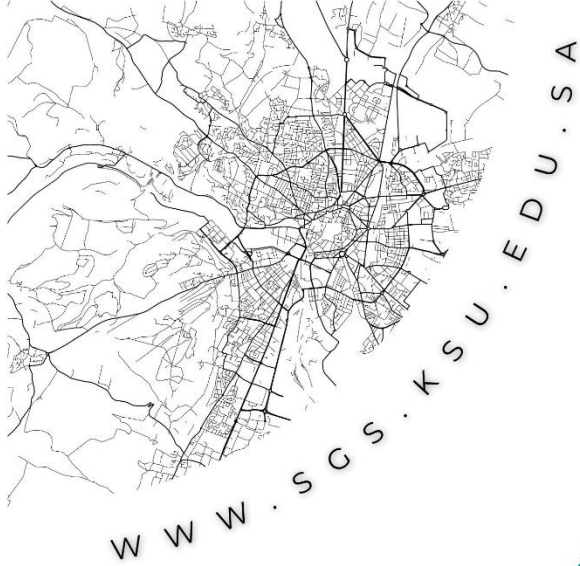
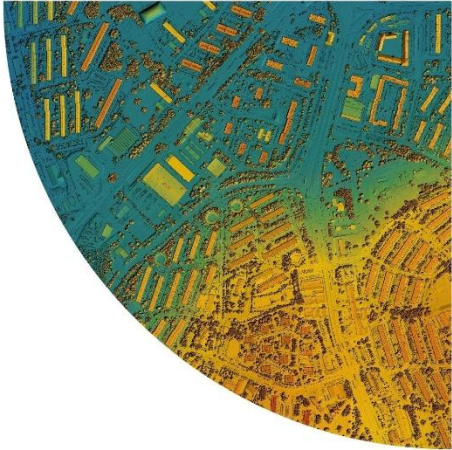


المجلة العربية لنظم المعلومات الجغرافية

المجلد (18) العدد (2)





أعضاء مجلس إدارة الجمعية الجغرافية السعودية

رئيسا	د. علي بن عبدالله الدوسري
نائب رئيس	أ. محمد بن أحمد الراشد
أمين المال	د. فهد بن عبد العزيز المطلق
أمين المجلس	د. سلطان بن عياد الحربي
عضوا	د. عنبرة بنت خميس السعود
عضوا	د. حمود بن هادي العتزي
عضوا	أ.د. عواطف بنت شجاع الشريف
عضوا	أ.د. أمل بنت حسين آل مشيط
عضوا	د. مها بنت عبدالله الضبيحي

رقم الإيداع ٧٨٤٩ - ١٤٤٣ هـ

ردم ٩٢٥٤ - ١٦٥٨





المجلة العربية لتنظم المعلومات الجغرافية

مجلة محكمة نصف سنوية

المجلد الثامن عشر العدد (٢)

محرم ١٤٤٨ هـ / يونيو ٢٠٢٦ م

doi: 10.33948/KSU-sgsajgis-18-2

تصدر عن الجمعية الجغرافية السعودية

هيئة التحرير

رئيس هيئة التحرير	د. فهد بن عبدالعزيز المطلق
عضو	أ.د. زياد مفضي مخامرة
عضو	أ.د. حسام البليسي
عضو	د. عادل معتمد عبد الحميد
عضو	د. صباح بنت صالح الجنيد
مدير التحرير	رندا بنت عبدالله الحربي

الهيئة الاستشارية

رئيس شركة إزري - الولايات المتحدة الأمريكية	السيد جاك دانجرموند
مركز دراسات الإحصاء - بريطانيا	أ.د. مايكل باتي
رئيس جامعة الزقازيق - جمهورية مصر العربية	أ.د. خالد علي الدرندي
رئيس الجمعية الجغرافية المصرية - جمهورية مصر	أ.د. محمد زكي السديمي
جامعة الفيوم - جمهورية مصر العربية	أ.د. محمد الخزامي عزيز

المراسلات

الرياض ١١٤٥١	ص.ب. ٢٤٥٦
فاكس ٠٠٩٦٦١١٤٦٧٧٣٢	هاتف ٠٠٩٦٦١١٤٦٧٨٧٩٨
GISJournal@ksu.edu.sa	بريد الكتروني

تعبر البحوث والدراسات التي تنشر في المجلة العربية لنظم المعلومات الجغرافية عن آراء
كاتبها، ولا تعبر بالضرورة عن وجهة نظر هيئة التحرير أو الجمعية الجغرافية السعودية

تصدر المجلة العربية لتنظيم المعلومات الجغرافية عن الجمعية الجغرافية السعودية، وهي دورية علمية محكمة تصدر بواقع عشرين سنوياً، مع إمكانية إصدار أعداد خاصة ترتبط بالمؤتمرات أو المناسبات العلمية التخصصية.

الرؤية

الريادة في نشر البحوث العلمية في العلوم الجغرافية.

الرسالة

التميز في نشر ودعم الدراسات الجغرافية التي تتميز بالأصالة والإبداع والجودة العالية وتخدم المجتمع وتدعم الإبداع الفكري محلياً وإقليمياً ودولياً ضمن معايير عالية الجودة.

الأهداف

- أن تكون المجلة مرجعاً علمياً للباحثين في علم المعلومات الجغرافية والتقنيات الجيومكانية.
- تلبية حاجة الباحثين في العلوم الجيومكانية لنشر نتائجهم العلمي المحكم.
- تطوير المعرفة التقنية والجغرافية والإسهام في حل مشكلات المجتمع وتنميته.

مجالات النشر

تنشر المجلة البحوث الأصلية في مجال النظم الجغرافية والتقنيات ذات العلاقة، ويشمل ذلك مجالات: نظم المعلومات الجغرافية والكارتوجرافيا، والمساحة، والاستشعار عن بعد، ونظم التوقيع الأرضي، والنمذجة والتطبيقات الجغرافية التي تستخدم كافة النظم والتقنيات الجيومكانية داخل المملكة وفي الوطن العربي.

أولاً: سياسة المجلة

١. تقدم طلبات النشر من خلال المنصة الإلكترونية للمجلة العربية لتنظيم المعلومات الجغرافية، ولا تقبل أية بحوث ترد عبر وسائل أخرى سواء كانت ورقية أم إلكترونية.
٢. رسوم طلب النشر (١٠٠٠ ريال ولأعضاء الجمعية الجغرافية السعودية ٧٠٠ ريال) يدفع مقدماً منها ٦٠٪ عند فترة التحكيم والباقي بعد صدور قرار قبول البحث (قبل نشر العدد).
٣. يُعد إرسال الباحث بحثه تعهداً من الباحث/الباحثة بأن البحث لم يسبق نشره، وأنه لم يقدم ولن يقدم للنشر في جهة أخرى حتى تنتهي إجراءات تحكيمه في المجلة، وإذا تبين أن البحث أرسل إلى وعاء نشر آخر خلال فترة تحكيمه لدى مجلة الآداب، فللمجلة أن تتخذ بحقه الإجراءات المناسبة.
٤. تخضع هيئة تحرير المجلة للتحكيم أولي؛ للتأكد من الالتزام بمعايير النشر بالمجلة، تردُّ البحوث التي لم تلتزم بمعايير النشر إلى أصحابها لإخضاعها لقواعد النشر بالمجلة.
٥. تلتزم المجلة بالسرية الكاملة فيما يتعلق بأسماء الباحثين والمحكمين وكل ما يتعلق بالتحكيم.
٦. ترشح هيئة تحرير المجلة ثلاثة محكمين لكل بحث، أحدهم يكون مرجحاً عند الحاجة إليه.
٧. يُشترط في المحكمين أن يكونوا من ذوي الاختصاص والخبرة ويتمتعون بكفاءة علمية عالية. مع مراعاة التنوع الجغرافي.
٨. معايير تحكيم البحوث تدور حول: القيمة العلمية للبحث، وأصالته، ومنهجه، وتوافق هذا المنهج مع موضوع البحث، وجودة الأسلوب والصياغة، وارتباط موضوع البحث بتخصص الباحث الرئيس، والالتزام بقواعد النشر بالمجلة، والتقيد بنسب الاقتباس المحددة في البحث العلمي، والتوصل إلى نتائج ذات قيمة في التخصص العلمي، والبعد عمّا يخالف الأمانة العلمية.
٩. الوقت المتاح للتحكيم هو خمسة عشر يوماً.
١٠. يلتزم الباحث بإجراء التعديلات المطلوبة في مدة لا تتجاوز خمسة عشر يوماً، وإذا تجاوزها تعدُّ المجلة هذا رغبة من الباحث في عدم نشر بحثه، إلا إذا قدم عذراً مقنعاً تقبله هيئة التحرير.
١١. يجوز للباحث ألا ينفذ بعض ما يراه غير متفق مع بحثه من تعديلات، بشرط أن يقدم ما يقنع المحكمين بسلامة موقفه العلمي.
١٢. للمجلة الحق في تعديل الصياغة اللغوية والأسلوب وتصويب ما يظهر من أخطاء لغوية دون الرجوع إلى الباحث.
١٣. إذا رفضت المجلة نشر البحث؛ يحقُّ للباحث الحصول على ملاحظات المحكمين مع الاحتفاظ بسرية معلوماتهم.
١٤. لا يجوز للباحث أن يتقدم للمجلة مرة أخرى بالبحث المرفوض، إلا إذا عدّله تعديلاً جذرياً، مع إرفاق نسخة من البحث المرفوض؛ للتأكد من ذلك.
١٥. للباحث الحق في طلب إعادة النظر في قرار الرفض إذا قدّم أسباباً موضوعية تقنع هيئة التحرير.
١٦. يتحمل الباحث مسؤولية التحقق من بريده الإلكتروني المرتبط بالمنصة وحسابه الشخصي بالمنصة لمتابعة أي طلبات تعديل أو قرارات صادرة من هيئة التحرير لضمان سرعة الإنجاز.

ثانياً: إجراءات النشر:

١. تقوم المجلة بعمل فحص أولي للأبحاث لتقرير صلاحيتها لاستكمال إجراءات تحكيمها أو رفض التحكيم.
٢. تخضع جميع الأبحاث بعد إجازتها من هيئة التحرير للتحكيم العلمي على نحو سري مزدوج، لا يعرف فيه المحكمون اسم الباحث، ولا يعرف الباحث أسماء المحكمين (Double-Blind Review).

٣. يرسل البحث إلى اثنين من المحكمين المختصين في موضوعه، فإن اختلف رأياهما أرسل إلى محكم ثالث، ويكون رأيه حاسماً.
٤. الأبحاث التي يقترح المحكمون إجراء تعديلات عليها تعاد لأصحابها مرة واحدة فقط لإجراء التعديلات، على ألا يتأخر الباحث في إعادة البحث للمجلة عن أسبوعين، ثم تعاد الأبحاث للمجلة لإرسالها للمحكمين مرة أخرى للتأكد من إجراء التعديلات، والتوصية بما يروونه من قبول للبحث أو رفض له.
٥. عند قبول البحث للنشر لا يجوز نشره في أي منفذ نشر آخر ورقي أو إلكتروني دون موافقة مجلس هيئة تحرير المجلة، والحصول على اشعار موافقة من رئيس التحرير.
٦. يتم إبلاغ الباحثين بنتائج التحكيم وقرارات القبول أو الرفض عبر المنصة الإلكترونية للمجلة، والتي تتيح للباحث الاطلاع على كافة مراحل سير العمل والملاحظات العلمية للمحكمين في أي وقت.

ثالثاً: شروط النشر:

١. يُراعى في البحوث التي تتولى "المجلة العربية لتنظيم المعلومات الجغرافية" نشرها الأصالة العلمية، وصحة الإخراج العلمي، وسلامة اللغة؛ ويعد تقديم البحث للمجلة منحها حق الطبع والنشر.
٢. يرفق الباحث التقارير التالية (بملفات منفصلة) عند تقديم البحث للنشر:
 - أ. تقرير نسبة الانتحال من أحد البرامج المعتمدة مثل: (Turnitin, PlagScan, iThenticate) على أن تكون النسبة المقبولة أقل من ١٥٪، غير أن مجرد الدخول ضمن هذه النسبة لا يعني بالضرورة قبول البحث، إذ تحتفظ المجلة بحقها في تفسير النسبة وتقييمها.
 - ب. تقرير خلو البحث من المحتوى المولد باستخدام الذكاء الاصطناعي التوليدي باستخدام أحد البرامج المعتمدة مثل: (Turnitin, GPTZero, Originality).
٣. لا يُذكر اسم الباحث، أو الباحثين، في متن البحث أو هوامشه أو قائمة مراجعه، صراحة، أو بأية إشارة تكشف عن هويته، أو هوياتهم، وتُستخدم بدلاً من ذلك كلمة "الباحث" أو "الباحثين" أو نحوهم.
٤. ان لا يتراوح طول البحث ما بين (١٥) إلى (٣٢) صفحة، بما لا يتجاوز (٨٠٠٠) كلمة. ويشمل هذا الحد كافة محتويات البحث بما في ذلك الجداول، الأشكال، والمراجع.
٥. الخط المعتمد في المجلة هو Sakkal Majalla بحجم ١٤ للنص باللغة العربية و Times New Roman بحجم ١٢ للنص باللغة الإنجليزية، وينبغي ترك فراغ سطر واحد بين كل سطر وآخر في كامل البحث، مع الأخذ في الاعتبار أن لا تقل الهوامش اليمنى واليسرى عن ٣,٥ سم لكل منهما.
٦. تعتمد المجلة نظام توثيق المراجع وفقاً لأسلوب جمعية علم النفس الأمريكية (APA Style- 7th Edition)، وذلك وفق الضوابط الآتية:

أولاً: التوثيق داخل المتن:

- يتم الإشارة إلى المصدر بين قوسين يشتملان على: (اسم عائلة المؤلف، سنة النشر)
- في حال تكرار نفس المؤلف في مراجع مختلفة، يذكر الاسم ثم سنة المرجع المعني.

