الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كليه الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الميكانيك العام

تطوير واختبار مبادل أنبوبي حلزوني لمضخة جيوحرارية وفق الشروط المناخية لمدينة دمشق

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية اختصاص هندسة التبريد

إعـــداد
م. أحمـد غريب عمايـري

إشراف
أ.د.م. وجيه محمد خير ناعمة

دمشق 2022

عقدت في تمام الساعة الحادية عسرة من يوم الاثنين 2022/9/5 لجنة الحكم على أطروحة الدكتوراه

تطوير واختبار مبادل أنبوبي حلزوني لمضخة جيوحرارية وفق الشروط المناخية لمدينة دمشق

المشكلة استناداً إلى قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم /2856/ م.ب.د تاريخ 2022/6/6

والمؤلفة من السادة:

الأستاذ الدكتور **وجيه ناعمة**		عضواً مشرفاً
جامعة دمشق	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	اختصاص هندسة آلات التبريد
الأستاذ الدكتور **نصر ياسين**		عضواً
جامعة دمشق	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	اختصاص الترموديناميك
الأستاذ الدكتور **علي سلامي**		عضواً
جامعة دمشق	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	اختصاص تحويل الطاقة والقياسات الحرارية
الأستاذ الدكتور **عاطف عامر**		عضواً
جامعة دمشق	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	اختصاص آلات وأجهزة التبريد وأنظمة تكييف الهواء
الأستاذ المساعد الدكتور **محمد باكير**		عضواً
جامعة البعث	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية	اختصاص الترموديناميك وانتقال الحرارة

وقد تمت التعديلات وفق ما طلب السادة أعضاء لجنة الحكم

الأستاذ الدكتور	الأستاذ الدكتور	الأستاذ الدكتور	الأستاذ الدكتور	الأستاذ المساعد الدكتور
وجيه ناعمة	نصر ياسين	علي سلامي	عاطف عامر	محمد باكير

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أوالأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).

2. أنه لايوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية الهربية السورية.

الاسم والتوقيع

م. أحمد غريب عمايري

فهرس المحتويات

فهرس الأشكال التوضيحية	1
فهرس الجداول	5
قائمة الاختصارات والمصطلحات والرموز العلمية	6
المستخلص	9
الإطار العام للبحث	11
1. مقدِّمة	11
2. بعض الدراسات السابقة	12
3. مشكلة البحث	17
4. هدف البحث	17
5. أهمية البحث	17
6. مسوغات البحث	18
7. محددات البحث	18
8. حدود البحث	18
9. منهج البحث وأدواته	18
10. هيكل الأطروحة	19
الفصل الأول: المضخة الجيوحرارية والطاقة الجيوحرارية	20
1.1 تمهيد	20
1.2 آلة التبريد العاملة وفق دورة المضخة الحرارية	21
1.3 المضخة الحرارية	22
1.4 تصنيف المضخات الحرارية وفقاً لطبيعة المصدر والمستهلك الحراري	22
1.5 المصادر والمصارف الحرارية للمضخات الحرارية	22
1.6 مميزات استخدام المضخة الحرارية	24
1.7 الطاقة الجيوحرارية	25
1.8 تصنيف المصادر الجيوحرارية	26
1.9 الطرق والمنظومات المستخدمة للاستفادة من المصادر الجيوحرارية	26
الفصل الثاني: خوارزمية تصميم المبادل الجيوحراري	40
2.1 تمهيد	40
2.2 المبادل الحراري المدروس	40

2.3 علاقات انتقال الحرارة في المبادل المدروس	41
2.4 توازن الطاقة	50
2.5 علاقات الحمل الحراري	59
2.6 علاقات انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن الأنبوب	62
2.7 علاقات انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن التربة	65
2.8 علاقات حساب الأبعاد التصميمية للمبادل الجيوحراري الحلزوني	70
2.9 علاقات الضياعات الهيدروليكية والمفاقيد في المبادل المدروس	71
2.10 حساب الطول الإضافي اللازم للمبادل الجيوحراري الحلزوني	71
2.11 علاقات حساب تغير درجة حرارة التربة مع التشغيل وكتلة التخزين اللازمة للمبادل	74
2.12 المعطيات التصميمية	76
الفصل الثالث: تصميم المبادل الجيوحراري	77
3.1 تمهيد	77
3.2 تصميم مبادل جيوحراري عامل في دارة مضخة جيوحرارية	77
3.2.1 دراسة تأثير قطر وطول المبادل في الاستطاعة الهيدروليكية اللازمة	89
3.2.2 دراسة تأثير قطر أنبوب المبادل في معامل انتقال الحرارة الكلي وحجم المبادل	91
3.2.3 استنتاج القطر الأمثل للمبادل	91
3.2.4 دراسة تغير درجة الحرارة الشهري للتربة وعلاقاتها مع المسافة عن أنبوب المبادل	93
3.2.5 كمية الحرارة التي يطرحها المبادل وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل	94
3.2.6 معامل انتقال الحرارة الكلي وعلاقته مع البعد عن أنبوب المبادل	95
3.3 تغير درجة حرارة التربة نتيجة التشغيل المستمر والدوري	96
3.4 دراسة التدرج الحراري ضمن التربة بطريقة العناصر المنتهية صيفاً للمبادل الجيوحراري	100
3.5 دراسة التدرج الحراري ضمن التربة بطريقة العناصر المنتهية شتاءً للمبادل الجيوحراري	101
3.6 سرعة وتسارع تغير درجة الحرارة ضمن التربة عند بعد 60 سم عن المبادل	102
الفصل الرابع: المحاكاة الحاسوبية	105
4.1 تمهيد	105
4.2 الهدف من الحل العددي	105
4.3 مبدأ عمل برامج المحاكاة الحاسوبية (ANSYS (CFX	105
4.4 مراحل الدراسة العددية	106
4.5 نتائج الدراسة العددية	110

4.5.1 نتائج الدراسة العددية صيفاً	110
4.5.2 نتائج الدراسة العددية شتاءً	116
الفصل الخامس: الدراسة التجريبية	124
5.1 تمهيد	124
5.2 وصف وحدة الاختبار	124
5.3 توصيف أجهزة القياس ودارة الحساسات	126
5-4 مبدأ العمل	128
5.5 نتائج الدراسة التجريبية	130
5.5.1 تحليل نتائج الدراسة التجريبية صيفاً لدارة المضخة الحرارية	130
5.5.2 تحليل نتائج الدراسة التجريبية شتاءً لدارة المضخة الحرارية	135
5.6 معوقات الدراسة التجريبية	137
5.7 أسباب الاختلاف بين طرق الحلِّ العددية والتجريبية	138
الفصل السادس: نتائج الدراسة	139
6.1 نتائج الدراسة	139
6.2 الاستنتاجات	140
6.3 التوصيات	140
المراجع	142
الأبحاث المنشورة	148

فهرس الأشكال التوضيحية

الشكل (1) توزع الطاقة الشمسية	11
الشكل (2) مقارنة درجة حرارة التربة مع درجة حرارة الهواء الخارجي	12
الشكل (1-1) الدورات العكسية في مخطط T – s	20
الشكل (1-2) المقارنة بين الدورات العكسية المختلفة باستخدام دورة كارنو العكسية المثالية	21
الشكل (1-3) مبدأ عمل آلة التبريد والمضخة الحرارية	22
الشكل (1-4) مقارنة أنظمة التدفئة مع المضخة الحرارية	24
الشكل (1-5) المنظومة الجيوحرارية غير المباشرة لتوليد الكهرباء	27
الشكل (1-6) مخططاً رمزياً لمنظومة المضخة الجيوحرارية في وضعي التدفئة والتبريد	28
الشكل (1-7) مخطط رمزي للمبادل الحراري الأرضي المغلق	29
الشكل (1-8) مبادل حرا ري أرضي أفقي مغلق ذو أنبوب واحد	31
الشكل (1-9) مبادل حراري أرضي أفقي مغلق ذو أنابيب متعددة	31
الشكل (1-10) مبادل حراري أرضي أفقي مغلق ذو أنابيب حلزونية	32
الشكل (1-11) مخطط رمزي لمنظومة مضخة جيوحرارية ذات أداء مزدوج وتمدد مباشر	33
الشكل (1-12) مخطط رمزي لمنظومة من هذا النوع مع بئر حقن	34
الشكل (1-13) مبادل حراري حلزوني مغمور في بحيرة	36
الشكل (1-14) منظومة بئر عمودي	37
الشكل (2-1) مبادل حراري أنبوبي حلزوني	41
الشكل (2-2) تطور الطبقة الهيدروديناميكية الصفائحية في أنبوب دائري	42
الشكل (2-3) توازن القوى على عنصر تفاضلي لجريان صفائحي مستقر ضمن أنبوب	44
الشكل (2-4) عامل الاحتكاك لجريان متطور في أنبوب دائري	46
الشكل (2-5) استقرار الطبقة الحدية الحرارية في أنبوب دائري	47
الشكل (2-6) التغير في معامل انتقال الحرارة بالحمل على طول الأنبوب	50
الشكل (2-7) عنصر تحكم في الجريان داخل الأنبوب	51
الشكل (2-8) تغير درجة الحرارة المحورية لانتقال الحرارة ضمن الأنبوب	53

الشكل(9-2) التدفق الحراري بين السائل خارج الأنبوب والسائل المار عبره	54
الشكل (10-2) التوازن الطاقي الحراري لعنصر تفاضلي لجريان مستقر صفائحي ضمن أنبوب	56
الشكل (11-2) نتائج طول منطقة الدخول للجريان الصفائحي في أنبوب دائري	58
الشكل (12-2) مجال الموصلية الحرارية لمواد مختلفة عند شروط الحرارة والضغط ذاتها	62
الشكل (13-2) العلاقة بين درجة الحرارة والموصلية الحرارية	63
الشكل (14-2) انتقال الحرارة أحادي البعد ضمن أنبوب	64
الشكل (15-2) جهاز قياس الخواص الحرارية للتربة	67
الشكل (16-2) درجة حرارة الأرض في ولاية ألاباما الأمريكية	68
الشكل (17-2) خوارزمية تصميم المبادل	73
الشكل (18-2) خوارزمية حساب الكتلة التخزينية للمبادل	75
الشكل (1-3) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل والاستطاعة الهيدروليكية	89
الشكل (2-3) العلاقة بين طول المبادل والاستطاعة الهيدروليكية	90
الشكل (3-3) العلاقة بين طول المبادل والاستطاعة الهيدروليكية عند تباعدات مختلفة	90
الشكل (4-3) العلاقة بين طول المبادل ومعامل انتقال الحرارة الكلي	91
الشكل (5-3) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل وحجم المبادل	91
الشكل (6-3) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل والكلفة الإجمالية	92
الشكل (7-3) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل ومعامل الطول الإضافي	92
الشكل (8-3) العلاقة بين النسبة $\frac{R_c}{r_i}$ ومعامل الطول الإضافي	93
الشكل (9-3) العلاقة بين تغير درجة الحرارة الشهري للتربة مع المسافة عن أنبوب المبادل	94
الشكل (10-3) كمية الحرارة التي يطرحها المبادل وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل	95
الشكل (11-3) معامل انتقال الحرارة الكلي وعلاقته مع البعد عن أنبوب المبادل	95
الشكل (12-3) المتغيرات المدروسة وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل	99
الشكل (13-3) التدرج الحراري كتابع للزمن والمسافة عن أنبوب المبادل صيفاً	100
الشكل (14-5) تغير درجة الحرارة بين الأنبوبين وفي مركز المبادل خلال فصل الصيف	101

الشكل (15-3) التدرج الحراري كتابع للزمن والمسافة عن أنبوب المبادل شتاءً	101
الشكل (16-5) تغير درجة الحرارة بين الأنبوبين وفي مركز المبادل خلال فصل الصيف	102
الشكل (17-3) سرعة تغير درجة الحرارة ضمن التربة عند بعد 60 سم عن المبادل	103
الشكل (17-3) تسارع تغير درجة الحرارة ضمن التربة عند بعد 60 سم عن المبادل	104
الشكل (1-4) مخطط صندوقي لعمل الـ Solver	106
الشكل (2-4) المبادل الحراري المدروس	107
الشكل (3-4) تقسيم المبادل الحراري إلى عناصر منتهية الأبعاد	108
الشكل (4-4) مرحلة الحل	110
الشكل (5-4) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة.	111
الشكل (6-4) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة (مقطع عرضي)	111
الشكل (7-4) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة مع تغير الزمن صيفاً	113
الشكل (8-4) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة	114
الشكل (9-4) تغير حمل المبادل مع الزمن	115
الشكل (10-4) تغير درجة حرارة خروج الماء مع الزمن	116
الشكل (11-4) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة شتاءً	117
الشكل (12-4) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة شتاءً (مقطع عرضي)	117
الشكل (13-4) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة مع تغير الزمن شتاءً	120
الشكل (14-4) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة.	121
الشكل (15-4) تغير حمل المبادل مع الزمن.	122
الشكل (16-4) تغير درجة حرارة خروج الماء مع الزمن.	123
الشكل (1-5) المبادل الجيوحراري	125
الشكل (2-5) مجموعة المقاييس المستعملة	128
الشكل (3-5) دارة المضخة الجيوحرارية	129
الشكل (4-5) مخطط رمزي للمنصة التجريبية	130
الشكل (5-5) قراءة حساسات درجة الحرارة للماء والتربة والهواء	131

الشكل (5–6) الحمل التبريد للغرفة مع الإشعاع الشمسي	131
الشكل (5-7) استطاعة المضخة الجيوحرارية مقارنة بحمل الغرفة	131
الشكل (5–8) درجات الحرارة عند مدخل الضاغط ومخرج المكثف	133
الشكل (5–9) زيادة التبريد في المكثف وكسر الجفاف عند مدخل المبخر	133
الشكل (5–10) استطاعة المضخة الجيوحرارية واستطاعة المبادل صيفاً	134
الشكل (5–11) استجابة المبادل الجيوحراري الحلزوني	134
الشكل (5–12) معامل الأداء صيفاً للمضخة الجيوحرارية كتابع للزمن	135
الشكل (5–13) تمثيل نقاط دورة المضخة الجيوحرارية شتاءً على مخطط الفريون R22	135
الشكل (5–14) كسر الجفاف عند مدخل المبخر شتاءً	136
الشكل (5–15) استطاعة المضخة الجيوحرارية واستطاعة المبادل صيفاً	136
الشكل (5–16) معامل الأداء للمضخة الجيوحرارية شتاءً	137

فهرس الجداول

الجدول (1–2) الموصلية والناشرية الحرارية للترب الرملية والطينية	66
الجدول (2–2) درجات حرارة الأرض لعدة مدن على عمق عشرة أمتار	69
الجدول (1–3) نتائج التصميم عند (d=15 mm)	78
الجدول (2–3) نتائج التصميم عند (d=20 mm)	80
الجدول (3–3) نتائج التصميم عند (d=25 mm)	82
الجدول (4–3) نتائج التصميم عند (d=30 mm)	84
الجدول (5–3) نتائج التصميم عند (d=35 mm)	86
الجدول (6–3) نتائج التصميم عند (d=40 mm)	88
الجدول (7–3) جدول النتائج لتغير درجة الحرارة	96
الجدول (8–3) الأبعاد التصميمية لمبادل جيوحراري عامل في دارة تكييف باستطاعة 1 طن	99
الجدول (1–4) أبعاد المبادل الجيوحراري الحلزوني المدروس	106
الجدول (2–4) الكود الخاص ببرنامج المحاكاة	109
الجدول (3–4) تغير درجة الحرارة في نقطة من مركز المقطع المدروس صيفاً	113
الجدول (4–4) تغير الحمل الحراري للمبادل الحراري مع تغير الزمن صيفاً	114
الجدول (5–4) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الجيوحراري مع تغير الزمن صيفاً	115
الجدول (6–4) تغير درجة الحرارة في نقطة من مركز المقطع المدروس شتاءً	121
الجدول (7–4) تغير الحمل الحراري المبادل الجيوحراري مع تغير الزمن شتاءً	122
الجدول (8–4) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الجيوحراري مع تغير الزمن شتاءً	123
الجدول (1–5) الأبعاد التصميمية لمبادل جيوحراري عامل في مضخة جيوحرارية باستطاعة 0.75 طن	125
الجدول (2–5) مواصفات أجهزة القياس المستخدمة	127
الجدول (3–5) بيانات التصميم للغرفة شتاءً وصيفاً	131

قائمة الاختصارات والمصطلحات والرموز العلمية

الاختصارات والمضطلحات باللغتين العربية والإنكليزية:

الاختصار	بالإنكليزية	بالعربية
GSHP	Ground Source Heat Pump	المضخة الجيوحرارية / المضخة الحرارية ذات المصدر الأرضي
GHE	Geothermal Heat Exchanger	مبادل حراري أرضي / مبادل جيوحراري
COP	Coefficient of Performance	معامل الأداء
HPs	Heat Pumps	مضخات حرارية
DX	Direct Expantion	تمدد مباشر
GCHP	Ground Coupled Heat Pump	منظومات المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج
VGCHP	Vertical Ground Coupled Heat Pump	المضخات الجيوحرارية الشاقولية ذات الأداء المزدوج
HDPE	High Density Polyethylene	البولي إيثيلين عالي الكثافة
HGCHP	Horizontal Ground Coupled Heat Pump	المضخات الجيوحرارية الأفقية ذات الأداء المزدوج
DXGCHP	Direct Expansion Ground Coupled Heat Pump	المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج والتمدد المباشر

GWHP	Ground Water Heat Pump	المضخات الجيوحرارية ذات المياه الجوفية
SWHP	Surface Water Heat Pump	المضخات الجيوحرارية ذات المياه السطحية
SCW	Standing column Well	الآبار العمودية
CAV	Constant Air Volume	الحجم الثابت للهواء

الرموز العلمية:

Q	كمية الحرارة	[W]
di	القطر الداخلي للأنبوب	[mm]
D_{turn}	قطر اللفة	[cm]
X	التباعد بين اللفات	[cm]
f	معامل الاحتكاك	–
Δp	انخفاض الضغط	[Pa]
P	الاستطاعة الهيدروليكية للضخ	[W]
U	معامل انتقال الحرارة الكلي	$[W/m^2.^oc]$
Per	محيط اللفة	[m]
N	عدد اللفات المطلوبة	No
L	طول المبادل الكلي	[m]
V_{turn}	حجم اللفة	$[m^3]$
V_{HX}	حجم المبادل	$[m^3]$
m	كتلة التربة	[kg]
C_s	السعة الإجمالية للتربة	[J/kg]

R_{eD}	عدد رينولدز	–
f	معامل احتكاك مودي	–
C_f	معامل احتكاك فاننع	–
$\dot{\forall}$	التدفق الحجمي	[m^3/h]
Pr	عدد براندل	–
h	معامل الانتقال الحراري بالحمل	[$W/m^2.^oc$]
T_∞	درجة حرارة التيار الحر للسوائل الخارجية	[^{o}c]
N_{u_D}	عدد نوسلت	–
k	معامل التوصيل الحراري	[W/m. ^{o}c]
$R_{t,cond}$	المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب	[m.C/ W]
K_S	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر التربة	[W/m. ^{o}c]
$F_{helical}$	معامل الطول الإضافي	–
C_S	السعة الإجمالية للتربة	[J/K]
m	كتلة التربة في المنطقة المحيطة بالمبادل	[kg]
ρ_{Soil}	كثافة التربة	[kg/m^3]

المستخلص

1- خلفية البحث

تستخدم المضخات الحرارية في الوقت الحالي بكثرة لتدفئة وتكييف المباني وتعتمد هذه الآلات على مبدأ دورة كارنو العكسية لاستخلاص الحرارة من سوية طاقية منخفضة ونقلها إلى سوية طاقية أعلى ويتم ذلك بمساعدة مصدر طاقة خارجي (الكهرباء غالباً). تعرف المضخات الحرارية الجيوحرارية GSHP على أنها المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي وتُؤمِّن تدفئة المباني وتسخين الماء بانتزاع الحرارة اللازمة من جوف الأرض وتُؤمِّن التبريد بعملية معاكسة ويتراوح التوفير في الطاقة المستهلكة في وضع التبريد بين 39%-20 وبين 47%-30 في وضع التدفئة كما يترتب على ذلك تقليل انبعاث الغازات الضارة بالبيئة حتى 65% مقارنة بالمضخات الحرارية التقليدية.

2- هدف البحث

- تصميم مبادل جيوحراري حلزوني في دارة المضخة الجيوحرارية
- ايجاد النموذج الأمثل للمبادل الجيوحراري الأنبوبي الحلزوني بما يتلاءم مع الشروط المناخية في مدينة دمشق
- تحليل أداء المبادل عددياً باستخدام برنامج ANSYS
- تنفيذ دارة اختبارية للمضخة الجيوحرارية المربوطة مع المبادل الجيوحراري المدروس في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق
- اختبار أداء المبادل الأنبوبي الحلزوني في منظومة المضخة الجيوحرارية
- اختبار أداء المضخة الجيوحرارية ومقارنتها مع الدارة التقليدية.

3- المواد والطرائق

سيتمُّ تصميم المبادل الجيوحراري المقترح وتحديد الأبعاد المثلى له وحجم الحفرة اللازمة لتوضع المبادل وسيؤخذ بالحسبان الشروط المناخية ومواصفات التربة في موقع تركيب المبادل باستخدام برنامج Visual Basic وستنفذ عملية النمذجة العددية باستخدام برنامج ANSYS 18.2 وسيتم اتباع المنهج التجريبي من خلال تنفيذ منصة اختبارية لربط المبادل الجيوحراري بدارة مضخة حرارية منزلية لاختبار أداء المبادل واختبار أداء المضخة الجيوحرارية ومقارنتها مع الدارة التقليدية.

4- النتائج العملية

إيجاد حلٍّ بديل يتمثل بالمبادل الجيوحراري الأنبوبي الحلزوني من أجل التغلب على أعماق الحفر الكبيرة التي يتطلبها المبادل الجيوحراري الشاقولي والتغلب على المساحات الشاسعة من الأراضي التي يتطلبها المبادل الجيوحراري الأفقي وتوفير الطاقة الكهربائية المستجرة والمصروفة على التكييف (صيفاً وشتاءً) وذلك باستخدام منظومات المضخات الجيوحرارية عوضاً عن الدارات التقليدية وتوطين تقانة تصميم وتصنيع المبادلات الجيوحرارية

5- الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث

الاستفادة من طاقة جوف الأرض والتي تُعدُّ أحد مصدر الطاقات المتجددة في عمليات التكييف (صيفاً وشتاءً) للمنشآت المنزلية والتجارية إذ تتميز الأرض بانخفاض درجة حرارتها صيفاً وارتفاعها شتاءً واستقرارها على مدار اليوم والفصل مقارنة بدرجة حرارة الهواء الخارجي وذلك للطبقات السطحية والعميقة على حد سواء وتقوم الطبقات السطحية بعزل الطبقات الأعمق عن الهواء الخارجي مما يسبب استقرار درجة حرارة هذه الطبقات على مدار العام ومن ثُمَّ الحصول على وفر حقيقي في مصروف الطاقة الكهربائية المستجرة بهدف التكييف (صيفاً وشتاءً) والتقليل من انبعاثات غاز CO_2

6- الكلمات المفتاحية

طاقة جوف الأرض، المضخة الجيوحرارية، المبادلات الجيوحرارية، مبادل حراري أنبوبي حلزوني، الكتلة التخزينية للمبادل، تكييف الهواء، معامل الأداء، تحليل أداء، دراسة تجريبية

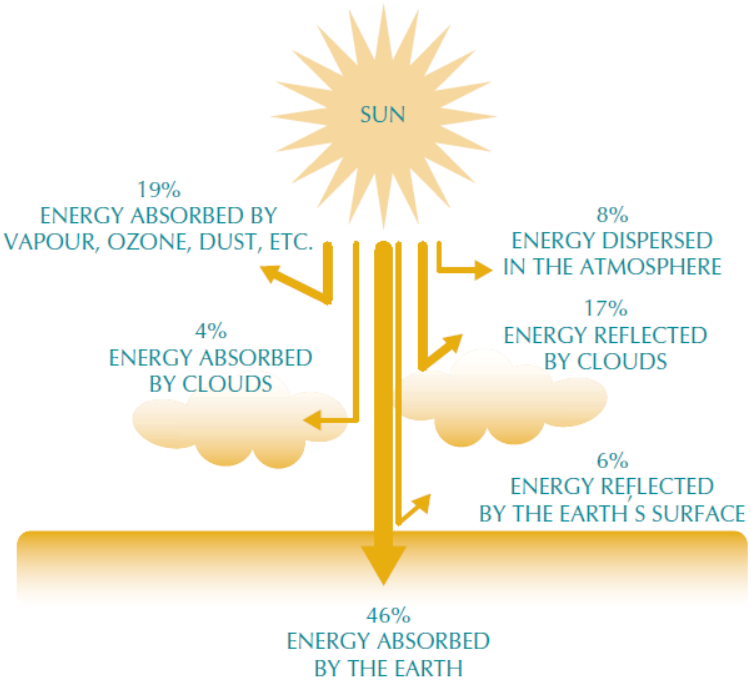
الإطار العام للبحث

Disertation Guidelins

1. مقدِّمة

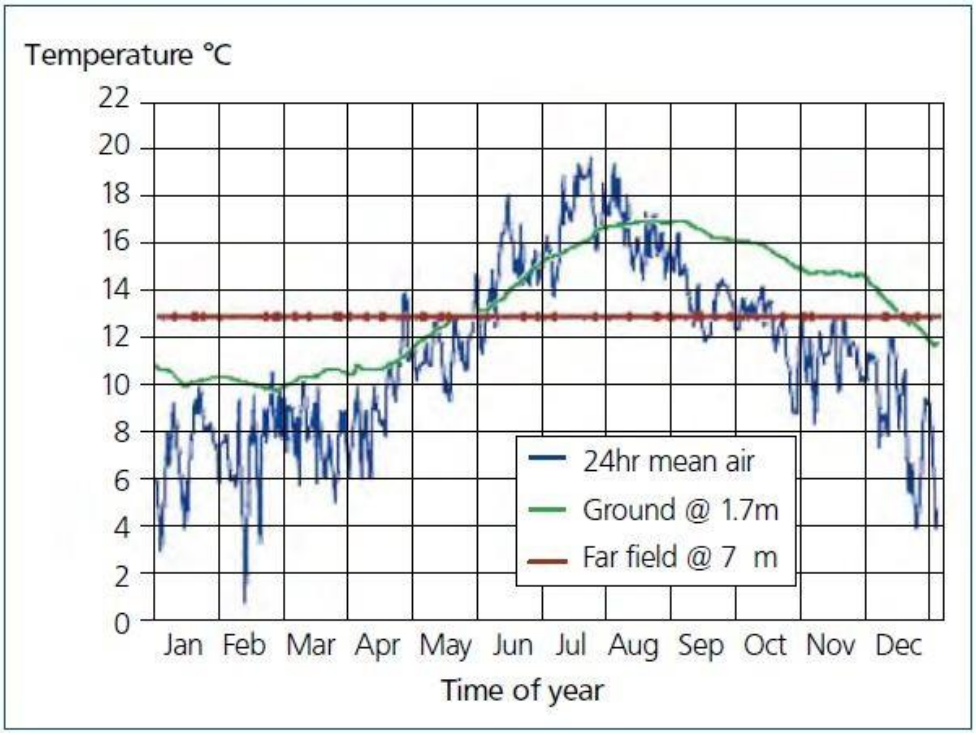
تقوم منظومات تكييف الهواء بالحفاظ على درجة حرارة مريحة للإنسان داخل الأبنية المكيفة ويستلزم ذلك صرف طاقة يتمُّ تأمينها عن طريق الكهرباء أو الوقود الأحفوري. تمتص الأرض46% من الطاقة الشمسية التي تسقط على الغلاف الجوي ويمكن استخدام هذه الطاقة الهائلة لتغطية احتياجات منظومات التكييف كما هو موضح بالشكل 1.

تُستخدم المضخات الحرارية في الوقت الحالي بكثرة لتدفئة وتكييف المباني وتعتمد هذه الآلات على مبدأ دورة كارنو العكسية لاستخلاص الحرارة من وسط معين ونقلها إلى وسط آخر ويتم ذلك بمساعدة مصدر طاقة خارجي (الكهرباء غالباً). تُعرَّفُ المضخات الحرارية الجيوحرارية GSHP (Ground Source Heat Pump) على أنَّها المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي وتؤمن تدفئة المباني وتسخين الماء بانتزاع الحرارة اللازمة من جوف الأرض وتُؤمِّن التبريد بعملية معاكسة.



الشكل (1) توزع الطاقة الشمسية [43]

تتميز الأرض بانخفاض درجة حرارتها صيفاً وارتفاعها شتاءً مقارنة بدرجة حرارة الهواء الخارجي وذلك للطبقات السطحية والعميقة على حدٍّ سواء وتقوم الطبقات السطحية بعزل الطبقات الأعمق عن الهواء الخارجي مما يسبب ثبات درجة حرارة هذه الطبقات على مدار العام كما هو مبيَّن بالشكل 2. نتيجة لهذه المميزات ينخفض الاستهلاك الكهربائي ويرتفع مردود منظومات المضخات الجيوحرارية مقارنة بالمنظومات التقليدية.



الشكل (2) مقارنة درجة حرارة التربة مع درجة حرارة الهواء الخارجي [44]

2. بعض الدراسات السابقة

يُعدُّ نظام المضخة الحرارية ذات المصدر الأرضي (Ground Source Heat Pump) والذي يُشار إليه اختصاراً (GSHP) من التقنيات الواعدة في مجال تدفئة وتبريد الأبنية حول العالم. وبالرغم من ذلك نجد أنَّ هذه التقنية لاتزال غير متوفرة في سورية، إلا أنه حان الوقت لبدء اختبار وتجريب هذه التقنية في بلدنا.

تتميز سورية بمناخها المتوسطي الذي يزخر بمستوى كبير من موارد الطاقة الشمسية. إذ تحصل مدينة دمشق العاصمة على ما متوسطه 4.8 $kW.h/m^2.day$ في اليوم بمجموع ساعات شمس تصل إلى 3500 ساعة في السنة بمعدل 350 يوماً مشمساً في السنة. وبما أن فصل الصيف الذي يستمر حوالي ستة أشهر يتميز

بمناخه الحار، نجد أن الاعتماد الأكبر في توليد الطاقة المستخدمة لتكييف الأبنية يأتي من مصادر الطاقة الكهربائية بنسبة تصل إلى أكثر من ثلث مجموع إنتاج الطاقة في البلد.

ومع النهضة العمرانية الكبيرة التي تشهدها مدن سورية، وعدم أخذ المتطلبات البيئية وتطور معايير المعيشة بالحسبان، ستبقى هذه النسبة لاستهلاك الطاقة الكهربائية تسير في منحى تصاعدي بالضرورة. وستشكل عبئاً كبيراً على البيئة من خلال زيادة مستويات التلوث، بالإضافة إلى تكلفتها المرتفعة التي قد لا يكون الاقتصاد الوطني قادراً على استيعابها.

لذلك فإنه من الضروري أن نعمل على تطوير استخدام الطاقة الحرارية عن طريق العمل بأنظمة المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي. وعلى اعتبار أنَّ الطاقة الحرارية من مصادر الطاقة الصديقة للبيئة، نجد أنَّ من أشهر تطبيقاتها، استخدامها في تكييف الأبنية السكنية والتجارية باستخدام أنظمة (المضخة الحرارية ذات المصدر الأرضي) GSHP [1]. وتتألف هذه الأنظمة من مضخة حرارية يرافقها مبادل حراري أرضي (Ground Heat Exchanger) (GHE)، ونجد أنَّ قيمة معامل الأداء الخاص بهذه التقنية أعلى من معامل الأداء في أنظمة تكييف الهواء التقليدية، لأنه يعتمد على استخدام الأرض والتي تملك بدورها درجة حرارة ثابتة على اعتبار أنَّ الحرارة تستمر بالزيادة مع النزول إلى الأسفل. [2]

ويمكن تحسين قيم معامل الأداء الخاصة بالأنظمة الحرارية عن طريق تحسين المنطقة التي يوجد فيها مبادل الحرارة ذو المصدر الأرضي لتحقيق أقصى استفادة ممكنة منه [3]. إن استخدام مبادلات الحرارة ذات المصدر الأرضي كجزء من أنظمة المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي سيسهم في تخفيض معدلات استهلاك الطاقة في الأبنية [4].

وقد يتأثر أداء مبادل الحرارة الأرضي الحراري بعدد من العوامل مثل الخواص الحرارية المحددة لهذا المبادل [5] (الناقلية – معامل تبادل الحرارة.....) الطول، العمق، معدل التدفق الكتلي ودرجة حرارة مدخل المياه. ويمكن أن تساهم عملية ارتشاح المياه الجوفية بالحدِّ من تراكم أو تكديس الحرارة حول المبادلات الحرارية الارضية، ويمكن أن تُحسِّن من أداء المبادلات الحرارية كما يمكنها أيضاً أن تسهم في زيادة كمية النقل الحراري في التراكم المتري حتى 4 أو 5 مرات أعلى مقارنة بحالة التوصيل الاعتيادي [6].

قام كلٌّ من لي ولاي Li – Lai [7] بالعمل على تطوير دراسة بحثية حول الحرارة بناء على التابع (G) المستنتج لتحديد الاستجابة الحرارية كي يكونوا قادرين على تحليل أثر الاختلاف بين خواص المواد داخل

وخارج الآبار الارتوازية على أداء مبادلات الحرارة الأرضية. وقد قام كلٌّ من فوسا ومينشيو (Fossa – Minchio) [8] باختبار أثر هندسة البئر الارتوازي والحمل الحراري للأرض على الاستجابة الحرارية الساعية لأنظمة المضخات الجيوحرارية. وقد قام كونجيدو (Congedo et al.) بإجراء تحفيز بواسطة ديناميكية حركة السوائل المحوسبة (CFD) لتحليل ثلاثة معطيات هندسية خاصة بمبادل الحرارة الأرضي الأفقي (خطي، حلزوني أفقي، حلزوني شاقولي) [9].

إنَّ التحليل القائم على القانون الثاني للترموديناميك يُقدِّم معلومات تتعلق بأداء النظام أكثر بكثير مما يُقدِّمه تحليل الطاقة الاعتيادي. [10] إذ إنَّه يُمثِّل كمية حركة أو ديناميكية حرارية تكشف عن معظم الطاقة المتوافرة في النظام. [11] ، وفي الهندسة الحرارية نجد الكثير من الدراسات التي تُقدِّم تحليلاً للطاقة الخاصة بمبادلات الطاقة الجيوحرارية. وقد قام كلٌّ من أوزنجر وهيباسلي [12] بمراجعة الكثير من الدراسات التي قدمت تحليلات خاصة بأنظمة (GSHP) حول العالم. وقد راجع هيباسلي [13] بشكل مكثف تحليل قائم على القانون الثاني للترموديناميك وتقييم أداء عدد كبير من مصادر الطاقة المتجددة للمرة الأولى.

وفي العقدين الماضيين حققت تكنولوجيا المضخة الجيوحرارية تطوراً كبيراً وازداد الاهتمام بها على المستوى العالمي. وبحسب تقارير صادرة عن مؤتمر الحرارة الدولي المنعقد عام 2005، نجد أنَّ عدد الوحدات المركبة من المضخات الجيوحرارية واستطاعتها قد ارتفع بين عامي 2000 و2005 من 198% إلى 272% على التوالي. وأنَّ العدد الكلي لعمليات تركيب هذه الأنظمة قد تجاوز 170ألف في 33 دولة حول العالم مع نهاية العام 2005. [14]. إنَّ التفاوت الحاصل بين أنظمة المضخات الجيوحرارية وما تقدمه من فعالية كبيرة في توليد الطاقة مقارنة بالتطبيقات التقليدية القديمة أدت إلى استمرار تزايد أعداد الوحدات التي يتم تركيبها سنوياً لاستخدامها في تطبيقات تكييف الأبنية والمنشآت. [15]. وفي التعمق بهذا المجال، نجد أنَّ الكثير من الأبحاث قد أُجريت لاختبار أنظمة المضخات الحرارية الأرضية [23–16]. وفي دراسة محاكاة حديثة استخدمت برنامج (TRNSYS) أثبت إنتيشيف (Entechev et al.) [24] أنَّ أنظمة المضخات الجيوحرارية، وأنظمة المضخات الحرارية الأرضية الهجينة مع منظومات خلايا الوقود قد حقَّقت توفيراً كبيراً وحقيقياً بمعدلات استهلاك الطاقة وصل إلى 39 % و 24 % على التوالي، مقارنة بالمنظومات التقليدية التي تحوي على مبرد ومسخن. وقد تفحَّص فلوريدز (Florides et al.) [25] في دراسة محاكاة أجراها، أثر درجة الحرارة والخواص الحرارية للأرض على مبادلات الحرارة الأرضية الأفقية والشاقولية.

كما وبحث بينلي (Benli) [26] في دراسة تجريبية أجراها مقارنة بالأداء بين أنظمة المضخات الحرارية الأفقية وأنظمة المضخات الحرارية الشاقولية في تدفئة البيوت الخضراء. وجد الباحث عند نهاية التجربة أنّ معدلات COP_{hp} و COP_{SYS} في أنظمة المضخات الحرارية الشاقولية أعلى منها في أنظمة المضخات الحرارية الأفقية ولكن النوع الأول يتطلب تكاليف تأسيسية أعلى. كما درس باكيرسي (Bakirci) [27] في بحث تجريبي أداء أنظمة المضخات الجيوحرارية الأفقية بطريقة تجريبية بحتة. وقد أشارت النتائج التجريبية إلى أنَّ متوسط معامل الأداء للمضخة الجيوحرارية وأنَّ جميع قيم معاملات الأداء الخاصة بالنظام كانت تتراوح بين 3.0 و 2.6 في أبرد الأشهر في فصل الشتاء.

وعندما يتمُّ نقل الماء في مبادلات الحرارة الأرضية, في أنظمة المضخات الجيوحرارية، إلى الماء الموجود في الأبنية، تُسَّمى حينها مضخات الحرارة بالمضخات الحرارية ماء/ماء (water–to–water HPs) ونجد أنَّ درجة الاستفادة من هذه المضخات تكون كما يلي COP = 3.0– 5.0 ، ومن ثُمَّ فإنَّ $1\ kW_e$ من الطاقة الكهربائية المصروفة على عمل مضخة جيوحرارية يعطي من 3.0 وحتى 5.0 kW_h من الطاقة الحرارية. وتزداد قيمة معامل الأداء عبر تخفيض درجة حرارة سائل التغذية في المضخة الحرارية. [28]

لقد أجرى جيو (Guo) [29] مقارنة اقتصادية وتقنية للتوسع الكبير الحاصل بالمصادر الأرضية والعقد الثانوية المرافقة لنظام المضخات الجيوحرارية (DX–GSPH. SL GCHP) الخاصة بتبريد الأبنية السكنية. كما تابع كوشكون (Coskun) [30] التحقق من الأداء التجريبي للضواغط الأفقية الأرضية الخاصة بآلات التبريد والتكييف، وتأثير المعاملات والقياسات المتنوعة في أداء الأنظمة التي تمَّ فحصها.

كما وطوَّر كلٌّ من لي ولام (Lee – Lam) [31] نموذجاً مبسطاً ثلاثي الأبعاد متناهي الاختلاف، خاصاً بكتلة تخزينية أسطوانية واحدة في أنظمة المضخات الحرارية الأرضية. كما قام المؤلفان بدراسة أثر الخواص الحرارية للمناطق المختلفة في أداء الكتلة التخزينية. وقد درس كلٌّ من إيسن وإينالي (Esen – Inalli) [32] الاستجابة الحرارية لأنظمة المضخات الحرارية الأرضية في تركيا كي يستطيعا تحديد الخواص الحرارية للأرض.

ودرس جيمس (James E. Bos) [33] دارة مضخة حرارية أرضية بدارة مغلقة وتوصَّل الباحث إلى أنّ استخدام المضخة الجيوحرارية لأغراض التدفئة يُوفِّر في مصروف الطاقة بالمقارنة مع دارات المضخة

الحرارية التقليدية والتدفئة التقليدية باستخدام الماء الساخن. وكان التوفير في الطاقة جراء استخدام المضخة الجيوحرارية بما يعادل 39% بالمقارنة مع الأنظمة الأخرى.

أجرى تارناوسكي وليونغ ومواموسي وحمادة (Tarnawski, Leong, Momose, Hamada) [34] دراسة تحليلية ونمذجة حاسوبية لدارة مضخة جيوحرارية ذات مبادل جيوحراري أفقي ذي طبقة واحدة، وآخر ذي طبقتين لتدفئة وتكييف منزل بمساحة $200m^2$ في مدينة سابورو اليابانية. أظهرت نتائج النمذجة الحاسوبية أنَّ نظام المضخة الجيوحرارية لم يتغير عملياً بعد السنة الثالثة ومن ثُمَّ اعتمدت نتائج النمذجة لمدة ثلاثة أعوام في عملية التحليل. ووجدوا أنَّ التوفير في مصروف الطاقة على الرغم من استجرار الكهرباء لتشغيل المنظومة كان بحدود 33% بسبب انخفاض مصروف الطاقة.

اختبر ميشوبولوس وزاشاريتدس وكرياكس (Michopoulos , Zachariadis, Kyriakis) [35] في هذا البحث اختبار أداء مضخة جيوحرارية ذات مبادل شاقولي بعمق 80m لتدفئة وتكييف مبنى في اليونان. تمَّ استقصاء النتائج على مدار ثماني سنوات. وتمَّ مقارنة استهلاك الطاقة وانبعاث الغازات مثل CO_2 مع أساليب التدفئة التقليدية وكانت أهم النتائج التي تم التوصل إليها البحث توفير الطاقة بمقدار 25% بالمقارنة مع الدارات التقليدية وتقليل انبعاثات غاز CO_2 بمقدار 22.7%

في دراسة تحليلية أجريت في مصر عام 2020 قارن مداح وغودارزي وريزا (Maddah, Goodarzi , Reza) [36] أداء المضخة الحرارية ذات المصدر الهوائي والمضخة ذات المصدر الأرضي، تبيَّن أنَّ معامل الأداء للمضخة الجيوحرارية كان أكبر بمقدار 7.5% بالمقارنة مع المضخة الحرارية التقليدية

وفي دراسة تحليلية ونمذجة حاسوبية لدارة مضخة جيوحرارية أجراها هونغ وديلاور وآخرون (Hong, Dilawar and others) [37] في كوريا الجنوبية عام 2022 بيَّنت أنَّ معامل الأداء للمضخة الجيوحرارية كان أكبر بمقدار 13% بالمقارنة مع المضخة الحرارية التقليدية

وإذا ما نظرنا إلى الأمر من منظور هندسي، نجد أنَّ هناك العديد من الدراسات التجريبية والعددية التي تناولت تقييم الأداء الخاص بأنظمة المضخات الحرارية الأرضية، وأنَّ القسم الأكبر من هذه الدراسات كان يعنى بدراسة الأنظمة المزودة بمبادلات حرارية أرضية شاقولية أو أفقية. إلا أنَّ هذا النوع من الدراسات لا يزال غير متوفر في سورية.

وبسبب هذا النقص الكبير في المعلومات المتوافرة لدينا فيما يتعلق بأداء أنظمة المضخات الحرارية الأرضية في سورية، تم إعداد وتركيب اختبار تجريبي، سيتمُّ تقديم وصف تفصيلي له في الفصل الخامس من هذه الدراسة، باستخدام مضخة حرارية مزودة بضاغط يستخدم وسيط تبريد (R22).

3. مشكلة البحث

التقليل من المصروف الكبير للطاقة الكهربائية المستجرة بهدف تدفئة وتكييف المباني وإيجاد حلٍّ للتغلب على المساحات الكبيرة من الأراضي التي تتطلبها المبادلات الجيوحرارية الأرضية وأعماق الحفر الكبيرة التي تتطلبها المبادلات الشاقولية

4. هدف البحث

- تصميم مبادل جيوحراري حلزوني في دارة المضخة الجيوحرارية
- ايجاد النموذج الأمثل للمبادل الجيوحراري الأنبوبي الحلزوني بما يتلاءم مع الشروط المناخية في مدينة دمشق
- تحليل أداء المبادل عددياً باستخدام برنامج ANSYS
- تنفيذ دارة اختبارية للمضخة الجيوحرارية المربوطة مع المبادل الجيوحراري المدروس في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق
- اختبار أداء المبادل الأنبوبي الحلزوني في منظومة المضخة الجيوحرارية
- اختبار أداء المضخة الجيوحرارية ومقارنتها مع الدارة التقليدية.

5. أهمية البحث

- توفير الطاقة باستخدام منظومات المضخات الجيوحرارية بالمقارنة مع الدارات التقليدية.
- دراسة تأثير نوع جديد من المبادلات الجيوحرارية في معامل أداء المضخة الجيوحرارية.
- توطين تقانة تصميم وتركيب المبادلات الجيوحرارية.
- التغلب على أعماق الحفر الكبيرة التي يتطلبها المبادل الجيوحراري الشاقولي.
- التغلب على المساحات الشاسعة من الأراضي التي يتطلبها المبادل الجيوحراري الأفقي.

بالإضافة لكونها دراسة حديثة مواكبة للدراسات العالمية وموافقة للدراسات الخاصة بتوفير الطاقة واستخدام الطاقات المتجددة إذ تُصنَّف منظومات المضخة الجيوحرارية ضمن منظومات الطاقة المتجددة كونها تستفيد من المخزون الحراري في جوف الأرض ويتراوح التوفير في وضع التبريد بين 39%–20 وبين 47%–30

في وضع التدفئة كما يترتب على ذلك تقليل انبعاث الغازات الضارة بالبيئة حتى 65% مقارنة بالمضخات الحرارية التقليدية [24,28,33,34].

6. مسوغات البحث

- تستهلك أنظمة التكييف صيفاً وشتاءً كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية المولدة.
- التخفيض من استهلاك الوقود ومن ثُمَّ نواتج الاحتراق وخصوصاً غاز Co2.
- التوفير في الطاقة الكهربائية المصروفة على التكييف صيفاً وشتاءً.
- استخدام مصادر الطاقات المتجددة في التكييف صيفاً وشتاءً.

7. محددات البحث

يُشكل الاستجرار الكهربائي المرتفع لتشغيل منظومات التدفئة والتكييف عبئاً كبيراً على الدولة ولهذا السبب كان التفكير في إيجاد حلول للتقليل من هذا المصروف ولاسيما استخدام المضخات الحرارية في منظومات التدفئة والتكييف، ونظراً لكون الاستفادة من طاقة جوف الأرض –أحد مصادر الطاقات المتجددة– يُؤمِّن وفراً إضافياً في مصروف الطاقة فقد تَمَّ التركيز في الدراسة على تصميم مبادل جيوحراري أنبوبي حلزوني يوافق خصائص التربة والمناخ في مدينة دمشق.

8. حدود البحث

تستهدف الداراسة التوفير في الطاقة من خلال استخدام المضخة الجيوحرارية ذات المبادل الجيوحراري الحلزوني في أنظمة تكييف الهواء. كما اقتصرت الدراسة على مناخ مدينة دمشق ومواصفات التربة الزراعية في مدينة دمشق وهو مكان تنفيذ المنصة الاختبارية في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق.

9. منهج البحث وأدواته

تمَّ اتباع المنهجين التحليلي والتجريبي خلال البحث، ففي البداية تم دراسة العناصر المؤثرة في تصميم المبادل الجيوحراري وتحليلها للتوصل إلى التصميم الأمثل لهذا المبادل وفق الشروط المناخية وشروط التربة في مدينة دمشق ومكان تركيبه على وجه الخصوص ومن ثُمَّ تمَّ تنفيذ منصة اختبارية لاختبار المبادل الجيوحراري ضمن منظومة المضخة الجيوحرارية خلال فصلي الصيف والشتاء وقد تمَّ استخدام

الأدوات الحاسوبية وهي عبارة عن عدد من البرامج أهمها برنامج ANSYS 18.2 والعديد من الأدوات الأخرى اللازمة لتنفيذ المنصة الاختبارية (آليات حفر، مكيف هواء منزلي، ومبادل جيوحراري، مضخة ماء، خزان تمدد...) بالإضافة إلى أجهزة القياس وأهمها: مقاييس حرارة ورطوبة، شاشة تحصيل بيانات...إلخ

10. هيكل الأطروحة

نُظمَّت الأطروحة في ستة فصول بحيث يتضمن الفصل الأول تعريفاً للمضخة الحرارية وللطاقة الجيوحرارية وأنواع منظومات المضخة الجيوحرارية والمبادلات الحرارية المستخدمة.

وفي الفصل الثاني تمَّ دراسة المعادلات الناظمة لانتقال الحرارة من وسيط التشغيل إلى التربة وبالعكس لتأمين انتقال كمية الحرارة المطلوبة من وإلى التربة خلال فصلي الصيف والشتاء وتمَّ إعداد خوارزمية خاصة وبرنامج حاسوبي لتنفيذ الحسابات المطلوبة لتحديد الأبعاد التصميمية للمبادل (قطر الأنبوب، قطر اللفة، طول المبادل، التباعد بين اللفات،...) وتحديد الكتلة التخزينية المطلوبة لتوضع المبادل.

وفي الفصل الثالث تمَّ تنفيذ خوارزميات التصميم التي تمَّ الحصول عليها في الفصل الثاني عند قيم مختلفة للأبعاد التصميمية للمبادل وتمَّ رسم خطوط بيانية متعددة للحصول على أفضل أبعاد تصميمية للمبادل بحيث تضمن تحقيق التبادل الحراري المطلوبة وتخفيض الكلفة المطلوبة للمبادل وتحديد أبعاد الحفرة اللازمة للمبادل الجيوحراري. وقد تمَّ تنفيذ المبادل الجيوحراري من مادة البيكس (PEX) علماً أن جميع الدراسات السابقة اعتمدت أنابيب البولي إيريثان عالي الكثافة (HDPE) لتنفيذ المبادلات الجيوحرارية كما تم اختيار الشكل الحلزوني وبأبعاد تصميمية مناسبة لانتقال الحرارة ضمن المياه وليس ضمن التربة كما تمّت دراسة إمكانية ترييش المبادل الجيوحراري المدروس.

وفي الفصل الرابع تمَّ دراسة وتحليل أداء المبادل الجيوحراري عددياً باستخدام الأبعاد التصممييمية المستنتجة في الفصل الثالث وكان ذلك باستخدام برنامج ANSYS 18.2.

وفي الفصل الخامس تمَّ شرح مكونات المنصة الاختبارية وطريقة التنفيذ والاختبار ومقارنة النتائج التصميمية ونتائج التحليل العددي مع النتائج التجريبية.

وفي الفصل السادس تمَّ مناقشة النتائج ووضع بعض التوصيات.

الفصل الأول

المضخة الجيوحرارية والطاقة الجيوحرارية

Geothermal Energy and Geothermal Heat Pump

1.1 تمهيد:

يُقصد بالتبريد الصناعي عملية نزع الحرارة من جسم درجة حرارته أخفض من درجة حرارة الوسط المحيط به فهو يختلف عن حادثة التبريد الطبيعي من حيث إنَّ درجة حرارة الوسط المبرد في حالة التبريد الطبيعي تكون أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط.

ترتبط عملية التبريد ارتباطاً وثيقاً بعملية التبادل الحراري وتتمُّ بمشاركة مالا يقلُّ عن جسمين، الجسم المعطي للحرارة (المبرد) والجسم الآخذ للحرارة (المبرِد) والذي يسمى المادة العاملة أو وسيط التبريد وتُسمَّى كمية الحرارة التي يمتصها بالإنتاجية التبريدية (Refrigerating Effect) [38] .

- تصنيف الدورات العكسية :

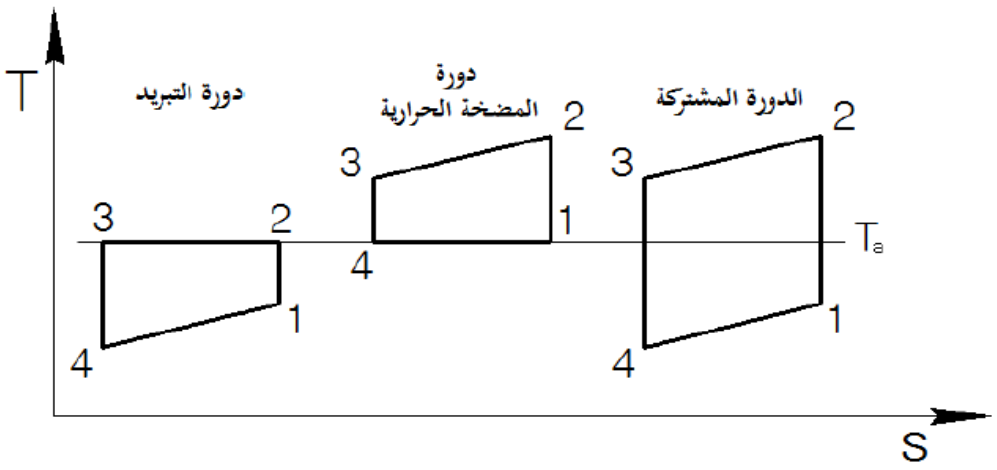
يوجد ثلاثة وظائف من الدوارت العكسية:

1-التبريدRefrigeration.

2-المضخة الحراريةHeat Pump.

3-المشتركة Combined Cycle.

