

تكامل التقنيات الجيومكانية لتعيين وبناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية بأعالي حوض وادي الحمض بمنطقة المدينة المنورة

د. فهد بن عبدالعزيز المطلق^(٢)

أ. مشاعل بنت عبدالرحمن بن عايض الهبيبي^(١)

الملخص:

وضحت الدراسة الحالية المقصد العام من مفهوم مصطلح المؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية، وذلك من خلال تسليط الضوء على أهم المؤشرات الدلالية المتصلة بهذا النوع من الطاقة المتجددة، والمتوفرة في منطقة الدراسة المتمثلة بأعالي حوض وادي الحمض بمنطقة المدينة المنورة، وذلك من خلال الاستفادة من التكامل الحاصل بين التقنيات الجيومكانية، والذي بدوره يُسهم في تعيين وبناء الطبقات الرقمية الخاصة بتلك المؤشرات، وفقاً لطبيعة وخصوصية منطقة الدراسة، مما يُسهل بعد ذلك مسألة الاستفادة من الطاقة الجيوحرارية، والتخلص من أهم المعضلات المتعلقة بها، والمتمثلة في عدم إمكانية تعيين البُعد المكاني لهذا النوع من الطاقة، وارتفاع التكلفة الخاصة بذلك، لذا سعت هذه الدراسة إلى تحقيق هدف رئيسي لها، تشكل في عملية تعيين وبناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، من خلال تطبيق منهجية علمية محددة ذات جملة معينة من الخطوات الإجرائية، والبرامج التطبيقية المتعددة، والتي قد نوهت عن عدة مراحل تنفيذية ساعدت في تحقيق الأهداف البحثية للدراسة، تمثلت في كلاً من: تحديد منطقة الدراسة، وتعيين أهم المؤشرات، وجمع البيانات الجغرافية، وتخصيص التطبيقات البرمجية، ومعالجة البيانات الجغرافية لإنتاج الطبقات الرقمية والخرائط الجغرافية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية، كما أنها قد أسفرت عن جملة من النتائج التي وضحت أهم المؤشرات الدلالية لطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، حيث توصلت إلى أن هناك ثلاث أنواع رئيسية من المؤشرات الدلالية تتواجد بمنطقة الدراسة وهي: المؤشرات الجيولوجية، والجيوفيزيائية، والطبوغرافية، وأن كل نوع من هذه المؤشرات له عدة عوامل دلالية مختلفة من حيث النوع والكم، ساعد في تقييم موارد الطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، والتَّعرف على التوزيع المكاني لها، مما سيسهم في تعيين البُعد المكاني المحتمل للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: المؤشرات الدلالية، الطاقة الجيوحرارية، التقنيات الجيومكانية، أعالي حوض

وادي الحمض، منطقة المدينة المنورة.

(١) باحثة دكتوراه في قسم الجغرافيا، جامعة الملك سعود (المملكة العربية السعودية).

(٢) أستاذ مشارك في قسم الجغرافيا، جامعة الملك سعود (المملكة العربية السعودية).

١. المقدمة:

تتعدد مصادر الطاقة المتجددة حيث تُمثل العديد من الأشكال كالطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وطاقة حرارة باطن الأرض، والقوى المائية، ولكل مصدر من هذه المصادر أهمية وضرورة تتميز وتختلف به عن باقي الموارد الأخرى، ومن هذه المصادر ذات الشأن الكبير في مختلف المجتمعات العالمية الطاقة الحرارية الجوفية، التي تُعد بديلاً نظيفاً وصديقاً للبيئة (Tampubolon, et al., 2016). ونظراً لدور هذا النوع من الطاقة في تحقيق التنمية المستدامة في مجال الطاقة، والحفاظ على البيئة الكونية، تقدم الدراسة الحالية دراسة أدبية حول موضوع الطاقة الجيوحرارية، من خلال التطرق لإيضاح أهم المؤشرات الدلالية لطاقة الجيوحرارية بالمنطقة الجغرافية الواقعة في أعالي حوض وادي الحمض بمنطقة المدينة المنورة، وذلك من خلال تعيين وبناء الطبقات الرقمية الخاصة بتلك المؤشرات الدلالية بمنطقة الدراسة، والتي تختلف وتتنوع من منطقة جغرافية إلى أخرى؛ نسبة إلى طبيعة وخصوصية هذه المنطقة الجغرافية قيد الدراسة والتحليل.

تُعتبر الطاقة الجيوحرارية شكل من أشكال الطاقة المتجددة، ومورد طاقة لا ينفد أبداً؛ كونه إحدى المصادر المتجددة الحديثة للطاقة، وكما يُرى أيضاً أنها مصدر طاقة مكلف مادياً نوعاً ما؛ لأن كما هو متعارف عليه فإن منبع هذا المورد هو درجة الحرارة الباطنية للكرة الأرضية، والتي تقدر كميتها وبحسب ما وضعه (العمرى، ٢٠٢٣) بما يقارب $10^{24} * 12,6$ ميغا جول، حيث تُعد هذه الكمية الهائلة من الطاقة الحرارية الأرضية مصدراً من مصادر الطاقة المتجددة. إلا إن عملية العثور عليها ليست بالأمر اليسير، وبحسب ما جاء في الأدبيات العلمية السابقة التي ناقشت ذات الموضوع، فإن مرحلة البحث واستكشاف مواطن الطاقة الجيوحرارية تُعد من أكثر المراحل المكلفة في كافة المراحل الخاصة بمشاريع استثمار هذا النوع من الطاقة، وبالرغم من ذلك فإن مسألة الاستفادة من الطاقة الجيوحرارية لتوليد وإنتاج الطاقة الكهربائية يُعتبر أمر هام من الضروري تسليط الضوء عليه؛ نظراً لما ينجم عن ذلك من خلال الاستثمار والتنمية لهذا النوع من الطاقة المتجددة، وليس هذا فقط بل أيضاً لتوفر الحلول العلمية والعملية في الوقت ذاته، التي تساعد على تخطي المعضلة الأهم في تنفيذ مشاريع الاستثمار في الطاقة الجيوحرارية، والمتمثلة في تعيين البُعد المكاني المُحتمل لها، وذلك من خلال توفر التقنيات المُساهمة في ذلك وإمكانية توظيفها والاستفادة منها، في حل تلك الإشكالية. حيث من الممكن توظيف التقنيات الجيومكانية لرصد وتعيين أهم العلامات والمؤشرات الدلالية الخاصة باحتمالية وجود طاقة جيوحرارية بمنطقة جغرافية ما، حسب مكونات هذه المنطقة من الناحية الطبيعية والجيولوجية، وغيرها من التراكيب

الأخرى التي تميز منطقة عن أخرى، وهذا ما تسعى إليه هذه الدراسة، لاستكشاف وتحديد البعد المكاني المحتمل لطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، وذلك من خلال تسليط الضوء على أهم المؤشرات الدلالية لها، وإيضاح كيفية إنتاج الطبقات الرقمية الخاصة بها.

يُشير مصطلح المؤشرات إلى الدليل أو الإشارة التي تُريد جلب الانتباه إلى شيء ما، مما يعني أنها الوسيلة التي من الممكن من خلالها إظهار وضع أو حالة شيء أو نظام ما، كما يمكن تعريفه أيضاً بأنه عبارة عن مقياس كمي أو نوعي قادر على إظهار مستوى واتجاه التغيير حول ظاهرة ما، أو رمز إحصائي يمثل ظاهرة معينة خلال فترة زمنية محدودة، كما يمكن تعريفه بأنه عبارة عن متغير قابل للقياس، فالمؤشر يساعدنا في الحكم على الأشياء ومن ثم اتخاذ القرار، وعليه نجد أن مجالات استخدامه وتوظيفه مختلفة ومتنوعة، حيث يمكن استخدامه في العديد من المجالات منها المجالات الاقتصادية والتجارية والمالية والجغرافية، وذلك من أجل اتخاذ القرار والتنبؤ باتجاه موضوع معين وفق معطياته (المنصوري، ٢٠١٦). وعليه نجد أن هناك جملة من المؤشرات والعلامات الدالة على وجود طاقة جيوحرارية تكون ظاهرة على سطح الأرض، أو تكون غير ظاهرة، يمكن من خلالها الاستدلال على البعد المكاني المحتمل لوجود الخزان الحراري الجوفي للطاقة. فقد وضع بودن (Boden, 2016) بأن العديد من الظواهر الطبيعية تدل على وجود درجات حرارة مرتفعة في باطن الأرض؛ ومن تلك الظواهر الطبيعية الدالة على ذلك البراكين التي يصاحبها اندفاع الحمم المنصهرة ذات الحرارة العالية، وينابيع المياه الحارة. ولكن هذه المؤشرات والدلالات والظواهر الطبيعية تختلف وتتنوع، بمعنى ليس من الضروري ما يتم رصده من مؤشرات في منطقة جغرافية ما، أن يكون هو ذاته في منطقة جغرافية أخرى؛ ولعل السبب في ذلك يعود إلى اختلاف التركيبة الطبيعية والطبوغرافية والجيولوجية باختلاف المواقع الجغرافية، ومع ذلك هناك مؤشرات عدة تكون مشتركة بين جميع المواقع الجغرافية، وبحسب ما تم نشره في هذا الجانب من أدبيات علمية سابقة، فقد تم رصد وتعيين جملة من هذه المؤشرات ذات العلاقة المباشرة بالطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، وفقاً لخصوصية هذه المنطقة وما يتناسب معها، ليتم من خلالها لاحقاً التمكن من بناء الطبقات الرقمية الخاصة بها، وقد شكلت هذه الشواهد العملية جملة من المؤشرات الدلالية، التي تم رصدها وتعيينها ومعالجتها وإنتاجها وتحليلها على هيئة طبقات رقمية، وخرائط جغرافية، وذلك من خلال الاستفادة من التكامل الحاصل بين التقنيات الجيومكانية، وتوظيف هذا النوع من التقنيات المتاحة، والبرمجيات التطبيقية المتوفرة.

فقد بين كانت (Kant, 2021) مدى ضرورة وأهمية توظيف التقنيات الحديثة في مرحلة السعي لتعيين وبناء المؤشرات الدلالية للطاقة الجيولوجية، نتيجة لما ينجم من جزاء إتباع الطرق التقليدية من حالات عدم اليقين، بالإضافة إلى المخاطر والتكاليف المالية الكبيرة، التي تتم مواجهتها في مراحل خطة العمل الأولية، إذ أن ما يقارب من ٤٢ بالمئة من الميزانية المخصصة للمشروع تذهب سدى أثر مسألة البحث والاستكشاف والحفر في مواقع جغرافية ذات فرضية عدم صفرية، عكس ما ينتج عن التقنيات الحديثة من فرضية بديلة توضح مواقع الطاقة الجيولوجية المحتملة. وبناءً على ذلك، فقد ركزت الدراسة الحالية على إيضاح الجانب العملي حول موضوع بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية ذات العلاقة المباشرة بالطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة، وذلك من خلال توظيف التقنيات الجيومكانية، حيث أظهرت معظم الأدبيات العلمية التي خصت موضوع الطاقة الجيولوجية بالتمحيص والمعاناة، بأن التقنيات الجيومكانية تُعتبر تقنية لها مساهمة ودور هام وبارز في هذه العملية، حيث بين كاشياب (Kashyap, 2011) بأن التقنيات الجيومكانية يتم توظيفها كأداة لاستكشاف وتحليل وتقييم ومراقبة واستغلال وإدارة العمليات المرتبطة بالطاقة الجيولوجية.

٢. موضوع الدراسة وأهميتها:

يكمن موضوع الدراسة وأهميتها في كونها تُركز على دراسة مورد أرضي، تُعد أرض المملكة العربية السعودية غنية به، فالمملكة العربية السعودية كما أوضح (باحيدرة، ٢٠١٤) أنها تتمتع بتوافر العديد من الموارد الأرضية داخلها، والتي تقع أساساً في الأجزاء الغربية والجنوبية الغربية من المملكة، وترتبط هذه الموارد بالنشاط التكتوني العام للبحر الأحمر، وكذلك بسلسلة من الصخور والتلال البركانية، وذلك من خلال البحث في أحد مصادر الطاقة المتجددة والمتمثل في الطاقة الجيولوجية، خاصة في ظل نسبة الطاقة الجيولوجية الموجودة بالمملكة، فإنها توفر فرصة ملموسة لاستغلالها خلال العقود المقبلة.

وعليه تسعى الدراسة إلى الاستفادة من التكامل التقني بين التقنيات الجيومكانية، من خلال توظيف التقنيات الجيومكانية كمصدر تقني محوري تعتمد عليه الدراسة، لبناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية لمنطقة الدراسة، وتسهيل الضوء على الطرق العلمية الرصينة والمتاحة، المناسبة والمساهمة في الانتفاع من مورد الطاقة المتجددة (الطاقة الجيولوجية)، بأقل وقت وجهد وتكلفة ممكنة تُسهل بذلك العملية الإنتاجية منها مستقبلاً بمنطقة الدراسة، مما سيكون له دور في تشجيع الجهات المختصة وصناع القرار للاستفادة منها بشكل أوسع.

٣. مشكـلة الدرـاسة:

أظهرت العديد من الأدبيات العلمية ومن بينها دراسة كارماكير وآخرون (Karmaker, et al., 2020) بأن انبعاثات غازات الاحتباس الحراري في تزايد مستمر وبشكل مُثير للقلق؛ وذلك بناءً على إنتاج الكهرباء بكميات كبيرة من الوقود الأحفوري. حيث يحتل الوقود الأحفوري المرتبة الأولى عالمياً على قائمة أهم مصادر الطاقة التقليدية في العالم. كما بين أن ما يقارب من ٤٦٪ من إنتاج الطاقة الكهربائية في العالم تتم عن طريق احتراق هذا الوقود، مما يكون له من تأثير سلبي جداً على البيئة، وزيادة في نسبة التلوث البيئي بشكل كبير.

