الفصل العاشر

طاقة الحرارة الجوفية

1-10 مقدمـــــة

2-10 أنواع مصادر الطاقة الجوفية

3-10 مصادر الحرارة والموائع المتعلقة بالنشاطات البركانية

4-10 الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية

5-10 تغيير الضغط مع العمق

6-10 مصادر الحرارة في السهول الرسوبية

7-10 الصخور الحارة الجافة

8-10 حقول البخار ذات الضغط العالي

- محطات البخار الجاف
- المحطات البخارية الوميضية الأحادية
- محطات الدورات المزدوجة
- المحطات الوميضية الثنائية

9-10 المصادر المستخدمة في الاستخدام المباشر لطاقة الحرارة الجوفية

10-10 تقنيات الصخور الحارة الجافة

11-10 الاعتبارات البيئية لطاقة الحرارة الجوفية

2-10 طاقة الحرارة الجوفية

تعتبر الأرض خزاناً ضخماً للحرارة التي يعتقد بأن لها مصدرين: الأول هو أن الأرض كانت كتلة غازية حارة جداً ثم بدأت تبرد مع مرور الزمن ، إذ بردت قشرتها وتصلبت نتيجة تماسها المباشر مع الفضاء الخارجي ، أما الجزء الداخلي فما زالت درجة حرارته عالية جداً . والمصدر الثاني هو أن حرارة الأرض هي الحرارة الناتجة من تحلل المواد المشعة الموجودة بمقادير صغيرة من الصخور نتيجة لتحلل عناصر الراديوم واليورانيوم والتوريوم والبوتاسيوم وغير ذلك من المواد المشعة الموجودة بنسب متفاوتة في هذه الصخور . ويظهر النشاط الإشعاعي بشكل بارز في صخور الغرانيت (صخور نارية) .

إن كمية الحرارة المتسربة سنوياً من باطن الأرض تعادل تقريباً 10^{12} جول ، وهي قليلة مقارنة بحرارة الشمس التي تصل إلى الأرض سنوياً والبالغة 5.4×10^{24} جول . وبعض مناطق الأرض فيها كمية حرارة مركزة وقريبة من سطح الأرض ، وتقوم المياه الجوفية بنقل هذه الحرارة إلى سطح الأرض على شكل ينابيع ساخنة يتصاعد منها الماء الساخن أو البخار ، ويمكن بذلك الاستفادة من هذه الحرارة للتسخين أو توليد الطاقة الكهربائية .

وإلى حدّ عام 1990 كانت كمية الطاقة الكهربائية المولدة من طاقة الحرارة الجوفية في مختلف دول العالم حوالي 6 جيغاواط ، وهي تمثل نسبة قليلة من الطاقة الكهربائية الكلية المولدة ، إلا إنها مصدر مهم للطاقة في بعض المناطق . وهناك حوالي 4 جيغاواط أخرى تم استثمارها أيضاً في استخدامات مباشرة دون توليد طاقة كهربائية ، ومجالات استخدام الطاقة المتأتية من هذا المصدر هي لغرض التدفئة والزراعة ومختلف العمليات الصناعية (الجدول 10-1) .

وعلى الرغم من أن بعض المختصين يعتقدون أن الطاقة الحرارية الجوفية غير متجددة - وهذا هو الغالب - بسبب فتور بعض الينابيع الحارة وتوقف نفثها البخار ، فإنها تشترك مع مصادر الطاقة المتجددة بكونها طاقة نظيفة وطبيعية وتختلف عن مصادر الطاقة التقليدية المخزونة في باطن الأرض كالنفط أو الوقود النووي . إن استغلال الطاقة الجوفية يعود إلى العصر الروماني الذي كانت المياه الحارة فيه تستخدم للأغراض الطبية والاستخدامات المنزلية والاستحمام . وسكان نيوزلندا الأصليون ، وقبل وصول الأوربيين إليها ، كانوا يعتمدون على البخار الصادر من الأرض للطبخ والتدفئة ويستخدمون الماء الحار للاستحمام والغسل والمعالجة .

جدول (10-1) : مصادر الطاقة الجوفية في مختلف أنحاء العالم المستثمرة حتى عام 1990

البلد	الطاقة الكهربائية المولدة (MW_e)	الاستخدام المباشر (MW_e)
أمريكا		
الولايات المتحدة	2800	160
المكسيك	680	8
السلفادور	95	-
نيكاراغوا	35	-
غرب الباسفيك (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
ايسليندا	39	480
فرنسا	4	270
إيطاليا	545	210
المجّر	-	375
تركيا	21	70
زكيا	3	-
كينيا	45	-
الأخرى	-	240
المجموع	**5834**	**4123**

وفي القرن التاسع عشر أمكن ، بفضل التقدم التقني ، استغلال هذه المصادر بصورة علمية. وفي منطقة توسكني (Tuscany) استخدمت الطاقة الجوفية بدلاً من الخشب في عمليات تحضير مركبات البورون والأمونيوم . لقد بدأ توليد الطاقة الكهربائية من هذا المصدر عام 1904 من قِبل الأمير كونتي (Conti) ، وشهد عام 1913 تشييد أول محطة توليد بطاقة 250 كيلو واط في منطقة لارديرلو (Larderllo) التي تعتبر كبداية لفعاليات جديدة . وتبلغ سعة محطة لارديرلو الآن 400 ميغاواط ، ومن الممكن أن تصل إلى 850 ميغاواط .

ويعتبر حقل ويراكي (Wairakei) في نيوزلندا الحقل الثاني الذي استثمر في عام 1950، وتبعه حقل في شمال كاليفورنيا بدأ توليد الطاقة فيه عام 1960 بسعة مقدارها 2800 ميغاواط ، وهو الآن من أكثر الحقول تطوراً في العالم .

ومن الدول التي استثمرت هذه الطاقة هي إيطاليا ، وإيسلندا ، واليابان ، والفلبين ، والمكسيك. ومن الدول المرشحة لاستغلال هذه الطاقة هي السلفادور ، ونيكاراغوا ، وكوستاريكا ، والاكوادور ، وتشيلي .

أما الدول التي استخدمت الطاقة الحرارية مباشرة لأغراض التدفئة والزراعة فهي اليابان ، والصين ، وجورجيا ، وداغستان . وتعتبر المجّر وإيسلندا هما الدولتان الرئيسيتان اللتان استغلتا الطاقة الجوفية في مجال الاستخدام المباشر ، بالإضافة إلى أنه تم تطوير تقنيات متقدمة في فرنسا وبعض الدول الأوربية الأخرى .

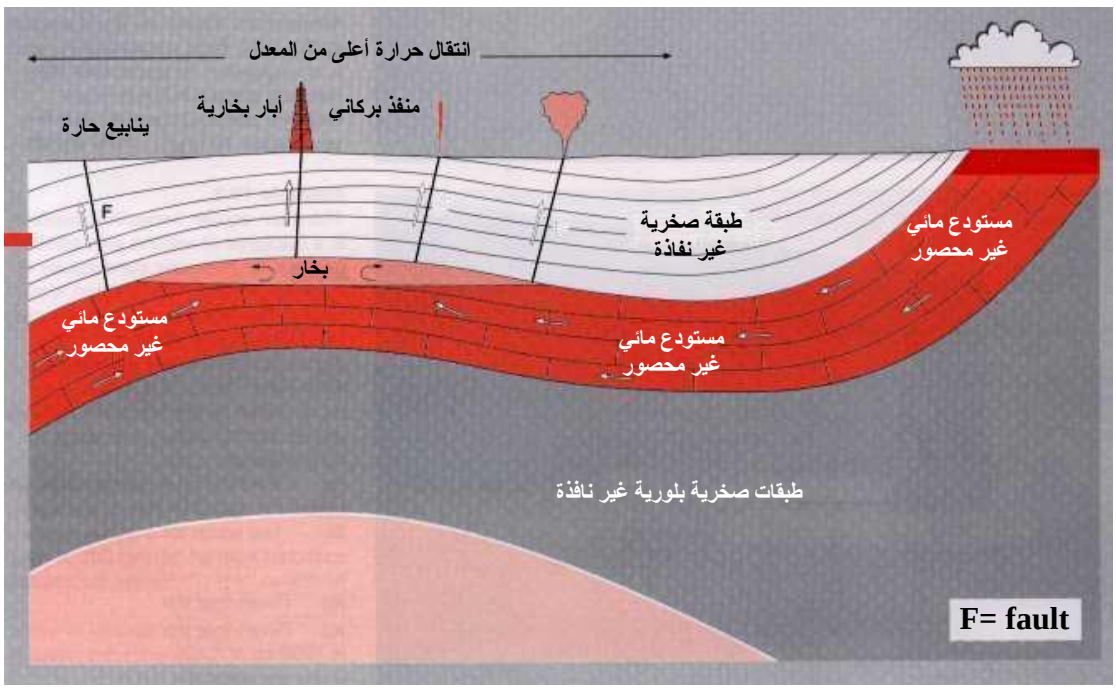
2-10 أنواع مصادر الطاقة الجوفية

هناك ثلاث خصائص هامة لمصادر الطاقة الجوفية بشتى أنواعها ، كما هو مبين بالشكل (10-1) وهي :

1 - طبقة مائية صخرية (Aquifer) تحتوي على ماء يُمكن الوصول إليه بعد الحفر.