كما هو مبيَّن بالشكل (1-1)



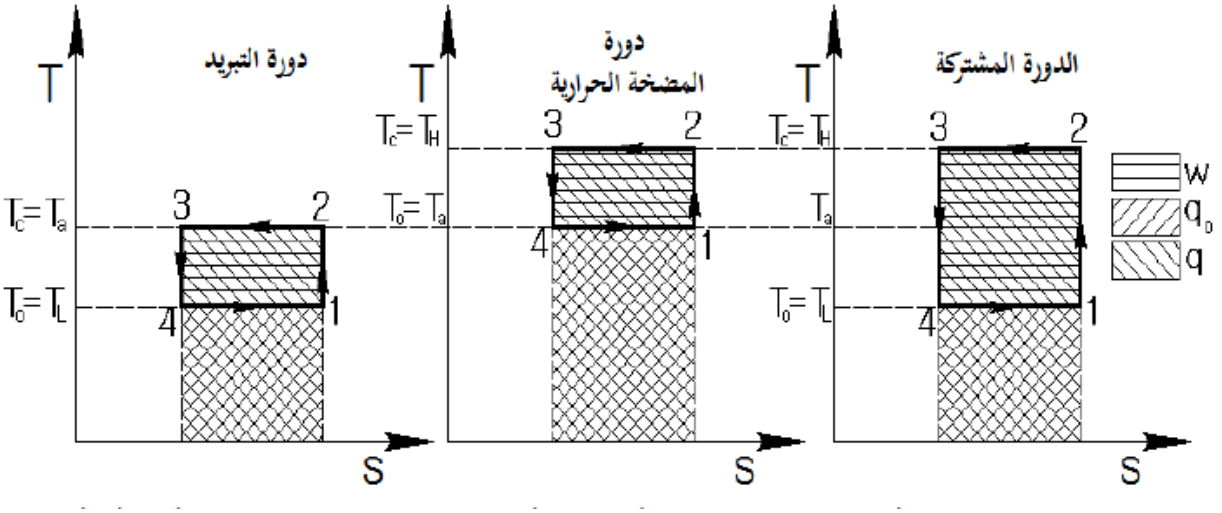
الشكل (1-1) الدورات العكسية في مخطط T – s [38]

1.2 آلة التبريد العاملة وفق دورة المضخة الحرارية:

تُستخدم آلة التبريد لأغراض التدفئة عندما يتمُّ نقل الحرارة من الوسط المحيط إلى المستهلك (المصرف) الحراري ذي درجة الحرارة T_H. في دورة المضخة الحرا رية الموضحة في الشكل (1−1) تكتسب المادة العاملة في الإجراء(4−1) من الوسط المحيط كمية من الحرارة qo وينضغط في الإجراء(1−2)، يتمُّ في الإجراء (2−3) طرح الحرارة q من وسيط التبريد إلى المستهلك الحراري ذي درجة الحرارة T_H وتُستخدم هذه الحرارة لأغراض التدفئة أو لأهداف تقنية أخرى، في الإجراء (3−4) يتمدد وسيط التبريد مع إنجاز عمل مقداره w_p كما يبيّن الشكل (2−1)

تحدد الفعالية الترموديناميكة لدورة المضخة الحرارية بمعامل التدفئة μ:

$$\mu = \frac{q}{w}$$

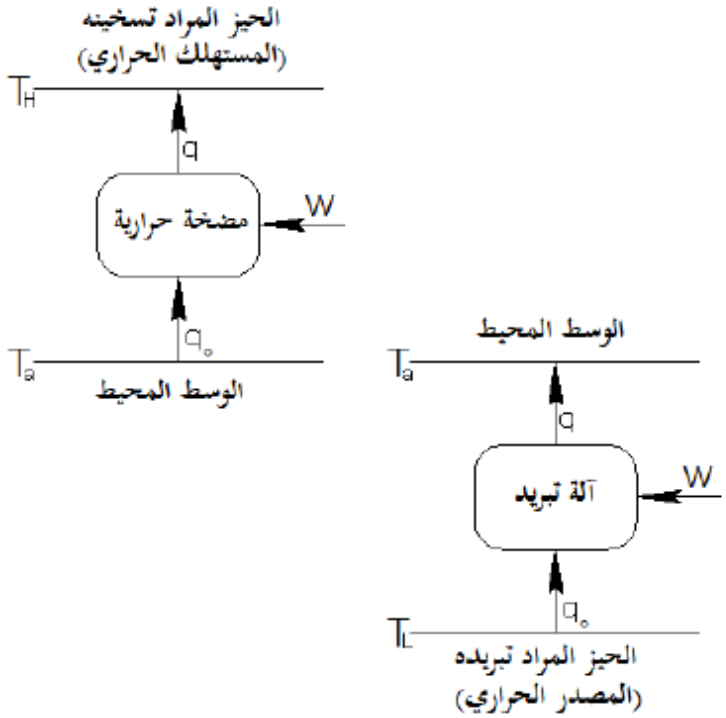


الشكل (2−1) المقارنة بين الدورات العكسية المختلفة باستخدام دورة كارنو العكسية المثالية [39]

1.3 المضخة الحرارية:

المضخة الحرارية تأخذ الحرارة من مصدر حرارة وتنقلها إلى (مصرف) مستهلك حراري ذي درجة حرارة أعلى كما هو موضح في الشكل (3−1).

ووفقاً لهذا التعريف فكل معدات التبريد (أجهزة تكييف الهواء , مبردات الماء... إلخ) تُعدُّ مضخات حرارية. أما هندسياً فإنَّ مصطلح المضخة الحرارية يُستخدمُ عموماً للمعدات التي تسخن لأغراض مفيدة مثل تدفئة المباني وأحواض السباحة وتسخين مياه الاستعمال، وهناك النوع ثنائي الاستخدام الذي يُستخدم لأغراض التدفئة والتبريد.



الشكل (3-1) مبدأ عمل آلة التبريد والمضخة الحرارية [39]

1.4 تصنيف المضخات الحرارية وفقاً لطبيعة المصدر والمستهلك الحراري:

تُصنَّفُ المضخات الحرارية المستخدمة لأداء وظيفتي التدفئة والتبريد وفق خمسة أنواع:

1- المضخات الحرارية هواء _ هواء.

2- المضخات الحرارية ماء _ هواء.

3- المضخات الحرارية ماء _ ماء.

4- المضخات الحرارية هواء _ سائل.

5- المضخات الحرارية إنتالبي التربة _ هواء/ماء أو المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج.

1.5 المصادر والمصارف الحرارية للمضخات الحرارية: [39]

إنَّ اقتصادية بناء المضخة الحرارية وتشغيلها يتعلق بمصادر الطاقة الحرارية ودرجة حرارتها، حيث يجب أن تتمتع هذه المصادر بالخواص التالية:

1- يجب أن تكون كمية الحرارة كافية في كل وقت لتزويد المضخة الحرارية.

2- يجب أن تكون درجة حرارة المصدر مرتفعة ما أمكن.

3- تكاليف استثمار منخفضة.

4- أن يكون استهلاك الطاقة في نقل الحرارة (المراوح والمضخات) منخفضاً.

إنَّ اختيار مصدر ومستهلك حراري لتطبيق ما يتأثر بشكل أساسي بالموقع الجغرافي، المناخ، كلفة التأسيس.[39]

1.5.1 الهواء:

يستعمل بشكل واسع في التطبيقات السكنية والتجارية الصغيرة كمصدر ومستهلك حراري . عند اختيار الهواء كمصدر حراري لوحدة مضخة حرارية يجب أن يؤخذ بالحسبان عاملان أساسيان:

1- درجة حرارة الهواء الخارجي المحلية.

2- تشكل الجليد.

1.5.2 الماء:

يُعدُّ الماء مصدراً ومستهلكاً حرارياً جيداً. إنَّ درجة الحرارة الثابتة للمياه الجوفية تسوغ أداءها الجيد كمصدر حراري، وتتعلق درجة حرارة المياه بعمق المصدر ودرجة حرارة الجو الخارجي وتتراوح بين درجة $(8-12)^{o}c$.

يمكن استخدام مياه البلدية كمصدر حراري مع الانتباه إلى كلفتها المرتفعة ولقوانين البلديات التي قد تمنع هذا الاستخدام.

1.5.3 الأرض:

يستخدم إنتالبي التربة كمصدر ومستهلك حراري باستخدام الوشائع المطمورة (المدفونة) على أعماق مختلفة. ويختلف أداء المضخة الحرارية نتيجة اختلاف الخواص الحرارية للتربة باختلاف نوعها.

1.5.4 الطاقة الشمسية:

إنَّ المصادر الحرارية المذكورة مثل الهواء، المياه السطحية والمياه الجوفية والتربة تستفيد من الطاقة الشمسية بشكل غير مباشر ويمكن للطاقة الشمسية أن تستخدم باعتبارها مصدرً حرارياً أساسياً أو مساعداً.

تُصنَّف أنظمة المضخات الحرارية التي تستفيد من الطاقة الشمسية في نوعين :النظام المباشر والنظام غير المباشر.

في النظام المباشر توضع أنابيب مبخر المضخة الحرارية داخل اللاقط الشمسي ويكون عادة من نوع الصفيحة المستوية بينما يقوم النظام غير المباشر بتدوير الماء أو الهواء عبر اللاقط الشمسس. تكمن ميزة النظام المباشر في الحصول على درجات حرارة أعلى من النظام غير المباشر.

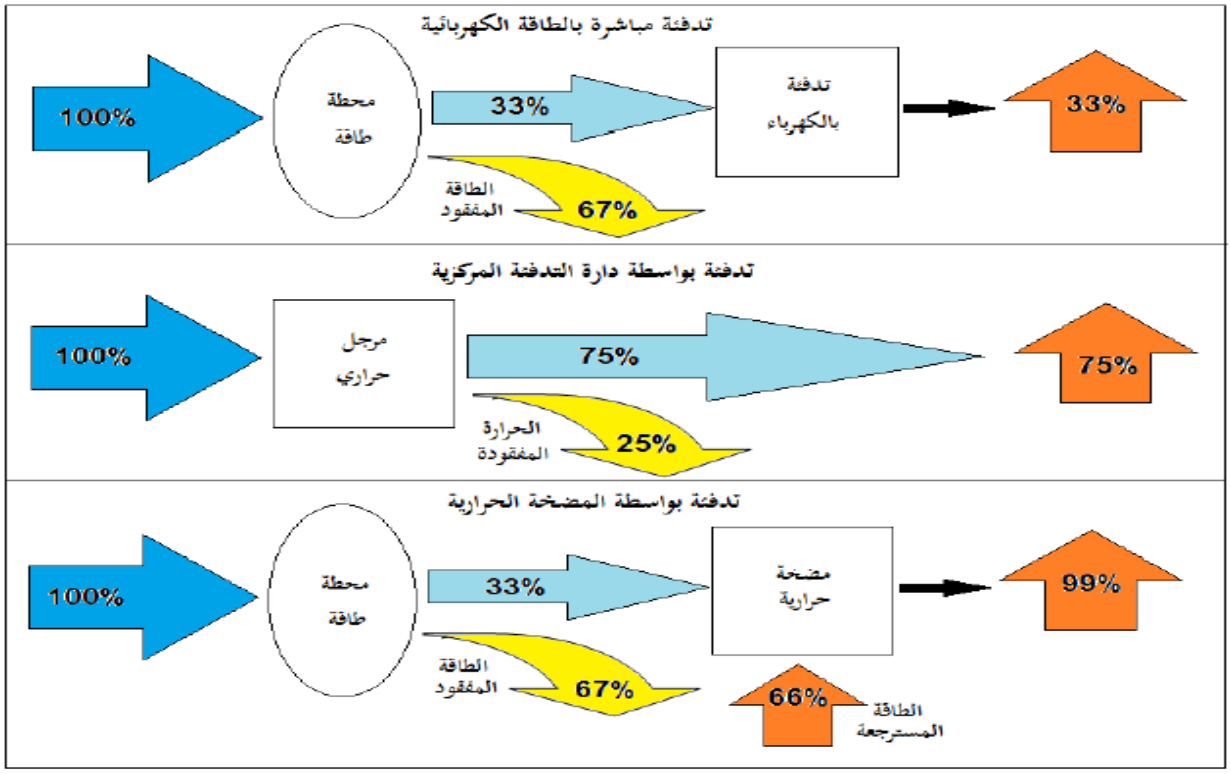
1.6 مميزات استخدام المضخة الحرارية:

1- التوفير الكبير الذي تحققه المضخات الحرارية عند استخدامها في عمليات التدفئة وتأمين الماء الساخن : يتراوح التوفير بين % 25 إلى % 70 في استهلاك الطاقة مقارنة بمنظومات التدفئة التي تَستَخدمُ الطاقة الكهربائية بشكل مباشر أو أنظمة التدفئة المركزية التي تَستَخدمُ مرجلاً حرارياً مما يُخفِّض كلفة استثمار المضخة الحرارية وتشغيلها كما هو مُبيّن بالشكل (4-1)

2- تعمل المضخة الحرارية بدون طرح غازات ملوثة أو بنسب منخفضة نسبياً مقارنة مع عملية التدفئة التقليدية بحرق الوقود. مما يُؤدِّي إلى تخفيض نسب التلوث والتخفيف من ظاهرة الاحتباس الحراري. تُخفِّض المضخة الحرارية نسبة انبعاث غاز CO_2 بحوالي % 90 مقارنة بمنظومات حرق الوقود السائل لأهداف التدفئة.

3- إنَّ استخدام المضخة الحرارية لأهداف التدفئة يحقق أماناً في التشغيل مقارنة بمنظومات احتراق الوقود.

4 - تُؤمِّن المضخة الحرارية الراحة الحرارية عند استخدامها في أنظمة التدفئة الأرضية، كما أنَّ ضجيجها منخفضٌ وعامل الصيانة أقل ما يمكن كما يمكن أن تُستخدمَ في فصل الصيف (التبريد).



الشكل (4-1) مقارنة أنظمة التدفئة مع المضخة الحرارية [39]

1.7 الطاقة الجيوحرارية

تُعرَّف الطاقة الجيوحرارية: بأنها الطاقة الحرارية الموجودة ضمن القشرة الأرضية وتشمل الطاقة الحرارية المختزنة في الصخور والرمال والحصى والتربة والسوائل الموجودة في مسام الصخور وضمن التربة (ماء وبخار الماء ...الخ.).

لقد أظهرت الدراسات أنَّ الأرض نشأت من كتلة مائعة كلياً ثمَّ تبردت وأصبحت صلبة دون إضافة أي طاقة خارجية ما عدا الطاقة القادمة من الشمس. وبسبب حركة الصفائح الأرضية والحركة البركانية، تركَّز جزء من هذه الطاقة قرب سطح الأرض ليشكل أماكن درجة الحرارة العالية. وقد ساهم التوصيل والحمل الحراري بنقل الطاقة من القسم العميق إلى القسم السطحي من القشرة الأرضية وذلك في الأماكن التي يسمح فيها التركيب الجيولوجي أو وجود الماء بذلك.

إنَّ الاختلاف في النشاط البركاني والنشاط الإشعاعي واختلاف ناقلية الصخور ودوران السوائل تسبب جميعها تدفقات حرارية مختلفة (من القشرة للسطح) بالإضافة إلى درجات حرارة مختلفة بالنسبة لعمق معين. إنَّ الزيادة الطبيعية لدرجة الحرارة مع العمق أو ما يُسمَّى بالتدرج الحراري الطبيعي يساوي تقريباً [K/km] 24 أما التدرجات الحرارية الشائعة فيمكن أن تتراوح حسب المنطقة بين [K/km] 9 إلى [K/km] 88

إنَّ المناطق ذات تدرجات الحرارة العالية أو المناطق التي لها تدفقات حرارية أكبر من المعدلات الطبيعية تُعدُّ الأكثر أهمية من ناحية الفعالية الاقتصادية .حتى الأماكن ذات التدرجات الحرارية العادية تُعدُّ مهمة في حال وجود ميزات جيولوجية معينة. [40]

1.8 تصنيف المصادر الجيوحرارية:

تُستخدم الأرض من أجل محتواها الحراري عندما تتراوح درجة حرارتها بين ($-5 \div 360\ ^oC$) وتقسم المصادر الجيوحرارية حسب درجة حرارتها إلى: [40]

المصادر ذات درجة الحرارة العالية: تستخدم لأغراض التوليد الكهربائي وتكون درجة الحرارة أكبر من 150 [^oC]

المصادر ذات درجة الحرارة المتوسطة: هذه المصادر قابلة للاستخدام المباشر وتتراوح درجة حرارتها ($32 \div 150\ ^oC$)

المصادر ذات درجة الحرارة المنخفضة :تستخدم في منظومات المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي وتكون درجة حرارتها أصغر من 23 [^oC]

كما تصنف المصادر الجيوحرارية وفقاً لشكل وجودها كما يلي:

1-المصادر النارية Igneous point resources: مرتبطة بالحمم البركانية الذائبة والتي تُسخِّن الصخور المجاورة بالتوصيل والحمل حسب ما تسمح به نفاذية الصخور ومحتوى مسام الصخور من السوائل.

2- الأنظمة الحملية السائلية الحرارية Hydrothermal convection system: وهي السوائل الحارة الموجودة قرب سطح الأرض وتنتج من دوران المياه عن طريق الحمل الطبيعي من الطبقات العميقة الساخنة إلى الطبقات السطحية .ويجب أن تكون البنى الصخرية نفوذة بشكل كافٍ لحصول هذا الدوران الطبيعي.

3-المصادر الأرضية المضغوطة Geopressured resources:

عبارة عن ماء حار موجود في الطبقات الجيولوجية الرسوبية العميقة حيث الضغط أعلى من [M Pa] 75 كما تحتوي هذه المصادر على الميثان محلولاً في الماء.

4-المصادر الحرارية الإشعاعية Radiogenic heat sources:

صخور بلوتونية غرانيتية تكون غنية نسبياً باليورانيوم والثوريوم وإذا غطت الرواسب ذات الناقلية الحرارية المنخفضة هذه الصخور يحدث ارتفاع في درجة حرارة الجزء القاعدي من الرواسب.

5-الطبقات الجيولوجية المحمية العميقة Deep regional aquifers:

لتكون الطبقات الجيولوجية العميقة ذات ميزة اقتصادية فإنه يجب أن تكون كافية من ناحية الحجم لتزوّد درجة الحرارة المفيدة خلال فترة العمل وأن تكون نفاذية الطبقات المحيطة كافية لتأمين التدفق الحراري المناسب.

1.9 الطرق والمنظومات المستخدمة للاستفادة من المصادر الجيوحرارية:

1.9.1 المنظومات الجيوحرارية لتوليد الكهرباء:

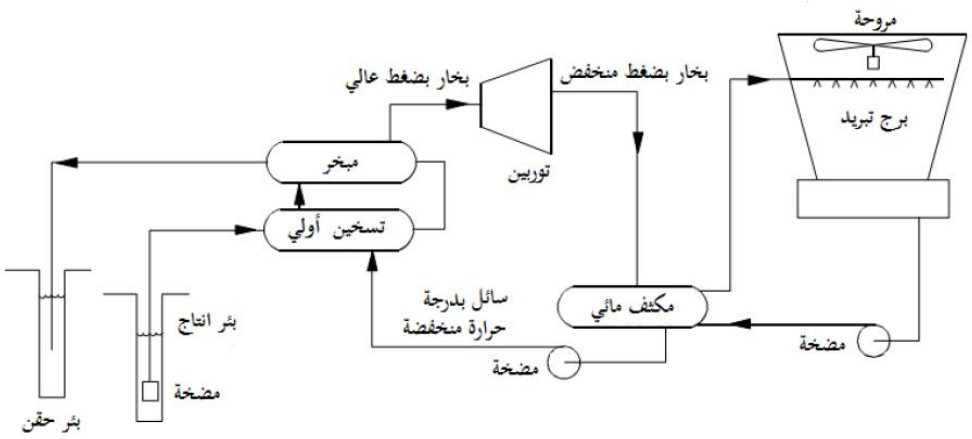
يُستخدم جوف الأرض لأغراض التوليد الكهربائي عندما تتجاوز درجة حرارته [^{o}C] 150. يوجد ثلاثة أنواع رئيسية للمنظومات الجيوحرارية لتوليد الكهرباء، يعتمد تصنيفها على طبيعة المصدر الجيوحراري والطور الذي يوجد فيه الماء ضمن الطبقات الجيولوجية وهي:

1- المنظومة الجيوحرارية المباشرة لتوليد الكهرباء: تستخدم عندما يوجد الماء في جوف الأرض على شكل بخار محمص. إذ يؤخذ البخار من جوف الأرض ويمرر عبر فاصل، يقوم بتخليصه من الرمال وأجزاء الصخور ثُمَّ يُساق البخار إلى توربين بخاري يتمُّ بدورانه توليد الكهرباء عن طريق منوبة، ويتمُّ طرح المياه الزائدة أو إعادتها إلى جوف الأرض بعيداً عن المكان الذي أخذت منه وعادة ما يتمُّ ذلك عن طريق بئر حقن.

2-المنظومة الجيوحرارية لتوليد الكهرباء بفصل البخار: تُستخدم عندما يوجد الماء في جوف الأرض على شكل بخار مشبع (خليط من الماء والبخار) إذ يؤخذ خليط الماء والبخار ويمرر عبر فاصل سائل، ويتمُّ هناك الحصول على البخار الذي يُساق إلى التوربين بينما يتمُّ طرح الماء الناتج بعد التوربين والماء الناتج من فاصل السائل أو إعادة حقنه إلى الأرض.

3- المنظومة الجيوحرارية غير المباشرة لتوليد الكهرباء: تُسمَّى بالمنظومة غير المباشرة نتيجة لوجود حلقة مغلقة تحوي سائل ناقل للحرارة يتبخر ويقوم بتحريك التوربين، ويتمُّ تبخره بالاستفادة من حرارة البخار القادم من جوف الأرض

عن طريق مبادلات حرارية . ويبيّن الشكل (5–1) منظومة من هذا النوع مع بئر إنتاج وبئر حقن ومبادل حراري للتسخين الأولي. [41]



الشكل (5–1) المنظومة الجيوحرارية غير المباشرة لتوليد الكهرباء[41]

1.9.2 منظومات الاستخدام المباشر للطاقة الجيوحرارية:

هي المنظومات التي تستخدم حرارة الأرض مباشرة لأغراض التدفئة وتسخين المياه وذلك باستخدام وسيط ناقل للحرارة وتجهيزات معدة خصيصاً لهذا الهدف.

ويستخدم جوف الأرض لأغراض الاستخدام المباشر عندما تتراوح درجة حرارته بين (32÷150 °C)

1.9.2.1 تطبيقات المنظومات الجيوحرارية المباشرة:

يتلخص استخدام المنظومات المباشرة في تسخين المياه والتدفئة والتكييف الصيفي(التبريد) من خلال دارة امتصاصية والمجال الزراعي ومجالات أخرى مثل تعدين الذهب وتربية الأسماك وتجفيف الخضار. وتستخدم المنظومة المباشرة على مجال واسع يمتد من الأبنية السكنية الطابقية المتوسطة والأبنية التجارية إلى مشاريع تدفئة المدن.

1.9.3 منظومات المضخات الجيوحرارية أو المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي للحرارة Ground Source Heat Pump systems (GSHP):

وهي منظومات المضخات الحرارية التي تَستخدمُ جوف الأرض أو المياه الجوفية أو المياه السطحية كمصدر أو مستهلك حراري. ويستخدم جوف الأرض كمصدر أو مستهلك حراري للمضخات الحرارية عندما تكون درجة حرارته أقل من 32°C

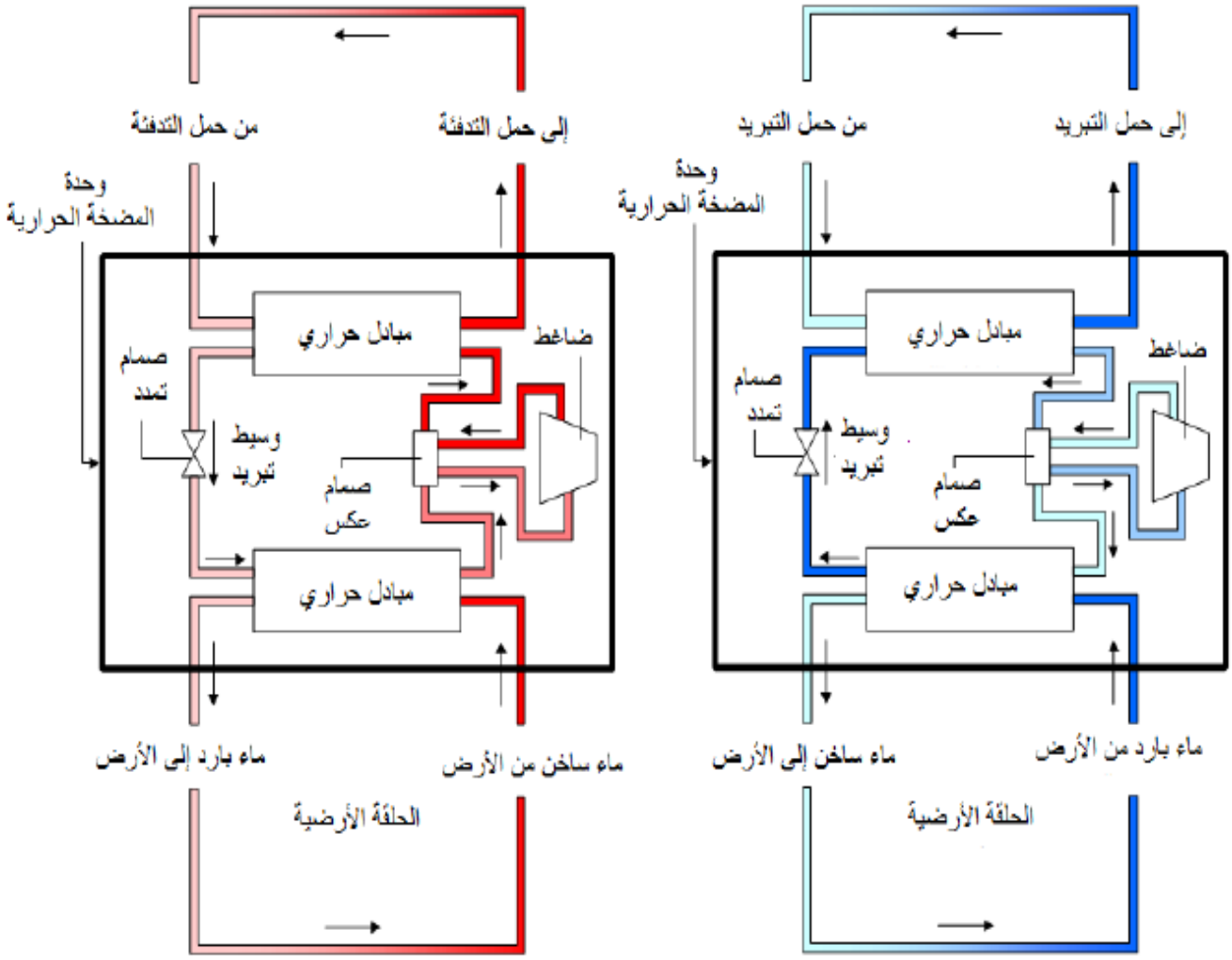
تتألف منظومة المضخة الجيوحرارية بشكل عام من ثلاث وحدات رئيسية وهي:

1– وحدة مضخة حرارية تعتمد دورة انضغاط البخار المغلقة تعمل في وضعي التدفئة والتبريد ويتمُّ التبديل بين الوضعين بتغيير اتجاه تدفق وسيط التبريد .

2- وحدة تقوم بتبادل الحرارة مع وسيط تبريد المضخة الحرارية وتنقلها إلى المكان المكيف، وتَستخدِمُ هذه الوحدة الماء أو الماء مع مادة مانعة للتجمد أو الهواء كوسيط ناقل للحرارة ويمكن أن تكون على شكل حلقة مغلقة أو مفتوحة.

3- وحدة تقوم بتبادل الحرارة مع وسيط تبريد المضخة الحرارية وتنقلها إلى جوف الأرض، وتَستخدِمُ هذه الوحدة الماء أو الماء مع مادة مانعة للتجمد كوسيط ناقل للحرارة ويمكن أن تكون على شكل حلقة مغلقة أو مفتوحة وتُسمَّى هذه الوحدة الحلقة الأرضية [42] ويُسمَّى الجزء المغمور بالأرض المبادل الحراري الأرضي GHX: Geothermal Heat Exchanger

كما هو مُوضَّح في الشكل (6-1)



الشكل (6-1) مخططاً رمزياً لمنظومة المضخة الجيوحرارية في وضعي التدفئة والتبريد [42]

وتقسم منظومات المضخات الجيوحرارية المستخدمة إلى:

1.9.4 منظومات المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج

Ground Coupled Heat Pump systems (GCHP):

ظهرت هذه المنظومات في السبعينات من القرن الماضي، وتدلُّ عبارة الأداء المزدوج على أنَّ المنظومة نفسها تُستَخدمُ لأغراض التبريد والتدفئة إذ يُعاد استخدام الحرارة التي تطرح في الأرض والناتجة عن عملية التبريد في عملية التدفئة.

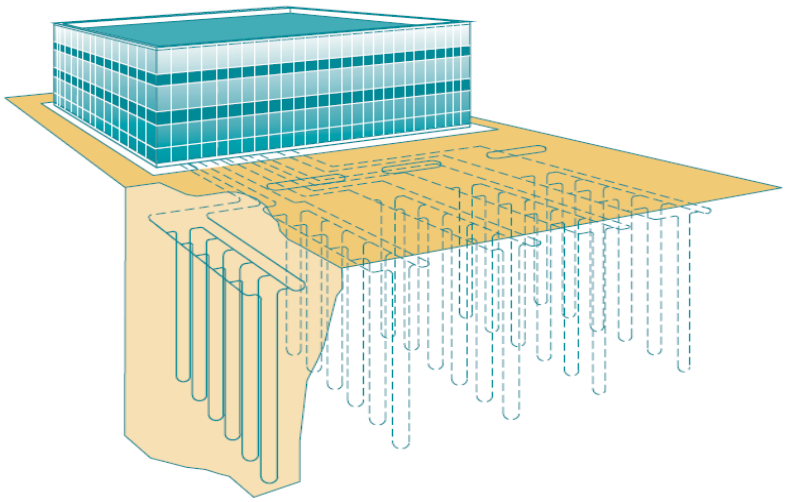
تعتمد هذه المنظومات على حلقة أرضية مغلقة تتألف من أنابيب مطمورة (مدفونة) يتمُّ تدوير الماء فيها قسرياً لإحداث التبادل الحراري المطلوب بين الماء وجوف الأرض. تُصنَّع الأنابيب غالباً من مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة High Density Polyethylene (HDPE) كما يُضافُ للماء أحياناً مادة مانعة للتجمد [42] .

تقسم منظومات المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج حسب شكل المبادل الأرضي إلى:

1.9.4.1 منظومات المضخات الجيوحرارية الشاقولية ذات الأداء المزدوج

Vertical Ground Coupled Heat Pump systems (VGCHP):

وفيها يتألف المبادل الحراري الأرضي من عدة حلقات ثانوية، تتألف كلُّ حلقة ثانوية من أنبوب (HDPE) على شكل حرف U يتراوح قطره بين (20–40 mm) يوضع في ثقب محفور في الأرض يتراوح قطره بين (75–150 mm) وعمقه بين(15–180 m) وترتبط الحلقات الثانوية فيما بينها عن طريق مجمع وبذلك تُشكِّلُ المجمعات مع الحلقات الثانوية ومضخات التدوير الحلقة الأرضية المغلقة [40]. ويبيِّن الشكل (7–1) مخططاً رمزياً للمبادل الحراري الأرضي المغلق.



الشكل (7–1) مخطط رمزي للمبادل الحراري الأرضي المغلق [43]

يتمُّ ملءُ الفراغ بين الأنابيب ذات الشكل U والجدران الداخلية للثقب بمادة مَلء (حشوة) لا تسمح باحتباس الماء خلالها. [42]

ويجب ألا تقل المسافة بين مراكز الثقوب المتجاورة عن 4.5m وذلك عند توضع الثقوب على شكل شبكة مستطيلة وذلك لتقليل التأثير الحراري للثقوب المتجاورة، أمَّا عند توضع الثقوب بشكل خط مستقيم فيمكن أن تكون المسافة بين كلِّ ثقبين متجاورين أصغر.

تتلخَّصُ مميزات منظومات المضخات الجيوحرارية الشاقولية ذات الأداء المزدوج بما يلي:

1- تتطلب مساحات صغيرة من الأرض مقارنة بمنظومات المضخات الجيوحرارية الأفقية.

2- أعماق الحفر الكبيرة نسبياً تُؤدّي إلى ثبات نسبي في درجة حرارة جوف الأرض ومن ثُمَّ استقرار في عمل وحدة المضخة الحرارية.

3- تَستَخدمُ كمية قليلة نسبياً من الأنابيب مقارنة بمنظومات المضخات الجيوحرارية الأفقية.

4- استطاعة الضخ اللازمة للدوران القسري للمياه في الحلقة الأرضية منخفضة نسبياً.

5- حماية التجهيزات كون الحلقة الأرضية مغلقة ومن ثُمَّ عزل وحدة المضخة الحرارية عن الأملاح والمواد الموجودة في جوف الأرض والتي تؤدي إلى تآكل المعادن.

6- حاجة المنظومة للمياه منخفضة كون الحلقة الأرضية مغلقة. [42]

تتلخَّصُ مساوئ منظومات المضخات الجيوحرارية الشاقولية ذات الأداء المزدوج بما يلي:

1- ارتفاع الكلفة التأسيسية للمنظومة بسبب ارتفاع كلفة الحفر.

2- صعوبة إيجاد مقاولين ذوي خبرة للعمل في هذا المجال.

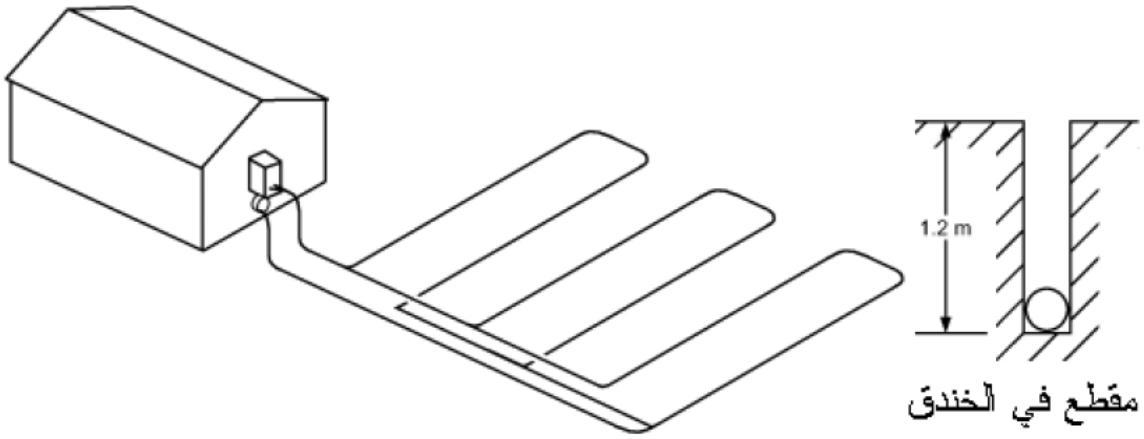
1.9.4.2 منظومات المضخات الجيوحرارية الأفقية ذات الأداء المزدوج:

Horizontal Ground Coupled Heat Pump systems (HGCHP):

وفيها يتألف المبادل الحراري الأرضي من حلقات ثانوية مصنوعة من أنابيب HDPE بأقطار تتراوح من 20 إلى 40 [mm] تطمر هذه الحلقات على أعماق منخفضة لا تقلُّ عن 1.2m ضمن خنادق تمتدُّ بشكل أفقي. توصل الحلقات الثانوية مع بعضها بشكل تفرعي أو تسلسلي أو مختلط لتشكل المبادل الحراري الأرضي الأفقي المغلق، إذ إنَّ طريقة الوصل تؤثر في الاستطاعة اللازمة لمضخة التدوير كما ترتبط ارتباطاً وثيقاً بتدفق المياه اللازم لعمل وحدة المضخة الحرارية ودرجة حرارة المياه المطلوبة على مدخل مبادلها الحراري.

ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من المبادل الحراري الأرضي الأفقي المغلق حسب طريقة توضع الأنابيب ضمن الخندق:

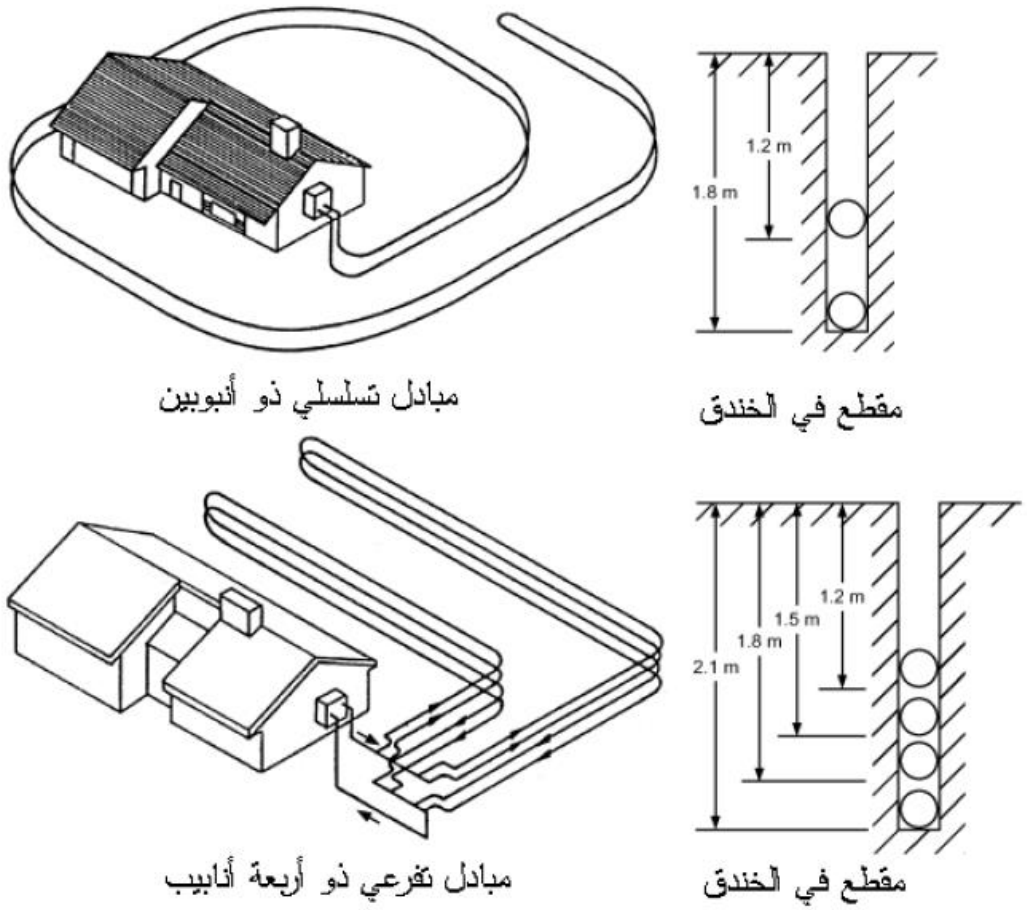
1 – مبادل ذو أنبوب مفرد: إذ يوضع في كلِّ خندق أنبوب واحد وتتميز هذه الطريقة بحاجتها لمساحات واسعة من الأرض لكنها تقلل من تعقيد عملية التركيب. كما هو مُبيَّن في الشكل (8-1)



الشكل (8–1) مبادل حرا ري أرضي أفقي مغلق ذو أنبوب واحد [40]

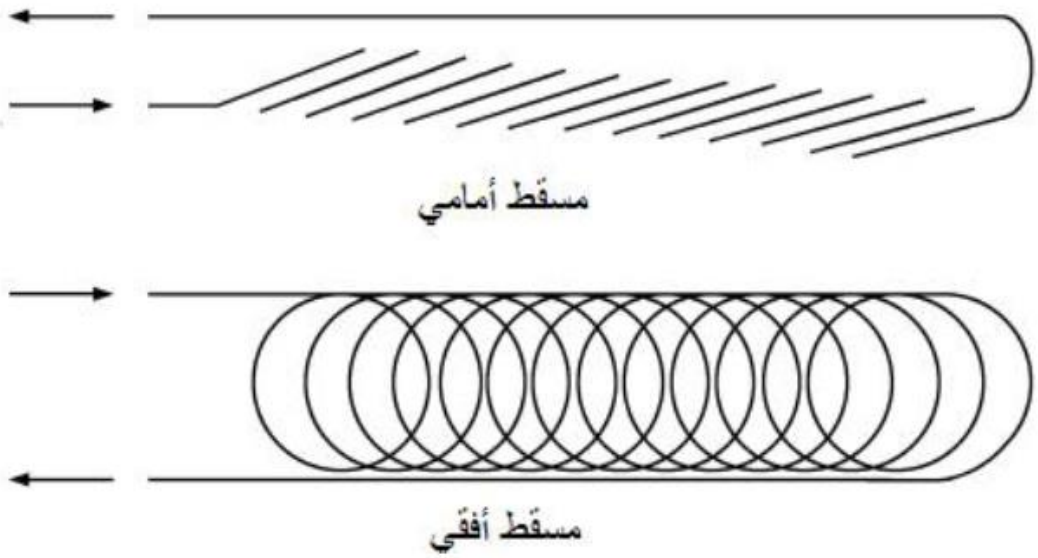
2– مبادل ذو أنابيب متعددة: إذ يوضع في كلِّ خندق أنبوبان أو أربعة أو ستة أنابيب وفق ترتيب معين. تقلل هذه الطريقة من طول الخندق ون ثُمَّ كلفة الحفر ولكن يجب زيادة الطول الإجمالي للأنابيب للتغلب على ضعف الأداء الناتج عن التأثير الحراري للأنابيب المتجاورة .

ويبين الشكل (9–1) مبادلاً تفرعياً ذا أربعة أنابيب ومبادلاً تسلسلياً ذا أنبوبين.



الشكل (9–1) مبادل حراري أرضي أفقي مغلق ذو أنابيب متعددة [40]

3- مبادل ذو أنابيب حلزونية: يُؤدّي استخدام هذا النوع إلى تقليل أكبر في المساحة المطلوبة إذ يقل الطول المطلوب للخندق بمقدار % 70 -80 عن الطول المطلوب لخندق مبادل الأنبوب المفرد ولكن الطول المطلوب للأنابيب يزداد بمقدار الضعف توضع الأنابيب الملفوفة حلزونياً بشكل أفقي ومائل أو شاقولية ضمن الخندق ويُوضِّح الشكل(10-1) المبادل الحلزوني.



الشكل (10-1) مبادل حراري أرضي أفقي مغلق ذو أنابيب حلزونية [40,42]

تتلخَّصُ ميزات منظومات المضخات الجيوحرارية الأفقية ذات الأداء المزدوج بما يلي:

1- الكلفة التأسيسية منخفضة مقارنة بالمنظومات الشاقولية نتيجة لانخفاض كلفة الحفر.

2- بساطة التركيب والتصميم.

3- قابلية الوصول للمبادل والقدرة على مرا قبة التربة السطحية. [42]

تتلخَّصُ مساوئ منظومات المضخات الجيوحرارية الأفقية ذات الأداء المزدوج بما يلي:

1- تتطلب مساحات كبيرة من الأرض.

2- تقلبات في أداء وحدة المضخة الحرارية نتيجة لتقلب درجة حرارة الأرض على الأعماق المنخفضة بسبب هطول الأمطار وتغير درجة حرارة الجو المحيط.

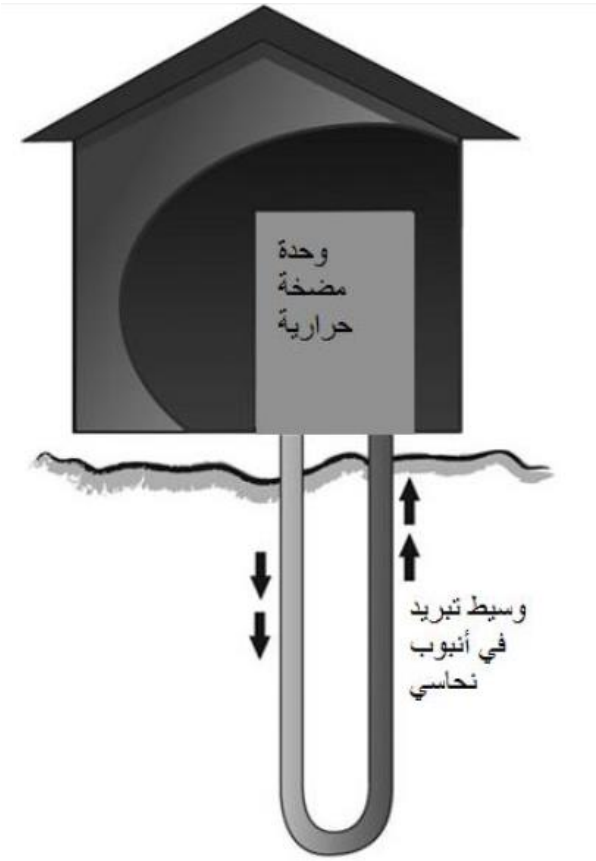
3- ارتفاع الطاقة اللازمة لمضخة التدوير بحدود 20%.

4- انخفاض معامل أداء المنظومة COP.

1.9.4.3 منظومات المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج والتمدد المباشر (DXGCHP)

Direct Expansion Ground Coupled Heat Pump systems:

وهي منظومات تستخدم أنابيب نحاسية مطمورة في الأرض عوضاً عن أنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة، وتُعدُّ هذه الأنابيب النحاسية كمكثف (أو مبخر) لوحدة المضخة الحرارية ولا يوجد حاجة لوجود مبادل حراري بين الحلقة الأرضية ووحدة المضخة الحرارية ولكن تحتاج الأنابيب النحاسية إلى معالجة لحمايتها من التآكل ضمن التربة. ويُبيِّن الشكل (11-1) مخططاً بسيطاً لهذه المنظومة.



الشكل (11-1) مخطط رمزي لمنظومة مضخة جيوحرارية ذات أداء مزدوج وتمدد مباشر [44]

تتلخَّصُ ميزات منظومات المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج والتمدد المباشر بما يلي:

1- سهولة التركيب نظراً لبساطة المنظومة.

2- قلة أعمال الصيانة.

3- تتطلب اختبارات أقل للتربة عند التركيب.

4- ارتفاع الفعالية نسبة للمنظومات الأفقية والشاقولية ومعامل الأداء COP يصل إلى 5 نتيجة التبادل المباشر للحرارة بين وسيط التبريد وجوف الأرض دون الحاجة لوجود مبادلات حرارية.

تتلخَّصُ مساوئ منظومات المضخات الجيوحرارية ذات الأداء المزدوج والتمدد المباشر بما يلي:

1- الكلفة التأسيسية المرتفعة نتيجة لتركيب أنابيب النحاس غالية الثمن مقارنة بأنابيب (HDPE) والكمية الكبيرة لوسيط التبريد.

2- أنابيب النحاس يمكن أن تتعرض للتلف في التربة الحمضية.

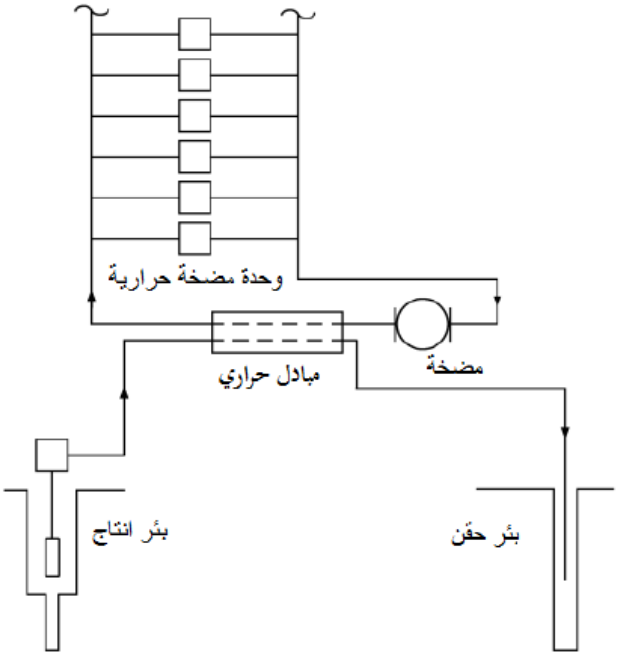
3- في حال حدوث تسرب لوسيط التبريد في التربة فإنَّ ذلك يمكن أن يُؤدِّي إلى مضار بيئية.[44]

1.9.4.4 منظومات المضخات الجيوحرارية ذات المياه الجوفية

Ground Water Heat Pump systems (GWHP):

وهي المنظومات الأقدم والأوسع انتشاراً بين منظومات المضخات الجيوحرارية ذات المصدر الأرضي، إذ بدأ استخدامها في أربعينيات القرن الماضي [44] ونعد هذه المنظومات من زمرة المنظومات ذات التبادل الحراري الأرضي ذي الشكل المفتوح.

يتمُّ في هذه المنظومات سحب المياه الجوفية من بئر عادي ذي عمق مناسب (بئر إنتاج) عن طريق مضخة ثمَّ تمرر المياه إلى وحدة مضخة حرارية ليتم التبادل الحراري المطلوب. تُعاد المياه بعد الاستفادة منها حرارياً إلى الأرض عن طريق بئر حقن، وقد تُعاد في بعض الحالات إلى بحيرة. تتطلَّب عملية التصميم اختبارات تتعلق بتوافر المياه ونوعيتها ونوعية التربة وكذلك تحديد طريقة طرح المياه بعد استخدامها. كما هو مُوضَّح في الشكل (12-1)



الشكل (12-1) مخطط رمزي لمنظومة من هذا النوع مع بئر حقن. [40,42]

تتلخَّصُ ميزات منظومات المضخات الجيوحرارية ذات المياه الجوفية بما يلي:

1- كلفتها أقل من كلفة منظومات المضخات الجيو حرارية ذات الأداء المزدوج (GCHP)

2- المساحة المطلوبة للآبار صغيرة نسبياً

3- تقلُّ كلفة المبادلات الحرارية مع ازدياد حجم المنظومة.

4- المنظومة مجربة منذ وقت طويل وتعمل بشكل جيد في عديد من المشاريع التجارية الكبيرة.

تتلخَّصُ مساوئ منظومات المضخات الجيو حرارية ذات المياه الجوفية بما يلي:

1- لا يمكن استخدام المنظومة في حالة عدم وجود المياه الجوفية بكثرة.

2- يجب حماية وحدة المضخة الحرارية في حال كانت نوعية المياه الجوفية تسبب التآكل للمعادن وهذا ما يفرض كلفة تأسيسية إضافية.

3- يمكن في حالات التركيب غير الصحيح أن تُؤدِّي المياه المطروحة إلى جوف الأرض إلى مخاطر بيئية.

4- الطاقة اللازمة لضخ المياه من جوف الأرض ستكون كبيرة إن كانت الطبقة الجوفية التي يتمُّ سحب المياه منها عميقة [40]

1.9.4.5 منظومات المضخات الجيو حرارية ذات المياه السطحية

Surface Water Heat Pump systems (SWHP):

تَستعمِلُ هذه المنظومات المياه السطحية كالبحيرات أو الأنهار أو الخزانات الصناعية كمصدر أو مستهلك حراري. وقد تكون هذه المنظومات بحلقة مفتوحة مثل منظومات GWHP أو بحلقة مغلقة مثل منظومات.GCHP

تتألف منظومات المضخات الجيوحرارية ذات المياه السطحية والحلقة المغلقة من وحدة مضخة حرارية تتبادل الحرارة مع وسط مائي (بحيرة مثلاً) عن طريق مبادل حراري مصنوع من أنابيب (HDPE) ومغمور في المياه على عمق مناسب وتستعمل مضخة لتدوير المياه أو مياه مع مادة مانعة للتجمد قسرياً ضمن المبادل المغمور في البحيرة لإحداث التبادل الحراري المطلوب. تتراوح أقطار أنابيب (HDPE) (20–40 mm) تتوضَّع بشكل لفات حلزونية موصولة على التفرع أو التسلسل وفقاً لمجال درجات الحرارة والتدفق المطلوبين. ويظهر الشكل (13–1) نموذجاً لهذا للمبادل المغمور.

تتلخَّصُ ميزات منظومات المضخات الجيو حرارية ذات المياه السطحية والحلقة المغلقة بما يلي:

1- كلفة منخفضة نسبياً مقارنة بمنظومات (GCHP) بسبب انخفاض كلفة أعمال الحفر أو انعدامها.

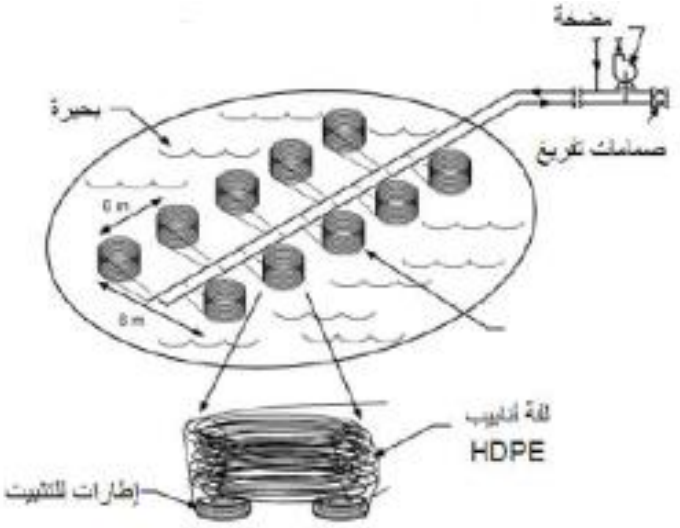
2- انخفاض الطاقة اللازمة للضخ.

3- انخفاض متطلبات الصيانة.

تتلخَّصُ مساوئ منظومات المضخات الجيو حرارية ذات المياه السطحية والحلقة المغلقة بما يلي:

1- احتمال عطب المبادل المغمور في المياه في البحيرات العامة.

2- التغير الكبير في درجة حرارة مياه البحيرات الصغيرة، وهذا يؤثر بشكل كبير في فعالية المضخة الحرارية مع أنَّ التغير يبقى أقل من تغيرات درجة حرارة الهواء في حال المضخات الحرارية التي تعتمد الهواء كمصدر حراري. [40]



الشكل (13-1) مبادل حراري حلزوني مغمور في بحيرة [40,42]

في منظومات المضخات الجيوحرارية ذات المياه السطحية والحلقة المفتوحة يتمُّ ضخ مياه البحيرة إلى المبادل الحراري الخاص بوحدة المضخة الحرارية لإتمام عملية التبادل الحراري ثمَّ تُعاد المياه إلى البحيرة بعد الاستفادة منها ومن ثُمَّ تُؤدِّي البحيرة دوراً شبيهاً بدور برج التبريد.

1.9.4.6 منظومات الآبار العمودية

Standing column Well systems (SCW):

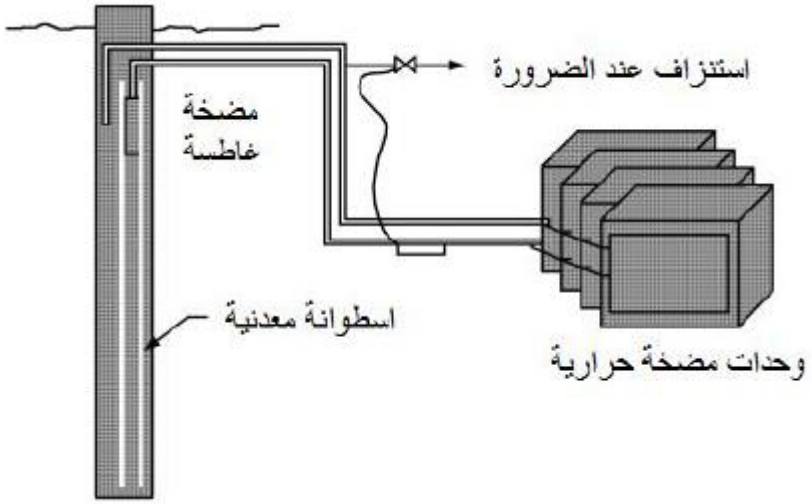
تُعدُّ منظومات الآبار العمودية منظومات هجينة بين منظومات المياه الجوفية (GWHP) والمنظومات ذات الأداء المزدوج (GCHP). إذ تُعدُّ المنظومة منظومة مفتوحة ولكن نقل الحرارة بالتوصيل في هذه المنظومة يعتمد على قواعد نظرية تشابه إلى حدٍّ كبير القواعد النظرية لانتقال الحرارة في المنظومات ذات الأداء المزدوج.

