

## الفصل التاسع

### إنتاج الملح بالطاقة الشمسية

#### استخراج الملح شمسيا بالطريقة التقليدية

يتم تبخر الماء من المحلول الملحي بالطاقة الشمسية وبصورة طبيعية وهذا التبخر يعتمد على درجة حرارة ورطوبة وسرعة الهواء والأشعاع الشمسي وكذلك درجة حرارة وكثافة الماء الملحي وتركيز الملح فيه. شكل (1-9) .

ان من بين الايونات الذائبة في ماء البحر هو NaCl ويوجد بكمية غزيرة تصل الى 85.65 % من كتلة جميع الاملاح الذائبة فيه. تتبلور الاملاح الذائبة في ماء البحر اذ يحدث عند مستويات تراكيز مختلفة وان تركيز الماء الملحي يرتفع بتبخر محتواه من الماء. يحصل ترسيب تباعي للاملاح الذائبة  $CaCO_3$   $CaSO_4$  ويتبعها NaCl واملاح البوتاسيوم والمغنيسيوم. ان الهدف من معمل الملح الشمسي *solar salt work* هو استخلاص NaCl من خلال اجبار المحلول الملحي بالجريان خلال مجاميع من برك التبخر المتصلة مع بعضها ، وفي هذا الطريق فان تركيز المحلول في كل بركة مسيطر عليه . اتمام هذا الطريق يسمح على الاقل للاملاح الذائبة وغير المرغوبة بالترسيب قبل البركة الاخيرة التي يتم فيها بلورة NaCl واستخلاصه.

قياس التركيز المستخدم في إنتاج الملح هو قياس  $Baume\ scale(^{\circ}Be)$  الذي يعتمد على الكثافة النوعية للمحلول الملحي ( $S_d$ ) المبينة في المعادلة (1-9) وتستخدم للموائع التي تكون اثقل من الماء وعند درجة حرارة 15.5 م ° .

$$S_d = \frac{145}{145 - Be} \dots\dots\dots (1-9)$$

الكثافة النوعية تشير الى النسبة بين كثافة المحلول الى كثافة الماء عند نفس درجة الحرارة.



شكل (1-9): استخراج الملح شمسيا بالطريقة التقليدية.

(Pereira et al.,2003)

هنالك خمسة مراحل للتركيز وهي معروفة في إنتاج الملح:

1- عندما ( $^{\circ}\text{Be}$ ) تتراوح بين 3.5 - 7 فإنه لا يحصل ترسيب للأملاح المهمة

ولكن ينخفض حجم المحلول الاولي بمقدار 18% .

2- عندما ( $^{\circ}\text{Be}$ ) تتراوح بين 7 - 12 يترسب 55% من كاربونات الكالسيوم

بالاضافة الى جميع اكاسيد الحديد وينخفض حجم المحلول الملحي بمقدار

18%.

3- عندما ( $^{\circ}\text{Be}$ ) تتراوح بين 12 - 20 فان جميع كاربونات الكالسيوم تترسب

عندما  $^{\circ}\text{Be}$  15 وعموما فان 60% من الترسيب الكلي في نهاية هذه

المرحلة وينخفض بمقدار 14.6% من حجم المحلول الملحي الاولي.

4- عندما ( $^{\circ}\text{Be}$ ) تتراوح بين 20 - 25 ، يترسب 25% من سلفات الكالسيوم

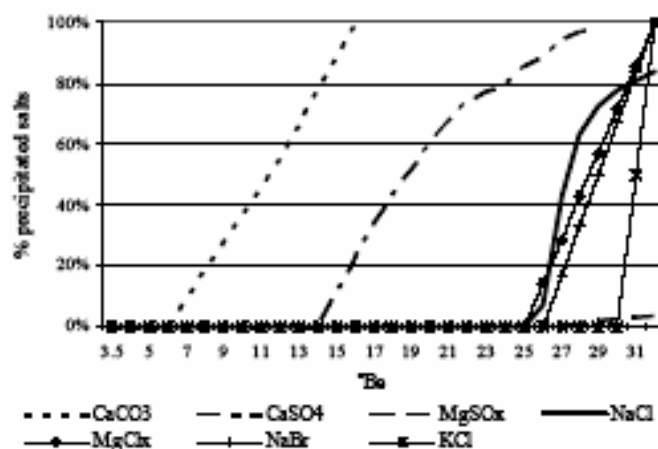
ويتبخر 4.3% من حجم المحلول الاولي.

