

تحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية في حوض وادي السويداء جنوب محافظة تعز (الجمهورية اليمنية) باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير

أستاذ المخاطر الطبيعية ونظم المعلومات الجغرافية
المساعد- قسم الجغرافيا ونظم المعلومات
الجغرافية- جامعة آب- الجمهورية اليمنية

د. ابراهيم عبد الله قايد درويش

المستخلص:

تعتبر المياه الجوفية اهم الموارد الطبيعية التي يعتمد عليها سكان حوض وادي السويداء، وتعاني المياه الجوفية من استنزاف كبير بسبب موسمية وتذبذب وقلة كمية الأمطار، وبذلك يهدف البحث إلى تحديد المكامن المحتملة للمياه الجوفية في الحوض. ولتحقيق هذا الهدف قامت الدراسة بجمع بيانات المعايير الجيولوجية كالتركيب والبنية الجيولوجية من وزارة النفط والمعادن، وبيانات الوحدات الجيومورفولوجية والطبوغرافية كالانحدار وشبكة الجريان السطحي وكل منها اشتق من نموذج ارتفاع رقمي (DEM) بدقة مكانية 12.5 م تم الحصول عليه من موقع الأقمار الصناعية في الاسكا للقمر الصناعي الياباني (ALOS PALSAR)، وبيانات الامطار التي تم الحصول عليها من الهيئة العامة للطيران المدني والأرصاد، والغطاء الأرضي الذي اشتق من مرئية القمر الصناعي لاندسات تم الحصول عليها من موقع المساحة الجيولوجية الأمريكية (USGS). وبالتالي قامت الدراسة بمعالجة هذه البيانات تمهيداً لاشتقاق طبقة معلوماتية لكل معيار محددة للمياه الجوفية في الحوض. واستخدمت الدراسة طريقة القرار متعدد المعايير (MCDA) في دمج طبقات هذه المعايير ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) للحصول على طبقة معلوماتية واحدة تحدد انسب المناطق التي تعتبر مكامن محتملة للمياه الجوفية في الحوض، وتمت عملية دمج المعايير حسب اهميتها النسبية التي تم تحديدها حسب طريقة التسلسل الهرمي (AHP). وتوصلت نتائج الدراسة الى تباين توزيع مواقع المكامن المحتملة للمياه الجوفية في الحوض، وبذلك بلغت مساحة المنطقة التي تتصف بكونها غنية بالمياه الجوفية 176 كم²، بنسبة 25.6 % من إجمالي مساحة الحوض، وتقع هذه المناطق في الاراضي شبة المستوية في السهول التحتاتية، وبلغت مساحة المنطقة التي تتصف بكونها غنية جداً بالمياه الجوفية 28 كم²، بنسبة 4 % من إجمالي مساحة الحوض، وتقع هذه المناطق حيث تنتشر الصخور الرملية والجيرية في المناطق المستوية ببطون الأودية حيث ترتفع كثافة الصدوع ومجري الاودية ويسود الغطاء النباتي والزراعي والمراعي.

كلمات مفتاحية: المياه الجوفية، القرار متعدد المعايير، نظم المعلومات الجغرافية، حوض وادي السويداء، محافظة تعز

Determination of groundwater potential zones in Al-Sweida wade basin, south of Taiz Governorate (Republic of Yemen) using multi-criteria GIS

Dr.Ebrahim Abdullah Qaid Darwesh

Abstract:

Groundwater is the most important natural resources on which population of Al-Sweida Basin depends, and groundwater suffers from a great drain due to seasonal, fluctuation and low amount of precipitation. Thus, research aims to determine potential reservoirs of groundwater in the basin. To achieve this aim, the study collected geological criterion data such as installation and geological structure from Ministry of Oil and Minerals. and geomorphological units data and topographic as slope and wadi stream which derived from digital elevation model (DEM) spatial accuracy 12.5 m obtained from in Alaskan Satellite Facility for Japanese satellite image (Alos Palsar). and precipitation data which obtained from General Authority of Meteorology. and land cover data which derived from Landsat image from (USGS). The study processed data in preparation for the derivation of an information layer for each specific Criteria of groundwater in basin. The study used MCDA decision to merge layers of these Criteria into geographic information systems environment (GIS) to obtain a single information layer that defines most suitability areas that are considered potential reservoirs of groundwater in basin, and process of merged Criteria to its relative importance that was identified according to the Analytic Hierarchy Process method. The results of study reached the variation of distribution of possible locations of groundwater in basin, and thus area of zone that is characterized by Rich in groundwater is 176 km², a rate 25.6 % of total area. and Located within Sandston and Limestone rocks in flat areas of the wade where the density of faults and streams rises and the vegetation and agricultural cover and pastures dominate.

Keywords: Groundwater, multi-criteria decision, geographic information systems, Al-Sweida wade Basin, Taiz Governorate.

مقدمة:

المياه الجوفية كل المياه التي تقع تحت سطح الأرض، وتعد المصدر الرئيسي لمياه الشرب والري في الحوض، ويعتمد عليها السكان بنسبة 90 %، ومن هنا تنبع أهمية دراستها، وتحديد مكانها بالتقنيات الحديثة، وتعتبر المياه الجوفية واحدة من الموارد الطبيعية المتجددة التي تعاني من الاستنزاف في المناطق الجافة وشبه الجافة، وتعد مهمة كونها المصدر الأساسي للشرب والري والتنمية الاقتصادية في مختلف المناطق المناخية في العالم، لذا من الضروري ان تكون هناك خطط لاستغلال المياه الجوفية بشكل مثالي والحفاظ عليها في المناطق الجافة وشبه الجافة. وتحتل المياه الجوفية الفراغات الموجودة في الصخور، وبالتالي فإن حدوث المياه الجوفية في التكوين الجيولوجي ونطاق استغلالها يعتمد في المقام الأول على مسامية التكوين، في حالة وجود الكسور والشقوق والفواصل، والتجاويف حيث يمكن لمياه الأمطار أن تتخللها بسهولة وتساهم في تكوين خزانات المياه الجوفية. وتعتمد الطرق التقليدية المستخدمة في تحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية بشكل رئيسي على المسح الأرضي، ومع ظهور الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية أصبح رسم خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية داخل كل وحدة جيولوجية إجراءً سهلاً (Ruzouq, et al, 2015, p.581). وتخضع مواقع المياه الجوفية وتحركها في أي منطقة لعدة عوامل مثل الطبوغرافيا والصخور والتركيب الجيولوجي والكسور والمسامية والانحدار ونمط التصريف والتضاريس الأرضية وأغطية واستعمالات الارض والظروف المناخية والعلاقة المتبادلة بين هذه العوامل، بالإضافة الى الخصائص المورفولوجية لأحواض الصرف التي تساعد في فهم وتقييم حالة المياه الجوفية (Jaiswal, et al, 2003, p. 995).

ومن هذا المنطلق أصبحت دراسة المياه الجوفية حاسمة ليس فقط لتحديد الأماكن المحتملة لها، ولكن أيضاً للرصد والحفاظ على هذا المورد الحيوي. (Hutti & Nijagunappa, 2011, p.92). وبالتالي هناك وجهات نظر مختلفة لدراسة المياه الجوفية؛ منها دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية وتغير مستوى المياه الجوفية، والمكان المحتمل للمياه الجوفية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد (Agrawal, et al, 2009, p.162). وهناك عدد من الطرق المستخدمة لتحديد المناطق المحتملة للمياه منها استخدام التقنيات الجيولوجية والهيدروولوجية والجيوفيزيائية والاستشعار عن بعد، ومنها دمج مختلف البيانات والخرائط الموضوعية مثل التضاريس، والهيدروجيومورفولوجيا، وعمق المياه، والمقاومة الجيوفيزيائية، وجميعها تساهم في رسم خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية (Ali, et al, 2015, p. 1140). وطبقت تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية حديثاً من قبل الباحثين لتحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية، واختلفت المعايير المستخدمة في تحديد مكان المياه الجوفية من باحث لآخر، مما أدى إلى اختلاف النتائج. فالبعض اعتمد على الصدوع فقط في تحديد مناطق تواجدتها، في حين دمج آخرون معايير مختلفة بغض النظر عن الصدوع منها كثافة الصرف والجيومورفولوجيا والجيولوجيا والانحدار واستخدام الأرض والأمطار، وتطابقت نتائج المسح الميداني بدرجة كبيرة مع نتائج دمج هذه المعايير، وتختلف نسبة التطابق من منطقة الى أخرى، بسبب تنوع الظروف الجغرافية والبيئية (Magesh, et al, 2012, p. 190). ويحتاج السكان المتزايدون حيث تفتقر المناطق الى المياه السطحية الدائمة بالذات بمناطق الصخور الصلبة حيث يصعب الحصول على مناطق تغذية للمياه الجوفية الى تحديد مواقع المياه الجوفية (Gupta &

(Srivastava, 2010, p. 233). وبذلك سنتناول هذه الدراسة تحديد مكامن المياه الجوفية في الحوض باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير، حيث اكدت العديد من الدراسات السابقة ان هذه التقنيات مناسبة في تحقيق هذا الغرض، كما انها تقلل من الوقت والتكلفة والجهد مقارنة بالطرق التقليدية، ولتحقيق هذا الهدف تم الاعتماد على سبعة معايير مكانية هي نوع الصخور والصدوع والوحدات الجيومورفولوجية والانحدار وكثافة التصريف والأمطار وأغطية واستعمالات الأرض، وبعدها تم الاعتماد على طريقة التسلسل الهرمي في تحديد وزن او اهميته كل معيار في تحديد المناطق المحتملة كمكامن للمياه الجوفية، وبالتالي دمجت جميع المعايير في بيئة نظم المعلومات الجغرافية حسب أوزانها، وصنفت الطبقة الناتجة الى أربعة فئات حسب احتمالية تواجد المياه الجوفية فيها فقيرة جداً، فقيرة، معتدلة، غنية، غنية جداً.

