

Analyzing the Impact of Topography on the Spatial Distribution of Rainfall in North Kordofan Using a Digital Elevation Model (DEM)

تحليل أثر الطبوغرافيا على التوزيع المكاني للأمطار في شمال كردفان باستخدام نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM)

Wigdan Dirar Ahmed¹, Najwa Mohammed Ari²

وجدان ضرار احمد^١، نجوى محمد اري^٢

1. Department of Geography, Faculty of Education, University of the Holy Quran and Islamic Sciences, Omdurman, Sudan

١. قسم الجغرافيا، كلية التربية جامعة القرآن الكريم والعلوم الاسلامية، أم درمان، السودان.

2. Department of Geography, Faculty of Arts, University of Neelain, Khartoum, Sudan

٢. قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة النيلين، الخرطوم، السودان.

Received:19/11/2025 Revised:16/02/2026 Accepted:24/02/2026

تاريخ التقديم:19/11/2025 تاريخ ارسال التعديلات:16/02/2026 تاريخ القبول:24/02/2026

الملخص:

تركز الدراسة على فهم كيف تؤثر العوامل الطبوغرافية مثل الارتفاع، الميل، واتجاه الانحدار على توزيع الأمطار في شمال كردفان خلال الفترة من ١٩٩٠ إلى ٢٠٢٤. تم استخدام بيانات من نموذج الارتفاع الرقمي (DEM/SRTM) وبيانات الأمطار من مصدر CHIRPS مع أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، كما اعتمدت الدراسة على تطبيق نماذج الانحدار البسيط والمتعدد لتحليل العلاقة بين المتغيرات، وقد اظهرت النتائج أن الارتفاع يمثل العامل الأكثر تأثيراً، إذ بلغت قيمة معامل الارتباط (R) نحو ٠.٩٤٨، كما حافظ على دلالة الإحصائية في نموذج الانحدار المتعدد بعد إدخال خط العرض والاتجاه، حيث بلغت قيمة معامل التحديد (R^2) نحو ٠.٠١٥. أما الميل والانحدار فقد اظهر علاقة سلبية ضعيفة بقيم -٠.٠١٦ و-٠.٠٤٨ على التوالي، مما يشير إلى محدودية دورهما كمتغيرات مستقلة. كما حددت الدراسة ارتفاعاً حرجاً عند حوالي ١١ 21متر، يبدأ عنده هطول الأمطار في ازدياد بشكل واضح. أوصت الدراسة بضرورة دمج نماذج الارتفاعات الرقمية في خطط الزراعة والإدارة المائية لتحسين استغلال الموارد المائية وزيادة الإنتاجية.

الكلمات المفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية، منحنيات الكثافة، تحليل مكاني، الارتفاع الحرج، مخططات الطبوغرافيا.

Abstract:

This study focuses on examining how topographic factors—specifically elevation, slope, and aspect—affect the distribution of rainfall in North Kordofan over the period 1990–2024. Data from a Digital Elevation Model (DEM/SRTM) and rainfall data obtained from the CHIRPS dataset were utilized, in combination with Geo-graphic Information Systems (GIS) tools. The study employed both simple and multiple regression models to analyze the relationships among the variables. The results indicate that elevation is the most influential factor, with a correlation coefficient (R) of approximately 0.948. Elevation also retained its statistical significance in the multiple regression model after incorporating latitude and aspect, with a coefficient of determination (R^2) of about 0.015. In contrast, slope and aspect exhibited weak negative relationships, with values of approximately -0.016 and -0.048, respectively, indicating their limited role as independent variables. The study further identified a critical elevation of around 1,121 meters, above which rainfall begins to increase noticeably. Finally, the study recommends integrating digital elevation models into agricultural planning and water resource management strategies to improve water resource utilization and enhance productivity.

Keywords: Geographic Information Systems, Density Curves, Spatial Analysis, Critical Elevation, Topographic Plots.

مقدمة

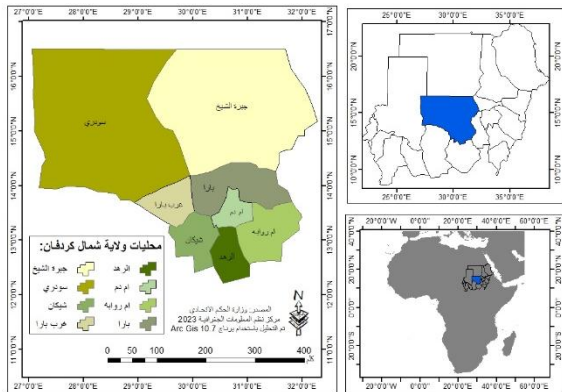
رغم أن الاختلاف في توزيع الأمطار من مكان لآخر يمكن أن يرجع لأسباب مناخية كثيرة، إلا أن خصائص التضاريس (الأرتفاع، الأنحدار واتجاه السطح)، تعتبر عوامل مهمة يمكن تفسير هذا التفاوت في كمية الأمطار وتوزيعها في المنطقة. ومن هنا، يأتي دور الدراسة في فهم كيف ترتبط الخصائص الطبوغرافية بالتفاوت في هطول الأمطار، بهدف تقديم شرح علمي للمناطق التي تشهد وفرة أو نقص في الأمطار من أجل وضع خطط مناسبة لتنمية الزراعة والمياه في المستقبل بشكل أفضل.

أهداف الدراسة

- تحليل التباين المكاني للأمطار في ولاية شمال كردفان.
- استخراج الخصائص الطبوغرافية (الأرتفاع، الأنحدار، الاتجاه) باستخدام نموذج DEM
- دراسة العلاقة بين التوزيع المكاني للأمطار والخصائص الطبوغرافية.
- إعداد خرائط تحليلية تظهر التباين المكاني لهطول الأمطار في شمال كردفان، بما يساهم في دعم اتخاذ القرار في مجالات التخطيط الزراعي والموارد المائية.

منطقة الدراسة

تعد شمال كردفان إحدى الولايات الوسطى لدولة السودان يحدها من الشمال الولاية الشمالية ومن الغرب شمال دارفور ومن الشرق الخرطوم والنيل الأبيض ومن الجنوب جنوب كردفان وغرب كردفان شكل (1) وتقع بين دائرتي عرض 075. '13.0. '12. و 049. '29. '16. و خطي طول 307. '4.16. '27. و 016. '16.35. '32. بمساحة 156.16999 كم²



شكل (1) موقع منطقة الدراسة

خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان، بتصرف الباحث

فروض الدراسة

- هناك علاقة إيجابية ذات دلالة إحصائية بين الأرتفاع الطبوغرافي في ولاية شمال كردفان وكميات هطول الأمطار.
- تؤثر خصائص الأنحدار والاتجاه الطبوغرافي على التوزيع المكاني لهطول الأمطار في المنطقة.

مشكلة الدراسة

تعد الأمطار من أهم العناصر المناخية التي لها دور كبير في بقاء الحياة واستمراريتها، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة مثل ولاية شمال كردفان، حيث تعتمد الزراعة بشكل أساسي على الأمطار، سواء في كمية المطر أو توزيعها عبر الزمن والمكان. مما يجعل فهم أنماط الهطول من الأمور الضرورية التي تساعد في التخطيط للتنمية بشكل صحيح.

أوضح (Ahrens, 2013) إن الأرتفاعات تساهم في تكوين مناطق مطرية محلية. فعندما تصطدم كتل هوائية رطبة بمنحدر أو جبل، تُجبر نفسها مضطربة بالصعود للأعلى بسبب شكل الأرض. وأثناء صعودها، ينقص الضغط، والهواء يتوسع ويتبرد. وعندما يبرد الهواء، يصبح غير قادر على حمل نفس كمية بخار الماء، فالبخار يتكاثف ويتحول إلى سحب، ويتالي تنزل أمطار. هذا يعني إن المناطق المواجهة للرياح الرطبة بتكون غالباً أكثر غزارة في الأمطار. وتتميز منطقة الدراسة بتضاريس متباينة، الأمر الذي يجعل للطبوغرافيا أثر مباشر في تحديد كمية الأمطار وتوزيعها (El-Tom, 2024). ويؤد هذا الأثر وضوحاً عند الأخذ في الاعتبار أن السودان، بطبيعته الطبوغرافية، يفتقر إلى المسطحات المائية الداخلية الواسعة التي يمكن أن تشكل مصدراً محلياً للرطوبة. وبدلاً من ذلك، تعتمد الرطوبة على النقل الجوي من المحيطين الأطلسي والهندي، عبر نظام ريحي موسمي يتحكم فيه توزيع الضغط الجوي فوق القارة الأفريقية ومحيطها وتعد الرياح الجنوبية والجنوبية الغربية في فصل الصيف المصدر الأساسي لهطول الأمطار، إذ تعد رياحاً بحرية رطبة تتسبب في الأمطار ما بين يونيو وسبتمبر (التوم، 2021) ورغم محدودية المرتفعات في شمال كردفان، فإن أثر التضاريس في تشكيل نمط هطول الأمطار لا يمكن تجاهله، حيث تساهم المرتفعات في رفع الهواء الرطب صعوداً عند اصطدامه بها، ما يؤدي إلى تكاثف السحب وهطول المطر. (El-Tom, 2024) ورغم أن آلية الرفع التضاريسي في السودان تعد محدودة، إلا أن آلية الرفع الحراري تلعب دوراً أكثر فاعلية، حيث تساهم في صعود الهواء الرطب إلى طبقات الجو العليا، مما يفضي إلى عمليات التكاثف وتكون الأمطار.

وتعد العوامل الجوية العليا مثل التيارات النفاثة من المؤثرات غير المباشرة التي تتحكم في ديناميكيات الأمطار (Ahrens, 2013)، إلا أن الطبوغرافيا تظل العامل الأبرز محلياً في تشكيل النمط المكاني للهطول، كما ستبينه الدراسة الحالية باستخدام نموذج الأرتفاعات الرقمية (DEM) وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) كأدوات تحليلية دقيقة لرصد العلاقة بين الخصائص الطبوغرافية وهطول الأمطار. ويساعد هذا المنهج في تحديد المناطق ذات الكفاءة المائية العالية، وهو ما يساهم في دعم التخطيط المكاني للأنشطة الاقتصادية، خصوصاً في ما يتعلق بالزراعة المطرية وحصاد المياه.

تتمثل مشكلة الدراسة في عدم تجانس التوزيع المكاني لهطول الأمطار في منطقة شمال كردفان وهذا يسبب صعوبة كبيرة في النشاطات الاقتصادية التي تعتمد على المناخ.

التوزيع المكاني والزمني للأمطار:

يشير **التغير المكاني** للأمطار إلى اختلاف كميات وشدة الأمطار من منطقة إلى أخرى، حيث لا يتسم الهطول المطري بالتجانس المكاني، بل يتأثر بعوامل جغرافية ومناخية متعددة تؤدي إلى تباينات واضحة في التوزيع المكاني للأمطار، سواء على المستوى السنوي أو الشهري (El-Tom, 2024, p.47).

