

تأثير قطر الأنبوب في أداء المبادل الحراري هواء- أرض المستخدم في البيوت المحمية في محافظة طرطوس

أ.د.م سليمان سلامة *

د.م وسيم مرشد **

م. هند علي ***

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٥/١٣ . قبل للنشر في ٢٠٢٥/٧/١٣)

□ ملخص □

إن تقنية المبادل الحراري هواء أرض من التقنيات الواعدة والتي بدأ تطبيقها مؤخراً في مجال التحكم بدرجة الحرارة في البيوت المحمية، لذا كان الهدف من الدراسة الحالية هو معرفة كيف ستؤثر زيادة قطر الأنبوب على عمل المبادل الحراري (هواء - أرض)، حيث تم اختبار مبادلين حراريين بطول (22m)، على عمق (1.5m)، كل منهما على شكل حرف (U) داخل بيتين محميين بأبعاد (2*3*12)m، كان المبادل الأول بأنبوب قطره (15.24cm)، أما المبادل الثاني بأنبوب قطره (5.08cm)، كلاهما مصنوع من (PVC) بسماكة جدار (2.8mm)، أما سرعة الهواء ضمن الأنابيب فكانت ثابتة وهي بحدود ($2m.s^{-1}$)، وتمت التجارب في المنطقة الساحلية وعند عمق متر ونصف في التربة الطينية. بينت النتائج أنه عند القطر الأكبر كان التبادل الحراري أكبر وأن المبادل الحراري ذي القطر الأكبر عمل على رفع درجة حرارة الهواء بمقدار (38.9%) و (20.7%) أثناء فترتي التدفئة خلال اليوم الواحد، أما المبادل الآخر ذي القطر الأصغر عمل على رفع درجة حرارة الهواء بمقدار (17.38%)، (12.56%) أثناء فترتي التدفئة خلال اليوم نفسه، وفي مرحلة التبريد عند وصول درجات الحرارة إلى أعلى مستوياتها في خلال ساعات النهار، قد عمل المبادل الحراري ذي القطر الأكبر عمل على خفض درجة حرارة الهواء ضمن البيت المحمي بنسبة حوالي (5.6%)، بينما كانت للقطر الصغير (3.4%).

الكلمات المفتاحية: مبادل حراري هواء- أرض ، قطر الأنبوب، درجة حرارة التربة، سرعة الهواء، تدفئة، تبريد.

*أستاذ في قسم المكننة الزراعية، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس.

**مدرس في قسم المكننة الزراعية، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس.

***طالبة دراسات عليا (دكتوراه) في قسم المكننة الزراعية، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس.

Effect of Tube Diameter on the Performance of Earth-to-Air Heat Exchangers Used in greenhouses in Tartous Governorate

(Received 13/5/2025 . Accepted 13/7/2025)

□ ABSTRACT □

Earth-to-air heat exchanger technology is a promising technology that has recently begun to be used to control the temperature of greenhouses, therefore, the aim of the current study was to know how increasing the diameter of the tube would affect the operation of the earth-to-air heat exchanger. Two heat exchangers, 22 meters long and 1.5 meters deep, each in the shape of a U, were tested inside two greenhouses with dimensions of (2*3*12)m. Both were made of PVC with a wall thickness of 2.8mm, the air velocity within the pipes was constant at about $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. The experiments were conducted in a coastal area at a depth of one and a half in clayey soil.

The results showed that the larger diameter resulted in greater heat exchange. The larger diameter heat exchanger raised the temperature by 38.9% and 20.7% during the two heating periods of the same day, while the smaller diameter heat exchanger raised the temperature by 17.38% and 12.56% during the two heating periods of the same day, during the cooling phase, when temperatures was reached their highest levels during the daytime hours, the exchanger with the larger diameter reduced the temperature inside the greenhouse by about 5.6% while this percentage was 3.4% for the small diameter.

Keywords: Earth-to-air heat exchanger, tube diameter, soil temperature, air velocity, heating, cooling.

