (4-8) يوضح هذه المستويات، وكيفية تركيب المزدوجات الحرارية في النقاط المخصصة لكل مستوي.

(1-7) فرضيات على المستويات الحرارية في النموذج (BSS):

لدينا الترتيب التصاعدي لقيم درجات الحرارة كل لحظة، كما يلي:

$T_g < T_w < T_b < T_s$ ، ونلاحظ أن طبقة الإسفنج لها درجة حرارة أكبر من السطح الأسود، وذلك بسبب وجود الإسفنج فوق السطح الأسود ويمكن تلويته بلون غير الأسود لأنه غير مسؤول عن امتصاص الأشعة، ومنه يصبح الإسفنج مسؤول على تسخين الماء، وهناك جزء من الحرارة بالتوصيل ينتقل منه كضياء للسطح الأسود والمتمثل في المقدار $q_{con,s \rightarrow b}$ ، وهو موضح في المعادلة (4-78) في الفقرة الخاصة بالمعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية.



الشكل (4-7): تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (BSS)

بوجود تحسينات (استعمال طبقة من الإسفنج)

(2-7) التحليل النظري للمستويات الحرارية داخل خلية التقطير في النموذج (BSS):

يمكن وضع نماذج رياضية على شكل معادلات تفاضلية لدرجة الحرارة بالنسبة للزمن.

7-2-1) المعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية في النموذج (BSS):

المستوى 1: التوازن الحراري على مستوى السطح الأسود (حوض ذو لون أسود حامل للإسفنج والماء المالح) وغير معرض للشمس

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dt} = q_{cond,s \rightarrow b} - (q_{c,b \rightarrow w} + q_{loss1} + q_{loss2}) \quad (76 - 4)$$

المستوى 2: التوازن الحراري على مستوى الإسفنج (المسؤول عن التبخير في المقطر)

$$m_s C_s \frac{dT_s}{dt} = \alpha_s (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) G_T + q_{e,s \rightarrow w} - (q_{c,s \rightarrow w} + q_{cond,s \rightarrow b}) \quad (77 - 4)$$

المستوى 3: التوازن الحراري على مستوى الماء (مبخر المقطر)

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) G_T + (q_{c,b \rightarrow w} + q_{c,s \rightarrow w}) - (q_{e,s \rightarrow w} + q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} \quad (78 - 4)$$

المستوى 3: التوازن الحراري على مستوى الغطاء الزجاجي (مكثف المقطر)

$$m_g C_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_g (1 - \rho_g) G_T + (q_{e,w \rightarrow g} + q_{r,w \rightarrow g} + q_{c,w \rightarrow g}) \frac{A_g}{A_w} - (q_{r,g \rightarrow a} + q_{c,g \rightarrow a}) \quad (79 - 4)$$

حدود المعادلات (77-4)، (78-4)، (79-4)، (80-4)، والتي بها المقدار G_T ، لدينا الشكل (9-4) يوضح مقدار الاشعاع الممتص في كل مستوى على حدى.

7-2-2) التدفق الكتلي والمقادير الحرارية في النموذج (BSS):

- كمية الماء المقطر بالنسبة لوحدة الزمن ووحدة المساحة:

$$\frac{dm_d}{dt} = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{\bar{H}_{e1}} = \dot{m}_{d1}(w \rightarrow g) \quad (80 - 4)$$

- الحرارة الكامنة للتبخير الخاصة بالماء محسوبة بالعلاقة:

$$\bar{H}_{e1} = (2501,67 - 2,389 \cdot T_{m1}) \cdot 10^3 \quad (81 - 4)$$

حيث أن درجة الحرارة المتوسطة في خلية التقطير هي $T_{m1} = \frac{T_w + T_g}{2}$

7-2-3) العبارات الخاصة بالمقادير الحرارية في النموذج (BSS):

- كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{r,w \rightarrow g} = \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_g^4) ; \quad \varepsilon_w \approx 0,9 \quad (82 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{c,w \rightarrow g} = h_{c,w \rightarrow g} (T_w - T_g) \quad (83 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$q_{e,w \rightarrow g} = h_{e,w \rightarrow g} (T_w - T_g) \quad (84 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين السطح الأسود والماء:

$$q_{c,b \rightarrow w} = h_{c,b \rightarrow w} (T_b - T_w) \quad (85 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالحمل بين الإسفنج والماء:

$$q_{c,s \rightarrow w} = h_{c,s \rightarrow w}(T_s - T_w) \quad (86 - 4)$$

- كمية الحرارة المنتقلة بالتوصيل بين الإسفنج والسطح الأسود:

$$q_{cond,s \rightarrow b} = h_{cond,s \rightarrow b}(T_s - T_b) \quad (87 - 4)$$

- كمية الحرارة الضائعة بالتوصيل من السطح الأسود للوسط الخارجي حسب

(Ben Halima et al. 2014; Madhlopa et al. 2009)

$$q_{loss1} = U_{b1}(T_b - T_a) \quad ; \quad U_{b1} = \left(\frac{e_b}{k_b} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (88 - 4)$$

$$q_{loss2} = U_{b2}(T_b - T_a) \quad ; \quad U_{b2} = \left(\frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{1}{h_a} \right)^{-1} \quad (89 - 4)$$

حيث المقادير التالية: k_b, k_1, k_2, k_3, k_4 هي عبارة عن التوصيلية الحرارية لمختلف المواد التي تدخل في تركيب حواف المقطر، لكن حسب الفرضية 2 فإن قيم هذه الانتقالات مهملة، أي ما معناه q_{loss1}, q_{loss2} ويمكن الإشارة لقيم سُمك كل مادة e_b, e_1, e_2, e_3, e_4 مع الكتلة السطحية و الحرارة النوعية المتوسطة في الجدول (4-1).

- كمية الحرارة الضائعة بالحمل من الغطاء الزجاجي إلى الهواء الخارجي حسب الباحثين:

(Madhlopa et al. 2009; Ben Halima et al. 2014)

$$q_{c,g \rightarrow a} = h_{c,g \rightarrow a}(T_g - T_a); \quad \begin{cases} h_{c,g \rightarrow a} = 2,8 + 3V_a & \text{if } V_a \leq 5 \text{ m/s} \\ h_{c,g \rightarrow a} = 6,15V_a^{0,8} & \text{if } V_a > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (90 - 4)$$

(4-2-7) معاملات انتقال الحرارة بين المستويات الحرارية في النموذج (BSS):

ويمكن إيجاد معاملات متعددة ومختلفة حسب نمط الانتقال والمستويات الحرارية، وهي:

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$h_{c,w \rightarrow g} = 0,884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273,15)}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (89 - 4)$$

معامل الانتقال الحراري بالتبخير بين الماء والغطاء الزجاجي:

$$h_{e,w \rightarrow g} = 16,273 \cdot 10^{-3} h_{c,w \rightarrow g} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (90 - 4)$$

حيث P_w, P_g ضغط البخار عند الغطاء الزجاجي و الماء على الترتيب، حسب ما أعطاه الباحثين

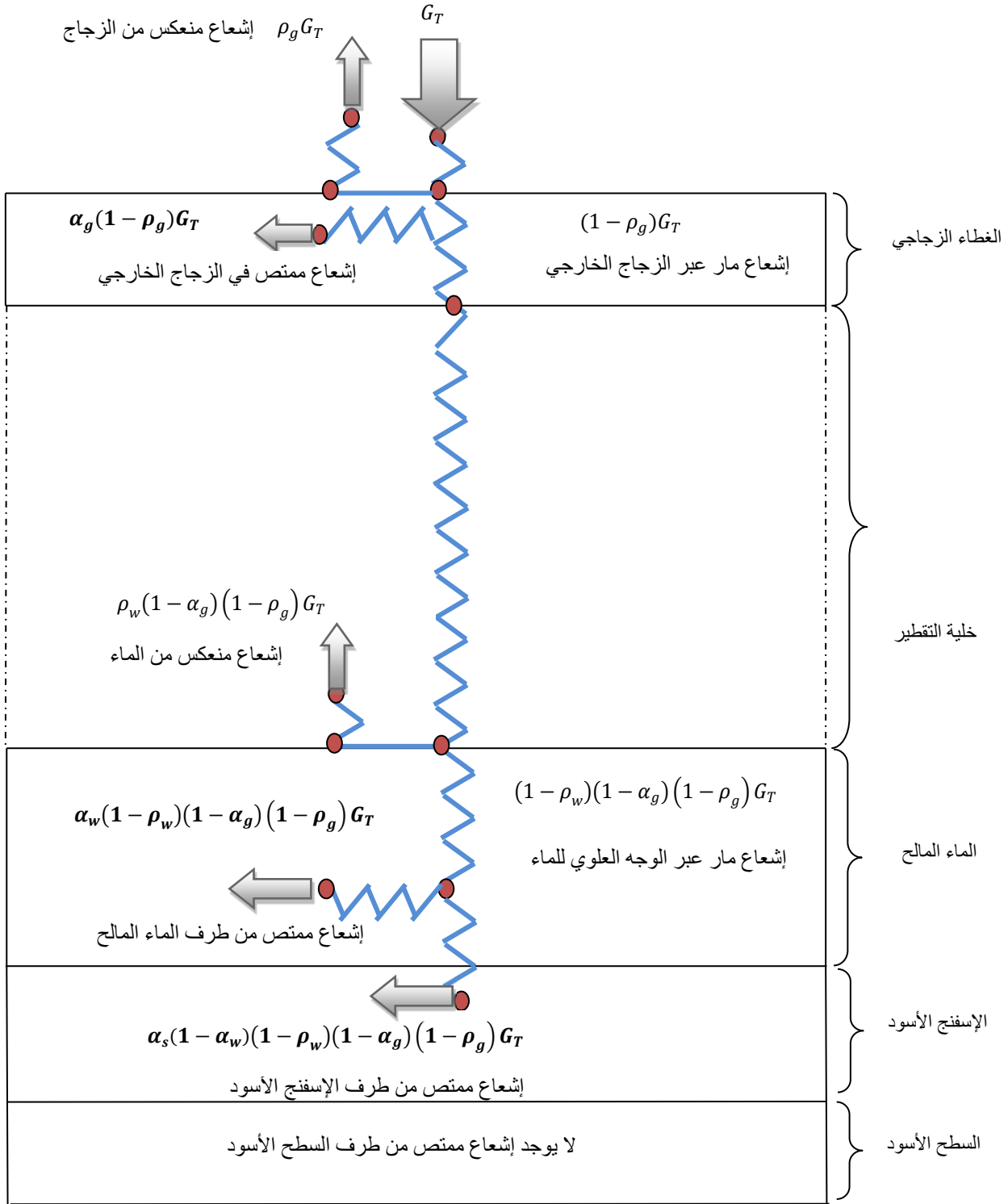
$$P(T) = \exp \left(25,317 - \frac{5144}{T + 273,15} \right) \quad (91 - 4)$$

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، والعلاقات كما وصفها الباحث:

(Ben Halima et al. 2014)

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,54 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^4 < Ra_w < 10^7 \quad (92 - 4)$$

$$h_{c,b \rightarrow w} = 0,15 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} \quad \text{if } 10^7 < Ra_w < 10^{11} \quad (93 - 4)$$



الشكل (8-4): مخطط يوضح الإشعاعات الحرارية المارة عبر مختلف أجزاء المقطر (BSS)

وجود تحسينات (وجود سطح من الإسفنج الأسود)

- رقم رايلي Rayleigh للانتقال الحراري بالحمل بين السطح الأسود والماء، حسب (Xie et al. 2015)

$$Ra_w = g \frac{e_w^3}{\nu_w \cdot a} \beta_w (T_b - T_w) ; \beta_w = \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\Delta \rho_w}{\Delta T} \right)_p \quad (94 - 4)$$

- معامل الانتقال الحراري بالحمل بين الإسفنج والماء:

$$\begin{cases} h_{c,b \rightarrow w} = 0,54 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} & \text{if } 10^4 < Ra_w < 10^7 \\ h_{c,b \rightarrow w} = 0,15 \frac{k_w Ra_w^{1/4}}{e_w} & \text{if } 10^7 < Ra_w < 10^{11} \end{cases} \quad (95 - 4)$$

- معامل الانتقال الحراري بالتوصيل بين الإسفنج والسطح الأسود:

$$h_{con,s \rightarrow b} = \lambda_b \cdot \frac{S_b}{e_b} \quad (96 - 4)$$

حيث S_b : يمثل السطح الكلي للتبادل الحراري في الوسط المسامي للإسفنج، وقيمته تفوق بأضعاف قيمة السطح الظاهري للإسفنج والقيمة المرتفعة لـ S_b هي سبب رئيسي لزيادة تسخين الماء. أما e_b : هو القيمة المتوسطة للبعد الخاص لمجموعة المسامات في الإسفنج.

- الإشعاع الحراري الممتص في المستويات الخمسة في المقطر البسيط (BSS):

$$\cdot \alpha_g (1 - \rho_g) G_T \text{ : الممتص في الغطاء الزجاجي}$$

$$\cdot \alpha_w (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) G_T \text{ : الممتص في الماء}$$

$$\cdot \alpha_s (1 - \rho_g) (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_w) G_T \text{ : الممتص في السطح الإسفنج}$$

حيث المقادير الإشعاعية للمستويات الثلاث (الامتصاصية α والانعكاسية ρ) مدونة في الجدول (2-4)²

- الكفاءة الطاقوية للمقطر البسيط: (Prakash et al. 2015)

$$\eta_1 = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{G_T} ; \text{ in type (SSS - BSS)} ; \quad (95 - 4)$$

8) النموذج الخامس للمقطر البسيط (بوجود تحسينات - بوجود مروحة فوق الزجاج)

Simple Solar Still with a Fan Over the Glass (SSS-FOG)

هذا النموذج يخص المقطر البسيط ذو ميل واحد وبوجود تحسينات، والتحسينات هي وضع مروحة فوق الزجاج لتبريده، حيث المروحة الكهربائية مغذاة بالألواح الشمسية.

ونرمز لهذا المقطر بالرمز: (SSS- FOG) اختصاراً لـ

Simple Solar Still with a Fan On the Glass

ونختصر العبارة (SSS- FOG) إلى (FOG) في جميع فقرات هذا الفصل.

وهو لا يختلف عن المقطر الشاهد (SSS) في عدد المستويات الحرارية، وهي ثلاث مستويات:

المستوى 1: السطح الأسود أو ما يسمى بطانة الحوض، ونرمز له بالرمز b اختصاراً لـ black surface.

المستوى 2: الماء أو الماء المالح وهو يقوم مقام المبخر، ونرمز له بالرمز w اختصاراً لـ water.

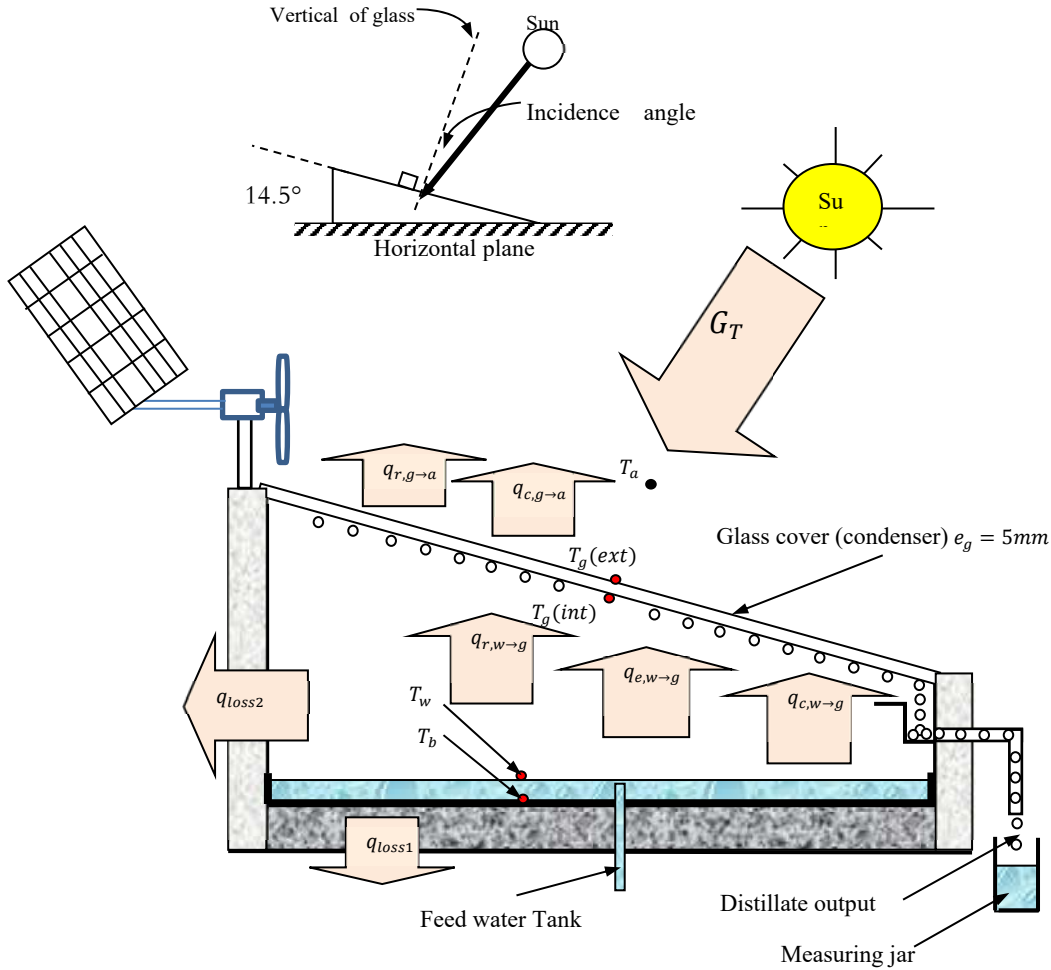
المستوى 3: الزجاج أو الغطاء الزجاجي وهو يقوم مقام المكثف، ونرمز له بالرمز g اختصاراً لـ glass cover.

² الجدول (2-4) في الصفحة 127 بالفقرة (3-2-4) في نفس الفصل

والشكل (4-10) يوضح هذه المستويات، وكيفية تركيب المزدوجات الحرارية في النقاط المخصصة لكل مستوى وتركيب المروحة على الغطاء الزجاجي.

8-1) فرضيات على المستويات الحرارية:

نعتبر الترتيب التصاعدي لقيم درجات الحرارة كل لحظة، كما يلي:
 $T_g < T_w < T_b$ ، ونفس الملاحظات يمكن قولها على المقطر الشاهد.



الشكل (4-9): تخطيط تفصيلي للمقطر الشمسي (FOG)

بوجود تحسينات - وجود سُمْك أقل في الزجاج

8-2) التحليل النظري للمستويات داخل خلية التقطير في النموذج (FOG):

مجموعة كبيرة من الباحثين وضعوا نماذج رياضية على شكل معادلات تفاضلية لدرجة الحرارة بالنسبة للزمن، وبنفس التحليل نحصل على المعادلات التفاضلية الخاصة بهذا المقطر.

8-2-1) المعادلات التفاضلية للمستويات الحرارية في النموذج (FOG):

نفس المعادلات الخاصة بالمقطر الشمسي الشاهد (SSS)، والمتمثلة في المعادلات (4-2)، (4-3)، (4-4).

ولفهم حدود المعادلات (2 - 4)، (3 - 4)، (4 - 4) والتي بها المقدار G_T لدينا الشكل (4-2) يوضح مقدار الاشعاع الممتص في كل مستوى على حدى، حيث أن المقادير لا تختلف عن المقطر الشاهد (SSS). وكذلك بالنسبة للتدفق الكتلي والمقادير الحرارية والعبارات الخاصة بالمقادير الحرارية الموجودة في معادلات التوازن، ومعاملات انتقال الحرارة بين المستويات الحرارية، كل ما سبق له نفس الطرح الرياضي الخاص بالمقطر (SSS). الكفاءة الطاقوية للمقطر البسيط (FOG): (Prakash et al. 2015; Rahmani et al. 2015):

$$\eta_1 = \frac{q_{e,w \rightarrow g}}{G_T} ; \text{ in type (SSS - FOG) ;} \quad (53 - 4)$$

9) خلاصة الفصل الرابع:

جميع المقطرات والتي وضعت نماذجها الرياضية تشترك في وجود زجاج وماء وبطانة حوض سوداء، وهذه المواد تتفاعل مع الاشعاع الشمسي، ويمكن مقادير عديدة للانعكاسية والامتصاصية والإمرارية وتلخيصها في الجدول التالي:
جدول (4-7): يوضح عوامل الامتصاصية والإمرارية والانعكاسية حسب زاوية ورود الإشعاع.