أما **التغير الزمني** للأمطار فيشير إلى التباين في كميات الأمطار عبر الزمن داخل السنة، حيث تختلف الأمطار شهريا وموسميا من حيث توقيت بدايتها ونهايتها وطول الموسم المطري، إضافة إلى التغير في شدة الهطول خلال أشهر السنة المختلفة. (El-Tom, 2024, p.51)

ظاهرة الرفع التضاريسي: (Orographic Effect)

هي عملية مناخية يحدث فيها صعود الكتل الهوائية الرطبة عند اصطدامها بالمرتفعات الجبلية، مما يؤدي إلى تبريدها وتكاثف بخار الماء وسقوط الأمطار على السفوح المواجهة للرياح وتكوين الظل المطري على السفوح المعاكسة (EL-Tom, 2024, pp. 15)

أهمية الدراسة

الأهمية العلمية: تتمثل الأهمية العلمية لهذه الدراسة في أنها تقدم الدراسة تحليلاً كميًا ومكانيًا رصينا لتأثير العوامل الطبوغرافية على توزيع الأمطار في بيئة شبة جافة باستخدام DEM/SRTM و GIS مع بيانات CHIRPS، مبرهنة إحصائيا على وجود ارتفاع حرج 1121 م يبدأ بعده ازدياد الهطول بوضوح؛ ما يعمق فهم آلية تأثير التضاريس ويفتح آفاقا بحثية في الطبوغرافيا المناخية والهيدرولوجيا الإقليمية ونماذج التنبؤات.

الأهمية العملية: تكمن الأهمية العملية للدراسة في قدرتها على تقديم الدراسة مخرجات تطبيقية مباشرة لدعم القرار في التخطيط الزراعي وإدارة الموارد المائية عبر تحديد المناطق الأوفر مطرا بحسب خصائص الارتفاع والانحدار، وتدعم حصاد المياه وإدارة الفيضانات والجفاف بدمج نماذج الارتفاعات في نظم المعلومات الجغرافية؛ كما تعزز جهود التكيف المناخي وتحسين الأمن المائي والغذائي بتوفير قاعدة بيانات موثوقة للتخطيط الاستراتيجي المستدام في الإقليم

الدراسات السابقة

سعت العديد من الدراسات إلى فهم العلاقة بين الطبوغرافيا وهطول الأمطار، باستخدام أدوات تحليل متقدمة مثل نماذج الارتفاعات الرقمية (DEM) وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد. أجرت دراسة (Luo et al., 2024) تقريبا دقيقا للعلاقة بين الهطول والارتفاع في الجزء الجنوبي الشرقي من هضبة التبت، بالاعتماد على بيانات من 30 محطة مناخية خلال موسم الرياح الموسمية. خلصت النتائج إلى وجود علاقة غير خطية بين الهطول والارتفاع، حيث ينخفض الهطول حتى ارتفاع 3000م، ثم تتباين العلاقة حسب الموقع، وصولاً إلى ارتفاع حرج فوق 4000م تنخفض فيه معدلات الأمطار بشكل حاد. كما تمت دراسة

- المناطق ذات الأنحدار الأعلى تتلقى معدلات أمطار أكبر مقارنة بالمناطق المنخفضة أو المستوية.
- نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) توفران دقة عالية في رصد العلاقة بين التضاريس وهطول الأمطار.
- التباين المكاني في هطول الأمطار في شمال كردفان يمكن تفسيره جزء كبير منه من خلال الخصائص الطبوغرافية دون الاعتماد الكامل على العوامل الجوية العليا فقط

مفاهيم الدراسة**الطبوغرافيا: (Topography)**

هي دراسة لتكوين سطح الأرض من حيث الارتفاع والأنحدار والاتجاه، وتأثير هذه المتغيرات في المناخ المحلي والعمليات الهيدرولوجية مثل جريان المياه وتجمعها في الاحواض اي ارتباطها بالعوامل البيئية المحيطة (Huggett, 2011, p.5).

نموذج الارتفاعات الرقمية: (DEM)

يعرف نموذج الارتفاعات الرقمية (Digital Elevation Model: DEM) بأنه تمثيل رقمي لسطح الطبوغرافي للأرض العارية (Bare Earth)، حيث يصف شكل سطح الأرض بعد استبعاد الأشجار والنباتات وجميع الأجسام السطحية الأخرى. ويتم إنشاء نماذج الارتفاعات الرقمية من مصادر متعددة، من بينها الخرائط الطبوغرافية التقليدية، وكذلك تقنيات الاستشعار عن بعد الحديثة مثل الليدار (LiDAR) والرادار، مما يجعل DEM أساسا مهما للتحليل الطبوغرافي والدراسات الجغرافية والهيدرولوجية (USGS, n.d).

نظم المعلومات الجغرافية: (GIS)

نظام حاسوبي متكامل لجمع، تخزين، إدارة، تحليل، ونمذجة البيانات المكانية وعرضها، استخدم في هذه الدراسة لدمج بيانات الأمطار والطبوغرافيا وتحليل الترابط المكاني بينهما. (Burrough & McDonnell, 1998, p.12)

بيانات أمطار: CHIRPS

تعرف بيانات CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) بمجموعة بيانات مطرية شبكية عالية الدقة، يتم إنتاجها من خلال دمج تقديرات الأقمار الصناعية المعتمدة على الأشعة تحت الحمراء مع بيانات محطات الرصد الأرضية، بهدف توفير تقديرات موثوقة للأمطار، خاصة في المناطق التي تعاني من ندرة بيانات القياس السطحي. وتمتاز CHIRPS بقدرتها على تمثيل التغيرات المكانية والزمانية للأمطار بدقة مكانية تصل إلى 0.05 درجة، مع تغطية زمنية طويلة مناسبة للدراسات المناخية وتحليل الجفاف والاتجاهات المطرية طويلة الأمد (Climate Hazards Group, n.d.).

كبيرا في معدلات الأمطار، ووجود شذوذات مناخية متكررة تعكس عدم استقرار النمط المطري وتأثيراته البيئية.

كما وظفت دراسة (EL-Mahdy and Mohamed, 2013) تقنيات الاستشعار عن بعد و GIS في رسم خرائط الخصائص الهيدرولوجية في دارفور، حيث تم تحديد مناطق تراكم المياه بدقة باستخدام صور أقمار صناعية عالية الدقة ونماذج ارتفاع رقمي DEM وفي دراسة أخرى (Mohamed, 2010) تناولت القدرات التكميلية في شمال كردفان، تم تحليل دور نشر توقعات الهطول الموسمية في تعزيز قدرة السكان الريفيين على التعامل مع التغيرات المناخية، وأشارت إلى تحديات في التواصل والوعي، واقترحت نماذج لتحسين الاستخدام المجتمعي للتوقعات المناخية.

رغم تعدد الدراسات حول العلاقة بين الطبوغرافيا والهطول، إلا أن منطقة شمال كردفان تفتقر لتحليل مكاني دقيق باستخدام أدوات GIS و DEM، مما يبرز أهمية هذه الدراسة لسد الفجوة وتقديم فهم أفضل لتوزيع الأمطار بما يدعم إدارة الموارد وتقييم المخاطر المناخية.

منهجية الدراسة

اعتمدت هذه الدراسة المنهج الوصفي التحليلي لفهم العلاقة بين الخصائص الطبوغرافية (الارتفاع، الميل، اتجاه الأنحدار) والتوزيع المكاني والزمني لهطول الأمطار في ولاية شمال كردفان خلال الفترة (1990-2024)، وذلك باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبرمجية R في التحليل الإحصائي والمكاني.

أولاً: مصادر وبيانات الدراسة

بيانات الأمطار: تم الحصول على بيانات هطول الأمطار الشهرية للفترة من 1990 إلى 2024 من قاعدة بيانات CHIRPS، وهي بيانات عالية الدقة مستمدة من تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة المناخية (Climate Hazards group, n.d). وقد اختيرت هذه الفترة بناء على توصيات علمية، حيث إن تحليل اتجاهات الهطول خلال مدة تتراوح بين 30 إلى 35 عاما يعد معيارا مناسباً لرصد التغيرات المناخية طويلة الأمد (التوم، 2021).

البيانات الطبوغرافية: استخدم نموذج الارتفاعات الرقمية SRTM بدقة 30 متر لاستخلاص الخصائص الطبوغرافية لمنطقة الدراسة، وتشمل: الارتفاع، الميل (Slope)، واتجاه الأنحدار (Aspect). (USGS, n.d)

خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة: من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان 2022

حجم العينة المستخدمة: تم استخدام حوالي 6248 نقطة، وهذه النقاط تمثل كل خلايا الشبكة النقطية الناتجة عن إعادة تحجيم بيانات الأمطار (CHIRPS) إلى دقة مكانية قدرها 30 م في 30 م تقريباً داخل حدود منطقة الدراسة. النقاط ليست عينة عشوائية أو شبكة منتظمة مستقلة، بل

تدرجات الهطول وشدته وتأثير قناة بخار الماء لنهر Yarlung Zangbo في تشكيل هذه الأنماط.

طبقت دراسة (Lawal et al., 2024) تقنية تقدير الكثافة الاحتمالية (KDE) لتحليل التوزيع الزمني-المكاني لارتفاعات المطر في جنوب إفريقيا باستخدام بيانات مناخية لعشر سنوات. بينت الدراسة أن KDE توفر تمثيلاً دقيقاً للتغيرات الزمانية والمكانية في ارتفاعات المطر، مما يحسن موثوقية شبكات الاتصالات اللاسلكية.

أما الدراسة التي تمت في منطقة مصدر نهر اليانغتسي (SR YR) (Jiang et al., 2023) أجرت تقييماً لتسعة منتجات للهطول (من الأرض والأقمار الصناعية والنماذج المدججة)، وأظهرت أن الهطول ينخفض بوضوح حتى ارتفاع 4500م، مع تغير في الاتجاه فوق هذا المستوى، ما يدل أيضاً على وجود ارتفاع حرج. كما بينت أن المنتجات الأرضية المصححة أدت أداء أفضل من المنتجات الفضائية، خاصة في المناطق الجبلية المرتفعة، مما يبرز الحاجة إلى بيانات أكثر دقة لدعم نماذج المياه والتنبؤ بالجريان السطحي.

كما استخدمت دراسة (Cao et al., 2023) نفس التقنية لفصل وتصنيف أحداث المطر، عبر تحديد أفضل زوج من مؤشرات MIET وعتبة الحدث)، واختبار دقتها باستخدام اختبار كولموغوروف-سميرنوف (K-S) وتوزيع بواسون. أظهرت نتائج دقيقة مقارنة بالطرق التقليدية مثل histogram، خاصة عند التطبيق في مدن صينية ذات مناخات مختلفة. تناولت دراسة (آل حسين واخرون، 2022) تأثير التضاريس في تباين التساقط المطري بين المناطق الجبلية والسهلية في شمال العراق بالاعتماد على بيانات محطات مناخية للفترة 1982-2014 وتحليل مكاني باستخدام ArcGIS. خلصت الدراسة إلى تدرج مكاني واضح لزيادة الأمطار نحو الشمال الشرقي مما يرتبط بزيادة الارتفاع، مع اتجاه عام لانخفاض التساقط خلال فترة وسطى من السلسلة الزمنية وتباين لاحق بين المحطات. كما أثبت وجود ارتباط قوي بين التساقط والارتفاع ($r=0.7$)، وأن المحطات الجبلية تستحوذ على النصيب الأكبر من الأمطار مقارنة بالسهلية، بما يدعم الدور الحاكم للتضاريس في تشكيل النمط المكاني للأمطار.

