

دراسة إمكانية توليد الطاقة الكهربائية من حرارة جوف الأرض وأثرها البيئي والاقتصادي في ليبيا

مصطفى الطاهر العائب
جامعة مصراتة، كلية الهندسة، قسم
الهندسة الميكانيكية، مصراتة، ليبيا
mustafa.elayeb@
eng.misuratau.edu.ly

ونيس عبد الناصر الزقل
جامعة مصراتة، كلية الهندسة، قسم
الهندسة الميكانيكية، مصراتة، ليبيا
Wanisalzog@gmail.com

عبد الله إبراهيم العجيل
جامعة مصراتة، كلية الهندسة،
قسم هندسة النفط، مصراتة، ليبيا
aelajeil@gmail.com

أسامة أحمد السنوسي
جامعة مصراتة، كلية الهندسة، قسم الهندسة
الميكانيكية، مصراتة، ليبيا
o.elsaniusi@eng.misuratau.edu.ly

الطاقة الجيوحرارية أو ما يعرف بطاقة حرارة جوف الأرض [10، 11]، والتي تزايد الاهتمام بها مع اندلاع الأزمة الروسية الأوكرانية، وخاصة في أوروبا لتعويض انقطاعات امدادات الغاز الروسي سواء في التدفئة أو في التطبيقات الصناعية والعلاجية الأخرى [2]. وبالرغم من أن الاهتمام بالطاقة الجيوحرارية في ليبيا من شأنه أن يحقق العديد من المكاسب، أهمها: المساهمة في تنوع مصادر الطاقة، وزيادة مصادر الدخل للدولة، وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية مما يساهم في تعزيز استدامة الطاقة وضمان عدم نضوبها في المدى القريب والمتوسط، إلا أنها لا تزال من مصادر الطاقة المتجددة غير المستغلة، بل وغير المستهدفة في أولويات الدراسات المحلية؛ لذلك تأتي هذه الورقة لتسلط الضوء على هذا النوع من الطاقة المتجددة، بهدف دراسة إمكانية إقامة محطة طاقة جيو حرارية في ليبيا، ومدى قدرة المحطة على تلبية جزء من احتياج الدولة للكهرباء مع تقدير التكاليف الاقتصادية والأثر البيئي لها.

2. استهلاك الطاقة من المصادر التقليدية وأثارها البيئية

تعتبر مصادر الطاقة التقليدية، المتمثلة في الوقود الأحفوري بأنواعه، مصادر ناضبة؛ لأنه لا يمكن إنتاجها من جديد خلال وقت قصير بل تحتاج إلى آلاف وربما ملايين السنين. وتشمل مصادر الوقود التقليدية كل من: الفحم والنفط والغاز الطبيعي. لقد أدى النمو السكاني والتقدم التقني إلى زيادة استهلاك الطاقة بشكل كبير ومتنام خاصة في العقود الأخيرة؛ فعلى سبيل المثال وصل استهلاك الكهرباء حول العالم لما يقرب من 25500 تيرا وات ساعة في عام 2022، وتضاعف خلال الفترة (1980-2022) أكثر من ثلاثة أضعاف [4]. وفي ليبيا، التي يعتمد اقتصادها بشكل كبير على مصدرين أساسيين هما النفط والغاز، تطوّر إنتاج الطاقة بشكل كبير خلال العقود الثلاثة الأخيرة، حيث زاد الإنتاج من 76.2 تيرا وات ساعة عام 1981 إلى حوالي 99.6 تيرا وات ساعة عام 1991 ثم إلى حوالي 127 تيرا وات ساعة عام 2006، وبزيادة سنوية بلغت حوالي 2.57 %. وصاحب هذه الزيادة في الإنتاج، زيادة في معدلات الاستهلاك، إذ زاد استهلاك الطاقة من 104.6 جيجا وات ساعة عام 1981 إلى حوالي 155 جيجا وات ساعة عام 1991، ثم إلى 228.3 جيجا وات ساعة عام 2006 بزيادة سنوية بلغت 4.55 %. لعل من أسباب ارتفاع المعدل السنوي في استهلاك الطاقة يرجع إلى التطور التقني والنمو السكاني المترادف [12]، ناهيك عن دعم المحروقات وانخفاض قيمة التعريفات الكهربائية والتساهل في الجباية.

إن استخدام مصادر الطاقة التقليدية؛ من شأنه أن يسبب أضراراً بيئية كبيرة؛ نتيجة للغازات المنبعثة جراء احتراق الوقود الأحفوري، والذي يعد أكبر منتج لغاز ثاني أكسيد الكربون، الذي

ملخص— تتمتع ليبيا بالعديد من مصادر الطاقة المتجددة، من بينها الطاقة الجيوحرارية، المستمدة من حرارة جوف الأرض، والتي من مظاهرها العيون الساخنة الموجودة في بعض المناطق، فقد وُجد من خلال المسح الميداني والدراسات السابقة أن التدرج الحراري مع العمق يتراوح ما بين (40-60) درجة سلسيوس لكل كيلو متر. هذه الطاقة يمكن استغلالها كمصدر بديل للحد من حرق الوقود الأحفوري، مصدر الدخل الرئيس في البلاد.

في هذه الورقة، سلط الضوء على إمكانية توليد الطاقة الكهربائية من حرارة جوف الأرض المتاحة في ليبيا، ومحاكاة محطة طاقة جيوحرارية من نوع البخار الوميضي لتوليد الكهرباء في مدينة مصراتة كحالة دراسية، لدراسة الأثر البيئي والاقتصادي لها. تمت محاكاة عدد 10 آبار إنتاج و4 آبار حقن، بمعدل تدفق 55 كيلوجرام في الثانية لبر الإنتاج الواحدة، ودرجة حرارة 250 درجة سلسيوس، وبلغ صافي قدرة المحطة حوالي 71 ميجا وات، وكفاءة حوالي 16%. قدرت التكلفة الابتدائية للمحطة بحوالي 364 مليون دولار، وتكلفة صيانة بنحو 7 مليون دولار سنوياً، ولم تتجاوز تكلفة وحدة الطاقة الكهربائية 7.2 سنت دولار لكل كيلو وات ساعة.

الكلمات المفتاحية— الطاقة المتجددة، الطاقة الجيوحرارية، العوامل البيئية والاقتصادية.