يتمُّ في هذه المنظومات استخدام بئر وحيد يدمج فيه كلٌّ من بئري الإنتاج والحقن ويضاف للمنظومة دارة استنزاف للمياه الجوفية .تستخدم دارة الاستنزاف لطرح المياه الجوفية عندما تتخطى درجة حرارة المياه الداخلة لمبادل وحدة المضخة الحرارية القيم الموصى بها، تبلغ نسبة الاستنزاف % 10 – 20 من كمية التدفق الذي يدور ضمن البئر، وتتمُّ عملية الاستنزاف عندما تكون درجة حرارة مياه البئر أكبر أو أصغر من الدرجة المطلوبة وذلك نتيجة لاختلاف حمل

البناء أو موصلية الصخور أو أحوال الطقس، وتُعدُّ هذه الطريقة طريقة مناسبة لإعادة درجة حرارة مياه البئر إلى الشروط التصميمية.

يُظهرُ الشكل الشكل (14-1) منظومة من هذا النوع، و يُظهرُ الشكل مضخة غاطسة تَتوضَّع ضمن أسطوانة معدنية مثقبة من الأسفل، تسحب المضخة الماء من داخل الأسطوانة ويضطر الماء العائد من وحدة المضخة الحرارية أن يلامس جدارن البئر خلال هبوطه ضمن المجال الحلقي بين الأسطوانة وجدران البئر قبل دخوله من ثقوب الاسطوانة في الأسفل، وبذلك يحدث التبادل الحراري المطلوب.

تُعدُّ منظومات الآبار العمودية منظومات حديثة ويتمُّ العمل على تطويرها في الوقت الراهن . [40]



الشكل (14-1) منظومة بئر عمودي [40,42]

1.9.5 ميزات ومساوئ استخدام منظومات المضخات الجيوحرارية (GSHP):

تملك منظومات المضخات الجيو حرارية عدة ميزات مقارنة بالمنظومات التقليدية التي تستخدم الماء أو الهواء كمصدر (مستهلك) حراري، تتلخَّصُ هذه الميزات بما يلي:

1- الفعالية العالية والسعة المستقرة:

إنَّ درجة حرارة المياه التي تدور ضمن الحلقات الأرضية تضمن عمل المنظومة بفعالية (Energy Efficiency Ratio) EER أعلى منها في المنظومات التقليدية والتي تستخدم الهواء كمصدر أو مستهلك حراري.

ففي وضع التبريد تتم تغذية وحدة المضخة الحرارية بماء ذي درجة حرارة أخفض من درجة حرارة الهواء الخارجي مما يخفض ضغط الدفع Pc في الضاغط ويقلل استهلاكه الكهربائي لسعة التبريد نفسها. أما في وضع التدفئة فستكون درجة حرارة المياه الآتية من الحلقة الأرضية والمارة عبر المبخر أكبر من درجة حرارة الهواء الخارجي ومن ثُمَّ تزداد السعة التي تقدمها وحدة المضخة الحرارية للتدفئة كما يمكن الحصول على درجة حرارة تغذية أكبر للهواء المدفّئ. تُعدُّ

درجة حرارة الأرض أكثر استقراراً من درجة حرارة الهواء الخارجي، مما يُؤدّي إلى استقرار أداء المنظومة الجيوحرارية وخاصة منظومات VGCHP.

تتطلَّب منظومات المضخات الجيوحرارية استطاعة كهربائية أقل لتشغيل المضخات والمراوح مقارنة بالمنظومات التقليدية وخاصة في الأبنية الضخمة التي تتطلَّب منظومات باستطاعات كبيرة.

2- تأمين الراحة الحرارية داخل المكان المكيف:

يُؤدّي ارتفاع درجة حرارة الجو الخارجي إلى ارتفاع ضغط الدفع Pc في المضخات الحرارية مما يُؤدّي إلى انخفاض معدل فعالية الطاقة EER إذ تتناقص الفعالية بزيادة نسبة الانضغاط في الضاغط والتي تساوي النسبة بين (ضغط الدفع) Pc(وضغط السحب)Po. لذلك يلجأ الصانعون إلى رفع قيمة ضغط السحب ومن ثُمَّ زيادة الفعالية، مما يُؤدّي إلى تقليل قدرة المضخة الحرارية على إزالة الرطوبة من الهواء المكيف وينخفض الحمل الكامن مسبباً عدم الراحة الحرارية. وهو الأمر الذي يمكن تجنبه في منظومات المضخات الجيوحرارية نتيجة انخفاض درجة حرارة الماء في الحلقة الأرضية عن درجة حرارة الجو الخارجي.

3- الانخفاض النسبي لكلفة الصيانة:

في غالبية منظومات المضخات الجيو حرارية تتوضع مضخات الماء ووحدات المضخات الحرارية ضمن البناء، ولا تكون معرضة للعوامل الجوية مما يخفف من تآكل المنظومة مع الزمن. كما أنَّ هذه المنظومات لا تتعرض لتغيرات مفاجئة في ضغط الدفع أو السحب مقارنة بالمنظومات التقليدية مما يزيد من عمر المنظومة.

4- إمكانية الاستفادة من المنظومة لتسخين المياه في فصل الشتاء:

غالباً ما تكون الحرارة المطروحة إلى جوف الأرض في فصل الصيف أكبر من الحرارة المستهلكة في فصل الشتاء لعملية التدفئة، لذلك يمكن الاستفادة من الحرارة الفائضة في تسخين المياه شتاءً .

5- عدم وجود تجهيزات خارجية ظاهرة:

مما يوفر المساحة لاستخدامات أخرى ويخفف التلوث الصوتي ويمنع حصول إصابات أو صدمات كهربائية للأشخاص الموجودين بالقرب من التجهيزات الخارجية في المنظومات التقليدية، وتظهر أهمية هذه الميزة في المدارس والمنشآت التعليمية.

6- تقليل التلوث البيئي:

إنَّ ارتفاع الفعالية يقلل من استهلاك الطاقة الكهربائية للاستطاعة التبريدية ذاتها أو استطاعة التدفئة المقدمة مقارنة بالمنظومات التقليدية، مما يقلل من انبعاث الغازات المضرة بالبيئة مثل CO_2

7- انخفاض الكلفة الاستثمارية:

على الرغم من ارتفاع الكلفة التأسيسية لمنظومات المضخات الجيوحرارية، إلَّا أنَّ كلفتها الاستثمارية تكاد تكون الأقل بين منظومات المضخات الحرارية وذلك بسبب العوامل الثلاثة التالية:

1- انخفاض الاستهلاك الكهربائي.

2- انخفاض كلفة الصيانة.

3- العمر المديد لمكونات المنظومة.

تملك منظومات المضخات الجيوحرارية عدة مساوئ مقارنة بالمنظومات التقليدية التي تستخدم الماء أو الهواء كمصدر (مستهلك) حراري، تَتلخَّص هذه المساوئ بما يلي:

1- ارتفاع الكلفة التأسيسية:

في الأبنية السكنية :الكلفة التأسيسية ضعف كلفة المنظومات التقليدية.

في الأبنية التجارية :الكلفة التأسيسية أكبر بحوالي % 20 إلى % 40 من كلفة المنظومات التقليدية المعتمدة على الحجم الثابت للهواء [Constant Air Volume [CAV.

2- محدودية عدد المصممين والمتعهدين والمصنعين.

الفصل الثاني

خوارزمية تصميم المبادل الجيوحراري

Geothermal Exchanger Design Algorithm

2.1 تمهيد:

الهدف من تصميم المبادل الجيوحراري هو تحديد الطول المطلوب للأنبوب واللازم لتلبية أحمال التدفئة والتكييف وتحديد أبعاد الحفرة اللازمة للمبادل ضمن الأرض. في البداية لا بدَّ من معرفة المعطيات التصميمية وطرق انتقال الحرارة في المبادل الحراري الموصف في هذا البحث. فيتمُّ البدء بالعلاقات التصميمية والتي تشمل انتقال الحرارة داخل الأنبوب باتجاه جدران الأنبوب وانتقال الحرارة بالتوصيل ضمن الأنبوب والتربة وكذلك ضياعات الضغط والمقاومات الهيدروليكية التي تُؤدّي لخوارزمية التصميم

يتعلق تحديد طول المبادل وأبعاد الحفرة اللازمة بالعوامل التالية [45] :

1- حمل التبريد والتدفئة التصميميين للبناء.

2- الخواص الحرارية للطبقات الجيوحرارية.

3- درجة حرارة جوف الأرض.

4- الخواص الحرارية للأنابيب المستحدمة.

5- التأثير الشهري والسنوي لاختزان الحرارة في جوف الأرض نتيجة عمل المضخة الجيوحرارية.

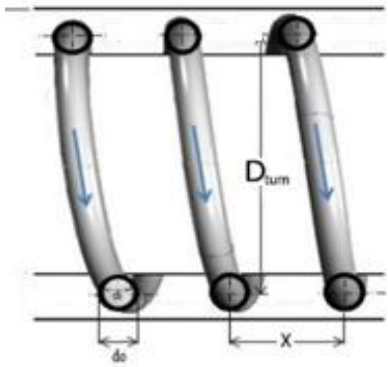
6- معدل تدفق الماء ضمن المبادل ووجود مادة مانعة للتجمد ضمنه.

7- درجة حرارة دخول الماء وخروجه من وإلى وحدة المبادل الحراري.

2.2 المبادل الحراري المدروس:

مبادل حراري أنبوبي حلزوني مُبيَّن في الشكل (1-2) مطمور ضمن التربة على عمق 5 متر ومصنوع من مادة البيكس pex ووسيط التشغيل المستخدم هو الماء حيث تكون درجة حرارة التربة وسطياً 15^oC (10^oC شتاء و 20^oC صيفاً) ودرجة حرارة الماء 35^oC صيفاً

ويقلل المبادل الجيوحراري الحلزوني من المساحة اللازمة لطمر المبادل ضمن التربة بالمقارنة مع المبادلات الأفقية إلا أنه يستلزم طول أنبوب أكبر، كما أن الانتقال الحراري يكون بشكل فراغي في جميع الاتجاهات وبصورة أفضل من المبادل الجيوحراري الأفقي أو الشاقولي.



الشكل (2–1) مبادل حراري أنبوبي حلزوني

خيت أن:

D_{turn} : قطر لفة المبادل

X : التباعد بين اللفات

d_i : قطر الأنبوب الداخلي

2.3 علاقات انتقال الحرارة في المبادل المدروس:

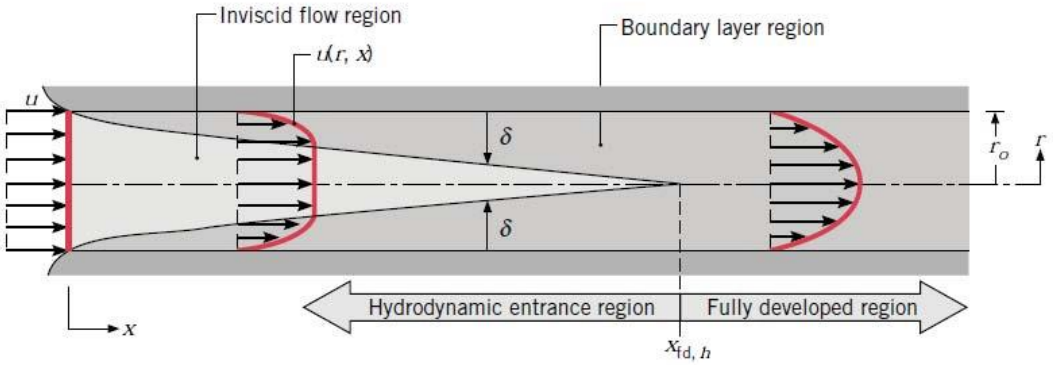
لا بدَّ من معرفة أنَّ الانتقال الحراري في هذه الحالة هو انتقال حراري داخلي بالحمل من الماء إلى جدار الأنبوب وانتقال حرارة بالتوصيل ضمن مادة الأنبوب وأيضاً بالتوصيل إلى التربة ومن ثُمَّ يوجد اعتبارين يجب الأخذ بهما وهما الاعتبارات الهيدروديناميكية الموافقة لسرعة التدفق ومن ثُمَّ الحصول على الطبقة الحدية الهيدروديناميكية وسماكتها والاعتبارات الحرارية الموافقة للتدفق الحراري والحصول على الطبقة الحدية الحرارية وسماكتها ليتمَّ تقدير التدرج والبث الحراري على طول سطح التبادل ومن ثُمَّ تحديد معاملات انتقال الحرارة.

2.3.1 الاعتبارات الهيدروديناميكية:

عند التعامل مع انتقال الحرارة عند التدفق الداخلي من المهم تحديد نوع التدفق إذا كان صفائحياً أو مضطرباً، كما يجب الاهتمام بوجود منطقة مدى الدخول والمنطقة المستقرة بالكامل.

2.3.1.1 شروط التدفق:

يُفترض أنه لدينا تدفق صفائحي في أنبوب دائري r_o مُوضَّحً في الشكل(2–2) حيث تدخل السوائل للأنبوب بسرعة موحدة، ونلاحظ بأنه عندما يلامس السائل سطح الأنبوب، فإنَّ تأثير اللزوجة يكون مهماً في هذه الحالة، وإن استقرار حدود الطبقة الحدية يحدث مع ازدياد الطول x ، حيث يحدث هذا الاستقرار على حساب تقلص منطقة التدفق اللزج.



الشكل (2−2) تطور الطبقة الهيدروديناميكية الصفائحية في أنبوب دائري

وتتضمن هذه المنطقة المتطورة دمج حدود الطبقة في خط الوسط، حيث لا يتغير شكل السرعة مع زيادة x، عندها يمكن القول عن التدفق بأنه مستقر بشكل كامل، وتسمى المسافة الممتدة من المدخل حتى نقطة الاستقرار (طول الدخول الهيدروديناميكي)، ويرمز لها بـ $X_{fd,h}$ كما هو مُوضَّح في الشكل (2−2)، يكون شكل السرعة المستقرة كلياً على هيئة قطع مكافئ بالنسبة للتدفق الصفائحي، ويكون الشكل أكثر تسطحاً في التدفق المضطرب وذلك بسبب حركة الدوامات بالاتجاه القطري.

عند التعامل مع التدفق الداخلي، من المهم تحديد منطقة مدى الدخول، التي تعتمد على نوع التدفق إذا كان صفائحياً أو مضطرباً وذلك من خلال حساب عدد رينولدز في أنبوب دائري حسب العلاقة التالية:

$$R_{eD} = \frac{\rho\, u_m\, D}{\mu} = \frac{u_m\, D}{\nu} \qquad (2-1)$$

حيث u_m هي السرعة الوسطية السائل في الأنبوب، و D هو قطر الأنبوب. يكون عدد رينولدز الحدي في تدفق مستقر بشكل كامل مع بداية الاضطراب:

$$R_{eD.c} \approx 2300 \qquad (2-2)$$

وعلى الرغم من حاجتنا لعدد رينولدز أكبر $(R_{eD} = 10000)$ لتحقيق شروط اضطراب كاملة. إنَّ تحول الجريان إلى جريان مضطرب يبدأ في منطقة الدخول على حدود الطبقة المستقرة.

من أجل التدفق الصفائحي $(R_{eD} \leq 2300)$ يمكن الحصول على طول الدخول الهيدروديناميكي من المعادلة (2−1):[47]

$$\left(\frac{X_{fd,h}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05\, R_{eD} \qquad (2-3)$$

هذه المعادلة تقوم على افتراض أنَّ السوائل تدخل الأنبوب من فوهة دائرية ولذلك تُعد سرعتها قريبة من الشكل (2−2) على الرغم من ذلك فإنَّه لا يوجد معادلة عامة مرضية لحساب طول الدخول الهيدروديناميكي في التدفق المضطرب، وكمقاربة أولية:[48]

$$10 \leq \left(\frac{X_{fd,h}}{D}\right)_{turb} \leq 60 \qquad (2-4)$$

ومن ثُمَّ نفترض أنَّ التدفق المضطرب مستقر من أجل $(X/D) > 10$

2.3.1.2 السرعة الوسطية:

بسبب اختلاف السرعة على المقطع العرضي للأنبوب، فإنَّه من الضروري العمل مع معدل السرعة u_m عند التعامل مع التدفق الداخلي، حيث يمكن تحديد السرعة بواسطة كثافة السوائل ρ ومساحة المقطع العرضي للأنبوب A_o، من معادلة التدفق الكتلي للأنبوب أو معادلة الاستمرار:

$$\dot{m} = \rho\, u_m\, A_c \qquad (2-5)$$

وفي التدفق المستقر غير القابل للانضغاط في أنبوب تكون قيم $(u_m\,, \dot{m})$ ثابتة ومستقلة عن X ، ومن المعادلة (2-1) و (2-5) ومن أجل التدفق في أنبوب دائري مساحة مقطعه $A_c = \pi D^2/4$ يكون عدد رينولدز:

$$R_{eD} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \qquad (2-6)$$

وبما أنَّ معدَّل التدفق الكتلي يمكن التعبير عنه بتكامل التدفق الكتلي $(\rho\, u)$ عبر المقطع العرضي:

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho\, u\,(r,x)\, dA_c \qquad (2-7)$$

ينتج لدينا بالنسبة لتدفق غير قابل للانضغاط في أنبوب دائري:

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho\, u\,(r,x)\, dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_o^2}\int_o^{r_o} u\,(r,x) r\, dr = \frac{2}{r_o^2}\int_o^{r_o} u\,(r,x) r\, dr \qquad (2-8)$$

يمكن استخدام هذه المعادلة من أجل تحديد u_m عند أي قيمة لـ x من معرفة شكل السرعة $u(\mathrm{r})$ عند ذلك الموضع.

2.3.1.3 شكل السرعة في المنطقة المستقرة كلياً:

يمكن تحديد شكل السرعة من أجل التدفق الصفائحي غير القابل للانضغاط وسوائل ذات خصائص ثابتة في منطقة مستقرة بشكل كامل في أنبوب دائري، ومن الأشياء المهمة في الشروط الهيدروديناميكية في المنطقة المستقرة كلياً هو أنَّ كلاً من مركبات السرعة الزاوية للسرعة v ومكونات السرعة المحورية $(\partial u/\partial x)$ تكون قيمتها صفراً في كلِّ الأماكن:

$$v = 0 \;\; and \;\; \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0 \qquad (2-9)$$

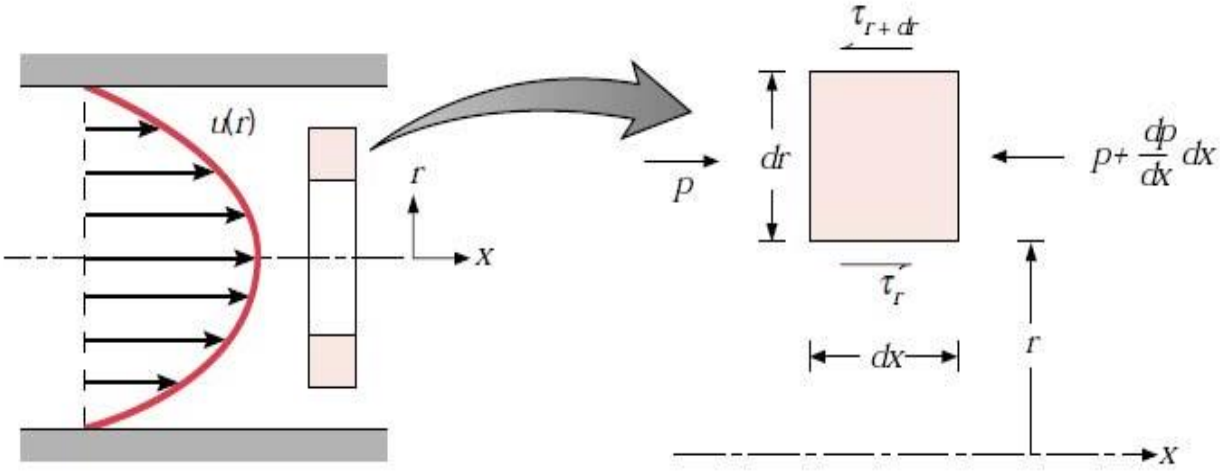
لذلك فإنَّ مركبات السرعة المحورية تعتمد فقط على $r, u(x,r) = u(r)$

يمكن الحصول على مكونات السرعة عبر حل الشكل المناسب لمعادلة x – معادلة الحركة، حيث يمكن تحديد هذا الشكل من خلال معرفة أنه من أجل شروط المعادلة (2-9) تكون قيمة الحركة مساوية للصفر في المنطقة المتطورة بشكل كامل. عندها يصبح الحفاظ على قوة الدفع من خلال التوازن البسيط بين قوى القصِّ والضغط للتدفق بالنسبة لعنصر تفاضلي حلقي. من الشكل (2-3) يمكن التعبير عن توازن القوى كما يلي:

$$\tau_r(2\pi r\, dx) - \left\{\tau_r(2\pi r\, dx) + \frac{d}{dr}[\tau_r(2\pi r\, dx)]dx\right\} + p(2\pi r\, dr)$$
$$- \left\{p(2\pi r\, dr) + \frac{d}{dx}[p(2\pi r\, dr)\, dx]\right\} = 0$$

حيث τ قوى القصِّ والتي تختصر إلى:

$$-\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r\frac{dp}{dx} \qquad (2-10)$$



الشكل (2-3) توازن القوى على عنصر تفاضلي لجريان صفائحي مستقر ضمن أنبوب دائري

مع $y = r_o - r$ قانون نيوتن للزوجة، يصبح شكل المعادلة:

$$\tau_r = -\mu\frac{du}{dr} \qquad (2-11)$$

وتصبح المعالة (2-10):

$$\mu\frac{d}{dr}\left(r\frac{du}{dr}\right) = \frac{dp}{dx} \qquad (2-12)$$

بما أنَّ انخفاض الضغط المحوري يكون مستقل عن ***r***، يمكن حل المعادلة (2-12) عن طريق إجراء التكامل مرتين للحصول على الحل العام:

$$r\frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right)\frac{r^2}{2} + C_1$$

و

$$u(r) = \frac{1}{\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right)\frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2$$

يمكن تحديد ثوابت التكامل من خلال إدخال الشروط الحدية:

$$u(r_o) = 0 \quad and \quad \left.\frac{\partial u}{\partial r}\right|_{r=0} = 0$$

والتي تفرض أن تكون نسبة الخطأ صفراً على سطح الأنبوب وأن يكون الجريان متناظراً بالنسبة للمركز، من السهل تقييم الثوابت وينتج لدينا:

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right) r_o^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \qquad (2-13)$$

لذلك فإنَّ شكل السرعة المستقرة يكون على شكل قطع مكافئ، حيث إنَّ تدرج الضغط يجب أن يكون دوماً سالباً.

يمكن استخدام النتائج السابقة لتحديد معدل سرعة التدفق من المعادلة (2-13).

ومن المعادلة (2-8) نحصل على:

$$u_m = -\frac{r_o^2\, dp}{8\,\mu\, dx} \qquad (2-14)$$

يمكن ان ندخل هذه القيمة في المعادلة (2-13)، ويكون شكل السرعة:

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2\left[1 - \left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \qquad (2-15)$$

بما أنَّ u_m يمكن حسابها من معدل التدفق الكتلي، ومن ثُمَّ فإن المعادلة (2-14) يمكن استخدامها من أجل تحديد انخفاض الضغط

2.3.1.4 انخفاض الضغط ومعامل الاحتكاك في التدفق المستقر كلياً:

نهتم عادة بانخفاض الضغط المطلوب للحفاظ على التدفق الداخلي، لأنَّ هذا المقدار يحدد استطاعة المضخة، ومن أجل تحديد انخفاض الضغط فإنه لا بدَّ من التعامل مع معامل احتكاك مودي (أو دارسي) والذي هو بارامتر لا بعدي يمكن إيجاده كما يلي:

$$f = \frac{-(dp/dx)\,D}{\rho\,\mu_m^2\,/\,2} \qquad (2-16)$$

يجب ألا نخلط بين هذه الكمية ومعامل احتكاك فاننع المعرف بالمعادلة:

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho\,\mu_m^2\,/\,2} \qquad (2-17)$$

حيث إنَّ $\tau_s = -\mu\left(\frac{du}{dr}\right)_{r=r_o}$ فينتج لدينا من المعادلة (2-13):

$$C_f = \frac{f}{4} \qquad (2-18)$$

نستنتج من إدخال المعادلتين (2-1) و (2-14) في المعادلة (2-16) من أجل تدفق صفائحي مستقر بشكل كامل فينتج لدينا:

$$f = \frac{64}{R_{e_D}} \qquad (2-19)$$

من أجل تدفق مضطرب مستقر بشكل كامل يكون التحليل أعقد ويجب أن نعتمد نتائج تجريبية، يمكن تحديد عامل الاحتكاك من أجل مدى كبير لأعداد رينولدز من الشكل (2-4)، بالإضافة إلى الاعتماد على عدد رينولدز يكون عامل الاحتكاك قليلاً جداً بالنسبة للأسطح الملساء ويزداد مع ازدياد خشونة السطح ***e***، ويمكن الحصول تقريبياً على شروط السطح الأملس من المعادلات:

$$f = 0.316\, R_{e_D}^{-1/4}\ ; R_{e_D} \le 2\times 10^4 \qquad (2-20a)$$

$$f = 0.184\, R_{e_D}^{-1/5}\ ; R_{e_D} \ge 2\times 10^4 \qquad (2-20b)$$

بدلاً من ذلك يوجد علاقة واحدة تشمل مدى كبير لأعداد رينولدز قدمها بيتخوف [49]

من الشكل:

$$f = \left(0.790 \ln R_{e_D} - 1.64\right)^{-2} \quad 3000 \leq R_{e_D} \leq 5 \times 10^6 \qquad (2\text{–}21)$$

نلاحظ أنَّ f، تكون ثابتة في منطقة مستقرة بشكل كامل. من المعادلة (2–16) يكون انخفاض الضغط $\Delta p = p_1 - p_2$ مرتبط مع التدفق المستقر بشكل كامل من الموقع x_1 الى الموقع x_2.

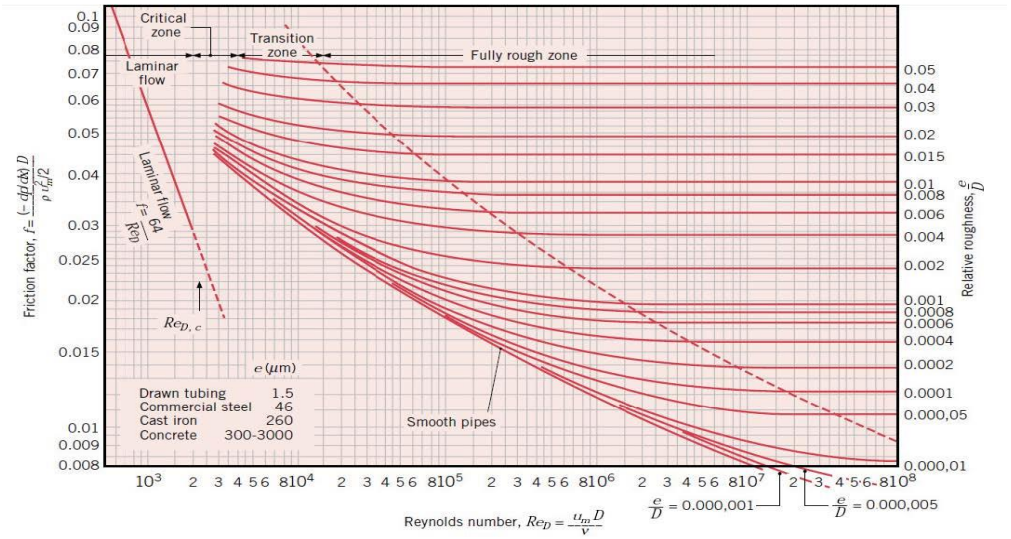
$$\Delta p = -\int_{p_1}^{p_2} dp = f\,\frac{\rho \mu_m^2}{2D}\int_{x_1}^{x_2} dx = f\,\frac{\rho \mu_m^2}{2D}\,(x_2 - x_1) \qquad (2\text{–}22a)$$

حيث يمكن الحصول على f من الشكل (2–4) ومن المعادلة (2–19) بالنسبة للتدفق الصفائحي ومن المعادلة (2–20) و (2–21) بالنسبة للتدفق المضطرب في الأنابيب الملساء.

تكون الاستطاعة المطلوبة للمروحة أو المضخة للتغلب على مقاومة التدفق مرتبطة مع انخفاض الضغط ويمكن التعبير عنها:

$$P = (\Delta p)\,\dot{\forall} \qquad (2\text{–}22b)$$

حيث معدل التدفق الحجمي $\dot{\forall}$ يمكن أن يُعَبَّر عنه بـ $\dot{\forall} = \dot{m}/\rho$ بالنسبة لتدفق غير قابل للانضغاط.

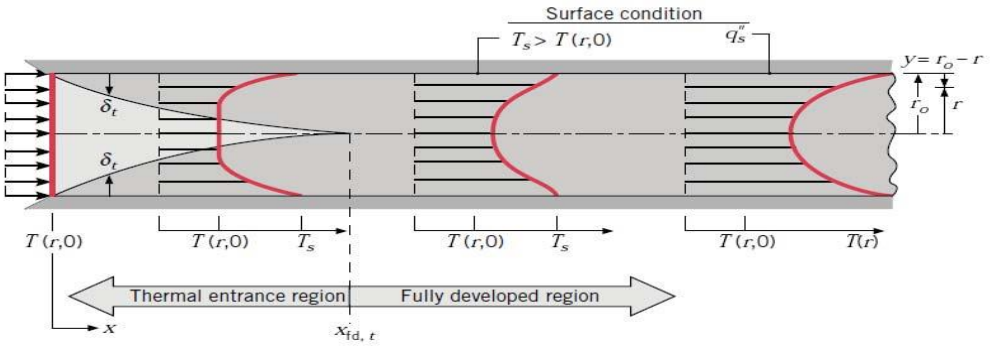


الشكل (2–4) عامل الاحتكاك لجريان مستقر في أنبوب دائري [50]

2.3.2 الاعتبارات الحرارية:

إذا دخلت السوائل الأنبوب كما هو مُوضَّحٌ في الشكل (2–5) بدرجة حرارة موحدة $T(r,O)$ أقل من درجة حرارة السطح فإنَّه يحدث انتقال حرارة بالحمل وتبدأ الطبقة الحدية الحرارية بالاستقرار، وبما أنَّ سطح الأنبوب مقيد بحيث يفرض إما درجة حرارة موحدة (T_s تكون ثابتة)، أو تدفق حراري ثابت (q_s'' تكون ثابتة)، فإننا نصل إلى شروط حرارية مستقرة

بالكامل. يختلف شكل درجة الحرارة المستقرة $T(r,x)$ تبعاً لدرجة حرارة السطح المنتظمة أو التدفق الحراري الثابت. أمَّا بالنسبة لشروط السطح، فبعد تجاوز منطقة الدخول، فإن درجة الحرارة تزداد أو تتناقص بازدياد x



الشكل (2−5) استقرار الطبقة الحدية الحرارية في أنبوب دائري

بالنسبة للتدفق الصفائحي يمكن أن يعطى طول الدخول الحراري بالعلاقة [48]:

$$\left(x_{fd,t}/D\right)_{lam} \approx 0.05 Re_D Pr \qquad (2-23)$$

بالمقارنة بين المعادلتين (2−3) و (2−23) ينتج لدينا، أنَّه إذا كان لدينا $P_r > 1$، فإنَّ حدود الطبقة الهيدروديناميكة تستقر بسرعة أكبر من حدود الطبقة الحرارية، ($x_{fd,h} < x_{fd,t}$) بينما يكون العكس صحيحاً من اجل $P_r < 1$.

ومن أجل سوائل بأعداد براندل كبيرة مثل الزيت ($P_r \geq 100$) تكون $x_{fd,h}$ تكون أقل بكثير من $x_{fd,t}$ ومن المنطقي أن نفترض سرعة مستقرة بشكل كامل ضمن منطقة الدخول، وعلى العكس بالنسبة للتدفق المضطرب تكون الشروط منفصلة كلياً عن أعداد براندل وكمقاربة أولية يجب أن نفترض [46]:

$$\left(x_{fd,t}/D\right) = 10$$

يمكن تصنيف الشروط الحدية في منطقة مستقرة بشكل كامل في عدة تصنيفات نافعة، وقبل أن يتمُّ أخذ هذه التصنيفات بالحسبان من الضروري تقديم المعنى الأساسي لمعدل درجة الحرارة والشكل الأمثل لقانون نيوتن في التبريد.

2.3.2.1 معدَّل درجة الحرارة

كما عدم سهولة تحديد سرعة التيار الحر، يقودنا لاستعمال معدَّل السرعة لوصف التدفق الداخلي، فإنَّ غياب درجة الحرارة الوسطية يدعونا إلى استخدام معدل درجة الحرارة، ومن أجل تعريف معدل درجة الحرارة نستخدم المعادلة:

$$q = \dot{m}\, c_p (T_{out} - T_{in}) \qquad (E)$$

نستذكر أنَّ الشروط على الطرف الأيمن تقدر الطاقة الحرارية للسوائل غير القابلة للانضغاط، او الطاقة الداخلية الكامنة (الطاقة الحرارية + عمل التدفق) بالنسبة للغاز المثالي الذي يتمُّ نقله عبر التدفق، بتطوير هذه المعادلة، تمَّ افتراض أنَّ درجة الحرارة موحدة عند المدخل والمخرج على المقطع العرضي للأنبوب، في الواقع هذا ليس صحيحاً عندما يحدث انتقال حرارة بالحمل، ومن أجل أن يكون الشرط $\dot{m}\, c_p\, T_m$ مساوياً للمعدَّل الحقيقي للطاقة الحرارية الكامنة عبر المقطع

العرضي، فإنَّ معدَّل تدفق الحرارة الصحيح يمكن الحصول عليه من خلال ضرب التدفق الكتلي ρu بإنتالبي واحدة الكتلة c_p, T عبر المقطع العرضي وعنده يمكن تعريف T_m من:

$$\dot{m}\, c_p\, T_m = \int_{A_c} \rho\, u\, c_p T\, dA_c \qquad (2-24)$$

أو

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho\, u\, c_p T\, dA_c}{\dot{m}\, c_p} \qquad (2-25)$$

ومن أجل تدفق في أنبوب دائري مع ρ ثابتة و c_p ثابتة ينتج لدينا من المعادلة (2-5) و (2-25)

$$T_m = \frac{2}{u_m\, r_o^2} \int_0^{r_o} u\, T\, r\, dr \qquad (2-26)$$

2.3.3 قانون نيوتن في التبريد:

معدَّل درجة الحرارة T_m هو مرجع مقنع بالنسبة للتدفق الداخلي، وتُؤدِّي الدور ذاته الذي تُؤدِّيه درجة حرارة التيار الحر T_∞ بالنسبة للتدفق الخارجي، لذلك يمكن التعبير عن قانون نيوتن في التبريد بما يلي:

$$q_s'' = h\,(T_s - T_m) \qquad (2-27)$$

حيث h معامل انتقال الحرارة بالحمل، بينما يوجد اختلاق حقيقي بين T_m و T_∞ حيث عندما تكون T_∞ ثابتة في اتجاه التدفق فإنَّ T_m يجب أن تختلف في الاتجاه، ولا تكون قيم dT_m/dx صفراً ابداً إذا كان هنالك حمل حراري، وإنَّ قيمة T_m تزداد مع x إذا كان معدَّل نقل الحرارة على السطح $(T_s > T_m)$، وتنخفض مع x إذا كان العكس صحيحاً $(T_s < T_m)$

2.3.4 الشروط المستقرة بشكل كامل:

بما أنه يوجد انتقال حرارة بين السطح والسائل، مما يفرض أن تتغير درجة حرارة السائل على طول x وهذا ما يدعو للتساؤل هل استقرت الحالة الحرارية أم لا؟ هذه الحالة مختلفة بشكل كامل عن الحالة الهيدروديناميكية من أجل $(\partial u/\partial x) = 0$ في المنطقة المستقرة بشكل كامل. بينما عند وجود انتقال حرارة $(dTm\ /\ dx)$ في أيّ نصف قطر لا يساوي الصفر. وتبعا لذلك، يتغير شكل التدرج الحراري $T(r)$ باستمرار على طول x ومن الواضح هنا أنَّ الوصول إلى طبقة مستقرة كلياً من الممكن ألا يحدث. يمكن تبسيط التحليل من خلال العمل على تغير درجة حرارة كسلوك عابر مستقل عن تغير المسافة x ومعادلة حفظ الطاقة. وتقديم تغير درجة حرارة مستقل عن المسافة من الشكل $(T_s - T)\ /\ (T_s - T_m)$، (درجة الحرارة اللا بعدي) شروط هذا المعدل المستقل عن x تكون موجودة [48] ، ويستمر شكل الحرارة $T(r)$ بالتغير مع تغير x، يمكن أن نُسمِّي هذا الشكل المرتبط مع شكل الحرارة والذي لا يتغير بالشكل المستقر كلياً ويمكن صياغة هذا الشرط كما يلي:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{T_s(X) - T(r,X)}{T_s(X) - T_m(X)}\right]_{fd,t} = 0 \qquad (2-28)$$

حيث T_s درجة حراة سطح الأنبوب، T هي درجة حرارة السائل، وT_m معدَّل درجة الحرارة للسوائل عبر مساحة المقطع العرضي للأنبوب.

الشرط المعطى بالمعادلة (2-28) يمكن الوصول إليه في أنبوب عندما تكون شدة التدفق الحراري المنتظمة على السطح q_s'' ثابتاً، أو درجة حرارة السطح المنتظمة T_s ثابتة، تظهر شروط السطح هذه في العديد من التطبيقات الهندسية. مثال: يمكن أن يوجد تدفق حراري ثابت على السطح إذا تم تسخين جدار الأنبوب بطريقة كهربائية أو إذا كان السطح الخارجي مشعاً. وعلى العكس يمكن أن يكون لدينا درجة حرارة موحدة ثابتة على السطح إذا تغيرت الحالة (بسبب الغليان أو التبخر) الحاصلين على السطح الخارجي. نلاحظ أنه من المستحيل في الوقت نفسه تقديم شروط التدفق الحراري الموحد الثابت ودرجة حرارة السطح الثابتة. إذا كان q_s'' ثابتاً، يجب أن تكون T_s متغيرة مع تغير x، وعلى العكس عندما تكونT_s ثابتة، فإن q_s'' يتغير مع x.

يمكن أن يتم استنتاج العديد من الميزات المهمة للشروط الحرارية المستقرة للتدفق من المعادلة (2-28). بما أن معدل درجة الحرارة منفصل عن x، فإنَّ القيم المشتقة من هذا المعدَّل مع أخذ r بالحسبان يجب أن تكون أيضاً مستقلة عن x، لتقييم هذه المشتقات على سطح الأنبوب (نلاحظ أنَّ T_s و T_m ثابتتان ومختلفتان مع اخذ r بالحسبان)، عندها نحصل على:

$$\frac{\partial}{\partial}\left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m}\right)\Big|_{r=r_o} = \frac{-\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_o}}{T_s - T_m} \neq f(x)$$

وبتعويض قيمة $\frac{\partial T}{\partial r}$ من قانون فوريير، من المعادلة (2-4) نحصل على:

$$q_s'' = -k\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0} = k\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_o}$$

ومن أجل q_s'' من قانون نيوتن في التبريد، المعادلة (2-27) نحصل على:

$$\frac{h}{k} \neq f(X) \qquad (2-29)$$

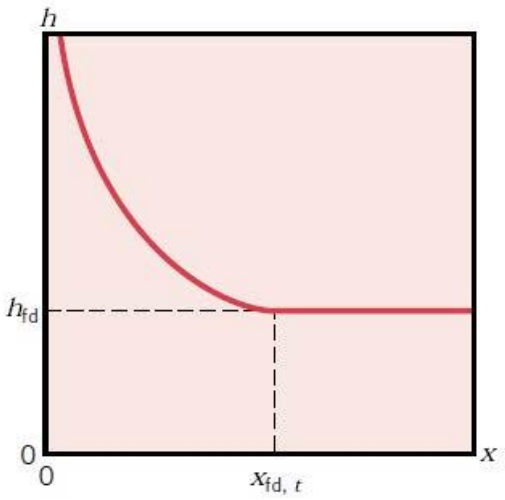
يكون معامل الانتقال الحراري ثابتاً ومستقلاً عن x في الشكل الحراري المستقر بشكل كامل مع خصائص ثابتة. المعادلة (2-28) غير مرضية في منطقة الدخول، حيث إنَّ h تتغير مع x كما هو موضَّح في الشكل (2-6) لأنَّ سماكة الحدود الحرارية للطبقة تكون صفراً عند مدخل الأنبوب، ويكون معامل انتقال الحرارة بالحمل كبيراً جداً عند $x = 0$، بينما h تنخفض بسرعة عندما تستقر الحدود الحرارية للطبقة حتى تصبح القيم الثابتة مرتبطة مع الشروط المستقرة كلياً.

هناك أمور أخرى مبسطة مرتبطة مع هذه الحالة الخاصة للتدفق الحراري الموحد حيث إنَّ h وq_s'' ثابتتان في المنطقة المستقرة بشكل كامل. ينتج لدينا من المعادلة (2-27):

$$\frac{dT_s}{dX}\Big|_{fd,t} = \frac{dT_m}{dX}\Big|_{fd,t} \quad ; q_s'' = constant \qquad (2-30)$$

واذا تمَّ بتوسيع المعادلة (2-28) وحللنا من أجل $\frac{\partial T}{\partial x}$ ينتج لدينا:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{fd,t} - \left.\frac{dT_s}{dX}\right|_{fd,t} - \left.\frac{(T_s-T)}{(T_s-T_m)}\frac{dT_s}{dX}\right|_{fd,t} + \left.\frac{(T_s-T)}{(T_s-T_m)}\frac{dT_m}{dX}\right|_{fd,t} \quad (2-31)$$



الشكل (2-6) التغير في معامل انتقال الحرارة بالحمل على طول الأنبوب

وبتعويض القيم من المعادلة (2-30) نحصل على:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial X}\right|_{fd,t} = \left.\frac{\partial T_m}{\partial X}\right|_{fd,t} \;;\; q_s'' = constant \quad (2-32)$$

لذلك فإنَّ تدرج درجة الحرارة على المحور مستقل عن الموقع. في حالة درجة حرارة السطح الثابتة $(dT_s/dX = 0)$ ينتج لدينا من المعادلة (2-31):

$$\left.\frac{\partial T}{\partial X}\right|_{fd,t} = \left.\frac{(T_s-T)}{(T_s-T_m)}\frac{dT_m}{dX}\right|_{fd,t} \;;\; T_s = constant \quad (2-33)$$

في مثل هذه الحالة فإنَّ قيمة $\frac{\partial T}{\partial X}$ تعتمد على الإحداثيات المحورية.

من النتائج السابقة نجد أنَّ معدَّل درجة الحرارة يكون متحولاً مهماً جداً بالنسبة للتدفق الداخلي، ومن أجل وصف مثل هذا التدفق يجب أن نعرف قيمة تغيره مع x، ويمكن الحصول على هذا التغير من خلال تطبيق توازن الطاقة الإجمالي على التدفق، كما سيتمُّ توضيحه في القسم اللاحق.

2.4 توازن الطاقة:

2.4.1 الاعتبارات العامة:

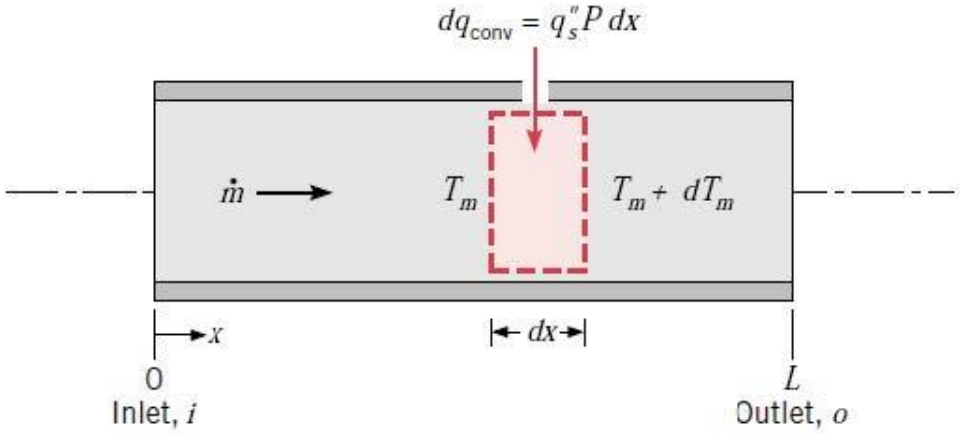
بما أنَّ التدفق الداخلي يكون كاملاً ضمن جدران الأنبوب، فيمكن تطبيق توازن الطاقة من أجل تحديد كيفية اختلاف معدَّل درجة الحرارة $T_m(x)$ مع اختلاف الموقع على طول الأنبوب ومخرجه. لنعتبر التدفق كما في الشكل (2-7) حيث تتحرك السوائل بتدفق ثابت $\dot{m}$، ويحدث حمل حراري على السطح الداخلي، فيكون من المنطقي افتراض بعض الشروط التي تقودنا إلى تبسيط شكل معادلة التدفق المستقر للطاقة الحرارية، المعادلة (E)، وهذه الشروط هي أن يكون أثر اللزوجة مهملاً ويمكن تشكيل السوائل إمَّا بشكل سوائل غير قابلة للانضغاط، أو غاز مثالي مع تغيّر ضغط مهمل. بالإضافة لذلك

فإنَّه من المنطقي إهمال معدَّل نقل الحرارة بالتوصيل في الاتجاه المحوري، لذلك فإن شرط نقل الحرارة من المعادلة (E) يتضمن فقط q_{conv}، لذلك تكتب المعادلة (E) بالشكل:

$$q_{conv} = \dot{m}\, c_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \qquad (2-34)$$

ومن أجل أنبوب محدود الطول، فإنَّ معادلة الطاقة البسيطة تحوي ثلاثة متغيرات حرارية هامة $(q_{conv}\ ,T_{m,o}\ ,T_{m,i})$، وهي تعبير عام يُطبَّق بغض النظر عن طبيعة السطح الحراري أو شروط تدفق ضمن الأنبوب، وبتطبيق المعادلة (E) مع استرجاع أنَّ معدَّل درجة الحرارة هو $\dot{m}\, c_p T_m$، فيكون المعدَّل الحقيقي للطاقة الحرارية عبر المقطع العرضي كالتالي:

$$dq_{conv} = \dot{m}\, c_p\, [(T_m + dT_m) - T_m] \qquad (2-35)$$



الشكل (2-7) عنصر تحكم في الجريان داخل الأنبوب

أو

$$dq_{conv} = \dot{m}\, c_p\, dT_m \qquad (2-36)$$

المعادلة (2-36) يمكن أن تعوَّض في شكل مناسب من معدل الحمل الحراري على العناصر المختلفة $q_{conv} = q''_s\, P\, dx$، حيث P هي محيط السطح $P = \pi D$ بالنسبة للأنبوب الدائري، وبالتعويض في المعادلة (2-27) ينتج لدينا:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q''_s P}{\dot{m}\, c_p} = \frac{P}{\dot{m}\, c_p}\, h\, (T_s - T_m) \qquad (2-37)$$

التعبير أعلاه نتيجة مهمة جداً، يمكن من خلاله تحديد التغير المحوري لـ T_m. فإذا كان $T_s > T_m$ فيكون نقل الحرارة إلى السوائل وتزداد T_m بازدياد قيمة x، واذا كان $T_s < T_m$ يكون العكس صحيحاً.

النمط في هذه الكميات الموجودة في الطرف الأيمن من المعادلة (2-37) يختلف مع اختلاف x، على الرغم من أنَّ P يمكن أن تختلف مع اختلاف x، فإنَّه من الشائع أن تكون ثابتة (أنبوب ذو مساحة مقطع عرضي ثابت)، ولذلك فأنَّ الكمية $P/\dot{m}\, c_p$ تكون ثابتة، في المنطقة المستقرة بشكل كامل، ويكون معامل الانتقال الحراري h ثابتاً على الرغم

من أنَّه يختلف مع اختلاف x في منطقة الدخول الشكل (2-6). اخيراً على الرغم من أن T_s يمكن أن تكون ثابتة، فإنَّ T_s يجب أن تتغير دائماً مع تغير x (باستثناء الحالات القليلة التي تكون بدون حمل حراري $T_s = T_m$)

يعتمد حل للمعادلة (2-37) من أجل $T_m(x)$ على الشروط الحرارية للسطح، مع التذكير بأن الحالتين الخاصتين هما التدفق الحراري الثابت على السطح ودرجة حرارة السطح الثابتة، من الشائع أن نجد أحد هاتين الحالتين بمقاربة معقولة.

2.4.2 تدفق الحرارة الثابتة على السطح:

من أجل تدفق حرارة ثابت على السطح يجب أن نلاحظ أولاً أنَّه من السهل تحديد معدَّل نقل الحرارة q_{conv}، بما أنَّ q_s'' مستقلة عن x ينتج لدينا:

$$q_{conv} = q_s''\ (P.L) \qquad (2-38)$$

يمكن استعمال هذا التعبير مع المعادلة (2-34) من أجل تحديد تغيُّر درجة حرارة التدفق $T_{m,o} - T_{m,i}$ ومن أجل q_s'' ثابتة ينتج لدينا أنَّ الحد الأوسط في المعادلة (2-37) يكون ثابتاً ومستقلاً عن x :

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s''\ P}{\dot{m}\ c_p} \neq f(x) \qquad (2-39)$$

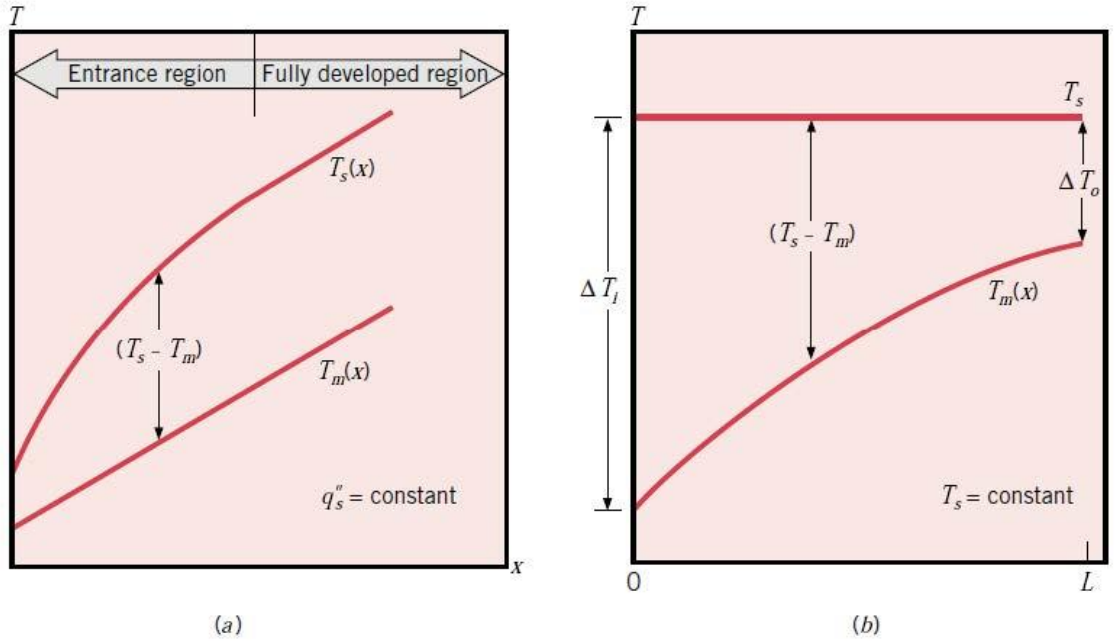
بالتكامل ينتج لدينا:

$$T_m(x) = T_{m.i} + \frac{q_s''\ P}{\dot{m}\ c_p}\ X\ \ ;\ q_s'' = constant \qquad (2-40)$$

الاختلاف الخطي لمعدَّل درجة الحرارة مع اختلاف x، على طول الانبوب الشكل (2-8a)

من المعادلة (2-27) والشكل (2-6) نتوقع دائماً اختلاف درجة الحرارة $(T_s - T_m)$ مع اختلاف x كما هو موضح في الشكل(2-8a) هذا الاختلاف يكون قليلاً (بسبب كبر قيمة h قرب المدخل)، ولكن تزداد مع ازدياد x بسبب انخفاض h هذا يحدث مع استقرار حدود الطبقة. بينما في المنطقة المستقرة بشكل كامل نعرف بأن h مستقلة عن x، لذلك فإنَّه من المعادلة (2-27) ينتج لدينا أنَّ $(T_s - T_m)$ يجب أن تكون مستقلة.

