

# تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية عالميا: نماذج ناجحة في التدفئة والتبريد وتوليد الكهرباء

Global Applications of Geothermal Energy: Successful Models in Heating, Cooling, and Electricity Generation

حسين بن حرزالله\*

جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي- الجزائر

[hocine30@gmail.com](mailto:hocine30@gmail.com)

تاريخ النشر: 2025/04/17

تاريخ القبول: 2025/04/13

تاريخ الإستلام: 2025/03/29

## ملخص:

تعد الطاقة الحرارية الأرضية مصدرا متجددا يعتمد على حرارة باطن الأرض، مما يجعلها خيارا واعدة لتقليل الانبعاثات وتعزيز الأمن الطاقوي. تعتمد على استخراج الحرارة من مصادر تقليدية وغير تقليدية، باستخدام تقنيات متنوعة مثل محطات البخار الجاف والدورة الثنائية، إلى جانب أنظمة التدفئة والتبريد الجيوحرارية، شهد المجال تطورات مهمة كالحفر العميق والذكاء الاصطناعي لتحسين الكفاءة، مع زيادة دول مثل إيسلندا والولايات المتحدة في استغلال هذا المورد تتميز الطاقة الحرارية الأرضية باستمراريتها واستدامتها مقارنة بمصادر أخرى، ما يجعلها حلا فعالا لمستقبل الطاقة النظيفة ورغم فوائدها البيئية والاقتصادية، تواجه تحديات كارتفاع تكاليف الحفر والتأثيرات الزلزالية، مما يستدعي تطوير تقنيات مبتكرة ودعم الاستثمارات لتعزيز دورها في التحول الطاقوي.

كلمات مفتاحية: طاقة حرارية أرضية، استدامة طاقوية، جيوحرارية، تدفئة وتبريد، استثمار.

تصنيفات JEL: Q42، Q01، L95، O13.

## Abstract :

Geothermal energy is a renewable source that relies on the Earth's internal heat, making it a promising option for reducing emissions and enhancing energy security. It involves extracting heat from both conventional and unconventional sources using various technologies, such as dry steam power plants and binary cycle systems, in addition to geothermal heating and cooling systems. Significant advancements have been made in the field, including deep drilling and artificial intelligence to improve efficiency, with countries like Iceland and the United States leading in its utilization. Geothermal energy is distinguished by its continuity and sustainability compared to other sources, making it an effective solution for the future of clean energy. Despite its environmental and economic benefits, it faces challenges such as high drilling costs and seismic risks, necessitating the development of innovative technologies and investment support to strengthen its role in the energy transition.

**Keywords:** Geothermal energy; energy sustainability; geothermal; heating and cooling; investment.

**Jel Classification Codes :** Q42; Q01; L95; O13.

\*المؤلف المراسل.

## 1. مقدمة:

تعد الطاقة الحرارية الأرضية من أقدم مصادر الطاقة التي اعتمد عليها الإنسان، حيث تستمد من الحرارة المخزنة في باطن الأرض. تنتج هذه الحرارة من التحلل الإشعاعي للعناصر في النواة الداخلية للأرض، مما يوفر مصدرا مستداما للطاقة يمكن استخدامه في تطبيقات متعددة.

في ظل التحديات البيئية المتزايدة والاعتماد المفرط على الوقود الأحفوري، تبرز أهمية استغلال الطاقة الحرارية الأرضية كمصدر متجدد ونظيف. يتميز هذا المصدر بقدرته على تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة والمساهمة في تحقيق التنمية المستدامة، بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام الطاقة الحرارية الأرضية يساهم في تنويع مصادر الطاقة، مما يعزز الأمن الطاقوي للدول ويقلل من الاعتماد على المصادر التقليدية المحدودة.

تسعى هذه الدراسة إلى استعراض تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية عالميا، مع التركيز على نماذج ناجحة في مجالات التدفئة، التبريد، وتوليد الكهرباء. تهدف الدراسة إلى تحليل التقنيات المستخدمة، تقييم الفوائد البيئية والاقتصادية، واستشراف الآفاق المستقبلية لهذا المصدر الطاقوي الحيوي.

## 2. مفاهيم أساسية حول الطاقة الحرارية الأرضية:

### 1.2. تعريف الطاقة الحرارية الأرضية:

الطاقة الحرارية الأرضية، أو الجيوثيرمالية، هي الطاقة المستمدة من حرارة باطن الأرض. تنتج هذه الحرارة من العمليات الجيولوجية الطبيعية، مثل التحلل الإشعاعي للعناصر المشعة في الصخور، وتستغل لتوليد الكهرباء وتوفير التدفئة والتبريد. (المعرفة، 2021) (النجاح، 2023)

تعتبر الطاقة الحرارية الأرضية مصدرا متجددا ونظيفا للطاقة، حيث تستخرج الحرارة من أعماق الأرض عبر آبار خاصة، وتستخدم مباشرة في التدفئة أو لتوليد الكهرباء من خلال محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية. تتميز هذه الطاقة باستمراريتها وعدم تأثرها بالظروف الجوية، مما يجعلها خيارا مستداما لتلبية احتياجات الطاقة. (renovables، .)

### 2.2. مصادر الطاقة الحرارية الأرضية وآلية استخراجها:

يمكن تصنيف مصادر الطاقة الحرارية الأرضية إلى نوعين رئيسيين:

#### ❖ الموارد التقليدية:

- المياه الجوفية الحارة: تتواجد في المناطق ذات النشاط البركاني أو التكتوني، حيث تسخن المياه الجوفية بفعل حرارة الصخور المحيطة. تستخرج هذه المياه أو البخار لاستخدامها مباشرة في التدفئة أو لتشغيل التوربينات وتوليد الكهرباء.
- الصخور الساخنة الرطبة: تتواجد في البيئات الرسوبية أو الجرانيتية المتشققة، حيث تتسرب المياه إلى أعماق الأرض وتسخن بفعل حرارة الصخور، مما يسمح باستخراجها واستخدامها في التطبيقات المختلفة. (Microsoft، )

#### ❖ الموارد غير التقليدية:

- أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المحسنة (EGS): تستخدم عندما تفتقر الصخور إلى النفاذية أو السوائل اللازمة لاستخراج الحرارة. يتم إنشاء خزانات حرارية اصطناعية عن طريق تحفيز الصخور لزيادة نفاذيتها، ثم يضخ سائل لنقل الحرارة إلى السطح.

– أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المتقدمة (AGS): تعتمد على أنظمة حلقة مغلقة، حيث يدور سائل عبر آبار محفورة ليمنص الحرارة من الصخور المحيطة، ثم يستخدم هذا السائل المسخن في توليد الكهرباء أو التدفئة. (ThinkGeoEnergy، )

### 3. تقنيات استخدام الطاقة الحرارية الأرضية

#### 1.3. تقنيات توليد الكهرباء من الطاقة الجوفية

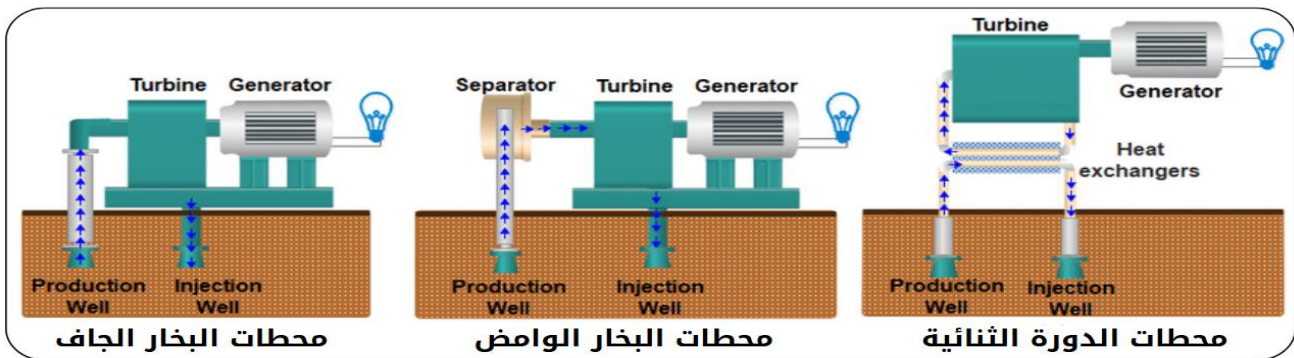
تعتمد عملية توليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الجوفية على عدة تقنيات، تختلف حسب خصائص السوائل الجوفية المستخدمة. ومن بين أكثرها شيوعاً:

❖ **محطات البخار الجاف (Dry Steam Power Plant):** تستخدم هذه المحطات السوائل الجوفية التي تكون في حالة بخارية بشكل طبيعي، حيث يتم توجيه البخار مباشرة إلى التوربين لتوليد الكهرباء. تعد هذه التقنية الأقدم، حيث تم استخدامها لأول مرة في إيطاليا عام 1904، ولا تزال تستخدم حتى اليوم في مناطق مثل The Geysers في كاليفورنيا، وهي أكبر مصدر للطاقة الحرارية الجوفية في العالم.

❖ **محطات البخار الوامض (Flash Steam Power Plant):** تعد هذه التقنية الأكثر انتشاراً حالياً، حيث تعتمد على استخراج السوائل الجوفية عالية الحرارة (أكثر من 182°C) من الأعماق. عند وصول هذه السوائل إلى سطح الأرض، تتعرض لانخفاض مفاجئ في الضغط، مما يؤدي إلى تحول جزء منها إلى بخار يستخدم في تشغيل التوربينات. يمكن استغلال السوائل المتبقية في مرحلة إضافية للحصول على المزيد من الطاقة.

❖ **محطات الدورة الثنائية (Binary-Cycle Power Plant):** تستخدم هذه المحطات عند توفر سوائل جوفية بدرجات حرارة متوسطة أو منخفضة (أقل من 182°C). يتم تمرير هذه السوائل عبر مبادل حراري لتسخين سائل ثانوي ذو درجة غليان منخفضة، مما يؤدي إلى تبخره وتشغيل التوربينات. هذه التقنية تتيح توسيع نطاق استغلال الطاقة الجوفية في مناطق أكثر، حيث يمكن استخدامها حتى مع الموارد الحرارية ذات درجات الحرارة الأقل. (U.S. Department of Energy، )

الشكل 1: آلية عمل المضخة الحرارية الجيوحرارية في التدفئة والتبريد



Source: Osman Özkaraca, (2018). A REVIEW ON USAGE OF OPTIMIZATION METHODS IN GEOTHERMAL POWER GENERATION, Mugla Journal of Science and Technology. 4. 130-136.

### 2.3. أنظمة التدفئة والتبريد الجيوحرارية

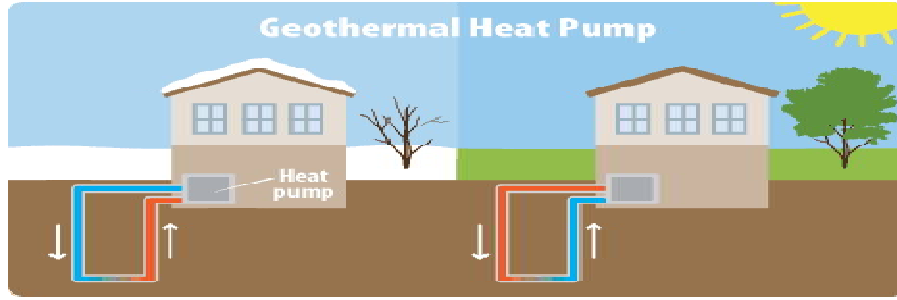
في ظل التوجه العالمي نحو حلول طاقة مستدامة وصديقة للبيئة، تبرز أنظمة التدفئة والتبريد الجيوحرارية كواحدة من التقنيات الأكثر كفاءة في استغلال الموارد الطبيعية. تعتمد هذه الأنظمة على الحرارة المخزنة في باطن الأرض لتوفير

## تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية عالميا: نماذج ناجحة في التدفئة والتبريد وتوليد الكهرباء

التدفئة في الشتاء والتبريد في الصيف، مما يجعلها خيارا مثاليا للحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري وتقليل الانبعاثات الكربونية.