1. مقدمة

إن الطلب العالمي المتزايد على الطاقة والتغيرات المناخية المتسارعة؛ يستدعي النظر في بدائل الوقود الأحفوري الناضب والملوث للبيئة [1-3]. في ليبيا، عانت الشبكة العامة للكهرباء ولعدة سنوات مضت عجزاً في توليد الطاقة، مما أدى إلى الانقطاعات الكهربائية المتكررة وطرح الأحمال خاصة في فصل الصيف. ونظراً للعجز في إمدادات الغاز في بعض الفترات ووجود بعض محطات توليد الكهرباء بعيداً عن خطوط إمداده؛ فقد استدعى تشغيلها بالديزل والزيوت الثقيل، بل وبالنفط الخام أحياناً، مما تسبب في ارتفاع التكلفة بشكل كبير، ووصل دعم الوقود إلى حوالي 8.5 مليار دولار سنوياً. يذكر أن توليد الكهرباء في ليبيا حالياً يستهلك ما يعادل 200,000 برميل نفط في اليوم، أي حوالي 71 مليون برميل سنوياً، ولا يزيد متوسط كفاءة المحطات التوليد العاملة عن 33% [4] وهذا يعني أن 67% من هذه الكمية يضيع هدرًا مع نفث كميات هائلة من الانبعاثات الكربونية إلى الجو. هذه التحديات العالمية والمحلية أدت إلى تركيز العديد من الباحث والمهتمين على دراسة بدائل أخرى لتوليد الكهرباء والتي في الغالب تكون مستمدة من الطاقات المتجددة والمستدامة [5-9]. ومن أحد هذه البدائل

استلمت الورقة بالكامل في 21 مايو 2024 وروجعت في 24 ديسمبر 2024 وقبيل النشر في 27 ديسمبر 2024 ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 30 ديسمبر 2024.

العالم. ينبعث من معظم أنظمتها بخار الماء فقط، على الرغم من أن بعضها ينبعث منه كميات صغيرة جداً من ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروز والجسيمات. وخلافا لمصادر الطاقة المتجددة الأخرى، التي تعتمد على العوامل المتغيرة مثل وجود الرياح أو الشمس، فإن محطات الطاقة الجيوحرارية يمكن أن تعمل في جميع الظروف وخلال جميع فصول السنة. كما أن مساحة هذه المحطات أقل بكثير من مساحة العديد من محطات الطاقة المتجددة الأخرى. أما أبرز التحديات التي قد تواجه استغلال هذه الطاقة فهي النشاط الزلزالي البسيط، أو الزلازل الصغيرة التي قد تنتج من عملية ضخ تيارات المياه عالية الضغط إلى سطح الأرض. وكذلك احتمالية انبعاث كميات صغيرة من الغازات الدفيئة مثل كبريتيد الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون. وعلى الرغم من أن المحطات لا تتطلب أي وقود تقريباً لتشغيلها، إلا أن التكلفة الأولية لتركيب محطة الطاقة الجيوحرارية باهظة الثمن نسبياً مقارنة بالمحطات العاملة بالوقود الأحفوري.

عالمياً، يتم توليد حوالي 86 تيرا وات ساعة من الكهرباء سنوياً من تكنولوجيا طاقة حرارة الأرض، حيث ساهمت موارد الطاقة الجيوحرارية في إنتاج الكهرباء في بعض المناطق؛ فعلى سبيل المثال: مثلت 17٪ من إنتاج الكهرباء في نيوزيلندا و31٪ من إنتاج الكهرباء في آيسلندا في عام 2018، كما قُدرت إضافات السعة الجيوحرارية العالمية في عام 2020 بحوالي 300 ميجاوات. قادت إندونيسيا وتركيا التطورات الجديدة، حيث تم إضافة 145 ميجاوات و70 ميجاوات من السعة للبلدين على التوالي. في حين كانت الولايات المتحدة الأمريكية في المرتبة الأعلى عالمياً من حيث سعة الطاقة الجيوحرارية حيث تقدر السعة المركبة بحوالي 3.7 جيجاوات [18]. يعتمد استغلال الطاقة الجيوحرارية بشكل أساسي على المعدات والموارد المالية، حيث تستخدم معظم دول العالم اليوم تقنيات البخار الجاف أو البخار المباشر، ومع ذلك فإن تقنية الدورة الثنائية تتطور بأسرع وتيرة على الصعيد العالمي في الوقت الحاضر، نظراً لزيادة استخدام الموارد ذات درجات حرارة منخفضة نسبياً استخداماً مباشراً. أما محلياً فتقع ليبيا بعامية فوق قاعدة من الصخور الأركية مغطاة بطبقات رسوبية مختلفة حسب السمك والعمر الجيولوجي. كما يوجد بها عدة أحواض للمياه الجوفية، شكل (1)، ومنها: حوض الكفرة- حوض مرزق - حوض السرير - حوض الحمادة - حوض سرت. ومن المعلوم أن وفرة المياه الجوفية يمكن استغلالها في محطات الطاقة الجيوحرارية، حيث يتم حقن المياه في الآبار العميقة لتكتسب حرارة من باطن الأرض، ثم تخرج بدرجات حرارة عالية يمكن استخدامها في مختلف التطبيقات. ومع ذلك فما زالت هذه الطاقة في ليبيا في إطار الدراسة والبحث، واقتصر الاستفادة منها في القليل من العمليات العلاجية أو التدفئة في بعض عيون المياه الساخنة. فقد قام الباروني وآخرون بدراسة حول المياه الجوفية الساخنة في شمال غرب ليبيا كمصدر من مصادر الطاقة، حيث وجد أن التدرج الجيوحراري لهذه المنطقة يتراوح ما بين 20 - 45 درجة سيلسيوس لكل كيلو متر، ويوضح الجدول (1) خصائص بعض الآبار التي تم تناولها في تلك الدراسة [20].

يعمل على رفع درجة حرارة الأرض أو ما يعرف بظاهرة الاحتباس الحراري [13]. ولهذا فإن الاستمرار في الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية بشكل كلي أو شبه كلي يعد خطراً حقيقياً على المدى المتوسط والبعيد، بالإضافة إلى كونها ناضبة [14-17]، الأمر الذي يستدعي ضرورة البحث عن مصادر أخرى تكون أكثر استدامة وأقل ضرراً للبيئة، ومن بينها مصادر الطاقة المتجددة مثل: الشمس والرياح والكتل الحيوية، والمد والجزر، والطاقة الجيوحرارية موضوع هذه الورقة.