يجب ملاحظة أنه إذا كان تدفق الحرارة غير ثابت يمكن الاشتقاق من المعادلة (2-27) للحصول على توزع معدَّل درجة الحرارة بتغير x، وبشكل مشابه معدَّل الحرارة الإجمالي يمكن الحصول عليه من المتطلبات التي تعطي $q_{conv} = \int_O^L q_s''\ P\ dX$



الشكل (8–2) تغير درجة الحرارة المحورية لانتقال الحرارة ضمن الأنبوب a. تدفق سطحي منتظم b. درجة حرارة سطح منتظمة

2.4.3 درجة حرارة السطح الثابت:

إنَّ نتائج معدَّل الحرارة الإجمالي والتوزيع المحوري لمعدَّل درجة الحرارة مختلفان اختلافاً كلياً من أجل شروط درجة حرارة السطح الثابتة، ولتعريف $\Delta T = (T_s - T_m)$، من المعادلة (2–27) يمكن التعبير عنها كما يلي:

$$\frac{dT_m}{dX} = -\frac{d(\Delta T)}{dX} = \frac{P}{\dot{m}\, c_p}\, h\, \Delta T$$

نفصل المتغيرات ونكامل من مدخل الانبوب لمخرجه:

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_o} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m}\, c_p} \int_O^L h\, dX$$

أو

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{P}{\dot{m}\, c_p} \left(\frac{1}{L} \int_O^L h\, dX \right)$$

من تعريف متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل، المعادلة (2–13) ينتج لدينا:

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{P}{\dot{m}\, c_p}\, \overline{h_L} \quad ;\ T_s = constant \qquad (2\text{–}41a)$$

حيث $\overline{h_L}$ أو بشكل أبسط $\bar{h}$ هي متوسط قيمة h بالنسبة لكامل الأنبوب:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{m.o}}{T_s - T_{m.i}} = \exp\left(-\frac{PL}{\dot{m}\, c_p} \bar{h} \right) \quad ;\ T_s = constant \qquad (2\text{–}41b)$$

وبتكامل مدخل الأنبوب وحتى بعض المواضع المحورية x ضمن الأنبوب، يمكن أن نحصل على نتائج مشابهة ولكن بشكل عام ينتج لدينا:

$$\frac{T_s - T_m(X)}{T_s - T_{m.i}} = \exp\left(-\frac{Px}{\dot{m}\, c_p}\bar{h}\right) \quad ; T_s = constant \qquad (2-42)$$

حيث $\bar{h}$ هي الآن متوسط القيمة من h من مدخل الأنبوب وحتى x. هذه النتيجة تُبيِّن أنَّ اختلاف درجة الحرارة $(T_s - T_m)$ يقل أو يضمحل كلما ابتعدنا محورياً على طول الأنبوب. وبذلك يكون ومعدَّل توزيع درجة الحرارة بالاتجاه المحوري كما هو موضح في الشكل (2–8b). إنَّ تحديد معادلة تعبر عن المعدَّل الإجمالي لنقل الحرارة q_{conv} يكون معقداً بسبب انخفاض واضمحلال تغير الحرارة. نعبر عن المعادلة (2–34) في الشكل:

$$q_{conv} = \dot{m}c_p\left[\left(T_s - T_{m,i}\right) - \left(T_s - T_{m,o}\right)\right] = \dot{m}c_p(\Delta T_i - \Delta T_o)$$

وبتعويض $\dot{m}c_p$ من المعادلة (2–a41) نحصل على:

$$q_{conv} = \bar{h}A_s\Delta T_{im} \quad ; T_s = constant \qquad (2-43)$$

حيث A_s مساحة السطح الجانبي للأنبوب $(A_s = P.L)$ و ΔT_{lm} فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغاريتمي:

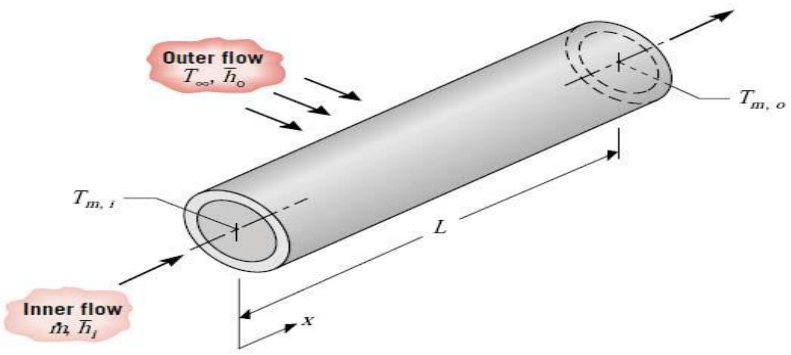
$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o/\Delta T_i)} \qquad (2-44)$$

المعادلة (2–43) هي شكل من أشكال قانون نيوتن في التبريد كله و ΔT_{lm} هو فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغاريتمي على طول أنبوب.

قبل ختام هذا القسم، من المهم أن نلاحظ في العديد من التطبيقات، أن حرارة الوسط الخارجي تكون بدلاً من درجة حرارة سطح الأنبوب، الموضح في الشكل (2–9)، وفي مثل هذه الحالات، من الواضح أنَّ نتائج هذا القسم يمكن ان تستعمل اذا تمَّ استبدال T_s بـ T_∞ (درجة حرارة التيار الحر للسوائل الخارجية) وتستبدل $\bar{h}$ بـ $\bar{U}$ (متوسط معامل انتقال الحرارة الكلي)، ومن أجل هذه الحالة ينتج لدينا:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_\infty - T_{m,o}}{T_\infty - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{\bar{U}\, A_s}{\dot{m}c_p}\right) \qquad (2-45a)$$

$$q = \bar{U}\, A_s\, \Delta T_{im} \qquad (2-46a)$$



الشكل(2–9) التدفق الحراري بين السائل خارج الأنبوب والسائل المار عبره

إنَّ معامل انتقال الحرارة الكلي معرف مسبقاً مما يعني انه لهذا التطبيق سيتضمن توزعاً للحمل الحراري على السطحين الداخلي والخارجي للأنبوب. بالنسبة لجدار أنبوب سميك مع توصيل حراري قليل، يمكن أيضاً أن يتضمن أثر التوصيل الحراري على طول جدار الأنبوب، نلاحظ أنَّ حاصل الجداء $\overline{U}\ A_s$ هي نفسها، ضمن شروط السطح الداخلي $(\overline{U}_i\ A_{s,i})$ أو السطح الخارجي $(\overline{U}_o\ A_{s,o})$ للأنبوب (المعادلة(2−32))، وأيضاً نُلاحظ أن $(\overline{U}\ A_s)^{-1}$ مساوية للمقاومة الحرارية بين الوسيطين الاثنين، وفي مثل هذه الحالة فإنَّ المعادلات: (2−45a) (2−46a) يُعبَّر عنهما:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_\infty - T_{m,o}}{T_\infty - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{1}{\dot{m}c_p\ R_{tot}}\right) \qquad (2-45b)$$

و

$$q = \frac{\Delta T_{im}}{R_{tot}} \qquad (2-46b)$$

إنَّ الاختلاف الشائع للشروط يكون باختلاف درجة الحرارة المنتظمة على السطح الخارجي $T_{s,o}$ بدلاً من درجة حرارة التيار الحر للسوائل الخارجية T_∞، بالنسبة للمعادلة المذكورة أعلاه تُستبدل T_∞ بـ $T_{s,o}$ وإجمالي المقاومة الحراية تكون المقاومة الحرارية المرتبطة مع التدفق الداخلي، كما تكون المقاومة الإجمالية بسبب الحمل الحراري بين السطح الداخلي للأنبوب والسطح تكون متطابقة $T_{s,o}$.

2.4.4 التدفق الصفائحي في الأنبوب الدائري: التحليل الحراري ومعامل التصحيح:

يجب معرفة قيمة معامل الانتقال الحراري الكلي للتمكن من استخدام العلاقات التي تمَّ عرضها سابقاً، والمعادلات التالية ستمكننا من حساب معامل الانتقال الحراري بالنسبة للتدفق الصفائحي في الأنبوب الدائري

2.4.4.1 المنطقة المتطورة بشكل كامل:

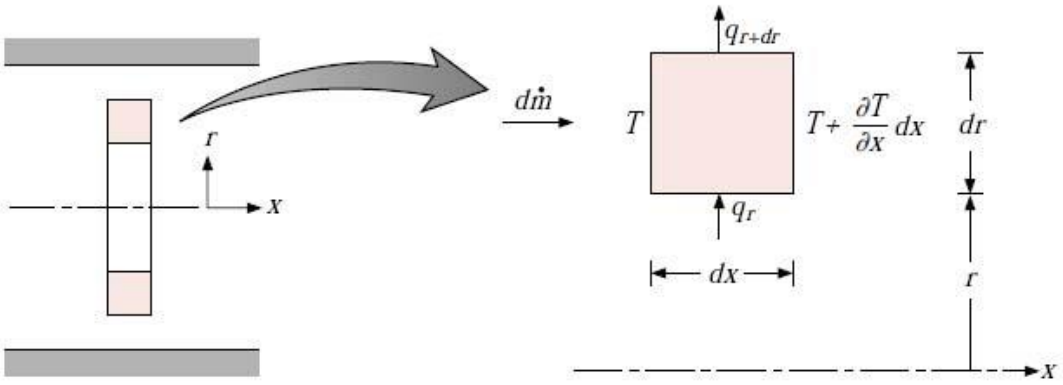
يتمُّ التعامل هنا مع انتقال حراري بالحمل بحالة تدفق صفائحي ووسيط غير قابل للانضغاط وذي خصائص ثابتة في المنطقة المستقرة بشكل كامل ضمن أنبوب دائري. حيث يتمُّ استعمال توزيع الحرارة الناتج لتحديد معامل الانتقال الحراري.

يوجد معادلة مختلفة تصف توزع درجة الحرارة، يتمُّ تحديدها عبر تطبيق الشكل المبسط للتدفق المستمر، من معادلة الطاقة الحرارية $\left[q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})\right]$، بالنسبة للعناصر الحقيقة المختلفة في الشكل(2−10) إذا أهملنا أثر التوصيل المحوري فتكون الحرارة الناتجة عن التوصيل عير السطوح الزاوية q. وعندما تكون السرعة الزاوية مساوية للصفر في منطقة مستقرة بشكل كامل، فإنَّه لا يوجد أثر للطاقة الحرارية عبر السطوح الزاوية، والأثر الوحيد الموجود يكون في الاتجاه المحوري، لذلك فإنَّ المعادلة الأساسية تقودنا إلى المعادلة (2−47) التي تُعبِّر عن التوازن في التوصيل الزاوي والتوصيل المحوري:

$$q_r - q_{r+dr} = (d\dot{m})c_p\left[\left(T + \frac{\partial T}{\partial x}dx\right) - T\right] \qquad (2-47a)$$

أو

$$(d\dot{m})c_p\frac{\partial T}{\partial x}dx = q_r - \left(q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r}dr\right) = -\frac{\partial q_r}{\partial r}\,dr \qquad (2-47b)$$



الشكل (2-10) التوازن الطاقي الحراري لعنصر تفاضلي لجريان مستقر صفائحي ضمن أنبوب

يكون معدَّل اختلاف التدفق الكتلي في الاتجاه المحوري $d\dot{m} = \rho u 2\pi r dr$ ومعدَّل الحمل الحراري الزاوي $q_r = -k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)2\pi r\,dx$، وإذا افترضنا خصائص ثابتة، تصبح المعادلة (2-47b):

$$u\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\alpha}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad (2-48)$$

سنتابع الآن ونحلُّ من أجل توزيع الحرارة في حالة تدفق حراري ثابت على السطح. في هذه الحالة، يكون افتراض أنَّ التوصيل الحراري المحوري مساوٍ للصفر افتراضاً جيداً، حيث $(\partial^2 T / \partial x^2) = Q$ مشتقة من أجل درجة الحرارة المحورية من المعادلة (2-32) ومن أجل مكونات السرعة المحورية، u ، من المعادلة (2-15)، معادلة الطاقة، المعادلة (2-48) تصبح:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \frac{2\,u_m}{\alpha}\left(\frac{dT_m}{dX}\right)\left[1-\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \;; q_s'' = constan \qquad (2-49)$$

حيث $T_m(x)$ تختلف خطياً مع x و $\frac{2\,u_m}{\alpha}\left(\frac{dT_m}{dX}\right)$ ثابتة، نفصل المتغيرات ونكامل مرتين، نحصل على المعادلة من أجل توزيع حرارة زاوي:

$$T(r,x) = \frac{2\,u_m}{\alpha}\left(\frac{dT_m}{dX}\right)\left[\frac{r^2}{4} - \frac{r^4}{16\,r_O}\right] + C_1 \ln r + C_2$$

يمكن تقييم ثابت التكامل عبر تطبيق شروط حدية مناسبة، من المفترض أن تكون درجة الحرارة محددة عند $r = 0$ فينتج لدينا أن $C_1 = 0$، من المفترض أبضاً أن يكون $T(r_o) = T_s$ حيث T_s تختلف مع اختلاف x وينتج لدينا أيضاً:

$$C_2 = T_s(X) - \frac{2\,u_m}{\alpha}\left(\frac{dT_m}{dX}\right)\left(\frac{3r_o^2}{16}\right)$$

لذلك يكون شكل توزع درجة الحرارة في منطقة مستقرة بشكل كامل مع تدفق حراري ثابت على السطح، من الشكل:

$$T(r,x) = T_s(\mathrm{x}) - \frac{2\,u_m r_o}{\alpha}\left(\frac{dT_m}{d\mathrm{x}}\right)\left[\frac{3}{16} + \frac{1}{16}\left(\frac{r}{r_o}\right)^4 - \frac{1}{4}\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \qquad (2-50)$$

ومن خلال معرفة شكل درجة الحرارة يمكن تحديد كل المقاييس الحرارية على سبيل المثال إذا كان شكل السرعة ودرجة الحرارة من المعادلة (2–15) و (2–50) على الترتيب، ثمَّ تعويضها في المعادلة (2–26) وكان التكامل بالنسبة لـ r، ومن ثُمَّ يمكن إيجاد درجة الحرارة من العلاقة:

$$T_m(\mathrm{x}) = T_s(\mathrm{x}) - \frac{11}{48}\left(\frac{2\,u_m r_o}{\alpha}\right)\left(\frac{dT_m}{dX}\right) \qquad (2\text{–}51)$$

ومن المعادلة (2–39) حيث $P = \pi D$ و $\dot{m} = \rho u_m(\frac{\pi D^2}{4})$، نحصل على:

$$T_m(\mathrm{x}) - T_s(\mathrm{x}) = -\frac{11}{48}\frac{q_s'' D}{k} \qquad (2\text{–}52)$$

بجمع قانون نيوتن في التبريد مع المعادلتين (2–27) و (2–52) ينتج لدينا:

$$h = \frac{48}{11}\left(\frac{k}{D}\right)$$

أو

$$N_{u_D} = \frac{hD}{k} = 4.36 \;; q_s'' = constan \qquad (2\text{–}53)$$

لذلك في الأنبوب الدائري وعند وجود تدفق حراري منتظم صفائحي في شروط مستقرة بشكل كامل، تكون أعداد نوسلت ثابتة ومستقلة عن R_{e_D}, P_r وعن الموقع المحوري.

ومن أجل شروط مستقرة بشكل كامل، وتدفق صفائحي مع درجة حرارة ثابتة على السطح، يكون افتراض إهمال التوصيل المحوري مقبولاً في أغلب الأوقات، بتعويض شكل السرعة في المعادلة (2–15) ومن أجل تدرج السرعة المحورية من المعادلة (2–33) تصبح معادلة الطاقة:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \left(\frac{2\,u_m}{\alpha}\right)\left(\frac{dT_m}{dX}\right)\left[1 - \left(\frac{r}{r_o}\right)\right]\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \;; T_s = const \qquad (2\text{–}54)$$

يمكن حلُّ هذه المعادلة من خلال عملية مكررة تتضمن مقاربة لشكل درجة الحرارة، حيث إنَّ الشكل الناتج لا يُعَبَّر عنه بمعادلة جبرية بسيطة، وإنَّما بأعداد نوسلت [47]:

$$N_{u_D} = 3.66 \quad ; T_s = constan \qquad (2\text{–}55)$$

نلاحظ أنَّه عند استخدام المعادلتين (2–53) و (2–55) لتحديد h، يجب تحديد التوصيل الحراري عند T_m.

2.4.4.2 منطقة الدخول:

إنَّ معادلة الطاقة لمنطقة الدخول معقدة أكثر من المعادلة (2–48) بسبب وجود شروط توصيل زاوي (حيث $v \neq 0$ في المنطقة الدخول)، بالإضافة الى أنَّ كلاً من السرعة والحرارة تعتمد على x، كما تعتمد على r . ولا يمكن تبسيط تغير درجة الحرارة المحورية $\partial \mathrm{T}/\partial \mathrm{x}$ عبر المعادلة (2–32) و (2–33)، بينما يمكن الحصول على حلين مختلفين.

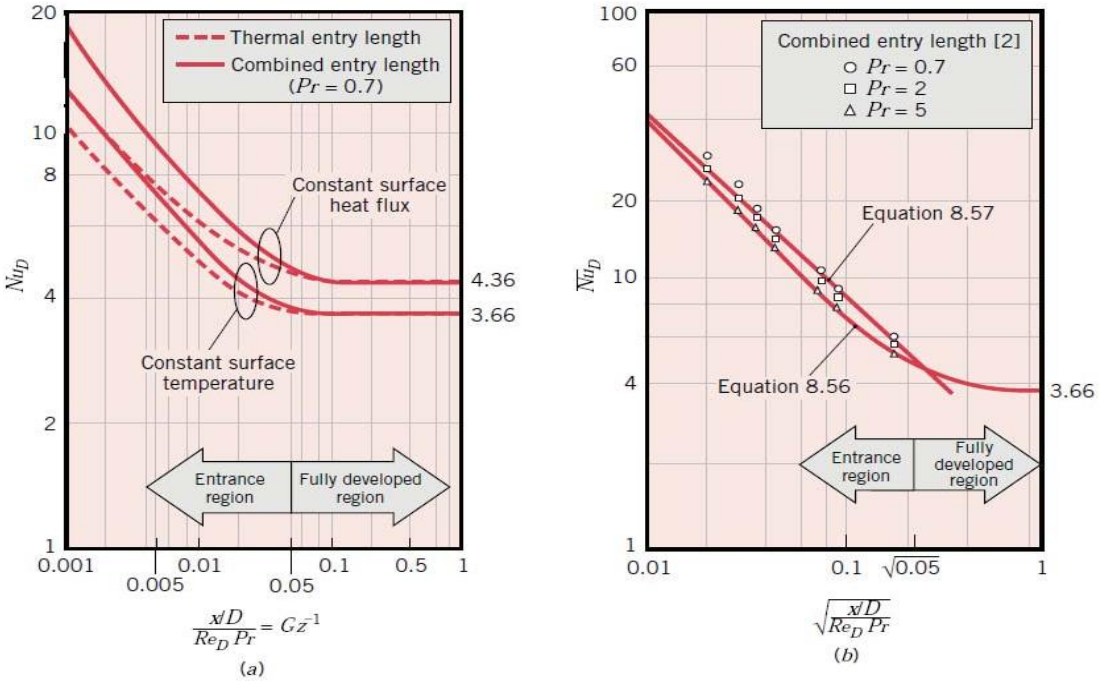
الحلُّ الأبسط يكون من أجل المشكلة الحرارية لطول المدخل والذي يعتمد على افتراض أنَّ الشروط الحرارية تستقر بوجود شكل سرعة مستقرة بشكل كامل، يمكن أن توجد هذه الحالة عندما يبدأ انتقال الحرارة قبل منطقة البداية غير المسخنة، أيضاً يمكن افتراض مقاربة منطقية من أجل سوائل بعدد براندل كبير مثل الزيوت. على الرغم من غياب الطول

المبدئي غير المسخن (unheated starting length)، فإنَّ سرعة استقرار حدود الطبقة تحدث بسرعة أكبر من استقرار حدود الطبقة الحرارية بالنسبة لسوائل لها أعداد براندل كبيرة ويمكن تقريب طول المدخل الحراري thermal entry length approximation.

لقد تمَّ الحصول على الحلول بالنسبة لكلا شرطي طول المدخل [47] والنتائج المختارة مبينة في الشكل (2–11a) الشكل (2–11b)، أعداد نوسلت N_{u_D} تكون لا نهائية عند $x = 0$ وتصل للقيم التقريبية مع ازدياد x.

عندما يتمُّ تمثيلها بالنسبة للأعداد اللابعدية $x\alpha/(u_m D^2) = \mathrm{x}/(DR_{e_D}P_r)$ والتي هي معاكسة لعدد غريتز $G_{Z_D} \equiv (D/x)\ R_{e_D}P_r$، النمط الذي تختلف فيه N_{u_D} مع $G_{Z_D}^{-1}$ يكون مستقلاً عن P_r من أجل مشكلة الدخول الحرارية حيث شكل السرعة في المنطقة المستقرة بشكل كامل –المعطى بالمعادلة (2–13)– يكون مستقلاً عن لزوجة السوائل، وعلى عكس مشكلة المدخل المدمج، تعتمد النتائج على النمط الذي يستقر وفقه توزيع السرعة، الذي يكون حساساً بشكل كبير للزوجة السوائل، لذلك فإنَّ نتائج الحمل الحراري تعتمد على أرقام براندل في حالة المدخل المدمج وموضَّحة بالشكل (2–11a) من أجل $P_r = 0.7$ التي تعبر عن الكثير من الغازات، عند أي موقع من منطقة الدخول، تنخفض N_{u_D} مع ازدياد P_r وتقترب من شروط المدخل الحراري كما $P_r \to \infty$، نلاحظ أنَّه يتمُّ الوصول إلى الشروط المستقرة بشكل كامل من أجل $[(x/D)\ /\ R_{e_D}Pr] \approx 0.05$.

من أجل شروط درجة حرارة ثابتة على السطح، يفضل معرفة معامل الكفاءة الوسطي من أجل استخدامه مع المعادلة (2–43).



الشكل (2–11) نتائج طول منطقة الدخول للجريان الصفائحي في أنبوب دائري [48]

a. نوسلت الموضعي b. متوسط قيم نوسلت

كاي [51] تقدم علاقة منسوبة لـ هاوزن [52] الذي يكون من الشكل:

$$\overline{N_{u_D}} = 3.66 + \frac{0.0668)](\mathrm{D/L})\ \mathrm{R_{eD}\ P_r}}{1+0.04\left[\left(\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{L}}\right)\mathrm{R_{eD}\ P_r}\right]^{\frac{2}{3}}} \qquad (2-56)$$

$$\left[\begin{array}{c} Thermal\ entrance\ length \\ or \\ combined\ entrance\ length\ with\ P_r \geq 5 \end{array}\right]$$

حيث $\overline{N_{u_D}} \equiv \bar{h}D/k$، لأنَّ هذه النتيجة تكون من أجل حل مشكلة المدخل الحرارية، ومن الممكن تطبيقها على كلِّ الحالات عندما يكون شكل السرعة مستقراً بشكل مسبق، بالنسبة للمدخل المدمج أو المركب يكون من المناسب استخدام طريقة أعداد براندل وفقاً لسيدار وتيت [53] من الشكل:

$$\overline{N_{u_D}} = 1.86\left(\frac{R_{e_D}P_r}{\frac{L}{D}}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \qquad (2-57)$$

$$0.60 \leq P_r \leq 5$$

$$0.0044 \leq \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right) \leq 9.75$$

من الموصى استخدام المعادلة (2−57) عندما يكون $0.60 \leq P_r \leq 5$ فتعطي [2,10] $\overline{N_{u_D}} \geq 3.66$ واذا كانت $\overline{N_{u_D}}$ أقل من هذه القيمة فمن المنطقي استخدام $\overline{N_{u_D}} = 3.66$ حيث إنَّ الشروط المستقرة بشكل كامل تطبق على كامل الأنبوب من أجل أعداد براندل كبيرة $P_r \geq 5$. تستقر الشروط الهيدروديناميكية بشكل أسرع من الشروط الحرارية، ويُوصى باستخدام المعادلة (2−57) حيث يُوضِّح الشكل (2−11b)، تنبؤات الأرقام $\sqrt{x/(D\ R_{e_D}\ P_r)}$ مقابل $\overline{N_{u_D}}$ و P_r وكل الخصائص التي تظهر في المعادلة (2−56) و (2−57) ماعدا μ_s يجب أن يتمُّ تقييمها بالنسبة لمتوسط القيمة لمعدل درجة الحرارة $\overline{T_m} = (T_{mt} + T_{mo})/2$

لقد تمَّت دراسة موضوع التدفق الصفائحي في الأقنية وتوجد نتائج رقمية لاختلاف مساحة المقطع العرضي للأنبوب وشروط السطح وقام بالدراسة شاه ولوندن [54] باهاتي وشاه [55].

2.5 علاقات الحمل الحراري:

2.5.1 التدفق المضطرب في أنابيب دائرية

بما أنَّ تحليل شروط التدفق المضطرب شيء معقد أكثر ويعتمد على تحديد العلاقة التجريبية، حيث يوجد معادلة تقليدية من أجل حساب أعداد نوسلت من أجل التدفق المضطرب المستقر بشكل كامل (الهيدروديناميكي والحراري) في أنبوب دائري أملس حسب كولبرن [56] ويمكن الحصول عليه من التشابه الجزئي لـ شيلتون – كولبرن. من المعادلة (2−18)، يكون التشابه من الشكل:

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = St\ P_r^{2/3} = \frac{N_{uD}}{R_{e_D}\ P_r}\ P_r^{2/3} \qquad (2-58)$$

بتعويض معامل الاحتكاك من المعادلة (2−21)، تكون معادلة كولبرن عندها:

$$N_{u_D} = 0.023\, R_{e_D}^{4/5}\, P_r^{1/3} \qquad (2-59)$$

ومعادلة ديتوس – بولتر [57] تكون مختلفة وهي نسخة مفضلة عن النتائج أعلاه وهي من الشكل:

$$N_{u_D} = 0.023\, R_{e_D}^{4/5}\, P_r^{n} \qquad (2-60)$$

حيث $n = 0.4$ من أجل التسخين $(T_s > T_m)$ و $n = 0.3$ من أجل التبريد $(T_s < T_m)$. هذه المعادلات تم التأكد منها من أجل مجموعة الشروط التالية:

$$\begin{bmatrix} 0.7 \le P_r \le 160 \\ R_{e_D} \ge 10000 \\ \dfrac{L}{D} \ge 10 \end{bmatrix}$$

يمكن استخدام المعادلات لتحديد الفرق القليل في درجات الحرارة $T_S - T_m$ مع كل الخصائص التي تمَّ تقييمها عند T_m، ومن أجل شكل التدفق الذي يكون فيه اختلافات كبيرة بالخصائص، ويُوصى بالمعادلة التالية من سيدر وتيت [53]:

$$N_{u_D} = 0.027\, R_{e_D}^{\frac{4}{5}}\, P_r^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \qquad (2-61)$$

$$\begin{bmatrix} 0.7 \le P_r \le 16700 \\ R_{e_D} \ge 10000 \\ \dfrac{L}{D} \ge 10 \end{bmatrix}$$

من الشائع أن نشير الى المعادلة (2–60) كمعادلة أساسية لـ ديتوس وبولتر، وتصبح المعادلة الأصلية لـ ديتوس وبولتر من الشكل:

$$N_{u_D} = 0.0243\, R_{e_D}^{\frac{4}{5}}\, P_r^{0.4}\,, (Heating)$$
$$N_{u_D} = 0.0265\, R_{e_D}^{4/5} P_r^{0.3}\, (cooling)$$

حيث يتم حساب كل الخصائص باستثناء μ_s عند T_m.

على الرغم من أنَّ المعادلتين (2–60) و (2–61) يمكن تطبيقهما بسهولة وبشكل مرضٍ بالنسبة لهذا المجال، ولكن الأخطاء الناتجة عن الاستخدام تكون كبيرة بنسبة 25%. هذه الأخطاء يمكن أن تقلَّ الى ما دون 10% عند استخدام علاقة معقدة أكثر، وتكون صالحة بالنسبة لكامل مجال أعداد رينولدز بحيث تتضمن منطقة التبادل، وهي:

$$N_{u_D} = \frac{(f/8)\,(R_{e_D} - 1000)P_r}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}\left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \qquad (2-62)$$

من أجل $0.5 \le P_r \le 2000\ and\ 3000 \le R_{e_D} \le 5 \times 10^6$، حيث يمكن الحصول على معامل الاحتكاك من مخطط مودي أو بالنسبة للأنابيب الملساء باستخدام المعادلة (2–21).

إنَّ المعادلة (2–62) يمكن تطبيقها على درجة الحرارة الموحدة على السطح وإذا كان اختلاف درجة الحرارة كبيراً يجب أخذ اعتبارات إضافية بالحسبان من أجل أثر تغيرات الخصائص والخيارات المتاحة، معروضة في كاكاك [58].

من أجل شروط اضطراب كاملة $\left(R_{e_D} > 10^4\right)$ واذا كنا نريد مستوى دقة عالٍ، علينا بعلاقة غلينيسكي، المعادلة (2-62). ويمكن البحث أكثر عن دراسة الحمل الحراري في منطقة التبادل في غاجار وتام [59].

أيضا نلاحظ أنَّه من المعادلة (2-62) يتم الحصول على معامل الاحتكاك f من مخطط مودي، الشكل (2-4)، بينما على الرغم من أنَّ الشكل العام هو أن يزداد h مع ازدياد f، ولكن زيادة f تكون نسبياً كبيرة، وعندما تكون f تقريبياً أكبر بأربع مرات من القيمة المرتبطة للسطح الأملس، لا تتغير عندها h مع أي ازدياد إضافي لـ f [60]. تمَّ مناقشة الإجراءات المتخذة من أجل تقدير أثر خشونة الجدار في التوصيل الحراري المستقر بشكل كامل في التدفق المضطرب في باهاتي وشاه [61]

بما أنَّ طول الدخول بالنسبة للتدفق المضطرب يكون عادة قصير $10 \leq \left(\frac{x_{fd}}{D}\right) \leq 60$ يكون من المنطقي افتراض أنَّ أعداد نوسلت الوسطية بالنسبة للأنبوب كله مساوي للقيمة المرتبطة مع المنطقة المستقرة بشكل كامل $\overline{N_{u_D}} \approx N_{u_{D_{fd}}}$، بينما بالنسبة للأنابيب القصيرة $\overline{N_{u_D}}$ سوف تتجاوز $N_{u_{D_{fd}}}$ ويمكن حسابها من المعادلة من الشكل:

$$\frac{\overline{N_{u_D}}}{N_{u_{D_{fd}}}} = 1 + \frac{C}{\left(\frac{x}{D}\right)^m} \qquad (2\text{-}63)$$

حيث تعتمد C وm على طبيعة المدخل (حواف حادة، فوهة) ومنطقة الدخول (حرارية أو مركبة)، أيضا على أعداد براندل ورينولدز [48,61,62]. الأخطاء تحت نسبة الـ 15% تكون مرتبطة مع افتراض $\overline{N_{u_D}} = N_{u_{D_{fd}}} \; for \; (L/D) > 60$، وعند تحديد $\overline{N_{u_D}}$ كل خصائص السوائل يجب تقييمها عند متوسط معدل درجة الحرارة $\overline{T_m} = \left(T_{m,i} + T_{m,o}\right)/2$.

أخيرا نلاحظ أنَّه لا يمكن تطبيق العلاقة الحالية $(3 \times 10^{-3} \leq P_r \leq 5 \times 10^{-2})$ بالنسبة للتدفق المضطرب في أنبوب أملس مع تدفق حراري ثابت على السطح. سكوبنسكي [63] يوصي أن تكون العلاقة من الشكل:

$$N_{u_D} = 4.82 + 0.0185\, P_{e_D}^{0.827} \; ; q_s'' = const \qquad (2\text{-}64)$$

$$\begin{bmatrix} 3.6 \times 10^3 \leq R_{r_D} \leq 9.05 \times 10^5 \\ 10^2 \leq P_r \leq 10^4 \end{bmatrix}$$

بشكل مشابه من أجل درجة حرارة ثابتة على السطح، سيبان وشيمازاكي [64] يوصيان أن تكون العلاقة التالية من $P_{r_D} \geq 100$:

$$N_{u_D} = 5.0 + 0.025\, P_{r_D}^{0.8} \; ; T_s = const \qquad (2\text{-}65)$$

2.5.2 معامل انتقال الحرارة بالحمل

بعد حساب عدد نوسيلت باستخدام المعادلة الموافقة لنوع الجريان ضمن المبادل المدروس نحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل من العلاقات التالية:

$$h = h_o \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2-66)$$

$$h_o = \frac{Nu_0 \times K}{D} \quad (2-67)$$

المعادلة (2-66) معادلة تصحيح درجة الحرارة لحساب معامل انتقال الحرارة بالحمل

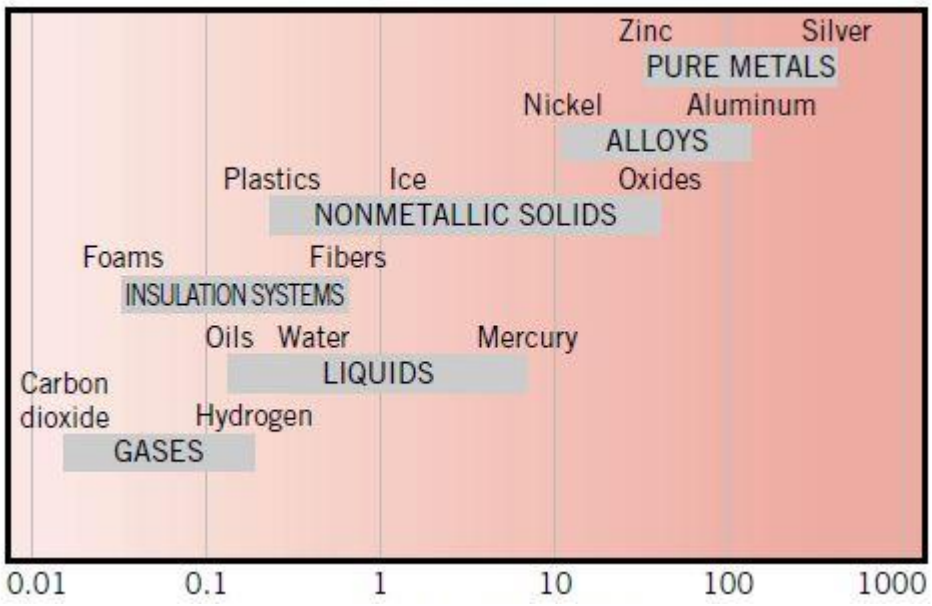
2.6 علاقات انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن الأنبوب:

بعد الانتهاء من التحليل الحراري والهيدروليكي للتدفق داخل الأنبوب فإنَّ الحرارة تنتقل بالتوصيل ضمن جدار الأنبوب وضمن التربة أيضاً:

2.6.1 معامل التوصيل الحراري:

إنَّ معامل التوصيل الحراري بارمتر فيزيائي خاص بالمادة ويتعلق عموماً بكلٍّ من: درجة الحرارة والضغط وطبيعة المادة وتحدد قيمته تجريبياً حيث تجرى قياسات لكلٍّ من معدَّل تدفق الحرارة وتدرج الحرارة ضمن المادة المدروسة ويحدد هذا المعامل من قانون فوريه العلاقة:

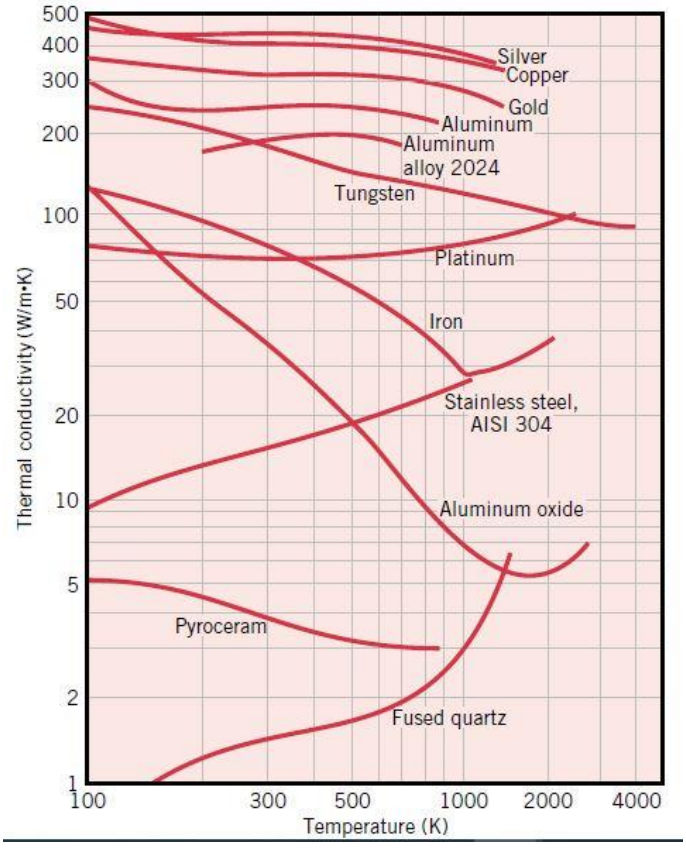
$$k = -\frac{\mathrm{q}}{(dt/dx)} \quad (2-68)$$



الشكل (2-12) مجال الموصلية الحرارية لمواد مختلفة عند شروط الحرارة والضغط ذاتها [46]

تتغير قيم الموصلية الحرارية في الحالة العامة بتغير درجة الحرارة، بصورة عامة يكون هذا التغير طفيفاً لمعظم المواد في مجال درجات الحرارة المألوفة في التطبيقات الهندسية، ويمكن إهماله، في هذه الحالة يمكننا اعتماد قيمة وسطية للموصلية الحرارية وعدها قيمة ثابتة [66] .

بما أن الأجسام تتمتع بدرجات حرارة مختلفة كما أن عدم انتظام توزيع درجات الحرارة ضمن الجسم الواحد خلال عملية التبادل الحراري تقود إلى ضرورة معرفة العلاقة بين الموصلية الحرارية ودرجة الحرارة ويُبيّن الشكل (13–2) [65] هذه العلاقة



الشكل (13–2) العلاقة بين درجة الحرارة والموصلية الحرارية لبعض المواد الصلبة

2.6.2 علاقات انتقال الحرارة بالتوصيل عبر جدار أنبوب:

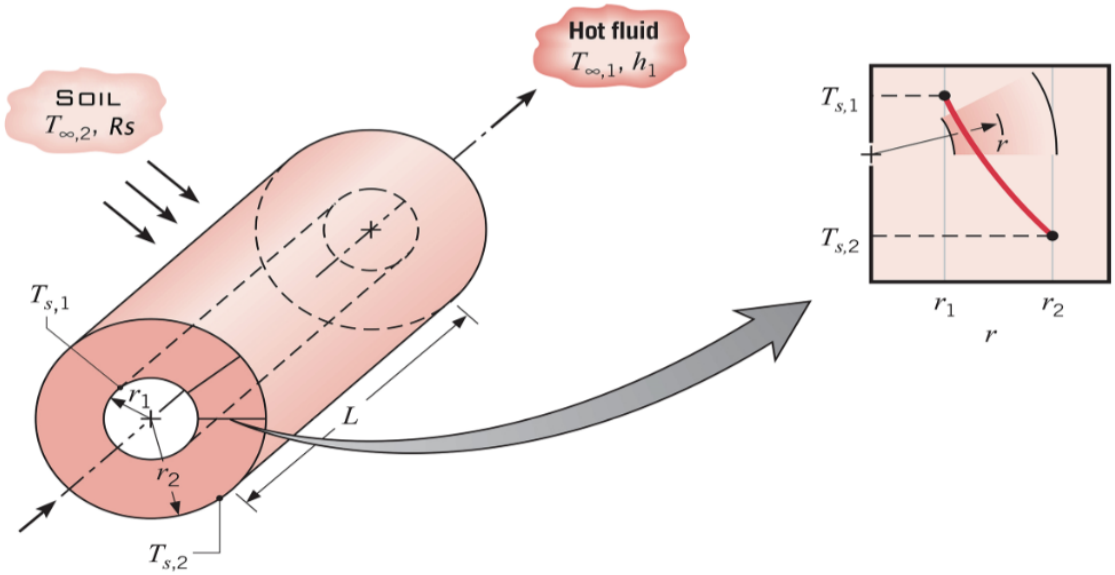
غالباً ما تواجه الأنظمة الأسطوانية والكروية تدرجات في درجة الحرارة في الاتجاه المركزي ومن ثُمَّ يمكن التعامل مع الانتقال على أنَّه انتقال أحادي البعد. كما يمكن تحليل هذه الأنظمة باستخدام الطريقة القياسية والتي تبدأ بالشكل المناسب لمعادلة الحرارة.

يُعدُّ انتقال الحرارة ضمن أنبوب من أهم الأمثلة لانتقال الحرارة في الأنظمة الأسطوانية. حيث يتعرض سطحه الداخلي والخارجي لموائع أو مواد مختلفة درجة الحرارة. ويكون الشكل المناسب للمعادلة التفاضلية للتوصيل الحراري من الشكل:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(kr\frac{dT}{dr}\right)=0 \qquad (2-69)$$

حيث يتم التعامل حالياً مع k بكونه متغيراً

تصبح النتيجة واضحة إذا أخذنا في الحسبان أيضاً الشكل المناسب لقانون فوريه



الشكل (2-14) انتقال الحرارة أحادي البعد ضمن أنبوب

ويُعبَّر عن شدة التدفق الحراري المنتقل عبر جدار الأنبوب بالعلاقة:(2-70)

$$q_r=-kA\frac{dT}{dr}=k(2\pi rL)\frac{dT}{dr} \qquad (2-70)$$

حيث $A=2\pi rL$ وهي مساحة السطح العامودي على جهة انتقال الحرارة وبما أنَّ المقدار $kr\frac{dT}{dr}$ كما هو مُوضَّح في المعادلة (2-69) مستقل عن r، فإنَّ معدَّل انتقال الحرارة بالتوصيل q_r (وليس معدَّل التدفق الحراري q''_r يكون ثابتاً في الاتجاه القطري).

يمكن تحديد شكل توزع درجة الحرارة عبر جدار الأنبوب من خلال حلِّ المعادلة (2-69) وبتطبيق الشروط الحدية المناسبة وبفرض أنَّ K ثابت ومن مكاملة العلاقة (2-69) مرتين نحصل على الحلِّ العام

$$T(r)=C_1\ln r+C_2$$

وللحصول على ثوابت التكامل C_1 و C_2 نطبق الشروط الحدية التالية:

$$T(r_1)=T_{s,1}$$
$$T(r_2)=T_{s,2}$$

وبإدخال الشروط الحدية بعد إيجاد قيم ثوابت التكامل C_1 و C_2 نحصل على معادلة توزع درجة الحرارة بجدار الأنبوب:

$$T_{s,1}=C_1\ln r_1+C_2$$
$$T_{s,2}=C_1\ln r_2+C_2$$

وبحلِّ المعادلتين للتخلص من الثوابت نحصل على:

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \qquad (2-71)$$

يكون توزيع الحرارة عبر جدار الأنبوب بالاتجاه المركزي لوغاريتمياً وليس خطياً كما هو الحال في الجدار المستوي الخاضع للشروط ذاتها ويُبيِّن الشكل (السابق) هذا التوزيع [66]

وبإدخال هذا التوزيع في المعادلة (2−70) نحصل على العلاقة التالية لمعدَّل انتقال الحرارة:

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \qquad (2-72)$$

ومن ثُمَّ تكون المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب هي:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \qquad (2-73)$$

ويُعطى معامل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الأنبوب أو التربة بالعلاقة:

$$h_{pipe\ or\ Soil} = 2k/(d_i \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)) \qquad (2-74)$$

2.7 انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن التربة:

يعتمد انتقال الحرارة ضمن التربة على التركيب الجيولوجي لجوف الأرض من ناحية نوعية التربة والصخور وخواصها الحرارية ومحتوى الأرض من الرطوبة ووجود وحركة المياه الجوفية عند الأعماق الكبيرة كما أنَّ درجة حرارة جوف الأرض لا تبقى ثابتة نتيجة طرح أو امتصاص الحرارة اللازمة لعمل المضخة الجيوحرارية ومن ثُمَّ فإن هذا التأثير سوف يُغيِّر من المقاومة الحرارية للتربة [45]

لفهم تأثير عمل المضخة في تغير درجة حرارة التربة يجب دراسة تأثير المدى الطويل على درجة حراة التربة (التأثير السنوي) وهو التغيُّر في درجة حرارة التربة ضمن منطقة المبادل والناتج عن عدم تساوي كميات الحرارة المنتقلة إلى التربة خلال فصلي الصيف والشتاء مما يُؤدِّي إلى ارتفاع درجة حرارة التربة في حالة كان حمل التبريد أكبر من حمل التدفئة والعكس بالعكس وغالباً ترتفع درجة حرارة التربة على المدى الطويل ولكن من الممكن تفادي هذا الارتفاع عن طريق استخدام الحرارة الزائدة في تسخين المياه خلال فصل الشتاء مثلاً.[68]

2.7.1 طريقة اختيار الخواص الحرارية للتربة

يمكن الحصول على الخواص الحرارية للتربة، الموصلية والناشرية بأخذ عينات من الطبقات الجيولوجية في موقع تركيب المبادل وتحليلها مخبرياً لمعرفة تركيبها ثم مقارنة هذا التركيب مع الأنواع المذكورة في الجدول (1−2) للحصول على القيم الأمثل

الجدول (1-2) الموصلية والناشرية الحرارية للترب الرملية والطينية

نوع التربة	الكثافة الجافة [kg/m^3]	رطوبة 5%		رطوبة10%		رطوبة15%		رطوبة20%	
		k	a	k	a	k	a	k	a
رمل خشن %100	1920	2.08 إلى 3.29	0.089 إلى 0.139	2.42 إلى 3.46	0.086 إلى 0.121	2.40 إلى 3.81	0.085 إلى 0.111	–	–
	1600	1.38 إلى 2.42	0.072 إلى 0.121	2.08 إلى 2.60	0.089 إلى 0.111	2.25 إلى 2.77	0.083 إلى 0.102	2.42 إلى 2.94	0.078 إلى 0.093
	1280	0.87 إلى 1.90	0.056 إلى 0.121	1.04 إلى 1.90	0.056 إلى 0.102	1.04 إلى 2.08	0.047 إلى 0.093	1.21 إلى 2.08	0.048 إلى 0.084
طين دقيق الحبيبات %100	1920	1.04 إلى 1.38	0.045 إلى 0.059	1.04 إلى 1.38	0.049 إلى 0.037	1.38 إلى 1.90	0.043 إلى 0.059	–	–
	1600	0.87 إلى 1.04	0.045 إلى 0.054	0.87 إلى 1.04	0.037 إلى 0.045	1.04 إلى 1.21	0.034 إلى 0.045	1.04 إلى 1.38	0.038 إلى 0.051
	1280	0.52 إلى 0.87	0.033 إلى 0.056	0.61 إلى 0.87	0.033 إلى 0.046	0.69 إلى 0.95	0.032 إلى 0.04	0.69 إلى 1.04	0.028 إلى 0.042

وقد تمَّ الحصول على هذه القيم بحساب المتوسط الحسابي للقيم المحسوبة بخمس طرق مختلفة [67]

يُبيّن الشكل (2-15) نموذجاً لجهاز قياس يستخدم لقياس قيم الموصلية والناشرية الحرارية ودرجة حرارة الأرض بشكل مباشر، ويُركَّب هذا الجهاز في الموقع الجيوحراري.

يتكوَّن الجهاز من مضخة تعمل على ضخ الماء وتدويره ضمن مبادل جيوحراري ويتمُّ تسخين الماء باستخدام سخانات كهربائية ويكون طول المبادل بحدود 10 إلى 15 متراً لكلِّ 1 كيلو واط من استطاعة السخان الكهربائي ويكون تدفق الماء بحدود 0.09 ليتراً بالثانية لكل كيلو واط. ويتمُّ قياس درجة حرارة دخول الماء وخروجه ويتمُّ تحصيل البيانات والربط بين قيم قراءات درجة الحرارة مع كمية الحرارة المبددة إلى التربة، من المهم عزل جميع الأنابيب الظاهرة فوق التربة من أجل دقة القياس كما يجب مراعاة الأمور التالية أيضاً:

1- مدة الاختبار تكون 36 إلى 48 ساعة.

2- الانحراف المسموح للطاقة الكهربائية لا تتجاوز % 1.5±.

3- دقة حساسات درجة الحرارة ^{o}C 0.3±.

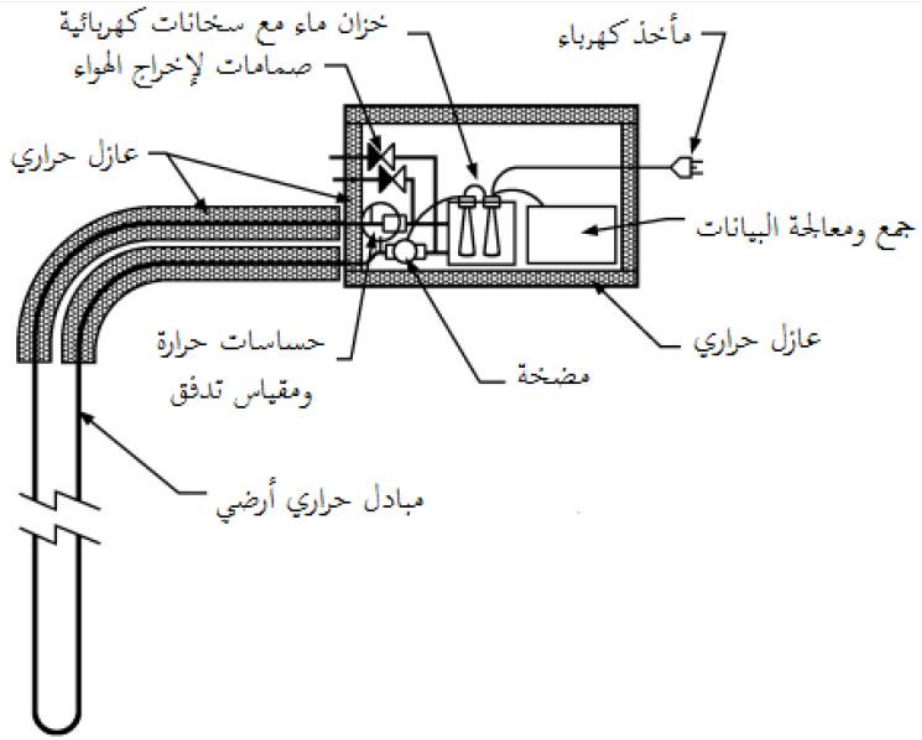
4- يجب الانتظار من 3 إلى 5 أيام لإجراء القياس الأولي لدرجة حرارة التربة وذلك عن طريق وضع حساس ضمن المبادل الجيوحراري المملوء بالماء في 3 أماكن ويؤخذ المعدل، أو قياس درجة حرارة الماء بعد تدويره مباشرة.

5- يكون الفاصل الزمني لجمع القراءات 10 دقائق على الأكثر.

