الفصل السابع

طاقة باطن الأرض الحرارية

7-1 طاقة الحرارة الجوفية Geothermal Energy :

هناك تحليلان يتعلقان بكون الأرض خزاناً حرارياً هائلاً:

الأول : هو أنها كانت كتلة غازية ملتهبة، ثم بدأت تبرد مع مرور الزمن حتى بردت قشرتها وتصلبت ، وذلك بنتيجة ملامستها الفضاء الخارجي ، أما بداخلها فاحتفظت بدرجات حرارة عالية جداً.

والثاني : هو أن حرارة الأرض هي الحرارة الناتجة من تحلل المواد المشعة الموجودة بمقادير صغيرة في الصخور، نتيجة لتحلل عناصر الراديوم واليورانيوم والتوريوم والبوتاسيوم وغير ذلك من المواد المشعة الموجودة بنسب متفاوتة في هذه الصخور، ويظهر النشاط الإشعاعي بشكل واضح في صخور الغرانيت (الصخور النارية).

إن درجة حرارة أكثر من 95% من كتلة كوكب الأرض الداخلية تزيد عن 1000 °C وهناك تدفق حراري مستمر من داخل الأرض باتجاه القشرة الأرضية وتقدر كمية الحرارة المتسربة سنوياً من باطن الأرض بحوالي 10^{12} [J]، أي بحدود 2,5 مرة من قيمة استهلاك العالم من الطاقة ، علماً أن معظم هذه الحرارة تتسرب الى الفضاء دون الإستفادة منها ، في حين يمكن لهذه الطاقة الجيوحرارية أن تشكل جزءاً هاماً من الطاقة البديلة المستدامة . الا أنه توجد في بعض المناطق من القشرة الأرضية كميات حرارة مركزة وقريبة من سطح الأرض، حيث تقوم المياه الجوفية بنقل هذه الحرارة على شكل ينابيع ساخنة أو حتى تدفقات بخار، يستفاد منها في التسخين أو في توليد الطاقة الكهربائية.

لقد بلغت في العام 1990 كمية الطاقة الكهربائية المولدة من الحرارة الجوفية على مستوى العالم حوالي 6[GW] ، وهذه الكمية لا تشكل سوى نسبة متواضعة من الطاقة الكهربائية الكلية المُولَّدة من المصادر الأخرى ، إلا إنها تعد مصدراً هاماً للطاقة في بعض المناطق ، وهناك حوالي 4[GW] أخرى تم استثمارها أيضاً في استخدامات مباشرة غير توليد الطاقة الكهربائية، ومجالات استخدام

الطاقة المُتأتية من هذا المصدر تُعَدُّ ملائمة لأغراض التدفئة والزراعة ومختلف العمليات الصناعية، الجدول (7-1).

جدول (7-1): مصادر الطاقة الجوفية المستثمرة حتى نهاية القرن العشرين

القارّة	الطاقة الكهربائية المولدة (MW_e)	الاستخدام المباشر (MW_e)
أمريكا		
الولايات المتحدة	2800	160
المكسيك	680	8
السلفادور	95	–
نيكاراغوا	35	–
غرب الباسيفك (المحيط الهادئ)		
اليابان	228	970
الصين	11	610
تايوان	3	10
الفلبين	894	–
أندونسيا	140	–
نيوزلندا	280	200
أوربا، آسيا، إفريقيا		
الاتحاد السوفيتي السابق	11	340
ايسلندا	39	480
فرنسا	4	270
إيطاليا	545	210
المجَر	–	375
تركيا	21	70
كينيا	45	–
الدول الأخرى	3	240
المجموع	5834	4123

وعلى الرغم من أن بعض المختصين يعتقدون أن الطاقة الحرارية الجوفية غير متجددة – وهذا هو الغالب – بسبب تراجع قيمة درجة حرارة بعض الينابيع الحارة وتوقف نفثها البخار، فإنها تشترك مع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى بكونها طاقة نظيفة وطبيعية وتختلف عن مصادر الطاقة التقليدية المخزونة في باطن الأرض كالنفط أو الوقود النووي. ويعود تاريخ استغلال الطاقة الحرارية

الجوفية إلى العصر الروماني الذي كانت فيه المياه الحارة تستخدم للأغراض الطبية والاستخدامات المنزلية والاستحمام . أمّا سكان نيوزلندا الأصليون ، وقبل وصول الأوربيين إليها، فكانوا يعتمدون على البخار المندفع من الأرض لأغراض الطبخ والتدفئة والإستحمام والغسل والمعالجة.

وفي القرن التاسع عشر أُمكن ، بفضل التقدم التقني ، استغلال هذه المصادر بصورة علمية ، ففي منطقة توسكَني (Tuscany) استخدمت الطاقة الحرارية الجوفية بدلاً من حرق الخشب في عمليات تحضير مركبات البورون والأمونيوم ، وقد بدأ توليد الطاقة الكهربائية من هذا المصدر عام 1904 من قِبل الإيطالي كونتي (Conti)، وشهد عام 1913 تشييد أول محطة توليد باستطاعة $250[kW]$ في منطقة لارديرللو (Larderllo) التي تعتبر كبداية لفعاليات جديدة ، وتبلغ استطاعة محطة لارديرللو الآن $420\ MW$ ، ومن الممكن أن تصل إلى $850\ [MW]$.

ويعتبر حقل ويراكاي (Wairakei) في نيوزلندا الحقل الثاني الذي استثمر في العام 1950، وتبعه حقل في شمال كاليفورنيا بدأ بتوليد الطاقة الكهربائية في العام 1960 باستطاعة قدرها $2800[MW]$ وهو الآن من أكثر الحقول تطوراً.

أمّا الدول التي استثمرت الطاقة الجوفية حتى الآن فهي : إيطاليا، وإيسلندا، واليابان ، والفيلبين ، والمكسيك . والدول المرشحة لاستغلال هذه الطاقة هي :السلفادور، ونيكاراغوا، وكوستاريكا، والاكوادور، وتشيلي . ويقدر حالياً خرج المحطات الجيوحرارية حول العالم بحوالي GW 10 وهذه الإستطاعة تكافئ استطاعة 20 محطة توليد ضخمة تعمل بالفحم ، إن معظم هذه المحطات مركب في الولايات المتحدة الأمريكية بولايتي "كاليفورنيا و كايسَر" حيث تُنتج عدة محطات للطاقة الجيوحرارية هناك مايعادل إنتاج محطة نووية ضخمة ، وبصورة عامة بلغت نسبة الطاقة المنتجة من مصادر جيوحرارية حوالي 2% من قيمة الطاقة المنتجة من مصادر الطاقات المتجددة في بداية القرن الحادي والعشرين .

أما الدول التي استخدمت الطاقة الحرارية الجوفية مباشرة لأغراض التدفئة والزراعة فهي اليابان ، والصين ، وجورجيا، وداغستان . وتُعد المجّر وآيسلندا الدولتين الرئيستين اللتين استغلتا الطاقة الجوفية في مجال الاستخدام المباشر، إذ تؤمن آيسلندا55% من استهلاكها الأساسي للطاقة من هذا المصدر حيث يُزوّد حوالي 87% من المنازل بالحرارة الجيوحرارية، وقد أسهمت كذلك البيوت المحمية ومزارع الأسماك المُدفّأة بهذه الحرارة بزيادة الإنتاج الغذائي علماً أن آيسلندا تولد معظم طاقتها الكهربائية من محطات التوليد المائية والجيوحرارية . ففي العام 2004 تم تركيب حوالي $200\ MW$

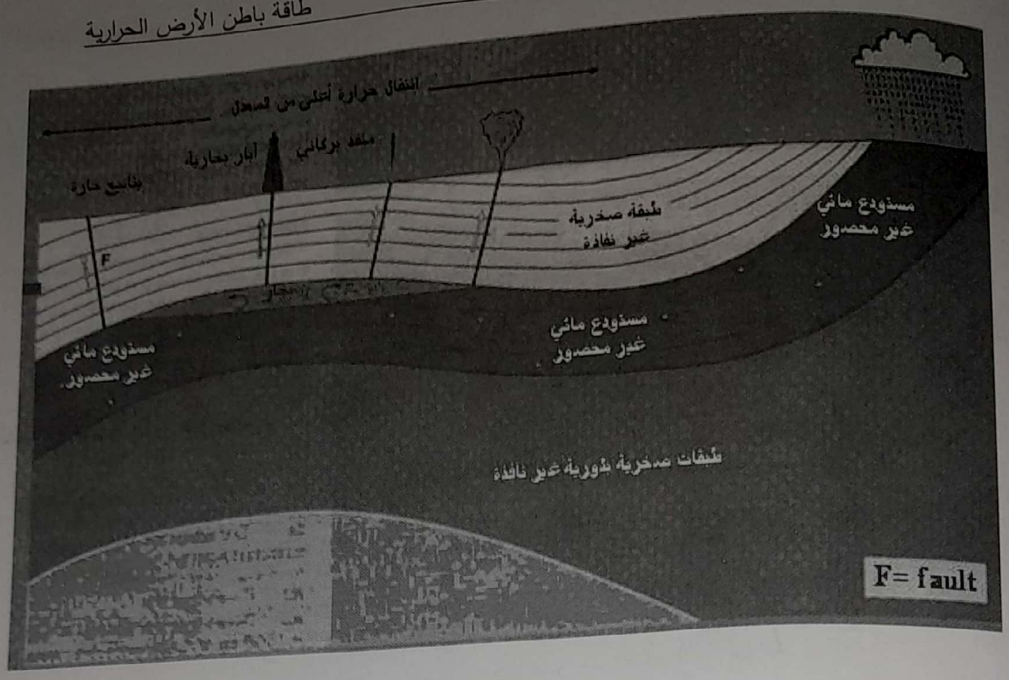
من المصادر الجيوحرارية والتي غطت حوالي 15% من استهلاك آيسلندا من الطاقة وفي العام 2008 بلغ مجموع استطاعة التوليد المركبة فيها من محطات الطاقة الجيوحرارية ما قيمته 575 *MW* وتم إنتاج ما قيمته 4038 *GWh* أي ما يعادل 24,5% من إنتاج الكهرباء الكلي لهذه الدولة. إضافة إلي أنه تم تطوير تِقنيات متقدمة في هذا المجال في بعض الدول الأوربية ، وتُستغل الطاقة الجيوحرارية أيضاً في المناطق التي لا يوجد فيها براكين نشطة-ألمانيا مثلاً- وبغض النظر عن هذه المناطق فإن درجة حرارة الأرض تزداد بحوالي 3°C كل 100m عمق تحت سطح الأرض في أوروبا .

