

أثر التغير المناخي على الموارد المائية الجوفية والسطحية بمنطقة عسير

سعيد بن عبدالرحمن آل حازب

باحث دكتوراة، الدراسات البيئية (جغرافيا)، كلية اللغات والعلوم الإنسانية، جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية
qareep12@hotmail.com, 471113978@qu.edu.sa

أحمد محمد البسام

أستاذ دكتور، الجغرافيا، كلية اللغات والعلوم الإنسانية، جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية
absam@qu.edu.sa

ملخص البحث

يهدف هذا البحث إلى تحليل أثر التغير المناخي على الموارد المائية الجوفية والسطحية في منطقة عسير، وهي من أكثر مناطق المملكة حساسية للتقلبات المناخية نظراً لاعتمادها الكبير على الأمطار الموسمية وتنوعها الطبوغرافي. تشير الدراسة إلى أن العالم يشهد «تغيرات مناخية متسارعة تُعد من أبرز التحديات البيئية» وأن هذه التغيرات أدت إلى اضطراب ميزان المياه العالمي، وهو ما ينعكس بوضوح في البيئات الجبلية شبه الجافة مثل عسير. وقد بينت البيانات المناخية أن المنطقة تعاني من تذبذب كبير في الهطول وارتفاع مستمر في درجات الحرارة، مما أدى إلى زيادة معدلات التبخر وتراجع التغذية الجوفية، حيث تؤكد الأدبيات أن «التغيرات المناخية أدت إلى انخفاض معدلات التغذية الطبيعية للخزانات الجوفية».

وتوضح الدراسة من خلال تحليل بيانات CHIRPS و ERA5 وخرائط NDVI و SPI أن عامي 1999 و 2024 شهدا تبايناً واضحاً في الحرارة والتبخر، إذ ارتفعت درجات الحرارة في 2024 إلى أكثر من 30°م في الصيف، بينما سجل مؤشر الجفاف SPI قيماً سالبة واسعة الانتشار، خصوصاً في المناطق الداخلية، مما أدى إلى انخفاض الجريان السطحي وتراجع المخزون المائي في السدود والآبار. كما أظهرت خرائط الغطاء النباتي انخفاضاً ملحوظاً في الكتلة الحيوية في المناطق التي سجلت جفافاً شديداً، مما يعكس تأثير الإجهاد المائي على النظم البيئية.

وتبرز الدراسة الدور المحوري للتضاريس في تشكيل نمط الهطول والجريان، حيث تستقبل المرتفعات الغربية النصيب الأكبر من الأمطار، بينما تعاني المناطق الشرقية من الجفاف المزمن. كما تؤكد أهمية السدود في تنظيم الجريان وتعزيز التغذية الجوفية، مثل سد الملك فهد الذي «ساهم في تحسين التغذية الجوفية» وفق الدراسات المحلية. وتناقش الدراسة كذلك أثر الجفاف على الآبار السطحية والزراعة، موضحة أن تذبذب الأمطار يؤدي إلى «جفاف بعض الآبار بالكامل» وتراجع الإنتاج الزراعي.

وتقترح الدراسة مجموعة من استراتيجيات التكيف، تشمل تحسين كفاءة الري، وتطوير حصاد مياه الأمطار عبر الحواجز الترابية والمساقط المائية، وتعزيز الغطاء النباتي كعامل اعتراض مائي يحد من سرعة الجريان ويزيد من التسرب الأرضي. وتؤكد أن هذه الإجراءات تتسق مع توجهات رؤية المملكة 2030 في تعزيز الأمن المائي والإدارة المستدامة للموارد الطبيعية.

الكلمات المفتاحية: التغير المناخي، الموارد المائية الجوفية، الموارد المائية السطحية، منطقة عسير، الجفاف الهيدرولوجي، الهطول المطري والتبخر، نظم المعلومات الجغرافية GIS.

The impact of climate change on groundwater and surface water resources in the Asir region

Saeed bin Abdulrahman Al-Hazeb

PhD Researcher, Environmental Studies (Geography), College of Languages and Humanities, Qassim University, Saudi Arabia
qareep12@hotmail.com, 471113978@qu.edu.sa

Ahmed Mohammed Al-Bassam

Professor of Geography, College of Languages and Humanities, Qassim University, Saudi Arabia
absam@qu.edu.sa

Abstract

This study aims to analyze the impact of climate change on groundwater and surface water resources in the Asir region, one of the most climatically sensitive areas in Saudi Arabia due to its strong dependence on seasonal rainfall and its diverse topography. The study highlights that the world is experiencing “rapid climatic changes that represent one of the most significant environmental challenges,” which have disrupted the global water balance—an effect clearly reflected in semi-arid mountainous environments such as Asir. Climatic data indicate that the region has undergone substantial rainfall variability and a continuous rise in temperature, leading to increased evaporation rates and reduced groundwater recharge. The literature confirms that “climatic changes have led to a decline in natural recharge rates of aquifers”.

Through the analysis of CHIRPS and ERA5 datasets, along with NDVI and SPI maps, the study shows that the years 1999 and 2024 exhibited marked differences in temperature and evaporation. Temperatures in 2024 exceeded 30°C during summer, while the SPI drought index recorded widespread negative values, particularly in inland areas, resulting in reduced surface runoff and declining water storage in dams and wells. Vegetation maps also revealed a noticeable decrease in biomass in areas experiencing severe drought, reflecting the impact of water stress on local ecosystems.

The study underscores the critical role of topography in shaping rainfall distribution and runoff patterns, with the western highlands receiving the largest share of precipitation, while the eastern areas suffer from chronic aridity. It also highlights the importance of dams in regulating runoff and enhancing groundwater recharge, such as King Fahd Dam, which “contributed to improving groundwater recharge” according to local studies. Additionally, the study discusses the effects of drought on shallow wells and agriculture, noting that rainfall variability can lead to “the complete drying of some wells” and a decline in agricultural productivity.

The study proposes several adaptation strategies, including improving irrigation efficiency, expanding rainwater-harvesting systems through earthen barriers and micro-catchments, and enhancing vegetation cover as a natural interception mechanism that reduces runoff velocity and increases infiltration. These measures align with Saudi Vision 2030 objectives to strengthen water security and promote sustainable natural-resource management.

Keywords: Climate Change, Groundwater Resources, Surface Water Resources, Asir Region, Hydrological Drought (SPI), Rainfall and Evaporation, Geographic Information Systems (GIS).

المقدمة

يشهد العالم في العقود الأخيرة تغيرات مناخية متسارعة تُعد من أبرز التحديات البيئية التي تواجه الدول والمجتمعات، إذ أثرت هذه التغيرات بشكل مباشر في النظم البيئية والموارد الطبيعية، وفي مقدمتها الموارد المائية التي تُعد أساس الحياة والتنمية. فقد أدت الزيادة في درجات الحرارة، وتذبذب معدلات الهطول المطري، وتكرار موجات الجفاف والفيضانات إلى اضطراب ميزان المياه العالمي، مما جعل العديد من المناطق تعاني من نقص في المياه أو تدهور في جودتها (UNESCO, 2020).

وعلى المستوى الإقليمي، تُعد المناطق الجافة وشبه الجافة في الشرق الأوسط من أكثر المناطق تأثرًا بالتغير المناخي، نظرًا لاعتمادها الكبير على الأمطار الموسمية ومحدودية مواردها المائية المتجددة. وقد بينت الدراسات الإقليمية أن التغيرات المناخية أدت إلى انخفاض معدلات التغذية الطبيعية للخزانات الجوفية، وتراجع تدفقات الأودية، وارتفاع معدلات التبخر، مما يزيد الضغوط على الموارد المائية السطحية والجوفية في آن واحد (Evans, 2009).

أما في المملكة العربية السعودية، التي تعتمد بشكل كبير على المياه الجوفية لتلبية احتياجاتها، فقد أصبحت آثار التغير المناخي أكثر وضوحًا، خاصة في المناطق الجبلية التي تعتمد على الأمطار كمصدر رئيسي لتجدد مواردها المائية وفق رؤية 2030. وتبرز منطقة عسير كأحد أهم المناطق التي تتأثر بهذه التغيرات، نظرًا لطبيعتها الجغرافية والمناخية التي تجمع بين المرتفعات الجبلية والأودية، مما يجعل مواردها المائية شديدة الحساسية لأي تغير في أنماط الهطول أو درجات الحرارة (Chowdhury & Al-Zahrani, 2015).

وفي هذا السياق، تواجه منطقة عسير تحديات متزايدة تتمثل في تراجع كميات الأمطار، وتغير توقيت الهطول، وارتفاع درجات الحرارة، وزيادة معدلات التبخر، مما يؤثر بشكل مباشر في تغذية الخزانات الجوفية وتدفقات المياه السطحية. كما أن النمو السكاني والتوسع العمراني والزراعي يزيد من الضغط على هذه الموارد، ويجعل الحاجة ملحة لفهم تأثير التغير المناخي على المياه في المنطقة بشكل علمي ودقيق.

ومن هذا المنطلق تبرز أهمية هذا البحث الذي يسعى إلى تحليل تأثير التغير المناخي على الموارد المائية الجوفية والسطحية في منطقة عسير، من خلال دراسة التغيرات المناخية الحديثة وتقييم انعكاساتها على كميات المياه وجودتها ومعدلات تجدها. ويأتي ذلك انسجامًا مع توجهات رؤية المملكة 2030 التي تؤكد على تعزيز الأمن المائي، ورفع كفاءة إدارة الموارد الطبيعية، وتطوير استراتيجيات مستدامة تضمن حماية الموارد المائية في المناطق الحساسة مناخيًا مثل منطقة عسير، بما يدعم جهود التخطيط والإدارة المتكاملة للمياه في المستقبل.

مشكلة البحث

تعاني منطقة عسير في السنوات الأخيرة من تغيرات مناخية متسارعة تمثلت في تذبذب معدلات الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة، وتزايد موجات الجفاف، وهي عوامل أثرت بشكل مباشر في توافر الموارد المائية، سواء الجوفية أو السطحية، مما يهدد استدامة المياه في المنطقة ويؤثر في الأنشطة الزراعية والاقتصادية والبيئية. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن جنوب غرب المملكة ومنها منطقة عسير يشهد بالفعل تراجعًا ملحوظًا في معدلات الهطول وتزايدًا في الإجهاد المائي نتيجة التغيرات المناخية. (العبد اللطيف، 2020).

ورغم أهمية هذه المشكلة، لا تزال درجة تأثير التغير المناخي على كميات المياه وجودتها وتوزيعها في عسير غير واضحة بشكل كافٍ، مما يخلق حاجة ملحة لدراسة علمية دقيقة.

كما تتمثل مشكلة البحث في التساؤل الرئيسي التالي:

كيف أسهمت التغيرات المناخية في التأثير على الموارد المائية الجوفية والسطحية في منطقة عسير، وما طبيعة هذا التأثير من حيث الكمية، والنوعية، والتوزيع المكاني والزمني؟

ويمكن تفريغها إلى أسئلة فرعية مثل:

1. كيف تغيرت معدلات الأمطار ودرجات الحرارة في منطقة عسير خلال العقود الأخيرة، وما أثر هذه التغيرات المناخية في مستويات المياه الجوفية والموارد السطحية مثل الأودية والآبار؟
2. ما الانعكاسات البيئية والزراعية والاقتصادية لهذه التغيرات المناخية، وما الإجراءات والاستراتيجيات الممكنة للتخفيف من أثارها على الموارد المائية في المنطقة؟

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى تحليل وتقييم أثر التغير المناخي على الموارد المائية الجوفية والسطحية في منطقة عسير، وذلك من خلال تحقيق الأهداف العلمية الآتية:

1. تحليل التغيرات المناخية في منطقة عسير ودراسة الاتجاهات الزمنية للهطول المطري ودرجات الحرارة خلال العقود الأخيرة وتحديد مدى التذبذب المناخي وتأثيره على الدورة الهيدرولوجية.
2. فهم تأثير التغير المناخي على الأنظمة البيئية في عسير.
3. تقييم أثر التغير المناخي على الموارد المائية الجوفية وقياس التغير في مستويات المياه الجوفية ومعدلات التغذية الطبيعية. وكذلك تحليل العلاقة بين التغيرات المناخية وتراجع أو زيادة المخزون الجوفي.
4. دراسة تأثير التغير المناخي على الموارد المائية السطحية وتقييم التغير في تدفقات الأودية، والسدود. وتحديد أثر ارتفاع درجات الحرارة وزيادة التبخر على الموارد السطحية.
5. تحليل التوزيع المكاني والزمني للتغيرات المائية وتحديد المناطق الأكثر عرضة للضغط المائي.
6. دراسة كفاءة نظم حصاد المياه واستراتيجيات التكيف المائي في مواجهة التغيرات المناخية، من خلال تقييم قدرتها على تحسين توافر المياه، وتقليل مخاطر الجفاف، ودعم الإدارة المتكاملة للموارد المائية في الأحواض الجبلية.
7. تقديم توصيات لإدارة الموارد المائية بما يتماشى مع رؤية المملكة العربية السعودية 2030م

أهمية البحث

تتبع أهمية هذا البحث من عدة جوانب علمية وبيئية وتنموية، يمكن تلخيصها في النقاط الآتية:

1. أهمية علمية :
 - يساهم في سد فجوة معرفية واضحة تتعلق بغياب دراسات محلية متخصصة تربط بين التغير المناخي والموارد المائية في منطقة عسير.
 - يضيف معرفة جديدة حول التغيرات الهيدرولوجية في البيئات الجبلية وشبه الجافة.
2. أهمية بيئية:
 - يوضح المخاطر المحتملة على التنوع الحيوي والغطاء النباتي نتيجة تراجع الموارد المائية.
3. أهمية اقتصادية وتنموية:
 - يدعم التخطيط المائي المستدام في منطقة تعتمد على الزراعة والسياحة والأنشطة الريفية.
 - يساهم في تعزيز الأمن المائي على المدى الطويل.

منهجية الدراسة

تعتمد دراسة أثر التغير المناخي على الموارد المائية في منطقة عسير على المنهج الوصفي التحليلي، وهو منهج يجمع بين وصف الظواهر الطبيعية والمناخية والهيدرولوجية بدقة، وتحليل البيانات الكمية والنوعية المرتبطة بها، بهدف فهم العلاقات والاتجاهات والتغيرات الحاصلة. يتيح هذا المنهج للباحثين رصد التغيرات المناخية والمائية عبر الزمن، وتحليل أسبابها ونتائجها، وتقديم تفسيرات علمية موضوعية مدعومة بالبيانات.

أدوات جمع البيانات:

تتطلب دراسة أثر التغير المناخي على الموارد المائية في منطقة عسير جمع بيانات متنوعة من مصادر متعددة، تشمل:

• البيانات المناخية:

- محطات الرصد المناخي المحلية: بيانات درجات الحرارة، الأمطار، الرطوبة، الرياح، التبخر، إلخ، من الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة، والمركز الوطني للأرصاد.
- صور الأقمار الصناعية: لرصد التغيرات في الغطاء النباتي، الرطوبة السطحية، مؤشرات الجفاف، باستخدام منصات مثل MODIS، Sentinel-2، Landsat.
- بيانات المياه الجوفية والسطحية.
- بيانات الآبار والسدود: من وزارة البيئة والمياه والزراعة، وتشمل بيانات السدود والسعة التخزينية، إلخ.

أدوات الاستشعار عن بعد والتحقق الميداني ومنها:

- تحليل صور الأقمار الصناعية: لتحديد التغيرات في الغطاء النباتي، رطوبة التربة، مؤشرات الجفاف، ومراقبة التغيرات الزمنية في المسطحات المائية.
- التحقق الميداني (الدراسة الميدانية): زيارات ميدانية لمواقع مختارة للتحقق من نتائج الدراسة.