5- عندما ( $^{\circ}\text{Be}$ ) تتراوح بين 25 - 28.5 يترسب 15% من سلفات الكالسيوم

ويتسب 75% من كلوريد الصوديوم ويتبخر 5.4% من حجم المحلول

الملحي الاولي .

عندما ( $^{\circ}\text{Be}$ ) تتراوح بين 25 – 26 تبدأ املاح المغنيسيوم وبروميد الصوديوم بالترسيب بالرغم من ان كميات قليلة غير كافية لنوعية متوسطة من NaCl المتحصل عليها، كما موضح في شكل (2-9).

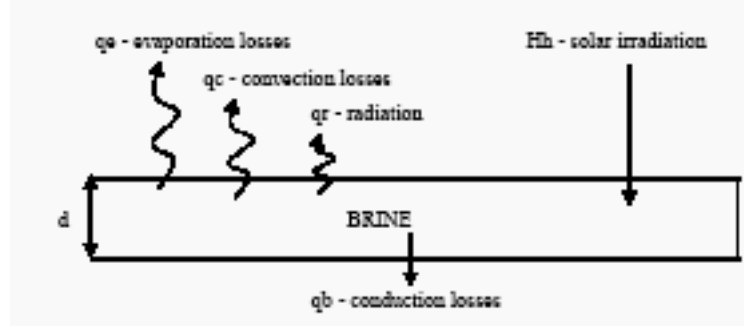


شكل (2-9) : ترسيب املاح المغنيسيوم وبروميد الصوديوم. (Pereira et al., 2003)

ان تبخر الماء بالطريقة التقليدية الشمسية يتبع الى تلك المراحل الخمسة . الاحواض المتماثلة للمراحل الثلاث الاولى يطلق عليها بالمبخرات ، والاحواض المتماثلة في المرحلة الرابعة يطلق عليها السخانات والاحواض المتماثلة لمرحلة التبخير الخامسة والاخيرة يطلق عليها المبلورات وعندها يتم الحصول على كلوريد الصوديوم.

#### الصيغة العددية للتبخير بالطريقة الشمسية التقليدية:

الشكل (3-9) يوضح موازنة الطاقة لطبقة من المحلول الملحي ، وهي ممثلة بالزمن ودرجة الحرارة معتمدة على معادلة معقدة . بعد الصيغة العددية تصبح معادلة تفاضلية محددة.



شكل (9-3) : موازنة الطاقة لطبقة من المحلول الملحي.

$$d\rho_{brine}C_{pbrine}\frac{(T_{brine}-T_{initialbrine})}{\Delta t}=F_sH_h-q_e-q_c-q_r-q_h.....(9-2)$$

يفترض في هذه المعادلة تعتمد صيغة البعد الواحد ولا تفترض تغيير في الاتجاه الافقي وان درجة الحرارة لا تتغير خلال سمك الطبقة للمحلول الملحي وكذلك اهمال الفقدان بالتوصيل الى الهواء والموصلية الحرارية للهواء منخفضة .

#### امتصاص الاشعاع الشمسي في طبقة المحلول الملحي:

الرمز  $F_s$  يشير الى نسبة الطاقة الشمسية الممتصة بواسطة طبقة المحلول الملحي ، و  $H_n$  يشير الى الاشعاع في المستوى الافقي *global irradiation* .  
الاشعاع الشمسي يصل الى اسفل طبقة المحلول الملحي من الحوض ويكون منعكس باتجاه اعلى السطح وجزء منه يعاد انعكاسه الى اسفل الطبقة الداخلية من المحلول والباقي يغادر الحوض. ولغرض تبسيط المعادلة يفترض بان كل الاشعاع الشمسي يصل الى طبقة المحلول ولا ينعكس حيث ان الإشعاع المباشر او المنتشر فانه سيتمص . جزء بسيط من الطاقة الشمسية يكون متأثر فقط بالانعكاسية من المحلول وقيمته 6 %.