7-2 خصائص مصادر الطاقة الجوفية:

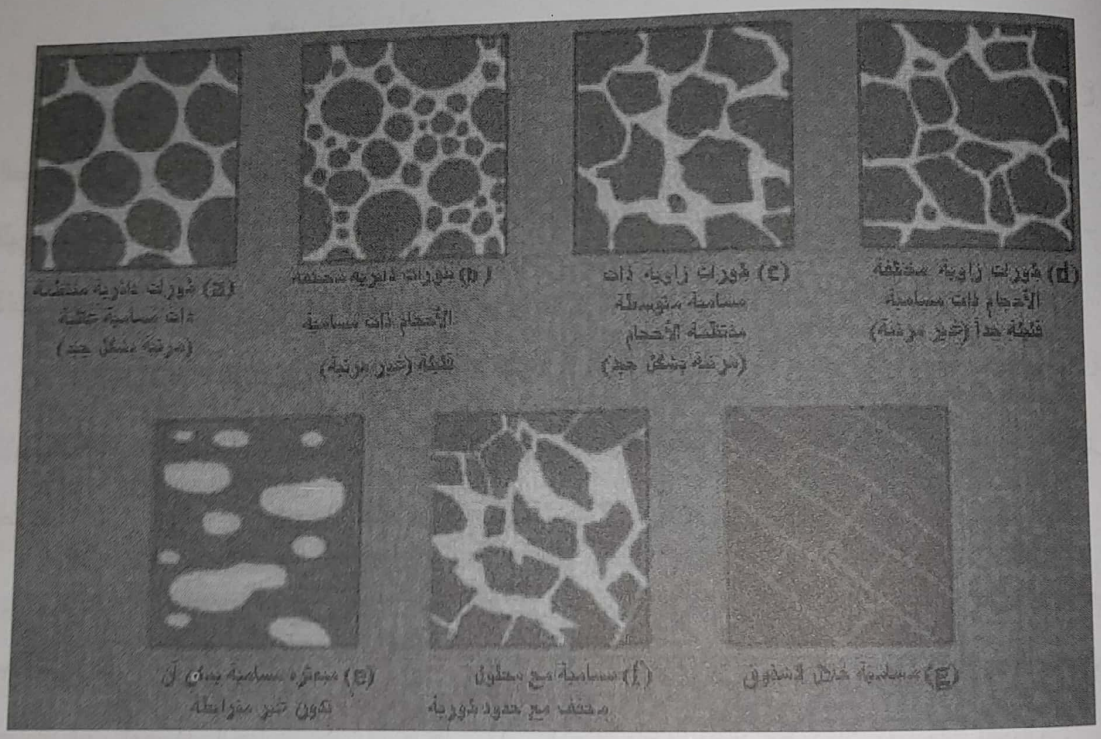
هناك خصائص مميزة لمصادر الطاقة الجوفية بأنواعها، الشكل (7-1) ، وهي وجود :

1- طبقة مائية صخرية (Aquifer) يُمكن الوصول إليها بحفر الآبار.
2- طبقة صخرية عليا غير نفوذة (Cap rock) تحجز الماء .
3- مصدر حراري .

والطبقة الصخرية المائية (Aquifer) الطبيعية تتشكل من صخور مسامية تستطيع خزن الماء بداخلها، والصخور المبينة بنيتها في الشكل (7-2 c،a) هي صخور ذات مسامية كبيرة ومتوسطة، وبالتالي تكون عالية النفاذية، لكن الصخور في الشكل (7-2 d،b) فهي ذات مسامية ونفاذية قليلتين. أما الصخور في الشكل (7-2 e) فهي ذات نفاذية قليلة على الرغم من أن لها مسامية كبيرة كونها غير مترابطة، لكن الصخور في الشكل (7-2 f) فهي ذات مسامية ونفاذية كبيرتين . والنفاذية الناتجة عن التفتيت كما هو موضح بالشكل (7-2 g) هي مهمة في حقول الحرارة الجوفية.



شكل (7-1):أحد مصادر الطاقة الحرارية الجوفية



شكل (7-2): بعض أنواع الصخور

ويُعد مُعامِل التوصيل الهيدروليكي (K_w) للصخور مقياساً جيداً للنفاذية، وينص قانون دارسِيْ (Darcy's Law): أن سرعة المائع (V) عبر مادة مسامية تتناسب طرداً مع فرق الضغط المسبب للجريان :

$$V = \frac{H}{L}.K_w \qquad (7.1)$$

حيث إن :

H : هو الارتفاع المؤثر للماء والمسبب للجريان ويقاس بالمتر.

والنسبة H/L : هي فرق الضغط أو الفرق الهيدروليكي ، وهو التغير في الارتفاع المؤثر (H) لمسافة (L) على طول اتجاه الجريان .

وحجم الماء (Q) المار خلال واحدة الزمن عبر سطح معين(A) هو:

حاصل ضرب السرعة في السطح . ويمكن كتابة قانون دارسي كما يلي:

$$Q = \frac{H}{L}.K_w.Ax \qquad (7.2)$$

حيث إن K_w :هو الحجم المار خلال متر مربع واحد في وقت معين وتحت فرق ضغط هيدروليكي واحد .

ويبين الجدول (7–2) بعض المعلومات عن المسامية والتوصيل الهيدروليكي لبعض أنواع الصخور، مع ملاحظة أن أكبر قيم تكون للصخور غير الصلبة وغير المصقولة كمثل الرماد البركاني المنتشر عادة في المناطق البركانية، وهذه القيم كبيرة أيضاً لبعض الأحجار الكلسية والرمال ذات النفاذية العالية.

في الطبقات الصخرية المائية المحصورة ، (الشكل7-1) ، يكون ضغط السائل تحت نقطة الاستخراج كبيراً ، وذلك لوجود طبقة من الصخور تمنع السوائل من التسرب إلى أعلى، كالصخور الطينية والفخار والصخور غير المُفَتتة .

ومن المتطلبات الرئيسة للمصدر الجوفي القابل للإستثمار تَوفُّر المصدر الحراري . ففي المناطق ذات المحتوى الحراري الكبير تكون الحرارة البركانية غزيرة ، أما في المناطق قليلة المحتوى الحراري فإن المصدر الحراري يكون شحيحاً . وفي هذه المناطق يوجد مصدران رئيسيان للحرارة :

المصدر الأول هو الواقع في الأحواض الرسوبية التي تسمح فيها المنطقة الصخرية للماء بالنفاذ إلى أعماق تجعلها حارة وجاهزة للإستغلال .

والمصدر الثاني هو الواقع في مناطق الصخور الحارة الجافة التي يكون فيها التوليد الطبيعي للحرارة كبيراً، ولكنها تحتاج إلى تصنيع منطقة صخرية مائية بتفتيت الصخور ليكون المصدر قابلاً للإستثمار .

الجدول(7-2) النفاذية والتوصيل الهيدروليكي لبعض الصخور

المادة	النفاذية (%)	التوصيل الهيدروليكي (متر/يوم)
طين	60 – 45	$<10^{-2}$
غرين	50 – 40	$10^{-2} - 1$
رمل ورماد بركاني	40 – 30	1 – 500
حصى	35 – 25	10000 – 500
صخور رسوبية متكونه من :		
أ- حجر طيني	15 – 5	$10^{-8} - 10^{-6}$
ب- حجر رملي	30 – 5	$10^{-4} - 10$
جـ- حجر جيري	30 – 0.1	$10^{-5} - 10$
صخور بللورية متكونة من :		
أ- حمَم بركانية متحجرة	1 – 0.001	0.003 – 0.03
ب- غرانيت	1 – 0.0001	0.003 – 0.03
جـ- صخر صفائحي	1 – 0.001	$10^{-8} - 10^{-5}$

3-7 مصادر الحرارة/الموائع المتعلقة بالنشاطات البركانية:

تتولد الحرارة عادة من تصلب الصخور الذائبة والتي لا تكون دائماً موجودة تحت الحقل الحراري الجوفي كما في الشكل (7-3) ، ومن المستغرب أحياناً عدم انفجار الصخور الذائبة تحت البراكين ، لكنها تكون قد وصلت إلى حالة تَوازُن مقدرة الطفو، كون كثافتها تتساوى مع كثافة الصخور المحيطة بها. وهنالك عاملان يعملان على كبح الصخور الذائبة الصاعدة من الأسفل .

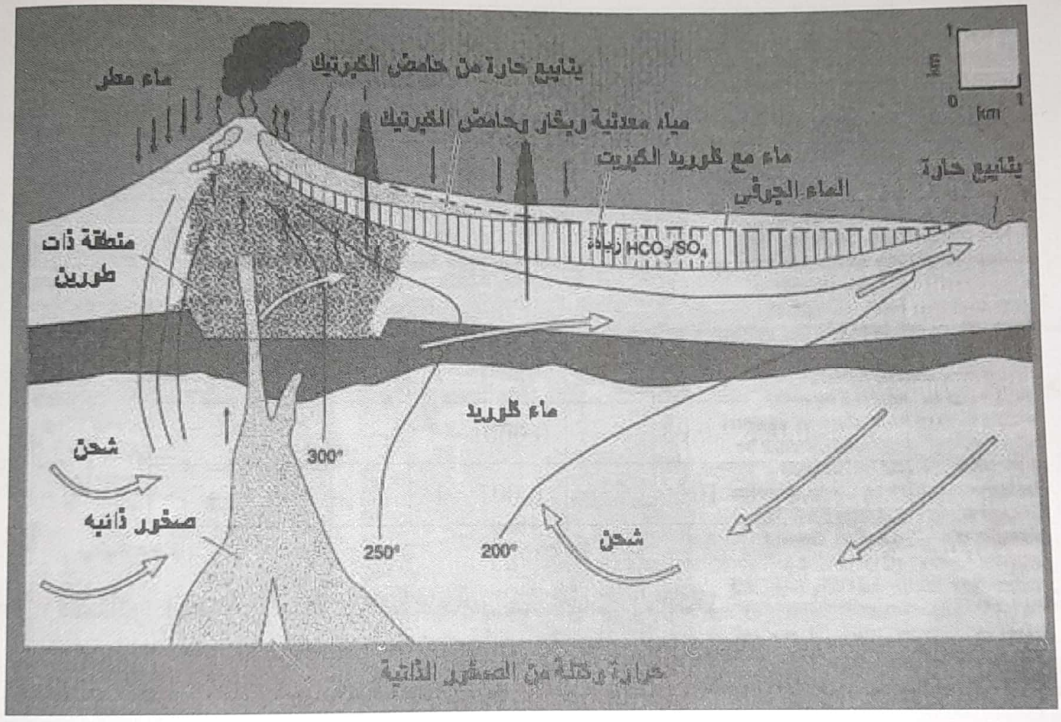
العامل الأول :

يقل الضغط مع صعود الصخور الذائبة إلى الأعلى ، وهذا يساعد على فصل هذه الصخور عن الغازات المذابة الضائعة، وبذلك تزداد كثافة الصخور الذائبة المتبقية.