3. الطاقة الجيوحرارية

يشير مصطلح الطاقة الجيوحرارية إلى طاقة الحرارة الطبيعية في جوف الأرض، وهي الحرارة التي يتم توليدها داخل الأرض وتنتج درجة الحرارة الناتجة عنها 6000 درجة سيلسيوس. لقد تعددت النظريات عن مصدر هذه الحرارة العالية، إلا أنه بعد عدة دراسات أجريت من عدة خبراء في هذا مجال، وُجد أن هذه الحرارة تأتي من أكثر من مصدر، منها المواد المشعة الموجودة بشكل طبيعي بكميات كبيرة في أعماق الأرض، والتي يتواجد بعضها حول القشرة الأرضية، حيث تتم عملية التحلل الإشعاعي للنظائر المشعة. وذهب البعض إلى أن المصدر الرئيس لهذه الحرارة هو احتكاك الصخور التكتونية والتي تسبب في توليد حرارة عالية نتيجة هذا الاحتكاك. ورأى البعض الآخر إلى أن السبب في الحرارة العالية لباطن الأرض هو تخزين حرارة الشمس منذ آلاف السنين [5]. وما يهم هنا هو كيفية الاستفادة من هذه الطاقة، حيث يمكن الحصول على الطاقة الجوف أرضية بطريقتين؛ الأولى، عند حفر مناطق معينة على الأرض، خاصة في المناطق التي حدثت فيها ثورات بركانية حديثة (تعتبر الألف سنة الأخيرة "حديثة" جيولوجياً) فيمكن الوصول إلى طبقة صخور شديدة الحرارة. أما الطريقة الثانية، والتي لا تزال قيد التطوير الهندسي، لا تتطلب مواقع بركانية أو مواقع قريبة من منطقة الصخور المنصهرة من أجل استخدام الطاقة الحرارية الجوفية، ولكنها ممكنة في أي مكان على الأرض تقريباً. تعتمد الطريقة على "التدرج الحراري الأرضي" (Geothermal Gradient) والقصد هو وتيرة ارتفاع درجة الحرارة كلما تم التعمق بالحفر في الأرض [6].

يعود استخدام الطاقة الحرارية الأرضية منذ القدم، فكان الإنسان يعتمد عليها في التسخين والطهي والاستحمام وغيرها من التطبيقات اليومية الأخرى، أما في الوقت الحالي فيمكن حصر استخدامات الطاقة الجيوحرارية إلى استخدامين رئيسيين هما التطبيقات الحرارية وتوليد الكهرباء [18]. يمكن الاستفادة من الطاقة الجيوحرارية في المنازل والمنشآت في التدفئة أو التبريد وذلك لأن الحرارة تحت الأرض تبقى ثابتة نسبياً بالرغم من تغير الحرارة فوق سطح الأرض خلال العام. أما توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية يعتبر أحد التطبيقات التي يتم استخدامها حول العالم والتي تزايد الاهتمام بها في الآونة الأخيرة. حيث يمكن توليد الطاقة من بعض محطات التوليد باستخدام هذه الحرارة. يوجد ثلاثة أنواع من هذه المحطات وهي: محطات الطاقة العاملة بالتبخير الومبضي (Flash Steam Power Plant)، ومحطات الطاقة ذات الدورة الثنائية (Binary Cycle Power plant) ومحطات البخار الجاف (Dry Steam Power Plant). تعتبر الموارد الحرارية الأرضية التي تقل عن 150 درجة سيلسيوس مناسبة أكثر للاستخدام المباشر مثل التدفئة والتبريد (باستخدام تقنيات الديناميكا الحرارية المناسبة مثل دورات التبريد بالامتصاص)، في حين يتم استغلال الموارد التي تتجاوز 150 درجة سيلسيوس لتوليد الكهرباء. ومع ذلك، تتيح التقنية الحديثة لتحويل الطاقة إمكانية توليد الكهرباء من الموارد ذات درجات الحرارة الأقل [10].

إن إنتاج الطاقة من المصادر الجيوحرارية له مميزاته وعيوبه؛ فمن أهم هذه المميزات: تعد الطاقة الجيوحرارية مصدراً متجدداً للطاقة، ويمكن الوصول إلى بعض أشكالها والاستفادة منها في أي مكان من

56.5	176	1065-915	وادي زمزم	69/77
38	109	688-483	الشويرف	1/84
72	479	1394-1318	ودان	20/78
65	227	1500-1318	ودان	1/80
73	172	1464-1341	ودان	19/79
33	56	789-585	حزوة	18/88
29	44	530-391	الحراية	126/81
35	54	558-502	فسانوس- مزدة	31/81
33.7	23	743-575	القلب - الحمادة	4/88
34.1	58	684-606	بئر مرحان	25/87



شكل 1. أحواض المياه الجوفية في ليبيا [19]

جدول 1 بيانات بعض الآبار ذات المياه الساخنة بالخران الجوفي ككله حوض سوف الجين- الحمادة [20]

رقم البئر	الموقع	العمق المستغل تحت الأرض (م)	الإنتاجية متر مكعب في الساعة	درجة حرارة المياه °س
VG/22	غدامس	950-770	30	40.2
277/76	غدامس	1018-770	212	
159/89	جنوب درج	725-606	83	43
11/81	القرينات	778-664	49	41
64/78	سبناون	801-725	100	36
66/82	رأس الطيل	935-785	203	40
30/85	الشميخ	937-762	216	41.3
22/87	دبنينا	1052-885	194	42.5
25/85	السويح	1648-1466	227	65.3
36/84	تاورغاء	6451-1325	274	57.9
3/83	وادي القطف	1190-968	376	50
HR-7	وادي المردوم	1019-878	264	43
1/85	السدادة	1086-973	220	52.4
K/8	وادي بي الكبير	1348-1270	152	61
ابونجيم	ابونجيم	1372-1167	144	62
VR-2	الوشكة المراح	1184-1080	56	63
سد جارف	سد وادي جارف	1513-1240	22	81
52/80	وادي قلوب	1363-1220	479	72
كرشنة-1	سرت	1437-1333	65	85
10/83	وادي بي الكبير	1404-1211	280	70
ZM-5.1	وادي زمزم	1223-969	220	59