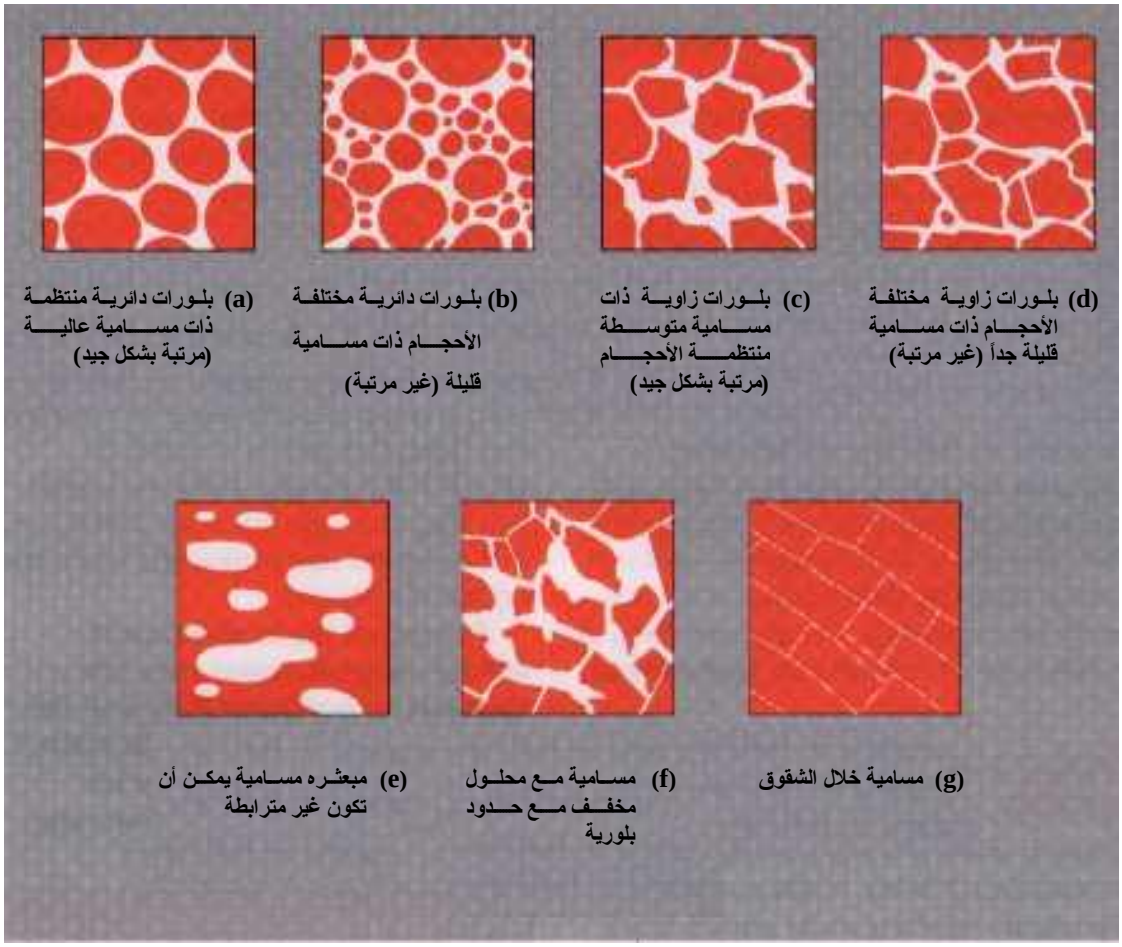
2 - طبقة صخرية فوقية (Cap rock) تحجز الماء .

3 - مصدر حراري .



شكل (10-1): خصائص مصادر الطاقة الجوفية

والطبقة الصخرية المائية (Aquifer) الطبيعية هي صخور مسامية تستطيع أن تخزن الماء ، ويمر الماء من خلالها . والصخور في الشكل (2a, 2c-10) هي صخور ذات مسامية عالية وبذلك تكون عالية النفاذية ، لكن الصخور في الشكل (2b, 2d-10) لها مسامية قليلة ونفاذية قليلة . والصخور في الشكل (2e-10) لها نفاذية قليلة بالرغم من أن لها مسامية عالية لأنها غير مترابطة لكن الصخور في الشكل (2f -10) لها مسامية ونفاذية عاليتان . والنفاذية الناتجة عن التكسر كما هو موضح بالشكل (2g -10) هي مهمة في حقول الحرارة الجوفية .



شكل (2a,b,c,d, e, f, g-10): أنواع مختلفة من الصخور

وتعتبر الموصلية الهيدروليكية (K_w) في الصخور مقياساً جيداً للنفاذية . وينص قانون دارسي (Darcy's Law) على أن سرعة المائع (V) المار خلال مادة مسامية يتناسب مع فرق الضغط المسبب للسريان :

$$V = \frac{H}{L} K_W$$

حيث أن H هو الارتفاع المؤثر للماء المسبب 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 المـــاء (Q) المار في وحدة الزمن خلال مساحة معينة (A) بالمتر المربع هو حاصل ضرب السرعة في المساحة . أو يمكن كتابة قانون دارسي كالآتي :

$$\frac{H}{L} K_W A = Q$$

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

ويبين الجدول (10-2) بعض المعلومات عن المسامية والموصلية الهيدروليكية لبعض الصخور ، مع ملاحظة أن أعلى قيم تكون في الصخور غير الصلبة وغير المصقولة مثل الرماد البركاني المنتشر اعتيادياً في المناطق البركانية ، وهذه القيم عالية أيضاً في بعض الأحجار الكلسية والأحجار الرملية التي تمتلك نفاذية عالية .

جدول (10-2) النفاذية والموصلية لبعض الصخور

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

في الطبقات الصخرية المائية المحصورة ، (الشكل10-1) يكون ضغط السائل تحت نقطة الاستخراج عالياً ، وذلك لوجود طبقة من الصخور تمنع السوائل من الخروج إلى أعلى ، مثل الصخور الطينية والفخار والصخور غير المتكسرة .

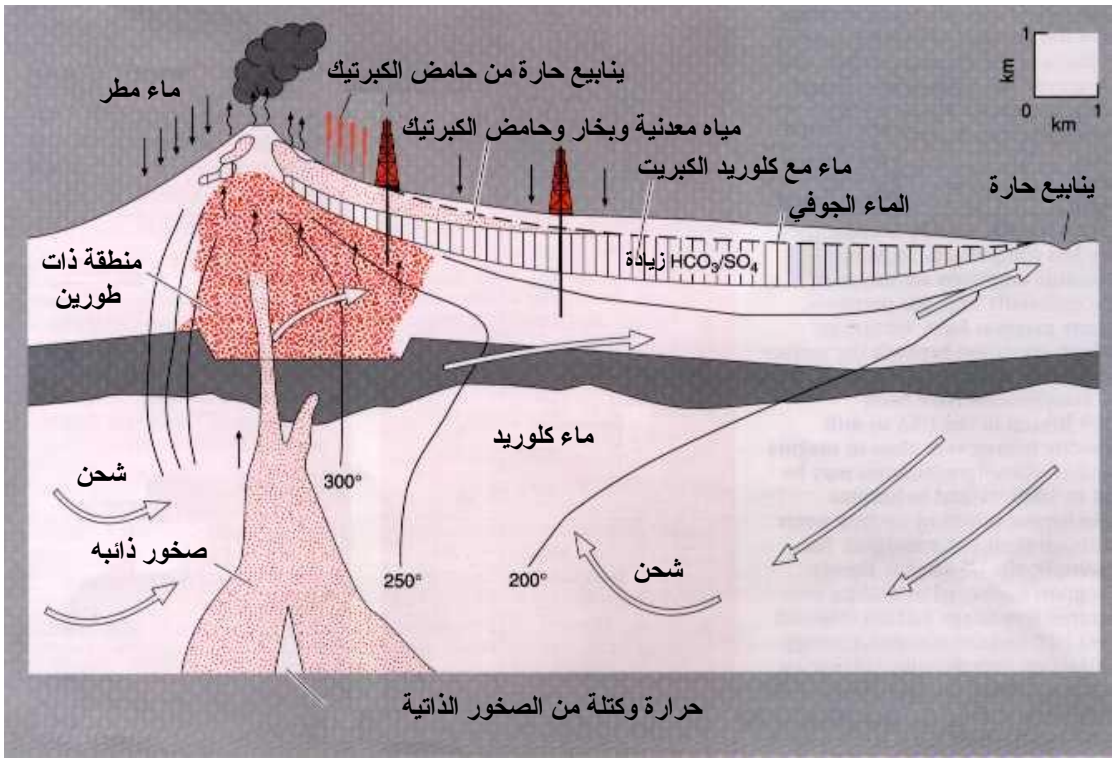
ومن المتطلبات الرئيسية للمصدر الجوفي القابل للاستغلال هو وجود المصدر الحراري . ففي المناطق ذات المحتوى الحراري العالي تكون الحرارة البركانية غزيرة ، أما في المناطق القليلة المحتوى الحراري فإن المصدر الحراري يكون أقل وضوحاً . وفي هذه المناطق هنالك مصدران رئيسيان للحرارة : المصدر الحراري الأول هو الواقع في الأحواض الرسوبية التي تنقل فيها المنطقة الصخرية الماء إلى أعماق تجعلها حارة وجاهزة للاستغلال . والثاني هو الواقع في مناطق الصخور الحارة الجافة التي يكون فيها التوليد الطبيعي للحرارة عالياً ، ولكنها تحتاج إلى عمل منطقة صخرية مائية بواسطة تكسير الصخور ليكون المصدر قابلاً للاستغلال .