والعامل الثاني :

تكون الصخور في المناطق الضحلة أقل انضغاطاً، علماً بأن الإنفجار البركاني يتكون بنتيجة ازدياد ضغط الغاز، وأن معظم الصخور الذائبة تتجمد على عمق يراوح في المجال $[km]$ 5 – 1 .

وتوجد مواقع عديدة للطاقة الحرارية الجوفية ذات إمكانيات جيدة تحت مواقع البراكين الخامدة وهي مناسبة للاستثمار، وذلك لأن الصخور تشكل عازلاً جيداً للحرارة ، ولهذا فإن الزمن الذي تستغرقه الصخور الذائبة للرجوع إلى درجة حرارة المحيط يستغرق عشرات الملايين من السنين ، وهذه المناطق تستمر في كونها مصدراً للمائع الحار. وطبيعة هذا المصدر تعتمد على الظروف المحلية من ضغط ودرجة حرارة. وهذه تحدد طريقة الاستخلاص وصلاحية الموقع .



شكل (7–3): نموذج افتراضي لمنظومة حرارة جوفية بركانية

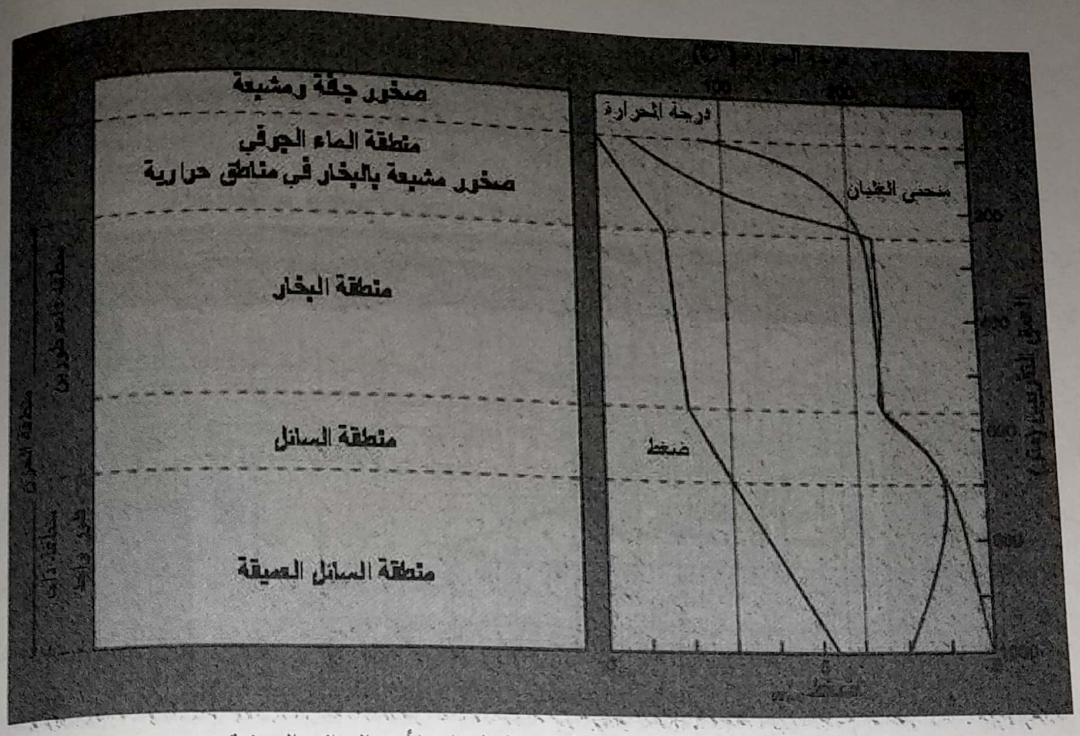
إن المدى الجيد لاستغلال موقع معين هو أن تكون درجة الحرارة (T) فيه تراوح في المجال 300 °C– 100 ، أقل من النقطة الحرجة التي لا يمكن فيها تمييز الماء السائل أو بخار الماء ، إذ تصل قيمة الضغط فيه إلى $[MPa]$ 20 .

ويبين الشكل (7–3) المنحني العادي لدرجة الحرارة T والضغط P (P-T Curve) في موقع عمودي من حقل حراري جوفي. ففي الأعماق الضحلة التي يبلغ عمقها حوالي $[m]$250 تكون درجة

الحرارة قليلة بحيث لا تستطيع إيصال الماء إلى درجة حرارة الغليان ، ولكن في الأعماق التي تتراوح قيمتها في المجال [m] 275 – 250 فإن درجة الحرارة تكون كافية لتبخير الماء ، ولهذا فإن منحنى درجة الحرارة يقع إلى اليمين من منحنى نقطة الغليان الشكل (7–3). وفي هذه المنطقة يكون ازدياد الضغط قليلاً بسبب امتلاء فتحة الحقل ببخار الماء المتحول بدلاً من الماء ، وأن وزن الغاز هو الذي يسبب زيادة الضغط القليلة هذه . ولأن بخار الماء يتحول بسرعة فإن المنطقة ستكون ثابتة الحرارة (Isothermal Zone) .

وعند عمق يتراوح في المجال [m] 700 – 575 يزداد معدل درجة الحرارة طرداً مع العمق ، وذلك لمواكبة تبخير الماء عند الازدياد المستمر للضغط . إن الضغط يزداد بسرعة في أعماق تقل عن [m]700 عندما يبتعد سير الضغط والحرارة (P-T) للمائع الجوفي عن منطقة غليان الماء في المنحنى . إن الفصل بين مناطق السائل والبخار نادراً ما يكون واضحاً كما هو مبين في الشكل (7–4)،وذلك لأنه في الأعماق التي تتراوح قيمتها في المجال [m] 700 – 250 يكون المائع قريباً من طور تغيير درجة الحرارة (بين السائل والبخار) ، وفي هذه الحالة لا تقوم كمية الطاقة المضافة أو المستخرجة بتغيير درجة الحرارة ، لذا فإن هذه المنطقة في الحقيقة هي منطقة يوجد فيها الطوران الغازي والسائل أي يكون فيها بخار الماء مُركَّزاً فوق السائل، وبناءً على ذلك تقسم منظومات المحتوى الحراري العالي إلى المنظومات ذات المحتوى البخاري والمنظومات ذات المحتوى السائل معتمدة على الطور (سائل/بخار) في الخزان.

وبالتمعن بالخزان في الشكل (7–4) يمكن اعتباره ذا هيمنة بخارية، ومن الطبيعي لمنظومة كهذه أن تحتوي على بخار ذي محتوى حراري كبير على شكل بخار عالي الحرارة لأن درجة الحرارة ارتفعت إلى درجة أعلى من نقطة الغليان في المنحنى ، وهذا النوع من المصادر هو الأفضل إنتاجاً وذلك لأن البخار يكون فيه جافاً (خالياً من السوائل) ، وذو محتوى حراري كبير ، ويكون خزان الصخور هذا تحت ضغط تتراوح قيمته في المجال [MPa] 3.5 – 3 عند عمق قدره [m] 2000 ، ويجب حماية هذه المستودعات الحرارية من تسرب المياه الجوفية الأرضية إليها.



شكل (7–4) منحنى الضغط ودرجة الحرارة لأحد المواقع الجوفية

وعلى العكس من ذلك فإن المناطق التي يسيطر فيها السائل تكون تحت ضغط عالٍ يزيد على $10[MPa]$ وبعمق أقل من $1[km]$. إن توليد الطاقة الكهربائية من المناطق التي يسيطر فيها السائل تستفيد من الضغط العالي في العمق إذ يتحول فيها الماء إلى بخار عندما يعبر نقطة التبخير على المنحنى إلى ضغط أقل ، لذا يمكن القول إن منحنى $P\text{-}T$ في المناطق التي يسيطر فيها السائل يكون أقل من منحنى التبخير للماء على كل الأعماق ، ولكن عندما تفتح فتحة في المنطقة فإن الضغط سيقل والماء الصاعد سيعبر نقطة الغليان عند صعوده إلى السطح ، وبذلك يتكون بخار لكنه سيكون بخاراً رطباً وذا محتوى حراري قليل مما يسبب مشاكل عند توليد الطاقة الكهربائية.

إن تفسير كيفية انتقال الحرارة من الصخور المتصلبة لتعزيز دوران المياه الحارة ، كما هو مبين بالشكل (7–3)، معقد ويحتاج إلى بحث أعمق . لكن من الواضح أن التفاعل بين الصخور والماء الجوفي لا يحدث إلا نادراً ، وأن الحرارة تنتقل بالتوصيل من الصخور عبر منطقة متاخمة (Boundary Layer) ، وتكون في بعض الأحيان ضيقة جداً لكنها ذات ناقلية حرارية كبيرة ، وبذلك تكون المنطقة العليا حاوية على مياه حارة مناسبة لأغراض التدفئة، وفي بعض الأحيان يخرج الماء مباشرة من منطقة الصخور حاملاً معه أنواعاً مختلفة من المواد الكيميائية المتطايرة التي تختلط أحياناً مع المياه الجوفية المتوفرة وتسبب مشاكل تلوث لمستثمري هذا المصدر، والمعلومات الجيوكيمائية تشير إلى أن معظم الماء الجوفي هو ماء مطر اختلط بقليل من ماء الصخور البركانية.

