ISSN: 1812-0512 (Print) 2790-346X (online)

Wasit Journal for Human Sciences

Available online at: https://wjfh.uowasit.edu.iq

OPEN ACCESS

Original article

Climatic Drought Trends and Future Scenarios in Iraq

Ahmed Lafta Hamad Al-Budeiri

Ministry of Education-Wasit Education Open Educational College/Al- Suwairah Branch

***Correspondence author**: ahmedlalbudeiri@gmail.com

Received: 26 April 2026
Accepted: 12 **June** 2026
Published: 01 **August** 2026

DOI: https://doi.org/10.31185/wjfh.Vol22.Iss3/Pt1.1909

1812-0512 /© 2026 The Author(s). Published by Wasit Journal for Humanities Sciences, Wasit University. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Cite:
Al-Budeiri, A. L. H. (2026). Climatic Drought Trends and Future Scenarios in Iraq. Wasit Journal for Human Sciences, 22(3/Pt1). https://doi.org/10.31185/wjfh.Vol22.Iss3/Pt1.1909

ABSTRACT

Drought is a major challenge associated with global warming due to its direct impacts on water resources and agriculture, particularly in Iraq, which lies within arid and semi-arid regions. This study assesses future drought trends using the SPEI-12 index based on outputs from two CMIP6 models (GFDL-ESM4 and ACCESS-CM2) under four SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) for the periods 2025–2060 and 2061–2096, compared with 1990–2024. Results show a statistically significant downward trend in SPEI-12 (−0.55 per decade), indicating increasing water deficit due to declining precipitation and rising temperatures. Under SSP5-8.5, strong negative trends dominate, indicating intensified and thermally driven drought. Moderate conditions decline while severe drought increases, reflecting a shift toward more extreme conditions. Spatially, the strongest trends occur in central and southern Iraq, while northern regions show weaker responses. These findings highlight the need for effective adaptation strategies, particularly in water resource management.

Keywords: Climate Drought, Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI), Shared Socioeconomic Pathways (SSPs

اتجاهات الجفاف المناخي وسيناريوهاته المستقبلية في العراق

أ.م. د. أحمد لفتة حمد البديري
وزارة التربية / المديرية العامة لتربية واسط، الكلية التربوية المفتوحة/ فرع الصويرة

المُستخلص

يُعد الجفاف من أبرز التحديات المرتبطة بالاحترار العالمي، له تأثيرات مباشرة على الموارد المائية والزراعة، ومنها العراق الذي يقع ضمن المناطق الجافة وشبه الجافة، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم اتجاهات الجفاف المستقبلية باستخدام مؤشر SPEI–12 بالاعتماد على مخرجات نموذجي CMIP6 (GFDL–ESM4 وACCESS–CM2) تحت أربعة سيناريوهات SSP (SSP1–2.6، SSP2–4.5، SSP3–7.0، SSP5–8.5) للمدتين (2025–2060) و(2061–2096)، مع مقارنتها بالمدة المرصودة (1990–2024)، أظهرت النتائج اتجاهًا تنازليًا معنويًا في SPEI–12 بمعدل (–0.55/عقد)، وهذا يعكس تفاقم العجز المائي نتيجة التفاعل بين انخفاض الأمطار وارتفاع درجات الحرارة، وتحت سيناريو SSP5–8.5، تسود اتجاهات سالبة قوية وذات دلالة إحصائية عالية، مما يعكس تعاظم الجفاف والتحول نحو الجفاف الحراري، وتنخفض الفئات المعتدلة مقابل زيادة فئات الجفاف الأكثر شدة، وهذا يدل انتقالًا نحو حالات أكثر تطرفًا، مكانيًا، يقع تركيز أشد الاتجاهات في المناطق الوسطى والجنوبية، بينما تُظهر المناطق الشمالية استجابة أقل حدة. وتشير النتائج إلى ضرورة تبني استراتيجيات تكيف فعالة، خاصة في إدارة الموارد المائية.

الكلمات المفتاحية: الجفاف المناخي، مؤشر الامطار والتبخر–النتح القياسي ((SPEI، السيناريوهات الاجتماعية–الاقتصادية المشتركة.

المقدمة:

يُعدّ الجفاف من أكثر الكوارث الطبيعية تعقيدًا وتأثيرًا على المستوى العالمي، إذ تتجاوز آثاره الاقتصادية والاجتماعية والبيئية تأثيرا معظم المخاطر الطبيعية الأخرى، وقد طالت تبعاته أكثر من ملياري إنسان منذ مطلع القرن العشرين (Vicente–serrano et al., 2022، Benjamin I Cook et al., 2018) تنشأ خطورته من طبيعته التراكمية والبطيئة، فضلًا عن تعدد أنماطه وتباين آليات تطوره الزمنية، فهو يبدأ عادةً بنقص في تساقط الامطار (الجفاف المناخي)، ثم يتطور إلى انخفاض في رطوبة التربة (الجفاف الزراعي)، يعقبه تراجع في الجريان السطحي والمخزون المائي (الجفاف الهيدرولوجي)، وصولًا إلى العجز في تلبية الاحتياجات المائية للمجتمعات (الجفاف الاجتماعي–الاقتصادي)، ولكل نمط من هذه الأنماط استجابة زمنية مختلفة تعكس تفاعلات معقدة بين النظامين المناخي والهيدرولوجي (Van Loon, 2015)،(Mishra & Singh, 2010).

ولرصد الجفاف كمّيًا، طُوِّرت مجموعة من المؤشرات القياسية، يأتي في مقدمتها مؤشر الامطار القياسي (SPI) الذي يعتمد على بيانات الأمطار، ويوصى به لرصد الجفاف المناخي نظرًا لبساطته وقابليته للمقارنة المكانية والزمانية (McKee et al., 1993)غير أن هذا المؤشر لا يستوعب تأثير ارتفاع درجات الحرارة في تفاقم ظروف الجفاف، خاصة في ظل الاحترار

العالمي المتسارع، حيث يؤدي ارتفاع الحرارة إلى زيادة الطلب التبخيري في الغلاف الجوي (Atmospheric Evaporative Demand – AED)، مما يُسهم في استنزاف رطوبة التربة وتعميق الإجهاد المائي للنباتات والأنظمة البيئية (Vicente-Serrano et al., 2020)، وفي سياق التغير المناخي، ورغم أن اتجاهات الجفاف المناخي وفق مؤشر(SPI) لا تظهر تغيراً جوهرياً على المستوى العالمي، إلا أن الدراسات الحديثة التي تستخدم مؤشر الامطار والتبخر–النتح القياسي SPEI تكشف عن زيادة واضحة في شدة الجفاف الزراعي والإيكولوجي، ويعزى ذلك بشكل رئيسي إلى الارتفاع الملحوظ في الطلب التبخيري (AED) في العقود الأخيرة، وهي نتيجة تؤكدها إسقاطات النماذج المناخية من الجيلين الخامس والسادس (CMIP5 و CMIP6) والتي تُجمع على توسع رقعة المناطق المعرضة للجفاف الحاد، لا سيّما في حوض البحر الأبيض المتوسط، وجنوب غرب أمريكا الشمالية، وجنوب إفريقيا، وأستراليا (Anna M Ukkola et al., 2020)، (Benjamin I Cook et al., 2020)، ويبرز الشرق الأوسط بوصفه منطقة من أكثر بؤر العالم حساسية تجاه هذا الجفاف المتزايد، حيث تتراكم تأثيرات ندرة المياه الطبيعية مع الهشاشة الاجتماعية والسياسية والاعتماد الكبير على الزراعة المطرية، كما تجسد بوضوح في موجات الجفاف القاسية التي ضربت المنطقة في 1999–2001 و2007–2008 (Barlow et al., 2016) ، ويُعدّ العراق من أكثر دول المنطقة تعرضًا لمخاطر الجفاف وعدم الاستقرار المائي، نظرًا لوقوعه ضمن النطاق الجاف وشبه الجاف، واعتماده بدرجة كبيرة على الموارد المائية السطحية العابرة للحدود، (نهري دجلة والفرات)، فضلًا عن تراكم تحديات إدارة الموارد والأراضي عبر عقود طويلة، وتشير نتائج الدراسات الحديثة إلى أن العراق يشهد تصاعدًا في شدة الجفاف وتكراره، مترافقًا مع تراجع ملحوظ في الغطاء النباتي، وتزايد عمليات زحف الكثبان الرملية على الأراضي الزراعية، مقرونا بتزايد تكرار الظواهر الغبارية، وهذه المظاهر تعكس هشاشة النظام البيئيّ والمائيّ، في ظل الضغوط المناخية المتزايدة (Adamo et al., 2022). ويشهد العراق ارتفاعاً في درجات الحرارة بمعدلات أسرع من دول عديدة في المنطقة؛ نتيجة لتغير المناخ، إلى جانب انخفاض ملحوظ في كميات الامطار ، أدى ذلك إلى زيادة حادة في حالات الجفاف (Salman et al., 2017) ، في هذا السياق، تشير بعض الدراسات إلى أن المناطق شبه الجافة في العراق أكثر تأثرًا بالتغيرات المناخية مقارنة بالمناطق الجافة (الخالدي، 2025)، نظرًا لحساسيتها العالية للتغيرات في التوازن المائي، وتشير التوقعات المستقبليّة –في ظل سيناريوهات الانبعاثات العالية (RCP 8.5)– إلى استمرار الاتجاهات المناخيّة الحالية، مع ارتفاع في درجات الحرارة، وانخفاض في معدلات الامطار (البديري، b2021) ، يؤدي ذلك إلى زيادة حدّة موجات الجفاف وتكرارها، لا سيّما الجفاف الزراعيّ والهيدرولوجيّ، مع تفاقم العجز المائي؛ نتيجة ارتفاع الطلب التبخيريّ، ما يجعل استخدام مؤشر SPEI ضرورة منهجية لرصد التأثيرات الحرارية التي يغفل عنها مؤشر SPI (Venturi et al., 2025).

تُستخدم النماذج المناخية العالمية (GCMs) على نطاق واسع لنمذجة المناخ والتغيرات في خصائص الجفاف في ظل سيناريوهات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري المختلفة(Wang et al., 2021) وطُوّرت نماذج عديدة في إطار مشاريع المقارنة الدولية المتعاقبة (CMIPs)، بما في ذلك CMIP3 و CMIP5 وأحدثها CMIP6، وقد كشفت دراسات سابقة عن وجود نقاط ضعف أو قصور في نماذج CMIP5 والنماذج الأقدم (Chen et al., 2020) ، مما أدى إلى تباين كبير في

إسقاطات الجفاف باستخدام هذه النماذج، في حين أشارت بعض الدراسات باستخدام نماذج CMIP3 إلى ارتفاع كبير في تكرار الجفاف وشدّته (Zhao & Dai, 2017) ، وقد أظهرت نماذج CMIP5 زيادة أقل حدة، ويتميز الجيل السادس من النماذج (CMIP6) بتحسينات في وصف العمليات الفيزيائية ومعالجة القصور في الإصدارات السابقة (Gusain et al., 2020)، فضلاً عن اندماج مسارات الاجتماعية والاقتصادية المشتركة (SSPs) مع مسارات التركيز الإشعاعي (RCPs) لتوفير سيناريوهات مناخية أكثر شمولية (Gidden et al., 2019).