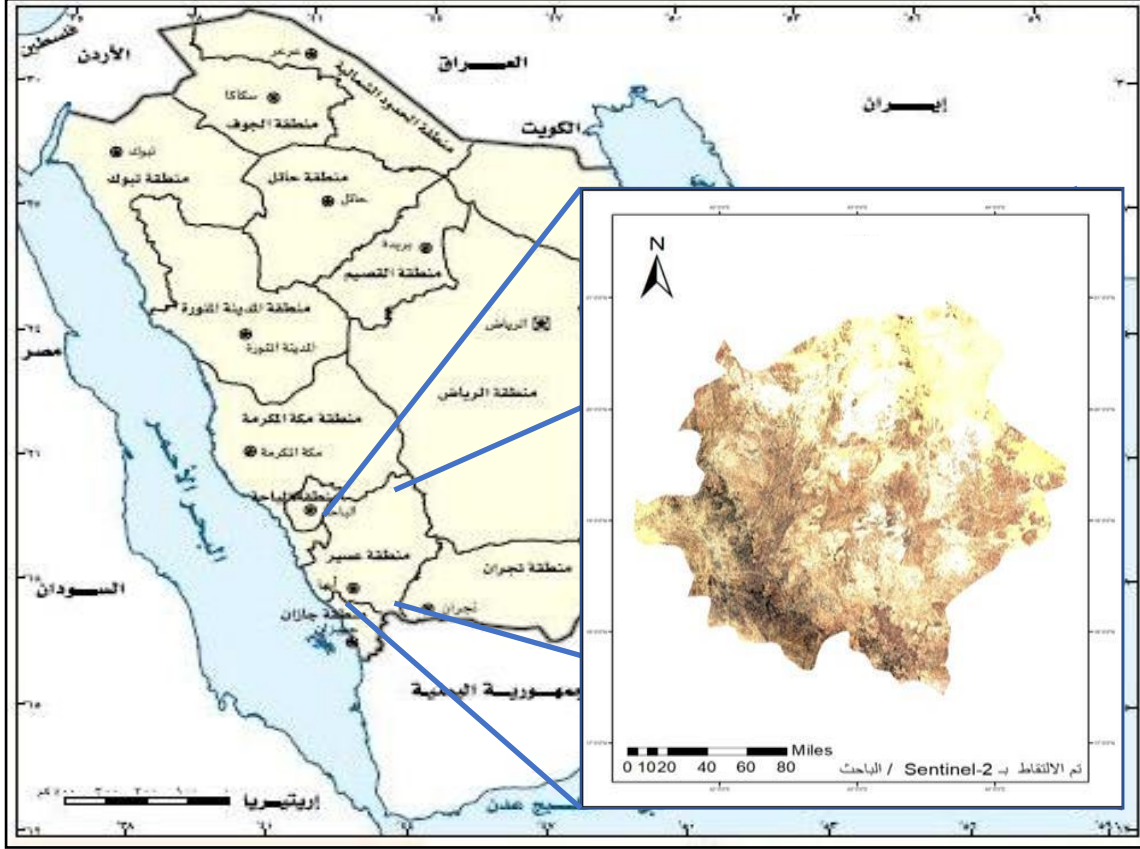
• نظم المعلومات الجغرافية (GIS):

- تُعد نظم المعلومات الجغرافية أداة أساسية لتحليل البيانات المكانية والزمانية المتعلقة بالموارد المائية والتغيرات المناخية. تشمل تطبيقات GIS في هذه الدراسة:
- تحليل مستجمعات المياه: تحديد الأحواض المائية، رسم شبكات التصريف، حساب تراكم التدفق، وتحديد المناطق الأكثر عرضة للجفاف أو الفيضانات.
- تحليل التغيرات الزمنية: مقارنة صور الأقمار الصناعية عبر الزمن لرصد التغيرات في المسطحات المائية، الغطاء النباتي، مؤشرات الجفاف، إلخ.
- نمذجة التداخل بين العوامل المناخية والهيدرولوجية: دمج بيانات الأمطار، التبخر، التربة، التضاريس، لاستخلاص خرائط المخاطر وتحديد المناطق الحرجة.

منطقة الدراسة (منطقة عسير):

الموقع الجغرافي:

تقع منطقة عسير في الجنوب الغربي من المملكة العربية السعودية، خريطة رقم (1) بين خطي عرض 17.25 و 19.50 شمالاً، وخطي طول 41.50 و 50.00 شرقاً. تبلغ مساحتها حوالي 81,000 كم²، وتضم 17 محافظة رئيسية، من أبرزها أبها (العاصمة الإدارية)، خميس مشيط، بيشة، النماص، رجال ألمع، محاليل، سراة عبيدة، تلتيت، وغيرها. (أمانة منطقة عسير)

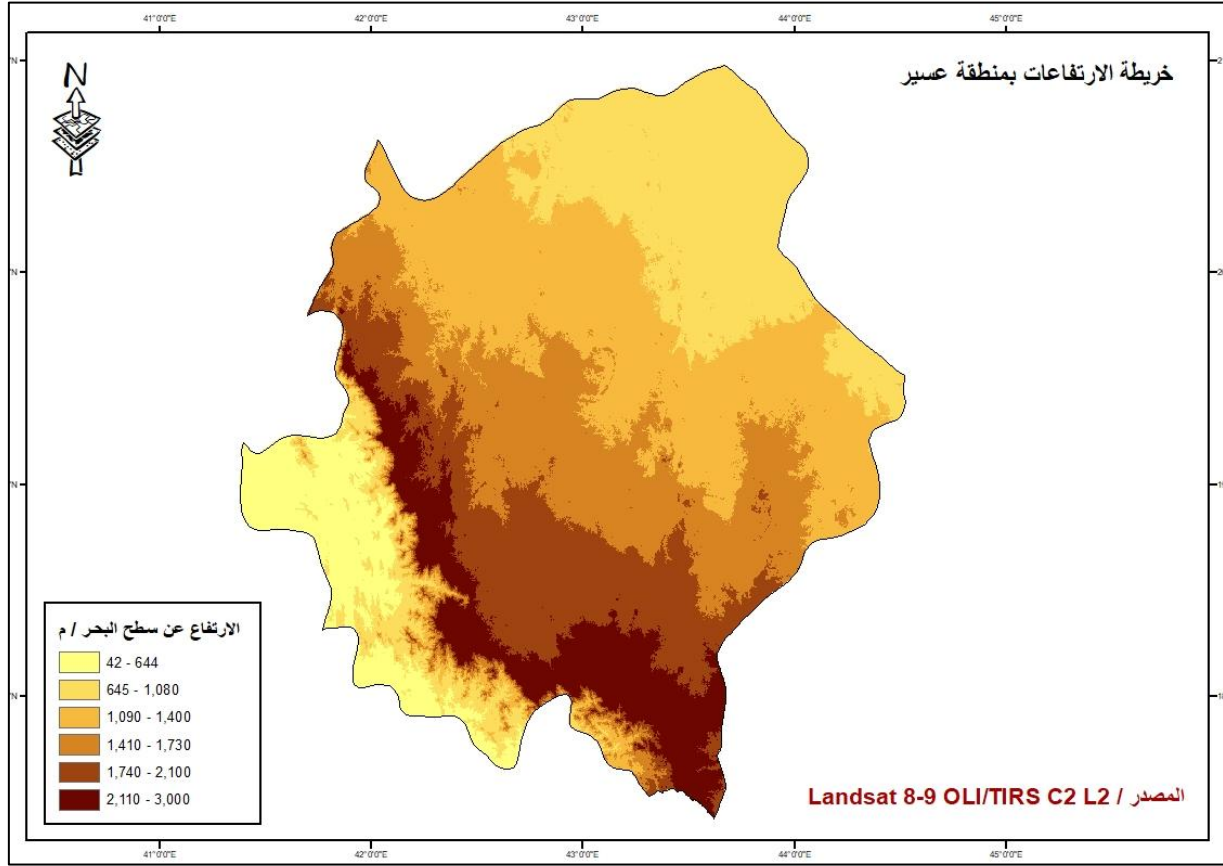


خريطة رقم (1) الموقع الجغرافي والفلكي لمنطقة الدراسة- المصدر الباحثين- استناداً على خريطة هيئة المساحة الجيولوجية

التضاريس:

تتميز عسير بتنوع تضاريسها بشكل ملحوظ، ويمكن تقسيمها إلى ثلاث نطاقات رئيسية:

- المرتفعات الجبلية (جبال السروات): تمتد من الشمال إلى الجنوب، ويصل ارتفاعها إلى أكثر من 3000 متر فوق سطح البحر في بعض القمم (مثل السوداء، الشعف). تشكل هذه الجبال العمود الفقري للمنطقة، وتتميز بانحداراتها الشديدة وأوديتها العميقة.
- الهضبة الشرقية: تمتد شرق جبال السروات، وتتميز بارتفاعات متوسطة (1000-1500 متر)، وتضم ودياناً واسعة مثل وادي بيشة وتثليث.
- سهول تهامة: تقع غرب جبال السروات بمحاذاة البحر الأحمر، وتتميز بارتفاعات منخفضة (0-200 متر)، وتربة طينية ورملية، ووجود بعض الكثبان الرملية.



خريطة رقم (2) خريطة التضاريس والارتفاعات بمنطقة عسير - المصدر / عمل الباحثين استناداً على Google Earth Engine ومعالجة برنامج GIS

الدراسات السابقة

تُعد الدراسات السابقة حول تأثير التغير المناخي على الموارد المائية من الركائز الأساسية لفهم التحديات التي تواجه المناطق الجبلية في جنوب غرب المملكة العربية السعودية، ولا سيما منطقة عسير التي تعتمد بشكل كبير على الأمطار الموسمية كمصدر رئيسي لتجدد مواردها المائية. وقد تناولت الأدبيات العلمية سواء المحلية أو الإقليمية أو العالمية مجموعة من الجوانب المرتبطة بتذبذب الهطول المطري، وارتفاع درجات الحرارة، وتراجع التغذية الجوفية، إضافة إلى التغيرات في الجريان السطحي وتدفقات الأودية. كما ركزت العديد من الدراسات على حساسية الأحواض الجبلية للتغيرات المناخية، نظراً لطبيعتها الطبوغرافية المعقدة واعتمادها على الأمطار في تغذية الخزانات الجوفية. وتبرز أهمية مراجعة هذه الدراسات في توفير إطار معرفي يساعد على تفسير التغيرات المائية في منطقة عسير، وتحديد الفجوات البحثية، وبناء تصور علمي يدعم جهود التخطيط والإدارة المستدامة للموارد المائية في ظل التغير المناخي المتسارع.

دراسات غير عربية:

تناول، هولغر ترايدل وآخرون (et al Holger Treidel. 2012) آثار تغير المناخ على المياه الجوفية في تحليل عالمي شامل لتأثير التغير المناخي على المياه الجوفية وكان من النتائج: انخفاض التغذية الجوفية في معظم المناطق الجافة وشبه الجافة والحاجة إلى سياسات تكيف مائي طويلة المدى.

أشار، دافاماني وآخرون (Davamani et al. 2024) في مراجعة نقدية لتأثيرات تغير المناخ على موارد المياه وخلصوا إلى أن تغير المناخ يؤثر على التغذية الجوفية عبر ارتفاع الحرارة وتغير الأمطار وأن نماذج المحاكاة الهيدرولوجية ضرورية للتنبؤ بالتغيرات المستقبلية.

وقام، غاوري يو. بهاغولي وآخرون (Gauri U. Bhagole et al. 2025) في دراستهم / تأثيرات تغير المناخ على جودة المياه السطحية بربط ارتفاع الحرارة بزيادة من درجة حرارة المياه ويغير خصائصها الكيميائية كما أن تغير الأمطار يؤثر على الجريان السطحي والتغذية الجوفية.

وأوضحت دراسة، يونوت مينيا وآخرون (Ionut Minea et al. 2025) تأثير تغير المناخ على موارد المياه الجوفية وهو تحليل علمي لأحدث الأبحاث حول المياه الجوفية وكان من نتائج تلك الدراسة تغير المناخ يسبب تذبذبًا كبيرًا في مستويات المياه الجوفية كما أن زيادة معدلات التبخر تؤثر على إعادة التغذية.

دراسات عربية:

عمد المجالي، (2015) - (الأردن) في بحثه عن التغير المناخي وتأثيره على الموارد المائية في الأردن إلى إظهار عدة نتائج من خلال دراسته انخفاض الأمطار بنسبة 20-30%. وكذلك تراجع التغذية الجوفية وارتفاع الطلب على المياه في المناطق الجبلية.

هدفت دراسة القباطي (2016) إلى تحليل تأثير التغير المناخي على الموارد المائية في المرتفعات الجبلية في (اليمن)، وذلك من خلال فهم كيفية تغير نمط الأمطار وما يترتب عليه من تراجع في مستويات المياه الجوفية، إضافة إلى تقييم ارتفاع احتمالية حدوث الفيضانات المفاجئة في المناطق الجبلية نتيجة اختلال التوازن الهيدرولوجي.

الدراسات المحلية:

تناول دراسة الحربي، محمد (2017) في (بحثه التغير المناخي وأثره على الموارد المائية في المناطق الجافة وشبه الجافة) وخلص إلى أن ارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى زيادة التبخر وتغير نمط الأمطار يؤثر على الجريان السطحي كما أوصى باستخدام نماذج هيدرولوجية للتنبؤ بالتغيرات المستقبلية.

وهدفت دراسة الشهري (2018) إلى تحليل أثر التغيرات المناخية على الموارد المائية في المملكة العربية السعودية، وذلك من خلال رصد التغيرات في معدلات الأمطار ودرجات الحرارة، وتقييم انعكاساتها على التغذية الجوفية ومخاطر الجفاف في المناطق الجبلية، خصوصًا جنوب غرب المملكة بما فيها منطقة عسير. وتركز الدراسة على فهم كيفية تراجع الهطول المطري وتذبذب التغذية الجوفية نتيجة ارتفاع درجات الحرارة، وما يترتب على ذلك من ضغوط متزايدة على الموارد المائية في البيئات الجبلية الحساسة.

كما بينت دراسة السلمي، (2019) ندرة المياه ستزداد في المناطق الجنوبية الغربية وضرورة تطوير استراتيجيات تكيف مائي للمحافظة على المياه السطحية والجوفية

وأشار العبد اللطيف، (2020) إلى انخفاض التغذية الجوفية في المناطق الجبلية وحساسية عالية للموارد الجوفية تجاه تغير الأمطار كما أشار إلى أهمية دمج GIS مع بيانات المناخ.

وعمد الشهراني، (2021) من خلال دراسته أثر السدود على تغذية المياه الجوفية في المناطق الجافة ودراسة حالة سد وادي ببشة إلى إبراز عدد من النتائج ومنها أن سد الملك فهد ساهم في تحسين التغذية الجوفية كما حدثت تغيرات في الجريان السطحي بعد إنشاء السد، وأهمية السدود في مواجهة آثار التغير المناخي.

وبذلك تُظهر الدراسات السابقة العالمية والإقليمية والمحلية إلى وجود إجماع علمي على أن التغير المناخي يؤدي إلى انخفاض الأمطار وارتفاع درجات الحرارة، مما يعكس مباشرة على تراجع التغذية الجوفية وتغير الجريان السطحي وزيادة مخاطر الجفاف، خصوصًا في المناطق الجبلية مثل منطقة عسير. كما تؤكد الدراسات أهمية استخدام النماذج الهيدرولوجية ودمج نظم المعلومات الجغرافية مع بيانات المناخ لتحليل التغيرات المستقبلية. وتشير الأدلة إلى أن السدود يمكن أن تلعب دورًا إيجابيًا في

تحسين التغذية الجوفية وتقليل آثار التغير المناخي. وبشكل عام، فإن ندرة المياه مرشحة للزيادة مستقبلاً، مما يستدعي تطوير استراتيجيات تكيف مائي مستدامة للمحافظة على الموارد السطحية والجوفية في منطقة عسير.

الإطار النظري للدراسة

• التغير المناخي: المفهوم وأبرز مظاهره:

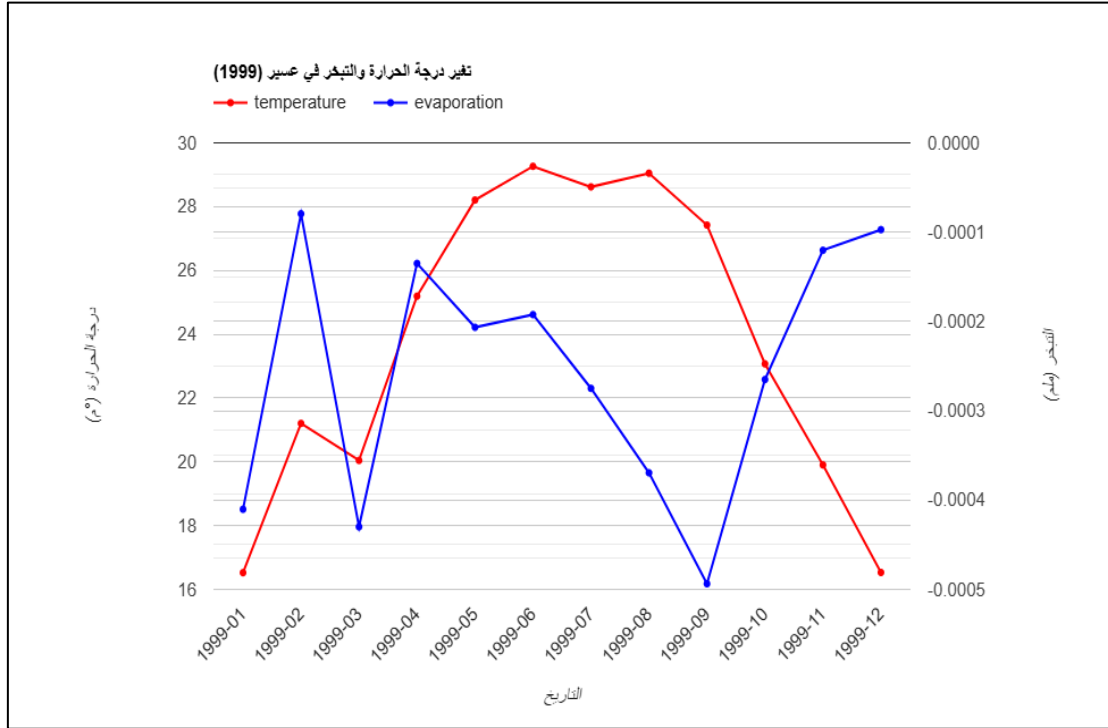
يُعرّف التغير المناخي بأنه التحولات طويلة المدى في درجات الحرارة وأنماط الهطول نتيجة عوامل طبيعية وبشرية، أبرزها زيادة انبعاثات الغازات الدفيئة. وقد أشارت الدراسة إلى أن: " العالم يشهد في العقود الأخيرة تغيرات مناخية متسارعة تُعد من أبرز التحديات البيئية".

