تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الامطار المشتقة من القمر الصناعي (GPM) في المملكة العربية السعودية

precipitation products Spatial downscaling of satellite-derived (GPM) in Saudi Arabia

إعداد

صيته بنت ناصر العوفي

Siatuh Nasser Al-Aoufi

طالبة دراسات عليا في قسم الجغرافيا – جامعة الملك سعود

Doi*: *10.21608/jasg.2025.403089

استلام البحث : ١٥ / ١٠ / ٢٠٢٤

قبـــول النشر: ١٥ / ١١ /٢٠٢٤

العوفي، صيته بنت ناصر (٢٠٢٥). تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الامطار المشتقة من القمر الصناعي (GPM) في المملكة العربية السعودية. ***المجلة العربية للدراسات الجغرافية***، المؤسسة العربية للتربية والعلوم والآداب، مصر، ٨(٢٢) ، ٧١ - ٩٦.

https://jasg.journals.ekb.eg

تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الامطار المشتقة من القمر الصناعي (GPM) في المملكة العربية السعودية

المستخلص:

تعد منتجات الأمطار التي تتسم بدقة مكانية عالية، أمرًا بالغ الأهمية للدراسات الهيدرولوجية والأرصاد الجوية والبيئية ، ويعتبر استخدام تقنيات تحسين الوضوح المكاني ، حلاً مناسبًا للحصول على منتجات الأقمار الصناعية بدقة عالية. تسعى هذه الدراسة إلى زيادة الوضوح المكاني لمنتجات الأمطار المشتقة من القمر الصناعي (GPM) في المملكة العربية السعودية من دقة مكانية ١٠كمx١٠كم إلى دقة مكانية ١كمx١كم . وقد تم تطبيق نموذج الانحدار الموزون جغرافياً(GWR) بهدف تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الامطار المشتقة من القمر الصناعي(GPM) ، حيث تأخذ هذه التقنية في الاعتبار العلاقة غير الثابتة مكانيا بين الامطار والمتغيرات البيئية المستقلة المستخدمة في هذه الدراسة (مؤشر النبات الفارقي المعياري، وارتفاع سطح الأرض الرقمي ودرجة حرارة سطح الأرض). وقد أظهرت نتائج الدراسة دقة وجودة نموذج GWR ، حيث بلغ مؤشر معامل التحديد (R^2) 0.9 ، كما دل مؤشر AIC (Akaike Information Criterion) ، والذي يبلغ ٧٣١٧٤.٥٩٣ ، إلى ان النموذج يتمتع بأداء وموثوقية عالية.

الكلمات المفتاحة: قياس هطول الامطار العالمي ، الانحدار المُتعدِّد الموزون جُغرافيًّا ، التقدير البيني المكاني.

Abstract:

High spatial resolution rainfall products are essential for hydrological, meteorological and environmental studies, and spatial resolution enhancement techniques are a suitable solution for obtaining high resolution satellite products. This study aims to increase the spatial resolution of satellite-based rainfall products (GPM) in Saudi Arabia from a spatial resolution of 10 km x 10 km to a spatial resolution of 1 km x 1 km. The Geographically Weighted Regression (GWR) model was applied in this study to improve the spatial resolution of satellite-based rainfall products (GPM), as this technique considers the spatially non-stationary relationship between rainfall and the independent environmental variables used in this study (standardized difference vegetation index, digital land surface elevation and land surface temperature). The results of the study

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

showed the accuracy and quality of the GWR model in improving the spatial downscaling of rainfall products, as the coefficient of determination index R^2 reached 0.9, and the AIC (Akaike Information Criterion) index, which reached 73174.593, indicated that the model has high performance and reliability.

Keywords: Global precipitation measurement, Geographically Weighted Multiple Regression, Spatial interpolation.

المُقدّمة

يُعَدُّ هطول الأمطار من أكثر العمليات الطبيعية تعقيدًا في الدورة الهيدرولوجية، حيث يتعرض لتقلبات كبيرة على المستويات المكانية والزمانية. إن الحصول على تقديرات دقيقة لهطول الأمطار أمر بالغ الأهمية، لأنه يشكل المدخل الرئيسي لمجموعة واسعة من التطبيقات في الدراسات البيئية، والإيكولوجية، والهيدرولوجية. تشمل المصادر الرئيسية لبيانات هطول الأمطار المباشرة محطات القياس الأرضية، بينما تشمل المصادر غير المباشرة الرادارات الأرضية والأقمار الصناعية (Mohammed et al.,2020).

تُعَدُّ محطات القياس الأرضية المصدر الأكثر دقة لقياسات هطول الأمطار، وهي البيانات الأكثر استخدامًا. ومع ذلك، فإن توزيع هذه المحطات غير متساوٍ ومتناثر، وهطول الأمطار هو ظاهرة ذات توزيع مكاني. لذا، للحصول على توزيع مكاني مستمر لبيانات هطول الأمطار، يجب إجراء الاستيفاء الجغرافي المكاني على بيانات محطات القياس الأرضية. ومع ذلك، قد لا تحقق هذه العملية دائمًا الدقة المطلوبة، مما يؤدي إلى بعض أوجه عدم اليقين التي لا تعكس النمط الفعلي لهطول الأمطار(Sharif et al., 2019) . كما تواجه أنظمة الرادار الأرضية أيضًا تحديات في التطبيقات العملية بسبب نطاقها المحدود، خاصة في المناطق الجبلية أو النائية، بالإضافة إلى التكلفة الأولية العالية وصعوبات الصيانة (Hong et al., 2018) . لذلك، أصبحت منتجات هطول الأمطار المشتقة من الأقمار الصناعية مصدرًا مهمًا لبيانات هطول الامطار، حيث توفر تقديرات أكثر موثوقية على المستويات العالمية والإقليمية والمحلية (He et al., 2016) .

ومع ذلك، أظهرت الدراسات الحديثة أن هناك بعض القيود على المنتجات المشتقة من الأقمار الصناعية من حيث الوضوح المكاني (Xie et al., 2020). على سبيل المثال، تتمتع معظم منتجات رطوبة التربة السطحية المشتقة من الأقمار الصناعية بدقة منخفضة تصل إلى عشرات الكيلومترات، مما يجعلها غير مناسبة للاستخدام في النمذجة المائية البيئية (Jin et al., 2018) . كذلك، عند بناء نموذج هيدرولوجي لتقدير قيم التصريف اليومية،

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

خاصة في المناطق التي تكون فيها التأثيرات المدارية مهمة، تظهر مشكلة انخفاض الوضوح المكاني لمنتجات قياس هطول الأمطار بوضوح (Zhan et al., 2018).

لذلك، هناك حاجة ملحة لتوفير معلومات عالية الدقة، والتي لا تتوفر من منتجات الأقمار الصناعية منخفضة الوضوح المكاني. لذا، يُعتبر تطبيق تقنيات تحسين الوضوح المكاني حلاً مناسبًا للحصول على منتجات الأقمار الصناعية بدقة عالية (Hong et al., 2018) .

مُشكلة الدِّراسة

تتطلب الدراسات المكانية على المستوى المحلي، والتخطيط السليم لمشاريع تصريف السيول في المناطق الحضرية، توفر بيانات الامطار بشكل مستمر مكاني وبوضوح مكاني عالي (Wang et al.,2021) . ومنتجات الامطار المتوفرة في المملكة العربية السعودية بمختلف مصادرها لا يتخطى وضوحها المكاني 10كمx10كم مما يجعلها غير مناسبة للدراسات المكانية على المستوى المحلي.

استجابة لحل هذه المشكلة ، تسعى هذه الدراسة الى العمل على تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الامطار المشتقة من المرئيات الفضائية الخاصة بالقمر الصناعي (GPM) في المملكة العربية السعودية ، من ١٠كيلومتر إلى ١ كيلومتر مقارنة بالبيانات الأصلية ، مما لا يؤدي إلى تحسين الوضوح المكاني بشكل كبير فحسب ، بل يزيد أيضًا من دقة المنتجات ، مما يجعلها تمتع بإمكانية تطبيق أفضل.