دراسات سابقة:

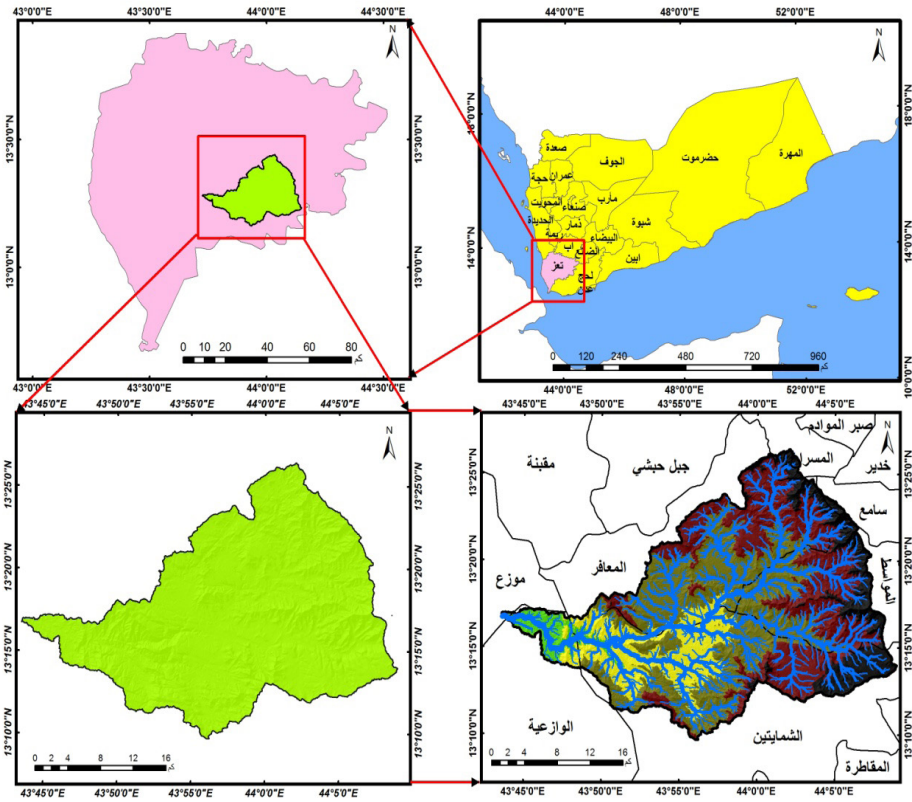
استخدم (Sener, et al, 2005) نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لتحديد مناطق المياه الجوفية في بوردور تركيا، واعتمد على دمج معايير الامطار والصخور وكثافة الصدوع واستخدام الارض والتضاريس والانحدار وكثافة التصريف. واستعمل (Kumar, et al, 2007) تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لرسم خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية في حوض نهر ولاية الساحل الغربي للهند، واعتمد على الوحدات الجيومورفولوجية والانحدار والصخور وكثافة التصريف وكثافة الصدوع واستعمالات الارض. وقيم (Nagarajan & Singh, 2009) المناطق المحتملة للمياه الجوفية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية واعتمد على معايير الجيولوجيا والوحدات الجيومورفولوجية والمجموعات الهيدرولوجية للتربة وأغطية واستعمالات الارض وكثافة التصريف. ودمج (Gupta & Srivastava, 2010) معايير كثافة الصدوع والانحدار وكثافة التصريف وأغطية واستعمالات الارض في بيئة نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية في التضاريس الجبلية في منطقة بافاغارة غوجارات بالهند. ورسمت (Al Saud, 2010) خرائط المناطق المحتملة لتخزين المياه الجوفية في حوض وادي عرنة باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، بالاعتماد على معايير الامطار والصخور والصدوع والانحدار والصرف وأغطية واستعمالات الارض. وحدد (Hutti & Nijagunappa, 2011) المناطق المحتملة للمياه الجوفية في حوض غاتا برابها كارناتاكا الشمالية الهند باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، واعتمدت الدراسة على معايير الوحدات الجيومورفولوجية والجيولوجيا والتغذية وكثافة التصريف والتربة والانحدار. وتناول (Sharma, et al, 2012) موضوع تحديد مناطق المياه الجوفية باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في منطقة رامغار وجهارخاند الهند، واعتمدت الدراسة على متغيرات الصخور والجيومورفولوجيا والانحدار وكثافة الصدوع والتصريف. وحدد (Patil, et al, 2013) المناطق المحتملة للمياه الجوفية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية في حوض بهيما العلوي، بيون، مهاراشترا، الهند، واعتمدت الدراسة على معايير الجيومورفولوجيا والتربة والانحدار وأغطية واستعمالات الأرض. كما حدد (Murasingh & Jha, 2013) المناطق المحتملة للمياه الجوفية في وادي تينسا بمنطقة اوديشا الهند، بالاعتماد على نظم المعلومات الجغرافية في دمج معايير كثافة التصريف واستعمالات الأرض وكثافة الصدوع. واتبع (Pandian & Kumanan, 2013) منهجية الجيوماتكس لرسم خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية في منطقة تريشي

وكارور، تاميل نادو، الهند، واعتمد على معايير كثافة التصريف والوحدات الجيومورفولوجية والصخور واستخدامات الأرض. واستخدم (Waikar & Nilawar, 2014) الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لتحديد المنطقة المحتملة للمياه الجوفية بمنطقة باريهاني، واعتمد على معايير الجيولوجيا، والمنحدرات، وكثافة الصدوع، والوحدات الجيومورفولوجية، وكثافة التصريف، وأغطية واستخدامات الأرض. واستعمل (Ma-halingam & Vinay, 2014) نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لتحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية في ميسور، الهند واعتمد على معايير الجيولوجيا والجيومورفولوجيا وكثافة الصدوع والتصريف والتربة والانحدار والأمطار واستعمالات الأرض والارتفاع. وحدد (Ghodratajadi & Feizi, 2015) المناطق المحتملة للمياه الجوفية في موالمان، ايران عن طريق الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، واعتمدت الدراسة على معايير الارتفاع والتربة والانحدار والجيولوجيا والوحدات الجيومورفولوجية وأغطية واستعمالات الأرض وكثافة الصدوع والأمطار. واتبع (Oikonomidis, et al, 2015) منهجية نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لتقييم امكانيات المياه الجوفية في منطقة تيرنافوس باليونان بالاعتماد على هطول الامطار والتغذية المحتملة والصخور وكثافة الصدوع والتصريف والانحدار وعمق المياه الجوفية.

كما حدد (Basavaraj, et al, 2016) المناطق المحتملة للمياه الجوفية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، واعتمد في ذلك على أغطية واستخدامات الأرض والتربة والجيومورفولوجيا والانحدار وشبكة التصريف والصخور. واعتمد (Bathis & Ahmed, 2016) في تحدد مناطق المياه الجوفية في الاحواض المائية دودالا بمنطقة شيتادورجا على معايير اغطية واستعمالات الارض والأمطار والانحدار والوحدات الجيومورفولوجية والتربة وكثافة التصريف والصدوع. وقام (Bera & Ahmed, 2016) برسم خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية في منطقة دنياد جرخاند باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، واعتمد على متغيرات أغطية واستعمالات الارض والجيولوجيا وكثافة التصريف والانحدار وعمق المياه. كما استعمل (Kumar, et al , 2017) نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لتحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية بالاعتماد على نوع التربة واستخدامات الأرض والصدوع وكثافة التصريف والانحدار والأمطار. وقام (Barik, et al , 2017) بتحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية في منطقة كاندهامال باستخدام منهجية الجغرافية المكانية، واعتمد على معايير الوحدات الجيومورفولوجية والصخور وأغطية واستعمالات الأرض والتربة وكثافة التصريف والصدوع والانحدار والأمطار. واتبع (Rana & Suryanarayana, 2020) طريقة اتخاذ القرار متعددة المعايير القائم على نظم المعلومات الجغرافية لتحديد مناطق تخزين الجريان السطحي المحتملة داخل في الاحواض المائية بمنطقة فادودارا غوجارات، الهند واعتمدت الدراسة على معايير الامطار والبلل الطبوغرافي والانحدار وأغطية واستعمالات الارض ونسيج التربة وكثافة التصريف والارتفاع. وأنتج (Alrawi, et al, 2022) خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية بمنطقة القلمون، سوريا باستخدام القرار متعدد المعايير (MCDA) ونظم المعلومات الجغرافية، واعتمدت هذه الدراسة على معايير الانحدار وكثافة التصريف والجيومورفولوجيا وكثافة الصدوع والأمطار والتربة. ورسم (Li, et al, 2023) خرائط المناطق المحتملة للمياه الجوفية في حوض النهر الأصفر، الصين باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، واعتمدت الدراسة معايير خصائص التربة واتجاه وخشونة التضاريس وكثافة الصرف والصدوع والارتفاع والأمطار والبعد من مجرى النهر.

منطقة البحث:

يقع حوض وادي السويداء جنوب محافظة تعز ضمن عدد من الوحدات الادارية هي (المعافر والشمائتين والمواسط والمسراخ وسامع والوازعية وموزع)، ويقع فلكياً كما يوضح شكل (1) بين دائرتي عرض 19°:11' - 13°:12' شمالاً، وبين خطي طول 10°:44' - 43°:26' شرقاً، وبلغت مساحة الحوض 688.1 كم²، ويمثل الحوض الجزء الأعلى من حوض وادي موزع أحد أودية اليمن الرئيسية التي تصب في البحر الأحمر، وتبدأ الروافد العليا للحوض من مرتفعات ذبحان والاصباح والعزازع التابعة ادارياً لمديرية الشمائتين، ومرتفعات الأشروح وبني حماد والاعلوم والايقوع وبني عباس وبني يوسف التابعة ادارياً لمديرية المواسط، ومرتفعات الجبزية والشعوبة والسواء التابعة ادارياً لمديرية المعافر، ويصب الحوض بمنطقة السويداء شمال مديرية الوازعية، ويعاني الحوض من استنزاف المياه الجوفية، بسبب الحاجة المتزايدة للسكان، ويعتبر الحوض من المنتجعات السياحية الهامة لسكان المحافظة، ويزود السكان بعدد من المنتجات الزراعية كالبن والمانجو والذرة الشامية والرفيعة والدخن والغرب والطماطم والبطاطس وغيرها.