تعتمد هذه الأنظمة على مضخات حرارية جيوحرارية تقوم بنقل الحرارة بين الأرض والمباني. نظرا لأن درجة حرارة باطن الأرض ثابتة نسبيا طوال العام، يمكن الاستفادة منها كمصدر للحرارة في فصل الشتاء أو كمخزن حراري لتبريد المباني في الصيف، يتم ذلك عبر دورة مغلقة تتضمن ضخ سائل نقل الحرارة داخل أنابيب مدفونة تحت سطح الأرض، حيث يمتص هذا السائل الحرارة أو يطرحها وفقا لاحتياجات التدفئة أو التبريد.

### الشكل 2: آلية عمل المضخة الحرارية الجيوحرارية في التدفئة والتبريد



المصدر: (MCE Community Choice Energy، 2021)

تتميز هذه الأنظمة بقدرتها العالية على توفير الطاقة مقارنة بالطرق التقليدية، حيث تعتمد على نقل الحرارة بدلا من إنتاجها، مما يجعلها أكثر كفاءة. كما أنها صديقة للبيئة لعدم استخدامها الوقود الأحفوري، وبالتالي تساهم في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة وتحافظ على نقاء الهواء، هذه المزايا تجعل من أنظمة التدفئة والتبريد الجيوحرارية خيارا واعدة في مجال البناء المستدام، خاصة في المناطق التي تتوفر فيها موارد الحرارة الجوفية، مما يساهم في خفض تكاليف الطاقة على المدى الطويل وتحقيق استقلالية أكبر عن مصادر الطاقة التقليدية (Green Well، 2021).

### 3.3. الابتكارات والتطورات الحديثة في المجال

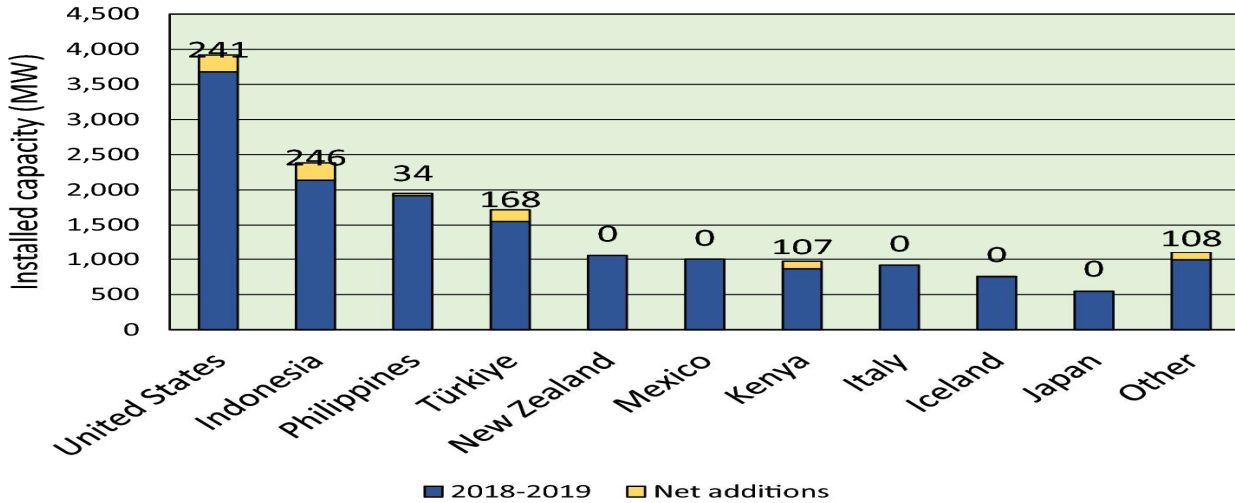
شهد مجال الطاقة الحرارية الجوفية تطورات ملحوظة في السنوات الأخيرة، مدفوعة بالابتكارات التكنولوجية التي ساهمت في تحسين كفاءة الاستخراج وتقليل التكاليف. من بين هذه التطورات، استخدام تقنيات الحفر العميق المحسنة، التي تتيح الوصول إلى مصادر حرارة أكثر عمقا، مما يزيد من قدرة الإنتاج الحراري. كما تم تطوير أنظمة الطاقة الجوفية المغلقة، التي تقلل من التأثيرات البيئية وتضمن استدامة الموارد الحرارية على المدى الطويل (سامر، 2025).

إضافة إلى ذلك، شهد القطاع اعتماد أنظمة تخزين الحرارة الجوفية الموسمية، والتي تتيح تخزين الطاقة الحرارية الزائدة في فترات الصيف لاستخدامها خلال الشتاء، مما يعزز من كفاءة الشبكات الحرارية. كما يتم دمج الطاقة الحرارية الجوفية مع تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين عمليات المراقبة والتحكم، ما يؤدي إلى زيادة الكفاءة التشغيلية وتقليل الأعطال. هذه الابتكارات تجعل الطاقة الحرارية الجوفية أكثر قدرة على المنافسة مقارنة بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى، وتفتح آفاقا جديدة للاستفادة منها في مختلف القطاعات الصناعية والسكنية (حمادة الأرض، 2023).