قيم الزوايا والعوامل				عوامل الامتصاصية والإمرارية والانعكاسية	نوعية الجسم
60	45	30	0	زاوية الورد للإشعاع i (بالدرجات °)	
10	6	5	5	الانعكاسية الإشعاعية للغطاء ρ_g %	الزجاج (شفاف)
5	5	5	5	الامتصاصية الإشعاعية للغطاء α_g %	
85	89	90	90	الإمرارية الإشعاعية للغطاء $(1 - \rho_g)$ %	
6	3	2	2	الانعكاسية الإشعاعية للماء ρ_w %	الماء (شفاف)
30	30	30	30	الامتصاصية الإشعاعية للماء α_w %	
64	67	68	68	الإمرارية الإشعاعية للماء $(1 - \rho_w)$ %	
5	5	5	5	الانعكاسية الإشعاعية للسطح الأسود ρ_b %	السطح الأسود (عاتم)
95	95	95	95	الامتصاصية الإشعاعية للسطح الأسود α_b %	
0	0	0	0	الإمرارية الإشعاعية للسطح الأسود $(1 - \rho_b)$ %	
2.99	3.13	3.16	3.16	الامتصاصية الإشعاعية الفعالة للسطح الأسود (FOG)، (HP)، (SSS) $\alpha_b(1 - \rho_g)(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_w)$	
0.31	0.24	0.22	0.22	الامتصاصية الإشعاعية الفعالة للسطح الأسود (DLG) $\alpha_b(1 - \rho_g)(1 - \alpha_g)^2(1 - \rho_w)(1 - \alpha_w)^2$	

بعد وضع الفرضيات العامة للدراسة النظرية، وكانت تخص توزيع درجات الحرارة في كل نموذج مدروس وترتيبها في مستويات حرارية، يمكن تلخيص النتائج في الجدول التالي:

جدول (8-4): ترتيب وعدد المستويات الحرارية في النماذج المقترحة في الدراسة

ترتيب المستويات الحرارية	عدد المستويات الحرارية	النموذج ونوعية المقطر الشمسي المقترح	النموذج
$T_g < T_w < T_b$	3	(Simple Solar Still)	النموذج 0 (SSS)
$T_f < T_g < T_w < T_b$	4	(Simple Solar Still with Heat Pump)	النموذج 1 (HP)
$T_g < T_w < T_b$	3	(Simple Solar Still with Less Thickness in Glass)	النموذج 2 (LTG)
$T_{g(e)} < T_{w(c)} < T_{g(i)} < T_w < T_b$	5	(Simple Solar Still with Double Layer of Glass)	النموذج 3 (DLG)
$T_g < T_w < T_b < T_s$	4	(Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge)	النموذج 4 (BSS)
$T_g < T_w < T_b$	3	(Simple Solar Still with a Fan Over Glass)	النموذج 5 (FOG)

أما بالنسبة للضغط المحسوب في كل مستوي فله علاقة بدرجة الحرارة بالعلاقة التالية:

$$P(T) = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T + 273,15}\right)$$

والانتقال الحراري في خلية التقطير مهما كان النموذج يصنف إلى ثلاث أنواع:

- الحمل الحراري بين مستوي المبخر (الماء) والمكثف (الغطاء الزجاجي) بالعلاقة التي تعطي معامل الانتقال:

$$h_{c,w \rightarrow g} = 0,884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot (T_w + 273,15)}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \right]^{1/3}$$

- التبخير الحراري بين مستوي المبخر (الماء) والمكثف (الغطاء الزجاجي) بالعلاقة التي تعطي معامل الانتقال:

$$h_{e,w \rightarrow g} = 16,273 \cdot 10^{-3} h_{c,w \rightarrow g} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)}$$

- الاشعاع الحراري بين مستوي المبخر (الماء) والمكثف (الغطاء الزجاجي) بالعلاقة التي تعطي معامل الانتقال:

$$h_{r,w \rightarrow g} = \frac{\varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_g^4)}{(T_w - T_g)}$$

المراجع:

- Ben Halima, Hanen, Nader Frikha, and Romdhane Ben Slama. 2014. "Numerical investigation of a simple solar still coupled to a compression heat pump." *Desalination* 337:60-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.01.010>.
- Edalatpour, Mojtaba, Ali Kianifar, and Shamsoddin Ghiami. 2015. "Effect of blade installation on heat transfer and fluid flow within a single slope solar still." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 66. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.05.015.
- Fath, Hassan E. S., and H. M. Hosny. 2002. "Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser." *Desalination* 142 (1):19-27. doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00422-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00422-2).
- Feilizadeh, Mehrzad, M. R. Karimi Estahbanati, Amimul Ahsan, Khosrow Jafarpur, and Amin Mersaghian. 2016. "Effects of water and basin depths in single basin solar stills: An experimental and theoretical study." *Energy Conversion and Management* 122:174-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.048>.
- Kreith, F, and RF Boehm. 1999. "Mechanical Engineering Handbook Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999." Intelligent Transportation Systems.
- Madhlopa, A., and C. M. Johnstone. 2009. "Numerical study of a passive solar still with separate condenser." *Renewable Energy* 34:1668-1677. doi: 10.1016/j.renene.2008.12.032.
- Omara, ZM, Mohamed A Eltawil, and ElSayed A ElNashar. 2013. "A new hybrid desalination system using wicks/solar still and evacuated solar water heater." *Desalination* 325:56-64.
- Prakash, P., and V. Velmurugan. 2015. "Parameters influencing the productivity of solar stills – A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49:585-609. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.136>.
- Rahbar, Nader, Javad Esfahani, and Ehsan Fotouhi-Bafghi. 2015. "Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still – CFD simulation and theoretical analysis." *Solar Energy* 113:313–323. doi: 10.1016/j.solener.2014.12.032.
- Rahmani, Ahmed, and Abdelouahab Boutriaa. 2017. "Numerical and experimental study of a passive solar still integrated with an external condenser." *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (48):29047-29055. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.242>.
- Rahmani, Ahmed, Abdelouahab Boutriaa, and Amar Hadeef. 2015. "An experimental approach to improve the basin type solar still using an integrated natural circulation loop." *Energy Conversion and Management* 93:298-308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.026>.
- Tosun, Ismail. 2007. *Modeling in transport phenomena: a conceptual approach*: Elsevier.
- Xie, Guo, Jianyin Xiong, Hongtao Liu, Baoping Xu, Hongfei Zheng, and Yingjun Yang. 2015. "Experimental and numerical investigation on a novel solar still with vertical ripple surface." *Energy Conversion and Management* 98:151-160.

الفصل الخامس

الدراسة التجريبية لتحسين مردودية المقطرات الشمسية

المحتوى: يحوي الفصل تجارب للمقارنة بين المقطر (SSS) والمقطرات التالية:

التجربة 1 (SSS-HP): المقطر البسيط بميل واحد بوجود مضخة حرارية للتكثيف.

(Simple Solar Still with Heat Pump)

التجربة 2 (SSS-LTG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود سُمْك أقل في الزجاج.

(Simple Solar Still with Less Thickness in Glass)

التجربة 3 (SSS-DLG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود طبقتين من الزجاج.

(Simple Solar Still with Double Layer of Glass)

التجربة 4 (SSS-BSS): المقطر البسيط بميل واحد بوجود سطح أسود من الإسفنج.

(Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge)

التجربة 5 (SSS-FOG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود مروحة فوق الزجاج.

(Simple Solar Still with a Fan Over Glass)

1) مقدمة الفصل الخامس:

التجارب العملية لهذا البحث تمت في مخبر الطاقات المتجددة للمناطق الصحراوية (LENREZAS) - المتواجد في قسم الفيزياء بكلية الرياضيات وعلوم المادة - بجامعة ورقلة (الجنوب الشرقي بالجزائر)، والتجارب أُعْتُمِدَت لتصحيح الفرضيات النظرية والبحث عن أفضل مقطر من حيث الإنتاجية للماء المقطر، ويمكن ترتيب المقطرات المحسنة حسب إنتاجيتها، وكذلك تهدف هذه الدراسة لتزويد المخابر العلمية التابعة لقسم الفيزياء بالماء المقطر لإجراء التجارب التي تعمل بالماء النقي و المنتج بالمقطرات الشمسية، وتزويد الأجهزة المخبرية لميكانيك الموائع وانتقال الحرارة والترموديناميك الموجودة في المخابر البيداغوجية. وهذه التجارب تمكن كذلك من وضع نماذج شبه تجريبية يمكن الاستفادة منها، وتمت هذه التجارب على مدى الأشهر من مارس إلى ماي 2017، وشهر مارس 2018.

2) النماذج الأولية للأجهزة التجريبية:

في كل تجربة تم الاعتماد في إنجاز هذا العمل على مقطرين شمسيين بسيطين متشابهين لكل منهما حوض وحيد الميل له الأبعاد التالية:

- أبعاد الحوض: (الطول × العرض): (0,94m × 0,94m). - أبعاد الغطاء الزجاجي: (1m × 1m).
 - لون الحوض: أسود غير براق. - سمك الزجاج: (5 مم في جميع التجارب إلا التجربة 2 التي يكون 4 مم في المقطر الذي به تحسينات).
 - مساحة الحوض في جميع المقطرات: $A_b = 0,8836m^2$.
- النماذج الأساسية عدد خمسة إضافة للنموذج الشاهد وهي كالتالي:
- النموذج الشاهد (SSS): المقطر البسيط بميل واحد.

(Simple Solar Still)

النموذج 1 (SSS-HP): المقطر البسيط بميل واحد بوجود مضخة حرارية للتكثيف.

(Simple Solar Still with Heat Pump)

النموذج 2 (SSS-LTG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود سُمْك أقل في الزجاج.

(Simple Solar Still with Less Thickness in Glass)

النموذج 3 (SSS-DLG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود طبقتين من الزجاج.

(Simple Solar Still with Double Layer of Glass)

النموذج 4 (SSS-BSS): المقطر البسيط بميل واحد بوجود سطح أسود من الإسفنج.

(Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge)

النموذج 5 (SSS-FOG): المقطر البسيط بميل واحد بوجود مروحة فوق الزجاج.

(Simple Solar Still with a Fan Over Glass)

(3) أجهزة القياس المستعملة في التجارب:

- جهاز قياس الإشعاع الشمسي (Solar meter): يتركب من جزء يوضع على الغطاء الزجاجي، وجهاز إلكتروني يحول الإشعاع إلى قراءة مباشرة على شاشة صغيرة رقمية، تعطي القيمة الحقيقية للإشعاع الساقط على الغطاء الزجاجي بـ W/m^2 .
- جهاز قياس درجة الحرارة (المزدوجات الحرارية-Thermocouples): وهي عبارة عن زوج من المعدن على شكل سلكين ملتحمين التحاماً ذاتياً، تربط كل مزدوجة حرارية بجهاز ميلي فولطمتر خاص، به شاشة رقمية يحول هذا الجهاز درجة الحرارة إلى تيار كهربائي، يقرأ على إثره قيمة درجة الحرارة في المكان الموضوع فيه المزدوجة. وكان عدد المزدوجات كافياً لكي نقيس درجة الحرارة في كل السطوح والمواضع في النماذج الأولية (مجال القياس: $-180^{\circ}C$ - $1200^{\circ}C$).
- جهاز قياس درجة حرارة الجو (المحرار-Thermometer): يوضع مقياس درجة حرارة الجو على ارتفاع واحد متر من سطح التربة في مكان به ظل، والجهاز متصل بالكمبيوتر (مجال القياس: $-10^{\circ}C$; $105^{\circ}C$).
- جهاز قياس الضغط الجوي (البارومتر-Barometer): لقياس الضغط الجوي نستخدم البارومتر وهو يقيس الضغط المطلق في المنطقة التي تمت فيها التجربة وهو متصل بالكمبيوتر.
- جهاز قياس سرعة حركة الهواء الدوار (Anemometers): وهو مزود بمروحة تقيس السرعة حسب عدد دورات المروحة وهو متصل بالكمبيوتر.
- جهاز قياس الرطوبة الجوية (Hygrometer): لقياس الرطوبة النسبية للجو، والتي هي حاصل قسمة الضغط الجزئي لبخار الماء على الضغط الجزئي في حالة التشبع وفي نفس درجة الحرارة نستعمل جهاز به مسبار (sonde)، وهو متصل بجهاز حاسوب. ويسمى الجهاز أيضاً المرطاب.
- جهاز قياس ملوحة الماء (Salt-meter): لقياس كمية الأملاح بالغرام لكل 1 لتر من الماء المقطر ومعرفة خواصه كالتوصيلية الكهربائية، ومقارنتها بالمعايير المعروفة للماء النقي وهي: (1,2 g/L).
- وتم إنشاء محطة أرصاد جوية تابعة للمخبر تقوم بجميع القياسات السابقة، والأجهزة السالفة الذكر كلها متصلة بهذه المحطة. وكانت النتائج التجريبية تأخذ من 8:00 صباحاً إلى غاية 17:00 مساءً على مدى 9 ساعات من المراقبة وتدوين النتائج التجريبية كل ربع ساعة، أما قيم الماء المقطر المنتج فكانت تأخذ كل ساعة.



محطة الأرصاد الجوية



جهاز قياس شدة الإشعاع الشمسي



مروحة لتبريد الزجاج



القدم القنوية



جهاز قياس شدة الملوحة



جهاز قياس درجة الحرارة

الشكل (1-5) : أجهزة القياس المستعملة في التجارب

(4) الأدوات المستعملة في التجارب

- الأنابيب المدرجة (Graduated tubes): تستعمل لقياس كمية السماء في كل مدة زمنية (30 دقيقة)، وبذلك نحسب التدفق الكتلي أو الحجمي للماء وكذلك حساب كمية الماء المُجمَّع.
- حوض التغذية بالماء (Water supply basin): وهو مزود بتركيبة تضمن بقاء مستوى الماء ثابتاً، ويستعمل هذا التجهيز في كل أنواع المقطرات.
- أنابيب بلاستيكية (Plastic tubes): وهي أنابيب ذات قطر 5mm إلى 10mm للتوصيل بين مختلف أجزاء المقطر ونقل الماء مهما كانت نوعيته (نقي-مالح-محلول ملحي).



الأنابيب المدرجة



أحواض التحكم في كمية الماء المالح



خزان التغذية بالماء المالح



أنابيب بلاستيكية



المقطرين المستعملين في التجربة



خلية تغذية اجهزة المخبر بالماء المقطر

الشكل (2-5) : الأدوات المستعملة في التجارب

5) التجارب العملية لتحسين أداء المقطرات الشمسية:

1-5) التجربة الأولى: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في التكثيف)

(SSS-HP) المقطر البسيط بميل واحد بوجود مضخة حرارية للتكثيف.

نرمز له اختصارا (HP)

المقطر الأول (SSS) Simple Solar Still : له ميل واحد وسُمْك الزجاج 5 مم.

المقطر الثاني (SSS-HP) Simple Solar Still with Heat Pump .

ونرمز له اختصارا (HP) : له ميل واحد وسُمْك الزجاج 5 مم ومزود بمضخة حرارية في خلفه لتقطير كمية من الماء.

1-1-5) وصف التجربة الأولى: تم القيام بتركيب مقطرين شمسين الأول مقطر شاهد والثاني به مضخة حرارية خلف

المقطر موصولة بأنابيب من PVC ذات قطر 110mm ، هذه الفتحات متصلة بخلية التقطير من أجل تكثيف البخار،

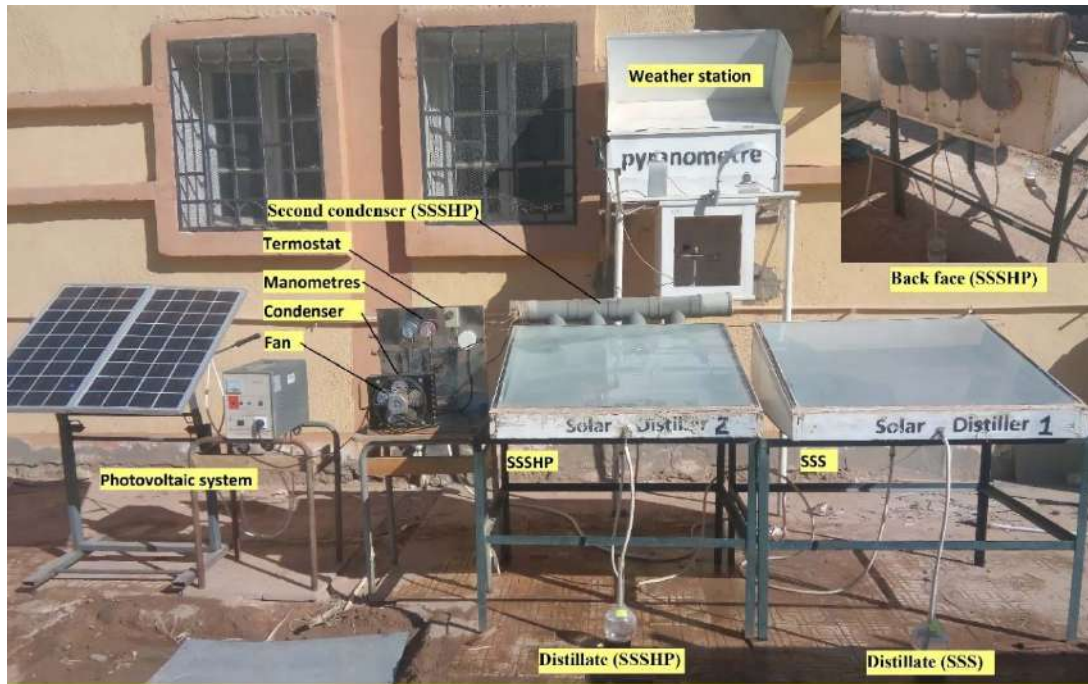
وتم تركيب المزدوجات الحرارية كما هو موضح في الشكل (4-5) و (5-5)، وتمت التجربة على النموذجين على مدى

يوم واحد (30 أبريل 2018) للمقارنة بين المقطرين، والظروف الجوية التي سادت هذه الأيام ظروف مختلفة، وتم ضبط

أجهزة القياس لقياس المتغيرات والثوابت المأخوذة بعين الاعتبار في التأثير المباشر وغير المباشر في كمية الماء المقطر والتدفقات

الحرارية الداخلية والخارجية والضائعة بالنسبة لكل نموذج. ويمكن اعتبار الجهاز (HP) به تحسين من جهة المكثف، وهو

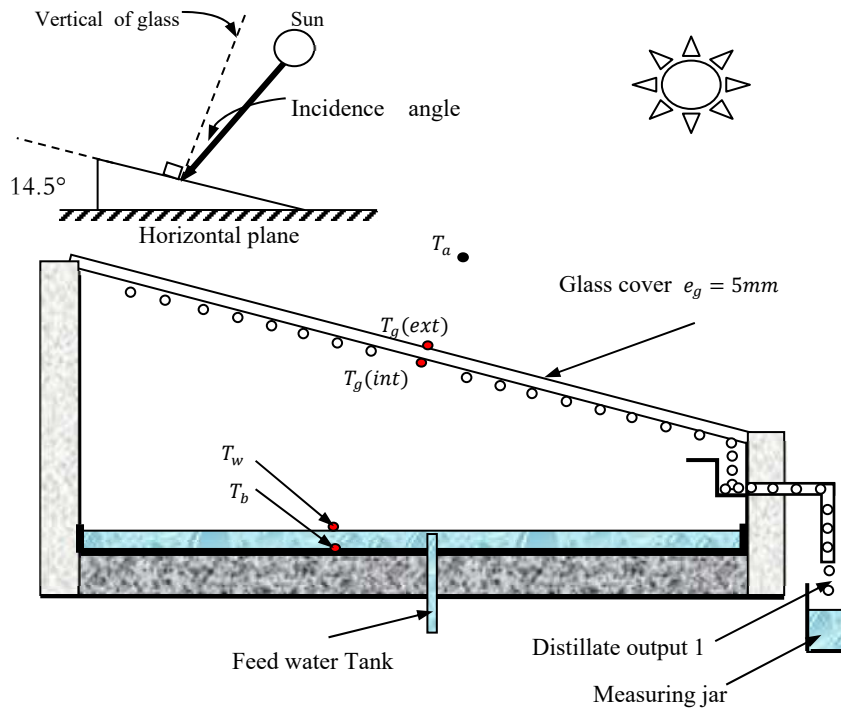
من نوع مقطرات شمسية تعمل بمكثفات مدمجة (Built-in condensers)¹.



¹ لمزيد من التفاصيل أنظر الفصل الثاني الصفحات (56-68)

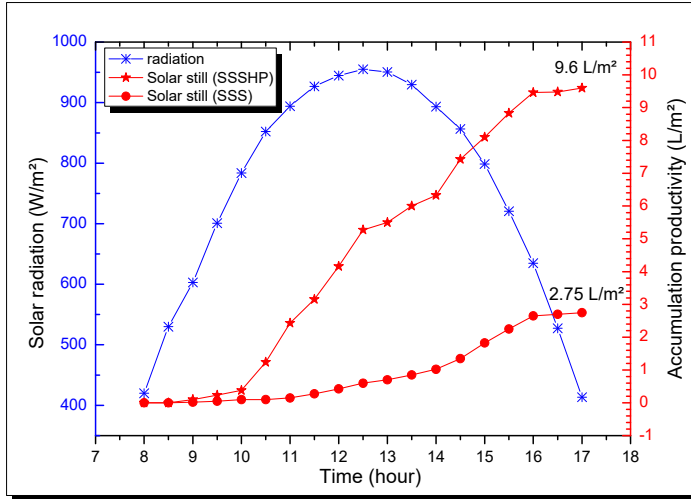


الشكل (3-5): نظرة عامة للحوض¹ بالتجربة الأولى باستعمال المقطر (SSS) و (HP)

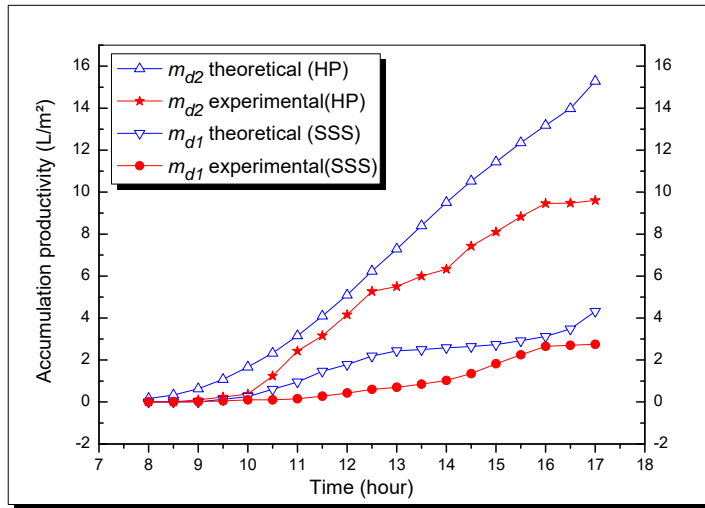


الشكل (4-5): المقطر الشمسي البسيط (SSS) بدون تحسينات

¹ سوف يستخدم هذا الحوض في جميع التجارب الخمس مع اختلاف في الإضافات لكل تجربة.

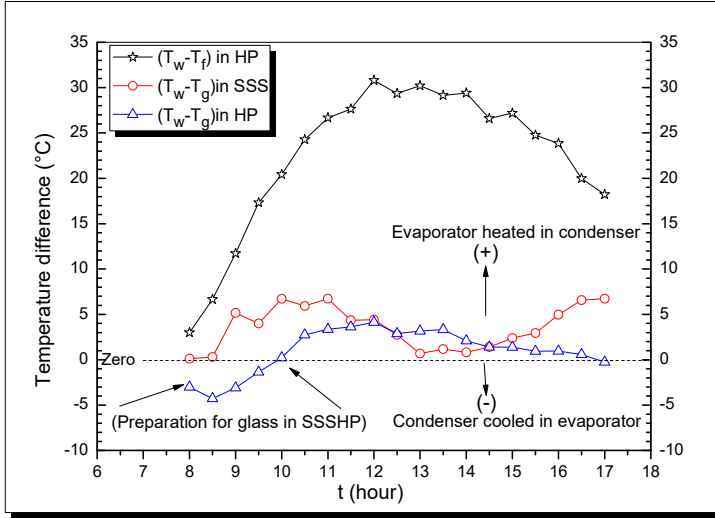


الشكل (5-6): تغيرات كمية الماء المنتج ومقدار الإشعاع الشمسي الكلي يوم 30 أبريل 2018 (التجربة 1)



الشكل (5-7): تغيرات كمية الماء المنتج المحسوب تجريبيا ونظريا يوم 30 أبريل 2018 (التجربة 1)

في الشكل (5-6) يلاحظ ما يلي: فيما يخص كميات الماء المقطر كل ساعة من المقطرين الأول والثاني، ويتضح أيضاً أن كمية المياه المنتجة في المقطر (HP) كانت أكبر منها في المقطر (SSS). والملاحظ أن الكمية متساوية تقريباً في بداية اليوم حتى الساعة 10:00 صباحاً، وبعدها بدأت زيادة الكمية في المقطر (HP)، وذلك نظراً لوجود مكثفين (المكثف 1 هو الغطاء الزجاجي و المكثف 2 هو مبخر المضخة الحرارية). والمقطر (SSS) الذي هو بدون تحسينات يحتوي على مكثف واحد فقط وهو الغطاء الزجاجي. وفي يوم 30 أبريل، تم تحديد كل كمية من كلا الجهازين في نهاية فترة التشمس الحقيقية، وكانت الإنتاجية القصوى للمقطر (SSS) و 9.60 L/m^2 للمقطر (HP). ولقد كانت إنتاجية المضخة الحرارية أكبر من الغطاء الزجاجي.



