تكامل المؤشرات الطيفية ومؤشر SPEI لرصد الجفاف غير المنظور مكانياً وزمانياً في منطقة سيد صادق باستخدام نظم المعلومات الجغرافية

أ.م. د بلسم شاكر شنيشل
الجامعة العراقية / كلية الآداب / العراق
balsam_shneshil@aliraqia.edu.iq

Integration of Spectral Indices and the SPEI for Spatiotemporal Detection of Invisble Drought in the Said Sadiq Region Using Geographic Information Systems (GIS)

Assistant Professor Balsam Shaker Shnishal
Iraqi University / College Arts / Iraq

المستخلص

يهدف هذا البحث إلى رصد وتحليل الجفاف غير المنظور في منطقة سيد صادق شمال شرق العراق خلال المدة ١٩٨١–٢٠٢٤، من خلال تكامل مؤشر الجفاف المناخي القياسي (SPEI) مع المؤشرات الطيفية المستخرجة من بيانات الأقمار الصناعيةNDVI) ، NDWI، VCI).يُعرف الجفاف غير المنظور بأنه ذلك النوع من الجفاف الذي لا يظهر في بيانات الهطول التقليدية، بل يُكشف من خلال تدهور الغطاء النباتي أو رطوبة التربة. تم احتساب مؤشر SPEI بناءً على التوازن المائي (P - PET) باستخدام معادلة-Penman Monteith، في حين تم تحليل المؤشرات الطيفية مكانياً وزمانياً باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية. أظهرت النتائج تذبذبات واضحة في مؤشرSPEI ، وتسجيل فترات جفاف حاد خاصة في سنوات مثل ١٩٩٩ و٢٠٢١. أما التحليل الطيفي فبيّن تدهوراً نباتياً في مساحات واسعة لم تُسجل كمواسم جفاف مناخي. كما تم توظيف تحليل LISA لتحديد البقع الساخنة للجفاف غير المنظور، حيث تميزت فئة Low-Low بنسبة ٢.٠٩٪ كمؤشر لبؤر حرجة مستقرة جافة. وأظهرت خريطة الجفاف غير المنظور أن نحو ٥.٢٩٪ من مساحة المنطقة تعاني من تدهور غير ظاهر مناخياً. تؤكد النتائج أهمية الدمج بين المؤشرات وتحليل الأنماط المكانية لتعزيز الإنذار المبكر وخطط التكيف في البيئات شبه الجافة.

الكلمات المفتاحية: الجفاف غير المنظور، SPEI، NDVI، VCI، NDWI، تحليل السلاسل الزمنية، تغير المناخ.

Abstract

This study aims to monitor and analyze hidden drought in the Said Sadiq region of northeastern Iraq during the period 1981–2024 by integrating the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) with satellite-derived spectral indices (NDVI, NDWI, VCI). Hidden drought refers to conditions not evident in traditional rainfall data but manifested through vegetation degradation or soil moisture decline. The SPEI was calculated based on the water balance (P - PET) using the Penman-Monteith equation, while spectral indices were analyzed both spatially and temporally using Geographic Information Systems (GIS). Results revealed significant temporal fluctuations in SPEI, with severe drought events particularly evident in years such as 1999 and 2021. Spectral analysis showed vegetation and moisture degradation in areas not classified as drought years by climate indices alone. Moreover, the Local Indicators of Spatial Association (LISA) analysis was employed to identify spatial clustering patterns of hidden drought. The Low-Low category, indicating persistent dry hotspots, represented 2.09% of the area. The final hidden drought map revealed that approximately 5.29% of the region suffers from environmentally degraded zones that are not reflected in climatic drought records. These findings highlight the importance of combining spectral and climatic indicators with spatial pattern analysis to enhance early warning systems and support drought adaptation planning in semi-arid environments.

Keywords: Invisible Drought, SPEI, NDVI, VCI, NDWI, Time Series Analysis, Climate Change.

بسم الله الرحمن الرحيم

أولا : المقدمة:

يُعدّ الجفاف أحد أكثر التحديات البيئية تعقيدًا وتأثيرًا على النظم البيئية والزراعة والموارد المائية، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة مثل شمال شرق العراق، ومن بين أنواع الجفاف يبرز الجفاف غير المنظور كأحد أصعب الأنواع من حيث الرصد، إذ لا يمكن اكتشافه بسهولة عبر مؤشرات الهطول التقليدية فقط، ويحدث هذا النوع من الجفاف عندما تتأثر رطوبة التربة أو الغطاء النباتي بشكل كبير رغم وجود معدلات هطول تبدو معتدلة، وتُعد هذه الظواهر شائعة بشكل خاص في مناطق مثل قضاء سيد صادق التابع لمحافظة السليمانية، اذ تتداخل الظروف المناخية والتضاريس الجبلية لتشكيل ديناميكيات معقدة للجفاف.

تقع المنطقة عند ارتفاع يبلغ نحو 500متر فوق مستوى سطح البحر، وتتميز بمناخ شبه جاف، مع صيف حار وجاف وشتاء بارد ورطب، ويتركز الهطول المطري عادة بين شهري نوفمبر وأبريل، ومن أبرز العناصر المناخية المؤثرة على حالات الجفاف في هذه المنطقة :الهطول، البخر–نتح، درجات الحرارة، الرطوبة النسبية، الإشعاع الشمسي، وسرعة الرياح.

يهدف هذا البحث إلى تحليل الاتجاهات الزمنية للجفاف غير المنظور في منطقة سيد صادق، من خلال دمج البيانات المناخية وتقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، واستخدام مؤشر الجفاف المناخي SPEI لمتابعة التغير في توازن المياه، إلى جانب استخدام المؤشرات الطيفية مثل NDVI، VCI، NDWI المستخلصة من صور الأقمار الصناعية للكشف عن الإجهاد النباتي ونقص رطوبة التربة.

- **المشكلة:**

يُعد الجفاف غير المنظور من أصعب أنواع الجفاف من حيث الاكتشاف، إذ لا تظهر مؤشراته بوضوح في بيانات الهطول التقليدية، بل تتجلى من خلال تدهور في الغطاء النباتي أو رطوبة التربة، وتعاني منطقة سيد صادق من تباين مناخي وتضاريسي يزيد من تعقيد رصد هذا النوع من الجفاف، كيف يمكن الكشف بدقة عن الجفاف غير المنظور في منطقة سيد صادق رغم غياب المؤشرات التقليدية في بيانات الهطول المناخي؟

- **الفرضية:**

يفترض البحث أن الاعتماد على بيانات الهطول فقط لا يكشف بدقة عن الجفاف غير المنظور في منطقة سيد صادق، وأن دمج مؤشر SPEI مع المؤشرات الطيفية NDVI، VCI، NDWIيُمكّن من تمثيل أدق وأشمل لهذا النوع من الجفاف زمانيًا ومكانيًا.

- **<u>أهداف الدراسة</u>**

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الجفاف غير المنظور في منطقة سيد صادق خلال المدة ١٩٨١–٢٠٢٤، من خلال دمج مؤشر SPEI مع المؤشرات الطيفيةNDVI) ، VCI، (NDWIلرصد التغيرات الزمانية والمكانية، وتحديد المدد الحرجة للجفاف غير المرصود مناخيًا، باستخدام نظم المعلومات الجغرافية لدعم التخطيط الزراعي وإدارة الموارد في البيئات شبه الجافة.

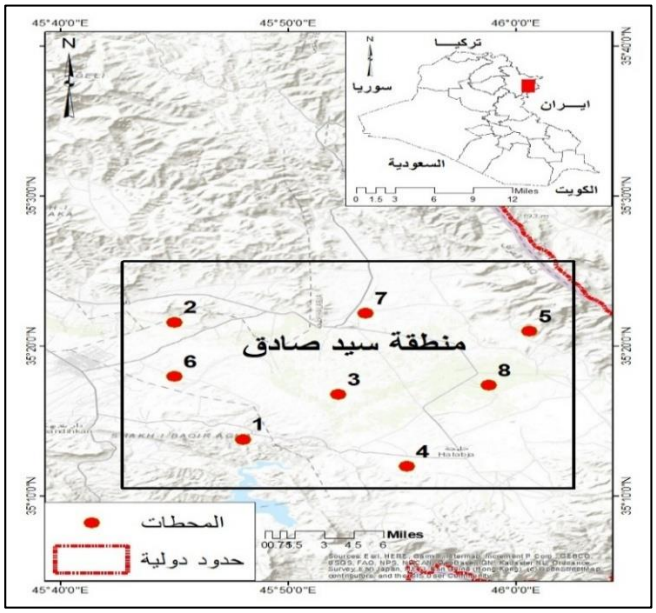
- **الأهمية**

تُبرز هذه الدراسة أهمية الكشف المبكر عن الجفاف غير المنظور لحماية الغطاء النباتي واستدامة الموارد المائية، خاصة في ظل التغيرات المناخية، كما توفر أساسًا علميًا لتطوير نظم الإنذار المبكر ودعم سياسات إدارة المياه والتخطيط الزراعي.

- **موقع المنطقة من العراق**

تقع منطقة سيد صادق ضمن المنطقة الشمالية الشرقية للعراق، وتتميز بتضاريس جبلية وشبه جبلية، ما يجعلها منطقة انتقالية مناخياً بين السهول المنخفضة غربًا والجبال العالية شرقًا، وتتنوع خصائصها الطبوغرافية، ما يؤثر بشكل مباشر في أنماط الهطول والتبخر واحتباس الرطوبة، وتتبع إداريًا محافظة السليمانية ضمن إقليم كردستان، يحدها من الشرق الشريط الجبلي الموازي للحدود الإيرانية، ومن الغرب السهول المنبسطة التابعة لوسط الإقليم، مما يمنحها موقعًا استراتيجيًا ومناخيًا متنوعًا، تقع منطقة الدراسة فلكيا عند خط عرض °35.314 –°35.00 شمالًا وخط طول °45.44 –°46.20 شرقًا، وبالارتفاع عن مستوى سطح البحر 500م، ينظر الشكل (١) .