وتشمل مظاهره: ارتفاع الحرارة، تذبذب الأمطار، زيادة الجفاف، وارتفاع التبخر. وتؤكد الأدبيات العلمية أن هذه التغيرات تؤثر مباشرة في النظم البيئية والموارد المائية (Davamani et al., 2024).

• التغير في درجة الحرارة والتبخر:

يُعدّ التبخر أحد أهم العمليات المناخية المرتبطة مباشرة بارتفاع درجة الحرارة، إذ تؤدي زيادة الحرارة إلى رفع الطاقة المتاحة على سطح الأرض، مما يزيد من قدرة الهواء على حمل بخار الماء، وبالتالي يرتفع معدل التبخر الفعلي من التربة والمسطحات المائية والنباتات. وتوضح الدراسات الهيدرولوجية أن العلاقة بين الحرارة والتبخر علاقة طردية قوية، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة الضغط البخاري المشبع، ومن ثم اتساع الفجوة بين الضغط البخاري الفعلي والمشبع، وهي الفجوة التي تُعد المحرك الأساسي لعملية التبخر (Chow et al., 1988). كما تشير معادلة بنمان-مونتيث، وهي المعادلة القياسية لحساب التبخر-النتح المحتمل، إلى أن درجة الحرارة تُعد أحد أهم العوامل المؤثرة في التبخر، إلى جانب الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح ورطوبة الهواء (Allen et al., 1998).

وتؤكد الدراسات المناخية الحديثة أن ارتفاع درجات الحرارة الناتج عن التغير المناخي يؤدي إلى زيادة معدلات التبخر على المستوى العالمي، مما يفاقم من حدة الجفاف الهيدرولوجي، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة مثل جنوب غرب المملكة العربية السعودية. وقد أظهرت تحليلات ERA5 أن السنوات ذات الحرارة الأعلى غالباً ما تسجل معدلات تبخر أعلى، حتى في ظل ثبات أو انخفاض كميات الأمطار، مما يؤدي إلى عجز مائي واضح في التربة وانخفاض التغذية الجوفية (Vicente-Serrano et al., 2014). كما أن ارتفاع الحرارة يزيد من الإجهاد المائي للنباتات، ويقلل من كفاءة استخدام المياه، ويؤدي إلى انخفاض مؤشرات الغطاء النباتي مثل NDVI، خاصة خلال فترات الجفاف المناخي التي تُظهرها مؤشرات مثل (SPI Anyamba & Tucker, 2012). وبذلك، فإن ارتفاع درجة الحرارة لا يقتصر تأثيره على زيادة التبخر فحسب، بل يمتد ليؤثر في الدورة الهيدرولوجية كاملة، ويُعد عاملاً رئيسياً في تفسير تدهور الغطاء النباتي وتراجع الموارد المائية في البيئات الحساسة مائياً. ويوضح الشكل التالي (شكل 1) كمية التبخر تبعاً لارتفاع درجة الحرارة في عام 1999م



شكل (1) التغير في درجة الحرارة والتبخير لعام 1999م- المصدر/ عمل الباحثين استناداً على Google Earth Engine

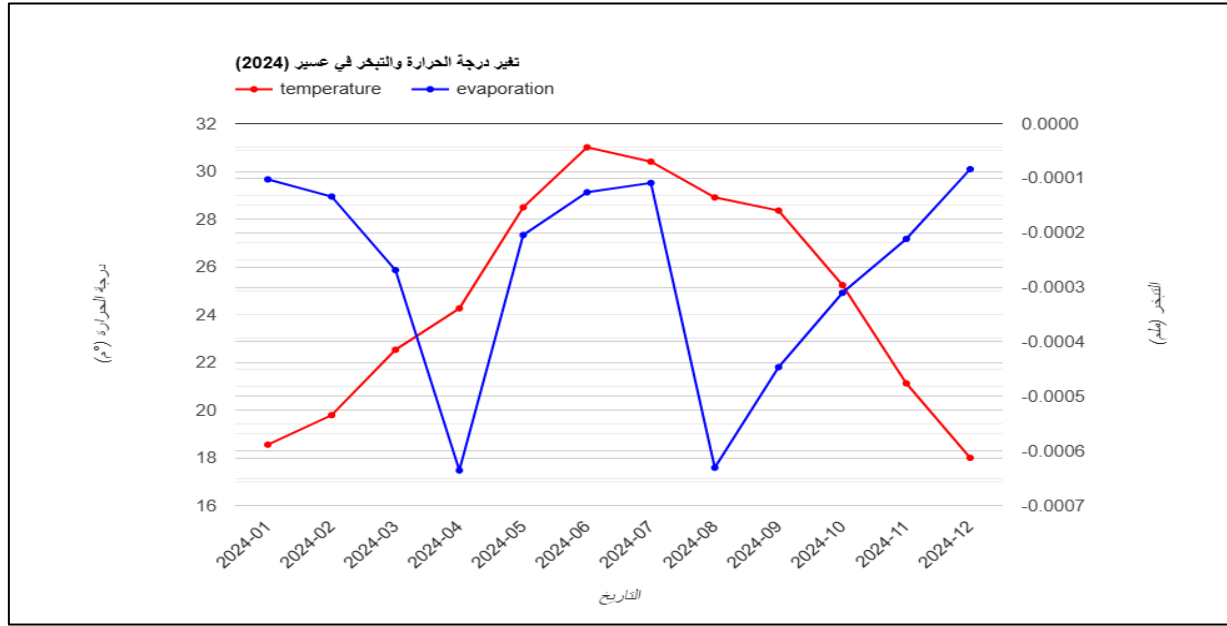
وهنا يظهر في منطقة عسير تبايناً موسمياً واضحاً بين درجة الحرارة والتبخير، حيث ارتفعت درجات الحرارة تدريجياً من الشتاء إلى الصيف لتبلغ ذروتها في شهري يوليو وأغسطس، في حين أظهر التبخير تذبذباً أعلى مرتبطاً بعوامل متعددة تشمل الإشعاع الشمسي ورطوبة الهواء وتوفر المياه السطحية. هذا النمط يعكس العلاقة المركبة بين الحرارة والتبخير في البيئات الجبلية شبه الجافة، إذ لا يعتمد التبخير على درجة الحرارة وحدها، بل يتأثر أيضاً بكمية المياه المتاحة في التربة والمساحات المائية- (Chow et al., 1988).

وعند ربط هذه النتائج بمؤشر الجفاف المعياري SPI لعام 1999، يتضح أن القيم السالبة للمؤشر في معظم أشهر السنة تشير إلى حالة جفاف مناخي ممتد، نتج عنها انخفاض في المخزون المائي السطحي والجوفي، وتراجع في معدلات التغذية المائية للأودية والسدود (McKee et al., 1993; MEWA, 2021). هذا التراجع في الموارد المائية انعكس مباشرة على الغطاء النباتي، حيث تُظهر بيانات الأقمار الصناعية ومؤشر NDVI انخفاضاً ملحوظاً في الكتلة الحيوية للنبات الطبيعي خلال أشهر الصيف والخريف، وهو ما يعكس ضعف النمو النباتي نتيجة الإجهاد المائي الناتج عن ارتفاع الحرارة وزيادة معدلات التبخير (Anyamba & Tucker, 2012; Vicente-Serrano et al., 2013).

وتشير بيانات الغطاء النباتي في منطقة عسير إلى وجود انخفاض ملحوظ في قيم مؤشر NDVI في العديد من المناطق الداخلية مقارنة بالمرتفعات الغربية، مما يعكس تأثيرات الجفاف المناخي والهيدرولوجي على تدهور الغطاء النباتي الطبيعي والمزروع، خصوصاً في المواقع التي سجلت قيماً سالبة لمؤشر SPI. وتُظهر العلاقة بين SPI وNDVI دوراً تشخيصياً مهماً في تقييم أثر الجفاف على النظام البيئي، حيث يؤدي انخفاض الهطول المطري وارتفاع درجات الحرارة وزيادة معدلات التبخير إلى تراجع المخزون المائي، ومن ثم انخفاض الكتلة النباتية، في دورة تغذية راجعة سلبية تزيد من هشاشة النظم البيئية في المناطق الجافة وشبه الجافة مثل عسير.

كما يُظهر التحليل الزمني لدرجة الحرارة والتبخير في منطقة عسير لعام 2024 من خلال الشكل (2) أن درجات الحرارة ارتفعت من نحو 18°م في يناير إلى أكثر من 30°م في أشهر الصيف، في حين سجل التبخير قيماً مرتفعة خلال الربع

والصيف مع تذبذب واضح يعكس تأثير كل من الإشعاع الشمسي وتوفر المياه السطحية. وعند ربط هذه النتائج بـ مؤشر الجفاف SPI لعام 2024، التي اتسمت بالسالبية في أجزاء واسعة من المنطقة، يتضح أن العجز المطري المصحوب بارتفاع درجات الحرارة وزيادة الفاقد بالتبخير قد أسهم في تعميق حالة الجفاف الهيدرولوجي. كما تُظهر خريطة الغطاء النباتي (NDVI) لعام 2024 انخفاضًا في الكتلة الحيوية للنبات الطبيعي في المناطق الداخلية مقارنة بالمرتفعات الغربية، مما يؤكد أن الظروف المناخية السائدة خلال العام قد أدت إلى إجهاد مائي واضح للنبات وتراجع في كفاءة النظم البيئية النباتية في عسير.



شكل (2) التغيير في درجة الحرارة والتبخير لعام 2024م- المصدر/ عمل الباحثين استناداً على Google Earth Engine

• المقارنة بين درجة الحرارة والتبخير بين عامي 1999 و2024:

تُظهر نتائج عامي 1999 و2024 في منطقة عسير أن العلاقة بين ارتفاع درجة الحرارة وزيادة التبخر ليست علاقة طردية بسيطة، بل علاقة مركبة تتأثر بعوامل مناخية وهيدرولوجية متعددة. ففي عام 1999، ارتفعت درجات الحرارة تدريجياً نحو الصيف، إلا أن أعلى قيم التبخر ظهرت في الربيع وليس في ذروة الصيف، مما يشير إلى أن توفر الرطوبة السطحية كان عاملاً حاسماً في تحديد شدة التبخر. أما في عام 2024، فقد أظهرت البيانات ارتفاعاً أكبر في درجات الحرارة خلال الصيف مقارنة بعام 1999، إلا أن التبخر لم يصل إلى أعلى قيمه في هذه الفترة، بل سجل ذروته في أشهر الربيع، وهو ما يعكس تأثير الجفاف المناخي المسجل في مؤشر SPI لعام 2024، حيث أدت قلة الأمطار إلى انخفاض رطوبة التربة، وبالتالي انخفاض التبخر الفعلي رغم ارتفاع الحرارة. وتؤكد هذه النتائج أن التبخر يعتمد على الحرارة من جهة، وعلى توفر المياه السطحية من جهة أخرى، وهو ما يتسق مع معادلة بنمان- مونثيث التي تشير إلى أن التبخر- النتح يتأثر بالإشعاع الشمسي ورطوبة الهواء وسرعة الرياح إضافة إلى الحرارة (Allen et al., 1998).

كما أن مقارنة عامي 1999 و2024 تُظهر أن ارتفاع درجات الحرارة في 2024 ترافق مع قيم SPI سالبة وانخفاض واضح في مؤشر NDVI، مما يعكس إجهاداً مائياً أكبر للنباتات مقارنة بعام 1999. ففي حين كان الغطاء النباتي في 1999 أكثر استجابة للتغيرات الموسمية، أظهر NDVI لعام 2024 تراجعاً في الكتلة الحيوية خلال الصيف والخريف، نتيجة ارتفاع الحرارة وزيادة الفاقد بالتبخير مع محدودية الأمطار. وهذا يؤكد أن ارتفاع الحرارة في ظل الجفاف يؤدي إلى تفاقم الضغط المائي، ويقلل من قدرة النظم البيئية على الاحتفاظ بالرطوبة، مما ينعكس مباشرة على الغطاء النباتي الطبيعي والمزروع (Vicente-Serrano et al., 2014; Anyamba & Tucker, 2012). وبذلك، فإن مقارنة السنتين توضح أن ارتفاع

الحرارة وحده لا يفسر التبخر أو تدهور الغطاء النباتي، بل إن التفاعل بين الحرارة والجفاف ونقص الرطوبة السطحية هو العامل الحاسم في تحديد شدة الضغط المائي في المنطقة.

• التغير المناخي والدورة الهيدرولوجية:

تُعدّ الدورة الهيدرولوجية أحد أكثر الأنظمة الطبيعية حساسية للتغيرات المناخية، إذ تعتمد توازنها الدقيقة على التفاعل المستمر بين الحرارة، التبخر، الهطول، والجريان السطحي والتغذية الجوفية. فارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى زيادة الطاقة المتاحة على سطح الأرض، مما يرفع معدلات التبخر والنتح، ويزيد من الطلب المناخي على المياه، وهو ما ينعكس مباشرة على رطوبة التربة وتوازن المياه السطحية والجوفية. وقد أكدت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2021) أن الاحترار العالمي أدى إلى زيادة معدلات التبخر-النتح في معظم مناطق العالم، خاصة في البيئات الجافة وشبه الجافة، حيث يتجاوز الفاقد المائي كمية الأمطار المتاحة، مما يخلق عجزاً مائياً هيكلياً. كما أن تذبذب الأمطار- سواء من حيث الكمية أو التوزيع الزمني- يُعد عاملاً رئيسياً في اضطراب التغذية الجوفية، إذ إن الأمطار المتقطعة والعواصف القصيرة لا توفر الوقت الكافي لتسرب المياه إلى باطن الأرض، بل تزيد من الجريان السطحي السريع وفقدان المياه عبر التبخر (Scanlon et al., 2006). وقد ورد في إحدى الدراسات العالمية: "أدت الزيادة في درجات الحرارة، وتذبذب معدلات الهطول المطري... إلى اضطراب ميزان المياه العالمي".

وهو ما يعكس التأثير المركب للتغير المناخي على الدورة الهيدرولوجية.

وتشير الأدبيات العلمية إلى أن المناطق الجافة وشبه الجافة هي الأكثر تأثراً بهذه التغيرات، حيث يؤدي ارتفاع الحرارة إلى زيادة التبخر المحتمل، بينما يؤدي تذبذب الأمطار إلى انخفاض التغذية الجوفية وتراجع الجريان السطحي، مما يفاقم من شدة الجفاف الهيدرولوجي (Treidel et al., 2012). وقد أظهرت دراسات عديدة أن انخفاض التغذية الجوفية في هذه المناطق يرتبط مباشرة بارتفاع درجات الحرارة وتراجع الأمطار، إضافة إلى زيادة شدة الأحداث المناخية المتطرفة مثل موجات الحر والجفاف (Taylor et al., 2013). كما أن التغيرات في الدورة الهيدرولوجية تؤثر بدورها على الغطاء النباتي، حيث يؤدي الإجهاد المائي الناتج عن ارتفاع الحرارة وزيادة التبخر إلى انخفاض مؤشرات الغطاء النباتي مثل NDVI، خاصة في السنوات التي يسجل فيها مؤشر الجفاف SPI قيماً سالبة. وبذلك، فإن التغير المناخي لا يغيّر فقط كمية المياه المتاحة، بل يعيد تشكيل ديناميكية الدورة الهيدرولوجية بأكملها، مما يجعل فهم العلاقة بين الحرارة، التبخر، والهطول أمراً أساسياً لتقييم المخاطر المائية ووضع استراتيجيات التكيف في المناطق الحساسة مائياً مثل جنوب غرب المملكة العربية السعودية.