الشكل (5-8): تغيرات الفرق في درجة الحرارة للمقطرين (التجربة 1)

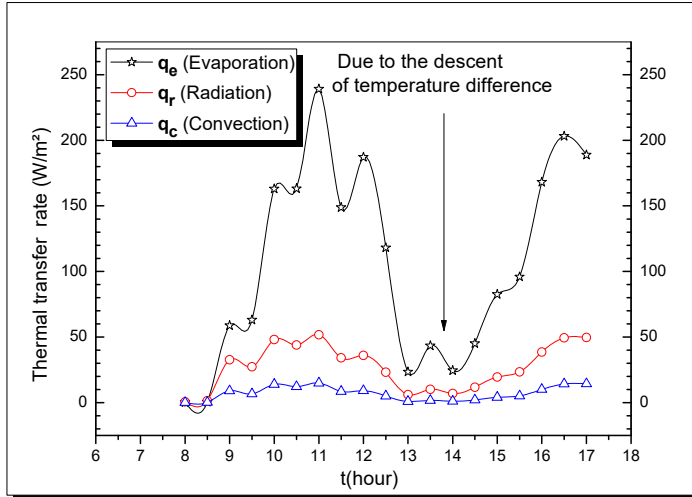
حيث تم وضع مبخر مضخة الحرارة خلف الجهاز بالمقطر (HP)، لكي لا يتعرض لأشعة الشمس مباشرة. وهذا تأكده

أيضاً الدراسة النظرية من كمية المياه المنتجة. والزيادة في الإنتاجية المقدمة هي كما يلي:

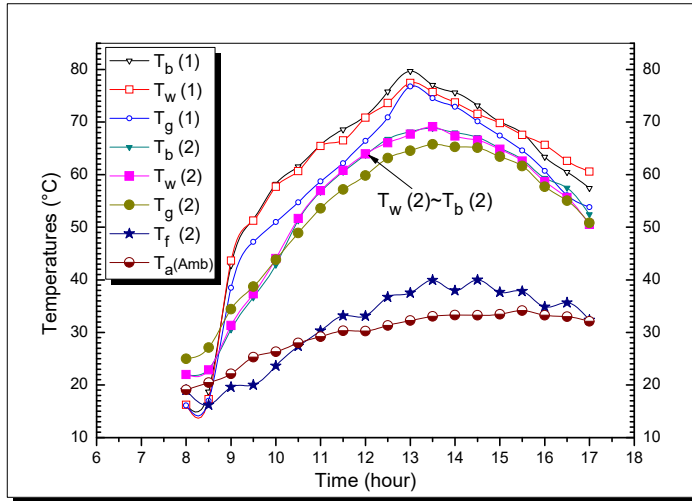
$$\frac{15,28 - 4,31}{4,31} = 2.5452 = 254.52 \% \text{ نظريا}$$

$$\frac{9,60 - 2,75}{2,75} = 2.4909 = 249.09 \% \text{ تجريبيا}$$

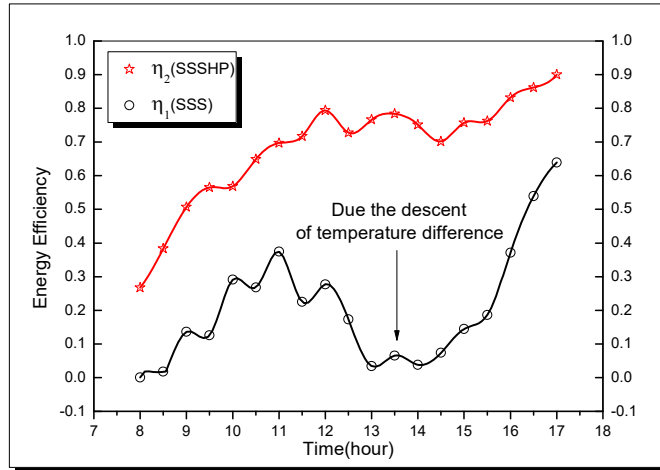
بعض التفسيرات المستنتجة من الشكل (5-8): يلاحظ أن فرق درجة الحرارة يختلف حسب المستويات الحرارية في كل مقطر، كما يمكن ملاحظة الفرق الكبير بين الماء ومبخر المضخة الحرارية في المقطر (HP)، مما يؤدي إلى زيادة في إنتاجية المياه في هذا المقطر. ولكن الفرق بين الماء والغطاء الزجاجي في حدود 5°C إلى $5^{\circ}\text{C}+$ ، والقيمة صفر في الساعة 10:00 صباحاً، وهذا يضمن أن تشغيل المضخة قبل هذا الوقت غير مفيد، لأن مبخر المضخة الحرارية يقوم بتبريد الغطاء الزجاجي. أما بالنسبة للمقطر (SSS) إن الفرق في درجة الحرارة بين الماء والغطاء الزجاجي دائماً أكبر من الصفر، يبدأ من الصفر في البداية (8:00 صباحاً)، ثم ينخفض إلى الصفر في منتصف النهار (13:00)، بسبب ارتفاع درجة حرارة الغطاء الزجاجي، وكذلك بسبب تشكل طبقة من الماء المقطر على الوجه الداخلي للزجاج مما يعيق انتقال الحرارة للغطاء الزجاجي.



الشكل (5-9): تغيرات كمية الحرارة المنتقلة بين الماء والغطاء الزجاجي في المقطر الشاهد (SSS) (التجربة 1) يستنتج من الشكل (5-9) أنه عند دراسة انتقال الحرارة في المقطر (SSS)، نجد الترتيب على النحو التالي: أكبر قيمة هي التبخير ثم الإشعاع، وأصغرها هي قيمة الحمل الحراري. يمكن ملاحظة أن التبخر يتناقص في فترة ما بعد الظهر، بسبب انخفاض الفرق في درجة الحرارة بين الماء والغطاء الزجاجي، ويرجع ذلك أيضاً إلى الفيلم الرقائقي المتكثف على الوجه الداخلي للزجاج.



الشكل (5-10): تغيرات درجات الحرارة في مختلف مستويات المقطرين (التجربة 1) يستنتج من الشكل (5-10) أن مستويات درجة الحرارة من النوع (SSS) أكبر في القيم من النوع (HP). الفرق بينهما هو حوالي 10 درجة مئوية، بسبب وجود مبخر المضخة الحرارية. وهذا يؤكد أن إنتاجية المياه لا علاقة لها بارتفاع درجات الحرارة. والسبب الرئيسي لرفع الإنتاجية هو الفرق بين الماء ومبخر المضخة الحرارية يصل إلى 30 درجة مئوية، وهذا يسبب زيادة في إنتاجية المياه في المقطر (HP). كل هذه التفاصيل مبينة في هذا الشكل.

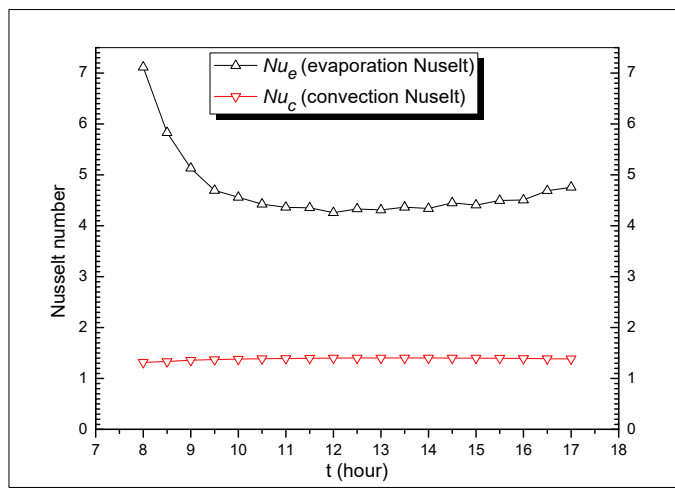


الشكل (5-11): تغيرات الكفاءة الطاقوية في المقطرين (SSS) و (HP) (التجربة 1)

من تفسير الشكل (5-11) يمكن الحصول على النتيجة التالية: من الكفاءة الطاقوية الموضحة في المعادلات (4 - 20) و (4 - 49) في الفصل الرابع¹، يكون المقطر (HP) دائماً أكبر قيمة في الإنتاجية من المقطر (SSS)، ومتوسط الزيادة في الكفاءة الطاقوية بفضل وجود مضخة حرارية في المقطر (HP) وكانت قيمتها هي: 71,6%، وفي الشكل يمكن ملاحظة أن تغيرات كفاءة المقطر (SSS) غير مستقرة، بسبب تقلبات درجات الحرارة. أما المقطر (HP) فكفاءته متزايدة ورتبية في التزايد حتى الوصول للقيمة 90%.

5-1-4 الحمل والتبخير في شريط التكثيف في المقطر المزود بالمضخة الحرارية (HP):

نعتمد في هذه الدراسة على تغيرات رقم **Nusselt** في المقطرين لمعرفة طبيعة الحمل والتبخير بجوار المكثف.



الشكل (5-12): تغيرات رقم Nusselt بالتبخير وبالحمل في المقطر (HP) (خاص بالتجربة 1)

$$Nu_\ell = [1,31 : 1,40], Nu_t = [1,01.10^{-4} : 4,34.10^{-4}], Ra_t = [7,94.10^{-10} : 6,90.10^{-8}]$$

$$Pr = [2,39 : 7,67], f = [0,66 : 0,71], C_\ell = [0,57 : 0,61], \bar{C}_t = [0,108 : 0,109]$$

¹ أكثر تفاصيل في الفصل الرابع صفحة 128-صفحة 133

القيمة المتوسطة لعدد Nusselt على شريط التكتيف الخاص بأنبوب أسطواني أفقي، كما هي موضحة في المعادلات في الفصل الرابع لحساب المعامل $h_{e,w \rightarrow f}$ ، و بعد استخدام المعادلة (4-47)¹، والمعبرة عن قيمة هذا المعامل بالعلاقة التالية: $h_{e,w \rightarrow f} = \frac{Nu_{\ell} k_l}{d}$ ، يلاحظ أن Nusselt للحمل الحراري ثابت مع الزمن، و له قيمة ثابتة تساوي تقريباً $1,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ، لكن قيم Nusselt للتبخير $h_{e,w \rightarrow f}$ في البداية تقارب $7,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ثم تتناقص لتصل قيمة ثابتة تقريباً $4,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ عن الساعة 11:00، ثم تزداد حتى تقارب إلى $4,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ في نهاية التشغيل، ويرجع ذلك لتشكيل شريط رقائق متكاثف و يستمر هذا الشريط في التشكل ويعزل نقل الحرارة بالتبخير. وكل ما سبق مبين بيانياً في الشكل (5-12). وبعد الحسابات النظرية الخاصة برقم Nusselt للحمل الحراري $h_{c,w \rightarrow f}$ على أنبوب أسطواني أفقي، دونت النتائج في الجدول (5-1)؛ يوضح أن قيم Nusselt الرقائقي أكبر من المضطرب، وهذا يؤكد أن نوع التدفق هو رقائق، وقد تمت الحسابات بواسطة المعادلات (4-42) إلى (4-46) في الفصل الخامس، ومن المعادلات الأخيرة نستنتج:

$$Nu_c = ((Nu_{\ell})^{15} + (Nu_t)^{15})^{\frac{1}{15}} \approx ((Nu_{\ell})^{15} + 0)^{\frac{1}{15}} \\ \Rightarrow Nu_c \approx Nu_{\ell}$$

الجدول (5-1): رقم Nusselt لشريط التكتيف على أنبوب أسطواني أفقي في المقطر (PH)

$t(\text{hour})$	$Ra_l \times 10^{-10}$	Pr	C_{ℓ}	f	Nu_{ℓ}	Nu_t	Nu_c
08	007,949	7.666864	0.615732706	0.661460676	1.315551	0.000101	1.315551
09	051,129	6.360540	0.610475028	0.685318634	1.358189	0.000188	1.358189
10	163,691	4.727204	0.601261232	0.698898078	1.380793	0.000277	1.380793
11	378,433	3.364188	0.58932862	0.707889076	1.394753	0.000363	1.394753
12	575,792	2.809109	0.582382965	0.712206762	1.401092	0.000417	1.401092
13	668,875	2.505742	0.577753528	0.713561112	1.403024	0.000438	1.403024
14	646,792	2.517585	0.577948039	0.713191647	1.402500	0.000434	1.402500
15	549,553	2.665624	0.580281156	0.711502512	1.400076	0.000411	1.400076
17	209,994	3.830587	0.594061159	0.701308158	1.384626	0.000298	1.384626

5-1-5 تفسير التغيرات والنتائج الخاصة بالتجربة الأولى:

نلاحظ أن المردود الطاقوي يختلف من مقطر إلى آخر حسب ظروف التجربة، لكن قيمة المردود الطاقوي تبقى متأثرة أكثر بشكل ونوعية المقطر والتحسين المضاف إليه، ويتميز بما يلي:

1. قيمته محصورة بين 0 و 1، وهذا ناتج من كون أن المقطرات الشمسية يوجد فيها ضياع للطاقة.
2. تبدأ قيمة المردود الطاقوي من 0 وتصل إلى الذروة عند الساعة 13:00 وتتناقص للوصول إلى قيمة دنيا عند المساء (من 0.1 إلى غاية 0.5).
3. النتائج الخاصة بأعظم قيمة للمردود الطاقوي مدونة في الجدول (5-3).

¹ المعادلة موضحة في الصفحة 133 بالفقرة (4-2-4) في الفصل الرابع، والطريقة النظرية المستنتجة منها المعادلة موضحة في الصفحة 112 في الفصل الثالث

2-5) التجربة الثانية: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في سُمك الزجاج)

(SSS-LTG) المقطر البسيط بميل واحد بوجود سُمك أقل في الزجاج.

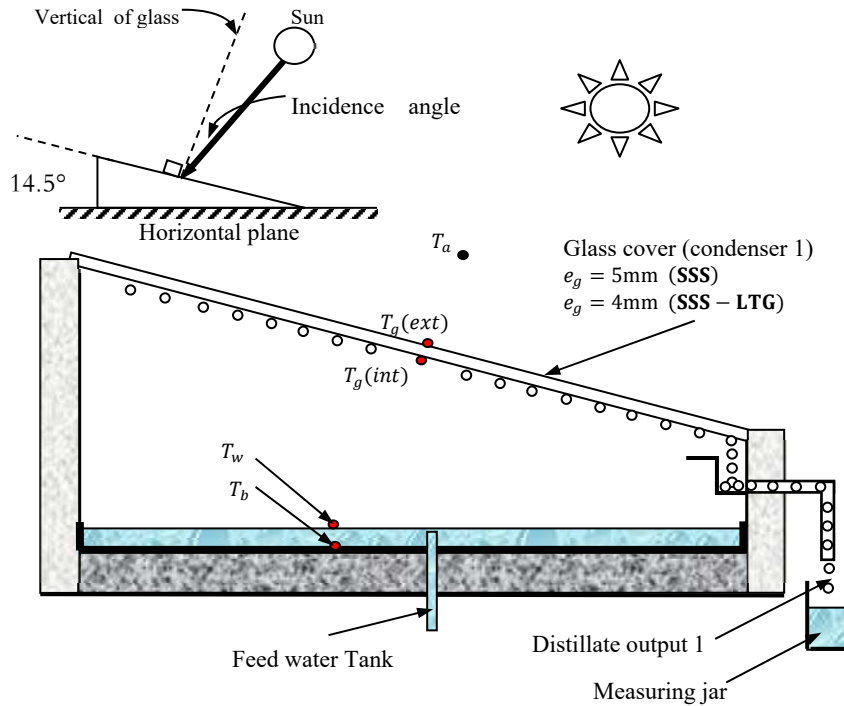
المقطر الأول- (SSS) Simple Solar Still: له ميل واحد وسُمك الزجاج $e_{g(1)} = 5mm$.

المقطر الثاني- (SSS-LTG) Simple Solar Still with Less Thickness in Glass

ونرمز له اختصارا (LTG)، حيث أن له ميل واحد وسُمك الزجاج $e_{g(2)} = 4mm$ ولا يختلف عن المقطر الشاهد إلا في سُمك الزجاج.

1-2-5) وصف التجربة الثانية:

تم القيام بتركيب مقطرين شمسين الأول سُمك الزجاج $e_{g(1)} = 5mm$ والثاني سُمك الزجاج له القيمة $e_{g(2)} = 4mm$ ، وتم تركيب المزدوجات الحرارية كما هو موضح في الشكل (5-13) و (5-4)، وتمت التجربة على النموذجين على مدى 3 أيام كاملة (12 و 13 و 14 مارس 2017) للمقارنة بين المقطرين، والظروف الجوية التي سادت هذه الأيام ظروف مختلفة، وتم ضبط أجهزة القياس لقياس المتغيرات والثوابت المأخوذة بعين الاعتبار في التأثير المباشر وغير المباشر في كمية الماء المقطر والتدفقات الحرارية الداخلية والخارجية والضائعة بالنسبة لكل نموذج، ثم دونت هذه النتائج .



الشكل (5-13): مخطط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (LTG)

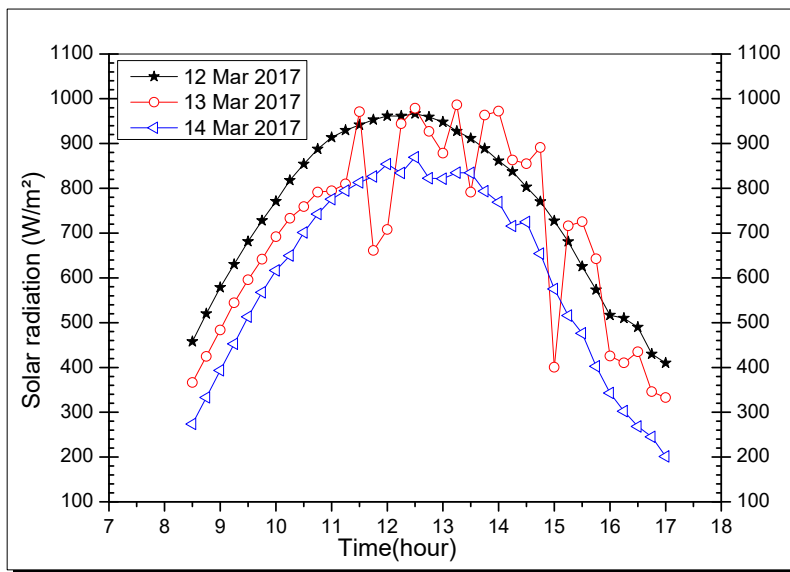
بوجود تحسينات (سُمك أقل في الزجاج) (التجربة 2)

5-2-2) الظروف الجوية الخاصة بالأيام الذي تمت فيه التجربة الثانية:

- الإشعاع الشمسي: إن في المجال، من 164 W/m^2 إلى 959 W/m^2 وقيمة الإشعاع هذه كافية لتسخين السطوح السوداء في النماذج الأولية للمقطرين.
- حركة الهواء: كانت حركة الهواء منعدمة تقريبا، من 0 m/s إلى $3,2 \text{ m/s}$ واختيار هذا الشرط للتقليل من الضياع في التدفقات الحرارية على مستوى الغطاء الزجاجي في كل من المقطرين.
- الضغط الجوي: كان الضغط الجوي أقل من 1 atm بقليل وذلك لارتفاع منطقة ورقلة عن البحر بـ 140 متر.
- الرطوبة الجوية النسبية: كان الجو جافا، بحيث أن قيمة الرطوبة النسبية للهواء في المجال من 7% إلى 22% .
- درجة الحرارة الجوية: تتراوح قيمتها 18°C إلى 36°C .

5-2-3) منحنيات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الثانية:

تم رسم منحنيات الإشعاع الشمسي الكلي بدلالة الزمن، ونلاحظ أن كل من الإشعاع الشمسي الكلي والمباشر والمنتشر يرتفع تدريجيا مع مرور الزمن إلى أن يبلغ الذروة خلال فترة الزوال (من الساعة $12:00$ إلى $13:00$) خلال اليومين 12 و14 مارس ويكون مذبذب خلال اليوم 13 مارس لأن الجو كان مغيم خلال هذه الفترة، ثم يبدأ بالتناقص تدريجيا خلال الفترة المسائية. وبعد المقارنة بين النتائج التجريبية خلال أيام التجربة من حيث الإشعاع الشمسي والظروف الجوية السائدة وكمية الماء المقطر المنتجة كان يوم 12 مارس هو الأحسن، لذلك سوف يعتمد في الدراسة على النتائج المأخوذة خلال هذا اليوم. ونلاحظ أن كل ما زاد الإشعاع الكلي قل الإشعاع المنتشر، وهذا ناتج من الشوائب الموجودة في الجو، بحيث كل ما زادت زاد الإشعاع المنتشر ويقل معه الإشعاع الكلي.