الشكل (١) موقع منطقة الدراسة من العراق



المصدر: المصدر: اعتمادا على ، وزارة الموارد المائية ، المساحة العامة ، شعبة نظم المعلومات الجغرافية ، ٢٠٢٠.
https://www.google.com

ثانيا: الأدوات والأساليب والمعايير

- مؤشر قياس الجفاف بناءً على التوازن المائي الهطول(SPEI– PET)، يتم حسابه باستخدام معادلة:Penman–Monteith PET .
- المؤشرات الطيفية:NDVI ، NDWI، VCIمن صور.Sentinel–2,MODIS ، جدول (١)
- التحليل المكاني :باستخدام نظم المعلومات الجغرافية.
- تحليل السلاسل الزمنية لتحديد التغيرات والاتجاهات على مدى العقود الاربع الماضية.(1981–2024)
-

جدول(١) المؤشرات المناخية والطيفية المستخدمة في تحليل الجفاف

اسم المؤشر بالعربي	English Name	المعيار المستخدم	المصدر/الأداة
درجة حرارة سطح الأرض	Land Surface Temperature (LST)	LST = (DN × 0.02) − 273.15	MODIS (MOD11A2), NASA POWER, Google Earth Engine
مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	NDVI = (B8 − B4) / (B8 + B4)	Sentinel-2, MODIS, Google Earth Engine
مؤشر حالة الغطاء النباتي	Vegetation Condition Index (VCI)	VCI = ((NDVI_current − NDVI_min) / (NDVI_max − NDVI_min)) × 100	محسوب من NDVI التاريخي عبر Sentinel-2
مؤشر رطوبة التربة/المياه	Normalized Difference Water Index (NDWI)	NDWI = (B3 − B8) / (B3 + B8)	Sentinel-2, MODIS, Google Earth Engine
مؤشر الجفاف المناخي المعياري	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	SPEI = f (P − PET)	المناخ التاريخي، معادلة Penman-Monteith

المصدر: : بيانات قواعد بيانات الأقمار الصناعية والبيانات المناخية العالمية مثل MODIS، Sentinel-2، NASA POWER، Google Earth Engine،

ثالثا: المنهجية والإجراءات البحثية:

الدراسة تقوم على المنهج التحليلي المكاني والزماني، باستخدام الأساليب الإحصائية وتحليلات نظم المعلومات الجغرافية، وبرمجيات مثل QGIS أو ArcGIS و Excel أو Python لتحليل البيانات الزمنية والمكانية للمدة ١٩٨١–٢٠٢٤.

١. جمع البيانات المناخية:

تم جمع البيانات المناخية الشهرية لمنطقة الدراسة من منصة NASA POWER Prediction of Worldwide Energy Resource، وهي منصة معتمدة عالميًا لتوفير بيانات مناخية طويلة المدى معتمدة على النمذجة والتحقق بواسطة الأقمار الصناعية، وأعتمادها لتمثيل الظروف المناخية في المنطقة بدقة عالية جدول(٢) والشكل (١) يوضح المحطات المنتخبة للبيانات المناخية من الموقع.

جدول (٢) محطات مناخية ومؤشر الجفاف

المحطة	دائرة العرض	خط الطول	مؤشر الجفافSPEI
S1	45.8	35.23	-2.648
S2	45.75	35.36	2.195
S3	45.87	35.28	2.195
S4	45.92	35.2	-2.647
S5	46.01	35.35	3.175
S6	45.75	35.3	2.195
S7	45.89	35.37	2.195
S8	45.98	35.29	3.175

المصدر: NASA POWER Prediction of Worldwide Energy Resource ، لحساب التبخر-نتح المرجعيReference Evapotranspiration PET باستخدام معادلة-Penman Monteith،

وشملت المتغيرات المناخية المستخدمة درجة حرارة السطح Land Surface Temperatureالإشعاع الشمسي Solar Radiation، سرعة الرياح Wind Speed

، والرطوبة النسبيةRelative Humidity ، وجميعها تُعد عناصر مناخية مؤثرة في حساب مكونات التوازن المائي، وهذه المتغيرات تم اعتمادها لحساب التبخر–نتح المرجعيReference Evapotranspiration PET باستخدام معادلة-Penman Monteith، وتُعد المعادلة القياسية التي توصي بها منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة(FAO) لقياس فقدان المياه بالتبخر والنتح ضمن الدراسات المناخية والزراعية (Allen et al., 1998).

٢. حساب مؤشرSPEI:

يُعد مؤشر SPEI من المؤشرات المعتمدة لقياس شدة وتكرار الجفاف من خلال دمج الهطول المطري مع التبخر نتح المرجعي(PET) ، وهو هيتيح تمثيلًا أكثر دقة لتغيرات التوازن المائي، يتم حسابه من احتساب الفرق بين الهطول الشهري (P) والتبخر نتح المرجعي (PET) وذلك استنادًا إلى ما طرحه **(Vicente-Serrano et al. (2010))** في تطويرهم لمؤشر SPEI.

$$D = P - PET$$

اذ يمثل

- D الفائض أو العجز المائي الشهري، او الفرق بين الهطول المطري الشهري.
- (P) التبخر–النتح المرجعي المحتمل.
- (PET) ويشير الى الفرق لحالة التوازن المائي؛ فإذا كانت القيمة موجبة أي (P PET >) فهذا يدل على وجود فائض مائي وظروف مناخية رطبة، بينما تعني القيم السالبة وجود عجز مائي وظروف جفاف أي P< PET .

يتم تحويل سلسلة قيم D إلى توزيعات احتمالية باستخدام توزيعLog–logistic ، الأنسب لتمثيل خصائص السلاسل الهيدرولوجية، ثم تُحوّل القيم إلى معيارية لمقارنة

شدة الجفاف بين الفترات، باستخدام مكتبات مثل SPEI في R و climate indices و SciPy Stats في Python تعكس المدد القصيرة (١–٣ أشهر) الجفاف الزراعي، بينما تكشف المدد الطويلة (٦–١٢ شهرًا) عن الجفاف الهيدرولوجي وتأثيره على المياه الجوفية والسطحية. يُصنّف الجفاف وفقًا لقيم :SPEI من > ٢.٠ رطوبة شديدة جداً ، ١.٥ الى ١.٩٩ رطوبة شديدة ، ١.٠ الى ١.٤٩ رطوبة معتدلة ، – ٠.٩٩ الى ٠.٩٩ لا يوجد جفاف (طبيعي) ، –١.٠ إلى –١.٤٩ معتدل، من –١.٥ إلى –١.٩٩ شديد، وأقل من –٢.٠ شديد جدًا.

أثبت مؤشر SPEI موثوقيته لدمجه تأثير الحرارة في التبخر، مقارنة بالمؤشرات المعتمدة على الهطول فقط. وفق الجدول (٣)، تُظهر النتائج أن معظم السنوات لم تسجل جفافًا، مع بعض الفترات الحادة في أوائل وأواخر التسعينيات وسنة ٢٠٢١. مكانيًا، سجّلت محطات S5 و S8تذبذبًا أكبر، بينما أظهرت S1 و S4استقرارًا نسبيًا، ما يعكس تباين التضاريس والغطاء النباتي.

هذا التباين المكاني والزمني يعكس الطابع غير المتجانس للجفاف، (Vicente-Serrano et al. 2010) وتُظهر النتائج أن الجفاف الشديد ارتبط بانخفاض الهطول وارتفاع الحرارة، ما يدعم وجود جفاف غير منظور لا يُكشف بمؤشرات الهطول فقط، بل عبر تغيرات التربة والنبات، وهو ما يبرز أهمية SPEI كأداة فعالة لصنّاع القرار في إدارة الموارد.(Zargar et al., 2011; Spinoni et al., 2014) .