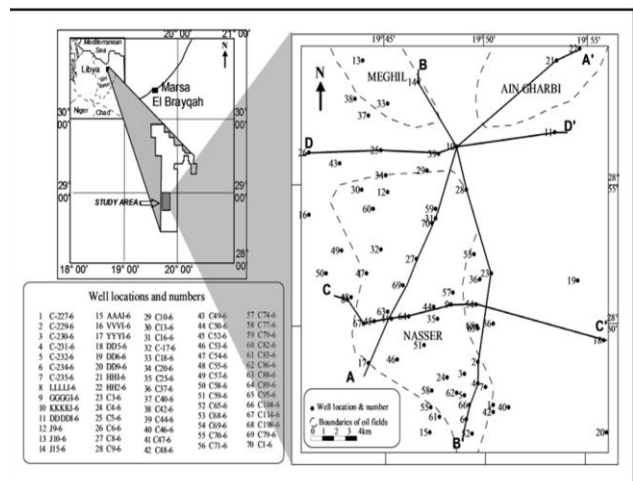
4. تصميم محطة طاقة جيوتحرارية

لتصميم محطة طاقة حرارة جوف أرضية في ليبيا فإننا نحتاج لمعرفة بعض المعلومات والتي تشمل:

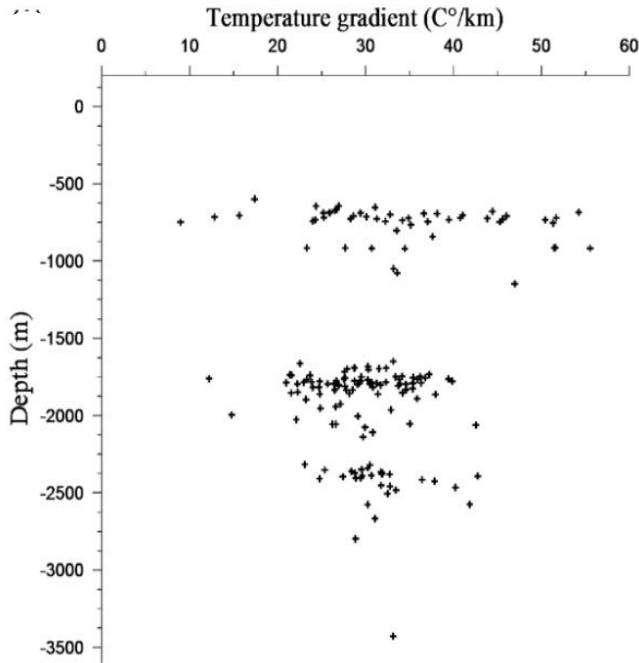
(أ) أماكن العيون الساخنة في ليبيا والتي تتواجد في عدة مناطق في البلاد منها هون ومصراتة ودوفان وودان وغيرها، حيث يمكن إقامة محطة طاقة جيوتحرارية من نوع التبخير الوميضي بالقرب من هذه العيون؛ فعند الحفر إلى أعماق كبيرة يكون الماء عند ضغط ودرجة حرارة عاليين، وعند صعود الماء إلى السطح يتحول جزء كبير من الماء إلى بخار نتيجة لفرق الضغط، يوضح الشكل (3) مخططا لمكونات محطة جيوتحرارية تعمل بتقنية التبخير الوميضي.

(ب) التدرج الحراري الأرضي والذي يختلف من مكان إلى آخر، إلا أنه وبصفة عامة تزداد درجة الحرارة بمقدار 2.7 درجة سلسيوس كلما تم التعمق 100 متر تحت سطح الأرض. يبين الشكل (4) التدرج الحراري الأرضي لمجموعة من الآبار في ليبيا [21].

(ج) تكلفة المشروع، وهي من أهم مخرجات الدراسة لإقامة المحطة، حيث يوجد عدة دراسات لتقدير التكلفة الكلية سواء التكلفة الابتدائية أو تكاليف الصيانة والتشغيل. يوضح الشكل (5) تكلفة الحفر لأربعة أنواع مختلفة من الآبار، حيث يلاحظ أن تكلفة الحفر تتوقف على نوع وعمق البئر: حيث يشير "القطر الصغير" إلى بئر بقطر داخلي لغلاف البئر قدره 0.16 متراً،



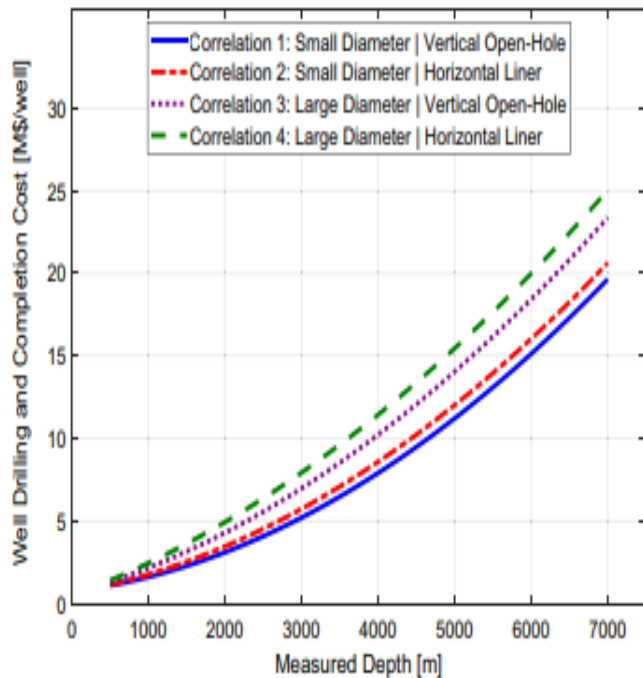
شكل 2. توزيع الآبار في منطقة حوض سرت [21]



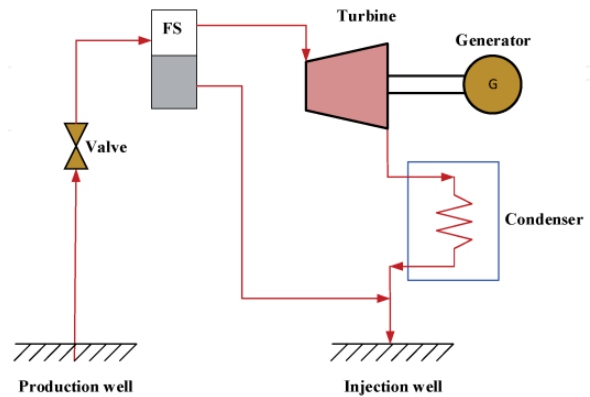
شكل 4. التدرج الحراري مع العمق لمجموعة من الآبار في ليبيا [21]