ثانياً: قائمة المراجع:

ترتب المراجع في نهاية البحث هجائياً وفقاً لاسم عائلة المؤلف، وتُقسم إلى قائمتين:

- قائمة المراجع العربية: توضع بعد المتن مباشرة، مرتبة هجائياً حسب اسم عائلة المؤلف الأول.
- قائمة المراجع الأجنبية: تلي القائمة العربية، وتتضمن المراجع الأجنبية الأصلية بالإضافة إلى بالإضافة إلى المراجع العربية التي تمت "رومنتها" وترتب هجائياً باللغة الإنجليزية

ثالثاً: تنسيق المراجع:

- الكتب: اسم عائلة المؤلف، الأسماء الأولى. (سنة النشر). *عنوان الكتاب بالخط المائل*. رقم الطبعة (إن وجد)، الناشر، مدينة النشر.
- الدوريات (المجلات العلمية): اسم عائلة المؤلف، الأسماء الأولى. (سنة النشر). *عنوان المقالة / اسم الدورية بالخط المائل*، المجلد (العدد)، أرقام الصفحات.
- الكتب المحررة: اسم عائلة مؤلف الفصل، الأسماء الأولى. (سنة النشر). *عنوان الفصل*. في: اسم عائلة المحرر (محرر)، *عنوان الكتاب*. الناشر، مدينة النشر.
- الرسائل الجامعية (غير المنشورة): اسم عائلة المؤلف، الأسماء الأولى. (سنة الحصول على الدرجة). *عنوان الرسالة بالخط المائل*. [رسالة ماجستير/دكتوراه غير منشورة]. اسم الجامعة، المدينة.

رابعاً: آلية رومنة المراجع العربية:

يلتزم الباحث برومنة (نقل الحروف العربية إلى لاتينية) لجميع المقالات العربية الواردة في القائمة، مع الإبقاء عليها في القائمة العربية أيضاً، وفقاً للنظام الآتي:

- (أ) في حال توفر بيانات إنجليزية: إذا كانت بيانات المقالة (المؤلف، العنوان، الدورية) متوفرة باللغة الإنجليزية في أصل صدرها، تُنقل كما هي في القائمة الأجنبية مع إضافة عبارة (in Arabic) بعد اسم الدورية.
- (ب) في حال عدم توفر بيانات إنجليزية:
 - يتم رومنة أسماء المؤلفين (نقل صوتي للحروف العربية إلى اللاتينية).
 - يُكتب عنوان المقالة بالإنجليزية (إذا كان متوفراً في الأصل) أو يُترجم بدقة (إذا لم يتوفر).
 - يُكتب اسم الدورية بالإنجليزية، مع إضافة عبارة (in Arabic) في نهايته.

رابعاً: ترتيب البحث:

العنوان: أدخل عنواناً موجزاً (لا تزيد عن ١٥ كلمة)، وغني بالمعلومات، مع تجنب الاختصارات والصيغ الرياضية حيثما كان ذلك ممكناً.

أسماء المؤلفين و انتماهم: اذكر أسماء المؤلفين بوضوح. اعرض انتماءات المؤلفين في الحاشية السفلية مع الترقيم.

الملخص (Abstract): يجب أن يشتمل كل بحث على معلومات ملخصة من ١٠٠ إلى ٢٥٠ كلمة بخط من حجم ١٠ نقطة.

وينبغي أن يشرح الملخص المعلومات المهمة ذات الصلة بهدف الورقة، والأسلوب والنتائج، والاستنتاجات. وينبغي تجنب

الاختصارات غير القياسية أو غير المألوفة.

كلمات مفتاحية (Keywords): ينبغي ادراج كلمات مفتاحية تشير إلى جوهر موضوع البحث، والقضايا الرئيسية التي تناولها، وذلك بعد الملخص في نسخته العربية والإنجليزية، ولا يتجاوز عددها ست كلمات.

مقدمة: تضم المقدمة أهداف العمل، مع تقديم خلفية كافية، وتجنب تضمينها دراسة مفصلة للأدبيات أو ملخصاً للنتائج.

الدراسات السابقة: عرض موجز لأحدث الدراسات ذات الصلة وأبرز ما توصلت إليه.

المنهجية: وصف دقيق وواضح لتصميم البحث ومنهجيته المتبعة.

النتائج والمناقشة: تُعرض النتائج بوضوح واختصار، وتتم مناقشة دلالاتها وأهميتها. يمكن دمجها في قسم واحد أو فصلهما. المناقشة

الخاتمة: تضم نقاط واضحة تبرز أهم ما توصلت إليه الدراسة مع تقديم توصيات محددة ويفضل أن لا يفرد لها عنوان خاص.

الشكر والتقدير: (اختياري) يُخصص لذكر الجهات الداعمة أو المنح، ويُوضع قبل قائمة المراجع، في قسم منفصل.

المراجع: التأكد من أن كل مرجع ورد في النص موجود أيضاً في قائمة المراجع (والعكس بالعكس). وينبغي أن تتبع المراجع المذكورة هنا النظام المتبع من الجمعية الجغرافية السعودية الذي سبق شرحه في المادة ٦ من قواعد النشر.

الاستشهادات في النص: التأكد من أن كل مرجع تم الاقتباس منه في النص موجود أيضاً في قائمة المراجع (والعكس بالعكس).

قائمة المراجع: المراجع يجب أن تكون مرتبة أبجدياً، ثم تفرز بعد ذلك زمنياً إذا لزم الأمر. وإذا وجد أكثر من مرجع واحد من المؤلف نفسه في السنة نفسها فلا بد من تحديدها بالحروف "أ"، "ب"، "ج"، "خ"، والتي توضع بعد عام النشر.

الملاحق: ينبغي أن توضع الملاحق في نهاية البحث، بعد قائمة المراجع. وفي الدراسات التي تتضمن تطوير معايير للقياس، ينبغي التأكيد على وضع أداة القياس في النص الرئيسي أو في الملاحق.

قائمة المحتويات

الصفحة	المؤلف	عنوان البحث
١	د. ابراهيم عبدالله درويش	الملاءمة المناخية للسياحة المستدامة في المحافظات الساحلية شمال غرب المملكة العربية السعودية بتطبيق مؤشر المناخ السياحي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية
٣١	د. عالية علي الاحمري د. سلافة حاج الصافي	رصد تلوث الهواء عبر غاز ثاني أكسيد الكبريت بمحافظة ينبع باستخدام التقنيات الجيومكانية
٦٩	خالد بن حامد الحربي د. علي بن سعيد الغامدي	تحليل التغيرات الزمانية والمكانية لخط الشاطئ واتصالها المناخي المحلي لمحافظة امالج، المملكة العربية السعودية
٩٨	نوره بنت إبراهيم الحصيبي د. أماني بنت محمد الجبني	التحليل المكاني-الزماني للمها العربي في محمية الإمام عبدالعزیز بن محمد الملكية باستخدام أطواق التتبع

كلمة التحرير

يضم هذا العدد مجموعة من البحوث التطبيقية عن المملكة العربية السعودية، فنجد الدراسة الأولى هدفت إلى الكشف عن دور منظمات القطاع غير الربحي في تفعيل التنمية المستدامة بمدينة الرياض، واتخذت من تناول الجغرافي المستقل إطاراً منهجياً لها؛ حيث استهدفت التعرف على حجم هذه المنظمات ونمط توزيعها المكاني باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS). وقد سعت الدراسة إلى تقييم الكفاءة المكانية لهذه المنظمات لعام (٢٠١٩م)، مع تحليل مدى مواءمة نموها مع التزايد السكاني المطرد، وصولاً إلى استقصاء العوامل الجغرافية المؤثرة في تشكيل أنماط توزيعها، بما يسهم في تجويد التخطيط المستقبلي لخدمات القطاع غير الربحي وتطوير كفاءته التنموية في المدينة.

أما الدراسة الثانية فقد سعت إلى رصد وتحليل تأثير زحف الكثبان الرملية على الطريق الرابط بين (الحيانية وتربة) في منطقة حائل، بوصفه أحد المحاور الحيوية المتأثرة بمخاطر الرمال المتحركة. وقد اعتمدت الدراسة منهجاً تكاملياً يجمع بين التحليل المكاني والإحصائي، عبر توظيف تقنيات الاستشعار عن بُعد وصور الأقمار الصناعية (Landsat) و(Sentinel-2)، مع تطبيق مؤشر التربة العارية (BSI) وتحليل بيانات الرياح (ERA5). ونجحت الدراسة في إنتاج خرائط مكانية تفاعلية توضح درجات التعرض ومناطق الضغط الأكبر على الطريق، مستخدمة نموذج الانحدار الذاتي (AR) للتنبؤ بالتوجهات المستقبلية للزحف؛ مما يقدم لمخططي الطرق وصنّاع القرار مؤشرات دقيقة لدعم التخطيط المكاني وتعزيز السلامة المرورية.

وجاءت الدراسة الثالثة التي ركزت على تحليل التوسع العمراني في مدينة خميس مشيط، بهدف تقييم الملاءمة المكانية للنمو المستقبلي للمدينة. وقد وظفت الدراسة أسلوب التحليل الهرمي (AHP) ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (ArcGIS)، من خلال معالجة حزمة من المعايير الطبوغرافية والبشرية. واستخدمت الدراسة أداة الجبر الخرائطي (Raster Calculator) لتحديد الأوزان النسبية لكل عامل، مما أسفر عن خريطة نهائية تصنف درجات الملاءمة المكانية للتوسع العمراني؛ حيث خلصت النتائج إلى تحديد مساحات الملاءمة المرتفعة التي بلغت (٢٦٦,٦ كم²)، مع استبعاد المناطق غير الملائمة التي تشكل نحو نصف مساحة المدينة. وتقدم هذه المخرجات رؤية استراتيجية لدعم صنّاع القرار في توجيه النمو العمراني نحو المناطق الأكثر أماناً واستدامة.

واختتمت هذه السلسلة بالدراسة الرابعة لتقييم مدى العدالة المكانية في توزيع مراكز الرعاية الصحية الأولية في المدينة المنورة، وذلك عبر توظيف أدوات التحليل المكاني الكمي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية ولغة البرمجة (R). وقد اعتمدت الدراسة على حزمة من المؤشرات الإحصائية والمكانية المتنوعة، مثل مؤشر جيني ومنحنى لورنز ونماذج الانحدار الجغرافي الموزون (GWR)، للكشف

عن التفاوتات في الوصول للخدمة. وتوصلت النتائج إلى وجود تباين مكاني ملحوظ وعجز فعلي في التغطية الصحية داخل أكثر من (٦٠) حيّاً سكنيّاً، كما كشفت عن عدم توازن التوزيع الحالي مع الواقع الديموغرافي، لا سيما في الأحياء الطرفية؛ مما يستوجب إعادة تخطيط الخدمات الصحية على أسس كمية عادلة لتحقيق مبدأ العدالة في الوصول للرعاية الصحية.

وفي الختام، نأمل أن تسهم الموضوعات المتنوعة لهذا العدد في إثراء الذخيرة العلمية والثقافية للمتخصصين والمهتمين بنظم المعلومات الجغرافية. ويسعد هيئة التحرير أن تقدم خالص شكرها للباحثين والمراسلين الذين يتواصلون دوماً مع مجلتهم، سواءً بمدّها بالبحوث العلمية الرصينة أو الأخبار ذات العلاقة أو المراجعات المفيدة التي تبقى المتخصصين والمهتمين على اطلاع مستمر بالجديد في مجالات اهتمام المجلة. وتفيد هيئة التحرير بأن الجمعية الجغرافية السعودية قامت بدعم نشر جميع أبحاث هذا العدد من المجلة.