حللت دراسة (EL-Tome and Ahmed, 2021) التغيرات المكانية والزمانية لهطول الأمطار في السودان خلال 1970-2018 باستخدام تقنيات الاستيفاء المكاني IDW. وقد أظهرت الدراسة زيادة تدريجية في الأمطار من الشمال إلى الجنوب، ووضحت التباينات المكانية الدقيقة من خلال خرائط IDW ضمن بيئة ArcGIS.

أظهرت دراسة (EL-Bastawesy et al., 2021) أن الجيومورفولوجيا تؤثر بدرجة أكبر من نوع مصدر الـ DEM في تحليل الفيضانات المفاجئة في الصحارى الجافة، ما يشير إلى أهمية فهم البنية الجيولوجية في تقييم المخاطر الهيدرولوجية.

ركزت دراسة (EL-Faig and EL-Tom, 2013) على منطقة الخوي بشمال كردفان خلال الفترة 1970-2010، حيث أظهرت تذبذبا

الشهرية لكل سنة، ثم حساب المتوسط الكلي للفترة (1990-2024) باستخدام دالة Cell Statistics التحليل المكاني: استخدمت أدوات ArcGIS المتقدمة مثل Zonal Statistics Table لتحليل العلاقة بين الهطول والمتغيرات الطبوغرافية، بالإضافة إلى حساب معاملات الارتباط الإحصائي (Pearson Correlation) بين كميات الأمطار والأرتفاع، والميل، والأخضرار، والانهيار المتعدد (Burrough & McDonnell, 1998; Luo et al., 2024). ولتحليل الفروق في كميات الأمطار بين اتجاهات الانحدار المختلفة، تم استخدام اختبار كروسكال-واليس غير المعلمي (Kruskal-Wallis H Test) لقياس دلالة الفروق الإحصائية بين المجموعات. التحليل الزمني: تم احتساب اتجاه التغير الزمني لهطول الأمطار عبر تحليل الأندحار الزمني (Trend Analysis) لحساب متوسط الميل (Slope) خلال فترة الدراسة. التقسيم المرحلي الزمني: تم تقسيم الفترة الزمنية الكلية إلى ثلاث مراحل (1990-2001، 2002-2013، 2014-2024) بمهدف مقارنة التغيرات في توزيع الأمطار بين المراحل، ورصد التحولات المناخية المكانية والزمانية بشكل أكثر دقة. (Burrough & McDonnell, 1998; Lawal et al., 2024) منحنيات الكثافة الاحتمالية (KDE) لتوضيح توزيع كميات الأمطار في كل فترة زمنية، تم تطبيق تقنية KDE باستخدام R عبر الخزميتين الإحصائيتين ggplot2 وggdensity، (جراح، ب.ت. و) Burrough & McDonnell, 1998; Lawal et al., 2024; Cao et al., 2023 لتوليد منحنيات سلسلة تعكس تغير التوزيع بدون الاعتماد على تصنيف فئوي. تحليل الأرتفاع الحرج: تم تطبيق تحليل الأندحار القطعي (Piecewise Linear Regression) باستخدام الحزمة 'segmented' في R لتحديد "الأرتفاع الحرج (Critical Elevation)" (Jiang et al., 2023; Luo et al., 2024; R-bloggers, 2014) الذي يبدأ عنده تغير واضح في العلاقة بين الأرتفاع وكميات الهطول.

العوامل الطبوغرافية المؤثرة على توزيع الأمطار

يعتبر كل من الأرتفاع، الميل، واتجاه الأندحار من العوامل الطبوغرافية التي تلعب دوراً رئيسياً في تحديد نمط توزيع الأمطار، خاصة في المناطق شبه الجافة. تؤثر المرتفعات على الهواء الرطب الصاعد، فعندما يصطدم الهواء بالتضاريس يجبر على الأرتفاع والتبريد، مما يؤدي إلى تكاثف بخار الماء وسقوط الأمطار، وهي الظاهرة المعروفة بـ الرفع التضاريسي (Orographic Lifting) أما السفوح المعاكسة، فتعاني من ظاهرة "ظل المطر (Rain Shadow)" نتيجة هبوط الهواء وفقدانه للرطوبة (EL-Tom, 2024, pp.15-16) أما اتجاه الأندحار (Aspect)،

هي جميع البيانات التي تم إعادة تشكيلها (full raster grid) بعد عملية Resample، وتطابقت مع نموذج الأرتفاع الرقمي (SRM) (DEM). تم إنشاء هذه الخلايا 6248 بشكل تلقائي عند قص بيانات CHIRPS على حدود منطقة شمال كردفان بعد إعادة تحجيمها، كل واحدة منها تحتوي على قيمة متوسط الأمطار السنوي، ومعها قيمة من بيانات الأرتفاع والأخضرار، بالتالي، نستطيع القول إن هذه النقاط تمثل بيانات كاملة داخل منطقة الدراسة، وليست مجرد عينة إحصائية عادية. مما يجعل النتائج المكانية والاستنتاجات الإحصائية أكثر دقة وموثوقة.

ثانياً: معالجة البيانات المكانية

تم توحيد حجم الخلايا المكانية (Cell Size) بين طبقتي الأمطار والأرتفاع الرقمي لضمان التوافق المكاني والتحليل الصحيح في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) حيث أن بيانات الأمطار الشهرية من مصدر CHIRPS كانت بدقة مكانية أصلية تبلغ حوالي 5 كم (0.05°)، في حين أن نموذج الأرتفاع الرقمي (SRM DEM) المستخدم في التحليل يتمتع بدقة أعلى تصل إلى 30 متر.

ولتفادي أي تعارض في الشبكة النقطية (Raster Misalignment) أثناء الحسابات المكانية، تمت إعادة تحجيم بيانات CHIRPS إلى دقة مكانية مساوية لـ 0.000833° (أي ما يعادل 30 متر تقريبا) باستخدام أداة Resample، مع تفعيل خيار Snap Raster لضمان التطابق الدقيق بين شبكات الطبقات المختلفة. هذا الإجراء لا يؤدي إلى تحسين دقة بيانات CHIRPS، بل يهدف فقط إلى تحقيق مواءمة مكانية صحيحة تسهل إجراء التحليل المكاني والإحصائي بدقة، خصوصا في العمليات التي تتطلب المقارنة بين كل خلية في الطبقتين، مثل Zonal Statistics ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن هذه الزيادة في الدقة المكانية لبيانات الأمطار هي تكرارية وليست أصلية (Pseudo resolution)، أي أن الخلايا الجديدة لا تحتوي على معلومات من مصدر جديد وإنما تعكس إعادة توزيع لقيمة الخلية الأصلية (5 كم) على وحدات أصغر. وقد تم اتخاذ هذه الخطوة لأغراض تقنية فقط، مثل ضمان التراكب الصحيح مع طبقة DEM، وليس بمهدف تحسين دقة بيانات الأمطار نفسها. (Burrough and Mc Donnell, 1998)

كما تم توحيد نظام الاحداثيات الى النظام الجغرافي WGS 1984 لضمان التطابق بين الخلايا وتجنب الى اختلاف مكاني وحتى تتوافق العمليات المكانية. جمعت البيانات الناتجة من DEM والأمطار في صورة شبكات مكانية موحدة، وتم تحويلها لاحقا إلى صيغة CSV تمهيدا للتحليل الإحصائي باستخدام برنامج R.

ثالثاً: التحليل الإحصائي والمكاني

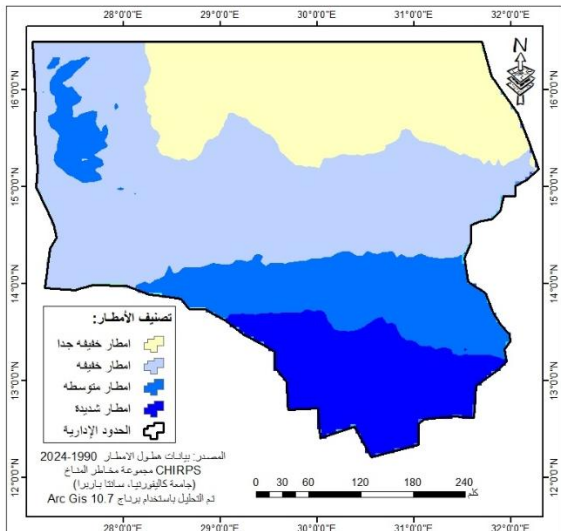
المتوسط السنوي المطري: تم حساب المتوسط السنوي طويل المدى لهطول الأمطار باستخدام دوال Raster Calculator، عبر تجميع القيم

المصدر: خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان، بتصرف الباحث

فقد سجلت المناطق الشمالية معدلات هطول منخفضة مقارنة بالمناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية التي شهدت كميات أمطار أعلى. يعكس هذا التباين النمط المناخي العام السائد في السودان، حيث تسود الظروف الصحراوية الجافة في الشمال، بينما يسود المناخ شبه الجاف إلى شبه الرطب في المناطق الجنوبية. ويلاحظ أن متوسط هطول الأمطار السنوي يتبع نمطاً تدريجياً بسيطاً، حيث تتناقص الكميات بوضوح كلما اتجهنا نحو خطوط العرض الشمالية، في ارتباط سلبى واضح مع الموقع الجغرافي (El-Tom, 2024)، يشكّل التفاوت في توزيع الأمطار تحدياً للتخطيط العمراني وتطوير البنية التحتية، مما يستدعي استراتيجيات تأخذ في الاعتبار التباينات المناخية بين مناطق الولاية.

التصنيف المكاني لشدة الأمطار في ولاية شمال كردفان 2024-1990

أظهرت نتائج التصنيف المكاني لهطول الأمطار في منطقة الدراسة تبايناً واضحاً في معدلات الهطول عبر مختلف أجزاء الولاية. شكل (3) فقد سجلت أدنى معدلات الأمطار في الأجزاء الشمالية (بين دائرتي عرض 15° و 16° شمالاً)، والتي ظهرت باللون الأحمر، مما يشير إلى مناطق شبه جافة ذات أمطار خفيفة جداً. أما المنطقة التي تمتد من وسط الولاية إلى شمالها الأوسط فتميزت بأمطار خفيفة، ممثلة باللون الأزرق الأصفر، مما يدل على تحسن طفيف في معدلات الهطول مقارنة بالشمال. في المنطقة الوسطى من شمال كردفان، ظهرت الأمطار المتوسطة بوضوح، وقد تميزت باللون الأزرق النيلي، مشيرة إلى مناطق أكثر رطوبة نسبياً أما أعلى معدلات الهطول فقد سجلت في الجنوب والجنوب الشرقي من الولاية (بين دائرتي عرض 12° و 13.5° شمالاً)، حيث ظهرت هذه المناطق باللون الأزرق القاتم مع الميلان باتجاه الغرب، مما يعكس طبيعة مناخية أكثر رطوبة ويدل على إمكانية زراعية ورعوية أعلى.