### 4. تجارب دولية ناجحة في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية

نجحت عدة دول في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية بفضل إمكاناتها الجيولوجية واستثماراتها في هذا المجال. يوضح المخطط التالي أكثر الدول تقدما من حيث القدرة المركبة والإضافات الحديثة.

الشكل 3: أكبر الدول المنتجة للطاقة الحرارية الأرضية وقدرتها المركبة بين 2018 و2021



Source: Luis C. A. Gutiérrez-Negrín, Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023, Geotherm Energy 12, 14.(2024)

#### 1.4.1. إيسلندا: رائدة العالم في استخدام الطاقة الحرارية الأرضية:

تعد إيسلندا واحدة من أبرز الدول في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية، حيث تعتمد بشكل شبه كامل على مصادر الطاقة المتجددة لتلبية احتياجاتها من الكهرباء والتدفئة. بفضل موقعها الجغرافي الفريد على الصدع التكتوني بين الصفيحتين الأمريكية الشمالية والأوراسية، تمتلك إيسلندا موارد هائلة من المياه الجوفية الساخنة والبخار، مما مكنتها من تطوير بنية تحتية متقدمة في مجال الطاقة الحرارية الأرضية. اليوم، يتم تسخير هذه الطاقة في تدفئة أكثر من 90% من المنازل، بالإضافة إلى توليد حوالي 30% من إجمالي الكهرباء في البلاد. وقد ساعدت هذه التجربة الناجحة إيسلندا على تصدير خبراتها إلى دول أخرى مثل ألمانيا والصين، مما جعلها نموذجا عالميا في استخدام الطاقة الحرارية الأرضية لتحقيق الاستدامة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. (Christopher، 2008)

#### 2.4. الولايات المتحدة الأمريكية: مشاريع ضخمة لإنتاج الكهرباء الجيوحرارية

تعمل الولايات المتحدة الأمريكية على تطوير مشاريع ضخمة لاستغلال الطاقة الجيوحرارية لإنتاج الكهرباء، حيث تمتلك محطات طاقة جيوحرارية في سبع ولايات رئيسية. في عام 2023، بلغ إجمالي إنتاج هذه المحطات نحو 17 مليار كيلواط ساعي، وهو ما يمثل حوالي 0.4% من إجمالي إنتاج الكهرباء على مستوى البلاد. وتتصدر ولاية كاليفورنيا القائمة بحصة تبلغ 66.6% من إجمالي الكهرباء الجيوحرارية المنتجة، تليها نيفادا بنسبة 26.1%. وتعتمد هذه المشاريع على استخراج البخار والمياه الساخنة من الخزانات الجوفية العميقة، مما يسمح بتوليد الكهرباء بطريقة مستدامة وصديقة للبيئة. ومع تزايد الطلب على الطاقة النظيفة، تستمر الولايات المتحدة في توسيع استثماراتها في هذا المجال، حيث تخطط لمشاريع جديدة تهدف إلى زيادة القدرة الإنتاجية وتعزيز كفاءة تقنيات استخراج الطاقة الحرارية من باطن الأرض. (U.S. Energy Information Administration، 2024)

#### 3.4. إندونيسيا والفلبين: استغلال الطاقة الجوفية في المناطق البركانية

تعتبر الطاقة الجيوحرارية مصدرا واعدة للطاقة النظيفة، خاصة في دول مثل إندونيسيا والفلبين التي تمتلك إمكانات هائلة للاستفادة منها. ورغم قدرتها على توفير طاقة مستدامة على مدار الساعة دون الحاجة إلى مساحات واسعة، إلا أن الاستغلال الفعلي لها لا يزال محدودا بسبب التحديات المالية والتنظيمية والمجتمعية. ومع ذلك، بدأت بعض التغييرات في الأنظمة المحلية والتمويل الميسر في معالجة هذه العوائق. تمتلك إندونيسيا والفلبين احتياطات ضخمة من الطاقة

الجيولوجية، لكن استغلالها لا يزال أقل من 10% من إمكاناتها. تسعى الحكومات إلى التوسع في استخدامها، حيث تخطط إندونيسيا لزيادة إنتاجها بنسبة 8% بحلول 2030، بينما تعمل الفلبين على مشاريع جديدة لزيادة قدرتها الجيولوجية بـ 1.5 جيجاواط. ومع ذلك، تظل مرحلة الاستكشاف مكلفة ومحفوفة بالمخاطر، مما يحد من الاستثمارات. في هذا السياق، توفر المؤسسات المالية، مثل البنك الدولي وصناديق المناخ، دعماً مالياً لتخفيف مخاطر الاستكشاف. ورغم تأمين التمويل، لا تزال هناك تحديات اجتماعية، حيث يواجه بعض المشاريع احتجاجات محلية بسبب مخاوف بيئية وأمان السكان. لذا، يرى الخبراء أن بناء الثقة مع المجتمعات المحلية وإشراكها في مشاريع الطاقة الجيولوجية ضروري لضمان نجاح هذه المشاريع. (VICTORIA، 2024)

### 4.4. إيطاليا: من أوائل الدول في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية

إيطاليا من الدول الرائدة في استغلال الطاقة الجيولوجية، حيث بلغت قدرتها الإنتاجية 944 ميغاواط عام 2018. ويعتبر مجمع لارديريلو الجيولوجي، الواقع في منطقة توسكانا بوسط إيطاليا، من أكبر المجمعات الجيولوجية في العالم، إذ يضم 34 محطة ويعتمد على خزانات عميقة تصل إلى 4000 متر، يساهم هذا المجمع بشكل كبير في إنتاج الكهرباء المتجددة، حيث يوفر الطاقة لما يقارب مليوني أسرة، بالإضافة إلى 8,700 عميل من القطاعات السكنية والتجارية في البلاد. (Energy، 2020)