هدف الدِّراسة

تهدف هذه الدِّراسة الى تحسين الوُضوح المكانيِّ لمنتجات الأمطار المُشتقَّة من الأقمار الصناعية GPM، لتوفير بيانات الأمطار السنوية في المملكة العربيَّة السُّعوديَّة بوُضوحٍ مكانيٍّ ١ كم، عوضًا عن ١٠ كم في المُنتجات الأصليَّة.

مُصطلَحات الدِّراسة

تحسين الوضوح Downscaling :

اجراء يهدف لاستنتاج معلومات عالية الدقة من بيانات الأقمار الصناعية منخفضة الدقة، وتعتمد هذه التقنية على مناهج ديناميكية أو إحصائية في العديد من التخصصات ، وخاصة علم المناخ والأرصاد الجوية (Atkinson,2012) .

تحسين الوضوح الاحصائي Statical Downscaling:

يعتمد على العلاقات الإحصائية بين المتغير التابع والمتغيرات المستقلة ، ويتسم هذا الاسلوب بكفاءة عالية بمراعاة العوامل البيئية (Chen et al.,2020).

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

تحسين الوُضوح المكاني Spatial Downscaling:

طريقة تهدف إلى تحسين الوُضوح المكانيّ للبيانات المستمرة مكانياً المُشتقَّة من الأقمار الصناعية او النماذج العددية ذات الدِّقَّة المكانيَّة المُنخفضة إلى دقَّةٍ مكانيَّةٍ عاليةٍ (Park,2019).

الانحدار المُتعدِّد الموزون جُغرافيًّا Geographically Weighted Multiple Regression (GWR):

نُموذج انحدار مُتعدِّد المعلمات محلي موزون، ويُستخدم لنمذجة العلاقات المُختلفة مكانيًّا بين مُتغيِّرين أو أكثر بمعايرة مُعاملات الانحدار في كل موقع بناء على البيانات في منطقة الجوار الموزونة جغرافيا (Tasyurek&Celik,2020) .

منطقة الدراسة

تحتل المملكة العربية السعودية الطرف الجنوبي الغربي لآسيا، بمساحة تبلغ حوالي ٢،٢٥٠،٠٠٠ كيلومتر مربع، تمتد بين خطي طول ٣٤ و٥٦ درجة شرقًا، ودائرتي عرض ١٦و٣٢ درجة شمالًا (Mahmoud et al.,2020). يحدها غرباً البحر الاحمر وشرقاً الخليج العربي والامارات العربية المتحدة وقطر وشمالاً الكويت والعراق والأردن وجنوباً اليمن وسلطنة عمان، وتقسم المملكة العربية السعودية إلى ثلاث عشرة منطقة ادارية: المدينة المنورة، مكة المكرمة، الرياض، القصيم، تبوك، عسير، جازان، نجران ، الجوف ، حائل ، الباحة ، والمنطقة الشرقية والشمالية (الهيئة العامة للإحصاء، ٢٠٢٢).

تتنوع تضاريس المملكة نظراً لاتساع مساحتها كما يظهر في شكل (١)، ففي جهة الغرب، يمتد سهل تهامة الساحلي على امتداد البحر الأحمر. وترتفع سلسلة جبال السروات إلى الشرق من هذا السهل، والتي يتراوح ارتفاعها ما بين ٩ الاف قدم في الجنوب، و٣ الاف قدم في الشمال. في المقابل، توجد هضبة نجد من جهة الشرق ومرتفعاتها التي تنتهي شرقاً بصحراء الصمان وكثبان الدهناء، وجنوبا بوادي الدواسر وصحراء الربع الخالي. وفي الشمال توجد سهول نجد، التي تتخللها بعض المرتفعات الجبلية مثل جبال طويق والعارض وأجا وسلمى. اما الجزء الجنوبي الشرقي من المملكة فتشكله صحراء الربع الخالي، والتي تشغل مساحة ٦٤٠ ألف كيلومتر. بينما السهل الساحلي الشرقي فيتميز بمساحات شاسعة من المناطق الرملية والسبخات الملحية (الهيئة العامة للإحصاء، 2023).

ويختلف مناخ المملكة من منطقة لأخرى تبعا لموقعها الجغرافي، اتساع مساحتها وتنوع تضاريسها، فهي تتسم بمناخ قاري وشبه جاف. فالمناطق الوسطى صيفها حار وشتاؤها بارد، وترتفع على السواحل درجة الحرارة والرطوبة، اما المرتفعات الغربية والجنوبية الغربية تتميز باعتدال مناخها (المركز الوطني للأرصاد، ٢٠٢٤). اما بالنسبة لهطول الأمطار في المملكة فهو يتفاوت من عام لآخر، ومن فصل لآخر، ومن منطقة

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

لأخرى نتيجة لوقوع المملكة في النطاق شبه المداري (المطيري، ٢٠١٩). فقد سجلت أعلى كميات من الأمطار خلال موسم الأمطار (أكتوبر-مايو) وأدناها في موسم الجفاف (يونيو-سبتمبر)، وحدثت أكبر كثافة لسقوط الامطار في الأجزاء الوسطى والجنوبية الغربية على طول ساحل البحر الأحمر، اما المناطق الشمالية والشمالية الغربية والجنوبية الشرقية تتمتع بكثافة تتراوح من منخفضة إلى متوسطة (Almazroui,2020). كما ان كميات الهطول تتساقط بدرجات متفاوتة في الموقع الواحد على كل مناطق المملكة العربية السعودية (Hussain et al,2022)، لكن بشكل عام يتصف هطول الامطار في المملكة بالقلة الى حد الجفاف، ماعدا المرتفعات الجنوبية الغربية فأمطارها غزيرة نسبياً (مصلح،٢٠١٩).

شكل ١: موقع وطبوغرافية المملكة العربية السعودية

المصدر: عمل الباحثة بالاعتماد على نموذج الارتفاع الرقمي من هيئة المسح الجيولوجي الأميركية USGS،٢٠٢١م.

الإطار النظري والدراسات السابقة

يتضمن جزئين هما: الإطار النظري والدراسات السابقة ، حيث يتناول الإطار النظري القمر الصناعي: قياس هطول الامطار العالم (GPM) ، وتحسين الوضوح

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

(Downscaling) . اما الجزء الخاص بالدراسات السابقة فيسلط الضوء على اهم الدراسات ذات العلاقة بموضوع الدراسة وإجراءاتها المنهجية .

الإطار النظري

القمر الصناعي: قياس هطول الامطار العالمي Global Precipitation Measurement

تم اطلاق القمر الصناعي : قياس هطول الامطار العالمي (GPM) ، في نهاية فبراير عام ٢٠١٤م ، و هي شبكة أقمار اصطناعية بدأتها وكالة ناسا (NASA) والوكالة اليابانية لاستكشاف الفضاء (JAXA) كخلف عالمي لـ قياس هطول الأمطار الاستوائية TRMM، وهي تضم اتحادًا من وكالات الفضاء الدولية ، بما في ذلك المركز الوطني للدراسات الفضائية (CNES) ، والمنظمة الهندية لأبحاث الفضاء (ISRO) ، الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجو (NOAA) ، والمنظمة الأوروبية لاستغلال أقمار الأرصاد الجوية (EUMETSAT)وغيره (NASA ،2024). ويهدف القمر الصناعي GPM الى تقدير هطول الأمطار من ٠.٢ إلى ١١٠ ملم / ساعة والكشف عن تساقط الثلوج، تحسين المعرفة بنظم هطول الأمطار وتذبذب دورة المياه وتوافر المياه العذبة، تحسين نمذجة المناخ والتنبؤ به، تحسين التنبؤ بالطقس وإعادة تحليل المناخ ، تحسين النمذجة والتنبؤ الهيدرولوجي، والاستجابة للكوارث الطبيعية كالأعاصير والفيضانات والانهيارات الأرضية (Hou et al.,2014).