الجدول (٣) مؤشر الجفاف السنوي للمنطقة لمدة ١٩٨١– ٢٠٢٤ باستخدام مؤشر SPEI

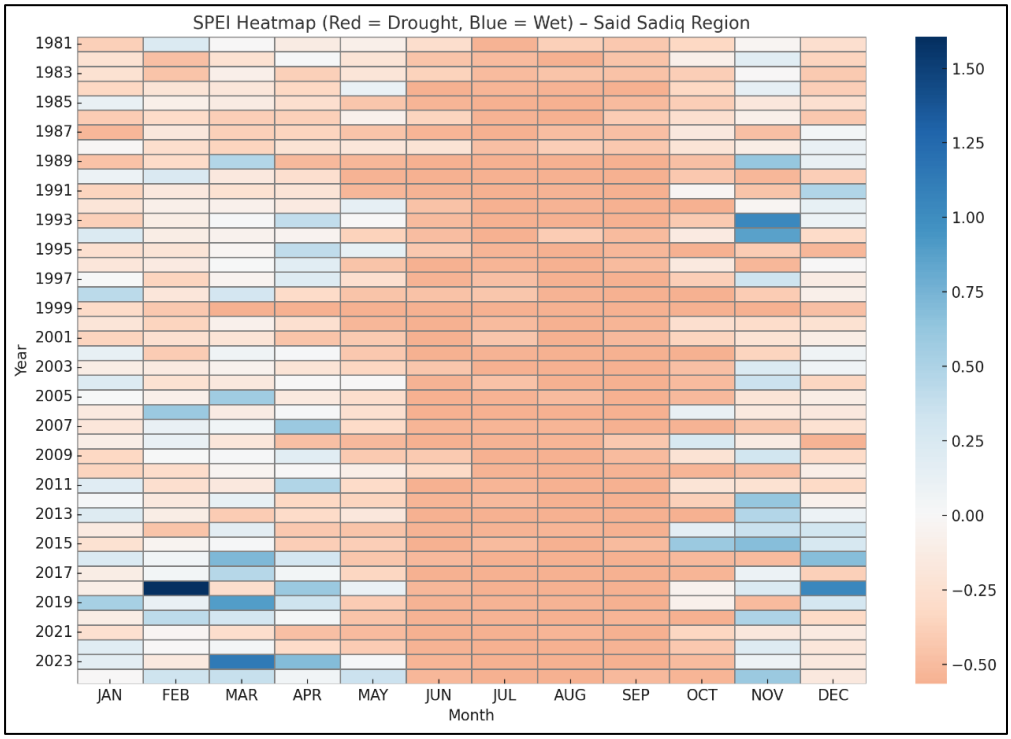
YEAR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	SPEI_Region	التصنيف
1981	0.02	0.13	0.13	0.02	0.36	0.13	0.13	0.36	0.16	لا يوجد جفاف
1982	-0.04	-0.03	-0.03	-0.04	-0.51	-0.03	-0.03	-0.51	-0.1525	لا يوجد جفاف
1983	-0.21	-0.34	-0.34	-0.21	0.17	-0.34	-0.34	0.17	-0.18	لا يوجد جفاف
1984	-0.15	-0.07	-0.07	-0.15	-0.21	-0.07	-0.07	-0.21	-0.125	لا يوجد جفاف
1985	-0.13	-0.1	-0.1	-0.13	-0.06	-0.1	-0.1	-0.06	-0.0975	لا يوجد جفاف
1986	-0.23	-0.18	-0.18	-0.23	-0.25	-0.18	-0.18	-0.25	-0.21	لا يوجد جفاف
1987	-0.24	-0.15	-0.15	-0.24	-0.24	-0.15	-0.15	-0.24	-0.195	لا يوجد جفاف
1988	0	0.13	0.13	0	0.04	0.13	0.13	0.04	0.075	لا يوجد جفاف
1989	0	-0.08	-0.08	0	-0.11	-0.08	-0.08	-0.11	-0.0675	لا يوجد جفاف
1990	-0.16	-0.19	-0.19	-0.16	-0.23	-0.19	-0.19	-0.23	-0.1925	لا يوجد جفاف
1991	-0.06	-0.07	-0.07	-0.06	-0.41	-0.07	-0.07	-0.41	-0.1525	لا يوجد جفاف
1992	0.05	-0.13	-0.13	0.05	0.1	-0.13	-0.13	0.1	-0.0275	لا يوجد جفاف
1993	0.22	0.33	0.33	0.22	0.11	0.33	0.33	0.11	0.2475	لا يوجد جفاف
1994	0.19	0.13	0.13	0.19	0.58	0.13	0.13	0.58	0.2575	لا يوجد جفاف
1995	-0.05	-0.02	-0.02	-0.05	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.0275	لا يوجد جفاف
1996	0.01	-0.06	-0.06	0.01	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.0425	لا يوجد جفاف
1997	0.15	0.06	0.06	0.15	0.38	0.06	0.06	0.38	0.1625	لا يوجد جفاف
1998	-0.07	-0.25	-0.25	-0.07	-0.86	-0.25	-0.25	-0.86	-0.3575	لا يوجد جفاف
1999	-0.52	-0.58	-0.58	-0.52	-0.72	-0.58	-0.58	-0.72	-0.6	لا يوجد جفاف
2000	-0.16	-0.2	-0.2	-0.16	-0.27	-0.2	-0.2	-0.27	-0.2075	لا يوجد جفاف
2001	-0.16	-0.26	-0.26	-0.16	-0.37	-0.26	-0.26	-0.37	-0.2625	لا يوجد جفاف
2002	-0.02	-0.09	-0.09	-0.02	-0.37	-0.09	-0.09	-0.37	-0.1425	لا يوجد جفاف
2003	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.025	لا يوجد جفاف
2004	0.06	0.09	0.09	0.06	-0.01	0.09	0.09	-0.01	0.0575	لا يوجد جفاف
2005	0.14	0.04	0.04	0.14	-0.44	0.04	0.04	-0.44	-0.055	لا يوجد جفاف
2006	0.09	0.07	0.07	0.09	0.14	0.07	0.07	0.14	0.0925	لا يوجد جفاف
2007	0.03	-0.02	-0.02	0.03	0.03	-0.02	-0.02	0.03	0.005	لا يوجد جفاف
2008	-0.14	-0.25	-0.25	-0.14	0	-0.25	-0.25	0	-0.16	لا يوجد جفاف
2009	0.08	0.1	0.1	0.08	0.31	0.1	0.1	0.31	0.1475	لا يوجد جفاف
2010	-0.21	-0.16	-0.16	-0.21	-0.04	-0.16	-0.16	-0.04	-0.1425	لا يوجد جفاف
2011	-0.03	-0.01	-0.01	-0.03	0.33	-0.01	-0.01	0.33	0.07	لا يوجد جفاف
2012	0.03	0.02	0.02	0.03	0.29	0.02	0.02	0.29	0.09	لا يوجد جفاف
2013	0.04	0.02	0.02	0.04	0.14	0.02	0.02	0.14	0.055	لا يوجد جفاف
2014	0.05	0.09	0.09	0.05	0.01	0.09	0.09	0.01	0.06	لا يوجد جفاف

2015	0.16	0.23	0.23	-0.22	0.16	0.23	0.23	-0.22	0.1	لا يوجد جفاف
2016	0.18	0.31	0.31	0.13	0.18	0.31	0.31	0.13	0.2325	لا يوجد جفاف
2017	-0.07	-0.05	-0.05	0.29	-0.07	-0.05	-0.05	0.29	0.03	لا يوجد جفاف
2018	0.57	0.72	0.72	0.83	0.57	0.72	0.72	0.83	0.71	لا يوجد جفاف
2019	0.34	0.33	0.33	0.05	0.34	0.33	0.33	0.05	0.2625	لا يوجد جفاف
2020	0.04	0.06	0.06	0.23	0.04	0.06	0.06	0.23	0.0975	لا يوجد جفاف
2021	-0.3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.2625	لا يوجد جفاف
2022	-0.14	-0.03	-0.03	0.22	-0.14	-0.03	-0.03	0.22	0.005	لا يوجد جفاف
2023	0.29	0.42	0.42	0.35	0.29	0.42	0.42	0.35	0.37	لا يوجد جفاف
2024	0.29	0.29	0.29	0.54	0.29	0.29	0.29	0.54	0.3525	لا يوجد جفاف

المصدر: استنادًا إلى بيانات الهطول والتبخر–نتح باستخدام معادلةPenman–Monteith

تُبرز خريطة مؤشر SPEI تباينات شهرية وزمنية واضحة بين فترات الجفاف والرطوبة، اذ تشير ألوان الأحمر للجفاف (قيم سالبة) والأزرق للرطوبة (قيم موجبة)، ما يسمح بتحليل موسمي دقيق ويظهر أن أشهر الصيف تهيمن عليها ظروف جافة، مما يعكس الطابع الجاف للموسم وتأثيره البيئي، وهو ما أشار إليه Vicente–Serrano et al. (2010). كما برزت في بعض سنوات الشتاء والربيع (مثل ٢٠١٧ و٢٠١٩) مدد رطبة استثنائية، في حين أظهرت سنوات أخرى (مثل ٢٠١٥ و٢٠٢١) مؤشرات جفاف غير منظور حتى في المواسم الممطرة، ما يشير إلى اضطراب في التوازن المناخي، وتؤكد هذه الملاحظات ازدياد الحالات المناخية المتطرفة كما أشار Spinoni et al. (2017)، وتُعد الخريطة أداة فعّالة لرصد الجفاف ودعم قرارات إدارة المياه والزراعة في المناطق الجافة.

الشكل (٢) الخريطة البيانية (SPEI) في منطقة سيد صادق للمدة ١٩٨١ – ٢٠٢٣



المصدر: اعتمادا على جدول (٣)

٣. استخراج المؤشرات الطيفية:

تُعد المؤشرات الطيفية من صور الأقمار الصناعية أدوات فعالة للكشف عن الجفاف غير المنظور، بفضل قدرتها العالية على تحليل الغطاء النباتي ورطوبة التربة، وقد تم استخدام بيانات Sentinel-2 و MODISلتميزهما بدقة مكانية وزمانية مناسبة؛ اذ توفر Sentinel-2 دقة ١٠ أمتار وتكرارًا كل ٥ أيام، بينما يوفّر MODIS تغطية يومية مثالية لتحليل التغيرات طويلة الأمد (Didan, 2015; Drusch et al., 2012).

- **مؤشر الغطاء النباتي NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)** لقياس كثافة ونشاط الغطاء النباتي وكما في الشكل (٢)، وهو يُحسب وفق المعادلة:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

$$NDVI=(B8−B4)(B8+B4)NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

* NIR الإشعاع القريب من تحت الأحمر.
* RED الإشعاع الأحمر.
* B8 النطاق تحت الأحمر القريب نطاق يعكس الأشعة تحت الحمراء القريبة ويعبر عن قوة النشاط النباتي
* B4 النطاق الأحمر نطاق يمتصه النبات في عملية البناء الضوئي.
* قيمة NDVI تتراوح بين (−١ إلى +١)، وكلما اقتربت القيمة من +١ دل ذلك على نشاط نباتي كثيف وصحي، تُستخدم هذه المعادلة على نطاق واسع كمؤشر لقياس فعالية التمثيل الضوئي وصحة الغطاء النباتي(Rouse et al., 1974) .