وعلى الرغم من أهمية النماذج المناخية العالمية، إلا أنها تعمل بمقياس مكاني محدود، مما يجعل مخرجاتها غير قابلة للاستخدام المباشر في تقييمات الجفاف على المستوى المحلي. وللتغلب على هذا القصور، تُستخدم طرق التحويل النطاقي (Downscaling) لمعالجة مخرجات هذه النماذج إلى المقاييس المحلية، تليها عمليات تصحيح للتحيز (Bias Correction)، تأسيسا على ذلك، تنطلق الدراسة من تساؤل مركزي مُفاده: **ما اتجاهات الجفاف المستقبلية في العراق؟**، وفرضية مفادها **أن اتجاهات وفئات الجفاف تتباين مكانيًا وزمانيًا تبعًا لاختلاف سيناريوهات الانبعاثات (SSPs)، مع ميل واضح نحو ازدياد شدة الجفاف تحت السيناريوهات المرتفعة**، وتهدف الدراسة إلى تقييم التغيرات الزمانية والمكانية للجفاف باستخدام مؤشر SPEI-12، وتحليل فئاته وفق تصنيف (Agnew, 2000) تحت سيناريوهات SSPs المختلفة، فضلًا عن تحديد المناطق الأكثر عرضة للجفاف لدعم استراتيجيات التكيف المستقبلية، وتسهم في تقديم إسقاطات محدثة للجفاف في العراق بالاعتماد على نماذج CMIP6، دعما لفهم ديناميكيات الجفاف في البيئات الجافة وشبه الجافة.

منطقة الدراسة

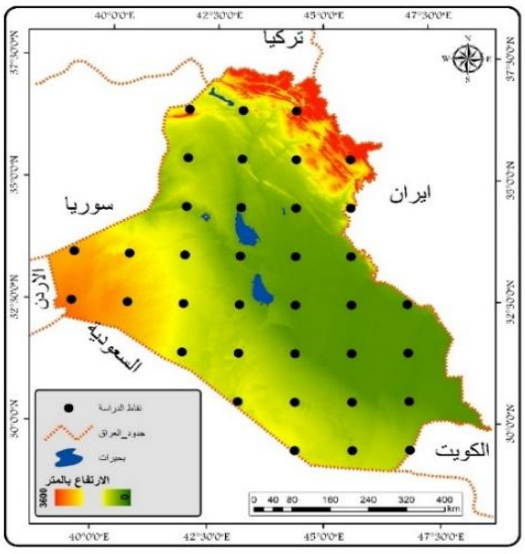
يقع العراق جنوب غرب آسيا، بين دائرتي عرض (29.5°–37.3° شمالاً) وخطي طول (38.4°–48.4° شرقاً)، وتبلغ مساحته نحو 435 ألف كم²، يحده من الشمال تركيا، ومن الشرق إيران، ومن الغرب سوريا والأردن، ومن الجنوب المملكة العربية السعودية والكويت والخليج العربي خريطة (1) (Muslih & Abbas, 2024)، يتباين السطح في العراق بين السهول الفيضية الرسوبية في الوسط والجنوب، ومنطقة الجزيرة بين دجلة والفرات، والسلاسل الجبلية وشبه الجبلية في الشمال والشمال الشرقي من العراق، إضافة إلى الهضبة والصحراء الغربية، ويمنح هذا التنوع التضاريسي البلاد طابعاً حوضياً يؤثر في حركة الكتل الهوائية وتوزيع الأمطار (Al-Ansari, 2021).

يُصنّف مناخ العراق جاف وشبه جاف، مع تذبذب مطري واضح من الشمال الشرقي نحو الجنوب الغربي؛ إذ وتتجاوز امطاره أكثر 900 ملم سنوياً في المرتفعات الشمالية، بينما تنخفض إلى أقل من 100 ملم في المناطق الصحراوية (Salman et al., 2019)، وتتسم درجات الحرارة بمدى سنوي مرتفع، و تتجاوز درجات الحرارة العظمى 45°م صيفاً وتنخفض شتاءً إلى ما دون الصفر في الشمال (Muslih & Abbas, 2024) ، مما يعكس الطابع القاري الجاف للمناخ ويجعل البلاد شديدة الحساسية لتذبذبات الامطار والارتفاع الحراري، ثَم لظاهرة الجفاف بمختلف أنماطه.

منهجية الدراسة

اعتمدت هذه الدراسة على تحليل الجفاف المناخي في العراق باستخدام بيانات مرصودة ونماذج مناخية مستقبلية ضمن إطارٍ منهجيٍ موحّد يغطي المدتين التاريخية والمستقبلية؛ إذ جرى تحليل اتجاهات الجفاف خلال المدة 1990–2024 بالاعتماد على بيانات CRU TS v4.09 ، في حين جرى تقييم الجفاف المستقبلي للمدة 2025–2099 استنادًا إلى مخرجات نموذجين من نماذج المناخ العامة (GCMs) ضمن مشروع المقارنة بين النماذج المناخية (CMIP6)، وهما نموذج GFDL–ESM4 الذي طوّره مختبر ديناميكيات الموائع الجيوفيزيائية التابع للإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA) في الولايات المتحدة الأمريكية، ونموذج ACCESS–CM2 المطوّر من قبل المكتب الأسترالي للأرصاد الجوية بالتعاون مع منظمة البحوث العلمية والصناعية (CSIRO) في أستراليا. وتهدف الدراسة استخدام نموذجين مختلفين إلى تمثيل عدم اليقين المرتبط بالنماذج المناخية، وتعزيز موثوقية النتائج من خلال المقارنة البينية، وقد اعتمد مجموعة من السيناريوهات الاجتماعية–الاقتصادية المشتركة (SSPs)، وهي: السيناريو منخفض الانبعاثات (SSP1–2.6)، والمتوسط (SSP2–4.5)، والمرتفع (SSP3–7.0)، والعالي جدًا (SSP5–8.5)، بهدف تمثيل نطاق واسع من مسارات الانبعاثات المستقبلية المحتملة، ولغرض تحليل التباين الزمني بصورة أكثر دقة، جرى تقسيم الفترة المستقبلية إلى مدتين رئيسيتين، هما المدة المتوسطة (2025–2060) والمدة البعيدة (2061–2096)، بما يتيح مقارنة السلوك المناخي بين الأفقين المتوسط والبعيد، ولتقليل التحيزات المنهجية في مخرجات النماذج، طُبِّق أسلوب رسم الخرائط الكمية (Quantile Mapping) بشكل نقطي على(36) نقطة تمثل الأقاليم المناخية المتنوعة في العراق، بالاستناد إلى بيانات CRU كمرجع للمدة (1990–2014)، باستخدام 100 كمّية احتمالية (quantiles) بخطوة 0.01، مع اعتماد استيفاء من نوع (tricube)، وشمل التصحيح متغيرات الامطار ودرجات الحرارة الصغرى والعظمى، مع معالجة القيم غير المنطقية بعد التصحيح لضمان الاتساق الفيزيائي للسلاسل الزمنية، واستُخدمت السلاسل الزمنية المصححة في حساب مؤشر الامطار والتبخر–النتح القياسي (SPEI–12)، ثم جرى تحليل الاتجاهات الزمنية باستخدام اختبار مان–كيندال المعدل (Modified Mann–Kendall Test)، مع تقدير مقدار التغيّر واتجاهه باستخدام منحدر سين (Sen’s slope)، بما يتيح تقييم تطور الجفاف مكانياً وزمانياً واستشراف سلوكه المستقبلي ضمن سيناريوهات متعددة، وبما يتوافق مع المعايير المعتمدة في الدراسات المناخية العالمية، واعتمدت الدراسة على تصنيف (Agnew, 2000) الجدول (1) لتمثيل أصناف الجفاف في العراق.

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة وتضاريسها مع النقاط المختارة



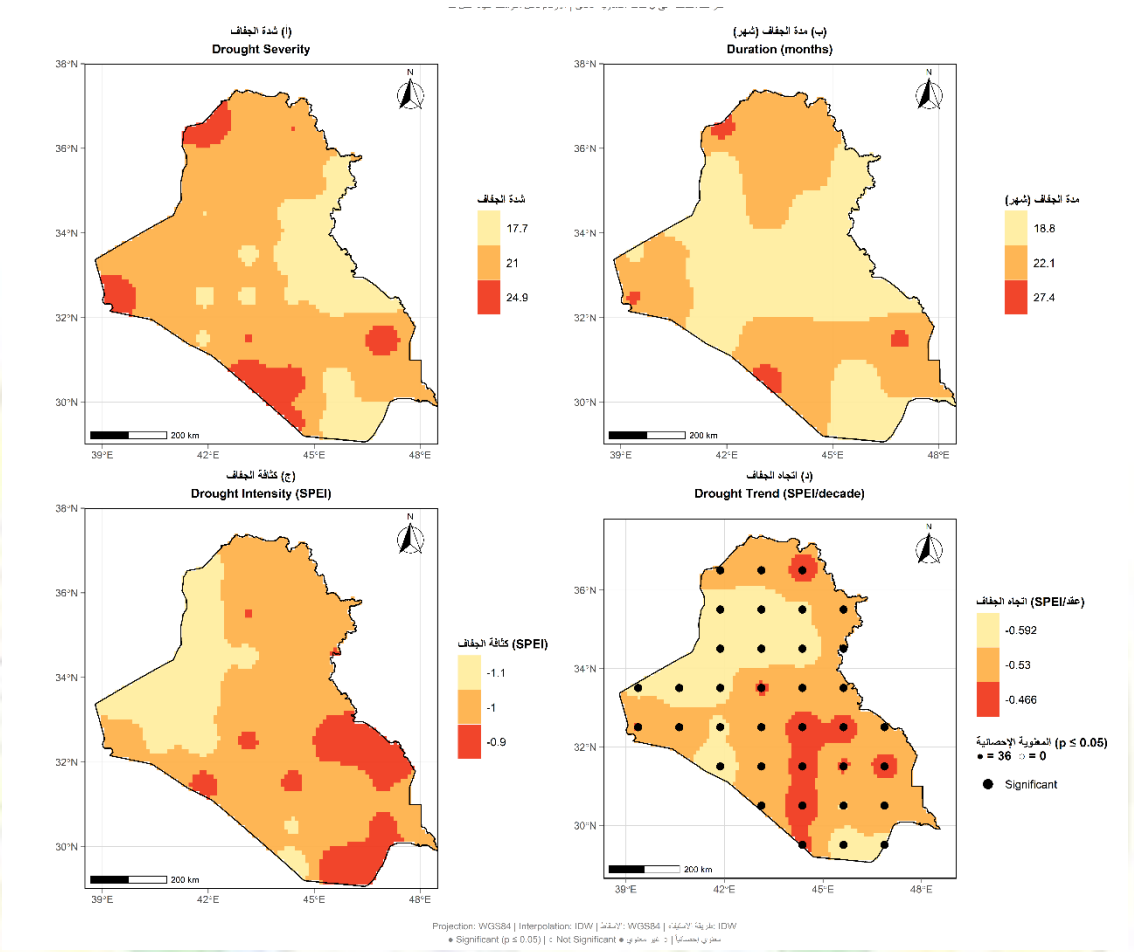
جدول (1) تصنيف فئات الجفاف وفق تصنيف (Agnew, 2000)		
قيم SPEI	فئات الجفاف	
0 < SPEI	NO Drought	ظروف معتدلة
−0.50 ≤ SPEI <0	Mild drought	الجفاف الخفيف
−0.84 ≤ SPEI < −0.50	Moderately Drought	الجفاف المعتدل
−1.28 ≤ SPEI < −0.84	Severely Drought	الجفاف الشديد
−1.65 ≤ SPEI < −1.28	Extremely	الجفاف المتطرف
SPEI < −1.65	Very Extremely	الجفاف المتطرف جدا
(Kenawy et al., 2016)		