تُنتج بيانات هطول الامطار التي تم اشتقاقها من القمر الصناعي GPMمن مستشعر الميكروويف ومستشعرات الأشعة تحت الحمراء (IR) الموجودة على متن مجموعات GPM، بالإضافة الى بيانات مقياس هطول الأمطار الشهرية المقاسة من المحطات الارضية، (Huffman,2020; He et al.,2022) ، في تنسيقات متعددة تخضع لأنواع مختلفة من المعالجة لتلبية احتياجات مجتمع مستخدمي البيانات (Huffman et al.,2020) .

تمتد التغطية المكانية لمنتجات GPM من ٦٠ درجة شمالاً الى ٦٠ درجة جنوباً. وتوفر ثلاث منتجات مختلفة بما في ذلك التشغيل المبكر والمتأخر والنهائي ، والتي تم حسابها بعد حوالي ٤ ساعات و١٤ ساعة و٣.٥ شهرًا بعد وقت المراقبة ، على التوالي. ، بدقة مكانية تبلغ ١٠كم (Huffman et al.,2020).

تحسين الوضوح DOWNSCALING

يعتبر تحسين الوضوح من التقنيات الهامة لزيادة دقة البيانات المنتجة من الأقمار الصناعية، حيث يساهم في جعل الصورة تبدو أكثر وضوحًا وتفصيلاً من تلك الخاصة بالمنتجات الاصلية (Atkinson,2021). ولكن هذا ليس التأثير المطلوب فقط، لكن لابد

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

أن توفر منتجات الأقمار الصناعية التي أجريت لها عمليات تحسين الوضوح تقديرات مطابقة للتقديرات الفعلية على سطح الأرض (Garcia,2021).

فعلى سبيل المثال، لتعزيز تطبيقات منتجات الامطار الحالية ذات الوضوح المكاني المنخفض ، أصبح تحسين وضوح هذه المنتجات والعمل على زيادة دقتها حلاً مهمًا. ففي العقود الأخيرة ، تم اقتراح العديد من تقنيات تحسين الوضوح لمنتجات هطول الأمطار عبر الأقمار الصناعية. وقد اعتمدت العديد من الأبحاث على عدد من النماذج المختلفة ، بناءً على الدقة المرغوبة للمخرجات ، أو الحصول على خصائص ذات تأثير أكبر للظاهرة محل الدراسة (Keller et al.,202 ; Mukherjee,2017).

يوجد نوعان من تحسين الوضوح لمنتجات الأقمار الصناعية، وهما: تحسين الوضوح الزماني (Temporal Downscaling) وهي تقنية تهدف الى تحسين الوضوح الزماني لبيانات الأقمار الصناعية ذات الدقة الزمنية المنخفضة ،(على سبيل المثال ٣ ساعات) إلى دقة زمنية عالية تصل الى نصف ساعة (Wang,2015). والنوع الثاني : تحسين الوضوح المكاني Spatial Downscaling وهو محور اهتمام هذه الدراسة حيث يهدف الى تحسين الوضوح المكاني لبيانات المشتقة من الأقمار الصناعية ذات الدقة المكانية المنخفضة ،على سبيل المثال ٩٩٠م الى دقة مكانية عالية تصل الى ٩٠م (He et al.,2022). وتعتمد تقنيات تحسين الوضوح المكاني في الغالب على نماذج إحصائية تبنى على أساس العلاقات بين المنتجات القائمة على الأقمار الصناعية والعوامل البيئية بغرض الحصول على بيانات ذات دقة مرتفعة ، فيما يعرف بتحسين الوضوح الإحصائي (Sun et al.,2022.). وتتضمن أساليب التحسين الاحصائي تطوير العلاقات الإحصائية بين المتغيرات البيئية ومتغيرات المناخ المحلية، ويتم بعد ذلك استخدام هذه العلاقات لزيادة وضوح البيانات والحصول على معلومات عالية الدقة (Latombe et al,2018 Brown et al.,2008).

الدراسات السابقة

أولاً. دراسات في تطبيق تقنيات تحسين الوضوح المكاني :

- استخدم كل من (Shi & Song, 2015) و (Jing et al.,2016) خوارزميتين للتعلم الآلي Machine Learning، وهي الغابة العشوائية Random Forest و الدعم القائم على الالة Support Vector Machine، بغرض زيادة الدِّقَّة المكانيَّة لبيانات هُطول الأمطار المشتقة من القمر الصناعي TRMM 3B43 من ٢٥ كم إلى ١ كم فوق منطقة هضبة التبت، وتوصلا أن البيانات ذات دقَّة ١ كم أكثر فائدة، خصوصًا للمناطق ذات الظروف المناخيَّة المتنوعة.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

- نفذ (Bala et al.,2020) تحسين الوضوح المكاني لظاهرة حرارة الأرض السَّطحية من مُستشعرات MODIS بدقة مكانيَّة تبلغ ٩٣٠ مترًا إلى ١٠٠ متر باستخدام أسلوب الانحدار(طريقة المربعات الصغرى)، على ثمانية مدن في الهند متفاوتة في المناخ والتضاريس، وقد أظهرت النتائج إمكانات عالية لرسم خرائط حرارة الأرض السَّطحية.
- في دراسة (Chen et al.,2015) تمت مقارنة طريقة الانحدار الموزون جُغرافيًّا متعدد المُتغيّرات (GWR) بطريقتين أخريين هما: الانحدار أحادي المُتغيّر (UR) والانحدار متعدد المُتغيّرات (MR)، للحصول على هُطول الأمطار السنوية والشَّهريَّة من مُنتجات TRMM 3B43 بدقة مكانيَّة عالية (١ كم) في منطقة جانسو بالصين ذات المناخ شبه الجاف، حيث توصلوا إلى أن طريقة GWR المقترحة تؤدي باستمرار أفضل من طُرُق UR وMR، ويرجع ذلك في أن الانحدار أحادي المُتغيّر والانحدار متعدد المُتغيّرات يواجهان تحدِّي عدم التَّجانُس المكاني لظاهرة هُطول الأمطار.
- أوضح كلا من (Luo et al.,2021) و(Wu et al,2019) من خلال دراستهما ان النموذج الاحصائي الانحدار الموزون جغرافيا (GWR) يظهر أداءً مستقرًا وأعلى صحة ، لأنه يأخذ في الاعتبار عدم الثبات المكاني.
- وبرر (Ghorbanpour et al.,2021) في دراسته تفوق نموذج الانحدار المتعدد الموزون جغرافياً GWR على الدعم القائم على الالة والانحدار المتعدد الخطي في اشتقاق هطول الامطار الشهرية المقدرة من TRMM 3B43 خلال الفترة ٢٠٠٩-٢٠١٣ في منطقة حوض بحيرة أرومية بإيران، الى قدرة خوارزمية GWR على التقاط الاختلاف المكاني بين هطول الأمطار والعوامل البيئية ، لأهمية تلك العلاقات بين هطول الأمطار والمتغيرات البيئية في إجراء تحسين الوضوح المكاني.

ثانياً. دراسات على مستوى المملكة العربية السعودية :

- أشارت دراسة (Bawadekji,2022) إلى أن التوزيع المكانيَّ لهُطول الأمطار في المملكة العربيَّة السُّعوديَّة غير مُتجانس من الشَّمال إلى الجنوب من خلال بيانات CHIRPS وGPCC من ناحية، ومن ناحية أخرى.
- كما ذكر (Mahmoud,2017) في دراسته أن تقديرات هُطول الأمطار في الوقت الفعليّ تقريبًا في مُعظم مناطق المملكة العربيَّة السُّعوديَّة المُنتجة من القمر الصناعي (GPM-IMERG)، تُعَدُّ أكثر قبولًا من تقديرات الأمطار المقيسة من المحطَّات الأرضيَّة المتفرقة.
- أفاد Kheimi وGutub (2014) في دراستهما أن تقييم مُنتجات الأقمار الصناعية لقياس هُطول الأمطار في المملكة العربيَّة السُّعوديَّة تحتاج إلى العمل على إزالة الأخطاء وتحسين تقديرات هُطول الأمطار لهذه المُنتجات.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

وهنا يبرز دور وأهمِّية هذه الدِّراسة في سدِّ الفجوة العلميَّة من خلال تحسين الوضوح المكانيّ لتقديرات الأمطار من القمر الصناعي GPM-IMERG في المملكة العربيَّة السُّعوديَّة، واشتقاق بيانات عالية الدِّقَّة

منهجية الدراسة واساليبها

البيانات المستخدمة:

منتجات الامطار السنوية الموزعة مكانيا على شكل مصفوفة لكامل المملكة العربية السعودية بوضوح مكاني قدره 10x10كم، والمشتقة من القمر الصناعي (GPM IMERGV7) لعام واحد ٢٠٢١م، والتي تم تحميلها من قاعدة البيانات التابعة لوكالة ناسا (https://disc.gsfc.nasa.gov/)، بوضوح مكاني ١٠ كم×١٠ كم.