هيئة التحرير

الملاءمة المناخية للسياحة المستدامة في المحافظات الساحلية شمال غرب المملكة العربية السعودية بتطبيق مؤشر المناخ السياحي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية

د. ابراهيم عبدالله قائد درويش¹

المستخلص:

تسعى الدراسة الى تقييم الملاءمة الحرارية بصورة خاصة والمناخية بشكل عام لممارسة النشاط السياحي في محافظات شمال البحر الأحمر بالمملكة العربية السعودية، وذلك من خلال تطبيق مؤشر المناخ السياحي. وتدرجت منهجية الدراسة من القيام بجمع بيانات عناصر المناخ اللازمة لتطبيق مؤشر مناخ السياحة كالحرارة العظمى والمعدلة والرطوبة النسبية الدنيا والمعدلة وكمية الأمطار وعدد ساعات سطوع الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح لعدة أقمار صناعية من موقع ناسا بيانات مناخ الأرض. واستخدمت الدراسة نظم المعلومات الجغرافية لمعالجة البيانات واشتقاق خرائط عناصر المناخ السياحي، واعتمدت على الحرارة والرطوبة النسبية في تحديد الراحة الحرارية على مستويي النهار واليوم، وبالاعتماد على طبقتي الراحة الحرارية والأمطار والإشعاع والرياح طبقت معادلة مؤشر المناخ السياحي لتحديد نطاقات الراحة المناخية للسياحة.

أكدت نتائج الدراسة تراوح مؤشر الحرارة الفاعلة في النهار بين ٢٢,١ - ٢٩,٥° م، وعليه فقد توزعت نطاقات الراحة النهارية بين راحة معتدلة الى عالية جدا، بمعدل مكاني للراحة على مستوى منطقة الدراسة ٢٦,٤° م، وهذا يؤكد وقوع غالبيتها ضمن راحة حرارية عالية. كما تراوحت الحرارة الفاعلة اليومية بين ١٥,٦ - ٢٤,٨° م، لتتوزع نطاقات الراحة اليومية بين راحة مقبولة الى عالية جدا، وبلغ المعدل المكاني للراحة الحرارية اليومية ٢٠,٧° م، مما يعني ان غالبية محافظات ينبع وأملج والوجه وضباء تقع ضمن راحة حرارية عالية جدا. وتراوحت نسب مؤشر المناخ السياحي بين ٧٨٪ في المناطق التي تتصف بملاءمة مناخية جيد جدا للأنشطة السياحية، الى ٩٤٪ في المناطق التي تتسم بوجود مناخ مثالي للسياحة، بمعدل على المستوى المكاني لمنطقة الدراسة ٨٨,٥٪، وتعكس هذه النسبة ان غالبية منطقة الدراسة تتصف بملاءمة مناخية ممتازة لممارسة الأنشطة السياحية.

كلمات مفتاحية:

نظم المعلومات الجغرافية، الراحة الحرارية، الراحة المناخية، مؤشر المناخ السياحي، محافظات شمال البحر الأحمر.

¹ دكتوراه جغرافيا ، كلية الآداب، قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، جامعة اب، اليمن

مقدمة:

يؤثر المناخ على جداول الرحلات السياحية لوكالات السفر والسياح (Lin & Matzarakis, 2011, p. 495). وأكدت عدة دراسات أن الظروف الجوية والمناخية تؤثر على اختيار الوجهة السياحية، وعلى التجربة السياحية، وموسمية السياحة (Bigano, et al, 2006, 177). ويرجع ذلك إلى أن معايير الأرصاد الجوية تؤثر على راحة وصحة السائح (Lin & Matzarakis, 2008, p. 283). فالسائح يستجيب لتأثير عناصر المناخ كحرارة الهواء والرطوبة والرياح والأمطار وأشعة الشمس.

ويعتبر المناخ من أكثر المعايير شيوعاً في عملية صنع قرار السياحة (Hamilton & Tol, 2007, p. 173). وتتسق أنماط الأنشطة السياحية مع تباين الانماط المناخية مكانياً وزمنياً (Farajzadeh & Matzarakis, 2009, p. 546). ويعتبر المناخ الملائم بالنسبة للسياحة مورداً مهماً، ومن هنا تأتي أهمية تقييم الظروف المناخية السياحية (Yu, et al, 2021, p. 743).

وعلى مدى العقود الماضية تم تقييم مدى ملاءمة مناخ الوجهة للسياحة باستخدام المؤشرات المناخية (Yu, et al, 2021, p. 742). كمؤشر المناخ للسياحة، وتعتبر منهجية مؤشر المناخ السياحي طريقة مهمة لتوضيح الطبيعة المتعددة الأوجه للظروف المناخية من خلال دمج العديد من العناصر المناخية المرتبطة بالسياحة، لأنها تعتمد في الغالب على الخصائص الحيوية لراحة الإنسان. ويعد مؤشر مناخ السياحة (TCI) الذي طوره (Mieczkowski) المؤشر الأكثر تطبيقاً على نطاق واسع لتقييم مدى ملاءمة المناخ للأنشطة السياحية العامة عبر مجموعة من النطاقات الجغرافية (Mieczkowski, 1985, p.222).

ومن مزايا تطبيق مؤشر (TCI) يعتبر مؤشراً شاملاً، لأنه يشمل جميع جوانب المناخ التي تعتبر ذات صلة بالسياحة، وتم تصميمه لاستخدام بيانات الطقس المتاحة بسهولة، وإجراء حسابات سهلة التشغيل، والتي تعكس أيضاً مدى ملاءمة مناخ الوجهة للسياح المشاركين في الأنشطة الخارجية (Kovacs & Unger, 2014, p. 147). وتسمح الطبيعة الشاملة للمؤشر بإمكانية تطبيقه على جودة التجربة السياحية للأنشطة السياحية العامة مثل مشاهدة المعالم السياحية والتسوق والاسترخاء (Hein, et al, 2009, p. 3).

ومع ذلك فإن مؤشر مناخ السياحة لا يخلو من القيود، لأنه يعتمد على حكم الخبراء، ولا يأخذ في الاعتبار تصورات السياح وتفضيلاتهم (Perch, 2010, p. 363). وتجدر الإشارة إلى أنه لا يمكن تطبيق مؤشر مناخ السياحة بشكل جيد لتقييم مدى ملاءمة المناخ لأنواع معينة من الأنشطة السياحية مثل التزلج وتسلق الجبال، وتم إجراء تعديلات على هذا المؤشر لتقييم الراحة المناخية على وجه التحديد لأنشطة سياحية محددة مثل مؤشر السياحة الشاطئية.

مشكلة الدراسة:

خلطت الكثير من دراسات المناخ السياحي بين مؤشري مناخ العطلات الذي يهتم بكشف ملاءمة المناخ الشهري والفصلي في عام معين، ويركز على توجيه السائح بصورة أكبر من اهتمامه بالتنمية المستدامة لمشاريع السياحة، ومؤشر مناخ السياحة الذي يهدف إلى تحديد ملاءمة المناخ السنوي للسياحة خلال مدة طويلة، بغرض تحقيق التنمية المستدامة للسياحة، وبالتالي أهملت غالبية هذه الدراسات مسألة التباين المكاني لملاءمة المناخ السنوي لمدة طويلة من خلال تطبيق مؤشر المناخ السياحي، رغم أن ذلك يعتبر جوهر دراسة الجغرافية، وأساس الجدوى الاقتصادية من إقامة مشاريع وخدمات السياحة، وتحقيق هذه المشاريع والخدمات لأهدافها المتمثلة بالتنمية المستدامة، فالجدوى الاقتصادية هي لب التنمية المستدامة للقطاع السياحي، وتعتبر نواة توجه وخطط المملكة في تنمية السياحة بين عامي ٢٠٢٠ - ٢٠٣٠. فهل تتوافق عطلات السائح مع ملاءمة مناخ شهر أو فصل معين؟ وكيف يمكن أن تقوم التنمية المستدامة للسياحة في مكان معين بسبب ملاءمة مناخ شهر أو فصل معين؟ وهل هناك جدوى اقتصادية للمستثمر من خلال ملاءمة مناخ هذا الشهر أو الفصل؟ وبالتالي تركز التنمية المستدامة للقطاع السياحي على ملاءمة عناصر مناخ المنطقة المستهدفة بغالبية العام، ولمدة طويلة لا تقل عن ثلاثين عام، وهو قامت به الدراسة من خلال تحليل التباين المكاني لملاءمة عناصر المناخ السنوي للسياحة، وتحديد نطاقات الملاءمة المناخية الدائمة لمدة ثلاثين عام لتنمية السياحة في المنطقة.

أهداف الدراسة:

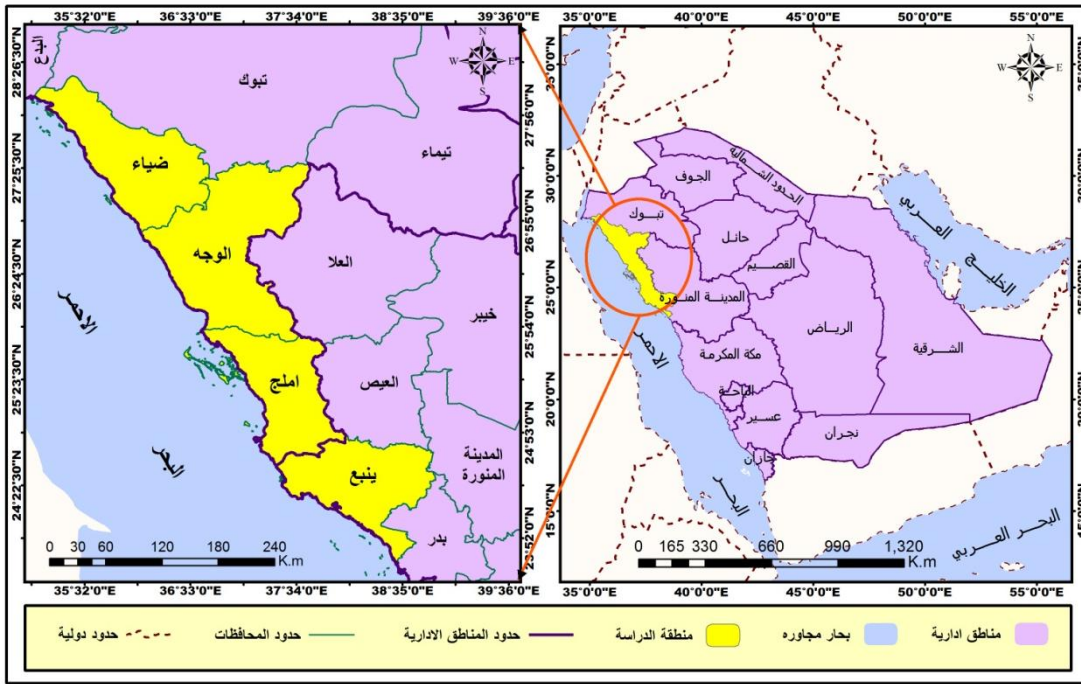
١. تحليل توزيع عناصر المناخ السياحي وتحديد مدى ملاءمتها للسياحة في محافظات شمال البحر الأحمر.
٢. تحديد الراحة الحرارية في النهار واليوم ومدى ملاءمتها للأنشطة السياحية بمحافظات شمال البحر الأحمر.
٣. تقييم الملاءمة المناخية للأنشطة السياحة في محافظات شمال البحر الأحمر باستخدام مؤشر مناخ السياحة.

تساؤلات الدراسة:

١. ما مدى ملاءمة عناصر المناخ للسياحة في محافظات المملكة العربية السعودية شمال البحر الأحمر.
٢. أين تقع المناطق التي تتسم بملاءمة حرارتها في النهار واليوم للأنشطة السياحية بمحافظات شمال البحر الأحمر.
٣. ما هي نطاقات الملاءمة المناخية للسياحة في محافظات المملكة شمال البحر الأحمر حسب مؤشر مناخ السياحة.

حدود منطقة الدراسة: تقع منطقة الدراسة مكانياً كما يوضح شكل (١) شمال البحر الأحمر غرب المملكة العربية السعودية، وتقع فلكياً بين دائرتي عرض ٥٥°:٥١':٢٨" - ٢٦°:١٥':٢٣" شمالاً، وبين خطي طول ١٠°:٣١':٣٨" - ٣٥°:٣٥':٣٥" شرقاً، وتضم منطقة الدراسة أربعة محافظات ثلاثة منها هي: ضياء والوجه وأملج تتبع من الناحية الادارية منطقة تبوك، والرابعة وهي محافظة ينبع تتبع اداريا منطقة المدينة المنورة، يحدها من الشمال محافظتي تبوك والبدع ومن الغرب البحر الأحمر ومن الجنوب محافظة بدر، ومن الشرق محافظات العيص والعلّا وتيماء، وتبلغ مساحة منطقة الدراسة ٤٨٤٧٥,٧٤ كم^٢. وتمتد الحدود الزمانية للدراسة خلال المدة الممتدة بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣ م.

شكل رقم (١) موقع منطقة الدراسة



المصدر: الباحث بالاعتماد على طبقات () للمناطق الادارية والمحافظه، أمانة منطقة تبوك.