3-10 مصادر الحرارة والموائع المتعلقة بالنشاطات البركانية

تتولد الحرارة اعتيادياً من تصلب الصخور المذابة التي لا تكون ، في كل الأحوال، موجودة تحت الحقل الحراري الجوفي كما في الشكل (3-10) . ومن المدهش أحياناً أن الصخور الذائبة تحت البراكين لا تنفجر ، لكنها تصل إلى مستوى تتوازن فيه قدرة الطفو وذلك لكون كثافتها تتساوى مع كثافة الصخور المحيطة بها . وهنالك عاملان يتعاونان على إيقاف الصخور الذائبة الصاعدة من الأسفل : أولهما أن الضغط يقل مع صعود الصخور الذائبة إلى الأعلى ، وهذا يساعد على فصل سائل الصخور الذائبة عن الغازات المذابة الضائعة ، وبذلك تزداد كثافة الصخور الذائبة المتبقية. والعامل الثاني هو أن الصخور في المناطق الضحلة تكون أقل انضغاطاً ، علماً بأن الانفجار البركاني يتكون نتيجة ازدياد ضغط الغاز . وإن معظم الصخور الذائبة تتجمد على عمق يتراوح من 1 إلى 5 كيلومتر.

وتوجد مواقع عديدة للطاقة الجوفية ذات إمكانيات جيدة تحت مواقع البراكين الخامدة وهي مناسبة للاستثمار ، وذلك لأن الصخور عازل جيد للحرارة ، ولهذا فإن الزمن الذي تستغرقه الصخور الذائبة بالرجوع 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 داخل المنطقة . وهذه تحدد طريقة الاستخلاص وصلاحية الموقع .

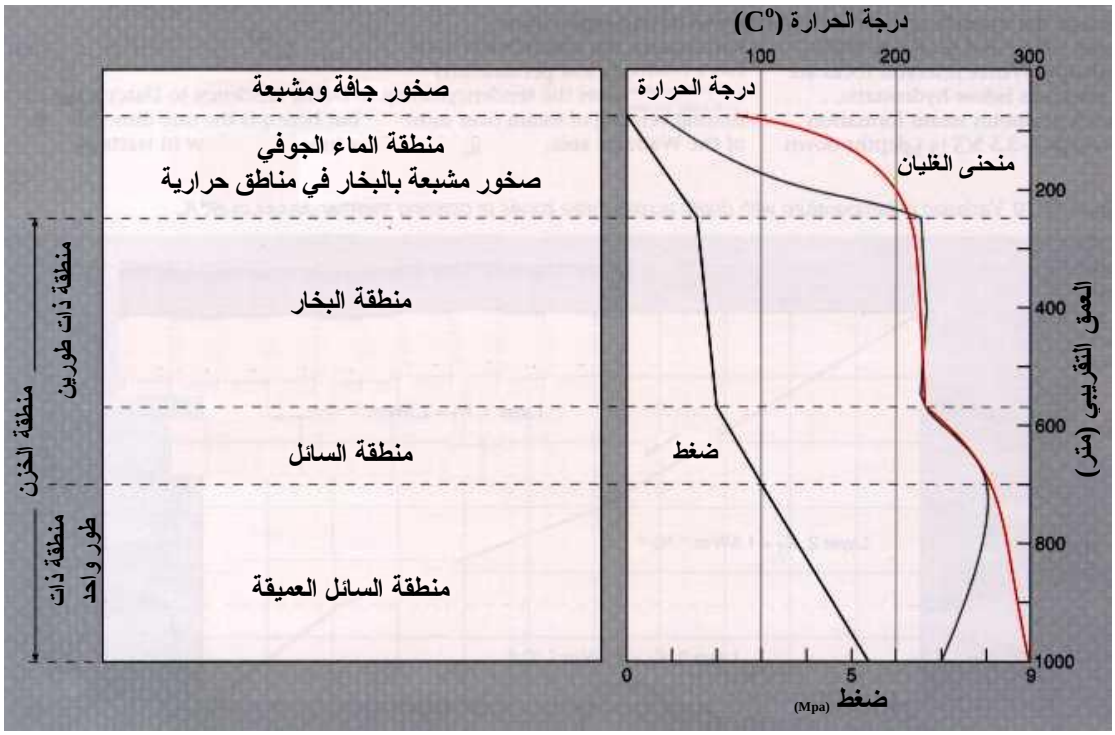


شكل (10-3): نموذج افتراضي لمنظومة حرارة جوفية بركانية

إن المدى الجيد لاستغلال موقع معين هو أن تكون درجة الحرارة (T) فيه تتراوح بين 100 و 300 درجة مئوية أقل من النقطة الحرجة التي لا يمكن فيها تمييز الماء السائل أو بخار الماء ، إذ يصل مدى الضغط فيها إلى حدّ 20 ميغا باسكال .

والمنحني الاعتيادي لدرجة الحرارة T والضغط P (P-T Curve) في موقع عمودي من حقل حراري جوفي يتوضح في (الشكل 10-4) . ففي الأعماق الضحلة التي يبلغ عمقها حوالي 250 متراً تكون درجة الحرارة منخفضة بحيث لا يمكنها الوصول بالماء إلى درجة الغليان ، ولكن في الأعماق التي تتراوح بين 250 و 575 متراً فإن درجة الحرارة تكون عالية بما فيه الكفاية لتبخر الماء ، ولهذا فإن منحنى درجة الحرارة يقع إلى اليمين من منحنى نقطة الغليان (الشكل 10-4) . وخلال هذه المنطقة يكون ازدياد الضغط قليلاً وذلك راجع لامتلاء فتحة الحقل ببخار الماء المتحول بدلاً من الماء، وإن وزن الغاز هو الذي يسبب زيادة الضغط القليلة هذه . ولأن بخار الماء يتحول بسرعة فإن المنطقة ستكون ثابتة الحرارة (Isothermal Zone) . وفي عمق يتراوح بين 575 متراً و 700 متر يزداد معدل درجة الحرارة مع العمق ، وذلك لمسايرة تبخير الماء عند

الازدياد المستمر للضغط . إن الضغط يزداد بسرعة في أعماق أقل من 700 متراً 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 بالشـــكل (4-10) ، وذلك لأن في الأعماق التي تتراوح بين 250 و700 متر 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 يتواجد فيها الطوران الغازي والسائل يكون فيها بخار الماء مركزاً فوق السائل .