كما تجدر الإشارة أيضاً، إلى ما تم إيضاحه من قِبَل الهيئة العامة للإحصاء من تقديرات إحصائية توضح ارتفاع استهلاك الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية بنحو ٠.٢٪ خلال عام ٢٠٢٠م ليصل إلى ٢٨٩,٣ ألف جيجا واط/ساعة، مقارنة بـ ٢٨٨,٧١ ألف جيجا واط/ساعة خلال عام ٢٠١٩م، ووفقاً لبيانات الهيئة فقد بلغ إجمالي إنتاج الطاقة الكهربائية عام ٢٠٢٠م نحو ٣٣٨,٠٣ ألف جيجا واط في الساعة، مرتفعاً بنسبة ١٪ عن عام ٢٠١٩م، مما يدل على أن ارتفاع الاستهلاك السنوي في زيادة مستمرة، بحسب ما تم رصده من تقديرات إحصائية خلال العشر السنوات الأخيرة من عام ٢٠١٠م حتى عام ٢٠٢٠م، حيث يفضي ذلك إلى أن مؤشر الزيادة متواصل في الإنتاجية الكهربائية المعتمدة على احتراق الوقود الأحفوري مصدر الطاقة الناضب.

وفي الإطار ذاته، فقد أدت الضرورة الملحة إلى توجه العديد من دول العالم إلى توظيف مصادر الطاقة المتجددة والاستفادة منها قدر الإمكان، من أجل التخفيف من استعمالات الوقود الأحفوري واستبداله بمصادر طاقة لا تكون مصدر مساهمة في مسألة زيادة الغازات الانبعاثية الضارة بالبيئة وبصحة الإنسان. فقد بين كلاً من جونزاليس ورودرiguez (Gonzalez & Rodriguez, 2019) بأن مورد الطاقة الجيوحرارية من الموارد التي تقع ضمن نطاق الطاقات المتجددة، وأن موضوع الاستفادة منها يرتبط بعدة تحديات أهمها التكلفة العالية لتحديد وتقييم مواقع توافرها، حيث تحتاج إلى عمليات حفر تكون مكلفة جداً مما يُشكل عقبة وصعوبة تحد من استخدامها. كما أوضح أبو بكار وآخرون (Abubakar, et al., 2017) أن استغلال الطاقة الجيوحرارية أمر مرتبط أولاً وقبل كل شيء في تحديد وتعيين وحصر المناطق الجغرافية المناسبة لتواجدها.

وبناءً عليه تكمن المشكلة البحثية والفجوة المعرفية لموضوع الدراسة في عدم توفر دراسات محلية كافية تُبين الدور الهام والإمكانات العملية العالية لتقنيات الجيومكانية المساهمة في مسألة الانتفاع من

الطاقة الجيوحرارية بالمملكة العربية السعودية بصفة عامة ومنطقة الدراسة بصفة خاصة، وذلك فيما يخص الجانب المتعلق ببناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية لهذا النوع من الطاقة. في حين هُناك العديد من الدراسات الأجنبية التي بينت وأظهرت جدوى ذلك. فمنها ما قام بإيضاح دور وقدرة تقنية الاستشعار عن بُعد وجوانب الاستفادة منها، وذلك كون تقنية الاستشعار عن بعد ذات قدرة عالية وتغطية شاملة لمناطق كبيرة في الوقت الفعلي، ويمكن بواسطتها تعيين وبناء المؤشرات بفعالية، وبتكلفة جيدة ومنخفضة وبكل سهولة مقارنة بطرق المسح التقليدية، وبالتالي تستطيع أن تُساعد في مراحل الجدوى المسبقة لتعيين وبناء المؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية، مما يقلل من التحديات والعقبات المرتبطة بمدى الاستفادة من هذه الطاقة، وبذلك يكون له دور في تشجيع صنّاع القرار إلى توظيفها بطرق مُثلى. إذ أن أحد التحديات قد أُزيح وقد تم تحديد وبناء المؤشرات الدلالية مما يُسهل من عمليات البحث والتنقيب عنها.

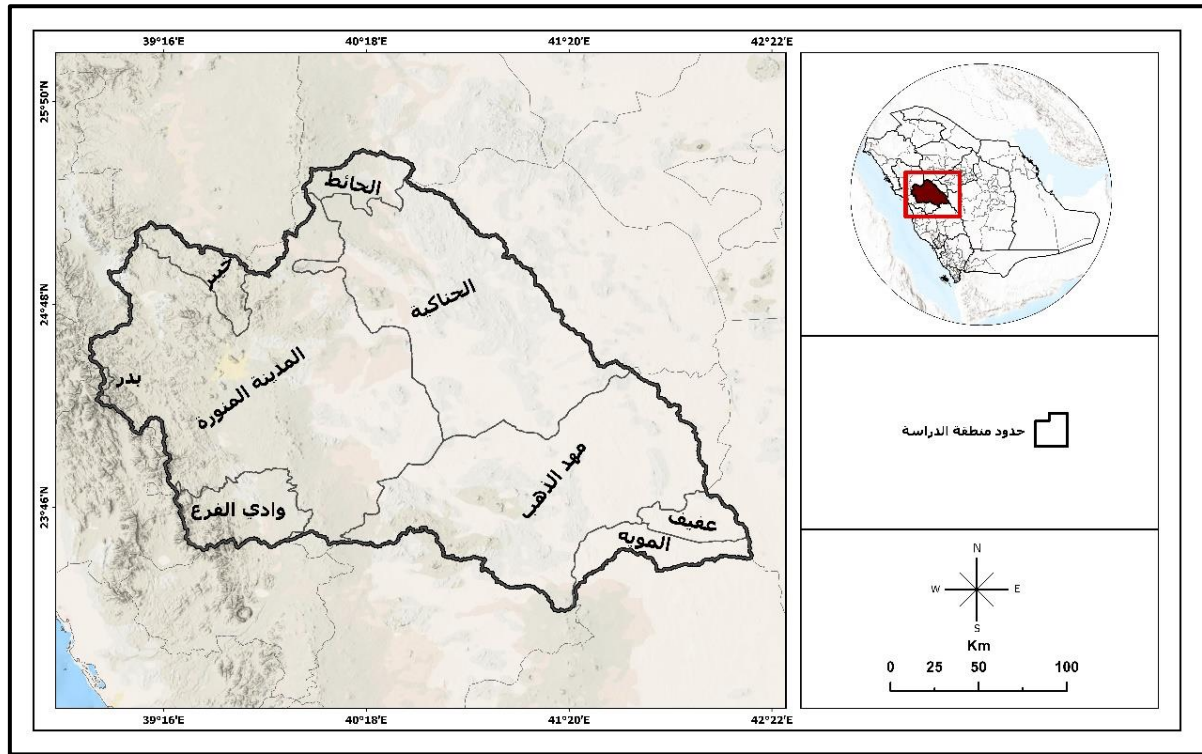
٤. أهداف الدراسة:

تهدف الدراسة الحالية إلى تحقيق مجموعة من الأهداف البحثية ومنها:

- تعيين المؤشرات الدلالية المُساهمة في بناء الطبقات الرقمية للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، وذلك من خلال تسليط الضوء على أهم تلك المؤشرات الواردة في الأدبيات العلمية السابقة بما يتوافق مع طبيعة وخصوصية منطقة الدراسة.
- بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية المُساهمة في كشف البُعد المكاني المُحتمل لطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة.
- إنتاج الطبقات الرقمية والخرائط الجغرافية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة.

٥. منطقة الدراسة:

تكمن الحدود المكانية للدراسة ضمن نطاق منطقة المدينة المنورة بصفة عامة، كحد إداري تقع ضمنه منطقة الدراسة، حيث نجد أن منطقة الدراسة تتمثل بالتحديد بالإقليم الجغرافي الواقع داخل إطار أعالي حوض وادي الحمض الذي تم الاعتماد عليه كحد طبيعي في استخراج وتعيين منطقة الدراسة بشكل دقيق جداً، والذي يُعد أحد أكبر أودية شبه الجزيرة العربية (أحمد، ١٩٨٥). وتشغل منطقة الدراسة تحديداً الحيز الجغرافي الواقع في الجزء الجنوبي والأوسط من منطقة المدينة المنورة، أما فَلَكيًا فهي تقع ما بين دائرتي عرض ١٤° ٣٥' ٢٥" و ٢٤° ٢٣' ١٤" شمالاً، وخطي طول ٥٠° ١٥' ٤٢" و ٣٦° ٥٣' ٣٨" شرقاً، بمساحة تقدر بنحو ٤٩٢٤٨ كيلومتر مربع (شكل رقم: ١).



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات هيئة تطوير المدينة المنورة.

شكل (١) حدود منطقة الدراسة

٦. أسلوب الدراسة:

تتبع الدراسة الحالية المتعلقة بموضوع تعيين وبناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، مجموعة من المراحل الإجرائية لتحقيق الأهداف الدراسية، وحل الإشكالية البحثية المتعلقة بموضوع الدراسة، وذلك وفقاً لأسلوب منهجي علمي مُنظم يُسهم في الوصول إلى نتائج علمية واضحة يمكن لصُناع القرار الاستفادة منها، وذلك من خلال تطبيق عدة خطوات تنفيذية على النحو التالي:

المرحلة الأولى: تحديد واستخراج منطقة الدراسة:

يتم تعيين منطقة الدراسة وفقاً للحدود الطبيعية لأعالي حوض وادي الحمض بمنطقة المدينة المنورة؛ وذلك لما تتسم به هذه المنطقة الجغرافية من تنوع طبيعي يُساعد على تحقيق الأهداف البحثية للدراسة، حيث يتم ذلك بواسطة تنفيذ عدة خطوات إجرائية على النحو التالي:

- فحص نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) لمعرفة أن كان نموذج الارتفاعات الرقمية مرجع جغرافي أو يحتاج إلى معالجته هندسياً وإرجاعه جغرافياً.

- معالجة القيم الشاذة بواسطة نافذة الأدوات (Arc Toolbox) واستخدام الأداة الخاصة بذلك (Fill) التابعة لصندوق التحليل الهيدرولوجي (Hydrology) والمدرجة داخل صندوق الأدوات (Spatial Analyst Tools)، حيث تقوم هذه الخطوة بمعالجة القيم الشاذة بالنموذج عن طريق ملء الانخفاضات أو الارتفاعات غير المتوقعة والتي تكون فجائية من نموذج الارتفاع الرقمي الذي يكون في صورة شبكة خلايا (Raster)، من خلال العملية المسماة بـ (Fill Sinks).
- تحديد اتجاه الجريان للخلايا على أساس الارتفاع، وفي هذه الخطوة يتم تحديد اتجاه الجريان على الخلية وليس على مستوى الرافد، وذلك من خلال الأمر (Flow Direction).
- يتم في هذه الخطوة تعيين حدود وادي الحمض بشكل عام بواسطة استخدام الأداة (Basin).
- نستخرج في هذه الخطوة الأحواض الصغرى لروافد حوض وادي الحمض، وذلك من خلال استخدام الأمر (Watershed)، وذلك من أجل تحديد الأحواض العليا لوادي الحمض والتي مثلت الحدود الطبيعية لمنطقة الدراسة الحالية.
- تم في هذه الخطوة تحويل الأحواض المستخرجة من الخطوة السابقة من ملف شبكي إلى ملف خطي بواسطة الأداة (Raster to Polygon) والمدرجة داخل صندوق الأدوات (Conversion Tools).
- الحصول على الحدود الطبيعية العليا لحوض وادي الحمض والتي شكلت بدورها منطقة الدراسة.

المرحلة الثانية: مرحلة تعيين أهم المؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة:

تُعد الطاقة الجيوحرارية طاقة حرارية مصدرها الطبقات والأجزاء الداخلية للكرة الأرضية، مما يدل على أنها طاقة لا يمكن ملامستها بشكل مباشر لتحديد موقعها والانتفاع بها؛ لصعوبة رصد البُعد المكاني المناسب للخزانات الحرارية الجوفية الخاصة بها، ولكن لا يعني ذلك عدم إمكانية تحقيق هذا الأمر نهائياً، لأن هناك وسائل يُمكن من خلالها التنبؤ بالبُعد المكاني المُحتمل لموارد الطاقة الجيوحرارية، ومن ثم تعيين المواقع الجغرافية المُحتملة تحت سطحية المُحملة بالخزانات الحرارية الجوفية، عن طريق الاستدلال على تلك المواقع المكانية من خلال المؤشرات الدلالية، والظواهرات الجغرافية، والشواهد العملية الدالة عليها، حيث أنها تنقسم إلى عدة أنواع فمنها على سبيل المثال المؤشرات الجيولوجية، والمؤشرات الجيوفيزيائية، والمؤشرات الجيوكيميائية، والتي بدورها تكون بمثابة إشارة مبدئية تُشير إلى المخزون الحراري الجوفي من الطاقة الجيوحرارية، ويحدث ذلك من خلال إجراء مجموعة من العمليات الحسابية والقياسات الخاصة بتلك العلامات والمؤشرات المتواجدة على سطح

الأرض أو بالجزء السفلي القريب منها، ومن ثم يمكن بواسطتها إيضاح العلاقة المشتركة، والمتقاطعة بين مختلف المظاهر والمؤشرات السطحية، والتحت سطحية، وأماكن خزانات الطاقة الجيـوحرارية.

المرحلة الثالثة: مرحلة جمع البيانات الجغرافية الخاصة بالدراسة:

نجد أن الدراسة الحالية قد تطرقت لعدة مؤشرات دلالية ذات علاقة بالطاقة الجيـوحرارية بمنطقة الدراسة، لذا اختلفت البيانات الجغرافية التي اعتمدت عليها سواء كانت تلك البيانات بيانات مكانية أو وصفية، وبالتالي تنوعت معها المصادر الخاصة بها؛ وذلك من أجل التمكن من إنتاج وبناء الطبقات الرقمية الخاصة بتلك الشواهد العملية، وقد تمثلت هذه البيانات في الآتي:

٣-١: نماذج الارتفاعات الرقمية Digital Elevation models:

اعتمدت الدراسة على تعيين نموذج الارتفاعات الرقمية في العمليات التحليلية كنوع من أنواع البيانات الرئيسية المعتمدة في الدراسة؛ وذلك من أجل استخراج منطقة الدراسة المتمثلة بأعالي حوض وادي الحمض بمنطقة المدينة المنورة، فقد وظفت الدراسة نموذج الارتفاعات الرقمية، بدقة مكانية تصل إلى ٣٠ متر، وقد تم الحصول على تلك البيانات من المنصة الرقمية لهيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (USGS).