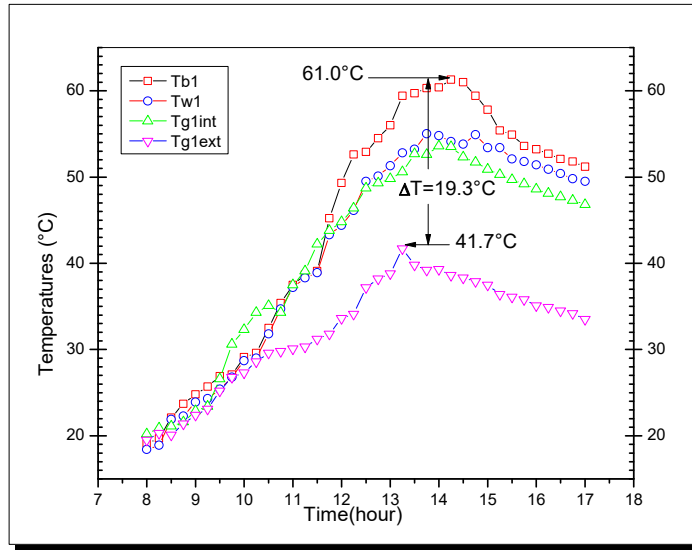


الشكل (5-14): تغيرات الإشعاع الشمسي (التجربة 2)

4-2-5 مقارنة درجات الحرارة في كل مقطر شمسي الخاصة بالتجربة الثانية:

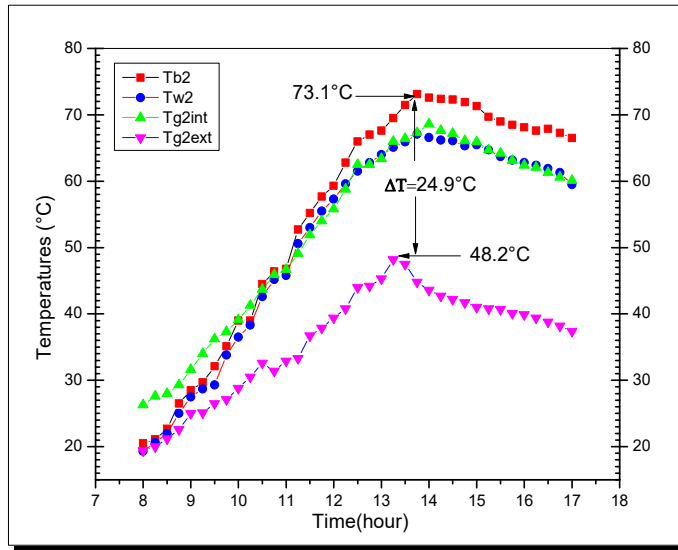
حسب الشكلين (15-5) و(16-5) الذين يعطيان تغيرات درجة الحرارة في كل مقطر على حدى، أن الفرق في درجة الحرارة القصوى T_b و الدنيا $T_{g(int)}$ يعطي فكرة عن مدى الفرق في درجة الحرارة بين التبخير والتكثيف، فنلاحظ أن القيمة في كل مقطر كما يلي:

المقطر (SSS): الفرق $19,3^{\circ}\text{C}$ كما في الشكل (15-5) مع كمية ماء منتجة $1,8 \text{ L/m}^2$ حسب الشكل (18-5).
المقطر (LTG): الفرق $24,9^{\circ}\text{C}$ كما في الشكل (16-5) مع كمية ماء منتجة $2,5 \text{ L/m}^2$ حسب الشكل (18-5).



Temperatures (SSS)

الشكل (15-5): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) (التجربة 2)

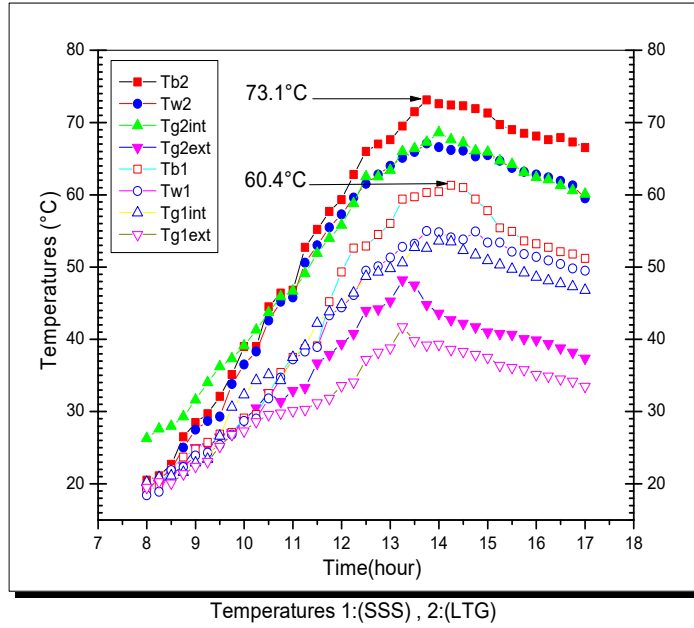


Temperatures (SSS-LTG)

الشكل (16-5): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الثاني (LTG) (التجربة 2)

5-2-5) مقارنة درجات الحرارة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في سُمك الزجاج:

ندون درجات الحرارة في المقطرين فينتج الشكل (5-17)، تغيرات درجات الحرارة لها هيئة واحدة.



الشكل (5-17): مقارنة تغيرات درجات الحرارة في المقطرين (SSS) و (LTG) (التجربة 2)

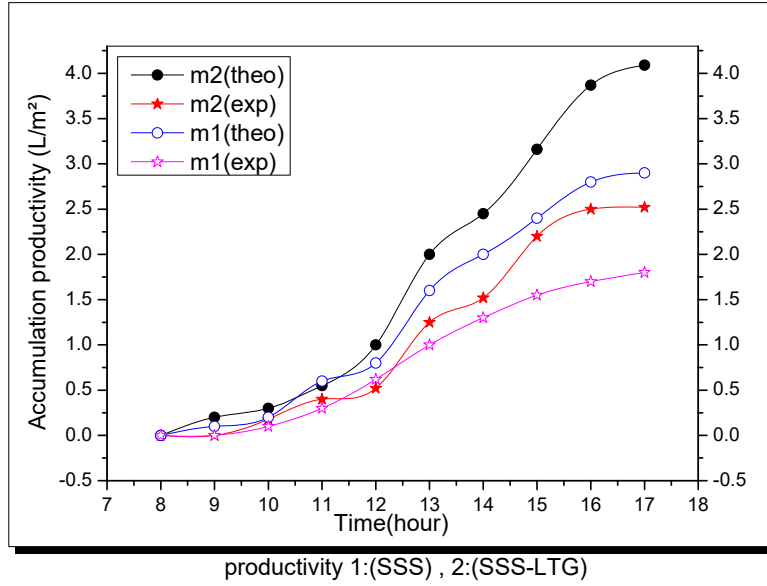
في المنحنيات التابعة للشكل (6-17) نلاحظ أن درجات الحرارة في كافة أجزاء المقطرين الأول (ذو السمك 5 مم) والثاني (ذو السمك 4 مم) تكون متزايدة بدلالة الزمن لتبلغ الذروة عند الزوال (13:30 تقريبا) ثم تنخفض مرة أخرى، والسطح الأسود يكون أكبر جزء ترتفع درجة حرارته يليه الماء والسطح الداخلي للزجاج، أما السطح الخارجي للزجاج يكون أبرد جزء. ومنه يمكن اعتبار درجة حرارة الزجاج الفعلية الداخلة في العلاقات النظرية هي القيمة المتوسطة بين الوجه الداخلي والوجه الخارجي.

$$T_g = \frac{T_{g(int)} + T_{g(ext)}}{2}$$

وهذا يفسر بأن السطح الأسود يمتص حرارة، تنتقل هذه الحرارة إلى الماء ليسخن ثم يتبخر ثم يتكثف على الزجاج. كما نلاحظ أن درجات الحرارة في مختلف أجزاء المقطر الأول تكون مرتفعة عن درجة حرارة أجزاء المقطر الثاني وهذا يفسر بأن الزجاج ذو السمك $e_{g(2)} = 4mm$ له إمرارية أكبر للإشعاع الشمسي من الزجاج ذو السمك $e_{g(1)} = 5mm$.

5-2-6) مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا في المقطرين الشمسين المختلفين في السُمك:

نلاحظ في المنحنيات الموضحة في الشكل (5-18) أن كمية الماء النظرية والتجريبية المجمعة في المقطر ذو السمك $e_{g(2)} = 4mm$ أكبر منها في المقطر ذو السمك $e_{g(1)} = 5mm$ ، وهذا ما يفسر أن الزجاج ذو السمك الأقل لديه إمرارية للإشعاع أكبر. ونستنتج أنه كلما كان سمك الزجاج صغير كانت إنتاجية الماء المقطر أكبر.



الشكل (5-18): تغيرات كمية الماء المجمعة تجريبيا والمحسوبة نظريا الخاصة بالتجربة الثانية (التجربة 2)

5-2-7) النتائج المستخلصة من التجربة الثانية:

النتيجة 1: عند استعمال الزجاج ذو السمك 4 مم كانت إنتاجية الماء المقطر تساوي $\dot{m} = 2.50 \text{ L/m}^2/\text{day}$

النتيجة 2: عند استعمال الزجاج ذو السمك 5 مم كانت إنتاجية الماء المقطر تساوي $\dot{m} = 1.80 \text{ L/m}^2/\text{day}$

النتيجة 3: عند استعمال الزجاج ذو السمك $e_{g(1)} = 5\text{mm}$ كانت إنتاجية الماء المقطر أكبر ومن هنا نستنتج أن كل ما قل سمك الغطاء كانت إمرارية أكبر للإشعاع الشمسي وكانت إنتاجية الماء المقطر أكثر.

النتيجة 4: عند استعمال الزجاج ذو السمك $e_{g(2)} = 4\text{mm}$ كانت إنتاجية الماء المقطر أكبر في الفترة المسائية ومن هنا نستخلص أن هذا المقطر خزن حرارة، وهذا ناتج من العزل الحراري في الغطاء ذو السمك الأكبر.

النتيجة 5: استعمال الزجاج ذو السمك $e_{g(1)} = 5\text{mm}$ يقلل من احتمالية حدوث كسور للزجاج خاصة عند درجات الحرارة المرتفعة وهذا ما دفع لاستعماله في التجربة.

النتيجة 6: والزيادة في كمية الماء المنتج، أو الزيادة في الإنتاجية المقدمة والمحسوبة نظريا وتجريبيا هي كما يلي:

$$\frac{4.09 - 2.90}{2.90} = 0.4103 = 41.03 \% \text{ نظريا}$$

$$\frac{2.50 - 1.78}{1.78} = 0.4044 = 40.44 \% \text{ تجريبيا}$$

النتائج نظريا وتجريبيا متقاربة رغم اختلاف الإنتاجية بينهما، ويمكن أن نستنتج من هذه الدراسة أن السمك الأقل يعطي كمية تصل الى 40 % في المتوسط حسب ظروف التجربة في منطقة ورقلة.

(3-5) التجربة الثالثة: (المقارنة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في عدد طبقات الزجاج)

(SSS- DLG) المقطر البسيط بميل واحد بوجود طبقتين من الزجاج.

المقطر الأول: **(SSS) Simple Solar Still**: له ميل واحد وأحادي الزجاج، سُمك الزجاج 5 مم.

المقطر الثاني: **(SSS- DLG) Simple Solar Still with Double Layer of Glass**.

ونرمز له اختصارا **(DLG)**، حيث أن له ميل واحد وطبقتين من الزجاج لهما سُمك 5 مم، بينهما مائع تبريد (ماء أو هواء)، في هذه التجربة استعملنا الماء.

(1-3-5) وصف التجربة الثالثة:

تم القيام بتركيب مقطرين شمسيين الأول أحادي الطبقة والثاني مزدوج الطبقة بينهما هواء أو ماء محجوز، و من الممكن استخدام أي مائع للتبريد، وحركة هذا المائع تؤثر على طريقة التبريد حيث أن المائع (ماء أو هواء) تجعل التبريد له دور في كفاءة التقطير وهذا ما توضحه المعادلة (4 - 58)، والتي تنص على ما يلي:

$$m_w C_w \frac{dT_{w(c)}}{dt} = \alpha_w (1 - \alpha_g) (1 - \rho_g) G_T + q_{c,i \rightarrow e}$$

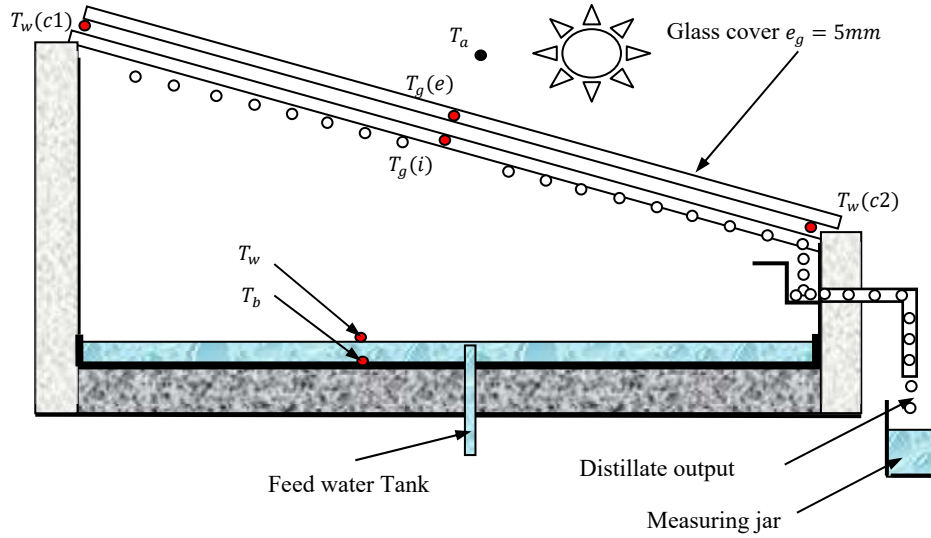
الحد الخاص بالتخزين الحراري يمكن حسابه لكتلة تفاضلية dm_w تمر عبر زمن تفاضلي dt ، ويتحول إلى العبارة التالية:

$$\frac{dm_w}{dt} C_w dT_{w(c)} = \dot{m}_w C_w dT_{w(c)} = \alpha_w (1 - \alpha_g) (1 - \rho_g) dG_T + dq_{c,i \rightarrow e}$$

العامل $\frac{dm_w}{dt}$ يمثل التدفق الكتلي لمائع التبريد ونرمز له بالرمز \dot{m}_w ، وهو ما يؤكد أن سرعة المائع تزيد من مقدار الضياع الحراري $dq_{c,i \rightarrow e}$ خلال الزمن dt ، والذي يمثل تبريدا للزجاج.

وفي هذه التجربة استخدمنا ماء التغذية لتبريد الزجاج وبسرعة بطيئة حيث كان التدفق $\dot{m}_w = 0.013 \text{ kg/s}$ يعني تقريبا له القيمة التالية $\dot{m}_w = 800 \text{ g/min}$ ، يدخل ماء التبريد باردا بدرجة حرارة $T_{w(c1)}$ ويخرج حاملا معه حرارة للمخرج بدرجة حرارة مرتفعة قليلا $T_{w(c2)}$ ، ومن أهم مساوي هذه الطريقة أن ماء التبريد يعتبر عائق لمرور الإشعاع، وسوف يتم التأكد من هذه الفرضية تجريبيا.

وتم تركيب المزدوجات الحرارية كما هو موضح في الشكل (5-19)، وتمت التجربة على النموذجين على مدى 3 أيام كاملة (15 و 16 مارس و 5 أبريل 2017) للمقارنة بين المقطرين، والظروف الجوية التي سادت هذه الأيام ظروف مختلفة، وتم ضبط أجهزة القياس لقياس المتغيرات والثوابت المأخوذة بعين الاعتبار في التأثير المباشر وغير المباشر في كمية الماء المقطر والتدفقات الحرارية الداخلية والخارجية والضائعة بالنسبة لكل نموذج.



الشكل (5-19): مخطط تفصيلي للمقطر الشمسي البسيط (DLG) (التجربة 3)

بوجود تحسينات (بوجود طبقتين من الزجاج)



صورة توضح الأنبوب المزود بماء التبريد في المقطر DLG



صورة توضح المقطرين معا أثناء عملية التقطير، حيث يظهر ماء التبريد بين الطبقتين الزجاجيتين

الشكل (5-20): صور توضيحية للتجربة الثالثة

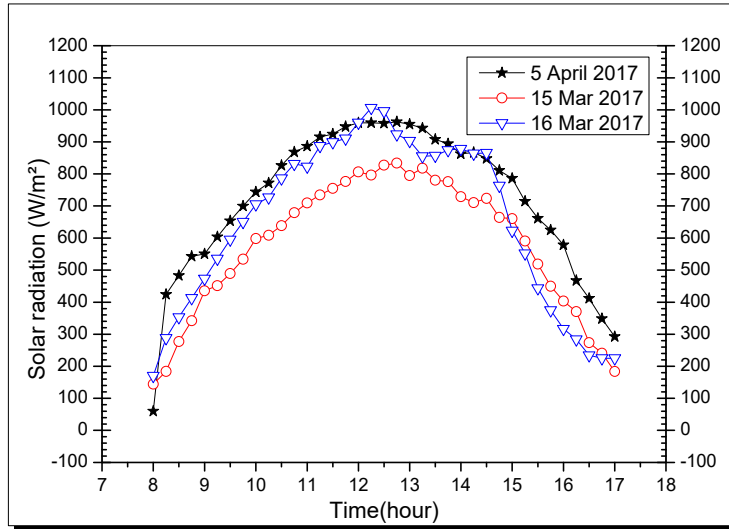
5-3-2) الظروف الجوية الخاصة بالأيام التي تمت فيها التجربة الثالثة:

- الإشعاع الشمسي: كان في المجال، من $59 W/m^2$ إلى $998 W/m^2$.
- حركة الهواء: كانت حركة الهواء منعقدة تقريبا، من $0 m/s$ إلى $2,4 m/s$ واختيار هذا الشرط للتقليل من تأثير الضياع في التدفقات الحرارية على مستوى الغطاء الزجاجي في كل من المقطرين.
- الضغط الجوي: كان الضغط الجوي أقل بقليل من $1 atm$.
- الرطوبة الجوية: كان الجو جافا، بحيث أن قيمة الرطوبة النسبية للهواء في المجال من 13% إلى 55%.
- درجة الحرارة الجوية: تتراوح قيمتها $16^\circ C$ إلى $34^\circ C$.

3-3-5) تغيرات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الثالثة:

تم رسم تغيرات الإشعاع الشمسي الكلي G_T بدلالة الزمن. ونلاحظ في الشكل (5-21) أن الإشعاع الشمسي الكلي يرتفع تدريجيا مع مرور الزمن إلى أن يبلغ الذروة خلال فترة الزوال (من الساعة 12 إلى 13) ثم يبدأ بالتناقص تدريجيا خلال الفترة المسائية.

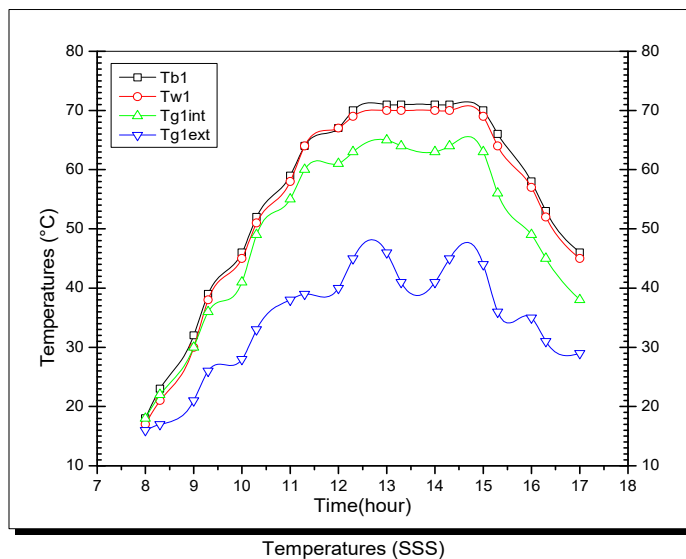
وبعد المقارنة بين النتائج التجريبية خلال أيام التجربة من حيث الإشعاع الشمسي والظروف الجوية السائدة وكمية الماء المقطر المنتجة كان يوم 16 مارس الأحسن، لذلك سوف يعتمد في الدراسة.



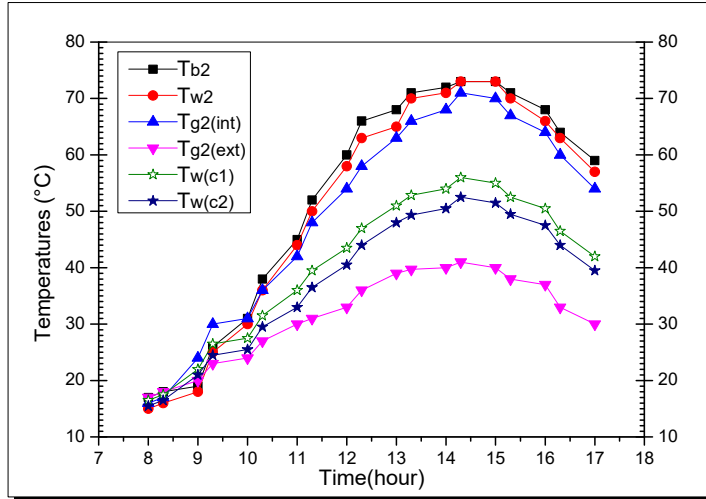
الشكل (5-21): تغيرات الإشعاع الشمسي (التجربة 3)

4-3-5) مقارنة درجات الحرارة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في عدد طبقات الزجاج:

عند رسم تغيرات درجات الحرارة في المستويات الداخلية للمقطرين والموضحة في الشكلين التاليين:

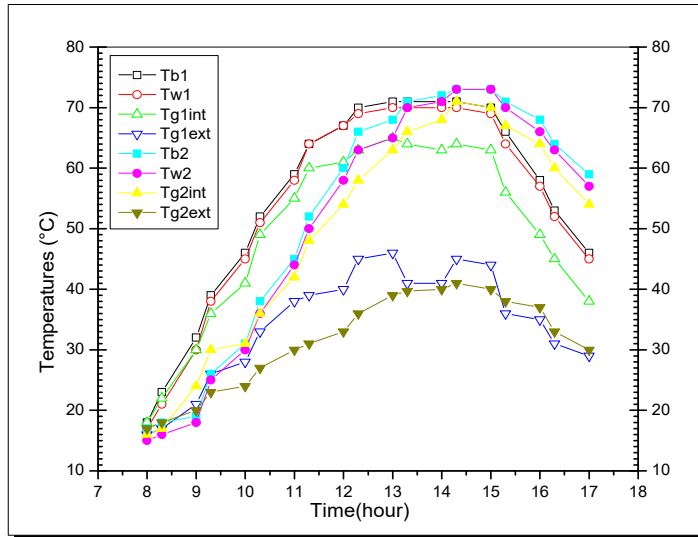


الشكل (5-22): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) (التجربة 3)



الشكل (5-23): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الثاني (DLG) (التجربة 3)

نلاحظ في الشكلين (5-22) و (5-23) السابقين (أن درجات الحرارة في كافة أجزاء المقطر تكون متزايدة بدلالة الزمن لتبلغ الذروة عند الزوال (13:30) بالنسبة للمقطر الأول وحوالي الساعة 14:30 المقطر الثاني) ثم تنخفض مرة أخرى، والسطح الأسود يكون أكبر جزء ترتفع درجة حرارته يليه الماء والسطح الداخلي للزجاج، أما السطح الخارجي للزجاج يكون أبرد جزء. وهذا يفسر بأن السطح الأسود يمتص حرارة تنتقل هذه الحرارة إلى الماء ليسخن ثم يتبخر ثم يتكثف على الزجاج.