شكل (10-4): منحنى الضغط ودرجة الحرارة لأحد المواقع الجوفية

وعلى أثر ذلك تقسم منظومات المحتوى الحراري العالي إلى المنظومات ذات المحتوى البخاري والمنظومات ذات المحتوى السائل معتمدة على الطور (سائل أو بخار) في الخزان . وعند النظر للخزان في الشكل(10-4) يمكن اعتباره ذا هيمنة بخارية . ومن الطبيعي لمنظومة كهذه أن تحتوي على بخار ذي محتوى حراري عالٍ على شكل بخار عالي الحرارة لأن درجة الحرارة ارتفعت إلى أعلى من نقطة الغليان في المنحنى . وهذا النوع من المصادر هو الأفضل إنتاجاً وذلك لأن البخار فيه يكون جافاً (خالياً من السوائل) ، ويحتوي على كمية حرارة عالية . ويكون خزان الصخور هذا تحت ضغط يتراوح من 3 إلى 3.5 ميغا باسكال عند عمق 2000 متر ، ويجب أن يتم عزل هذه المستودعات من تسرب الماء الجوفي الأرضي .

وعلى العكس ، فإن المناطق التي يهيمن فيها السائل تكون تحت ضغط عالٍ يزيد على 10 ميغا باسكال وبعمق أقل من كيلو متر واحد. إن توليد الطاقة الكهربائية من المناطق التي يهيمن 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-T في المناطق التي يهيمن فيها السائل يكون أقل من منحنى التبخير للماء على كل الأعماق ، ولكن عندما تفتح فتحة في المنطقة فإن الضغط سيقل والماء المرتفع 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 (10-3) ، معقد ويحتاج إلى بحوث كثيرة . لكن من الواضح أن التفاعل بين الصخور والماء الجوفي نادراً ما يحدث ، وأن الحرارة تنتقل بواسطة التوصيل من الصخور عبر منطقة متاخمة (Boundary Layer) ، وتكون في بعض الأحيان ضيقة جداً لكن لها انتقال حراري عالٍ ، وبذلك تكون المنطقة الأعلى ذات مياه حارة مناسبة للتدفئة . 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 للذين يستغلون هذا المصدر . والمعلومات الجيوكيمائية تشير إلى أن معظم الماء الجوفي هو ماء مطر مخلوط بقليل من ماء الصخور البركانية .

4-10 الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية

يوضح (الشكل 10-3) كيفية اختلاف كيمياء محاليل المناطق الجوفية بالنسبة لبعدها عن الصخور البركانية الحارة . فالغازات المتسربة من مناطق الصخور البركانية تحتوي على كلوريد الهيدروجين (HCL) و ثاني 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) وقليل من كلوريد البوتاسيوم (Kcl) . وبعض هذه المياه يتسرب إلى سطح الأرض كينابيع كبريتية .

ويصل ثاني أكسيد الكبريت إلى سطح الأرض مكوناً ينابيع الكبريت الحامضية . ويكون البخار الناتج من الماء الحراري الجوفي قرب السطح 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 .

5-10 تغيير الضغط مع العمق

يزداد الضغط بحوالي 1 ضغط جوي لكل زيادة 10 أمتار من العمق ، لذا فإن منطقة الطبقة الصخرية المائية ذات عمق 1000 متر تنتج ضغطاً مقداره 100 ضغط جوي (100 Bars) أو 10 ميغا باسكال (ميغا باسكال واحد يعادل 10 ضغط جوي) .

6-10 مصادر الحرارة في السهول الرسوبية

من النقاط المهمة التي يجب معرفتها لفهم مصادر طاقة الحرارة الجوفية هي معادلة التوصيل :

$$K_T \frac{\Delta T}{Z} = q$$

q = كمية الحرارة المتنقلة (وات بالمتر المربع)

ΔT = فرق درجات الحرارة (بالدرجات المئوية) على ارتفاع Z (بالمتر)

$\Delta T \backslash Z$ = التغيير الحراري

K_T = التوصيلية الحرارية (وات/متر- درجة مئوية)

مثال حول تغير درجة الحرارة مع الأعماق

إذا افترضنا وجود حرارة تنتقل إلى الأعلى من عدة كيلومترات تحت السطح وبمعرفة التوصيلية الحرارية للتربة نستطيع أن نربط كمية الحرارة المنتقلة مع درجة الحرارة على أي عمق . فمثلاً إذا كانت درجة الحرارة على عمق 2000 متر هي 58 درجة مئوية وكانت درجة حرارة السطح 10 درجة مئوية فإن التغيير الحراري سيكون :

$$\frac{DT}{Z} = \frac{58-20}{2000} = 0.024 \text{ درجة مئوية لكل متر}$$

وبافتراض أن التوصيلية الحرارية هي 2.5 واط/متر.درجة مئوية ، لذا فإن كمية الحرارة المنتقلة هي :

$$q = 2.5X0.024$$
$$= 0.06 \text{ واط لكل متر مربع}$$

أما إذا افترضنا أن هذه الكمية من الحرارة تنتقل خلال عدة طبقات مختلفة التوصيلية الحرارية فإن المعادلة السابقة تخبرنا بأن هنالك تغييراً حرارياً لكل طبقة مع درجة حرارة متغيرة أكثر خلال الطبقة القليلة التوصيلية الحرارية .

فإذا كانت التوصيلية الحرارية للطبقة الأولى هي 2.5 وات/متر.درجة مئوية ، والتوصيلية للطبقة الثانية 1.5 وات/متر.درجة مئوية ، والطبقة الثالثة 3.0 واط/متر.درجة مئوية ، عندها يمكن أن نتحقق بأن الشكل (10-5) يزودنا بقراءات صحيحة . فعند حساب التغير الحراري لكل طبقة من المعادلة ومقارنتها بقراءة من المنحنى في الشكل المشار إليه نحصل على النتائج التالية :

بالنسبة للطبقة الأولى :

$$\text{التغير الحراري حسب المعادلة} = \frac{0.06}{2.5} = 0.024 \text{ درجة مئوية/متر}$$

$$\text{القراءة من المنحنى} = \frac{34.5 - 10}{1000} = 0.0245 \text{ درجة مئوية/متر}$$

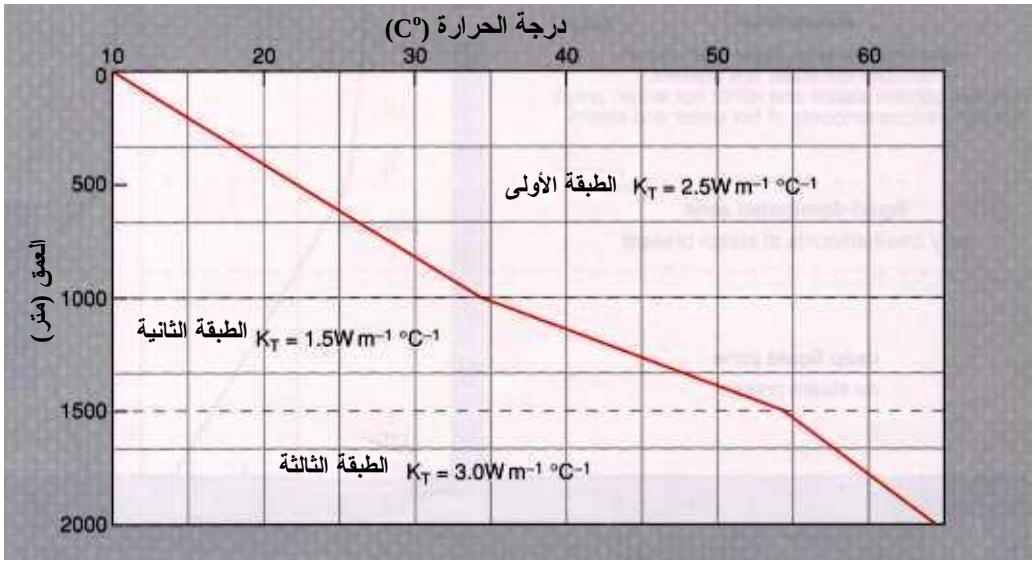
بالنسبة للطبقة الثانية :

$$\text{التغير الحراري حسب المعادلة} = \frac{0.06}{1.5} = 0.04 \text{ درجة مئوية/متر}$$
$$\text{القراءة من المنحنى} = \frac{54.5 - 34.5}{500} = 0.04 \text{ درجة مئوية/متر}$$

بالنسبة للطبقة الثالثة :

$$\text{التغير الحراري حسب المعادلة} = \frac{0.06}{3.0} = 0.02 \text{ درجة مئوية/متر}$$
$$\text{القراءة من المنحنى} = \frac{64.5 - 54.5}{1000} = 0.02 \text{ درجة مئوية/متر}$$

من دقة المعلومات وتوافق الدرجة المحسوبة والمقاسة يتبين أن التغيير الحراري يتناسب مع كمية الحرارة المنتقلة وهي 0.06 واط لكل متر لكل طبقة . وعند مقارنة هذه الحالة مع الحالة الأولى عند استخدام موصلية حرارية واحدة لكل العمق نستنتج أن وجود طبقة قليلة العمق وذات موصلية حرارية قليلة تحّسن من درجة الحرارة على عمق 2 كيلو متر .