شكل(3) تصنيف الأمطار للفترة 2024-1990

فهو يؤثر على كمية الإشعاع الشمسي والتعرض للرياح الرطبة أو الجافة. فالمنحدرات الجنوبية تستقبل عادةً إشعاعاً أكبر، بينما المنحدرات المواجهة للرياح الجنوبية الغربية قد تستفيد من تكاثف بخار الماء (Ahrens, 2013) رغم أن الميل يعد أقل تأثيراً مقارنة بالارتفاع، إلا أنه يؤثر في الجريان السطحي وتكوين الرطوبة المحلية. استخدام بيانات نموذج الارتفاعات الرقمية يعزز فهم هذه العلاقات.

الارتفاع الحرج وتحول العلاقة بين الارتفاع والهطول

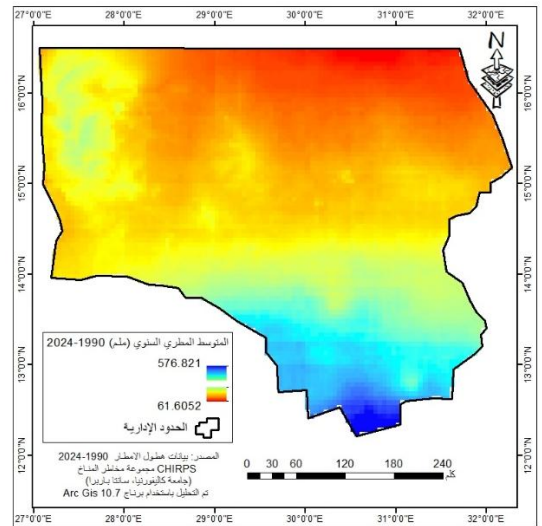
تشير الأدبيات إلى وجود "أرتفاع حرج (Critical Elevation)" تبدأ عنده العلاقة بين الارتفاع والأمطار بالتحول، حيث تزداد كميات الهطول مع زيادة الارتفاع (Bohne et al., 2008; Luo et al., 2024) ويعد هذا التحول نتيجة مباشرة لتكاثف الهواء الصاعد فوق السفوح المواجهة للرياح. فهم هذا المفهوم ضروري عند استخدام نماذج ارتفاع رقمي لتحليل الأنماط المطرية، خاصة في المناطق ذات الطبوغرافيا المعقدة.

دور العوامل الجوية العليا في تفسير نمط الأمطار

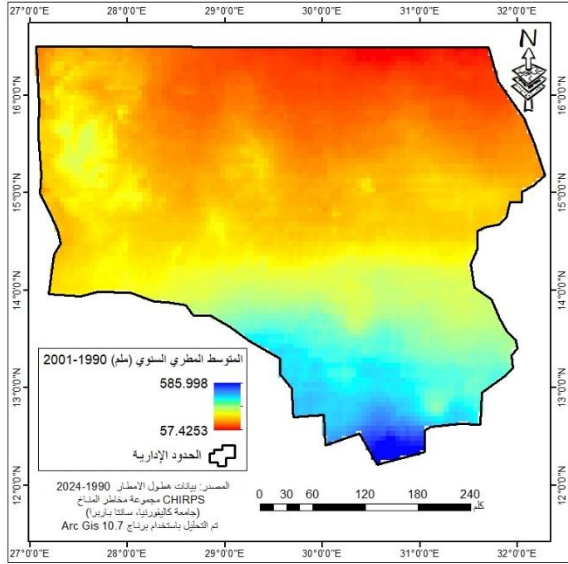
تعد التيارات النفاثة (Jet Streams) أحد أهم العوامل المناخية العليا التي تؤثر في توزيع الأمطار، خاصة خلال فصل الصيف، حيث يتقدم قلب التيار النفاث إلى خط عرض 15° شمالاً، مما يضع ولاية شمال كردفان ضمن نطاق تأثيره المباشر. تساهم هذه التيارات في تكوين السحب الركامية نتيجة عدم الاستقرار الجوي (El-Tom, 2024, p.35) أما الفاصل المداري (ITCZ)، فهو العنصر الرئيسي في تحديد موسم الأمطار في السودان، ويتقدم شمالاً خلال الصيف، حاملاً الرياح الموسمية الرطبة. يؤدي تموضعه فوق الإقليم إلى زيادة فرص الهطول، خصوصاً في المناطق المرتفعة التي تعزز من عملية الرفع الهوائي (التوم، 2021، ص32).

أنماط التوزيع المطري للفترة 2024-1990

تظهر نتائج التحليل الإحصائي المكاني لهطول الأمطار في شمال كردفان خلال الفترة من 1990 إلى 2024 شكل (2) وجود تدرج واضح في التوزيع من الشمال إلى الجنوب.



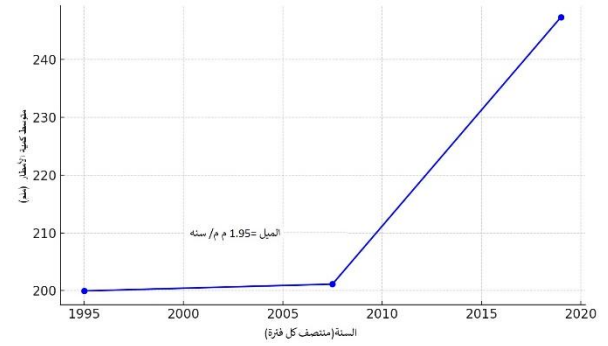
شكل(2) المتوسط المطري السنوي للفترة 2024-1990



المصدر: خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان، بتصريف الباحث

الاتجاه الزمني والتقسيم المرحلي لهطول الأمطار في ولاية شمال كردفان 1990-2024

بعد تحليل البيانات الإحصائية لمعدلات هطول الأمطار في شمال كردفان خلال الفترة من 1990 إلى 2024، لاحظنا وجود اتجاه بسيط نحو زيادة الأمطار على مر السنين. استخدمنا اختبار مان-كيندال، لمعرفة إذا كانت هناك اتجاهات واضحة في البيانات بدون الحاجة لافتراض توزيع معين. مع حساب منحدر سين، الذي يوضح معدل التغير السنوي، وبلغ حوالي $1.95+$ ملم في السنة. مما يعني إن الأمطار كانت تتزايد بشكل تدريجي خلال فترة الدراسة، على مدى 34 سنة، شكل (4) كما لاحظنا أن الاتجاه الإيجابي أصبح واضح أكثر خلال العقد الأخير (2014-2024). مما يدل على تغير مناخي محلي إيجابي في بعض مناطق المنطقة. وهو ما يعد مؤشرا واعدا للتخطيط الزراعي والمائي في المستقبل، خاصة في المناطق التي شهدت تغيرا مكانيا متزامنا مع هذا الاتجاه.

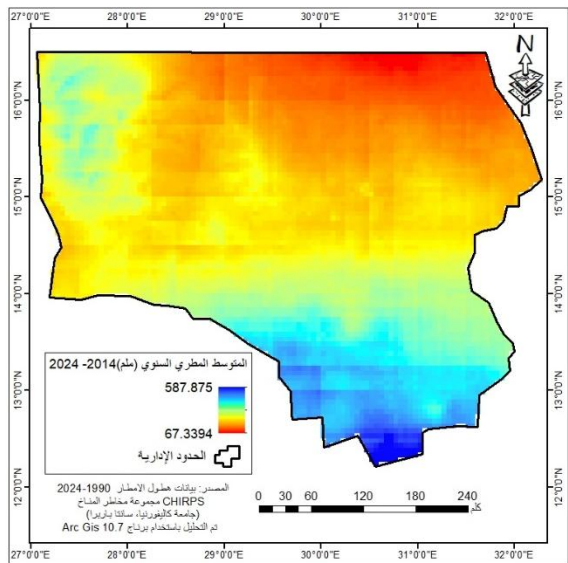
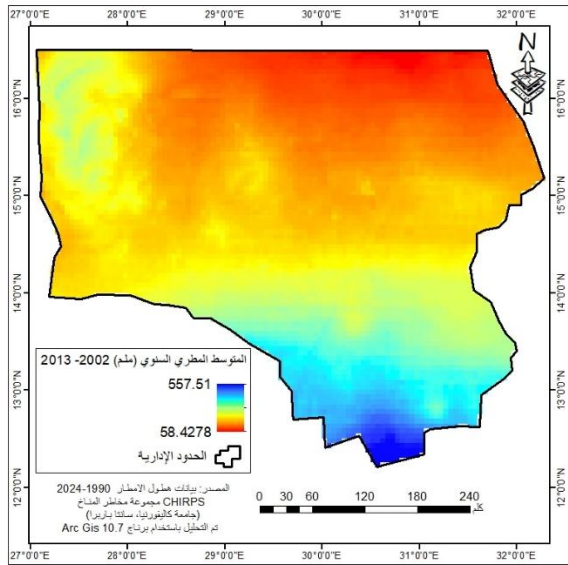


شكل (4) خط الاتجاه العام لمعدل الأمطار 1990-2024

المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS بتصريف الباحث

التغيرات المكانية والزمانية لهطول الأمطار ودلالاتها المناخية 1990-2024

استنادا إلى هذا النمط التصاعدي، تم تقسيم فترة الدراسة إلى ثلاث مراحل زمنية متتالية بهدف إجراء تحليل مقارن أكثر دقة لرصد التغيرات المناخية والفروقات المكانية.