#### الفقدان بالحمل:

هذا الفقدان يعتمد بصورة مباشرة على الاختلاف بدرجة الحرارة بين الهواء والمحلول الملحي بالاضافة الى سرعة جريان الهواء.

$$q_c = h_c (T_{brine} - T_{air}) \dots \dots \dots (9-3)$$

$q_c$ : الطاقة الحرارية المفقودة (واط / م<sup>2</sup>)

$T_{brine}$ : درجة حرارة المحلول الملحي (م<sup>0</sup>)

$T_{air}$ : درجة حرارة الهواء (م<sup>0</sup>)

$h_c$ : معامل انتقال الحرارة بالحمل (واط / م<sup>2</sup> . م<sup>0</sup>).

يحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل كالآتي:

$$h_c = 2.8 + 3v \dots \dots \dots (9-4)$$

$V$ : سرعة جريان الهواء (م/ثا)

الفقدان بسبب التبخر:

تحسب مفقودات التبخر كالآتي:

$$q_e = 0.0163 h_c (P_{S(T_{brine})} - \phi P_{S(T_{air})}) \dots \dots \dots (9-5)$$

$P_s$ : ضغط التشبع عند درجة حرارة المحلول الملحي  $T_{brine}$  و درجة حرارة الهواء

$T_{air}$ : درجة حرارة الهواء (م<sup>0</sup>).

$\phi$ :

$q_e$ : الفقدان بسبب التبخر (واط / م<sup>2</sup>)

الفقدان نتيجة الاشعاع :

ويحسب الفقدان نتيجة الاشعاع من المعادلة الآتية:

$$q_r = \epsilon \sigma (T_{brine}^4 - T_{sky}^4) \dots \dots \dots (9-6)$$

$q_r$ : الفقدان نتيجة الاشعاع (واط / م<sup>2</sup>).

الفقدان بالتوصيل الى التربة

يحسب الفقدان بالتوصيل الى التربة كالآتي:

$$q_b = \frac{k}{l} (T_{brine} - T_{lost}) \dots \dots \dots (9-7)$$

$K$ : الموصلية الحرارية (واط/م . م<sup>0</sup>) و  $l$  السمك الكلي.

## كتلة الماء المتبخر

لحساب كتلة الماء المتبخر  $m$  (كغم/م<sup>2</sup>) تستخدم المعادلة الآتية:

$$m = \frac{q_e \Delta t}{C_i} C_{evap} \dots \dots \dots (9-8)$$

$C_i$  : الطاقة الكامنة لتبخر الماء عند معدل درجة حرارة المحلول الملحي خلال زمن محدد.

$m$ : كتلة الماء المتبخر (كغم/م<sup>2</sup>).

$C_{evap}$  :معامل التبخير ويعتمد على تركيز الملح في المحلول وقيمته تفرض اقل من 1.

كتلة الماء المتبخر هو استجابة الى تقليص سمك طبقة المحلول الملحي والتي تدخل في حسابات خطوة الزمن القادم .

حساب انخفاض سمك الطبقة يعتمد على خصائص الماء عند معدل درجة حرارة المحلول الملحي في كل فترة زمنية محددة. يمكن زيادة معدل التبخر وكالاتي:

1-زيادة ضغط البخار المشبع عند درجة حرارة المحلول الملحي مثل عملية تسخين المحلول ، وهذا يقلل من الحرارة الكامنة للتبخر.

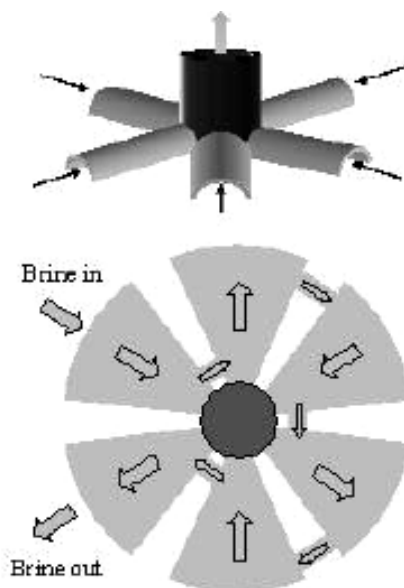
2-زيادة معامل انتقال الحرارة بالحمل خلال سرعة عالية لجريان الهواء في منطقة سطح المحلول الملامسة للهواء.