شكل (10-5): تغير درجة الحرارة مع العمق لثلاث مناطق مختلفة الموصلية الحرارية

إن قيم الموصلية الحرارية (K_T) لأنواع مختلفة من الصخور (كالصخور الكلسية والرملية والبلورية) متقاربة وتتراوح قيمتها من 2.5 إلى 3.5 وات/م درجة مئوية . أما الصخور الطينية فتتراوح قيمتها من 1-2 وات/م.درجة مئوية . وعند النظر مرة ثانية إلى الجدول (10-2) نرى أن هذه الصخور هي من الصخور العالية النفاذية وتسهم بخاصتين مهّمتيْن للمصادر الجوفية : الأولى أنهّا تعمل كصخور واقية عالية النفاذية، والثانية أنهّا تقوم بتحسين التغير الحراري فوق المنطقة المائية الصخرية .

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

إن استكشافات المصادر الهيدروكربونية في الستينات والسبعينات من القرن العشرين كانت ناجحة في تحديد مواقع مياه حارة بدرجات حرارية تتراوح بين 70 و55 درجة

مئوية على أعماق تتراوح ما بين 2 و1 كيلو متر تحت مدينة باريس ، ولكنها لم تجد أي نفط أو غاز . وبما أن هذه الدرجات غير مناسبة لتوليد الطاقة الكهربائية وقربها من الحمل الحراري ، فإن منطقة باريس تكون منطقة مناسبة لاستغلال هذه الطاقة لأغراض التدفئة . وهنالك مناطق أخرى مماثلة في إنكلترا أيضاً .

7-10 الصخور الحارة الجافة

تنسب مصادر الصخور الحارة الجافة إلى الحرارة المخزونة في طبقة من الصخور القليلة النفاذية وإلى العمليات التي يمكن بها استخلاص هذه الحرارة . والطريقة التي يتم بها استخلاص الحرارة من هذه المناطق هي بحفر مجارعميقة داخل الطبقات الصخرية يتم ضخ المياه فيها ليتكون بخار يتم منه توليد الطاقة الكهربائية . وبالرغم من أن التكنولوجيا غير موجودة 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 . وكلفة الحفر عالية ، ولهذا فإن 6 كيلو مترات فقط تحت سطح الأرض يمكن استخدامها لاستخلاص طاقة بالرغم من أن الحفر قد وصل أحياناً إلى عمق 15 كيلو متر . وبعد دراسة المحددات التقنية الحالية وكلفة الحفر بعمق فإنه من الأفضل الاهتمام بمناطق صخرية ذات انتقال حراري عالٍ . والهدف المثالي هو أجسام الغرانيت ، وذلك لأنها تحتل حجوماً كبيرة من قشرة الكرة الأرضية وأنها تصلبت من الحمم البركانية ذات التركيز العالي بالمواد المشعة كاليورانيوم والتوريوم والبوتاسيوم .

ومن محاسن استغلال طبقات الصخور الجافة انتقال الحرارة العالي منها إذ يصل فرق درجات الحرارة إلى 30 درجة مئوية لكل كيلو متر فيها ، لذا فإنه على عمـــــق 5 كيلو مترات تكون درجة الحرارة أكثر من 170 درجة مئوية ، وهي مناسبة جداً لتوليد الطاقة الكهربائية . وتجري حالياً بحوث في منطقتين ملائمتين في كل من فرنسا وألمانيا لتطوير استغلال طاقة الحرارة الجوفية .

8-10 حقول البخار ذات الضغط العالي

تبدأ الخطوة الأولى لاستغلال الطاقة الجوفية بدراسات جيولوجية في المناطق البركانية بهدف تحديد الصخور التي تغيرت كيميائيا بواسطة المحاليل الجيوحرارية والمساحات ذات المظاهر الدالة كالينابيع ومستنقعات الطين . والتقنيات الجيو فيزيائية ، وبالأخص

تحديد المقاومة وبعض الطرق الكهربائية الأخرى المصممة للاستشعار عن مناطق ذات موائع موصلة للكهربائية ، هي من الطرق الفعالة لتحديد المصادر الجوفية الحرارية .

وعندما يتم تحديد موقع الصخور المائية يتم حفر البئر . وعندما يكون ضغط المائع داخل الموقع حوالي 10 ميغا باسكال يجب أن يتم رمي طين ذي كثافة عالية للتصدي لهذا الضغط ومنع الانفجار ، ويتم حينها إخراج الغازات التي من الصعب السيطرة عليها. إن مساحة فتحة البئر تقل كلما ازداد العمق . فعند السطح تكون اعتيادياً بحوالي 50 سنتمتراً ، وتكون حوالي 15 سنتمتراً عند عمق الإنتاج . وتغلف البئر بأنابيب فولاذ وكونكريت وأحياناً يتم وضع غطاء فولاذي مثقوب عند عمق الإنتاج . ويتم أيضاً وضع صمام على أنبوب البئر يكون إمّا مربوطاً بلحام بالأنبوب الفولاذي أو مربوطاً بقاعدة الكونكريت على سطح الأرض . وهذه تساعد ربط البئر بمحطة توليد الطاقة عبر شبكة من الأنابيب المعزولة .

إن تقنيات محطة التوليد تعتمد بصورة رئيسية على طبيعة المنتج ولكن ليس فقط درجة الحرارة والضغط وإنمّا أيضاً درجة ملوحته واحتوائه على غازات أخرى ، إن كل هذه تؤثر على كفاءة المحطة وتصميمها . وتوجد الآن أكثر من 250 محطة منصوبة في مختلف أنحاء العالم ، وهي تتضمن أربعة أنواع رئيسية هي :

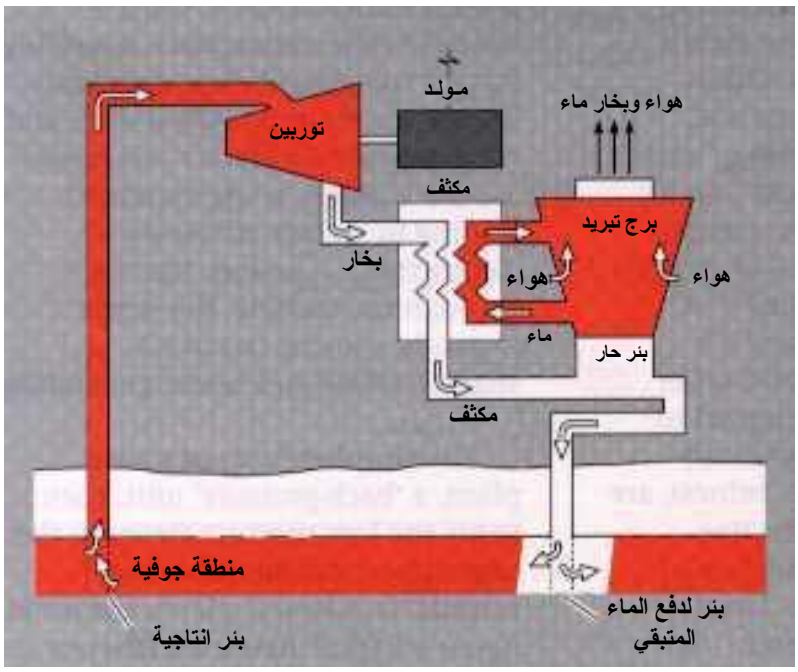
1-8-10 محطات البخار الجاف

يكون البخار المنتج في هذه المحطات غير مختلط بالسوائل ، وإنما هو بخار عالي الحرارة بدرجة حرارة تتراوح بين 185 و180 درجة مئوية وضغط يتراوح بين 0.9 و0.8 ميغا باسكال ويصل إلى السطح من عمق يبلغ عدة كيلومترات . وعندما يتم تنفيسه إلى الجو يحدث صوتاً كصوت الماكنة النفاثة في الجو. ودرجات حرارة هذا البخار تتراوح بين 350 و 300 درجة مئوية ، وضغط عالٍ يمكن استغلاله أيضاً ، وهذا يعطينا كفاءة أكثر في إنتاج الطاقة الكهربائية. وعند إمرار البخار في التوربين فإنه سيتمدد ليقوم بتدوير شفرات التوربين وتوليد الطاقة الكهربائية .