### 5.4. الصين: توسع سريع وابتكار في تقنيات الطاقة الجيولوجية

الصين من الدول الرائدة في مجال الطاقة الحرارية الأرضية، حيث أصدرت في سبتمبر 2023 أول معيار عالمي لصناعة الطاقة الحرارية الأرضية خلال المؤتمر العالمي للطاقة الحرارية الأرضية 2023 في بكين. يوصي هذا المعيار بممارسات التدفئة الحرارية الأرضية ذات درجات الحرارة المتوسطة إلى المنخفضة، ويهدف إلى ضمان التنمية المستدامة لمشاريع التدفئة باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية. شارك في إعداد هذا المعيار مؤسسات بارزة مثل شركة "سينوبك" الصينية، وشركة البترول الوطنية الصينية، وجامعة تسينغها، وجامعة الصين للبترول، وجامعة الصين لعلوم الأرض. (خالد، 2023)

### 6.4. كينيا: تجربة رائدة في أفريقيا:

تعتبر كينيا من الدول الرائدة في أفريقيا في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية، حيث نجحت في تحقيق تقدم كبير في هذا المجال بفضل موقعها الجغرافي المميز في وادي الصدع العظيم. تعتمد كينيا على الطاقة الحرارية الأرضية كمصدر رئيسي للكهرباء، حيث تساهم بحوالي ثلث إلى نصف الطاقة المولدة في الشبكة الوطنية، مما يجعلها واحدة من أكبر المنتجين في العالم. وتعمل الحكومة الكينية، من خلال شركة KenGen، على تطوير مشاريع ضخمة مثل محطة Olkaria VI، التي يتوقع أن تكون أكبر محطة للطاقة الحرارية الأرضية في العالم. ورغم النجاحات الكبيرة، تواجه كينيا تحديات اجتماعية وبيئية مرتبطة بإعادة توطين السكان المحليين وتأثير المشاريع على النظام البيئي، ما يفرض الحاجة إلى توازن بين التنمية المستدامة وحقوق المجتمعات المحلية. (ويل، 2022)

### 7.4. اليابان: موارد هائلة وجهود لتعزيز استغلال الطاقة الجيولوجية

تمتلك اليابان ثالث أكبر احتياطي من موارد الطاقة الحرارية الأرضية في العالم، حيث تقدر إمكاناتها بحوالي 23 جيجاواط. على الرغم من ذلك، لا تزال مساهمة هذا المصدر في مزيج الطاقة الياباني محدودة، حيث تمثل حوالي 0.3% فقط من إجمالي إنتاج الكهرباء في البلاد، مع قدرة توليدية تبلغ نحو 535 ميغاواط.

بعد كارثة فوكوشيما النووية عام 2011، زاد الاهتمام في اليابان بتطوير مصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة الحرارية الأرضية، في عام 2012، خففت الحكومة اليابانية القيود المفروضة على تطوير مشاريع الطاقة الحرارية الأرضية داخل المتنزهات الوطنية، مما سمح بإجراء أعمال المسح والتطوير في هذه المناطق. كما زادت الحكومة التمويل المخصص للحفر الاستكشافي وقدمت تعريفه تغذية تحفيزية لمشاريع الطاقة الحرارية الأرضية، بهدف تعزيز الاستثمار في هذا القطاع. (باحيدرة، 2015)

بالإضافة إلى ذلك، تسعى اليابان للتعاون الدولي في مجال الطاقة الحرارية الأرضية. في عام 2023، وقعت اليابان والولايات المتحدة اتفاقية للتعاون في تطوير مشاريع الطاقة الحرارية الأرضية، بهدف تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض انبعاثات الكربون. (المستقبل الأخضر، 2023)

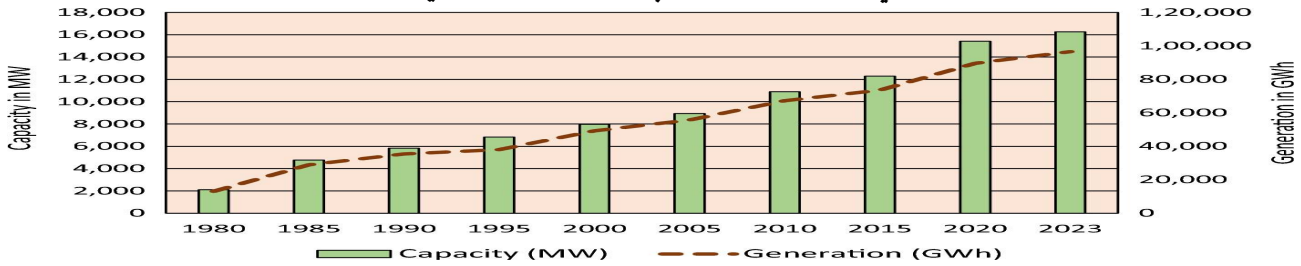
على الرغم من هذه الجهود، لا تزال تحديات مثل التكاليف الأولية المرتفعة والعمليات التنظيمية الصارمة تعيق التوسع السريع في استخدام الطاقة الحرارية الأرضية في اليابان. ومع ذلك، يتوقع أن تسهم السياسات الحكومية الداعمة والتعاون الدولي في تعزيز دور هذا المصدر المتجدد في مزيج الطاقة الياباني مستقبلاً. (حواش، 2023)