أهمية الدراسة:

تكمن أهمية الدراسة من خلال تحديد نطاقات الراحة الحرارية بصورة خاصة، والراحة المناخية بصورة عامة في منطقة الدراسة، بالاعتماد على بيانات عناصر المناخ لمدة ثلاثين (٣٠) عام بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣، بما يتناسب مع توجهات السائح والمستثمر وصانع القرار في مجال التخطيط للتنمية المستدامة للسياحة في المنطقة، وبالتالي فقد حددت وجهات السائح الدائمة لممارسة السياحة من جهة،

وحددت للمستثمر أين تقع المناطق التي يمكن من خلالها استثمار أمواله بنجاح في قطاع السياحة، وحددت لصانع القرار أين ينبغي أن يتم تركيز مشاريع التنمية المستدامة للسياحة، حسب نطاقات الراحة المناخية التي حددتها الدراسة، وتعطي نتائج الدراسة المعتمدة على بيانات مناخية لمدة طويلة جدوى اقتصادية لتوطين وتركيز مشاريع الاستثمار والتنمية المستدامة للسياحة، وبما يتوافق مع رؤية المملكة ٢٠٢٠ - ٢٠٢٠ م في مجال التنمية المستدامة للسياحة.

منهجية الدراسة:

تدرجت منهجية الدراسة من مراجعة أدبيات مؤشر المناخ السياحي لتحديد البيانات المناخية المطلوبة لتطبيق المؤشر، وبالتالي تحديد نطاقات الراحة المناخية بواسطته، ولتحقيق ذلك اعتمدت الدراسة على المنهج الكمي التحليلي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية لتحليل توزيع عناصر المناخ، وتطبيق معادلات الراحة الحرارية النهارية واليومية، وبالتالي تطبيق معادلة مؤشر المناخ السياحي، وعليه فقد تدرجت منهجية الدراسة على النحو الآتي:

(١) جمع بيانات المناخ: قامت بجمع بيانات عناصر المناخ (الأمطار، الحرارة، الأشعاع الشمسي، الضغط الجوي، الرياح، التبخر، التكاثف، الرطوبة) لمنطقة الدراسة على شكل طبقات (Raster)، لعدد من الأقمار الصناعية المبينة في جدول (١) من موقع وكالة ناسا بيانات مناخ الأرض، بما يتناسب مع طبيعة البيانات المستخدمة في مؤشر المناخ السياحي، والمتمثلة ببيانات درجة الحرارة (الحد الأقصى والمعدل)، والرطوبة النسبية (الحد الأدنى والمعدل)، وهطول الأمطار، ومدة أشعة الشمس، وسرعة الرياح (Mieczkowski, 1985, p. 225)

جدول (١) البيانات المناخية المطلوبة لتطبيق مؤشر مناخ السياحة

القمر	العنصر	الوحدة	الدقة المكانية	الدقة الزمنية	محطات الرصد	بداية المدة	نهاية المدة
Merra 2	الحرارة العظمى	C	٦٠ كم	يومية	٢٤	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣
Merra 2	معدل الحرارة	C	٦٠ كم	يومية	٢٤	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣
FLDAS	الأشعاع الشمسي	W/M ²	١١ كم	يومية	٤١٨	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣
FLDAS	سرعة الرياح	K/H	١١ كم	ساعية	٤١٨	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣
AIRS	الرطوبة النسبية الدنيا	%	١٢٠ كم	يومية	١٥	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣
AIRS	معدل الرطوبة النسبية	%	١٢٠ كم	يومية	١٥	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣
GPM	معدل الأمطار	MM	١١ كم	شهرية	٤١٨	١٠-١-١٩٩٣	٣١-١٢-٢٠٢٣

المصدر: ناسا، بيانات مناخ الأرض، رابط الموقع (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>).

٢) تهيئة بيانات المناخ: يهدف الحصول على ادق النتائج كان لا بد من البدء بمعالجة بيانات عناصر المناخ بداية اعادة ارجاع الطبقات من النظام الجغرافي الى المتري (UTM_ZONL_37N). وتوحيد الدقة الزمنية بما يتناسب مع وحدات القياس المتبعة في تطبيق مؤشر المناخ السياحي، وتوحيد الدقة المكانية للطبقات عند ٥٠ م، من خلال تحويل طبقات عناصر المناخ المرجعة من (Raster) الى (Points).

٣) اشتقاق الخرائط: بعد الانتهاء من تهيئة البيانات تم الانتقال الى اشتقاق خرائط عناصر توزيع الحرارة والرطوبة النسبية والأمطار والرياح والإشعاع بالاعتماد على طبقات (points)، واستخدام خوارزمية وزن المسافة المعكوسة (IDW) ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية، وهي إحدى طرق الاستيفاء المكاني لإجراء تقدير لعناصر المناخ في المناطق غير المعروفة بياناتها بمساعدة النقاط المعروفة في منطقة الدراسة (Adiguzel, et al, 2022, p. 55).

٤) تطبيق مؤشرات الراحة الحرارية: يتكون مفهوم الراحة المناخية حسب مؤشر مناخ السياحة من خمسة مؤشرات الأول مؤشر الراحة أثناء النهار (Daytime Comfort Index (CIA) الذي يُحسب من درجة الحرارة العظمى اليومية (متوية) والحد الأدنى للرطوبة اليومية (%)، ومؤشر الراحة اليومية Daily Comfort Index (CID) الذي يُحسب بواسطة معدل درجة الحرارة اليومية (متوية)، والرطوبة (/)، وهطول الأمطار ملم، وساعات أشعة الشمس اليومية، ومعدل سرعة الرياح اليومية، م/ث (Cao & Gao, 2022, p. 383). وقبل تطبيق معادلة مؤشر المناخ السياحي ل (Mieczkowski 1985)، كان لا بد من اشتقاق طبقتي مؤشري الراحة الحرارية النهارية، والراحة الحرارية اليومية. ويتم استخدام درجة حرارة الهواء والرطوبة النسبية لربط الظروف المتوقعة لدرجات الحرارة الرطبة والجافة (Emmanuel, 2005, p. 1592).

وقامت الدراسة في البداية باشتقاق طبقة مؤشر الراحة خلال النهار (CID)، ويعتبر هذا المؤشر أهم معيار يؤثر في السياحة، ويحسب من خلال دمج عنصري الحرارة العظمى والرطوبة النسبية الدنيا.

$$THI = (0.8 * T) + \{(RHT) / 500\}. \text{ (Hasanah, et al, 2020. p.3).}$$

حيث THI مؤشر الراحة الحرارية نهاراً، (T) الحرارة العظمى اليومية متوية، (RHT) الرطوبة النسبية الدنيا (/)، وطبقت هذه المعادلة في حاسبة برنامج (GIS) بالصيغة:

$$(8.5 * LayerTempermax") + ("LayerReletvmin" / 500")$$

حيث (LayerTempermax) طبقة الحرارة العظمى اليومية م، (LayerReletvmin) طبقة الرطوبة النسبية الدنيا، وبعد اشتقاق طبقة الراحة الحرارية في النهار (CID) تم اعادة تصنيف الطبقة بما يتوافق مع حدود فئات

الحرارة الفعالة، وإعطاء وزن لكل فئة بما يتوافق مع حدود الفئات التي تم تصنيفها بواسطة مخطط (ميكزكوفسكي).

وتمثلت ثاني الخطوات في اشتقاق طبقة الحرارة الفعالة اليومية بواسطة مؤشر الراحة اليومية (CIA)، والاعتماد على معدلي درجات الحرارة اليومية والرطوبة النسبية اليومية.

$$THI = (0.8 * TM) + \{(RHTM)/500\}. \text{ (Hasanah, et al, 2020, p.3).}$$

حيث THI مؤشر الراحة الحرارية اليومية، (TM) معدل الحرارة اليومية م، (RHTM) معدل الرطوبة النسبية اليومية (%/)، وطبقت الدراسة هذه المعادلة في حاسبة برنامج (GIS) بالصيغة:

$$(0.8 * LayerTempermean) + ("LayerReletvmean"/500")$$

حيث (LayerTempermean) طبقة معدل الحرارة اليومية م، (LayerReletvmean) طبقة معدل الرطوبة النسبية اليومية، وبالتالي تم تصنيف طبقة الراحة الحرارية خلال اليوم (CIA) بما يتوافق مع مخطط تصنيف مؤشر الراحة المناخية، وإعطاء اوزان للفئات بما يتوافق مع حدود الفئات التي اعددها (ميكزكوفسكي).

٥) تطبيق مؤشر المناخ السياحي: لاشتقاق خريطة الراحة المناخية في المنطقة حسب مؤشر المناخ السياحي، دمجت طبقات مؤشري الراحة الحرارية اثناء النهار، والراحة الحرارية اليومية مع طبقات كمية الأمطار الشهرية، وعدد ساعات الاشعاع اليومي، وسرعة الرياح كم/ساعة، وذلك من خلال تطبيق المعادلة مؤشر المناخ السياحي (Tourism Climate Index) في حاسبة نظم المعلومات الجغرافية.

$$TCI=2[4 * CID + CIA + (2*P) + (2*S) +W]. \text{ (Gungor, et al, 2021, p. 518).}$$

حيث (CID) مؤشر الراحة الحرارية نهارا، (CIA) مؤشر الراحة الحرارية اليومية، R الأمطار (ملم)، S الاشعاع الشمسي ساعة/يوم، W سرعة الرياح (كم/ساعة). والأوزان المستخدمة في المعادلة ذاتية، على الرغم من أن لها أساسًا في المعرفة العلمية (Farajzadeh and Matzarakis, 2009, p. 547).

ومن الملاحظ في المعادلة السابقة إعطاء أعلى وزن لمؤشر الراحة اثناء النهار (CID) لتعكس حقيقة أن السائحين يكونون أكثر نشاطًا بشكل عام خلال النهار، وأعطى هطول الأمطار والإشعاع الشمس ثاني أعلى وزن، تليها الراحة الحرارية اليومية وسرعة الرياح، وطبقت هذه المعادلة في حاسبة (GIS) بالصيغة:

$$2 * ("Float(4 * "LayerCID" + "LayerCIA" + 2 * "LayerRain" + 2 * "LayerRadiation" + "LayerWind)$$

حيث (LayerCID) طبقة مؤشر الراحة الحرارية نهارا، (LayerCIA) طبقة مؤشر الراحة الحرارية اليومية، (LayerRain) طبقة الأمطار (ملم)، (LayerRadiation) طبقة الإشعاع الشمسي، (LayerWind) طبقة سرعة سرعة الرياح. وأعقبه اشتقاق طبقة الراحة المناخية بالمعادلة السابقة لغرض تقييم الملاءمة المناخية للأنشطة السياحية من خلال تصنيف الطبقة الناتجة بناءً على حدود فئات مؤشر المناخ السياحي المبينة في جدول (٢).

جدول (٢) فئات الراحة المناخية حسب تصنيف (Mieczkowski)

الفئة	مستوى الراحة
٩ - ٣٠	غير ممكنة للسياحة
١٩ - ١٠	غير مواتية للغاية للسياحة
٢٩ - ٢٠	غير مواتية جدا للسياحة
٣٩ - ٣٠	غير مواتية للسياحة
٤٩ - ٤٠	ضعيفة للسياحة
٥٩ - ٥٠	مقبولة للسياحة
٦٩ - ٦٠	جيدة للسياحة
٧٩ - ٧٠	جيدة جدا للسياحة
٨٩ - ٨٠	ممتازة للسياحة
١٠٠ - ٩٠	مثالية للسياحة

دراسات سابقة:

استخدمت دراسة (Scott & Mcboyle, 2001) مؤشر مناخ السياحة لكشف أثر تغير عناصر المناخ على المناخ كمورد سياحي لعدد من وجهات السياحة في أمريكا الشمالية، وقامت الدراسة بتطبيق مؤشر مناخ السياحة لتحديد الملاءمة المناخية لممارسة الأنشطة السياحية في ١٧ مدينة أمريكية، وتوصلت نتائج الدراسة الى اختلاف تأثير تغير المناخ على السياحة الموسمية حسب موقع هذه المدن.

وقامت دراسة (Bakhtiari, et al, 2018) بكشف أثر تغير المناخ على راحة الانسان في إيران، وذلك من خلال استخدام مؤشر المناخ السياحي، بهدف التحقق من تأثيرات تغير المناخ على راحة الإنسان في الهواء، واعتمدت الدراسة على بيانات طويلة المدى لنحو ١٥٣ محطة، وتوصلت نتائج الدراسة الى ان تغيرات المناخ أدت إلى تحسين الراحة المناخية.

واستخدم (توفيق، ٢٠١٩) مؤشر المناخ السياحي في مدينة الأقصر، وتحقيقا لهدف البحث فقد تم عرض المضمون الخاص بهذا المؤشر وشرح عناصر المناخ بالأقصر مع التركيز على العناصر ذات

العلاقة بالسياحة؛ كالسطوع الشمسي ودرجات الحرارة والرطوبة النسبية والمطر واتجاهات الرياح وسرعتها ثم عرض البحث لنتائج تطبيق مؤشر المناخ السياحي بمدينة الأقصر، وللحركة السياحية الاجنبية الوافدة اليها وعلاقة ذلك بنتائج المؤشر، وقد توصل البحث الى وجود علاقة طردية قوية نسبيا بين الظروف المناخية بالأقصر وحركة السياحة اليها وان قمة الحركة السياحية قمة موسمية تتركز خلال شهور الشتاء ونهاية الربيع وبداية الخريف.