وأبسط نوع من هذه المحطات هو وحدة الضغط الخلفي (الشكل10-6) وفيها يتم إطلاق البخار ذي الضغط الواطئ إلى الخارج . ولكن المحطات التي تقوم بتكثيف البخار هي

الأكثر كفاءة إذ تقوم بتكثيف البخار وبالتالي زيادة فرق الضغط بين طرفي التوربين، وذلك لأن الماء يشغل حجماً أقل من حجم البخار بما يعادل 1000 مرة .

إن الكفاءة الاعتيادية لهذه المحطات لا تزيد عن 30% رغم أنها تستخدم بخاراً بدرجات حرارة عالية . وكانت المحطات التي أنشئت في الستينات تحتاج إلى 15 كيلو غرام من البخار لإنتاج واحد كيلو وات – ساعة من الكهرباء في الظروف الاعتيادية . ومع استخدام بخار بدرجات حرارة أعلى ومكائن ذات تصميم أفضل تم تقليل الكمية إلى 6.5 كيلو غرام من البخار لإنتاج واحد كيلو وات – ساعة من الكهرباء . لذا فإن محطة بقدرة 55 ميغاواط تحتاج إلى 100 كيلو غرام بالثانية من البخار . وإن وجود الغازات غير القابلة للتكثيف مع البخار يقلل من كفاءة المحطة ويؤثر على جدواها الاقتصادية وعلى تلوث البيئة أيضاً . ولهذا إما أن يتم تخليصها من السائل المتبقي الخارج من التوربين أو حقنها مرة أخرى إلى الأرض لتقليل التلوث . ومحطات البخار الجاف من أكثر المحطات كفاءة واستخداماً واقتصاداً . وتتوفر الولايات المتحدة وإيطاليا على كميات كبيرة من مصادر البخار الجاف ، بالإضافة إلى وجود بعض الحقول في كل من أندونيسيا واليابان والمكسيك .

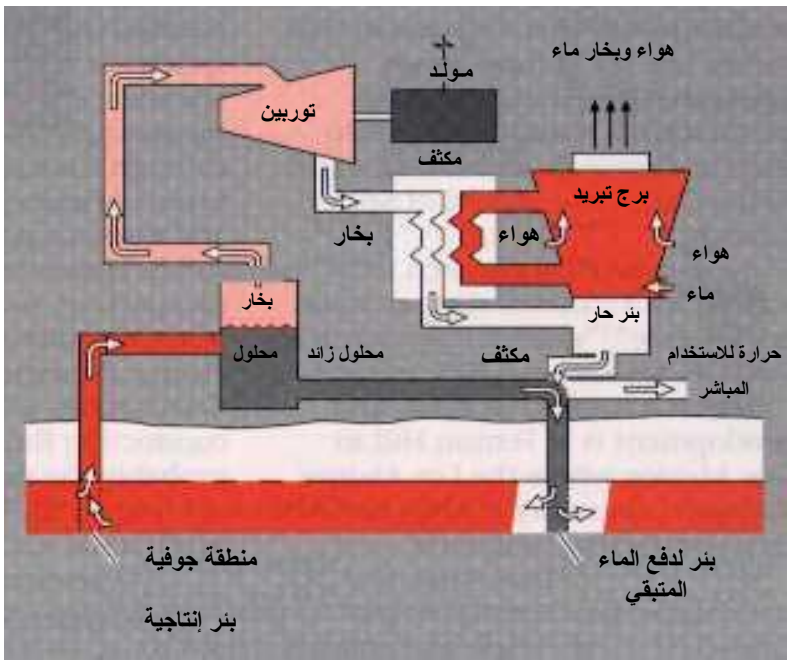


شكل (10-6): مخطط لمحطة بخار جاف من نوع وحدة الضغط الخلفي

2-8-10 المحطات البخارية الوميضية الأحادية

في هذه المحطات يكون البخار الواصل إلى السطح مصحوباً ببعض السوائل الناتجة إمّا من تكثيف بعض البخار أثناء صعوده إلى السطح أو من تواجد ماء حار ذي ضغط عالٍ في الخزان (الشكل 10-7) . وفي هذه الحالة يتم نصب جهاز لفصل الماء عن البخار لحماية التوربين ومن الأفضل تجنب حالة تكثيف البخار أثناء صعوده لأن ذلك سيسبب تراكم المعادن المصاحبة للبخار على جانبي الأنبوب والتي يمكن أن تؤدّي إلى انسداده .

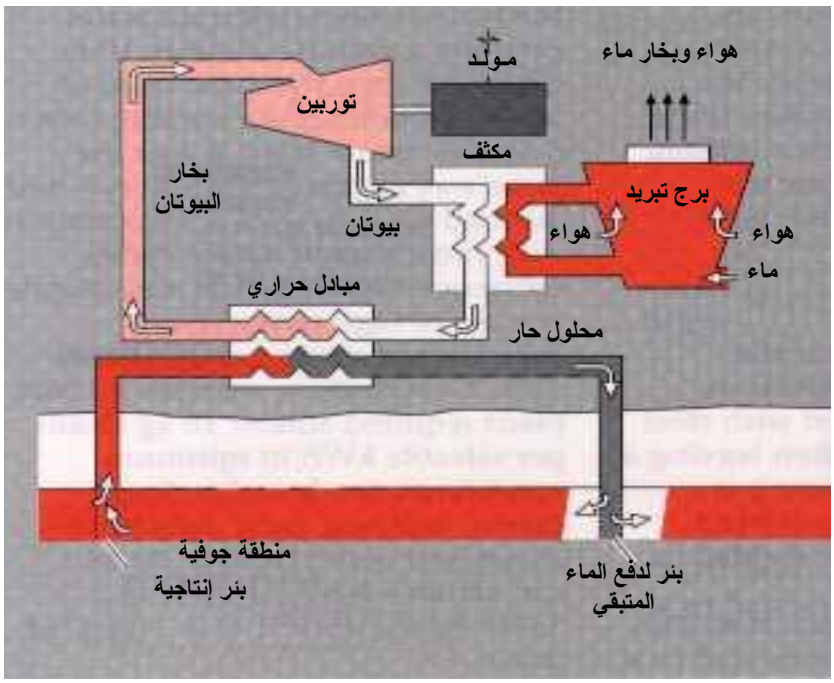
إن التعامل مع ماء تحت ضغط عالٍ يتطلب أجهزة أكثر تعقيداً وذلك لتقليل الضغط وفصل البخار . وفي هذه المحطات يستخدم التوربين التقليدي بضغط أقل يتراوح بين 0.6و0.5 ميغا باسكال ودرجات حرارة تتراوح بين 165 و155 درجة مئوية ، إذ تحتاج المحطة إلى كمية أكثر من البخار تصل إلى 8 كيلوغرام لكل كيلوواط – ساعة . أما السائل المتبقي والذي يصل إلى حوالي 8% ، فيمكن أن يحقن مرة ثانية أو يستخدم في أغراض التدفئة وتسخين المياه .



شكل (10-7): مخطط لمحطة بخار جاف من النوع الوميضي الأحادي

3-8-10 محطات الدورات المزدوجة

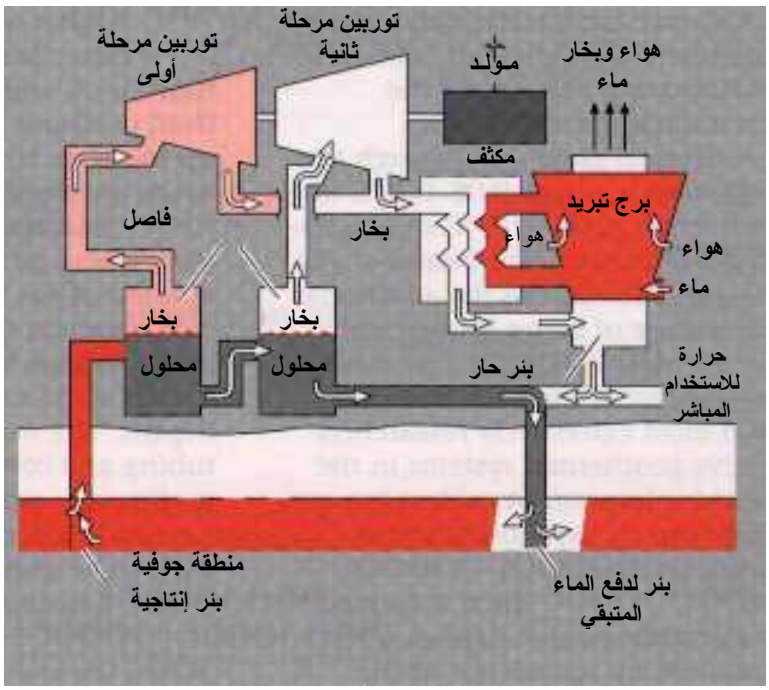
تستخدم هذه المحطات مائعاً ثانويّاً ، كما في الشكل (10-8) ، ذا درجة غليان أقل من درجة غليان الماء مثل البنتين والبيوتين اللذين يتبخران ويدوّران التوربين . ويدفع محلول الماء الجوفي عند ضغط مساو لضغط الخزان إلى مبادل حراري ، والحرارة المنتقلة عبر المبادل الحراري إلى المائع تكون كافية لتبخيره ورفع درجة حرارة البخار إلى درجة عالية . وعلى الرغم من الكفاءة العالية لهذا النظام ، مقارنة بالمحطات البخارية الوميضية الأحادية ، إلاّ أن كلفته الأولية عالية جداً . وبالإضافة إلى ذلك فإن إبقاء الماء الجوفي تحت ضغط ورفع ضغط المائع الثانوي يتطلب حوالي 30% من الطاقة المنتجة وذلك للحاجة إلى مضخات كبيرة . وهناك كميات كبيرة من الماء الجوفي تستخدم لهذا الغرض . ففي محطة الطاقة الجوفية الحرارية في منطقة ماموث في ولاية كاليفورنيا يتم استهلاك 700 كيلو غرام بالثانية من المياه لإنتاج 30 ميغاوات . وتعمل حوالي 60 محطة من هذا النوع في مناطق مختلفة من العالم .