7-4 الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية:

يوضح الشكل (7-3) اختلاف كيمياء محاليل المناطق الجوفية بالنسبة لبعدها عن الصخور البركانية الحارة ، فالغازات المتسربة من مناطق الصخور البركانية تحتوي على كلوريد الهيدروجين (HCl)، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، وثاني أكسيد الكربون (CO_2) . ويحتوي ماء المطر على ثاني أكسيد الكربون المذاب ، ويتفاعل كلوريد الهيدروجين من الصخور البركانية مع الصخور المجاورة مكوناً ماءً جوفياً يحتوي على كلوريد الصوديوم $(NaCl)$ وقليلاً من كلوريد البوتاسيوم (KCl)، وبعض هذه المياه يتسرب إلى سطح الأرض مشكلا ينابيع مياه معدنية.

ويصل ثاني أكسيد الكبريت ممزوجاً مع الماء إلى سطح الأرض مكوناً الينابيع الكبريتية، ويكون البخار الناتج من المياه الجوفية الحارة قرب سطح الأرض غنياً بالكبريت أكثر من البخار الموجود في مناطق أعمق ، والذي يختلط مع محلول غني بالكلور، وهنالك زيادة مستمرة بمحتوى الكربونات الثنائية على مسافة من مركز الصخور البركانية، وذلك لاختلاطها بماء المطر المشبع بثاني أكسيد الكربون .

7-5 تغيير الضغط مع العمق :

يزداد الضغط بمعدل $1atm$ لكل $10[m]$ من العمق ، أي إن منطقة الطبقة الصخرية المائية ذات العمق $1000m$ ترزح تحت ضغط قدره $100atm$ أي $100[Bars]$ أو $10\ [MPa]$ ((كل 1 $[MPa]$ يعادل 10 ضغط جوي)).

7-6 مصادر الحرارة في السهول الرسوبية:

من المهم معرفة وحساب قيمة الحرارة الجوفية من مصدرها، ويمكن هنا الاستفادة من معادلة التوصيل الحراري التالية:

$$q = K_T . \frac{\Delta T}{Z} \qquad (3\text{-}7)$$

حيث إن :

q : هي كمية الحرارة المنتقلة ؛ $[W/m^2]$.

ΔT : هو فرق درجات الحرارة (C^o) على ارتفاع $Z\ [m]$

$\Delta T / Z$: هو التغيير الحراري .

K_T :هو التوصيل الحراري $[W/m.C^o]$

مثال حول تغير درجة الحرارة بتغير العمق :

بفرض أن الحرارة تنتقل من العمق (عدة كيلومترات تحت سطح الأرض) إلى الأعلى فمن خلال معرفة قيمة عامل التوصيل الحراري للتربة يمكن ربط كمية الحرارة المنتقلة مع درجة الحرارة على أي عمق .

فمثلاً إذا كانت درجة الحرارة على عمق $[m]$ 2000 هي $58\ C^o$ وكانت درجة حرارة السطح $10C^o$ فإن قيمة التغيير الحراري سيكون :

$$\frac{\Delta T}{Z} = \frac{58-10}{2000} = 0,024 \qquad [C^o/m^2]$$

وبفرض أن قيمة معامل التوصيل الحراري هي $2،5[W/m.C^o]$ ، فتكون كمية الحرارة المنتقلة:

$$q = 2,5 \times 0,024 = 0,06 \qquad [W/m^2]$$

أما إذا افترضنا أن هذه الكمية من الحرارة تنتقل خلال عدة طبقات ولكل طبقة منها معامل توصيل حراري خاص بمادتها فإن المعادلة السابقة تفيد بأن هنالك تغيراً حرارياً لكل طبقة مع درجة حرارة أكثر تغيراً خلال الطبقة ذات معامل التوصيل الحراري الأقل قيمةً.

فإذا كانت قيم معامل التوصيل الحراري للطبقة الأولى $2،5[W/m^2.C^o]$ ، وللطبقة الثانية $1،5[W/m^2.C^o]$، وللطبقة الثالثة $3[W/m^2.C^o]$ ، عندها يمكن التأكد من أن القراءات في الشكل (5-7) صحيحة، وعند حساب التغير الحراري لكل طبقة من المعادلة ومقارنتها بقراءة من المنحنى في الشكل المشار إليه يتم الحصول على النتائج الآتية:

- بالنسبة للطبقة الأولى :

- التغير الحراري (بحسب المعادلة): $\frac{0,06}{2,5} = 0,024\ [C^o / m]$

- والقراءة من المنحنى : $\frac{34,5-10}{1000} = 0,0245\ [C^o / m]$

- بالنسبة للطبقة الثانية:

- التغير الحراري (بحسب المعادلة): $\frac{0,06}{1,5} = 0,04\ [C^o / m]$

- والقراءة من المنحنى : $\frac{54,5-34,5}{500} = 0,04\ [C^o / m]$

- بالنسبة إلى الطبقة الثالثة:

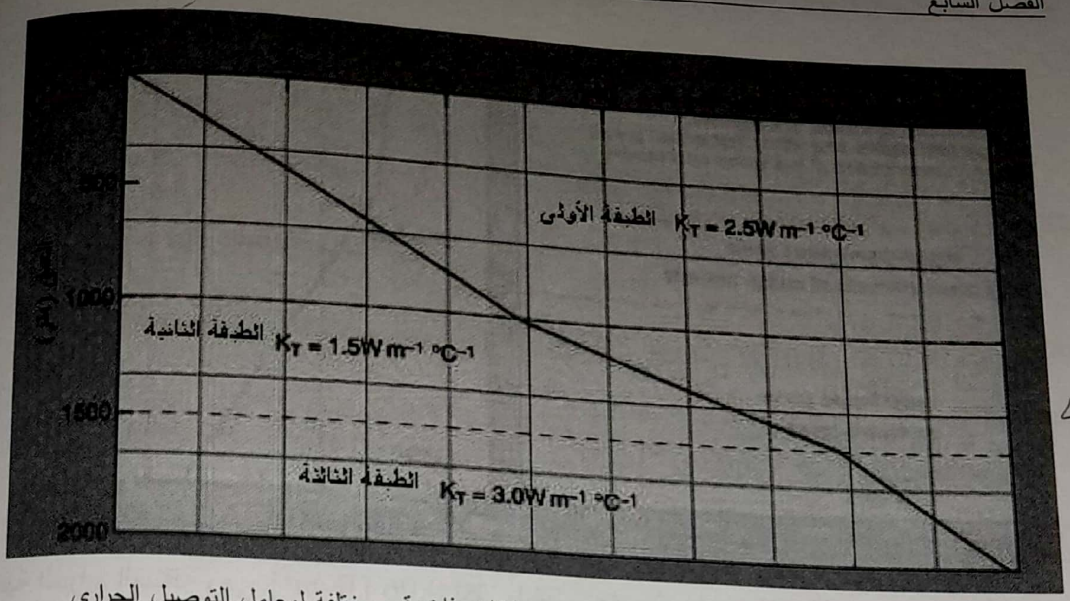
- التغير الحراري (بحسب المعادلة): $\frac{0,06}{3,0} = 0,02\ [C^o / m]$

- والقراءة من المنحنى : $\frac{64,5-54,5}{1000} = 0,02\ [C^o / m]$

من دقة المعلومات وتوافق الدرجة المحسوبة والمقاسة يتبين أن التغير الحراري يتناسب مع كمية الحرارة المنتقلة وهي $[W/m^2]$ 0.06 لكل طبقة. وعند مقارنة هذه الحالة مع الحالة الأولى عند استخدام معامل توصيل حراري واحد لكامل العمق يستنتج أن وجود طبقة قليلة العمق ، وذات معامل حراري قليل القيمة تحّسن من قيمة درجة الحرارة على عمق $[km]$ 2 .

إن قيمة معامل التوصيل الحراري (K_T) لأنواع مختلفة من الصخور (كالصخور الكلسية والرملية والبلورية) متقاربة حيث تراوح قيمها في المجال $[W/m^2.C^o]$ 3,5 – 2,5 . أما الصخور الطينية فتراوح قيمها في المجال $[W/m^2.C^o]$ 2 – 1، وبالعودة إلى الجدول (7-2) يلاحظ أن هذه الصخور هي من الصخور كبيرة النفاذية، وتسهم بخاصتين مُهِمّتيْن للمصادر الجوفية : **الأولى** أنهّا تعمل كصخور واقية كبيرة النفاذية، **والثانية** أنهّا تقوم بتحسين التَّغَيُّر الحراري فوق المنطقة المائية الصخرية.

وهذه الخواص ساعدت في تَبَنّي برامج اكتشاف لتحديد مكان المياه الطبيعية الحارة في مناطق الصخور الرسوبية التي تحتوي على الصخور الطينية والصخور الكلسية كبيرة النفاذية.



شكل (7-5): تغير درجة الحرارة مع العمق لثلاث طبقات ذات قيم مختلفة لمعامل التوصيل الحراري

إن استكشافات المصادر الهيدروكربونية في الستينيات والسبعينيات من القرن الماضي كانت ناجحة فقط في تحديد مواقع مياه حارة بدرجات حرارة تراوح قيمها بين $55[C^o]$ و $70[C^o]$، وبأعماق تراوح قيمها بين $1[km]$ و $2[km]$ (تحت مدينة باريس مثلاً) حيث لا يوجد أي نفط أو غاز، وبما أن هذه الحرارة ليست كافية لتوليد الطاقة الكهربائية، فإنها تُلائِم بلا شك أغراض التدفئة. وهنالك مناطق أخرى مماثلة.

7-7 الصخور الحارة الجافة:

تنسب مصادر الصخور الحارة الجافة إلى الحرارة المخزونة في طبقة من الصخور القليلة النفاذية وإلى العمليات التي يمكن من خلالها استخلاص هذه الحرارة ، والطريقة التي يتم بها استخلاص الحرارة من هذه المناطق تكون بحفر آبار عميقة داخل الطبقات الصخرية، ويضخ الماء فيها ليتشكل البخار الذي يولد الطاقة الكهربائية. وعلى الرغم من عدم توفر التقنية المناسبة حالياً لاستخلاص هذه الحرارة إلاَّ أنه من الناحية النظرية يمكن لتقنية استخلاص الطاقة من الصخور الجافة أن تطبق على مناطق واسعة من سطح الكرة الأرضية. علماً أن تكلفة الحفر كبيرة ، ولهذا فإن حفر $6[km]$ فقط تحت سطح الأرض يمكن استخدامها لاستخلاص طاقة جيدة ، رغم أن أعماق الحفر قد وصلت في بعض المناطق إلى $15[km]$. وبعد دراسة المحددات التقنية الحالية وتكلفة الحفر العميق فإنه من الأفضل الاهتمام بمناطق صخرية ذات انتقال حراري كبير. والهدف المثالي

هو أجسام الغرانيت التي تشكل جزءاً كبيراً من القشرة الأرضية، والتي تصلبت من الحمم البركانية ذات التركيز العالي بالمواد المشعة كاليورانيوم والتوريوم والبوتاسيوم .