*Professor, Department of Agricultural Mechanization, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

**Assistant Prof., Department of Agricultural Mechanization, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

***Ph.D Student, Department of Agricultural Mechanization, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

1- المقدمة:

تتجه الأبحاث اليوم إلى استخدام مصادر الطاقة المتجددة النظيفة لتلبية احتياجات التدفئة والتبريد بدلاً من الوقود الأحفوري، للحد من الاحتباس الحراري العالمي وتلوث الهواء في جميع أنحاء العالم، فنتيجة الاختلافات الجذرية في درجات حرارة الهواء (يومية أو موسمية)، فتكون موارد الطاقة الحرارية الأرضية حلاً واعدًا، و لتنفيذ التقنيات التي تعتمد بشكل أساسي على حرارة باطن الأرض كانت الدراسة التي تقيس حرارة باطن الأرض حتى عمق (3.5m) أمر في غاية الأهمية، حيث كانت درجة الحرارة على عمق (3m) هي (32C°) في الصيف و (29C°) في الشتاء (من أجل صحراء شبه الجزيرة العربية، وهذه الدرجات تختلف بالنسبة لمناطق أخرى) ، كما أظهرت النتائج أن درجة حرارة الأرض تزداد مع زيادة العمق في الشتاء، وتنخفض في الصيف، وعند عمق معين تصبح ثابتة طيلة العام، وبالتالي درجة الحرارة هذه ستوفر قدرة تدفئة وتبريد كبيرة في حال تم تنفيذ مبادل حراري من الأرض إلى الهواء في المناطق القاحلة. (Abdel-Ghany et al, 2022)

المبادل الحراري الأنبوبي (هواء_ أرض)، تقنية مبتكرة من أجل تقليل استهلاك الطاقة في المنشآت حيث يمكن استخدام هذه الطريقة لتبريد أو لتسخين الهواء المحيط بالاعتماد على الحرارة أو البرودة المخترنة في التربة، (Janssens & De Paepe, 2020) .

إن تطبيق هذا النوع من المبادلات الحرارية يعتمد على مبدأ أن الأرض تعمل كخزان كبير جداً للطاقة الحرارية، حيث أن درجة حرارة الأرض تحت أعماق معينة من سطحها تبقى ثابتة طوال العام. (Sukhija & Sharma 2021).

تلعب التغيرات الحرارية خلال اليوم الواحد بين ساعات النهار الأولى والمتأخرة، والتغيرات الفصلية بين الصيف والشتاء الدور والعامل الأساسي في عمل تقنية المبادل الحراري هواء- أرض (EAHE)، وفي نيودلهي تم إجراء حسابات عديدة ليوم صيفي حار نموذجي، ويوم شتوي بارد نموذجي (لتحديد التغير اليومي)، وتتوافق مع متوسط البيانات الجوية لعام (1974) في المدينة ذاتها (لتحديد التغير السنوي)، حيث لاحظ الباحثان أن درجة الحرارة ثابتة على عمق حوالي (0.15m) للتغيرات اليومية، وعلى عمق (4m) للتغيرات السنوية. (Bharadwaj & Bansal, 1981)

تمت دراسات كثيرة حول استخدام هذه التقنية في ظل ظروف وشروط مختلفة مثل سرعة الهواء وعمق الأنبوب وطوله، حيث أن جميع هذه العوامل وغيرها لها دور أساسي في أداء الـ (EAHE). (Verma et al 2020).

إذ يعتبر المبادل طريقة واعدة في تخفيف الحمل الحراري من خلال عملية التدفئة شتاءً وحمل التبريد صيفاً. وتم إجراء الكثير من الأبحاث لتطويره والوصول لنماذج تحليلية وعددية لأنظمة الـ (EAHE) وقد توصل الباحثون إلى معادلات وإجراءات ليس من السهل إعادة صياغتها في معادلات تصميمية ثابتة، تعتمد بشكل أساسي على حساب التدرج الحراري الأرضي أو ما يعرف بحرارة الأرض المستقرة (EUT) Earth's undisturbed temperature، ومعادلات أخرى تضم معامل الاحتكاك و عدد نوسيلت Friction factor and Nusselt number، لضمان دقة أعلى في حساب انتقال الحرارة ومعامل الحمل الحراري، وهبوط الضغط وطول أنبوب النظام الأمثل، وتم التوصل إلى أنه الأنبوب الأطول

بقطر أقل والمغمور على عمق أكبر وله سرعة أقل لتدفق الهواء ضمن الأنبوب يؤدي لزيادة في فعالية أداء نظام المبادل الحراري (EAHE) . (Bisoniya, 2015).