وقيمت دراسة (Hasanah, et al, 2020) الراحة المناخية للسياحة في معبد إندونيسيا، وطبقت الدراسة مؤشري مناخ السياحة (TCI)، ومناخ العطلات (HCI)، وتوصلت النتائج الى ان الفترة الممتدة بين يونيو - أغسطس تعتبر الاكثر ملاءمة من حيث الراحة المناخية بحسب مؤشر المناخ السياحي، وبحسب مؤشر مناخ العطلات جاءت الأشهر الممتدة بين يوليو - أكتوبر الأولى من حيث ملاءمة المناخ لممارسة الانشطة السياحية.

وقامت دراسة (Perez, et al, 2021) بتقييم أكثر مؤشرات السياحة استخداما (TCI) الذي اقترحه (Mieczkowski, 1985)، من خلال حساب السلاسل الزمنية الشهرية لمعدل المؤشر باستخدام بيانات الأرصاد الجوية الاسبانية وتقييم المناخ الأوروبي، وتوصلت مطابقة نتائج هذه الدراسة مع مخطط تصنيف مؤشر المناخ السياحي الى توافق نتائج تطبيق المؤشر مع راحة مناخية عالية جدا طول مدة الدراسة، وكان فصل الربيع افضل فصول السنة من حيث تميزه بأفضل نطاقات الراحة المناخية.

وتناول (زهران، ٢٠٢١) تحليل الملاءمة المناخية للنشاط السياحي على ساحل البحر الأحمر باستخدام مؤشر المناخ السياحي بين عامي ١٩٨٠ - ٢٠٢٠ م، واعتمدت الدراسة على المنهج الجغرافي الشمولي الذي يهدف إلى استقراء البيانات الوصفية والإحصائية لتوظيفها في استنتاج العلاقات المكانية بالاعتماد على مجموعة من النماذج الرياضية و المؤشرات الإحصائية، وركزت الدراسة على تحديد تأثير عناصر المناخ ولاسيما درجة الحرارة على الطلب السياحي، وحاولت تحديد أفضل الشهور لراحة السائح من خلال ربطها بنتائج مؤشر المناخ السياحي، وتوصلت الدراسة لعدة نتائج تمثل أبرزها في الاعتماد على مخرجات مؤشر المناخ السياحي في تصنيف شهور السنة إلى ثلاثة مستويات وهم "مثالي"، "ممتاز"، "جيد جدا"، كما أثبتت النتائج وجود علاقة ارتباطية طردية بين مخرجات تطبيق مؤشر المناخ السياحي و كل من الحركة السياحية و نسبة الإشغال الفندقي.

وتناولت دراسة (Masoudi, 2021) توزيع نطاقات الراحة المناخية باستخدام مؤشر المناخ السياحي في مقاطعة فارس، إيران، هدفت الدراسة لتقييم ملاءمة عناصر المناخ للسياحة، وأكدت نتائج الدراسة أن ٧٠-٨٣٪ من مدن منطقة الدراسة تظهر راحة مناخية ممتازة ومثالية في اشهر أبريل ومايو

وأكتوبر ونوفمبر، ونحو ٤٥-٥٤٪ من مدن المنطقة تتصف براحة مناخية بين الجيدة الى الجيدة جدا للسياحة في أشهر يناير ومارس ويوليو وديسمبر.

وتطرفت دراسة (Faraj, et al, 2022) لمدى إمكانية تطبيق مؤشر مناخ السياحة دراسة حالة المملكة العربية السعودية، هدفت هذه الدراسة لتطبيق مؤشر مناخ السياحة على مستوى المناطق الادارية، وأكدت نتائج الدراسة وجود تباين مكاني زمني لتوزيع أنطقه الراحة المناخية، فالمناطق الجبلية جنوب غرب المملكة تتمتع براحة مناخية مواتية للسياحة طول ايام العام، وتتصف غالبية المناطق براحة مناخية مناسبة لممارسة أنشطة السياحة في فصل الشتاء وغير مناسبة للغاية في فصل الصيف.

واستخدمت دراسة (Sultana & Paul, 2023) نظم المعلومات الجغرافية ومؤشر المناخ السياحي لتقييم الملاءمة المناخية لأنشطة السياحة الترفيهية غرب خليج البنغال، واعتمدت الدراسة في تحديد نطاقات الراحة وتغيراتها على مؤشرات الراحة الحرارية، ومعدل الأمطار شهريا، ومعدل ساعات الاشعاع الشمسي، ومعدل سرعة الرياح، توصلت النتائج الى أن الفترة الممتدة بين مارس - نوفمبر باستثناء يونيو ويوليو ممتازة لممارسة أنشطة الترفية في سبعة مواقع من إجمالي عشرة، وتتصف الراحة المناخية في شهري يونيو ويوليو بكونها غير مناسبة للأنشطة السياحية البيئية في المناطق الساحلية.

وحدد دراسة (عبد النبي، ٢٠٢٤) العلاقة بين الراحة الحرارية والحركة السياحية بمدينة شرم الشيخ باستخدام مؤشر المناخ السياحي بين عامي ١٩٨٠ - ٢٠٢٠ م. وتعد مدينة شرم الشيخ من أهم المدن السياحية المصرية التي تتفرد بثراء مقوماتها الطبيعية التي تخدم أنماط سياحية متعددة، واعتمدت الدراسة على المنهج الجغرافي الشمولي الذي يهدف إلى استقراء البيانات الوصفية والإحصائية لتوظيفها في استنتاج العلاقات المكانية بالاعتماد علي عدة نماذج رياضية ومؤشرات إحصائية، وركزت الدراسة على تحديد تأثير عناصر المناخ؛ لاسيما درجة الحرارة علي الطلب السياحي، وحاولت تحديد أفضل الشهور لراحة السائح من خلال ربطها بنتائج مؤشر المناخ السياحي، وتوصلت الدراسة لعدة نتائج أبرزها الاعتماد على مخرجات مؤشر المناخ السياحي في تصنيف شهور السنة إلى ثلاثة مستويات وهم "مثالي"، "ممتاز"، "جيد جدا"، كما أثبتت النتائج وجود علاقة ارتباطية طردية بين مخرجات تطبيق مؤشر المناخ السياحي و كل من الحركة السياحية ونسبة الإشغال الفندقية.

وبموجب عرض الدراسات السابقة سوف تمتاز هذه الدراسة عن كثير مما سبق باستخدام بيانات لعناصر المناخ خلال مدة ثلاثين عام مما يعني ارتفاع نسبة الوثوق بنتائجها في تحقيق تنمية مستدامة للسياحة، فضلا عن ذلك تميزت هذه الدراسة عن الدراسات السابقة باعتمادها على بيانات الأقمار الصناعية في تحديد نطاقات الملاءمة المناخية للسياحة في المنطقة، وتتسم هذه البيانات بدقتها المكانية اذا ما قورنت بعدد المحطات المناخية التي لا تتجاوز محطتين، وبالتالي انتجت الدراسة خرائط

توزيع مساحي لمفردات الدراسة باستخدام خوارزمية وزن المسافة المعكوسة في نظم المعلومات الجغرافية، في الوقت ذاته اعتمدت غالبية الدراسات السابقة على بيانات محطة ارضية او أكثر في تطبيق مؤشر المناخ السياحي بموضع محدودة المساحة، وبدون انتاج خرائط توزيع مساحة تحدد نطاقات الملاءمة على مستوى مساحات أوسع، كما تختلف هذه الدراسة عن الدراسات السابقة كونها طبقت معادلات المؤشرات على طبقات خلوية (Raster) داخل حاسبة نظم المعلومات الجغرافية.

التحليل والمناقشة:

ولاً) التحليل المكاني لعناصر مناخ السياحة: تم تطوير عدة مؤشرات للراحة المناخية بهدف تسليط الضوء على الطبيعة المتنوعة للموارد المناخية للسياحة (Andelkovic, et al, 2016, p. 483). ويعتبر مؤشر المناخ السياحي تقييم كمي للمناخ السياحي الذي يدمج العوامل المناخية المرتبطة بالسياحة في مؤشر واحد.

ويعد هذا أحد المؤشرات المناخية الأكثر انتشاراً على نطاق واسع، وهو مستمد من انطباع الراحة الإنسانية (Mendez-l azaro et al., 2014, p. 11). ويتضمن هذا المؤشر مقاييس تجمع بين العوامل المناخية الحيوية الثلاثة المتعلقة بالسياحة: كالراحة الحرارية، والمطر، والرياح؛ وجماليات أشعة الشمس.

وبذلك تستخدم اربعة متغيرات مناخية لتقييم ملاءمة أي منطقة مناخياً للأنشطة السياحية حسب مؤشر مناخ السياحة بواسطة الذي وضع اسسه (Mieczkowski) هي الحرارة العظمى والحرارة المعدلة، والرطوبة النسبية الدنيا ومعدل الرطوبة النسبية، وعدد ساعات الإشعاع الشمسي، وسرعة الرياح، والأمطار الشهرية.

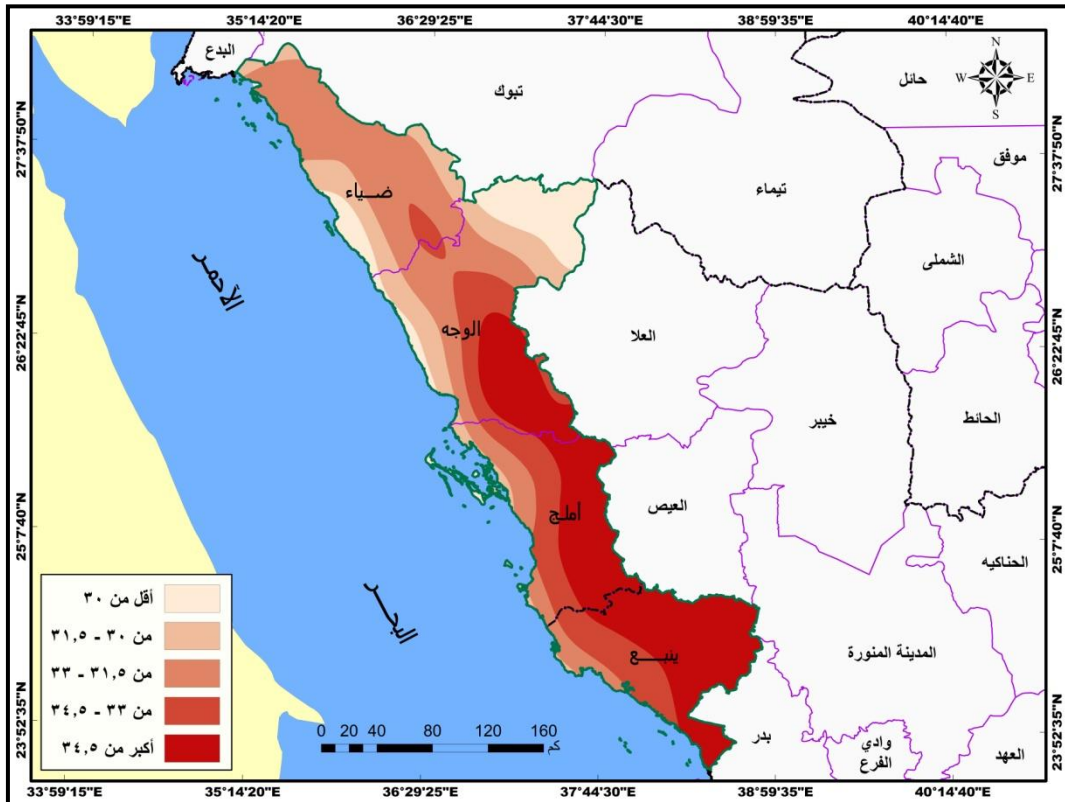
أ) درجات حرارة الهواء: تعتبر الحرارة اهم عناصر المناخ التي ركز عليها بسبب تأثيرها على راحة الانسان، وممارسة انشطته المختلفة بما فيها النشاط السياحي، وعليه فقد توصلت نتائج تحليل الحرارة العظمى اليومية لتباين توزيعها من مكان لآخر في منطقة الدراسة، حيث ترتفع وسط وجنوب وجنوب شرق المنطقة وتقل شمالها، حيث تراوحت الحرارة العظمى بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣ بين ٣٦,٨° - ٢٧,٥° م، بمعدل على مستوى المنطقة ٣٢,٩° م. وتوضح نتائج تصنيف الحرارة العظمى شكل (٢) وقوع المنطقة التي تقل حرارتها عن ٣٠° م غرب محافظات امالج والوجه وضباء وشرق محافظة الوجه، وتبلغ مساحة هذه المنطقة ٤٥٨٥,٤٧ كم^٢، بنسبة ٩,٤٥٪ من مساحة المنطقة.