ومن فوائد استغلال طبقات الصخور الجافة هو انتقال الحرارة الكبير منها (إذ يصل فرق درجات الحرارة إلى 30 C° لكل $1km$ فيها) ، أي أنه وعلى عمق $5[km]$ تكون درجة الحرارة أكثر من 170 C° ، وهي درجة مناسبة جداً لتوليد الطاقة الكهربائية.

7-8 حقول البخار ذات الضغط العالي :

تبدأ الخطوة الأولى لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية بإجراء دراسات جيولوجية في المناطق البركانية، بهدف تحديد الصخور التي تغيرت كيميائياً عن طريق التحاليل الجيوحرارية، وبتحديد المساحات ذات المظاهر الدّالة عليها ، كالينابيع والمستنقعات الطينية، وذلك باستخدام التقنيات الجيوفيزيائية، وعلى الأخص تحديد قيمة المقاومة واستخدام بعض الطرق الكهربائية الأخرى المصممّة للاستشعار عن مناطق فيها موائع موصلة للكهرباء ، وهذه الطرق هي طرق فعالة لتحديد المصادر الحرارية الجوفية .

ويتم تحديد موقع الصخور المائية وحفر البئر فيها ، فإذا كانت قيمة ضغط المائع بحدود $10[MPa]$ يجب عندئذٍ أن تملأَ البئر بطينٍ عالي الكثافة بهدف ضبط هذا الضغط ومنع حدوث الانفجار، ويتم حينها إخراج الغازات ، التي يصعب السيطرة عليها، وطردها . ومن المعلوم أنّ قيمة مساحة مقطع فتحة البئر تقل كلما ازداد عمقه، فعند السطح يكون القطر عادة $50[cm]$، ليتناقص إلى حوالي $15[cm]$ عند عمق الإنتاج ، وتغلف الآبار بأنابيب من الفولاذ والكونكريت ، وأحياناً يتم وضع غلاف فولاذي مثقب عند عمق الإنتاج ، ويتم أيضاً وضع صمام على أنبوب البئر يكون إمّا ملحوماً بالأنبوب الفولاذي ، وإما مثبتاً بقاعدة الكونكريت على سطح الأرض ، وذلك لربط البئر بمحطة توليد الطاقة عبر شبكة من الأنابيب المعزولة.

إن التقنيات اللازمة لمحطة التوليد تعتمد بصورة رئيسة على طبيعة المواد الخارجة من البئر، وليس فقط على درجة الحرارة والضغط ، بل أيضاً على درجة الملوحه والمحتوى من الغازات الأخرى ، والتي تؤثر على كفاءة المحطة وتصميمها، وتوجد حالياً أكثر من 250 محطة من هذا النوع في مختلف أنحاء العالم ، تصنف إلى أربعة أنواع رئيسية هي :

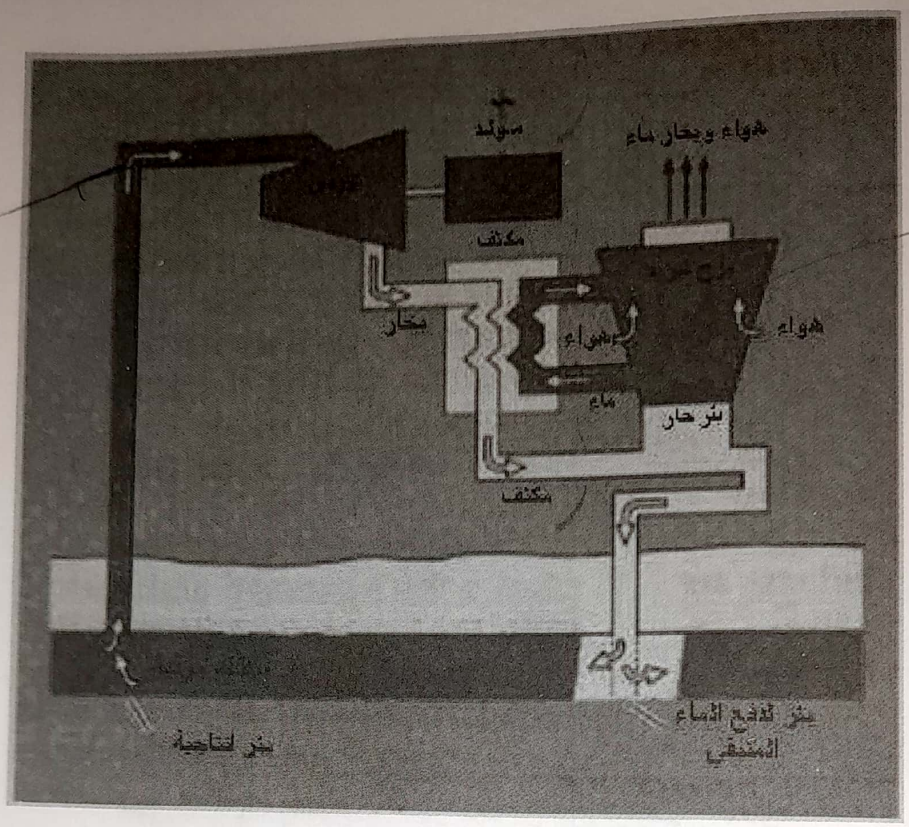
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

7-8-1 محطات البخار الجاف :

يكون البخار المنتج في هذه المحطات خالٍ من السوائل ، وقيمة درجة حرارته تراوح في المجال $[C^o]185 - 180$ ، ويراوح ضغطه في المجال $[MPa]$ 0.9 – 0.8 وهذا البخار يصل إلى السطح من عمق عدة كيلومترات، يحدث خروجه عند فوهة البئر صوتاً كصوت المحرك النفاث ، إذا انطلق حراً، ودرجات حرارة هذا البخار تراوح في المجال $[C^o]350 - 300$ ، أما ضغطه فهو ضغط عالٍ يمكن استغلاله أيضاً في تشغيل العنفات البخارية بغرض توليد الطاقة الكهربائية.

وأبسط نوع من أنواع هذه المحطات هي ذات الضغط الخلفي الشكل (7–6) إذ يتم فيها إطلاق البخار ذي الضغط المنخفض إلى الخارج ، ولكن المحطات التي تقوم بتكثيف البخار هي الأكثر كفاءة إذ تقوم بتكثيف البخار، وبالتالي زيادة فرق الضغط بين طرفي العنفة، وذلك لأن الماء يشغل حجماً أقل من حجم البخار بـ 1000 مرة .

إن مردود هذه المحطات لا يزيد عن 30% رغم أنها تستخدم بخاراً ذا درجات حرارة عالية ، وقد كانت المحطات التي أنشئت في الستينيات تحتاج إلى $15kg$ من البخار لإنتاج استطاعة قدرها $1kW$ من الكهرباء في الظروف الطبيعية. وباستخدام بخار ذي درجات حرارة أعلى في آلات ذات تصميم أفضل قلّت هذه الكمية إلى $6.5\ kg$ من البخار لإنتاج نفس الاستطاعة ($1kWh$ من الكهرباء). لذا فإن محطة باستطاعة $55\ MW$ تحتاج إلى $100kg$ من البخار بالثانية ، وإن وجود الغازات غير القابلة للتكثيف مع البخار يقلل من مردود المحطة، ويؤثر على جدواها الاقتصادية ويزيد من تلوث البيئة أيضاً ، ولهذا يجب تصريف السائل المتبقي والخارج من العنفة أو حقنه مرة أخرى في بئر قريبة لتقليل التلوث . وتعد محطات البخار الجاف من أكثر المحطات مردوداً واستخداماً واقتصاداً . و لدى الولايات المتحدة وإيطاليا مواقع كثيرة لمصادر البخار الجاف ، بالإضافة إلى وجود بعض الحقول في كل من أندونيسيا واليابان والمكسيك .



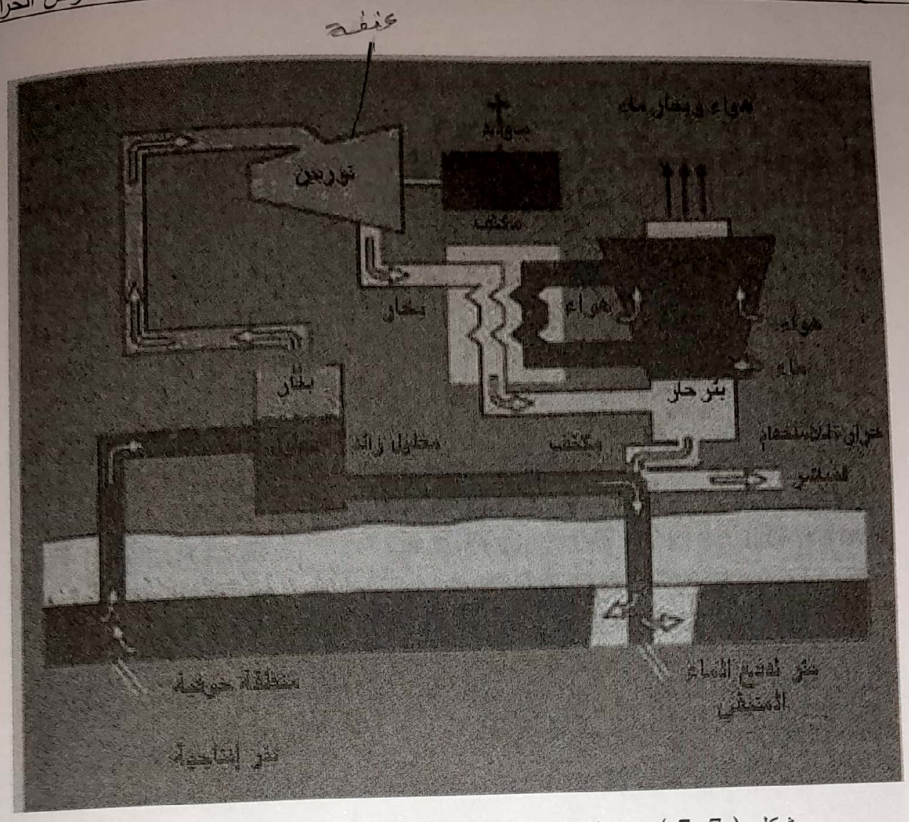
شكل (7-6): مخطط لمحطة بخار جاف من نوع وحدة الضغط الخلفي

7-8-2 المحطات البخارية الوميضية الأحادية:

في هذه المحطات يكون البخار الواصل إلى السطح محتوياً على بعض السوائل الناتجة إمّا عن تكاثف بعض البخار في أثناء صعوده إلى السطح ، وإما بسبب وجود ماء حار ذي ضغط عالٍ في الخزان الشكل (7-7). وفي هذه الحالة يتم استخدام جهاز لفصل الماء عن البخار بغرض حماية العنفة، ويفضل تجنب حالة تكاثف البخار في أثناء صعوده ، لأن ذلك سيسبب تراكم المعادن المرافقة للبخار على جانبي الأنبوب، والتي يمكن أن تؤدّي إلى انسداده.