بيانات مؤشر النبات الفارقي المعياري Normalized Difference Vegetation Index

وفي هذه الدراسة، استخدمت بيانات (MODIS) من نوع MODIS13A3 وهي بيانات شهرية بوضوح مكاني ١كم لفترة عام واحد ٢٠٢١م، والمتاحة مجاناً على موقع Earth Explorer (usgs.gov) . (Wang et al.,2020; NASA,2023)

ويحسب مؤشر (NDVI)كما يلي (Huang et al.,2021 Isaya & Avdan, (2016;

$$\mathbf{NDVI} = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \qquad (١)$$

حيث ان:

NIR = انعكاسية السطح في نطاق الاشعة الحمراء القريبة ويمثل النطاق الثاني في منتجات MODIS

RED = انعكاسية السطح في نطاق الاشعة الحمراء ويمثل النطاق الاول في منتجات MODIS

بيانات حرارة سطح الأرض Land Surface Temperature

هذه الدراسة استخدمت بيانات MOD21A1 وهي بيانات يومية بوضوح مكاني ١كم لفترة عام واحد ٢٠٢١م والمتاحة مجاناً على موقع EarthExplorer (usgs.gov)، لأنها ملائمه لمقياس منطقة الدراسة.

بيانات ارتفاع سطح الأرض الرقمي Digital Elevation Model

قد تم استخدام بيانات الارتفاع الرقمي في هذه الدراسة من منتجات(SRTM) بوضوح مكاني 30 مترًا، الإصدار الثالث، التي تم إنشاؤه بواسطة هيئة المساحة الجيولوجية الأميركية USGS ومركز الفضاء الألماني DLR باستخدام بيانات تم جمعها بواسطة مكوك

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

الفضاء انديفور (DAAC,2015; NASA,2024). وقد تم تحميل بيانات DEM بالمملكة العربية السعودية المتاحة على موقع Earth Explorer (usgs.gov).

نموذج الانحدار المتعدد الموزون جغرافيا (Geographically Weighted Regression)

تم استخدام نموذج الانحدار الموزون جغرافيا في تحسن الوضوح المكاني لمنتجات الامطار السنوية في المملكة العربية السعودية لعام ٢٠٢١م ، وذلك لأنها تعالج مشكلة عدم ثبات العلاقة المكانية Spatial Non-stationarity في نماذج الانحدار (Regression Models) وتزايد استخدامها في العقدين الأخيرين مع تطور برمجيات نظم المعلومات الجغرافية(Sun et al.,2022)

والانحدار الموزون جغرافيا يعالج مشكلة عدم ثبات العلاقة المكانية معادلة (رقم ٢) في حدود جوار معين واعطاء الملاحظات Observations داخل نطاق منطقة الجوار المعينة أوزان تتناسب تناسب عكسياً مع البعد الجغرافي بينها وبين الموقع قيد الدراسة (Wang et al.,2020).

$$\mathcal{R}_i = \alpha_{i+} \beta_{1,i} DEM_i + \beta_{2,i} NDVI_i + \beta_{3,i} LST_i + \mathcal{E}_i \quad (٢)$$

حيث إن:

$\mathcal{R}_i$ = الامطار السنوية (ملم) في الموقع i

α_i = معامل الانحدار الثابت في الموقع i

$\beta_{1,i}$ = مقدار التغير في $\mathcal{R}_i$ في الموقع i لكل وحدة تغير في DEM_i في منطقة الجوار i

DEM_i = الارتفاع فوق مستوى سطح البحر(م) في الموقع i

$\beta_{2,i}$ = مقدار التغير في $\mathcal{R}_i$ في الموقع i لكل وحدة تغير في $NDVI_i$

$NDVI_i$ = مؤشر الغطاء النباتي في الموقع i

$\beta_{3,i}$ = مقدار التغير في $\mathcal{R}_i$ في الموقع i لكل وحدة تغير في LST_i

LST_i = درجة حرارة سطح الأرض في الموقع i

$\mathcal{E}_i$ = الخطأ العشوائي في الموقع i

ويمكن تقدير معاملات الانحدار الموزون جغرافيا في معادلة (٣) على النحو التالي : (Chen et al.,2015; Wang et al.,2021)

$$\boldsymbol{\beta}_i = (\mathbf{X}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathcal{W}}_i \mathbf{X}_i)^{-1} \mathbf{X}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\mathcal{W}}_i \boldsymbol{\mathcal{R}}_i \quad (3)$$

حيث ان:

$\boldsymbol{\beta}_i$ = متجهة (Vector) معاملات الانحدار في الموقع i

$\mathbf{X}_i$ = مصفوفة (Matrix) المتغيرات المستقلة في منطقة جوار الموقع i

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

$\mathbf{X}_i^{\mathrm{T}}$ = مقلوب (transpose) $\mathbf{X}_{j,i}$

$\boldsymbol{W}_i$ = المصفوفة القطرية (diagonal matrix) للأوزان الجغرافية في منطقة جوار الموقع i

$\boldsymbol{\mathcal{R}}_i$ = متجهة قيم الامطار في منطقة جوار الموقع i

وتحسب الاوزان الجغرافية $\mathcal{W}_{j,i}$ للشهر j في منطقة جوار الموقع i للملاحظة (Observation) في الموقع K المجاور بناء على المسافة الإقليدسية Euclidean distance بين الموقع i و الموقع κ بطريقة Gaussian (معادلة ٤) التالية (Wang et al.,2021) :

$$\begin{cases} \mathcal{W}_{\mathrm{i},k} = exp^{-0.5\,(d_{\mathrm{i},\kappa}\ /\ h_{\mathrm{i}})^2} & d_{\mathrm{i},k} \le h_{\mathrm{i}} \\ \mathcal{W}_{\mathrm{i},k} = 0 & d_{\mathrm{i},k} > h_{\mathrm{i}} \end{cases} \qquad (٤)$$

حيث إن:

$d_{\mathrm{i},\kappa}$ = المسافة الاقليدسية بين الموقع ì و الموقع κ

h_{i} = عرض منطقة الجوار Bandwidth للموقع ì

معايرة نموذج الانحدار الموزون جغرافياً

تمت معايرة نموذج الانحدار الموزون جغرافياً (GWR) على المستوى السنوي لعام ٢٠٢١م. في عملية معايرة النموذج، هناك عدة خيارات يمكن أن تؤثر على نتائج المعايرة وتُستخدم لتحسين دقة النموذج وفهم العلاقات المكانية بشكل أفضل. من بين هذه الخيارات الأساسية:

نوع النموذج (Model Type) : Continuous (Gaussian)

نوع الجوار (Neighborhood Type) : Number of neighbors

طريقة اختيار الجوار (Neighborhood Selection Method) : User defined

عدد الجيران (Number of Neighbors) : ٦٠.

المتغيرات المستقلة (Explanatory Variables) :اختيار المتغيرات المستقلة التي سيتم استخدامها في النموذج.

المتغير التابع (Dependent Variable): تحديد المتغير التابع الذي سيتم نمذجته.