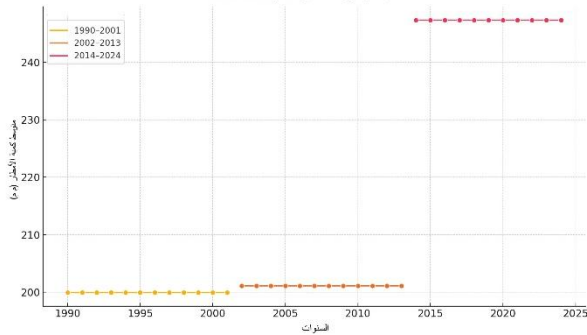
شكل (5) التغيرات المكانية والزمانية لهطول الأمطار للفترة 1990-2024

المصدر: خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال

كردفان، بتصريف الباحث

شكل (5) يظهر ما شهدته منطقة الدراسة من تغيرات مكانية وزمانية واضحة في معدلات هطول الأمطار عبر ثلاث مراحل زمنية. على النحو التالي: المرحلة الأولى (1990-2001) تمثل الأساس المرجعي قبل بداية التغيرات الواضحة. والمرحلة الثانية (2002-2013) تمثل فترة انتقالية اتسمت بتذبذب نسبي في معدلات الهطول. والمرحلة الثالثة (2014-2024) تظهر بداية الزيادة الملحوظة في كمية الأمطار،

ففي المرحلة الأولى (1990-2001)، سجلت المناطق الجنوبية أعلى كميات أمطار بلغت نحو 586 مم، في حين بقيت المناطق الشمالية ضمن النطاق الجاف عند أدنى قيمة بلغت 57.4 مم، مما يعكس نمطاً تقليدياً مستقراً في التوزيع المكاني. أما في المرحلة الثانية (2002-2013)، فقد سجل انخفاض طفيف في القيم العظمى لتصل إلى 557 مم، مع استمرار الجفاف النسبي في الشمال، إلى جانب تراجع محدود في بعض مناطق الوسط. وفي المرحلة الأخيرة (2014-2024)، لوحظ تحسن نسبي في كميات الأمطار بالمناطق الوسطى، وارتفاع طفيف في القيم العظمى (587.9 مم)، مما يدل على توجه نحو توزيع أكثر توازناً مقارنة بالفترات السابقة، مع بقاء المناطق الجنوبية الأكثر تأثراً بالرياح الموسمية، وبالتالي استمرار هيمنتها من حيث معدلات الهطول. وفي هذا الإطار، تم إجراء التحليل الإحصائي لتغير كميات الأمطار عبر الفترات الزمنية الثلاث (1990-2024)، حيث حسبت المؤشرات الإحصائية الأساسية لكل مرحلة.



شكل(6)خط الاتجاه العام لمتوسطات الأمطار للثلاث فترات
المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS بتصرف الباحث

تحليل التوزيع الإحصائي باستخدام منحنيات الكثافة

لتعزيز التحليل الزمني، تم تمثيل التوزيع الإحصائي لهطول الأمطار خلال كل مرحلة زمنية باستخدام منحنيات الكثافة الاحتمالية (KDE). أظهر منحنى الفترة الأولى (1990-2001) ميلاً واضحاً نحو القيم المنخفضة (100-200 مم)، مشيراً إلى سيادة الأمطار الخفيفة والمتوسطة. وفي الفترة الثانية (2002-2013)، حافظ المنحنى على نمط مشابه مع توسع طفيف باتجاه القيم الأعلى، بينما شهدت الفترة الأخيرة (2014-2024) انزياحاً ملحوظاً للمنحنى نحو اليمين، مع بروز ذروة جديدة قرب 250 مم شكل (7)، ما يعكس زيادة في كميات الأمطار وتحويل عدد من المناطق إلى نطاقات مطرية أعلى. تشير هذه النتائج إلى ثبات نسبي في التوزيع الجغرافي للأمطار عبر الفترات الثلاث، مع تفاوت زمني ملحوظ في كميات الهطول، خاصة في المناطق الوسطى، الأمر الذي يبرز أهمية المتابعة المستمرة للتغيرات المناخية لدعم خطط إدارة المياه والزراعة المستدامة.

شكل (5) يظهر ما شهدته منطقة الدراسة من تغيرات مكانية وزمانية واضحة في معدلات هطول الأمطار عبر ثلاث مراحل زمنية. على النحو التالي: المرحلة الأولى (1990-2001) تمثل الأساس المرجعي قبل بداية التغيرات الواضحة. والمرحلة الثانية (2002-2013) تمثل فترة انتقالية اتسمت بتذبذب نسبي في معدلات الهطول. والمرحلة الثالثة (2014-2024) تظهر بداية الزيادة الملحوظة في كمية الأمطار، ففي المرحلة الأولى (1990-2001)، سجلت المناطق الجنوبية أعلى كميات أمطار بلغت نحو 586 مم، في حين بقيت المناطق الشمالية ضمن النطاق الجاف عند أدنى قيمة بلغت 57.4 مم، مما يعكس نمطاً تقليدياً مستقراً في التوزيع المكاني. أما في المرحلة الثانية (2002-2013)، فقد سجل انخفاض طفيف في القيم العظمى لتصل إلى 557 مم، مع استمرار الجفاف النسبي في الشمال، إلى جانب تراجع محدود في بعض مناطق الوسط. وفي المرحلة الأخيرة (2014-2024)، لوحظ تحسن نسبي في كميات الأمطار بالمناطق الوسطى، وارتفاع طفيف في القيم العظمى (587.9 مم)، مما يدل على توجه نحو توزيع أكثر توازناً مقارنة بالفترات السابقة، مع بقاء المناطق الجنوبية الأكثر تأثراً بالرياح الموسمية، وبالتالي استمرار هيمنتها من حيث معدلات الهطول. وفي هذا الإطار، تم إجراء التحليل الإحصائي لتغير كميات الأمطار عبر الفترات الزمنية الثلاث (1990-2024)، حيث حسبت المؤشرات الإحصائية الأساسية لكل مرحلة.

الفترة الزمنية	-1990	-2002	-2014
عدد النقاط	2001	2013	2024
المتوسط (مم)	199.94	201.12	247.36
الانحراف المعياري	91.10	87.84	97.34
أدنى قيمة	57.43	58.43	67.34
القيمة الوسطية	179.20	182.71	224.71
أعلى قيمة	586.00	557.51	587.87

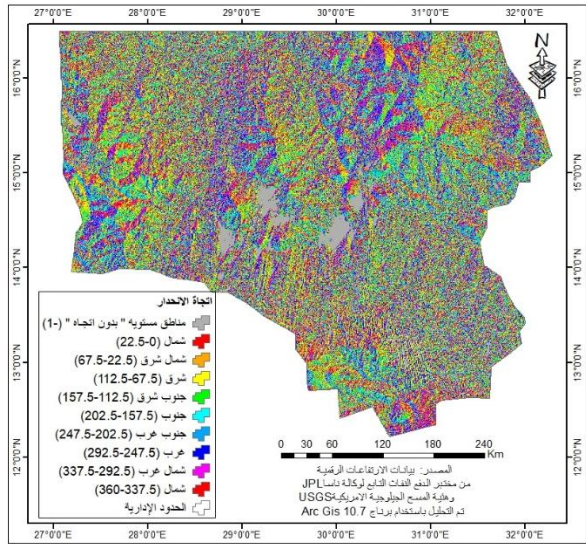
جدول(1) التحليل الإحصائي لتغير الأمطار عبر الفترات الزمنية الثلاثة للفترة المصدر: عمل الباحث اعتماداً على تحليل بيانات امطار CHIRPS، بتصرف الباحث تشير النتائج إلى زيادة ملحوظة في المتوسط المطري في الفترة الأخيرة مقارنة بالفترتين السابقتين، مع ارتفاع واضح في القيم القصوى والانحراف المعياري، مما يدل على تباين مكاني أوسع في كميات الأمطار.

تعزيز نتائج التحليل البياني لمتوسطات كميات الأمطار عبر الفترات الثلاث (1990-2024) الاتجاه العام للتغيرات المكانية والزمانية التي أظهرها التوزيع الإحصائي شكل(6) فقد بين التحليل وجود تحول زمني واضح في معدلات الهطول في شمال كردفان، حيث استقر المتوسط خلال الفترة الأولى (1990-2001) حول 200 مم، ما يمثل خط الأساس المرجعي لانطلاق السلسلة الزمنية. وفي الفترة الثانية (2002-2013)، طرأ تحسن

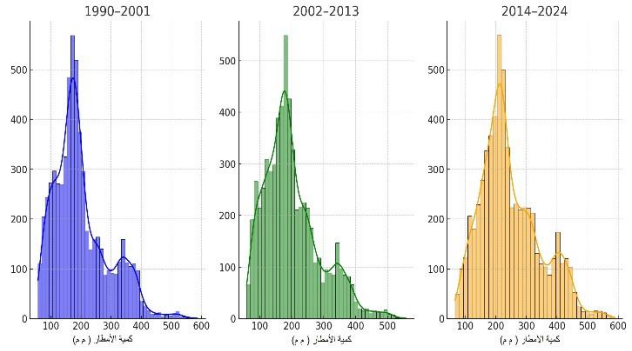
تعكس خريطة اتجاه الأضداد (Aspect) تنوعاً واضحاً في اتجاهات السفوح على مستوى الولاية. تظهر النتائج انتشاراً واسعاً للاتجاهات الجنوبية والجنوبية الغربية، خصوصاً في الجزء الجنوبي من الولاية، وهي اتجاهات مهمة لكونها تتلقى أكبر قدر من الإشعاع الشمسي والرياح الموسمية. تصنف الاتجاهات وفق نظام دائري من 0° إلى 360° ، مع اعتبار اتجاه "الشمال" في تصنيفين: من 0° إلى 22.5° ومن 337.5° إلى 360° (شكل 9) وذلك لضمان استمرارية التغطية الزاوية دون فجوات. وعموماً، فإن التنوع في الاتجاهات يعكس تعقيداً طبوغرافياً في المنطقة، ويعد أحد العوامل المؤثرة في توزيع الرطوبة والغطاء النباتي.

الميل (Slope)

تظهر خريطة الميل وجود تدرجات متفاوتة في الأضداد، موزعة كما يلي: ميل بسيط ($0-5^\circ$) يغطي غالبية مساحة الولاية، ويعكس طبيعة شبه مستوية، مناسبة لتجميع المياه وتغذية التربة. وميل متوسط ($6-15^\circ$) مناطق ذات التضاريس معتدل، تظهر في بعض الأجزاء الوسطى. وميل شديد ($16-45^\circ$) يدل على أراضٍ وعرة تظهر موضعياً. ميل شديد جداً ($>45^\circ$) يمثل منحدرات جبلية حادة، تتوزع في مناطق الجنوب والغرب (شكل 10). وقد سجلت في بعض المواقع قيم ميل تصل إلى 138%، أي أن الأرض ترتفع 1.38 متر لكل متر أفقي، مما يدل على وعورة شديدة. هذا التباين في الميل له آثار مباشرة على الجريان السطحي، تخزين المياه، والتآكل، حيث تعد الأراضي المنبسطة أكثر ملاءمة للزراعة المطرية مقارنة بالمنحدرات الحادة التي تفقد الرطوبة بسرعة. تؤكد نتائج التحليل الطبوغرافي أن منطقة شمال كردفان تتمتع بتنوع تضاريسي ملحوظ، ما يجعل دراسة العلاقة بين خصائص الـ DEM (الأرتفاع، الميل، الاتجاه) وتوزيع الأمطار ذات أهمية خاصة في التخطيط البيئي والمائي والزراعي.