شكل رقم (1) موقع منطقة البحث

المصدر: الباحث بالاعتماد على طبقات (Shapfile) للمحافظات والمديريات، ونموذج ارتفاع رقمي دقة مكانية، 12.5 م.

أهداف الدراسة:

- التحليل المكاني للمعايير المحددة لمكامن المياه الجوفية في الحوض.
- تحديد المكامن المحتملة للمياه الجوفية في الحوض باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير.

منهجية الدراسة:

لتحقيق الاهداف السابقة اعتمدت الدراسة على كل منالمنهج الوصفي التحليلي في وصف علاقة مكامن المياه الجوفية في الحوض بالمعايير الجيولوجية والجيومورفولوجية والهيدرولوجية في الحوض، والمنهج الكمي الذي تم من خلاله تحديد الاوزان او الاهمية النسبية لكل معيار وجبر جميع هذه المعايير في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، ومنهج التحليل المكاني الذي تم من خلاله انتاج طبقات المعايير المحددة للمناطق المحتملة للمياه الجوفية وتحليل تبايناتها المكانية، وبذلك فقد تدرجت منهجية الدراسة كما يأتي:

أ) جمع البيانات: وتمثلت بيانات الدراسة التي تم القيام بجمعها مرئية(8 Landsat) التي التقطت بتاريخ (31/ 5/ 2021) وتم الحصول عليها من موقع المساحة الجيولوجية الأمريكية (USGS). ومرئية (Google Earth) تم الحصول عليها بتاريخ (30/ 5/ 2021) باستخدام برنامج (tenalP SAS). ونموذج ارتفاع رقمي دقة مكانية 12.5 م تم الحصول عليه من موقع الأقمار الصناعية في الاسكا (Alaskan Satellite Facility) وهو نموذج ارتفاع رقمي انتج بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي الياباني (ALOS) الذي قدم بيانات عالية الجودة لرصد الأرض ورسم الخرائط الطبوغرافية بالمستشعر (PALSAR). خريطة جيولوجية بصيغة (Jpg) مقياس 1: 250000 تم الحصول عليها من الهيئة العامة للمساحة الجيولوجية، صنعاء. وطبقة (Shapfile) للأمطار تم الحصول عليها من الهيئة العامة للارصاد الجوية.

ب) معالجة البيانات: وتتضمن هذه الخطوة معالجة مرئية لاندسات ومرت مراحل معالجتها بدمج نطاقات المرئية بواسطة اداة (layer Stack) في برنامج (Erdas Imagine 2014)، والتصحيح الهندسي (Geometric Correction) بالاعتماد على 10 نقاط ارجاع من خريطة طبوغرافية مقياس (1:50000)، باستخدام اداة (Georeferencing) برنامج (Arc GIS). والتصحيح الراديومتري (Radiometric) للمرئية باستخدام اداة (Autonomous Atmospheric Correction) ببرنامج (Erdas Imagine). وتحسين الدقة المكانية للمرئية من خلال دمج نطاقات المرئية مع النطاق البنكروماتي (8) باستخدام اداة (Resolution Merge) في البرنامج السابق نفسه. والاقطاع على حدود الحوض بواسطة اداة (Create subset image). ومعالجة مرئية (Google Earth) وذلك من خلال اعادة ارجاعها بالاعتماد على مرئية لاندسات المعالجة. وقبل اشتقاق طبقات معايير الوحدات الجيومورفولوجية والانحدار وشبكة مجاري الاودية تم معالجة نموذج الارتفاع الرقمي من خلال اعادة ارجاعه من النظام الجغرافي الى النظام المتر، واستخدام اداة (FILL) من اجل تعبئة التخلص من القيم الصفرية لبعض الخلايا بالاعتماد على قيم الخلايا المحيطة بها، وبالتالي استخدام اداة (Clip) للاقطاع على حدود منطقة الدراسة، وتضمنت مرحلة المعالجة اعادة ارجاع الخريطة الجيولوجية بالاعتماد على الاحداثيات الظاهرة في اطراف الخريطة.

ج) اشتقاق طبقات المعيار: بعد معالجة مرئية لاندسات استخدمت الدراسة اداة التصنيف الموجة

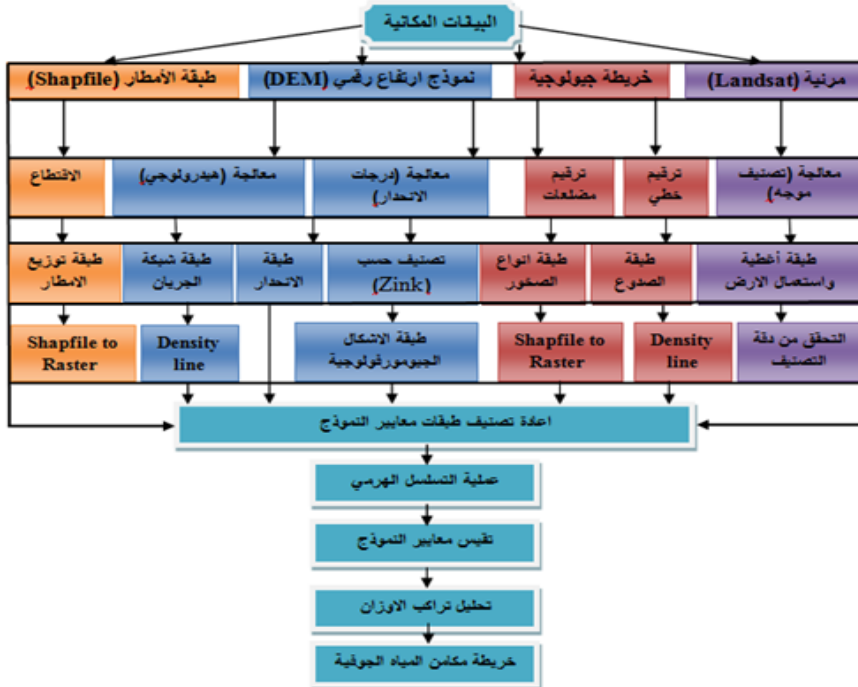
(Supervised) ضمن برنامج (Erdas) لاشتقاق طبقة معيار اغطية واستعمالات الارض في الحوض، وبالتالي تم التحقق من نتائج التصنيف من خلال اخذ عينات عشوائية باستخدام اداة انشاء نقاط تقييم الدقة (create accuracy assessment points) في برنامج (Arc GIS)، والاعتماد على طريقة التوزيع العشوائي المتساوي (Equalized_Stratified_Random) تم توزيع 50 عينة عشوائية موزعة على الاغطية الارضية بنحو 10 عينات لكل غطاء او استعمال ارضي، وعليه فقد بلغت قيمة معامل الدقة الاجمالية للتصنيف 0.91، وبلغت قيمة معامل كبا 0.89. وبعد الانتهاء من معالجة نموذج الارتفاع الرقمي في الخطوة السابقة استخدمت الدراسة اداة (Slope) لاشتقاق طبقة معيار الانحدار، وبالاعتماد على هذه الطبقة استخدمت الدراسة اداة (Reclassify) لاشتقاق طبقة الاشكال الجيومورفولوجية حسب تصنيف حسب تصنيف (Zink)، وهو تصنيف هرمي متسلسل يقع ضمن خمس فئات. وتم استعمال ادوات (Hydrology) ضمن برنامج (Arc GIS) لاشتقاق طبقة مجاري الاودية، وبالاعتماد على هذه الطبقة استخدمت اداة (line Density) في البرنامج نفسه للحصول على طبقة معيار كثافة شبكة التصريف في الحوض. وبعد اعادة ارجاع الخريطة الجيولوجية تم استخدام اداة (Clip) ببرنامج (Arc GIS) للاقطاع من الخريطة المرجعة بما يتناسب مع حدود الحوض، وبالتالي تم القيام بإنشاء طبقة (Shapfile Polygon) جديدة والقيام بعمل ترقيم (Digi-tizing) لرسم التراكيب الجيولوجية ونتاج طبقة معيار التركيب الجيولوجي، واعقبها إنشاء طبقة أخرى جديدة (Shapfile Line) للقيام بترقيم الصدوع، وبالتالي تم استخدام اداة (Density line) لإنتاج طبقة معيار كثافة الصدوع في الحوض. واشتقت طبقة معيار الامطار بعمل (Clip) للطبقة التي تم الحصول عليها من هيئة الأرصاد، وبالتالي تم تحويلها من (Shapfile to Raster).

د) بناء نموذج الملاءمة:

تعد عملية اعادة تصنيف طبقات المعايير المشتقة في الخطوة السابقة الى فئات وإعطاء كل فئة وزن بما يتناسب مع ملاءمتها للمناطق المحتملة للمياه الجوفية أولى خطوات بناء النموذج، واعقبها تقييس معايير النموذج من خلال تحويل الطبقات المعلوماتية من اسطح رتيبة، الى اسطح مستمرة بواسطة دالة (Large) ضمن ادوات (Rescale by Function) ببرنامج (Arc GIS)، وبذلك اتبعت الدراسة طريقة متقدمة في تقييس معايير نموذج الملاءمة المكانية لمكامن المياه الجوفية في الحوض، وبالتالي قامت الدراسة بتحديد العلاقات بين المعايير مع عدد من البدائل بشكل هرمي، فكل معيار له بديل حسب طريقة التسلسل الهرمي، وتقاس البدائل حسب طريقة التسلسل الهرمي بمقياس يتراوح بين 1 - 9. ومن ثم قامت الدراسة بوزن المعايير حسب طريقة التسلسل الهرمي (APH) لتحديد الاهمية النسبية لكل معيار من خلال بناء مصفوفة المقارنة الزوجية، واعتمدت الدراسة في بناء مصفوفة المقارنة الزوجية على الحاسبة الالكترونية في موقع (AHP Online System)، وتستخدم مصفوفة المقارنة الزوجية لاستقراء اوزان المعايير، وحساب مدى ثبات الاحكام، وحددت طريقة التسلسل الهرمي مستوى ثبات الاحكام بما يعرف مستوى التناسق، والتي ينبغي ان لا تتجاوز 10 % حتى تدل على اقتراب الاحكام من الثبات وعدم وجود تناقض بينها، وبذلك فقد بلغت نسبة تناسق معايير النموذج 3 % مما يعني ثبات الاحكام وعدم تناقضها.