٣-٢: المرئيات الفضائية Satellite image:

وظفت الدراسة عدة أنواع من المرئيات الفضائية، ذات الاختلاف في الأقمار الصناعية؛ من أجل إجراء مختلف العمليات التحليلية اللازمة لتحقيق أهداف الدراسة، ومن هذه المرئيات الفضائية:

٣-٢-١: المرئيات الفضائية للقمر الصناعي الأمريكي (Landsat-8):

عينت الدراسة مجموعة من المرئيات الفضائية للقمر الصناعي الأمريكي (Landsat-8)، كمصدر بيانات رئيسي تم الاعتماد عليه في إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة، والطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر استخدامات الأرض والغطاء الأرضي، والتي قد تم الحصول عليها من المنصة الرقمية لهيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (USGS)، فقد شملت منطقة الدراسة ست مرئيات فضائية؛ نظرًا للمساحة الشاسعة التي تمتاز بها تلك المنطقة، وفق خصائص معينة اتصفت بها المرئيات الفضائية المستخدمة في هذا الجزء من الدراسة، حسب المعلومات المتوفرة في جدول رقم (١)، والذي يبين سمات المرئيات الفضائية.

جدول (١) خصائص المرئية الفضائية للقمر الصناعي (Landsat-8)

التسلسل	المرئيات	مسار القمر	صف القمر	تاريخ الالتقاط
١	المرئية الأولى	١٧٠	٤٤	٢٠٢٣-٥-١ م
٢	المرئية الثانية	١٧٠	٤٣	٢٠٢٣-٥-١ م
٣	المرئية الثالثة	١٧٠	٤٤	٢٠٢٣-٥-١ م
٤	المرئية الرابعة	١٦٩	٤٤	٢٠٢٣/٥/٢٦
٥	المرئية الخامسة	١٦٩	٤٤	٢٠٢٣/٥/٢٦
٦	المرئية السادسة	١٦٨	٤٤	٢٠٢٢-١١-٨ م

المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (USGS).

٣-٢-٢: المرئيات الفضائية للقمر الصناعي الأوروبي (Sentinel-3):

وظفت الدراسة الحالية المرئية الفضائية الخاصة بالقمر الصناعي الأوروبي (Sentinel-3)؛ وذلك من أجل إنتاج وتحضير الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر درجات الحرارة السطحية، والتي قد تم الحصول عليها من المنصة الرقمية لهيئة الفضاء الأوروبية (eesa)، فقد شملت منطقة الدراسة مرئية فضائية واحدة فقط، بدقة مكانية تصل إلى ١٠ متر، وذلك ضمن مجموعة من الخصائص والمزايا الموضحة في جدول رقم (٢) والذي يوضح ميزات المرئية الفضائية المستخدمة في إنتاج الطبقة الرقمية لمؤشر درجات الحرارة السطحية لمنطقة الدراسة.

جدول (٢) خصائص المرئية الفضائية للقمر الصناعي Sentinel-3

الخصائص	
٢٠٢٣/٥/٢٧	تاريخ التقاط المرئية
١ كم لكل بكسل أي ما يعادل ١٠٠٠ متر للبكسل الواحد	الدقة المكانية
UTM Zone 37 North	نوع الإسقاط
(SLSTR) مقياس إشعاع درجة حرارة سطح البحر والأرض	المستشعر
Thermal Band S7, S8, S9 (VNIR, SWIR, IR)	النطاق الطيفي المستخدم

المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات هيئة الفضاء الأوروبية (eesa).

٣-٣: القيم الرقمية للبيانات الشبكية:

استخدمت الدراسة القيم الرقمية الخاصة بالطبقة الشبكية (Raster) لدرجات الحرارة الجوفية لمنطقة الدراسة، والصادرة من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)، وذلك من أجل إنتاج الطبقة الرقمية لمؤشر درجات الحرارة الجوفية، وفق مجموعة من الخصائص المحددة والموضحة في جدول رقم (٣).

جدول (٣) خصائص بيانات درجات الحرارة الجوفية بمنطقة الدراسة

خصائص البيانات	
نوع البيانات	بيانات شبكية توضح درجات الحرارة الجوفية لمنطقة الدراسة
تاريخ البيانات	٢٠١٢م
المصدر	الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)
وحدة البيانات	الدرجة المئوية
نوع الإسقاط	WGS 1984
الدقة المكانية	١٨ كم

المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA).

٣-٤: الخرائط الجيولوجية Geological Maps:

وركزت الدراسة على توظيف الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة، فقد تم الحصول على خريطة جيولوجية ورقية بمقياس رسم ١:٢٥٠,٠٠٠، من هيئة المساحة الجيولوجية السعودية، وذلك من أجل رقمه تلك الخريطة، ومن ثم رسم وتوقيع التركيبات الجيولوجية الممثلة لبعض من المؤشرات الدلالية، والتي كانت عبارة عن الحزات والصخور.

٣-٥: بيانات النشاط الزلزالي:

نجد أن الدراسة الحالية قد اعتمدت على توظيف البيانات الخاصة بالنشاط الزلزالي، والتي كانت عبارة عن إحداثيات جغرافية توضح المواقع الجغرافية لمواقع نقاط تأثير النشاط الزلزالي بمنطقة الدراسة على شكل طبقة نقطية، وقد تم الحصول عليها من المنصة الرقمية لهيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية، وذلك من أجل استخدامها لإنتاج الطبقة الرقمية لمؤشر النشاط الزلزالي.

المرحلة الرابعة: مرحلة تحديد التطبيقات البرمجية الخاصة بمعالجة وإعداد بيانات الدراسة:

تشكلت التطبيقات البرمجية للدراسة الحالية في عدة أنواع مختلفة، منها ما هو خاص بنظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، ومنها ما هو له علاقة بالبرمجيات الجيولوجية وغيرها من التطبيقات الأخرى على حسب ما تحتاجه تلك البيانات، وذلك وفق جدول رقم (٤).

جدول (٤) التطبيقات البرمجية المستخدمة في الدراسة

اسم التطبيق البرمجي	نبذة تعريفية عن التطبيق البرمجي	أيقونه التطبيق البرمجي	الطبقة الرقمية المنتجة بواسطته
ArcGIS Pro 2022	يُعد نوع من أنواع البرمجيات التطبيقية الخاصة بنظم المعلومات الجغرافية، يساعد في عدد لا نهائي من العمليات التحليلية التي تُساهم بدورها في معالجة مختلف البيانات الجغرافية، للوصول إلى نتائج منطقية، تم إنتاجه من قِبَل شركة Esri.		جميع الطبقات والخرائط الخاصة بالدراسة تم إنتاجها عن طريق برنامج ArcGIS Pro، بالإضافة إلى بعض البرامج الأخرى حسب نوع البيانات والإجراء التحليلي الخاص بها.
Geomatca 2014	عبارة عن حزمة برمجية للاستشعار عن بعد والمساحة التصويرية، يستخدم لمعالجة البيانات المكانية بشكل أسرع ودقيق، من تصميم شركة PCI Geomatics، يُتيح للمستخدمين إمكانية تحميل المرئيات الفضائية، والصور الجوية لإجراء مختلف التحليلات المطلوبة المتقدمة.		إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الصدوع الجيولوجية، وذلك من خلال استخدام الخوارزميات البرمجية الخاصة بتحليل استنباط الصدوع الجيولوجية من المرئيات الفضائية.
SNAP 9.0.0 SeNtinel Applications Platform	عبارة عن تطبيق برمجي يحتوي على بيئة برمجية تحتوي مجموعة من الأدوات المساعدة في تنفيذ مختلف عمليات التحليل المختلفة، وذلك من خلال الواجهات البرمجية المتاحة، لمعالجة مختلف أنواع البيانات المستشعرة، تم إنتاجه من قِبَل شركة Brockmann Consult.		إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بدرجات الحرارة السطحية، وذلك من خلال اشتقاق درجات الحرارة السطحية بالدرجة المئوية من المرئية الفضائية للقمر الصناعي Sentinel-3، بواسطة تطبيق الخوارزميات الخاصة بذلك.

المصدر: إعداد الباحثان.

المرحلة الخامسة: معالجة البيانات الجغرافية لإنتاج الطبقات الرقمية الخاصة بمؤشرات الطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

تتمتع المملكة العربية السعودية بمقومات قوية في شتى مجالات الطاقة المتجددة؛ نظراً لموقعها الجغرافي والفلكي، والذي ساعد على توفير بيئة خصبة وقاعدة مناسبة لإنتاج الطاقة من مختلف مصادر وموارد الطاقة المتجددة (غرفة الرياض، ٢٠٢١). ومن بين تلك المصادر الطاقة الجيولوجية، والتي وبحسب

ما تم ذكره من معلومات أنفة، فهي طاقة جوفية لا يمكن الاستفادة منها إلا من خلال تحديد البعد المكاني المُحتمل لها، وعليه فقد تم تعيين جملة من المؤشرات الاستدلالية لمواقع الطاقة الجيوحرارية حسب ما يتناسب مع خصوصية وشخصية منطقة الدراسة، وذلك من أجل إنتاج الطبقات الرقمية الخاصة بها، والتي كانت على النحو التالي:

المؤشر الأول: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر درجة حرارة باطن الأرض على عمق (١،٢،٣ كيلومتر):

قد تم توظيف تلك البيانات المكانية وفقاً للخصائص الخاصة بها والموضحة في جدول رقم (٣)، وذلك من أجل إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بدرجة الحرارة الجوفية لمنطقة الدراسة، على حسب اختلاف العمق لكل طبقة عن الأخرى، وباستخدام برنامج (ArcGIS Pro) إحدى البرمجيات الإجرائية والمنصات التطبيقية لتنظم المعلومات الجغرافية، وذلك من خلال تطبيق جملة من الخطوات العملية على النحو التالي:

١. تهيئة البيانات المكانية لدرجات الحرارة الجوفية، وذلك من خلال التأكد من مدى صحة الإرجاع الجغرافي.
٢. تعيين الحدود المكانية لمنطقة الدراسة، بواسطة الاعتماد على الطبقة الخاصة بأعالي حوض وادي الحمض.

٣. إنتاج خريطة التركيب الحراري الجوفي لمنطقة الدراسة على عدة أعماق باطنية مختلفة.

المؤشر الثاني: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر درجة الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة:

اعتمدت الدراسة في رصد درجات الحرارة السطحية لمنطقة الدراسة، على استقراء مرئيات القمر الصناعي الأوروبي (Sentinel-3). وقد تم الحصول عليها من موقع هيئة الفضاء الأوروبية (eesa)، حيث يقوم هذا القمر بتسجيل الأشعة المنعكسة من سطح الأرض في عدة نطاقات طيفية من بينها النطاق الحراري الخاص برصد وحساب درجة الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة، كما هو موضح في جدول رقم (٢)، وذلك من أجل إنتاج خريطة التركيب الحراري السطحي لمنطقة الدراسة وفق الخطوات التالية:

١. تهيئة المرئية الفضائية الخاصة بمنطقة الدراسة، وذلك من خلال تحديد النطاق الطيفي الحراري داخل بيئة برنامج (SNAP)، ومن ثم معالجتها لتجهيزها للخطوة التالية بواسطة تصحيح الإحداثيات الجغرافية، وإرجاعه إلى المرجع الجغرافي المحلي UTM Zone 37 North.

٢. تحويل قيم البكسل من درجة الحرارة المطلقة (كلفن) إلى قيم البكسل بدرجة الحرارة المئوية، وذلك من خلال تطبيق المعادلة الآتية: $Band (LST) - 273,15$ (هيئة الفضاء الأوروبية).

٣. إنتاج خريطة التركيب الحراري السطحي لمنطقة الدراسة خلال فصل الشتاء والصيف.

المؤشر الثالث: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر النشاط الزلزالي بمنطقة الدراسة:

تمكنت الدراسة الحالية من إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر النشاط الزلزالي بمنطقة الدراسة،

وذلك من خلال تطبيق مجموعة من الخطوات التنفيذية على النحو التالي:

١. الحصول على البيانات المتعلقة بالنشاط الزلزالي لمنطقة الدراسة.

٢. تعيين البيئة البرمجية المناسبة، وقد تم تجهيز البيئة التطبيقية لبرنامج ArcGIS Pro 2022.

٣. تطبيق مجموعة من الأوامر البرمجية داخل النوافذ التطبيقية، حسب المعادلات الإجرائية.

٤. حساب المسافة الإقليدية لنقاط النشاط الزلزالي حسب مدى قربها من منطقة الدراسة.

المؤشر الرابع: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الصخور الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

وظفت الدراسة الحالية منهجية رقمنة البيانات؛ من أجل الاستفادة منها في إنتاج الطبقة الرقمية

الخاصة بمؤشر التراكيب الصخرية، وذلك من خلال اتباع مجموعة من الخطوات التنفيذية كالتالي:

١. الحصول على البيانات المطلوبة، وقد تمثلت في الخرائط الجيولوجية لمنطقة الدراسة مقياس رسم

١:٢٥٠,٠٠٠، من هيئة المساحة الجيولوجية السعودية.

٢. تحضير البيئة البرمجية المناسبة لتطبيق ArcGIS Pro.

٣. تهيئة الخريطة الورقية وذلك من خلال تحويلها لصوره رقمية ومن ثم إرجاعها جغرافياً.

٤. رقمنة ورسم جميع التراكيب الصخرية وتصنيفها حسب أنواعها.