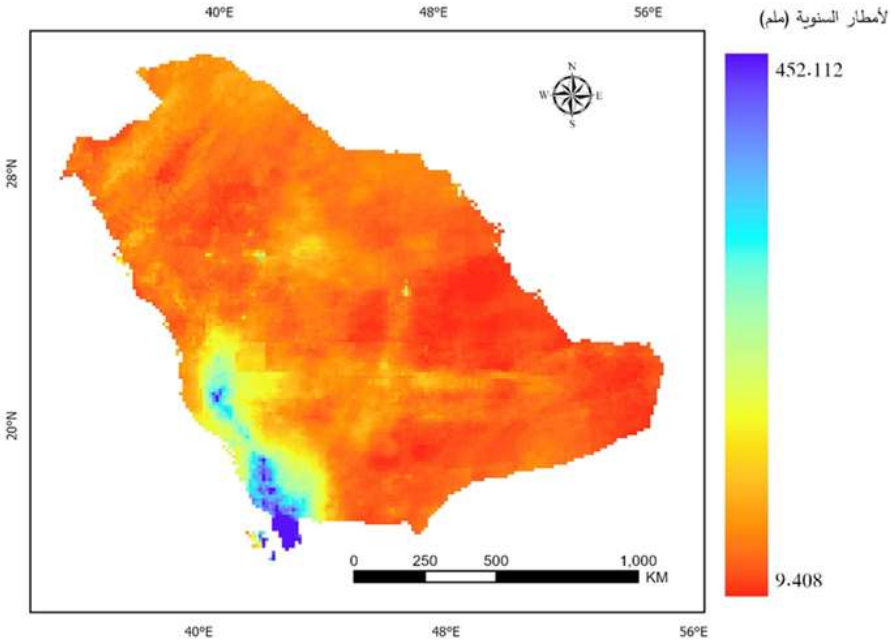
طريقة حساب الأوزان (Local Weighting Scheme) : استخدم دالة Gaussian لحساب الأوزان بناءً على المسافة.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

النتائج والمناقشة

التوزيع الجغرافي للأمطار السنوية خلال فترة الدراسة

يوضح (الشكل رقم ٢) التوزيع الجغرافي للأمطار السنوية في المملكة العربية السعودية لعام ٢٠٢١م، حيث تتراوح الامطار السنوية لعام ٢٠٢١م ، ما بين ٤٥٢.١١ ملم ، و٩.٤١ ملم ، مما يعكس التباين الكبير في الأمطار السنوية بين الأقاليم المختلفة في المملكة العربية السعودية، حيث تتلقى الأجزاء الجنوبية الغربية مزيد من الامطار خاصة مرتفعات عسير ، مع انخفاض للأمطار باتجاه الشرق .



شكل ٢: التوزيع الجغرافي للأمطار السنوية في المملكة العربية السعودية لعام ٢٠٢١م.

في حين يناهز متوسط الأمطار السنوية نحو ٤٧.٠٧ ملم، والذي يعكس المعدل العام للأمطار السنوية في المملكة العربية السعودية في عام٢٠٢١م . كان هناك تباين كبير في كميات الأمطار بين الأقاليم المختلفة. حيث بلغ الانحراف المعياري ٣٩.٧١ ملم ، مما يشير إلى وجود اختلافات كبيرة في كميات الأمطار. كما بلغ الوسيط ٣٧.٢٤ ملم ، مما يشير إلى أن ٥٠% مساحة المملكة تلقت أقل من هذا الرقم والنصف الآخر تلقى أعلى منه، في حين بلغ الربيع الأول ٢٨.١٨ ملم أي أن ٢٥% من مساحة المملكة العربية السعودية في عام

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

٢٠٢١م تلقت أمطار لا تقل عن ٢٨.١٨ملم، وأن ٧٥% من مساحة المملكة تلقت أمطار أعلى من ٢٨.١٨ ملم . كما ان الربيع الثالث بلغ ٤٨.٩٨ ملم أي أن ٧٥% من مساحة المملكة لم تتلق فيها أمطار أعلى من ٤٨.٩٨ ملم ، وأن ٢٥% من مساحة المملكة سقطت عليها الأمطار اعلى من ٤٨.٩٨ملم ، كما يظهر في (جدول رقم ١). مما يعطينا فكرة عن توزيع الأمطار بين الأقاليم المختلفة. وهذا التباين الكبير للأمطار في المملكة العربية السعودية يؤكد على ضرورة تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الأمطار حتى يتضح التباين المكاني للأمطار على المستوى المحلي.

جدول١ :الإحصاءات الوصفية لبيانات الأمطار السنوية في منطقة الدراسة لعام٢٠٢١م (مم) عند وضوح مكاني١٠كمx10كم.

الإحصاءات الوصفية		القيمة (ملم)
أدنى قيمة		٩.٤١
أعلى قيمة		٤٥٢.١١
المتوسط		٤٧.٠٧
الانحراف المعياري		٣٩.٧١
الربيع الأول	25%	٢٨.١٨
الربيع الأوسط (الوسيط)	50%	٣٧.٢٤
الربيع الثالث	75%	٤٨.٩٨

المصدر: من النتائج الإحصائية في هذه الدراسة باستخدام برنامج ArcGIS Pro.

نموذج الانحدار المتعدد الموزون جغرافيا (GWR):

يوضح جدول رقم (٢) نتائج نموذج الانحدار الموزون جغرافياً (GWR) ،ان قيم R^2 المحلي غير ثابتة ، في مناطق منخفضة (0.030) ، وفي مناطق أخرى مرتفع جداً (٠.٩٢٥) يكاد يصل الى ١ .كما تبلغ قيمة معامل R^2 و R^2 المعدل ٠.٩٣٦ ، ٠.٩٣٤ على التوالي مما يعكس مدى جودة وقوة أداء النموذج ، مما يشير إلى أن نموذج GWR يأخذ في الاعتبار عدم الثبات المكاني في العلاقة بين المتغيرات البيئية المستقلة (مؤشر النبات الفارقي المعياري، وارتفاع سطح الأرض الرقمي ودرجة حرارة سطح الأرض) والمتغير التابع(الأمطار). كذلك تبلغ قيمة AICc ٧٣١٧٤.٥٩٣، مما يشير إلى جودة النموذج. كما يظهر معامل(mm) α تباينًا كبيرًا حيث يتراوح من ٢٣٨١.٧٤ - إلى ٦١٦٦.٧١ ملم، بوسيط، متوسط وانحراف معياري ١٥٤.٣٠ملم،١٨٨.٨١ ملم و٨٦٦.٦٧ ملم على التوالي .

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

أما بالنسبة لمعامل $\beta_{1(mm/m)}$ يبلغ المتوسط ، الوسيط والانحراف المعياري ٠.٠٠ملم، ٠.٠٠ملم و٠.٠٤ ملم على التوالي. أما معامل $\beta_{2\ (mm)}$ فقد بلغ المتوسط ٣٨.٩٢ ملم، الوسيط بلغ ٥.٨٣ ملم والانحراف المعياري يبلغ١٥٣.٥٦ ملم . في حين معامل $\beta_{3\ (mm/k)}$ يظهر تباينًا كبيرًا مع متوسط -٠.٤٨ ملم ، الوسيط – ٠.٣٧ ملم وانحراف معياري ٢.٦٦ ملم. أما فيما يتعلق بقيم البواقي (residuals) أظهرت تباينًا كبيرًا من منطقة الى أخرى بمتوسط ٠.٢٩ ملم ، وسيط – ٠.٦١ ملم وانحراف معياري ٩.٨٨ ملم.