Temperatures, 1:(SSS) , 2: (SSS-DLG)

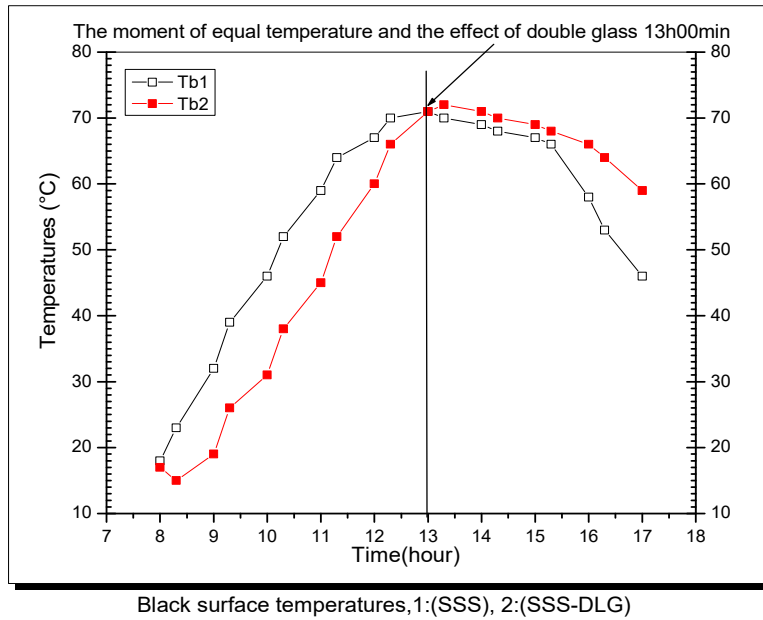
الشكل (5-24): مقارنة تغيرات درجات الحرارة في المقطرين (SSS) و (DLG) (التجربة 3)

عند مقارنة درجات الحرارة في المقطرين كما هو موضح في الشكل (5-24)، نلاحظ أن درجات الحرارة في مختلف أجزاء المقطر الأول (أحادي الزجاج) تكون مرتفعة عن درجة حرارة أجزاء المقطر الثاني (مزدوج الزجاج) إلى غاية الزوال (من الساعة 13:30 - 14:30) ليصبح العكس درجة حرارة أجزاء المقطر الثاني أكبر وهذا يفسر بأن المقطر الثاني يخزن

حرارة أكثر من المقطر الأول، حيث ان درجات الحرارة للسطح الأسود والماء في المقطر الأول عند نهاية التقطير كانت تقارب 60°C ، أما المقطر الثاني كانت تقارب 45°C .

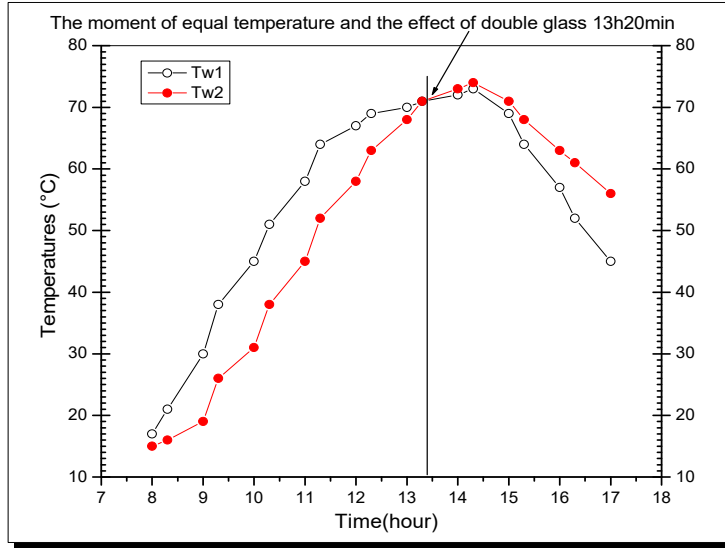
5-3-5) مقارنة مستويات درجات الحرارة للأجزاء المتماثلة في المقطرين المختلفين في عدد طبقات الزجاج:

وهذه المقارنة تتم بوضع تغيرات درجات الحرارة لنفس المستوي لكلا المقطرين، ومن هذه المقارنة يمكن معرفة أثر التحسينات التي تمت في المقطر الثاني على كل مستوى، ومن أهم المستويات التي تتم مقارنتها هي المستويات الداخلية، فالشكل (5-25) خاص بالسطح الأسود، أما الشكل (5-26) خاص بالماء المالح وفي الأخير يأتي الشكل (5-26) تعطينا مقارنة لدرجات الحرارة للوجه الداخلي للزجاج، وأهم لحظة نهتم بها هي لحظة تساوي درجات الحرارة في كلا المقطرين وهذه اللحظة تمثل لحظة انقلاب سوف يتم شرحها لاحقا في الفقرة الموالية، والتغيرات كالآتي:



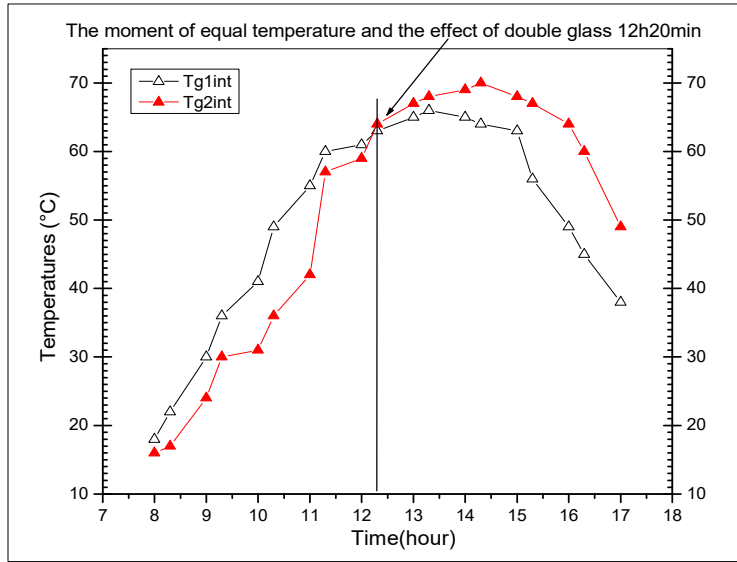
الشكل (5-25): مقارنة تغيرات درجات حرارة السطح الأسود في المقطرين (SSS) و (DLG) (التجربة 3)

في الشكل (5-25) الذي يقارن بين درجات السطح الأسود في المقطرين، ويبدو أن التغير بالنسبة للزمن لدرجات الحرارة له نفس الهيئة لكن هناك اختلاف في ترتيب القيم، حيث نسبي الفترة الصباحية (من 8:00 إلى 13:00) الفترة المسائية (من 13:00 إلى 17:00)، والزمن 13:00 هو زمن الانقلاب في الترتيب.



Water's temperatures, 1:(SSS), 2:(DLG)

الشكل (5-26): مقارنة تغيرات درجات حرارة الماء المالح في المقطرين (SSS) و (DLG) (التجربة 3)



Glass temperatures, 1:(SSS), 2:(DLG)

الشكل (5-27): مقارنة تغيرات درجات حرارة السطح الداخلي للزجاج في (SSS) و (DLG) (التجربة 3)

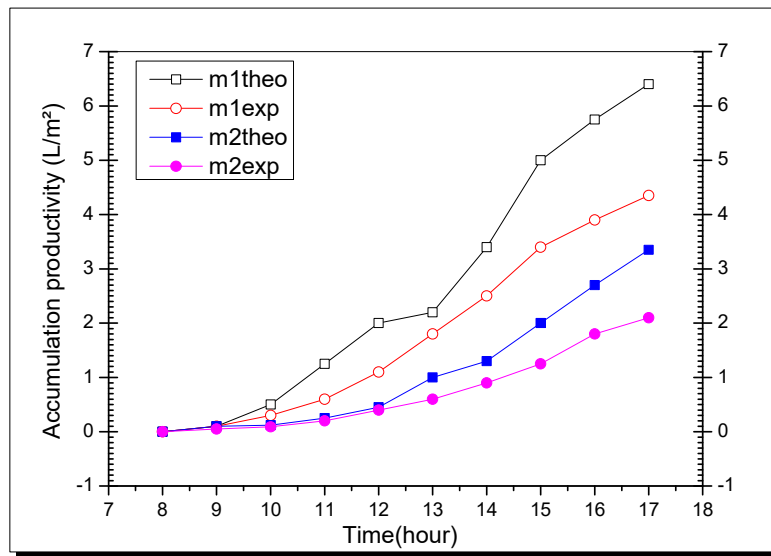
تفسير المنحنيات: نلاحظ أن درجات الحرارة الخاصة بالسطح الأسود تزداد مع مرور الزمن في كلا المقطرين بحيث أن درجات الحرارة في المقطر الأول تكون أكبر منها في الثاني، ثم تنعكس الظاهرة لتصبح درجات الحرارة في المقطر الثاني أكبر منها في الأول وذلك بالترتيب بين أجزاء المقطر، نبدأ بالسطح الأسود قيمة زمن الانقلاب هي اللحظة 13:00 ، أما الماء المالح فلحظة الانقلاب كانت 13:30 ، وأخيرا السطح الداخلي للزجاج لحظة الانقلاب هي اللحظة 12:20. ومن الأشكال نحدد الفترة الصباحية بالنسبة للسطح الأسود (من 8:00 إلى 13:00)، حيث يمر الإشعاع في المقطر الأول للسطح الأسود بقيم أكبر مما يمر عند المقطر الثاني والسبب وجود طبقتين من الزجاج في المقطر الثاني والانعكاسات

التي تحدث للإشعاع، وعند تشبع المقطرين بالحرارة بعد الزمن 13:00 فإن الطبقتين تعزلان الحرارة منه تزداد درجة حرارة السطح الأسود في المقطر الثاني. ويمكن تلخيص النتائج في الجدول التالي:

الجدول (5-2): لحظة الانقلاب لكل مستوي في المقطرين (SSS) و (DLG) الخاصة بالتجربة الثالثة

المستوى المدروس	السطح الأسود	الماء المالح	الوجه الداخلي للزجاج
لحظة الانقلاب	13:00	13:30	12:20

6-3-5 مقارنة كمية الماء المُجمَّعة تجريبيا والمحسوبة نظريا في مقطري مختلفين في عدد طبقات الزجاج:



Water Productivity, 1:(SSS), 2:(DLG)

الشكل (5-28): تغيرات كمية الماء المجمعة تجريبيا والمحسوبة نظريا الخاصة بالتجربة الثالثة

تفسير المنحنيات: نلاحظ أن كمية الماء النظرية والتجريبية المجمعة في المقطر أحادي الطبقة أكبر منها في المقطر المزدوج الطبقة، وهذا ما يفسر أن الزجاج ذو الطبقة المزدوجة له عزل حراري أكبر من الزجاج ذو الطبقة الأحادية.

وهذا ما يؤكد أن الماء المحجوز عبارة عن عازل يقلل من كفاءة المكثف.

7-3-5 النتائج المستخلصة من التجربة الثالثة:

وهي نتيجة واحدة ومهمة، وتنص على ما يلي: إن استعمال زجاجتين بينهما ماء محجوز كان بهدف تبريد المكثف، لكن هذا التحسين كان له دور تخزين الطاقة داخل المقطر وتسخين المبخر، وكان أثره على المكثف بزيادة التسخين وإنتاجية الماء المقطر كانت أقل، وهذا ما يدفع بنا للقول إن هذا الإجراء لا يجدي نفعا لذلك ينصح بعدم تجربته في الدراسات المستقبلية.

4-5) التجربة الرابعة: (المقارنة بين مقطرين شمسيين بسيطين مختلفين في طبيعة السطح الأسود)**(SSS- BSS) المقطر البسيط بميل واحد بوجود سطح أسود من الإسفنج.**

المقطر الأول (SSS) Simple Solar Still: له ميل واحد وسُمْك الزجاج 5 مم، وله مبخر من الألمنيوم مطلي باللون الأسود.

المقطر الثاني (SSS- BSS) Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge.

ونرمز له اختصاراً (BSS) ، حيث أن له ميل واحد وسُمْك الزجاج 5 مم، وله مبخر من الألمنيوم موضوع عليه طبقة من الإسفنج مطلية باللون الأسود، حيث أنه يمكن عدم طلي طبقة الألمنيوم بالأسود لأن هذا السطح موضوع تحت الإسفنج وغير معرض لأشعة الشمس. لكن في هذه التجربة كان السطح أسوداً وهذا اللون لن ينفع الجهاز في عملية التقطير.

5-4-1) وصف التجربة الرابعة:

تم القيام بتركيب مقطرين شمسيين الأول به سطح أسود من الألمنيوم والثاني به سطح أسود من الإسفنج 1 سم وتم تركيب المزدوجات الحرارية كما هو موضح في الشكل (5-29) وفي هذه التجربة تم تغيير المزدوجات الحرارية بمزدوجات لها رأس حساس من الفولاذ نظراً لبعض المشاكل التي حصلت في المزدوجات السابقة (مزدوجات ذات رأس عادي)، وتمت التجربة على النموذجين على مدى 3 أيام كاملة (10 و 11 و 12 أبريل 2017) للمقارنة بين المقطرين، والظروف الجوية التي سادت هذه الأيام ظروف مختلفة، وتم ضبط أجهزة القياس لقياس المتغيرات والثوابت المأخوذة بعين الاعتبار في التأثير المباشر وغير المباشر في كمية الماء المقطر والتدفقات الحرارية الداخلية والخارجية والضائعة بالنسبة لكل نموذج.

5-4-2) الظروف الجوية الخاصة بالأيام التي تمت فيها التجربة الرابعة:

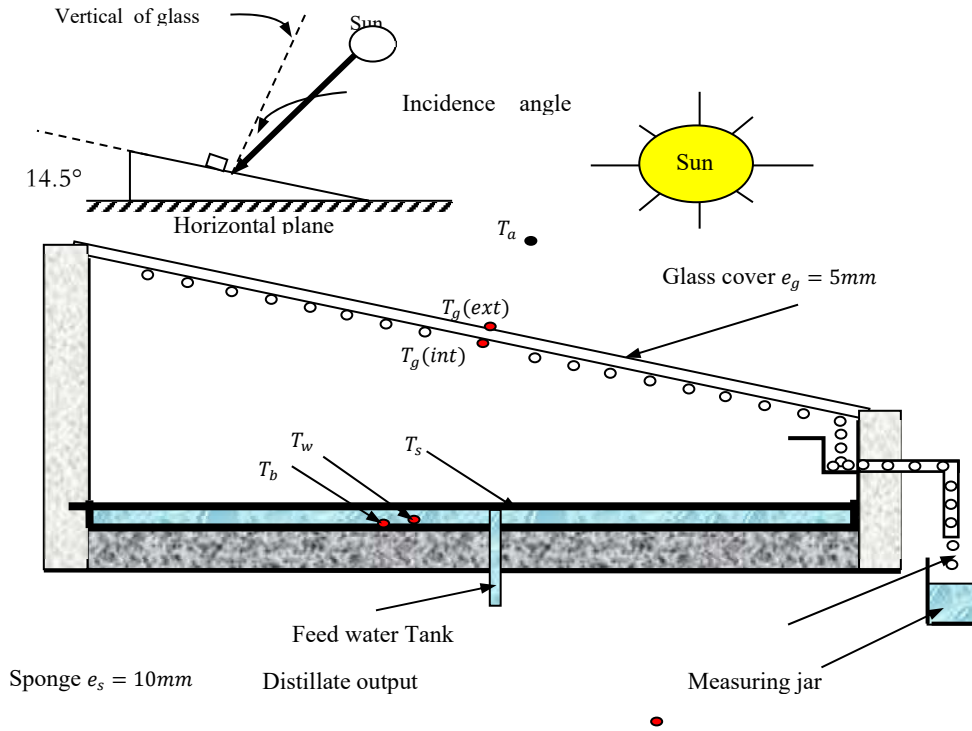
- الإشعاع الشمسي: كان في المجال، من 73 W/m^2 إلى 948 W/m^2 وقيمة الإشعاع هذه كافية لتسخين السطوح السوداء في النماذج الأولية للمقطرين.

- حركة الهواء: كانت حركة الهواء منعدمة تقريباً، من 0 m/s إلى $1,6 \text{ m/s}$ واختيار هذا الشرط للتقليل من تأثير الضياع في التدفقات الحرارية على مستوى الغطاء الزجاجي في كل من المقطرين.

- الضغط الجوي: كان الضغط الجوي أقل بقليل من 1 atm .

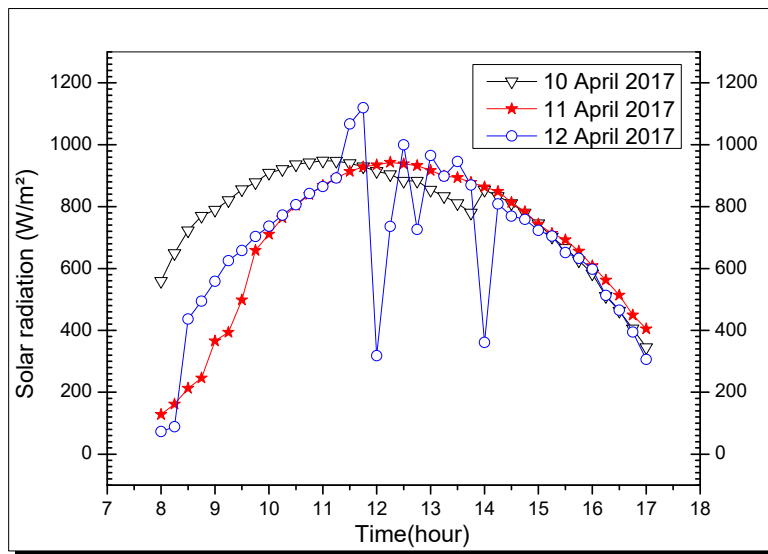
- الرطوبة الجوية: كان الجو جافاً، بحيث أن قيمة الرطوبة النسبية للهواء في المجال من 17% إلى 63%.

- درجة الحرارة الجوية: تتراوح قيمتها 15°C إلى 35°C .



الشكل (5-29): تركيب المقطر في التجربة الرابعة والمزدوجات الحرارية داخله (التجربة 4)

3-4-5) تغيرات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الرابعة: تم رسم منحنيات الإشعاع الشمسي الكلي والمباشر والمنتشر بدلالة الزمن. وفي الشكل (5-30) نلاحظ أن كل من الإشعاع الشمسي الكلي والمباشر والمنتشر يرتفع تدريجياً مع مرور الزمن إلى أن يبلغ الذروة خلال فترة الزوال (من الساعة 11:30 إلى 13)، ما عدا في اليوم 12 أبريل فقد كان الجو مغيم خلال هذه الفترة، ثم يبدأ بالتناقص تدريجياً خلال الفترة المسائية، وكان الإشعاع المنتشر يتجاوز قيمة 300W/m^2 خلال فترة الزوال وهذا ناتج من الغيوم في الجو التي تؤدي إلى زيادة انتشار الإشعاع في الجو.

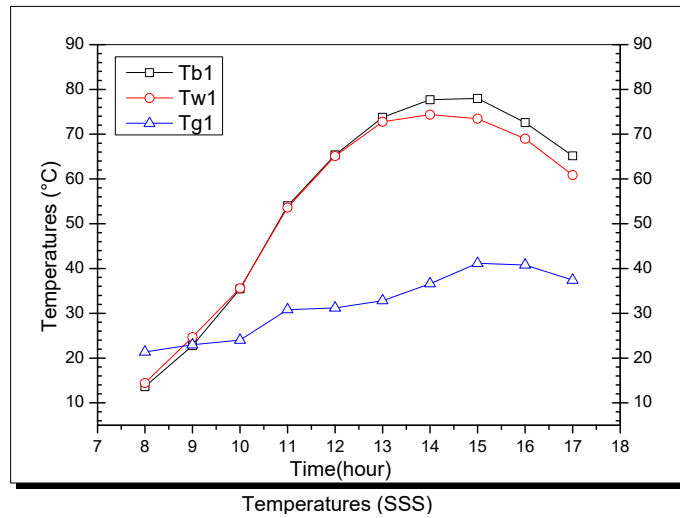


الشكل (5-30): تغيرات الإشعاع الشمسي (التجربة 4)

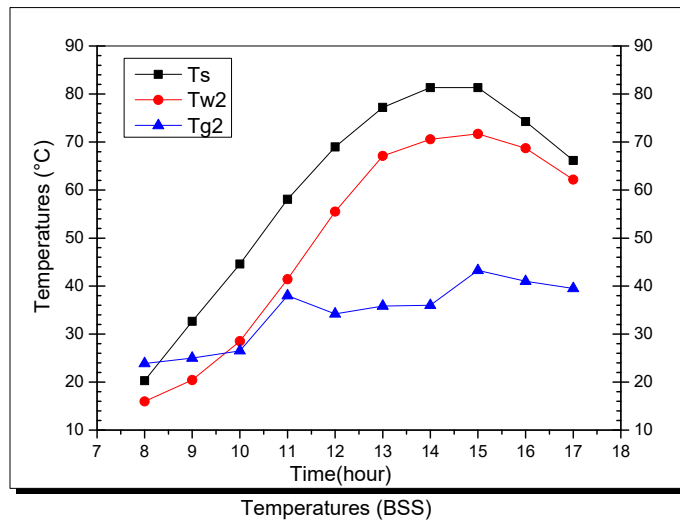
وبعد المقارنة بين النتائج التجريبية خلال أيام التجربة من حيث الإشعاع الشمسي والظروف الجوية السائدة وكمية الماء المقطر المنتجة كان يوم 11 أبريل الأحسن، لذلك سوف يعتمد في الدراسة على النتائج المأخوذة خلال هذا اليوم.