بينما يشير "القطر الكبير" إلى قطر داخلي للغلاف قدره 0.22 مترًا، كما أن البئر يمكن أن تكون عمودية أو أفقية؛ فالعمودية تستعمل في حالة توفر المياه على أعماق بعيدة (منابع العيون الساخنة) حيث يوجد الماء عند ضغط ودرجة حرارة عاليين ويتم استخراج المياه للاستفادة منه في المحطة البخارية، لذلك تم الإشارة إلى أنها من النوع العمودي المفتوح. أما البئر الأفقية فتستخدم في حالة عدم وجود مياه في مكان المحطة حيث يكون الحفر أفقياً والاستفادة من حرارة الأرض بزيادة المساحة لتبادل الحرارة بين الماء الذي سيتم ضخه في الأنابيب المغلقة ليكتسب درجة الحرارة من الأرض ومن ثم الاستفادة من هذه الحرارة. في هذه الدراسة تم اقتراح البئر العمودية من النوع المفتوح لوفرة منابع العيون الساخنة في أرجاء ليبيا.

(د) طبقات الأرض والبيئة الجيولوجية للمنطقة تعد من الأشياء التي يجب أخذها في الاعتبار عند تصميم المحطة؛ حيث تختلف آلية الحفر وفقاً للتركيب الجيولوجي للمنطقة وأنواع الصخور المختلفة.



شكل 5. علاقة تربط بين تكلفة الحفر والعمق لأربعة آبار مختلفة [22]



شكل 3. مخطط مكونات محطة التبخير الوميضي [14]

5. محاكاة محطة طاقة جيولوجية

تمت عملية محاكاة لمحطة طاقة جيولوجية لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام النموذج:

"Geothermal Energy for the Production of Heat and Electricity Economically Simulated" (GEOPHIRES)

وهو برنامج مفتوح المصدر يحاكي الإنتاج الاقتصادي للحرارة

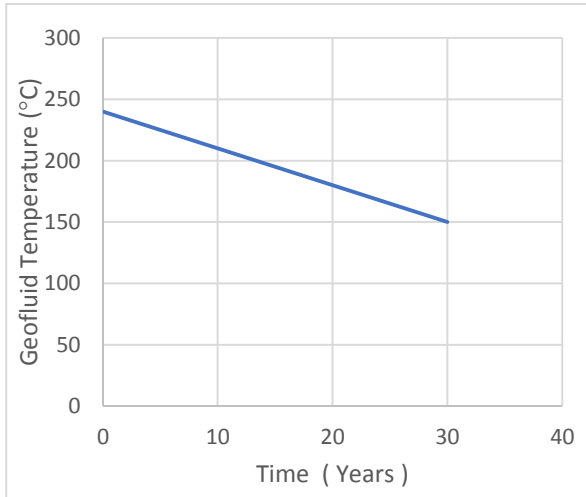
- معدل التدفق لبئر الإنتاج الواحدة 55 كيلوجرام في الثانية.
- ضغط صمام التمدد (المبخر): 500 كيلو باسكال.
- ضغط البخار الخارج من التوربين: 10 كيلو باسكال، بمعامل كسر جفاف: 0.98.
- درجة حرارة حقن الماء: 50 درجة سلسيوس.
- المحطة من نوع محطات البخار الوميضي.

6. النتائج

تم الحصول على العديد من المخرجات من هذه المحاكاة والدراسة ومن أهمها:

6-1 الانخفاض في درجة حرارة البئر

بلغت درجة حرارة قاع البئر عند العمق 4600 مترًا حوالي 250 درجة سلسيوس، كما كان مقدار الانخفاض في درجة الحرارة على مدى عمر المشروع كما هو موضح في الشكل (7). حيث يلاحظ أن درجة حرارة الماء الخارج من بئر الإنتاج تكون أكبر ما يمكن خلال الخمس سنوات الأولى، حيث تتراوح ما بين (225.5 - 240) درجة سلسيوس، ومن ثم تتناقص إلى أن تصل عند منتصف عمر المشروع إلى حوالي 195 درجة سلسيوس، وصولاً إلى 150 درجة سلسيوس عند نهاية عمر المحطة بعد نحو 30 سنة.



شكل 7. الانخفاض في درجة الحرارة مع الزمن

6-2 قدرة المضخة وعلاقتها بعمر المحطة

إن القدرة التي تتطلبها المضخة ليست ثابتة خلال فترة عمل المحطة، فهي تكون منعدمة عند بداية عمل المحطة، ومن ثم تزداد مع مرور الوقت وذلك بسبب انخفاض درجة حرارة الماء الذي يخرج من البئر؛ وبالتالي انخفاض الضغط مما يؤدي إلى انخفاض معدل التدفق للبئر، لذلك وللقضاء على هذه المشكلة يمكن استخدام المضخة إضافية، والتي تحافظ على معدل التدفق ثابت خلال فترة عمر المحطة. من خلال الشكل (8)، يتضح أنه لا يحتاج إلى المضخة خلال الخمس سنوات الأولى من عمر المحطة وصولاً إلى السنة السادسة التي تدخل فيها المضخة بقدرة 0.15 ميغا وات، تزداد قدرة المضخة مع مرور الزمن إلى أن تصل إلى 1.51 ميغا وات عند منتصف عمر المحطة، وتصل إلى أقصى قدرة لها عند نهاية عمر المشروع لتبلغ 3.4 ميغا وات.

والكهرباء باستخدام مصدر الطاقة الجيوحرارية. كُتب البرنامج بشكل أساسي بلغة (FORTRAN 90) ثم تم تطويره باستخدام كلا من الماتلاب ثم البايثون، ويشمل البرنامج المعلمات الآتية [23]:

- معلمات المورد (التدرج الحراري الأرضي، الموصلية الحرارية للصخور، كثافة الصخور)
- معلمات هندسية (عمق البئر، قطر البئر، عدد آبار الإنتاج والحقن)
- معلمات الخزان (فصل الآبار، مقاومة الخزان، نموذج انخفاض المياه)
- المعلمات المالية والتشغيلية (عمر المشروع، عامل القدرة، معدل الفائدة)
- معلمات تكلفة رأس المال (تكاليف الحفر، تكاليف تحفيز الخزان)
- معلمات تكلفة التشغيل والصيانة (تكاليف صيانة حقل الآبار، تكاليف المياه المستخدمة)
- كما يشمل هذا النموذج عدة معلمات للتحسين من جودة المحطة. ويوضح الشكل (6) عينة من نتائج البرنامج.