- **مؤشر NDWI (Normalized Difference Water Index)** لرصد محتوى رطوبة النبات والتربة، وكما في الشكل (٢) ويُحسب وفق احدى المعادلات:

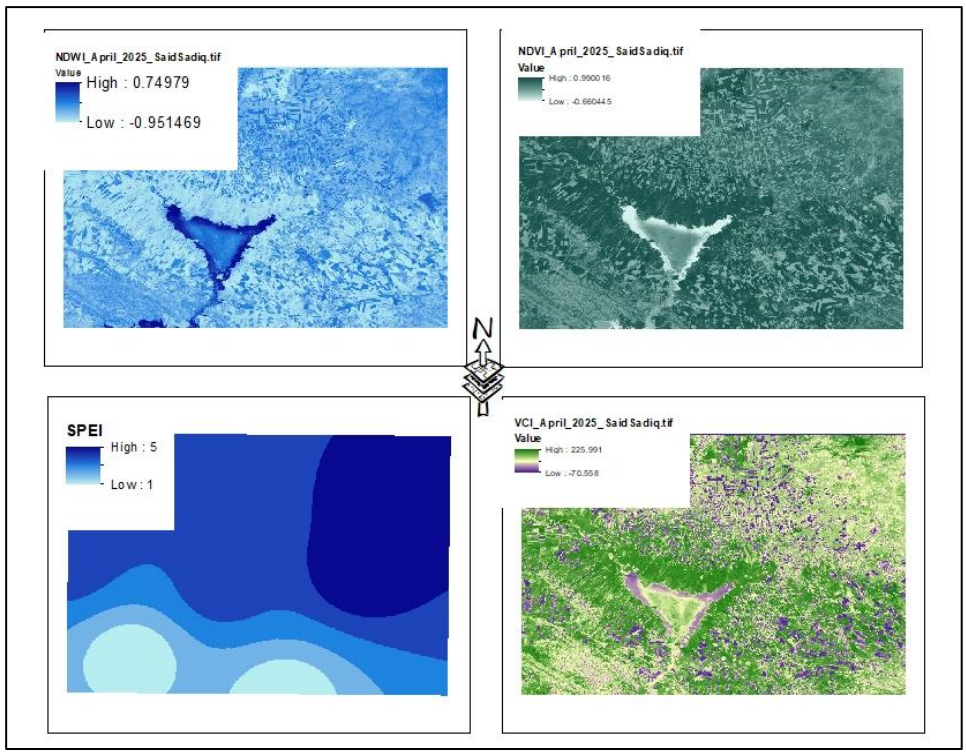
$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

$$NDWI=(B3−B8)(B3+B8)NDWI = \frac{(B3 - B8)}{(B3 + B8)}$$

* يمثل SWIR النطاق الطيفي للأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة.
* B3 النطاق الأخضر نطاق الأشعة الخضراء الحساس للمياه السطحية ورطوبة التربة.
* B8 النطاق تحت الأحمر القريب نطاق حساس لغطاء النبات، وبالتالي تُطرح لتعزيز تباين وجود المياه، ان قيم NDWI تتراوح بين (−١ إلى +١)، وكلما كانت

القيمة إيجابية مرتفعة دل على وجود مياه سطحية أو تربة رطبة، والقيم السالبة تشير لغياب المياه أو التربة الجافة، ويُستخدم المؤشر للكشف عن انخفاض رطوبة التربة، وهو مفيد لمراقبة الجفاف الزراعي(Gao, 1996) .

الشكل (3) المؤشرات الطيفية (NDVI، NDWI، VCI) ومؤشرSPEI



المصدر : بيانات من القمرين الصناعيين Sentinel2 وMODIS و NASA POWER Prediction of Worldwide Energy Resource ، باستخدام ArcMap 10.8 .

- **مؤشر VCI (Vegetation Condition Index)** لتقييم الحالة النسبية للنبات من خلال مقارنة قيم NDVI الحالية بأقصى وأدنى قيم NDVI التاريخية، وكما في الشكل (3) وفق المعادلة:

$$VCI = [(NDVI - NDVImin) / (NDVImax - NDVImin)] \times 100$$

* current: NDVI القيمة الحالية لمدة الدراسة.

* NDVI_min: القيمة الدنيا التاريخية للNDVI
* NDVI_max:القيمة العليا التاريخية للNDVI

المؤشر يتراوح من ٠ إلى ١٠٠، حيث تشير القيم المنخفضة (٠–٣٠) إلى إجهاد نباتي حاد أو ظروف جفاف، والقيم (٣١ – ٦٩) نبات متوسط او انتقالية والقيم المرتفعة (٧٠–١٠٠) تشير إلى غطاء نباتي صحي، ويُعد هذا المؤشر فعالًا في التعرف على شدة الإجهاد النباتي وتمييز حالات الجفاف عن التغيرات الموسمية الطبيعية(**Kogan, 1995**) ، وقد تمت معالجة الصور وتحليل المؤشرات الطيفية باستخدام منصة Google Earth Engine لسهولة الوصول إلى بيانات الأقمار الصناعية وسرعة المعالجة، وتصحيحها شعاعيًا، واشتقاق المؤشرات الطيفية.

رابعا: تحليل السلاسل الزمنية للمتغيرات للمنطقة:

أُجرِيت دراسة اتجاهية لسلاسل SPEI و NDVIو NDWIو VCI(الشكل ٢) باستعمال اختبار مان–كيندال غير المعلمي، لما يتميّز به من القدرة على كشف الاتجاهات الإحصائية مع تحييد تأثير القيم الشاذة (**Yue et al., 2002**) (**Kendall, 1975**) تظهر نتائج مؤشر SPEI السنوي للمنطقة (الشكل ٣) تقلبات واضحة؛ إذ بلغ الجفاف ذروته عام ١٩٩٩، تلاه تحسّن تدريجي بعد ٢٠٠٠، مع موجات جفاف قصيرة شديدة أبرزها في ٢٠٢١، ويميل خط الاتجاه العام إلى ارتفاع طفيف، مما يشير بتحسّن نسبي طويل الأمد في التوازن المائي رغم استمرار مخاطر الجفاف المتطرف(**Kendall, 1975; Yue et al., 2002**) .

الجدول (٤) تحليل الاتجاه الزمني لمؤشر SPEI السنوي باستخدام Theil–Sen للمحطات

Station	ميل Slope* الاتجاه السنوي	Intercept** القيمة الابتدائية	Lower_CI*** الحد الأدنى لمدة الثقة	الحد Upper**** الأعلى لمدة الثقة CI_
S1	0.006	-0.117	0.001	0.010
S2	0.006	-0.159	0.002	0.011
S3	0.006	-0.159	0.002	0.011
S4	0.006	-0.117	0.001	0.010
S5	0.010	-0.195	0.003	0.016
S6	0.006	-0.159	0.002	0.011
S7	0.006	-0.159	0.002	0.011
S8	0.010	-0.195	0.003	0.016

المصدر: تم الاعتماد على جدول (٣) باستخدام طريقة "Theil–Sen .

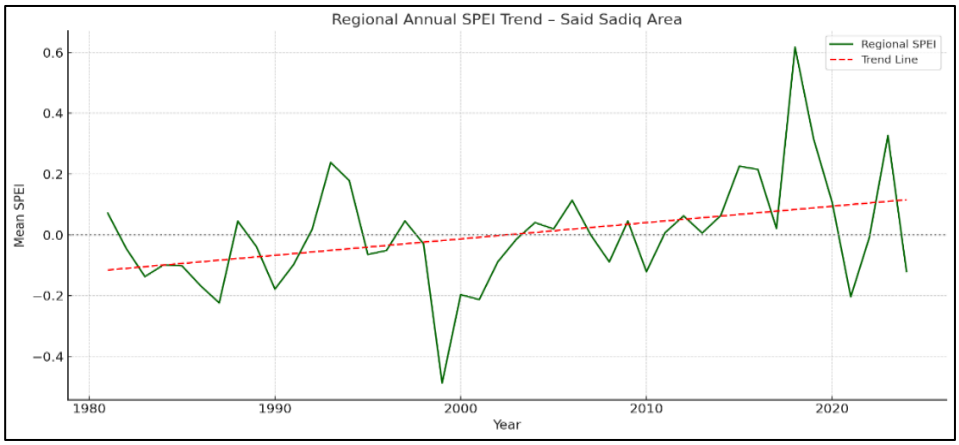
* ميل الاتجاه السنوي :(Theil-Sen Slope) يمثل مقدار التغير السنوي في مؤشرSPEI ، ويُعبّر عن زيادة أو نقصان الجفاف. إذا كانت القيمة موجبة ← هناك تحسن (رطوبة أعلى)، وإذا كانت سالبة ← هناك تدهور (جفاف).

** القيمة الابتدائية للمعادلة (أي عندما تكون السنة = ٠): تُستخدم لرسم معادلة الخط، لكنها أقل أهمية من الميل.

*** الحد الأدنى لفترة الثقة :(Lower Confidence Interval)هو الحد الأدنى الذي يمكن أن يأخذه الميل بثقة (غالبًا ٩٥٪)، ويعطي مؤشرًا على دقة الميل.

**** الحد الأعلى لفترة الثقة :(Upper Confidence Interval)الحد الأعلى الذي يمكن أن يأخذه الميل بثقة، ويُظهر نطاق عدم اليقين حول الاتجاه العام.