إن التعامل مع ماء تحت ضغط عالٍ يتطلب أجهزة أكثر تعقيداً وذلك لتقليل الضغط وفصل البخار. وفي هذه المحطات تستخدم العنفات التقليدية ذات الضغط الأقل ، والذي تراوح قيمته في المجال $[MPa]$ 0.6 – 0.5 ، ودرجات حرارته في المجال $[C^o]$ 165 – 155، إذ تحتاج المحطة إلى كمية أكبر من البخار ($8\ kg$ لإنتاج $1kWh$)

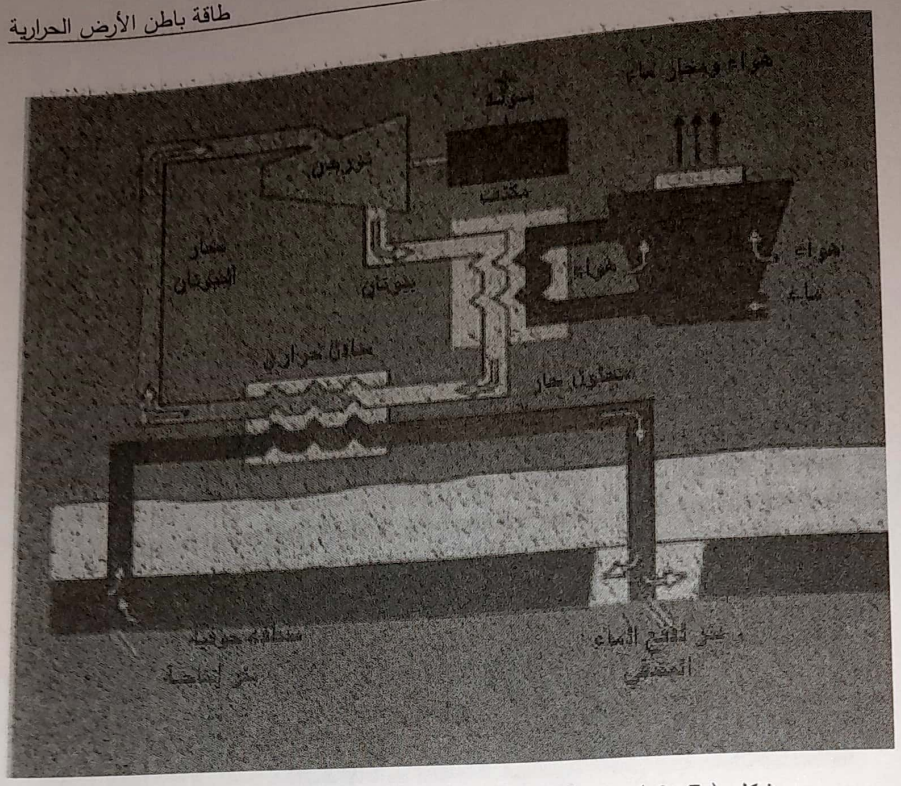
ن أما السائل المتبقي والذي تصل نسبته إلى حوالي 8% ، فيمكن أن يحقن مرة ثانية أو يستخدم في أغراض التدفئة وتسخين المياه .



شكل (7-7): مخطط لمحطة بخار جاف من النوع الوميضي الأحادي

7-8-3 محطات الدارات المزدوجة:

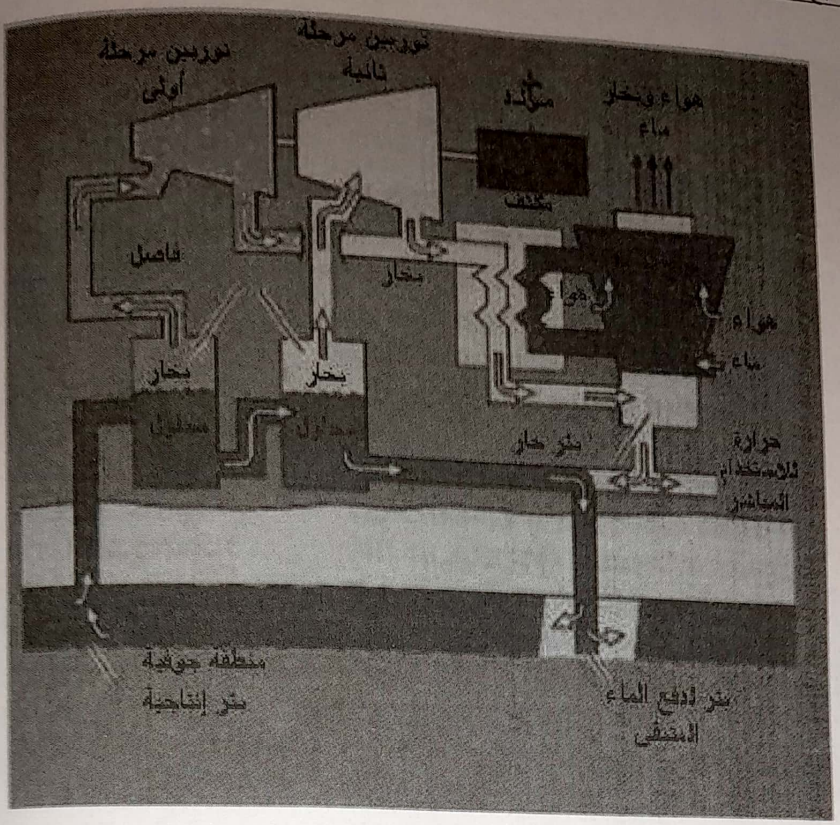
تَستعمل هذه المحطات مائعاً ثانوياً، كما في الشكل (7-8)، درجة غليانه أقل من درجة غليان الماء كمثل البنتين والبيوتين اللذين يتبخران ويدوّران العنفة، ويدفع محلول الماء الجوفي عند ضغط مساوٍ لضغط الخزان إلى مبادل حراري ، وتكون الحرارة المنتقلة عبر المبادل الحراري إلى المائع كافية لتبخيره وزيادة درجة حرارة البخار إلى درجة عالية، وعلى الرغم من المردود العالي لهذا النظام ، مقارنة بالمحطات البخارية الوميضية الأحادية، إلاَّ أن تكلفته الأولية كبيرة جداً ، إضافة لذلك فإن إبقاء الماء الجوفي تحت الضغط ، وزيادة ضغط المائع الثانوي يتطلب استهلاك حوالي 30% من الطاقة المنتجة لتشغيل المضخات الكبيرة اللازمة لذلك . كما وتستهلك كميات كبيرة من المياه الجوفية لهذا الغرض ، ففي محطة الطاقة الجوفية الحرارية في منطقة ماموث في ولاية كاليفورنيا يتم استهلاك 700 $[kg/s]$ من المياه لإنتاج $30[MW]$، وتعمل حوالي 60 محطة من هذا النوع في مناطق مختلفة من العالم .



شكل (7-8): مخطط لمحطة بخار جاف نوع محطات الدوران المزدوجة

7-8-4 المحطات الوميضية الثنائية:

جرت مؤخراً محاولات لتحسين مردود المحطات البخارية الوميضية الأحادية، وذلك بغرض تجنب استخدام محطات الدارات المزدوجة باهظة التكلفة، والمحطات الثنائية، الشكل (7-9) ، مناسبة جداً عند عدم إحتواء الماء الجوفي على شوائب ومتكاثفات غازية وترسبات. وفي هذه المحطات يتحرك السائل المتبقي بعد المرحلة الأولى إلى خزان ضغط منخفض . وبنتيجة فرق الضغط يتكون بخار يختلط في العنفة الأولى ، وهذا التعديل يزيد إنتاج المحطة بنسبة من 20% إلى 25% ، ويرافقه زيادة في التكلفة قدرها 5%، وفي هذا النوع من المحطات توجد حاجة إلى كميات كبيرة من المياه الجوفية، فمحطة "شرق ميسا (East Mesa)" جنوب كاليفورنيا والتي افتتحت في العام 1988، تستهلك كمية من الماء قدرها $1000[kg/s]$ تضخ من ستة عشرة بئراً لإنتاج $37[MW]$.



شكل(7-9): مخطط لمحطة بخار جاف من النوع الوميضي الثنائي

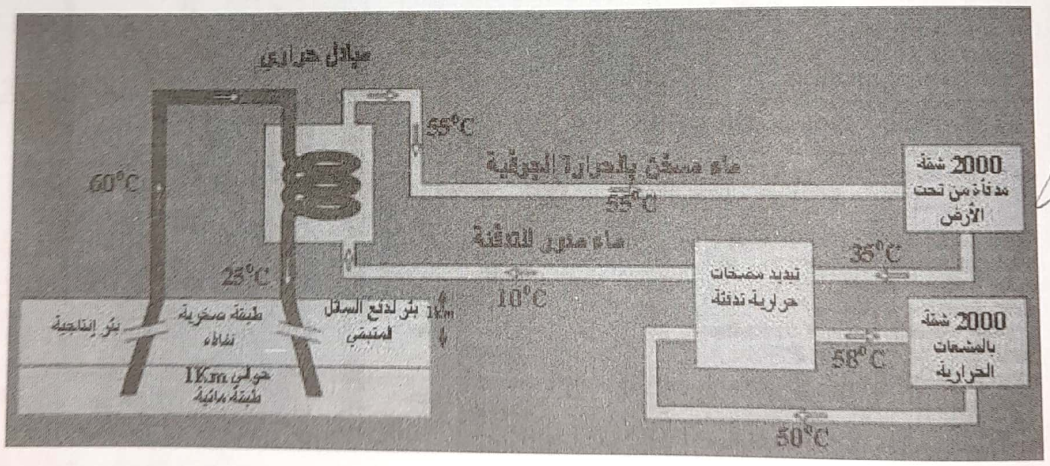
7-9 المصادر المستخدمة في الاستخدام المباشر لطاقة الحرارة الجوفية:

الدول المدرجة في الجدول (7-1)، والتي تستغل مصادر الطاقة الجوفية لأغراض غير توليد الطاقة الكهربائية اختارت في تطوير هذه الاستخدامات مناطق مجاورة للحقول البخارية. ومن هذه الدول : اليابان ، ونيوزلندا، وأيسلندا، وإيطاليا. أما بالنسبة للمصادر ذات درجات الحرارة القليلة، والتي تقع في الأحواض الرسوبية فإن عدداً منها يستغل في وسط أوروبا، لأن عمليات الحفر في هذه المناطق أقل خطراً ولأن المياه الموجودة تكون تحت ضغط قليل مقارنة بحقول البخار، وفي هذه الحالة توجد حاجة إلى مضخات لضخ المياه إلى سطح الأرض . إن الماء الحار المستخدم يكون بالتأكيد مالحاً جداً، يحتوي على الشوائب الكثيرة التي تُحفِّز التآكل ، ولا يمكن ضخ هذه المياه مباشرة إلى منظومات التدفئة لذا تستخدم مبادلات حرارية خاصة مقاومة للتآكل في هذا المجال ، ويتم استغلال الماء الحار العابر للمبادل الحراري في تدفئة البيوت الزجاجية وفي التدفئة المركزية.