نتائج الدراسة

1. اتجاهات الجفاف المرصودة

تُظهر نتائج تحليل السلاسل الزمنية لمؤشر الجفاف (SPEI) في العراق للمدّة (1990–2024) تحولاً ملموساً نحو ظروف أكثر جفافاً، مع زيادة واضحة في تكرار وشدة الجفاف، لا سيّما في العقدين الأخيرَين، وقد سجل المؤشر اتجاهاً متناقصاً معنوياً بمعدل (−0.55) لكل عقد زمني، ، ما يشير إلى تسارع وتيرة العجز المائيّ الناتج عن نقص الامطار، والارتفاع في معدلات التبخر–نتح الممكن، أظهرت خرائط خصائص الجفاف في العراق (1990–2024) توزيعاً مكانياً متفاوتاً، كما هو موضح في خريطة (2) حيث تراوحت شدة الجفاف بين (17.7 – 24.9) في ثلاثة نطاقات، وكان النطاق المتوسط (21.0) هو الأكثر انتشاراً في جميع أجزاء العراق، أمّا مدة الجفاف فتراوحت بين (18.8 – 27.4) شهراً، حيث سيطرت الفئة (18.8 شهر) على المناطق الوسطى وبعض المناطق الجنوبية، بينما تمركزت الفئة (22.1 شهر) في المناطق الشمالية وأغلب المناطق الجنوبية، كما تراوحت كثافة الجفاف بين (−0.9 إلى −1.1) موزعة في جميع أجزاء العراق، فيما أظهرت خريطة الاتجاه (2–د) اتجاهاً متزايداً للجفاف ذا دلالة إحصائية في جميع أنحاء العراق، بتراوح قيم الميل بين (−0.46 إلى −0.59) لكل عقد، مما يؤكد تزايد حدة الجفاف خلال الفترة المدروسة.

خريطة (2): التوزيع المكاني لخصائص الجفاف في العراق (1990–2024)



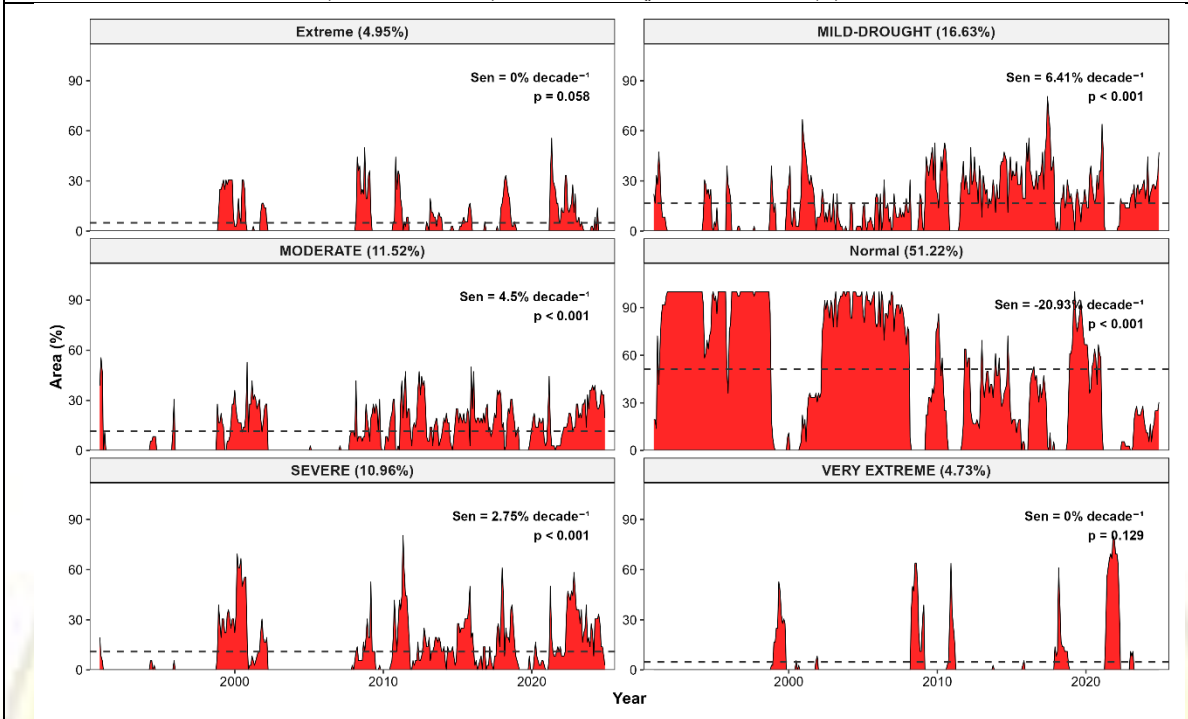
المصدر: اعتمادا على بيانات CRU TS v4.09 / https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/ /

2. اتجاهات فئات الجفاف المرصودة

يُظهر الشكل (1) التغير الزمني للنسب المئوية للمناطق المتأثرة بفئات الجفاف المختلفة في العراق في المدة (1990–2024)، وفق تصنيف Agnew (2000)، تُظهر نتائج تحليل مؤشر الامطار والتبخر–النتح القياسي (SPEI–12)) تغيرات مكانية وزمانية في أنماط الجفاف في العراق، فقد استحوذت الفئة الطبيعية (Normal) على النسبة الأكبر من إجمالي التكرارات بالعراق بنسبة بلغت (51.2%)، إلا أنها سجلت اتجاهاً تناقصياً معنوياً إحصائياً بلغ نحو (-20.9%) لكل عقد زمني ($p < 0.001$). وفي المقابل، أظهرت فئات الجفاف الخفيف والمعتدل والشديد اتجاهات تصاعدية معنوية بلغت (6.4%) و(4.5%) و(2.8%) لكل عقد على التوالي ($p < 0.001$)، مما يعكس تزايداً تدريجياً في انتشار ظروف الجفاف خلال مدة الدراسة.

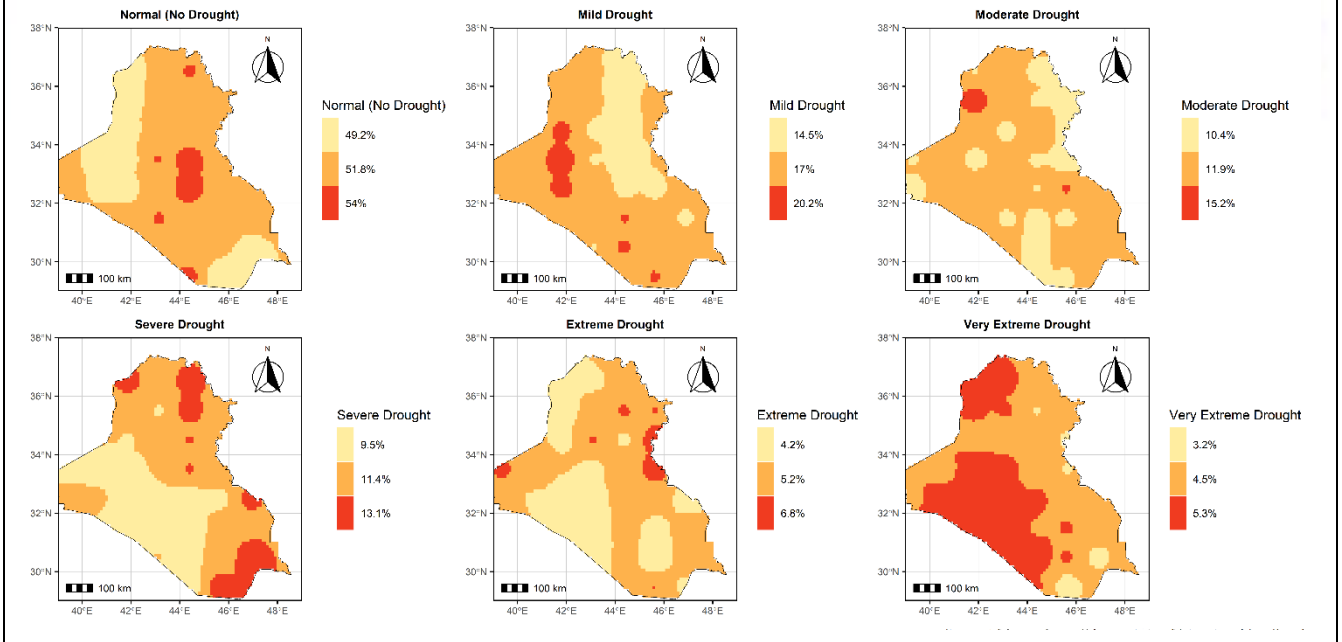
كما أظهرت فئتا الجفاف المتطرف والجفاف الشديد جداً تذبذباً زمنياً ملحوظاً، مع اتساع رقع انتشارهما خلال سنوات الجفاف الرئيسة، ولا سيما أواخر تسعينيات القرن الماضي ، وتشير هذه الأنماط إلى تحول تدريجي في التوزيع الزماني والمكاني نحو ظروف أكثر جفافاً، يتمثل في تراجع هيمنة الفئة الطبيعية مقابل ازدياد تكرار واتساع الفئات الجافة بمختلف درجاتها، الأمر الذي يعكس تنامياً في مخاطر الجفاف المناخي في العراق خلال العقود الأخيرة، ويرتبط على الأرجح بتزايد الضغوط المناخية المتمثلة بارتفاع درجات الحرارة وتذبذب كميات تساقط الامطار، مكانيا تُظهر خريطة (3) تبايناً مكانياً واضحاً في توزيع فئات الجفاف في العراق، إذ سادت فئة الجفاف الطبيعي (Normal) على أكبر نسبة من مساحة البلاد، تراوحت بين (49.2–54%)، مع تسجيل أعلى قيمة بلغت (51.8%)، تركزت امتداداتها من الشمال الشرقي نحو الجنوب، أما فئة الجفاف الخفيف (Mild Drought)، فقد تراوحت نسبتها بين (14.5–20.2%)، وكانت القيمة الأكثر انتشاراً (17%)، متوزعة بشكل شبه متصل من شمال العراق إلى جنوبه، في حين سجلت فئة الجفاف المعتدل (Moderate Drought) نسباً تراوحت بين (10.4–15.2%)، حيث مثلت نسبة (11.9%) النطاق الأوسع انتشاراً، وشملت معظم أجزاء العراق، أما فئة الجفاف الحاد (Severe Drought)، فقد ظهرت بثلاثة نطاقات مكانية تراوحت نسبها بين (9.5–13.1%)، إذ تركز النطاق الأول (9.5%) في بعض المناطق الغربية والجنوبية الغربية، بينما ظهر النطاق الثاني (11.4%) في مناطق شمالية ووسطى، في حين امتد النطاق الثالث (13.1%) ليشمل أجزاءً من المناطق الشمالية والجنوبية، أما فئة الجفاف المتطرف (Extreme Drought)، فقد تراوحت نسبتها بين (4.2–6.8%)، وكانت القيمة الأكثر انتشاراً (5.2%)، موزعة على معظم مناطق العراق، في المقابل، سجلت فئة الجفاف المتطرف جداً (Very Extreme Drought) نسباً تراوحت بين (3.2–5.3%)، حيث تركزت النسبة (4.5%) في المناطق الشمالية الشرقية امتدادا نحو الجنوب الشرقي، في حين ظهرت النسبة الأعلى (5.3%) في المناطق الشمالية الغربية وبعض المناطق الوسطى وأجزاء من الجنوب الغربي.