3-خفض الرطوبة النسبية وهذا يزيد من ضغط البخار المشبع من خلال تسخين الهواء.

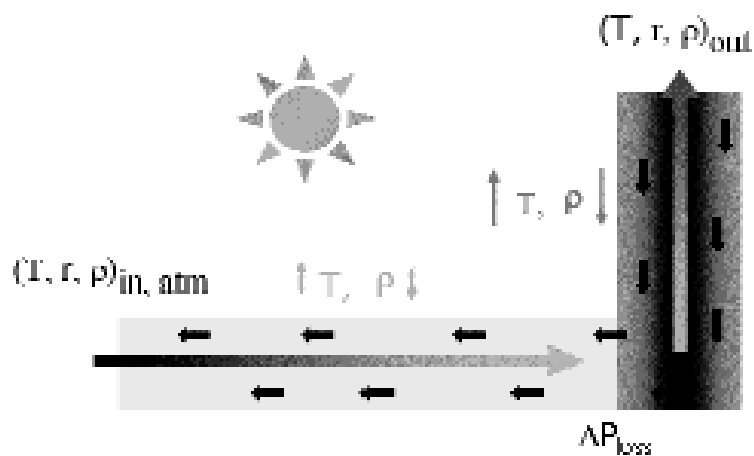
هذا الجهاز يتكون من بيت بلاستيكي مكون قطاعات دائرة متعددة تعمل بالحمل الحراري مزودة في مركزها بمدخنة شكل (4-9) و (5-9) . ان الهواء الموجود في البيت البلاستيكي يسخن بواسطة الاشعاع الشمسي مما يؤدي الى رفع درجة حرارته وانخفاض كثافته. اما في المدخنة الشمسية فان الهواء يسخن اكثر كونه يمثل مجمع شمسي كفوء ، والقوة المحركة للهواء فيه هي نتيجة الاختلاف بالضغط بين الدخول والخروج وهذا ينعكس على الاختلاف بكثافة الهواء داخله نتيجة تسخينه وكالاتي:

$$\Delta P = (\rho_{in} - \rho_{out}) gh \dots \dots \dots (9-9)$$

$\Delta P$ : الاختلاف بالضغط (باسكال).



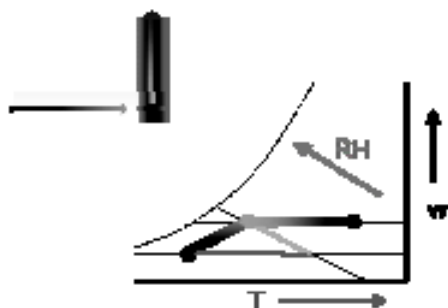
شكل (9-4): حركة المحلول الملحي.



شكل (9-5) : مخطط لجهاز إنتاج الملح بالطاقة الشمسية.

جريان الهواء يحدث عندما القوة المحركة تفوق الفقدان الحراري وهذا العمل ذاتي مثل الثرموسيفون . عندما المحلول الملحي الموجود في البيت الزجاجي يسخن بفعل الطاقة الشمسية ويتبخر الماء منه تسمى هذه العملية بالتبريد الادبياتيكي

لجريان الهواء . في المخطط السايكرومترى لجريان الهواء في البيت الزجاجي يكون هنالك جمع بين التسخين عند رطوبة نوعية ثابتة والتبريد الادياباتيكي . في المدخنة الشمسية يكون التسخين عند رطوبة نوعية ثابتة. كما هو موضح في شكل (6-9).



شكل (6-9) : التسخين في المدخنة.