٥. إنتاج الطبقة الرقمية للمؤشر التراكيب الصخرية بمنطقة الدراسة.

المؤشر الخامس: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الحرّات بمنطقة الدراسة:

تركز الدراسة الحالية على إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الحقول البركانية (الحرّات) بمنطقة

الدراسة، وذلك من خلال الاستفادة من البرمجة المكانية للغة البايثون داخل بيئة نظم المعلومات

الجغرافية؛ من أجل كتابة الكود البرمجي الخاص بمسألة اقتطاع طبقة الحرّات البركانية من طبقة

التراكيب الجيولوجية، وفقاً لمجموعة من الخطوات التنفيذية على النحو التالي:

١. تهيئة البيئة البرمجية المستخدمة والمتمثلة في تطبيق Arc GIS Pro.

٢. رقمنة الخريطة الجيولوجية وعمل إرجاع جغرافي لها، لتعيين الإحداثيات الجغرافية للخريطة ومطابقتها مع الإحداثيات الحقيقية لمنطقة الدراسة، وذلك من خلال الاستقادة من الأمر البرمجي Georeferencing.

٣. رسم الظاهرات الجغرافية الجيولوجية، وتحديدًا الحقول البركانية الحرات، وذلك من خلال إنشاء طبقة Shapefile من نوع المعالم المساحية لرسم ورقمنة الظاهرة الجيولوجية المعروفة بمسمى الحرات.

٤. التوجه نحو بيئة لغة البرمجة بايثون وفتح النافذة الخاصة بها، لكتابة الكود البرمجي.

٥. إنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الحقول البركانية (حرات).

المؤشر السادس: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر الصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

لإنتاج الخريطة الرقمية الخاصة بمؤشر الصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة تم اتباع مجموعة من الخطوات الإجرائية التسلسلية على النحو التالي:

١. تعيين المرئيات الفضائية الخاصة بهذا المؤشر، وقد تم اختيار مرئيات القمر الصناعي Landsat-8.

٢. تحضير البيئة البرمجية لتطبيق PCI Geomatica، والذي يُعد أحد البرامج المساعدة في اشتقاق الصدوع.

٣. توظيف المكتبة الخاصة بالخوارزميات البرمجية Algorithm Librarian، ومن ثم اختيار المكتبة البرمجية الخاصة بالخوارزميات الجيولوجية، وتطبيق الخوارزمية البرمجية الخاصة باشتقاق الصدوع من المرئيات الفضائية والمعروفة بمسمى Lineament Extraction.

٤. تصدير الصدوع الجيولوجية المستنبطة من المرئية الفضائية على صيغة Shapefile.

٥. المعالجة البرمجية للصدوع المشتقة من المرئية الفضائية، داخل بيئة البرنامج التطبيقي ArcGIS pro.

٦. استخراج خريطة التوزيع المكاني للصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة.

٧. حساب كثافة الصدوع بمنطقة الدراسة، عن طريق توظيف أداة حساب كثافة الخطوط Line Density.

٨. إنتاج الطبقة الرقمية للمؤشر كثافة الصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة.

المؤشر السابع: إعداد الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر استخدامات الأرض والغطاء الأرضي بمنطقة الدراسة:

تُعتبر تقنية التعلم الآلي أسلوب من أساليب الذكاء الاصطناعي، والتي من الممكن الاستفادة منها من خلال توظيفها بجانب التقنيات الخاصة بنظم المعلومات الجغرافية، لإنتاج الطبقات الرقمية واستخراج البيانات الخام الخاصة بدراسة موضوع معين، للاستفادة منها في استكمال الدراسة البحثية لشتى

المواضيع العلمية، لذا تم الاعتماد على هذا الأسلوب العلمي لإنتاج الطبقة الرقمية الخاصة بمؤشر استخدام الأرض، والغطاء الأرضي لمنطقة الدراسة، وذلك من خلال اتباع جملة من الخطوات الإجرائية على النحو التالي:

١. تعيين المرئيات الفضائية للقمر الصناعي Landsat-8، لإنتاج الطبقة واستخراج البيانات المطلوبة.
٢. دمج النطاقات الطيفية الخاصة بالمرئية من النطاق الطيفي الثاني ولغاية النطاق الطيفي السابع، ومن ثم اقتطاع منطقة الدراسة، وعمل تجميع لجميع مرئيات منطقة الدراسة، والتأكد من صحة الإرجاع الجغرافي.
٣. تنفيذ الأمر البرمجي الخاصة بأداة Segment mean shift المعروفة بمسمى أداة التجزئة والتي يمكن بواسطتها القيام بتحليل المرئية الفضائية وتجزئتها بناءً على الكائن والظاهرة الجغرافية.
٤. تطبيق الخوارزميات البرمجية الخاصة بالتعلم الآلي Machine Learning، بواسطة الأداة البرمجية Train Support Vector Machine Classifier، والاستفادة أيضاً من أداة Train Random Trees Classifier، وليتم ذلك لابد من توفر ملف خاص بالبصمات الطيفية لمنطقة الدراسة بصيغة Shapefile، عينات التدريب لتدريب النموذج وفقاً لها.
٥. إجراء عملية التصنيف بواسطة الأداة البرمجية Classify Raster.
٦. أخذ العينات لتوقيع النقاط في مواقعها الصحيحة، بواسطة استخدام الأداة البرمجية Create Fishnet التابعة لصندوق الأدوات Sampling، وذلك من أجل إنشاء شبكة من الخطوط العمودية والأفقية المتساوية. والتي يمكن بواسطتها تحديد منطقة الدراسة.
٧. تعبئة الجدول الخاص بالبيانات الوصفية من خلال إدخال مسمى كل نقطة، وتحديد نوع الظاهرة الجغرافية.
٨. تعيين أفضل نتيجة للخطوة السابقة من خلال توظيف نماذج تعلم الآلة، التي تم الحصول عليها في الخطوة الخامسة، وذلك باستخدام الأداة البرمجية Extract Multi Values to Points التابعة لصندوق الأدوات Extraction، ومن ثم إضافة القيم الحقيقية للنقاط اعتماداً على الموقع الجغرافي الحقيقي لكل نقطة تم رصدها، ومن ثم توظيف أداة التحليل البرمجي Frequency، من أجل الحصول على جدول مواصفات جديد يحتوي على قيم الحقول وعدد تكرار كل قيمة.
٩. إنتاج الطبقة الرقمية لمؤشر استخدامات الأرض والغطاء الأرضي.

٧. النتائج والمناقشة:

تتطرق هذه الجزئية من الدراسة إلى مناقشة ما تم التوصل إليه من نتائج للخطوات الإجرائية الخاصة بالمنهجية العلمية، والتي بدورها قد ساهمت في حل الإشكالية البحثية قيد الدراسة، وذلك من خلال تحقيق أهداف الدراسة، التي قد نَجَمَ عنها جملة من النتائج المرجوة، على النحو التّالي:

٧-١: مناقشة نتائج تحديد أهم المؤشرات الدلالية لطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة:

نجد أن هُنَاك جملة من المؤشرات والعلامات الدالة على وجود طاقة جيوحرارية تكون ظاهرة على سطح الأرض، أو تكون غير ظاهرة، يمكن من خلالها الاستدلال على البُعد المكاني المُحتمل لوجود الخزان الحراري الجوفي للطاقة. فقد وضح بودن (Boden, 2016) بأن العديد من الظواهر الطبيعية تدل على وجود درجات حرارة مرتفعة في باطن الأرض؛ ومن تلك الظواهر الطبيعية الدالة على ذلك البراكين التي يصاحبها اندفاع الحمم المنصهرة ذات الحرارة العالية، وينابيع المياه الحارة. ولكن هذه المؤشرات والظواهر الطبيعية تختلف وتتنوع، بمعنى ليس من الضروري ما يتم رصده من مؤشرات في منطقة جغرافية ما، أن يكون هو ذاته في منطقة جغرافية أُخرى؛ ولعل السبب خلف ذلك اختلاف التراكيب الجيولوجية والطبوغرافية باختلاف المواقع الجغرافية. ومع ذلك هُنَاك مؤشرات عدة تكون مشتركة بين جميع المواقع الجغرافية، وبحسب ما تم نشره في هذا الجانب من أدبيات علمية سابقة، فقد تم رصد جملة من هذه المؤشرات ذات العلاقة المباشرة بالطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة، وفقاً لخصوصية هذه المنطقة وما يتناسب معها، وقد شكلت هذه الشواهد العملية جملة من المؤشرات الدلالية تم رصدها وتعيينها ومعالجتها وتحليلها وإنتاجها على هيئة طبقات رقمية على النحو الآتي:

أولاً: المؤشرات الجيوفيزيائية:

يُطلق مصطلح المؤشرات الجيوفيزيائية على المؤشرات التي تستخدم في علم الجيوفيزياء وعلم الجيولوجيا، لتحديد الخصائص الفيزيائية لمظاهر الجغرافية الطبيعية المتعددة كالترية، والصخور والمياه الجوفية، والطاقة الجيوحرارية والموجات الزلزالية وغيرها، مما يجعل من الممكن الكشف عن الموارد الطبيعية غير السطحية (العمرى، ٢٠٢١). وقد تم تحديد جملة من هذه المؤشرات بما يتوافق مع طبيعة المنطقة الجغرافية قيد الدراسة والتحليل، وهي على النحو التّالي:

١. مؤشر درجة الحرارة الجوفية.

٢. مؤشر درجة الحرارة السطحية.

٣. مؤشر النشاط الزلزالي.

ثانياً: المؤشرات الجيولوجية:

تُعرف المؤشرات الجيولوجية بأنها عبارة عن علامات أو عناصر تستخدم لتحديد، وتقييم الخصائص الجيولوجية المختلفة لمنطقة جغرافية ما، وتشمل عدة مؤشرات منها، مؤشرات الصخور والمعادن والتركيب الجيولوجي والتغيرات الجيولوجية (Balkema, 1996). وقد تم تعيين مجموعة من تلك المؤشرات، وذلك بما يتوافق مع منطقة الدراسة وهي كالتالي:

١. مؤشر الصخور.

٢. مؤشر الحرّات.

٣. مؤشر الصدوع والانكسارات الجيولوجية.

ثالثاً: المؤشرات الطبيعية والبشرية (الطبوغرافية):

يُقصد بمفهوم المؤشرات الطبوغرافية هو كل مظهر جغرافي على سطح الأرض دل على عنصر طبيعي أو بشري لبقعة جغرافية ما، ومن بينها الظواهر الجغرافية التي ظهرت وتكونت نتيجة تدخل الإنسان مثل، الحقول والمزارع والمباني والمستشفيات وطرق المواصلات وغيرها من مظاهر جغرافية بشرية، بالإضافة إلى كل مظهر جغرافي نشأ وتواجد على سطح الأرض دون تدخل الإنسان مثل البحيرات والأنهار والجبال والصخور وغيرها من مظاهر جغرافية طبيعية (جودة وأبو عيانة، ٢٠٠١). وقد تم تخصيص بعضاً منها حسب طبيعة منطقة الدراسة وهي على النحو التالي:

١. مؤشر استخدامات الأرض والغطاء الأرضي.

٧-٢: مناقشة نتائج بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية لطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

يتضح من خلال ما تم عرضه من معلومات سابقة بأن الدراسة الحالية قد ركزت على تعيين وتحديد أهم المؤشرات الدلالية ذات العلاقة بالطاقة الجيولوجية وذات الارتباط المباشر بمنطقة الدراسة، وخصوصية هذا البعد المكاني المحدد، والذي من خلاله قد تم التطرق لجملة من المؤشرات الدلالية المختلفة شملت الحيز الجغرافي للدراسة، وقد تم بناء الطبقات الرقمية الخاصة بها على النحو التالي:

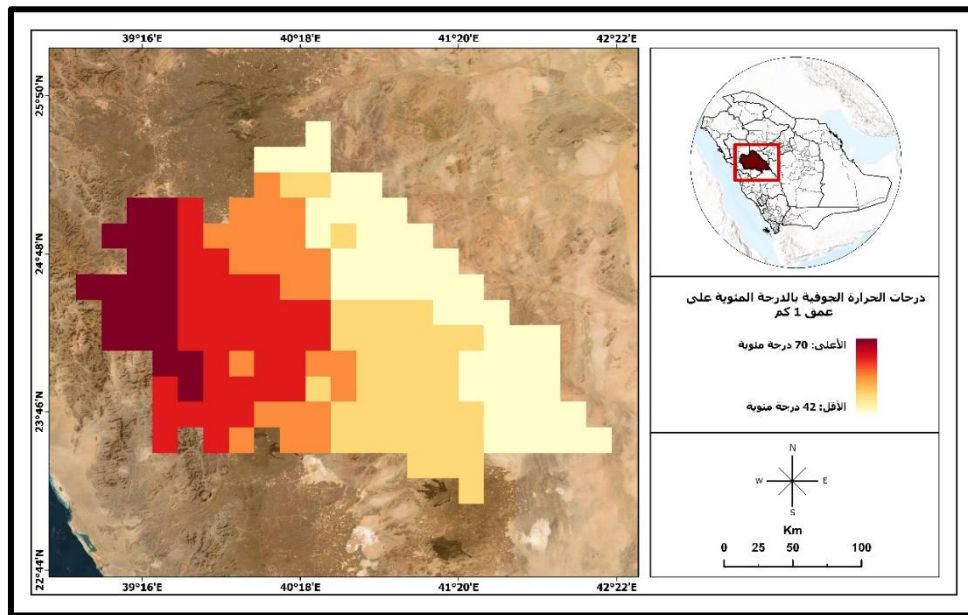
٧-٢-١: مناقشة نتائج بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الجيوفيزيائية لطاقة الجيولوجية بمنطقة

الدراسة:

يتبين أن الدراسة الحالية قد تطرقت إلى بناء مجموعة من المؤشرات الدلالية الجيوفيزيائية الخاصة بموضوع الطاقة الجيولوجية، والمتصلة بالحيز الجغرافي للدراسة، والتي كانت كالتالي:

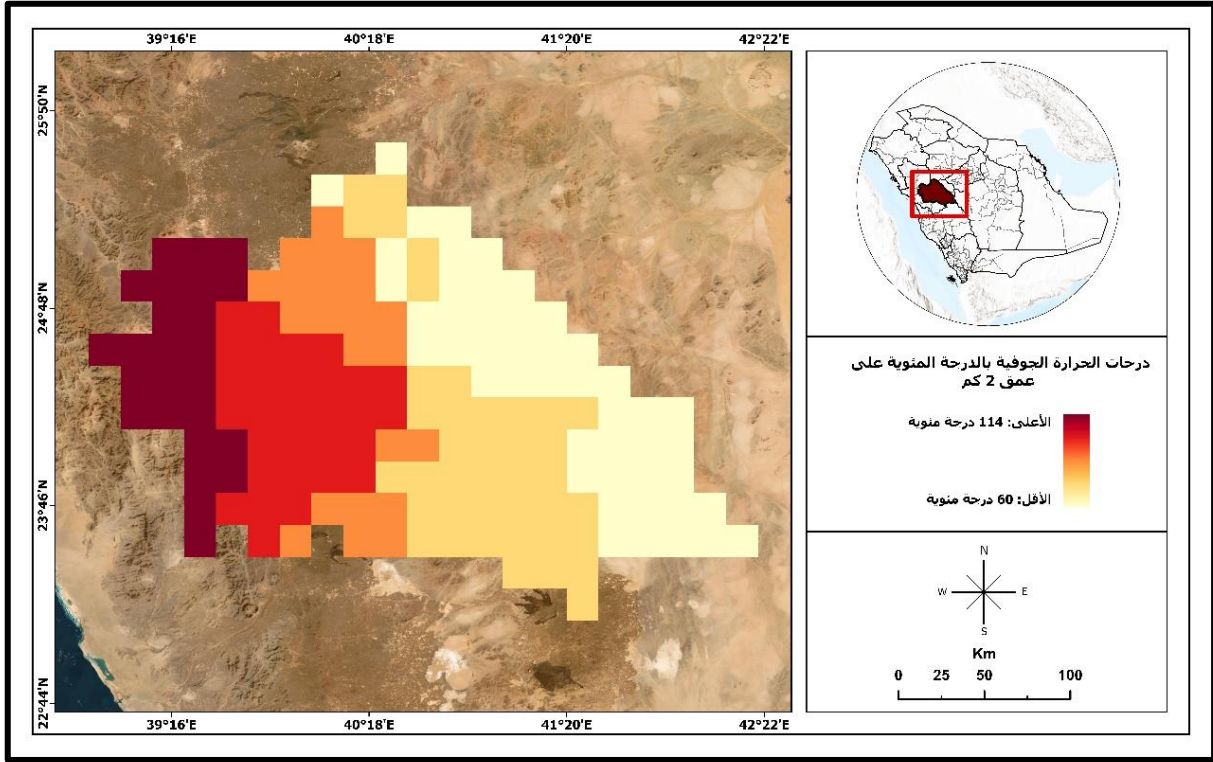
أولاً: الطبقة الرقمية المنتجة لمؤشر درجة حرارة باطن الأرض بمنطقة الدراسة:

يتضح من خلال ما تم إنتاجه من طبقات رقمية وخرائط جغرافية تبين التوزيع الجغرافي لمعدلات درجات الحرارة الجوفية بمنطقة الدراسة، أن درجات الحرارة الجوفية تراوحت ما بين ٤٢ درجة مئوية إلى ٧٠ درجة مئوية على عمق ١ كيلومتر من سطح الأرض بمنطقة الدراسة، وأن الأجزاء الشمالية والشمالية الغربية لمنطقة الدراسة كانت صاحبة درجات الحرارة الأعلى كما هو موضح في شكل رقم (٢)، بينما كان التوزيع الجغرافي لمعدلات درجات الحرارة الجوفية على عمق ٢ كيلومتر من سطح الأرض بين ٦٠ درجة مئوية و ١١٤ درجة مئوية بالإضافة إلى أن الأجزاء الشمالية والشمالية الغربية لمنطقة الدراسة أيضاً كانت ذات المعدلات الأعلى كما هو موضح في شكل رقم (٣)، في حين قد بلغت معدلات درجات الحرارة الجوفية بين ٧٧ درجة مئوية و ١٥٨ درجة مئوية على عمق ٣ كيلومتر من سطح منطقة الدراسة، حيث كانت المناطق الواقعة في الأجزاء الشمالية والشمالية الغربية من منطقة الدراسة هي الأعلى من درجات الحرارة الجوفية بمنطقة الدراسة، وذلك كما هو موضح في شكل رقم (٤). وبناءً عليه يتبين بأن الأجزاء الشمالية والشمالية الغربية لمنطقة الدراسة هي الأجزاء الأكثر ارتفاعاً من ناحية درجات الحرارة الجوفية على مختلف الأعماق الثلاث التي تم رصد درجات الحرارة الجوفية بها، مما يدل على احتمالية وجود خزان حراري جوفي بهذه المناطق، والتي قد بلغت درجات الحرارة الجوفية بها ما بين ٧٠ درجة مئوية كأعلى درجة مئوية تم رصدها على عمق ١ كيلومتر من سطح منطقة الدراسة إلى ١٥٨ درجة مئوية تم استقراؤها على عمق ٣ كيلومتر من سطح منطقة الدراسة.



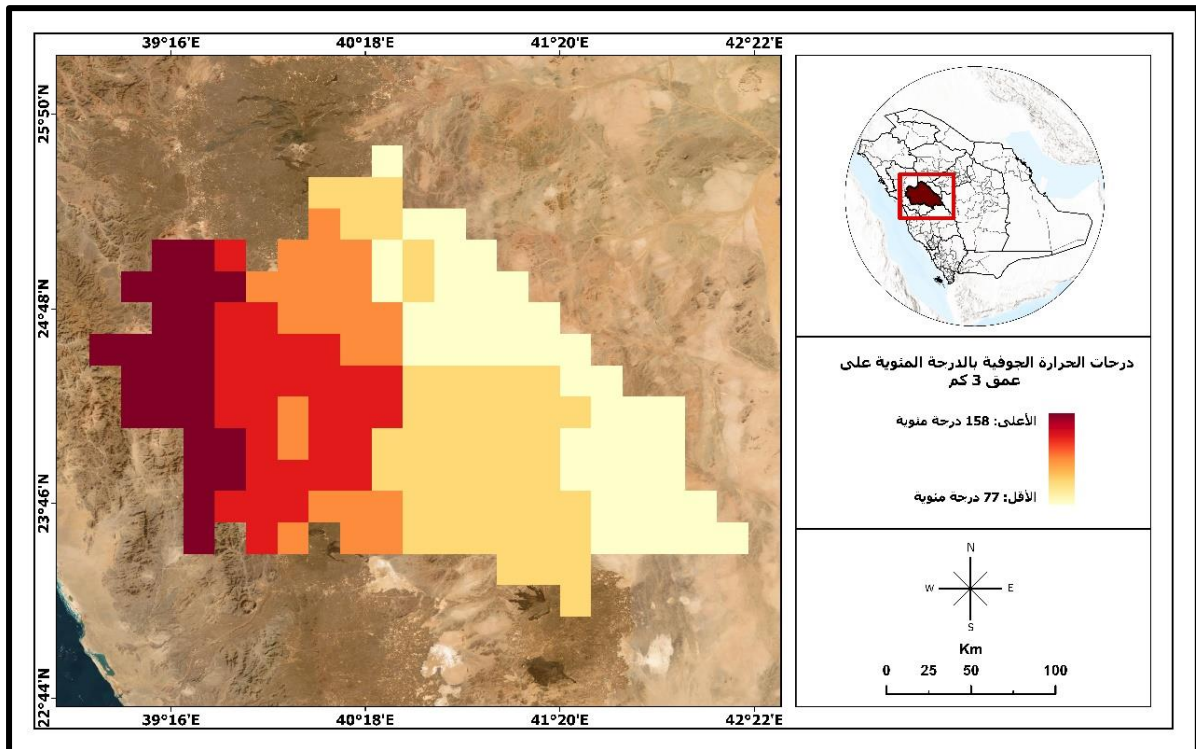
المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA).

شكل (٢) طبقة درجات الحرارة الجوفية لمنطقة الدراسة على عمق ١ كم



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA).

شكل (٣) طبقة درجات الحرارة الجوفية لمنطقة الدراسة على عمق ٢ كم

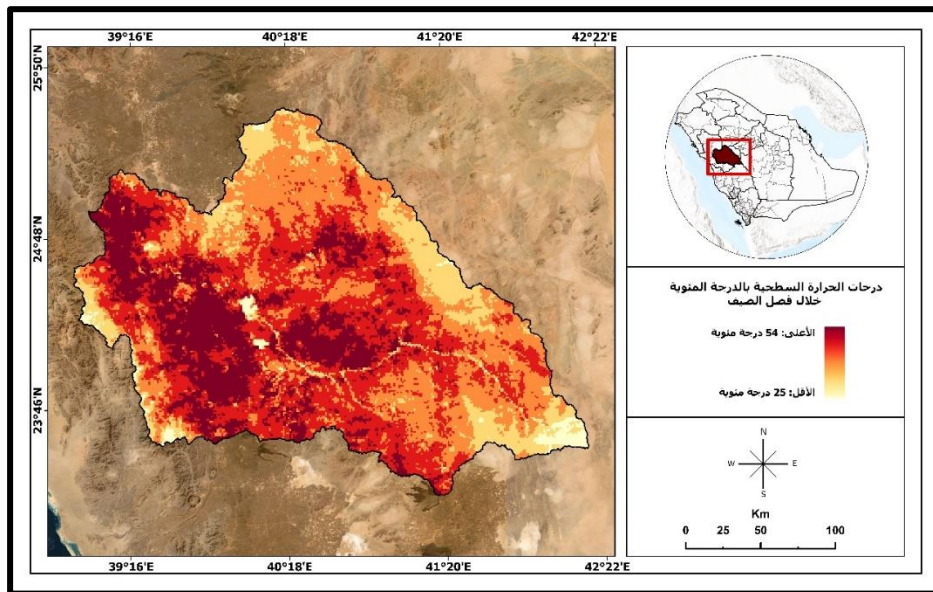


المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA).

شكل (٤) طبقة درجات الحرارة الجوفية لمنطقة الدراسة على عمق ٣ كم

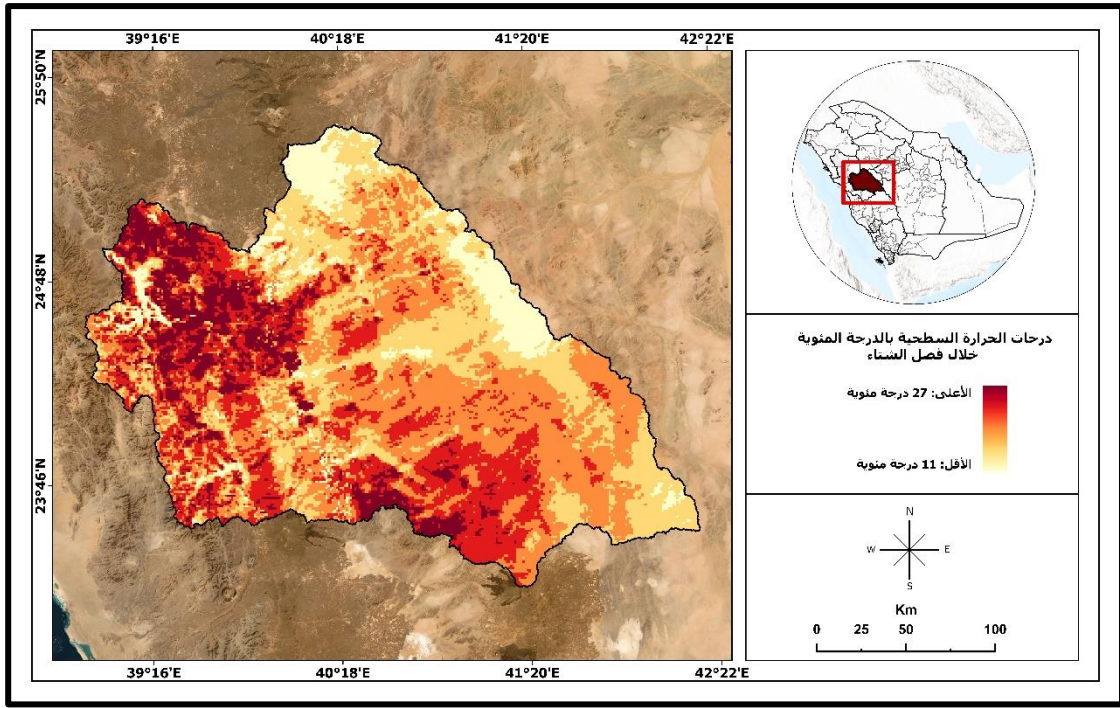
ثانياً: الطبقة الرقمية المنتجة لمؤشر درجة حرارة سطح الأرض بمنطقة الدراسة:

تطـرقت الدرـاسة الحـالية إـلى إـنتاج الطبقة الرقمية والخريطة الجغرافية لمؤشر درجات الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة خلال فصلي الشتاء والصيف، وذلك لتحليل ومناقشة ما تم التوصل له من نتائج والتعرف على أهم الفروقات والاختلافات بين معدلات الحرارة لتلك الفصول، وتعيين الجهات الجغرافية ذات الحرارة المرتفعة بكل فصل من فصول الدراسة، فقد تبين بأن درجات الحرارة السطحية تتراوح ما بين ٢٥ درجة مئوية كأدنى معدل حراري بمنطقة الدراسة و٥٤ درجة مئوية كأعلى درجة حرارية بمنطقة الدراسة خلال فصل الصيف، في الأجزاء الجغرافية الواقعة في الجزء الشمالي والشمالي الغربي والغربي والأوسط من منطقة الدراسة كما هو موضح في شكل رقم (٥)، في حين قد بلغت درجات الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة خلال فصل الشتاء بين ١١ درجة مئوية كأدنى درجة حرارة سطحية تم استخلاصها من المرئية الفضائية و٢٧ درجة مئوية كأعلى درجة حرارة؛ لتكون الأجزاء الشمالية والغربية هي الأعلى من ناحية هذه المعدلات الحرارية كما هو موضح في شكل رقم (٦). وبناءً عليه يتضح بأن المناطق الواقعة في كلاً من الجزء الشمالي والجزء الغربي هي الأجزاء ذات الحيز الجغرافي الأعلى من ناحية المعدلات السطحية لدرجات الحرارة مع اختلاف الفصول السنوية للرصد، والتي قد تم رصدها من خلال استقراء درجات الحرارة السطحية المشتقة من المرئية الفضائية للقمر الصناعي سنتينل-٣، والتي تراوحت ما بين ٢٧ درجة مئوية و٥٤ درجة مئوية كأعلى درجات حرارة سطحية تم رصدها خلال فصلي الشتاء والصيف، في نطاق جغرافي متشابهة، مما يعني احتمالية وجود خزان حرارة جوفية في تلك المواقع الجغرافية وفق لما نوه عنه هذا المؤشر من نتائج ومعدلات حرارية مختلفة في وقت الرصد والاستقراء.