شكل (1) فئات الجفاف في العراق للمدة (1990 – 2024)



المصدر: اعتمادا على بيانات CRU TS v4.09 / https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/

خريطة (3) التباين الزماني والمكاني لفئات الجفاف في العراق للمدة (1990 – 2024)



المصدر: اعتمادا على بيانات CRU TS v4.09 / https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/

3. اتجاهات الجفاف للسيناريوهات المستقبلية

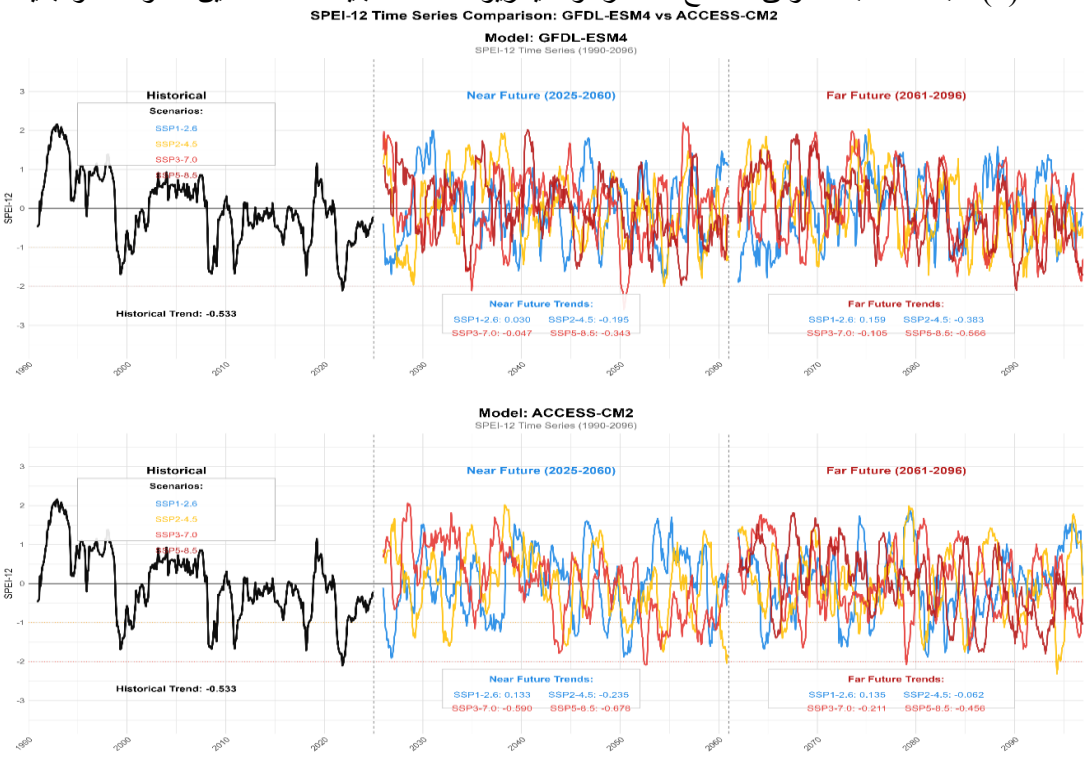
يتضح من الشكل (2) والجدول (2) وجود تباين واضح في اتجاهات الجفاف بين السيناريوهات المناخية المختلفة، بما يعكس حساسية النظام المناخي في العراق لمسارات الانبعاثات المستقبلية، ففي السيناريو منخفض الانبعاثات (SSP1–2.6)، سُجلت اتجاهات رطوبة في كلا النموذجين، إذ تراوح متوسط الاتجاه بين (0.13 –0.16) عقد خلال المدة البعيدة، مع دلالة إحصائية بلغت نسبتها (75–81) % من نقاط الدراسة، مما يشير إلى تحسن نسبي محتمل في ظروف الرطوبة تحت سياسات مناخية فعّالة للحد من الانبعاثات، في المقابل، أظهر السيناريو عالي الانبعاثات (SSP5–8.5) اتجاهات جفاف واضحة ومستمرة في جميع المدد والنماذج، حيث بلغ متوسط الاتجاه (–0.68) عقد في نموذج ACCESS–CM2 و(–0.32) في GFDL–ESM4 خلال المدة المتوسطة، واستمرت هذه الاتجاهات السالبة في المدة البعيدة لتصل إلى (–0.45) و(–0.57) على التوالي، مع تسجيل دلالة إحصائية في جميع المحطات (100%) ، وهذا يعكس درجة عالية من الثقة في تفاقم الجفاف تحت هذا السيناريو ،و كشفت النتائج ايضا عن تباين ملحوظ بين النموذجين، خاصة ضمن السيناريوهات المتوسطة (SSP2–4.5 وSSP3–7.0)، حيث أظهر نموذج ACCESS–CM2 في سيناريو SSP3–7.0 اتجاهاً قوياً نحو الجفاف خلال الفترة القريبة (–0.58)، في حين كان نموذج GFDL–ESM4 قريباً من الحالة المتعادلة (–0.04) مع نسبة معنوية منخفضة (36%). ويُعزى هذا التباين إلى اختلاف تمثيل العمليات المناخية في النماذج، لا سيما التفاعلات بين السطح والغلاف الجوي وتأثيرات الخصائص المحلية مثل التضاريس والغطاء الأرضي، وعلى المستوى الزمني، يُلاحظ أن نموذج ACCESS–CM2 يُظهر تحسناً نسبياً من المدة القريبة إلى البعيدة عبر معظم السيناريوهات، في حين يُظهر نموذج GFDL–ESM4 اتجاهاً نحو التدهور في السيناريوهات عالية الانبعاثات، وهو اختلاف سلوكي يشير إلى تباين استجابة النماذج للتغير المناخي، ويتطلب مزيداً من التحليل لفهم الآليات الديناميكية المرتبطة به.

جدول (2) اتجاهات الجفاف المستقبلية (SPEI-12) وفق السيناريوهات والنماذج العالمية خلال المدتين المتوسطة والبعيدة

النموذج	السيناريو	المدة	متوسط الاتجاهات	اقل اتجاه	اعلى اتجاه	النقاط المعنوية	عدد النقاط	نسبة المعنوية
access_cm2	SSP126	البعيدة	0.14	-0.06	0.24	29	36	81
access_cm2	SSP126	المتوسطة	0.13	-0.15	0.46	21	36	58
access_cm2	SSP245	البعيدة	-0.06	-0.27	0.19	23	36	64
access_cm2	SSP245	المتوسطة	-0.24	-0.47	-0.06	31	36	86
access_cm2	SSP370	البعيدة	-0.23	-0.55	0.11	27	36	75
access_cm2	SSP370	المتوسطة	-0.58	-0.71	-0.32	36	36	100
access_cm2	SSP585	البعيدة	-0.45	-0.69	-0.16	36	36	100
access_cm2	SSP585	المتوسطة	-0.68	-0.79	-0.38	36	36	100
gfdl_esm4	SSP126	البعيدة	0.16	-0.03	0.31	27	36	75
gfdl_esm4	SSP126	المتوسطة	0.02	-0.13	0.24	6	36	17
gfdl_esm4	SSP245	البعيدة	-0.40	-0.53	-0.28	36	36	100
gfdl_esm4	SSP245	المتوسطة	-0.18	-0.35	-0.04	33	36	92
gfdl_esm4	SSP370	البعيدة	-0.11	-0.30	0.14	28	36	78
gfdl_esm4	SSP370	المتوسطة	-0.04	-0.19	0.17	13	36	36
gfdl_esm4	SSP585	البعيدة	-0.57	-0.73	-0.32	36	36	100
gfdl_esm4	SSP585	المتوسطة	-0.32	-0.44	-0.18	36	36	100

المصدر: اعتمادا على بيانات / https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/

شكل (2) اتجاهات الجفاف وفق النماذج المختارة والسيناريوهات المستقبلية خلال المدتين المتوسطة والبعيدة