(5) انتاج خريطة المناطق الملائمة للمياه الجوفية:

تم انتاج الخريطة النهائية التي سيتم من خلالها تحديد أنسب المناطق لتواجد المياه الجوفية في الحوض من خلال جبر الطبقات المعلوماتية للمعايير حسب اوزانها او اهميتها النسبية التي تم تحديدها في الخطوة السابقة، وتم جبر هذه المعايير بواسطة الحاسبة الخلوية (Raster Calculator) ببرنامج Arc GIS، وذلك بعد تحويل الاهمية النسبية للمعايير التي تم الحصول عليها من حاسبة (AHP) الى قيم مطلقة من خلال قسمة الاهمية النسبية لكل معيار على 100، ويوضح شكل (2) خطوات منهجية الدراسة.



شكل رقم (2) مخطط منهجية البحث

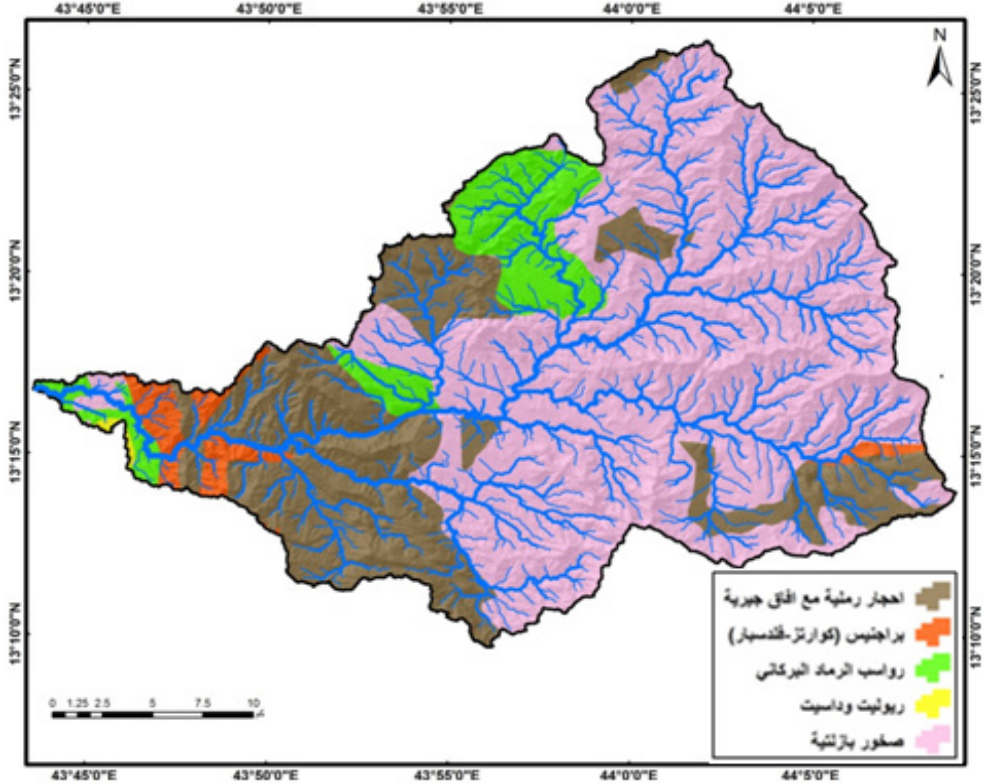
مناقشة نتائج الدراسة:

أولاً) معايير تحديد مكامن المياه الجوفية:

أ) التركيب الجيولوجي للحوض:

يعتبر التركيب الجيولوجي واحداً من أهم المتغيرات المكانية في تحديد المناطق المحتملة للمياه الجوفية، فمسامية الصخور او نسبة حجم الفراغات الموجودة فيها تحدد حجم المياه الجوفية التي يمكن تخزينها، وبالتالي تختلف المسامية باختلاف نوع الصخور وكيفية ترتيب حبيبات كل منها، فكلما زادت مسامية الصخور زادت احتمالية تواجد المياه الجوفية والعكس. ويوضح شكل (3) وجود خمسة أنواع من الصخور في حوض وادي السويداء تأتي الصخور البازلتية في المرتبة الأولى بالمساحة، وتغطي أعلى ووسط الحوض، وتتصف بمسامية ضعيفة جداً تتراوح بين 0.3 - 2.5 % من حجم الصخر الكلي (Al-Qadhi, 2016, p.21). وبالتالي لا تساعد هذه المسامية على تكوين المياه الجوفية، وتبلغ مساحة الصخور البازلتية 422.7

كم²، بنسبة 61.4 % من إجمالي مساحة الحوض. وتأتي صخور الحجر الرملي التي تتسم بمسامية مرتفعة تتراوح بين 10 - 35 % من حجم الصخر الكلي (Smith, et al, 2009, p. 56). في المرتبة الثانية من حيث المساحة، وتظهر ادنى وشمال وجنوب شرق الحوض، وتعد من اهم المناطق التي تحتوي خزانات المياه الجوفية في الحوض، بمساحة بلغت 181.1 كم²، بنسبة 26.3 % من إجمالي مساحة الحوض. وجاءت رواسب الرماد البركاني في المرتبة الثالثة من حيث المساحة، وتتسم هذه الرواسب بمسامية عالية تساعد على تخزين المياه الجوفية. وتتراوح مسامية رواسب الرماد البركاني بين 34 - 40 % من حجم الصخر الكلي (Mohebbi, et al, 2022, p. 5). وتبلغ مساحتها في الحوض 61.5 كم²، بنسبة 8.9 % من إجمالي مساحة الحوض. وأعقبها في المرتبة الرابعة صخور البارانيس وهي صخور نارية لا تساعد على تخزين المياه الجوفية، بمساحة بلغت 21.8 كم²، بنسبة 3.2 % من إجمالي مساحة الحوض. وأخيرا جاءت مجموعة صخور الريوليت - داسيت ادنى الحوض، وكلاهما صخر بركاني ناري ذو مسامية ضعيفة. حيث تتراوح مسامية تشبعهما بالماء بين 1 - 10% من حجم الصخر الكلي (Negron, et al, 2016, p. 4). وتبلغ مساحة هذا التركيب الصخري 1.2 كم²، بنسبة 0.2 % من إجمالي مساحة الحوض.

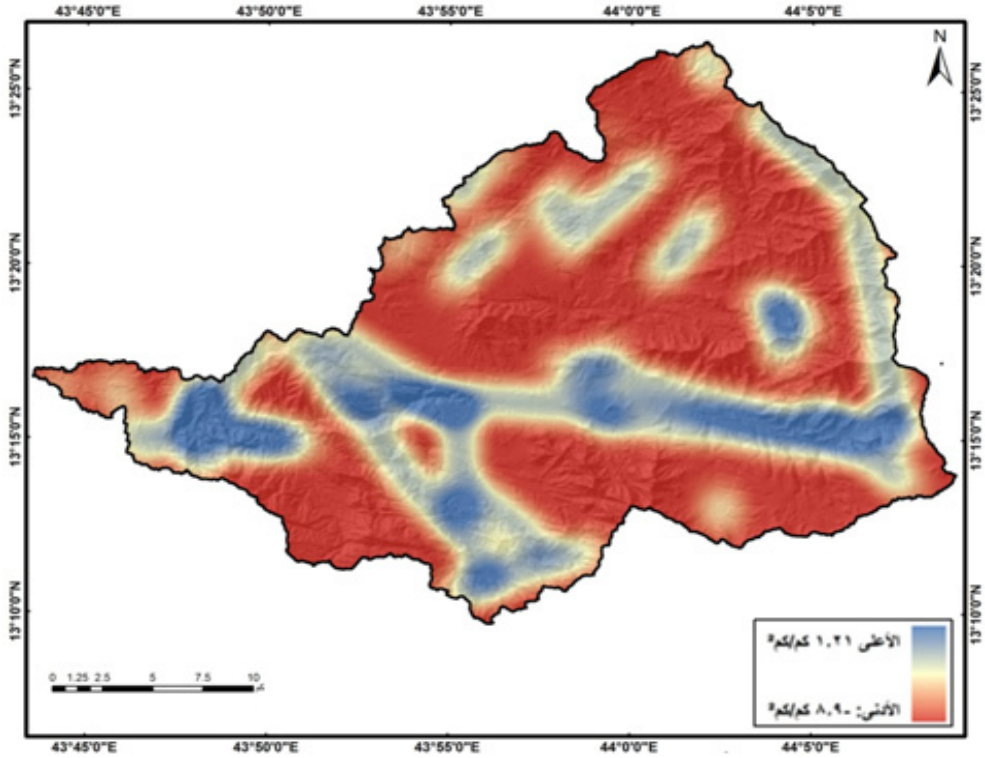


شكل رقم (3) التركيب الجيولوجي لحوض وادي السويداء

المصدر: الباحث بالاعتماد على الخريطة الجيولوجية لمحافظة تعز، لوحة رقم (13)، الهيئة العامة للمساحة الجيولوجية.