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على مرئيات موقع هيئة الفضاء الأوروبية.

شكل (٥) طبقة مؤشر درجة الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة خلال فصل الصيف عام ٢٠٢١م

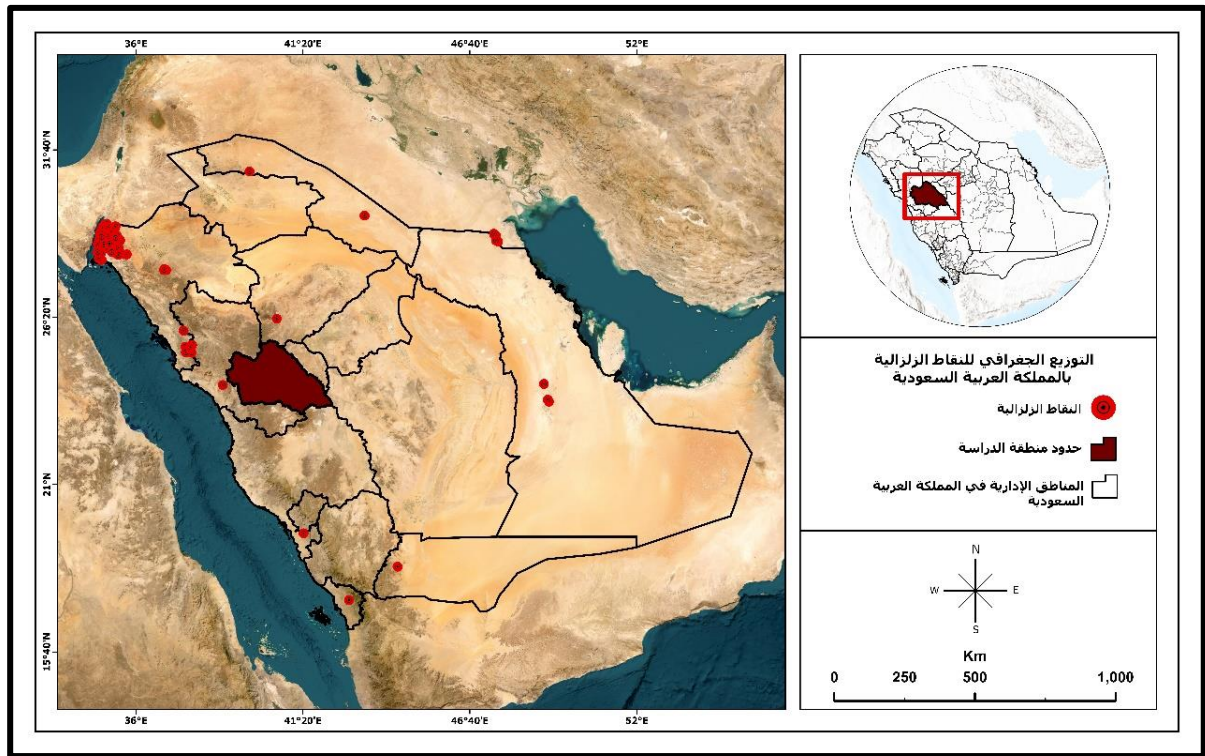


شكل (٦) طبقة مؤشر درجة الحرارة السطحية بمنطقة الدراسة خلال فصل الشتاء عام ٢٠٢١م

ثالثاً: الطبقة الرقمية المنتجة لمؤشر النشاط الزلزالي بمنطقة الدراسة:

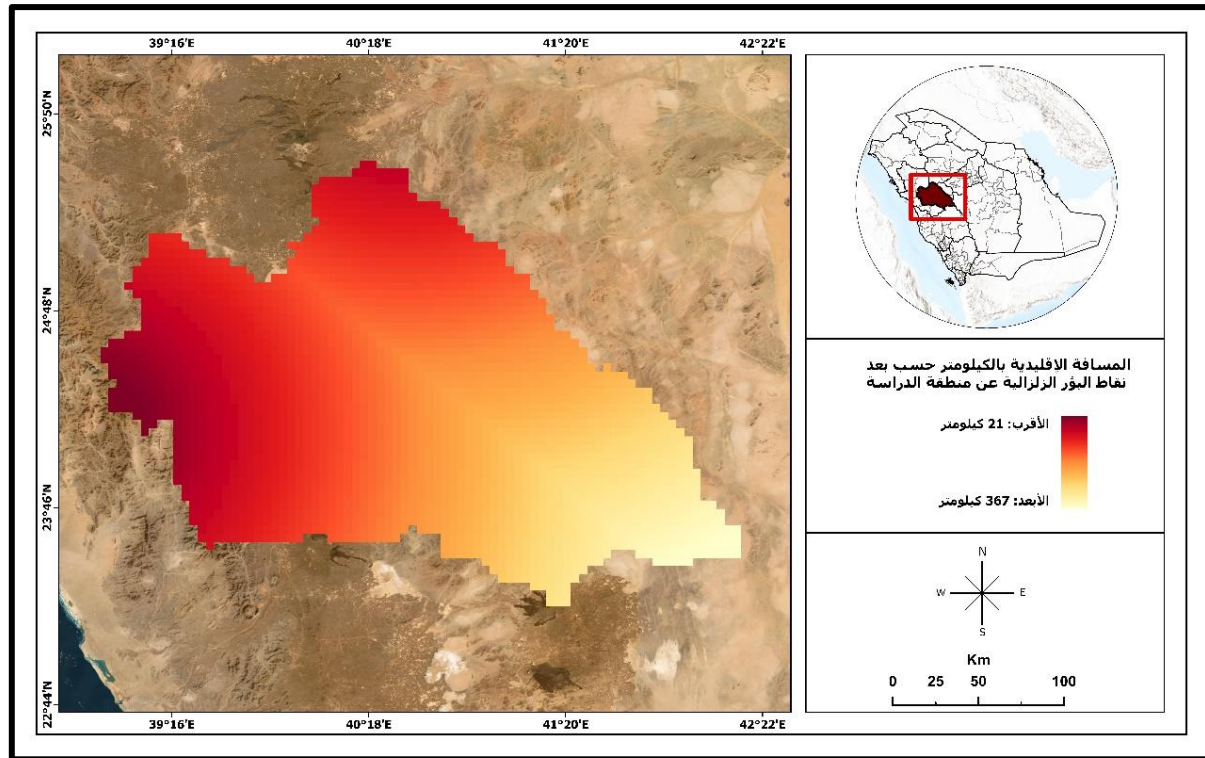
يتضح من خلال ما تم رصده من نقاط زلزالية في فترة الدراسة أن منطقة الدراسة والحيز الجغرافي الذي تشغله لم تشهد أي هزات أرضية، ولكن كما هو مبين في شكل رقم (٧) أن المناطق المجاورة لها قد تعرضت لعدد من الهزات الأرضية، ونظراً لأهمية بناء الطبقة الرقمية لهذا النوع من المؤشرات الدلالية تطرقت الدراسة الحالية إلى حساب المسافة الإقليدية لهذه النقاط ورصد مدى تأثير ذلك على منطقة الدراسة، حيث تبين أن المناطق الجغرافية الواقعة في الجزء الشمالي والشرقي والغربي من منطقة الدراسة ذات التأثير الأكبر، حيث بلغت المسافة الفاصلة بينها وبين نقاط النشاط الزلزالي ما يقارب ٢١ كيلومتر، بينما نجد باقي الأجزاء من منطقة الدراسة لم تتأثر حيث تم رصد المسافة عنها بما يقارب ٣٦٧ كيلومتر كما هو مبين في شكل رقم (٨). وبناءً عليه يتبين بأن البعد المكاني الواقع في الجزء الشمالي والشمالي الغربي والشرقي والغربي من منطقة الدراسة هو الحيز الجغرافي الذي تصدى لتأثير النشاط الزلزالي الصادر من المناطق الجغرافية المجاورة لها، مما يعني على احتمالية وجود درجات حرارة مرتفعة في تلك المناطق سواء كانت تلك المعدلات الحرارية سطحية أو جوفية، نظراً لما تم رصده من قِبل مختلف الدراسات الأدبية السابقة من علاقة ارتباطية طردية بين كلاً من مناطق النشاط الزلزالي ودرجات الحرارة المرتفعة.

تكامل التقنيات الجيومكانية لتعيين وبناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية..... أ/ مشاعل اللهيبي، د/ فهد المطلق



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على المرئيات الفضائية الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية.

شكل (٧) نقاط النشاط الزلزالي بالمملكة العربية السعودية



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية.

شكل (٨) خريطة المسافة الإقليدية لتأثير نقاط النشاط الزلزالي بمنطقة الدراسة

٧-٢-٢: مناقشة نتائج بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الجيولوجية لطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

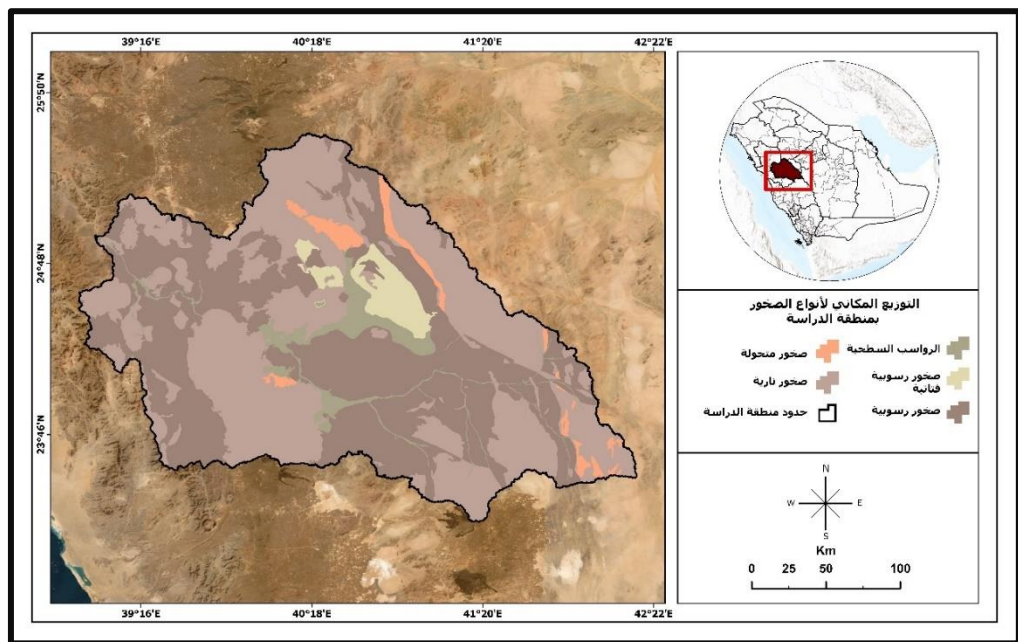
تطرت الدراسة الحالية إلى إنتاج وبناء جملة من المؤشرات الدلالية الجيولوجية ذات الصلة المباشرة بالطاقة الجيولوجية وخصوصية منطقة الدراسة وهي على النحو التالي:

أولاً: الطبقة الرقمية الممتجة لمؤشر الصخور الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

يتبين من خلال الطبقة الرقمية للتوزيع المكاني لأنواع الصخور الجيولوجية بمنطقة الدراسة، أن تلك الحدود الجغرافية تتميز بتعدد ذلك النوع من التراكيب الجيولوجية، حيث توضح الخريطة الجيولوجية لتلك الأنواع من الأشكال الجيولوجية شكل رقم (٩)، أن هناك عدة أنواع وأنماط منها. تُشكل وتُمثل هذه الطبقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة، لذا تصنف طبقة الصخور الجيولوجية بمنطقة الدراسة إلى عدة أصناف بحسب ما تم رصده من نتائج مستخرجة ومرصوده، حيث تشمل تلك الأنواع كلاً من: الصخور النارية، والصخور الرسوبية، والصخور المتحولة، مع اختلاف التوزيع الجغرافي لكل منها والمساحة الجغرافية التي تشغلها. وبناءً عليه يتضح أن الحيز الجغرافي لمنطقة الدراسة يشغل أحد أنواع الصخور الجيولوجية ذات العلاقة المتصلة بالطاقة الجيولوجية، والمتمثل في الصخور النارية، التي تُعد مؤشر هاماً من المؤشرات الدلالية للطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة، وذلك بحسب ما جاء في الأدبيات العلمية السابقة، التي درست وناقشت ذات الموضوع، حيث تُشكل الأجزاء الغربية والشرقية ومناطق متفرقة من شمال وجنوب منطقة الدراسة المواقع الجغرافية لهذا النوع من الصخور الجيولوجية، وخاصة المناطق الجغرافية الواقعة في الجزء الغربي من منطقة الدراسة.