وتقع الفئة التي تتراوح حرارتها العظمى بين ٣١,٥° - ٣٠° م شمال وشرق ووسط محافظة ضياء، وشمال شرق ووسط محافظة الوجه، وغرب محافظتي امالج وينبع، بمساحة بلغت ٦٢١٧,٣٥ كم^٢، بنسبة ١٢,٨٢٪ من مساحة المنطقة. وتغطي فئة الحرارة العظمى بين ٣٣° - ٣١,٥° م وسط وشمال شرق

وشمال غرب محافظة ضياء، ووسط محافظة الوجه واملج وينبع، وتبلغ مساحة هذه الفئة ١٤.٤١,٠٥ كم^٢، بنسبة ٢٨,٩٧٪ من مساحة المنطقة.

وتبرز الفئة التي تتراوح حرارتها العظمى بين ٣٤,٥° - ٣٣° م جنوب محافظة ضياء، ووسط محافظات الوجه واملج وينبع، بمساحة ٨٤٧٥,٠٨ كم^٢، بنسبة ١٧,٤٨٪ من مساحة المنطقة. وتتجاوز درجات الحرارة العظمى ٣٤,٥° شرق محافظتي الوجه واملج وشرق وجنوب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ١٥١٥٦,٧٨ كم^٢، بنسبة ٣١,٢٧٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة.

شكل رقم (٢) المعدلات السنوية لدرجة حرارة الهواء العظمى اليومية للفترة ١٩٩٣-٢٠٢٣



المصدر: الباحث بالاعتماد على بيانات القمر (MERRA2).

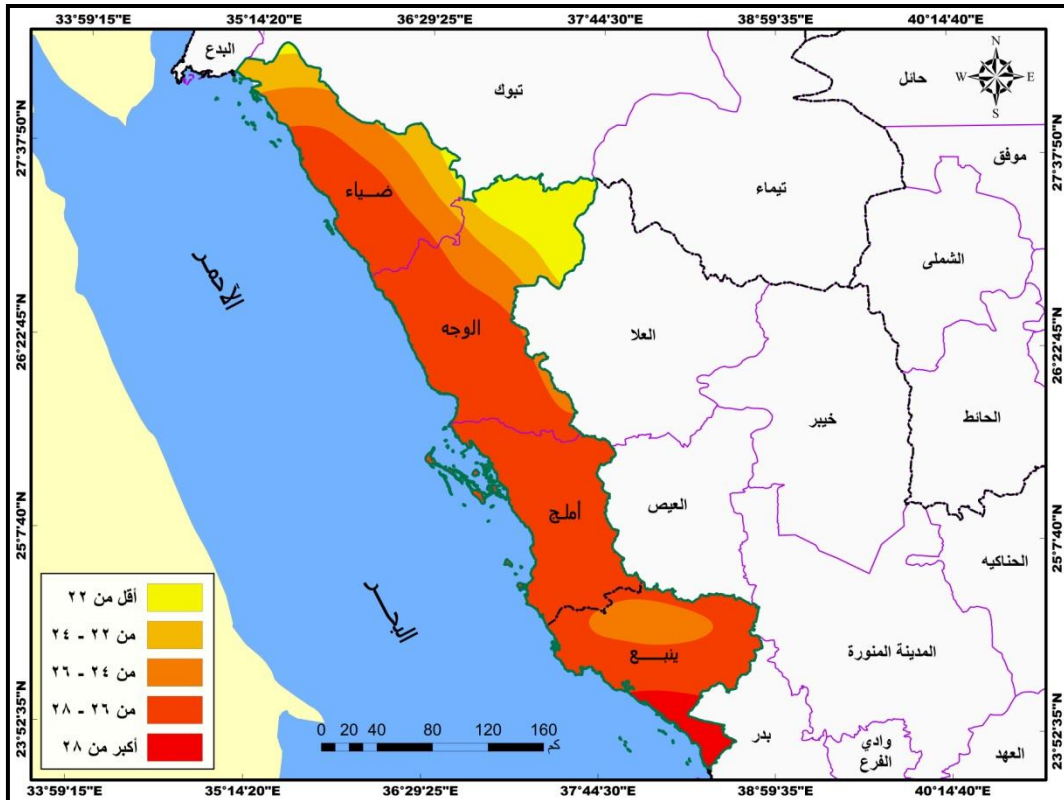
في المقابل تظهر نتائج كشف تباين توزيع معدل الحرارة اليومية في المنطقة خلال المدة نفسها تراجع درجات الحرارة كلما اتجهنا من جنوب المنطقة نحو شمالها، ومما يدل على ذلك تراوح المعدل اليومي لدرجات الحرارة بين ١٩,٤° م، الى ٣٠,٩° م، بمعدل على مستوى منطقة الدراسة بلغ ٢٥,٨° م.

وتوضح نتائج تصنيف معدل درجات الحرارة في الشكل (٣) وقوع المنطقة التي تقل حرارتها عن ٢٢° م شمال شرق محافظة الوجه وشرق وشمال شرق محافظة ضياء بمساحة بلغت ٣٨٩١,٢١

كم^٢، بنسبة ٨,٠٢٪ من مساحة المنطقة. وتقع فئة تراوح معدل الحرارة بين ٢٤° - ٢٢° م وسط شرق محافظة الوجه، وجنوب شرق وشمال محافظة ضياء بمساحة ٤٠٣١,٢٦ كم^٢، بنسبة ٨,٣١٪ من مساحة المنطقة.

وتظهر الفئة التي يتراوح معدل حرارة بين ٢٦° - ٢٢° م وسط محافظة الوجه، ووسط وشرق وشمال غرب محافظة ضياء، ووسط محافظة ينبع، بمساحة ٨٢٠٢,٢ كم^٢، بنسبة ١٦,٩٢٪ من مساحة المنطقة. وتغطي الفئة التي يتراوح معدل حرارتها بين ٢٨° - ٢٦° م جنوب غرب محافظة ضياء ووسط وغرب محافظة الوجه وكل مساحة محافظة امالج وشرق وشمال غرب محافظة ينبع، بمساحة تصل الى ٣٠٩١٠,٨٢ كم^٢، بنسبة ٦٣,٧٧% من مساحة المنطقة. ويتجاوز المعدل اليومي للحرارة ٢٨° م جنوب وجنوب غرب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ١٤٤٠,٢٤ كم^٢، بنسبة ٢,٩٧٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة.

شكل رقم (٣) المعدلات السنوية لمتوسط درجة حرارة الهواء اليومية للفترة ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



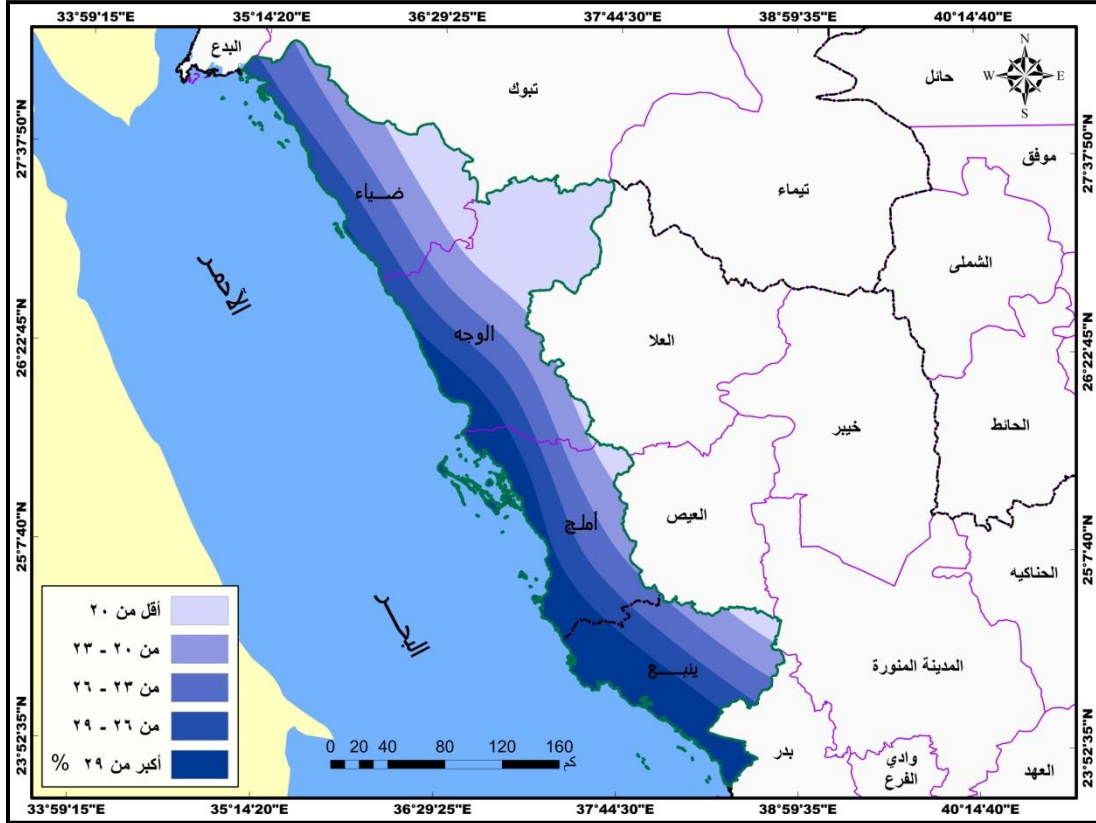
المصدر: الباحث بالاعتماد على بيانات القمر (MERRA2).

ب) الرطوبة النسبية: تشترك الرطوبة النسبية مع الحرارة في الكثير من الصيغ الرياضية المستخدمة في حساب مؤشرات الانزعاج والحرارة الفاعلة، وبالتالي تبين نتائج تحليل تباين توزيع الرطوبة النسبية اليومية الدنيا انخفاضا تدريجيا كلما اتجهنا من محاذاة البحر الأحمر باتجاه الداخل، لتراوح بين ١٨,٨٪ الى ٣٦,٤٪، بمعدل مكاني لمنطقة الدراسة ٢٢,٢٪.

وتظهر نتائج تصنيف الرطوبة النسبية الدنيا في المنطقة شكل (٤) وقوع المنطقة التي تقل رطوبتها عن ٢٠٪ جنوب شرق محافظة ضياء وشمال شرق وجنوب شرق محافظة الوجه وشمال شرق محافظة امالج وشرق محافظة ينبع، بمساحة بلغت ١٠٠٣٩,٠٧ كم^٢، بنسبة ٢٠,٧٪ من مساحة المنطقة. وتقع فئة تراوح الرطوبة النسبية الدنيا بين ٢٠ - ٢٣٪ غرب الفئة الاولى وسط محافظة ضياء ووسط وجنوب شرق محافظة الوجه ووسط وجنوب شرق محافظة امالج ووسط محافظة ينبع، بمساحة بلغت ٩٥٨٧,٨٦ كم^٢، بنسبة ١٩,٧٨٪ من مساحة المنطقة.

وتمتد الفئة التي تتراوح رطوبتها بين ٢٣ - ٢٦٪ وسط المحافظات من اقصى جنوب محافظة ينبع وحتى اقصى شمال محافظة ضياء، بمساحة وصلت الى ١٠٩٥٤,٧٩ كم^٢، بنسبة ٢٢,٦٪ من مساحة المنطقة. كما تمتد الفئة التي تتراوح رطوبتها بين ٢٦ - ٢٩٪ غرب الفئة السابقة وسط محافظتي ينبع وامالج وشمال غرب محافظة الوجه وغرب محافظة ضياء، بمساحة ٨٩٨٨,٤٢ كم^٢، بنسبة ١٨,٥٥٪ من مساحة المنطقة. وتبرز الفئة التي تجاوزت رطوبتها النسبية الدنيا ٢٩٪ غرب محافظتي ينبع وامالج وجنوب غرب محافظة الوجه، بمساحة بلغت ٨٩٠٥,٦٠ كم^٢، بنسبة ١٨,٣٧٪ من إجمالي مساحة المنطقة.