6- يجب أن تعزل جميع الأنابيب المتوضعة فوق التربة بعازل من الأرموفلكس بسماكة 13 مم على الأقل

7- تتوضع تجهيزات القياس ضمن حجرة معزولة بالفايبر غلاس بسماكة 2.5 سم على الأقل

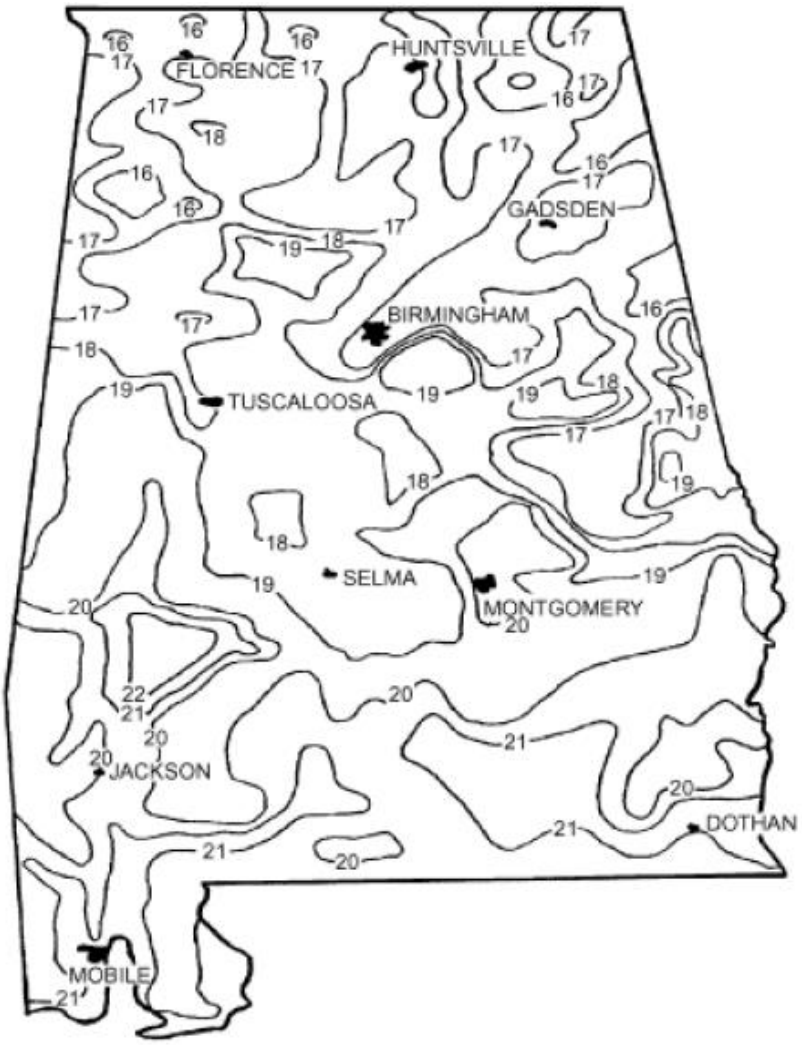
8- في حالة الحاجة لإعادة القياسات فإنَّه يجب أن يتمَّ إعادة تحصيل البيانات بعد أن تعود درجة الحرارة إلى قيمتها الأولية وهذا يتطلب من 10 إلى 14 يوماً وهذه المدة مرتبطة بموصلية التربة [40]



الشكل (15-2) جهاز قياس الخواص الحرارية للتربة [40,67]

2.7.2 تحديد درجة حرارة الأرض

يتمُّ تحديد درجة حرارة الأرض عن طريق الاختبارات المباشرة في الموقع الجيوحراري كما هو مُوضَّحٌ في الفقرة السابقة، أو باستخدام الخرائط الجيوحرارية المعتمدة من المؤسسات الجيولوجية ويُبيِّن الشكل (16-2) خطوط ثبات درجة الحرارة للتربة في ولاية ألاباما الأمريكية على عمق 45 متراً ومن ثُمَّ يتمُّ تحديد درجة حرارة الأرض بالاعتماد على هذه الخريطة



الشكل (16–2) درجة حرارة الأرض في ولاية ألاباما الأمريكية [40]

ويُبيّن الجدول (2–2) درجات حرارة الأرض في عدة مدن وبلدان من العالم على عمق أكثر من عشرة أمتار

الجدول (2-2) درجات حرارة الأرض صيفاً لعدة مدن على عمق عشرة أمتار [67]

الدولة	المدينة	°C	الدولة	المدينة	°C
سورية	دمشق	22	اسبانيا	مدريد	16
مصر	القاهرة	23	ألمانيا	برلين	11
السعودية	الرياض	28	فرنسا	باريس	12
الإمارات	دبي	27	فلندا	هلسنكي	8
قطر	الدوحة	28	بريطانيا	لندن	12
الكويت	الكويت	27	إيطاليا	روما	16
البحرين	المنامة	27	استراليا	سدني	19
تونس	تونس	21	أمريكا	لوس أنجلوس	18
تركيا	أنقرة	11	أمريكا	ميامي	26
اليابان	طوكيو	18	أمريكا	أتلانتا	17
الصين	بكين	12	أمريكا	دالاس	20
ماليزيا	كوالالمبور	28	البرازيل	برازيليا	27

ويمكن تحديد درجة حرارة الأرض من العلاقات التالية [43]

$$T_{g,Max} = \overline{T_g} + A_S \times e^{(-X_S\sqrt{\frac{\pi}{365\times a}})} \quad (2-75)$$

$$T_{g,Min} = \overline{T_g} - A_S \times e^{(-X_S\sqrt{\frac{\pi}{365\times a}})} \quad (2-76)$$

$T_{g,Min}$: درجة حرارة الأرض العظمى بالفهرنهايت (صيفاً)

$T_{g,Max}$: درجة حرارة الأرض الصغرى بالفهرنهايت (شتاءً)

X_S: عمق التربة مقدر بالقدم

A_S: مدرى درجات الحرارة السطحية بالفهرنهايت

$\overline{T_g}$: المتوسط السنوي لدرجات الحرارة السطحية بالفهرنهايت

a : الانتشارية الحرارية للتربة

2.7.3 تحديد درجة حرارة دخول وخروج الماء عند مدخل ومخرج المبادل الحراري

يُعد اختيار درجة حرارة دخول الماء إلى وحدة المضخة الحرارية أمراً شائكاً خلال خطوات التصميم حيث ترتفع فعالية المنظومة وتنخفض الكلفة الاستثمارية كلما انخفض الفرق بين درجة حرارة التربة ودرجة حرارة دخول الماء ولكن يزداد طول المبادل ومن ثُمَّ ترتفع الكلفة التأسيسية للمنظومة

أظهرت الدراسات والتجارب أنَّ الحصول على الحالة المثالية في الموازنة بين الكلفتين التأسيسية والاستثمارية يتمُّ بأخذ درجة حرارة دخول الماء أكبر من درجة حرارة الأرض بمقدار 10–15 °C في وضع التبريد وأصغر بحدود 5– 10 °C في وضع التدفئة [45]

ويتمُّ حساب درجة حرارة خروج الماء من المعادلة:

$$t_{wo} = t_{wi} + \frac{Q}{C_w \times m} \qquad (2-77)$$

2.7.4 تحديد معامل انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن التربة

يُعدُّ تحديد المقاومة الحرارية للأرض صعباً وذلك بسبب تنوع واختلاف أنواع الأراضي التي يتم استخدامها لوضع المبادل الجيوحراري ويبين الجدول (1–2) قيم الناشرية والموصلية الحرارية لأنواع الترب الرملية والطينية ويوضح الجدول تأثير محتوى الرطوبة على هذه الخواص الحرارية

ويعطى معامل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر التربة بالعلاقة:

$$h_G = 2k/(d_i \times \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)) \qquad (2-78)$$

2.8 علاقات حساب الأبعاد التصميمية للمبادل الجيوحراري الحلزوني:

يكون معامل انتقال الحرارة الكلي بالحمل والتوصيل:

$$U = \frac{1}{h+h_p+h_S} \qquad (2-79)$$

وتكون مساحة سطح التبادل الحراري

$$A = \frac{Q}{U \times \Delta t} \qquad (2-80)$$

أمَّا طول المبادل:

$$L = \frac{A}{\pi \times d_i} \times F_{helical} \qquad (2-81)$$

ويُحسب حجم اللفة من العلاقة

$$V_{turn} = \frac{\pi \times D_{turn}^2 \times X}{2} \qquad (2-82)$$

حيث: D_{turn} هو قطر اللفة [m]

و X هو التباعد بين اللفات ويؤخذ 0.6[m] على الأقل حتى لا يحدث تداخل حراري [68]

وعدد اللفات المطلوبة

$$N = L/Per \qquad (2-83)$$

حيث:

Per: هو محيط اللفة

ومن ثُمَّ يكون حجم المبادل الكلي

$$V_{HX} = N \times V_{turn} \qquad (2-84)$$

وتم إعداد نموذج رياضي حاسوبي لتصميم المبادل الحراري المدروس

2.9 علاقات الضياعات الهيدروليكية والمفاقيد في المبادل المدروس:

تعطى علاقات الضياع الهيدروليكي كتابع للطول والسرعة ومعامل الاحتكاك ضمن المبادل الحراري المدروس كالتالي[69] :

$$\Delta p = \frac{0.6 \times L \times f \times V^2}{d_i} \qquad (2-85)$$

وتكون الاستطاعة الهيدروليكية المطلوبة للضخ

$$P = \frac{\Delta p \times \dot{V}}{\eta} \qquad (2-86)$$

2.10 حساب الطول الإضافي اللازم للمبادل

يستخدم معامل الطول الإضافي أو للتعبير عن تأثير الانحناء والتدفق الثانوي في انتقال الحرارة في المبادل الأنبوبي الحلزوني وبذلك يصحح طول المبادل الأنبوبي من خلال ضربه بمعامل التصحيح المعطى في العلاقة [70]

$$F_{helical} = 1 + 3.6\left(1 - \frac{r_i}{R_c}\right)\left(\frac{r_i}{R_c}\right)^{0.8} \qquad (2-87)$$

حيث:

r_i : نصف قطر أنبوب المبادل

R_c : نصف قطر المبادل

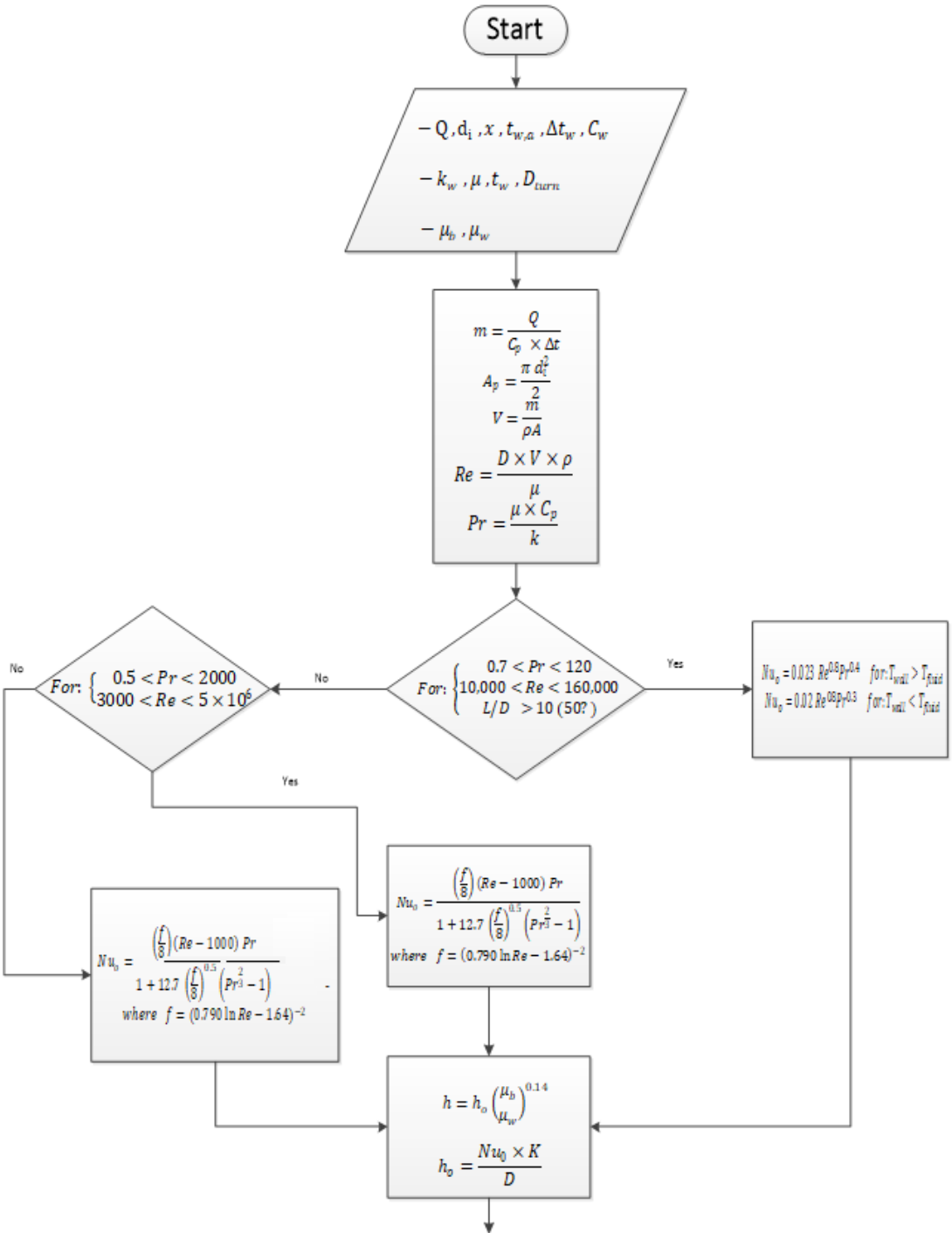
ويكون مجال تطبيق معامل التصحيح هذا بالنسبة لعدد رينولدز

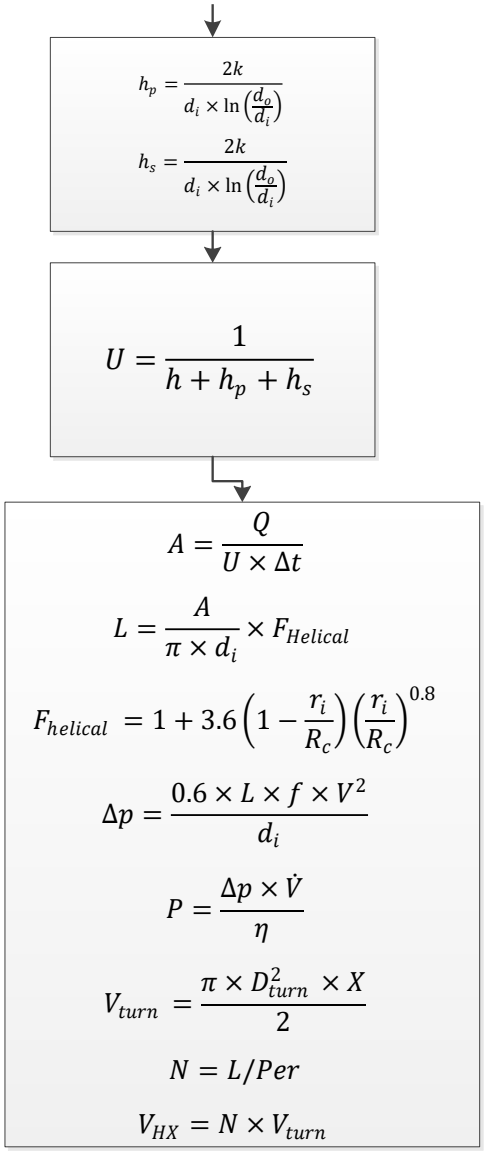
$$2 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10\text{^}5$$

$$5 < \frac{R_c}{r_i} < 84$$

حيث إنَّ العلاقات المدروسة لانتقال الحرارة في المعادلات السابقة كانت لانتقال الحرارة في أنبوب أفقي إلَّا أنَّ انتقال الحرارة في المبادل المدروس –وهو مبادل أنبوبي حلزوني– يحتاج لمعامل تصحيح لمعامل انتقال الحرارة والذي بدوره يُؤدّي لزيادة طول الأنبوب وفق المعادلة (2–87)

يُبيّن الشكل (2–17) خوارزمية تصميم المبادل وإيجاد أبعاده:





الشكل (2-17) خوارزمية تصميم المبادل

2.11 علاقات حساب تغير درجة حرارة التربة مع التشغيل وكتلة التخزين اللازمة للمبادل:

كمية الحرارة التي يطرحها المبادل لواحدة الطول

$$q = Q/L \qquad (2-88)$$

حيث:

Q: معدل كمية الحرارة التي يطرحها المكثف إلى التربة صيفاً أو كمية الحرارة التي يمتصها المبخر من التربة شتاءً

ونحسب تغير درجة الحرارة من العلاقة

$$DT = \frac{Q}{C_s} \qquad (2-89)$$

حيث: C_S السعة الحرارية للتربة [J/K]

$$C_S = m \times C \qquad (2-90)$$

حيث:

C: السعة الحرارية النوعية للتربة [J/kg.K]

m: كتلة التربة في المنطقة المحيطة بالمبادل [kg]

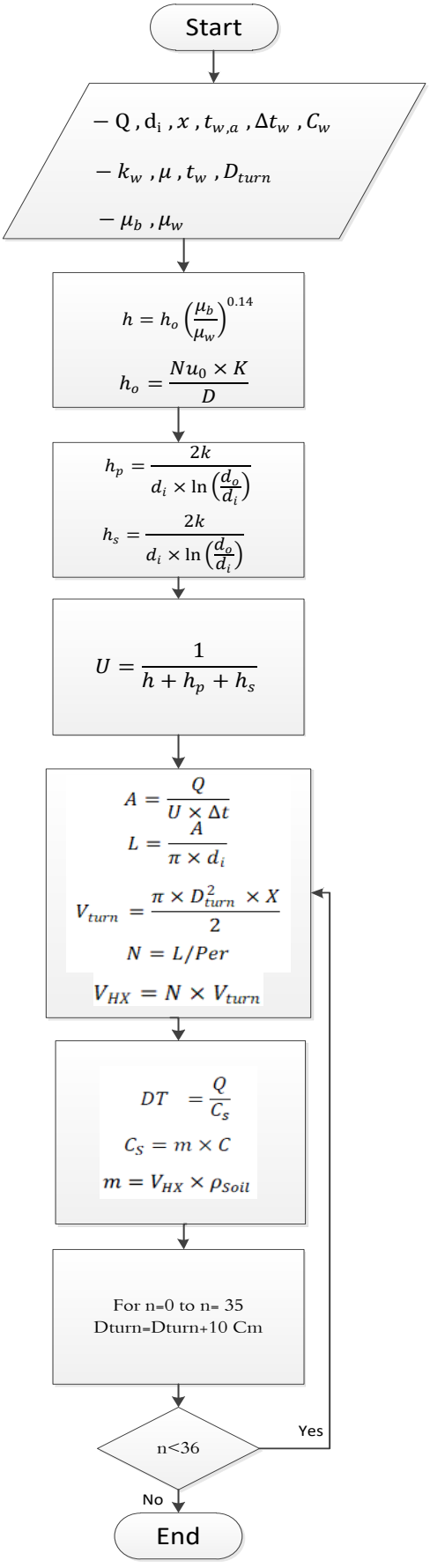
وهي كتلة أسطوانة حجمها حجم الأسطوانة التي يشكلها المبادل ويمكن حسابها من العلاقة

$$m = V_{HX} \times \rho_{Soil} \qquad (2-91)$$

حيث:

ρ_{Soil}; كثافة التربة [kg/m^3]

ويكرر تطبيق المعادلات(2-88) (2-89) (2-90) (2-91) بعد تصميم برنامج حاسوبي لهذا الغرض بحيث يتمُّ زيادة حجم الأسطوانة المدروسة بإضافة 10 سم لنصف قطرها في كلِّ مرة.



الشكل (18–2) خوارزمية حساب الكتلة التخزينية للمبادل الجيوحراري الحلزوني

2.12 المعطيات التصميمية:

1- كمية الحرارة التي تطرحها المضخة الجيوحرارية إلى التربة Q

2- التباعد بين لفات المبادل الجيوحراري الحلزوني X

3- فرق درجات الحرارة على طرفي المبادل (الفرق بين درجة حرارة دخول وخروج الماء)

القيم المفروضة والمتغيرة لحساب الأبعاد التصميمية للمبادل الجيوحراري الحلزوني

1- القطر الداخلي للأنبوب d_i

2- قطر اللفة D_{turn}

المخرجات الحسابية:

1- طول أنبوب المبادل L

2- عدد اللفات N

3- محيط اللفة P

4- حجم المبادل V_{HX}

5- ارتفاع درجة الحرارة الشهري D_t

6- الكتلة التخزينية للمبادل وهي أبعاد الحفرة اللازمة ليتوضع المبادل ضمنها والتي يجب أن تكون كافية لتأمين تفريغ الحرارة ضمن التربة صيفاً وامتصاص الحرارة من التربة شتاءً

الفصل الثالث

تصميم المبادل الجيوحراري

Design of Geothermal Exchanger

3.1 تمهيد:

سيتمُّ في هذا الفصل تحديد الأبعاد المثلى للمبادل المدروس وذلك من خلال دراسة تأثير عناصر التصميم في أبعاد المبادل حيث سيتمُّ تطبيق خوارزمية التصميم المقترحة في الفصل السابق عند أقطار مختلفة للأنبوب وأقطار مختلفة للفة المبادل وللتباعد بين اللفات وتأثير هذه العناصر في أداء المبادل ومعامل انتقال الحرارة الكلي والاستطاعة الهيدروليكية المطلوبة ومن ثمَّ تحديد الكتلة التخزينية المطلوبة من التربة لتحديد أبعاد الحفرة اللازمة لتوضع المبادل.

3.2 تصميم مبادل جيوحراري عامل في دارة مضخة جيوحرارية:

إن الاستطاعة المقترحة للتصميم هي لمضخة جيوحرارية باستطاعة 1 طن ومن ثُمَّ تكون الحرارة المطروحة منها إلى التربة صيفاً 4 kw

سيتمُّ دراسة تأثير

- قطر الأنبوب d
- قطر اللفة D_{turn}
- التباعد بين اللفات x
- معامل انتقال الحرارة الكلي U
- معدل التصريف الحراري إلى التربة Q
- الاستطاعة الهيدروليكية المطلوبة لتدوير الماء ضمن المبادل الجيوحراري W
- حجم التأريض الأرضي أو الكتلة التخزينية اللازمة للمبادل لتحديد أبعاد الحفرة اللازمة

وذلك باستخدام خوارزميات التصميم المستنتجة في الفصل الثاني أقطار مختلفة للأنبوب وأقطار لفات متباينة كانت النتائج كما هو موضَّحٌ في الجدول (1-3)

الجدول (1-3) نتائج التصميم عند (d=15 mm)

d [mm]	L [m]	f	DP [pa]	W [W]	Vw [m^3]	U $w/m^2.^oC$	X [mm]	Dturn [mm]	per [m]	N_{turn}	L_h [m]	Vol [l]
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	200	0.628	76	7.6	0.240
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	400	1.257	38	3.8	0.480
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	600	1.885	25	2.5	0.720
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	800	2.513	19	1.9	0.960
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	1000	3.142	15	1.5	1.200
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	1200	3.770	13	1.3	1.440
15	47.999	0.026	58726	112.7	8.482	70.74	100	1400	4.398	11	1.1	1.680
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	200	0.628	91	18.3	0.574
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	400	1.257	46	9.1	1.148
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	600	1.885	30	6.1	1.723
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	800	2.513	23	4.6	2.297
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	1000	3.142	18	3.7	2.871
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	1200	3.770	15	3.0	3.445
15	57.425	0.026	70258	134.8	10.148	59.13	200	1400	4.398	13	2.6	4.020
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	200	0.628	100	30.1	0.946
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	400	1.257	50	15.1	1.892
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	600	1.885	33	10.0	2.839
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	800	2.513	25	7.5	3.785
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	1000	3.142	20	6.0	4.731
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	1200	3.770	17	5.0	5.677
15	63.078	0.026	77175	148.1	11.147	53.83	300	1400	4.398	14	4.3	6.623
15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	200	0.628	107	42.7	1.343
15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	400	1.257	53	21.4	2.685
15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	600	1.885	36	14.2	4.028
15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	800	2.513	27	10.7	5.370
15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	1000	3.142	21	8.5	6.713

15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	1200	3.770	18	7.1	8.056
15	67.130	0.026	82132	157.6	11.863	50.58	400	1400	4.398	15	6.1	9.398
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	200	0.628	112	55.9	1.757
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	400	1.257	56	28.0	3.514
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	600	1.885	37	18.6	5.272
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	800	2.513	28	14.0	7.029
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	1000	3.142	22	11.2	8.786
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	1200	3.770	19	9.3	10.543
15	70.290	0.026	85998	165	12.421	48.30	500	1400	4.398	16	8.0	12.301
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	200	0.628	116	69.6	2.186
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	400	1.257	58	34.8	4.373
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	600	1.885	39	23.2	6.559
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	800	2.513	29	17.4	8.746
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	1000	3.142	23	13.9	10.932
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	1200	3.770	19	11.6	13.118
15	72.880	0.026	89168	171.1	12.879	46.59	600	1400	4.398	17	9.9	15.305

الجدول (2-3) نتائج التصميم عند (D=20 mm)

d [mm]	L [m]	f	DP [pa]	W [W]	Vw [m^3]	U $w/m^2.^oC$	X [mm]	Dturn [mm]	per [m]	Nturn	L_h [m]	Vol [l]
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	200	0.628	66	6.6	0.206
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	400	1.257	33	3.3	0.413
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	600	1.885	22	2.2	0.619
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	800	2.513	16	1.6	0.825
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	1000	3.142	13	1.3	1.032
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	1200	3.770	11	1.1	1.238
20	41.273	0.028	12911	24.8	12.966	61.70	100	1400	4.398	9	0.9	1.445
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	200	0.628	80	16.0	0.503
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	400	1.257	40	8.0	1.005
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	600	1.885	27	5.3	1.508
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	800	2.513	20	4.0	2.011
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	1000	3.142	16	3.2	2.513
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	1200	3.770	13	2.7	3.016
20	50.269	0.028	15725	30.2	15.792	50.66	200	1400	4.398	11	2.3	3.519
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	200	0.628	89	26.6	0.836
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	400	1.257	44	13.3	1.671
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	600	1.885	30	8.9	2.507
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	800	2.513	22	6.6	3.342
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	1000	3.142	18	5.3	4.178
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	1200	3.770	15	4.4	5.013
20	55.702	0.028	17425	33.4	17.499	45.72	300	1400	4.398	13	3.8	5.849
20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	200	0.628	95	37.9	1.192
20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	400	1.257	47	19.0	2.384
20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	600	1.885	32	12.6	3.576
20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	800	2.513	24	9.5	4.769
20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	1000	3.142	19	7.6	5.961

20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	1200	3.770	16	6.3	7.153
20	59.607	0.028	18646	35.8	18.726	42.72	400	1400	4.398	14	5.4	8.345
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	200	0.628	100	49.9	1.566
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	400	1.257	50	24.9	3.133
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	600	1.885	33	16.6	4.699
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	800	2.513	25	12.5	6.266
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	1000	3.142	20	10.0	7.832
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	1200	3.770	17	8.3	9.399
20	62.657	0.028	19600	37.6	19.684	40.64	500	1400	4.398	14	7.1	10.965
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	200	0.628	104	62.2	1.955
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	400	1.257	52	31.1	3.910
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	600	1.885	35	20.7	5.864
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	800	2.513	26	15.6	7.819
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	1000	3.142	21	12.4	9.774
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	1200	3.770	17	10.4	11.729
20	65.160	0.028	20384	39.1	20.471	39.08	600	1400	4.398	15	8.9	13.684

الجدول (3-3) نتائج التصميم عند (d=25 mm)

d [mm]	L [m]	f	DP [pa]	W [kw]	Vw [m^3]	U $w/m^2.^oC$	X [mm]	Dturn [mm]	per [m]	Nturn	L_h [m]	Vol [l]
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	200	0.628	59	5.9	0.184
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	400	1.257	29	2.9	0.368
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	600	1.885	20	2.0	0.552
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	800	2.513	15	1.5	0.736
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	1000	3.142	12	1.2	0.920
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	1200	3.770	10	1.0	1.104
25	36.795	0.030	4004	7.7	18.062	55.37	100	1400	4.398	8	0.8	1.288
25	45.483	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	200	0.628	72	14.5	0.455
25	45.483	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	400	1.257	36	7.2	0.910
25	45.483	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	600	1.885	24	4.8	1.364
25	45.5	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	800	2.513	18	3.6	1.819
25	45.5	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	1000	3.142	14	2.9	2.274
25	45.5	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	1200	3.770	12	2.4	2.729
25	45.5	0.030	4950	9.5	22.327	44.79	200	1400	4.398	10	2.1	3.184
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	200	0.628	81	24.2	0.761
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	400	1.257	40	12.1	1.523
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	600	1.885	27	8.1	2.284
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	800	2.513	20	6.1	3.046
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	1000	3.142	16	4.8	3.807
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	1200	3.770	13	4.0	4.569
25	50.8	0.030	5525	10.6	24.920	40.13	300	1400	4.398	12	3.5	5.330
25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	200	0.628	87	34.7	1.091
25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	400	1.257	43	17.4	2.183
25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	600	1.885	29	11.6	3.274
25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	800	2.513	22	8.7	4.366
25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	1000	3.142	17	6.9	5.457

25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	1200	3.770	14	5.8	6.549
25	54.6	0.030	5939	11.4	26.788	37.33	400	1400	4.398	12	5.0	7.640
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	200	0.628	92	45.8	1.439
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	400	1.257	46	22.9	2.878
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	600	1.885	31	15.3	4.316
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	800	2.513	23	11.4	5.755
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	1000	3.142	18	9.2	7.194
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	1200	3.770	15	7.6	8.633
25	57.6	0.030	6263	12	28.250	35.40	500	1400	4.398	13	6.5	10.071
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	200	0.628	95	57.3	1.800
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	400	1.257	48	28.6	3.600
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	600	1.885	32	19.1	5.400
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	800	2.513	24	14.3	7.200
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	1000	3.142	19	11.5	9.000
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	1200	3.770	16	9.5	10.800
25	60.0	0.030	6529	12.5	29.451	33.95	600	1400	4.398	14	8.2	12.600

الجدول (4-3) نتائج التصميم عند (d=30 mm)

d [mm]	L [m]	f	DP [pa]	W [kw]	Vw [m^3]	U $w/m^2.^oC$	X [mm]	Dturn [mm]	per [m]	Nturn	L_h [m]	Vol [l]
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	200	0.628	53	5.3	0.168
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	400	1.257	27	2.7	0.335
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	600	1.885	18	1.8	0.503
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	800	2.513	13	1.3	0.671
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	1000	3.142	11	1.1	0.839
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	1200	3.770	9	0.9	1.006
30	33.5	0.031	1543	2.96	23.711	50.61	100	1400	4.398	8	0.8	1.174
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	200	0.628	67	13.4	0.420
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	400	1.257	33	6.7	0.840
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	600	1.885	22	4.5	1.260
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	800	2.513	17	3.3	1.680
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	1000	3.142	13	2.7	2.099
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	1200	3.770	11	2.2	2.519
30	42.0	0.031	1931	3.71	29.680	40.43	200	1400	4.398	10	1.9	2.939
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	200	0.628	75	22.5	0.707
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	400	1.257	38	11.3	1.415
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	600	1.885	25	7.5	2.122
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	800	2.513	19	5.6	2.829
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	1000	3.142	15	4.5	3.537
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	1200	3.770	13	3.8	4.244
30	47.2	0.031	2169	4.16	33.332	36.00	300	1400	4.398	11	3.2	4.951
30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	200	0.628	81	32.4	1.018
30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	400	1.257	40	16.2	2.036
30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	600	1.885	27	10.8	3.053
30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	800	2.513	20	8.1	4.071
30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	1000	3.142	16	6.5	5.089

30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	1200	3.770	13	5.4	6.107
30	50.9	0.031	2340	4.49	35.972	33.36	400	1400	4.398	12	4.6	7.125
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	200	0.628	86	42.8	1.345
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	400	1.257	43	21.4	2.691
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	600	1.885	29	14.3	4.036
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	800	2.513	21	10.7	5.382
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	1000	3.142	17	8.6	6.727
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	1200	3.770	14	7.1	8.072
30	53.8	0.031	2475	4.75	38.040	31.55	500	1400	4.398	12	6.1	9.418
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	200	0.628	89	53.7	1.687
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	400	1.257	45	26.8	3.373
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	600	1.885	30	17.9	5.060
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	800	2.513	22	13.4	6.746
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	1000	3.142	18	10.7	8.433
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	1200	3.770	15	8.9	10.120
30	56.2	0.031	2585	4.96	39.740	30.20	600	1400	4.398	13	7.7	11.806

الجدول (5-3) نتائج التصميم عند (d=35 mm)

d [mm]	L [m]	f	DP [pa]	W [kw]	Vw [m3]	U w/m^2.°C	X [mm]	Dturn [mm]	per [m]	Nturn	L_h [m]	Vol [l]
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	200	0.628	49	4.9	0.155
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	400	1.257	25	2.5	0.311
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	600	1.885	16	1.6	0.466
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	800	2.513	12	1.2	0.621
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	1000	3.142	10	1.0	0.776
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	1200	3.770	8	0.8	0.932
35	31.1	0.033	690	1.32	29.878	46.86	100	1400	4.398	7	0.7	1.087
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	200	0.628	63	12.5	0.393
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	400	1.257	31	6.3	0.786
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	600	1.885	21	4.2	1.179
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	800	2.513	16	3.1	1.572
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	1000	3.142	13	2.5	1.964
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	1200	3.770	10	2.1	2.357
35	39.3	0.033	873	1.68	37.801	37.04	200	1400	4.398	9	1.8	2.750
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	200	0.628	71	21.2	0.665
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	400	1.257	35	10.6	1.331
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	600	1.885	24	7.1	1.996
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	800	2.513	18	5.3	2.662
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	1000	3.142	14	4.2	3.327
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	1200	3.770	12	3.5	3.993
35	44.4	0.033	986	1.89	42.681	32.80	300	1400	4.398	10	3.0	4.658
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	200	0.628	76	30.6	0.961
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	400	1.257	38	15.3	1.921
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	600	1.885	25	10.2	2.882
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	800	2.513	19	7.6	3.843
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	1000	3.142	15	6.1	4.804

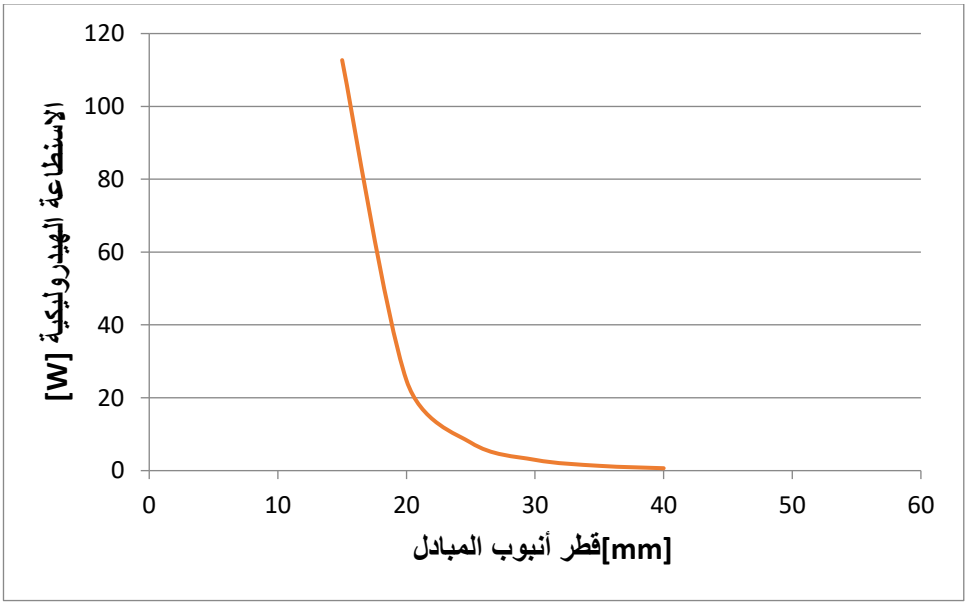
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	1200	3.770	13	5.1	5.764
35	48.0	0.033	1068	2.05	46.217	30.29	400	1400	4.398	11	4.4	6.725
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	200	0.628	81	40.5	1.273
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	400	1.257	41	20.3	2.546
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	600	1.885	27	13.5	3.819
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	800	2.513	20	10.1	5.092
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	1000	3.142	16	8.1	6.365
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	1200	3.770	14	6.8	7.638
35	50.9	0.033	1132	2.17	48.992	28.58	500	1400	4.398	12	5.8	8.911
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	200	0.628	85	50.9	1.599
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	400	1.257	42	25.4	3.198
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	600	1.885	28	17.0	4.797
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	800	2.513	21	12.7	6.395
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	1000	3.142	17	10.2	7.994
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	1200	3.770	14	8.5	9.593
35	53.3	0.033	1184	2.27	51.276	27.30	600	1400	4.398	12	7.3	11.192

الجدول (6-3) نتائج التصميم عند (d=40 mm)

d [mm]	L [m]	f	DP [pa]	W [w.10]	Vw [m3]	U w/m^2.^{o}C	X [mm]	Dturn [mm]	per [m]	Nturn	L_h [m]	Vol [l]
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	200	0.628	46	4.6	0.145
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	400	1.257	23	2.3	0.291
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	600	1.885	15	1.5	0.436
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	800	2.513	12	1.2	0.581
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	1000	3.142	9	0.9	0.727
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	1200	3.770	8	0.8	0.872
40	29.1	0.034	344	0.66	36.535	43.79	100	1400	4.398	7	0.7	1.018
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	200	0.628	59	11.8	0.371
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	400	1.257	30	5.9	0.743
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	600	1.885	20	3.9	1.114
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	800	2.513	15	3.0	1.485
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	1000	3.142	12	2.4	1.856
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	1200	3.770	10	2.0	2.228
40	37.1	0.034	440	0.84	46.655	34.29	200	1400	4.398	8	1.7	2.599
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	200	0.628	67	20.1	0.632
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	400	1.257	34	10.1	1.264
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	600	1.885	22	6.7	1.895
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	800	2.513	17	5.0	2.527
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	1000	3.142	13	4.0	3.159
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	1200	3.770	11	3.4	3.791
40	42.1	0.034	499	0.96	52.926	30.23	300	1400	4.398	10	2.9	4.422
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	200	0.628	73	29.1	0.915
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	400	1.257	36	14.6	1.830
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	600	1.885	24	9.7	2.745
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	800	2.513	18	7.3	3.659
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	1000	3.142	15	5.8	4.574

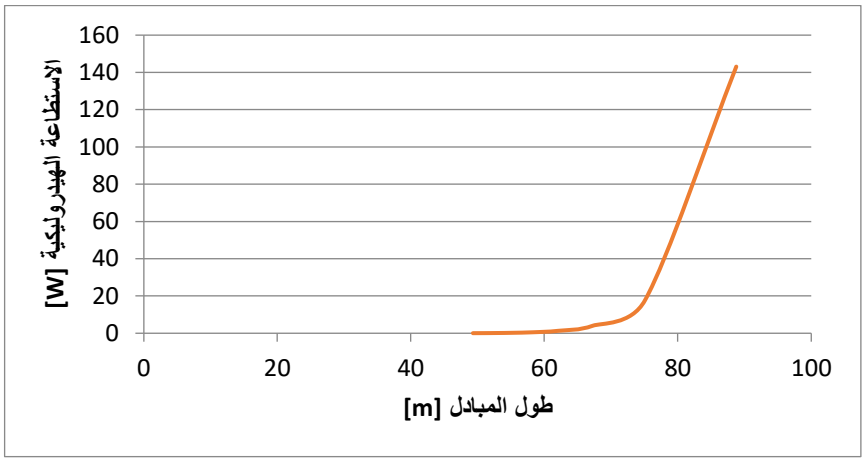
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	1200	3.770	12	4.9	5.489
40	45.7	0.034	542	1.04	57.482	27.83	400	1400	4.398	10	4.2	6.404
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	200	0.628	77	38.7	1.215
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	400	1.257	39	19.3	2.430
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	600	1.885	26	12.9	3.644
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	800	2.513	19	9.7	4.859
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	1000	3.142	15	7.7	6.074
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	1200	3.770	13	6.4	7.289
40	48.6	0.034	576	1.1	61.063	26.20	500	1400	4.398	11	5.5	8.504
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	200	0.628	81	48.6	1.528
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	400	1.257	41	24.3	3.056
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	600	1.885	27	16.2	4.585
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	800	2.513	20	12.2	6.113
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	1000	3.142	16	9.7	7.641
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	1200	3.770	14	8.1	9.169
40	50.9	0.034	603	1.16	64.013	25.00	600	1400	4.398	12	6.9	10.697

3.2.1 دراسة تأثير قطر وطول المبادل في الاستطاعة الهيدروليكية اللازمة



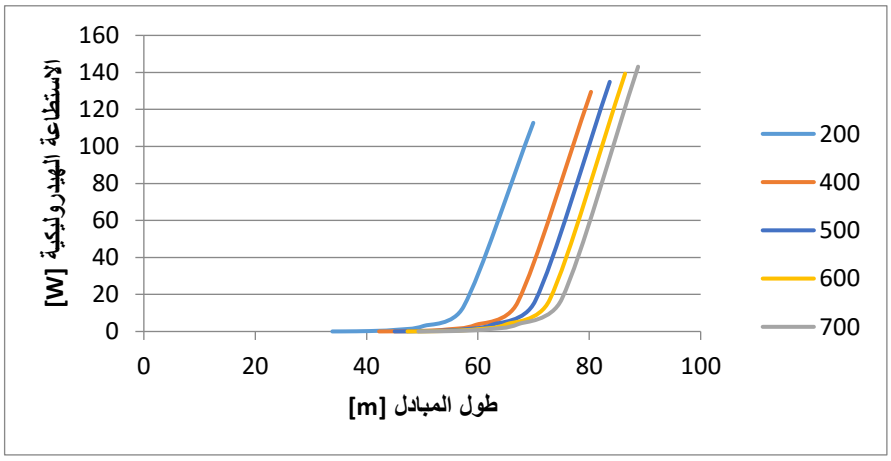
الشكل (1-3) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل والاستطاعة الهيدروليكية

يُبيِّن الشكل (3-1) العلاقة بين قطر الأنبوب بالـ mm والاستطاعة الهيدروليكية بالواط وذلك عند تباعد (خطوة) 100mm ما بين اللفات ونلاحظ انخفاض الاستطاعة اللازمة مع ازدياد قطر الأنبوب وبداية الاستقرار عند قطر أكبر من 25 mm ويمكن رسم المنحني ذاته لخطوات مختلفة وسيعطي نفس الشكل ولكن بقيم أكبر قليلاً للاستطاعة الهيدروليكية



الشكل (3-2) العلاقة بين طول المبادل والاستطاعة الهيدروليكية

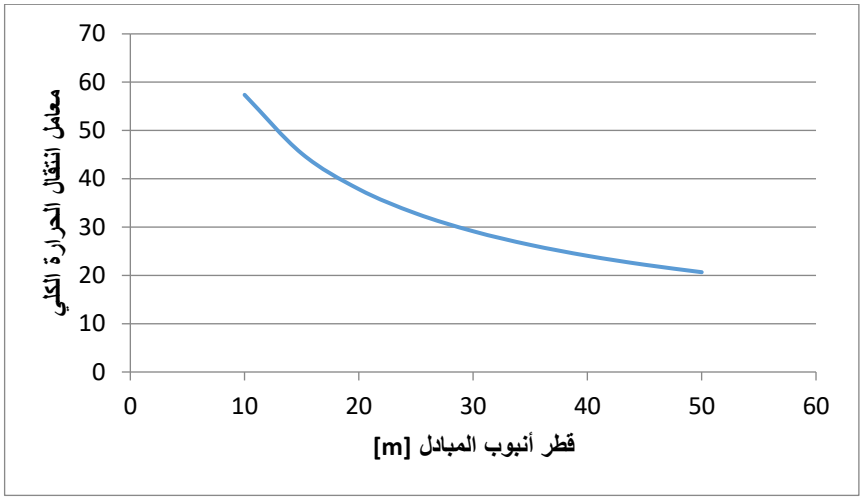
يُبيِّن الشكل (3-2) العلاقة بين طول المبادل بالـ m والاستطاعة الهيدروليكية بالواط ونلاحظ أنَّ طول المبادل عند أقطار متدرجة للمبادل من قطر 15مم وحتى 40 مم وعند تباعد (خطوة) 600mm ونلاحظ زيادة الاستطاعة الهيدروليكية مع زيادة طول الأنبوب حيث أن الطول الأكبر يكون موافق للقطر الأصغر



الشكل (3-3) العلاقة بين طول المبادل والاستطاعة الهيدروليكية عند تباعدات مختلفة

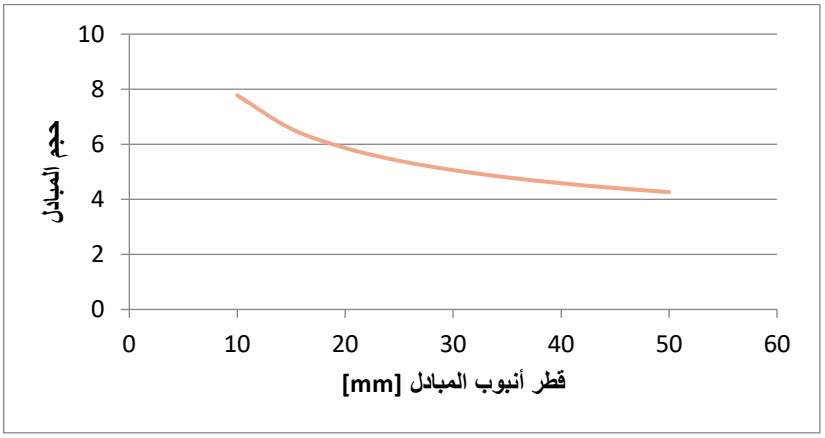
يُبيِّن الشكل (3-3) العلاقة بين طول المبادل بالـ m والاستطاعة الهيدروليكية بالواط وذلك عند تباعدات مختلفة بين لفات المبادل بدءاً من X=20cm وحتى X=70cm ويلاحظ تقارب القيم للمنحنيات عندما تصل قيمة التباعد X=40cm ولكن كما ذكرنا سابقاً فإنَّ أقل قيمة لهذا التباعد هي X=60cm بهدف عدم حصول تداخلات حرارية أثناء تقريغ أو امتصاص الحرارة من التربة.

3.2.2 دراسة تأثير قطر أنبوب المبادل في معامل انتقال الحرارة الكلي وحجم المبادل



الشكل (3-4) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل ومعامل انتقال الحرارة الكلي

يبين الشكل (3-4) معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل مع قطر الأنبوب عند تباعد 600mm ونلاحظ انخفاض قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي U مع ازدياد قطر الأنبوب ومع مقاطعة النتائج مع تكاليف التشغيل والاستثمار نلاحظ أنَّ القطر الأفضل ضمن المجال di=30-40mm.

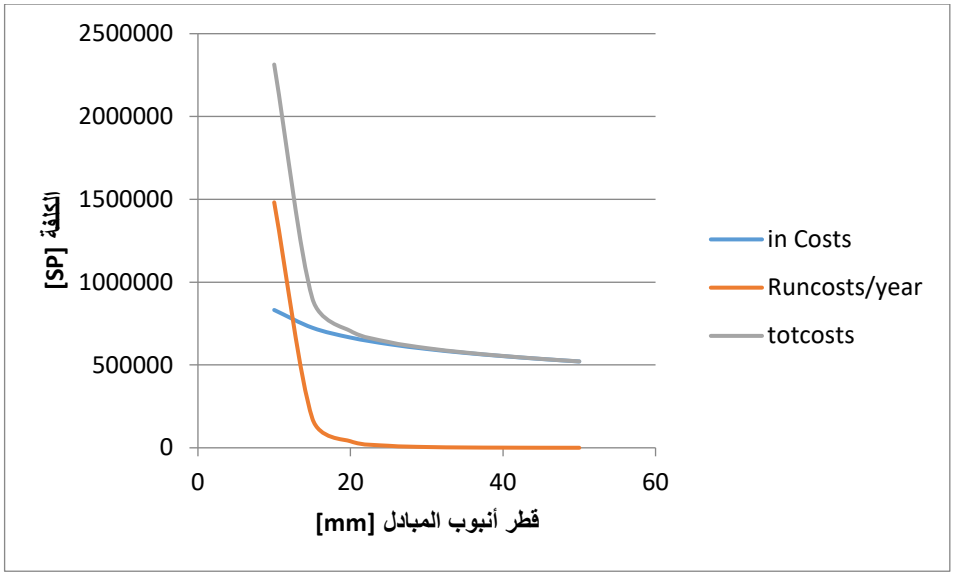


الشكل (3-5) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل وحجم المبادل

يُبيّن الشكل (3-5) العلاقة بين حجم المبادل والذي يؤثر تأثيراً مباشراً في كلفة الحفر مع قطر أنبوب المبادل تباعد 600mm ونلاحظ انخفاض حجم المبادل مع زيادة قطر الأنبوب.

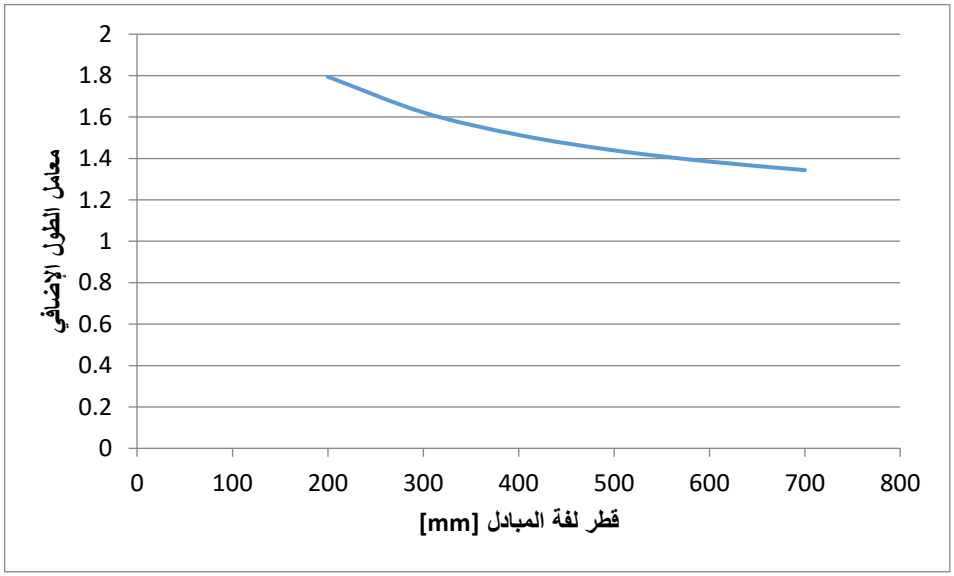
3.2.3 استنتاج القطر الأمثل للمبادل

تمَّ إنشاء برنامج حاسوبي لحساب أبعاد المبادل والوقوف عند الأبعاد الأمثل وأُخذ بالحسان الكلفة التأسيسية وكلفة الحفر والكلفة التشغيلية المطلوبة للضخ ويُبيّن المخطط في الشكل (3-6) العلاقة ما بين قطر أنبوب المبادل والكلفة التأسيسية والكلفة التشغيلية والكلفة الكلية.



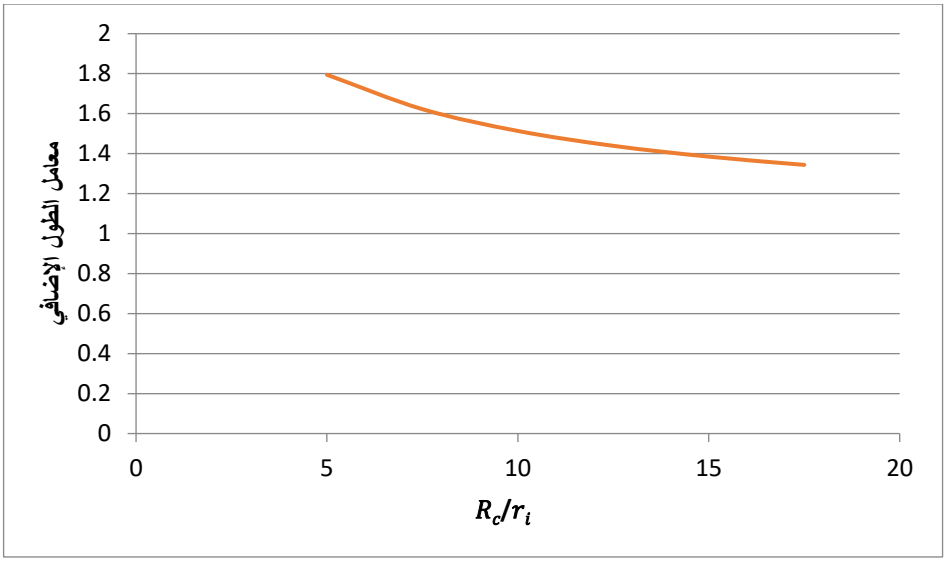
الشكل (3-6) العلاقة بين قطر أنبوب المبادل والكلفة الإجمالية

ويلاحظ من المنحني السابق استقرار الكلفة التشغيلية بدءاً من قطر أنبوب di=25mm وحتى di=50mm بينما يكون استقرار الكلفة التأسيسية والكلفة الكلية عند قطر أكبر من di=30mm وحتى di=50mm ومن ثُمَّ يمكن اعتماد قطر أنبوب 32mm كقطر تصميمي للمبادل المدروس كونه القطر الأصغر الموجود في الأسواق والمحقق لانخفاض الكلفتين التأسيسية والتشغيلية.



الشكل (3-7) العلاقة بين قطر لفة المبادل ومعامل الطول الإضافي

يُبيّن الشكل (3-7) علاقة معامل الطول الإضافي مع قطر لفة المبادل ويُلاحظ انخفاض قيمة معامل الطول الإضافي مع ازدياد قطر المبادل وذلك عند تباعد ثابت بين اللفات 600mm.

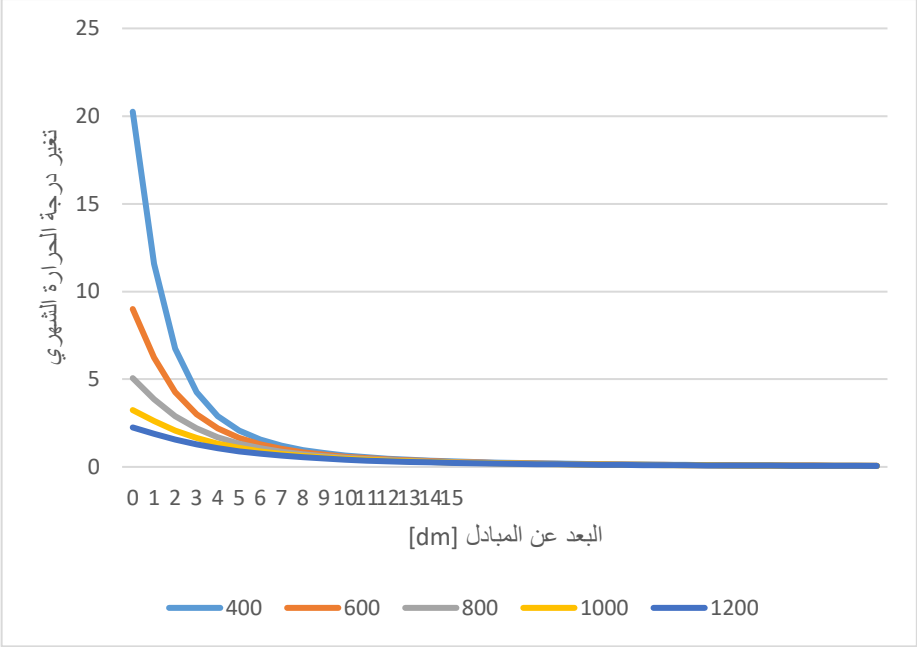


الشكل (3-8) العلاقة بين النسبة $\frac{R_c}{r_i}$ ومعامل الطول الإضافي

يُبيّن الشكل (3-8) علاقة الطول الإضافي للأنبوب مع النسبة $\frac{R_c}{r_i}$ ويلاحظ انخفاض معامل الطول الإضافي مع زيادة هذه النسبة حيث أنَّ قيم المنحني المختارة عند قطر أنبوب 32mm

3.2.4 دراسة تغير درجة الحرارة الشهري للتربة وعلاقاتها مع المسافة عن أنبوب المبادل

يبين الشكل (3-9) العلاقة بين تغير درجة الحرارة خلال شهر واحد من تشغيل المضخة الحرارية في فصل الصيف والعلاقة مع البعد عن أنبوب المبادل وذلك عند أقطار لفات متدرجة من 400 مم وحتى 1200 مم ويُلاحظ أنَّه مع ازدياد قطر اللفة ينخفض ارتفاع درجة الحرارة ومن ثُمَّ قطر اللفة 1200 مم هو الأنسب للمبادل وكلما ازداد قطر لفة المبادل أصبح منحني تغير درجة الحرارة متسطح على نحو أكبر. كما يُلاحظ أنَّ ارتفاع درجة الحرارة نتيجة طرح الحرارة ضمن التربة ينخفض كلما ابتعدنا عن أنبوب المبادل ويصبح مقارب للصفر على بعد ثلاثة أمتار من المبادل ومن ثُمَّ يمكن اختيار أن يكون عمق الحفرة التي سيوضع فيها المبادل 3 متر عن سطح الأرض علماً أن جميع القيم المذكورة هي عند قطر أنبوب للمبادل 32 مم (وهو القطر المختار للتنفيذ بعد اعتماد أن تكون مادة البكس PEX هي مادة المبادل الجيوحراري).