ب) كثافة الصدوع:

يشار الى الصدوع بالخصائص الخطية التي تظهر على سطح الأرض، وتعزى إلى الكسور والفواصل التي تطورت مع الحركات التكتونية، وتستخدم على نطاق واسع لفهم حركة وتخزين المياه الجوفية. وكان كل من (Lattman & Parizek) أول من أعتمد خريطة الصدوع لاستغلال المياه الجوفية، وتتناسب الكثافة العالية للصدوع طردياً مع المناطق المحتملة للمياه الجوفية (Magesh, et al, 2016, 56). وتعتبر كثافة الصدوع في أي منطقة مؤشر جيد في التنبؤ بالمناطق المحتملة للمياه الجوفية. فكلما زادت كثافة الصدوع كم²/كم كان هناك احتمال كبير لمكامن المياه الجوفية، اما المناطق ذات الكثافة المنخفضة جداً، فتتصف باحتمال ضعيف للمياه الجوفية (Basavaraj, 2014, p.12168). وتؤدي مناطق الصدوع والكسور إلى زيادة المسامية والنفاذية، وهى عوامل هيدروجيولوجية جيولوجية مهمة في حركة المياه الجوفية، وتعد مناطق كثافة الصدوع مكامن جيدة للمياه الجوفية (Magesh, et al, 2012,193). وبذلك يبين شكل (4) ارتفاع كثافة الصدوع لتصل الى 1.2 كم²/كم وسط وغرب وادي الحوض، مما يعني احتمالية وجود مكامن للمياه الجوفية بهذه المناطق، وتقل كثافة الصدوع لتصل الى الصفر شمال شرق وجنوب وجنوب غرب الحوض.

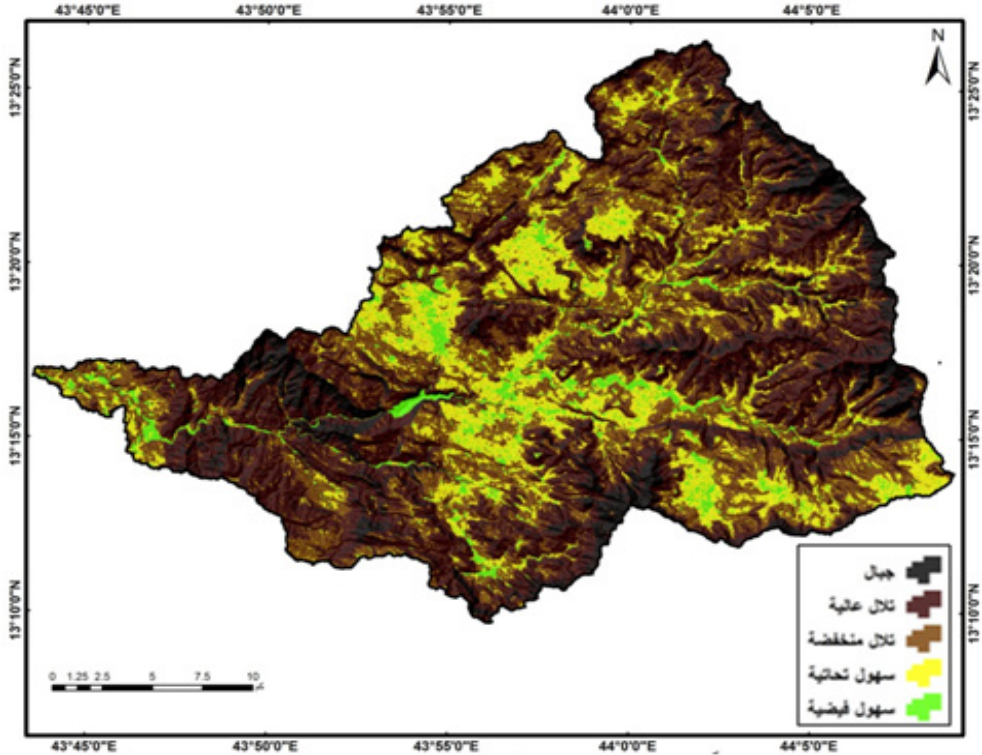


شكل رقم (4) كثافة الصدوع في حوض وادي السويداء

المصدر: الباحث بالاعتماد على الخريطة الجيولوجية لمحافظة تعز، لوحة رقم (13)، الهيئة العامة للمساحة الجيولوجية.

ج) جيومورفولوجية الحوض:

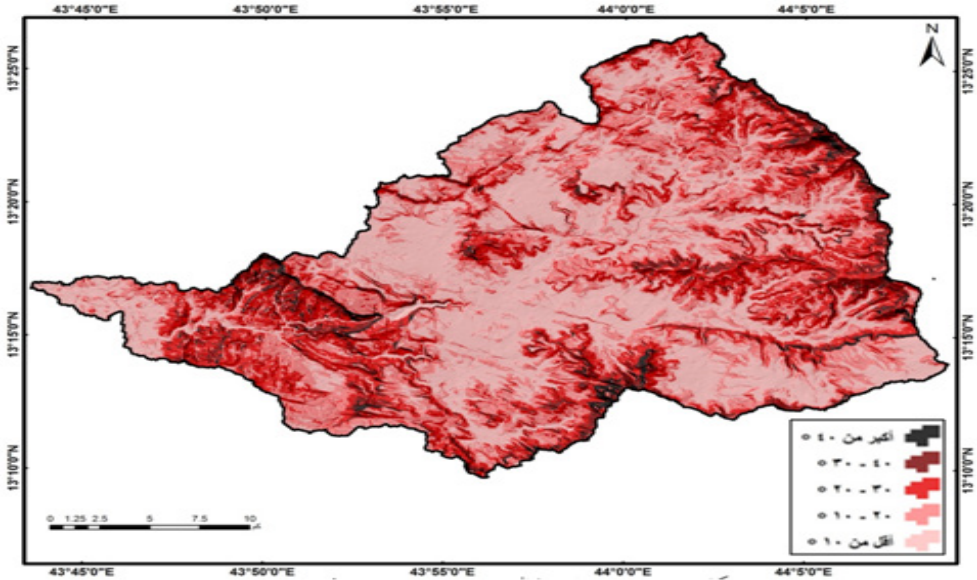
تؤثر الخصائص الجيومورفولوجية في تحديد مكان المياه الجوفية، لذا فإن الربط بين الخصائص الجيومورفولوجية والهيدرولوجية يوفر طريقة بسيطة لفهم سلوكها الهيدرولوجي. وتميل المياه الجوفية إلى التخزين في تضاريس منخفضة، ويؤدي الارتفاع إلى تقليل احتمالية تواجد المياه الجوفية والعكس. (Mahalingam & Vinay, 2014, 396). وتفيد دراسة تضاريس سطح الأرض في فهم مناطق مسامية ونفاذية منطقة الدراسة، حيث تتصف مناطق الأودية ومناطق السهول التحتانية بإمكانيات جيدة إلى معتدلة للمياه الجوفية، وتشير مناطق المرتفعة والتلال إلى إمكانيات منخفضة إلى منخفضة جداً للمياه الجوفية (Patil, et al, 2013, 1181). وبذلك ترتب الأشكال الجيومورفولوجية في حوض وادي السويداء حسب مساحتها شكل (5)، حيث جاءت التلال المرتفعة في المرتبة الأولى بمساحة 221.3 كم²، بنسبة 32.2 % من إجمالي مساحة الحوض. وتليها التلال المنخفضة بمساحة 189.1 كم²، بنسبة 27.5 % من إجمالي مساحة الحوض، وأعقبها السهول التحتانية بمساحة بلغت 120.7 كم²، بنسبة 17.5 % من إجمالي مساحة الحوض. ومن ثم جاءت الجبال التي تقع أعلى وجنوب ووسط أدنى الحوض بمساحة بلغت 90.6 كم²، بنسبة 13.1 % من إجمالي مساحة الحوض. وأخيراً جاءت السهول الفيضية التي تبرز أدنى ووسط وشمال وجنوب الحوض بمساحة بلغت 66.4 كم²، بنسبة 9.7 % من إجمالي مساحة الحوض.



شكل رقم (5) الأشكال الجيومورفولوجية في حوض وادي السويداء
المصدر: الباحث بالاعتماد على نموذج ارتفاع رقمي (DEM)، للقمر الصناعي الياباني (ALOS PALSAR).

(د) انحدار التضاريس:

يعتبر الانحدار من أهم المعايير المحددة لتوزيع مكامن المياه الجوفية وإعادة تغذيتها، حيث يؤثر الانحدار في تدفق المياه السطحية والجوفية تحت سطح الأرض وإعادة تغذيتها، وتحافظ المناطق قليلة الانحدار بمياه الأمطار فترة أطول مما يسمح بتسربها إلى باطن الأرض، ويتسبب الانحدار الشديد في سرعة الجريان، وتقلص زمن تركيز مياه الأمطار على سطح الأرض، مما يقلل من قدرتها على إعادة تغذية المياه الجوفية. ويتيح عن الانحدار الخفيف تسرب مياه الأمطار بكميات كبيرة إلى طبقة المياه الجوفية، ويحتاج الانحدار الشديد إلى وقت أطول لتسريب مياه الأمطار إلى خزانات المياه الجوفية (Patil, et al, 2013, 1181). وبذلك تعد المناطق المستوية والقليلة الانحدار من المواضيع المهمة كمكامن للمياه الجوفية في الحوض والعكس، وبالتالي فقد بلغت مساحة المنطقة التي تتصف بقدراتها العالية على تغذية الخزانات الجوفية وتكوينها في الحوض بسبب بطئ حركة الجريان السطحي عقب هطول الأمطار وتسرب جزء كبير منها عبر التربة حيث تقل فيها درجات الانحدار عن 10° نحو 241.2 كم^2 ، بنسبة 35 % من إجمالي مساحة الحوض، وتقع هذه المنطقة وسط وادي وشمال وجنوب شرق الحوض. وبلغت مساحة المنطقة التي تتسم بتغذية جيدة للمياه الجوفية حيث تتراوح فيها درجات الانحدار بين $10^\circ - 20^\circ$ نحو 209.7 كم^2 ، بنسبة 30.5 %، وتقع بمحاذاة المناطق السابقة. في حين بلغت مساحة المنطقة التي تتصف باعتدال انحدارها وتغذيتها للمياه الجوفية حيث تتراوح درجات الانحدار بين $20^\circ - 30^\circ$ نحو 146.6 كم^2 ، بنسبة 21.3 %. وبلغت مساحة المنطقة التي تتصف بشدة انحدار تضاريسها حيث تتراوح درجات الانحدار بين $30^\circ - 40^\circ$ نحو 69.2 كم^2 ، بنسبة 10 %. وبلغت مساحة المنطقة التي تعاني من وجود منحدرات شديدة جدا لا تساعد على تغذية المياه الجوفية وتكوينها حيث تتجاوز درجات الانحدار 40° حوالى 21.4 كم^2 ، بنسبة 3.1 % من إجمالي مساحة الحوض.