### الربط بين تصميم مجفف شمسي لانتاج الملح والصيغة العددية للتبخير

الربط بين صيغة تبخير المحلول الملحي الموصوف في ماتقدم مع تصميم مجفف للملح يجب ان يعكس الظروف الحدية المتغيرة التي يحصل عليها من مكان طبقة المحلول الملحي في المجفف الذي يعمل بالحمل الطبيعي. بعد هذه التغيرات في ظروف طبقة المحلول الملحي وبالتحديد فقدان درجة الحرارة بالتوصيل والاشعاع وتحديد سرعة الهواء ودرجة حرارته يجب ان ياتي خلال عملية التكرير *iterative* التي تقارب الى ظروف الجريان المستقر في تلك القوة الرئيسية المعطاة بتدرج الكثافة والتي تعادل الفقد الحراري في المنظومة. هنالك عدة افتراضات يجب اخذها بنظر الاعتبار وهي:

- 1- افتراض ان سرعة جريان الهواء محددة خلال مقطع الدراسة .
- 2- تحديد كثافة الهواء الداخل (يعتمد على درجة حرارته الاولى) والجريان الكتلي والحجمي (يعتمد على السرعة ومساحة المقطع).
- 3- تحديد ارتفاع درجة حرارة الهواء نتيجة امتصاص الطاقة الشمسية من خلال خصائص المجمع الشمسي المتمثلة بمقطع البيت البلاستيكي و حاصل



ضرب الامتصاصية - الانفاذية في معامل الانتزاع الحراري ضرب معامل  
الفقدان الحراري الكلي في معامل الانتزاع الحراري . على افتراض ان درجة  
حرارة الهواء  $\Delta t$  وهذه العوامل تحدد كفاءة المجمع الشمسي وكالاتي:

$$\eta = F'(\tau\alpha) - F'U_L \times \frac{\Delta t}{I} \dots\dots\dots(9-10)$$

لتحديد الزيادة في درجة الحرارة للهواء الحار المار خلال مقطع من المجمع  
الشمسي فيؤخذ بنظر الاهتمام زمن مرور دقائق الهواء خلال طول المجمع .

$$Q = mC_p \Delta t = IA_{capt} \eta_{col} \dots\dots\dots(9-11)$$

$A_{capt}$ : المساحة من البيت البلاستيكي المعرضة للاشعاع الشمسي.

#### 4- تحديد كتلة الماء المتبخر

من خلال الصيغة الرياضية لتبخير المحلول الملحي بالطريقة التقليدية المار  
ذكرها فان كتلة الماء المتبخر تحسب من المعادلة (8-9) حيث ان خواص  
الهواء معطاة من معدل درجة الحرارة وخصائص المحلول الملحي عند درجة  
حرارة المحلول الاولية.

#### 4-التبريد الادبياتيكي:

ان كتلة الماء المتبخرة هي لتحديد كمية الطاقة المصروفة بواسطة جريان الهواء  
لهذا الغرض التي سوف تحدد التبريد للهواء التالي ، باعتبار ان الحرارة ناتجة من  
الاشعاع الشمسي وهذا سوف يؤكد درجة الحرارة النهائية عند مقطع الخروج.

$$Q_{evap} = mC_l m_{evap} = m_{air} C_{pair} I \Delta t \dots\dots\dots(9-12)$$

6-ظرف جريان الهواء الاخيرة يتم الحصول عليها من المخطط السايكرومترى  
ثم يدخل هواء جديد له ظروف اولية للمقطع القادم.

7-حساب الفقد الحراري: بعد تحديد ظروف جريان الهواء خلال فتحة المنظومة  
على اعتبار ان مميزات المدخنة مختلفة عن المجمع ولايحصل فيها تبريد  
ادبياتيكي وهذا ممكن ان يحدد من خلاله الفقدان الحراري الكلي على

المنظومة والذي يجب ان يساوي القوة الرئيسية المعطاة في المعادلة (12-9).

القيمة المفترضة لسرعة جريان الهواء عند دخوله البيت البلاستيكي متغيرة ،  
والفقد الحراري يساوي القوة الرئيسية التي تبدأ مرة اخرى بتهوية اخرى له.

8-ظروف المحلول: مثل درجة حرارة المحلول النهائية التي ستكون مستخدمة  
في الخطوة الزمنية القادمة.