الشكل (٣) اتجاه مؤشر (SPEI) السنوي في منطقة سيد صادق للمدة ١٩٨١-٢٠٢٤



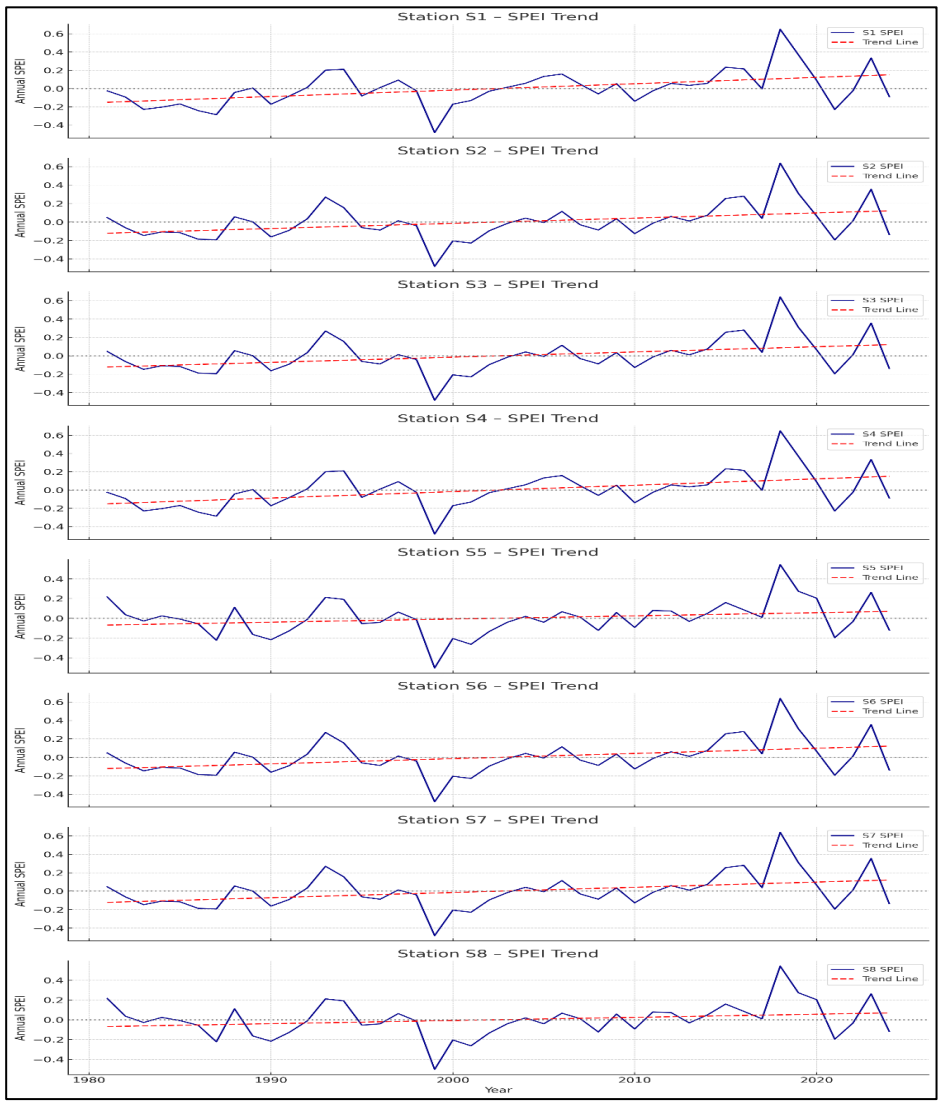
المصدر بيانات الجدول (٣)

تعكس هذه النتائج تزايد حساسية المنطقة للتغيرات المناخية، وهو ما يتفق مع الأدبيات العلمية التي تؤكد دور التغير المناخي في إعادة توزيع وتواتر الجفاف في البيئات شبه الجافة (**Vicente-Serrano et al., 2010**) ، ويُعد استخدام مؤشر SPEI فعالًا في تحليل شدة وتواتر الجفاف لأنه يدمج كلًا من الهطول والتبخر-نتح المرجعي(PET) ، مما يمنحه قدرة تفسيرية أعلى مقارنة بمؤشرات الهطول وحدها (**Beguería et al., 2014**).

تم تحليل الاتجاه الزمني السنوي لمؤشر SPEI باستخدام طريقة Theil-Sen، التي تُعد أكثر دقة من الانحدار الخطي التقليدي بفضل اعتمادها على الوسيط ومقاومتها للقيم الشاذة (Sen, 1968) ، أظهرت النتائج اتجاهًا موجبًا في جميع المحطات، ما يدل على تحسن نسبي في التوازن المائي، اذ سجّلت محطة S5 أعلى معدل تغير (+٠.٠١٠)، تليها S8 بنفس القيمة، بينما تراوحت بقية المحطات بين (+٠.٠٠٦)، ويبين الشكل (٤) تذبذب المؤشر بين مدد رطبة وجافة، خاصة في

التسعينات وأوائل الألفينات، مقابل تحسن نسبي بعد ٢٠١٠، ورغم الاتجاه العام الإيجابي، إلا أن استمرار موجات الجفاف الموسمية يبرز الحاجة إلى نظم إنذار مبكر،

الشكل (٤) الاتجاهات الزمنية السنوية لمؤشر الجفاف المناخي SPEI لمحطات الدراسة للمدة 1981–٢٠٢٤



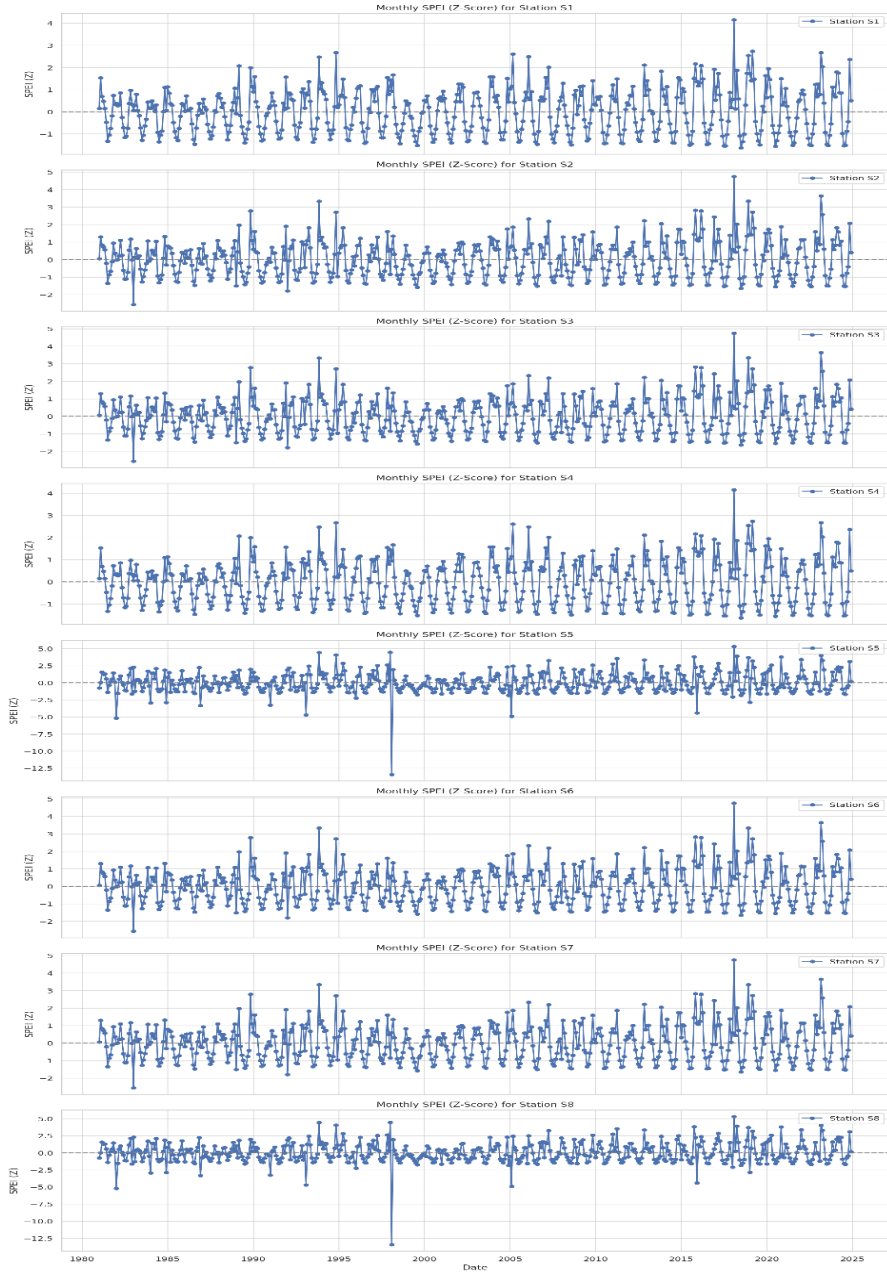
المصدر: إعداد الباحث اعتمادًا على نتائج مؤشر SPEI السنوي، المحسوب استنادًا إلى بيانات الهطول و PETوتحليل Theil–Sen للمدة ١٩٨١–٢٠٢٤.

ويؤكد هذه النتائج فاعلية SPEI كأداة لرصد الجفاف، وموثوقية Theil–Sen في تتبع التغيرات المناخية طويلة الأمد، **(Vicente–Serrano 2010) Sen et al 1968))**

.

يُظهر الشكل(٥) تحليل مؤشر SPEI الشهري الدرجة المعيارية لمحطات المنطقة تذبذبات واضحة تعكس ديناميكيات الجفاف والفائض المائي في المنطقة. زمنيًا، سُجلت فترات جفاف شديدة ولافتة في أواخر التسعينات وأوائل الألفينات، لا سيما في السنوات ١٩٩٩–٢٠٠١ و٢٠٠٧–٢٠٠٩، حيث انخفض مؤشر SPEI إلى ما دون –٢، مما يدل على جفاف حاد. كما شهدت السنوات الأخيرة تزايدًا في حدة التقلبات المناخية، ما يشير إلى أثر التغير المناخي على انتظام الفائض والعجز المائي **.(Vicente–Serrano et al., 2010)**وتُعد هذه النتائج متسقة مع ما ذكرته الأدبيات في أن الجفاف المناخي أصبح أكثر تطرفًا وتكرارًا في البيئات شبه الجافة مثل شمال شرق العراق**(Wilhite et al., 2007)** .

الشكل(٥) تحليل مؤشر SPEI الشهري لمحطات المنطقة للمدة ١٩٨١–٢٠٢٤



المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات الجفاف المستخرجة من مؤشر SPEI للمحطات الثمان في منطقة سيد صادق(1981–2024) .

مكانياً تُظهر المحطات اختلافات واضحة في سلوك مؤشر الجفاف؛ فالمحطات S5وS8 على الأطراف الجنوبية والشرقية أظهرت أحداثًا قصوى مفاجئة، بينما سجلت محطات الوسط مثل S2 و S3 تذبذبات أكثر انتظامًا، ما قد يُعزى إلى تداخل العوامل الطبوغرافية والمناخية في المنطقة الجبلية وشبه الجبلية (**Zargar et al., 2011**). كذلك، فإن الاستقرار النسبي في بعض المحطات لا يعني غياب الجفاف، بل ربما يشير إلى وجود "جفاف غير منظور"، وهو النوع الذي لا يظهر من خلال الهطول فقط بل يتجلى من خلال مؤشرات مثل SPEI و NDVIو NDWI كما تؤكد دراسات الجفاف المركب(**Bachmair et al., 2016**) .