## 5. فوائد وتحديات استخدام الطاقة الحرارية الأرضية

### 1.5 الفوائد البيئية والاقتصادية

تعد الطاقة الحرارية الأرضية مصدراً متجدداً ومستداماً يوفر مزايا بيئية واقتصادية مهمة. فهي تعمل على مدار الساعة بغض النظر عن الظروف الجوية، مما يجعلها مصدراً موثوقاً للكهرباء والتدفئة. بيئياً، تنتج محطاتها الحديثة انبعاثات كربونية شبه معدومة وتستهلك مياهاً أقل مقارنة بمعظم تقنيات توليد الكهرباء، إضافة إلى احتياجها لمساحات أقل من الأراضي مقارنة بالفحم والطاقة الشمسية وطاقة الرياح، اقتصادياً، تقلل هذه الطاقة من الاعتماد على الوقود المستورد وتتميز بتكاليف تشغيل منخفضة بعد الاستثمار الأولي، كما يمكن دمج المضخات الحرارية الجوفية في المباني لتقليل استهلاك الطاقة التقليدية. كل هذه العوامل تجعلها خياراً مثالياً لتحقيق الاستدامة والطاقة النظيفة. (U.S. Department of Energy، )

الشكل 4: التطور العالمي لقدرة وتوليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية (1980-2023)



Source: Luis C. A. Gutiérrez-Negrín, Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023, Geotherm Energy 12, 14. (2024)

### 2.5 التحديات التقنية والمالية

رغم الفوائد الكبيرة للطاقة الحرارية الجوفية، إلا أن تطويرها يواجه مجموعة من التحديات التقنية والمالية التي قد تعيق انتشارها على نطاق واسع.

تعتبر عمليات الحفر والاستكشاف من أكثر المراحل تكلفة في مشاريع الطاقة الحرارية الجوفية، نظراً للحاجة إلى تقنيات حفر متطورة للوصول إلى أعماق كبيرة حيث تتوفر الحرارة المطلوبة. هذه التكاليف المرتفعة تجعل الاستثمار الأولي في مشاريع الطاقة الحرارية الجوفية مكلفاً مقارنة ببعض مصادر الطاقة المتجددة الأخرى.

## تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية عالمياً: نماذج ناجحة في التدفئة والتبريد وتوليد الكهرباء

بالإضافة إلى ذلك، لا تتوفر الموارد الحرارية الجوفية بكميات كافية في جميع المناطق، حيث تعتمد إمكانية استغلالها على التكوينات الجيولوجية ووجود خزانات حرارية مناسبة. هذا يعني أن بعض الدول قد تجد صعوبة في الاعتماد على هذه التقنية بسبب محدودية الموارد الجوفية المتاحة.

من ناحية أخرى، قد تؤدي عمليات الحفر العميق والحقن الهيدروليكي في الأنظمة الحرارية الجوفية المحسنة (EGS) إلى تحفيز نشاط زلزالي خفيف في بعض المناطق، مما يستدعي اتخاذ تدابير وقائية صارمة للحد من هذه التأثيرات. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تؤثر التسربات الحرارية أو إعادة ضخ السوائل الجوفية على التوازن البيئي.

كما أن بعض السوائل الحرارية الجوفية تحتوي على معادن وكبريتيدات قد تسبب تآكل المعدات المستخدمة في استخراج الطاقة، مما يؤدي إلى زيادة تكاليف الصيانة والاستبدال. علاوة على ذلك، يمكن أن تكون بعض هذه المعادن ضارة بالبيئة إذا لم تتم معالجتها بشكل صحيح.

بشكل عام، تعد الطاقة الحرارية الجوفية خياراً واعداً لتوليد الكهرباء بطريقة مستدامة، إلا أن تجاوز التحديات التقنية والمالية يتطلب تطورات في تقنيات الحفر، واستراتيجيات تمويل مبتكرة، وتعزيز الأبحاث الجيولوجية لاستكشاف مواقع جديدة ذات جدوى اقتصادية أكبر. (مديرية البيئة لولاية سكيكدة، )

### 3.5. الأثر الاجتماعي ودور الطاقة الجوفية في التنمية المستدامة

تسهم الطاقة الحرارية الجوفية بشكل فعال في التنمية المستدامة من خلال توفير مصدر طاقة متجدد ومستقر، مما يقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري ويحد من انبعاثات الغازات الدفيئة. هذا يسهم في تحسين جودة الهواء والبيئة، مما ينعكس إيجابياً على صحة المجتمع والرفاهية العامة.

بالإضافة إلى ذلك، تساهم مشاريع الطاقة الحرارية الجوفية في تعزيز الاقتصادات المحلية عبر خلق فرص عمل جديدة في مجالات البحث، الحفر، والتشغيل، مما يدعم الاستقرار الاقتصادي والاجتماعي. كما توفر هذه المشاريع طاقة موثوقة لتلبية احتياجات المجتمعات المحلية، مما يعزز أمن الطاقة ويسهم في تحسين البنية التحتية والخدمات الأساسية. (فاستركايتال، 2024)

### 6. آفاق تطوير الطاقة الحرارية الأرضية عالمياً

#### 1.6. دور البحث والتطوير في تحسين كفاءة الاستغلال

يلعب البحث والتطوير دوراً حيوياً في تحسين كفاءة استغلال الطاقة الحرارية الجوفية، من خلال تطوير تقنيات حفر متقدمة وأنظمة استخراج أكثر فعالية. تسهم هذه الجهود في تعزيز كفاءة استغلال هذا المصدر المتجدد للطاقة، مما ينعكس إيجابياً على تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض البصمة الكربونية.

مثال بارز على ذلك هو مشروع "G2COOL" الذي نفذته شركة بترول أبوظبي الوطنية (أدنوك) بالتعاون مع الشركة الوطنية للتبريد المركزي (تبريد) في "مدينة مصدر" بأبوظبي. يعد هذا المشروع الأول من نوعه في منطقة الخليج لتبريد المناطق باستخدام الطاقة الحرارية الجوفية، حيث تم تطوير تقنيات مبتكرة لاستخراج الحرارة من باطن الأرض وتوظيفها في أنظمة التبريد. يهدف المشروع إلى خفض انبعاثات نظام تبريد المباني والمساهمة في تنويع مزيج الطاقة في دولة الإمارات، مما يعكس أهمية البحث والتطوير في تحقيق الاستدامة البيئية. (أدنوك، 2023)

## 2.6. سياسات واستراتيجيات تعزيز الطاقة الجوفية

تبنّت العديد من الدول سياسات لتعزيز استخدام الطاقة الحرارية الجوفية، نظراً لأهميتها كمصدر متجدد ومستدام للطاقة. في الصين، أصدرت إدارة الطاقة الوطنية خططا تهدف إلى تطوير واستغلال هذه الطاقة، بما في ذلك بناء مشاريع نموذجية وتوسيع نطاق استخدامها في التدفئة والتبريد، مما يعكس التزامها بالتحول نحو مصادر طاقة أنظف وأكثر استدامة (Seetao, 2021).