(4-4-5) مقارنة درجات الحرارة بين مقطرين شمسين بسيطين مختلفين في طبيعة السطح الأسود:

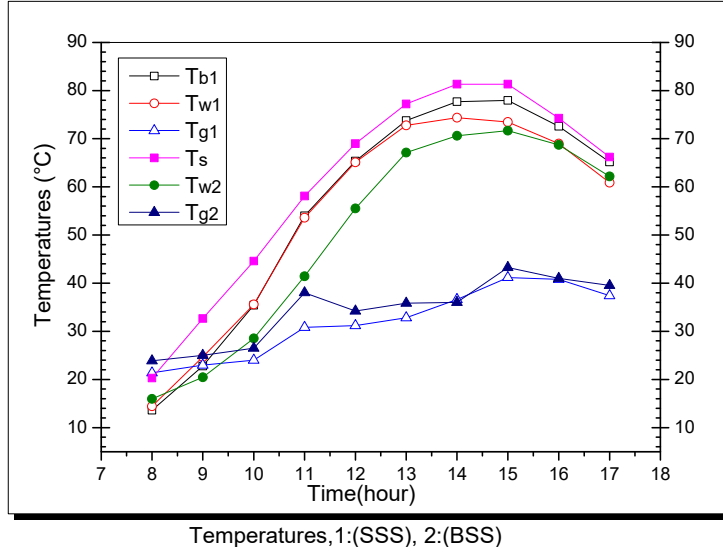
تتم المقارنة بين درجات الحرارة في ثلاث مستويات T_g ، T_w ، T_b في كل مقطر على حدى لمعرفة الترتيب و زمن الذروة، وهذا ما هو موضح في الشكلين (31-5) و (32-5)، ويمكن مقارنة درجات الحرارة في كلا المقطرين في مخطط واحد لمعرفة من هو المقطر الذي كان أسخن من الآخر، وهذه المقارنة موضحة في الشكل (33-5). وبالنسبة لمقارنة درجة حرارة مستوي محدد في المقطرين لا نلاحظ ظاهرة الانقلاب في درجة الحرارة، وهذا يدل على أن هذا التحسين له جدوى ويضيف قيمة لكفاءة الجهاز. عكس ما حدث في التجربة الثالثة الخاصة بالمقطر (DLG).



الشكل (31-5): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) (التجربة 4)



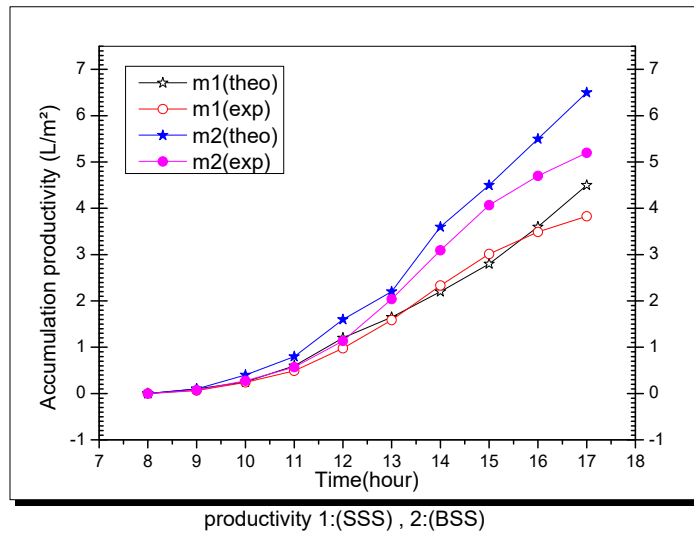
الشكل (32-5): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الثاني (BSS) (التجربة 4)



الشكل (5-33): تغيرات درجات الحرارة في المقطر الأول (SSS) والثاني (BSS) (التجربة 4)

تفسير المنحنيات: نلاحظ أن درجات الحرارة في كافة أجزاء المقطرات تكون متزايدة بدلالة الزمن لتبلغ الذروة على الساعة (14 تقريبا) ثم تنخفض مرة أخرى، وفي الشكل (5-31) بالنسبة للمقطر الشاهد (المقطر الأول) (SSS) نلاحظ تساوي درجات الحرارة بين السطح الأسود T_{b1} والماء T_{w1} ، والسبب في تساوي درجة حرارتهما يعود لسلك الماء الذي لا يتجاوز 1 سم، أما السطح الخارجي للزجاج يكون أبرد جزء نتيجة لتعرضه للهواء الخارجي، ودرجة حرارة الزجاج هي المتوسط بين الوجه الداخلي والخارجي وهي محسوبة مباشرة، أما المقطر الثاني (BSS) فنلاحظ أن الاختلاف في درجات الحرارة بينه وبين المقطر الأول يكون في درجة حرارة الماء والسطح الأسود حيث يلاحظ ارتفاعها في المقطر الثاني، وسبب هذا الارتفاع راجع لمساهمة الإسفنج في تخزين الحرارة، وهو موضح في الشكل (5-33).

5-4-5 مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا في مقطرين مختلفين في طبيعة السطح الأسود:



الشكل (5-34): تغيرات كمية الماء المجمعة تجريبيا والمحسوبة نظريا (التجربة 4)

تفسير المنحنيات: نلاحظ أن كمية الماء النظرية أكبر من التجريبية المجمعة في كل من المقطر 1 والمقطر 2 (المزود بالإسفنج)، وهذا ما يفسر أن النماذج النظرية هي نماذج مثالية. ويبقى أن المقطر 2 دائما أكبر إنتاجية للماء نظريا وتجريبيا. لذلك ينصح باستخدام هذا الإجراء وهو إضافة إسفنج أسود فوق سطح المبخر، لأن هذا الإجراء يزيد من الكفاءة الطاقوية للمقطر.

5-4-6) النتائج المستخلصة من التجربة الرابعة:

النتيجة 1: السبب في تساوي درجة حرارة الماء والسطح الأسود يعود لسماك الماء الذي لا يتجاوز 1 سم وبالتالي كلما زاد السمك الخاص بكمية ماء التغذية كان الفرق في درجة الحرارة أكبر وكانت الكفاءة أقل.

النتيجة 2: درجة حرارة الماء في المقطر 2 أكبر من درجة حرارة الماء في المقطر 1 بسبب مساهمة الإسفنج في تكديس وتخزين الحرارة. ولو كان هناك مادة لها سعة حرارية أكبر من الإسفنج لكنت النتائج أكبر.

النتيجة 3: درجة حرارة الوجه الخارجي مساوية تقريبا لدرجة حرارة الوجه الداخلي للزجاج، وتعطينا قيمة درجة حرارة الزجاج بحساب المتوسط بينهما، وكذلك نجد درجات الحرارة الداخلية في المقطر كبيرة مقارنة بدرجة حرارة الزجاج

$$T_g \ll T_b, T_w$$

النتيجة 4: كمية الماء المنتجة (حوالي 3 لتر في المقطر الأول و4.5 لتر في المقطر الثاني) وذلك راجع لوجود سطح صلب يتمثل في الإسفنج ويساعد هذا السطح في ظاهرة التبخير أحسن من وجود سطح حر للماء السائل. وزيادة على ذلك فإن عدم وجود الماء بشكل مباشر في المقطر 2 يجعل الإشعاع الشمسي لا يتعرض لانعكاس وامتصاص من طرف الماء، وبالتالي هناك امتصاص مباشر للأشعة من طرف الإسفنج وإعطائها للماء الذي هو أصلا في الإسفنج.

النتيجة 5: والزيادة في كمية الماء المنتج، أو الزيادة في الإنتاجية المقدمة والمحسوبة نظريا وتجريبيا هي كما يلي:

$$\frac{6.47 - 4.48}{4.48} = 0.4441 = 44.41 \% \text{ نظريا}$$

$$\frac{5.20 - 3.80}{3.80} = 0.3684 = 36.84 \% \text{ تجريبيا}$$

النتائج نظريا وتجريبيا متقاربة نسبيا رغم اختلاف الإنتاجية بينهما، ويمكن أن نستنتج من هذه الدراسة أن الإسفنج الأسود عند المبخر يعطي كمية محصورة في المجال 36% إلى 44% في المتوسط حسب ظروف التجربة في منطقة ورقلة.

(5-5) التجربة الخامسة: (تأثير سرعة الهواء الجو المحيط بالمقطر على كمية الماء المقطر)**(SSS- FOG) المقطر البسيط بميل واحد بوجود مروحة فوق الزجاج.**

المقطر الأول (SSS) Simple Solar Still: له ميل واحد وسُمْك الزجاج 5 مم، وله مبخر من الألمنيوم مطلي باللون الأسود.

المقطر الثاني (SSS- BSS) Simple Solar Still with a Fan Over Glass.

ونرمز له اختصاراً (FOG)، حيث أن له ميل واحد وسُمْك الزجاج 5 مم، الزجاج عليه مروحة لها سرعات مختلفة، وله مبخر من الألمنيوم مطلي بالأسود.

(1-5-5) وصف التجربة الخامسة:

تم القيام بتركيب مقطرين شمسيين الأول مقطر عادي والثاني به مروحة في أعلى الزجاج من أجل تبريده، وتم تركيب المزدوجات الحرارية كما هو موضح في الشكل (5-35)، وتمت التجربة على النموذجين على مدى 3 أيام كاملة (27، 28، 29 أبريل 2019 حيث في اليوم الأول والثاني سرعة المروحة كانت 3m/s وفي اليوم الثالث كانت 3.5m/s) للمقارنة بين المقطرين، والظروف الجوية التي سادت هذه الأيام ظروف مختلفة، وتم ضبط أجهزة القياس لقياس المتغيرات والثوابت المأخوذة بعين الاعتبار في التأثير المباشر وغير المباشر في كمية الماء المقطر والتدفقات الحرارية الداخلية والخارجية والضائعة بالنسبة لكل نموذج.

(2-5-5) الظروف الجوية الخاصة بالأيام الذي تمت فيه التجربة الخامسة:

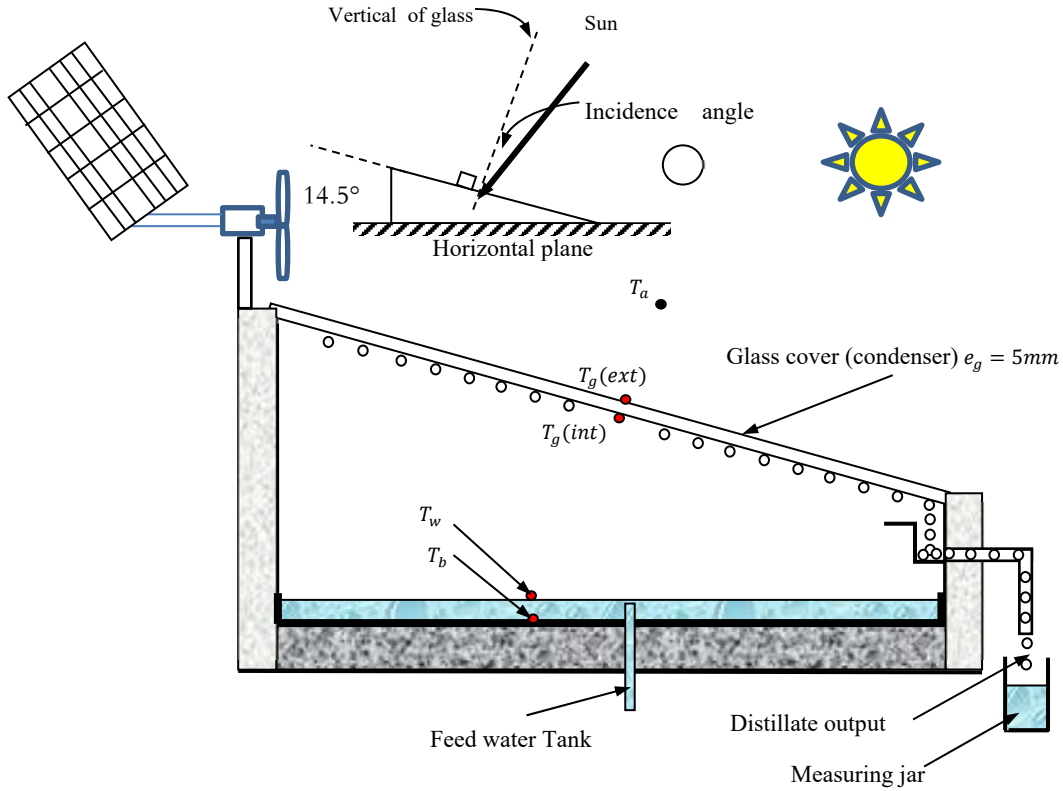
- الإشعاع الشمسي: كان في المجال من $117 W/m^2$ إلى $917 W/m^2$ وقيمة الإشعاع هذه كافية لتسخين السطوح السوداء في النماذج الأولية للمقطرين.

- حركة الهواء: كانت حركة الهواء منعدمة تقريباً $0 m/s$

- الضغط الجوي: كان الضغط الجوي أقل بقليل من $1 atm$.

- الرطوبة الجوية: كان الجو جافاً، بحيث أن قيمة الرطوبة النسبية للهواء في المجال من 14% إلى 48%.

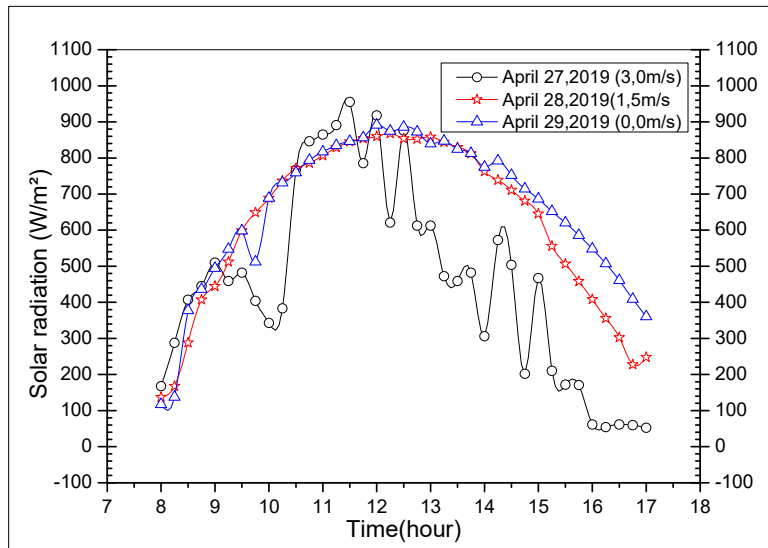
- درجة الحرارة الجوية: تتراوح قيمتها $20^{\circ}C$ إلى $41^{\circ}C$.



الشكل (5-35): تركيب المقطر والمزدوجات الحرارية داخله في المقطر (FOG) (التجربة 5)

3-5-5 منحنيات الإشعاع الشمسي خلال أيام التجربة الخامسة:

تم رسم منحنيات الإشعاع الشمسي الكلي بدلالة الزمن.

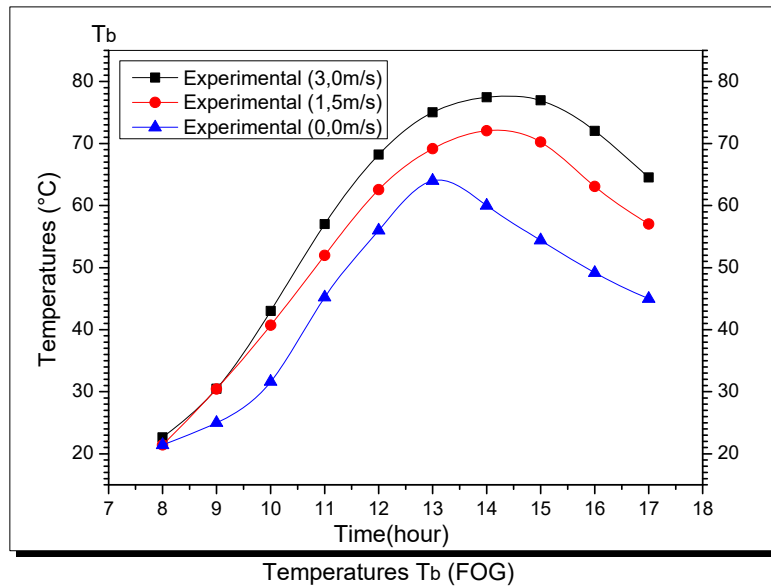


الشكل (5-36): تغيرات الإشعاع الشمسي مع تغيير سرعة الهواء (التجربة 5)

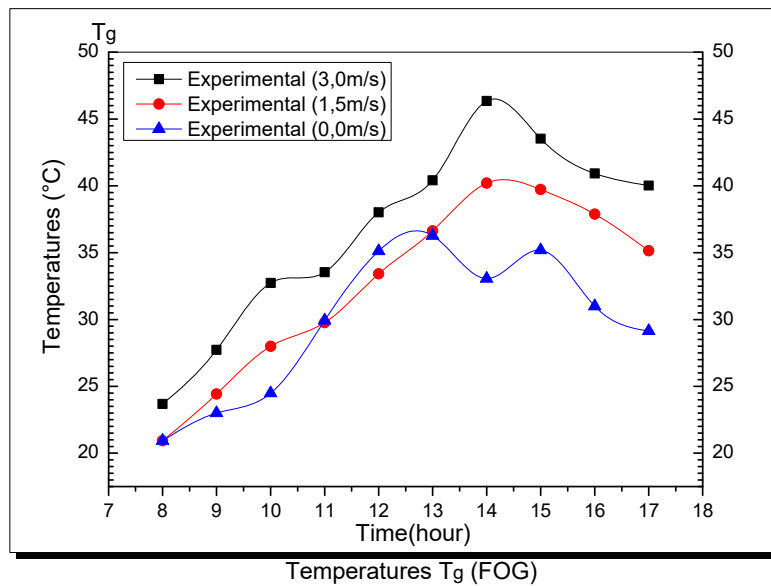
تفسير المنحنيات: نلاحظ أن كل من الإشعاع الشمسي الكلي للأيام الثلاثة يرتفع تدريجياً مع مرور الزمن إلى أن يبلغ الذروة خلال فترة الزوال (من الساعة 11:30 إلى 13)، ما عدا في اليوم 27 أبريل فقد كان الجو مغيماً خلال هذه الفترة، ثم يبدأ بالتناقص تدريجياً خلال الفترة المسائية. وتم تغيير سرعة الهواء كما يلي:
 اليوم الأول (27 أبريل 2019): سرعة الهواء 3 م/ثانية. اليوم الثاني (28 أبريل 2019): سرعة الهواء 1,5 م/ثانية.
 اليوم الثالث (29 أبريل 2019): سرعة الهواء 0 م/ثانية.

5-5-4 مقارنة درجات الحرارة بين الماء والزجاج في السرعات المختلفة:

يتم حساب درجات الحرارة في كلا المقطرين وتدوينها، ورسم تغيراتها بالنسبة للزمن من الساعة 8 صباحاً إلى 17 مساءً.



الشكل (5-37): مقارنة درجات الحرارة للماء بين مختلف السرعات (التجربة 5)

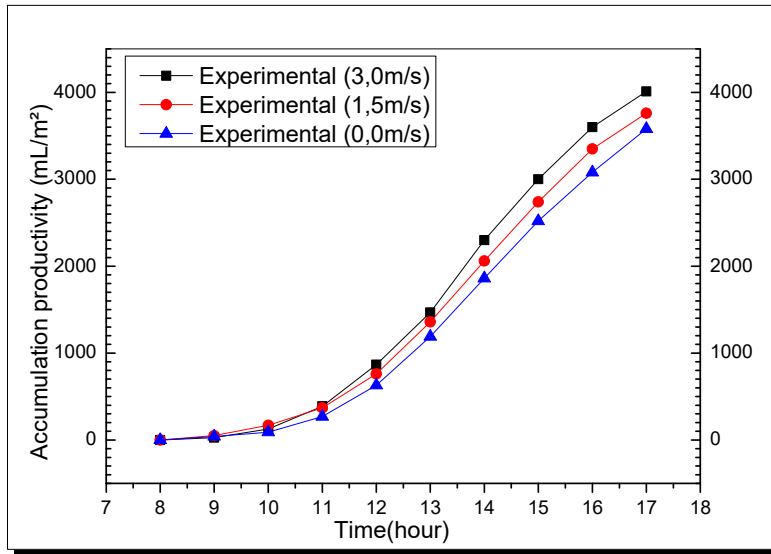


الشكل (5-38): مقارنة درجات الحرارة للزجاج بين مختلف السرعات (التجربة 5)

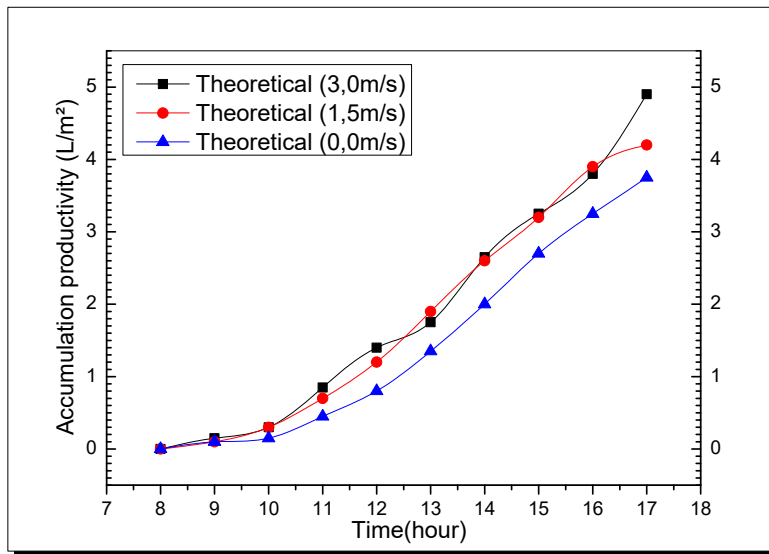
تفسير المنحنيات: نلاحظ أن درجات الحرارة الخاصة بكل من الزجاج والماء تكون متزايدة بدلالة الزمن، ثم تتناقص هذه الحرارة تكون مرتفعة عندما تكون سرعة الهواء (0م/ثا)، أقل منها عندما تكون سرعة الهواء (1.5م/ثا)، أقل منها عندما تكون سرعة الهواء (3م/ثا). وهذا ما يفسر بتبريد المكثف بالمروحة وكلما زادت سرعتها يزيد تبريد المكثف، والذي يؤثر بدوره على المبخر فيبرد الماء لكن هذا لا يؤثر كثيرا على الفرق في درجة الحرارة داخل المقطر.