المصدر: خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان، بتصريف الباحث



شكل (7) منحنيات الكثافة KDE للفترة 1990-2024

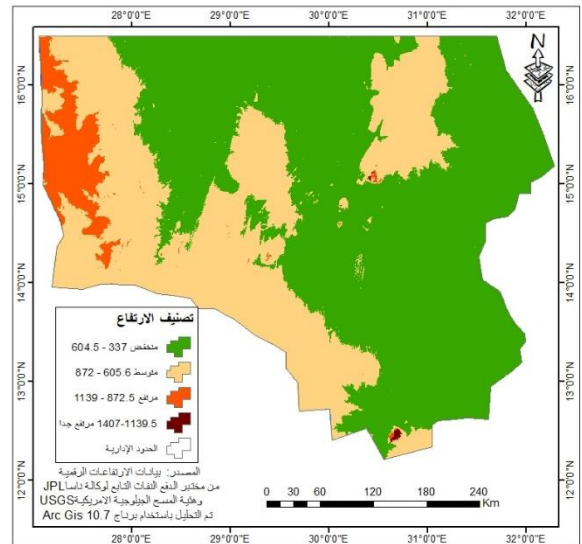
المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS بتصريف الباحث

التحليل الطبوغرافي باستخدام نموذج الأرتفاعات الرقمية

يعتمد هذا التحليل على نموذج الأرتفاعات الرقمية لتحديد الخصائص الطبوغرافية الأساسية مثل الأرتفاع، الميل، واتجاه الأضداد، وذلك لفهم تأثير التضاريس على توزيع الأمطار والأنشطة الزراعية في المنطقة.

خريطة الأرتفاع (Elevation)

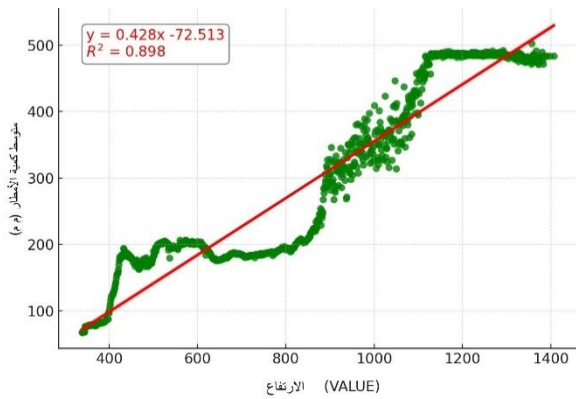
تظهر شكل (8) أن غالبية مناطق شمال كردفان، خاصة في الوسط والشرق، تقع ضمن النطاقات المنخفضة من حيث الأرتفاع. في المقابل، تتركز المناطق المرتفعة والمرتفعة جداً في الأجزاء الغربية والجنوبية الغربية من الولاية. وتعد مرتفعات جبل الداير - كجزء من سلسلة جبال النوبة - من أبرز التكوينات التضاريسية في الجنوب، إلى جانب مرتفعات البحرية ومجموعة من المرتفعات الأخرى في الشمال الغربي. (يوسف، 2021) يسهم هذا التباين الطبوغرافي في تشكيل أنماط مناخية وهيدرولوجية متباينة، ويؤثر بشكل مباشر في حركة المياه السطحية، سواء من حيث التجميع أو التصريف، ما ينعكس بدوره على استخدامات الأراضي والغطاء النباتي.



المصدر: خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان، بتصريف الباحث

اتجاه الأضداد (Aspect)

الهوائي المحلي. وتتسق هذه الملاحظات مع دراسات سابقة (El-Tom, 2024) أشارت إلى تركيز الأمطار حول التلال المنفردة مقارنة بالمناطق السهلية المجاورة، مما يبرز أهمية التضاريس الدقيقة في تشكيل النمط المطري. أما مخطط التبعر في الشكل (11) فقد أظهر نمطاً إيجابياً شبه خطي بين الارتفاع ومتوسط كميات الأمطار، حيث توزعت النقاط بشكل قريب من الأتجاه الصاعد العام. وقد تم تأكيد هذا الأتجاه من خلال معادلة الأتحدار الخطي البسيط التي تربط الارتفاع (X) بكميات الأمطار (y) حيث: $y = 0.428x - 72.513$ ويظهر معامل التحديد ($R^2 = 0.898$) أن نحو 89.8% من التباين في كميات الأمطار يمكن تفسيره بمتغير الارتفاع، مما يؤكد قوة العلاقة وفعالية النموذج في تفسير السلوك المناخي في المنطقة.



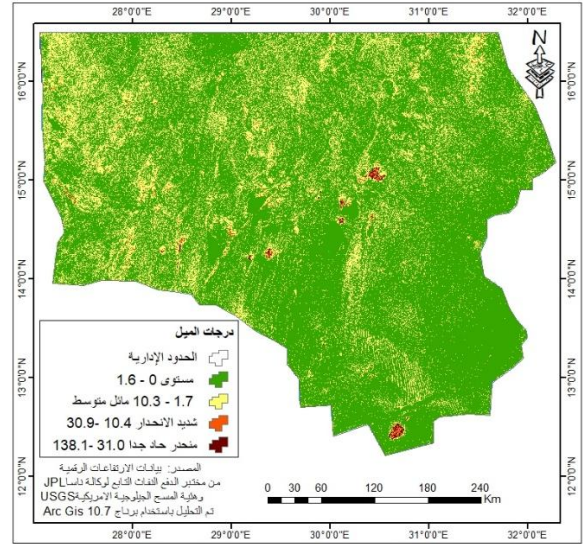
شكل (11) مخطط تبعر العلاقة بين الارتفاع ومتوسط كمية الأمطار 1990-2024 المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS/DEM/SRTM بتصريف الباحث تم إجراء تحليل الأتحدار خطي متعدد لتقييم ما إذا كان تأثير الارتفاع على كميات الأمطار تأثيراً مستقلاً، أم أنه يمثل بديلاً للتدرج الجغرافي في الأتجاه. شمل النموذج ثلاثة متغيرات مستقلة: الارتفاع، واتجاه الأتحدار (Aspect)، وخط العرض (Latitude)، وذلك لقياس التأثيرات المستقلة والمشاركة لكل منها على الهطول المطري.

أظهرت النتائج أن الارتفاع احتفظ بتأثير معنوي موجب وقوي ($P < 0.0001$)، حيث ارتبط بزيادة كميات الأمطار بمعدل يقارب 12.5 ملم لكل وحدة ارتفاع، حتى بعد إدخال المتغيرات الأخرى.

تم استخدام ثلاثة نماذج أتحدار خطي، كما في جدول (3)، لدراسة العلاقة بين الهطول المطري والمتغيرات الجغرافية.

النموذج الأول: استخدم فقط متغير الارتفاع، وبين أن الارتفاع وحده يفسر 1.5% فقط من تباين الهطول ($R^2 = 0.015$)، مما يشير إلى ضعف تأثيره عند تحليله بمعزل عن بقية العوامل.

النموذج الثاني: أضيف فيه متغير خط العرض إلى الارتفاع، فارتفع معامل التفسير إلى 83.1% ($R^2 = 0.831$)، مما يبرز الأثر الكبير للتدرج الجغرافي (شمال-جنوب) على تباين كميات الأمطار. ورغم ذلك، ظل تأثير الارتفاع مستقلاً ومعنوياً.



شكل (10) المثل بولاية شمال كردفان

المصدر: خريطة رقمية لحدود منطقة الدراسة من مفوضية الاستثمار والصناعة، ولاية شمال كردفان، بتصريف الباحث

التحليل الإحصائي والمكاني للعلاقة بين الأمطار والعوامل الطبوغرافية

اعتمد التحليل على نموذج الأرتفاعات الرقمية (DEM) والإحصاءات النطاقية (Zonal Statistics) لتقييم تأثير الارتفاع، الميل، واتجاه الأتحدار على توزيع الأمطار في شمال كردفان (1990-2024) أظهرت النتائج وجود علاقة واضحة بين العوامل الطبوغرافية وكميات الأمطار، ما يعكس تفاعل التضاريس مع المناخ المحلي.

كما تم تطبيق تحليل الارتباط والقيمة الاحتمالية (p-value) (Pearson Correlation) لقياس قوة العلاقة بين الأمطار والمتغيرات التضاريسية، وقد بينت النتائج درجات ارتباط متفاوتة كما في جدول (2)

العلاقة	معامل الارتباط (r)	القيمة الاحتمالية
الأمطار × الارتفاع	0.948+	0.0
الأمطار × الميل	-0.016	0.195
الأمطار × الأتحدار	-0.048	0.00013

جدول (2) مصفوفة الارتباط (r) والقيمة الاحتمالية (p-value)

المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS وDEM/SRTM بتصريف الباحث

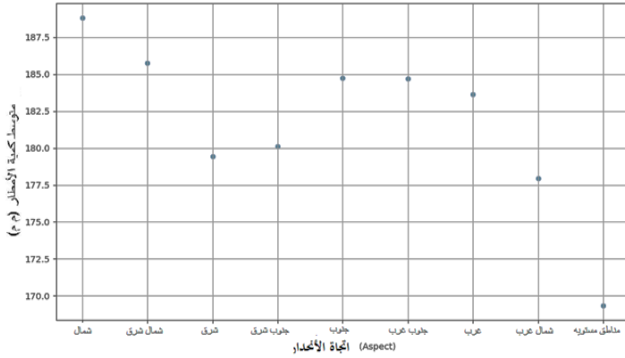
العلاقة بين الأمطار والأرتفاع الطبوغرافي في ولاية شمال كردفان

أظهر تحليل الارتباط بين كميات الأمطار وفئات الارتفاع جدول (2) وجود علاقة موجبة قوية جداً، حيث بلغ معامل الارتباط ($r = 0.948+$) وكانت القيمة الاحتمالية ($p < 0.001$)، مما يعكس دلالة إحصائية عالية. تشير هذه النتائج إلى أن الارتفاع يعد العامل الطبوغرافي الأهم في تفسير التباين المكاني للأمطار خلال الفترة 1990-2024. ويمكن تفسير ذلك بظاهرة الرفع التضاريسي، حيث تتلقى المناطق المرتفعة - مثل جبل الداير جنوب الرهد - كميات أمطار أكبر بفعل اصطدام الرياح الرطبة بالتضاريس. كما تظهر مناطق شمال غرب الولاية تأثيراً طبوغرافياً ملحوظاً على الهطول، رغم انخفاضها النسبي، نتيجة لتحفيز الرفع

غربي، بالإضافة إلى المناطق المسطحة)، ثم مقارنة كميات الأمطار بين هذه الفئات باستخدام اختبار كروسكال واليس (Kruskal-Wallis H Test) بوصفه اختباراً لا معلمياً مناسباً لمقارنة أكثر من مجموعتين دون افتراض التوزيع الطبيعي للبيانات.

أظهرت نتائج الاختبار عدم وجود فروق ذات دلالة إحصائية في متوسط كميات الأمطار بين فئات اتجاه الانحدار المختلفة، حيث بلغت قيمة إحصاء الاختبار $H = 8.0$ عند مستوى دلالة $p = 0.433$ ، وهي قيمة أعلى من مستوى الدلالة المعتمد ($\alpha = 0.05$) ويشير ذلك إلى أن الاختلاف في اتجاه الانحدار لا يؤدي إلى فروق معنوية في كميات الأمطار المسجلة في منطقة الدراسة.