شكل (10-8): مخطط لمحطة بخار جاف نوع محطات الدوران المزدوجة

4-8-10 المحطات الوميضية الثنائية

جرت في الآونة الأخيرة محاولات لتحسين كفاءة المحطات البخارية الوميضية الأحادية وذلك لتجنب استخدام محطات الدورات المزدوجة العالية الكلفة . والمحطات الثنائية كما في الشكل (10-9) تكون مناسبة جداً عند عدم احتواء الماء الجوفي على شوائب وغازات متكثفة وترسبات . وفي هذه المحطات يذهب السائل المتبقي بعد المرحلة الأولى إلى خزان ضغط واطئ . ونتيجة لفرق الضغط يتكون بخار يخلط مع الناتج الخارج من التوربين الأول لتشغيل توربين آخر (أو تشغيل المرحلة الثانية من التوربين الأول) . وهذا التحوير يرفع إنتاج المحطة بنسبة 20% إلى 25% بزيادة إضافية في الكلفة قدرها 5% . وفي هذه المحطات هنالك حاجة أيضاً إلى كميات كبيرة من المياه الجوفية . فمثلاً تستخدم محطة شرقي ميسا (East Mesa) في جنوب كاليفورنيا ، التي افتتحت في عام 1988 مياهاً بكمية مقدارها 1000 كيلو غرام بالثانية من ست عشرة بئراً لإنتاج 37 ميغاوات ، وهي عشرة أضعاف الكمية المستخدمة في محطات البخار الجاف.



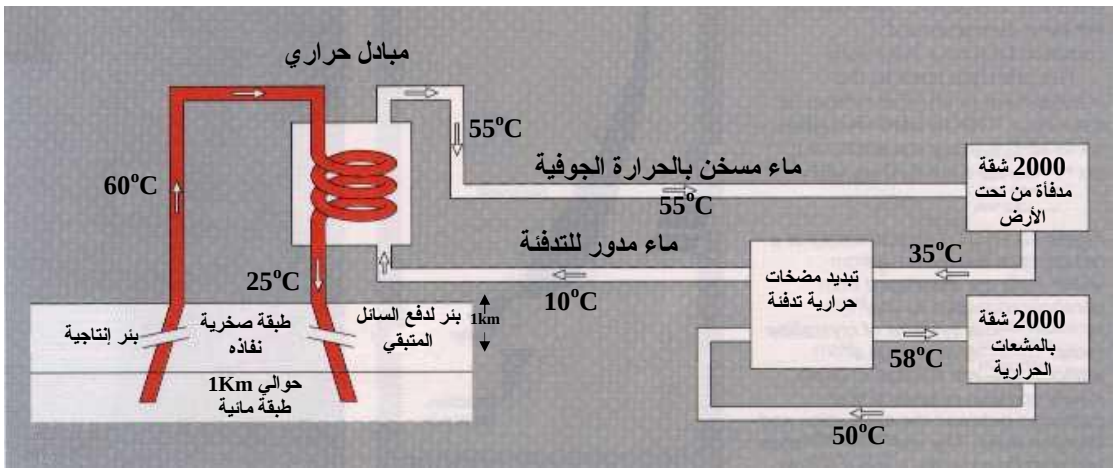
شكل (10-9): مخطط لمحطة بخار جاف من النوع الوميضي الثنائي

9-10 المصادر المستخدمة في الاستخدام المباشر لطاقة الحرارة الجوفية

الدول المدرجة في الجدول (10-1) والتي تستغل مصادر الطاقة الجوفية لأغراض غير توليد الطاقة الكهربائية اختارت في تطوير هذه الاستخدامات مناطق مجاورة للحقول البخارية . ومن أمثلة ذلك اليابان ، ونيوزلندا ، وإيسلندا وإيطاليا . أما بالنسبة إلى المصادر ذات درجات حرارية قليلة والتي تقع في الأحواض الرسوبية فإن عدداً منها قد استغل في وسط أوربا . فعمليات الحفر في هذه المناطق أقل خطراً وذلك لكون الماء الموجود يكون تحت ضغط قليل مقارنة بحقول البخار ، وهنالك حاجة في هذه الحالة إلى مضخات لرفع الماء إلى سطح الأرض . إن الماء الحار المستخدم سيكون بالتأكيد مالحاً جداً وذا شوائب كثيرة تساعد على التآكل ولا يمكن ضخه مباشرة إلى منظومات التدفئة ولهذا السبب تستخدم مبادلات حرارية عالية المقاومة للتآكل في هذا المجال . ويتم استغلال الماء الحار الناتج عبر المبادل الحراري في تدفئة البيوت الزجاجية والتدفئة المركزية .

لقد طور الفرنسيون هذه المصادر القليلة المحتوى الحراري ، وخلال الثلاثين عاماً الماضية تم نصب 55 مجموعة تدفئة في باريس وعدة منظومات أخرى في جنوب غربي فرنسا . في مرحلة التصميم يتم ضخ المياه الحارة من بئر إنتاجية ويتم طرح المياه الخارجة من المبادل الحراري إلى بئر أخرى الشكل (10-10) وذلك لإنتاج 3 إلى 5 ميجاوات من الطاقة الحرارية وبمعـــدل20 إلى 25 لتراً بالثانية لماء بدرجة حرارة $60C^0$ درجة مئوية . في هذا التصميم يجب الاهتمام بالظروف الراهنة بالماء الجوفي بحيث يجب أن تكون المسافة بين البئرين مناسبة لعدم حدوث تأثير من الماء الراجع على درجة حرارة الماء المجهز لمنظومة التدفئة . وقد تم الاعتماد على مبدأ المضخة الحرارية لتحسين كفاءة المنظومة كما في الشكل (10-10) . وتعمل المضخات الحرارية بنفس مبدأ مكيفات الهواء ولكنها هنا تنتج ماء بدرجة حرارية عالية . بالطبع ، فإن المضخة الحرارية ستستهلك طاقة كهربائية ولكنها في نفس الوقت تقوم بتجهيز ماء حار كافي لتدفئة منظومة إضافية أخرى .

سيتيح استعمال المضخة الحرارية مستقبلاً إلى الاتجاه حول إمكانية استخدام آبارٍ ذات مياه جوفية بدرجة حرارة معتدلة لأغراض التدفئة . فمثلاً أمكن تدفئة 4000 سكن منفرد باستخدام المضخة الحرارية وبمياه جوفية ذات عمق 100 متر ، وارتفع هذا العدد إلى 9000 في عام 1992 .