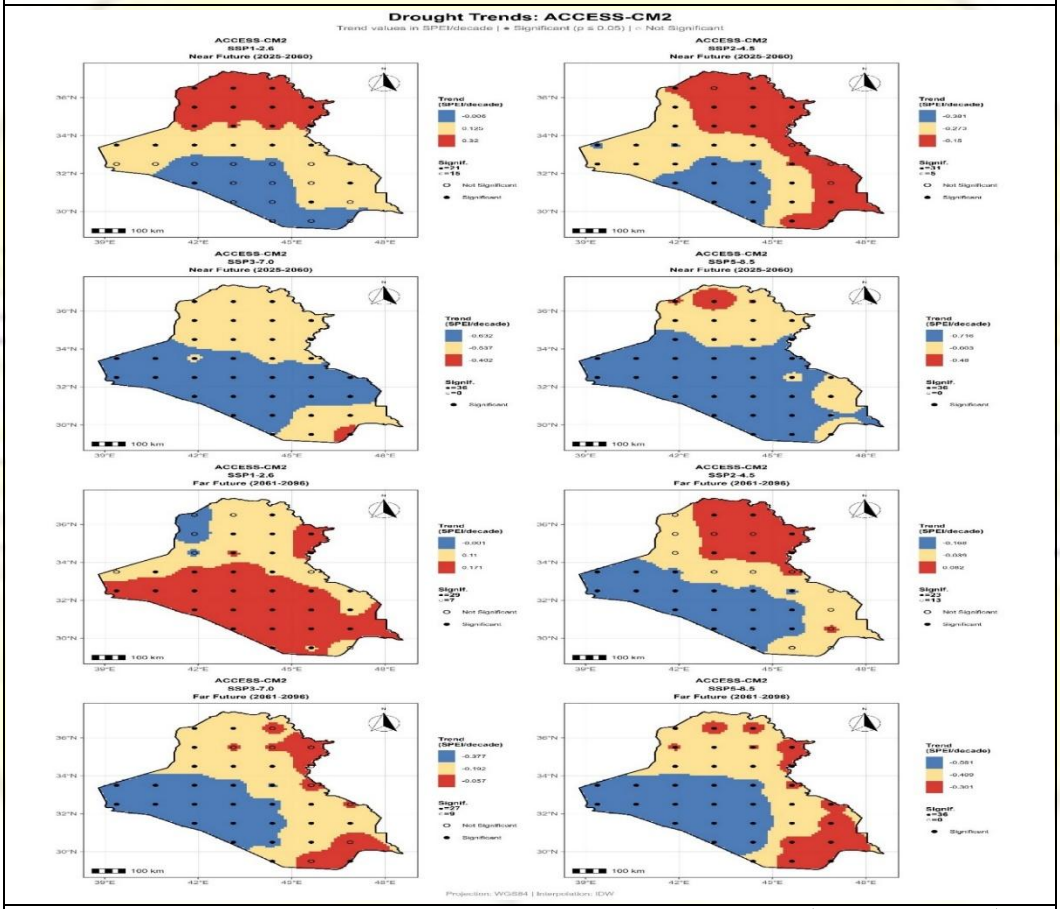


المصدر: اعتمادا على بيانات /https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl

من الناحية المكانية خريطة (4)، تُظهر نتائج نموذج ACCESS-CM2 وفق السيناريو منخفض الانبعاثات (SSP1-2.6) وجود اتجاهات نحو زيادة الرطوبة خلال المدة القريبة، حيث تراوحت قيم الاتجاه بين (0.13-0.32) عقد، وتمركزت بصورة رئيسة في المناطق الشمالية والوسطى، مع نسبة معنوية بلغت (58%). في المقابل، تشير نتائج المدة البعيدة إلى اتساع نطاق هذه الاتجاهات الرطبة، إذ سُجلت قيم موجبة في معظم المحطات، مع تركز أوضح في المناطق الوسطى والجنوبية، وارتفاع نسبة المعنوية إلى (81%)، مما يعكس تعززاً ملحوظاً في ظروف الرطوبة مستقبلاً، أما في السيناريو المتوسط (SSP2-4.5)، فتُظهر نتائج المدة القريبة اتجاهات نحو زيادة الجفاف، حيث تراوح مقدار التغير بين (-0.15 - -0.38) عقد، مع تركز أعلى القيم في المناطق الجنوبية الغربية، وبلوغ نسبة المعنوية (86%). في حين تشير نتائج المدة البعيدة إلى تراجع نسبي في شدة هذه الاتجاهات، إذ سُجلت تغيرات طفيفة مقارنة بالمدة القريبة، مع انخفاض نسبة المعنوية إلى (64%)، مما يدل على تذبذب نسبي في وضوح الإشارة المناخية المستقبلية، من جهة أخرى، سجّل السيناريو المرتفع (SSP3-7.0) خلال المدة القريبة تغيرات واضحة نحو زيادة الجفاف، حيث تراوح مقدار التغير بين (-0.40 - -0.63) عقد، مع تركز أعلى القيم في المناطق الوسطى وبعض المناطق الجنوبية، وبلوغ نسبة المعنوية (100%). بينما خلال المدة البعيدة، انخفضت شدة هذه التغيرات نسبياً، إذ تراوحت القيم بين (-0.06 - -0.38) عقد، مع تركز أعلى التغيرات في المناطق الجنوبية الغربية، وبلوغ نسبة معنوية (75%)، الأمر الذي يشير إلى استمرار الاتجاه نحو الجفاف ولكن بدرجة أقل حدة مقارنة بالمدة القريبة.

علاوة على ذلك، سجّل السيناريو المرتفع جداً (SSP5–8.5) خلال المدة القريبة تغيرات حادة نحو زيادة الجفاف، حيث تراوح مقدار التغير بين (–0.48 – –0.72) عقد، مع تركز واضح لهذه القيم في المناطق الجنوبية والوسطى، وبلوغ نسبة المعنوية (100%)، وهو ما يعكس شدة واستقرار الاتجاهات السالبة تحت هذا السيناريو. في المقابل، استمرت هذه الاتجاهات خلال المدة البعيدة على امتداد معظم أجزاء العراق، حيث تراوح مقدار التغير بين (–0.32 – –0.58) عقد، مع تركز أعلى القيم في بعض المناطق الجنوبية والغربية والوسطى، مما يؤكد استمرار تأثير السيناريو المرتفع في تعزيز ظروف الجفاف على المدى الطويل.

خريطة (4) التوزيع المكاني لاتجاهات الجفاف وفق نموذج ACCESS-CM2 في ظل سيناريوهات SSPs المختلف

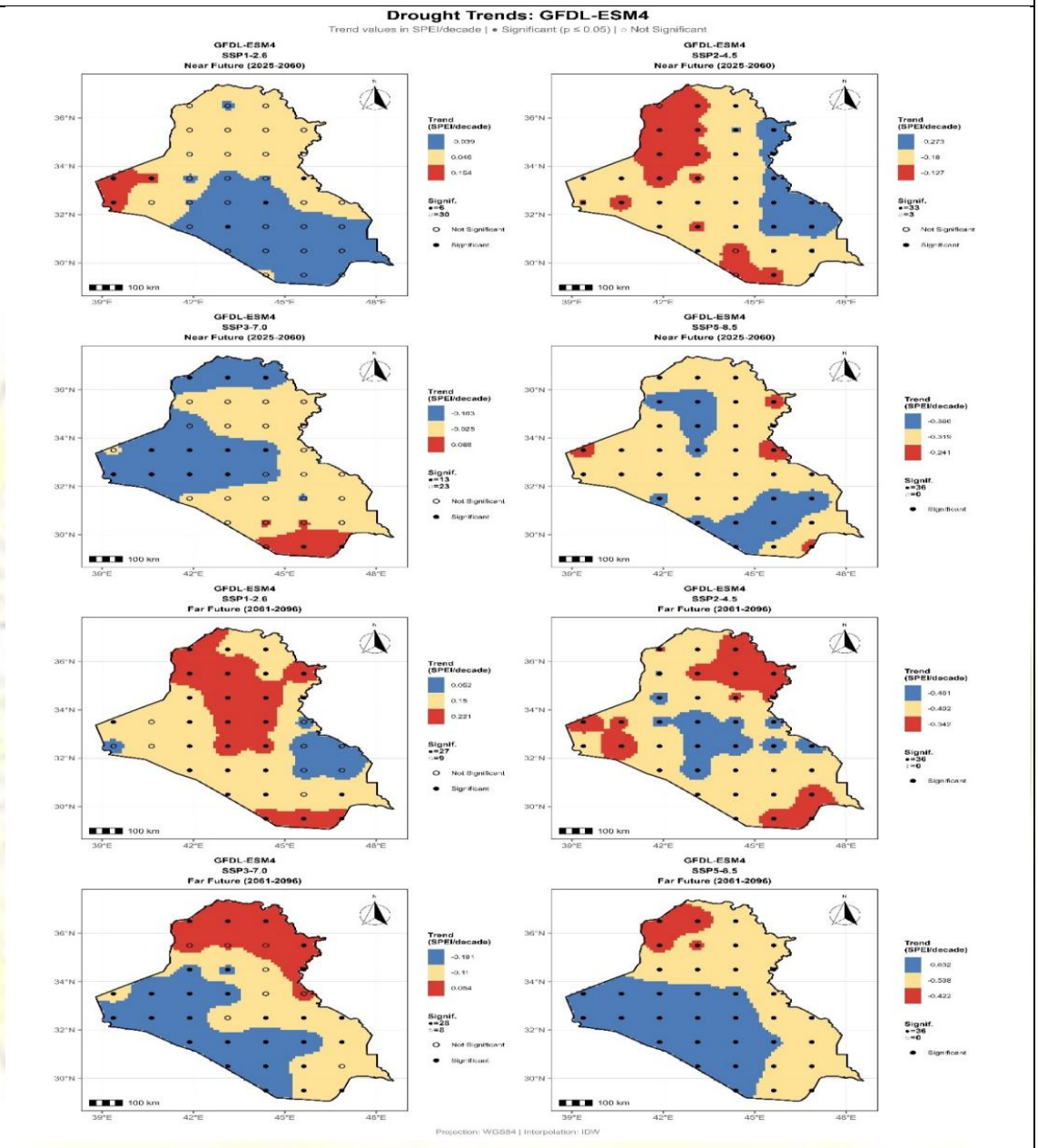


المصدر: اعتمادا على بيانات / https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/

من الناحية المكانية خريطة (5)، أظهرت نتائج نموذج GFDL–ESM4 تبايناً واضحاً في اتجاهات الجفاف ، ففي السيناريو المنخفض الانبعاثات (SSP1–2.6)، سُجلت خلال المدة المتوسطة اتجاهات طفيفة نحو زيادة الرطوبة، بلغت نحو (0.15) عقد، تركزت في المنطقة الغربية، إلا أنها اتسمت بضعف دلالتها الإحصائية، حيث لم تتجاوز نسبة المعنوية (17%)، في المقابل، شهدت المدة البعيدة تحولاً أكثر وضوحاً نحو الظروف الرطبة، إذ تراوحت قيم الاتجاه بين (0.05–0.22) عقد، مع تركز أعلى القيم في بعض المناطق الوسطى والشمالية الغربية، وارتفاع نسبة المعنوية إلى (75%)، مما يشير إلى تحسن نسبي في ظروف الرطوبة على المدى البعيد، أما في السيناريو المتوسط (SSP2–4.5)، فقد أظهرت نتائج المدة المتوسطة سيادة

اتجاهات نحو الجفاف في عموم العراق، حيث تراوح مقدار التغير بين (−0.13 − −0.27) عقد، مع تسجيل أعلى قيم الجفاف في المناطق الشرقية، وبلوغ نسبة النقاط المعنوية (92%)، واستمر هذا النمط خلال المدة البعيدة، ولكن بشدة أكبر، إذ تراوحت القيم بين (−0.034 − −0.46) عقد، مع تركز أشد حالات الجفاف في بعض المناطق الوسطى، وارتفاع نسبة المعنوية إلى (100%)، مما يعكس ترسخ الاتجاهات الجافة تحت هذا السيناريو، و سجل السيناريو المرتفع (SSP3−7.0) المدة المتوسطة اتجاهات ضعيفة نحو الجفاف، بلغت نحو (−0.10) عقد، تركزت في المناطق الشمالية والغربية وأجزاء من المنطقة الوسطى، مع نسبة معنوية منخفضة نسبياً بلغت (36%). غير أن الصورة اختلفت في المدة البعيدة، حيث ظهرت تباينات مكانية واضحة؛ إذ سجلت المناطق الشمالية اتجاهات طفيفة نحو الرطوبة (0.05)عقد، في حين سادت اتجاهات نحو الجفاف في المناطق الوسطى والجنوبية، تراوحت بين (−0.11 إلى −0.19) عقد، مع نسبة معنوية بلغت (78%)، مما يشير إلى تزايد عدم التجانس المكاني في الاستجابة المناخية، أما السيناريو المرتفع جداً (SSP5−8.5)، فقد أظهر نمطاً واضحاً من الجفاف الشامل خلال المدة المتوسطة، حيث تراوحت قيم الاتجاه بين (−0.24 إلى −0.37) عقد، وشملت هذه القيم جميع أنحاء العراق، مع دلالة إحصائية كاملة (100%)، وتفاقمت هذه الاتجاهات خلال المدة البعيدة، إذ تراوحت بين (−0.42 إلى −0.62) عقد، مع تسجيل أشد حالات الجفاف في المناطق الغربية والجنوبية الغربية، وجميعها ذات دلالة إحصائية عالية (100%)، مما يعكس تأثيراً قوياً ومستداماً لسيناريو الانبعاثات المرتفعة في تعزيز ظروف الجفاف مستقبلاً.