إن دراسة العمق المقترح للتصميم تطلب أخذ بعض القياسات لدرجة الحرارة داخل مدينة مصراتة فمن واقع زيارات ميدانية وأخذ بعض القياسات لبئرين، وُجد أنه عند عمق 320 متر بلغت درجة حرارة الماء الخارج من البئر حوالي 30 درجة سلسيوس في منطقة الدافئة، أما في مصنع النسيم للصناعات الغذائية مصراتة فبلغت درجة الحرارة 50 درجة سلسيوس عند عمق 700 متر، ومن واقع زيارة ميدانية للعيون الساخنة في مدينة مصراتة ومنها (فوار السكيرات)، تم قياس درجة حرارة الماء في الفوار فُوجد أنها حوالي 75 درجة سلسيوس، وحيث أن العمق الذي تأتي منه هذه الحرارة مجهول فيصعب تقدير التدرج الحراري لها.

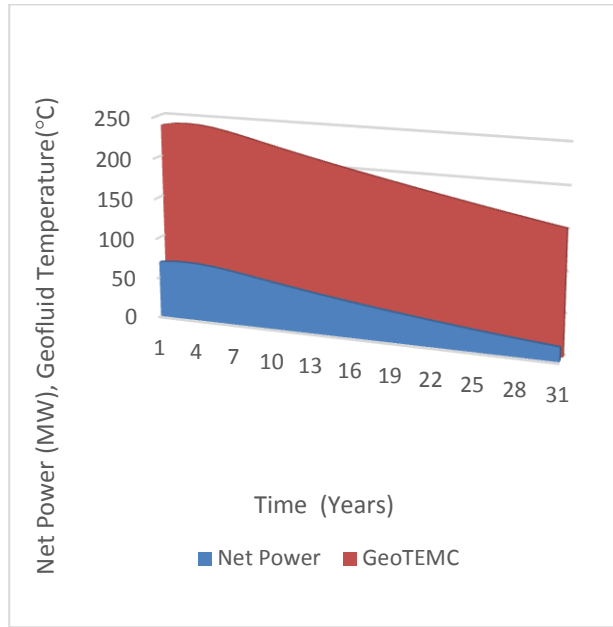
Total Capital Cost = 364.33 M\$
Wellfield Cost = 144.57 M\$
Surface Plant Cost = 193.26 M\$
Exploration Cost = 8.89 M\$
Field Gathering System Cost = 11.57 M\$
Stimulation Cost = 6.04 M\$
Total O&M Cost = 7.18 M\$/year
Wellfield O&M Cost = 2.17 M\$/year
Surface Plant O&M Cost = 4.72 M\$/year
Make-Up Water O&M Cost = 0.29 M\$/year

شكل 6. عينة من نتائج النموذج المستخدم في الدراسة.

فيما يلي بعض المنحلات والفرضيات التي تم إدخالها في النموذج:

- التدرج الحراري الأرضي والذي يبلغ 50 درجة سلسيوس لكل كيلومتر.
- عمق البئر حيث بلغ 4600 مترًا تحت مستوى سطح الأرض. علماً بأن أعماق بئر حرارية تستخدم لأغراض الطاقة موجودة في فنلندا بعمق 6400 مترًا بينما أعماق بئر في الصين حتى سنة 2023 بعمق 4700 مترًا، وكذلك آبار الطاقة الجوف أرضية المنتشرة حول العالم من النوع العميق يتراوح عمقها من 3000 إلى 5000 مترًا [23].

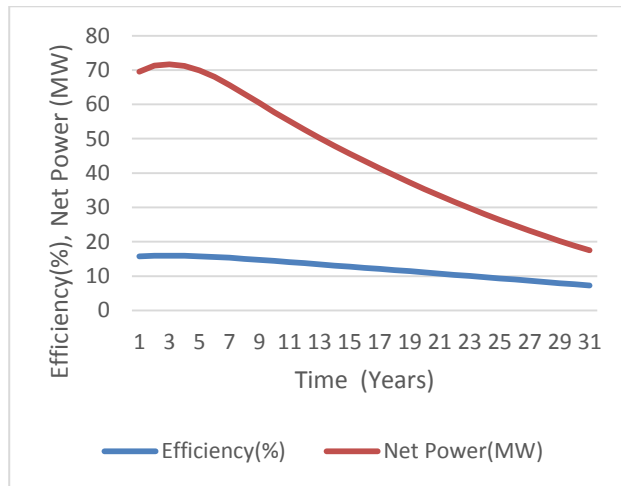
بعض الدراسات إلى أن البئر تحتاج إلى فترة سكون لاستعادة التوازن الحراري للبئر [25] .



شكل 10. العلاقة بين درجة حرارة البئر وصافي القدرة المنتجة خلال فترة عمل المحطة

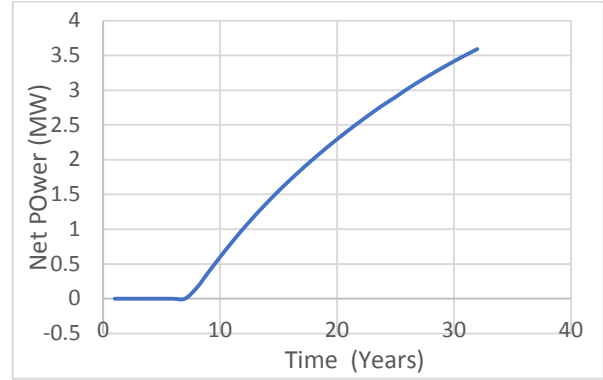
5-6 صافي القدرة وعلاقته بكفاءة المحطة

يقدر إجمالي قدرة المحطة بواسطة نموذج المحاكاة حوالي 71 ميغاوات بكفاءة تصل إلى 16% تقريباً، يوضح الشكل (11) العلاقة بين صافي القدرة المنتجة والكفاءة خلال فترة عمل المحطة. يلاحظ من خلال المخطط أن أقصى قدرة وأقصى كفاءة للمحطة تكون في بداية عمر المشروع خلال الخمس سنوات الأولى، ثم يبدأ الانخفاض إلى أن يصل صافي القدرة إلى نصف قيمته القصوى بعد 20 سنة من عمر المشروع، كما أن الكفاءة تنخفض إلى 11% تقريباً عند نفس عدد السنوات، ومن ثم يستمر الانخفاض وصولاً إلى نهاية عمر المشروع؛ ليصبح صافي القدرة المنتجة حوالي 19 ميغاوات وبكفاءة نحو 7.6%.