لقد تم في فرنسا تطوير المصادر " شحيحة المحتوى الحراري "، حيث ركبت خلال ثلاثة عقود 55 مجموعة تدفئة في مدينة باريس لوحدها ، وركبت عدة منظومات أخرى في الجنوب الغربي ، وتتم تقنية عملها وفق ما يلي :

في المرحلة الأولى يتم ضخ المياه الحارة من بئر إنتاجية عبر مبادل حراري وبمعدل 20 إلى $25[l/s]$ من الماء ذي درجة الحرارة $60[C^o]$، ومن ثم تطرح المياه الخارجة من هذا المبادل إلى بئر أخرى الشكل (7-10) وبذلك ينتج ماقيمته $[MW]$ 5 – 3 من الطاقة الحرارية، وفي هذا التصميم يجب الاهتمام بالظروف المحيطة بالمياه الجوفية، إذ يجب أن تكون المسافة بين كل بئرين مدروسة حتى لا تؤثر حرارة الماء الراجع على درجة حرارة الماء المجهز لمنظومة التدفئة ، وقد تم هنا الاعتماد على المضخة الحرارية لتحسين كفاءة هذه المنظومة، الشكل (7-10)، حيث تعمل المضخات الحرارية على مبدأ مكيفات الهواء ، ولكنها هنا تنتج ماءً بدرجة حرارية عالية ، وعلى الرغم من أن المضخة الحرارية تستهلك طاقة كهربائية إلا أنها في الوقت نفسه تساعد على تحضير ماءٍ حارٍ كافٍ لتدفئة منظومة إضافيةٍ أخرى .

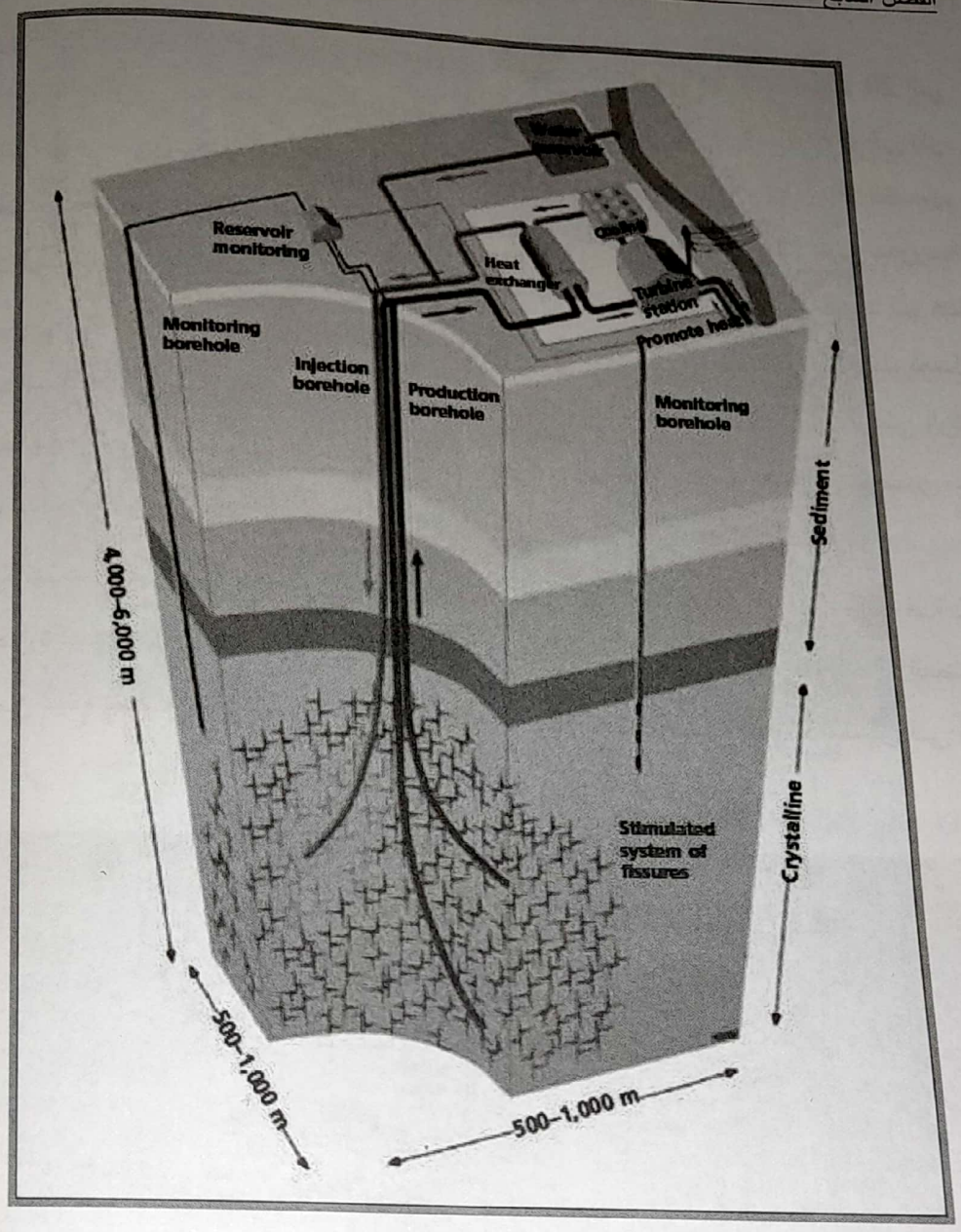
إن استعمال المضخة الحرارية مستقبلاً سيمكن من الاستفادة من آبارِ المياه الجوفية ذات درجات حرارة معتدلة لأغراض التدفئة. فلقد أمكن تدفئة 4000 مسكن منفرد باستخدام المضخة الحرارية من مياه جوفية على عمق $[m]100$، وزاد هذا العدد ليصبح 9000 مسكن في العام 1992.



شكل (7-10): منظومة تدفئة جوفية تعمل بمبدأ المضخة الحرارية

7-10- تقنيات الصخور الحارة الجافة:

إن المبدأ الذي تقوم عليه عمليات استغلال الطاقة من الصخور الجافة هو حفر بئر رأسية تصل إلى هذه الصخور "الصلدة الحارة" في باطن الأرض ، والتي يراوح عمقها في المجال $[km]$ 7-3 تحت سطح الأرض ، ومن ثم يضخ الماء في هذه البئر ليتدفق عبر شقوق الصخور الحارة ، فينتقل جزء من حرارتها إليه ليحملها معه إلى سطح الأرض عبر بئر ثانية.



الشكل 7–11 منظومة استخلاص الحرارة من طبقة الصخور الجافة

لقد أجريت التجارب العملية الأولى بهذا المجال في مختبرات لوس ألَموس ، إذ تم في سبعينيات القرن العشرين حفر بئر رأسية بالقرب من أحد البراكين القديمة بعمق قدره $3000[m]$ تحت سطح الأرض ، ودُفع فيه تيار من الماء ليخرج من بئر أخرى على مسافة قريبة من البئر الأولى بعد أن تَحَوَّلَ إلى بخار درجة حرارتة $180[C^o]$. واستخدم هذا البخار في تدوير عنفة لتوليد الكهرباء . وبعد نجاح هذا المشروع تم التخطيط لمشروع آخر مماثل في عام 1979. وقد بدأت تجارب مماثلة في كل من ألمانيا وفرنسا واليابان وأوكرانيا.

وهنالك الكثير من الصعوبات التي تعترض تنفيذ مثل هذه المشاريع منها تسرب المياه التي يتم دفعها إلى البئر الأولى إلى بعض الطبقات المسامية من القشرة الأرضية ، وبذلك لا يمكن إعادتها إلى سطح الأرض ثانية ، ومنها أيضاً قلة نفاذية الصخور في بعض المناطق مما يشكل حملاً كبيراً على مضخات الماء المستخدمة ، وهذا يتطلب استكشافاً دقيقاً للمناطق التي تصلح للإستفادة من طاقة باطن الأرض الحرارية من خلال دراسة نوعية الصخور الموجودة .

لقد انحصر البحث عن هذه المصادر الأرضية فيما مضى في الأماكن المحيطة بالينابيع الحارة الطبيعية، واستخدمت في ذلك بعض طرق البحث عن البترول ، كمثل قياس الجاذبية الأرضية، وتعيين عامل التوصيل الكهربائي للكتل الصخرية، واستخدام أجهزة القياس المتقدمة. ويهتم الاختصاصيون أيضاً بتقليل تكلفة عمليات الحفر العميق ، وذلك لأن أغلب الصخور الصلدة الحارة التي تصلح مصدراً للحرارة العالية توجد على عمق كبير ، وتزداد تكلفة أعمال الحفر كثيراً بزيادة عمق البئر عن $6000[m]$ ، ولا بد من التنويه هنا الى أن أجهزة القياس المختلفة تفقد كثيراً من حساسيتها ، وقد تفقد صلاحيتها تماماً ، عند درجات الحرارة التي تصل إلى $2000C^{o}$. ولهذا فإن البحوث الحديثة في هذا المجال تتجه أساساً إلى تحسين طرق الحفر وطرق القياس.