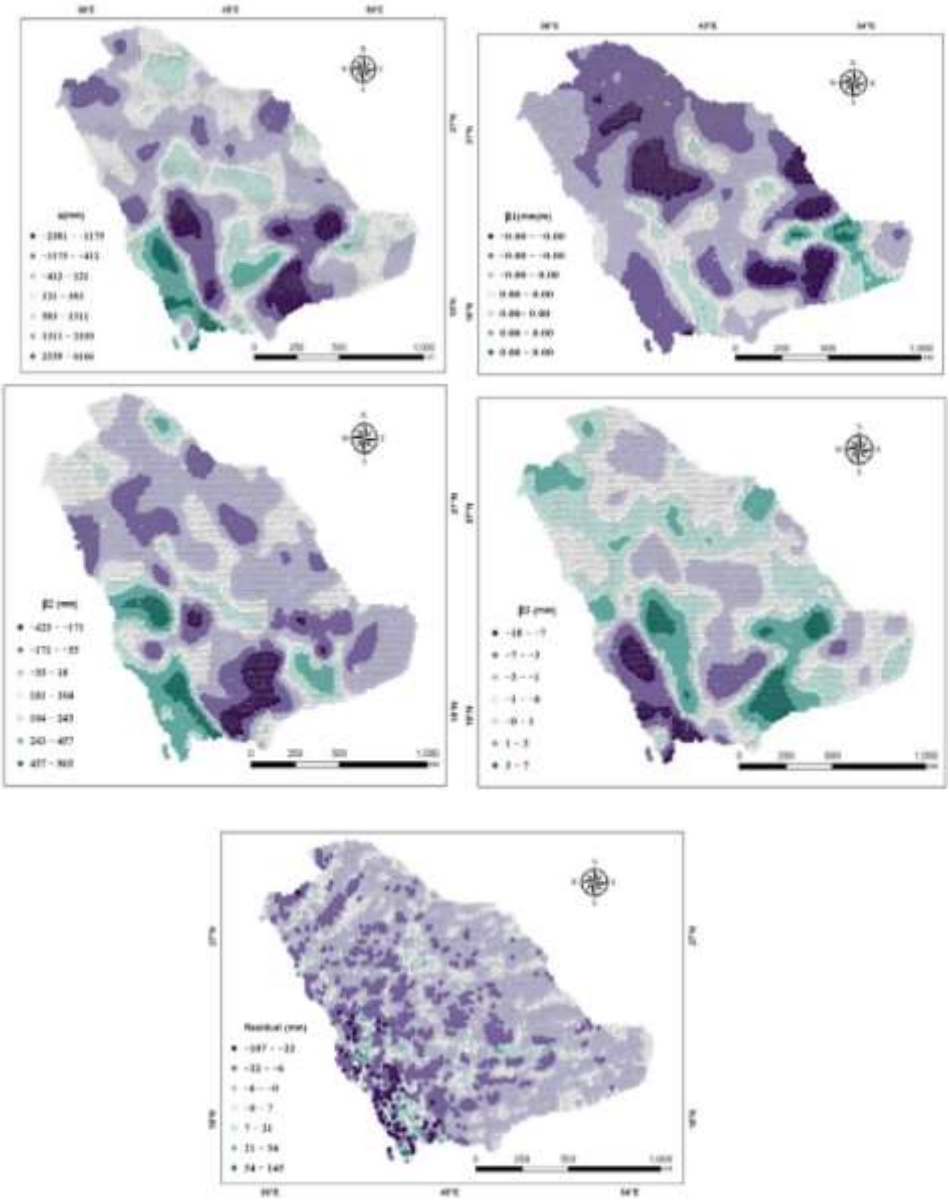
المعلم	أدنى قيمة (ملم)	أعلى قيمة (ملم)	المتوسط (ملم)	الوسيط(ملم)	الانحراف المعياري(ملم)
α (mm)	-2381.74	6166.71	188.81	154.30	**866.67**
β_1 (mm/m)	-0.13	0.20	0.00	0.00	**0.04**
β_2 (mm)	-425.58	803.51	38.92	5.83	**153.56**
β_3 (mm/k)	-18.81	7.57	-0.48	-0.37	**2.66**
Locl_R^2	0.03	0.93	0.50	0.49	**0.17**
Residual (mm)	-107.83	145.01	0.29	-0.61	**9.88**
R^2	٠.٩٤				
R^2 المعدل	**0.93**				

جدول رقم (٢) معاملات نموذج الانحدار المتعدد الموزون جغرافيا (GWR) لتقدير الأمطار السنوية من المتغيرات البيئية المستقلة لعام ٢٠٢١م

المصدر: نتائج نموذج GWR في هذه الدراسة باستخدام برنامج ArcGIS Pro.

وبناءا على نتائج نموذج GWR كما هو في جدول رقم (٢) ، وتفاوت واختلاف التوزيع الجغرافي لمعاملات نموذج GWR من منطقة لأخرى ، كما يتضح من شكل رقم (٣) ، وهو ما يؤكد على وجود عدم ثبات مكاني(non stationarity) في العلاقة بين المتغيرات البيئية المستقلة (مؤشر النبات الفارقي المعياري، وارتفاع سطح الأرض الرقمي ودرجة حرارة سطح الأرض) والمتغير التابع(الأمطار). ، وبالتالي دقة وموثوقية نتائج نموذج GWR.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

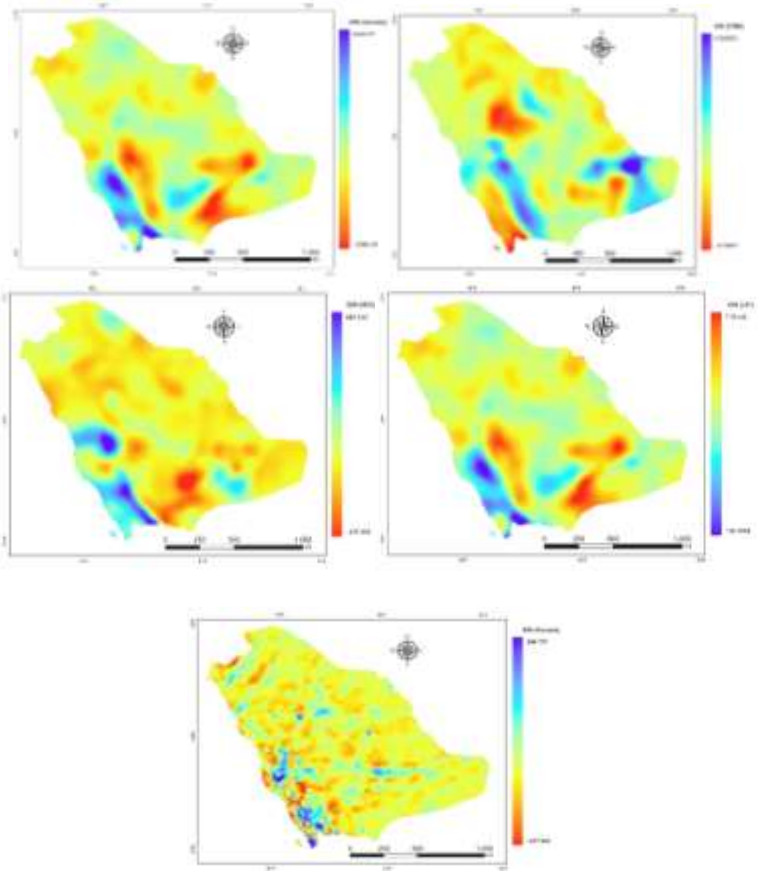


شكل (٣) التوزيع الجغرافي لمعاملات نموذج الانحدار الموزون جغرافياً

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

التقدير البيني المكاني لمعاملات نموذج GWR وبواقيه

تم استخدام تقنية التقدير البيني المكاني Spatial Interpolation ممثلة بأسلوب مقلوب مربع المسافة Inverse Square Distance، لتقدير قيم معاملات نموذج الانحدار المتعدد الموزون جغرافياً وبواقيه في مصفوفة مستمرة بوضوح مكاني ١كمx١كم لاستخدامها في عملية تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الأمطار من ١٠كمx١٠كم إلى ١كمx١كم.



شكل ٤ : التقدير البيني المكاني بأسلوب مقلوب مربع المسافة لقيم معاملات نموذجGWR .

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

ويتضح من الشكل رقم (٤) التباين الجغرافي الكبير في معاملات الانحدار وعدم ثبات العلاقة بين المتغيرات المستقلة والمتغير التابع ، وبالتالي ضرورة الاعتماد على نتائج نموذج GWR للسماح لهذه العلاقة بالتغير مكانياً. كما يبين جدول (رقم3) نتائج اختبار (Cross Validation) لقياس صحة ودقة أسلوب التقدير البيني المكاني (IDW) لمصفوفات معاملات نموذج الانحدار الموزون جغرافيا في هذه الدراسة ، حيث نجد أن نتائج متوسط الخطأ (ME) لمعاملات نموذج الانحدار الموزون جغرافيا قريبة من الصفر مما يدل على صحة النتائج فيما عدا معامل التقاطع $\alpha_{(mm)}$. كذلك نلاحظ أن نتائج الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ صغيرة ، وبالتالي أعطى أسلوب (IDW) تقديرات قليلة للخطأ ، كما أن الانحراف عن القيم الأصلية منخفضة جدا . وبالتالي دلت نتائج اختبار (Cross Validation) على دقة التقدير البيني المكاني ومدى اقتراب قيم التوقع من القيم المقاسة.