بالتالي فإن هذا التحليل يثبت صحة فرضية الدراسة بأن الاعتماد على مؤشرات الهطول وحدها لا تكفي وأن دمج SPEI مع المؤشرات الطيفية يعزز القدرة على كشف الجفاف في أبعاده غير المرئية، خاصة في مناطق ذات تعقيد مناخي وتضاريسي مثل سيد صادق، وهو ما ينسجم مع توجهات حديثة في علم المناخ التطبيقي.(**Naumann et al., 2014**)

- **تحديد المدد الحرجة للجفاف.**

يُعد دمج المؤشرات المناخية والطيفية خطوة حاسمة في رصد وفهم الجفاف غير المنظور، حيث يسمح هذا الدمج بكشف المدد الحرجة التي لا تظهر فيها مؤشرات الهطول المطري التقليدي إشارات واضحة للجفاف، اذ تشير نتائج الجدول إلى أنه لم تُسجَّل أي قيمة حرجة خلال المدة ١٩٨١–٢٠٢٤ كان فيها مؤشر SPEI للمنطقة أقل من –١.٥، وهي القيمة التي تُصنَّف ضمن جفاف شديد جدًا أقل من –٢.٠ ، جدول (٥) يوضح تكرار المدد الحرجة في المنطقة.

جدول (٥) تكرار المدد الحرجة للجفاف للمحطات وحسب الأشهر المنطقة ١٩٨١-٢٠٢٤

المحطات	تكرار المدد الحرجة للجفاف		الأشهر	تكرار مدد الجفاف الحرجة
S1	101		كانون الثاني	36
S2	99		شباط	14
S3	99		اذار	4
S4	101		حزيران	84
S5	125		تموز	346
S6	99		اب	326
S7	99		ايلول	22
S8	125		كانون الاول	16

المصدر: تحليل الباحث بالاعتماد على جدول(٣)

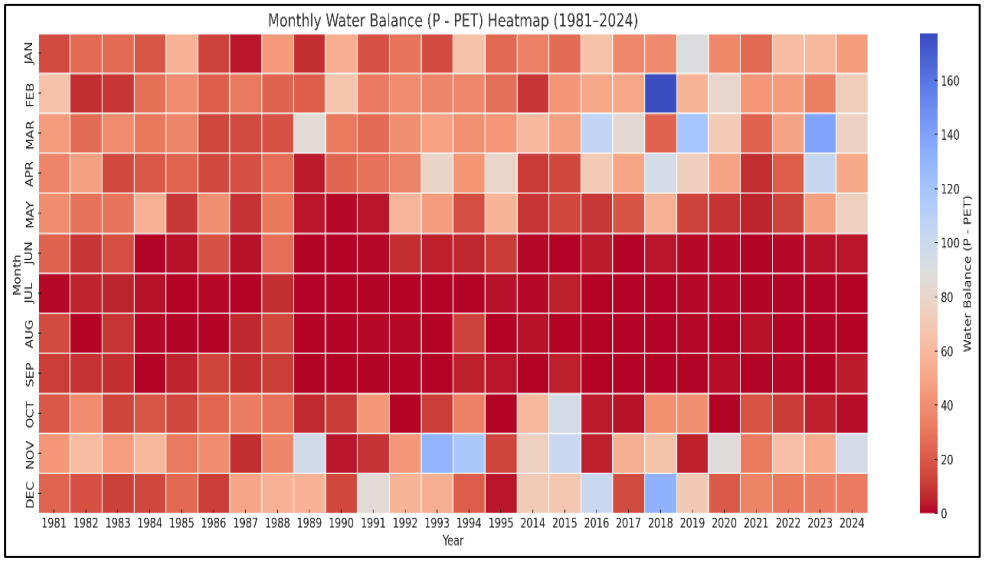
يبيّن جدول (٥) تباين تكرار المدد الحرجة للجفاف بين محطات الدراسة خلال ١٩٨١–٢٠٢٤، اذ سُجلت أعلى القيم في محطتي S5 و S8(١٢٥ مرة)، مما يشير إلى تعرضهما المتكرر لجفاف شديد، بينما سجلتS2 ، S3، S6، S7 تكرارًا متساويًا (٩٩ مرة)، في حين بلغ التكرار في S1 و S4نحو ١٠١ مرة، ما يعكس تفاوتًا مكانيًا يرتبط بالعوامل المناخية والجغرافية المحلية.

أما التحليل الزمني فيُظهر أن أشهر الصيف، خاصة تموز (٣٤٦ مرة) وآب (٣٢٦ مرة) وحزيران (٨٤ مرة)، تمثل ذروة الجفاف نتيجة ارتفاع الحرارة وقلة الهطول، وهو ما يتفق مع طبيعة المناخ الجاف في العراق. في المقابل، تسجل أشهر الشتاء والربيع (آذار، شباط، كانون الأول، كانون الثاني) أقل التكرارات، ما يشير إلى تحسن نسبي في الرطوبة، ويُعد هذا التوزيع الموسمي مؤشرًا مهمًا في تخطيط إدارة المياه والزراعة والتكيف مع تغيرات المناخ.

خامسا: دمج المؤشرات وتحليل علاقات الارتباط :

اعتمد البحث على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحليل النتائج المناخية والطيفية مكانيًا، حيث تم تحويل مؤشرات SPEI و NDVIو NDWIو VCIإلى طبقات قابلة للتحليل باستخدامArcGIS ، مما أتاح تمثيل الأنماط المكانية المرتبطة بالجفاف. كما أُجري تحليل ارتباط خطي بين SPEI السنوي وكل من NDVI و NDWIوVCI، إذ أشار ضعف الارتباط أو ظهوره بشكل عكسي إلى فقدان استجابة الغطاء النباتي للمناخ، وهو ما يُعد مؤشرًا على الجفاف غير المنظور، كما بيّنه **Vicente-Serrano (et al. 2010)** ، وتُصنّف السنوات التي يسجّل فيها SPEI > −1 مع انخفاض في NDVIو VCIو NDWI كحالات جفاف خفي، وهي منهجية دقيقة لرصد الإجهاد النباتي غير الظاهر مناخيًا**(Wu et al. 2022)** ، ويُعد دمج SPEI بالمؤشرات الطيفية اسلوبا متقدمًا لرصد البعد غير المرئي للجفاف، ما يعزّز من فعالية نظم الإنذار المبكر وخطط الاستدامة الزراعية، خاصة في البيئات الهشة مناخيًا.

الشكل (٦) الموازنة المائية الشهرية للمدة ١٩٨١ و ٢٠٢٤



المصدر: تحليل الباحث بالاعتماد على الموازنة المائية الشهرية السنوي (P – PET) باستخدام معادلة بنمان–مونتيث (Penman–Monteith) للمدة 1981إلى ٢٠٢٤،

يُظهر الشكل (٦) أنّ العجز المائي يبقى ثابتًا وشديدًا في الفصل الجاف (حزيران–أيلول)، نتيجة هيمنة التبخر–نتح على أي هطل محدود، كما وثّق–**Vicente) (Serrano et al.,2010**في الشتاء والربيع يتباين التوازن بحدة: سنوات ١٩٩٣ و٢٠١٥ و٢٠١٨ سجلت فائضًا رطبًا استثنائيًا يرتبط غالبًا بظواهر ENSO القوية **(Trenberth & Hoar, 1997)**، بينما شهدت ١٩٨٧ و١٩٩٩ و٢٠١٤ جفافًا شتوياً متكرّرًا، وهو ما حذّر منه .**(Lloyd–Hughes & Saunders2002)** بعد ٢٠٠٠ اتسعت رقع العجز، خصوصًا في آذار–أيار، مما يعكس ارتفاع PET وتزايد النقص الربيعي وفق توقعات .(IPCC 2021) ورغم ازدياد الفائض الشتوي (مثلاً ٢٠١٨ و٢٠٢٣)، يعود العجز سريعًا صيفًا، مؤكّدًا هشاشة التخزين السطحي ويوجّه السياسات نحو حصاد الأمطار والريّ التكميلي في الشتاء–الربيع للتخفيف من الجفاف الصيفي . **(Sheffield & Wood, 2011)**

– تغيرات المؤشرات الطيفية للمدة ٢٠٢٠–٢٠٢٥

يظهر الجدول (٦) الإحصاءات للمؤشرات الطيفية :

الجدول (٦) يبين الإحصاءات للمؤشرات الطيفية في منطقة الدراسة

المؤشر	المعدل	الوسيط	الانحراف المعياري	أدنى قيمة	أعلى قيمة
NDVI	0.55	0.59	±0.28	-0.66	0.99
NDWI	-0.54	-0.56	±0.24	-0.96	0.76
VCI	66.82	71.76	±24.63	0.01	100.00

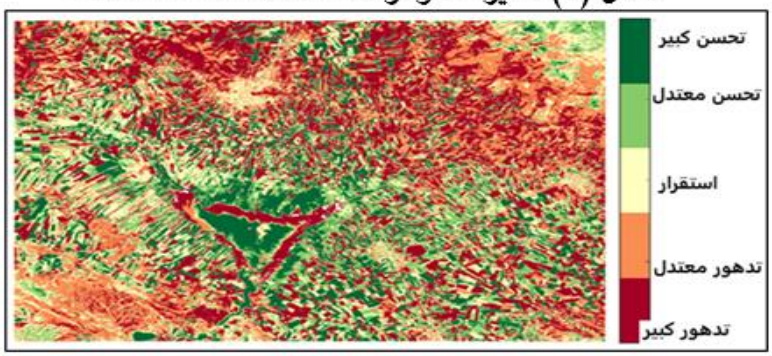
المصدر: اعتمادا على بيانات (Sentinel-2 أوMODIS)١/٤/٢٠٢٠-٢٠٢١-٢٠٢٢-٢٠٢٣-٢٠٢٤-٢٠٢٥

يُظهر الشكل (٧) تباينًا ملحوظًا في مؤشر NDVI بمنطقة سيد صادق بين ٢٠٢٠ و٢٠٢٥، مما يعكس تأثيرات مناخية وبيئية متداخلة تدعم فرضية الجفاف غير المنظور. فقد تدهور نحو ٢٥.٢٦٪ من الغطاء النباتي (١٣.٨٦٪ تدهور كبير، ١١.٤٠٪ تدهور معتدل)، رغم عدم تسجيل مؤشر SPEI لجفاف مناخي خلال الفترة، ما يشير إلى انفصال بين الإشارات المناخية والنباتية، ويؤكد وجود جفاف خفي. في المقابل، تحسنت ١٥.٢٦٪ من المساحة (٨.٢١٪ تحسن كبير، ٧.٠٥٪ معتدل)، ربما نتيجة تحسين إدارة الأراضي أو أمطار محلية، في حين استقرت ٩.٦٦٪ من المساحة، و٤٧.٤٧٪ بقيت غير مصنفة. تؤكد هذه النتائج فعالية تحليل NDVI المكاني في رصد الجفاف غير الظاهر، خصوصًا عند دمجه بالتحليل المناخي والزمني، كما أوصت به دراسات (**Vicente-Serrano et al. 2010**)و **Zhao et al.** (**2020**) التي بيّنت أن المؤشرات الطيفية تُعد أداة إنذار مبكر لتدهور الغطاء النباتي قبل ظهور مؤشرات مناخية مباشرة.