الشكل (3-9) العلاقة بين تغير درجة الحرارة الشهري للتربة مع المسافة عن أنبوب المبادل

3.2.5 كمية الحرارة التي يطرحها المبادل وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل

يُبيِّن الشكل (3-10) العلاقة بين كمية الحرارة المفيدة التي يطرحها المبادل لكلِّ متر طولي وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل عند قطر 32mm وتباعد ثابت بين اللفات تباعد 600mm ويُلاحظ أنَّ كمية الحرارة المطروحة من المبادل تنخفض مع ازدياد البعد عن أنبوب المبادل نتيجة المقاومة الحرارية للتربة إلَّا أنَّ الانخفاض يصبح بشكل شبه مستقر على بعد 15 متراً من المبادل

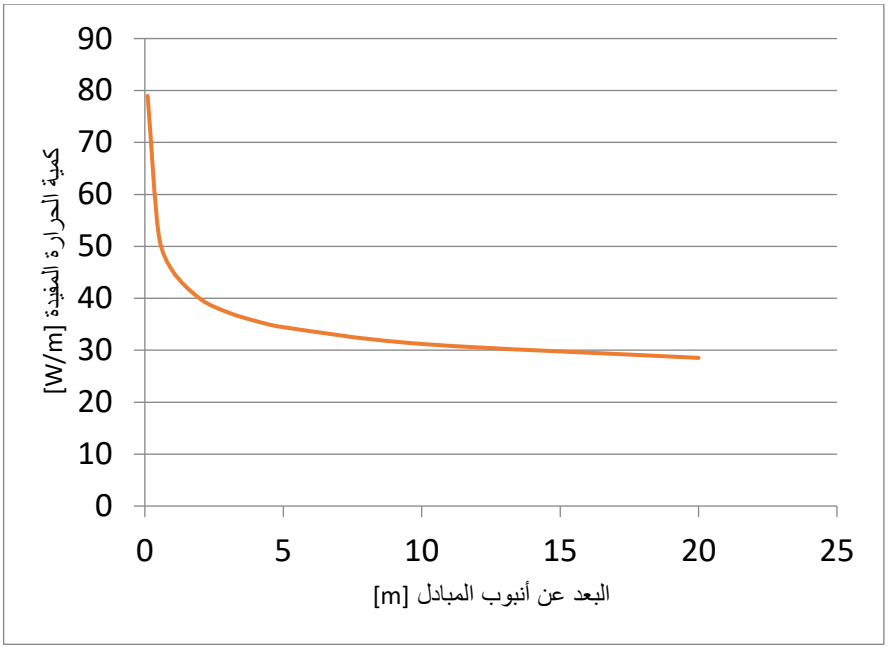
ويمكن استنتاج علاقة رياضية تربط ما بين كمية الحرارة المفيدة والبعد عن أنبوب المبادل وهي:

$$q = 47.061 \times Dis^{-0.171} \qquad (3-1)$$

حيث

q: هي كمية الحرارة المفيدة W/m

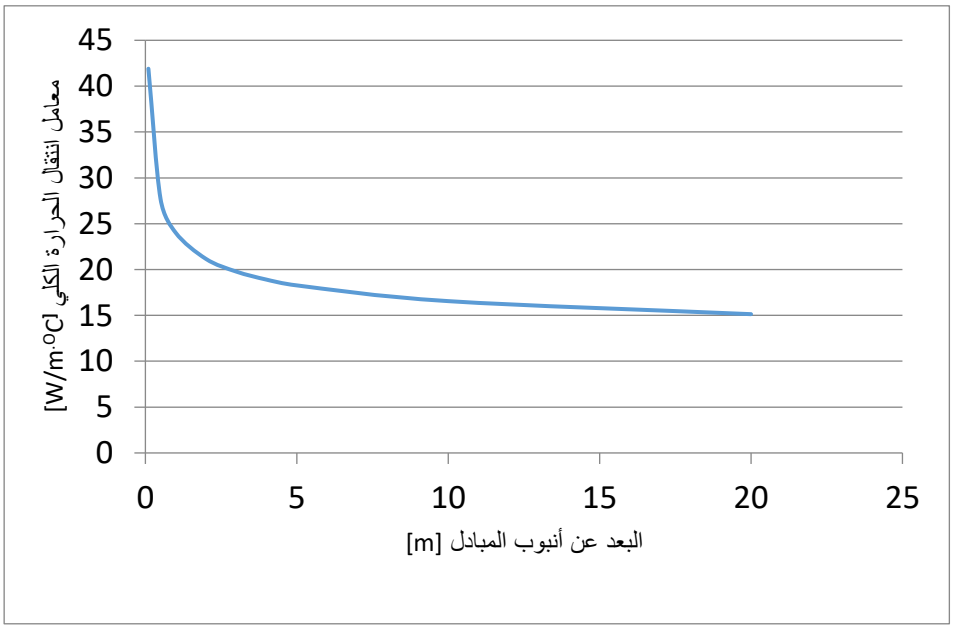
Dis: البعد عن أنبوب المبادل m



الشكل (3–10) كمية الحرارة التي يطرحها المبادل وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل

3.2.6 معامل انتقال الحرارة الكلي وعلاقته مع البعد عن أنبوب المبادل

يُبيّن الشكل (3–11) العلاقة بين معامل انتقال الحرارة الكلي وعلاقته مع البعد عن أنبوب المبادل عند قطر 32mm وتباعد ثابت بين اللفات تباعد 600mm ونلاحظ انخفاض معامل انتقال الحرارة كلما زاد البعد أكثر عن أنبوب المبادل ويصبح الانخفاض شبه مستقر على بعد 15 متراً من المبادل



الشكل (3–11) معامل انتقال الحرارة الكلي وعلاقته مع البعد عن أنبوب المبادل

3.3 تغير درجة حرارة التربة نتيجة التشغيل المستمر والدوري

الجدول (7-3) جدول النتائج لتغير درجة الحرارة

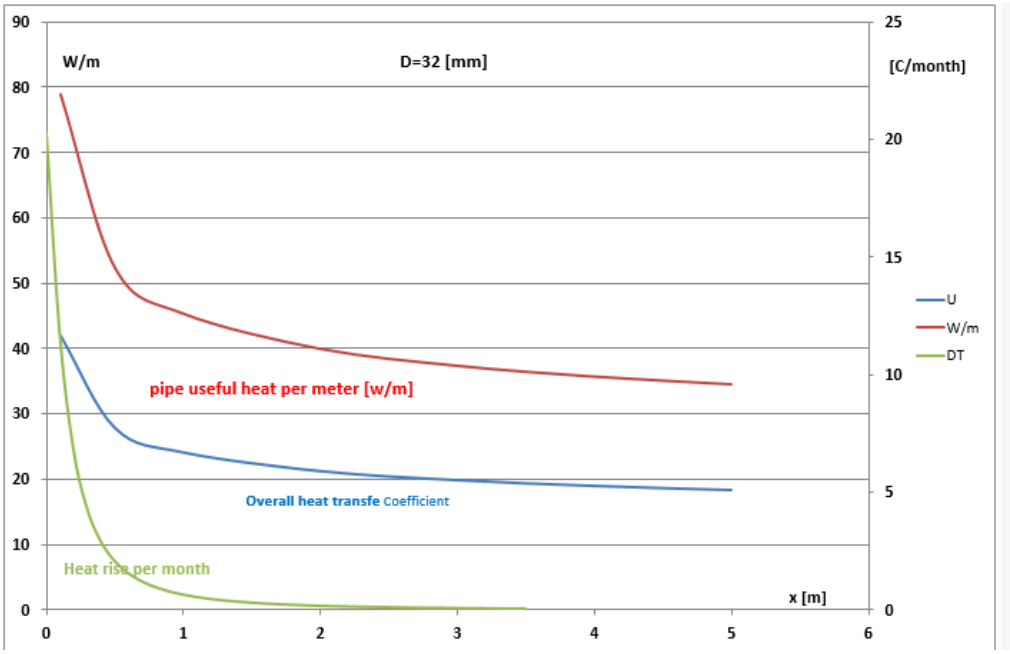
2	1	0	رقم التكرار n
0.9801769	0.8105309	0.678584	حجم اللفة V_{turn} m^3
26.334248	21.776397	18.231402	الحجم الكلي V_{tot} m^3
1568.2831	1296.8494	1085.7344	كتلة التربة m kg
1568283.1	1296849.4	1085734.4	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
1.5576923	1.8837209	2.25	تغير درجة الحرارة الشهري
5	4	3	رقم التكرار n
1.7153096	1.4325663	1.187522	حجم اللفة V_{turn} m^3
46.084934	38.488516	31.904954	الحجم الكلي V_{tot} m^3
2744.4953	2292.106	1900.0352	كتلة التربة m kg
2744495.3	2292106	1900035.2	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
0.8901099	1.0657895	1.2857143	تغير درجة الحرارة الشهري
8	7	6	رقم التكرار n
2.7897343	2.3938936	2.035752	حجم اللفة V_{turn} m^3
74.951321	64.316336	54.694207	الحجم الكلي V_{tot} m^3
4463.5748	3830.2298	3257.2033	كتلة التربة m kg
4463574.8	3830229.8	3257203.3	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
0.5472973	0.6377953	0.75	تغير درجة الحرارة الشهري
11	10	9	رقم التكرار n
4.203451	3.694513	3.2232741	حجم اللفة V_{turn} m^3
112.93341	99.259857	86.599161	الحجم الكلي V_{tot} m^3
6725.5216	5911.2207	5157.2385	كتلة التربة m kg
6725521.6	5911220.7	5157238.5	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
2.80E-07	3.19E-07	3.66E-07	تغير درجة الحرارة الشهري
14	13	12	رقم التكرار n
5.9564597	5.3344243	4.7500881	حجم اللفة V_{turn} m^3
160.0312	143.31908	127.61982	الحجم الكلي V_{tot} m^3
9530.3355	8535.0789	7600.1409	كتلة التربة m kg

9530335.5	8535078.9	7600140.9	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
1.98E-07	2.21E-07	2.48E-07	تغير درجة الحرارة الشهري
17	16	15	رقم التكرار n
8.0487604	7.3136277	6.6161941	حجم اللفة V_{turn} m^3
216.24469	196.494	177.75617	الحجم الكلي V_{tot} m^3
12878.017	11701.804	10585.911	كتلة التربة m kg
12878017	11701804	10585911	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
0.1896956	0.2087629	0.2307692	تغير درجة الحرارة الشهري
20	19	18	رقم التكرار n
10.480353	9.6321231	8.8215922	حجم اللفة V_{turn} m^3
281.57388	258.78463	237.00823	الحجم الكلي V_{tot} m^3
16768.565	15411.397	14114.547	كتلة التربة m kg
16768565	15411397	14114547	السعة الحررايا للتربة C_s j/kg
0.1456835	0.1585127	0.1730769	تغير درجة الحرارة الشهري
23	22	21	رقم التكرار n
13.251238	12.28991	11.366282	حجم اللفة V_{turn} m^3
356.01877	330.19095	305.37599	الحجم الكلي V_{tot} m^3
21201.981	19663.857	18186.052	كتلة التربة m kg
21201981	19663857	18186052	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
0.1152205	0.1242331	0.1343284	تغير درجة الحرارة الشهري
26	25	24	رقم التكرار n
16.361415	15.28699	14.250264	حجم اللفة V_{turn} m^3
439.57937	410.71298	382.85945	الحجم الكلي V_{tot} m^3
26178.263	24459.184	22800.423	كتلة التربة m kg
26178263	24459184	22800423	السعة الحرارية للتربة C_s j/kg
0.093318	0.0998767	0.1071429	تغير درجة الحرارة الشهري
29	28	27	رقم التكرار n
19.810883	18.623361	17.473538	حجم اللفة V_{turn} m^3
532.25566	500.35071	469.45861	الحجم الكلي V_{tot} m^3
31697.413	29797.378	27957.661	كتلة التربة m kg

السعة الحرارية للتربة C_s j/kg	27957661	29797378	31697413
تغير درجة الحرارة الشهري	0.0873786	0.0819838	0.0770695
رقم التكرار n	30	31	32
حجم اللفة V_{turn} m^3	21.036104	22.299025	23.599644
الحجم الكلي V_{tot} m^3	565.17347	599.10414	634.04766
كتلة التربة m kg	33657.767	35678.439	37759.43
السعة الحرارية للتربة C_s j/kg	33657767	35678439	37759430
تغير درجة الحرارة الشهري	0.0725806	0.06847	0.0646965
رقم التكرار n	33	34	35
حجم اللفة V_{turn} m^3	24.937962	26.31398	27.727697
الحجم الكلي V_{tot} m^3	670.00404	706.97327	744.95536
كتلة التربة m kg	39900.74	42102.368	44364.315
السعة الحرارية للتربة C_s j/kg	39900740	42102368	44364315
تغير درجة الحرارة الشهري	0.0612245	0.0580229	0.0550646

حيث يظهر الجدول (7-3) عينة من النتائج بتكرار 36 مرة في كلِّ مرة تمّ زيادة نصف قطر حجم الأسطوانة المدروس بمقدار 10 سم بدءاً من الأسطوانة الأولى عند n=0 وهي حجم التربة عند حدود المبادل أي في المنطقة الداخلية ومن ثُمَّ الابتعاد عن أنبوب المبادل بجميع الاتجاهات بهدف دراسة التدرج الحراري وتغير درجة الحرارة في المنطقة المحيطة للمبادل عند قطر 32mm وتباعد ثابت بين اللفات تباعد 600mm

يُبيّن الشكل (12-3) المنحنيات التي تمَّت دراستها مجمعة لأجل المبادل المدروس ويُلاحظ أنَّ مجال التغير يكون في المجال من 10cm ويبدأ حدوث الاستقرار على بعد 2 متر تقريباً.



الشكل (3-12) المتغيرات المدروسة وعلاقتها مع البعد عن أنبوب المبادل الجيوحراري

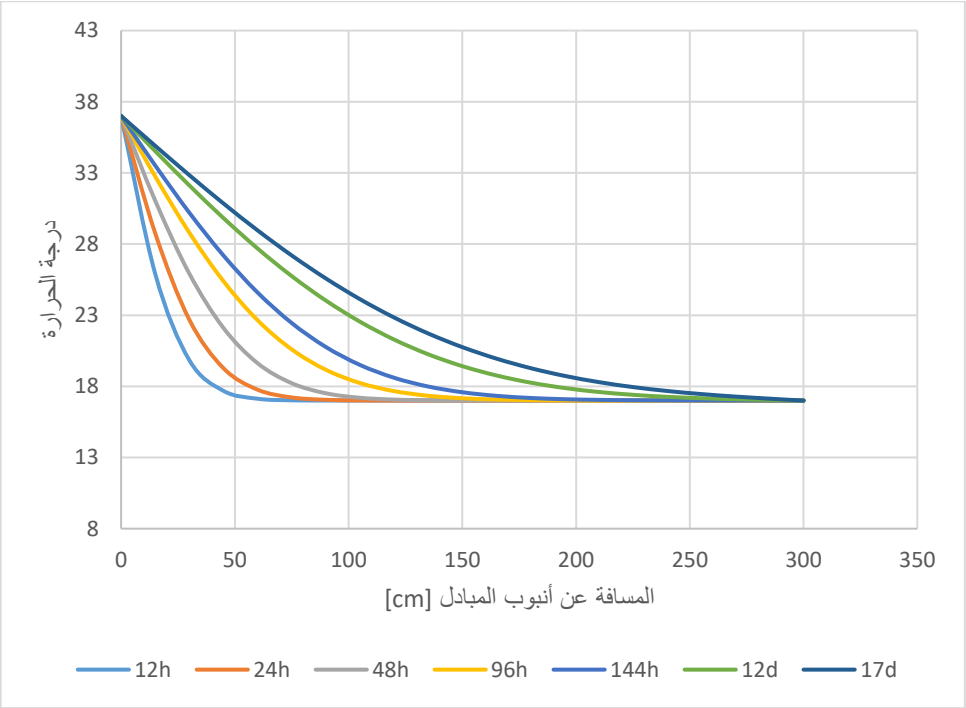
يُبيّن الجدول (3-8) أبعاد المبادل الجيوحراري اللازم لمضخة جيوحرارية استطاعتها 1 طن تبريدي وتمَّ الحساب في حالة التبريد والذي يحقق حالة التدفئة كون الاستطاعة اللازمة للتدفئة أقل.

الجدول (3-8) الأبعاد التصميمية لمبادل جيوحراري عامل في دارة مضخة جيوحرارية باستطاعة 1 طن تبريدي

المدخلات	
كمية الحرارة [W]	4500
القطر الداخلي للأنبوب [mm]	32
قطر اللفة [Cm]	150
التباعد بين اللفات [Cm]	60
المخرجات	
معامل الاحتكاك f	0.03387
انخفاض الضغط [pa]	2298.7
الاستطاعة الهيدروليكية للضخ [W]	4.7
معامل انتقال الحرارة الكلي [$W/m^2.C$]	29.724.
محيط اللفة [m]	4.7
عدد اللفات المطلوبة	12.77
طول المبادل الكلي [m]	60.2
حجم اللفة [m^3]	1.06
حجم المبادل [m^3]	13.54

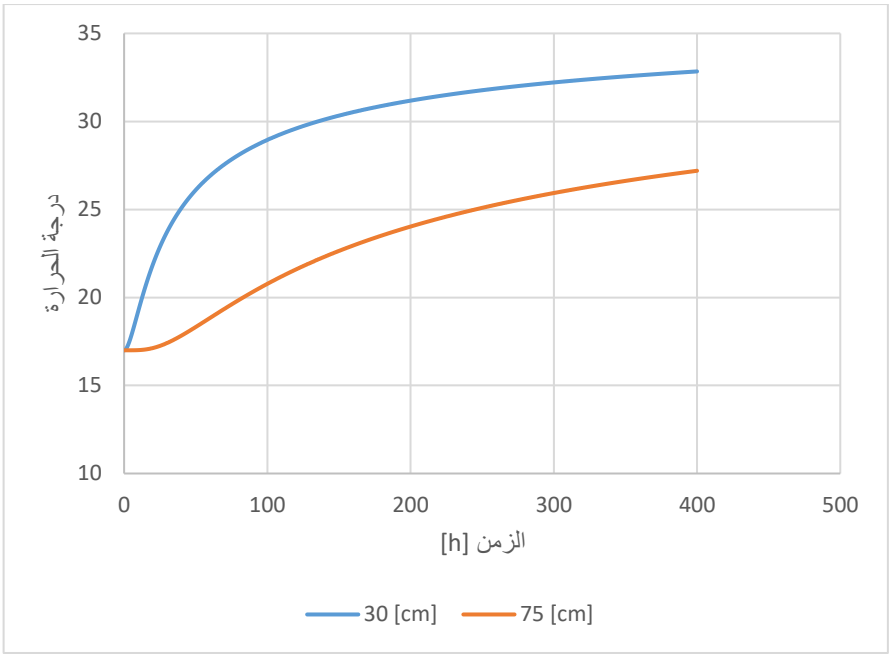
3.4 دراسة التدرج الحراري ضمن التربة بطريقة العناصر المنتهية صيفاً للمبادل الجيوحراري والتربة

يُبيّن الشكل (3-11) التدرج الحراري كتابع للزمن والمسافة عن أنبوب المبادل خلال فصل الصيف حيث تم تقسيم المنطقة المحيطة بالمبادل وأيضاً منطقة التربة داخل لفات المبادل إلى عقد زمانية مكانية وتم دراسة التدرج الحرارة وفق الانتشارية الحرارية وخواص التربة وتم استنتاج المنحنيات التالية



الشكل (3-13) التدرج الحراري كتابع للزمن والمسافة عن أنبوب المبادل الجيوحراري خلال فصل الصيف

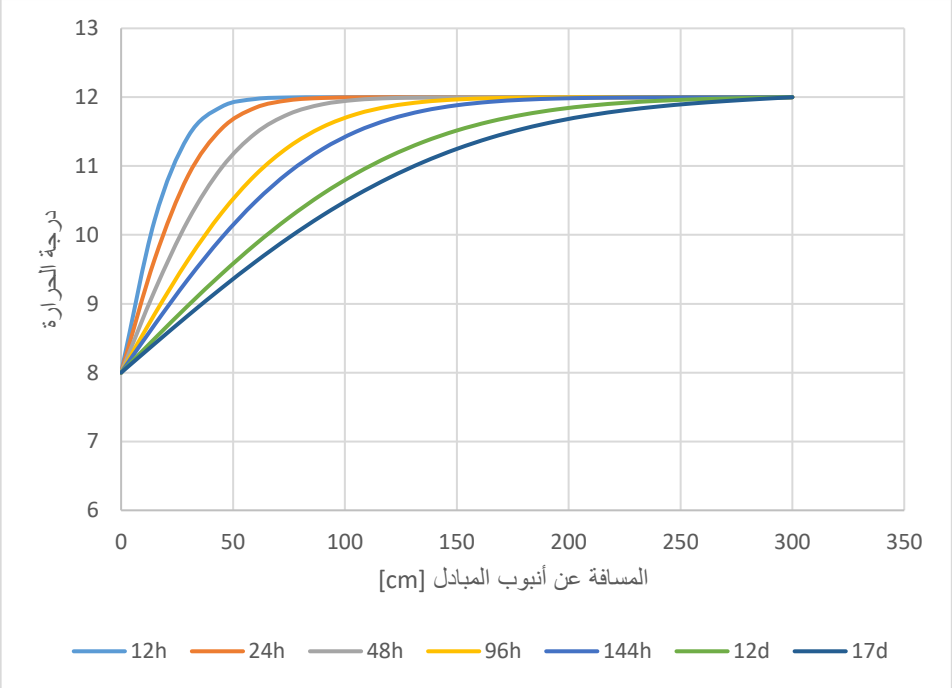
يُبيّن الشكل (3-14) أن درجات الحرارة وتغيرها مع البعد عن أنبوب المبادل الجيوحراري وتكون درجة الحرارة عند أنبوب المبادل $37^{o}C$ وهي درجة حرارة الماء ضمن الأنبوب كما أنَّ درجة الحرارة البدائية على بعد ثلاثة أمتار هي درجة حرارة التربة المفترضة عند بداية التشغيل الصيفي $17^{o}C$



الشكل (3-14) تغير درجة الحرارة بين الأنبوبين وفي مركز المبادل الجيوحراري خلال فصل الصيف

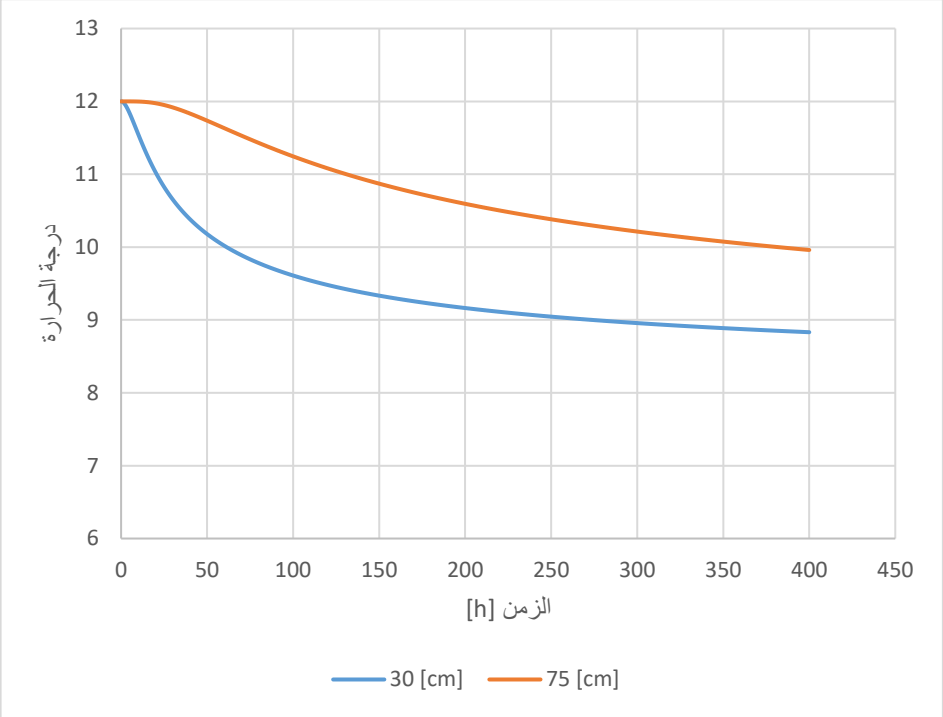
يُبيِّن الشكل أنَّ الابتعاد عن الأنبوب يؤدي إلى تغير أبطأ بدرجة حرارة التربة وتكون درجة الحرارة أقل ما يمكن في مركز المبادل وذلك بعد 400 ساعة تشغيل (أي 50 يوم عمل) بمعدل تشغيل 8 ساعات يومياً.

3.5 دراسة التدرج الحراري ضمن التربة بطريقة العناصر المنتهية شتاءً للمبادل الجيوحراري والتربة



الشكل (3-15) التدرج الحراري كتابع للزمن والمسافة عن أنبوب المبادل الجيوحراري خلال فصل الشتاء

يُبيِّن الشكل (3–15) أنَّ درجات الحرارة وتغيرها مع البعد عن أنبوب المبادل الجيوحراري وتكون درجة الحرارة عند أنبوب المبادل 8^oC وهي درجة حرارة الماء ضمن الأنبوب كما أنَّ درجة الحرارة البدائية على بعد ثلاثة أمتار هي درجة الحرارة التي المفترضة في بداية التشغيل الشتوي وهي 12^oC



الشكل (3–16) تغير درجة الحرارة بين الأنبوبين وفي مركز المبادل خلال فصل الشتاء

يُبيِّن الشكل (3–16) أنَّ الابتعاد عن الأنبوب يُؤدِّي إلى تغير أبطأ بدرجة حرارة التربة وتكون درجة الحرارة أقل ما يمكن في مركز المبادل وذلك بعد 400 ساعة تشغيل (أي 50 يوم عمل) بمعدَّل تشغيل 8 ساعات يومياً

3.6 سرعة وتسارع تغير درجة الحرارة ضمن التربة عند بعد 60 سم عن المبادل

ان تغير طاقة النظام الزمني

$$\Delta E_{sys} = E_{time+\Delta time} - E_{time} = m.C.(T_{time+\Delta time} - T_{time}) = \rho.C.A.\Delta x.(T_{time+\Delta time} - T_{time})$$

وكذلك

$$G_e^{\bullet} = g^{\bullet}.V_e = g^{\bullet}.A.\Delta x$$

اي أن

$$Q_x - Q_{x+\Delta x} + g^{\bullet}.A.\Delta x = \rho.C.A.\Delta x.\frac{T_{time+\Delta time} - T_{time}}{\Delta time}$$

نقسم على $A.\Delta x$

$$\frac{1}{A}.\frac{Q_x - Q_{x+\Delta x}}{\Delta x} + g^{\bullet} = \rho.C.\frac{T_{time+\Delta time} - T_{time}}{\Delta time}$$

نأخذ نهاية التابع عندما $\Delta x \to 0, \Delta time \to 0$ ولدينا من معادلة فوريه:

$$\lim \frac{Q_x - Q_{x+\Delta x}}{\Delta x \to 0} = \frac{\partial Q^{\bullet}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-k.A.\frac{\partial T}{\partial x}\right)$$

فيكون

$$\frac{1}{A}.\frac{\partial}{\partial x}\left(k.A.\frac{\partial T}{\partial x}\right) + g^{\bullet} = \rho C.\frac{\partial T}{\partial time}$$

باعتبار A ثابتة و:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k.\frac{\partial T}{\partial x}\right) + g^{\bullet} = \rho C.\frac{\partial T}{\partial time}$$

بالتعريف الانتشارية الحرارية:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C}$$

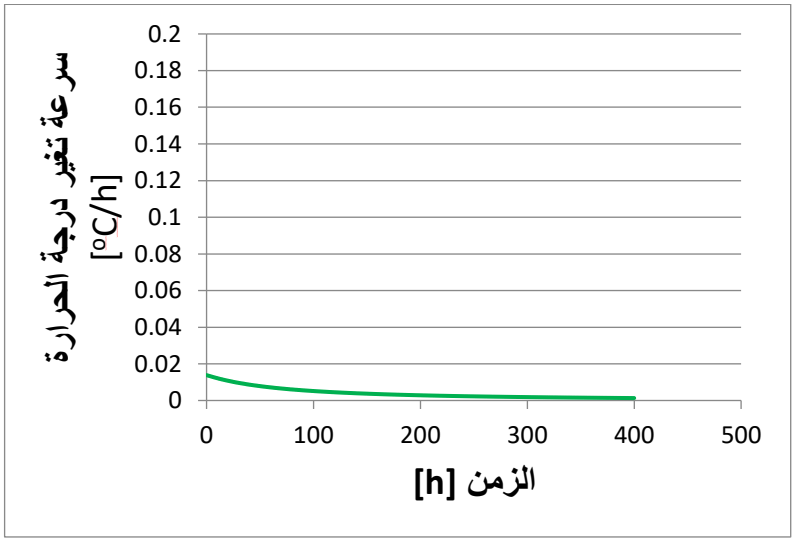
عندما k=const

$$\frac{\partial 2T}{\partial x^2} + \frac{g^{\bullet}}{k} = \frac{1}{\alpha}.\frac{\partial T}{\partial time} = \frac{1}{\alpha}.\frac{\partial T}{\partial t}$$

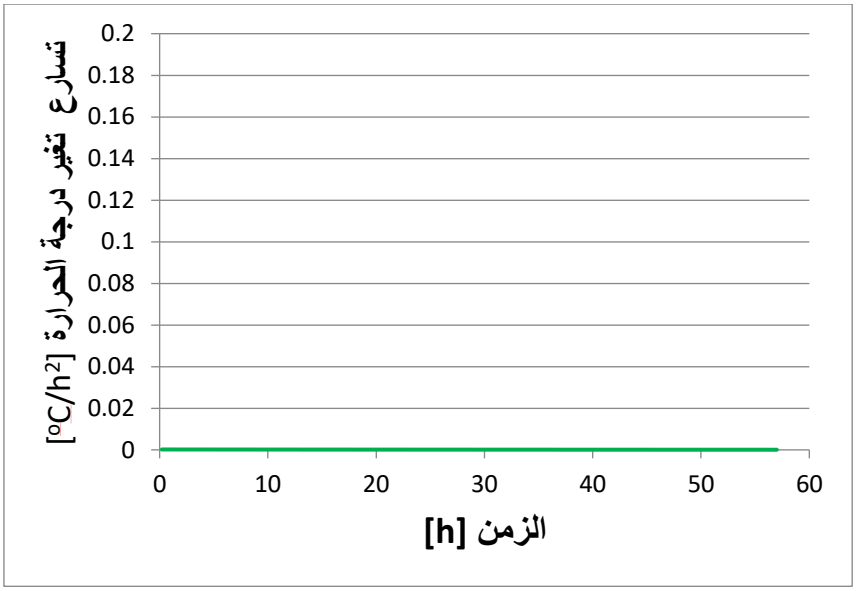
حالة 1. الحالة المستقرة: $\frac{\partial}{\partial t} = 0 \to \frac{\partial 2T}{\partial x^2} + \frac{g^{\bullet}}{k} = 0$

حالة 2. عابرة بدون توليد داخلي: $\frac{\partial 2T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha}.\frac{\partial T}{\partial t}$

حالة 3. مستقرة بدون توليد داخلي: $\frac{\partial 2T}{\partial x^2} = 0$



الشكل (3-17) سرعة تغير درجة الحرارة ضمن التربة عند بعد 60 سم عن المبادل



الشكل (18–3) تسارع تغير درجة الحرارة ضمن التربة عند بعد 60 سم عن المبادل

يبين الشكل (18–3) انعدام المشتق الثاني لتغير درجة الحرارة بالنسبة للزمن وبالتالي يعد انتقال الحرارة مستقر ضمن الكتلة التخزينية المقترحة للمبادل

الفصل الرابع

المحاكاة الحاسوبية

Numerical Simulation

4.1 تمهيد:

نظراً لصعوبة إجراء التحليلات المطلوبة للمبادلات الحرارية اعتماداً على الحلِّ التحليلي والتجريبي فقط، تمَّ إجراء عملية محاكاة حاسوبية لمبادل حراري أنبوبي حلزوني يعمل في منظومة مضخة جيوحرارية يستخدم للتكييف صيفاً وشتاءً ضمن شروط مدينة دمشق خلال فصلي الصيف والشتاء باستخدام برنامج المحاكاة العددية ANSYS (CFX) 18.2 ، وتمِّ باستخدام البرنامج دراسة التدرج الحراري للتربة بعد مضي 10 ساعات تشغيل .

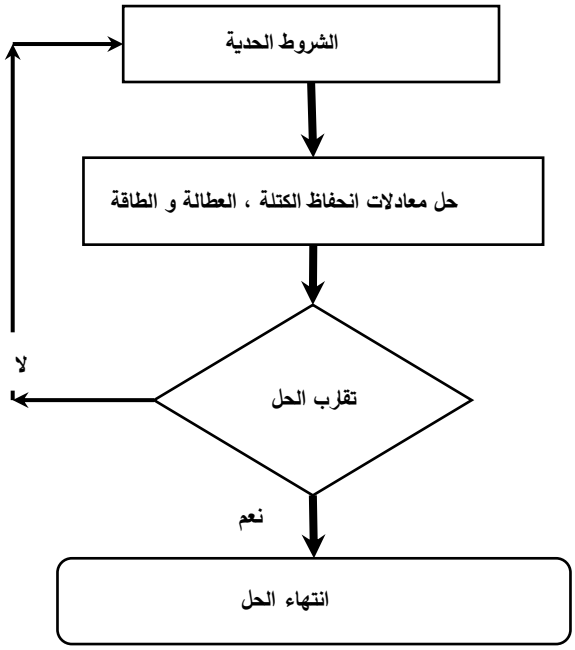
4.2 الهدف من الحل العددي:

تُمثِّلُ مرحلة المحاكاة الحاسوبية مرحلة وسيطية بين الدراسة النظرية (الحل التحليلي) من جهة والإجراء التجريبي من جهة أخرى، تكمن ميزات هذه البرامج بإمكانية دراسة تأثير كلِّ بارامتر بشكل مستقل ومستقر، ودراسة تأثير بارامترات يصعب دراستها تحليلياً أو تجريبياً، وتحديد الحالة الأنسب للدراسة قبل الشروع بالتصنيع ومن ثُمَّ توفير في الجهد والوقت والمال. تجدر الإشارة إلى أنَّ النتائج التي نحصل عليها من هذه المحاكاة هي نتائج تقريبية وذلك لأنَّ برامج المحاكاة تعتمد الطرق العددية للوصول إلى الحلِّ، بالمقابل فإنَّ هذه النتائج التقريبية يمكن أن تصل إلى حد التطابق مع النتائج الحقيقية، وهذا يعتمد على درجة تعقيد المسألة المطروحة.

4.3 مبدأ عمل برامج المحاكاة الحاسوبية (ANSYS (CFX:

أتاحت الشركة المنتجة لبرنامج ANSYS العديد من الباقات (Solver) للتعامل مع مختلف المسائل المطروحة سواءً بمجال انتقال الحرارة و الهيدروليك– الكهرباء– الأجسام الصلبة.

تعتمد هذه البرامج على تقسيم الجسم المدروس إلى عناصر يتمُّ التحكم بشكلها وأبعادها، ثم أخذ معادلات الاستمرار، والعطالة ومعادلة انحفاظ الطاقة بشكلها التفاضلي الجزئي وتحولها إلى معادلات جبرية يتمُّ حلها حاسوبياً باستخدام الطرق العددية وذلك لكل عنصر على حدةٍ انطلاقاً من شروط حدية يحددها المستخدم، يستمر تكرار العمليات الحسابية ويتوقف الحل عندما نصل إلى تقارب في الحل من رتبة 10^{-6} غالباً وحسب درجة تعقيد المسألة والدقة المطلوبة، نكون بذلك وصلنا إلى الحلِّ كما يُبيِّن الشكل (1–4) ، ثمَّ يتمُّ دمج الحل لكامل المسألة. تُستخدم هذه البرمجيات في مجال الطيران، والسيارات، والمجال الطبي، والتدفئة والتكييف، وتوليد الطاقة ...إلخ.



الشكل (1−4) مخطط صندوقي لعمل الـ Solver

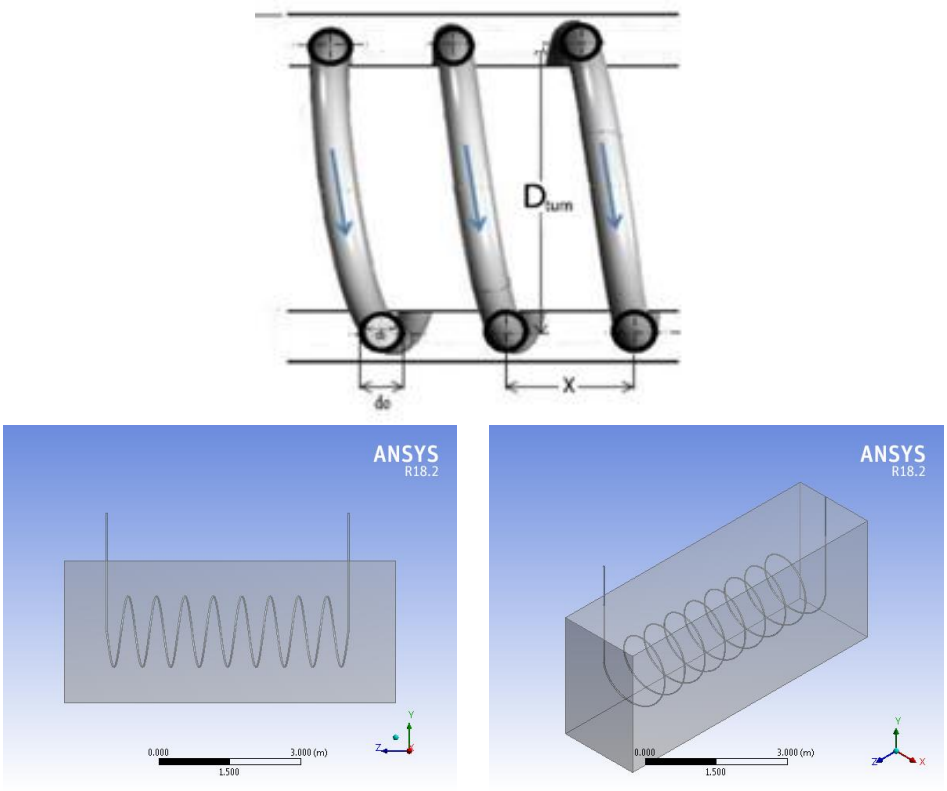
4.4 مراحل الدراسة العددية:

تمَّ في الدراسة إجراء عملية محاكاة حاسوبية لمبادل جيوحراري أنبوبي حلزوني فراغي باستخدام برنامج المحاكاة العددية **ANSYS (CFX) 18.2[71]** ، وذلك وفق الخطوات التالية:

1. **تحديد الأبعاد الهندسية:** تمَّ إنشاء نموذج للمبادل الحراري المراد دراسته وفقاً للتصميم والأبعاد المطلوبة مستخدمين برنامج **Solid Works 2018**. يتألف المبادل المدروس من أنبوب بطول L، والقطر الداخلي والخارجي للأنبوب الداخلي d_{in}, d_{out} وقطر اللفة الحلزونية D. أبعاد التربة المدروسة H×S×A يُبيِّن الجدول (1−4) أبعاد المبادل المدروس، ويبين الشكل (4 − 2) شكلاً توضيحياً له.

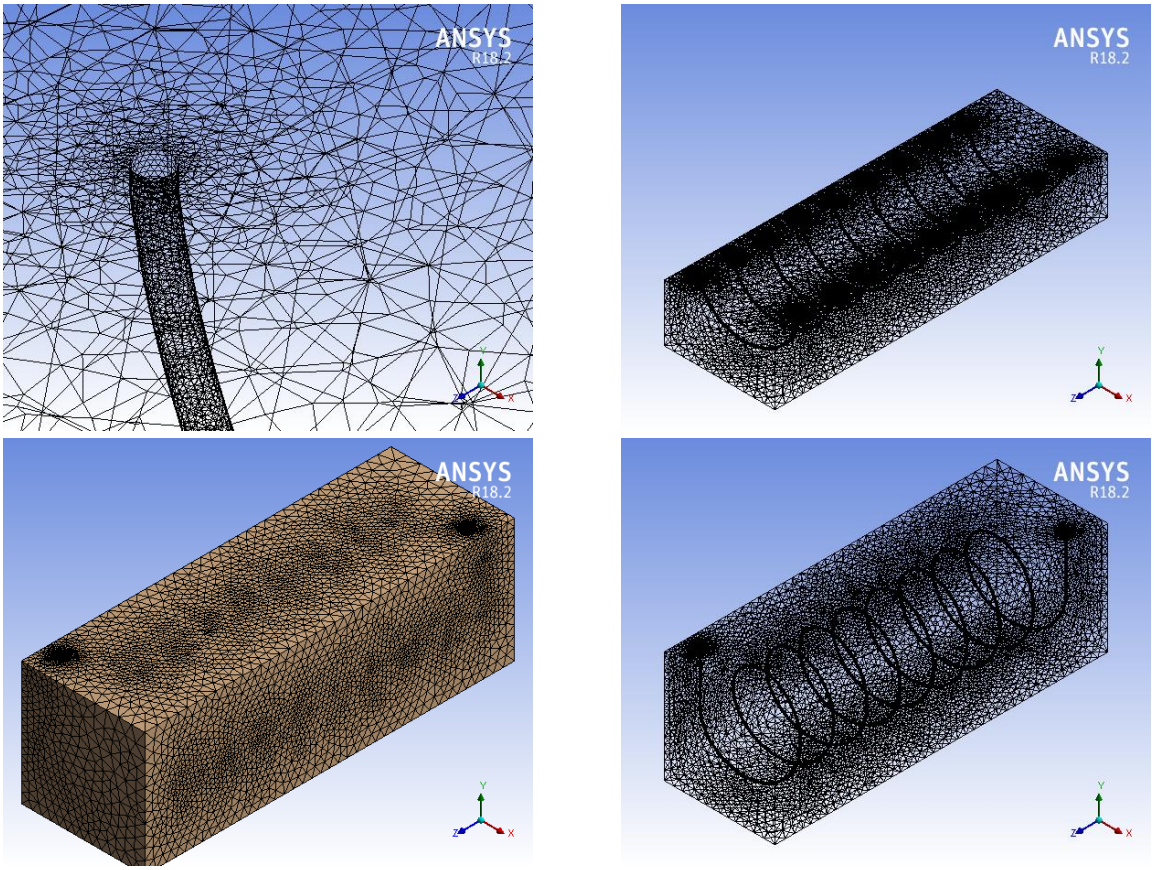
الجدول (1-4) أبعاد المبادل الجيوحراري الحلزوني المدروس

القطر الداخلي للأنبوب [mm]	32
قطر اللفة [cm]	150
التباعد بين اللفات [cm]	60
محيط اللفة [m]	4.7
طول المبادل الكلي [m]	40 + 19
مساحة سطح التبادل $[m^2]$	4.56
أبعاد التربة [m]	7 × 1.5 × 3



الشكل (2-4) المبادل الجيوحراري الحلزوني المدروس

2. **تقسيم المبادل إلى عناصر وعقد:** في هذه المرحلة يتمُّ تقسيم المبادل إلى شبكة من العناصر المنتهية المحدودة، وقد تمَّت زيادة عدد العناصر عند سطح التماس بين الماء والأنبوب، وبين التربة والأنبوب. نشير هنا إلى أنَّ دقة وصحة النتائج تتعلق بأبعاد الشبكة التي تمَّ تقسيم النموذج المدروس إليها فكلما زاد عدد العقد تزداد دقة النتائج، وبالمقابل فإنَّ زيادة عدد العقد سيُؤدِّي لزيادة الزمن المستغرق للحلِّ كما يتطلب أجهزة حاسوبية ذات مواصفات متطورة لتنفيذ العمليات الحسابية [72,73] . بلغ عدد العقد في النموذج المدروس للمبادل الحلزوني 2980791 وعدد العناصر 12834297. يُبيّن الشكل (3-4) تقسيم المبادل المدروس إلى عناصر منتهية الحدود..



الشكل (3-4) تقسيم المبادل الجيوحراري إلى عناصر منتهية الأبعاد

3. **تحديد شروط العمل:** يتمُّ في هذه المرحلة تحديد الشروط الابتدائية من درجات حرارة وضغوط وتدفق الماء وطبيعة الجريان، وتحديد الشروط الابتدائية للتربة ومواصفاتها، ومن ثمَّ تحديد سطح التبادل الحراري والسطوح المعزولة حرارياً.

كما يتمُّ في هذه المرحلة تحديد مادة الأنابيب، حيث تمَّ اختيار أنبوب من نوع PEX

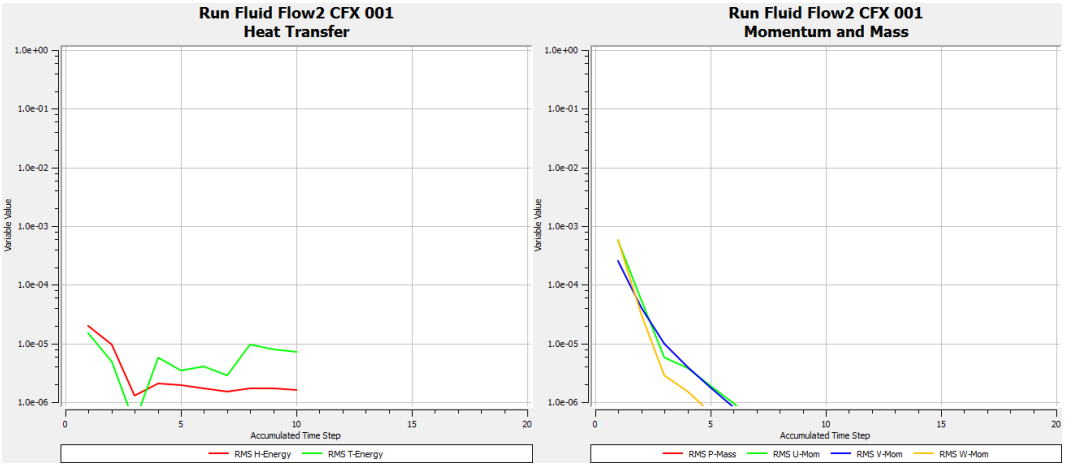
يُبيّن الجدول (2-4) الشروط الابتدائية المعتمدة.

الجدول (2-4) الكود الخاص ببرنامج المحاكاة

CFX - Pre	User Mode	General Mode
	Analysis Type	Steady State Transient Model
	Fluid Type	General Fluid
	Domain Type	Multiple Domain
	Material	Water .... Fluid Soil.....Solid PEX.....Solid
	Turbulence Model	K – Epsilon, Turbulance
	Heat Transfer	Thermal Energy
	Water Domain Boundary Conditions	Inlet Type :Inlet(Subsonic) Mass flow rate Mw Kg/s (as Expression) Total Temperature Tw K (as Expression) Outlet Type: Outlet Wall No - Slip wall
	Soil Domain Boundary Conditions	Inlet Type :Inlet(Subsonic) Temperature Tsoil K (as Expression) Wall No - Slip
	Time step	physical Time scale
	Number of Iteration Rms	200 0.00001
Soil Properties	Thermodynamic state Thermal Conductivity Specific Heat Mass Density	Solid 0.8775 $W.m^{-2}.k^{-1}$ 1090 $J.kg^{-1}K^{-1}$ 1550 $kg.m^{-3}$
PEX Properties	Thermodynamic state Thermal Conductivity Specific Heat Mass Density	Solid 4.1 $W.m^{-2}.k^{-1}$ 2299 $J.kg^{-1}K^{-1}$ 937.1 $kg.m^{-3}$
Water Properties	Thermodynamic state Thermal Conductivity Specific Heat Mass Density	Fluid 0.8775 $W.m^{-2}.k^{-1}$ 4180 $J.kg^{-1}K^{-1}$ 996 $kg.m^{-3}$

4. **مرحلة الحلِّ:** في هذه المرحلة تمَّ تحديد عدد مرات التكرار للوصول إلى الحلِّ خلال المرحلة المتغيرة مع الزمن بـ 50 عملية تكرار، الزمن الكلي 10 ساعات بخطوة زمنية 1 ساعة. (أي لكل خطوة زمنية سيتمُّ حلِّ معادلات انحفاظ الطاقة

والكتلة 50 مرة لكلِّ عقدة من العقد البالغ عددها 2980791 حتى الوصول لدرجة الدقة الموضوعة وانتهاء الحلِّ) وقد استغرقت عملية الحلِّ لكلِّ نموذج 19 ساعة.



الشكل (4-4) مرحلة الحل

5. **مرحلة النتائج:** بعد انتهاء مرحلة الحلِّ يتمُّ عرض النتائج بشكل بيانات، وصور، أو منحنيات. يتمُّ حساب كلٍّ من معاملات انتقال الحرارة من جهتي الماء والأنبوب، والحرارة المنتقلة عبر سطح التبادل، والخصائص الفيزيوحرارية، ودرجات الحرارة باستخدام مكتبة التوابع الملحقة ضمن البرنامج.

4.5 نتائج الدراسة العددية:

4.5.1 نتائج الدراسة العددية صيفاً

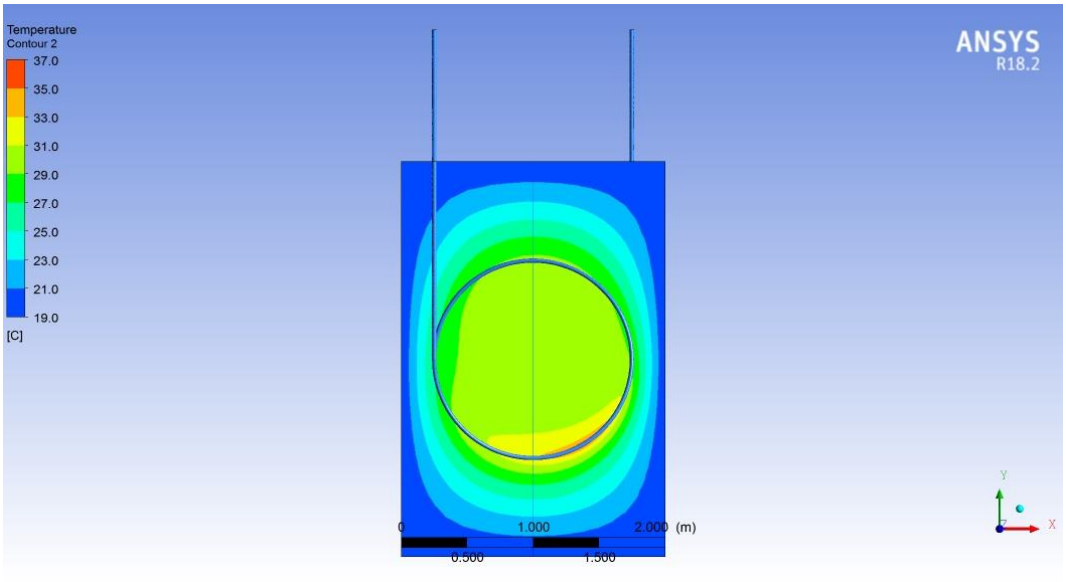
تدفق الماء

$$m_w = 0.2\ \mathrm{Kg/s}$$

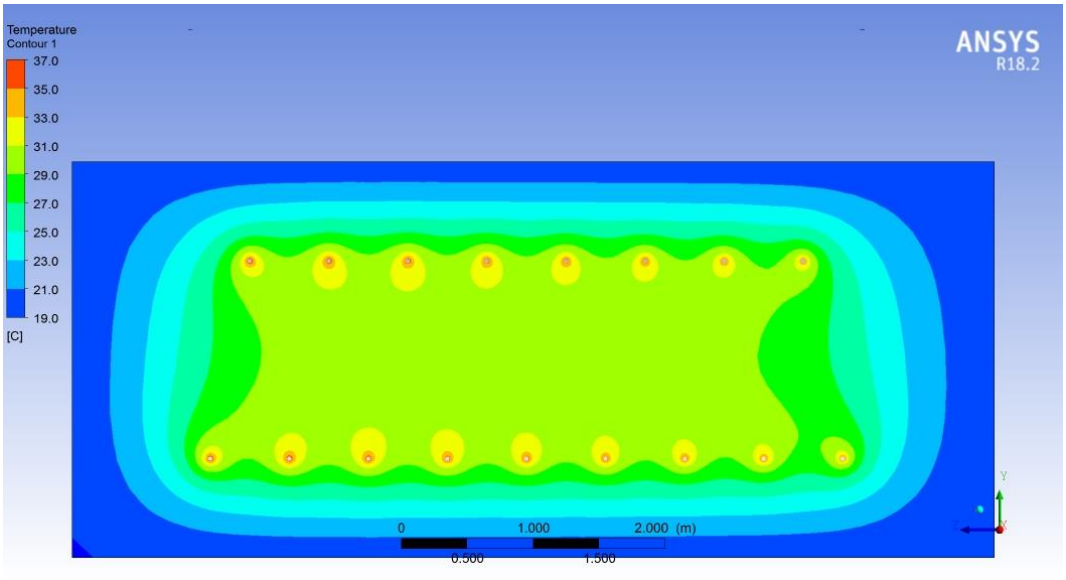
و درجة حرارة دخول الماء

$$t_{w,in} = 37\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

- التدرج الحراري في الحالة المستقرة صيفاً: يُبيّن الشكلان (4-5) و (4-6) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة بالأبعاد المفترضة للتربة والموضحة في الجدول (4-1) وذلك بعد الوصول لحالة الاستقرار، كما يُلاحظ من الأشكال إنَّ درجة حرارة التربة لا تزداد بشكل كبير عند الوصول لحالة الاستقرار كما يبين الشكلان أن الكتلة التخزينية المقترحة للمبادل كانت كافية لاستيعاب الحرارة المطروحة من المبادل إلى التربة دون تجاوز الأبعاد المقترحة لتوضع المبادل وهذا يتطابق مع نتائج الدراسة التحليلية والكتلة التخزينية المقترحة في الفصل الثالث.