خريطة (5) التوزيع المكاني لاتجاهات الجفاف وفق نموذج GFDL–ESM4 –في ظل سيناريوهات SSPs المختلف



المصدر: اعتمادا على بيانات / https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/

4. اتجاهات فئات الجفاف المستقبلية

كشف الجدول (3) والشكل (3) عن تحوّلٍ واضح في النظام الهيدرومناخي في العراق، يتمثل في تراجعٍ منتظم في تكرار الفئة الطبيعية (No Drought) يقابله توسّع متزايد في فئات الجفاف، مع تعاظم هذا النمط تدريجيًا بارتفاع مستويات الانبعاثات،

وبصورة أكثر وضوحًا عند الانتقال من المدة المتوسطة (2025–2060) إلى المدة البعيدة (2061–2096)، ففي السيناريو منخفض الانبعاثات (SSP1–2.6)، تتسم الاتجاهات خلال المدة المتوسطة بضعفها وعدم معنويتها الإحصائية في كلا النموذجين، حيث بلغ الانخفاض في الفئة الطبيعية نحو (−1.23)% عقد في نموذج GFDL–ESM4 و(−2.34)% عقد في ACCESS–CM2، ومع الانتقال إلى المدة البعيدة يتزايد هذا الانخفاض نسبيًا ليصل إلى (−3.45)% عقد و(−3.90)% عقد على التوالي، دون أن يبلغ مستوى الدلالة الإحصائية، وهو ما يعكس استمرار حالة من الاستقرار النسبي في توزيع فئات الجفاف، أما في السيناريو المتوسط (SSP2–4.5)، فتظهر خلال المدة المتوسطة مؤشرات أولية لتحول النظام المناخي نحو الجفاف، إذ سجلت الفئة الطبيعية انخفاضًا معنويًا تراوح بين (−5.67)%/عقد في GFDL–ESM4 و(−6.78)% عقد في ACCESS–CM2، ويتعزز هذا الاتجاه بشكل أوضح خلال المدة البعيدة، حيث يتعمق الانخفاض ليبلغ (−11.85)% عقد و(−13.68)% عقد على التوالي، بالتزامن مع زيادات ملحوظة في فئات الجفاف، خاصة المعتدل والحاد، التي ارتفعت إلى نحو (4.12–4.56)% عقد و(3.89)%/عقد، مما يشير إلى انتقال تدريجي نحو ظروف أكثر جفافًا، ويزداد هذا التحول حدةً في السيناريو المرتفع (SSP3–7.0)، إذ تسجل المدة المتوسطة انخفاضًا كبيرًا ومعنويًا في الفئة الطبيعية بلغ (−8.34)% عقد في GFDL–ESM4 و(−9.45)% عقد في ACCESS–CM2، بينما تتزايد هذه القيم خلال المدة البعيدة لتصل إلى (−16.56)% عقد و(−19.67)% عقد على التوالي، وهو ما يتزامن مع زيادات واضحة في فئات الجفاف المعتدل والحاد، التي بلغت نحو (5.67–5.89)% عقد و(4.89–5.12)% عقد، فضلًا عن ظهور زيادات معنوية في فئة الجفاف الشديد، مما يعكس تصاعدًا واضحًا في شدة الجفاف، أما في السيناريو المرتفع جدًا (SSP5–8.5)، فتبلغ التغيرات ذروتها، حيث تسجل المدة المتوسطة انخفاضًا حادًا في الفئة الطبيعية يتراوح بين (−10.23)% عقد في GFDL–ESM4 و(−12.34)% عقد في ACCESS–CM2، في حين يتعمق هذا الانخفاض بشكل كبير خلال المدة البعيدة ليصل إلى (−21.11)% عقد و(−24.34)% عقد على التوالي، وجميعها ذات دلالة إحصائية عالية، ويقابل ذلك ارتفاع واسع ومعنوي في مختلف فئات الجفاف، إذ يصل الجفاف المعتدل إلى (6.78–7.89)% عقد، والجفاف الحاد إلى (5.23–6.12)% عقد، فضلًا عن زيادات ملحوظة في الجفاف الشديد (حتى 2.34–3.45)% عقد والجفاف الشديد جدًا (حتى 3.33–4.01)% عقد، مما يعكس انتقالًا واضحًا نحو سيادة ظروف جفاف متطرفة على المدى البعيد، كما يُلاحظ أن فئة الجفاف الخفيف (Mild Drought) تبقى في معظم الحالات غير معنوية إحصائيًا خلال المدتين كلتاهما، على الرغم من تسجيل زيادات طفيفة، وهو ما يشير إلى أن التغير المناخي لا يتمّ عبر تدرج سلس في الفئات الضعيفة، بل من خلال انتقال مباشر نحو الفئات الأشد. وعلى مستوى المقارنة بين النماذج، يُظهر نموذج ACCESS–CM2 استجابة أكثر حدة، خاصة خلال المدة البعيدة، سواء من حيث مقدار الانخفاض في الفئة الطبيعية أو حجم الزيادة في فئات الجفاف، مما يعكس حساسية أعلى لهذا النموذج تجاه التغيرات المناخية. وبصورة عامة، تؤكد هذه النتائج أن العراق يتجه نحو تحوّل تدريجي لكنه متسارع نحو ظروف أكثر جفافًا، يتعاظم بمرور الزمن ومع ارتفاع الانبعاثات، ولا سيما عند الانتقال من المدة المتوسطة إلى المدة البعيدة، أما في السيناريو المرتفع جداً (SSP5–8.5)، فتبلغ التغيرات أقصاها، حيث تسجل الفئة الطبيعية أكبر انخفاض لها، يتراوح بين (−10.23 إلى −21.11) %عقد في GFDL–ESM4، وبين (−12.34 إلى −24.34) %عقد في ACCESS–CM2، وجميعها ذات دلالة إحصائية عالية،

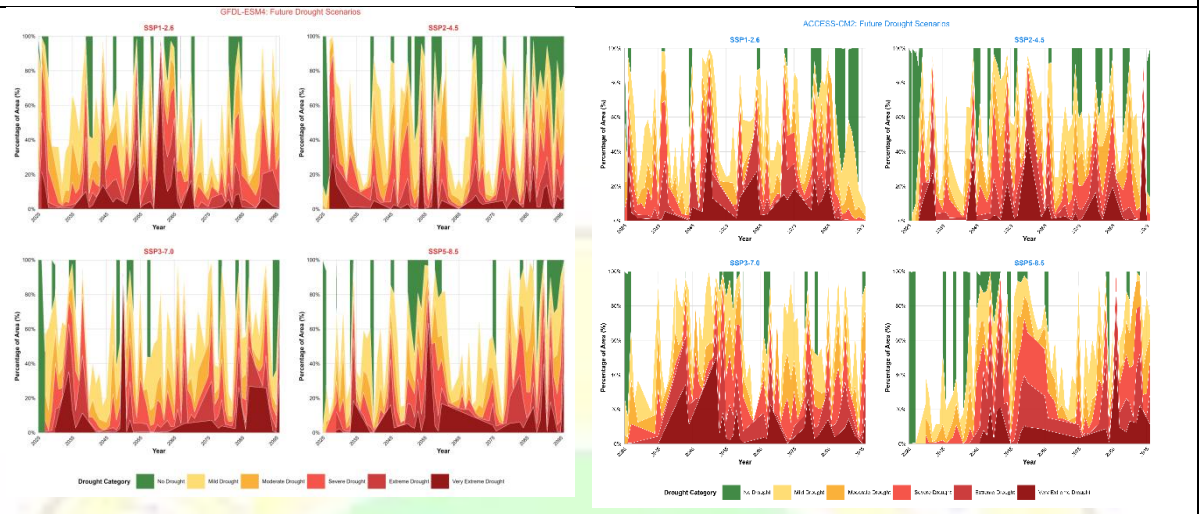
خاصة في المدة البعيدة، وهو ما يقابله ارتفاع كبير ومعنوي في جميع فئات الجفاف، إذ يصل الجفاف المعتدل إلى (6.78 و7.89) %عقد، والجفاف الحاد إلى (5.23 و6.12) %عقد، فضلاً عن تسجيل زيادات واضحة في الجفاف المتطرف (حتى 2.34 و3.45 %عقد) والجفاف المتطرف جداً (حتى 3.33 و4.01 %عقد)، مما يدل على انتقال صريح نحو سيادة ظروف جفاف متطرفة، كما يُلاحظ أن فئة الجفاف الخفيف (Mild Droughtتبقى في معظم الحالات غير معنوية إحصائياً رغم تسجيل زيادات طفيفة، وهو ما يشير إلى أن التغير المناخي لا يتجلى بزيادة تدريجية في الحالات الضعيفة، بل من خلال انتقال مباشر نحو الفئات الأشد. وعلى مستوى المقارنة بين النماذج، يُظهر نموذج ACCESS-CM2 استجابة أكثر حدة واتساعاً مقارنةً بـ GFDL-ESM4، سواء من حيث مقدار الانخفاض في الفئة الطبيعية أو حجم الزيادة في فئات الجفاف، خاصة في المدة البعيدة، مما يعكس حساسية أعلى لهذا النموذج تجاه التغيرات المناخية، وبصورة عامة، تؤكد هذه النتائج أن العراق يتجه نحو تحوّل تدريجي لكنه متسارع نحو ظروف أكثر جفافاً، يتعاظم مع الزمن ومع ارتفاع الانبعاثات، وهو ما يمثل إشارة مناخية قوية ذات تأثير مباشرة على الموارد المائية والاستدامة البيئية، ويستدعي تبني استراتيجيات تكيف فعالة للتقليل من آثار هذا التحول مستقبلاً.