شكل 11. العلاقة بين صافي قدرة المحطة والكفاءة مع مرور الزمن

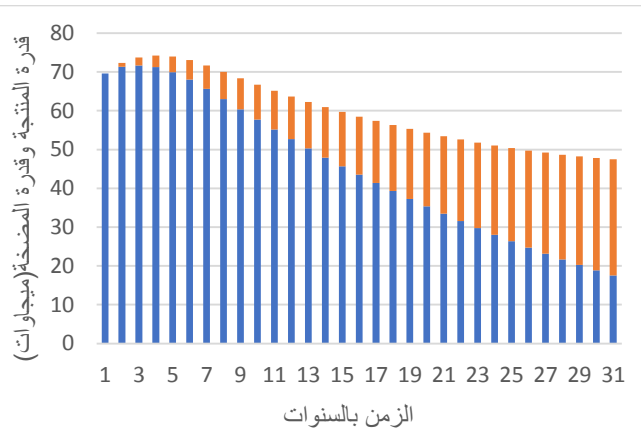
6-6 التكلفة الكلية للمحطة



شكل 8. تطور قدرة الضخ المطلوبة مع تقدم عمر المحطة

3-6 صافي قدرة المحطة خلال عمرها الافتراضي

إن العمر التقديري لهذه المحطة يلعب دوراً مهماً في قيمة صافي القدرة والكفاءة التي يتم الحصول عليها طوال فترة عمل المشروع، حيث أن صافي القدرة يكون أقصى ما يمكن عند بداية عمل المحطة وخلال 5 السنوات الأولى من عمر المشروع، كما هو موضح في الشكل (9). يبين الشكل صافي قدرة المحطة خلال فترة عملها، والتي تكون 71 ميغاوات في بداية عمل المحطة، ومن ثم تنخفض لتصل إلى حوالي 46.5 ميغاوات عند منتصف عمر المشروع، ومن ثم تستمر في الانخفاض إلى أن تصل 19 ميغاوات عند نهاية عمر المحطة.



شكل 9. صافي القدرة المنتجة مع تقدم عمر المشروع

4-6 انخفاض درجة حرارة البئر وعلاقته بصافي قدرة المحطة

من المعلوم أن درجة حرارة البئر تنخفض مع مرور الزمن؛ مما يؤثر على صافي خرج المحطة وبالتالي، فإنه كلما انخفضت درجة حرارة البئر؛ انخفضت تبعاً لها صافي القدرة المنتجة خلال فترة عمل المحطة، كما هو موضح في الشكل (10). يتضح من خلال هذه العلاقة أن صافي القدرة المنتجة للمحطة تتناسب مع درجة حرارة البئر فعندما كانت درجة حرارة البئر قرابة 245 درجة سلسيوس؛ بلغ صافي القدرة المنتجة حوالي 71 ميغاوات، ثم بدأت في الانخفاض تدريجياً، مروراً بمنتصف عمر المحطة حيث كانت درجة الحرارة حوالي 200 درجة سلسيوس؛ بصافي قدرة بلغ 46.5 ميغاوات، لتكون درجة الحرارة عند نهاية عمر المحطة حوالي 150 درجة سلسيوس؛ وبصافي قدرة بلغ حوالي 19 ميغاوات. إن انخفاض درجة الحرارة في البئر يأتي نتيجة فقد الاتزان الحراري للبئر من خلال تبادل الحرارة مع الماء المحقون، وتشير

4- "World's Leading Electricity Producers 2022 | Statista". <https://www.statista.com/statistics/1263669/Electricity-Generation-Worldwide-Country/>

5- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., and Tasa, D. G., Earth: An Introduction to Physical Geology, Global Edition. Pearson Higher Ed, 2016.

6- Ozbek, B.B., Aydın, H., and Merey, S., (2024). Ground source cooling to increase power generation from geothermal power plants. Energy, 292(292) (2024) 130649, pp.130649–130649.

7- Eshtaiwi, Saleh., et al. "The Impact Of Residential Optimally Designed Rooftop PV System On Libya Power Shortage Case Study", Journal Of Energy, 2022.

8- الأمين ف.، الضراط ه. & العجيل ع. ا. (2024). قياس شدة الضوضاء ودرجة حرارة العادم لمحرك ديزل يعمل بوقود الديزل الحيوي. The International Journal Of Engineering & Information Technology (IJEIT), 10(1), 90–93.

9- Beckers, F., McCabe, K., " GEOPHIRES V2.0: Updated Geothermal Techno-Economic Simulation Tool ". Dissertation, 15013 Denver West Parkway, Golden, CO 80401, USA, 2019.

10- Geothermal Energy (2020a) Solarabic Available At: <https://solarabic.com/learn/2019/05/geothermal-energy-explained/> (Accessed: 20 March 2024).

11- Ismail, B.I., "Introductory Chapter: ORC Power Generation Technology Using Low-Temperature Geothermal Energy Resources: A Conceptual Case Study", Intechopen, 2022. DOI: 10.5772/Intechopen.101577.

12- Population of Libya 1950-2024 & Future Projections. [online] database.earth. Available at: <https://database.earth/population/libya#:~:text=The%20country%20has%20a%20population%20density%20of%201548> [Accessed 14 Aug. 2024].

13- International Renewable Energy Agency IRENA. Available At: <https://www.irena.org/> (Accessed: 20 March 2024).

14- Elsanusi, O., Elayeb, M., Aburwais, M., and Shetwan, M. (2023). Diesel Engine Fuel and Fuel Emulsion Influence on Diesel Engine Performance and Emission. In: IntechOpen eBooks. IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002405>

15- Kote H (ed.) (2024) Diesel Engines - Current Challenges and Future Perspectives. IntechOpen. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110936>

16- Osama Elsanusi (2017). Cold Flow Improvement of Biodiesel and Investigation of the Effect of Biodiesel Emulsification on Diesel Engine Performance and Emissions. [online] Lakehead University. Available at: <https://knowledgecommons.lakeheadu.ca/handle/2453/4111>.