5-5-5) تأثير سرعة الهواء الجوي على كمية الماء المقطر المجمعة:

يتم حساب كمية الماء المقطر المجمعة والناجمة في كلا المقطرين وتدوينها، ورسم تغيراتها بالنسبة للزمن من الساعة 8 صباحا إلى 17 مساء.



الشكل (5-39): تأثير سرعة الهواء على كمية الماء المقطر تجريبيا لمختلف السرعات (التجربة 5)



الشكل (5-40): تأثير سرعة الهواء على كمية الماء المقطر نظريا لمختلف السرعات (التجربة 5)

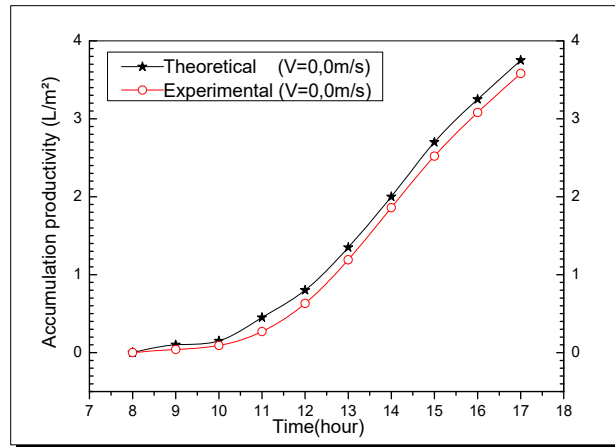
تفسير المنحنيات: في الشكل (5-38) وبعد المقارنة بين النتائج التجريبية خلال أيام التجربة من حيث الإشعاع الشمسي والظروف الجوية السائدة وكمية الماء المقطر المنتجة كانت السرعة 3م/ثا أكبر من اليوم الذي كانت به السرعة 1,5م/ثا، وعند مقارنة سرعتين 1,5م/ثا مع السرعة المنعدمة كانت السرعة الأكبر تعطي كمية أكبر.

ونلخص مما سبق أن كمية الماء المجمعة في مختلف السرعات تزداد بدلالة الزمن، وكلما كانت السرعة أكبر كانت الإنتاجية أكبر وهذا ما يفسر على أن السرعات الكبيرة للهواء الجوي تعمل على تبريد الزجاج فيزداد الفرق في درجة الحرارة بين الزجاج (T_g) و الماء (T_w) وبالتالي تكون الإنتاجية كبيرة.

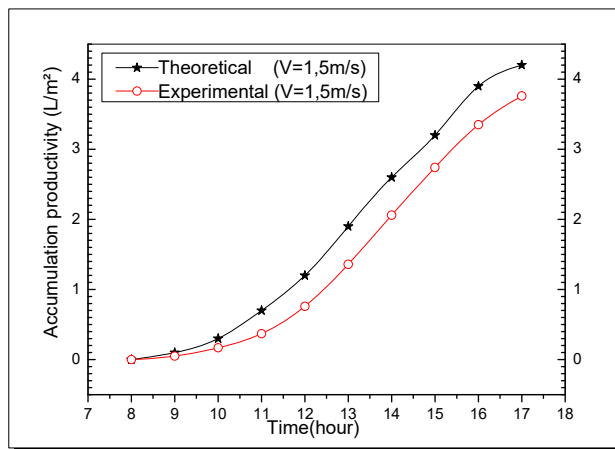
أما الشكل (5-39) والذي يعطي تأثير سرعة الهواء على كمية الماء المقطر المجمعة نظريا لمختلف السرعات فنلاحظ أن النتائج النظرية تتفق مع التجريبية في سرعتين 0,0م/ثا و 1,5م/ثا و تحتل النتائج بالنسبة للسرعة 3,0م/ثا، وذلك راجع لتذبذب الاشعاع الشمسي في اليوم الذي تمت فيه السرعة 3,0م/ثا كما هو موضح في الشكل (5-35)

5-5-6) مقارنة كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا عند سرعات مختلفة للهواء:

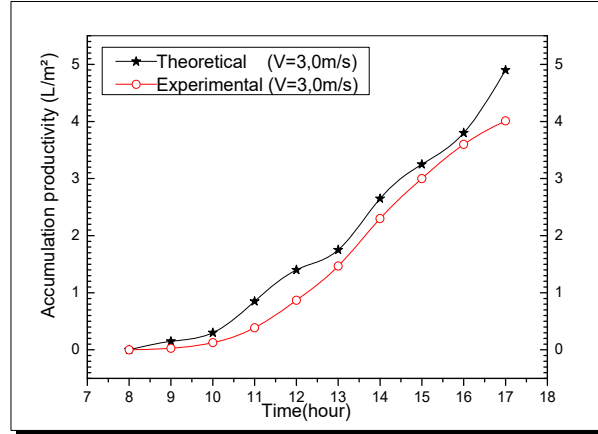
يتم حساب كمية الماء المقطر المجمعة و حساب الكمية نظريا، ومقارنة ما هو نظري بما هو تجريبي عند كل سرعة هواء.



الشكل (4-41): تغيرات كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا، السرعة 0,0م/ثا (التجربة 5)



الشكل (4-42): تغيرات كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا، السرعة 1,5م/ثا (التجربة 5)



الشكل (4-43): تغيرات كمية الماء المجمعة نظريا وتجريبيا، السرعة 3.0م/ثا (التجربة 5)

تفسير المنحنيات: نلاحظ أن كمية الماء النظرية أكبر من التجريبية المجمعة من أجل السرعات المختلفة، وهذا ما يفسر أن النماذج النظرية هي نماذج مثالية. ونلاحظ أنه كلما زادت السرعة زادت إنتاجية الماء نظريا وتجريبيا.

5-5-7) النتائج المستخلصة من التجربة الخامسة:

النتيجة 1: من تفسير المنحني الخاص بالمقارنة بين كمية الماء المقطر بدلالة سرعة الهواء نستنتج أنها كلما زادت سرعة الهواء زادت كمية الماء المقطر المجمعة.

النتيجة 2: يمكن استخدام جسم بارد متصل بالمكثف لسحب حرارة منه وزيادة إنتاجية الماء المقطر.

النتيجة 3: والزيادة في كمية الماء المنتج، أو الزيادة في الإنتاجية المقدمة والمحسوبة نظريا وتجريبيا هي كما يلي:

الزيادة في الإنتاجية بين	الزيادة المحسوبة نظريا	الزيادة المحسوبة تجريبيا	مجال الزيادة في الانتاج
$0.0 \text{ m/s} \rightarrow 1.5 \text{ m/s}$	$\frac{4.20 - 3.70}{3.70} = 13.51 \%$	$\frac{3.70 - 3.50}{3.50} = 05.71 \%$	من 05.71 % إلى 13.51 %
$0.0 \text{ m/s} \rightarrow 3.0 \text{ m/s}$	$\frac{4.88 - 3.70}{3.70} = 31.89 \%$	$\frac{4.00 - 3.50}{3.50} = 14.28 \%$	من 05.71 % إلى 31.89 %
$1.5 \text{ m/s} \rightarrow 3.0 \text{ m/s}$	$\frac{4.88 - 4.20}{4.20} = 16.19 \%$	$\frac{4.00 - 3.70}{3.70} = 08.10 \%$	من 08.10 % إلى 16.19 %

6) دراسة المردود الطاقوي الخاص بالتجارب:

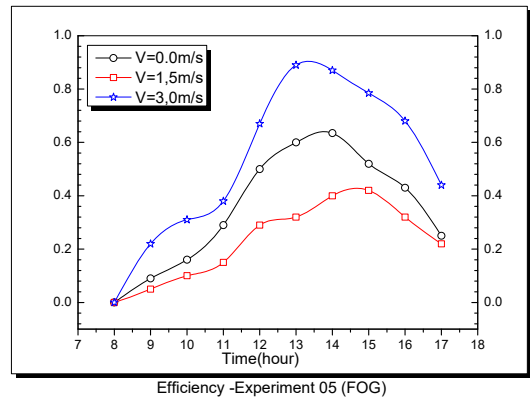
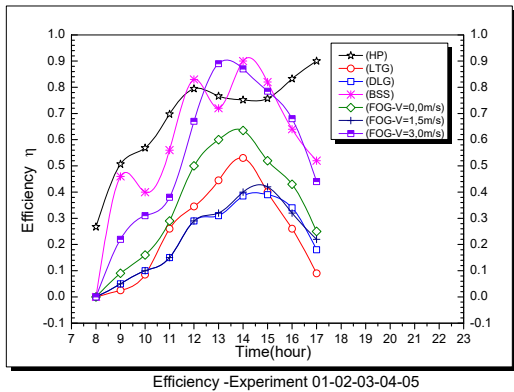
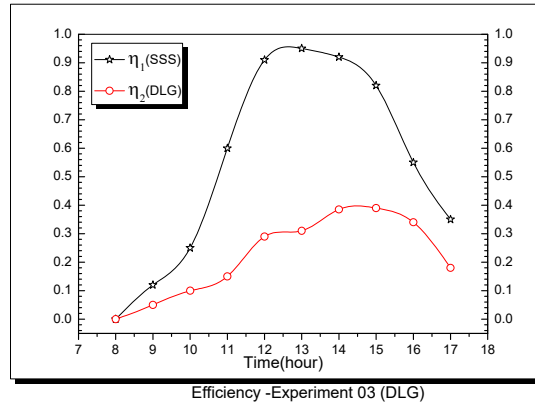
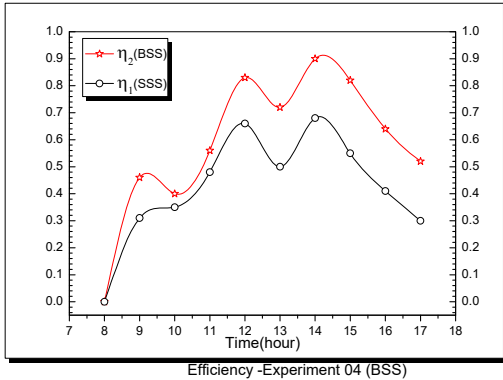
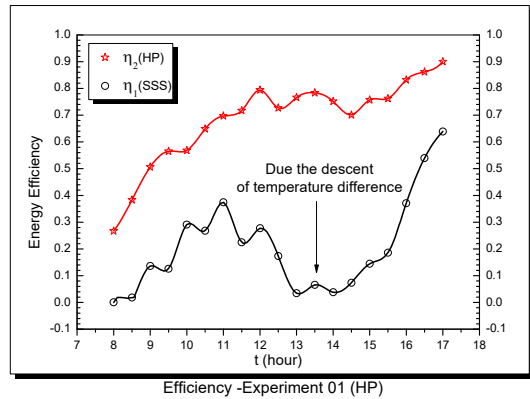
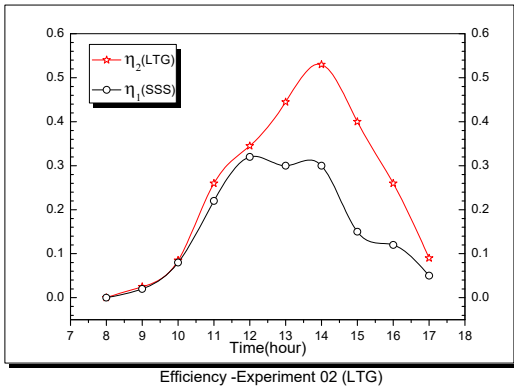
1-6) تعريف: يعتبر المردود الطاقوي مقدار فيزيائي لا بعدي (بدون وحدة) يعطي للدارس فكرة على كفاءة أي جهاز يعمل بالطاقة، حيث هو عبارة عن حاصل قسمة الطاقة المنتجة على الطاقة المستهلكة من طرف الجهاز. ولدينا المقطر الشمسي يستهلك طاقة إشعاعية من الشمس متمثلة في الإشعاع الشمسي الكلي G_T الوارد للجهاز في كل لحظة، والمقطر ينتج طاقة حرارية على شكل تبخير Q_{ev} لها علاقة بكمية البخار المنتج التي بدورها تساوي كمية الماء المقطر عند المكثف. ومنه المردود الطاقوي يعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta_{th} = \frac{\text{الطاقة المنتجة}}{\text{الطاقة المستهلكة}} = \frac{Q_{ev}}{G_T} = \frac{\dot{m} \cdot H_w}{G_T} = \frac{\left(\frac{m}{3600}\right) \cdot H_w}{G_T} \quad (1.4)$$

حيث: m هي كمية الماء المنتجة كل ساعة، وللحصول على التدفق الكتلي للماء \dot{m} نقسم الكتلة m على عدد الثواني في كل ساعة أي نقسم على 3600. ونحصل في الأخير على \dot{m} الذي يمثل كمية الماء المقطر المنتج تجريبيا كل ثانية لكل متر مربع من حوض التقطير.

(2-6) طريقة العمل: في كل تجربة من التجارب الخمس يحسب المردود الطاقوي اللحظي على مدى تسع ساعات، ويقارن مردود المقطر 1 بدون تحسين بمردود المقطر 2 بوجود تحسين، ومنه يأخذ مقدار الإشعاع الكلي G_T التجريبي كل لحظة (كل ساعة)، ويتم حساب المقدار Q_{ev} انطلاقا من العلاقة $\left(\frac{m}{3600}\right) \cdot H_w$ ، حيث H_w هي الحرارة الكامنة للتبخير والمأخوذة عند درجة الحرارة المتوسطة بين T_g و T_w المعطاة تجريبيا.

(3-6) منحنيات المردود الطاقوي:



الشكل (4-44) : مقارنة المردود الطاقوي في التجارب الخمسة

تفسير المنحنيات والنتائج المستخلصة: نلاحظ أن المردود الطاقوي يختلف من مقطر إلى آخر حسب ظروف التجربة، لكن قيمة المردود الطاقوي تبقى متأثرة أكثر بشكل ونوعية المقطر والتحسين المضاف إليه، ويتميز المردود الطاقوي بما يلي:

1. قيمته محصورة بين 0 و 1، وهذا ناتج من كون أن المقطرات الشمسية يوجد فيها ضياع للطاقة.
2. تبدأ قيمة المردود الطاقوي من 0 وتصل إلى الذروة عند الساعة 13:00 وتتناقص للوصول إلى قيمة دنيا عند المساء (من 0.1 إلى غاية 0.5).
3. النتائج الخاصة بأعظم قيمة للمردود الطاقوي لكل تجربة مدونة في الجدول التالي:

الجدول (5-3) : النتائج الخاصة بأعظم قيمة للمردود الطاقوي

القيمة العظمى للإشعاع الشمسي $G_t \left(\frac{W}{m^2} \right)$	القيمة العظمى للمردود η_{max}	لحظة الذروة	التجربة ونوعية المقطر الشمسي المستعمل
950.0000	0.90	17:00	التجربة 1 المقطر 1 : بدون مضخة حرارية
	0.60	17:00	(HP) المقطر 2 : بوجود مضخة حرارية
959.4107	0.55	14:00	التجربة 2 المقطر 1 : سُمْك 4 مم
	0.32	14:00	(LTG) المقطر 2 : سُمْك 5 مم
998.0355	0.97	13:00	التجربة 3 المقطر 1 : أحادي الزجاج
	0.52	16:00	(DLG) المقطر 2 : ثنائي الزجاج
928.5990	0.90	14:00	التجربة 4 المقطر 1 : بدون إسفننج
	0.60	14:00	(BSS) المقطر 2 : بوجود إسفننج
858.3636	0.60	14:00	التجربة 5 المقطر 1 : سرعة الهواء $0.0 m/s$
	0.50	15:00	(FOG) المقطر 2 : سرعة الهواء $1.5 m/s$
	0.80	13:30	المقطر 3 : سرعة الهواء $3.0 m/s$

الخاتمة العامة

النتائج:

هذه الدراسة تركز في الأساس على تحسين مردود الإنتاجية اليومية من الماء المقطر للمقطر الشمسي البسيط ذي الميل الواحد والمقارنة بين مقطرين من نفس النوع الأول (شاهد) والثاني (مُحسَّن). وعلى ضوء النتائج المتحصل عليها من خلال التجارب في الفصل الخامس وربطها بالفرضيات والمعادلات في الفصل الرابع، يمكننا أن نستخلص عدة نتائج تكون في المستقبل مرجعا مُهماً لدراسات المستقبلية، كما يبيِّنُ هذه الدراسة سلبيات في بعض النماذج، والتي ستندرج لها توصيات مستقبلية في آخر المطاف.

التجربة الأولى (Simple Solar Still with Heat Pump–SSS–HP):

النتيجة 1: كان متوسط العائد اليومي للمقطر الشمسي البسيطة حوالي 2.75 لتر / م² في اليوم. وتم تحسين هذه الكمية باستخدام جهاز التقطير الشمسي البسيط المزود بمضخة حرارية لتصل إلى 9.60 لتر / م² في اليوم. تقدر إنتاجية المياه بحوالي 2.5 مرة أعلى من آلة التقطير التقليدية البسيطة. حسب القيم والتفاصيل التالية:

$$\frac{15,28 - 4,31}{4,31} = 2.5452 = 254.52 \% \text{ نظريا}$$

$$\frac{9,60 - 2,75}{2,75} = 2.4909 = 249.09 \% \text{ تجريبيا}$$

تم استخدام مبخر المضخة الحرارية كمكثف لعملية التقطير، حيث زادت إنتاجية المياه. ومنه لزيادة إنتاجية أي مقطر يمكن وضع مبخر المضخة الحرارية خلف خلية التقطير وعدم تعريضه مباشرة للشمس.

النتيجة 2: بسبب مبخر المضخة الحرارية، والذي لا يؤثر على عمل مبخر المقطر (بطانة الحوض)، كانت كمية المياه المنتجة أكبر من جهاز التقطير الشمسي الشاهد. ومنه يجب تشغيل المضخة الحرارية بعد ساعتين من بدء التقطير، حتى لا تعيق عمل البخار المتكثف في الغطاء الزجاجي.

النتيجة 3: أن مستويات درجة الحرارة من النوع (SSS) أكبر في القيم من النوع (HP)، والفرق بينهما هو حوالي 10 درجة مئوية، بسبب وجود مبخر المضخة الحرارية. وهذا يؤكد أن إنتاجية المياه لا علاقة لها بارتفاع درجات الحرارة. والسبب الرئيسي لرفع الإنتاجية هو الفرق بين الماء ومبخر المضخة الحرارية يصل إلى 30 درجة مئوية، وهذا يسبب زيادة في إنتاجية المياه في المقطر (HP).

النتيجة 4: يكون المقطر (HP) دائماً أكبر قيمة في الإنتاجية من المقطر (SSS)، ومتوسط الزيادة في الكفاءة الطاقوية بفضل وجود مضخة حرارية في المقطر (HP) وكانت قيمتها هي: 71,6%، واستنتج أن تغيرات كفاءة المقطر (SSS) غير مستقرة، بسبب تقلبات درجات الحرارة. أما المقطر (HP) فكفاءته متزايدة ورتيبة في التزايد حتى الوصول للقيمة 90%.

النتيجة 5: كانت طرق نقل الحرارة والتدفق في مكثف المضخة الحرارية متباينة في القيم. والتحليل النظري أكد أن أكبر قيمة لنقل الحرارة بالتبخير، يليه الإشعاع ثم الحمل الحراري. وكان رقم رايلي للحمل الحراري الطبيعي على مبخر المضخة الحرارية رقائقي.

النتيجة 6: أن Nusselt للحمل الحراري ثابت مع الزمن، و له قيمة ثابتة تساوي تقريباً $1,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ، لكن قيم Nusselt للتبخير $h_{e,w \rightarrow f}$ في البداية تقارب $7,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ثم تتناقص لتصل قيمة ثابتة تقريباً $4,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ عن الساعة 11:00، ثم تزداد حتى تقارب إلى $4,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ في نهاية التشغيل، ويرجع ذلك لتشكيل شريط رقائقي متكاثف و يستمر هذا الشريط في التشكل ويعزل نقل الحرارة بالتبخير.

النتيجة 7: بسبب وجود طبقة رقائية من الماء المكثف، تم تقليل الانتقال الحراري بين الماء والغطاء الزجاجي في منتصف النهار. حيث يمكن تكثيف البخار كقطرات على المكثفين الزجاجي والتابع للمضخة الحرارية.

النتيجة 8: على الرغم من أن التقطير الشمسي قد تم التحقيق فيه على نطاق واسع من قبل من عدة باحثين؛ على حد علمنا، لا يوجد عمل منشور يدرس مكثف مدمج متصل ومبرد بواسطة مضخة حرارية. لذلك، يجب إجراء المزيد من الأبحاث حول هذا الموضوع في المستقبل. وبالمثل، فإن المقطر الشمسي المدعم بمضخة حرارية هو حل ممكن لزيادة كمية الماء المنتج.

النتيجة 9: رغم التكلفة المالية لإنشاء مقطر شمسي مدعم بمضخة حرارية المرتفعة بالمقارنة بتحسينات أخرى، لكن يمكن اعتماد هذا التحسين في إنتاج الماء المقطر النقي الموجه للمخابر، ويرجع هذا الاختيار كذلك لنقاوة الماء المنتج. ومنه يمكن الاستغناء عن شراء الماء المقطر والاعتماد على جهاز دائم الإنتاجية بوجود إشعاع شمسي مرتفع في شدته على مدار السنة بمنطقة ورقلة وما شابهها من مناطق صحراوية جافة وشبه جافة.

النتيجة 10: بعد الحسابات النظرية الخاصة برقم Nusselt للحمل الحراري $h_{c,w \rightarrow f}$ على أنبوب أسطواني أفقي، تبين أن القيمة المتوسطة لـ Nusselt الرقائقي يساوي 1.382289 وهي أكبر من القيمة المتوسطة لرقم Nusselt المضطرب التي تساوي 0.000325، وهذا يؤكد أن نوع التدفق هو رقائقي.

التجربة الثانية (Simple Solar Still with Less Thickness in Glass-SSS-LTG):

النتيجة 11: كل ما قل سُمك الغطاء الزجاجي كان مرور الاشعاع الشمسي له قيمة أكبر وكانت إنتاجية الماء المقطر أكبر. وحسب ما تم في التجربة فإن الزجاج ذو السمك $e_{g(2)} = 4mm$ له إمرارية أكبر للإشعاع الشمسي من الزجاج ذو السمك $e_{g(1)} = 5mm$.