يُظهر الشكل (٨) تفاوتًا مكانيًا واضحًا في مؤشر NDWI ، ما يعكس تغيرات ديناميكية في رطوبة التربة السطحية ويمثل أداة فعالة لرصد الجفاف غير المنظور. وقد شكّلت المناطق غير المصنفة ٤٧.٤٤٪ من الخريطة، بينما سجلت المناطق التي شهدت تحسنًا في الرطوبة ٢٢.٢٤٪ (٩.٩٣٪ تحسن كبير، ١٢.٣١٪ معتدل)، في حين بلغت المناطق المتأثرة سلبًا ١٧.٧٥٪ (٩.٩٩٪ تدهور معتدل، ٧.٧٦٪ تدهور كبير). هذا يشير إلى بؤر جفاف خفي لا يمكن كشفها عبر مؤشرات مناخية مثل .SPEI وتؤكد هذه النتائج أهمية NDWI في تتبع تغيرات الرطوبة، خاصة في البيئات شبه الجافة مثل شمال شرق العراق، بما يتفق مع ما بيّنه (**Gao1996**) و .Jiang et al

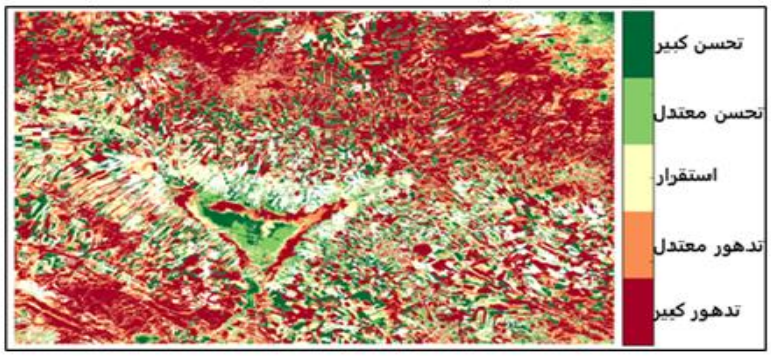
(2021)، من أن NDWI يُظهر حساسية أعلى لتغيرات الرطوبة مقارنة بمؤشرات الغطاء النباتي التقليدية.

الشكل (٧) التغيرات لمؤشر NDVI للمدة ٢٠٢٠-٢٠٢٥



الشكل (٨) التغير لمؤشر NDWI (٢٠٢٠-٢٠٢٥)

الشكل (٩) التغير لمؤشر VCI (٢٠٢٠-٢٠٢٥)



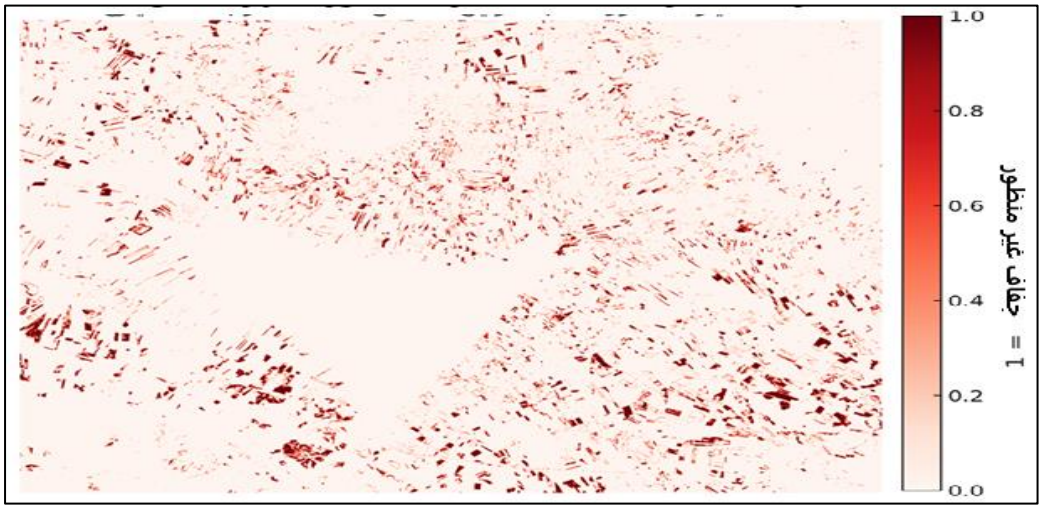
المصدر: اعتمادا على بيانات (Sentinel-2 أوMODIS)١/٤/٢٠٢٠-٢٠٢١-٢٠٢٢-٢٠٢٣-٢٠٢٤-٢٠٢٥

يعكس الشكل (٩) تدهورًا ملحوظًا في مؤشر VCI بمنطقة الدراسة، ما يُعد مؤشرًا حساسًا للجفاف غير المنظور المرتبط بالإجهاد النباتي. فقد شكّلت الفئة غير المصنفة ٥٢.٩٠٪ من الخريطة، في حين بلغت نسبة التدهور الكبير ١٨.٠٤٪ والتدهور المعتدل ٨.٩٦٪، مما يدل على ضغوط بيئية ونباتية واضحة رغم غياب إشارات مناخية مباشرة في مؤشر .SPEI أما التحسن النباتي فاقتصر على ١٠.٣٠٪ فقط (٥.٩١٪ تحسن كبير، ٤.٣٩٪ معتدل)، ما يعزز فرضية الانفصال النباتي–المناخي، وهي سمة للجفاف غير المرصود. وتتفق هذه النتائج مع ما أشار إليه Kogan (1995)و Zhang et al. (2013)، بأن VCI أداة فعالة لرصد الإجهاد النباتي حتى عند غياب مؤشرات مناخية صريحة، ويؤكد أهمية دمجه مع SPEI وبقية المؤشرات الطيفية لرصد دقيق للجفاف في المناطق الزراعية الهشة.

- **تحليل التوزيع المكاني للجفاف غير المنظور.**

تم إنتاج شكل (١٠) والذي يبين التوزيع المكاني للجفاف غير المنظور من خلال دمج المؤشرات الطيفية المشتقة من صور الأقمار الصناعية (Sentinel–2 أو MODIS) وهي:

الشكل (١٠) يبين التوزيع المكاني للجفاف غير المنظور في منطقة الدراسة



المصدر: اعتمادا على بيانات (Sentinel-2 أوMODIS)١/٤/٢٠٢٠-٢٠٢١-٢٠٢٢-٢٠٢٣-٢٠٢٤-٢٠٢٥ ، و NDVI و VCIو NDWI وSPEI

الجدول (٦) دلالة الجفاف غير المنظور في منطقة الدراسة

المؤشر	دلالة الجفاف	العتبة المستخدمة
NDVI	تدهور الغطاء النباتي	< 0.3
NDWI	نقص رطوبة التربة	< -0.3
VCI	إجهاد نباتي حاد ناتج عن جفاف	< 35

المصدر: الشكل (١٠)

يعكس الشكل (١٠) والجدول (٦) التباين المكاني للجفاف غير المنظور، وهو حالة بيئية لا يمكن كشفها عبر مؤشرات مناخية تقليدية مثلSPEI ، بل من خلال مؤشرات طيفية متعددة تُظهر تدهور الغطاء النباتي(NDVI < 0.3) ، ونقص رطوبة التربة (NDWI < −0.3)، وإجهاد نباتي مرتفع .(VCI < 35) تشير الإحصاءات إلى تأثر ٣٩٣,٥٨٤ بكسل (نحو ٥.٢٩٪ من المنطقة أو ٣٥٤.٢٣ كم²)، توزعت في مناطق سهلية ضعيفة التغطية النباتية أو التصريف، في حين أظهرت المناطق الجبلية مقاومة نسبية، مما يبرز دور الغطاء الأرضي والارتفاع.

زمنيًا، رغم أن نيسان يعد مطيرًا عادةً، إلا أن المؤشرات الطيفية كشفت تدهورًا نباتيًا، يُحتمل أنه ناتج عن تأخر الأمطار أو تراكم الإجهاد السابق، وهو ما يُعرف بالإنهاك التراكمي للنظام البيئي. ويُعد هذا التحليل المركب باستخدام بيانات Sentinel-2 و MODISنهجًا فعالًا لرصد الجفاف غير المنظور ، كما أكده **Vicente-Serrano**) **et al. 2013)**بضرورة مراعاة الاستجابات البيئية متعددة الزمن لرصد الجفاف بدقة، ويمثل هذا النوع من التحليل أداة إنذار مبكر يمكن أن تساعد في منع تطور الجفاف إلى مرحلة حرجة.

- **المؤشر المحلي للتجمع المكاني LISA**

هو تبسيط أو محاكاة يدوية لمفهوم LISA – Local Indicators of Spatial Association، أي المؤشر المحلي للتجمع المكاني، والتي تُستخدم عادة للكشف عن البقع الساخنة أو الباردة في توزيع الظواهر الجغرافية مثل الجفاف أو تدهور الغطاء النباتي، تعمل على نُصنّف كل بكسل في NDVI أو VCI أو NDWI إلى فئات(قيمة عالية) ،(قيمة منخفضة)، ثم نُقيّم العلاقة بين قيمة البكسل وقيمة البكسلات المجاورة له، باستخدام أدوات بسيطة أو تصنيف منطقي، الجدول (٧) يوضح التصنيف المعتمد للمؤشر المحلي للتجمع المكاني LISA .