• معدلات الهطول المطري وأثرها على المخزون المائي:

تعتمد خريطة الهطول المطري السنوي لعام 1999 على بيانات مشروع CHIRPS، وهو أحد أكثر المنتجات العالمية استخداماً في الدراسات المناخية والهيدرولوجية، نظراً لقدرته على دمج قياسات الأقمار الصناعية- المعتمدة على تقنية (Infrared Cold Cloud Duration (CCD)- مع سجلات محطات الرصد الأرضية، مما يمنحه دقة مكانية عالية وموثوقية أكبر في المناطق ذات التضاريس المعقدة مثل منطقة عسير (Funk et al., 2015). وبعد معالجة البيانات وقصّها على حدود المنطقة، تُظهر الخريطة تبايناً مكانياً واضحاً في توزيع الأمطار خلال عام 1999، حيث تتركز القيم المرتفعة في الأجزاء الغربية والجنوبية الغربية ذات الارتفاعات الجبلية، بينما تنخفض تدريجياً باتجاه الشرق والجنوب الشرقي. ويعكس هذا النمط الدور الحاسم للتضاريس في تشكيل المناخ المحلي، إذ تؤدي المرتفعات الجبلية إلى تعزيز الرفع التضاريسي (Orographic Lifting) للكتل الهوائية الرطبة القادمة من البحر الأحمر، مما يزيد من احتمالية التكاثف والهطول على السفوح المواجهة للرياح، مقارنة بالمناطق الداخلية الأكثر جفافاً.

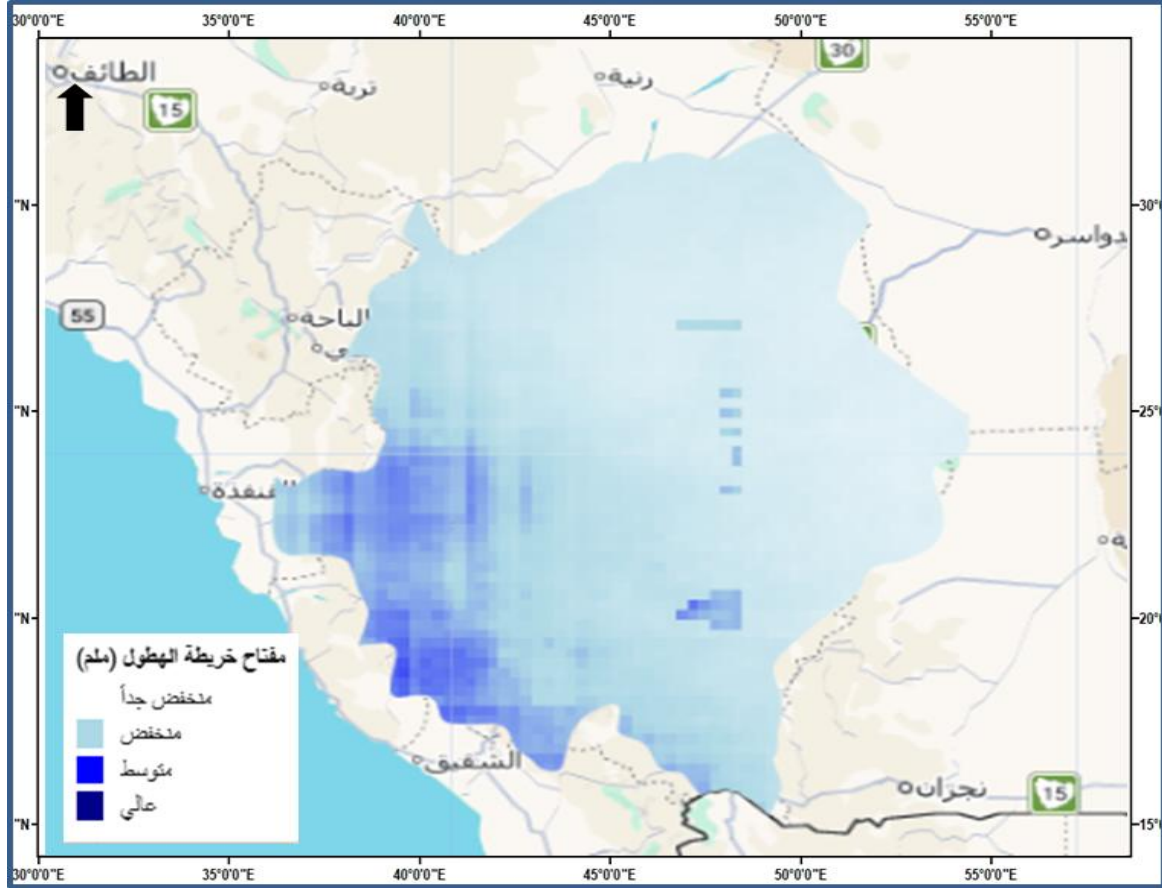
وتشير الخريطة (3) إلى أن عام 1999 اتسم بتوزيع مطري غير متجانس داخل منطقة عسير، وهو نمط يتسق مع ما ورد في الدراسات العلمية حول تأثير التضاريس في إعادة توزيع الأمطار في البيئات الجبلية شبه الجافة. (Barros & Lettenmaier, 1994).



خريطة رقم (3) الهطول المطري لعام 1999م على منطقة الدراسة- المصدر/ الباحثين استناداً على بيانات UCSB-CHG/CHIRPS

كما أن هذا التباين المكاني يعكس حساسية المنطقة للتغيرات المناخية الإقليمية، حيث تُظهر الدراسات أن المناطق الجبلية غالباً ما تستجيب بشكل أكثر وضوحاً لتذبذب الأمطار مقارنة بالمناطق السهلية، نظراً لاعتمادها الكبير على الرفع التضاريسي كمصدر رئيسي للهطول (Roe, 2005). وبذلك، يمكن الاستنتاج أن العوامل الطبوغرافية كانت العامل الأكثر تأثيراً في تشكيل النمط المناخي داخل منطقة عسير خلال عام 1999، وأن فهم هذا التباين ضروري لتفسير ديناميكية الجريان السطحي، والتغذية الجوفية، وتوزيع الغطاء النباتي في المنطقة.

بينما توضح خريطة (4) ما أشارت له بيانات المركز الوطني للأرصاد إلى أن الهطول المطري السنوي لعام 2024 سجّل ارتفاعاً ملحوظاً على امتداد السلسلة الجبلية الغربية، حيث بلغ متوسط الهطول نحو 198.77 ملم، مقارنةً بمتوسط قدره 119.61 ملم في عام 1999، أي بزيادة مقدارها 79.16 ملم خلال ما يقارب ربع قرن (National Center for Meteorology, 2024)، وهي زيادة تُعد مؤشراً على تغيير ملحوظ في السلوك المطري للمنطقة. ويكشف هذا التغير عن دور مزدوج لكل من التضاريس والعوامل المناخية الإقليمية؛ إذ ما تزال المرتفعات الغربية تستقبل النصب الأكبر من الأمطار بفعل الرفع التضاريسي، إلا أن نمط 2024 يتسم بنشأة مكاني أكبر، ما يشير إلى تأثير إضافي للتقلبات المناخية الحديثة. وتدل هذه الفروقات الرقمية والمكانية على أن منطقة عسير تشهد اتجاهاً عاماً نحو زيادة الهطول في المناطق الجبلية، الأمر الذي ينعكس على الدورة الهيدرولوجية من حيث تعزيز التغذية المائية السطحية وارتفاع احتمالات الجريان في الأودية الرئيسية. ويُعد هذا التحليل مهماً لفهم ديناميكية التغير المناخي في المنطقة وتقييم أثره على الموارد المائية.



خريطة رقم (4) الهطول المطري لعام 2024م على منطقة الدراسة- المصدر/ الباحثين استناداً على بيانات UCSB-CHG/CHIRPS

ولذلك نجد أن منطقة عسير من أكثر مناطق المملكة حساسية للتغيرات المناخية نظراً لاعتمادها الكبير على الموارد المائية المتجددة، وخاصة مياه الأمطار التي تُغذي الأودية والآبار الجوفية والينابيع الطبيعية.

وتشمل الموارد المائية الرئيسية في المنطقة:

الجريان السطحي في الأودية الكبرى مثل وادي أبها ووادي بيشة، والمياه الجوفية المخزنة في الخزانات الرسوبية والبركانية، إضافة إلى مياه السدود. وهي من أهم عناصر البنية المائية في منطقة عسير، إذ تلعب دوراً محورياً في تنظيم الجريان السطحي، وحجز مياه الأمطار، وتعزيز مخزون المياه الجوفية، إضافة إلى الحد من مخاطر الفيضانات في الأودية الرئيسية. وقد شهدت المنطقة خلال العقود الماضية توسعاً ملحوظاً في إنشاء السدود بهدف دعم الأمن المائي وتلبية احتياجات السكان والزراعة. وتتنوع السدود في عسير من حيث السعة التخزينية، والوظيفة، ونوع الإنشاء، حيث تشمل سدوداً كبرى مثل سد الملك فهد في بيشة، وسدوداً متوسطة وصغيرة موزعة على مختلف المحافظات الجبلية والسهلية. ويُعد حصر هذه السدود وتحليل خصائصها خطوة أساسية لفهم البنية الهيدرولوجية للمنطقة وتقييم قدرتها على التكيف مع التغيرات المناخية وتذبذب الهطول المطري. ويعرض الجدول (1) التالي قائمة بأهم السدود في منطقة عسير وفق البيانات الرسمية الصادرة عن وزارة البيئة والمياه والزراعة، متضمناً مواقعها وسعاتها التخزينية وأنواعها.

جدول رقم (1): السدود والسعة التخزينية بـ ملليمتر مكعب- منطقة الدراسة- المصدر/ وزارة البيئة والمياه والزراعة (2024)

م	اسم السد	الموقع (المحافظة)	السعة التخزينية (م ³)	نوع السد	الجهة المشغلة
1	سد الملك فهد	بيشة	325,000,000	خرساني	وزارة البيئة والمياه والزراعة
2	سد أبها	أبها	2,130,000	خرساني	وزارة البيئة والمياه والزراعة
3	سد وادي عتود	خميس مشيط	2,700,000	خرساني	وزارة البيئة والمياه والزراعة
4	سد وادي تندحة	خميس مشيط	1,500,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
5	سد وادي بيشة (سد تباله)	بيشة	68,000,000	ركامي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
6	سد وادي هرجاب	محابل عسير	500,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
7	سد وادي ريم	رجال ألمع	1,000,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
8	سد وادي حلي	القنفذة	95,000,000	ركامي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
9	سد وادي عياف	بللحمر	1,200,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
10	سد وادي شصعة	التماص	800,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
11	سد وادي ترح	بيشة	3,000,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة
12	سد وادي حوية	تنومة	600,000	ترابي	وزارة البيئة والمياه والزراعة

ولهذا نجد أن للسدود في منطقة عسير دوراً محورياً في تعديل نمط الجريان السطحي الناتج عن الأمطار الموسمية، إذ تسهم في خفض ذروة الجريان وتقليل مخاطر الفيضانات المفاجئة في الأودية الجبلية، وذلك من خلال قدرتها على تخزين كميات كبيرة من المياه خلال فترات الهطول الغزير (Chow et al., 1988; Bedient et al., 2019). كما يؤدي التخزين خلف السدود إلى إطالة زمن التصريف عبر تحرير المياه تدريجياً، مما يعزز تغذية الخزانات الجوفية ويزيد من استدامة الموارد المائية خلال الفترات الجافة، وهو تأثير أكدته دراسات هيدرولوجية عديدة تناولت دور السدود في تحسين التوازن المائي في البيئات الجافة وشبه الجافة (Yang et al., 2008). وفي المقابل، فإن حجز المياه خلف السدود يؤدي إلى انخفاض كميات المياه المتدفقة نحو المجرى السفلي، مما يغير من ديناميكية الأودية وأنماط الترسيب والنحت فيها، وهو ما أشار إليه (Richter et al. 1996) في تحليله لتأثير السدود على الأنظمة النهرية. وتؤكد تقارير وزارة البيئة والمياه والزراعة أن سدود منطقة عسير تمثل عنصرًا أساسيًا في إدارة الجريان السطحي وحماية التجمعات السكانية من مخاطر السيول، إضافة إلى دورها في دعم الأمن المائي عبر تعزيز التخزين السطحي والجوفي (MEWA, Annual Dams Report). ومن خلال دمج هذه الأدلة العلمية مع الخصائص الجغرافية للمنطقة، يتضح أن السدود تُعد أداة فعالة في التكيف مع التذبذب المناخي وزيادة كفاءة استغلال الموارد المائية في عسير. كما بينت دراسة الشهراني (2021) أن السدود مثل سد الملك فهد في بيشة ساهمت في تحسين التغذية الجوفية رغم تغير الجريان السطحي بعد إنشاء السد.

• التغير المناخي في المناطق الجافة وشبه الجافة:

تُعد المناطق الجافة من أكثر المناطق تأثرًا بالتغير المناخي بسبب اعتمادها على الأمطار الموسمية. كما تشير دراسات عربية إلى انخفاض الأمطار بنسبة 20-30% في الأردن (المجالي، 2015)، وتراجع المياه الجوفية في المرتفعات اليمينية (القباطي، 2016).

• دور الاستشعار عن بعد و GIS في دراسة التغير المناخي:

تُعد تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية أدوات أساسية لرصد التغيرات المناخية والمائية. وقد ورد في الدراسة: "تحليل صور الأقمار الصناعية لتحديد التغيرات في الغطاء النباتي ورطوبة التربة ومؤشرات الجفاف". وتستخدم هذه التقنيات في:

- تحليل مستجمعات المياه.
- رصد التغيرات الزمنية في المسطحات المائية.
- نمذجة العلاقة بين المناخ والهيدرولوجيا.

وقد أوصت دراسات محلية بدمج GIS مع بيانات المناخ لتحسين دقة التحليل (العبد اللطيف، 2020م).

وعليه يكشف التحليل المكاني لبيانات السدود والهطول والأودية في منطقة عسير عن علاقة هيدرولوجية مترابطة تُسهم في تفسير ديناميكية الموارد المائية في المنطقة. إذ تُظهر خرائط الهطول السنوي أن أعلى كميات الأمطار تتركز على السلسلة الجبلية الغربية، وهي المناطق نفسها التي تنحدر منها الأودية الرئيسية مثل وادي أبيها ووادي بيثية ووادي عتود، مما يجعلها مناطق تغذية رئيسة للسود. ويؤدي هذا التوافق المكاني بين مناطق الهطول المرتفع ومجارٍ مائية فعّالة إلى تعزيز كفاءة السدود في حجز مياه الأمطار، خصوصاً في السنوات الرطبة التي ترتفع فيها معدلات الجريان السطحي. كما يُظهر الربط المكاني أن السدود الكبرى مثل سد الملك فهد وسد أبيها تقع في مواقع استراتيجية عند مخارج الأودية أو في نقاط التقاء الروافد، مما يزيد من قدرتها على التحكم في ذروة الجريان وتخزين كميات كبيرة من المياه. وفي المقابل، فإن السدود الصغيرة والمتوسطة المنتشرة في المحافظات الجبلية تعمل على اعتراض الجريان المحلي وتقليل سرعة المياه، مما يرفع من معدلات التغذية الجوفية في المناطق المحيطة.

وتدعم خريطة الأودية (5) هذا التحليل بشكل مباشر، إذ تُظهر بوضوح شبكة الأودية المتجهة من المرتفعات الغربية نحو السهول الشرقية والجنوبية، وتبين نقاط التقاء الروافد ومسارات الجريان التي تغذي مواقع السدود. ويبرز هذا التوافق بين خريطة الأودية وخرائط الهطول ومواقع السدود أن توزيع السدود في عسير ليس عشوائياً، بل يعكس استجابة مباشرة للخصائص المناخية والهيدرولوجية، حيث تتكامل مناطق الهطول مع شبكات الأودية ومواقع السدود لتشكيل نظام مائي مترابط يساهم في إدارة الموارد المائية والتكيف مع التغير المناخي. كما تُظهر الخريطة أن الأودية الرئيسية تعمل كممرات طبيعية لتجميع مياه الأمطار من المرتفعات، مما يعزز كفاءة السدود في حجز المياه وزيادة التغذية الجوفية. وتوضح كذلك أن كثافة الأودية في المناطق الجبلية تخلق بيئة مواتية لحصاد المياه، خاصة في السنوات التي تشهد تذبذباً في الهطول. ويؤكد هذا الترابط المكاني أن البنية الطبيعية للمنطقة تلعب دوراً محورياً في تحديد فعالية السدود، وأن فهم ديناميكية الأودية يعد عنصراً أساسياً في التخطيط المائي المستدام. كما يشير هذا التوافق إلى أن أي تغيير في نمط الأمطار أو شدة الجريان سيؤثر مباشرة على كفاءة السدود وقدرتها على التخزين، مما يجعل دمج الخرائط الهيدرولوجية والمناخية ضرورة في إدارة الموارد المائية في عسير.