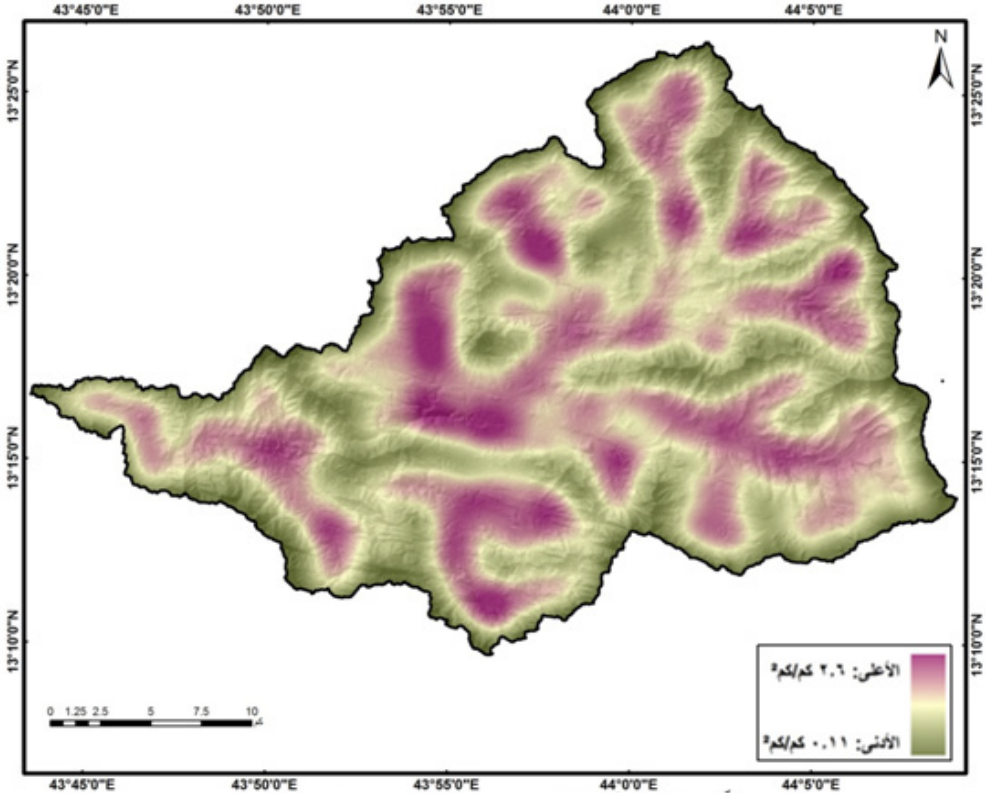


شكل رقم (6) درجات الانحدار في حوض وادي السوياء

المصدر: الباحث بالاعتماد على نموذج ارتفاع رقمي (DEM)، للقمر الصناعي الياباني (ALOS PALSAR).

هـ) كثافة شبكة التصريف:

تعتبر كثافة شبكة الجريان السطحي من المعايير الهامة في تحديد الأماكن المحتملة للمياه الجوفية في أي منطقة. وتوفر كثافة شبكة التصريف معلومات تتعلق بالتضاريس والجريان والتسرب والنفذية، فالتصريف الشجري يشير إلى تجانس الصخور، بينما تشير انماط التصريف المستطيلة والمتوازية إلى الضوابط الليثولوجية والهيكلية، ويشير نسيج التصريف الخشن إلى تشكيلات صخرية عالية المسامية وقابلية عالية للتسرب، في حين أن النسيج الناعم يشير إلى انخفاض المسامية والتسرب (Basavaraj, 2014, p.12166). وبذلك تتركز المياه الجوفية حيث تكون كثافة التصريف عالية، في حين تنخفض امكانيات تواجد المياه الجوفية، حيث تنخفض كثافة التصريف. (Mahalingam & Vinay, 2014, 395). وتشير الكثافة المرتفعة للتصريف إلى اقتراب القنوات من السطح، وارتفاع كثافة التصريف تعني أن القدرة على تسرب المياه تكون أعلى، وبالتالي سيكون توقع وجود المياه الجوفية أكبر (Magesh, et al, 2016, 56). وبذلك تؤكد نتائج شكل (7) تراوح كثافة شبكة التصريف في حوض وادي السويداء بين 2.6 كم²/كم² وسط الحوض، مما يعني احتمالية وجود أماكن للمياه الجوفية بهذه المناطق، إلى 0.12 كم²/كم² في المناطق التي تقل فيها كثافة شبكة التصريف إلى أدنى مستوياتها.

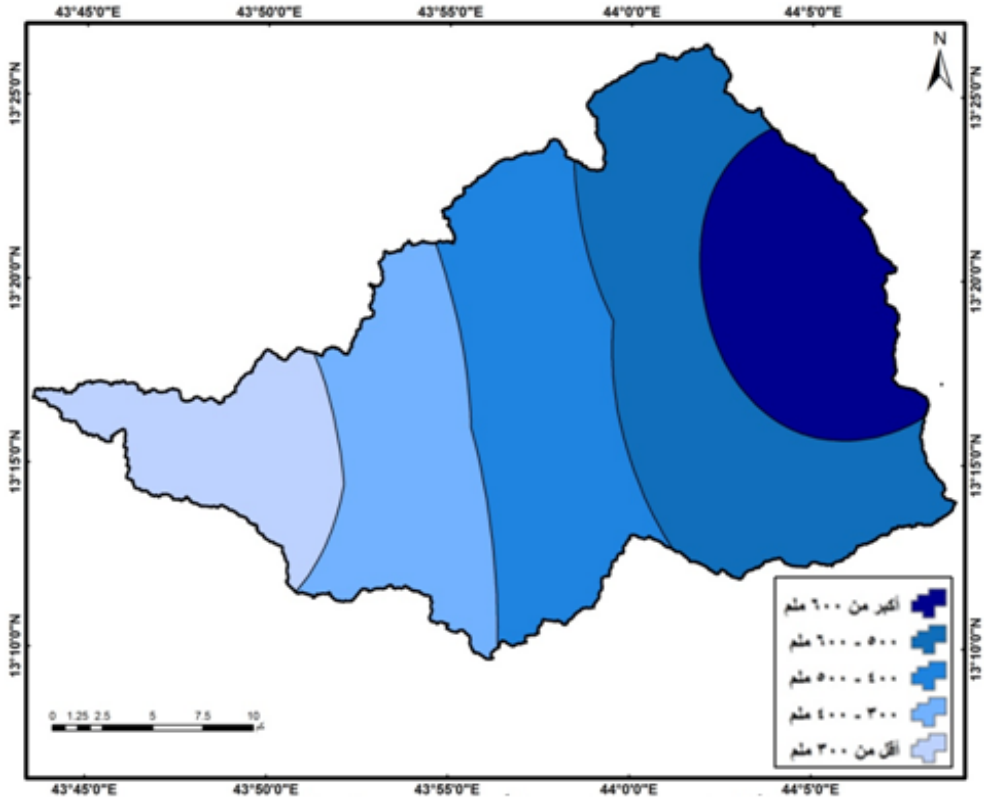


شكل رقم (7) كثافة شبكة التصريف في حوض وادي السويداء

المصدر: الباحث بالاعتماد على نموذج ارتفاع رقمي (DEM)، للقمري الصناعي الياباني (ALOS PALSAR).

١) الأمطار:

تعتبر الأمطار من المصادر الرئيسية لتكوين وتغذية خزانات المياه الجوفية، وذلك من خلال دورة المياه في الطبيعة، وبالتالي فإن كمية هطول الأمطار ليست متساوية في مختلف المناطق، وتختلف مكانياً تبعاً لاختلاف الظروف البيئية. وبالتالي تكون امكانية المياه الجوفية عالية اذا كانت كمية الأمطار مرتفعة، وتنخفض اذا كان هطول الأمطار منخفضاً (Mahalingam & Vinay, 2014, 397). وبذلك يوضح شكل (8) تدرج المعدل السنوي للأمطار في الحوض بالانخفاض من 700 ملم في المناطق التي تقع أعلى الحوض إلى 300 ملم عند مخرج الحوض، وعليه تظهر نتائج تصنيف طبقة الأمطار أن مساحة المنطقة التي تقل فيها كمية الأمطار عن 300 ملم بلغت 84.2 كم²، بنسبة 12.2 %. في حين تبلغ مساحة المنطقة التي تتراوح كمية أمطارها بين 300 - 400 ملم حوالي 120.2 كم²، بنسبة 17.5 %. ومساحة المنطقة التي تتراوح فيها كمية الأمطار بين 400 - 500 ملم نحو 162.2 كم²، بنسبة 23.6 %. كما بلغت مساحة المنطقة حيث تتراوح كمية الأمطار بين 500 - 600 ملم نحو 205.4 كم²، بنسبة 29.9 %. أما المنطقة التي تتجاوز معدل أمطارها 600 ملم فقد بلغت مساحتها 116 كم²، بنسبة 16.8 % من إجمالي مساحة الحوض.