إلى جانب ذلك، تعتمد العديد من الدول على استراتيجيات تدعم الاستثمارات في هذا المجال، مثل تقديم الحوافز المالية، وتحسين تقنيات الحفر العميق، وتطوير أنظمة استخلاص الحرارة بكفاءة أعلى. هذه السياسات تهدف إلى تسريع تبني الطاقة الحرارية الجوفية كجزء من حلول الطاقة المستقبلية، كما هو الحال في بعض الدول الأوروبية التي تدمجها في شبكات الطاقة الوطنية لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري (Editverse, ).

## 3.6. مستقبل الطاقة الحرارية الأرضية في مزيج الطاقة العالمي

وفقاً لوكالة الطاقة الدولية (IEA)، يمكن أن تساهم هذه الطاقة في تلبية 15% من نمو الطلب العالمي على الكهرباء بحلول 2050، مع إمكانية نشر 800 جيغاواط من القدرة الإنتاجية. التقنيات الحديثة توسع نطاق استخدامها حتى في المناطق غير البركانية، بينما يمكن لقطاع النفط والغاز أن يلعب دوراً في خفض التكاليف، حيث تعتمد 80% من الاستثمارات في الطاقة الحرارية الأرضية على تقنيات مشابهة لصناعة النفط.

ورغم تحديات التكلفة والتنظيم، فإن دعم السياسات والابتكار قد يخفض تكاليف الإنتاج بنسبة 80% بحلول 2035، مما يجعلها منافساً قوياً لمصادر الطاقة النظيفة الأخرى، كما أن الطلب المتزايد على الكهرباء لتشغيل مراكز البيانات يدفع شركات التكنولوجيا الكبرى إلى الاستثمار في هذا المجال، ما قد يرفع إجمالي الاستثمارات إلى 2.5 تريليون دولار بحلول 2050، مما يعزز دور الطاقة الحرارية الأرضية في مزيج الطاقة العالمي (IEA, 2024).

## 7. خاتمة:

تناول هذا البحث تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية عالمياً، حيث استعرضنا نماذج ناجحة في التدفئة والتبريد وتوليد الكهرباء، مما أبرز الفوائد البيئية والاقتصادية لهذا المصدر الطاقوي المتجدد. أثبتت التجارب الدولية أن الاستثمار في الطاقة الحرارية الأرضية يحقق كفاءة طاقيّة عالية، ويقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري، ويساهم في خفض الانبعاثات الكربونية، مما يجعله خياراً استراتيجياً لمستقبل الطاقة المستدامة.

من خلال دراسة تجارب دول مثل آيسلندا، والولايات المتحدة، وإيطاليا، تبين أن النجاح في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية يعتمد على سياسات حكومية داعمة، وتمويل مستدام، واعتماد تكنولوجيا متقدمة. كما أن هذه التطبيقات لم تقتصر على الدول المتقدمة فقط، بل أثبتت إمكانية تبنيها في الدول النامية، خاصة في المناطق ذات النشاط الحراري الأرضي المرتفع، وبناء على ما سبق، نقترح التوصيات التالية لتعزيز استخدام الطاقة الحرارية الأرضية في الدول النامية:

- وضع سياسات تحفيزية تشمل الدعم المالي وتشجيع الاستثمار في هذا القطاع.
- تعزيز البحث والتطوير لتطوير تقنيات حفر واستخراج أكثر كفاءة وأقل تكلفة.
- إطلاق مشاريع تجريبية في المناطق ذات الإمكانيات الجيوحرارية المرتفعة للاستفادة من التجارب الناجحة عالمياً.
- تطوير الشراكات الدولية لنقل التكنولوجيا وتبادل الخبرات بين الدول الرائدة والدول النامية.
- زيادة الوعي المجتمعي بأهمية الطاقة الحرارية الأرضية ودورها في تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية.

في الختام، يمكن القول إن الطاقة الحرارية الأرضية تمثل حلاً واعداً لتلبية احتياجات العالم المتزايدة من الطاقة خاصة في ظل التوجه نحو الطاقات النظيفة والمستدامة. إن تبني استراتيجيات فعالة لاستغلال هذا المورد الطبيعي سيسهم في تحقيق أمن طاقتي طويل الأمد، مع تقليل التأثير البيئي وتعزيز التنمية المستدامة.