خريطة رقم (5) شبكة التصريف المائي- بمنطقة الدراسة- المصدر/ عمل الباحثين استناداً على Google Earth Engine

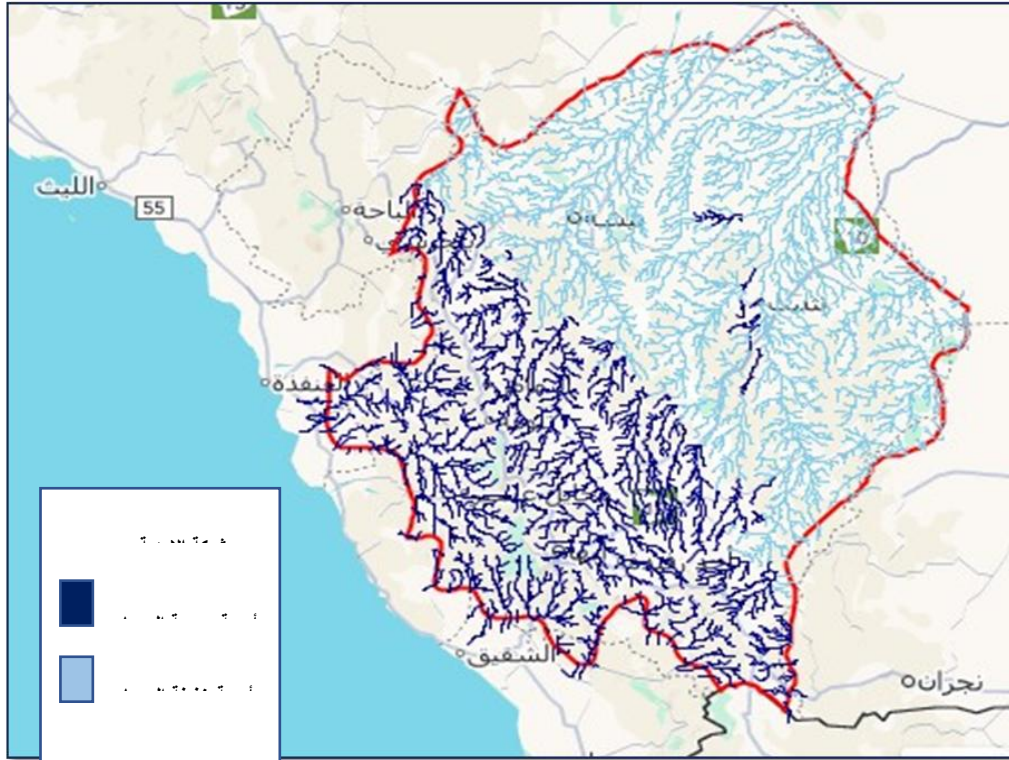
● التحليل المكاني للعلاقة بين الأودية والهطول ومواقع السدود في منطقة عسير:

يُظهر التحليل المكاني لشبكة الأودية في منطقة عسير أن البنية الهيدرولوجية للمنطقة تتأثر بدرجة كبيرة بالطبيعة الجبلية الممتدة على طول الحافة الغربية والجنوبية الغربية من الإقليم. إذ تُعد هذه المرتفعات من أكثر أجزاء المنطقة استقبالية للأمطار

السوية، نتيجة تأثيرات الارتفاع والتعرض للرياح الرطبة القادمة من البحر الأحمر، مما يجعلها مناطق تغذية رئيسة للجريان السطحي. وتؤكد الدراسات المناخية أن نطاقات الارتفاع العالية في جنوب غرب المملكة تُسجل أعلى معدلات الهطول مقارنة بالمناطق الداخلية، وهو ما ينعكس مباشرة على كثافة وتنوع شبكة التصريف (Almazroui, 2020).

وتتطلب من هذه المرتفعات شبكة واسعة من الشعاب الدقيقة والروافد العليا التي تتجمع تدريجياً لتشكل أودية أكبر وأكثر وضوحاً كلما اتجهت نحو الشرق والجنوب الشرقي. ويُعزى هذا الاتجاه العام للجريان إلى الانحدار التضاريسي الحاد بين القمم الجبلية والسهول الداخلية، حيث تعمل الفروق الارتفاعية على توجيه المياه عبر مسارات طبيعية تتدرج من شعاب صغيرة في أعالي الجبال إلى أودية متوسطة ثم أودية رئيسة في المناطق المنخفضة. وقد أشارت دراسات هيدرولوجية عدة إلى أن هذا النمط من التصريف يُعد سمة مميزة للقطاع الجنوبي الغربي من المملكة، حيث تنتج معظم الأودية من الغرب نحو الداخل نتيجة البنية الجيومورفولوجية للمنطقة (Subyani, 2004; Al Saud, 2010).

وتُظهر الخريطة (6) في هذه الدراسة أن منطقة عسير تمتلك شبكة مائية ضخمة ومتنوعة تشمل الشعاب، والأودية المتوسطة، والأودية الرئيسية، مما يعكس تعقيد النظام الهيدرولوجي وتعدد مصادر التغذية السطحية. كما تؤكد التحليلات المورفومترية السابقة أن أودية عسير تتسم بتشعبات كثيفة وتدرج واضح في الرتب النهرية، وهو ما يدل على فعالية العمليات السطحية في تشكيل مجاري الأودية عبر الزمن (Al-Ghamdi, 2011). وتدعم تقارير وزارة البيئة والمياه والزراعة هذا النمط، إذ تشير إلى أن معظم الأودية التي تغذي السدود في المنطقة تتبع من المرتفعات الغربية وتتجه نحو الداخل، مما يعزز أهمية هذه الجبال كمناطق تغذية رئيسة للموارد المائية السطحية (MEWA, 2021).

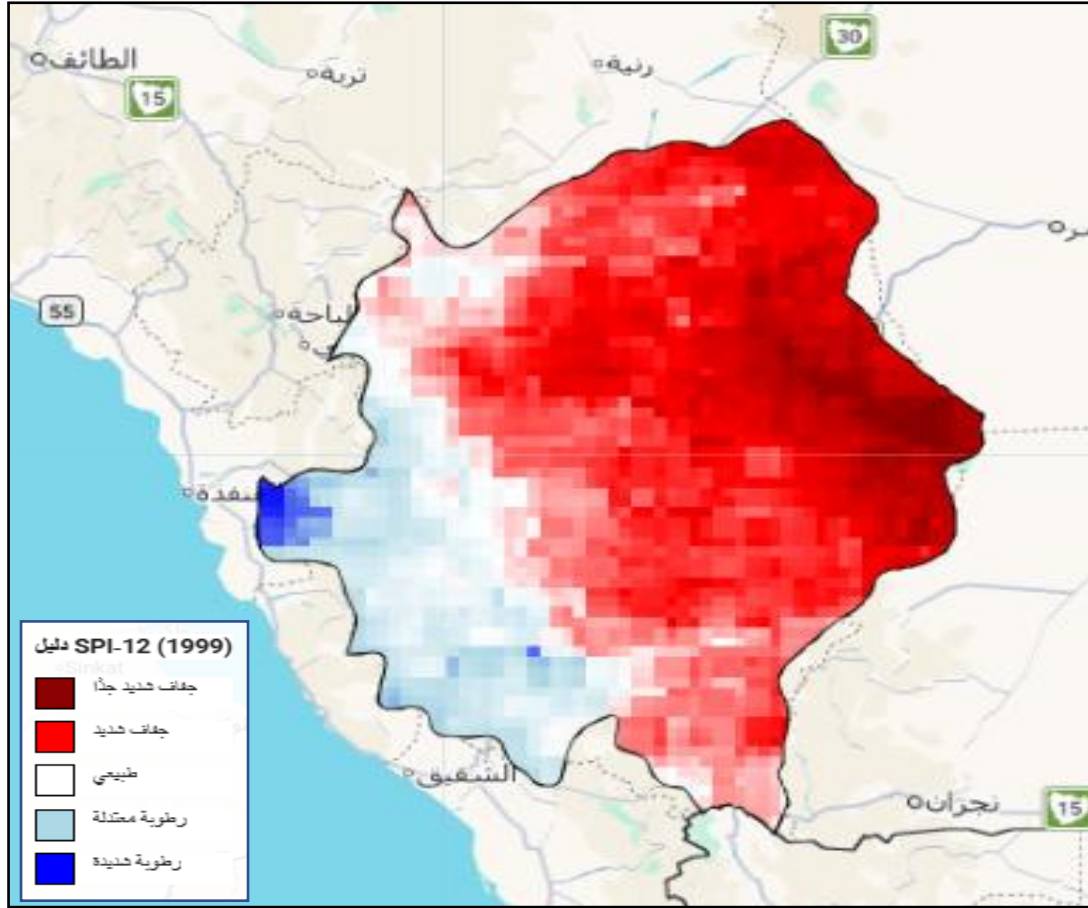


خريطة رقم (6) أودية منطقة عسير حسب الرتب النهرية وكمية الجريان بمنطقة الدراسة- المصدر / عمل الباحثين استناداً على Google Earth Engine

وبذلك، يتضح أن شبكة الأودية في عسير ليست مجرد مجاري مائية موسمية، بل هي نظام تصريف مترابط تحكمه التضاريس والارتفاعات والهطول، ويُعد من أكثر الأنظمة الهيدرولوجية تعقيداً في المملكة.

● مؤشر الجفاف SPI-12 وأثره على المخزون المائي بمنطقة عسير:

يُعد مؤشر الجفاف أحد أهم الأدوات المناخية والهيدرولوجية المستخدمة لتقييم حالة الرطوبة السطحية وتحديد مستويات الإجهاد المائي في البيئات الجافة وشبه الجافة. وعند تحليل مؤشر الجفاف في منطقة عسير، يتضح وجود تباين مكاني واضح يرتبط ارتباطاً وثيقاً بتوزيع الهطول وشبكة الأودية وطبيعة التضاريس. إذ تُظهر المناطق الجبلية الواقعة في الغرب والجنوب الغربي وهي (مناطق منشأ معظم الأودية) قيمًا منخفضة للجفاف نتيجة ارتفاع معدلات الأمطار وفعالية عمليات التغذية السطحية، مما يعزز من قدرة هذه المناطق على دعم المخزون المائي السطحي والجوفي على حد سواء (Almazroui, 2020). في المقابل، ترتفع قيم مؤشر الجفاف تدريجياً كلما اتجهنا نحو الشرق والجنوب الشرقي، كما نلاحظ ذلك في الخريطة (7) حيث تقل معدلات الهطول وتضعف كثافة شبكة التصريف، وتزداد المساحات التي تعتمد على الجريان السطحي القادم من المرتفعات. ويؤدي هذا التباين إلى تفاوت واضح في قدرة الأحواض المائية على تخزين المياه، إذ تُعد المناطق الداخلية أكثر عرضة للجفاف ونقص التغذية الجوفية مقارنة بالمناطق الجبلية.

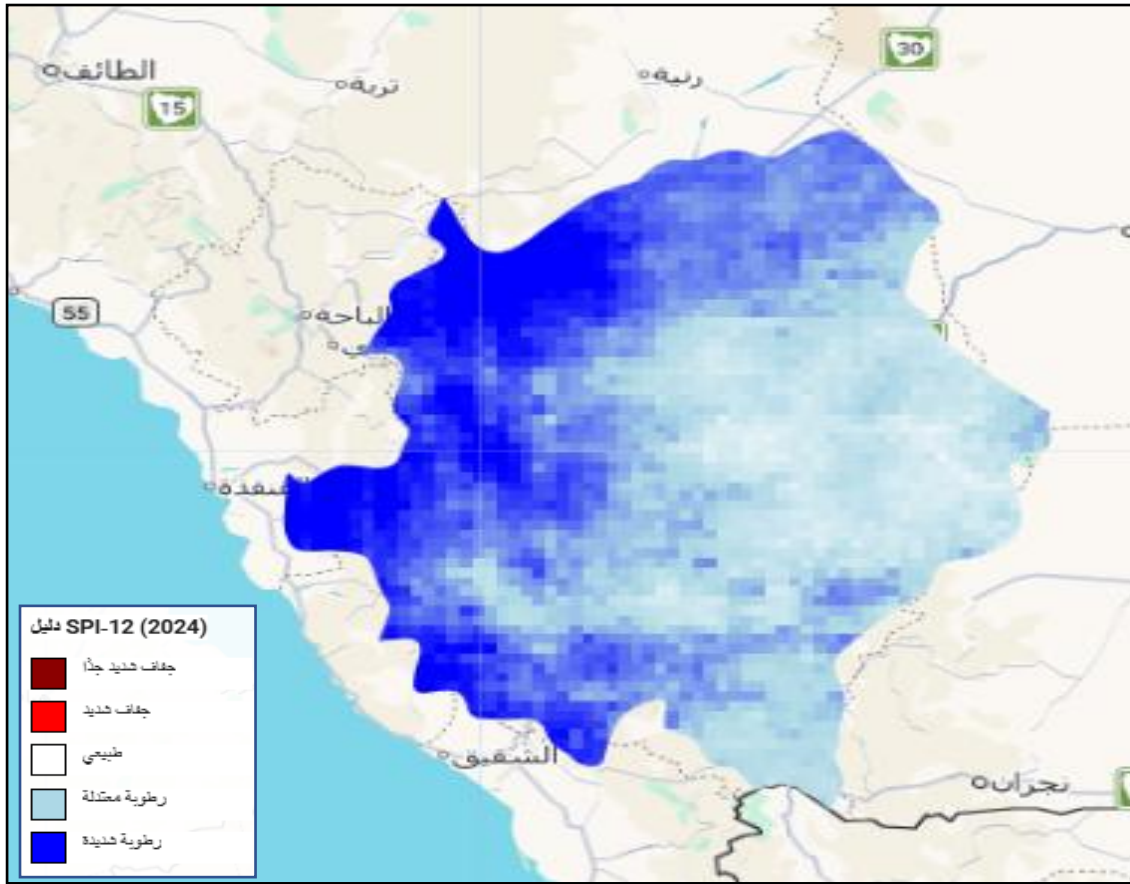


خريطة رقم (7) مؤشر الجفاف SPI لمنطقة الدراسة لعام 1999م- المصدر/ عمل الباحثين استناداً على Google Earth Engine

وقد أكدت الدراسات الهيدرولوجية أن حساسية الأودية في جنوب غرب المملكة للجفاف ترتبط بشكل مباشر بكمية الأمطار التي تستقبلها مناطق المنابع، وبقدرتها على نقل المياه نحو المناطق المنخفضة (Subyani, 2004; Al Saud, 2010).

وعند مقارنة هذه النتائج مع خريطة (8) لمؤشر الجفاف لعام 2024، يتضح أن النمط المكاني للجفاف خلال هذا العام يعكس نفس الاتجاهات الهيدرولوجية؛ إذ تُظهر الخريطة أن المناطق الشرقية والداخلية من عسير - مثل بيشة وتلث - سجلت قيمًا

سالبة واضحة في مؤشر SPI-12، مما يشير إلى جفاف متوسط إلى شديد. وتتوافق هذه القيم مع الانخفاض الملحوظ في الجريان السطحي في هذه المناطق، نظرًا لاعتمادها شبه الكامل على الجريان الوارد من المرتفعات الغربية. في المقابل، تُظهر أجزاء من المرتفعات الغربية والجنوبية الغربية قيمًا أقرب إلى الوضع الطبيعي أو رطوبة خفيفة، وهو ما يعكس استمرار استقبالها لكميات أمطار أعلى نسبيًا مقارنة بالمناطق الداخلية. هذا التباين المكاني بين الجفاف والرطوبة في خريطة 2024 يؤكد أن مؤشر الجفاف يُعد أداة حاسمة لفهم ديناميكية الموارد المائية في عسير، وأن تأثيره يمتد ليشمل كفاءة الأودية في نقل المياه، ومستويات التخزين في السدود، وإجمالي المخزون المائي المتاح في المنطقة.



خريطة رقم (8) مؤشر الجفاف SPI لمنطقة الدراسة لعام 2024م- المصدر/ عمل الباحثين استنادًا على Google Earth Engine

• دور مؤشر SPI-2024 في تفسير التغيرات في المخزون المائي والجريان السطحي بعسير:

تُعدّ تقديرات المخزون المائي- سواء السطحي أو الجوفي- مرتبطة بشكل مباشر بدرجة الجفاف التي تتعرض لها المنطقة، إذ يعتمد التغير في التخزين المائي على مبدأ الاتزان الهيدرولوجي الذي يربط بين الأمطار والجريان السطحي والتبخر-النتح (Chow et al., 1988). ويُظهر مؤشر الجفاف SPI لعام 2024 في منطقة عسير نمطًا مكانيًا واضحًا لانخفاض قيم المؤشر في الأجزاء الشرقية والداخلية من المنطقة، مما يشير إلى جفاف متوسط إلى شديد. هذا الانخفاض في قيم SPI يعكس تراجعًا في كميات الأمطار خلال الاثني عشر شهرًا السابقة، وهو ما يؤدي بطبيعته إلى انخفاض الجريان السطحي وتراجع معدلات التغذية المائية للأودية والسدود.