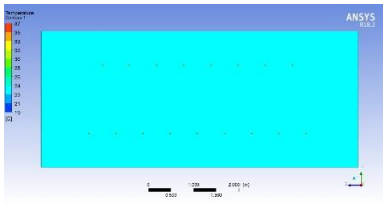
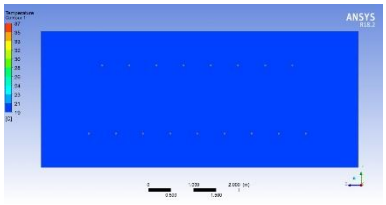
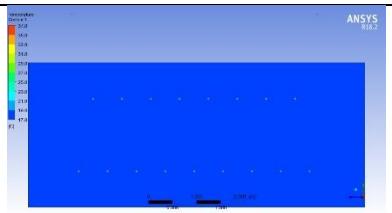
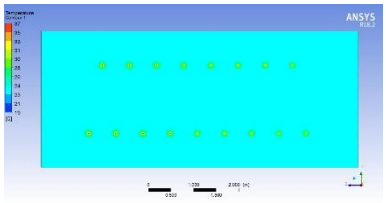
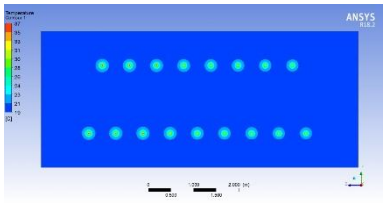
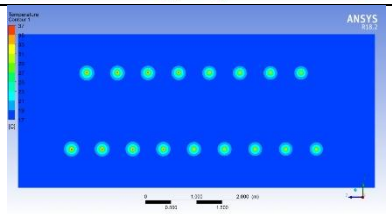
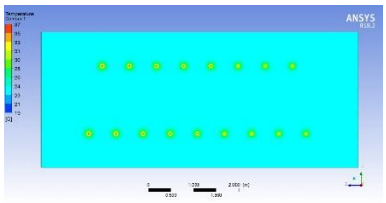
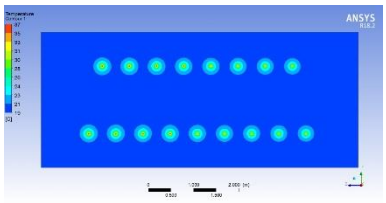
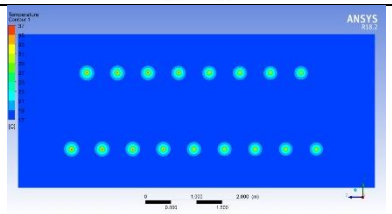
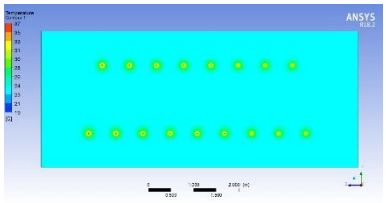
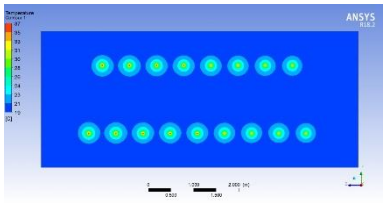
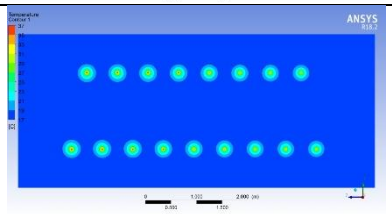
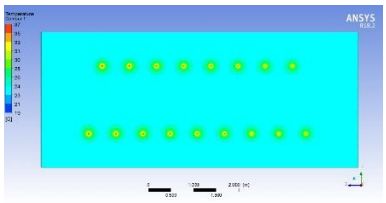
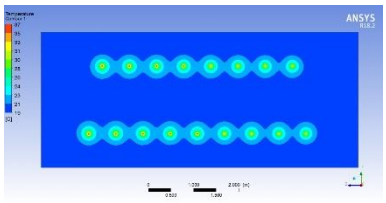
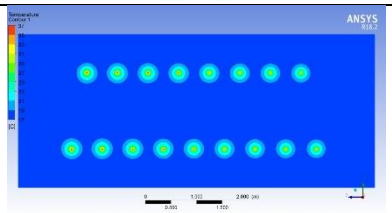
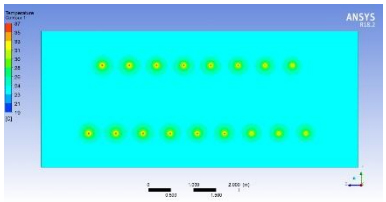
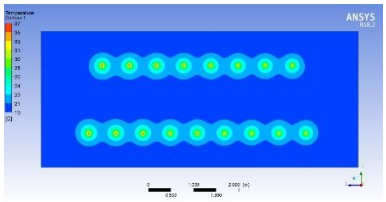
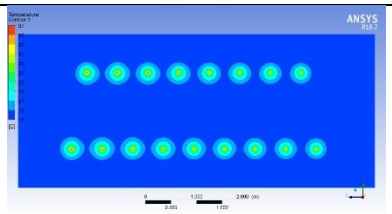
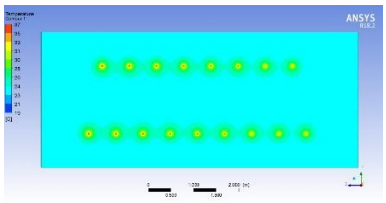
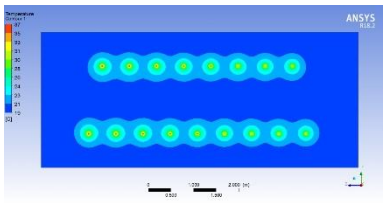
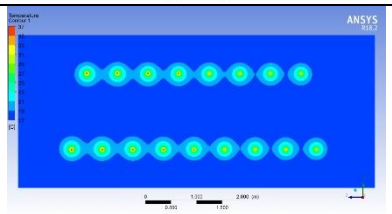
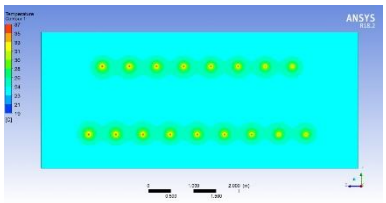
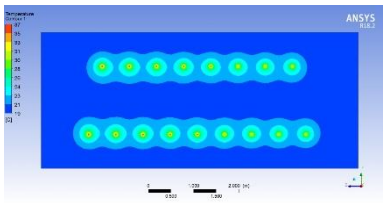
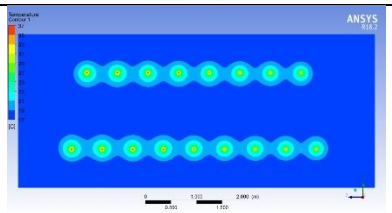


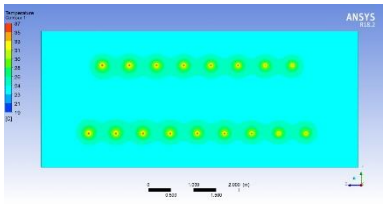
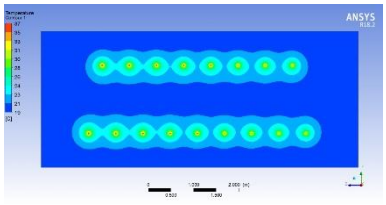
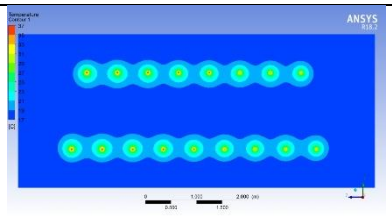
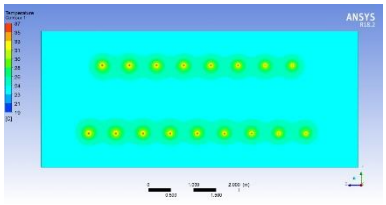
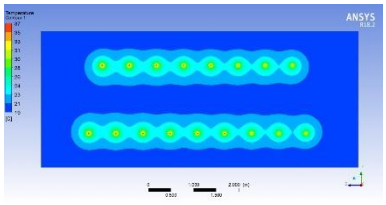
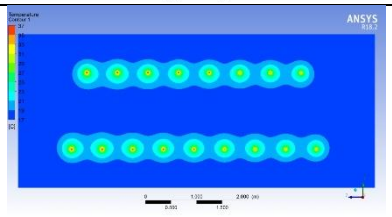
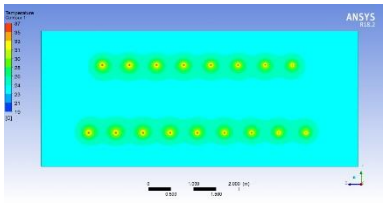
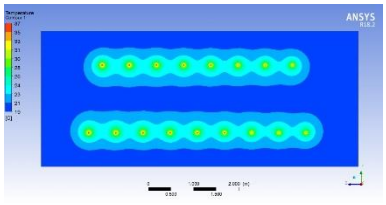
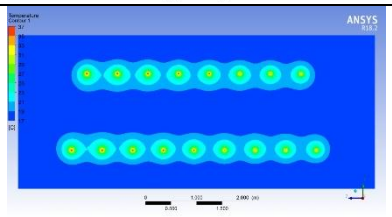
الشكل (4-5) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة صيفاً



الشكل (4-6) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة صيفاً (مقطع عرضي).

- التدرج الحراري في الحالة غير المستقرة صيفاً: يُبيّن الأشكال (4–7) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة بالأبعاد المفترضة للتربة والموضحة في الجدول (4–1) وذلك مع تغير الزمن، كما يُلاحظ من الأشكال أنَّ درجة حرارة التربة تزداد بشكل ضئيل، كما يُبيّن الأشكال مقارنة تدرج درجة حرارة التربة عند اختلاف الشروط الخارجية والتي تُؤدّي لزيادة درجة حرارة التربة واستمرار التشغيل الذي يساهم أيضاً في رفع درجة حرارة التربة.

$t_{soil} = 23$ ℃	$t_{soil} = 20$ ℃	$t_{soil} = 17$ ℃	الزمن [h]
			0
			1
			2
			3
			4
			5
			6
			7

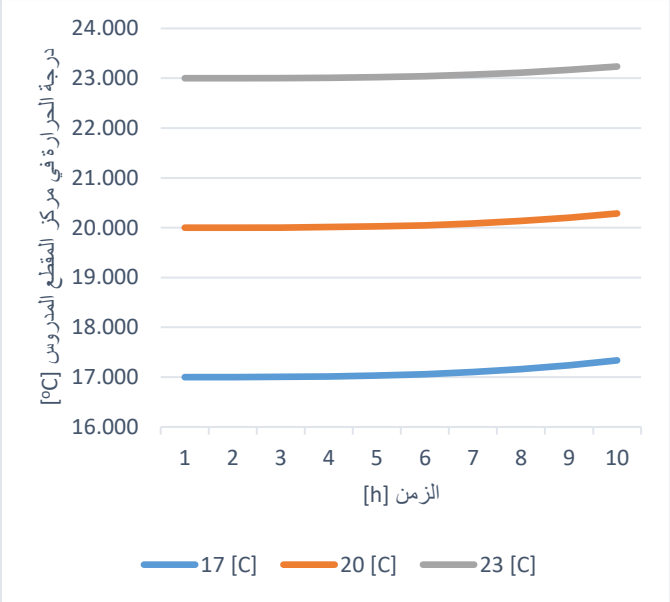
			8
			9
			10

الشكل (4-7) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة مع تغير الزمن صيفاً

- التدرج الحراري في مركز التربة: يُبيّن الشكل (8–4) تغير درجة الحرارة في نقطة من مركز المقطع المدروس بالأبعاد المفترضة للتربة والموضحة في الجدول (1–4) وذلك بتغير الزمن، كما نلاحظ من الشكل أنَّ درجة حرارة التربة تزداد بشكل ضئيل بزيادة الزمن، حيث ازدادت درجة حرارة التربة بشكل أعظمي بعد مرور 10 ساعات بـ 0.3 درجة مئوية وذلك عند درجة حرارة تربة 17 ℃.

الجدول (3–4) تغير درجة الحرارة في نقطة من مركز المقطع المدروس صيفاً

17 ℃	20 ℃	23 ℃	الزمن[h]
17.000	20.000	23.000	1
17.002	20.000	23.000	2
17.005	20.004	23.004	3
17.014	20.012	23.010	4
17.030	20.026	23.021	5
17.058	20.049	23.041	6
17.101	20.086	23.070	7
17.160	20.136	23.112	8
17.238	20.202	23.166	9
17.336	20.285	23.235	10

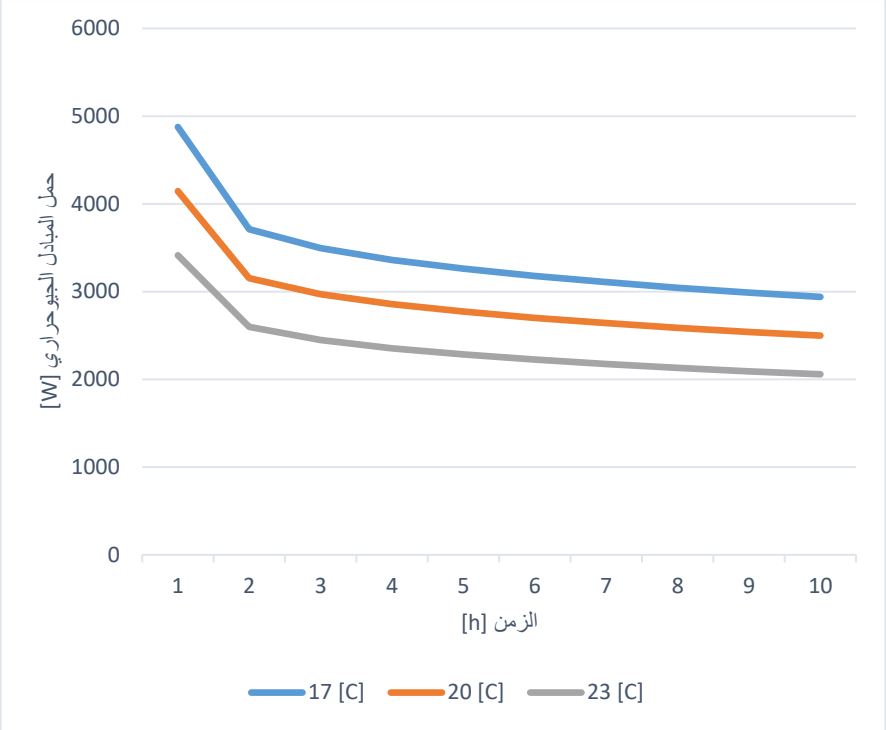


الشكل (4-8) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة صيفاً

- تغير حمل المبادل مع الزمن: يُبيّن الشكل (4–9) تغير حمل المبادل الحراري مع تغير الزمن، كما يُلاحظ من الشكل فإنه بزيادة الزمن ينخفض معدل الحرارة المنتقلة من الماء إلى التربة وذلك عند تدفق محدد للماء ودرجة حرارة دخوله، أيضاً فإنَّ الشكل ينخفض تغير حمل المبادل عند اختلاف درجة حرارة التربة وذلك من أجل الحالات $t_{soil} = 17,20,23$ °C، يلاحظ من الشكل أنَّ معدَّل الحرارة المنتقلة من الماء إلى التربة ينخفض بزيادة درجة حرارة التربة ويُفسر ذلك بانخفاض فرق درجات الحرارة بين الماء والتربة حيث كلما قلَّ هذا الفرق تنخفض فعالية التبادل الحراري.

الجدول (4-4) تغير الحمل الحراري للمبادل الجيوحراري مع تغير الزمن صيفاً

17 °C	20 °C	23 °C	الزمن[h]
4877	4145	3414	1
3711	3154	2598	2
3495	2971	2447	3
3361	2857	2353	4
3261	2772	2283	5
3178	2701	2225	6
3108	2642	2175	7
3045	2588	2132	8
2990	2541	2093	9
2940	2499	2058	10

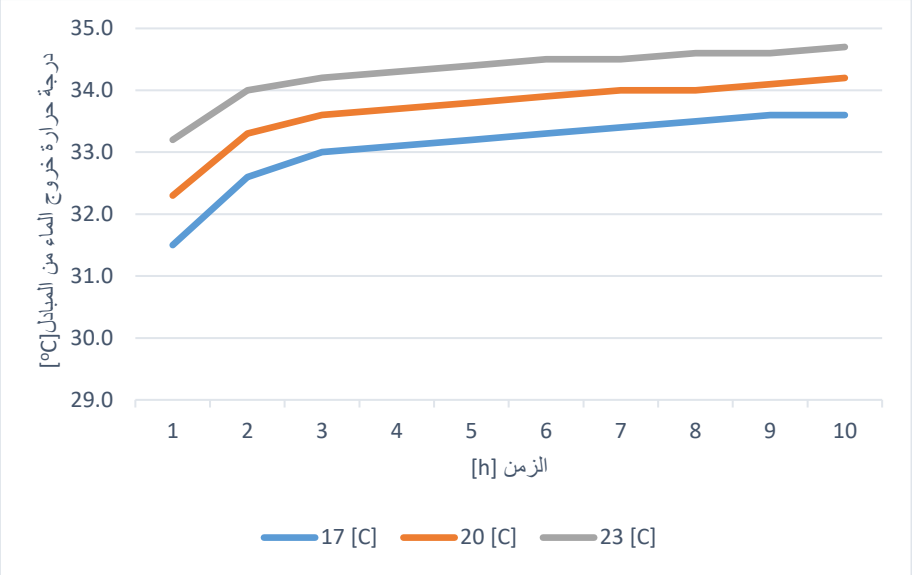


الشكل (4-9) تغير الحمل الحراري للمبادل الجيوحراري مع الزمن صيفاً

- تغير درجة حرارة خروج الماء: يُبيّن الشكل (4–10) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الحراري مع تغير الزمن، كما يُلاحظ من الشكل فإنَّ درجة حرارة خروج الماء تزداد بزيادة الزمن وذلك عند تدفق محدد للماء ودرجة حرارة دخوله، كما يُبيّن الشكل اختلاف تغير درجة حرارة خروج الماء عند اختلاف درجة حرارة التربة وذلك من أجل $t_{soil} = 17,20,23$ °C، حيث يُلاحظ أن درجة حرارة خروج الماء تزداد بزيادة درجة حرارة التربة ويُفسر ذلك بانخفاض حمل المبادل الحراري بزيادة درجة حرارة التربة.

الجدول (4–5) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الجيوحراري مع تغير الزمن صيفاً

17 °C	20 °C	23 °C	الزمن[h]
31.4	32.2	33.1	1
32.5	33.2	33.9	2
32.9	33.5	34.1	3
33.0	33.6	34.2	4
33.1	33.7	34.3	5
33.2	33.8	34.4	6
33.3	33.9	34.4	7
33.4	33.9	34.5	8
33.5	34.0	34.5	9
33.5	34.1	34.6	10



الشكل (4-10) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الجيوحراري مع الزمن صيفاً

4.5.2 نتائج الدراسة العددية شتاءً

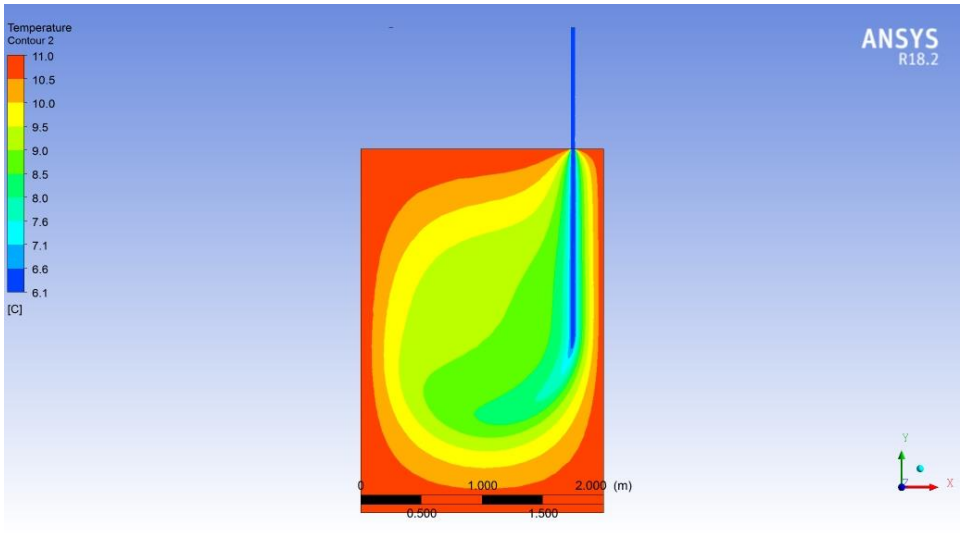
تدفق الماء

$$mw = 0.2\ Kg/s$$

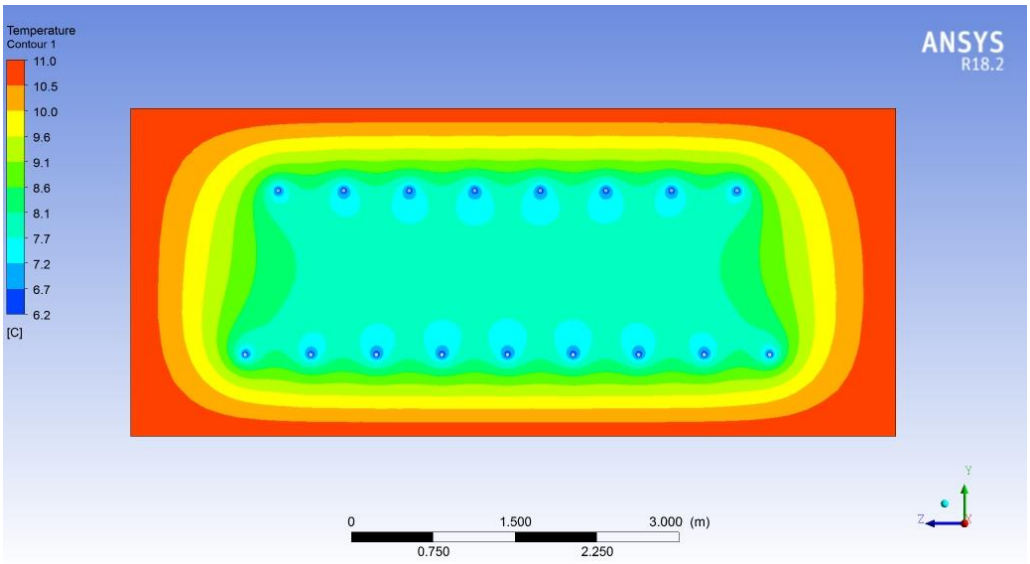
و درجة حرارة دخول الماء

$$tw, in = 6\ ℃$$

- التدرج الحراري في الحالة المستقرة شتاءً: يُبيّن الشكلان (4-11) و (4-12) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة بالأبعاد المفترضة للتربة والموضحة في الجدول (4-1) وذلك بعد الوصول لحالة الاستقرار، كما يُلاحظ من الأشكال فإنَّ درجة حرارة التربة لا تزداد بشكل كبير عند الوصول لحالة الاستقرار كما يبين الشكلان أن الكلتلة التخزينية المقترحة للمبادل كانت كافية لاستيعاب الحرارة المطروحة من المبادل إلى التربة دون تجاوز الأبعاد المقترحة لتوضع المبادل وهذا يتطابق مع نتائج الدراسة التحليلية والكتلة التخزينية المقترحة في الفصل الثالث.

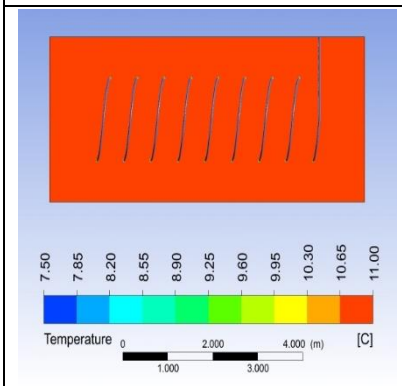
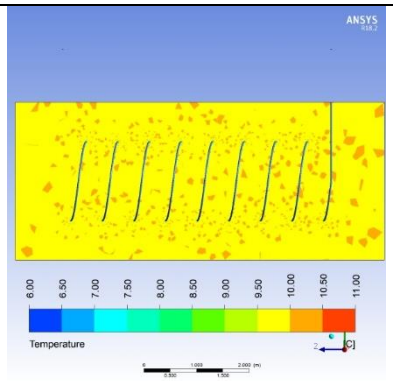
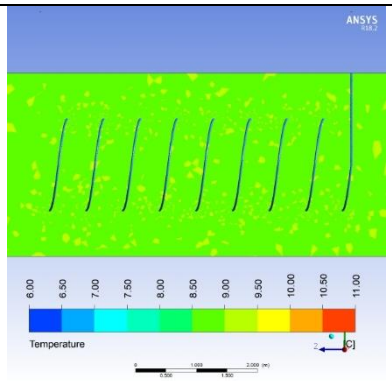
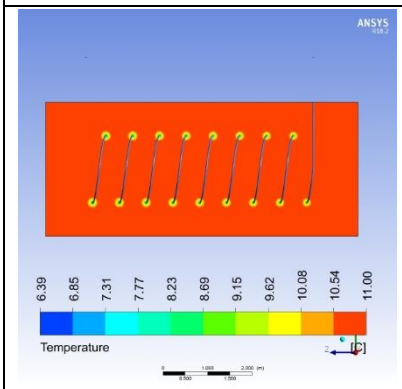
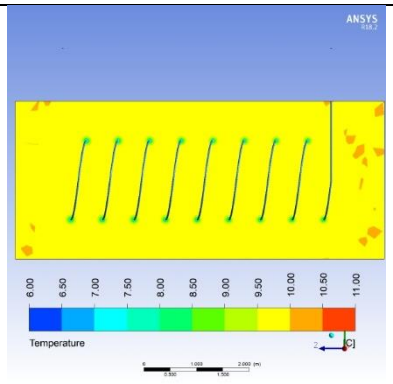
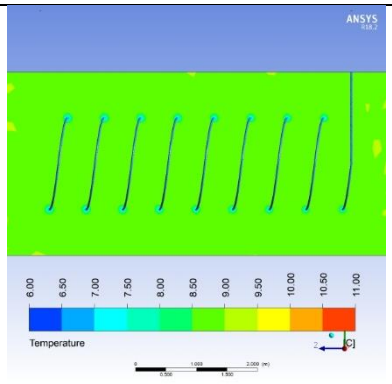
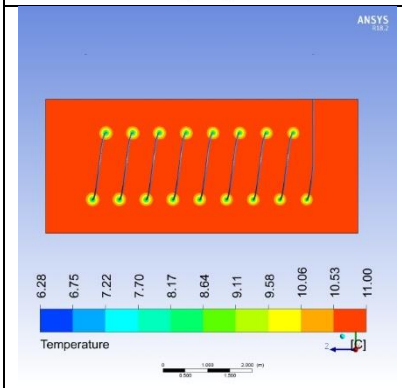
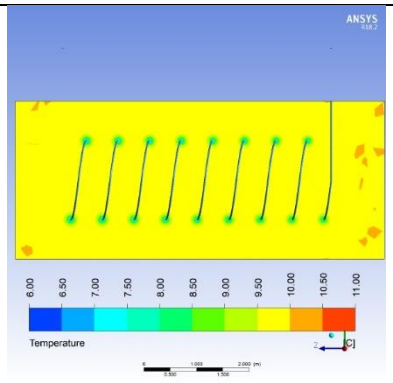
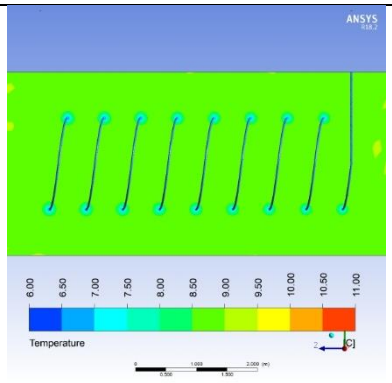
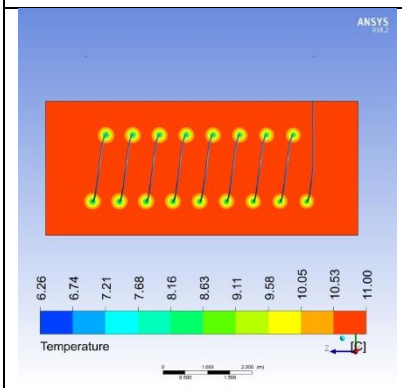
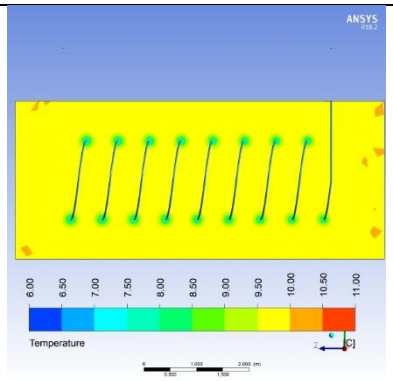
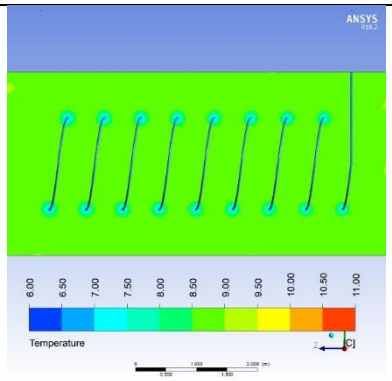


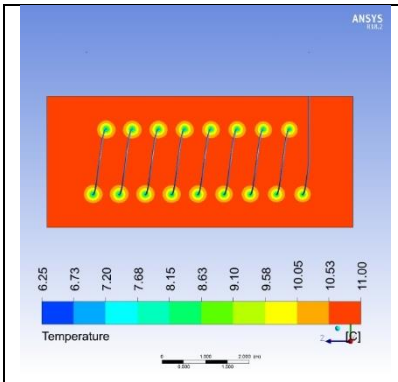
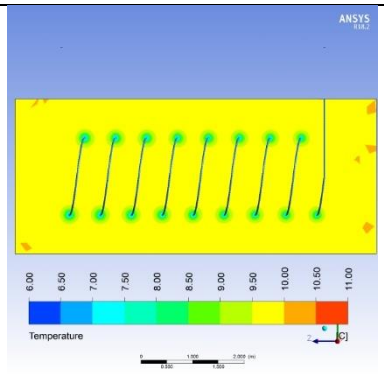
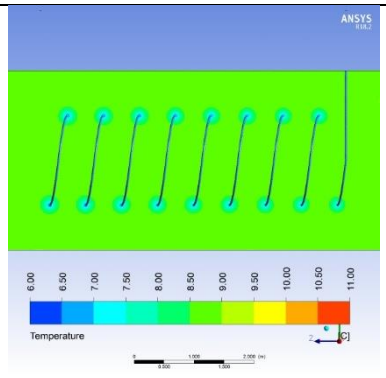
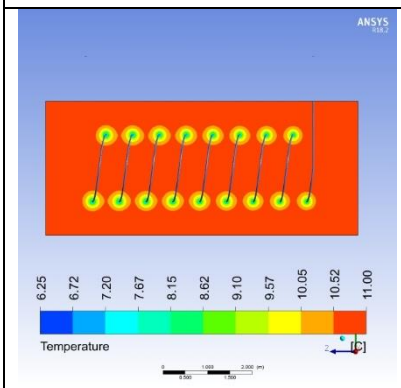
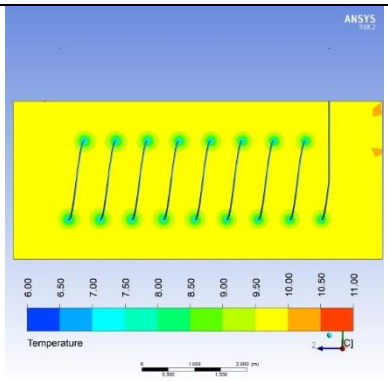
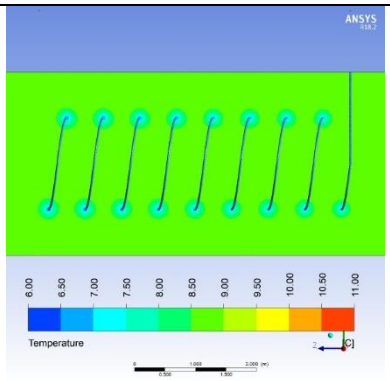
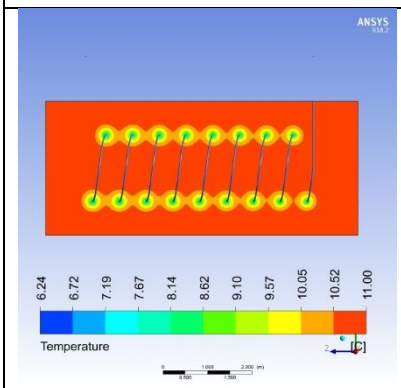
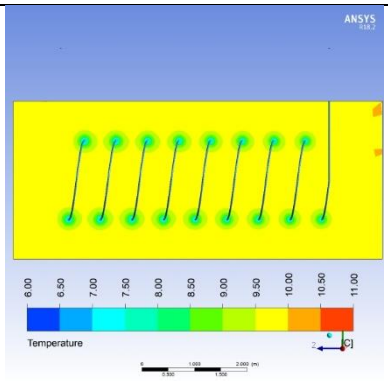
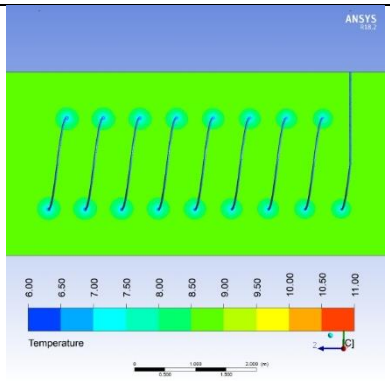
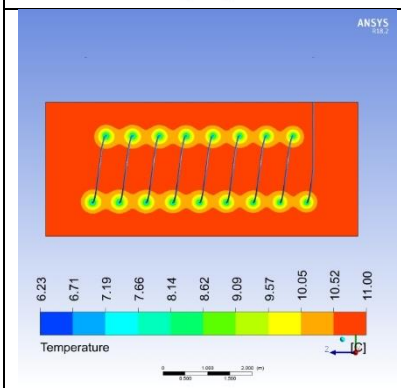
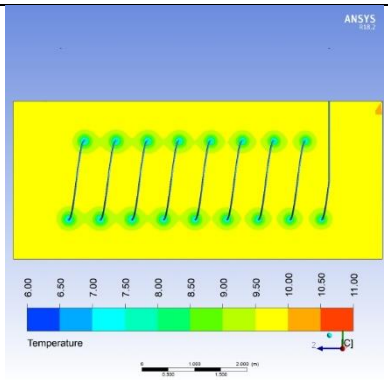
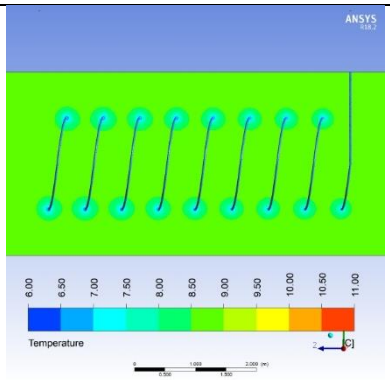
الشكل (4-11) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة شتاءً.

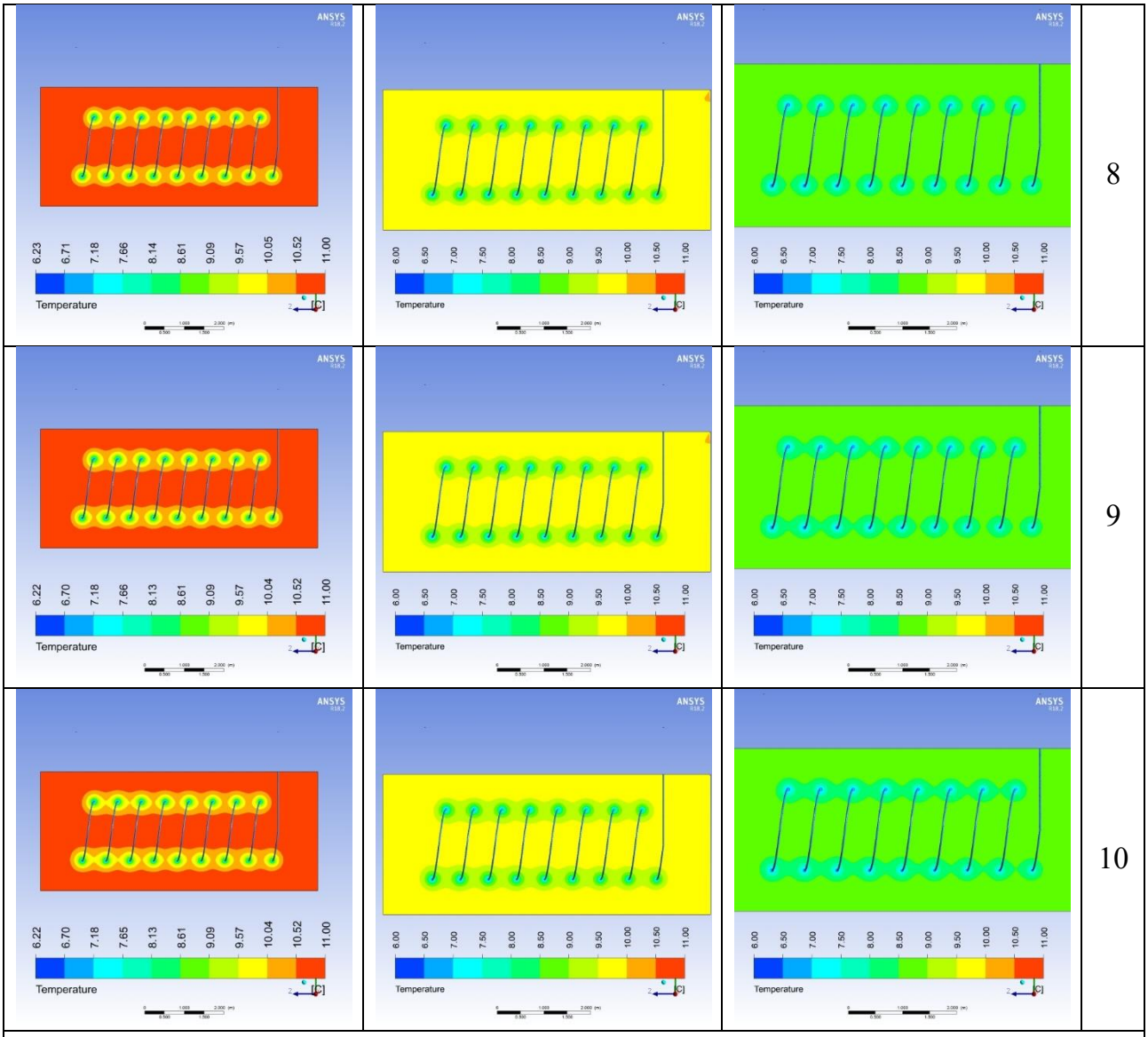


الشكل (4-12) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة شتاءً (مقطع عرضي).

- التدرج الحراري في الحالة غير المستقرة شتاءً: يُبيِّن الأشكال (4–13) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة بالأبعاد المفترضة للتربة والموضحة في الجدول (1–4) وذلك مع تغير الزمن، كما يُلاحظ من الأشكال أنَّ درجة حرارة التربة تنخفض بشكل ضئيل، كما يُبيِّن الأشكال مقارنة تدرج درجة حرارة التربة عند اختلاف الشروط الخارجية والتي تُؤدِّي لانخفاض درجة حرارة التربة واستمرار التشغيل الذي يساهم أيضاً في خفض درجة حرارة التربة.

11 ℃	10 ℃	9 ℃	الزمن[h]
			0
			1
			2
			3

ANSYS 6.25 6.73 7.20 7.68 8.15 8.63 9.10 9.58 10.05 10.53 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	4
ANSYS 6.25 6.72 7.20 7.67 8.15 8.62 9.10 9.57 10.05 10.52 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	5
ANSYS 6.24 6.72 7.19 7.67 8.14 8.62 9.10 9.57 10.05 10.52 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	6
ANSYS 6.23 6.71 7.19 7.66 8.14 8.62 9.09 9.57 10.05 10.52 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	ANSYS 6.00 6.50 7.00 7.50 8.00 8.50 9.00 9.50 10.00 10.50 11.00 Temperature [C]	7

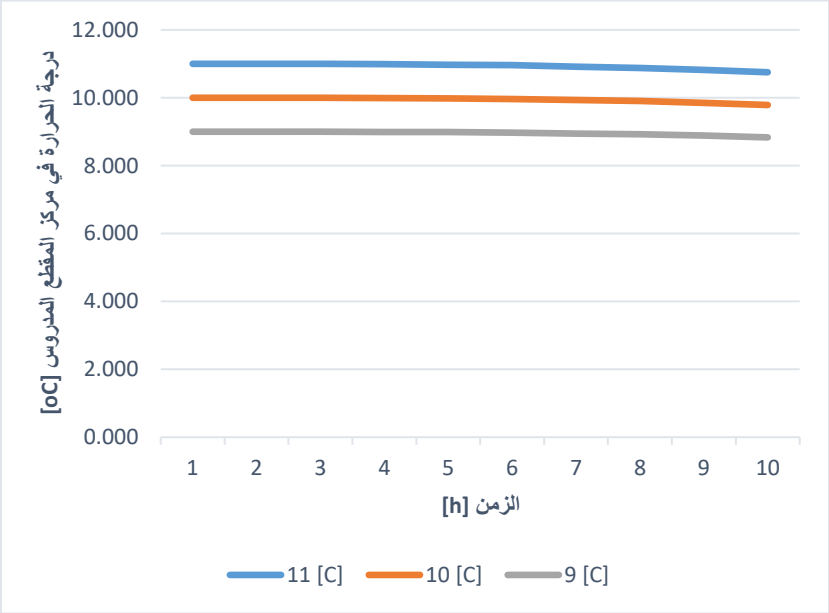


الشكل (13-4) تدرج درجة الحرارة في مقطع من التربة مع تغير الزمن شتاءً

- التدرج الحراري في مركز التربة شتاءً: يُبيِّن الشكل (14–4) تغير درجة الحرارة في نقطة من مركز المقطع المدروس بالأبعاد المفترضة للتربة والموضحة في الجدول (6–4) وذلك بتغير الزمن، كما يُلاحظ من الشكل أنَّ درجة حرارة التربة تنخفض بشكل ضئيل بزيادة الزمن، حيث انخفضت درجة حرارة التربة بشكل أعظمي بعد مرور 10 ساعات بـ 0.248 درجة مئوية وذلك عند درجة حرارة تربة 11 ℃.

الجدول (4-6) تغير درجة الحرارة في نقطة من مركز المقطع المدروس

9 °C	10 °C	11 °C	الزمن[h]
9.000	10.000	11.000	1
9.000	10.000	10.999	2
8.998	9.998	10.998	3
8.995	9.994	10.993	4
8.989	9.977	10.975	5
8.970	9.965	10.61	6
8.945	9.937	10.920	7
8.924	9.902	10.880	8
8.887	9.849	10.821	9
8.833	9.787	10.752	10

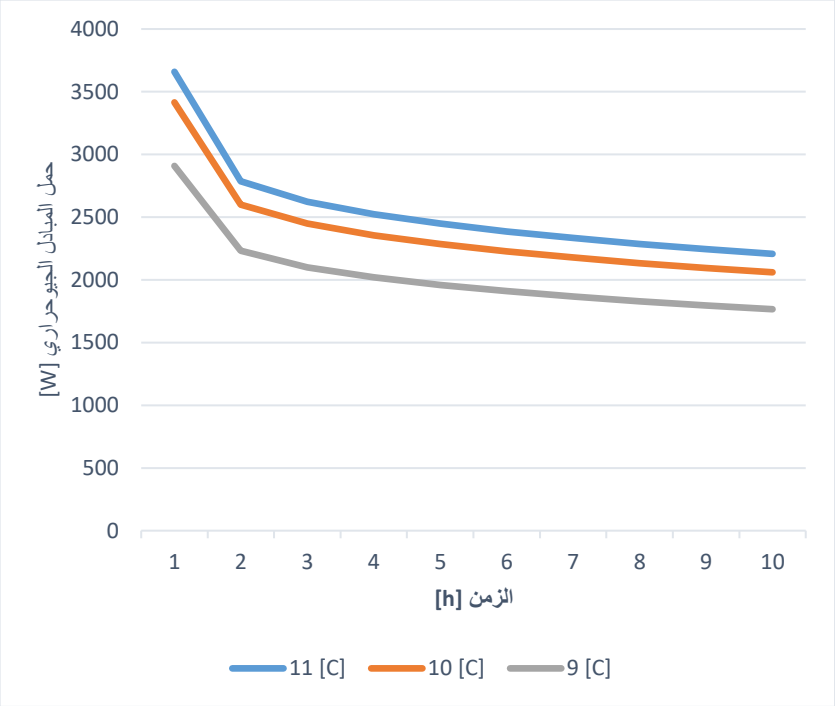


الشكل (4-14) تدرج درجة حرارة التربة بالحالة المستقرة شتاءً

- تغير حمل المبادل مع الزمن شتاءً: يُبيّن الشكل (4-15) تغير حمل المبادل الحراري مع تغير الزمن، كما يُلاحظ من الشكل فإنَّه بزيادة الزمن ينخفض معدَّل الحرارة المنتقلة من التربة إلى الماء وذلك عند تدفق محدد للماء ودرجة حرارة دخوله، أيضاً فإنَّ الشكل يُبيّن تغير حمل المبادل عند اختلاف درجة حرارة التربة وذلك من أجل الحالات t_{soil} = 9,10,11 °C، يُلاحظ من الشكل أنَّ معدَّل الحرارة المنتقلة من التربة إلى الماء يَنقُص بنقصان درجة حرارة التربة ويفسر ذلك بانخفاض فرق درجات الحرارة بين الماء والتربة حيث كلما قلَّ هذا الفرق تنخفض فعالية التبادل الحراري.

الجدول (4–7) الحمل الحراري للمبادل الجيوحراري مع تغير الزمن شتاءً

11 ℃	10 ℃	9 ℃	الزمن[h]
3659	3415	2908	1
2786	2600	2232	2
2623	2448	2100	3
2524	2355	2019	4
2448	2285	1959	5
2386	2227	1909	6
2333	2177	1866	7
2286	2134	1829	8
2245	2095	1796	9
2207	2060	1766	10

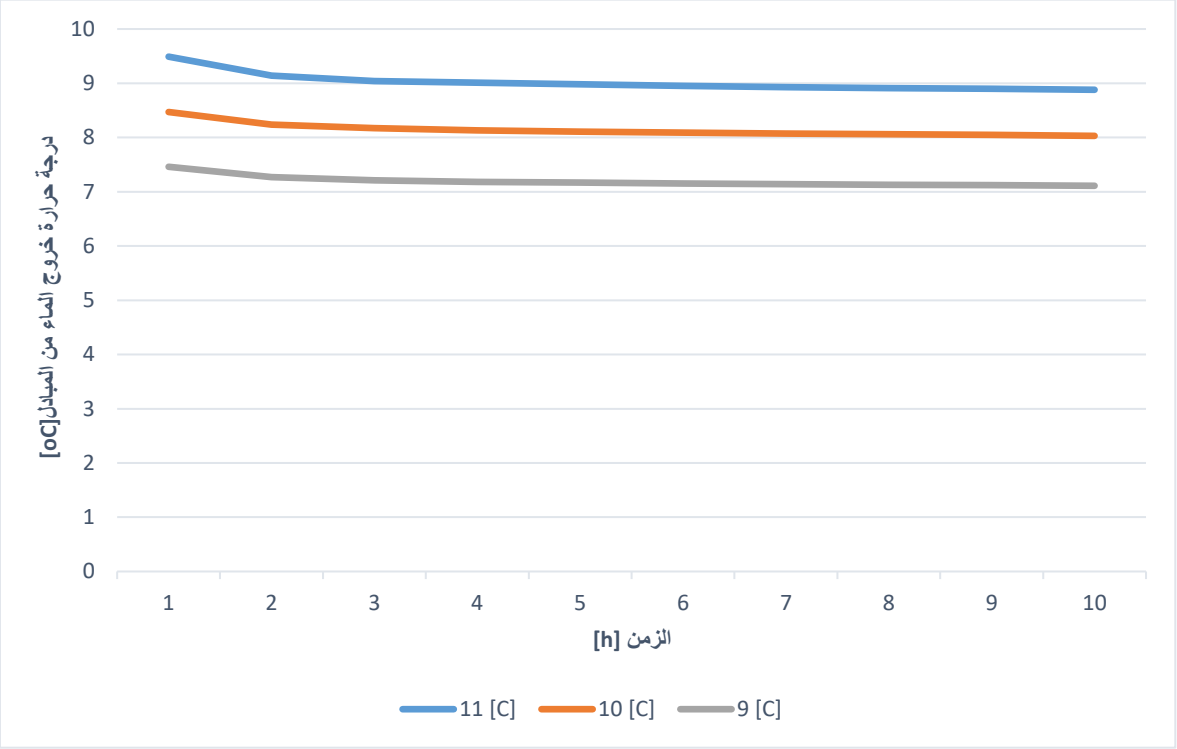


الشكل (4-15) تغير الحمل الحراري للمبادل الجيوحراري مع الزمن شتاءً

- تغير درجة حرارة خروج الماء شتاءً: يُبيّن الشكل (4–16) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الحراري مع تغير الزمن، كما يُلاحظ من الشكل فإن درجة حرارة خروج الماء تنخفض بزيادة الزمن وذلك عند تدفق محدد للماء ودرجة حرارة دخوله، كما يُبيّن الشكل اختلاف تغير درجة حرارة خروج الماء عند اختلاف درجة حرارة التربة وذلك من أجل $t_{soil} = 9,10,11$ ℃، حيث يُلاحظ أنَّ درجة حرارة خروج الماء تنخفض بانخفاض درجة حرارة التربة ويُفسر ذلك بانخفاض حمل المبادل الحراري مع انخفاض درجة حرارة التربة.

الجدول (4-8) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الجيوحراري مع تغير الزمن شتاءً

الزمن[h]	9 ℃	10 ℃	11 ℃
1	7.46	8.47	9.49
2	7.27	8.24	9.14
3	7.21	8.17	9.04
4	7.18	8.13	9.01
5	7.17	8.11	8.98
6	7.15	8.09	8.95
7	7.14	8.07	8.93
8	7.13	8.06	8.91
9	7.12	8.05	8.9
10	7.11	8.03	8.88



الشكل (4-16) تغير درجة حرارة خروج الماء من المبادل الجيوحراري مع الزمن شتاءً

الفصل الخامس

الدراسة التجريبية

Experimental Study

5.1 تمهيد

تمَّ تنفيذ المبادل الجيوحراري الحلزوني المصمم مسبقاً بالاعتماد على نتائج الدراسة التحليلية والدراسة العددية وربطه مع دارة مضخة جيوحرارية تستعمل لتكييف غرفة على مدار العام. وذلك بهدف اختبار هذا المبادل وفعاليته ومقارنته مع المبادلات الأخرى تمدد مباشر أو هواء– ماء وسيتضمن الفصل شرحاً تفصيلياً لوحدة الاختبار وأجهزة القياس المستعملة والتجارب التي تمَّ إجراؤها.

5.2 وصف وحدة الاختبار

يُبيّن الشكل (5–1) المبادل الجيوحراري المستخدم في وحدة الاختبار التجريبية وتتألف هذه الوحدة من مضخة حرارية من النوع المنفصل باستطاعة فعلية 0.75 طن تبريدي ومبادل صفائحي وأنبوب من البيكس قطر 32 مم ومضخة ماء بإضافة إلى مجموعة من الحساسات وأجهزة القياس المختلفة.

1– مضخة جيحرارية من النوع المنفصل

وهو عبارة عن مضخة حرارية من النوع المنفصل باستطاعة فعلية 0.75 طن تعمل على الفريون R22 حيث تمَّ عزل مكثف القطعة الخازجية والمروحة واستبدالهما بالمبادل الجيوحراري الحلزوني المطمور في التربة ومضخة الماء والمبادل الصفائحي

2– مبادل حراري صفائحي

وهو عبارة عن مبادل حراري ماء – فيريون يستعمل من أجل التبادل الحراري ما بين وسيط التبريد الفريون R22 الموجود ضمن مبخر المضخة الجيوحرارية والضاغط بطبيعة الحال وما بين الماء المتجه إلى التربة مارأ بأنابيب البكس المُشكلة للمبادل الجيوحراري

3– مضخة ماء

مضخة ماء طاردة مركزية باستطاعة 0.5 HP تدفقها الأعظمي 40 L/min وضاغطها 40 m، تستخدم لتدوير الماء المضاف له مانع التجمد ضمن المبادل الجيوحراري والمبادل الصفائحي.

4– المبادل الجيوحراري

تُصنع عادة المبادلات الجيوحرارية ذات التمدد غير المباشر من أنابيب HDPE بولي إيريثان عالي الكثافة ولكن تمَّ استخدام أنابيب من البكس بقطر 32 mm وهو القطر الذي تم الحصول عليه في الفصل الثالث وذلك بسبب صعوبة تأمين أنابيب HDPE ذات جودة مرتفعة وقابلية لإنشاء لفات متناظرة وبالقطر

المطلوب إذ إن الأنواع المتوافرة في السوق المحلية ذات جودة متوسطة. وتمَّ عزل الأنابيب الظاهرة فوق التربة بعازل من الأرموفلكس للتقليل من الحرارة الضائعة.





الشكل (1-5) المبادل الجيوحراري

5- خزَّان تمدد مغلق

خزَّان تمدد مغلق بسعة 25 L لاستيعاب التمدد في حجم الماء في حال حدوثه

الجدول (1-5) الأبعاد التصميمية لمبادل جيوحراري عامل في مضخة جيوحرارية باستطاعة 0.75 طن

المدخلات	
كمية الحرارة التي يطرحها المبادل للتربة [W]	3000
القطر الداخلي للأنبوب [mm]	32
قطر اللفة [Cm]	150
التباعد بين اللفات [Cm]	60
المخرجات	
معامل الاحتكاك f	0.0345
انخفاض الضغط [pa]	838.7
الاستطاعة الهيدروليكية للضخ [W]	120.7
معامل انتقال الحرارة الكلي [$W/m^2.C$]	28.7
محيط اللفة [m]	4.7
عدد اللفات المطلوبة	8.6
طول المبادل الكلي [m]	41+19
حجم اللفة [m^3]	1.06
حجم المبادل [m^3]	9.1

5.3 توصيف أجهزة القياس ودرارة الحساسات

1- مقياس تدفق مياه

وهو مقياس تدفق بمجال قياس 0-25 l/min

2- مقياس درجة حرارة سطحي (تيرمو كابل PT 100)

وهو عبارة عن حساس درجة حرارة لقياس درجة حرارة وسيط التبريد والماء على مدخلي ومخرجي المبادل الصفائحي ودرجة حرارة الماء ضمن المبادل الجيوحراري بعدد 5 حساسات على طول المبادل وترتبط جميع هذه الحساسات مع شاشة لتحصيل القراءات وتخزينها.

3- **مقياس درجة حرارة سطحي**

وهو عبارة عن حساس درجة حرارة مزود بشاشة لقياس درجة حرارة السحب والدفع على مدخل ومخرج الضاغط وقياس درجة حرارة هواء التغذية والهواء الراجع من القطعة الداخلية للمكيف كما أنَّ المقياس مزود بحساس لقياس رطوبة الهواء.

4- المجموعة متعددة المقاييس

وتُستَخدَم هذه المجموعة في دارات التبريد للتأكد من ضغوط التشغيل وشحن المضخة الجيوحرارية بوسيط التبريد، وتمَّ استخدامها لقياس ضغطي السحب والدفع خلال التشغيل.

5- مقاييس كهربائية

وهي عبارة عن آفومتر لقياس التوتر الكهربائي وبانس أمبير لقياس التيار المستجر من المكيف خلال التشغيل.

6- مقاس تدفق هواء

Anemometre (fan) وهو عبارة عن مروحة صغيرة مربوطة بمقاومة متغيرة يتمُّ تحديد سرعة الهواء وتدفقه من خلال تغير هذه المقاومة بتغير سرعة دوران المروحة أثناء توضعها ضمن مجرى الهواء وتُستَخدَم لقياس تدفق الهواء الخارج من الوحدة الداخلية للمكيف.