شكل رقم (٤) الرطوبة النسبية الدنيا بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



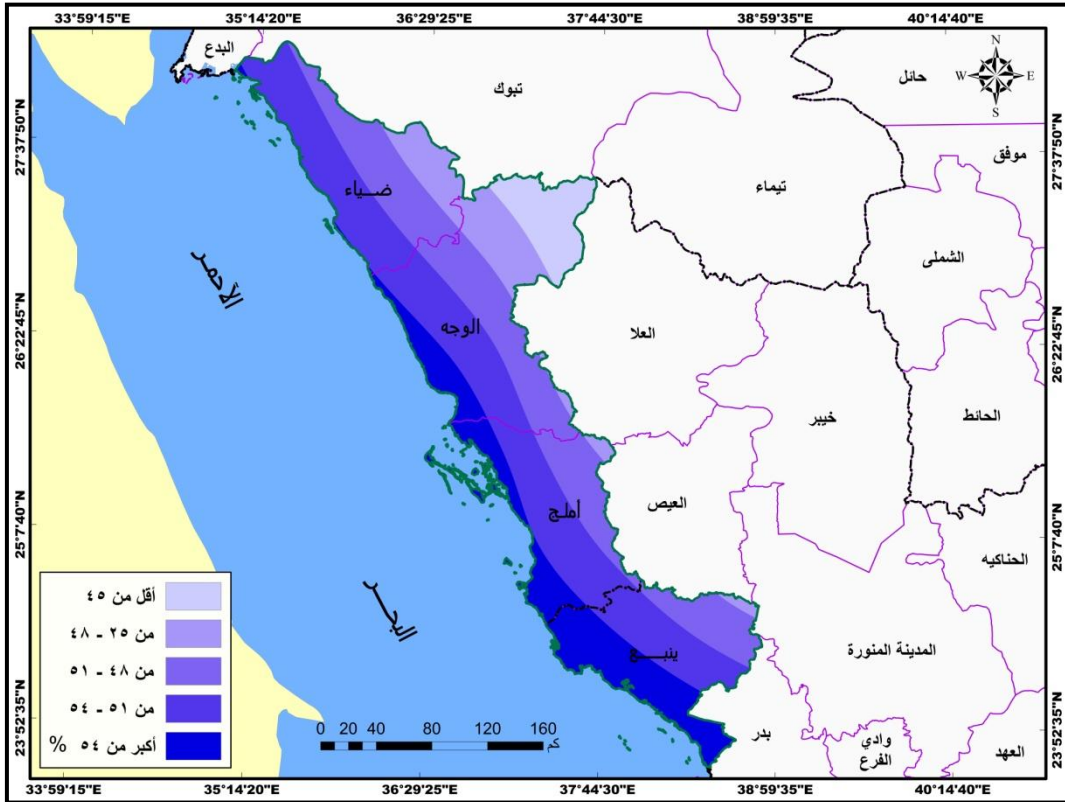
من جهة أخرى أكدت نتائج تحليل توزيع معدل الرطوبة النسبية في المنطقة تباين توزيعها من مكان لآخر، حيث ترتفع في المناطق الساحلية وتقل باتجاه الداخل، وعليه فقد تراوحت بين ٤١٪ إلى ٥٩,١٪، بمعدل على مستوى المنطقة بلغ ٥١٪.

وتوضح نتائج تصنيف معدل الرطوبة النسبية في الشكل رقم (٥) وقوع الفئة التي يقل معدل رطوبتها النسبية عن ٤٥٪ شمال شرق محافظة الوجه، بمساحة وصلت إلى ٣١٨٠,٠٨ كم^٢، بنسبة ٦,٥٦٪ من مساحة منطقة الدراسة.

وتبرز الفئة التي تتراوح الرطوبة النسبية الدنيا فيها بين ٤٥ - ٤٨٪ جنوب شرق محافظة ضياء ووسط وجنوب شرق محافظة الوجه وشمال شرق محافظة أمالج وشرق محافظة ينبع، بمساحة بلغت ٤٩٣٨,٢٦ كم^٢، بنسبة ١٠,١٨٪ من مساحة المنطقة.

وتقع فئة تراوح الرطوبة النسبية بين ٤٨ - ٥١٪ وسط محافظة ضباء ووسط وشرق محافظة الوجه ووسط وجنوب شرق امالج ووسط وشمال شرق محافظة ينبع، بمساحة ١٣٤٣٩,٩ كم^٢، بنسبة ٢٧,٧٣٪ من مساحة المنطقة. وتمتد الفئة التي تراوحت رطوبتها بين ٥١ - ٥٤٪ وسط محافظات ينبع واملج والوجه وغرب محافظة ضباء، بمساحة بلغت ١٨٠١٨,٤١ كم^٢، بنسبة ٣٧,١٧٪ من مساحة المنطقة. وتقع فئة تجاوزت معدل الرطوبة النسبية ٥٤٪ غرب محافظات ينبع واملج والوجه، بمساحة وصلت الى ٨٨٩٩,٠٨ كم^٢، بنسبة ١٨,٣٦٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة.

شكل رقم (٥) فئات توزيع معدل الرطوبة النسبية بين عامي ١٩٩٣-٢٠٢٣



المصدر: الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (AIRS).

(ج) الراحة الحرارية في النهار: تعرف الراحة الحرارية على أنها حالة الرضا عن الظروف الحرارية البيئية الناتجة عن التأثيرات الحرارية للبيئة؛ ومن ثم فإن الراحة الحرارية تخلق تأثيرًا فسيولوجيًا. وبذلك تقاس الحرارة الفاعلة حسب مؤشر المناخ السياحي بواسطة مؤشرين الأول مؤشر الراحة خلال النهار بالاعتماد على الحرارة العظمى والرطوبة النسبية الدنيا، وتعطى الفئة ذات الحرارة

الفعالة بين ٢٠ - ٢٦ م وزن ٥ درجات، ومع انحراف قيم الحرارة الفعالة عن هذان الحدان تتراجع مستويات الراحة المناخية لممارسة الأنشطة السياحية (Cao & Gao, 2022, p. 385).

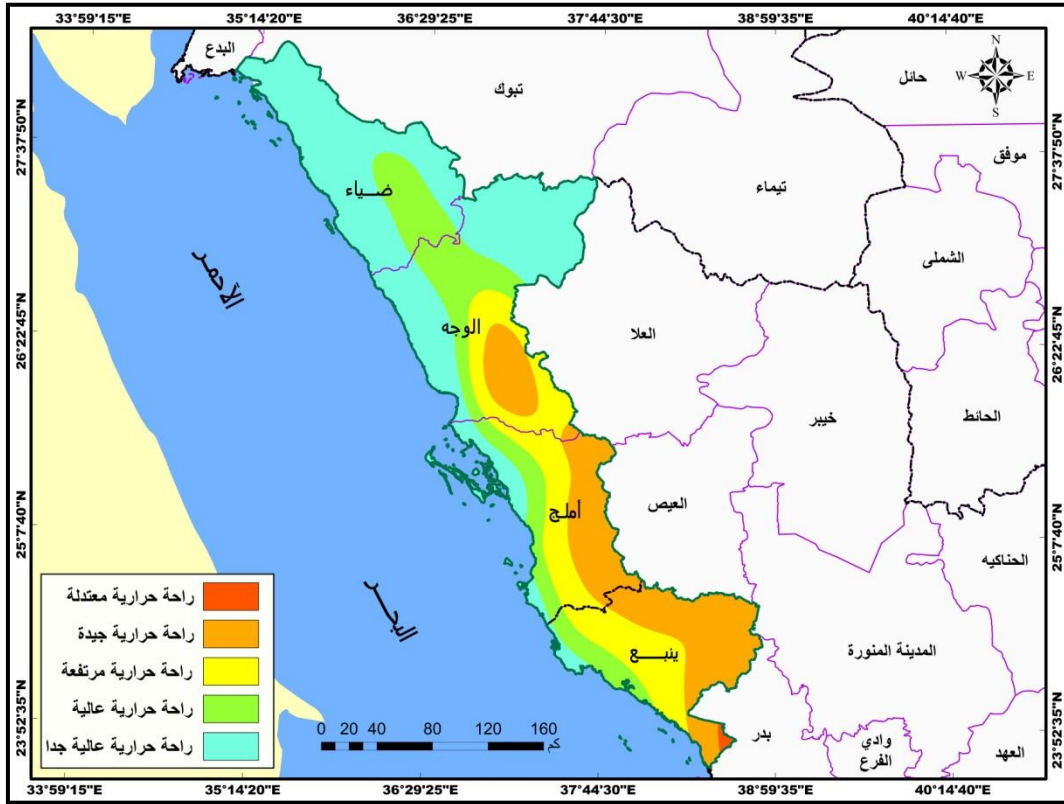
وبذلك تظهر نتائج قياس الحرارة الفاعلة بواسطة مؤشر راحة المناخ خلال النهار تباين توزيعها من مكان لآخر في المنطقة، حيث ترتفع ملاءمة شمال المنطقة لممارسة الأنشطة السياحية أكثر من جنوباً، ومما يؤكد هذا التباين تراوح مؤشر الحرارة الفاعلة خلال النهار بين ٢٢,١ - ٢٩,٥ م، بمعدل مكاني لمؤشر الراحة خلال النهار على مستوى المنطقة بلغ ٢٦,٤ م، مما يعني ان غالبية مساحة المنطقة تتصف بمناخ ذو ملاءمة عالية لممارسة الأنشطة السياحية خلال النهار.

وتبين نتائج تصنيف ملاءمة منطقة الدراسة للأنشطة السياحية حسب مؤشر الراحة خلال النهار شكل (٦) تغطية المنطقة التي تتصف بملاءمة عالية جداً للسياحة خلال النهار حيث تتراوح الحرارة الفاعلة بين ٢٢ - ٢٦ م شمال وغرب محافظتي ضباء والوجه وغرب محافظة امالج وشمال غرب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ١٩٨٧٤,٦٦ كم^٢، بنسبة ٤١٪ من مساحة المنطقة.

وتقع المنطقة التي تتصف بملاءمة عالية للأنشطة السياحية خلال النهار حيث تتراوح الحرارة الفاعلة بين ٢٦ - ٢٧ م وسط محافظتي ضباء والوجه ووسط وغرب محافظة امالج وغرب محافظة ينبع، بمساحة تصل الى ٨٦١١,٨٦ كم^٢، بنسبة ١٧,٧٧٪ من مساحة المنطقة. وتظهر المنطقة التي تتسم بملاءمة مرتفعة لممارسة السياحة خلال النهار حيث تتراوح الحرارة الفاعلة بين ٢٧ - ٢٨ م وسط محافظتي الوجه وامالج ووسط وغرب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ٨٩٥٠,٨٨ كم^٢، بنسبة ١٨,٤٦٪ من مساحة المنطقة.

وتغطي المنطقة التي تتسم بملاءمة جيدة لممارسة أنشطة السياحة خلال النهار حيث تتراوح قيمة الحرارة الفاعلة بين ٢٨ - ٢٩ م وسط محافظة الوجه وشرق محافظتي امالج وينبع، بمساحة ١٠٩٠٢,٣١ كم^٢، بنسبة ٢٢,٥٪ من مساحة المنطقة. وتبرز منطقة الملاءمة المعتدلة للسياحة في النهار حيث تتراوح قيمة الحرارة الفاعلة بين ٢٩ - ٣٠ م جنوب شرق محافظة ينبع، بمساحة صغير لا تتجاوز ١٣٦,٠٢٥ كم^٢، بنسبة ٠,٢٨٪ من إجمالي مساحة المنطقة.

شكل رقم (٦) الراحة الحرارية خلال النهار بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



المصدر: الباحث بالاعتماد على الشكلين (٢، ٤).

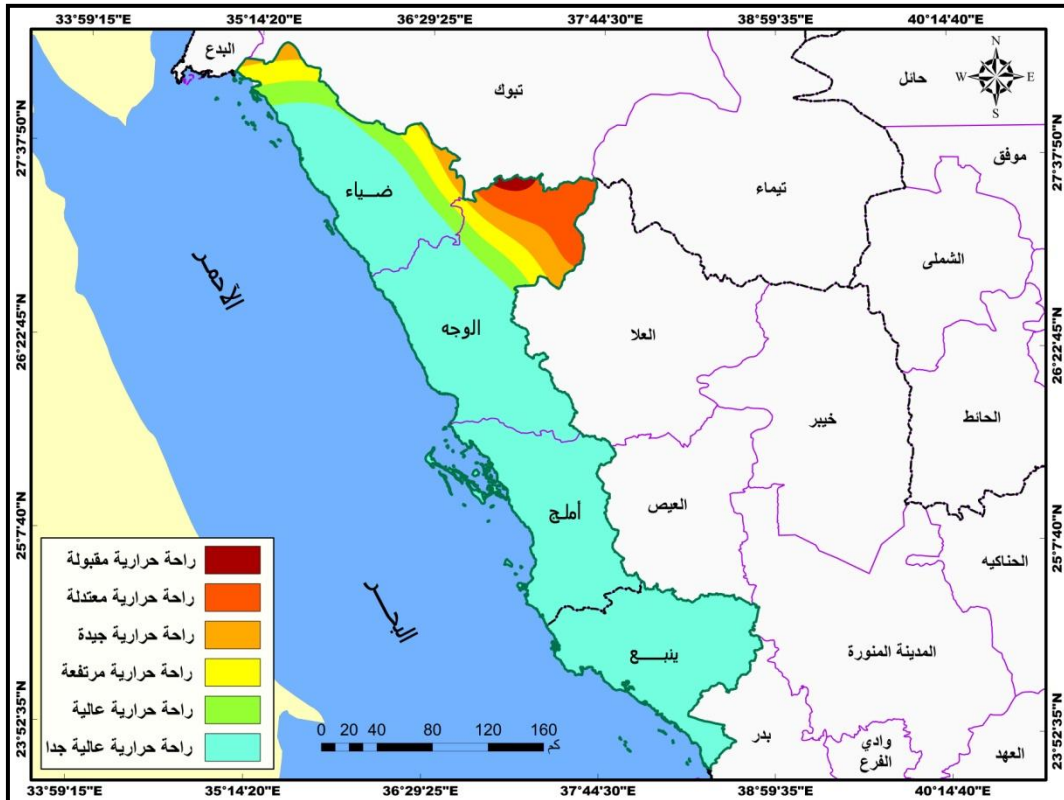
(د) الراحة الحرارية اليومية: في المقابل توصلت نتائج تحديد الراحة المناخية خلال اليوم بمؤشر الحرارة الفاعلة اليومية، الذي يحسب بالاعتماد على معدلي الحرارة والرطوبة النسبية، وتبين نتائج تحليل توزيع الحرارة الفاعلة اليومية تباين مستويات الراحة المناخية اليومية في المنطقة، اذا تظهر نتائج هذا المؤشر ارتفاع الملاءمة جنوب المنطقة، وتراجعها مع الاتجاه شمالا، وتراوحت الحرارة الفاعلة اليومية بين $15,6^{\circ}$ - $24,8^{\circ}$ م، بمعدل مكاني للمنطقة بلغ $20,7^{\circ}$ م، وبالتالي تقع غالبية المنطقة ضمن المناطق التي تتسم بملاءمة مناخية يومية تامة لممارسة النشاط السياحي.