وتشير تقارير وزارة البيئة والمياه والزراعة إلى أن السدود الداخلية في عسير- مثل سد الملك فهد في بيشة- تعتمد بدرجة كبيرة على الجريان القادم من المرتفعات الغربية ذات الأمطار الأعلى نسبيًا (MEWA, 2021). وبما أن خريطة SPI لعام 2024

تُظهر جفافًا ملحوظًا في المناطق الداخلية مقارنة بالمرتفعات، فإن ذلك يفسر الانخفاض المتوقع في المخزون المائي المخزن في هذه السدود خلال هذا العام. كما تؤكد دراسات الاستشعار عن بُعد، مثل بيانات GRACE، أن فترات الجفاف الممتدة تؤدي إلى انخفاض واضح في التخزين الأرضي (Groundwater & Soil Moisture Storage)، خصوصًا في المناطق الجافة وشبه الجافة (Tapley et al., 2019).

وبذلك، فإن نتائج مؤشر SPI لعام 2024 لا تعكس فقط حالة الأمطار، بل تُعد مؤشرًا مباشرًا على تراجع المخزون المائي في المناطق التي سجلت قيمًا سالبة، نظرًا لانخفاض الجريان السطحي وضعف تغذية السدود والخزانات الجوفية. ويُبرز هذا الترابط أهمية استخدام مؤشر SPI كأداة تشخيصية لفهم ديناميكية الموارد المائية في عسير، وتقييم المخاطر المرتبطة بالجفاف طويل المدى، وتوجيه سياسات إدارة المياه في المنطقة.

• الموارد المائية الجوفية وتأثرها بالتغير المناخي:

المياه الجوفية مورد استراتيجي في المناطق الجافة مثل عسير، وتعتمد المملكة عليها بشكل كبير. وقد أكدت الدراسة أن: "التغيرات المناخية أدت إلى انخفاض معدلات التغذية الطبيعية للخزانات الجوفية".

وتشير الدراسات المحلية إلى أن ارتفاع الحرارة وتذبذب الأمطار يؤديان إلى تراجع مستويات المياه الجوفية (العبد اللطيف، 2020). كما أوضحت دراسات عالمية أن زيادة التبخر وتغير نمط الأمطار يسببان تذبذبًا كبيرًا في مستويات المياه الجوفية (Minea et al., 2025). وكما هو الحال بالنسبة لمنطقة عسير فقد انخفضت التغذية الجوفية بنسبة 18-27% خلال 30 سنة.

وأدى ارتفاع الحرارة بمقدار $0.4-0.7^{\circ}\text{C}$ أدى إلى زيادة التبخر. كما أدى تذبذب الأمطار أدى إلى تراجع منسوب المياه الجوفية بمعدل 0.6 م/سنة (العبد اللطيف 2020).

• الجفاف كمحرك رئيسي لتغيرات المخزون المائي وتدهور الغطاء النباتي: تحليل مدعوم بمؤشر SPI:

تُعدّ العلاقة بين الجفاف والمخزون المائي والغطاء النباتي علاقة مترابطة ومعقدة، إذ يتأثر كل عنصر منها بشكل مباشر بالتغيرات المناخية، وخاصة تذبذب الأمطار وارتفاع درجات الحرارة. ويُعدّ مؤشر الجفاف المعياري (SPI) أحد أهم الأدوات المستخدمة لتقييم أثر الجفاف على الأنظمة البيئية والهيدرولوجية، حيث يعكس الانحراف في كميات الأمطار عن معدلاتها الطبيعية، وبالتالي يُعدّ مؤشرًا مباشرًا على تراجع التغذية المائية وانخفاض المخزون السطحي والجوفي (McKee et al., 1993).

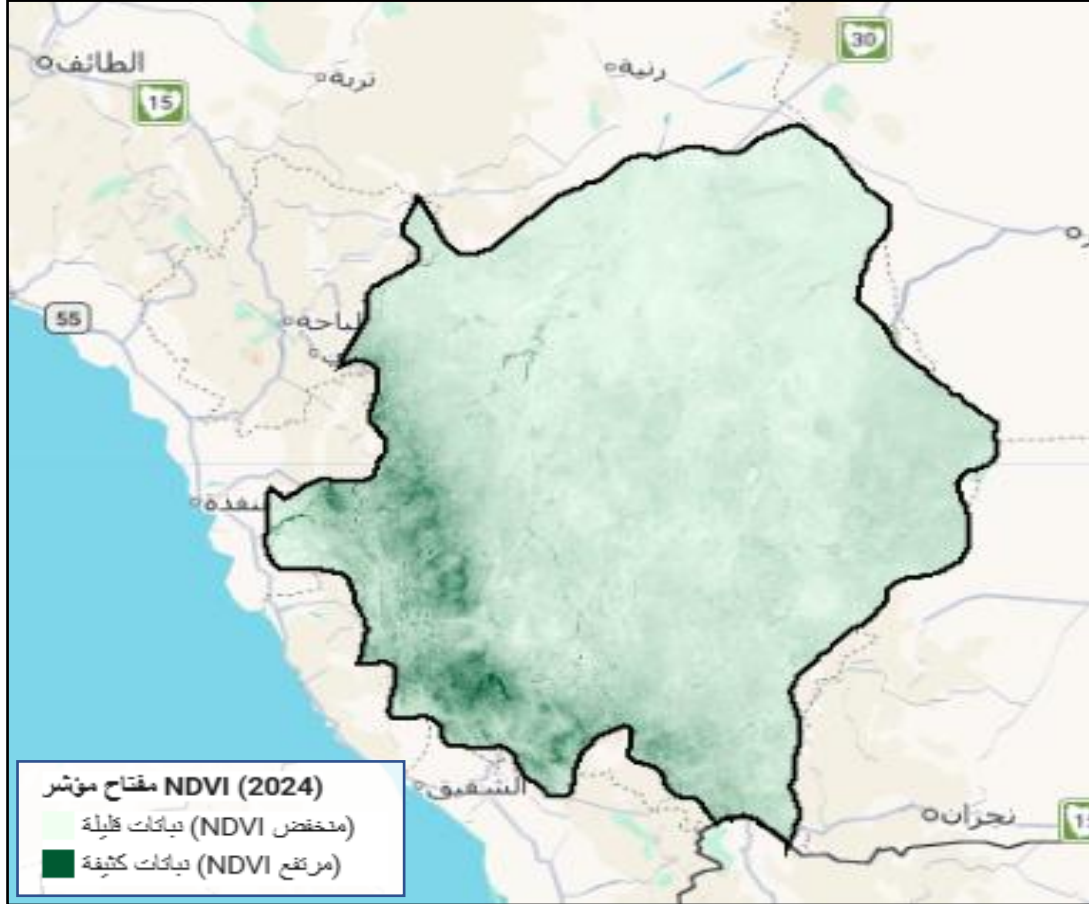
وتشير الدراسات الهيدرولوجية إلى أن انخفاض قيم SPI يرتبط عادةً بانخفاض واضح في المخزون المائي، سواء في السدود أو الخزانات الجوفية، وذلك نتيجة تراجع الأمطار وضعف الجريان السطحي، وهو ما تؤكد معادلة الاتزان المائي التي تربط بين الأمطار والتبخر والجريان والتخزين (Chow et al., 1988). وفي المناطق الجافة وشبه الجافة مثل منطقة عسير، يؤدي الجفاف الممتد إلى انخفاض كبير في التغذية الجوفية، خاصة في المناطق الداخلية التي تعتمد على الجريان القادم من المرتفعات الغربية ذات الأمطار الأعلى نسبيًا (MEWA, 2021).

أما بالنسبة للغطاء النباتي:

فإن تأثير الجفاف يظهر بوضوح في المناطق الطبيعية والمساحات المزروعة على حد سواء. فالنبات الطبيعي يعتمد بشكل مباشر على الأمطار الموسمية، وبالتالي فإن انخفاض SPI إلى قيم سالبة يؤدي إلى تراجع الكتلة الحيوية، وانخفاض مؤشر الغطاء النباتي NDVI، وتدهور المراعي الطبيعية (Anyamba & Tucker, 2012). كما أن المساحات الزراعية - خصوصًا التي تعتمد على الري السطحي - تتأثر بانخفاض المخزون المائي في السدود والآبار، مما يؤدي إلى تراجع الإنتاجية الزراعية وارتفاع معدلات الإجهاد المائي للنباتات (FAO, 2019).

وتُظهر الدراسات الحديثة أن العلاقة بين مؤشر الجفاف SPI والغطاء النباتي علاقة وثيقة؛ إذ إن انخفاض الأمطار يؤدي إلى انخفاض رطوبة التربة، وبالتالي انخفاض قدرة النبات على القيام بالعمليات الحيوية مثل التمثيل الضوئي والنمو، وهو ما ينعكس مباشرة في مؤشرات الغطاء النباتي المستمدة من الأقمار الصناعية مثل NDVI و EVI Vicente-Serrano et al., (2013). كما أن فترات الجفاف الطويلة تؤدي إلى تدهور الغطاء النباتي الطبيعي، وزيادة معدلات التصحر، وتراجع قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه، مما يفاقم من حدة الجفاف في دورة تغذية راجعة سلبية.

وتتسق هذه النتائج مع الخريطة (9) للغطاء النباتي لعام 2024 والتي تُظهر انخفاضًا واضحًا في قيم NDVI في المناطق التي سجّلت قيمًا سالبة في مؤشر SPI، خصوصًا في الأجزاء الشرقية والداخلية من منطقة عسير. ويعكس هذا الانخفاض تراجع الكتلة الحيوية للنبات الطبيعي وضعف نمو المساحات المزروعة نتيجة انخفاض المخزون المائي وتراجع معدلات الهطول المطري خلال العام. كما تُظهر الخريطة أن المناطق الجبلية الغربية التي سجّلت قيم SPI أقرب للوضع الطبيعي- احتفظت نسبيًا بمستويات أعلى من الغطاء النباتي- مما يؤكد حساسية الغطاء النباتي للتغيرات المناخية والجفاف طويل المدى.



خريطة رقم (9) مؤشر NDVI- مؤشر الغطاء النباتي لمنطقة الدراسة 2024 م- المصدر/ الباحثين استناداً على بيانات UCSB-CHG/CHIRPS

وبذلك، يتضح أن مؤشر الجفاف SPI لعام 2024 الذي سجّل قيمًا سالبة في أجزاء واسعة من المناطق الداخلية في عسير يمثل إشارة واضحة إلى تراجع المخزون المائي، وانخفاض معدلات الهطول المطري، وتدهور الغطاء النباتي الطبيعي والمزروع. وتؤكد هذه النتائج أهمية استخدام SPI كأداة تشخيصية لفهم ديناميكية الموارد المائية والغطاء النباتي، وتوجيه سياسات إدارة المياه والزراعة في المناطق الجافة.

• أثر الجفاف وتذبذب الأمطار على المناطق الزراعية والآبار السطحية:

يُعدّ الجفاف وتذبذب الأمطار من أكثر العوامل تأثيرًا في النظم الزراعية والموارد المائية السطحية، خاصة في البيئات الجافة وشبه الجافة مثل جنوب غرب المملكة العربية السعودية. فعندما تنخفض كميات الهطول أو تتوزع بشكل غير منتظم خلال الموسم الزراعي، تتراجع رطوبة التربة بشكل ملحوظ، مما يؤدي إلى انخفاض إنتاجية المحاصيل وتراجع الكتلة الحيوية للنباتات، وهو ما أكدته دراسات عديدة أشارت إلى أن تذبذب الأمطار يُعد العامل الأكثر حساسية في تحديد نجاح الموسم الزراعي في المناطق المطرية (Rockström & Falkenmark, 2015). كما أن الجفاف الممتد يؤدي إلى زيادة معدلات

التبخّر – النتج، مما يرفع الطلب المائي للمحاصيل ويجعلها أكثر عرضة للإجهاد المائي، خصوصاً في الأراضي الزراعية التي تعتمد على الأمطار الموسمية دون أنظمة ري مساندة. وقد أظهرت دراسات الاستشعار عن بعد أن مؤشرات الغطاء النباتي مثل NDVI تنخفض بشكل واضح خلال سنوات الجفاف، مما يعكس تدهوراً في صحة النباتات وانخفاضاً في الإنتاج الزراعي (Anyamba & Tucker, 2012).

أما بالنسبة للآبار السطحية والينابيع، فإن تأثير الجفاف يكون أكثر حدة، إذ تعتمد هذه الموارد بشكل مباشر على التغذية الجوفية السريعة الناتجة عن الأمطار الموسمية. وعندما تتراجع الأمطار أو تأتي على شكل عواصف قصيرة وعالية الشدة، فإن معظم المياه تتحول إلى جريان سطحي سريع بدلاً من أن تتسرب إلى باطن الأرض، مما يؤدي إلى انخفاض مستويات المياه في الآبار السطحية وجفاف بعضها بالكامل (Scanlon et al., 2006). وقد وثقت دراسات عالمية أن المناطق الجبلية وشبه الجافة تشهد انخفاضاً كبيراً في التغذية الجوفية خلال فترات الجفاف، مما ينعكس مباشرة على استدامة الآبار والموارد المائية المحلية (Treidel et al., 2012). وفي حالات الجفاف الشديد، تتراجع قدرة المجتمعات الزراعية على الاعتماد على الآبار السطحية، مما يضطرها إلى حفر آبار أعمق أو التحول إلى مصادر مائية بديلة ذات تكلفة أعلى. وبذلك، فإن الجفاف وتذبذب الأمطار لا يؤثران فقط على الإنتاج الزراعي، بل يمتدان ليشكلا تهديداً مباشراً لاستدامة الموارد المائية السطحية، ويزيدان من هشاشة النظم الزراعية والمعيشية في المناطق المعتمدة على الأمطار والآبار الضحلة. وفي الصورة التالية رقم (1) و (2) يتضح أثر الجفاف السطحي لأحدى الآبار السطحية في منطقة الدراسة كمثال للندرة وانخفاض مستوى المياه نتيجة التذبذب المناخي



صورة رقم (1) بئر سطحية جافة في منطقة الدراسة- المصدر/ الباحثين- تصوير ميداني ضمن منطقة وادي أبيها - ببشة



صورة رقم (2) بئر سطحية جافة في منطقة الدراسة- المصدر/ الباحثين- تصوير ميداني - ضمن منطقة وادي بيشة

• استراتيجيات التكيف المناخي في ظل ندرة المياه السطحية:

تتطلب ندرة المياه السطحية وتزايد الضغوط المناخية في المناطق الجافة وشبه الجافة اعتماد استراتيجيات تكيف متكاملة تهدف إلى تعزيز كفاءة استخدام الموارد المائية المتاحة وتقليل الهشاشة المناخية. وتشير تقارير الهيئة الحكومية الدولية لتغير المناخ (IPCC, 2022).

إلى أن التكيف الفعال يعتمد على ثلاثة محاور رئيسية:

1. إدارة الطلب على المياه.
2. وتنويع مصادر الإمداد.
3. تعزيز مرونة النظم البيئية والزراعية.

فمن ناحية إدارة الطلب، تُعدّ تقنيات الري الحديث مثل الري بالتنقيط والري بالنبض من أكثر الأساليب كفاءة في تقليل الفاقد المائي وزيادة إنتاجية المياه، إذ يمكن أن تخفض الاستهلاك الزراعي بنسبة تتراوح بين 30-50% مقارنة بالري التقليدي (FAO, 2017). كما أن استخدام أصناف نباتية مقاومة للجفاف، وتحسين مواعيد الزراعة، وتطبيق ممارسات حفظ التربة مثل التغطية العضوية، كلها إجراءات تقلل من التبخر وتحافظ على رطوبة التربة خلال فترات الجفاف.