### 8. قائمة المراجع:

1. النجاح، الطاقة الحرارية: التعريف والأنواع والأمثلة والحقائق الشيقة، (2023-12-02)، الرابط: <https://ila.io/h1G6i7>، شوه بتاريخ: 2025-03-20.
2. المعرفة، الطاقة الحرارية الأرضية، (2024-03-08)، الرابط: <https://marefa.org/wEPyG9>، شوه بتاريخ: 2025-03-20.
3. المستقبل الأخضر، (2023-04-15)، اتفاق اليابان والولايات المتحدة على تعاون في الطاقة الحرارية الأرضية لخفض الانبعاثات وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، الرابط: <https://greenfue.com> /اتفاق بين-اليابان-والولايات-المتحدة-ع/، شوه بتاريخ: 2025-03-22.
4. مديرية البيئة لولاية سكيكدة، الطاقة الجوفية الحرارية (الجيوتيرمال): طاقة نظيفة من قلب الأرض، الرابط: <https://environnement-skikda.dz> /الطاقة-الجوفية، شوه بتاريخ: 2025-03-19.
5. مايكروسوفت، ما المقصود بالطاقة الحرارية الأرضية؟، الرابط: <https://www.microsoft.com/ar/sustainability/learn/what-is-geothermal-energy>، شوه بتاريخ: 2025-03-27.
6. فاستركابيتال، (2024-06-09)، إلقاء الضوء على التأثير الاجتماعي من خلال مشاريع الطاقة المتجددة، الرابط: <https://fastercapital.com/content/Illuminating-Social-Impact-Through-Renewable-Energy-Projects.html> 2025-03-20 شوه بتاريخ: 2025-03-20.
7. سامر أبووردة، (2025-03-06)، الطاقة الحرارية الجوفية في السعودية.. إمكانات ضخمة، الرابط: <https://attaqa.net/?p=478735>، شوه بتاريخ: 2025-03-27.
8. خالد حسن، (2023-09-19)، عالم رقمي، الصين تضع أول معيار في العالم لصناعة الطاقة الحرارية الأرضية، الرابط: <https://alamrakamy.com/article/54789>، شوه بتاريخ: 2025-03-27.
9. حواش منتصر، (2023-03-27)، العين الإخبارية، اليابان حائرة بين الهوية والمناخ.. من ينتصر أصحاب الحمامات أم أنصار الطاقة الحرارية؟، الرابط: <https://al->
10. حماة الأرض، (2023-10-18)، استثمار الحرارة الأرضية: الطاقة الحرارية الجوفية تفتح آفاقاً جديدة للتنمية المستدامة، الرابط: <https://earthsguards.com> /الطاقة-الحرارية-الجوفية/، شوه بتاريخ: 2025-03-25.
11. براونويل، كينيا تستفيد من حرارة الأرض، مجلة التمويل والتنمية، 2022-12.
12. باحيدرة هيثم، (2015-11-09)، الإقتصادية، تجربة اليابان في الطاقة الحرارية الأرضية، الرابط: [https://www.aleqt.com/2015/11/09/article\\_1004931.html](https://www.aleqt.com/2015/11/09/article_1004931.html)، شوه بتاريخ: 2025-03-28.
13. أدنوك، (2023-12-04)، "أدنوك" و"تبريد" تبدأ تشغيل أول محطة لتبريد المناطق باستخدام الطاقة الحرارية الجوفية على مستوى المنطقة في "مدينة مصدر"، الرابط: <https://www.adnoc.ae/ar/news-and-media/press-releases/2023/adnoc-and-tabreed-commence-operations-at-regions-first-geothermal-cooling-plant-in-masdar-city>، شوه بتاريخ: 2025-03-21.
14. VICTORIA MILKO, (02-12-2024), AP News, Financial and community hurdles slow geothermal energy development in Southeast Asia, In: <https://apnews.com/article/geothermal-energy-indonesia-philippines-climate-finance-6de912a0a2911f3cb96a875aac3c6c95>, consulté: 26-03-2025.
15. U.S. Energy Information Administration, (03-04-2024), Geothermal explained, In: <https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/use-of-geothermal-energy.php>, consulté: 28-03-2025.
16. U.S. Department of Energy, Geothermal Basics, In: <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics>, consulté: 20-03-2025.
17. U.S. Department of Energy, Electricity Generation, In: <https://www.energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation>, consulté: 24-03-2025.
18. ThinkGeoEnergy, An Overview of Geothermal Resources, In: <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal/an-overview-of-geothermal-resources/>, consulté: 23-03-2025.
19. Seetao, (28-09-2021)، أصدرت إدارة الطاقة الوطنية آراء لتعزيز تطوير واستخدام الطاقة الحرارية الأرضية، الرابط: <https://www.seetao.com/details/115302.html>، شوه بتاريخ: 2025-03-26.
20. Renovables blog, Geothermal Energy: Discover its Potential and Applications, In: <https://renovables.blog/en/energia-geotermica-potencial-aplicaciones/>, consulté: 21-03-2025.
21. Osman Özkaraç, (2018). A REVIEW ON USAGE OF OPTIMIZATION METHODS IN GEOTHERMAL POWER GENERATION, Mugla Journal of Science and Technology. 4: 130-136.
22. NS Energy, (08-01-2020), Profiling the top geothermal power producing countries in the world, In: <https://www.nsenergybusiness.com/analysis/top-geothermal-power-producing-countries/>, consulté: 22-03-2025.
23. MCE Community Choice Energy, (27-04-2021), Energy 101: Geothermal, In: <https://mcecleanenergy.org/energy-101-geothermal/>, consulté: 27-03-2025.
24. Luis C. A. Gutiérrez-Negrín, Evolution of worldwide geothermal power 2020–2023, Geotherm Energy 12, 14 (2024).
25. International Energy Agency, (13-12-2024), Technology breakthroughs are unlocking geothermal energy's vast potential in countries across the globe, In: <https://www.iea.org/news/technology-breakthroughs-are-unlocking-geothermal-energys-vast-potential-in-countries-across-the-globe>, consulté: 27-03-2025.
26. Green Well، أنظمة التدفئة المركزية الجيوحرارية، الرابط: <https://greenwell-eg.com/ar> /أنظمة-التدفئة-المركزية-الجيوحرارية/، شوه بتاريخ: 2025-03-26.
27. Editverse، الطاقة الحرارية الأرضية: حل مستدام للطاقة، الرابط: <https://editverse.com/ar> /استدامة-الطاقة-الحرارية-الأرضية/، شوه بتاريخ: 2025-03-24.
28. Christopher Mims, (20-10-2008), One Hot Island: Iceland's Renewable Geothermal Power, Scientific American.