الجدول (2-5) مواصفات أجهزة القياس المستخدمة

	جهاز القياس	الواحدة	مجال القياس	الدقة
1	مقياس تدفق الماء	l/min	0~25	±1%
2	جهاز قياس سرعة وتدفق الهواء Fluke 925	m/s m^3/s	0.4~25 0.01~99.99	±2%
3	حساس درجة الحرارة PT100	°C	−200~850	± 0.3 °C
4	بانس أمبير	A	0~50	±0.5%
5	آفومتر	V	0~600	±1%
6	المجموعة متعددة المقاييس	PSI bar	0~500 0~35	±0.1%
7	مقياس ضغط ماء	bar	0~6	±1%

ويبين الشكل (2-5) مجموعة المقاييس المستعملة


مقياس ضغط الماء




مقياس تدفق الماء


مقياس درجة حرارة


بانسة أمبير


مقياس درجة حرارة ورطوبة


مقياس ضغط وسيط التبريد


شاشة تحصيل بيانات


مقياس سرعة الهواء

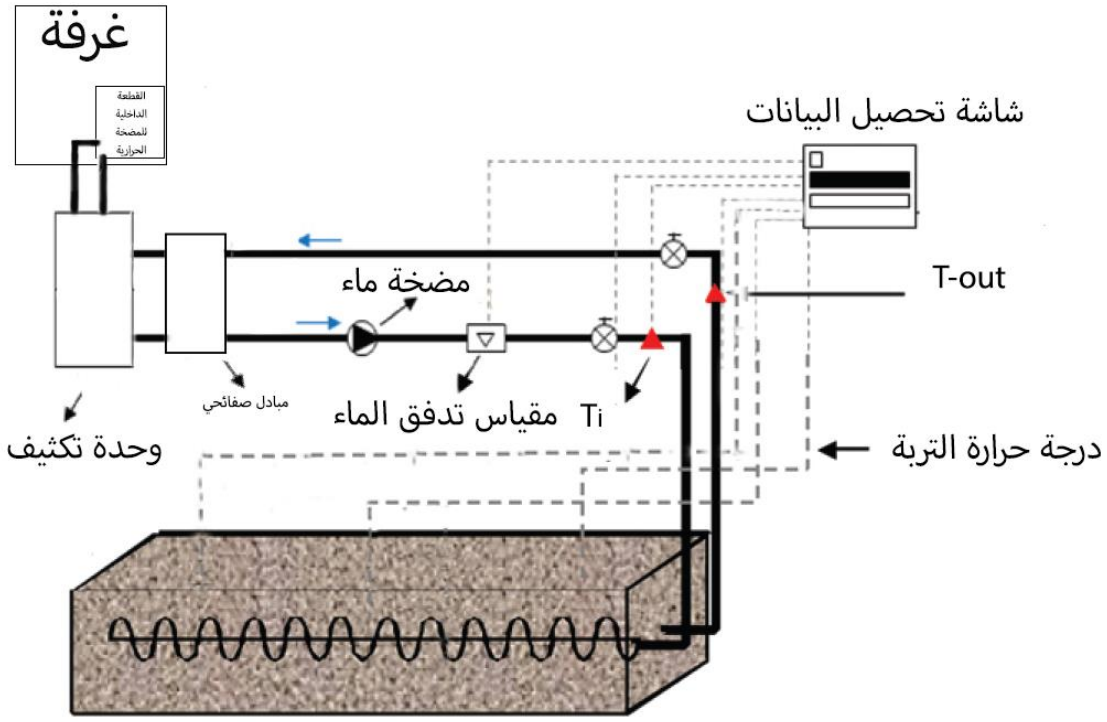
الشكل (2-5) مجموعة المقاييس المستعملة

5-4 مبدأ العمل

يُبيّن الشكل (3-5) الدارة المستخدمة حيث يتمُّ تكييف الغرفة صيفاً شتاءً باستخدام دارة المضخة الجيوحرارية ويتمُّ الحصول على كمية الحرارة في فصل الشتاء من التربة عبر امتصاص كمية الحرارة اللازمة عن طريق المياه المارة ضمن المبادل الجيوحراري وثمَّ تتبادل المياه الحرارة مع الفريون ضمن المبادل الصفائحي ليتمَّ تبخر الفريون ومن ثمَّ ضغطه ضمن الضاغط وانتقاله إلى المكثف الهوائي وضخ الحرارة إلى هواء الغرفة وباستخدام الصمام الرباعي يتمم عكس الدورة الحرارية صيفاً ويتمُّ تفريغ كمية الحرارة إلى الأرض باستخدام المياه المارة في المبادل الجيوحراري والمبادل الصفائحي حيث يُؤدّيان دور المكثف في الدارة



الشكل (3-5) دارة المضخة الجيوحرارية



الشكل (4-5) مخطط رمزي للمنصة التجريبية

5.4.1 طريقة إجراء التجارب

في البداية يجب إعطاء النظام مدة حتى تستقر البيانات كما يجب تشغيل التجربة باستمرار لمدة 8-12 ساعة يومياً وتحصيل النتائج على مدار شهر على الأقل في كلِّ فصل [76]

يتمَّ تحصيل درجات الحرارة باستخدام الشاشة الموصولة على الحساس وهي:

درجات الحرارة على مدخل ومخرج المبادل الصفائحي من جهة الماء ومن جهة الفريون ودرجات الحرارة على طول المبادل الجيوحراري.

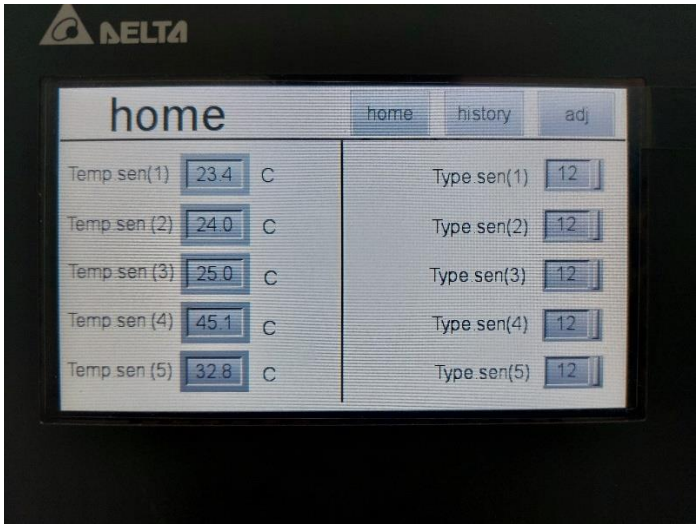
5.5 نتائج الدراسة التجريبية

5.5.1 تحليل نتائج الدراسة التجريبية صيفاً لدارة المضخة الحرارية

يُبيِّن الشكل (5-5) قراءة الحساسات أثناء التشغيل الصيفي

حيث يبين الشكل اليميني العلوي درجة حرارة التربة في منطقتين مختلفتين بالبعد عن المبادل على بعد 10 سم وعلى بعد 30 سم ويبين الشكل اليميني السفلي درجة حرارة هواء الغرفة وهواء التغذية ويبين الشكل اليساري درجات الحرارة التالي بالترتيب

درجة حرارة الماء عند مدخل المبادل الجيوحراري ومنتصفه ومخرجه ودرجة حرارة الفريون عند مدخل ومخرج المبادل الصفائحي







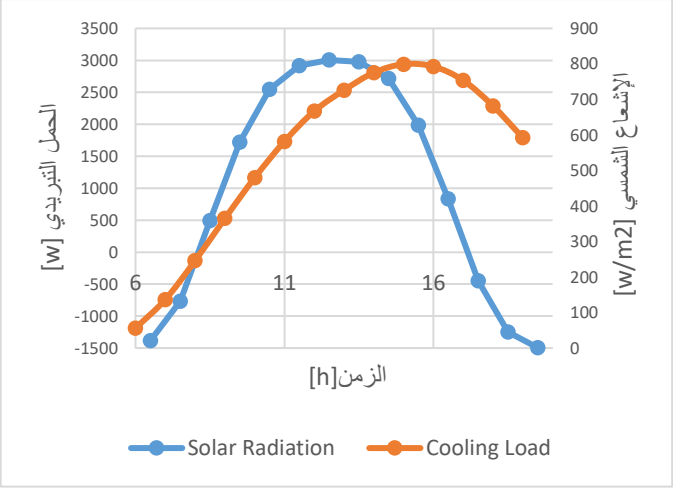
الشكل (5-5) قراءة حساسات درجات الحرارة للمبادل الحلزوني والصفائحي والتربة والهواء

يُبيّن الجدول (5-3) الحمل الحراري للغرفة شتاءً والتبريدي صيفاً

الجدول (5-3) بيانات التصميم للغرفة شتاءً وصيفاً

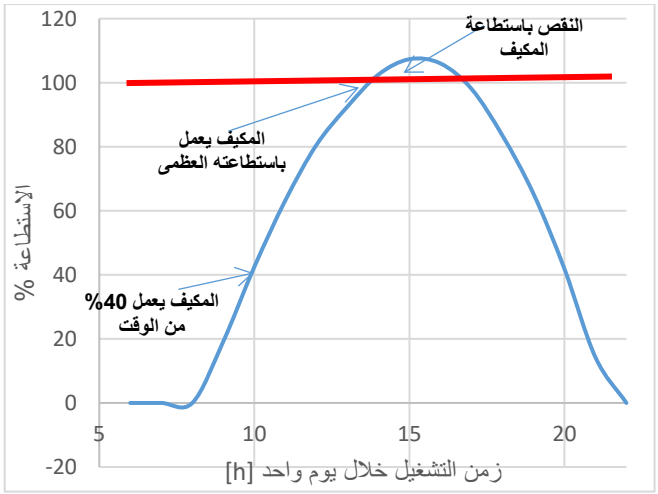
بيانات التصميم صيفاً	
الحمل الحراري للغرفة [W]	**3000**
درجة حرارة الغرفة [^{O}C]	**24**
درجة الحرارة الوسطية للتربة [^{O}C]	**19**
بيانات التصميم شتاء	
الحمل الحراري للغرفة [W]	**1590**
درجة حرارة الغرفة [^{O}C]	**22**
درجة الحرارة الوسطية للتربة [^{O}C]	**10**

يُبيّن الشكل (5-6) الحمل التبريدي للغرفة التي تم تركيب وحدة الاختبار بداخلها وعلاقته مع الإشعاع الشمسي الموجه على الجدار الخارجي للغرفة باتجاه الشرق [75,79].



الشكل (5–6) الحمل التبريد للغرفة مع الإشعاع الشمسي

يُبيّن الشكل (5–7) الاستطاعة المطلوبة للمضخة الجيوحرارية لتكييف الغرفة خلال يوم واحد من التشغيل من الصباح إلى المساء، وفقًا لحمل التبريد المحسوب للغرفة والذي يختلف باختلاف الإشعاع الشمسي. من الواضح أنَّ الاستطاعة المقدَّمة من المضخة الجيوحرارية غير كافية للغرفة المكيفة في وقت الذروة من الساعة الثانية إلى الرابعة تقريباً ويعود ذلك إلى أنَّ المبادل الصفائحي المستخدم غير كافٍ لتحقيق التبادل الحراري اللازم ولكن يتم قبول هذه النتيجة كونها تغطي الاستطاعة المطلوبة بنسبة أعلى من 95%

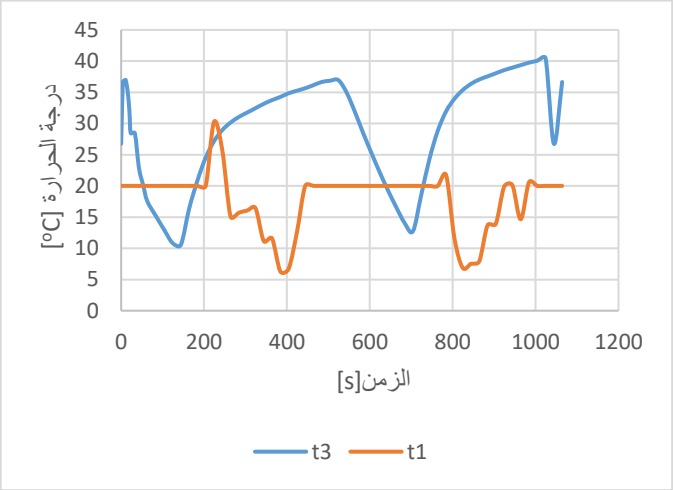


الشكل (5–7) استطاعة المضخة الجيوحرارية مقارنة بحمل الغرفة

يُبيّن الشكل (5–8) درجة حرارة وسيط التبريد R22 عند مدخل الضاغط (t_1) فمن الواضح أن هناك زيادة تسخين عند مخرج المبخر تتراوح من (1–26)°C ومن ثُمَّ ، يدخل وسيط التبريد إلى الضاغط في حالة بخار محمص وبدون قطرات من سائل وسيط التبريد، مما يحمي الضاغط من التلف، تُصمم الشركات المصنعة لمكيفات الهواء بأن تكون درجة حرارة التبخر حوالي (5–7)°C ومن ثُمَّ تكون زيادة التسخين

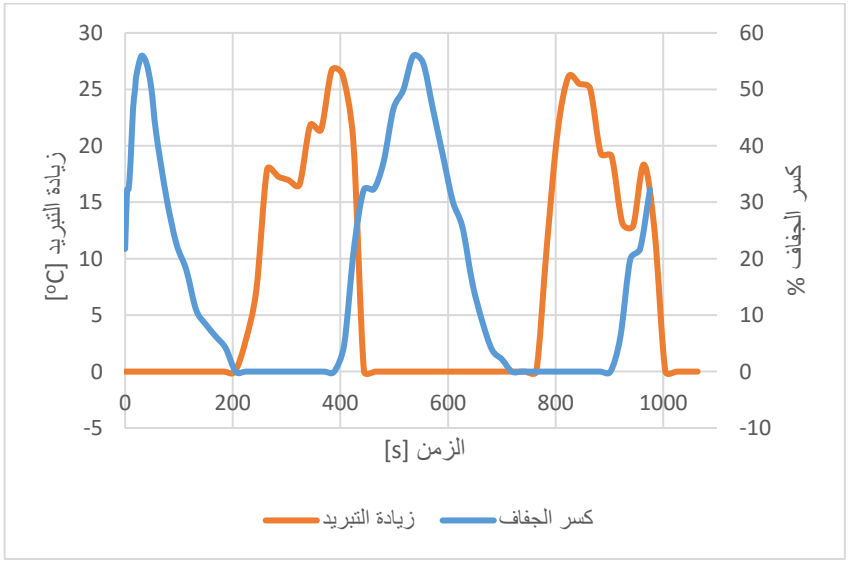
$$\Delta t_h = t_1 - t_o$$

يُبيّن أيضاً درجة حرارة وسيط التبريد R22 عند مخرج المكثف (t_3) من الواضح أن درجة حرارة تكاثف وسيط التبريد 40°C، بمقارنة t3 مع .مقدار زيادة التبريد المُبيَّن في الشكل (5-7) حيث إنَّ زيادة التبريد $\Delta t_c = t_c - t_3$.



الشكل (5-8) درجات الحرارة عند مدخل الضاغط ومخرج المكثف

يُبيّن الشكل (5-9) زيادة التبريد في المكثف أثناء تشغيل المضخة الجيوحرارية ونلاحظ انخفاض قيمته إلى $\Delta t_c = -1^oC$ في عدة نقاط تشغيل. ويدلُّ هذا إلى أنَّ وسيط التبريد لا يتكاثف كلياً أثناء مروره عبر المبادل الصفائحي ويعود ذلك إلى الكفاءة المنخفضة لهذا المبادل. وتجدر الإشارة أيضاً إلى أنَّ قيمة زيادة التبريد تصل إلى 25^oC ، وهو أمر إيجابي يُؤدّي إلى ارتفاع معامل أداء الدارة. يُبيّن الشكل أيضًا مقدار كسر الجفاف عند مدخل المبخر، وتتراوح قيمته بين 0-56٪، ويرتبط بقيمة زيادة التبريد، فكلما انخفض كسر الجفاف، زادت الإنتاجية التبريدية التي نحصل عليها .عندما يكون كسر الجفاف مساويًا للصفر، فهذا يعني أنَّ كل كمية وسيط التبريد التي تدخل المبخر تكون في حالتها السائلة وهي أفضل حالة ممكنة.

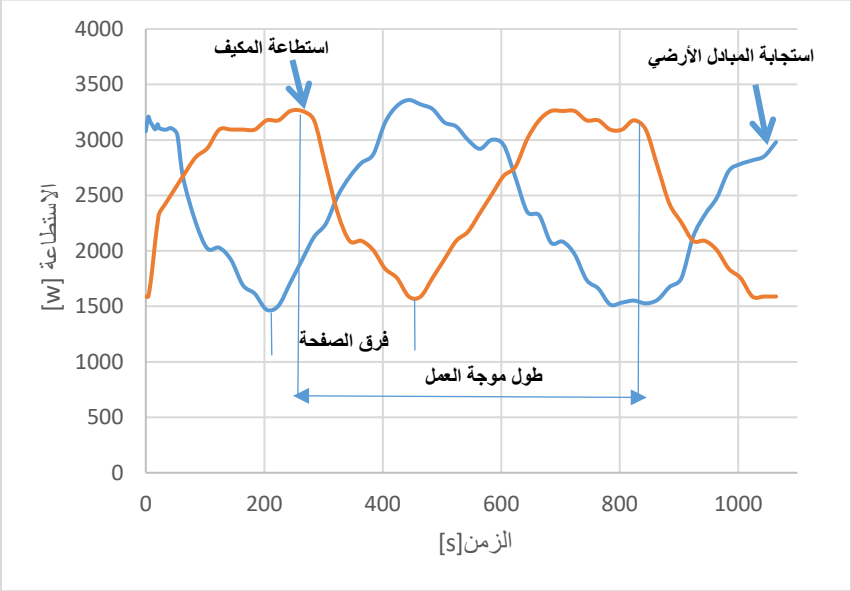


الشكل (5-9) زيادة التبريد في المكثف وكسر الجفاف عند مدخل المبخر

يُبيِّن الشكلان (5–8)، (5–9) العلاقة بين الاستطاعة التبريدية للمضخة الجيوحرارية واستطاعة (استجابة) المبادل الجيوحراري أثناء التشغيل. من الملاحظ أنَّ الحدَّ الأدنى والحد الأقصى لقيمة الاستطاعة متساويان، ولكن مع تأخر زمني (فرق في الصفحة) قدره 214 ثانية. يُوضِّح الشكل أيضاً أنَّ طول موجة العمل يبلغ 592 ثانية.



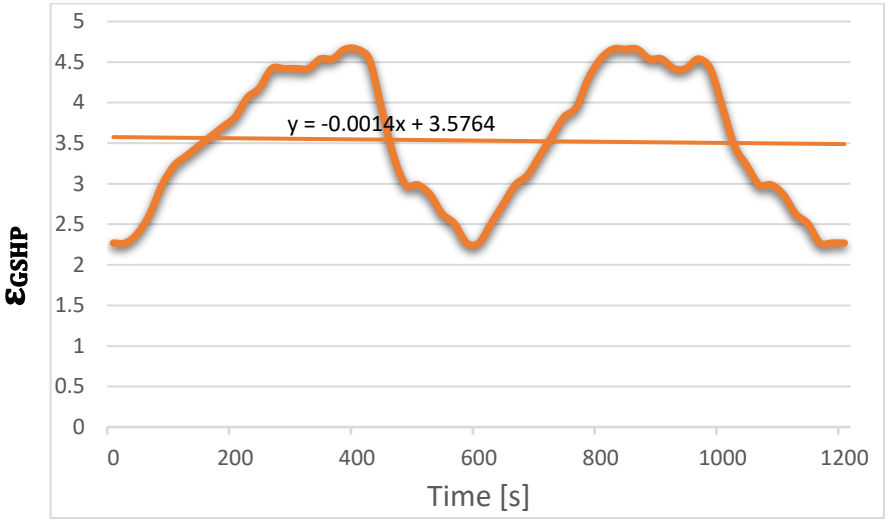
الشكل (5–10) استطاعة المضخة الجيوحرارية واستطاعة المبادل صيفاً



الشكل (5–11) استجابة المبادل الجيوحراري الحلزوني

يُبيِّن الشكل (5–12) معامل أداء المضخة الجيوحرارية أثناء التشغيل. من الملاحظ أنَّ متوسط قيمته هو 3.5، وهو أكثر من متوسط قيمة معامل الأداء لمضخة حرارية ذات المكثف الهوائي، والذي يبلغ حوالي 2.6

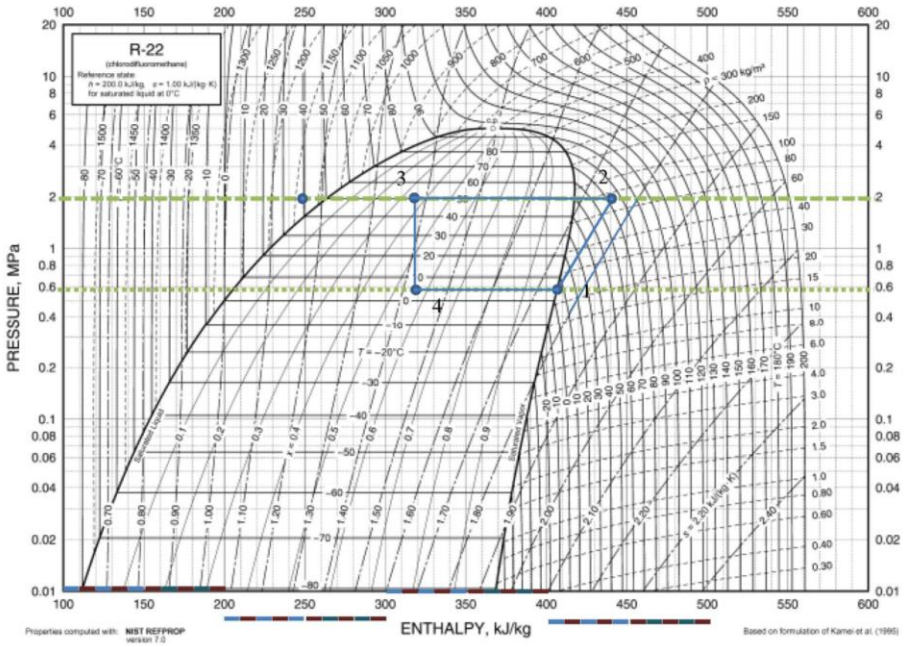
[81] بسبب انخفاض درجة حرارة التكاثف في المبادل الجيوحراري مقارنة بالمكثف المبرد بالهواء. تتحقق القيمة القصوى لمعامل الأداء عندما تكون زيادة التبريد عند أكبر قيمة لها



الشكل (5–12) معامل الأداء صيفاً للمضخة الجيوحرارية كتابع للزمن

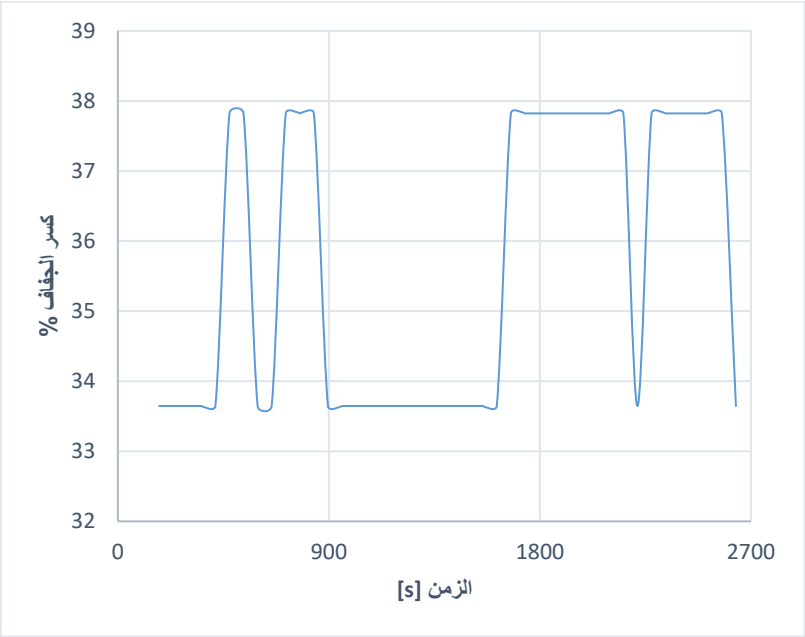
5.5.2 تحليل نتائج الدراسة التجريبية شتاءً لدارة المضخة الحرارية

يُبيّن الشكل (5–13) تمثيل نقاط دورة المضخة الجيوحرارية على مخطط الفريون R22 للتجربة والقراءات التي تم تحصيلها ومن الملاحظ أنَّ وسيط التبريد لا يتكاثف بشكل كامل ونقاط الدورة الحرارية لا تصل لمنطقة السائل المشبع ولا يتحقق أي زيادة تبريد وذلك لأنَّ الدارة الاختبارية صممت وحسبت لفصل الصيف ومن المعلوم أنَّ الحمل الحراري في سورية أقل من الحمل التبريدي وبذلك كانت كمية الحرارة المقدمة للمكان كافية لتدفئته شتاءً.



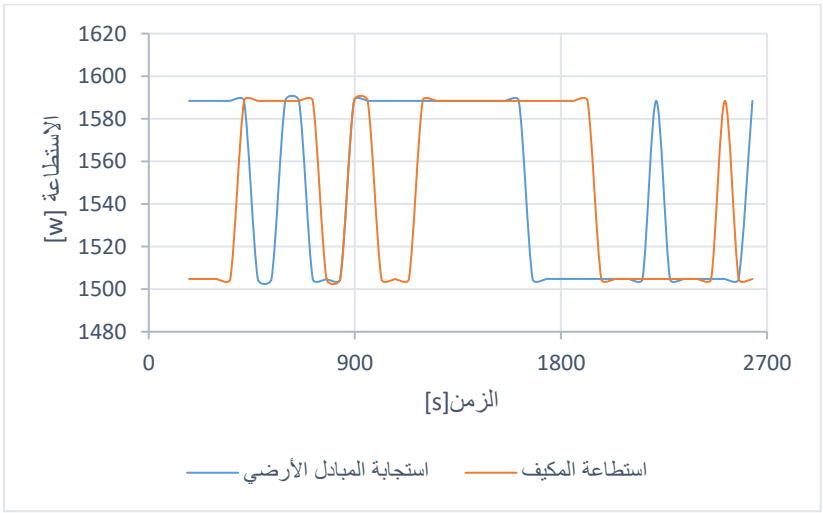
الشكل (5–13) تمثيل نقاط دورة المضخة الجيوحرارية شتاءً على مخطط الفريون R22 [80]

يُبيّن الشكل (5–14) مقدار كسر الجفاف عند مدخل المبخر، وتتراوح قيمته بين 38–33٪، وهي قيم مستقرة لكنها منخفضة نسبياً حيث لا تصل الدورة الحرارية لحدود السائل المشبع ولا يوجد أيُّ زيادة تبريد كما هو مُوضَّح بالشكل (5–14) وذلك بسبب تحقيق الاستطاعة المطلوبة لتغطية الحمل الحراري للمكان.



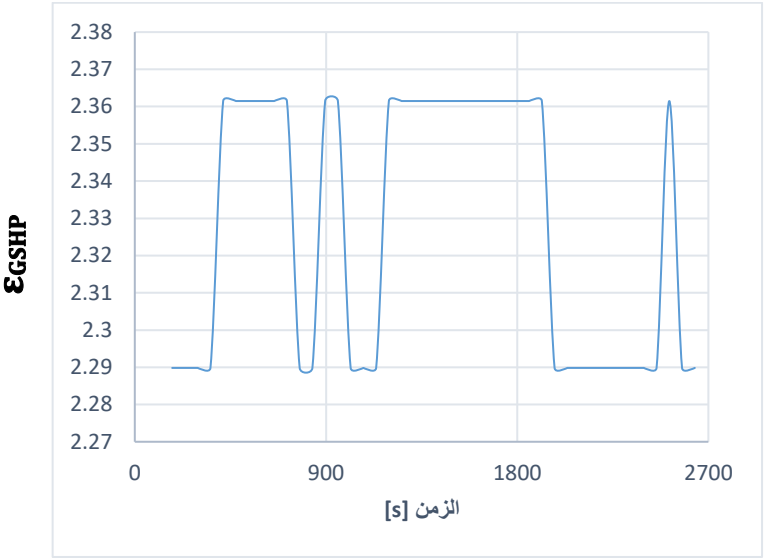
الشكل (5–14) كسر الجفاف عند مدخل المبخر شتاءً

يُبيّن الشكل (5–15) العلاقة بين استطاعة المضخة الجيوحرارية واستطاعة (استجابة) المبادل الجيوحراري أثناء التشغيل. من الملاحظ أنَّ الحد الأدنى والحد الأقصى لقيمة الاستطاعة متساويان، ولكن مع تأخر زمني (فرق في الصفحة) ومن الملاحظ وجود استقرار أكبر في الأداء خلال فصل الشتاء مقارنة بفصل الصيف والسبب أنَّ استطاعة المكيف أكبر من كمية الحرارة اللازمة لتغطية الحمل الحراري شتاءً.



الشكل (5–15) استطاعة المضخة الجيوحرارية واستطاعة المبادل صيفاً

يُبيِّن الشكل (16-5) معامل أداء المضخة الجيوحرارية أثناء التشغيل. من الملاحظ أنَّ متوسط قيمته هو 2.33 وهو أقل من متوسط قيمة معامل الأداء للمضخة الحرارية ذات المكثف الهوائي، والذي يبلغ حوالي2.8 بسبب انخفاض قيمة الحمل الحراري شتاء وثبات عمل الضاغط في المكيف كونه من النوع ثابت الاستطاعة Constant Compressor وفي حال اكتمال الدورة الحرارية (أي تركيب مضخة جيوحرارية لتغطية مساحة أكبر) يتضاعف معامل الأداء ليصل إلى قيمة 4.7 تقريباً ومن الممكن استخدام ضاغط متغير السرعة Inverter Compressor للحصول على القيمة الحقيقية لمعامل الأداء.



الشكل (16-5) معامل الأداء للمضخة الجيوحرارية شتاءً

5.6 معوقات الدراسة التجريبية

يُلاحظ خلال التجارب بعض النقاط التي أثرت في دقة النتائج وعمليات القياس ولم يكن من الممكن تداركها بسبب التكلفة المادية المرتفعة وهي:

1- تمَّ تصميم المبادل الجيوحراري بناءً على الحمل التبريدي صيفاً كونه الحمل الأكبر ونظراً لاختلاف الحمل الحراري للمكان خلال فصلي الصيف والشتاء كانت النتائج متباينة نسبياً بين الصيف والشتاء.

2- الحاجة إلى دارتين اختباريتين واحدة صيفاً والأخرى شتاء للحصول على نتائج أفضل وأكثر دقة.

3- إنَّ المبادل الصفائحي المستخدم لتبادل الحرارة بين وسيط التبريد الفريون R22 والماء المار ضمن المبادل الجيوحراري لم يُؤدِّ الغرض المطلوب منه بشكل كامل صيفاً بينما كان كافٍ خلال فصل الشتاء.

4- عدم إمكانية التحكم بكمية الحرارة المسحوبة أو المضافة إلى الحيز المدروس بسبب استخدام ضاغط من النوع ثابت الاستطاعة ومن الأفضل استخدام ضاغط متغير السرعة Inverter.

5- عدم إمكانية التحكم بتدفق الماء خلال المبادل الجيوحراري بسبب استخدام مضخة ثابتة السرعة.

6- غياب عناصر التحكم الحقيقية بكميات الحرارة المطروحة أو الممتصة من التربة هو العائق الرئيسي بالحصول على الأداء الأمثل للمنظومة (لكنها ترفع من الكلفة التأسيسية للمنظومة).

5.7 أسباب الاختلاف بين طرق الحلِّ العددية والتجريبية

1- إنَّ حجم التأريض المدروس خلال الدراسة العددية هو بأبعاد الحفرة المدروسة $3 \times 1.5 \times 7\ m^3$ أما في حالة الدراسة التجريبية فإنَّ حجم التأريض الحراري غير منتهي ويستمر انتقال الحرارة بالتوصيل خلال التربة لمجال أكبر من الحفرة المدروسة.

2- إن إدخال حجم حفرة أكبر من $3 \times 1.5 \times 7\ m^3$ ضمن برنامج النمذجة ANSYS يُؤدِّي إلى زيادة عدد العقد المدروسة ويحتاج من ثُمَّ إلى حاسب متطور جداً لإنجاز عملية النمذجة.

3- اختلاف كمية الحرارة الممتصة من التربة شتاء حيث كانت مضاعفة خلال الحل العددي مقارنة بالحلِّ التجريبي ويعود ذلك إلى أنَّ كمية الحرارة الممتصة في الحلِّ العددي مرتبطة باستطاعة المبادل الجيوحراري بينما في الحلَّ التجريبي كانت مرتبطة بالحمل الحراري للحيز المدروس.

4- إنَّ استجابة المبادل الصفائحي وعدم كفايته للاستطاعة بشكل كامل في فصل الصيف لا يظهر في الحل العددي ومن ثُمَّ فهو سبب آخر لاختلاف النتائج ما بين الطريقتين.

5- لا يدخل تأثير درجة حرارة الجو الخارجي في درجة حرارة التربة في المنطقة المحيطة بالمبادل خلال الحل العددي ويكون ذلك عنصراً أساسياً في الحلِّ التجريبي.

6- لا يدخل تأثير الإشعاع الشمسي المؤثر في التربة خلال الحلِّ العددي

7- تتطلب دقة النتائج في الحلِّ التجريبي استخدام أجهزة قياس وحساسات حرارة ووسائل التحكم دقيقة جداً.

بالمقابل يُعدُّ الحلُّ التجريبي أهم الطرق لدراسة أيِّ عملية أو ظاهرة والوسيلة الوحيدة لبرهان أيَّة ظاهرة فيزيائية.

الفصـــــــــل السادس

نتائج الدراسة

Results

تمَّ في الفصلين الثاني والثالث استخدام الحلِّ التحليلي لتصميم وحساب مبادل جيوحراري حلزوني في دارة مضخة جيوحرارية وذلك عند تصميم وشروط عمل محددة وفق مناخ مدينة دمشق وشروط التربة الزراعية فيها ومن ثُمَّ تمَّ استخدام الحلِّ العددي في الفصل الرابع لتحليل عمل المبادل الجيوحراري الحلزوني وفي الفصل الخامس تمَّ تنفيذ منصة اختبارية تجريبية لاختبار المبادل بربطه مع دارة مضخة جيوحرارية منزلية. وفيما يلي نُبيِّن أهم نتائج الدراسة.

6.1 نتائج الدراسة:

1. يمكن أن يكون المبادل الجيوحراري الحلزوني بديلاً للمبادلات الأفقية والشاقولية مع تحقيق التدفق الحراري المطلوب من وإلى التربة.
2. ضرورة الأخذ بالحسبان الطول الإضافي اللازم عند تصميم المبادلات الحلزونية.
3. إنَّ اختيار قطر لفة أكبر لأنبوب المبادل يخفض من ارتفاع درجة حرارة التربة في المنطقة المحيطة للمبادل بفروقات تصل إلى 17 درجة في المنطقة القريبة من المبادل ويضمحل الفرق تقريباً بعد الابتعاد بمقدار 2 متر.
4. إن عمق 3 متر كاف لتحقيق طرح الحرارة من دارة المضخة الحرارية إلى التربة.
5. تنخفض الكلفة التأسيسية وذلك باستخدام الأنظمة ذات المبادل الحراري الحلزوني بسبب انخفاض تكاليف الحفر بالمقارنة مع المبادل الأفقي بمقدار 48%
6. تعد التربة خزان حراري لا نهائي الحجم على بعد 20 متر من المبادل.
7. يمكن استخدام أنابيب PEX بدلاً من البولي إيريثان عالي الكثافة لتنفيذ المبادلات الجيوحرارية لما تتمتع به من سهولة في تشكيل المبادل مع فعالية في نقل الحرارة من وإلى التربة.
8. المضخة الحرارية الأرضية لها قيم معامل أداء أعلى مقارنة بالمضخة الحرارية ذات المنبع الهوائي ويكون معامل الأداء أعلى بمقدار 34% صيفاً و 67% شتاءً.
9. يكون مقدار الوفر الطاقي في الاستجرار الكهربائي حوالي 33% بالمقارنة مع المضخة الحرارية التقليدية ذات المنبع الهوائي وبالتالي التقليل من انبعاثات غاز co2.
10. إنَّ المبادل الجيوحراري المطلوب صيفاً أكبر من المبادل اللازم شتاءً وفق الشروط المناخية وشروط التربة في مدينة دمشق ومن ثُمَّ يجب العناية باختيار عناصر التحكم بالاستطاعة في الدارة.

- الاعتماد على ضواغط من نوع Inverter بدلاً من الضواغط ذات الاستطاعة الثابتة.

- الاعتماد على مضخة ماء متغيرة السرعة للتحكم بتدفق الماء ضمن المبادل الجيوحراري.
- الاعتماد على صمام تمدد عوضاً عن الأنبوبة الشعرية ضمن دارة المضخة الجيوحرارية.

6.2 الاستنتاجات

1. أنظمة المضخات الجيوحرارية في الجمهورية العربية السورية ملائمة جداً لحالة التدفئة وتوفر في الاستطاعة الكهربائية المستجرة.
2. يمكن استخدام المضخة الجيوحرارية لتسخين المياه أيضاً بالإضافة لتغطية الحمل الحراري كون الاستطاعة المطلوبة للتكييف أكبر منها في حالة التدفئة.
3. يمكن اعتماد أنابيب البيكس المزودة بطبقة من الألمنيوم لتنفيذ المبادلات الجيوحرارية عوضاً عن أنابيب البولي إيريثان عالي الكثافة.
4. للحصول على الأداء الأمثل للدارة على مدار العام يجب استخدام تجهيزات ذات محركات بسرعة متغيرة Inverter للضاغط والمضخات.

6.3 التوصيات:

1. يُوصى بتوطين أنظمة المضخات الجيوحرارية في الجمهورية العربية السورية لما تمتلكه من مزايا وتوفير في الاستطاعة الكهربائية المستجرة من أنظمة التكييف.
2. يُوصى باعتماد المبادل الحلزوني كحلٍ بديل عن المنظومات الأفقية والشاقولية لما له من توفير في كلفة الحفر والاستطاعة الهيدروليكية للضخ.
3. يُوصى بإجراء نمذجة حاسوبية متغيرة مع الزمن لدراسة تأثير التشغيل المستمر على مدار عام أو عامين ولكن ذلك يتطلب حواسب بمواصفات خاصة
4. يُوصى بالتعديل على المنصة الاختبارية واستبدال الضاغط المستخدم من النوع ذي الاستطاعة الثابتة بضاغط آخر من النوع متغير الاستطاعة وكذلك الأمر بالنسبة لمضخة الماء ومراوح الهواء.
5. يُوصى بالتعديل على المنصة الاختبارية واستبدال المبادل الصفائحي بمبادل من النوع ذو حزمة الأنابيب Shell and Tube ومقارنة الاختلاف في النتائج المحصلة.
6. يوصى باستخدام وسائط تبريد حديثة صديقة للبيئة كالفريون R410، والفريون R32 عوضاً عن الفريون R22 ودراسة التأثير على أداء المضخة الجيوحرارية.
7. يُوصى بوضع جداول بيانات خاصة بدرجات حرارة الأرض والمياه الجوفية والخواص الحرارية للتربة في مختلف مناطق الجمهورية العربية السورية.

8. يوصى بالتعديل على المنصة للحصول على الماء البارد أو الساخن وربط الدارة مع وحدة وشيعة – مروحة (Fancoil) أو تدفئة أرضية عوضاً عن وحدة التمدد المباشر
9. يُوصى بدراسة إضافة مواد ذات انتشارية حرارية أعلى بجوار الأنبوب لتسريع تفريغ الحرارة من وإلى الأرض ودراسة تأثيرها في استثمار التربة الزراعي.

ترتيب المراجع وفقاً لورودها:

[1] Jalaluddin A, Jalaluddin M, Miyara A. Thermal performance investigation of several types of vertical ground heat exchangers with different operation mode. Appl Therm Eng 2012.

[2] Man Y, Hongxing Y, Jinggang W, Zhaohong F. In situ operation performance test of ground coupled heat pump system for cooling and heating provision in temperate zone. Appl Energy 2012.

[3] Pulat E, Coskun S, Unlu K, Yamankaradeniz N. Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. Energy 2009.

[4] Loveridge F, Powrie W. Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. Energy 2013.

[5] Rui F, Yiqiang J, Yang Y, Deng S, Zuiliang M. A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection. Energy 2007.

[6] Zhang W, Yang H, Lu L, Fang Z. The analysis on solid cylindrical heat source model of foundation pile ground heat exchangers with groundwater flow Energy 2013.

[7] Li Min, Lai Alvin CK. New temperature response functions (G functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium linesource theory. Energy 2012.

[8] Marco F, Fabio M. The effect of borefield geometry and ground thermal load profile on hourly thermal response of geothermal heat pump systems. Energy 2013.

[9] Congedo PM, Colangelo G, Starace G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: a comparison among different configurations. Appl Therm Eng 2012.

[10] Turan O. Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications. Energy 2012.

[11] Ganjehsarabi H, Gungor A, Dincer I. Exergetic performance analysis of Dora II geothermal power plant in Turkey. Energy 2012.

[12] Ozgener O, Hepbasli A. A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems. Renew Sust Energy Rev 2007.

[13] Hepbasli A. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. Renew Sust Energy Rev 2008.

[14] Lund JW. Present utilization and future prospects of geothermal energy worldwide. In: Proceedings of the renew energy conference 2006.

[15] Carli MD, Zarrella A. Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: a literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. Energy Build 2012.

[16] Negiz A, Hastaoglu MA, Heidemann RA. Three-dimensional heat transfers from a buried Pipe-I. Laminar flow. Chem Eng Sci 1993.

[17] Negiz A, Hastaoglu MA, Heidemann RA. Three-dimensional transient heat transfer from a buried pipe: solidification of a stationary fluid. Numer Heat Transf 1995.

[18] De Swardt CA, Meyer JP. A performance comparison between an airsource and a ground-source reversible heat pump. Int J Energy Res 2001.

[19] Zhao J, Wang H, Chuanshan D, Li X. Experimental investigation and theoretical model of heat transfer of saturated soil around coaxial ground coupled heat exchanger. Appl Therm Eng 2008.

[20] Michopoulos A, Zachariadis T, Kyriakis N. Operation characteristics and experience of a ground source heat pump system with a vertical ground heat exchanger. Energy 2013.

[21] Demir H, koyun A, Temir G. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification. Appl Therm Eng 2009.

[22] Eicker U, Vorschulze C. Potential of geothermal heat exchangers for office building climatisation. Renew Energy 2009.

[23] Montagud C, Corberán JM, Ruiz-Calvo F. Experimental and modeling analysis of a ground source heat pump system. Appl Energy 2013.

[24] Entchev E, Yanga L, Ghoraba M, LeeE J. Simulation of hybrid renewable microgeneration systems in load sharing applications. Energy 2013.

[25] Florides G, Theofanous E, Iosif-Stylianou I, Tassou S, Christodoulides P, Zomeni Z, et al. Modeling and assessment of the efficiency of horizontal and vertical ground heat exchangers. Energy 2013.

[26] Benli H. A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump system for a greenhouse heating in the mild climate Elazig, Turkey. Appl Therm Eng 2013.

[27] Bakirci K. Evaluation of the performance of a ground-source heat-pump system with series GHE (ground heat exchanger) in the cold climate region.
Energy 2010.

[28] Mileni_c D, Vasiljevi_c P, Vranjes A. Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes. Energy Build 2010.

[29] Guo Y, Zhang G, Zhou J,WuJ, Shen W. A techno-economic comparison of a direct expansion ground-source and a secondary loop ground-coupled heat pump system for cooling in a residential building. Appl Therm Eng 2012.

[30] Cos¸kun S, Pulat E, }Unl}u K, Yamankaradeniz R. Experimental performance investigation of a horizontal ground source compression refrigeration machine.Int J Energy Res 2008.

[31] Lee CK, Lam HN. A simplified model of energy pile for ground-source heat pump systems. Energy 2013.

[32] Esen H, Inalli M. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazı_g, Turkey. Energy Build 2009.

[33] James E. Bose, Air Innovations Conference, 2005

[34] V.R. Tarnawski, W.H. Leong, T. Momose Y. Hamada, Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan, 2007.

[35] A. Michopoulos,T. Zachariadis, N. Kyriakis, Operation characteristics and experience of a ground source heat pump system with a vertical ground heat exchanger 2012

[36] Saeed Maddah, Marjan Goodarzi , Mohammad Reza Safaei, Comparative study of the performance of air and geothermal sources of heat pumps cycle operating with various refrigerants and vapor injection, 2020

[37] H Mun, M Dilawar, M Jeong, Effect of a Heating System Using a Ground Source Geothermal Heat Pump on Production Performance, Energy-Saving and Housing Environment of Pigs, 2022

[38] نديم مخيبر، علي عيسى، هندسة التبريد الجزء الأول، مطبوعات جامعة دمشق ، 2007

[39] وجيه ناعمة، تطبيقات المضخة الحرارية، مطبوعات جامعة دمشق، 2010

[40] ASHRAE, Geothermal Energy Chapter, Application Handbook, USA, ASHREA, 2019

[41] Rafferty, K. A PRIMER ON LOW-TEMPERATURE, SMALL- SCALE APPLICATIONS. IN GEOTHERMAL POWER GENERATION. USA: Geo-Heat Center, 2000

[42] CHIASSON, A. D. ADVANCES IN MODELING OF GROUND SOURCE HEAT PUMP. MASTER of SCIENCE, Oklahoma State University, USA. 1999

[43] RETScreen International, Clean Energy Decision Support Centre, GROUND SOURCE HEAT PUMP PROJECT ANALYSIS,2005

[44] Egg, J, & Hwoard, B.C. Geothermal HVAC Green Heating and Cooling. USA: McGraw-Hill Companies, 2011

[45] Cavanaugh, S.P, &Rafferty, K. Ground Source Heat Pumps, Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. USA: ASHRAE, 1997.

[46] FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DEWITT, Fundamentals of Heatand Mass Transfer, SEVENTH EDITION. USA, 2011.

[47] Langhaar, H. L., J. Appl. Mech., 64, A-55, 1942

[48] Kays, W. M., and M. E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1993.

[49] Petukhov, B. S., in T. F. Irvine and J. P. Hartnett, Eds.,Advances in Heat Transfer, Vol. 6, Academic Press, New York, 1970.

[50] Moody, L. F., Trans. ASME, 66, 671, 1944.

[51] Kays, W. M., Trans. ASME, 77, 1265, 1955.

[52] Hausen, H., Z. VDI Beih. Verfahrenstech., 4, 91, 1943.

[53] Sieder, E. N., and G. E. Tate, Ind. Eng. Chem., 28, 1429,1936.

[54] Shah, R. K., and A. L. London, Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Academic Press, New York, 1978.

[55] Shah, R. K., and M. S. Bhatti, in S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung, Eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, Chap. 3, Wiley-Interscience, New York, 1987.

[56] Colburn, A. P., Trans. AIChE, 29, 174, 1933.

[57] Winterton, R. H. S., Int. J. Heat Mass Transfer, 41, 809, 1998.

[58] Kakac, S., in S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung, Eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, Chap. 18, Wiley-Interscience, New York, 1987.

[59] Ghajar, A. J., and L.-M. Tam, Exp. Thermal and Fluid Science, 1994.

[60] Norris, R. H., in A. E. Bergles and R. L. Webb, Eds., Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer, ASME, New York, 1970.

[61] Bhatti, M. S., and R. K. Shah, in S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung, Eds., Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, Chap. 4, Wiley-Interscience, NewYork, 1987.

[62] Molki, M., and E. M. Sparrow, J. Heat Transfer, 1986.

[63] Skupinski, E. S., J. Tortel, and L. Vautrey, Int. J. Heat Mass Transfer, 8, 937, 1965.

[64] Seban, R. A., and T. T. Shimazaki, Trans. ASME, 1951.

[65] Klemens, P. G., "Theory of the Thermal Conductivity of Solids," in R. P. Tye, Ed., Thermal Conductivity, Vol. 1, Academic Press, London, 1969.

[66] د. عاطف عامر، أسس انتقال الحرارة والكتلة، مطبوعات جامعة دمشق، 2018-2019

[67] McQuay air conditioning. Geothermal Heat Pump Design Manual. (1st ed) McQuay International. 2008

[68] jay Egg, Greg Cunniff, Carl D. Orio, Modern Geothermal HVAC engineering and control applications, 2013

[69] ASHRAE, Systems Handbook, USA, ASHREA, 2016

[70] Marija Lazova, Henk Huisseune, Alihan Kaya, Steven Lecompte, George Kosmadakis and Michel De Paepe,Performance Evaluation of a Helical Coil Heat Exchanger Working under Supercritical Conditions in a Solar Organic Rankine Cycle Installation, 2016

[71] ANSYS (CFX) 18.2

[72] P.M. Congedo, G. Colangelo, G. Starace, CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations, 2012

[73] Alessandro Franco n, MaurizioVaccaro, Numerical simulation of geothermal reservoirs for the sustainable design of energy plants: A review, 2014

[74] Yaobin Zhang, Jia Zheng, Aihua Liu, Qiulan Zhang, Jingli Shao and Yali Cui, Numerical Simulation of Shallow Geothermal Fieldin Operating of a Ground Source Heat Pump System—A Case Study in Nan Cha Village, Ping Gu District, Beijing, 2020

[75] www.geographyiq.com

[76] Nabiha Naili*, Majdi Hazami, Issam Attar, Abdelhamid Farhat, In-field performance analysis of ground source cooling system with horizontal ground heat exchanger in Tunisia, 2013

[77] Aikins KA, Choi JM. Current status of the performance of GSHP (ground source heat pump) units in the Republic of Korea. Energy 2012.

[78] ASHRAE. Residential Cooling and Heating Load Calculations, FUNDAMENTALS HANDBOOK, 2021

[79] Hourly Analysis Program V: 5.1, Computer software Carrier company

[80] ASHRAE. THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF REFRIGERANTS, FUNDAMENTALS HANDBOOK, 2021

[81] LG Split Ac Datasheet

ا. البحث الأول

تمَّ نشر مقالة في مجلة جامعة البعث للعلوم الهندسية بعنوان

تصميم مبادل جيوحراري أنبوبي حلزوني وفق الشروط المناخية للجمهورية العربية السورية

Designing a Geothermal Helical Exchanger According to Damascus Climate's Conditions

وجيه ناعمة (1) أحمد عمايري(2)

ملخص

تمَّ في هذا البحث إيجاد التصميم الأمثل لمبادل أنبوبي حلزوني يعمل في منظومة مضخة جيوحرارية تستخدم للتدفئة والتكييف وفقاً للشروط المناخية لمدينة دمشق مع التركيز على إيجاد حلٍ بديل للمبادلات الجيوحرارية الشاقولية والتي تتطلب أعماق حفر كبيرة ترفع من الكلفة التأسيسية للمنظومة وللمبادلات الأفقية التي تتطلب مساحة كبيرة من الأراضي.

خلصت الدراسة إلى تحديد الأبعاد التصميمية الأمثل للمبادل: طول المبادل، قطر الأنبوب، والتباعد بين اللفات وقطر اللفة وذلك من خلال رسم منحنيات متعددة للحصول على أفضل نتيجة من خلال الأخذ بالحسبان سرعة الماء وحجم التخزين الأرضي لتحقيق أكبر فعالية للمبادل بأصغر مساحة حفر ممكنة.

الكلمات المفتاحية: طاقة جوف الأرض، مبادل حلزوني، مضخة جيوحرارية

II. البحث الثاني

تمَّ نشر مقالة في مجلة جامعة البعث للعلوم الهندسية بعنوان

حساب الكتلة التخزينية لمبادل جيوحراري أنبوبي حلزوني في دارة المضخة الحرارية

Estimating the storage mass of a Geothermal Helical Exchanger in Geothermal Heat Pump Cycle

وجيه ناعمة (1) أحمد عمايري(2)

ملخص

تمَّ في هذا البحث إيجاد الكتلة التخزينية الهندسية لمبادل أنبوبي حلزوني يعمل في منظومة مضخة جيوحرارية، تستخدم للتدفئة والتكييف وفقاً للشروط المناخية لمدينة دمشق، مع التركيز على إيجاد الأبعاد الهندسية للحفرة اللازمة للمبادل مع تحقيق التبادل الحراري الكافي لامتصاص الحرارة في وضع التدفئة وطرحها في وضع التبريد.

خلصت الدراسة إلى تحديد تغير درجة الحرارة الطولي وارتفاع درجة حرارة التربة وكمية الحرارة المفيدة لكل متر طولي من الأنبوب ومعامل انتقال الحرارة الكلي، وعلاقة هذه القيم مع البعد عن أنبوب المبادل وذلك من خلال رسم منحنيات متعددة للحصول على أفضل نتيجة من خلال الأخذ بالحسبان معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل وموصلية التربة.

الكلمات المفتاحية: الموصلية الحرارية التربة، مبادل حراري أنبوبي حلزوني، الكتلة التخزينية للمبادل

III. البحث الثالث

تمَّ نشر بحث خارجي في مجلة International Journal of Mechanical Engineering بعنوان:

Performance Analysis of Geothermal Heat Pump with Helical Ground Heat Exchanger in Syria

Prof.Wajih Naimeh Eng.Ahmad Amayri

Abstract

GSHP (Ground Source Heat Pump) system is a highly sophisticated technology for cooling and heating buildings worldwide. Unfortunately, this technology is not available here in Syria, however it is time to start thinking about applicable ways that enable us to make use of the advantages of this promising technology here is Syria because of its high performance. Aiming for this exact purpose, an experiment was installed at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University in Syria. First, to evaluate the optimal parameters of the GSHE (ground source heat exchanger), the performance of a helical GSHE was analyzed experimentally and analytically. The heat pump cycle (Carnot cycle) was analyzed, also dryness factor, subcooling, coefficient of performance, response of GSHE were analyzed.

The findings of this experimental study, will be used to evaluate the COPhp (coefficient of performance of the heat pump) which are ranged between 2.3-4.7. The results showed that the use of the ground source heat pump is appropriated for cooling buildings in Syria, which has hot climate, as a substitutional solution of traditional air-cooled heat pump.

Index Terms: Geothermal energy. Ground source heat pump. Helical heat exchanger- experimental study.

Abstract

1. Research ackground

Heat pumps are nowadays widely used for heating and air conditioning buildings. These machines rely on the reverse Carnot cycle principle to extract heat from one medium and transfer it to another medium with the use of an external power source (mostly electricity). GSHP geothermal heat pumps are defined as ground source heat pumps that provide building heating and water heating by extracting the necessary heat from the ground and providing cooling by a counter process. The savings in energy consumed in the cooling mode ranges between 20-39% and 30-47% in the heating mode. This reduces the emission of harmful gases to the environment up to 65% compared to traditional heat pumps.

2. The Purpose of the research

The main purpose of the research is to reduce the electrical energy spent on heating and air conditioning by finding the optimal design model for a helical geothermal exchanger working in the geothermal pump circuit according to the climatic conditions of the city of Damascus and implementing a test platform to test the performance of the exchanger and geothermal pump and compare it with traditional circuits.

3. Materials and methods

The exchanger will be designed and the optimum dimensions of it and the size of the gravitational hole where the exchanger will be placed in will be taken into account. The climatic conditions and soil specifications at the site of the exchanger installation will be taken into account using the Visual Basic program. The numerical modeling process will be carried out using the ANSYS 18.2 program. Exchanger performance and geothermal pump performance test and comparison with the conventional circuit.

4. Practical results

Finding an alternative solution represented by the helical tube geothermal exchanger in order to overcome the large digging depths required by the vertical exchanger and to overcome the vast areas of land required by the horizontal exchanger and to provide electrical energy rented and spent on air conditioning by using geothermal pump systems instead of

traditional circuits and to localize the design and manufacture of geothermal exchangers technology

5. Conclusions from the researcher's point of view

Benefiting from the energy of the underground, which is one of the sources of renewable energies in the air-conditioning operations of domestic and commercial facilities, as the earth is characterized by a lower temperature in the summer and a higher temperature in the winter compared to the temperature of the ambient air, for both the surface and deep layers. The surface layers isolate the deeper layers from the outside air, which causes stability of temperature for these layers throughout the year, thus obtaining real savings in the expenditure of electrical energy rented with the for conditioning, heating and reducing CO2 emissions.

6. Keywords

Geothermal energy, geothermal pump, geothermal exchangers, helical tube exchanger, storage mass of the exchanger, air conditioning, Cofficient of performance, performance analysis, expremintal study

SYRIAN ARAB REPUBLIC
DAMASCUS UNIVERSITY
FACULTY OF MECHANICAL & ELECTRICAL ENGINEERING
GENERAL MECHANIC DEPARTMENT

Improving and Testing a Helical Exchanger of a Geothermal Heat Pump according to the Climate Conditions of Damascus

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of PHD in Cooling Engineering

By

Eng. Ahmad Ghareeb Amayri

SCIENTAFIC SUPERVISOR

Dr.Eng Wajih MHD Kair Naimeh

2022