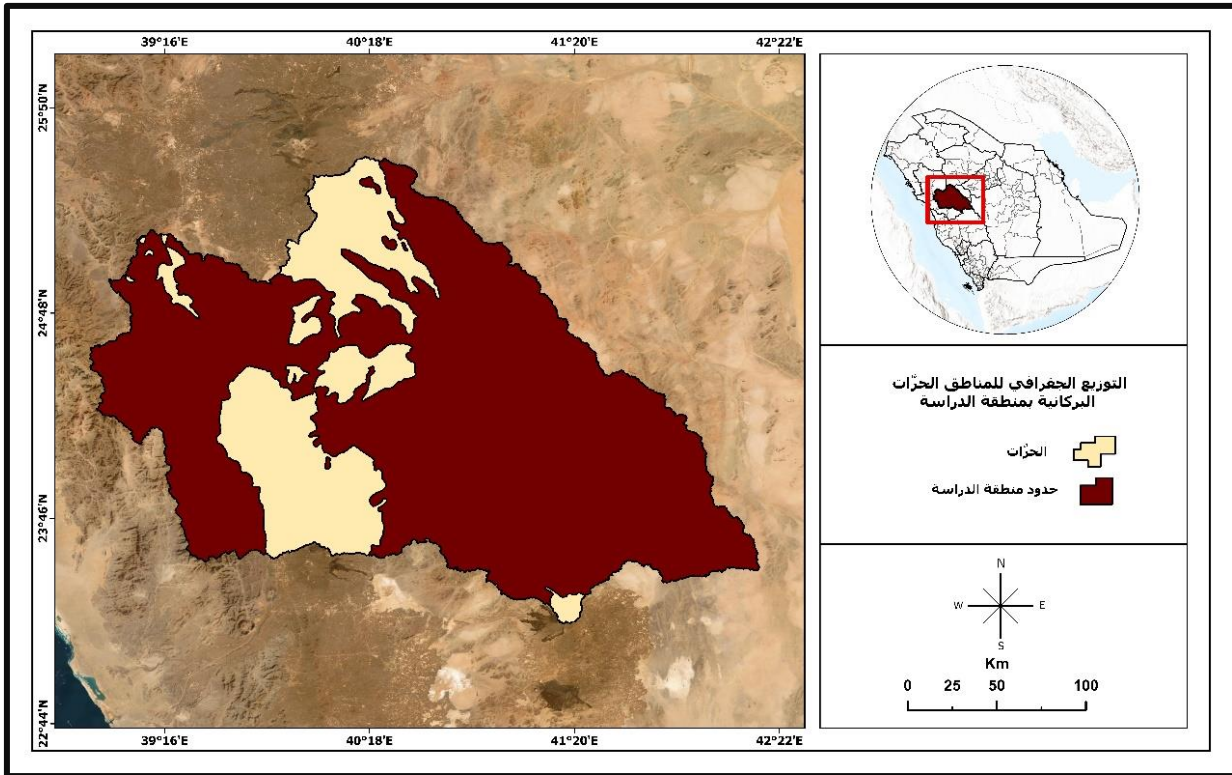
شكل (٩) أنواع الصخور بمنطقة الدراسة

المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على الخرائط الجيولوجية الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية السعودية.



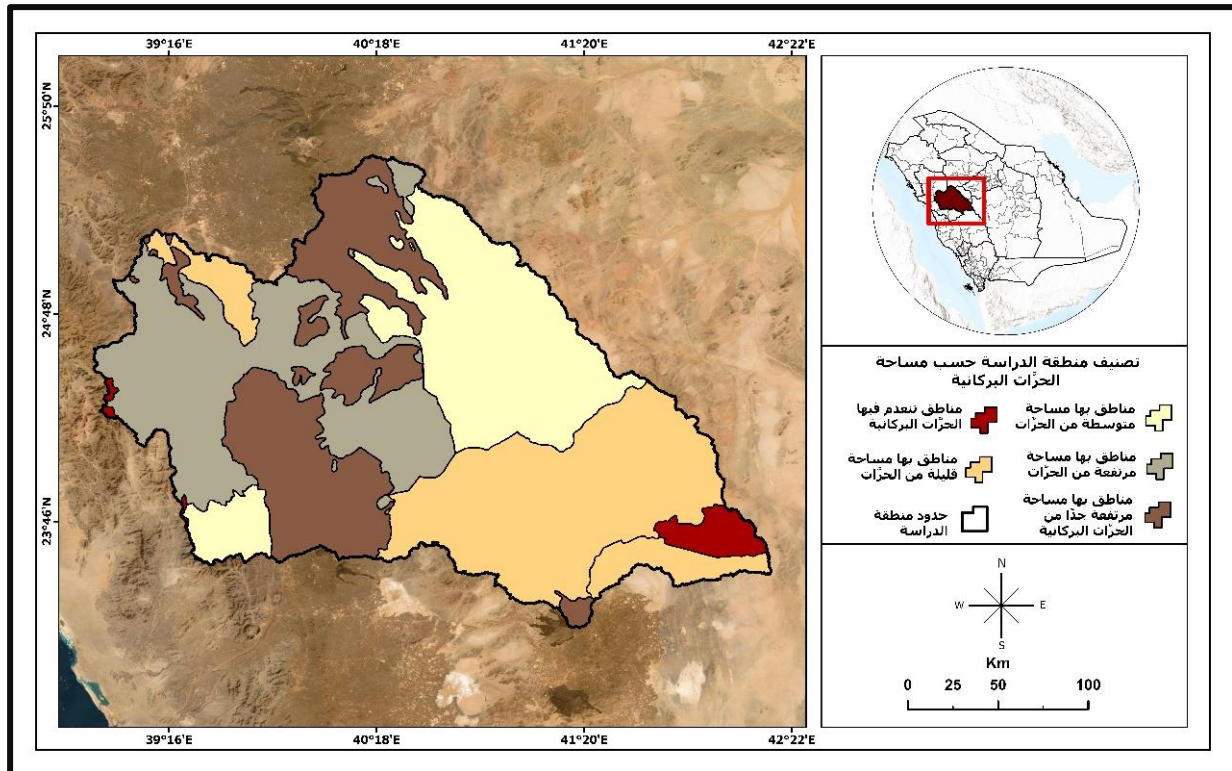
ثانياً: الطبقة الرقمية المنتجة لمؤشر الحرّات البركانية بمنطقة الدراسة:

يتضح من خلال ما تم التوصل له من نتائج لهذا النوع من المؤشرات الجيولوجية وفقاً للطبقة الرقمية المنتجة، والخريطة الجغرافية المستخرجة شكل رقم (١٠)، بأن الحرّات البركانية تُشكل نوع رئيسي من التركيب الجيولوجي لهذا الحيز الجغرافي قيد الدراسة والتحليل، بالإضافة إلى ذلك فهناك جملة مختلفة منها، بمعنى أنها لا تقتصر على نوع واحد فمن بين تلك الحرّات المتواجدة بمنطقة الدراسة، مساحة كبيرة من أكبر هذه الحرّات مساحة وهي حرّة رهط والتي قد بلغ إجمالي مساحتها ٥٣٨٤ كيلومتر، وقد اختلفت تلك الحرّات من ناحية التوزيع المكاني لها، إلا أن معظمها أنتشر في الجزء الأعلى من منطقة الدراسة. وبناءً عليه يتبين بأن البعد المكاني لمنطقة الدراسة يشتمل على مساحة كبيرة من أهم مؤشر من المؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية، والذي احتوى على مساحة كبيرة ومن أهمها وهي حرّة رهط وحرّة خيبر، والتي تُعد موطن غني بالطاقة الجيوحرارية، وذلك بحسب ما تم نشره من دراسات سابقة ناقشت وحللت هذا النوع من التراكيب الجيولوجية النادرة، كما يتضح أيضاً اختلاف محافظات منطقة الدراسة من ناحية مدى تواجد الحرّات بأراضيها من عدمه، بالإضافة إلى المساحة التي تشغلها لتلك الحرّات البركانية من الحدود الجغرافية لمحافظة منطقة الدراسة، لذا قد صنفت منطقة الدراسة إلى خمس أنماط مختلفة من حيث المساحة الإجمالية للحرّات البركانية بها كما هو موضح في شكل رقم (١١)، والذي يوضح أن مناطق الحرّات البركانية قد صنفت من ضمن المناطق ذات المساحة الكبيرة جداً من هذا النوع من الظواهر الطبيعية الجيولوجية، وفقاً للحيز الجغرافي منها الذي شغل جزء كبير من منطقة الدراسة، بينما شكلت مدينة المنورة ومحافظة الحائط التابعة لمنطقة حائل النمط الثاني من أنماط تصنيف منطقة الدراسة حسب التوزيع المساحي لهذه الظاهرة، حيث صنفت من ضمن المناطق التي قد احتوت على مساحة كبيرة من إجمالي مساحة الحرّات البركانية الموزعة بمنطقة الدراسة، بينما شكلت محافظة كلاً من: الحناكية، ووادي الفرع التابعة لمنطقة المدينة المنورة من بين المناطق ذات المساحة المتوسطة من الحرّات البركانية، في حين نجد محافظة المهد والمويه التابعة لمنطقة مكة المكرمة وخبير من المحافظات التي شغلت الحرّات البركانية مساحة قليلة من أراضيها، لتكون أراضي محافظة كلاً من بدر وعفيف التابعة لمنطقة الرياض من المحافظات التي لم تُشكل الحرّات البركانية جزءاً من أراضيها.



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية السعودية.

شكل (١٠) الحزّات البركانية بمنطقة الدراسة

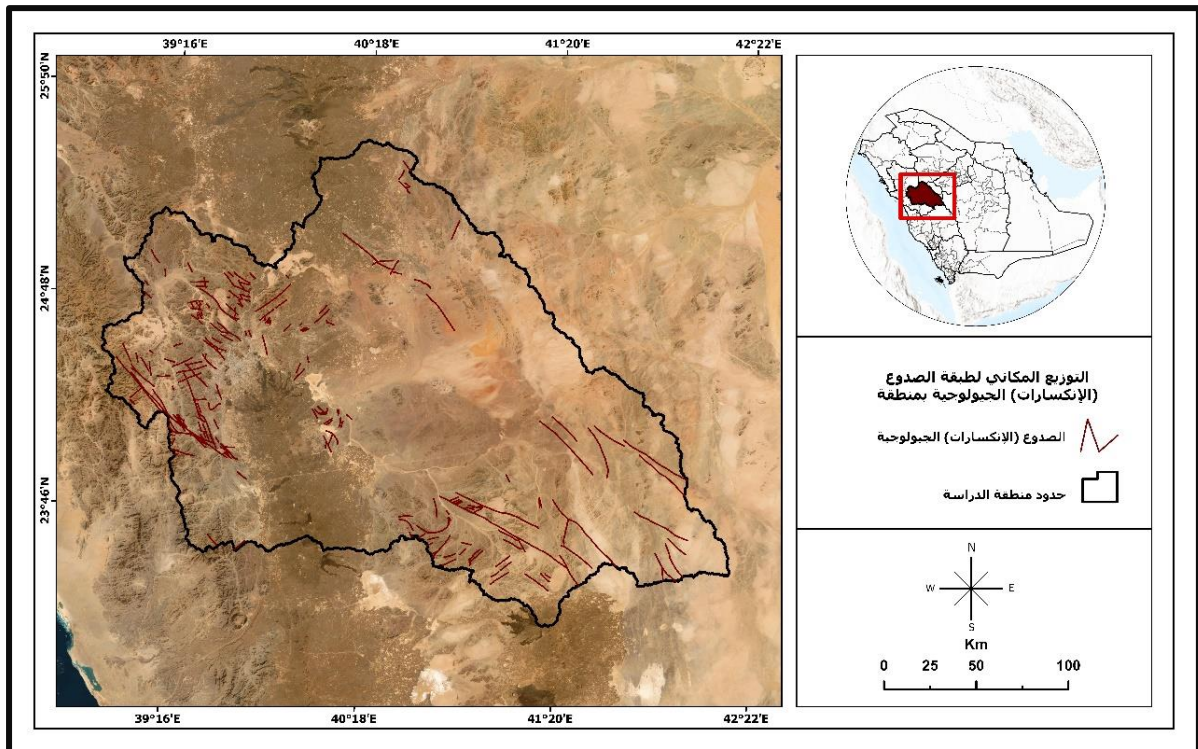


المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية السعودية.