جدول رقم (٣) القيم الإحصائية لقياس دقة وصحة أسلوب التقدير البيني المكاني (IDW) لمعاملات الانحدار الموزون جغرافياً

المعامل	متوسط الخطأ (ME)	الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE)
$\alpha_{(mm)}$	٠.٨١	٥٨.٩٣
$\beta_{1(mm/m)}$	٠.٠٠	٠.٠٠
$\beta_{2\ (\mathrm{mm})}$	٠.٠١	١١.٥٦
$\beta_{3\ (mm/k)}$	٠.٠٠	٠.١٨
residual	٠.٥٧	٧.١١

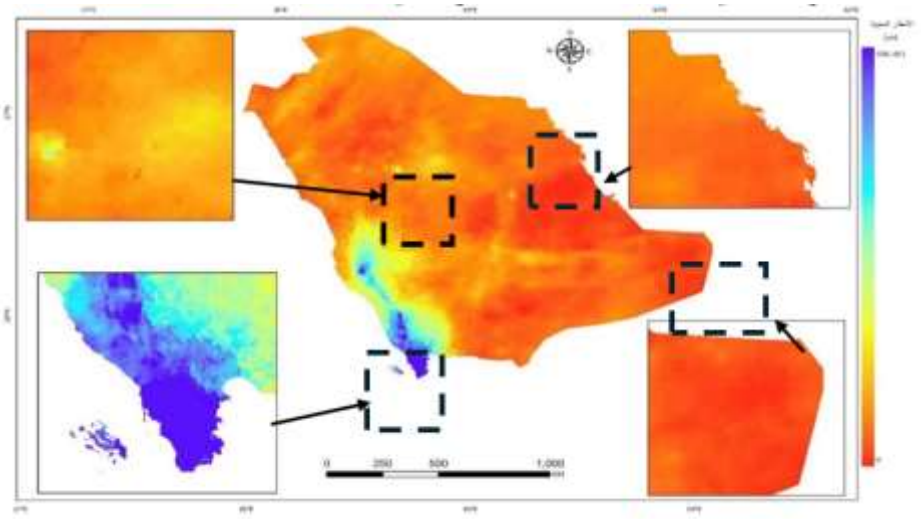
المصدر: نتائج Cross validation باستخدام برنامج ArcGIS Pro.

تحسين الوضوح المكاني لمنتجات الأمطار في المملكة العربية السعودية عند ١X١كم

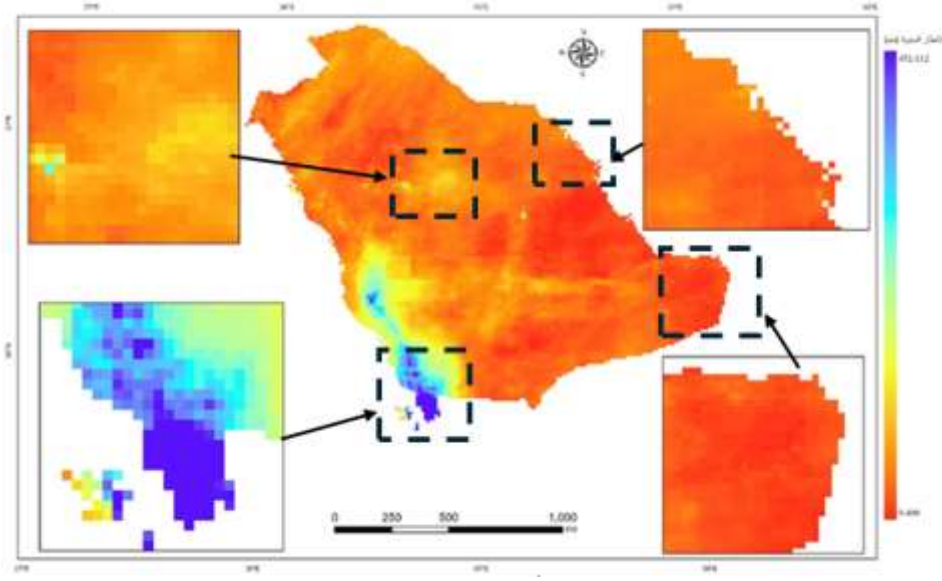
القيم المقدرة للأمطار عند وضوح مكاني ١كمx١كم ، تمت بتعويض مصفوفات معاملات الانحدار الموزون جغرافياً ، مصفوفة بواقي النموذج ومصفوفات المتغيرات المستقلة (DEM,NDVI,LST) كما في المعادلة التالية:

$$\mathcal{R}_{\mathrm{i}} = \alpha_{\mathrm{i}+} \beta_{1,\mathrm{i}} DEM_{\mathrm{i}} + \beta_{2,\mathrm{i}}\, NDVI_{\mathrm{i}} + \beta_{3,\mathrm{i}}\, LST_{\mathrm{i}} + \mathcal{E}_{\mathrm{i}}$$

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X



شكل (٥) التوزيع الجغرافي للأمطار السنوية عند وضوح مكاني ١كمx1كم لعام ٢٠٢١م



شكل(٦) التوزيع الجغرافي للأمطار السنوية عند وضوح مكاني ١٠كمx10كم لعام ٢٠٢١م

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

كما يتضح من شكل رقم (٥) و (٦) التوزيع الجغرافي للأمطار عند وضوح مكاني ١٠كمx١٠كم ووضوح مكاني ١كمx1كم ، التشابه العام في توزيع الامطار جغرافيا في المملكة العربية السعودية لعام ٢٠٢١م . مع زيادة في التفاصيل والتباين للأمطار على المستوى المحلي.

تقييم دقة النتائج

من أجل تقييم دقة وإمكانية تطبيق نموذج الانحدار الموزون جغرافيا لتحسين الوضوح المكاني لمنتجات الأمطار السنوية المشتقة من القمر الصناعي GPM في المملكة العربية السعودية عند ١كم، تم احتساب مقاييس الأداء كالجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) لتحديد مدى صحة النموذج، والذي يبلغ حوالي ١٣.٥٤، واستخدام مؤشر معامل التحديد R^2 والذي أظهر أن أداء نموذج GWR كان عالي بقيمة ٠.٩ ، مما يعطي ثقة كبيرة في تقديرات النموذج. بالإضافة الى مؤشر AIC (Akaike Information Criterion) والذي يقدم تقييم شامل لأداء النموذج وهو يبلغ ٧٣١٧٤.٥٩٣ ، مما يشير إلى جودة النموذج ومدى دقته . بالإضافة الى استخدام مقياس متوسط الخطأ (ME) لتحديد التحيز وهو يساوي ٠.٨٦ ملم، مما يشير الى عدم وجود تحيز يذكر في تقديرات النموذج المستخدم ، وبالتالي يمكن استنتاج أن التقديرات دقيقة بشكل عام.

الخاتمة

تهدف هذه الدراسة إلى حل مشكلة الوضوح المكاني المنخفض لمنتجات الأمطار المشتقة من الأقمار الصناعية، وصعوبة هذه المنتجات من تلبية تطبيقات المحاكاة الهيدرولوجية ودراسات الأرصاد الجوية والبيئية على المستوى المحلي. لذلك تم إجراء تحسين للوضوح المكاني لمنتجات الأمطار المشتقة من القمر الصناعي GPM في المملكة العربية السعودية لعام ٢٠٢١م ، من ١٠كيلومتر إلى كيلومتر واحد. مقارنة بالبيانات الأصلية ، مما لا يؤدي إلى تحسين الوضوح المكاني بشكل كبير فحسب ، بل يزيد أيضًا من دقة المنتجات ، وبالتالي توفير منتجات مستمرة مكانياً للأمطار في المملكة العربية السعودية بدقة مكانية عالية، مما يجعلها تمتع بإمكانية تطبيق أفضل.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

المصادر والمراجع

أولا: المراجع العربية

- الهيئة العامة للإحصاء، ٢٠٢٤، https://www.stats.gov.sa /
- المركز الوطني للأرصاد ، ٢٠٢٤، https://ncm.gov.sa/ar/Pages/default.aspx
- المطيري، مطيرة بنت خويتم هلال. (٢٠١٩). دراسة مناخية للأمطار في المملكة العربية السعودية. المجلة العلمية بكلية الآداب، ع٣٦, ج١ ، ٢٠٩ - ٢٣٥. مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1045238
- مصلح، مصلح معيض. (٢٠١٩). كميات الأمطار في المملكة العربية السعودية. رسائل جغرافية، الرسالة٤٧٥ ، ١ - ٤٠.