قام (Sakhri et al, 2021) بدراسة تجريبية في منطقة بيشار جنوب غرب الجزائر وهي ذات ظروف مناخية تعتبر قاسية نوعا ما, تم دراسة أداء وحدة تبادل حراري هواء- أرض دون استخدام أجهزة خارجية (مراوح أو غيرها), حيث تم استخدام أنبوب (PVC) بطول (66m) وقطر (110mm), ودفن الأنبوب على عمق (1.5m), وكانت درجة حرارة التربة على العمق ذاته (28°C), واستطاع النظام المستخدم رفع درجة حرارة الهواء مقدار (10°C) عند التدفئة, وتقليلها (11.9°C) عند التبريد, وتم رفع الرطوبة النسبية بمقدار (19%) في وضع الترطيب, وخفضها (27%) في وضع التجفيف.

قام (Hegazy et al, 2021) في مصر (منطقة الغردقة) بالمقارنة بين بيتين محميين أحدهما مزود بنظام مبادل حراري هواء- أرض (EAHE), وآخر دون مبادل حراري, حيث كانت درجة الحرارة الداخلية في البيت المحمي الغير مزود بنظام المبادل الحراري (EAHE) (دون تدفئة) أقل من درجة الحرارة الدنيا اللازمة للزراعة (أقل من 20 درجة مئوية), خلال الساعات الأولى والمتأخرة من النهار, أما خلال ساعات النهار فكانت تتجاوز درجة الحرارة القصوى للزراعة (أكثر من 30 درجة مئوية), وعند استخدام نظام (EAHE) فقد أظهرت النتائج أنه قادر على المحافظة على درجة الحرارة داخل البيت المحمي بحيث تكون مناسبة للزراعة من خلال التبريد في النهار والتدفئة في الليل, كما أنه تم تقليل الرطوبة النسبية من (35%) إلى (15%), وبذلك تكون تقنية المبادل الحراري (هواء- أرض) طريقة مستدامة, صديقة للبيئة, وقابلة للتنفيذ والاستخدام في تنظيم درجة الحرارة والرطوبة داخل البيوت المحمية.

قام الباحث مرشد وآخرون بدراسة نظام مبادل حراري هواء- أرض مكون من خطين أحدهما في تربة جافة, والآخر في تربة تم ترطيبها صناعيا بأنابيب تنقيط ترتفع عنه (10cm). وتم التوصل إلى أن ترطيب التربة حول خط المبادل يحسن من عملية التبادل الحراري, في كل من التدفئة والتبريد, كما وجد أن زيادة طول الأنبوب لكلا الخطين قد سببت زيادة في كفاءة التبريد, لكن الثلث الأول من طول الأنبوب كان أكثر فاعلية, علما أن المبادل المدروس كان بطول (37m) ومدفون على عمق (2m), وأجريت الدراسة في مناخ شبه صحراوي في مدينة البصرة في العراق. (Morshed et al, 2018).

أما محليا فقد تم تنفيذ مبادل حراري هواء- أرض في المنطقة الساحلية وذلك لمعرفة فيما إذا كان من الممكن اعتماد هذه التقنية في تكييف البيوت المحمية (تبريد, تدفئة), حيث تم أيضا تقييم بعض البارامترات (الطول, القطر, وسرعة التدفق) التي تؤثر بشكل واضح على أداء المبادل الحراري وكفاءته, وفي هذه الدراسة تم دفن أنابيب المبادل بطول (20m) على عمق (1m), وكانت الأقطار المستخدمة (10.16cm), (15.24cm) بسرعتي تدفق هما ($2, 1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), حيث أظهرت النتائج تأثيرا معنويا للبارامترات المدروسة على أداء التدفئة لكلا المبادلين المدروسين, كما أدت زيادة طول الأنبوب إلى (20m) إلى زيادة كفاءة التدفئة حتى (56%) بالنسبة للمبادل ذي الأنابيب بقطر (10.16cm), وحتى (36.28%) بالنسبة للمبادل ذي الأنابيب بقطر (15.24cm), وبذلك كان الأنبوب ذو القطر الأصغر هو الأفضل كما أظهرت النتائج أن انخفاض السرعة للهواء ضمن الأنابيب من ($2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) إلى ($1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) قد تسبب في زيادة درجة الحرارة من (5.5) إلى (6.99) درجات مئوية. (Morshed et al, 2022).

2- مشكلة البحث

إن التلوث الكبير عند استخدام مصادر الطاقة الاعتيادية في تكييف البيوت المحمية، والحجم الكبير المخصص لهذه التجهيزات ضمنها فضلا عن الحاجة إلى العمالة الكبيرة والتكاليف الاقتصادية المرتفعة، كلها أمور أثقلت قطاع الإنتاج الزراعي، ودفعت إلى إيجاد الحلول البديلة الأكثر استدامة وأقل ضرر بالبيئة.