الظروف المحيطية للمحلول: ان مكان طبقة المحلول الملحي في المجفف  
الطبيعي للملح يؤثر على موازنة الطاقة من خلال:

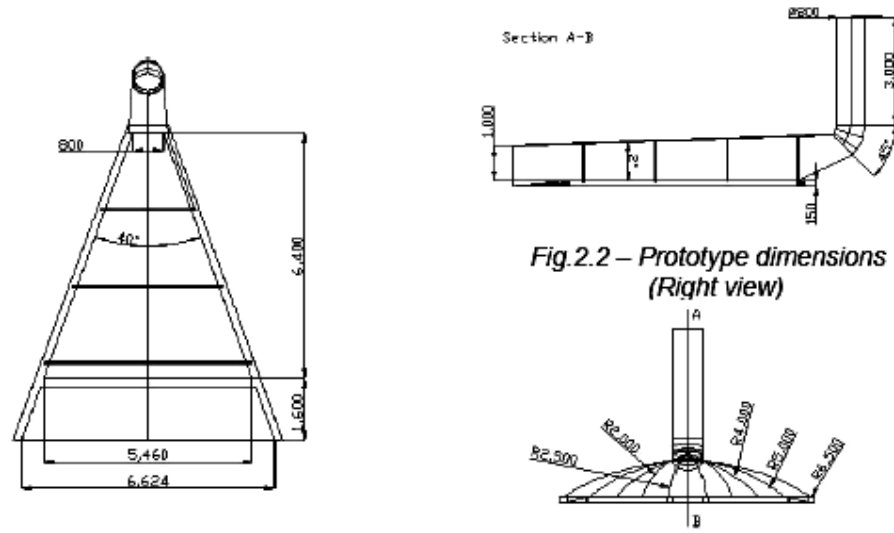
1-امتصاص الاشعاع الشمسي بواسطة طبقة المحلول الملحي  $F_s$  يصبح  
مضروباً بانبعائية البيت البلاستيكي.

2-الفقدان عن طريق الاشعاع يشير الى درجة حرارة السماء  $T_{sky}$  . درجة حرارة  
الغطاء للبيت البلاستيكي تعتمد على درجة حرارة الجو وشدة الاشعاع  
الشمسي من خلال :

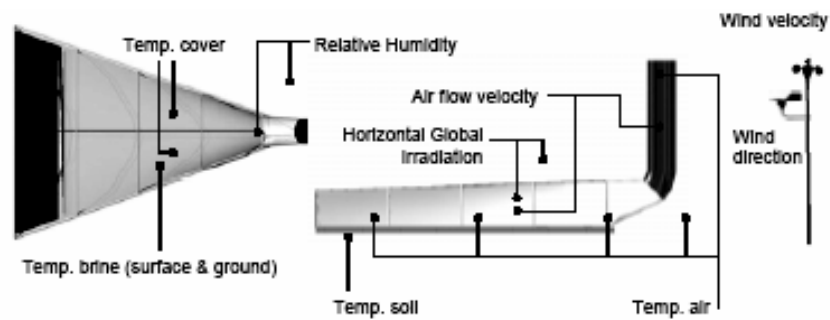
$$T_{cover} = T_{air,amb} - 5 + \frac{5}{400} I_{gH} \dots\dots\dots (9-13)$$

3- الفقدان عن طريق التوصيل الى التربة

المجفف الشمسي لإنتاج الملح يتكون من حوض للتبخير مساحته 20 م<sup>2</sup>  
مبطن بطبقة من *polyethylene (PE+thermal PE+EVA)* سمك كل  
طبقة 0.2 ملم ومزود بمدخنة شمسية قطرها 0.8 م مصنوعة من انبوب حديدي  
مغلون مصبوغ بلون اسود كما موضح في الشكلين (7-9) و (8-9) ويوضح  
الشكل (9-9) طريقة مراقبة عمل الجهاز .



شكل (8-9): مجفف شمسي لإنتاج الملح.