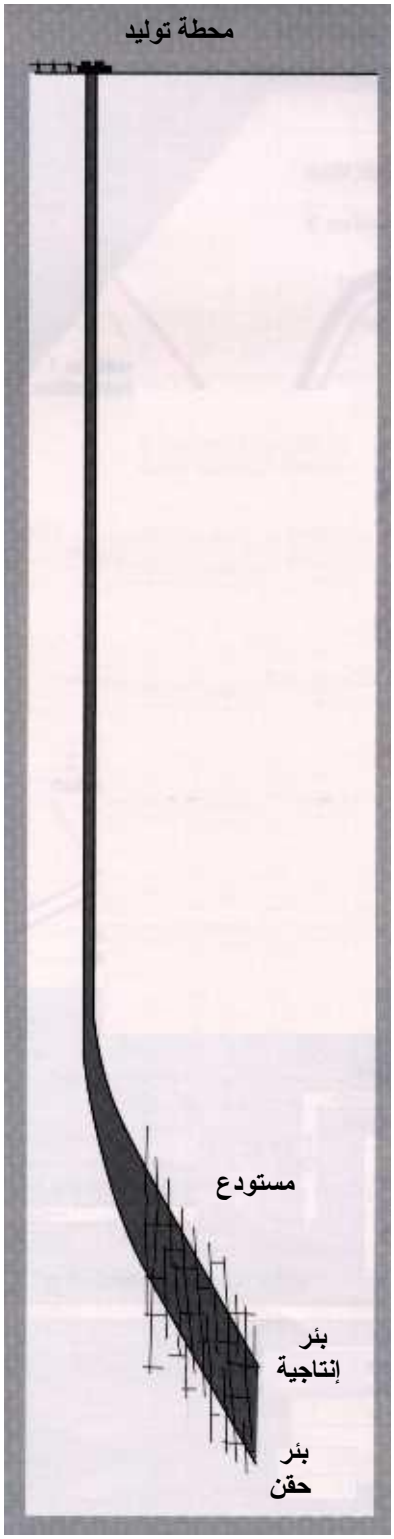
شكل (10-10): منظومة تدفئة جوفية تعمل بمبدأ المضخة الحرارية

10-10 تقنيات الصخور الحارة الجافة

إن المبدأ الذي تقوم عليه عمليات استغلال هذه الطاقة هو حفر بئر رأسية تصل إلى الصخور الصلدة الساخنة في باطن الأرض ، والتي قد يصل عمقها من 6 إلى3 كيلو متر تحت سطح الأرض ، ثم دفع سائل يستطيع نقل الحرارة (مثل الماء) خلال هذه البئر ليدور بين شقوق هذه الصخور وينقل منها بعض حرارتها ويحملها معه إلى سطح الأرض من بئر أخرى (الشكل 10-11) .

وقد كان العلماء الأمريكيّون في مختبرات لوس ألموس أول من قاموا بإجراء تجربة عملية في هذا المجال في بداية السبعينات . فتم حفر بئر رأسية بجوار أحد البراكين القديمة حتى وصل عمقها إلى 3000 متر تحت سطح الأرض ، ودُفع فيه تيار من الماء ليخرج من بئر أخرى على مسافة قريبة من البئر الأولى بدرجة حرارة $180C^0$ درجة مئوية بعد أن تحول إلى بخار . واستخدم البخار الخارج في تدوير توربين لتوليد الكهرباء . وبعد نجاح هذا المشروع بدأ العلماء في التخطيط لمشروع آخر مماثل في عام 1979 . وقد بدأت تجارب مماثلة في كثير من البلدان مثل ألمانيا الغربية وفرنسا واليابان وأوكرانيا .

وهنالك الكثير من الصعوبات التي تعترض تنفيذ مثل هذه المحطات منها تسرب المياه التي يتم دفعها إلى البئر إلى بعض الطبقات المسامية من قشرة الأرض ، وبذلك لا يمكن إعادتها إلى سطح الأرض ، وصعوبة نفاذية الصخور في بعض المناطق وهذا يشكل حملاً كبيراً على مضخات ضخ الماء . وسيحتم ذلك استكشاف المناطق التي تصلح لاستخدام طاقة الأرض الحرارية مع دراسة نوعية الصخور الموجودة بباطن أرضها .



شكل (10-11): منظومة توليد تستخدم طبقة الصخور الجافة

لقد انحصر البحث عن هذه المصادر الأرضية فيما مضى في الأماكن المحيطة بالينابيع الحارة الطبيعية واستخدمت في ذلك بعض الطرق المستعملة في البحث عن البترول ، مثل قياس الجاذبية الأرضية وتعيين التوصيل الكهربائي للكتل الصخرية واستخدام أجهزة القياس المتقدمة . ويهتم العلماء أيضاً بخفض تكلفة عمليات الحفر العميق وذلك

لأن أغلب الصخور الصلدة الساخنة التي تصلح مصدراً للحرارة العالية توجد على عمق كبير . وترتفع تكلفة الحفر إلى حدود كبيرة عندما يزيد عمق الحفرة عن 6000 متر ، كما أن أجهزة القياس المختلفة تفقد كثيراً من حساسيتها وقد تفقد صلاحيتها تماماً عند درجات الحرارة المرتفعة التي تصل إلى 2000 درجة مئوية . ولهذا فإن البحوث الحديثة في هذا المجال تتجه أساساً إلى تحسين طرق الحفر وطرق القياس معاً .

11-10 الاعتبارات البيئية لطاقة الحرارة الجوفية

إن معظم المشاكل البيئية المتعلقة بهذا النوع من الطاقة هي تلك المتعلقة بتحضير الموقع مثل مشاكل الضجيج خلال الحفر ، ورمي المخلفات السائلة للحفر والتي تحتاج منطقة ترسيب واسعة . والضجيج عامل مهم في المواقع ذات المحتوى الحراري العالي وذلك عند خروج البخار خلال عمليات الحفر والتجربة ، ولكن عندما يصل الموقع إلى مرحلة التشغيل الاعتيادي فإن مستوى الضجيج لا يتعدى مستوى محطات توليد الطاقة الأخرى .

والحوادث خلال عمليات التجربة قليلة ماعدا حادثة 1991 في محطة زميل (Zamil) للحرارة الجوفية التي نتجت من جراء الحفر في موقع مهمل منذ عام 1981 في منطقة بركانية . وقد أدى هذا الحادث إلى تطاير مئات الأطنان من الصخور والطين والبخار إلى الجو .

ومن التأثيرات الطويلة الأمد هو ترسب السوائل الناتجة عن الحفر والغازات الملوثة غير المتكثفة مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مع كميات قليلة من كبريتيد الهيدروجين (H_2S) ، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) ، والهيدروجين (H_2) ، والميثان (CH_4)، والنيتروجين (N_2) . كما يوجد في الماء المتكثف السليكات ، والمعادن الثقيلة، وكلوريدات الصوديوم ، والبوتاسيوم وفي بعض الأحيان الكربونات ، وهذه تعتمد على علاقة التفاعل 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 تبعث الطاقة الجوفية من غاز ثاني أكسيد الكربون 2% فقط من الكمية التي يبعثها أنظف وقود للطاقة التقليدية . أما بالنسبة إلى

غاز الأمطار الحامضية (ثاني أكسيد الكبريت) فإن الانبعاث لا يتجاوز 1% . وفي مجال التنمية الاجتماعية فإن المحطات الجوفية الحرارية تستغل مساحة قليلة من الأراضي، ويمكن استخدام بضعة دونمات لتشغيل محطة بطاقة 100 ميغاوات . كما أن حفر آبار الطاقة الجوفية الحرارية أكثر أماناً وخالٍ من الحرائق مقارنة بحفر آبار النفط أو الغاز .

إن استخلاص الطاقة من باطن الأرض له كثير من المميزات الواضحة ، إذ لا يحتاج إلى عمليات ثانوية مثل عمليات التعدين والاستخراج من باطن الأرض ، كما أن الطاقة لا تحتاج إلى إعداد معين قبل تسويقها ولا تحتاج إلى ابتكار وسائل لنقلها أو تخزينها، وهي أمور نصادفها دائماً عند استخدامنا لمصادر الطاقة التقليدية المستعملة اليوم .

وعلى الرغم من أن الطاقة الحرارية لباطن الأرض لم تستغل إلى حد الآن بشكل جدي وعلى نطاق واسع ، فإن هنالك آمالاً عريضة في أن يتم استغلالها بشكل عملي في السنوات القليلة القادمة ، خاصة وأنها تتوفر في كل مكان ، كما أنها طاقة نظيفة لا ينتج عنها تلوث للبيئة .

أسئلة تقويمية

١. كيف تكونت الحرارة داخل الأرض ؟
٢. ما هي أنواع الطاقة الحرارية الجوفية ؟
٣. كيف يتم استخلاص الحرارة من الصخور الجافة ؟
٤. ما هي التقنيات المستخدمة في توليد الطاقة الحرارية من الطاقة الجوفية ؟
٥. ما هي الآثار البيئية الناجمة عن استخدام مصادر الطاقة الجوفية ؟
٦. بعض علماء الجيولوجيا لا يعتبرون الطاقة الحرارية طاقة غير متجددة لأن الحرارة تتسرب إلى الجو لدرجة وصول حرارة الجوف إلى البرودة . ما هو تعليقك على هذا الرأي ؟