كما يدعم هذا الاستنتاج التحليل البصري المتمثل في خريطة اتجاهات الانحدار ومخططات المقارنة، التي تظهر تداخلاً كبيراً في قيم الأمطار بين الاتجاهات المختلفة دون بروز نمط اتجاهي واضح، شكل (12) يستقبل كميات أمطار أعلى أو أقل بصورة منتظمة. وبناء على ذلك، يمكن الاستنتاج أن اتجاه الانحدار لا يعد عاملاً حاسماً بمفرده في تفسير التباين المكاني لهطول الأمطار في شمال كردفان، وإنما يمكن اعتباره متغيراً مساعداً ضمن إطار تحليلي أشمل يضم متغيرات طبوغرافية أكثر تأثيراً مثل الارتفاع والانحدار.



شكل (12) مخطط يوضح العلاقة بين اتجاه الانحدار ومتوسط كمية الأمطار 1990-2024 المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS و DEM/SRTM بتصرف الباحث

العلاقة بين الأمطار والميل الطبوغرافي في ولاية شمال كردفان

أظهر تحليل الارتباط بين الميل الطبوغرافي وكميات الأمطار في ولاية شمال كردفان عدم وجود علاقة خطية ذات دلالة إحصائية، حيث بلغ معامل ارتباط بيرسون ($r = -0.0164$)، وهي قيمة منخفضة جداً تشير إلى ارتباط سلبي ضعيف للغاية. كما أن القيمة الاحتمالية (p -value = 0.195) تفوق مستوى الدلالة المعتمد (0.05)، مما يدل على أن العلاقة بين المتغيرين غير معنوية إحصائياً. تشير هذه النتائج إلى أن الميل الطبوغرافي لا يعد من العوامل المؤثرة المباشرة على التوزيع المكاني للأمطار في المنطقة، مقارنة بعوامل أكثر تأثيراً كارتفاع. ورغم أن الميل يمثل عنصراً مهماً في التحليل الجيومورفولوجي، إلا أن دوره في تفسير تباين كميات الهطول يبدو محدوداً في هذه الدراسة. ويحتمل أن يكون تأثير الميل غير خطي، أو أنه يتداخل مع عوامل أخرى مثل نوع التربة، الغطاء النباتي، أو نمط الرياح، مما

النموذج الثالث: أضيفت فيه مؤشرات اتجاه الانحدار (Northness و Eastness) المشتقة من متغير الـ Aspect، إلا أن معامل التفسير لم يتحسن كثيراً (بقي عند $R^2 = 0.831$)، ومع ذلك ظل تأثير الارتفاع قوياً ومعنوياً ($P < 0.0001$).

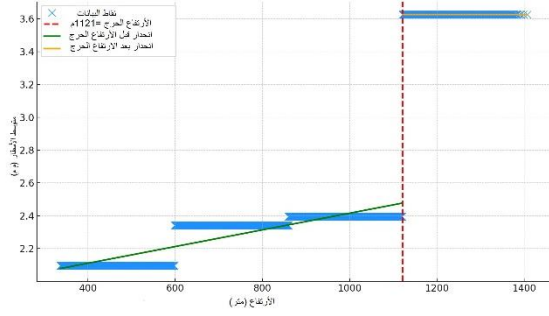
النموذج	1	2	3
معادلة النموذج	كمية الأمطار ~ الارتفاع	كمية الأمطار ~ الارتفاع + دائرة العرض	كمية الأمطار ~ الارتفاع + دائرة العرض + اتجاه الشمال + اتجاه الشرق
R^2	0.015	0.831	0.831
معامل الارتفاع	+16.95	+18.27	+18.26
معامل خط العرض	-	-68.44	-68.44
اتجاه الشمال	-	-	+0.77
اتجاه الشرق	-	-	+1.10

جدول (3) مقارنة بين نماذج الانحدار لتحليل أثر الارتفاع والعوامل الجغرافية على كمية الأمطار

المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS و DEM/SRTM بتصرف الباحث يتضح من ذلك أن الارتفاع لا يمثل مجرد بديل عن التدرج الجغرافي (Latitude/Aspect)، بل يعد عاملاً مستقلاً ذا أثر مباشر على نمط توزيع الأمطار. حيث إن إدخال متغيرات مثل خط العرض واتجاه الانحدار لم يبلغ التأثير المستقل للارتفاع. تؤكد هذه النتائج أهمية استخدام الارتفاع كمتغير تفسيري رئيسي في نماذج التنبؤ بالأمطار، دون مخاوف من تداخل كبير (multicollinearity) مع المتغيرات الجغرافية الأخرى. كما تدعم هذا التفسير الفرضيات الفيزيائية المرتبطة بزيادة الرطوبة والتكاثف في المناطق المرتفعة. وتجدر الإشارة إلى أن الاعتماد على نموذج انحدار بسيط قد يؤدي إلى استنتاجات مضللة، توحى بأن الارتفاع هو العامل الوحيد المؤثر. إلا أن إدخال متغيرات إضافية مثل خط العرض والاتجاه الجغرافي يكشف عن وجود تداخل (confounding) بين العوامل. وعليه، فإن استخدام نماذج انحدار متعددة يعد ضرورياً لاستخلاص استنتاجات دقيقة ومدعومة إحصائياً. حتى بعد التحكم في تأثيرات التدرج الجغرافي، احتفظ الارتفاع بتأثيره المعنوي والموجب، مما يعزز أهميته في النمذجة المكانية للأمطار في الإقليم المدروس.

العلاقة بين الأمطار واتجاه الانحدار الطبوغرافي في شمال كردفان

نظراً للطبيعة الدائرية لمتغير اتجاه الانحدار (Aspect)، فقد تم التعامل معه بوصفه متغيراً تصنيفياً من خلال تقسيمه إلى فئات اتجاهية رئيسية (شمال، شمال شرقي، شرق، جنوب شرقي، جنوب، جنوب غربي، غرب، شمال



شكل (14) تحليل الارتفاع الحرج وتأثيره على الهطول المطري (1990-2024)

المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS و DEM/SRTM بتصريف الباحث

الخلاصة

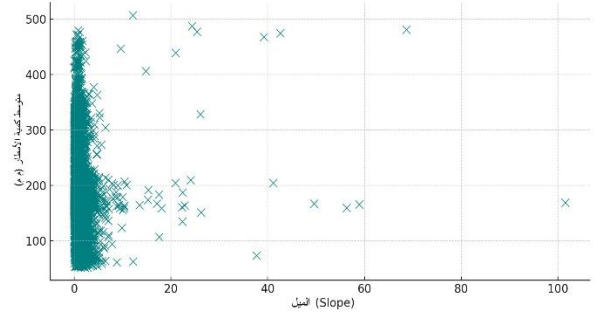
يمثل فهم العلاقة بين العوامل الطبوغرافية وانماط الهطول المطري ركيزة اساسية في تحليل التباين المناخي المحلي. خاصة في المناطق شبه الجافة وقد اتاحت التحليلات المكانية والاحصائية المعتمدة على النماذج الرقمية للارتفاعات امكانية فحص اكثر دقة للأثر الطبوغرافي على الأمطار في منطقة شمال كردفان. هذه الدراسة تمثل خطوة مهمة وتمهد الطريق لفهم العوامل التي تؤثر على أنظمة الأمطار بشكل أوسع. وفي الوقت ذاته، تؤكد على أهمية إدخال بيانات الطبوغرافيا، في نماذج المناخ والدراسات الجغرافية المستقبلية. وتفتح آفاق جديدة لتحسين دقة التنبؤات المناخية، مما يساعد في وضع استراتيجيات تنمية مستدامة وإدارة أفضل للموارد البيئية خاصة في المناطق شبه الجافة.

نتائج الدراسة

- أظهرت نتائج التحليل الزمني زيادة تدريجية في معدلات الأمطار السنوية خلال الثلاثة عقود الماضية في شمال كردفان، بمعدل يقدر بـ $1.95+$ ملم سنويا. أكد اختبار مان-كيندال (Mann-Kendall) وجود هذا الاتجاه التصاعدي بمعنوية إحصائية، رغم أنه بسيط.
- بناء على تقسيم الفترة الزمنية إلى ثلاث مراحل: (1990-2000، 2001-2013، 2014-2024)، تبين أن المرحلة الأخيرة سجلت أعلى متوسط أمطار (247.36 مم)، مقارنة بأدنى متوسط في المرحلة الأولى (199.94 مم). كما أظهرت البيانات أن المناطق الشمالية كانت أكثر جفافاً (>100 مم)، بينما المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية أكثر رطوبة (<250 مم)، مما يعكس تغيراً مناخياً تدريجياً.
- أظهرت النتائج وجود ارتباط معنوي قوي جداً بين الارتفاع وكميات الأمطار ($r = +0.948$ ، $p = 0.000$)، حيث تم تحديد ارتفاع حرج عند 1121 متراً تبدأ بعده كميات الهطول بالزيادة بشكل واضح.
- بينت نتائج الانحدار الخطي المتعدد أن الارتفاع يحتفظ بتأثير قوي ومعنوي مستقل على كميات الأمطار ($P < 0.0001$)، حتى بعد إدخال كل من خط العرض واتجاه الانحدار (Aspect). رغم أن

يتطلب استخدام نماذج تحليل متعددة المتغيرات للكشف عن علاقات أكثر دقة.

يدعم مخطط التبعثر شكل (13) هذا التوجه، إذ تظهر النقاط تشتتاً عشوائياً دون أي نمط تصاعدي أو تنازلي واضح، مما يعكس غياب العلاقة الخطية بين الميل وكميات الأمطار. وبالتالي، يمكن تصنيف الميل كمتغير ثانوي أو تفاعلي في تفسير توزيع الهطول، وليس كعامل مستقل حاسم في هذا السياق المناخي.



شكل (13) مخطط تبعثر العلاقة بين الميل ومتوسط كمية الأمطار 1990-2024

المصدر: تحليل بيانات امطار CHIRPS و DEM/SRTM بتصريف الباحث

مما سبق يتضح أن الارتفاع يعد العامل الطبوغرافي الأكثر تأثيراً، حيث سجل معامل ارتباط موجب وقوي بلغ $r = +0.948$ ، مما يدل على علاقة طردية قوية ذات دلالة إحصائية. في المقابل، أظهرت كل من الميل والانحدار معاملات ارتباط سالبة وضعيفة جداً بلغت $r = -0.016$ و $r = -0.048$ على التوالي، وهو ما يشير إلى أن تأثيرهما على توزيع الأمطار محدود، ولا يمكن الاعتماد عليهما كمتغيرات تفسيرية رئيسية.