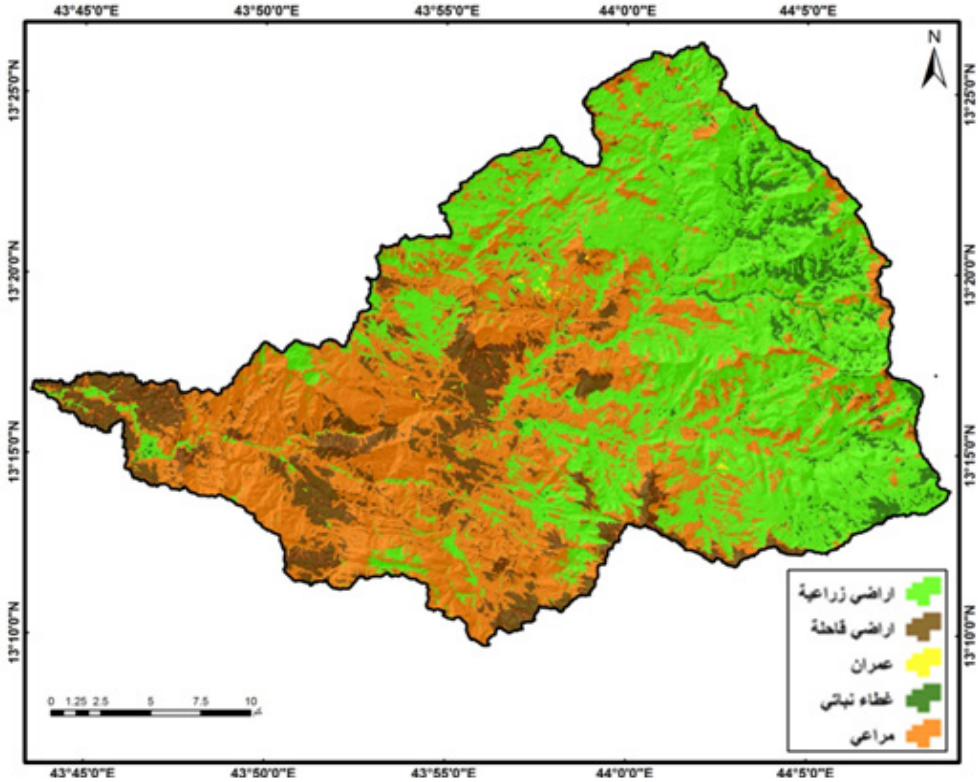


شكل رقم (8) المعدل السنوي للأمطار في حوض وادي السويداء

المصدر: الباحث بالاعتماد على طبقة (Shapfile) لتوزيع الامطار، الهيئة العامة للطيران المدني والارصاد.

ل) الغطاء الأرضي:

تلعب اغطية واستخدام الارض دوراً هاماً في تنمية موارد المياه الجوفية، وتؤثر على العديد من العمليات الهيدرولوجية في دورة المياه، بمعنى تؤثر في عمليات التسرب والتبخر والتج والجريان السطحي. فمناطق الغابات والزراعة تعد مناطق مهمة في تسريب مياه الامطار وتغذية المياه الجوفية، والعكس في المناطق الحضرية حيث يقل تسريب مياه الامطار ويزداد الجريان (Basavaraj, 2014, p.12170). وبالتالي تتحكم اغطية واستعمالات الارض في العديد من العمليات الهيدرولوجية كالتبخر والجريان السطحي وإعادة تغذية المياه الجوفية (Chaudhary & Kumar, 2018, p. 719). ويوضح شكل (9) اتساع مساحة الاراضي الزراعية التي تعزز من تغذية المياه الجوفية في الحوض اعلى الحوض حيث بلغت 276.6 كم²، بنسبة 40.2 % من إجمالي مساحة الحوض. وبلغت مساحة المراعي التي تقع وسط وادنى الحوض نحو 267.3 كم²، بنسبة 38.9 % من إجمالي مساحة الحوض. في حين بلغت مساحة الأراضي القاحلة 98.5 كم²، بنسبة 14.4 % من إجمالي مساحة الحوض. وبلغت مساحة الغطاء النباتي الذي ينتشر في المناطق غزيرة الأمطار أعلى الحوض نحو 44 كم²، بنسبة 6.4 % من إجمالي مساحة الحوض. وأخيراً بلغت مساحة العمران نحو 2.3 كم²، بنسبة 0.3 % من إجمالي مساحة الحوض.



شكل رقم (9) أغطية واستعمالات الارض في حوض وادي السودان
المصدر: الباحث بالاعتماد على مرئية لاندسات بتاريخ (31 / 5 / 2021).

ثانياً) المناطق المحتملة للمياه الجوفية في الحوض:

تم انتاج خريطة المناطق المحتملة للمياه الجوفية في حوض وادي السويداء من خلال جبر جميع طبقات المعايير حسب اوزانها المبينة في جدول (1) باستخدام الحاسبة الخلوية ببرنامج (Arc GIS)، وبالتالي صنف الطبقة الناتجة إلى فئات، واعتمدت الدراسة في اوزان وطريقة اعادة تصنيف طبقات المعايير على عدد من الدراسات السابقة مثل (Magesh et al 2016, Waiker & Nilawa, 2014, Barik et al, 2017, Ghodratabadi, 2015, Senanayaka, et al, 2016). وأعطيت الاوزان الكبيرة للمناطق ذات الامكانية العالية للمياه الجوفية، والأوزان الصغيرة للمناطق ذات الامكانيات الضعيفة جداً، وتم اعادة ترتيب بعض المتغيرات مثل الانحدار، حيث اعطيت درجات الانحدار الصغيرة أعلى الأوزان لأن قلة درجات الانحدار تعني تسريب مياه الأمطار وتغذية المياه الجوفية، وبالتالي يكون هناك احتمال أكبر للمياه الجوفية بهذه المناطق.

جدول رقم (1) الاهمية النسبية لمعايير النموذج

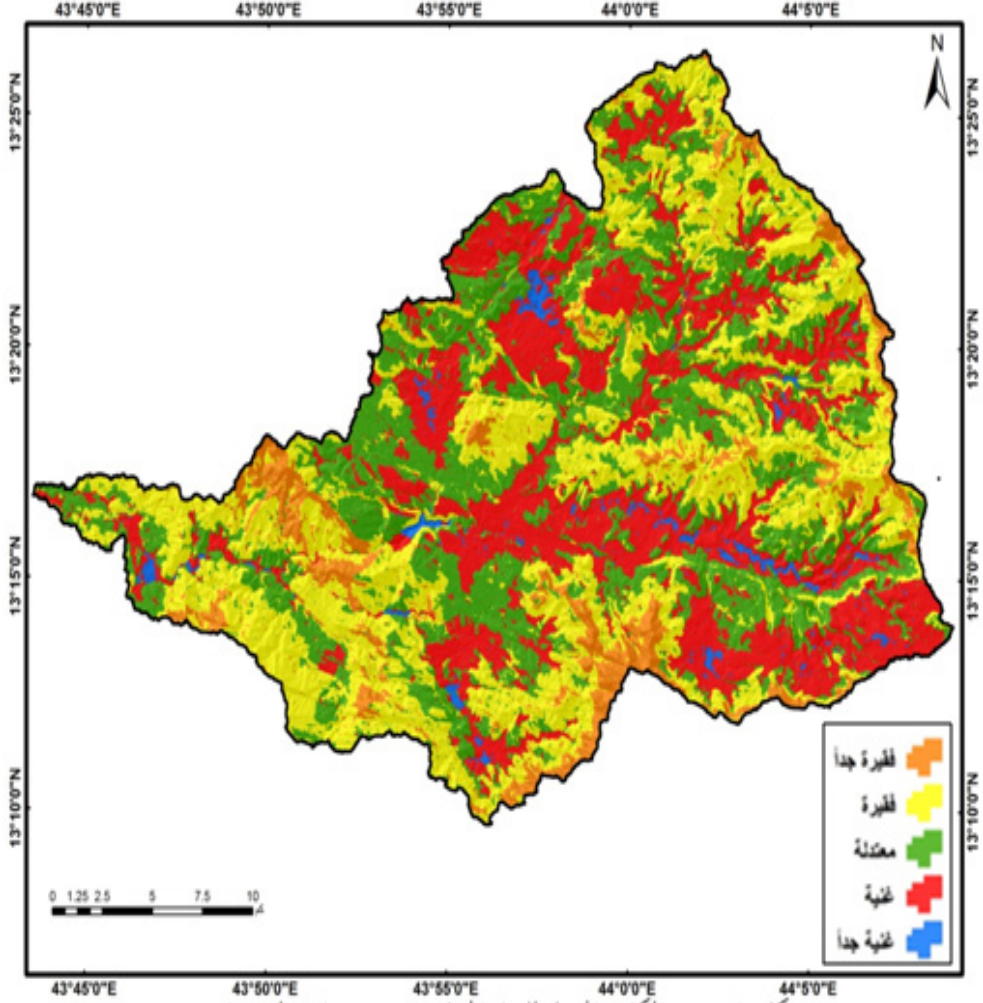
المعيار	الفئة	احتمالية المياه الجوفية	وزن الفئة	الاهمية النسبية للمعايير %
الجيومورفولوجيا	جبال	فقيرة جداً	1	25
	تلال عالية	فقيرة	2	
	تلال منخفضة	معتدلة	3	
	سهول تحاتية	غنية	4	
	سهول فيضية	غنية جداً	5	
الانحدار	أقل من 10	غنية جداً	5	15
	1020 -	غنية	4	
	2030 -	معتدلة	3	
	3040 -	فقيرة	2	
	أكبر من 40	فقيرة جداً	1	
التركيب الجيولوجي	رواسب	غنية جداً	5	15
	صخور رملية ذات افاق جيرية	غنية	4	
	براجنيس	معتدلة	3	
	ريوليت وداسيت	فقيرة	2	
	بازلت	فقيرة جداً	1	

المعيار	الفئة	احتمالية المياه الجوفية	وزن الفئة	الاهمية النسبية للمعايير %
كثافة الصدوع كم ²	أقل من 0.2	فقيرة جداً	1	10
	0.20.4 -	فقيرة	2	
	0.40.6 -	معتدلة	3	
	0.60.8 -	غنية	4	
	أكثر من 0.8	غنية جداً	5	
كثافة التصريف كم ²	أقل من 0.8	فقيرة جداً	1	10
	0.81.2 -	فقيرة	2	
	1.21.6 -	معتدلة	3	
	1.62 -	غنية	4	
	أكثر من 2	غنية جداً	5	
الأمطار	أكثر من 600 ملم	غنية جداً	5	15
	500 - 600 ملم	غنية	4	
	400 - 500 ملم	معتدلة	3	
	300 - 400 ملم	فقيرة	2	
	أقل من 300 ملم	فقيرة جداً	1	
أغطية واستعمالات الأرض	غطاء نباتي	غنية جداً	5	10
	ارض زراعية	غنية	4	
	مراعي	معتدلة	3	
	ارض جرداء (صخرية)	فقيرة	2	
	عمران	فقيرة جداً	1	

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الاشكال من 3 - 9.