جدول (3) اتجاهات فئات الجفاف المستقبلية (SPEI-12) (%) حسب النماذج والسيناريوهات المُستخدمة للمدتين المتوسطة والبعيدة

النموذج	السيناريو	المدة	لا جفاف		جفاف خفيف		جفاف معتدل		جفاف شديد		جفاف متطرف		جفاف متطرف جداً	
Model	Scenario	Period	No Drought	sig	Mild	sig	Moderate	sig	Severe	sig	Extreme	sig	Very Extreme	sig
GFDL-ESM4	SSP1-2.6	المتوسطة	-1.23	ns	0.89	ns	0.23	ns	0.12	ns	0.04	ns	0.01	ns
GFDL-ESM4	SSP1-2.6	البعيدة	-3.45	ns	1.45	ns	0.67	ns	0.34	ns	0.12	ns	0.03	ns
GFDL-ESM4	SSP2-4.5	المتوسطة	-5.67	**	1.89	*	2.34	ns	1.89	*	0.56	ns	0.12	ns
GFDL-ESM4	SSP2-4.5	البعيدة	-11.85	***	2.78	ns	4.12	**	3.89	**	1.23	ns	0.78	ns
GFDL-ESM4	SSP3-7.0	المتوسطة	-8.34	***	2.34	ns	3.45	**	2.89	**	0.89	ns	0.23	ns
GFDL-ESM4	SSP3-7.0	البعيدة	-16.56	***	3.89	ns	5.67	***	4.89	***	1.56	*	1.11	*
GFDL-ESM4	SSP5-8.5	المتوسطة	-10.23	***	2.45	ns	4.23	***	3.45	**	1.23	*	0.45	*
GFDL-ESM4	SSP5-8.5	البعيدة	-21.11	***	3.12	ns	6.78	***	5.23	***	2.34	**	3.33	**
ACCESS-CM2	SSP1-2.6	المتوسطة	-2.34	ns	1.12	ns	0.67	ns	0.23	ns	0.08	ns	0.02	ns
ACCESS-CM2	SSP1-2.6	البعيدة	-3.9	ns	1.78	ns	0.89	ns	0.45	ns	0.15	ns	0.08	ns
ACCESS-CM2	SSP2-4.5	المتوسطة	-6.78	***	2.12	ns	2.89	**	2.34	*	0.89	ns	0.23	ns
ACCESS-CM2	SSP2-4.5	البعيدة	-13.68	***	3.23	ns	4.56	***	3.89	**	1.78	*	1.55	*
ACCESS-CM2	SSP3-7.0	المتوسطة	-9.45	***	2.67	ns	4.23	***	3.45	**	1.23	ns	0.34	ns
ACCESS-CM2	SSP3-7.0	البعيدة	-19.67	***	4.12	ns	5.89	***	5.12	***	2.12	*	1.22	*
ACCESS-CM2	SSP5-8.5	المتوسطة	-12.34	***	2.89	ns	5.12	***	4.23	***	2.12	**	0.67	**
ACCESS-CM2	SSP5-8.5	البعيدة	-24.34	***	3.89	ns	7.89	***	6.12	***	3.45	***	4.01	**

المصدر: اعتمادا على بيانات / https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/

شكل (3) النسب المئوية لفئات الجفاف المستقبلية (SPEI–12) للنماذج والسيناريوهات المختلفة



المصدر: اعتمادا على بيانات / https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/

المناقشة:

تكشف نتائج الدراسة عن اتجاه واضح نحو تزايد الجفاف في العراق، إذ سجل مؤشر SPEI–12 اتجاهاً تنازلياً معنوياً بلغ (–0.55) لكل عقد خلال المدة (1990–2024)، بما يعكس اختلالاً متزايداً في التوازن المائي–المناخي نتيجة التغيرات المتزامنة في التساقط والطلب التبخري المرتبط بارتفاع درجات الحرارة، وتتفق هذه النتيجة مع ما توصلت إليه دراسة (Vicente–serrano et al., 2022) التي أكدت أن الجفاف المعاصر لم يعد ظاهرة مطرية ، بل أصبح مدفوعاً بشكل متزايد بارتفاع الطلب التبخيري الجوي(AED) ، وهو ما يفسر عدم كفاية مؤشر SPI في تمثيل التغيرات الحديثة مقارنةً بمؤشر SPEI.

وعلى صعيد الإسقاطات المستقبلية، تُظهر نتائج هذه الدراسة توافقاً واضحاً مع الأدبيات المناخية التي تؤكد أن مناطق العروض شبه المدارية، ومنها الشرق الأوسط، ستشهد زيادة ملحوظة في شدّة الجفاف وتكراره تحت سيناريوهات الانبعاثات المرتفعة. فباستخدام نماذجCMIP6 ، أظهر (Li et al., 2021) أن ما نسبته 93.2% من المناطق القاحلة عالمياً، بما في ذلك الشرق الأوسط، ستتعرض لظروف جفاف شديد تحت سيناريو SSP585 بحلول أواخر القرن الحادي والعشرين. وفي السياق نفسه، أشار (Balting, 2021) إلى أن معدل حدوث الجفاف في المناطق شبه المدارية من نصف الكرة الشمالي قد يزداد بنسبة تصل إلى 100% تحت سيناريوهات الاحترار المرتفع مقارنة بالسيناريوهات المنخفضة، ويتعزز هذا التوافق مع دراسة (Al–Hussein et al., 2026)التي اعتمدت – مثل دراستنا – على معادلة هارفس لحساب النتح المحتمل (PET) المناسبة للمناخ الجاف، وأظهرت أن سيناريو SSP5–8.5 سيؤدي إلى تحول ظروف الجفاف من 'قريبة من الطبيعي' إلى 'جفاف شديد' بحلول نهاية القرن، مع ارتفاع في درجات الحرارة العظمى بنسبة تصل إلى 19.53% ، وفي السيناريو منخفض الانبعاثات (SSP1–2.6)، تُظهر الدراسة اتجاها نحو استقرار نسبي أو تحسن طفيف في الرطوبة، خلال المدة البعيدة، وهو ما ينسجم مع تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2021) التي تؤكد أن خفض الانبعاثات يمكن أن يحد من

تفاقم الجفاف دون أن يعكسه بالكامل، في المقابل تُظهر السيناريوهات المتوسطة والعالية SSP2–4.5) و (SSP3–7.0 انتقالاً تدريجياً نحو ظروف أكثر جفافاً، مع ارتفاع ملحوظ في القيم السالبة لمؤشر SPEI واتساع رقعة المناطق المتأثرة وتتفق هذه النتيجة مع ما توصلت إليه (A M Ukkola et al., 2018)التي أكدت أن الارتباط بين رطوبة التربة ودرجة الحرارة يمكن أن يضخم الظواهر المتطرفة في المناطق الانتقالية وشبه المدارية، مما يعزز فهم الآلية التي تفسر تفاقم الجفاف تحت السيناريوهات المرتفعة، وتختلف نتائج هذه الدراسة جزئياً عما توصلت إليه (Hamed et al., 2023) التي وجدت أن الجفاف في العراق قد يقل تحت سيناريو SSP5–8.5 في المستقبل القريب. ويرجع هذا الاختلاف إلى ثلاثة أسباب رئيسة: **الاول:** اعتماد دراستنا على معادلة (هارفس)التي تُعد الأكثر مناسبة للمناطق الجافة وشبه الجافة (Moeletsi et al., 2013)،بينما استخدمت دراستهم معادلة ثورنثويت التي أثبتت الدراسات أنها أقل دقة في مثل هذه الظروف المناخية، **الثاني:** تغطي دراستنا مدة رصدية أحدث (1990–2024) شهدت جفافاً شديداً ومتسارعاً في العراق، **الثالث:** اعتمادنا على نموذج–ACCESS CM2الذي يُظهر استجابة أكثر حدة للجفاف، وهو ما يتوافق مع خصائص هذا النموذج المعروفة بارتفاع حساسيته المناخية (Grose et al., 2020)؛ فالنماذج عالية الحساسية تتوقع احترار أسرع وأكثر شدة، مما يضخم الطلب التبخيري الجوي (AED)يؤدي إلى تفاقم الجفاف في المناطق القاحلة مثل العراق . لذلك، نرى أن نتائجنا تتفق بشكل أفضل مع الإجماع العالمي الذي يؤكد زيادة الجفاف وشدته في المناطق الجافة تحت سيناريوهات الانبعاثات المرتفعة (IPCC, 2021) أما في السيناريو المرتفع جداً(SSP5–8.5) ، فتُظهر النتائج تحولاً جذرياً في طبيعة الجفاف، حيث تسود اتجاهات سالبة قوية ومستمرة ذات دلالة إحصائية كاملة في كلا النموذجين، وهو ما يعكس سيطرة العامل الحراري بوصفه المحرك الرئيس للجفاف المستقبلي، وتتفق هذه النتيجة مع ما توصلت إليه دراسات (B I Cook & Mankin, 2019)،(Nielsen et al., 2024) حيث أكدت الأولى أن جفاف رطوبة التربة والجريان السطحي أكثر حدة من جفاف الأمطار فقط بسبب العمليات الحساسة لدرجة الحرارة، بينما أظهرت الثانية أن الاحترار يقلل من فعالية فترات الأمطار في إنهاء حالات الجفاف. وهاتان الآليتان تفسران بشكل مباشر نتائجنا، وتؤكدان أن الجفاف المستقبلي في العراق سيكون جفافاً حرارياً (Thermal Drought) بالدرجة الأولى، حيث يطغى تأثير ارتفاع الحرارة وتضخم الطلب التبخيري الجوي(AED) .