شكل (١١) تصنيف منطقة الدراسة حسب مساحة الحزّات البركانية

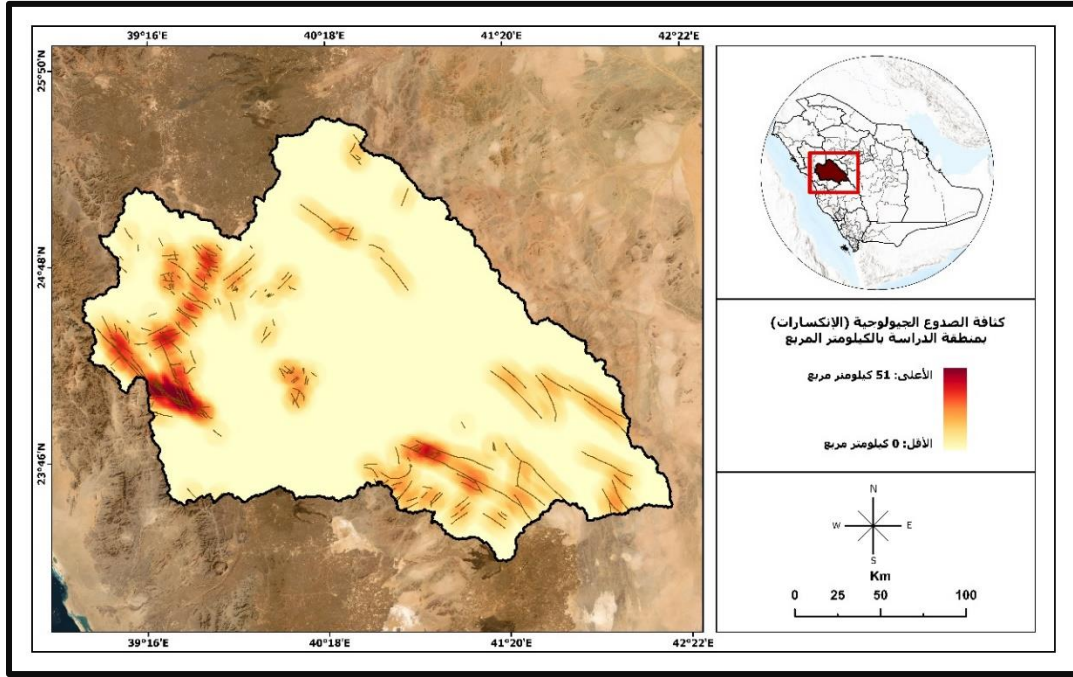
ثالثاً: الطبقة الرقمية المنتجة لمؤشر الصدوع (الانكسارات) الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

يتضح من خلال الطبقة الرقمية والخريطة الجغرافية المستخرجة لمؤشر الصدوع الجيولوجية أحد المؤشرات الدلالية للطاقة الجيوحرارية بمنطقة الدراسة شكل رقم (١٢)، أن التوزيع المكاني لتلك الظاهرة مختلف، بالإضافة إلى كثافتها، مما يعني وجود أجزاء من منطقة الدراسة تظهر بها تلك الظاهرة، وأجزاء أخرى تكاد تنعدم بها تلك الظاهرة، مع تنوع تركيب كثافتها داخل الحيز الجغرافي قيد الدراسة والتحليل، ونظراً لأهمية ذلك النوع من الظواهر لموضوع الطاقة الجيوحرارية، ووفقاً لما جاء في الدراسات السابقة التي ناقشت وحللت ذات المؤشر، تم إنتاج الطبقة الرقمية له وإخراج الخريطة الجغرافية المرتبطة بها. وبناءً عليه فقد تم إنتاج الطبقة الرقمية لكثافة الصدوع، وإخراج الخريطة الجغرافية المرافقة لها، وذلك لتصنيف تلك الظاهرة الجيولوجية بمنطقة الدراسة وفقاً لكثافتها كما هو موضح في شكل رقم (١٣)، والذي يُبين بأن الصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة تتراوح ما بين الأعلى كثافة والأقل كثافة، لتشهد المناطق الواقعة في الجزء الغربي والشمالي الغربي من منطقة الدراسة بكثافة عالية من هذه الظاهرة، في حين تكون المناطق المنفرقة من الجزء الأوسط من منطقة الدراسة صاحبة الكثافة المنخفضة جداً نظراً لعدم وجود أي نوع منها في تلك الأجزاء.



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على المرئيات الفضائية الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية

شكل (١٢) التوزيع الجغرافي للصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على المرئيات الفضائية الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية.

شكل (١٣) كثافة الصدوع الجيولوجية بمنطقة الدراسة

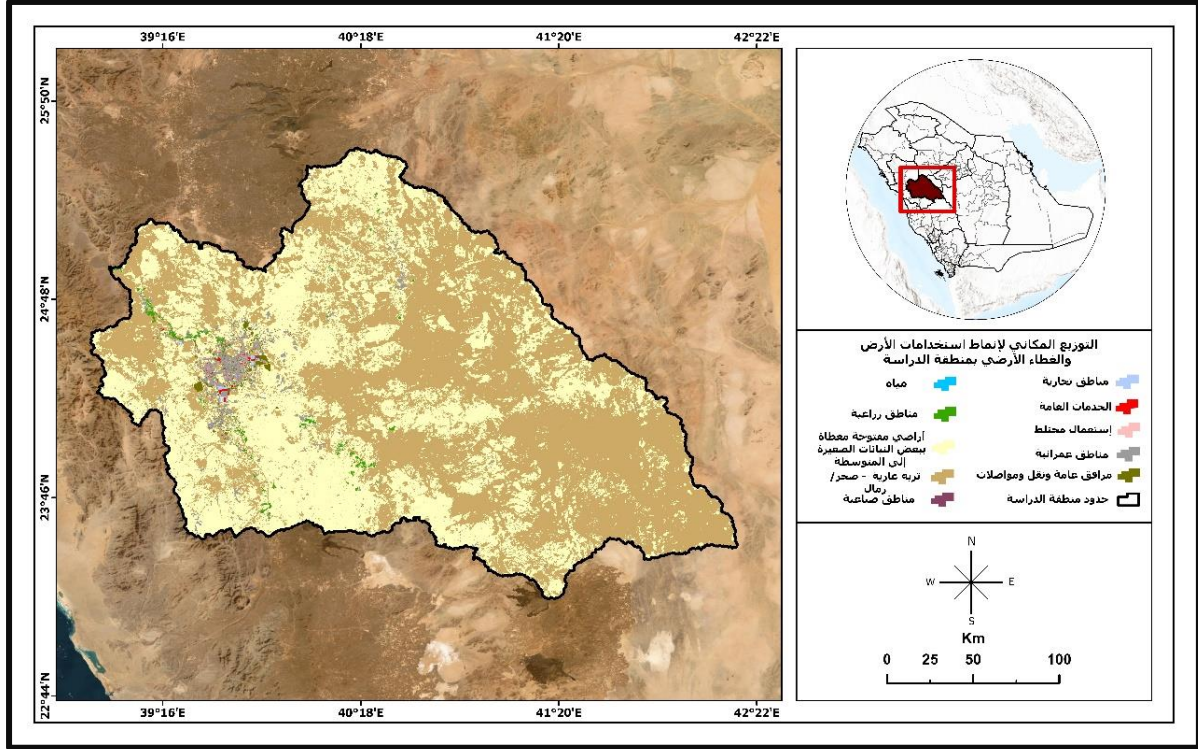
٧-٢-٣: مناقشة نتائج بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الطبوغرافية لطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة:

نجد أن الدراسة الحالية قد ركزت أيضاً على إنتاج الطبقات الرقمية الخاصة بالمؤشرات الدلالية الطبوغرافية بمنطقة الدراسة ذات العلاقة بالطاقة الجيولوجية، وذلك نظراً لدور ذلك النوع من المؤشرات في دراسة موضوع الطاقة الجيولوجية، ومدى تأثيره على البعد المكاني الخاص بها، لذا قد حرصت الدراسة على إخراج الخريطة الجغرافية الخاصة بها، وذلك على النحو التالي:

أولاً: الطبقة الرقمية المنتجة لمؤشر استخدامات الأرض والغطاء الأرضي بمنطقة الدراسة:

يتضح من خلال ما تم إنتاجه من طبقة رقمية لمؤشر استخدامات الأرض والغطاء الأرضي لمنطقة الدراسة، بأن الحيز الجغرافي قيد الدراسة والتحليل يشغل أنواع متعددة ومختلفة من استخدامات الأرض والغطاء الأرضي وينسب أيضاً متفاوتة، وذلك بحسب ما تم إخراجها من خريطة جغرافية شكل رقم (١٤)، والتي توضح الأنماط المختلفة لذلك المؤشر، والتي شملت على كلاً من: مناطق تجارية ومناطق عمرانية ومناطق خدمات عامة، ومناطق ذات استخدامات مختلفة، ومناطق صناعية، ومرافق عامة ونقل ومواصلات، بالإضافة إلى المظاهر الطبوغرافية والتي احتوت على ظواهر الغطاء الأرضي بمنطقة الدراسة وهي: المناطق الزراعية، ومناطق المياه، والمناطق المفتوحة المغطاة ببعض النباتات الصغيرة والمتوسطة، ومناطق التربة العارية. وبناءً عليه تم توظيف تلك الطبقة لتكون أحد المؤشرات

تكامل التقنيات الجيومكانية لتعيين وبناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية للطاقة الجيولوجية..... أ/ مشاعل اللهيبي، د/ فهد المطلق
 الدلالية لطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة، وذلك لتعرف على المناطق المناسبة والمُحتملة لتواجد تلك
 الطاقة والمتمثلة بالمناطق الخالية والتي كانت من ضمن الجزء الخاص بمناطق التربة العارية، والمناطق
 المفتوحة المغطاة ببعض النباتات الصغيرة.



المصدر: إعداد الباحثان بالاعتماد على البيانات الصادرة من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية.

شكل (١٤) أنماط استخدامات الأرض والغطاء الأرضي بمنطقة الدراسة

الخلاصة:

أظهرت النتائج مدى فعالية تكامل التقنيات الجيومكانية، في مسألة بناء الطبقات الرقمية للمؤشرات الدلالية لطاقة الجيولوجية بمنطقة الدراسة، بالإضافة إلى إمكانية تعيين وتحديد تلك المؤشرات الدلالية، وفق الشخصية الجغرافية للحيز الجغرافي قيد الدراسة والتحليل والتفسير، حيث يُسهم ذلك في تحسين عملية اتخاذ القرارات المثلى بشأن موضوع استكشاف مواطن ومكامن هذا النوع من أنواع موارد الطاقة المتجددة المتمثل في الطاقة الجيولوجية، وعليه تُعد هذه المؤشرات المشار إليها نموذج من الممكن الاعتماد عليها في كشف البُعد المكاني المُحتمل لمواطن الطاقة الجيولوجية، حيث تبين من خلال عملية جمع وتحليل وتفسير تلك المؤشرات أن الجهات الغربية والشمالية الغربية من منطقة الدراسة تُعد مواقع جغرافية مرجحة لعملية استكشاف هذا النوع من الطاقة، بحسب ما تم التوصل له من نتائج تحليلية لعملية تفسير الطبقات الرقمية الخاصة بإنتاج الخرائط الجغرافية لتلك المؤشرات المحددة.

قائمة المراجع

المراجع العربية:

- العمري، عبدالله بن محمد سعيد (٢٠٢٣): الطاقة الحرارية الأرضية، مكتبة الملك فهد الوطنية، الرياض.
- المنصوري، صالح (٢٠١٦): التقارير والمؤشرات مفهوماً وأهميتها في صناعة القرارات، المنظمة الليبية للسياسات والإستراتيجيات.
- أحمد، محمد أبو العلا (١٩٨٥): أودية تهامة السعودية، درار النهضة العربية للطبع والنشر والتوزيع، بيروت.
- غرفة الرياض (٢٠٢١): مؤشرات تطور قطاع الطاقة المتجددة بالمملكة العربية السعودية في ظل رؤية ٢٠٣٠، مرصد قطاع دعم الأعمال، الرياض.
- العمري، عبدالله بن محمد سعيد (٢٠٢١): الجيوفيزياء التطبيقية، مكتبة الملك فهد، الرياض، ط١.
- جودة، حسنين جودة، أبو عيانة، فتحي محمد (٢٠٠١): قواعد الجغرافيا العامة الطبيعية والبشرية، دار لمعرفة الجامعية، الإسكندرية، ط١.

المراجع الإنجليزية:

- Tampubolon, T., Abdullah, K., San, L., & Yanti, J. (2016). *The Identification of Geothermal with Geographic Information System and Remote Sensing in Distrct of Dolok Marawa.*
- Boden, David R., (2016). *Geologic fundamentals of geothermal energy, CRC Press, Taylor & Francis Group.*
- Kant, Patrick Muanza. (2021). *Geothermal Mapping and Remote Sensing of Surface thermal anomalies at Graendalur area, Hverageroi, SW Iceland. University of Iceland: Faculty of Earth Sciences.*
- Kashyap, A. (2011). *Geospatial unleashing renewable Power. Geospatial World by Geospatial Media.*
- Karmaker, A. K., Rahman, M., Hossain, A., & Ahmed, R. (2020). *Exploration and corrective measures of greenhouse gas emission from fossil fuel power stations for Bangladesh. Journal of Cleaner production.*
- Gonzalez, D. L., & Rodriguez, P. (2019). *Detection of Geothermal Potential Zones Using Remote Sensing Techniques.*
- Abubakar, A. J., Hashim, M., Pour, A. B., & Shehu, k. (2017). *Areview of Geothermal Mapping Techniques Using Remotely Sensed Data.*
- Balkema, Rotterdam. (1996). *Geological Indicatoros of Rapid Environmental Change.*

المراجع العربية الإلكترونية:

- باحيدرة، هيثم (٢٠١٤): الطاقة الحرارية الأرضية مورد نظيف، تم الاسترداد من: https://www.aleqt.com/2014/04/21/article_842750.html.

Integration of Geospatial Technologies for Identifying and Constructing Digital Layers of Geothermal Energy Semantic Indicators in the Upper Basin of Wadi Al-Hammad in the Madina Region

Introduction:

The current study clarified the general intent behind the concept of geothermal energy indicators by highlighting the key semantic indicators associated with this type of renewable energy available in the study area, specifically the upper catchment area of Wadi al-Hammad in the Madina region. This was achieved through leveraging the integration of geospatial technologies, which in turn contributed to the delineation and construction of digital layers for these indicators, according to the nature and specificity of the study area. This approach facilitates the utilization of geothermal energy and addresses significant challenges related to it, such as the difficulty in determining the spatial extent of this energy type and the associated high costs. Thus, the study aimed to achieve a primary objective: the delineation and construction of digital layers for geothermal energy indicators in the study area. This was accomplished by applying a specific scientific methodology involving a set of procedural steps and various application programs. Several implementation phases were noted to help achieve the research objectives, including defining the study area, identifying key indicators, collecting geographical data, assigning software applications, and processing geographical data to produce digital layers and maps for geothermal energy indicators. The study resulted in several findings, clarifying the main geothermal energy indicators in the study area. It identified three primary types of indicators: geological, geophysical, and topographical. Each type of indicator has various semantic factors in terms of type and quantity, which assisted in evaluating geothermal energy resources in the study area and understanding their spatial distribution. This will contribute to determining the potential spatial extent of geothermal energy in the study area in the future.

Keywords: *Indicator indicators. Geothermal energy. Geospatial techniques Upper basin of Wadi Al-Hammad. Madina region.*