النتيجة 12: بالنسبة للمقطر الزجاجي ذو السمك الأكبر في القيمة؛ تكون إنتاجيته للماء المقطر أكبر في الفترة المسائية ومن هنا نستخلص أن هذا المقطر خزن حرارة في هذه الفترة، وهذا ناتج من العزل الحراري بسبب الغطاء ذو السمك الأكبر. وكانت النتائج حسب هذه التجربة هي:

عند استعمال الزجاج ذو السمك 4 مم كانت إنتاجية الماء المقطر تساوي $\dot{m} = 2.50 \text{ L/m}^2/\text{day}$

عند استعمال الزجاج ذو السمك 5 مم كانت إنتاجية الماء المقطر تساوي $\dot{m} = 1.80 \text{ L/m}^2/\text{day}$

النتيجة 13: استعمال الزجاج ذو السمك الأكبر يقلل من احتمالية حدوث كسور للزجاج خاصة عند درجات الحرارة المرتفعة وهذا ما دفع لاستعماله في معظم التجارب التجربة.

النتيجة 14: الفروق القصوى في درجة بين الماء والزجاج كانت كما يلي: المقطر (SSS): الفرق $19,3^\circ\text{C}$ مع كمية ماء منتجة $1,8 \text{ L/m}^2$ ، والمقطر (LTG): الفرق $24,9^\circ\text{C}$ مع كمية ماء منتجة $2,5 \text{ L/m}^2$. يعني كل ما زاد الفرق في درجة الحرارة زادت كمية الماء (الإنتاجية).

النتيجة 15: الزيادة في كمية الماء المنتج، أو الزيادة في الإنتاجية المقدمة والمحسوبة نظريا وتجريبيا هي كما يلي:

$$\frac{4.09 - 2.90}{2.90} = 0.4103 = 41.03 \% \text{ نظريا}$$

$$\frac{2.50 - 1.78}{1.78} = 0.4044 = 40.44 \% \text{ تجريبيا}$$

التجربة الثالثة (Simple Solar Still with Double Layer of Glass- SSS-DLG):

النتيجة 16: درجات الحرارة في كافة أجزاء المقطر تكون متزايدة بدلالة الزمن لتبلغ الذروة (73°C) عند الزوال (13:30) بالنسبة للمقطر الأول وحوالي الساعة 14:30 المقطر الثاني) ثم تنخفض مرة أخرى إلى قيمة متوسطة تساوي (56°C) عند نهاية التجربة على الساعة 17:00 مساء.

النتيجة 17: عند مقارنة درجات الحرارة في المقطرين نجد أن درجات الحرارة في مختلف أجزاء المقطر الأول (أحادي الزجاج) تكون مرتفعة عن درجة حرارة أجزاء المقطر الثاني (مزدوج الزجاج) إلى غاية الزوال (من الساعة 13:30-14:30) ليصبح العكس درجة حرارة أجزاء المقطر الثاني أكبر وهذا يفسر بأن المقطر الثاني يخزن حرارة أكثر من المقطر الأول، حيث ان درجات الحرارة للسطح الأسود والماء في المقطر الأول عند نهاية التقطير كانت تقارب 60°C ، أما المقطر الثاني كانت تقارب 45°C .

النتيجة 18: عند مقارنة تغيرات درجات حرارة السطح الأسود في المقطرين نجد أن التغير بالنسبة للزمن لدرجات الحرارة له نفس الهيئة لكن هناك اختلاف في ترتيب القيم، حيث نسمي الفترة الصباحية (من 8:00 إلى 13:00)، والفترة المسائية (من 13:00 إلى 17:00)، والزمن 13:00 هو لحظة الانقلاب في ترتيب درجات الحرارة. ومن هذا المنطلق يمكن البحث عن لحظة الانقلاب لدرجات الحرارة الأخرى، فنجد ما يلي: بالنسبة للماء المالح فلحظة الانقلاب كانت 13:30، وأخيرا السطح الداخلي للزجاج لحظة الانقلاب هي اللحظة 12:20.

لحظة الانقلاب للزجاج (12:20) ثم لحظة الانقلاب للسطح الأسود (13:00) ثم لحظة الانقلاب للماء (13:30).

النتيجة 19: وهي نتيجة واحدة ومهمة، وتنص على ما يلي: إن استعمال زجاجتين بينهما ماء محجوز كان بهدف تبريد المكثف، لكن هذا الإجراء كان له دور تخزين الطاقة داخل المقطر وتسخين المبخر، وكان أثره على المكثف سلبي حيث زادت درجته جراء التخزين الكبير للحرارة، وإنتاجية الماء المقطر كانت أقل، وهذا ما يدفع بنا للقول إن هذا الإجراء لا يجدي نفعا ولا يعتبر تحسین، لذلك ينصح بعدم تجربته في الدراسات المستقبلية.

التجربة الرابعة (Simple Solar Still with a Black Surface of Sponge- SSS-BSS):

النتيجة 20: درجات الحرارة في كافة أجزاء المقطرات تكون متزايدة بدلالة الزمن لتبلغ الذروة على الساعة (14:00) تقريبا) والقيم تتراوح كما يلي: للمبخر كانت 78°C و 84°C بالنسبة للشاهد والمحسن على الترتيب ، وللمكثف كانت 40°C و 44°C بالنسبة للشاهد والمحسن على الترتيب، ثم تنخفض هذه القيم مرة أخرى، أما بالنسبة للمقطر الشاهد (المقطر الأول) (SSS) نلاحظ تساوي درجات الحرارة بين السطح الأسود T_{b1} والماء T_{w1} ، والسبب في تساوي درجة حرارتهما يعود لسماك الماء الذي لا يتجاوز 1 سم. وبالتالي كلما زاد السُمك الخاص بكمية ماء التغذية كان الفرق في درجة الحرارة أكبر وكانت الكفاءة أقل. ومن الممكن اجراء مجموعة من التجارب على سُمك مختلف والبحث عن القيمة المثلى للسُمك.

النتيجة 21: درجة حرارة الماء في المقطر المزود بالإسفننج أكبر من التي في المقطر الشاهد كما تم الإشارة إليه في النتيجة السابقة، وذلك بسبب مساهمة الإسفننج في تكديس وتخزين الحرارة. ولو كان هناك مادة لها سعة حرارية أكبر من الإسفننج لكانت النتائج أحسن وأكبر في الإنتاجية. وهذا يدعو الى البحث في هذا المجال أكثر للوصول لمواد ذات وسط مسامي ولها تكلفة أقل وغير ملوثة للمياه المنتجة.

النتيجة 22: كمية الماء المنتجة من المقطر المزود بالإسفننج أكبر من التي في المقطر الشاهد (حوالي 3 لتر في المقطر الشاهد و4.5 لتر في المقطر المدعم بتحسين)، وذلك راجع لوجود سطح صلب يتمثل في الإسفننج ويساعد هذا السطح في ظاهرة التبخير أحسن من وجود سطح حر للماء السائل. وزيادة على ذلك فإن عدم وجود الماء بشكل مباشر في المزود بالإسفننج يجعل الإشعاع الشمسي لا يتعرض لانعكاس وامتصاص من طرف الماء، وبالتالي هناك امتصاص مباشر للأشعة من طرف الإسفننج وإعطائها للماء الذي هو أصلا في الإسفننج.

النتيجة 23: الزيادة في كمية الماء المنتج، أو الزيادة في الإنتاجية المقدمة والمحسوبة نظريا وتجريبيا هي كما يلي:

$$\frac{6.47 - 4.48}{4.48} = 0.4441 = 44.41 \% \text{ نظريا}$$

$$\frac{5.20 - 3.80}{3.80} = 0.3684 = 36.84 \% \text{ تجريبيا}$$

التجربة الخامسة (Simple Solar Still with a Fan Over Glass- SSS-FOG):

النتيجة 24: من التجارب التابعة لهذا المقطر وتغيير سرعة الهواء كانت درجات حرارة المبخّر والمكثف كما يلي:

سرعة الهواء	T_b (لحظة الذروة)	T_g (لحظة الذروة)	الإنتاجية اليومية لكل متر مربع
0.0 m/s	64°C (13:00)	36°C (12:30)	3.56 L/m ² /day
1.5 m/s	71°C (14:00)	40°C (14:00)	3.70 L/m ² /day
3.0 m/s	77°C (14:00)	46°C (14:00)	4.00 L/m ² /day

النتيجة 25: من التجارب الميدانية التي اعتمدت على تغيير سرعة الهواء بجوار الغطاء الزجاجي، نستنتج أنه كلما زادت سرعة الهواء زادت كمية الماء المقطر المنتجة.

النتيجة 26: الزيادة في كمية الماء المنتج، أو الزيادة في الإنتاجية المقدمة والمحسوبة نظريا وتجريبيا هي كما يلي:

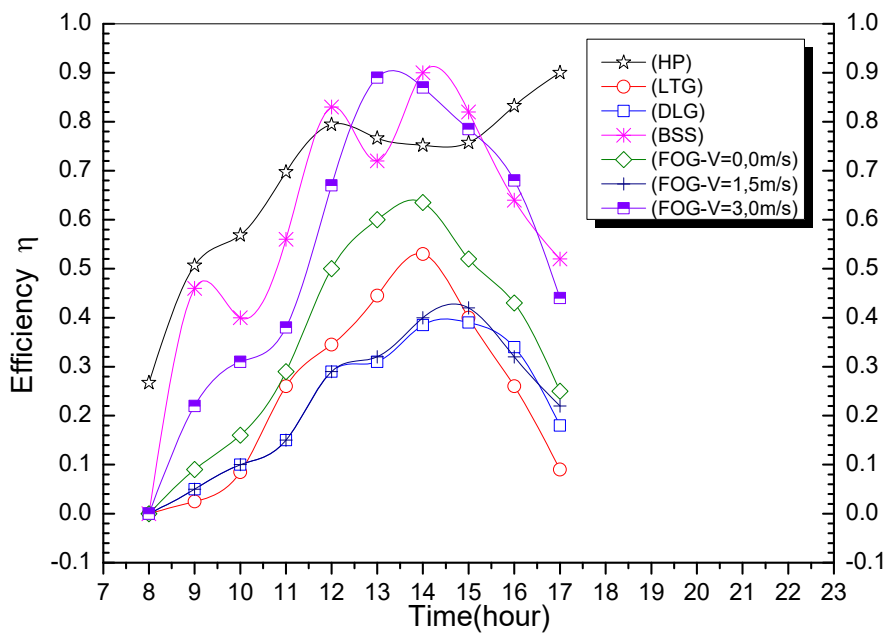
مجال الزيادة في الانتاج	الزيادة المحسوبة تجريبيا	الزيادة المحسوبة نظريا	الزيادة في الإنتاجية بين
من 05.71 % إلى 13.51 %	$\frac{3.70 - 3.50}{3.50} = 05.71 \%$	$\frac{4.20 - 3.70}{3.70} = 13.51 \%$	0.0 m/s → 1.5m/s
من 05.71 % إلى 31.89 %	$\frac{4.00 - 3.50}{3.50} = 14.28 \%$	$\frac{4.88 - 3.70}{3.70} = 31.89 \%$	0.0 m/s → 3.0m/s
من 08.10 % إلى 16.19 %	$\frac{4.00 - 3.70}{3.70} = 08.10 \%$	$\frac{4.88 - 4.20}{4.20} = 16.19 \%$	1.5 m/s → 3.0m/s

النتيجة 25: يمكن استخدام جسم بارد متصل بالمكثف لسحب حرارة منه وزيادة إنتاجية الماء المقطر.

نتائج عامة:

النتيجة 26: نلاحظ أن المردود الطاقوي يختلف من مقطر إلى آخر حسب ظروف التجربة، لكن قيمة المردود الطاقوي تبقى متأثرة أكثر بشكل ونوعية المقطر والتحسين المضاف إليه، ويتميز بما يلي:

1. قيمته محصورة بين 0 و 1 ولا تساوي 1، وهذا ناتج من كون أن المقطرات الشمسية يوجد فيها ضياع للطاقة.
2. تبدأ قيمة المردود الطاقوي من 0 وتصل إلى الذروة عند الساعة 13:00 وتتناقص للوصول إلى قيمة دنيا عند المساء (من 0.5 إلى غاية 0.1).
3. النتائج الخاصة بقيم المردود الطاقوي اللحظي للأجهزة في التجارب موضحة في الشكل التالي:



Efficiency -Experiment 01-02-03-04-05

التوصيات:

- نوصي بدورنا وعلى ضوء النتائج التي حصلنا عليها من سلسلة التجارب التي تم القيام بها على المقطر الشمسي البسيط ذو ميل واحد، أن يتم التنبيه في التجارب المستقبلية للعواقب التالية:
- في الأوساط التي يكون فيها الإشعاع الشمسي قوي يجب استعمال زجاج ذو سمك مقبول (من 4 مم إلى 5 مم) لتجنب تشققه وانكساره.
- استعمال مقطرات متوسطة الحجم مثلا (60 سم x 60 سم) وتجنب الاحجام الكبيرة وذلك من اجل سهولة النقل والتكلفة الأقل، والمساحة لا تؤثر على تقييم أداء الجهاز بحيث يمكن حساب المقادير الفيزيائية لوحدة الحجم بقسمة المقيم المحسوبة للسطح المستعمل على قيمة مساحة السطح.
- التحسين باستعمال زجاجتين بينهما ماء متدفق أو هواء محجوز كان بهدف تبريد المكثف إلا أن ما حدث كان تخزين للطاقة داخل المقطر في الفترة المسائية وكانت إنتاجية الماء المقطر أقل، وهذا ما يدفع بنا للقول إن هذا الاجراء لا يجدي نفعا لذلك ينصح بعدم تجربته في الدراسات المستقبلية.
- ننصح باستعمال المزدوجات الحرارية الخاصة بالماء التي يكون لها رأس مغطى بالبلاستيك، كما ننصح بعدم استعمال المزدوجات الحرارية التي تحتوي على رأس مصنوع من الفولاذ داخل الأوساط التي تحتوي على البخار لأنها تتأثر ولا تعطينا قيم حقيقية لدرجات الحرارة.
- إذا قمنا بدمج تجربة التحسين بالإسفننج مع تجربة تبريد الزجاج بالمروحة، سوف نقوم بتحسينين في نفس الوقت، وهما تسخين المبخر وتبريد المكثف وسنحصل على كمية ماء مقطر أكبر.
- من بين التجارب التي نقتربها مستقبلا والتي لم يسعفنا الحظ ولم يكفينا الوقت للقيام بها التحسين باستعمال المضخة الحرارية التي تعمل على تبريد المكثف بمبخر المضخة من جهة، وتسخين المبخر بمكثف المضخة الحرارية، وذلك بسحب الحرارة من خلية التقطير وإعطاء جزء منها إلى المبخر. وهذا الاجراء يمكن تسميته المقطر الشمسي المدعم بمسترجع حراري يعمل بمضخة حرارية، والفرضيات تنص على أنه؛ كلما كانت كفاءة المسترجع (المضخة الحرارية) كبيرة كانت الكفاءة الطاقوية للمقطر كبيرة، والإنتاجية اليومية للماء تزداد مع هذه الزيادة.

- مقارنة المردود الطاقوي تكون غير صحيحة بين أجهزة تم تشغيلها في ظروف مختلفة. والشكل في النتيجة 26 هو لعرض قيم المردود لكل جهاز وليس لمقارنتها، وتكون المقارنة عادلة ومنطقية عندما تكون بين جهاز به تحسين وجهاز آخر شاهد لا يحوي إضافات.
- لكي تكون المقارنة فعلية وذات مدلول كمي وكيفي يجب وضع كل التجارب في تجربة واحدة، وتدعم هذه التجربة بجهاز شاهد على التحسينات. ومن الممكن أن تواجه هذه التجربة صعوبة في الإنجاز من حيث التكلفة المالية.
- أما مقارنة الزيادة في الإنتاجية يمكن مقارنتها بين التجارب مهما كان عددها، بشرط أن تكون كل تجربة بها جهازين الأول شاهد والثاني به تحسين، والزيادة في الإنتاجية هي نسبة بين الفرق في إنتاجية الجهازين مقسومة على إنتاجية الجهاز الأول. بعكس الإنتاجية في حد ذاتها غير قابلة للمقارنة بين أجهزة تم تشغيلها في ظروف مختلفة.

الملاحق

سائل وبخار الماء المشبع (مرتب بدرجات الحرارة)

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Sat. <i>h_f</i>	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/kg-		K
			Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>		Sat. Vapor s_{g}
0.01	0.6113	0.00	2501.35	2501.35	0	9.1562	9.1562
5	0.8721	20.98	2489.57	2510.54	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	41.99	2477.75	2519.74	0.1510	8.7498	8.9007
15	1.705	62.98	2465.93	2528.91	0.2245	8.5569	8.7813
20	2.339	83.94	2454.12	2538.06	0.2966	8.3706	8.6671
25	3.169	104.87	2442.30	2547.17	0.3673	8.1905	8.5579
30	4.246	125.77	2430.48	2556.25	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	146.66	2418.62	2565.28	0.5052	7.8478	8.3530
40	7.384	167.54	2406.72	2574.26	0.5724	7.6845	8.2569
45	9.593	188.42	2394.77	2583.19	0.6386	7.5261	8.1647
50	12.350	209.31	2382.75	2592.06	0.7037	7.3725	8.0762
55	15.758	230.20	2370.66	2600.86	0.7679	7.2234	7.9912
60	19.941	251.11	2358.48	2609.59	0.8311	7.0784	7.9095
65	25.03	272.03	2346.21	2618.24	0.8934	6.9375	7.8309
70	31.19	292.96	2333.85	2626.80	0.9548	6.8004	7.7552
75	38.58	313.91	2321.37	2635.28	1.0154	6.6670	7.6824
80	47.39	334.88	2308.77	2643.66	1.0752	6.5369	7.6121
85	57.83	355.88	2296.05	2651.93	1.1342	6.4102	7.5444
90	70.14	376.90	2283.19	2660.09	1.1924	6.2866	7.4790
95	84.55	397.94	2270.19	2668.13	1.2500	6.1659	7.4158
100	101.3	419.02	2257.03	2676.05	1.3068	6.0480	7.3548
105	120.8	440.13	2243.70	2683.83	1.3629	5.9328	7.2958
110	143.3	461.27	2230.20	2691.47	1.4184	5.8202	7.2386
115	169.1	482.46	2216.50	2698.96	1.4733	5.7100	7.1832
120	198.5	503.69	2202.61	2706.30	1.5275	5.6020	7.1295
125	232.1	524.96	2188.50	2713.46	1.5812	5.4962	7.0774
130	270.1	546.29	2174.16	2720.46	1.6343	5.3925	7.0269
135	313.0	567.67	2159.59	2727.26	1.6869	5.2907	6.9777
140	361.3	589.11	2144.75	2733.87	1.7390	5.1908	6.9298
145	415.4	610.61	2129.65	2740.26	1.7906	5.0926	6.8832
150	475.9	632.18	2114.26	2746.44	1.8417	4.9960	6.8378
155	543.1	653.82	2098.56	2752.39	1.8924	4.9010	6.7934
160	617.8	675.53	2082.55	2758.09	1.9426	4.8075	6.7501
165	700.5	697.32	2066.20	2763.53	1.9924	4.7153	6.7078
170	791.7	719.20	2049.50	2768.70	2.0418	4.6244	6.6663
175	892.0	741.16	2032.42	2773.58	2.0909	4.5347	6.6256
180	1002.2	763.21	2014.96	2778.16	2.1395	4.4461	6.5857
185	1122.7	785.36	1997.07	2782.43	2.1878	4.3586	6.5464
190	1254.4	807.61	1978.76	2786.37	2.2358	4.2720	6.5078

سائل وبخار الماء المشبع (مرتب بدرجات الحرارة) تابع للجدول السابق

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
195	1397.8	0.001149	0.13990	0.14105	828.36	1764.43	2592.79
200	1553.8	0.001156	0.12620	0.12736	850.64	1744.66	2595.29
205	1723.0	0.001164	0.11405	0.11521	873.02	1724.49	2597.52
210	1906.3	0.001173	0.10324	0.10441	895.51	1703.93	2599.44
215	2104.2	0.001181	0.09361	0.09479	918.12	1682.94	2601.06
220	2317.8	0.001190	0.08500	0.08619	940.85	1661.49	2602.35
225	2547.7	0.001199	0.07729	0.07849	963.72	1639.58	2603.30
230	2794.9	0.001209	0.07037	0.07158	986.72	1617.17	2603.89
235	3060.1	0.001219	0.06415	0.06536	1009.88	1594.24	2604.11
240	3344.2	0.001229	0.05853	0.05976	1033.19	1570.75	2603.95
245	3648.2	0.001240	0.05346	0.05470	1056.69	1546.68	2603.37
250	3973.0	0.001251	0.04887	0.05013	1080.37	1522.00	2602.37
255	4319.5	0.001263	0.04471	0.04598	1104.26	1496.66	2600.93
260	4688.6	0.001276	0.04093	0.04220	1128.37	1470.64	2599.01
265	5081.3	0.001289	0.03748	0.03877	1152.72	1443.87	2596.60
270	5498.7	0.001302	0.03434	0.03564	1177.33	1416.33	2593.66
275	5941.8	0.001317	0.03147	0.03279	1202.23	1387.94	2590.17
280	6411.7	0.001332	0.02884	0.03017	1227.43	1358.66	2586.09
285	6909.4	0.001348	0.02642	0.02777	1252.98	1328.41	2581.38
290	7436.0	0.001366	0.02420	0.02557	1278.89	1297.11	2575.99
295	7992.8	0.001384	0.02216	0.02354	1305.21	1264.67	2569.87
300	8581.0	0.001404	0.02027	0.02167	1331.97	1230.99	2562.96
305	9201.8	0.001425	0.01852	0.01995	1359.22	1195.94	2555.16
310	9856.6	0.001447	0.01690	0.01835	1387.03	1159.37	2546.40
315	10547	0.001472	0.01539	0.01687	1415.44	1121.11	2536.55
320	11274	0.001499	0.01399	0.01549	1444.55	1080.93	2525.48
325	12040	0.001528	0.01267	0.01420	1474.44	1038.57	2513.01
330	12845	0.001561	0.01144	0.01300	1505.24	993.66	2498.91
335	13694	0.001597	0.01027	0.01186	1537.11	945.77	2482.88
340	14586	0.001638	0.00916	0.01080	1570.26	894.26	2464.53
345	15525	0.001685	0.00810	0.00978	1605.01	838.29	2443.30
350	16514	0.001740	0.00707	0.00881	1641.81	776.58	2418.39
355	17554	0.001807	0.00607	0.00787	1681.41	707.11	2388.52
360	18651	0.001892	0.00505	0.00694	1725.19	626.29	2351.47
365	19807	0.002011	0.00398	0.00599	1776.13	526.54	2302.67
370	21028	0.002213	0.00271	0.00493	1843.84	384.69	2228.53
374.1	22089	0.003155	0	0.00315	2029.58	0	2029.58