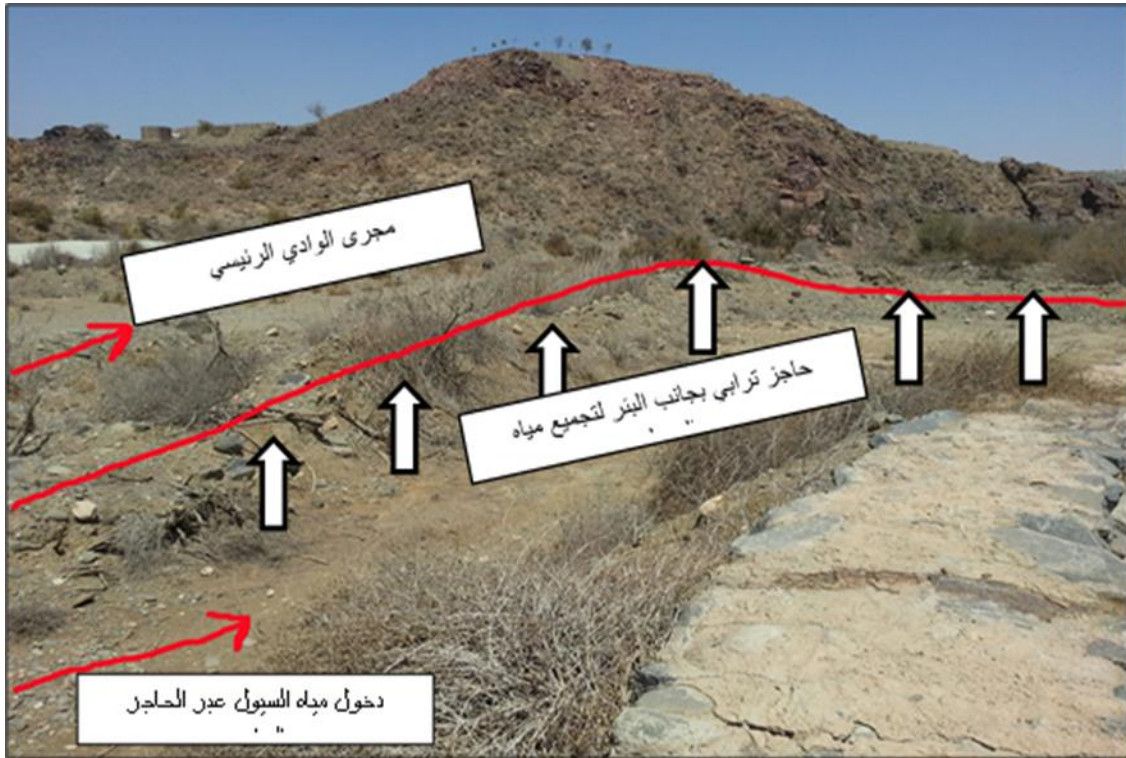
أما على مستوى تنويع مصادر المياه، فتوصي الدراسات الحديثة بتعزيز حصاد مياه الأمطار عبر إنشاء السدود الصغيرة، والحواجز الترابية، وخزانات تجميع مياه الأسطح، ويعتبر حصد مياه الأمطار والسيول من الوسائل المثلى لتوفير المياه خاصة في المناطق الجافة حتى ولو توافرت بها المياه الجوفية غير المتجددة (حيث يكون من الأفضل عدم استخدامها بدون دراسات مسبقة وعلى أساس علمي سليم). لذا قام مركز الأمير سلطان لأبحاث البيئة والمياه والصحراء بتنفيذ مشروع الملك فهد لحصد

وخرن مياه الأمطار والسيول بالمملكة والذي استهدف الاستفادة من تقنيات وأساليب حصد وخرن مياه الأمطار والسيول التي أثبتت جدواها في دول لها ظروف بيئية مشابهة للمملكة وذلك لتأمين المياه لسكان البادية وسقيا الماشية وتوفير بيئة نباتية تخفف من تأثير الظروف المناخية القاسية وتكون مصدراً للرعى والترفيه.

ولذلك تم استخدام أسلوبين رئيسيين من أساليب حصد وخرن مياه الأمطار والسيول هما:

1. إنشاء غدران صناعية (حفائر تخزينية) كبيرة يتم فيها تحويل جزء من مياه السيول المتدفقة في الأودية نتيجة هطول الأمطار نحو الغدران المعدة لهذا الغرض.
2. حفر آبار التغذية الصناعية بأعماق تتراوح بين 33 و40 متر (آل الشيخ-2006).

وبعيداً عن تنفيذ هذه مثل هذه المشاريع رسمياً فقد عمد العديد من ملاك المزارع على ضفاف الأودية كوادي أبها مثلاً لعمل أحواض تجميعية للمياه السيول بهدف الإبقاء على المياه الجارية أكبر وقت ممكن ليتم تغذية الآبار المجاورة لها وتتلخص الفكرة في عمل ما يسمى بـ عقوم ترابية اعتراضية موازية لمجرى الوادي تقوم على تغيير مسار السيول والعمل على انحرافها لتقترب أكثر بقدر الامكان من البئر لتتم بعد ذلك عملية التسرب المائي الى جوف الارض ومن ثم يرتفع منسوب المياه في الآبار وتتم الاستفادة منها بعد ذلك . وكما نلاحظ ذلك في الصورة رقم (3) والتي تمثل مظهراً منتشراً على طول مجرى وادي أبها.

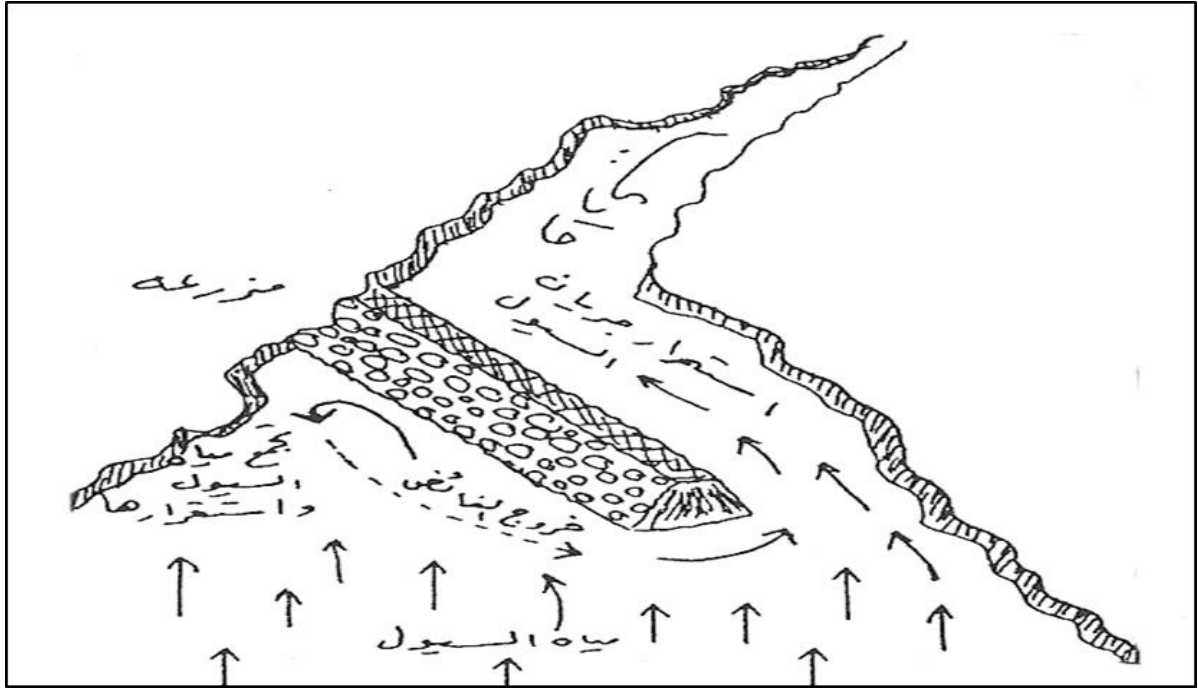


صورة رقم (3) طريقة عمل الاحواض التجميعية لمياه الامطار في منطقة الدراسة- المصدر/ الباحثين- تصوير ميداني- ضمن منطقة وادي أبها - ببشة

وبالإضافة إلى ما سبق وكما هو واقع ومشهود في منطقة الدراسة فقد تصور الباحثين طريقتين يمكن من خلالهما الاستفادة من المياه الجارية في الوادي وعدم ترك تلك المياه تذهب هدرًا متخذةً طريقها الى مصبها النهائي دون توقف ومن ثم ضياع فرصة الحصول على الحد الأدنى من تلك المياه .

• الطريقة الأولى: الحاجز الترابي المائل:

وتتلخص فكرته في عمل حاجزاً ترابياً مائلاً أشبه بالموازي لمجرى الوادي وهذا الطريقة تسمى أحياناً بـ (العقوم) بحيث يمكنه من خلال ذلك استقطاب جزء من المياه الجارية أثناء فترة السيول وتجميعها بالقرب من الآبار أو المزارع القريبة من الوادي وذلك يضمن توقف المياه مؤقتاً ويضمن أيضاً استمرار بقاء المياه فترة أطول مما يتيح الفرصة أمام عملية التسرب المائي لجوف الأرض. والرسم التالي (1) يوضح الطريقة الأولى وهي طريقة الحاجز الترابي أو العقوم.

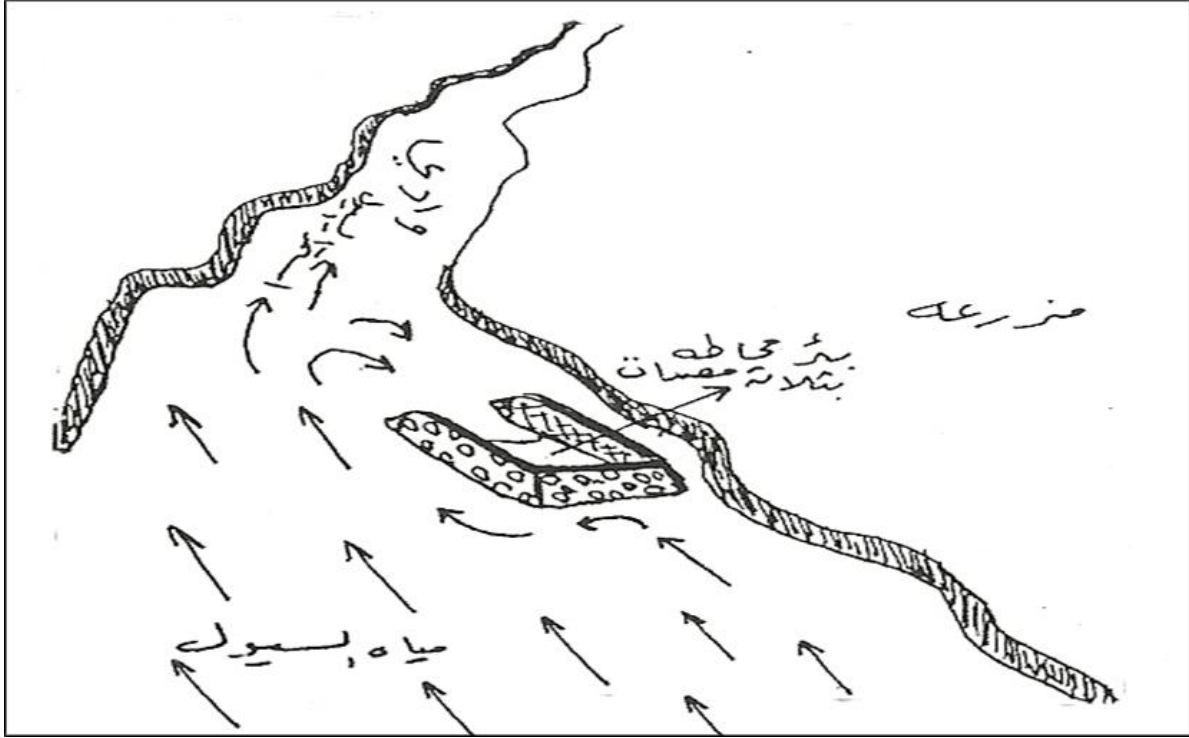


شكل رقم (3) طريقة الحاجز الترابي- (العقوم) في منطقة الدراسة- المصدر/ الباحثين

• الطريقة الثانية: طريقة المساقط المائية:

وتتمثل هذه الطريقة في عمل مساقط مائية أو شبه آبار على جانب الوادي لكي تتجمع فيها مياه السيول أثناء جريانها وبالتالي الاستفادة منها فيما بعد ويتم عمل تلك المساقط المائية كالتالي:

1. عمل حفر في جانب مجرى الوادي وليس في الوسط وذلك تجنباً لتعرض تلك الحفر للهدم جراء عملية الردم والترسيب الناتج عن حمولة السيول من الاتربة والطيني.
2. يعمل لها حاجزاً دائري يحيط بها من جميع الجهات ما عدا الجهة العكسية لجريان مياه السيول ويتم وضع جلاميد صخرية كبيرة على جوانب ذلك الحاجز للتقليل من قوة نحت وجرف الاتربة المكونة لذلك المسقط. وبهذا تتجه مياه السيول في المجرى بشكل طبيعي ويتجه جزء منها في هذا المسقط والذي يتم استغلاله فيما بعد بمثابة بئر مؤقتة تعمل على تغذية المنطقة المجاورة لها وبهذا يرتفع منسوب المياه في الآبار المجاورة. وكما هو موضح في الشكل (4) حيث تزيد الاستفادة من هذه الطريقة في حالة الجريان الطبيعي. وقد تفقد هذه الطريقة أو الطريقة السابقة فعاليتها عند ارتفاع منسوب السيول بشكل كبير أو عند ضخامة وقوة الجريان وغالباً ما يكون ذلك في المواسم المطيرة.



شكل رقم (4) طريقة المساقط المائية- (شبه آبار)- المصدر/ الباحثين

ولعل هذين النموذجين هما الأكثر شيوعاً في منطقة البحث وربما استخدمت طرقاً أخرى لتحقيق نفس الهدف. وقد ترتب على هذا عدة فوائد لعل من أبرزها :

1. ارتفاع مناسب المياه في الآبار بشكل خاص.

2. زيادة وتحسن الغطاء النباتي والذي يمثل بدوره عاملاً يساعد على التقليل من سرعة المياه الجارية.

كما تُعدّ خصائص سطح التجميع من أهم العوامل المحددة لكفاءة حصاد مياه الأمطار، إذ تتحكم بشكل مباشر في كمية المياه المتدفقة نحو الحفر الترايبيية أو الخزانات السطحية، وفي معدل التخزين الفعلي مقارنة بالمياه المفقودة عبر الجريان السطحي أو التبخر. فالإ جانب الميل الذي يجب ألا يتجاوز حدوداً معينة لتجنب انجراف التربة وفقدان المياه، وطول السطح الذي يحدد حجم الجريان المتولد والفترة الزمنية اللازمة لتعبئة الحوض (آل الشيخ، 2006).

• كما تلعب مجموعة من العوامل الهيدرولوجية والفيزيائية دوراً تكاملياً في تحديد كفاءة الموقع:

- أحد أهم هذه العوامل هو خشونة السطح (Surface Roughness)، إذ تؤدي الأسطح الخشنة- كالأسطح الحصوية أو ذات الغطاء النباتي الخفيف- إلى تقليل سرعة الجريان وزيادة فرصة تسرب المياه إلى التربة، مما يعزز التغذية الجوفية. أما الأسطح الملساء أو المضغوطة فتزيد من سرعة الجريان وتقلل من التسرب، مما يجعلها مناسبة للحصاد السطحي ولكن أقل كفاءة في دعم المخزون الجوفي. كما أن نوع التربة يمثل عاملاً حاسماً، حيث تُظهر التربة الرملية قدرة عالية على تسرب المياه، بينما تحتفظ التربة الطينية بالمياه لفترات أطول لكنها تقلل من معدلات التغذية الجوفية، وهو ما أكدته دراسات منظمة الأغذية والزراعة (FAO, 2003).