الجدول (٧) التصنيف المعتمد للمؤشر المحلي للتجمع المكاني LISA

قيمة المساحة الصورية(بكسل)	قيم المساحة الصورية(بكسل) المجاور	التصنيف اليدوي
مرتفع	مرتفع	High-High (بقعة خضراء ثابتة)
منخفض	منخفض	Low-Low (بقعة جافة مستقرة)
مرتفع	منخفض	High-Low (بقعة انتقالية أو مهددة)

قيمة المساحة الصورية(بكسل)	قيم المساحة الصورية(بكسل) المجاور	التصنيف اليدوي
منخفض	مرتفع	بقعة استثنائية – قد تستعيد) Low-High (خضرتها

المصدر: Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

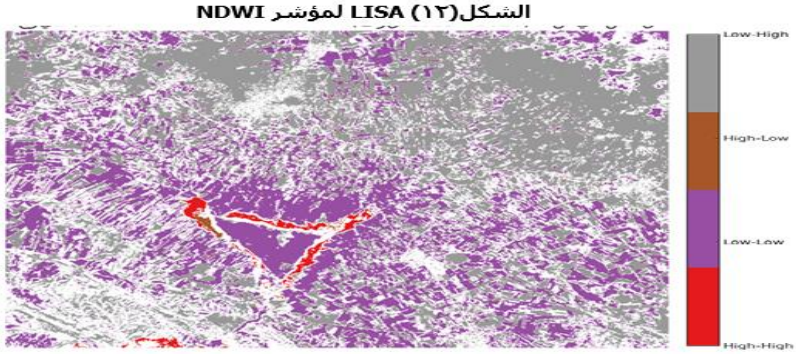
تم عرض خريطة LISA اليدوية لمؤشر NDVI بين عامي ٢٠٢٠ و٢٠٢٥ لمنطقة سيد صادق، وهي تعكس أنماطًا متمايزة في استجابة الغطاء النباتي للظروف البيئية، وتُعد مؤشرًا دقيقًا للكشف عن الجفاف غير المنظور الموضعي، ووفقًا للتحليل الإحصائي للألوان المصنفة في الخريطة، فإن الفئة غير المصنفة (باللون الأبيض)، والتي لا تُظهر ترابطًا مكانيًا واضحًا في قيم المؤشرات، استحوذت على النسبة الأكبر من المساحة وبلغت نحو **75.25%** من المنطقة، مما يشير إلى وجود مساحات واسعة لا تحمل نمطًا مكانيًا منتظمًا، وقد تعود لغطاء غير نباتي أو مناطق حضرية أو تربة مكشوفة.

أما الفئة **High–High**(باللون الأحمر)، والتي تمثل مناطق ذات قيم المؤشرات مرتفع محاطة بمناطق مماثلة، فقد شكّلت **10.97%** من المساحة، مما يعكس وجود بؤر نباتية مستقرة نسبيًا رغم التغيرات المناخية، وغالبًا ما تقع هذه المناطق في الأراضي الزراعية المستقرة أو القريبة من مصادر مائية، في المقابل برزت الفئة **Low–Low**(باللون البنفسجي) بنسبة **2.09%** فقط، إلا أنها تمثل أخطر المؤشرات، اذ تدل على مناطق ذات تدهور نباتي حاد ومحاط بمناطق متدهورة، وهي بؤر حرجة للجفاف غير المرئي.

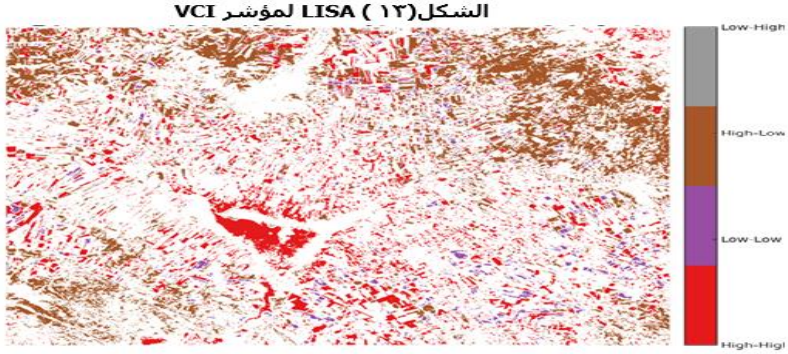
كما شغلت فئة **High–Low**(البني) نسبة **9.87%**، وهي مناطق ذات قيم جيدة داخل محيط متدهور، مما قد يشير إلى تدخلات بشرية (مثل الري الاصطناعي) حافظت على الإنتاج النباتي في بيئات متدهورة مناخيًا، أخيرًا جاءت فئة **Low–High**(الرمادي) بنسبة **0.89%**، وهي تمثل جيوبًا من التدهور ضمن بيئة نباتية مستقرة، ما قد يشير إلى تغيرات محلية في استخدام الأرض أو تدهور نوعي في التربة. تدل هذه النسب على أن نحو **12%من المنطقة** تعاني من تغيرات مكانية منظمة في قيم المؤشرات، وهي دلائل واضحة على جفاف غير منظور لا يمكن رصده عبر مؤشرات مناخية تقليدية فقط، مما يؤكد أهمية التحليل المكاني المحلي باستخدام تقنيات مثل LISA لدعم التخطيط الزراعي وإدارة الجفاف في البيئات الهشة، كما أوصت بذلك دراسات مثل **(Anselin, 1995; Jiang et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2010)**

الشكل (١١) LISA لمؤشر NDVI

الشكل(١٢) LISA لمؤشر NDWI



الشكل(١٣) LISA لمؤشر VCI



High–High(أحمر): مناطق ذات قيمة مرتفع وتحسّن مستمر – بقع نباتية قوية.

Low–Low(أزرق): مناطق ذات قيمة منخفض وتدهور – بقع جفاف خفي مستمر.

High–Low(أخضر): مناطق نباتية بدأت تتدهور – إنذار مبكر.

Low–High(بنفسجي): مناطق جافة بدأت تتحسن – بقع استرداد نباتي.

سادسا: النتائج والتوصيات

- النتائج

١. أظهرت القيم الزمنية لمؤشر SPEI تذبذبات واضحة، اذ سُجلت فترات جفاف حاد في سنوات مثل ١٩٩٩ و٢٠٢١، بالرغم من غياب مؤشرات جفاف صريحة في بعض المواسم الممطرة، مما يشير إلى ضعف الاعتماد على بيانات الهطول وحدها.

٢. أثبتت المؤشرات الطيفية NDVI و NDWIو VCIفعاليتها في كشف تدهور بيئي غير مرئي مناخيًا، اذ كشفت عن تدهور في الغطاء النباتي والرطوبة السطحية في مناطق لم تُسجل كمواسم جفاف وفق البيانات المناخية.

٣. كشف تحليل LISA عن بؤر حرجة للجفاف غير المنظور، تركزت ضمن نمط Low–Lowبنسبة ٢.٠٩٪، مما يعكس وجود تجمعات مكانية ثابتة تعاني من تدهور مزمن في الغطاء النباتي.

- التوصيات

١. ضرورة دمج المؤشرات المناخية والطيفية في نظم الإنذار المبكر، لتعزيز القدرة على الكشف عن الجفاف غير المنظور في البيئات شبه الجافة.

٢. أهمية توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية وتحليل LISA لرصد التوزيع المكاني الدقيق لبؤر الجفاف، وتوجيه التدخلات الزراعية والمائية بشكل أكثر فاعلية.

٣. تضمين نتائج هذا النوع من الدراسات في سياسات التكيف مع الجفاف، لضمان استدامة الموارد الطبيعية، وتحسين خطط الزراعة الموسمية والإدارة البيئية.

Reference

1. 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). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

2. Anselin, L. (1995). *Local indicators of spatial association—LISA*. Geographical Analysis, 27(2), 93–115.

3. Bachmair, S., Svensson, C., Hannaford, J., Barker, L. J., & Stahl, K. (2016). A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(10), 4227–4249. https://doi.org/10.5194/hess-20-4227-2016

4. Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). *Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring*. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887

5. Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems* (2nd ed.). Oxford University Press.

6. Didan, K. (2015). *MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.

7. Drusch, M., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

8. Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

9. Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2008). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over

the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 35(6). https://doi.org/10.1029/2007GL032938

10. Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

11. Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2021). *Monitoring drought using remote sensing*. *Remote Sensing of Environment*, various issues.

12. Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). Charles Griffin.

13. Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T

14. Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571–1592.

15. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th ed.). Wiley.

16. Naumann, G., Barbosa, P., Garrote, L., Iglesias, A., & Vogt, J. (2014). Exploring drought vulnerability in Africa: An indicator-based analysis to be used in early warning systems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1591–1604. https://doi.org/10.5194/hess-18-1591-2014

17. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309–317.

18. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

19. Sheffield, J., & Wood, E. F. (2011). *Drought: Past problems and future scenarios*. Earthscan.

20. Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. (2014). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*, 120, 14–26. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.012

21. Trenberth, K. E., & Hoar, T. J. (1997). El Niño and climate change. *Geophysical Research Letters*, 24(23), 3057–3060.

22. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

23. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., & El Kenawy, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52–57. https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110

24. Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2015). *MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006

25. Wilhite, D. A., Sivakumar, M. V. K., & Pulwarty, R. (2007). Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes*, 3, 4–13.

26. Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1–4), 254–271. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7

27. Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333–349. https://doi.org/10.1139/a11-013

28. Zhang, X., Chen, J., et al. (2013). Response of vegetation to drought detected by VCI and NDVI in arid regions. *Remote Sensing of Environment*, various issues.

29. Zhao, X., Feng, Y., et al. (2020). Monitoring hidden drought using vegetation indices in semi-arid environments. *Journal of Arid Land*, various issues.