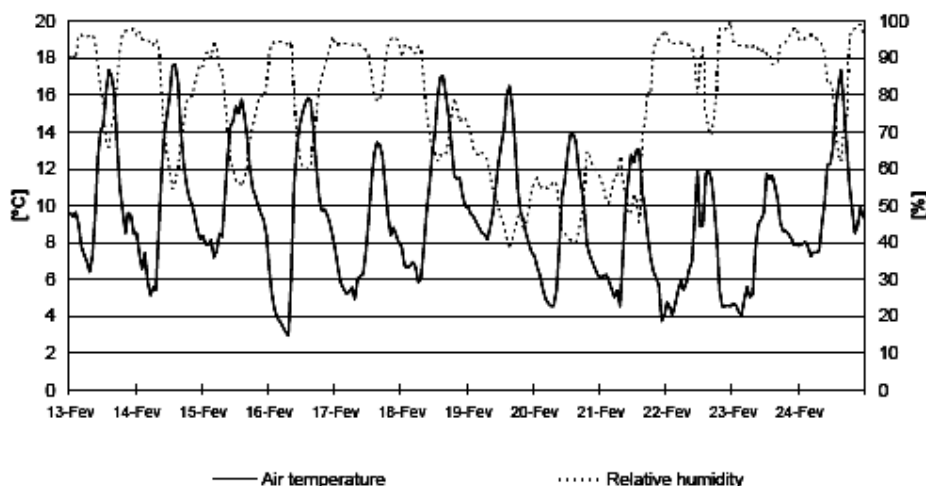
شكل (9-9): مجفف شمسي لإنتاج الملح. (Pereira et al., 2003).

يوضح الشكل (9-10) تبخر الماء من المحلول الملحي من ناحية التمثيل الهندسي والبيانات العملية حيث ان التبخر يزداد مع زيادة ايام عمل الجهاز والبالغة 12 يوم كما ان القيم النظرية كانت اعلى من القيم العملية وهذا بسبب ان الفقدان من الناحية العملية كان اكبر من حسابات الصيغة العددية . ويوضح الشكل (9-11) سرعة الهواء خلال 12 يوم وعلى ارتفاع 30 سم من سطح المحلول الملحي وكذلك في المدخنة ان سرعة جريان الهواء فوق سطح المحلول اقل كثيرا من معدل القيمة المتوقعة.

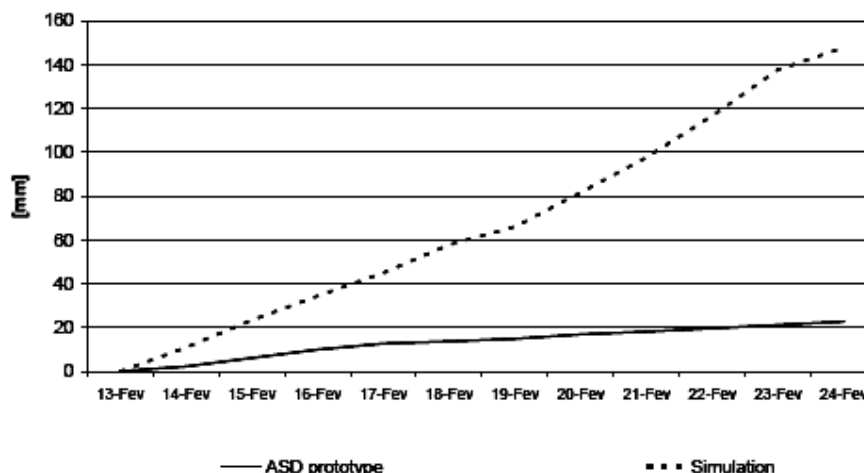
يحسب معدل سرعة الهواء في المدخنة ( $\bar{U}_{chim}$ ) كالاتي:

$$\bar{U}_{chim} = \sqrt{0.05 + 0.3DF} \dots\dots\dots(9-14)$$

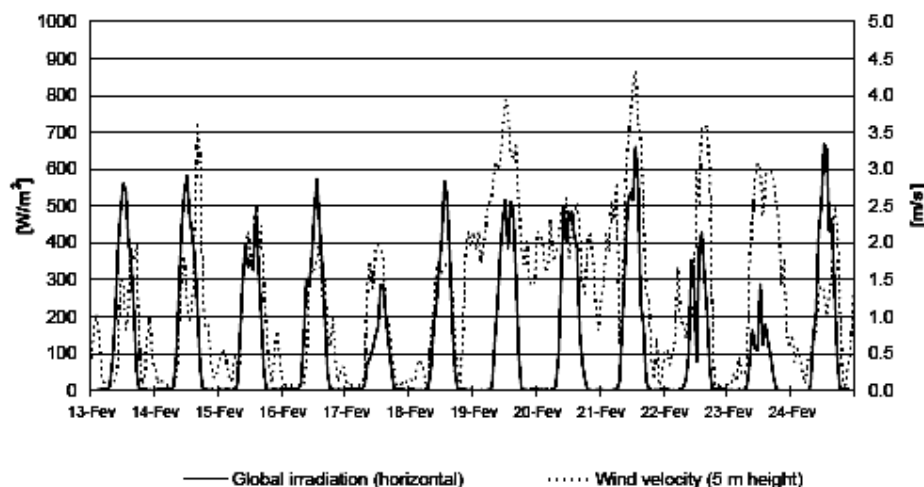
Df : هو القوم المحركة (باسكال)



شكل (9-10): تبخر الماء من المحلول الملحي.



شكل (9-11): سرعة الهواء فوق المحلول الملحي.



شكل (9-12): الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي وسرعة الرياح.

معدل مقطع السرعة يحسب:

$$\frac{U_{y/CH}}{U_{\infty}} = (y/CH)^{2.5} - (y/CH)^3 \dots \dots \dots (9-15)$$

$CH$  : ارتفاع القناة الكلي. و  $Ux$  سرعة الهواء غير المثار و  $y$  الارتفاع فوق سطح المحلول الملحي

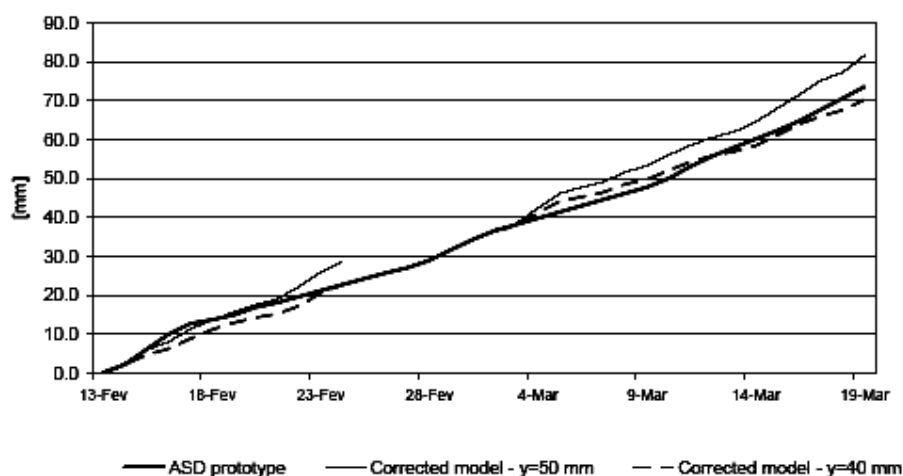
بينما معدل مقطع السرعة في مقطع التبخر هو

$$\bar{U} = U_{\infty} \int_0^1 \left[ (y/CH)^{2.5} - (y/CH)^3 \right] p(y/CH) dy \quad (9-16)$$

سرعة جريان الهواء بالحمل هي دالة للمسافة من سطح المحلول الملحي ومعدل سرعة جريان الهواء من المعادلتين ينتج:

$$U_{y/CH} = \frac{\bar{U} (y/CH)^{2.5} - (y/CH)^3}{\int_0^1 \left[ (y/CH)^{2.5} - (y/CH)^3 \right] p(y/CH) dy} \quad (9-17)$$

معدل السرعة في مقطع التبخر حسب من المعادلة (8-16) بمعدلات سرع مختلفة لجريان الهواء وكما هو موضح في شكل (9-13).



شكل (9-13): معدل السرعة في مقطع التبخر.