17- Elsanusi OA, Roy MM, Sidhu MS. Experimental investigation on a diesel engine fueled by diesel-biodiesel blends and their emulsions at various engine operating

يربط نموذج (GEOPHIRES) بين عدة معلمات منها ما يخص التكلفة المتضمنة لجميع نواحي المشروع، ومنها ما يتعلق بدورة الحياة الاقتصادية لتقييم الأداء الفني والاقتصادي للطاقة الجيوحرارية، حيث تضمنت المخرجات حساب التكاليف الكلية للمشروع، سواء الأولية منها، أو التشغيلية، وتكاليف الصيانة. نلاحظ أن التكلفة الكلية التقديرية للمشروع بلغت 364.33 مليون دولار مقسمة كما يلي:

- تكلفة حفر الآبار: 144.57 مليون دولار.
- تكلفة معدات وأجزاء المحطة: 193.26 مليون دولار.
- تكلفة الاستكشاف والتنقيب: قُدر بحوالي 8.89 مليون دولار.
- تكلفة التجميع والتركيب: 11.57 مليون دولار.
- تكلفة التنشيط والتحفيز: 6.04 مليون دولار.
- إجمالي تكلفة التشغيل والصيانة: 7.18 مليون دولار سنوياً مقسمة إلى:
 - i. تكلفة تشغيل وصيانة الآبار بحوالي 2.17 مليون دولار سنوياً
 - ii. تكلفة تشغيل وصيانة أجزاء المحطة بحوالي 4.72 مليون دولار سنوياً
 - iii. تكلفة الماء المضاف الذي يكون بديل لماء البئر عند الحقن بحوالي 0.29 مليون دولار سنوياً.

7. الاستنتاجات

عند إجراء المحاكاة باستخدام النموذج على محطات تشتغل بالطاقة الجيوحرارية تم التوصل إلى عديد الاستنتاجات ومن أهمها:

- في بداية عمر المحطة لا حاجة للمضخة لضخ الماء إلى أعلى؛ وذلك لأن معدل التدفق يكون بالمعدل المطلوب خلال أول خمس سنوات من بداية عمل المحطة؛ بسبب الضغط العالي، ومن ثم يبدأ في الهبوط مع مرور الزمن، وللحفاظ على معدل تدفق مستمر عند نفس القيمة؛ يتم الاستعانة بمضخة، وتزداد قدرة المضخة مع مرور الزمن. حيث يكون صافي القدرة المنتجة أعلى ما يمكن عند بداية عمل المحطة، ومن ثم تبدأ في الانخفاض مع مرور الزمن.
- بلغت أقصى كفاءة للمحطة 16% في الخمس سنوات الأولى من تاريخ عملها، ومن ثم بدأت في الانخفاض مع مرور الزمن.
- تعتبر محطة الطاقة الجيوحرارية صديقة للبيئة ولا يصدر عنها ملوثات تذكر مقارنة بالمحطات التقليدية.
- يمكن إقامة محطة طاقة جيوحرارية من نوع محطات التبخير الومبضي في ليبيا؛ إذا توفرت الإمكانيات المالية والبشرية لذلك. قدرت التكلفة التقديرية الكلية لمشروع الإنتاج في المحطة بنحو 364 مليون دولار. وقدّرت تكلفة الكهرباء المنتجة بنحو 7.2 سنت دولار لكل كيلو وات ساعة.
- تقدر الطاقة المنتجة من المحطة المقترحة بنحو 1 تيرا وات ساعة، وهذا ما سيوفر نحو 7 مليون طن ثاني أكسيد كربون مكافئ.

المراجع

1- الطاهر الزيتوني (2018)، تطور استهلاك الطاقة في الدول الأعضاء وآفاقه المستقبلية. مجلة النفط والتعاون العربي (المجلد الرابع والأربعون-العدد 166)

2- ياسر نصار (2006)، هندسة الطاقة الشمسية، جامعة سبها، الطبعة الأولى، دار الكتب الوطنية – بنغازي.

3- Prinsloo, G.J., Dobson, R.T. (2015). Solar Tracking. Stellenbosch: Solarbooks. ISBN 978-0-620-61576-1, P 1-542.

conditions. Appl Energy 2017;203:582–93.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.052.

18- Z. Yusupov , M. Almakhtar, "Geothermal Power Generation", Geothermal Energy, 2022. Doi: 10.5772/Intechopen.97423.

19- محمد الحنفي (2022) أبحاث ودراسات ميدانية تطبيقية في جغرافيا وموارد مياه حوض إقليم الجبل الأخضر في ليبيا " – منشورات جامعة عمر المختار البيضاء-.

20- صالح الباروني، عمر امحمد سالم، الهادي سليمان الهنشير "المياه الجوفية الساخنة في شمال غرب الجماهيرية كمصدر من مصادر الطاقة" مجلة الطاقة والحياة العدد الثالث، يونيو 1994م.

21- Al-Rashed, A., et al. "The Geothermal Regime In Sirt Basin, Libya The Geological Role And Heat Flow Studies. ". International Journal of Geosciences 2019

22- Beckers, K. .F, " Low-Temperature Geothermal Energy: Systems Modelling, Reservoir Simulation, and Economic Analysis", Dissertation, Cornell University, 2016.

23- Beckers, K. F, et al," Introduction GEOPHIRES V1.0: Software Package Levelized Cost of Electricity and/or Heat from Enhanced Geothermal Systems" Introducing GEOPHIRES V1.0: Software Cornell University, Department Of Chemical Engineering, West Virginia University, Morgantown,2013.

24- Ma, Y. (2023). Deep geothermal resources in China: Potential, distribution, exploitation, and utilization. Energy geoscience, pp.100209–100209.
https://doi.org/10.1016/j.engeos.2023.100209.

25- Jia, G., Ma, Z.Y., Xia, Z., Zhang, Y., Xue, Y.Y., Chai, J. and Jin, L. (2022). A finite-volume method for full-scale simulations of coaxial borehole heat exchangers with different structural parameters, geological and operating conditions. Renewable Energy, 182(182 (2022) 296_313), pp.296–313. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.01