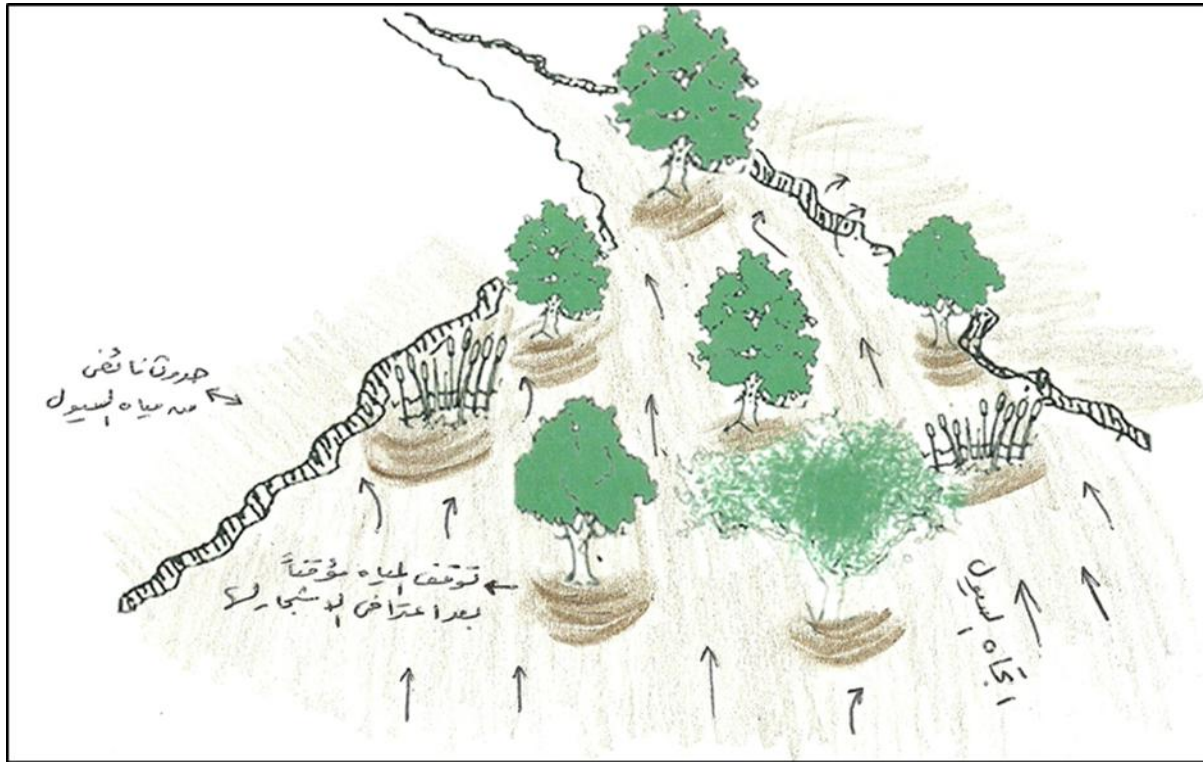
ويُعد الغطاء النباتي عنصراً مؤثراً آخر، إذ إن وجود غطاء نباتي كثيف يزيد من اعتراض الأمطار (Interception) ويقلل من كمية المياه المتجهة نحو الحفر، بينما تساهم الأسطح قليلة الغطاء في زيادة الجريان السطحي. كما أن اتجاه السطح بالنسبة

للرياح الرطبة ومسار العواصف المطرية يلعب دورًا في تحديد كمية الأمطار الفعلية التي تصل إلى منطقة الحجز، خاصة في المناطق الجبلية التي تتأثر بالرفع التضاريسي.

• النبات الطبيعي كعامل هيدرولوجي: عامل اعتراض مائي:

جميع المياه الجوفية التي تُضخ من أي نظام خزان جوفي لها بعض التأثير على مناسيب السطح الحر للمياه الجوفية. (غديف- 2006) وبالنسبة للتأثيرات على النظام البيئي فإن الاهتمام الرئيسي هو حيثما تتسبب التأثيرات المترامية للضخ في إحداث انخفاض كبير ودائم في مناسيب السطح الحر للمياه الجوفية. ويمكن لهذا الوضع أن ينشأ أيضًا، بدون استعمال مكثف للمياه الجوفية، في الحالات التي تعاني فيها مناطق التغذية لأنظمة المياه الجوفية من تغيرات كبيرة نتيجة لإزالة الغابات أو للتشجير، كلاهما يمكن أن يؤدي إلى إحداث تخفيضات كبيرة في تغذية الخزان الجوفي تحت بعض الظروف (غديف- 2006).

كما أن المياه كانت دائمة الجريان تزداد في مواسم الصيف عند هطول الأمطار وتبقى على منسوب معين طوال السنة حتى يحين موسم المطر القادم، ويزداد تبعًا لذلك الغطاء النباتي، والذي بدوره يقوم بالتوغل والانتشار في مجرى الوادي مشكلًا بذلك عامل يطلق عليه عامل الاعتراض حيث يلعب النبات بعدة أدوار يتم من خلالها تخفيف سرعة جريان الوادي من ناحية، وزيادة التسرب المائي إلى جوف الأرض من ناحية أخرى. كما يلاحظ في الشكل رقم (5).



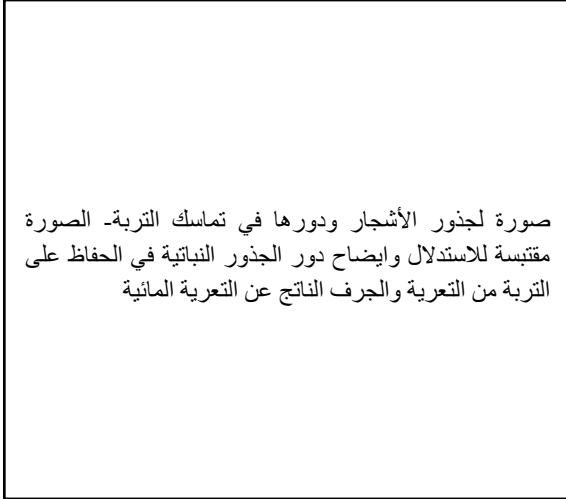
شكل رقم (5) وجود الأشجار كعامل اعتراض مائي بار- المصدر/ تصميم الباحثين

وفيما يلي بعض الأدوار التي يقوم بها النبات للمحافظة على المياه سواء بطريقة مباشرة أو غير مباشرة:

- النبات يعمل على تثبيت التربة:

تتوغل في الأرض النباتات بما لديها من جذور سواء جذور وتدية أم جذور عرضية وتعمل على تماسك التربة وحمايتها من عملية الانجراف ومن عملية النحت المصاحبة للمياه المتدفقة وتكمن مشكلة الانجراف بالنسبة للتربة في تعريتها وإزالة جزء

كبير منها بما تحمله من بذور للنباتات، كما تتسبب في زيادة الانحدار السطحي لمجرى الوادي وبهذا تزيد سرعة تدفق المياه دون عوائق يمكن أن تخفف من حدة الجريان أو حتى العمل على تهدئة المياه المتدفقة نحو مصب الوادي.. إذن العلاقة هنا طردية، كلما زادت سرعة المياه زاد معدل انجراف التربة. وفي المنظر التالي يحاول الباحث تأكيد هذه العملية التي تقوم بها جذور النباتات في تثبيت التربة والمحافظة عليها من الانجراف تبعاً لقوة المياه الجارية.



صورة لجذور الأشجار ودورها في تماسك التربة- الصورة
مقتبسة للاستدلال وإيضاح دور الجذور النباتية في الحفاظ على
التربة من التعرية والجرف الناتج عن التعرية المائية



صورة رقم (4) جذور النبات ودوره في تثبيت التربة- المصدر/ شبكة الانترنت .

كما تشير الدراسات الحديثة إلى ضرورة استخدام أدوات التحليل المكاني مثل GIS ونماذج الجريان السطحي لتحديد المواقع المثلى لحصاد المياه، وذلك عبر دمج الانحدار، نوع التربة، الغطاء النباتي، اتجاه الجريان، وكثافة الأمطار (Mbilinyi et al., 2007). وقد أثبتت التجارب الإقليمية في الأردن والمغرب والسودان أن إنشاء الحفر الترابية والسدود الصغيرة يُعد من أكثر الأساليب فعالية وأقلها تكلفة في البيئات الجافة، حيث ساهمت في تحسين إنتاجية المراعي، وزيادة مخزون المياه السطحية، ودعم المجتمعات الزراعية.

وهي تقنيات أثبتت فعاليتها في المناطق الجبلية مثل عسير حيث يتسم الهطول بالتذبذب المكاني والزمني (UNEP, 2018). كما يُعدّ إعادة استخدام المياه المعالجة أحد أهم محاور التكيف، إذ توفر هذه المياه مصدراً مستداماً للري وللأستخدامات الحضرية غير الصالحة للشرب، وقد تبنت العديد من الدول الجافة هذا النهج لتعويض النقص في المياه السطحية. وفيما يتعلق بالآبار الجوفية، فإن تطبيق سياسات الإدارة المستدامة للمياه الجوفية- مثل مراقبة السحب، وتحديد حصص الاستخدام، وتعزيز التغذية الاصطناعية- يسهم في الحد من الاستنزاف ويحافظ على مستويات المياه في الآبار السطحية والضحلة (Treidel et al., 2012).

وتشير الأدبيات العلمية إلى أن تعزيز مرونة النظم البيئية يمثل محوراً أساسياً في التكيف، إذ إن استعادة الغطاء النباتي الطبيعي، وحماية المناطق الرطبة، وإعادة تأهيل الأودية، كلها إجراءات تقلل من التعرية، وتزيد من قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه، وتدعم التغذية الجوفية الطبيعية (MEA, 2005). كما أن دمج نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في مراقبة الجفاف، ورصد تغيرات الغطاء النباتي، وتحديد المناطق الأكثر هشاشة، يوفر أدوات دقيقة لصناع القرار لتوجيه الاستثمارات نحو المناطق الأكثر عرضة للضغط المائي. وبذلك، فإن التكيف المناخي في ظل ندرة المياه السطحية يتطلب نهجاً متعدد المستويات يجمع بين التقنيات الحديثة، والإدارة المستدامة، والسياسات التنظيمية، كما يولي مركز الأمير سلطان لأبحاث البيئة والمياه والصحراء اهتماماً كبيراً بتطوير هذه التقنيات، نظراً لفعاليتها العالية وانخفاض تكلفتها مقارنة بالحلول الهندسية الكبرى. كما أن هذه الأساليب ليست جديدة على المنطقة، إذ تعود جذورها إلى ممارسات تاريخية مثل درب زبيدة الذي اعتمد على إنشاء برك وحفر لجمع مياه الأمطار لخدمة الحجاج والمسافرين. الجديد اليوم هو الحاجة الملحة لإحياء هذه التقنيات وتطويرها باستخدام أدوات حديثة لضمان استدامة الموارد المائية، وتقليل الضغط على المياه الجوفية المحدودة، وتعزيز قدرة المجتمعات المحلية على التكيف مع التغير المناخي وندرة المياه.

الخاتمة والتوصيات

تُظهر المعطيات المناخية خلال العقود الأخيرة أن التذبذب الكبير في الهطول المطري، مقترناً بارتفاع درجات الحرارة وزيادة معدلات التبخر، قد أدى إلى ضغوط متزايدة على الموارد المائية السطحية والجوفية في المناطق الجبلية مثل منطقة عسير. فعدم انتظام الأمطار وتراجع كمياتها السنوية يحدان من التغذية الجوفية ويقللان من تدفقات الأودية، بينما يؤدي ارتفاع الحرارة وإلى زيادة الفاقد المائي من التربة والنبات، مما يفاقم من شدة الجفاف الهيدرولوجي ويؤثر مباشرة في الإنتاج الزراعي واستدامة الآبار السطحية. وتشير الدراسات العلمية إلى أن هذه التغيرات المناخية تمثل تحدياً مركباً، إذ تؤثر في الدورة الهيدرولوجية بأكملها، وتزيد من هشاشة النظم البيئية والزراعية في البيئات الجافة وشبه الجافة (IPCC, 2022؛ Treidel et al., 2012).

وفي ظل هذه الظروف، تبرز الحاجة إلى تبني استراتيجيات تكيف فعالة تضمن الاستخدام الأمثل للمياه، وتعزز قدرة المجتمعات الزراعية على الصمود. وتشمل هذه الاستراتيجيات تحسين كفاءة الري عبر تقنيات الري بالتنقيط والري بالنبض، وتطوير ممارسات حفظ التربة، واستخدام أصناف نباتية مقاومة للجفاف، إضافة إلى التوسع في حصاد مياه الأمطار عبر السدود الصغيرة والحوجز الترابية والخزانات السطحية، وهي تقنيات أثبتت نجاحها في البيئات الجبلية ذات الأمطار المتذبذبة. كما تشير الدراسات إلى أن بعض المحاصيل—مثل البرسيم، والموز، والذرة الصفراء—تُعد من أكثر المحاصيل استهلاكاً للمياه، بينما تُعد محاصيل مثل الشعير، والدخن، والسوسم، واللوزيات، والزيتون من أفضل الخيارات الزراعية في المناطق ذات الموارد المائية المحدودة نظراً لقدرتها العالية على تحمل الجفاف (FAO, 2017).

وتتسق هذه الجهود مع توجهات رؤية المملكة 2030 التي أولت ملف المياه أهمية استراتيجية، من خلال تعزيز كفاءة استخدام المياه في الزراعة، وتطوير البنية التحتية للمياه المعالجة، والتوسع في مشاريع حصاد مياه الأمطار، مثل مشروع إعادة تأهيل المدرجات الزراعية في عسير والباحة والطائف، ومبادرات السدود الصغيرة، ومشاريع إعادة استخدام المياه المعالجة ثلاثياً، إضافة إلى برامج التحول الزراعي التي تهدف إلى تقليل الهدر المائي ورفع كفاءة الإنتاج. كما تسعى الدولة إلى تعزيز الأمن المائي عبر مبادرات كبرى مثل المركز الوطني لإدارة النفايات المائية، والمركز الوطني للرقابة على المياه، ومشاريع التحلية بالطاقة المتجددة، مما يعكس رؤية مستقبلية واعية لمواجهة تحديات التغير المناخي.

المراجع العربية:

1. المجالي، محمد. (2015). التغير المناخي وتأثيره على الموارد المائية في الأردن. مجلة جامعة مؤتة للبحوث والدراسات، (2)30، 250-233.
2. القباطي، عبد الرحمن. (2016). تأثير التغير المناخي على الموارد المائية في المرتفعات الجبلية في اليمن. مجلة العلوم البيئية، (3)12، 162-145.
3. الحربي، محمد بن عبد الله. (2017). التغير المناخي وأثره على الموارد المائية في المناطق الجافة وشبه الجافة. مجلة دراسات البيئة، (1)9، 78-55.
4. الشهري، أحمد بن محمد. (2018). أثر التغيرات المناخية على الموارد المائية في المملكة العربية السعودية: دراسة تحليلية للهطول والتغذية الجوفية في المناطق الجبلية. مجلة العلوم البيئية، (2)14، 118-95.
5. السلمي، عبد الرحمن بن علي. (2019). ندرة المياه في المناطق الجنوبية الغربية للمملكة العربية السعودية في ظل التغيرات المناخية: التحديات واستراتيجيات التكيف. مجلة الجغرافيا العربية، (3)22، 192-175.
6. العبد اللطيف، عبد الله. (2020). تأثير التغيرات المناخية على الموارد المائية الجوفية في جنوب غرب المملكة العربية السعودية. مجلة جامعة الملك سعود - العلوم الهندسية، (4)32، 263-250.
7. الشهراني، عبد الله بن سعيد. (2021). أثر السدود على تغذية المياه الجوفية في المناطق الجافة: دراسة حالة سد وادي بيشة. مجلة جامعة الملك خالد للعلوم الطبيعية والهندسية، (1)33، 105-89.
8. وزارة الزراعة والمياه - المملكة العربية السعودية.

المراجع غير العربية:

1. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
2. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, 179–184
3. Barros, A. P., & Lettenmaier, D. P. (1994). Dynamic modeling of orographically induced precipitation. *Reviews of Geophysics*, 32(3), 265–284.
4. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO, Rome.
5. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO, Rome.
6. Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, W. M., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20(15), 3335–3370.
7. Yang, S. L., Milliman, J. D., Li, P., & Xu, K. H. (2008). Significant sediment load reduction in the Yangtze River due to dam construction. *Geophysical Research Letters*, 35(14), L14407
8. Evans, R. (2009). *The impact of climate change on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations*. Washington, DC: The World Bank
9. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.
10. Al Saud, M. (2010). Morphometric analysis of Wadi Aurnah drainage basin, western Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 3(3), 299–314
11. Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2012). Analysis of global land surface conditions from 1982–2010 using AVHRR vegetation indices. *Remote Sensing*, 4(7), 1855–1878
12. Al-Ghamdi, K. A. (2011). Morphometric analysis of Wadi Yalamlam basin, western Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(1–2), 1–12.
13. Treidel, H., Martin-Bordes, J. L., & Gurdak, J. J. (Eds.). (2012). *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. International Association of Hydrogeologists (IAH) International Contributions to Hydrogeology, Vol. 27. CRC Press

14. Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2012). Analysis of global land surface conditions from 1982–2010 using AVHRR vegetation indices. *Remote Sensing*, 4(7), 1855–1878.
15. Chowdhury, S., & Al-Zahrani, M. (2015). Implications of climate change on water resources in Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(7), 2225–2237
16. Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., ... & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5), 358–369
17. UNESCO & UN-Water. (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris: UNESCO
18. Almazroui, M. (2020). Rainfall climatology over Saudi Arabia. *Climate Research*, 79(2), 139–155.
19. Davamani, V., John, J. E., Poornachandhra, C., Gopalakrishnan, B., Arulmani, S., Parameswari, E., Santhosh, A., Srinivasulu, A., Lal, A., & Naidu, R. (2024). A Critical Review of Climate Change Impacts on Groundwater Resources: A Focus on the Current Status, Future Possibilities, and Role of Simulation Models. *Atmosphere*, 15(1), 122
20. Bhagole, G. U., Patil, S., & Raut, P. (2025). Climate change impacts on surface water quality: A comprehensive review of thermal and hydrological alterations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(2), 1–18.
21. Minea, I., Crăciun, I., & Sandu, I. (2025). Climate change impacts on groundwater resources: A scientific synthesis of recent global research. *Water Resources Management*, 39(1), 112–130.