3- أهمية البحث

استخدم المبادل الحراري الأنبوبي (هواء-أرض) في تكييف البيوت المحمية الزراعية، وأبدى فعاليته عالميا في التحكم بدرجة الحرارة، إضافة لكون هذه الطريقة ذات أثر فعال في توفير البيئة المناسبة بكلفة أقل حيث لانتاج لاستخدام الوقود المستخدم بالطرق التقليدية، كما أنها طريقة صديقة للبيئة ليس لها أية أضرار تذكر، وتكمن أهمية هذا البحث في تحديد البارامترات المثلى التي تأمن التوافق بين التكلفة والأداء.

4- الهدف من البحث

يهدف البحث إلى اختيار القطر المناسب للمبادل الحراري (هواء- أرض) على عمق معين، ليكون أكثر فعالية من حيث توفي الوقت والجهد والتكاليف.

5- مواد البحث وطرائقه

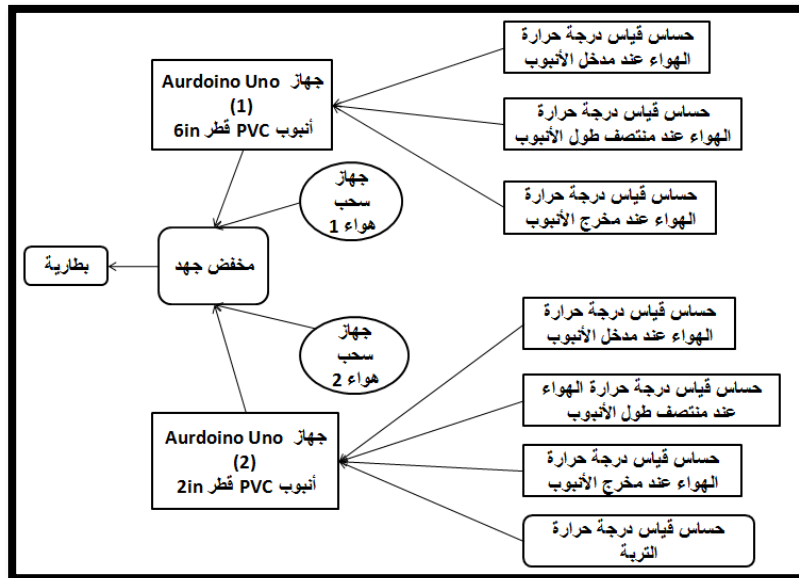
5-1- مكان تنفيذ التجربة:

تم إجراء التجارب في بيوت محمية في منطقة حريصون في محافظة طرطوس، حيث تعتبر الزراعة المحمية هي الزراعة الأساسية و مصدر دخل أساسي للكثير من العائلات، وتم ذلك خلال الفترة الممتدة بين 2/1/2025 و 15/2/2025.

5-2- التجهيزات والأدوات اللازمة لإجراء البحث:

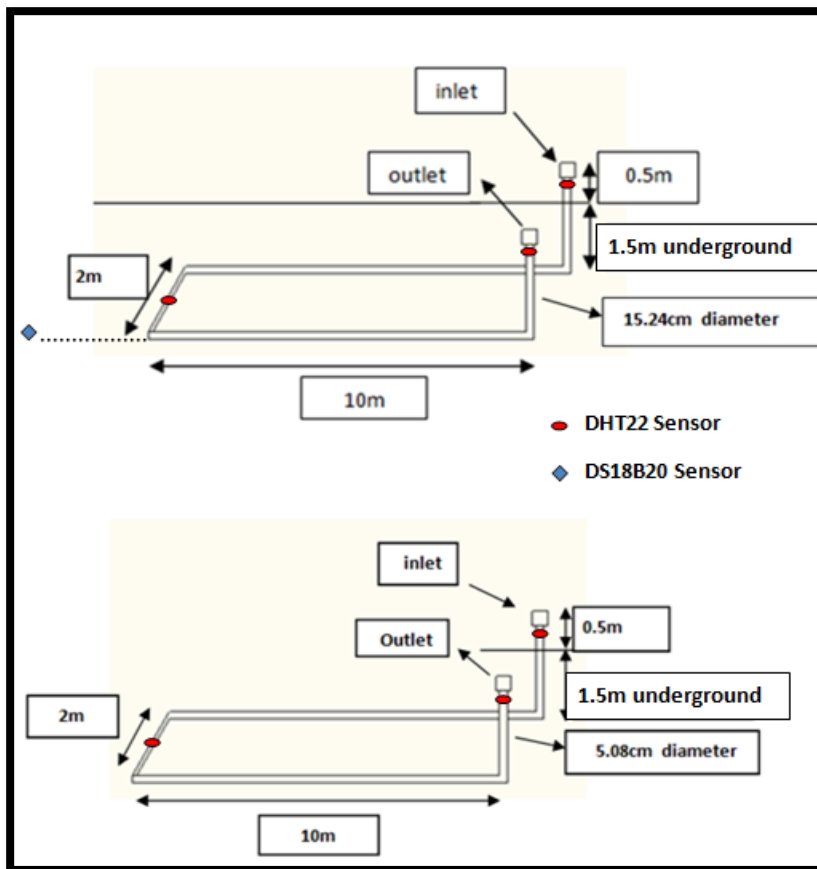
- أنابيب (PVC) بقطر (15.24 cm) بطول (26m)، وأنابيب (PVC) بقطر (5.08cm) وطول (26m)، مع الأكواع والوصلات المناسبة.
- مضخة سحب هواء.
- حساسات (DHT22) لقياس درجة حرارة الهواء عدد (6).
- حساس (DS18B20) لقياس درجة حرارة التربة.
- جهاز (Aurduino Uno)، عدد (2).
- دارة زمن حقيقي (RTC Module DS1307) عدد (2).
- قارئ ذواكر مع كرت ذاكرة لتخزين القراءات عدد (2).

وفيما يلي الشكل الذي يبين مخطط توصيل الحساسات والأجهزة المستخدمة في التجربة:



الشكل (1) آلية توصيل الأجهزة والحساسات المستخدمة في التجربة.

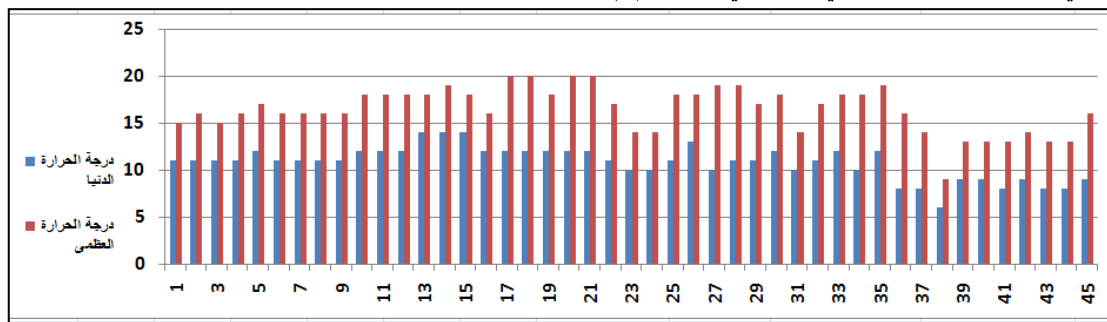
تم تنفيذ التجربة في بيتين بلاستيكيين أبعاد كل منهما $(2*3*12)m$, تم دفن الأنابيب على عمق $(1.5m)$ على شكل حرف (U) ضمن البيت المحمي أي أن دائرة المبادل من النوع المغلق، وتم توصيل الحساسات و جهاز الأوردوينو وبرمجته ليقوم بأخذ القياسات اللازمة لدرجة حرارة الهواء والتربة كل ساعة وتسجيلها خلال هذه الفترة. والشكل التالي (الشكل (2)) يبين مخطط توضيحي لنظامي المبادل الحراري المستخدمان في التجربة.



الشكل (2) مخطط توضيحي يبين المبادلين المستخدمين في التجربة

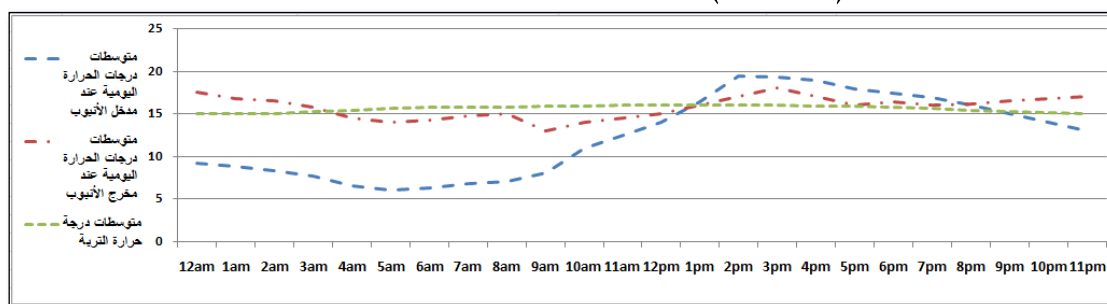
6- النتائج:

تم تسجيل درجات الحرارة عند المدخل والمخرج لكل مبادل خلال الفترة التجريبية وذلك خلال الفترة الممتدة بين 2/1/2025 و 15/2/2025، وفي هذا الوقت من العام كانت درجات الحرارة العظمى والدنيا في منطقة التجربة كما هي مبينة في الشكل (3).



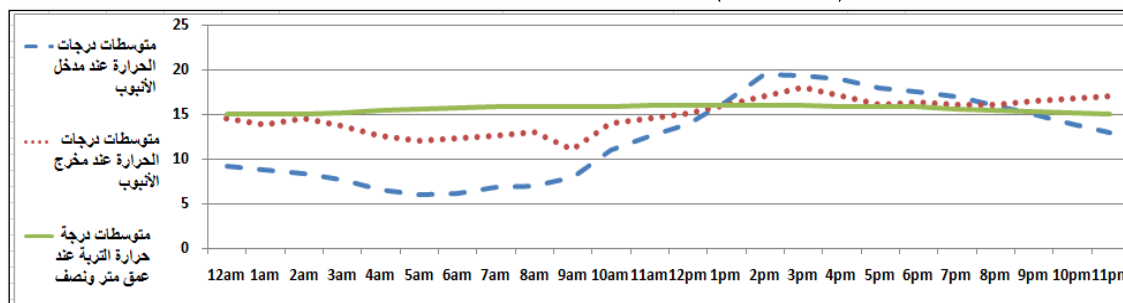
الشكل (3) يبين درجات الحرارة العظمى والدنيا خلال الفترة التجريبية.

أما الشكل (4) التالي فهو يمثل متوسطات درجة الحرارة خلال الفترة التجريبية عند كل من مدخل و مخرج الأنبوب ذي القطر (15.24cm)، بالإضافة إلى متوسطات درجات حرارة التربة والتي كانت شبه ثابتة تراوحت بين (15-16°C).



الشكل (4) يبين درجات متوسطات درجات الحرارة اليومية عند مدخل ومخرج الأنبوب ذي القطر 15.24cm ودرجة حرارة التربة على عمق 1.5m.

وفيما يلي الشكل (5) الذي يبين متوسطات درجات الحرارة عند مدخل ومخرج الأنبوب ذي القطر (5.08cm) خلال الفترة التجريبية، إضافة إلى متوسطات درجة حرارة التربة التي كانت شبه ثابتة وتراوحت بين (15-16°C).

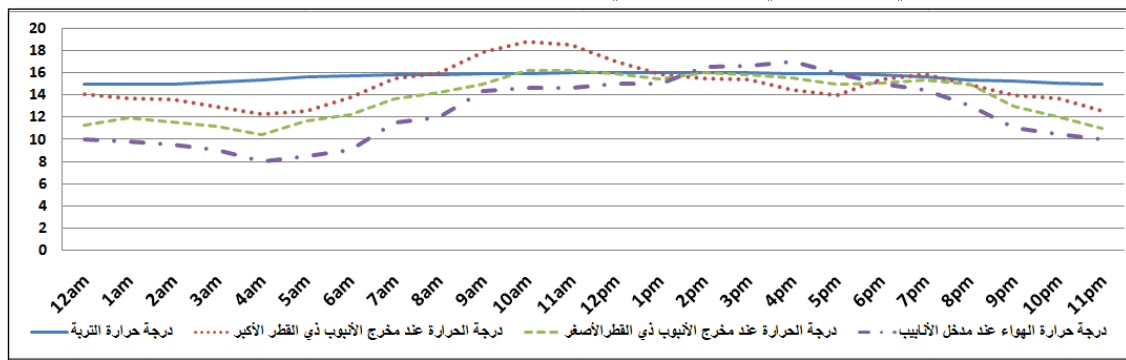


الشكل (5) يبين متوسطات درجات الحرارة اليومية عند مدخل ومخرج الأنبوب ذي القطر 5.08cm ودرجة حرارة التربة على عمق 1.5m.