وبذلك يظهر شكل (10) تباين مساحة المناطق المحتملة للمياه الجوفية في حوض وادي السويديا، حيث بلغت مساحة المنطقة التي تتصف بفقر شديد للمياه الجوفية، وذلك بسبب وقوعها في مناطق تتصف بملاءمة ضعيفة جداً لمعايير النموذج 65 كم²، بنسبة 9.4 % من إجمالي مساحة الحوض، وتقع هذه المنطقة في أطراف الحوض. وتقع المناطق التي تتصف بافتقارها للمياه الجوفية حيث تنتشر التلال العالية بمساحة بلغت 200.6 كم²، بنسبة 29.2 % من إجمالي مساحة الحوض. وتظهر المنطقة التي تتصف بمكامن معتدلة من المياه الجوفية بمحاذاة المناطق الفقيرة بالمياه الجوفية، وبلغت مساحة هذه المنطقة 218 كم²، بنسبة 31.7 % من إجمالي مساحة الحوض. وتقع المنطقة التي تتصف بكونها غنية بالمياه الجوفية في الأراضي شبة المستوية بمناطق السهول التحاتية جنوب شرق ووسط وشمال شرق الحوض، بمساحة بلغت 176 كم²، بنسبة

25.6 % من إجمالي مساحة الحوض. وبلغت مساحة المنطقة التي تتصف بكونها غنية جداً بالمياه الجوفية 28 كم²، بنسبة 4 % من إجمالي مساحة الحوض، وتقع هذه المنطقة حيث التضاريس شبة المستوية وفي بطون الأودية وسط وادي الحوض.



شكل رقم (10) الأماكن المحتملة للمياه الجوفية في حوض وادي السويداء
المصدر: الباحث بالاعتماد على الأشكال من 3 - 9.

الهوامش:

- (1) الهيئة العامة للإحصاء الجوية، صنعاء، طبقة (Shapfile) للمعدل السنوي للأمطار بين عامي 2000 - 2020.
- (2) الهيئة العامة للمساحة، صنعاء، خريطة طبوغرافية، مقياس 1:50000، 1985.
- (3) وزارة النفط والمعادن، الهيئة العامة للمساحة الجيولوجية، صنعاء، الخريطة الجيولوجية لمحافظة تعز، لوحة ١٣، مقياس 1:25000، ١٩٩٤.
- (4) Agrawal, R., Argal, R., Pokharna, S. (2009). An assessment of ground-water quality of Chaksu town in Rajasthan India. Current World Environment, Vol, 4, No, (1), pp.161-164.
- (5) Alaskan Satellite Facility, digital elevation model, (ALOS PALSAR), spatial resolution 12.5 m, the site was accessed on 12/5/2021, website link (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>).
- (6) Ali, Y., Priju, C.P., Prasad, N.B. (2015). Delineation of Groundwater Potential Zones in Deep Midland Aquifers along Bharathapuzha River Basin, Kerala using Geophysical Methods. international conference on water resource, coastal and ocean engineering, Vol, 4, pp. 1139-1146.
- (7) Alrawi, I., Chen, J., Othman, A. A. (2022). Groundwater Potential Zone Mapping: Integration of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and GIS Techniques for the Al-Qalamoun Region in Syria. Geo-Inf, Vol, 11, pp. 1-31.
- (8) Al Saud, M. (2010). Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. Hydrogeology Journal, Vol 18, NO, 6, pp. 1481-1495.
- (9) Barik, K.K., Dalai, P. C., Goudo, S.P., Panda, S. R., Nandi, d. (2017). delineation of groundwater potential zone in balikuda block of kandhamal district using geospatial technology approach. international journal of advanced remote sensing and gis, Vol, 6, No, 3, pp. 2068-2079.
- (10) Basavaraj, D. B., Hiremath, C. G., Davithuraj, J., Purandara, B. K. (2016). identification of groundwater potentail zones using arcgis, International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, pp.31- 35

- (11) Basavaraj, W., Nilawar, A.P. (2014). Identification of Groundwater Potential Zone using Remote Sensing and GIS Technique. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol, 3, No, 5, pp. 12163- 12174.
- (12) Bathis, K.I., Ahmed, S. A. (2016). Geospatial technology for delineating groundwater potential zones in Doddahalla watershed of Chitradurga district, India. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol, 19, pp. 223-234.
- (13) Bera, S., Ahmed, M. (2016). Delineation of ground water potential zones in Dhanbad district, Jharkhand, using Remote Sensing and GIS Techniques. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol, 3, No, 7, pp. 1607-1615.
- (14) Chaudhary, B. S., and Kumar, S. (2018). Identification of groundwater potential zones using remote sensing and GIS of K-J watershed, India. J. Geol. Soc. India, Vol, 91, pp. 717-721.
- (15) Ghodratabadi, S., Feizi, F. (2015). Identification of Groundwater Potential Zones in Moalleman, Iran by Remote Sensing and Index Overlay Technique in GIS. Iranian Journal of Earth Sciences, Vol, 7, pp,142- 152.
- (16) Gupta, M., Srivastava, .P. K. (2010). Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India. Water International, Vol, 35, No, 2, pp. 233-245.
- (17) Hutti, B., Nijagunappa, R. (2011). identification of groundwater potential zone using geoinformatics in Ghataprabha basin, North Karnataka, India. international journal of geomatics and geosciences, Vol, 2, No 1, pp.91-109.
- (18) Jaiswal, R. K., Mukherjee, S., Krishnamurthy, .J., Saxena, R. (2003). Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones. International Journal of Remote Sensing, Vol, 24, No, 5, pp. 993-1008.
- (19) Kumar, Y. Y., Moorthy, S., Srinivas, G. S. (2017). identification of groundwater potential zones using reooth sensing and geographical informa-

tion system. International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol, 8, No, 3, pp. 1-10.

(20) Kumar, P. K.D., Gopinath, G., Seralathan, P. (2007). Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. International Journal of Remote Sensing, Vol, 28, No, 24, pp. 5583-5601.

(21) Li, S., Abdelkareem, M., Al-Arifi, N. (2023). Mapping Groundwater Prospective Areas Using Remote Sensing and GIS-Based Data Driven Frequency Ratio Techniques and Detecting Land Cover Changes in the Yellow River Basin, China. Land, Vol, 12(4), pp. 1-21.

(22) Magesh, N. S., Chandrasekar, N., Subbiah, K. K. (2016). A Fuzzy-GIS Model for the exploration of groundwater potential zones in Tamiraparani sub-basin, Tamil Nadu, India, Front Cur Trends Engg Tech, Vol, 1 (2), pp. 52 - 58.

(23) Magesh, N. S., Chandrasekar, N., Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. Geoscience Frontiers, Vol, 3, No, 2, pp. 189-196.

(24) Mahalingam, R., Vinay, B. (2014). Identification of ground water potential zones using GIS and Remote Sensing Techniques: A case study of Mysore taluk -Karnataka. international journal of geometrics and geosciences, Vol, 5, pp. 393-403.

(25) Mohebbi, H. R., Javadi, A. A., Azizkandi, A. S. (2022). The Effects of Soil Porosity and Mix Design of Volcanic Ash-Based Geopolymer on the Surface Strength of Highly Wind Erodible Soils. Minerals, Vol, 12(8), pp. 1- 15.

(26) Murasingh, S., Jua, R. (2014). Identification of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing and GIS in A Mine Area of Odisha, Conference: National conference on "recent approaches to water resource management". At Indian School of Mines, Dhanbad, DOI: 10.13140/RG.2.1.4247.7283, 1-10.

- (27) Nagarajan, M., Singh, S. (2009). Assessment of groundwater potential zones using GIS technique. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol, 37, No, 1, pp 69–77.
- (28) Negron, L., Pingitore, N., Gorski, D. (2016). Porosity and Permeability of Round Top Mountain Rhyolite (Texas, USA) Favor Coarse Crush Size for Rare Earth Element Heap Leach. Minerals, Vol, 6(1), pp. 1-13.
- (29) Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., Voudouris, K. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece, Journal of Hydrology, Vol, 525, pp. 197-208.
- (30) Rana, V. K., Suryanarayana, T. M. V. (2020). GIS-based multi criteria decision making method to identify potential runoff storage zones within watershed. ANNALS OF GIS, Vol. 26, NO. 2, pp. 149–168.
- (31) Pandian, M., Kumanan, C. J. (2013). Geomatics approach to demarcate groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques in part of Trichy and Karur district, Tamilnadu, India, Scholars Research Library. Archives of Applied Science Research, Vol, 5 (2), pp. 234-240.
- (32) Patil, S. G., Mohite, N. M., Khare, M. (2013). Identification of groundwater potential zones using Geoinformatics in upper Bhima basin, Pune, Maharashtra, India. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol, 4, NO, 5, pp. 1178-1183.
- (33) Ruzouq, R., Shanableh, A., Merabtene, T. (2015). Geomatics for mapping of groundwater potential zones in northern part of the United Arab Emirates - Sharjah City, Vol, XL-7/W3, International Symposium on Remote Sensing of Environment, Berlin, Germany, pp. 581-586.
- (34) Senanayaka, I. P., Dissanayake, D. M. D., Mayadunna, B. B. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. Geoscience Frontiers, Vol, 7, No, 1, pp. 115-124.
- (35) Sener, E., Davaraz, A., Ozcelik, M. (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. Hydrogeology Journal, Vol, 13, No 5–6, pp. 826–834.

- (36) Sharma, M. P., Kujur, A., Sharma, U. (2012). Identification of ground-water prospecting zones using Remote Sensing and GIS techniques in and around Gola block, Ramgargh district, Jharkhand India. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol, 3, No, 3, pp. 1-6.
- (37) Smith, T. M., Sayers. C. N., Sondergeld, C. H. (2009). Rock properties in low-porosity/ low-permeability sandstones. the leading edge, Vol, 28, pp. 48-59.
- (38) USGS, satellite image (Landsat 8), the site was accessed on 31/5/2021, website link (<https://earthexplorer.usgs.gov>).