تحليل الارتفاع الحرج وتأثيره على الهطول المطري

كشفت التحليل الإحصائي للعلاقة بين الارتفاع وكميات الأمطار عن وجود ارتفاع حرج عند 1121 متراً، يشكل نقطة تحول في نمط الهطول. ففي المناطق التي يقل ارتفاعها عن هذا الحد، تبقى كميات الأمطار منخفضة ومستقرة نسبياً، بينما تشهد المناطق الواقعة فوق هذا الارتفاع زيادة ملحوظة في كمية الأمطار، ويعزى ذلك إلى تأثير ظاهرة الرفع التضاريسي، حيث تؤدي التضاريس المرتفعة إلى تبريد الهواء الصاعد وتكاثف بخار الماء وهطول الأمطار. يوضح الشكل (14) هذا التحول؛ إذ يظهر المنحنى باللون الأخضر مسطحاً قبل 1121 متراً، مما يعكس استقرار الأمطار، في حين يظهر ميل إيجابي حاد باللون البرتقالي بعد هذه النقطة، ويمثل الخط الأحمر المنقطع موقع التحول أو "الارتفاع الحرج".

تبرز هذه النتائج أن الارتفاع يمثل عاملاً حاسماً في التوزيع المكاني للأمطار في شمال كردفان، كما أن تحديد هذا الارتفاع الحرج يمكن أن يستخدم كأساس لتقسيم المنطقة إلى مناطق مناخية فرعية، مما يساهم في تحسين إدارة الموارد المائية، وتوجيه الأنشطة الزراعية والرعية نحو المناطق ذات المردود المطري الأفضل. ويدعم هذا التحليل دمج بيانات نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) مع البيانات المناخية كأداة فعالة لفهم الأنماط المكانية للهطول.

بالاستخدام والمشاركة والتعديل والتوزيع وإعادة الإنتاج بأي وسيلة أو تنسيق، طالما أنك تمتع الاعتماد المناسب للمؤلف (المؤلفين) الأصليين. والمصدر، قم بتوفير رابط لترخيص المشاع الإبداعي، ووضح ما إذا تم إجراء تغييرات. يتم تضمين الصور أو المواد الأخرى التابعة لجهات خارجية في هذه المقالة في ترخيص المشاع الإبداعي الخاص بالمقالة، إلا إذا تمت الإشارة إلى خلاف ذلك في جزء المواد. إذا لم يتم تضمين المادة في ترخيص المشاع الإبداعي الخاص بالمقال وكان الاستخدام المقصود غير مسموح به بموجب اللوائح القانونية أو يتجاوز الاستخدام المسموح به، فسوف تحتاج إلى الحصول على إذن مباشر من صاحب حقوق الطبع والنشر. لعرض نسخة من هذا الترخيص، قم بزيارة:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>

المراجع

آل حسين، أسعد أحمد مقداد، سليمان، محمد علي محمد، وخليل، صفا أحمد . (2022) أثر التضاريس على تباين التساقط المطري ما بين المناطق الجبلية والسهلية في شمالي العراق *Iraqi National Journal of Earth Science*, 22(1), 45-27.

<https://doi.org/10.33899/earth.2022.133832.1015>

التوم، مهدي أمين (2021). المناخ. منشورات جامعة السودان المفتوحة.

جراح، ندى (ب.ت) لغة البرمجة الإحصائية. R. Internet Archive. <https://archive.org/details/02000-pdf-r>

يوسف، حبيبة (2021). محمية جبل الداير، مجلة السودان <https://sudanjournal.com>

References

- Al-Husayn, As'ad Ahmad Miqdād, Sulaymān, Muhammad 'Alī Muhammad, wa-Khalīl, Šafā Aḥmad (2022), Athar al-taḍārīs 'alā tabāyun al-tasāquṭ al-maṭarī mā bayna al-manāṭiq al-jabalīyah wa-al-sahlīyah fī shumālī al-'Irāq, *Iraqi National Journal of Earth Science*, 22(1), 27-45. <https://doi.org/10.33899/earth.2022.133832.1015>
- Al-Tūm, Mahdī Amīn (2021), al-Manākh, Manshūrāt Jāmi'at al-Sūdān al-Maftūḥah.
- Ahrens, C. D. , (2013). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*.
- Barry, R. G. (2008). *Mountain weather and climate* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Bohne, L., Strong, C., & Steenburgh, W. J. (2020). Climatology of orographic precipitation gradients in the contiguous Western United States. *Journal of Hydrometeorology*, 21(8), 1723-1740 <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0229.1>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Cao, S., Diao, Y., Wang, J., Liu, Y., Raimondi, A., & Wang, J. (2023). KDE-Based Rainfall Event Separation and Characterization. *Journal of Water*, 15 (3), 580. <https://doi.org/10.3390/w15030580>

- تحليل الانحدار البسيط أظهر تفسيراً ضعيفاً ($R^2 = 0.015$)، فإن إدخال خط العرض رفع التفسير إلى $R^2 = 0.831$ ، دون أن يضعف أثر الارتفاع. هذا يؤكد أن الارتفاع ليس مجرد انعكاس للتدرج الجغرافي، بل يمثل عاملاً مفسراً مستقلاً ذا أهمية في النمذجة المناخية.
- لم تظهر النتائج وجود ارتباط معنوي بين درجة الميل وكمية الأمطار ($r = -0.016$ ، $p = 0.195$)، مما يشير إلى أن الميل لا يفسر توزيع الهطول بشكل مباشر في المنطقة المدروسة..
- بحسب اختبار كروسكال واليس (Kruskal-Wallis H Test)، لم توجد فروق معنوية في كميات الأمطار بين فئات اتجاه الانحدار التسع ($H = 8.0$ ، $p = 0.433 > 0.05$)، مما يعني أن اتجاه الانحدار ليس عاملاً حاسماً في تفسير التوزيع المكاني للهطول.
- على الرغم من أهمية العوامل المناخية العليا (مثل ITCZ والتيارات النفاثة)، إلا أن الدراسة أظهرت أن النموذج الطبوغرافي قادر على تفسير مناطق ذات نمط مطري مميز، مما يدعم الفرضية بأن التضاريس قادرة على تفسير نسبة معتبرة من التباين في الأمطار دون الحاجة إلى النماذج الجوية المعقدة.

التوصيات

- انطلاقاً من النتائج المتوصل إليها، توصي الدراسة بما يلي:
- توسيع نطاق الدراسات الطبوغرافية المناخية لتشمل عناصر مناخية إضافية مثل الحرارة والرطوبة وسرعة الرياح، لفهم أعمق لتأثير التضاريس على المناخ المحلي.
- اعتماد نتائج الدراسة في تخطيط استخدامات الأراضي، خصوصاً في مجال الزراعة والرعي، حيث تسهم المرتفعات والمناطق ذات الاتجاهات الجنوبية الغربية في دعم الأمن المائي.
- دمج تحليل النماذج الرقمية للارتفاعات (DEM) ضمن نظم دعم القرار للتنمية الريفية، وخاصة في تقييم مخاطر الجفاف والفيضانات.
- تحسين جودة البيانات المناخية والطبوغرافية عبر التحديث المستمر، بما يدعم الأبحاث المستقبلية ويعزز دقة النماذج المكانية.
- إجراء دراسات تفصيلية حول العلاقة بين خصائص المنحدرات وحصاد المياه، للاستفادة منها في دعم الأمن المائي.
- توظيف نتائج العلاقة بين "الارتفاع الحرج" والهطول في تطوير خرائط مناخية محدثة تساعد على إعادة تصنيف المناطق المطرية والأنشطة الملائمة لها.

الإفصاح والتصريحات:

- تضارب المصالح: ليس لدى المؤلف أي مصالح مالية أو غير مالية ذات صلة للكشف عنها. المؤلفون يعلنون عن عدم وجود أي تضارب في المصالح.
- الوصول المفتوح: هذه المقالة مرخصة بموجب ترخيص إسناد الإبداع التشاركي غير تجاري 4.0 الدولي (CC BY-NC 4.0)، الذي يسمح

- El-Mahdy, S. I., & Mohamed, M. M. (2013). Remote sensing and GIS applications of surface and near-surface hydromorphological features in Darfur region, Sudan. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), 4754–4769.
- El-Tom, I. M., & Ahmed, U. H. I. (2021). Spatio-temporal analysis of rainfall variability using statistical and IDW interpolation methods in Sudan (1970–2018). *International Journal of Scientific and Research Publications*, 11(5), 11378.
- El-Tom, M. A. (2024). The rains of Sudan and South Sudan (Geographic Studies Series, 11). Arynthia for Publishing and Distribution.
- Luo, L., Zhao, Y., Duan, Y., Dan, Z., Acharya, S., Jimi, G., Bai, P., Yan, J., Chen, L., Yang, B., & Zhang, Y. (2024). Relationships between precipitation and elevation in the southeastern Tibetan Plateau during the active phase of the Indian monsoon. *Journal of Water*, 16(18), 2700. <https://doi.org/10.3390/w16182700>
- Mohamed, H. H. (2010). Improving adaptive capacities to climate extremes through dissemination and use of seasonal rainfall forecast in a drought-prone area of Sudan, Northern Kordofan, Doctor of Philosophy in Environmental Sciences, UOFK.
- R-bloggers.(2014, June 30). *Piecewise regression in R.R-bloggers*. <https://www.r-bloggers.com/2014/06/piecewise-regression-in-r/>
- USGS. (n.d.). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM DEM). <https://www.usgs.gov>.
- Yūsuf, Habībah (2021), *Mahmīyat Jabal al-Dā'ir, Majallat al-Sūdān*. <https://sudanjournal.com>
- Climate Hazards Group. (n.d.). CHIRPS rainfall data. University of California, Santa Barbara. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- El-Bastawesy, M., El Saadawy, O., Abotalib, A. Z., Othman, A., Taha, M., & Gaber, A. (2021). Examining the impact of different DEM sources and geomorphology on flash flood analysis in hyper-arid deserts. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(7), 431. <https://doi.org/10.3390/ijgi10070431>
- El-Faig, A. H., & El-Tom, I. M. (2013). Rainfall variability in Elkhuwe area, Northern Kordofan-Western Sudan (1970–2010). Faculty of Geographical and Environmental Sciences- University of Khartoum. Working paper. International Household Survey Network. <https://catalog.ihns.org/>
<https://doi.org/10.1080/01431161.2013.781287>
<https://doi.org/10.29322/IJSRP.11.05.2021.p11378>
- Huggett, R. J. (2011). *Fundamentals of Geomorphology* (3rd ed.). Routledge.
- Jarāh, Nadā (b.t), *Lughah al-barmajah al-iḥṣā'īyah R*, Internet Archive. <https://archive.org/details/02000-pdf-r>
- Jiang, H., Yi, Y., Xu, J., Chen, D., Lu, F., Li, R., Wang, X., & Zhou, B. (2023). Characterizing precipitation uncertainties in a high-altitudinal permafrost watershed of the Tibetan Plateau based on regional water balance and hydrological model simulations. *Journal of Hydrology*, 620, 129352. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129352>
- Lawal, Y. B., Owolawi, P. A., Tu, C., Van Wyk, E., & Ojo, J. S. (2024). The kernel density estimation technique for spatio-temporal distribution and mapping of rain heights over South Africa: The effects on rain-induced attenuation. *Journal of Atmosphere*, 15 (11), 1354. <https://doi.org/10.3390/atmos15111354>