يلاحظ من الأشكال السابقة أن المبادل قد عمل على التبريد والتدفئة خلال اليوم الواحد من خلال التبدلات الحرارية اليومية.

حيث يمكن تقسيم اليوم بحسب ذلك إلى ثلاث فترات منذ الساعة الثانية عشرة في منتصف الليل حتى منتصف النهار كان المبادل الحراري قد عمل على رفع درجة حرارة الهواء وتسخينه (تدفئة)، أما منذ ساعات الظهر المتأخرة وحتى ساعات المساء الأولى فكانت درجات الحرارة عند مخرج الأنبوب في كلا المبادلين أقل منها عند المدخل أي أن النظام عمل كمبرد (تبريد)، ثم عاد ليعمل على تدفئة الهواء ورفع درجة حرارته حتى منتصف الليل.

لدراسة تأثير قطر الأنبوب المستخدم في عملية التبادل الحراري تم اختيار اليوم التمثيلي للفترة المدروسة و هذا اليوم تم إيجاده عن طريق حساب مجموع الفروق التربيعية بين متوسطات درجات الحرارة الخارجية لكل ساعة من اليوم على مدار الفترة التجريبية ودرجات الحرارة الخارجية لكل يوم عند نفس التوقيت، فيكون اليوم ذو المجموع الأقل هو اليوم التمثيلي، وكان اليوم الموافق لليوم التمثيلي هو الثاني والعشرين من فترة التجربة وكان (23\1\2025). أما درجات حرارة الهواء عند مدخل ومخرج كل من المبادلين و درجة حرارة التربة عند عمق متر ونصف فكانت كما هي موضحة في المخطط التالي، (الشكل 6).



الشكل (6) يبين درجات حرارة الهواء عند مدخل الأنبوب الأكبر (15.24cm)

والأصغر (5.08cm) ومخارجها ودرجة حرارة التربة على عمق متر ونصف خلال اليوم التمثيلي.

يلاحظ من الشكل (6) أنه وبنسبة تبدلات الحرارة اليومية أن كلا المبادلين قد عمل على تدفئة الهواء ورفع درجة حرارته من الساعة الثانية عشر بعد منتصف الليل وحتى الساعة الواحدة ظهراً ليبدأ بتبريد الهواء وخفض درجة حرارته نتيجة لوصول درجة حرارة الهواء الخارجي إلى أعلى مستوياتها خلال هذا اليوم خلال الفترة بين الواحدة والسادسة عصراً ليعاود بعد الساعة السادسة للعمل على تدفئة الهواء ورفع درجة حرارته حتى منتصف الليل، ليتم ذلك من خلال التبادل الحراري بين التربة المحيطة بالأنابيب على عمق متر ونصف والهواء المار ضمن الأنابيب.

خلال عمل المبادلين كانت متوسطات درجات الحرارة عند المخرج لكل منهما كما هي موضحة في

الجدول التالي.

الجدول (1): متوسطات درجات الحرارة عند مداخل ومخارج أنبوبي المبادلين الحراريين

متوسط درجات الحرارة عند مخرج الأنبوب		متوسط درجات الحرارة عند مدخل الأنبوب		التوقيت
للقطر 5.08cm	للقطر 15.24cm	متوسط درجات الحرارة عند مداخل ومخارج أنبوبي المبادلين الحراريين		
13.17	15.59	11.22		12am – 12pm

15.47	15.12	16.02	1pm – 6pm
13.26	14.22	11.78	12am –7pm

من الجدول أعلاه نجد أن المبادل الحراري ذي الأنبوب بقطر (15.24cm) كان أكثر كفاءة في رفع درجة حرارة الهواء كما في خفض درجة حرارته من المبادل ذي الأنبوب بقطر (5.08cm), وهذا يتعارض مع نتائج الدراسات المرجعية السابقة حيث أن القطر الأصغر كان أكثر كفاءة في عمل المبادل الحراري (Bisoniya, 2015) & (Morshed et al, 2022), إلا أن هذه النتيجة يمكن إرجاعها إلى طبيعة التربة التي تم فيها تنفيذ التجربة على عمق متر ونصف حيث أن دفن الأنابيب كان قد تم في تربة طينية على الرغم من أن عمليات الحفر والتحضير للتجربة ودفن الأنابيب كان خلال شهر آب من عام 2024. وهذا بدوره يتفق مع دراسة سابقة تم تنفيذها في محافظة البصرة جنوب العراق للتحكم بدرجة الحرارة في حظيرة دواجن حيث أن ترطيب التربة صناعياً حول المبادل الحراري قد حسن من أداء المبادل في كل من التدفئة والتبريد (Morshed et al, 2018).