وتُظهر المقارنة بين النموذجين GFDL–ESM4) و (ACCESS–CM2 وجود تباين ملحوظ في تقدير شدة الجفاف، حيث يُظهر نموذج ACCESS–CM2 استجابة أكثر حدة واتساعاً، خاصة خلال المدة البعيدة وتحت السيناريوهات المرتفعة .ويمكن تفسير هذا التباين باختلاف تمثيل العمليات الفيزيائية داخل النماذج، لا سيما تفاعلات السطح–الغلاف الجوي، وحساسية كل نموذج لارتفاع درجات الحرارة، ومعالجة عمليات السحب والإشعاع، وقد أشار (Grose et al., 2020) إلى أن مجموعة من نماذج CMIP6 تتمتع بحساسية مناخية أعلى، مما يؤدي إلى احترار أكبر وزيادة في الظواهر المتطرفة بعد عام 2050،وفي السياق نفسه، اكدت دراسة (Collins, 2017) أن مجموعات النماذج مثل CMIP6 لا تتكون من نماذج مستقلة أو متساوية المعقولية، مما يبرر التخلي عن 'ديمقراطية النماذج' (أي التعامل مع جميع النماذج كمتساوية الأهمية)، والاعتماد على مجموعات نماذج متعددة (Multi–Model Ensembles) لتقليل عدم اليقين وتعزيز موثوقية التقديرات، وتدعم نتائج تحليل فئات الجفاف وفق تصنيف Agnew (2000) تكشف هذا التحول الكبير، إذ تُظهر تراجعاً واضحاً في الفئة الطبيعية يقابله

توسع واضح في فئات الجفاف، خاصة المعتدل والحاد والشديد جداً، وقد بلغ الانخفاض في الفئة الطبيعية مستويات مرتفعة وصلت إلى (−24.34%/عقد) في نموذج ACCESS−CM2 تحت السيناريو المرتفع جداً (SSP5−8.5) خلال المدة البعيدة (2081−2100)، في حين ارتفعت فئات الجفاف المعتدل والحاد إلى (7.89 و6.12%/عقد) على التوالي. ومن اللافت أن فئة الجفاف الخفيف لم تُظهر تغيرات معنوية، وهو ما يشير إلى أن التغير المناخي لا يتجلى عبر انتقال تدريجي سلس، بل عبر قفزات نحو الحالات الأكثر تطرفاً هو ما يتوافق مع مفهوم 'تضخيم الظواهر المتطرفة' الذي أكدته (Seneviratne et al., 2021) حيث يزداد حجم التغيرات في الظواهر المتطرفة بشكل غير خطي مع كل زيادة في الاحترار العالمي وهذا يتوافق أيضا مع دراسة (البديري، 2021a) ، التي اكدت انخفاض فئات الجفاف الطبيعية وزيادة فئات الجفاف الشديد والمتطرف في بعض محطات الوسط من العراق ،ورغم قوة هذه النتائج وتماسكها مع الأدبيات العالمية، إلا أن هناك بعض المحددات التي ينبغي أخذها في عين الاعتبار، من أبرزها الاعتماد على نموذجين مناخيين فقط، مما قد لا يغطي كامل نطاق عدم اليقين، فضلاً عن أن استخدام مؤشر SPEI−12 يركز على الجفاف طويل الأمد دون تمثيل كافٍ للتقلبات قصيرة الأمد، فضلا عن أن الدراسة لم تقف بشكل مباشر على تأثير العوامل البشرية مثل إدارة الموارد المائية والتغيرات في استخدامات الأراضي، والتي قد تضخم من آثار الجفاف كما تشير إليه دراسات حديثة.

بصورة عامة، تتفق نتائج هذه الدراسة مع الاتجاه العام في الأدبيات المناخية العالمية التي تؤكد تزايد الجفاف في المناطق الجافة وشبه الجافة، لكنها تضيف بعداً مكانياً وزمانياً أكثر تفصيلاً على مستوى العراق، وتبرز بوضوح أن استمرار الانبعاثات المرتفعة سيؤدي إلى انتقال النظام المناخي نحو حالة أكثر جفافاً وتطرفاً، بناءً على ذلك ، فإن هذه النتائج تمثل أساساً علمياً قوياً لدعم سياسات التكيف، التي ينبغي أن تركز على تحسين كفاءة استخدام المياه، وتطوير أنظمة الري، وتعزيز الإدارة المتكاملة للموارد المائية، مع أهمية التخفيف من الانبعاثات على المستوى العالمي لتقليل شدة هذه التحولات مستقبلاً.

الاستنتاجات

تكشف نتائج هذه الدراسة عن تحول ملحوظ متسارع في النظام الهيدرومناخي للعراق، يتمثل في انتقال واضح نحو ظروف أكثر جفافًا وتطرفًا. فقد أظهرت السلسلة المرصودة (1990–2024) اتجاهًا تنازليًا معنويًا في مؤشر SPEI−12 بمعدل (−0.55/عقد)، مما يؤكد بداية تحول طويل الأمد نحو الجفاف على المستوى المستقبلي، تُظهر السيناريوهات منخفضة الانبعاث (SSP1−2.6)تحسنًا طفيفًا في الرطوبة خلال المدة البعيدة، إلا أن هذا التحسن يظل محدودًا وغير كافٍ لعكس الاتجاه العام. في المقابل، تسجل السيناريوهات مرتفعة الانبعاث) خصوصًا (SSP5−8.5 اتجاهات سالبة قوية وذات دلالة إحصائية عالية، بما يعكس تحولًا جوهريًا في طبيعة الجفاف من جفاف مطري إلى جفاف حراري مدفوع بارتفاع الطلب التبخيري الجوي، وتشير النتائج إلى تغير غير خطي في شدة الجفاف، حيث تنخفض الفئة الطبيعية (لا جفاف) بمعدل يصل إلى (−24.34%/عقد)، مقابل تزايد معنوي في فئات الجفاف المعتدل والحاد، في حين لم تُظهر فئة الجفاف الخفيف تغيرًا معنويًا، وهو ما يعزز فرضية تضخيم الظواهر المتطرفة بدلًا من الانتقال التدريجي بين الفئات، مكانيًا، تتركز أعلى معدلات التدهور في المناطق الوسطى والجنوبية، في حين تُظهر المناطق الشمالية درجة أعلى من المرونة المناخية نتيجة التأثيرات التضاريسية

وزيادة المدخل المطري، وأظهر نموذج ACCESS-CM2 حساسية أعلى مقارنة بـGFDL-ESM4 ، مما يؤكد وجود تباين بنيوي بين نماذج CMIP6 ويبرز أهمية استخدام النمذجة متعددة المصادر لتقليل عدم اليقين تشير هذه النتائج إلى أن العراق يتجه نحو نظام مناخي أكثر جفافًا وهيمنة للعامل الحراري، مع تداعيات مباشرة على الأمن المائي والزراعي. وعليه، تبرز الحاجة إلى تبني استراتيجيات تكيف فورية وفعالة، تشمل تحسين كفاءة استخدام المياه، وتطوير تقنيات الري، وتعزيز الإدارة المتكاملة للموارد المائية، مع تركيز خاص على المناطق الأكثر هشاشة في الوسط والجنوب.

المصادر :

البديري، أحمد لفتة حمد .(2021a) .أثر التغيرات المناخية على الجفاف في محافظة واسط. مجلة واسط للعلوم الإنسانية، 17(47)، 611-638. https://iasj.rdd.edu.iq/journals/journal/issue/8016.

البديري، أحمد لفتة حمد .(2021b) .اتجاهات التغير في درجات الحرارة والأمطار في العراق وإسقاطاتها المستقبلية. مجلة الآداب، 3(137)، 443-472 . https://doi.org/10.31973/aj.v3i137.1129

رافد صالح مهدي الخالدي. (2025). تحليل تأثير التغير المناخي على الخصائص الكمية للأمطار والجفاف اليومية في العراق. مجلة واسط للعلوم الانسانية، 21(2)، 193-227 . https://doi.org/10.31185/wjfh.Vol21.Iss2.895

Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Jehad Fahmi, K., & Ali Abed, S. (2022). Climate change: Droughts and increasing desertification in the Middle East, with special reference to Iraq. *Engineering, 14*(7), 235–273.

Agnew, C. T. (2000). Using the SPI to identify drought. Drought Network News, 12(1), 6-12. https://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/1

Al-Ansari, N. (2021). Topography and climate of Iraq. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, 11*(2), 1–13.

Al-Hussein, A. A. M., Khalil, S. A., & Ali, B. M. (2026). Assessment of meteorological drought based on CMIP6 multi-model ensemble projections in Iraq. *Climatic Change, 179*(2), 1–25. https://doi.org/10.1007/s10584-026-04123-6

Al-Bedairi, A. L. H. (2021a). The impact of climate change on drought in Wasit Governorate. *Wasit Journal of Humanities Sciences, 17*(47), 611-638.

Al-Bedairi, A. L. H. (2021b). Trends of changes in temperature and rainfall in Iraq and their future projections. *Journal of Arts, 3*(137), 443-472. https://doi.org/10.31973/aj.v3i137.1129

Al-Khalidi, R. S. M. (2025). Analysis of the impact of climate change on the quantitative characteristics of daily rainfall and drought in Iraq. Wasit Journal for Human Sciences, 21(2), 193–227. https://doi.org/10.31185/wjfh.Vol21.Iss2.895

Balting, D. F. (2021). Northern Hemisphere drought risk in a warming climate. 1–13. https://doi.org/10.1038/s41612-021-00218-2

Barlow, M., Zaitchik, B., Paz, S., Black, E., Evans, J., & Hoell, A. (2016). A review of drought in the Middle East and southwest Asia. *Journal of Climate, 29*(23), 8547–8574.

Chen, H., Sun, J., Lin, W., & Xu, H. (2020). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin, 65*(17), 1415–1418.

Collins, M. (2017). Still weighting to break the model democracy. *Geophysical Research Letters, 44*(7), 3328–3329.

Cook, B. I., & Mankin, J. S. (2019). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 1–20. https://doi.org/10.1029/2019EF001461

Cook, B. I., Mankin, J. S., & Anchukaitis, K. J. (2018). Climate change and drought: From past to future. [بيانات ناقصة].

Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future, 8*(6), e2019EF001461.

Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., Van Vuuren, D. P., Van Den Berg, M., Feng, L., & Klein, D. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development, 12*(4), 1443–1475.

Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschat, G., Chung, C., Kajtar, J. B., Rauniyar, S., & Freund, M. B. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future, 8*(5), e2019EF001469.

Gusain, A., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research, 232*, 104680.

Hamed, M. M., Sammen, S. S., Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2023). Spatiotemporal variation of drought in Iraq for shared socioeconomic pathways. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37*(4), 1321–1331. https://doi.org/10.1007/s00477-022-02343-7

IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2*(1), 2391.

Kenawy, A. M. El, McCabe, M. F., & Robaa, S. M. (2016). Changes in the frequency and severity of hydrological droughts over Ethiopia from 1960 to 2013. *Cuadernos de Investigación Geográfica, 42*(1), 145-166. https://doi.org/10.18172/cig.2931

Li, H., Li, Z., Chen, Y., Xiang, Y., Liu, Y., & Kayumba, P. M. (2021). Drylands face potential threat of robust drought in the CMIP6 SSPs scenarios. [بيانات ناقصة].

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, 17*(22), 179–183.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology, 391*(1–2), 202–216.

Moeletsi, M. E., Walker, S., & Hamandawana, H. (2013). Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 66*, 4–15.

Muslih, K. D., & Abbas, A. M. (2024). Climate of Iraq. In *The Geography of Iraq* (pp. 19–47). Springer.

Nielsen, M., Cook, B. I., Marvel, K., Ting, M., & Smerdon, J. E. (2024). The changing influence of precipitation on soil moisture drought with warming in the Mediterranean and western North America. *Earth's Future, 12*(5), e2023EF003987.

Salman, S. A., Shahid, S., Ismail, T., Ahmed, K., Chung, E.-S., & Wang, X.-J. (2019). Characteristics of annual and seasonal trends of rainfall and temperature in Iraq. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 55*(3), 429–438.

Salman, S. A., Shahid, S., Ismail, T., Chung, E.-S., & Al-Abadi, A. M. (2017). Long-term trends in daily temperature extremes in Iraq. *Atmospheric Research, 198*, 97–107.

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. Di, Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., & Lewis, S. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press.