ثانياً: المراجع الأجنبية

- Almazroui, M. (2020). Rainfall trends and extremes in Saudi Arabia in recent decades. Atmosphere, 11(9), 964.
- Atkinson, P. M. (201٢). Downscaling in remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 22, 106-114.
- Bala, R., Prasad, R., & Yadav, V. P. (2020). Thermal sharpening of MODIS land surface temperature using statistical downscaling technique in urban areas. Theoretical and Applied Climatology, 141(3), 935-946.
- Bawadekj, A., Tonbol, K., Ghazouani, N., Becheikh, N., & Shaltout, M. (2022). Statistical downscaling of global climate projections over Tabuk city, northwest of Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences, 15(14), 1-16.
- Brown, C., Greene, A. M., Block, P. J., & Giannini, A. (2008). Review of downscaling methodologies for Africa climate applications.
- Chen, C., Zhao, S., Duan, Z., & Qin, Z. (2015). An improved spatial downscaling procedure for TRMM 3B43 precipitation

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

product using geographically weighted regression. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(9), 4592-4604.

- Chen, C., Chen, Q., Qin, B., Zhao, S., & Duan, Z. (2020). Comparison of different methods for spatial downscaling of GPM IMERG V06B satellite precipitation product over a typical arid to semi-arid area. Frontiers in Earth Science, 8, 536337.
- DAAC, L. (2015). The shuttle radar topography mission (SRTM) collection user guide. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls, SD, USA
- Garcia, R. (2021). Downscaling of GOES-16's Land Surface Temperature Product using Epitomes (Doctoral dissertation, The University of Texas at El Paso).
- Ghorbanpour, A. K., Hessels, T., Moghim, S., & Afshar, A. (2021). Comparison and assessment of spatial downscaling methods for enhancing the accuracy of satellite-based precipitation over Lake Urmia Basin. Journal of Hydrology, 596, 126055.
- He, K., Zhao, W., Brocca, L., & Quintana-Seguí, P. (2022). SMPD: A soil moisture-based precipitation downscaling method for high-resolution daily satellite precipitation estimation. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1-29.
- Hong, Y., Tang, G., Ma, Y., Huang, Q., Han, Z., Zeng, Z., ... & Guo, X. (2018). Remote Sensing Precipitation: Sensors, Retrievals, Validations, and Applications.
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., ... & Iguchi, T. (2014). The global

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

precipitation measurement mission. Bulletin of the American meteorological Society, 95(5), 701-722.

- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K. L., Joyce, R. J., Kidd, C., & Xie, P. (2020). Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG). In Satellite precipitation measurement (pp. 343-353). Springer, Cham.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. Journal of Forestry Research, 32(1), 1-6.
- Hussain, S., Elfeki, A. M., Chaabani, A., Yibrie, E. A., & Elhag, M. (2022). Spatio-temporal evaluation of remote sensing rainfall data of TRMM satellite over the Kingdom of Saudi Arabia. Theoretical and Applied Climatology, 150(1), 363-377.
- Isaya Ndossi, M., & Avdan, U. (2016). Application of open source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps
- Jin, Y., Ge, Y., Wang, J., Heuvelink, G. B., & Wang, L. (2018). Geographically weighted area-to-point regression kriging for spatial downscaling in remote sensing. Remote Sensing, 10(4), 579.
- Jing, W., Yang, Y., Yue, X., & Zhao, X. (2016). A spatial downscaling algorithm for satellite-based precipitation over the Tibetan plateau based on NDVI, DEM, and land surface temperature. Remote Sensing, 8(8), 655.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

- Keller, A. A., Garner, K. L., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2022). Downscaling approaches of climate change projections for watershed modeling: Review of theoretical and practical considerations. PLOS Water, 1(9).
- Kheimi, M. M., & Gutub, S. (2014). Assessment of remotely sensed precipitation products across the Saudi Arabia region. In 6th International conference on water resources and arid environments (Vol. 1617).
- Latombe, G., Burke, A., Vrac, M., Levavasseur, G., Dumas, C., Kageyama, M., & Ramstein, G. (2018). Comparison of spatial downscaling methods of general circulation model results to study climate variability during the Last Glacial Maximum. *Geoscientific Model Development*, *11*(7), 2563-2579.
- Luo, X., Chen, Y., Wang, Z., Li, H., & Peng, Y. (2021). Spatial downscaling of MODIS land surface temperature based on a geographically and temporally weighted autoregressive model. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 7637-7653.
- Mahmoud, M. (2017). Evaluation of Global Precipitation Measurement (GPM) Satellite Products Over Saudi Arabia (Doctoral dissertation, King Fahd University of Petroleum & Mineralsl).
- Mohammed, S. A., Hamouda, M. A., Mahmoud, M. T., & Mohamed, M. M. (2020). Performance of GPM-IMERG precipitation products under diverse topographical features and multiple-intensity rainfall in an arid region. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1-27.

ISSN: 2537-0839 **eISSN : 2537-088X**

- Mukherjee, S., Joshi, P. K., & Garg, R. D. (2017). Downscaling of Coarse Resolution Satellite Remote Sensing Thermal Data. In Environment and Earth Observation (pp. 35-55). Springer, Cham.
- Park, N. W., Kim, Y., & Kwak, G. H. (2019). An overview of theoretical and practical issues in spatial downscaling of coarse resolution satellite-derived products. Korean Journal of Remote Sensing, 35(4), 589-607.
- Sharifi, E., Saghafian, B., & Steinacker, R. (2019). Downscaling satellite precipitation estimates with multiple linear regression, artificial neural networks, and spline interpolation techniques. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(2), 789-805.
- Shi, Y., & Song, L. (2015). Spatial downscaling of monthly TRMM precipitation based on EVI and other geospatial variables over the Tibetan Plateau from 2001 to 2012. Mountain Research and Development, 35(2), 180-194.
- Sun, X., Wang, J., Zhang, L., Ji, C., Zhang, W., & Li, W. (2022). Spatial Downscaling Model Combined with the Geographically Weighted Regression and Multifractal Models for Monthly GPM/IMERG Precipitation in Hubei Province, China. Atmosphere, 13(3), 476.
- Tasyurek, M., & Celik, M. (2020). RNN-GWR: A geographically weighted regression approach for frequently updated data. Neurocomputing, 399, 258-270.
- The National Aeronautics and Space Administration.(202٣). https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/main/index.html.

ISSN: 2537-0839 eISSN : 2537-088X

- Wang, Q., Shi, W., Atkinson, P. M., & Zhao, Y. (2015). Downscaling MODIS images with area-to-point regression kriging. Remote Sensing of Environment, 166, 191-204.
- Wang, N., Yu, J., Zhu, L., Wang, Y., & He, Z. (202٠). Spatial Downscaling of Remote Sensing Precipitation Data in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Journal of Computer and Communications, 9(6), 191-202.
- Wu, J., Zhong, B., Tian, S., Yang, A., & Wu, J. (2019). Downscaling of urban land surface temperature based on multi-factor geographically weighted regression. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(8), 2897-2911.
- Xie, S., Liu, Y., & Yao, F. (2020). Spatial downscaling of TRMM precipitation using an optimal regression model with NDVI in inner Mongolia, China. Water Resources, 47(6), 1054-10.

ISSN: 2537-0839 **eISSN : 2537-088X**