فالمبادل بأنبوب ذو القطر (15.24cm) قد عمل على رفع درجة حرارة الهواء بمقدار (38.9%), (20.7%) خلال فترتي التدفئة في اليوم الواحد, في حين أن المبادل الآخر ذي القطر الأصغر قد رفع درجة حرارة الهواء ضمن البيت المحمي بمقدار (17.38%), (12.56%) خلال فترتي التدفئة, أما خلال عملية التبريد من الساعة الواحدة ظهراً حتى السادسة مساءً فكانت نسبة التبريد (5.6%) بالنسبة للمبادل ذو القطر الأكبر, في حين كانت من أجل المبادل ذو القطر الأصغر (3.4%).

7- الاستنتاجات:

من خلال التجربة وما تقدم نجد أن :

- أثناء التدفئة عند استخدام أنبوب بقطر (15.25cm), ارتفعت درجة حرارة الهواء حوالي (38.9%) خلال فترة التدفئة الأولى, وحوالي (20.7%) خلال الفترة الثانية, أما عند استخدام القطر (5.08cm) كان الارتفاع في درجات الحرارة أقل فخلال الفترة الأولى كان (17.38%), وفي الثانية (12.56%).
- ومن أجل أداء التبريد فقد أظهر المبادل فعالية أكبر عند استخدام القطر الأكبر حيث كان الانخفاض في درجات الحرارة (5.6%) ما يعادل ($0.9C^{\circ}$), ومن أجل المبادل بالقطر الأصغر كان هذا الانخفاض حوالي (3.4%) أي بحدود ($0.55C^{\circ}$).

8- التوصيات:

- يمكن استخدام المبادل الحراري من أجل التحكم في درجة حرارة البيوت المحمية في المنطقة الساحلية حيث أنه حافظ على درجات حرارة مستقرة مناسبة للزراعات المحمية خلال فترة التجربة وهي تعتبر من الفترات الصعبة نوعاً ما خلال فصل الشتاء.
- إجراء أبحاث أخرى لأنظمة المبادل الحراري (هواء-أرض) بأنابيب ذات أطوال وأقطار أخرى, وعلى أعماق مختلفة.

9- قائمة المراجع:

1. Abdel-Ghany, A. M., Al-Helal, I. M., Alsadon, A., Ibrahim, A., & Shady, M. (2022). Measuring and predicting the in-ground temperature profile for geothermal energy systems in the desert of arid regions. *Energies*, 15(19), 7268.
2. Bharadwaj, S. S., & Bansal, N. K. (1981). Temperature distribution inside ground for various surface conditions. *Building and Environment*, 16(3), 183-192.
3. Bisoniya, T. S. (2015). Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, 3, 1-10.
4. Hegazy, A., Subiantoro, A., & Norris, S. (2021, November). Closed greenhouse heating in an arid Egyptian winter using earth-air heat exchangers. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 85673, p. V011T11A077). American Society of Mechanical Engineers.
5. Janssens, A., & De Paepe, M. (2020). Design of earth-air heat exchangers. In *Research in Building Physics* (pp. 835-842). CRC Press.
6. Morshed, W., Leso, L., Conti, L., Rossi, GT., Simonini, S., & Barbari, M. (2018). Cooling performance of earth-to-air heat exchangers applied to a poultry barn in semi-desert areas of south Iraq. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 47-53.
7. Morshed, W., Abbas, L., & Nazha, H. (2022). Heating performance of the PVC earthair tubular heat exchanger applied to a greenhouse in the coastal area of west Syria: An experimental study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 27, 101000.
8. Sakhri, N., Menni, Y., Ameer, H., & Chamkha, A. J. (2021). Experimental study of a stand-alone earth to air heat exchanger for heating and cooling in arid regions. *Journal of Thermal Engineering*, 7(5), 1206-1215.
9. Sukhija, A., & Sharma, A. (2021). Design studies on horizontal and vertical configuration of ground earth heat exchanger. *Journal of Thermal Engineering*, 8(3), 373-390.
10. Verma, M., Bansal, V., & Rana, K. (2020). Development of passive energy source as earth air pipe heat exchangers (eaphe) system-a review. *Journal of Thermal Engineering*, 6(5), 651-676.