وعلى سبيل المثال يوجد في ألمانيا عدد من المنشآت لإنتاج الطاقة الجيوحرارية منها منشأة في نويشتادت–كليوي تم تنفيذها في العام 2003 حيث يسحب الماء الحار من عمق 2200 m تحت الأرض ليسهم عن طريق عنفة بخارية فيتوليد $1.2\ mil\ kWh$ في السنة.

7-11 الاعتبارات البيئوية لطاقة الحرارة الجوفية:

إن معظم المشاكل البيئوية المتعلقة بهذا النوع من الطاقة هي تلك المتعلقة بتحضير الموقع كمثل : مشاكل الضجيج أثناء الحفر، وطرح مخلفات الحفر السائلة والتي تشغل منطقة ترسيب واسعة، تغيير جو الموقع ليصبح أكثر حرارة وذا نسبة رطوبة كبيرة بسبب نفث البخار خلال عمليات الحفر والتجريب ، ولكن عند التشغيل الطبيعي فإن مستوى الضجيج لا يتعدى مستوى ضجيج محطات توليد الطاقة الأخرى .

هذا وقد كانت الحوادث نادرة خلال عمليات التجريب باستثناء حادثة العام 1991 في محطة (Zamil) للحرارة الجوفية التي حدثت جراء الحفر في موقع مهمل منذ العام 1981 في منطقة بركانية ، وقد أدى هذا الحادث إلى تطاير مئات الأطنان من الصخور والطين والبخار إلى الجو المحيط .

ومن التأثيرات الطويلة الأمد ترسب السوائل الناتجة عن الحفر والغازات الملوثة غير المتكاثفة مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مع كميات قليلة من كبريت الهيدروجين (H_2S)، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) ، والهيدروجين (H_2) ، والميثان (CH_4) ، والنيتروجين (N_2) . كما وجد في الماء المتكاثف السليكات ، والمعادن الثقيلة ، وكلوريدات الصوديوم ، والبوتاسيوم وفي بعض الأحيان الكربونات ، وهذا متعلق بنوع التفاعل الحاصل بين الماء والصخور في الخزانات العميقة.

ويمكن القول إن تطوير مصادر الطاقة الجوفية الحرارية له تأثيرات إيجابية على المحيط مقارنة بمنظومات مصادر الطاقة التقليدية، وذلك لقلة انبعاث المواد الملوثة، فلتوليد نفس الكمية من الطاقة الكهربائية تنبعث من محطات الطاقة الحرارية الجوفية مانسبته 2% فقط "من غاز ثاني أكسيد الكربون "من الكمية التي تنبعث من حرق أنظف وقود للطاقة التقليدية. أما بالنسبة للأمطار الحامضية (ثاني أكسيد الكبريت) فإن نسبة الإنبعاث لا تتجاوز 1%، وفي مجال التنمية الاجتماعية فإن المحطات الحرارية الجوفية لا تشغل سوى مساحات قليلة من الأراضي، إذ تُشغل محطة بطاقة 100[MW] مساحة بضعة آلاف من الأمتار المربعة فقط ، كما أن حفر آبار الطاقة الحرارية الجوفية أكثر أماناً ولا يتعرض للحرائق التي يمكن أن تحدث عند حفر آبار النفط والغاز.

إن استخلاص الطاقة من باطن الأرض ذو ميزات واضحة ، فلا يحتاج إلى عمليات ثانوية كما هو الحال في عمليات التعدين والاستخراج من باطن الأرض ، كما أن هذه الطاقة لا تحتاج إلى تحويل معين قبل تسويقها، ولا تحتاج إلى وسائل نقل أو تخزين جديدة مبتكرة.

وعلى الرغم من أن طاقة باطن الأرض الحرارية لم تستغل بعد على نطاق واسع ، فإن هناك آمالاً كبيرة في استغلالها بشكل كبير مستقبلاً ، خاصة وأنها متوفرة في كل مكان ، إضافة إلى أنها طاقة نظيفة وغير ملوّثة للبيئة.

7-12 طرق الاستفادة من الحرارة الجوفية:

7-12-1 طريقة المبادلات الحرارية الأرضية:

وهي الطريقة الأكثر شيوعاً للإستفادة من الطاقة الجيوحرارية في تدفئة الأبنية بإستخدام المبادلات الحرارية الأرضية ، إذ يستخدم أنبوبان على شكل حرف U يعملان كمبادل حراري في بئر عمقه حوالي 100 m ، ويضخ الماء في هذا الأنبوب يتم امتصاص الحرارة ، من حرارة باطن الأرض ،

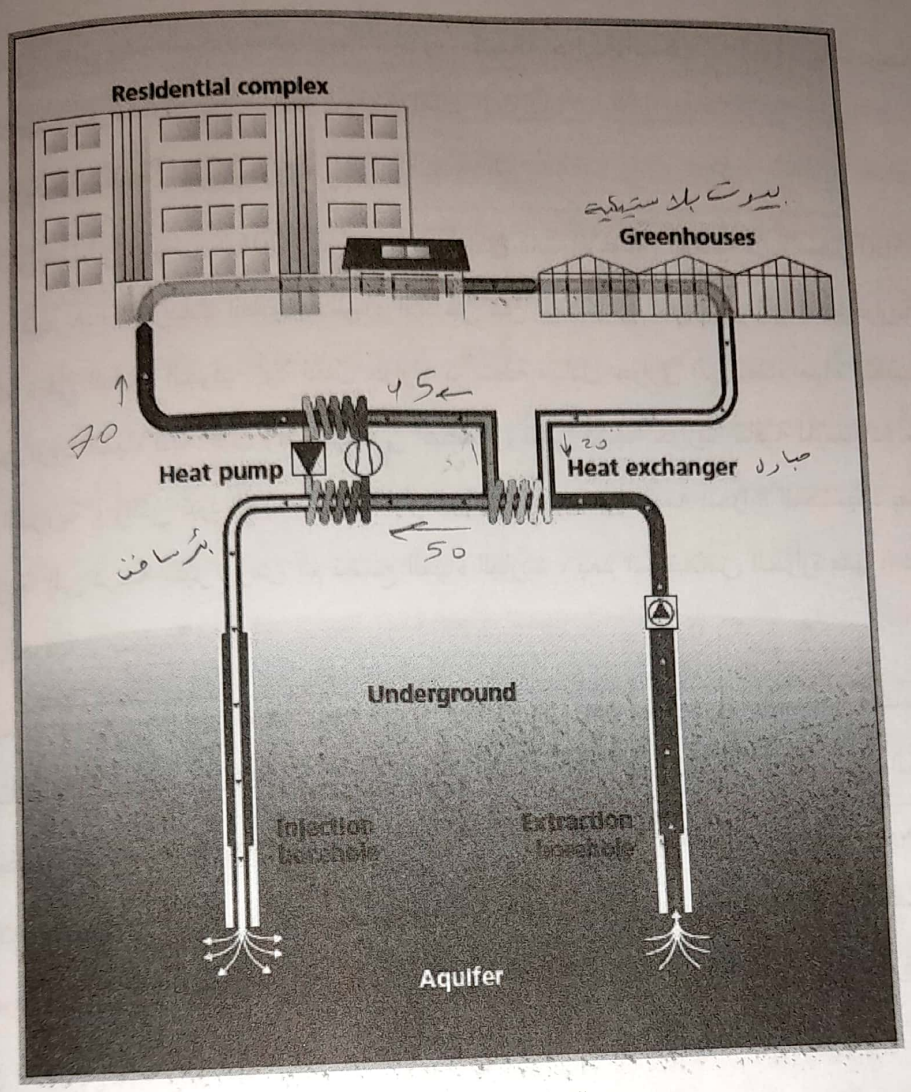
ويعود الماء الى أعلى وهو أسخن بعدة درجات لتقوم مضخة حرارية(الشكل 7-12) بزيادة درجة حرارته الى حوالي $35\ C°$ ويصبح صالحاً للإستخدامات المنزلية.

7-12-2 طريقة الأنظمة الهيدروحرارية:

تتجاوز درجة حرارة باطن الأرض $100C^o$ في بعض الأماكن ذات الأعماق الواقعة في المجال 2500 m- 1000، وتعد هذه الخزانات الطبيعية للماء الساخن من المصادر الكبيرة للطاقة الجيوحرارية ، حيث يضخ الماء في الطبقة الجوفية أولاً لتنقل حرارته بواسطة مبادل حراري إلى نظام مياه التغذية ، وعلى الرغم من برود المياه قليلاً قبل وصولها الى السطح ، تبقى درجة حرارته كافية للإستفادة منها في المضخة الحرارية ، والتي تبرد الماء بدورها أكثر من ذلك لأنها تزيد قيمة الحرارة المكتسبة، بفعلها كمضخة حرارية، إلى درجة أكبر، ومن ثم تضخ المياه الباردة ، بعد استخلاص الحرارة منها، عائدة الى الطبقات الجوفية ، شكل 7-12.

وبشكل عام يمكن إنشاء محطات التدفئة الجيوحرارية بحال توفر الطبقات الجوفية الحرارية المناسبة ، ففي ألمانيا مثلاً تتواجد هذه الطبقات في الشمال حيث الأراضي المنبسطة ، إضافة لمناطق الجنوب الغربي ومناطق جنوب نهر الدانوب بمحاذاة جبال الألب ، وبحسب جمعية الطاقة الجيوحرارية الألمانية(Geothermal Association of Germany) فإن الطبقات الجوفية الحرارية الموجودة على طول حوض "مولاسي" يمكنها تلبية الطلب على الحرارة الصديقة للبيئة لثلاث مدن كبيرة بحجم مدينة ميونيخ عاصمة مقاطعة بافاريا .

لقد سبق وتم إنشاء ثلاث محطات جيوحرارية للتدفئة في شرق ألمانيا ، أما في مقاطعة بافاريا فتم إنشاء محطات تدفئة جيوحرارية في شتراوبينغ وايردينغ وسيمباخ _ براناو ، إذ يؤمّن مشروع شتراوبينغ مثلاً حوالي $21600\ MWh$ حرارة سنوياً وهذا يكافئ حمل التدفئة لحوالي 4000 شقة سكنية مساحة الواحدة منها $100\ m^2$.



الشكل 7- 12 محطة تدفئة جيوحرارية - مائية