وتبين نتائج تصنيف ملاءمة الراحة المناخية اليومية للأنشطة السياحية بمنطقة الدراسة بموجب نتائج مؤشر الراحة اليومية شكل (٧) تغطية المنطقة التي تتصف بملاءمة عالية جدا للسياحة خلال النهار حيث تتراوح الحرارة الفاعلة بين 20° - 25° م غالبية المنطقة فهي تغطي محافظتي ينبع واملج وجزء كبير من محافظتي الوجه وضياء، بمساحة بلغت $38374,92$ كم^٢، بنسبة $79,17\%$ من مساحة المنطقة.

وتقع المنطقة التي تتصف بملاءمة عالية للسياحة اليومية أينما تتراوح الحرارة الفاعلة بين ٢٠ - ١٩ م وسط محافظتي ضياء والوجه، بمساحة وصلت الى ٢٩٩٥,٠٢ كم^٢، بنسبة ١٧,١٧٪ من مساحة المنطقة. وتبرز المنطقة التي تتسم بملاءمة مرتفعة لممارسة أنشطة السياحة حيث تتراوح الحرارة الفاعلة اليومية بين ١٩ - ١٨ م وسط محافظة الوجه وشمال وشرق محافظة ضياء، بمساحة ٢٥٠٦,٢٥ كم^٢، بنسبة ١٧,١٧٪ من مساحة المنطقة.

وتظهر المنطقة التي تتسم بملاءمة مناخية جيدة لممارسة السياحة حيث تتراوح الحرارة الفاعلة اليومية بين ١٨ - ١٧ م وسط شرق محافظة الوجه وشرق وأقصى شمال محافظة ضياء، بمساحة بلغت ١٩٦٦,٢٥ كم^٢، بنسبة ٤,٠٥٪ من مساحة المنطقة. وتقع المنطقة ذات الملاءمة المناخية المعتدلة للسياحة اليومية حيث تتراوح الحرارة الفاعلة بين ١٧ - ١٦ م شمال شرق محافظة الوجه، بمساحة ٢٤٠٩,٢٣ كم^٢، بنسبة ٤,٩٧٪ من مساحة المنطقة. بينما تقع المنطقة ذات الملاءمة المناخية المقبولة لممارسة السياحة حيث تتراوح الحرارة الفاعلة اليومية بين ١٦ - ١٥ م شمال شرق محافظة الوجه، بمساحة ٢٢٤,٠٧ كم^٢، بنسبة ٠,٤٦٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة.

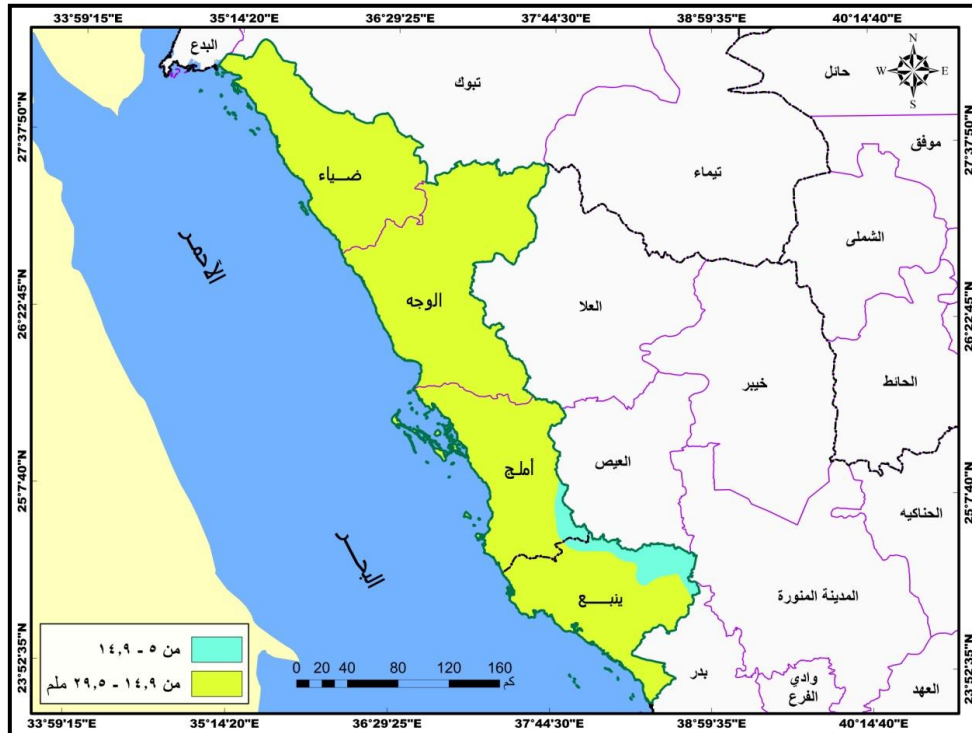
شكل رقم (٧) الراحة الحرارية اليومية بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



هـ) الأمطار: يصف مؤشر مناخ السياحة علاقة الملاءمة المناخية للسياحية بعنصر الأمطار بالعكسية، فكلما زادت كمية الأمطار تقل الملاءمة المناخية للسياحة والعكس، وبذلك تبين نتائج تحليل توزيع الأمطار في المنطقة بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣ تباين توزيعها حيث ترتفع جنوب شرق محافظة امالج وشمال وشرق محافظة ينبع، وتراجع كميتها في بقية المناطق، وعليه فقد تراوح معدل كمية الأمطار الشهرية خلال هذه المدة بين ٥,٤ ملم الى ٢٠,٣ ملم، بمعدل مكاني على مستوى منطقة الدراسة بلغ ٩,٢ ملم شهرياً، وتعكس قيمة المعدل ملاءمة عالية جداً للأمطار المنطقة فيما يتعلق بممارسة الأنشطة السياحية.

وتظهر نتائج تصنيف طبقة الأمطار حسب حدود فئات مؤشر مناخ السياحة في الشكل (١٠) وجود نطاقين فقط الاول يتصف بملاءمة عالية للسياحة غالبية مساحة المنطقة، حيث تغطي هذه الفئة كل مساحة محافظتي ضباء والوجه، وأغلبية مساحة محافظتي امالج ونبع، وذلك حيث تتراوح كمية الأمطار شهرياً بين ١٤,٩ - ٢١ ملم، بمساحة وصلت الى ٤٦٠٩٤,٨٩ كم^٢، بنسبة ٩٥,٠٩٪ من مساحة المنطقة. ويتصف النطاق الثاني لتصنيف الأمطار بملاءمة عالية جداً لممارسة الأنشطة السياحية، وذلك حيث تقل كمية الأمطار عن ١٤,٩ ملم/شهرياً شمال وشرق محافظة ينبع وجنوب شرق محافظة امالج، بمساحة بلغت ٢٣٨٠,٨٤ كم^٢، بنسبة ٤,٩١٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة.

شكل رقم (١٠) فئات كمية الأمطار الشهرية في المنطقة بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



المصدر: الباحث بالاعتماد على بيانات القمر (GPM).

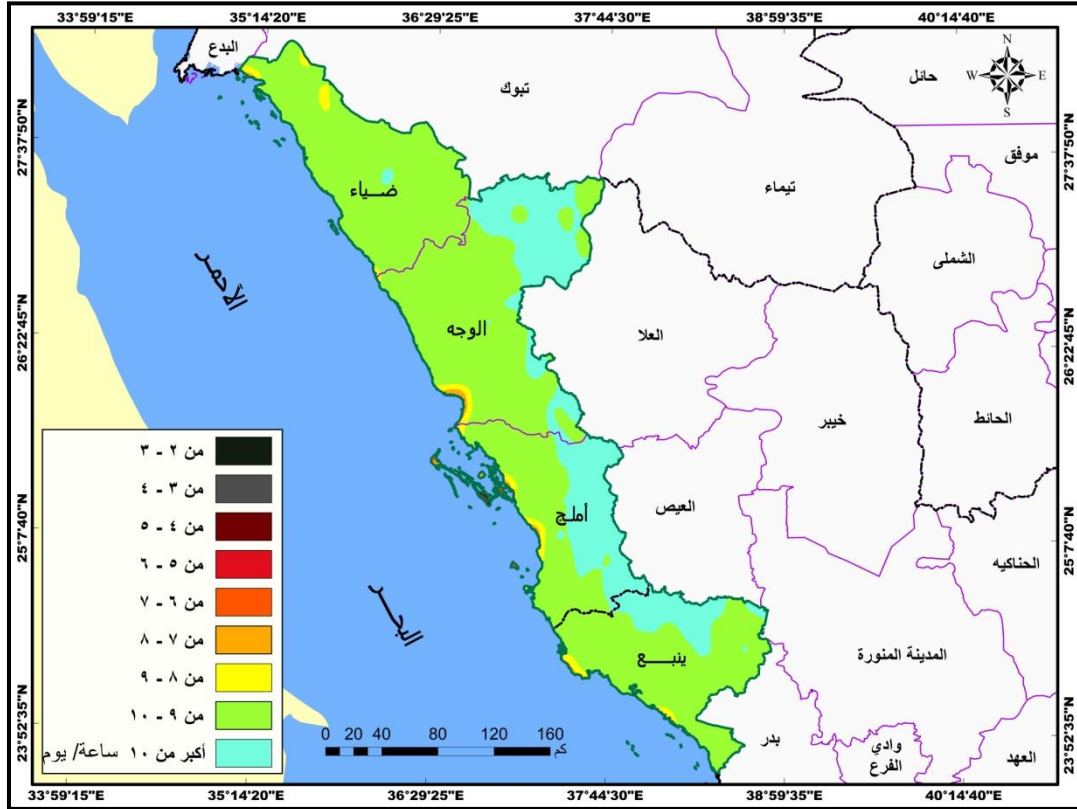
(و) الاشعاع الشمسي: يرى مؤشر مناخ السياحة ان تأثير عدد ساعات الاشعاع بالملاءمة المناخية لممارسة الانشطة السياحية بالطردية، فكلما زادت عدد ساعات الاشعاع زادت ملاءمة المناخ للسياحة والعكس، وبذلك توصلت نتائج تحليل توزيع عدد ساعات الاشعاع الشمسي في منطقة الدراسة بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣ تراوح ساعات الاشعاع بين ٢,١ بمناطق الجروف البحرية والجزر الصغيرة في البحر الأحمر، الى ١٠,٨ ساعة/يوم جنوب شرق وشرق المنطقة، بمعدل مكاني لساعات الاشعاع بلغ ٩,٧ ساعات/يوم، مما يعني وقوع غالبية المنطقة ضمن اشعاع ذو ملاءمة عالية جدا للسياحة.

بناء على ذلك يوضح شكل (٨) وقوع المنطقة التي تتصف بملاءمة عالية جدا للأنشطة السياحية حيث تتجاوز عدد ساعات الاشعاع الشمسي عن ١٠ ساعات/يوم شمال محافظة ينبع وشرق محافظة امالج وشرق ووسط محافظة الوجه ووسط محافظة ضياء، بمساحة ١٠٩٧٥,٤٨ كم^٢، بنسبة ٢٢,٦٥٪ من مساحة المنطقة. وتغطي الفئة التي يتسم اشعاعها بملاءمة عالية لممارسة السياحة حيث تتراوح ساعات الاشعاع بين ١٠ - ٩ ساعات/يوم غالبية المنطقة حيث تغطي غالبية محافظة ضياء وغرب ووسط ينبع وامالج وجنوب وجنوب شرق وغرب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ٣٥٩٨٩,٤١ كم^٢، بنسبة ٧٤,٢٥٪ من مساحة المنطقة.

وتبرز الفئة التي يتصف اشعاعها بملاءمة مرتفعة للسياحة حيث ساعات الاشعاع تتراوح بين ٨ - ٩ ساعات/يوم شمال محافظة ضياء وجنوب غرب الوجه وغرب امالج وينبع، بمساحة تصل الى ١٠٣٠,٢٦ كم^٢، بنسبة ٢,١٢٪ من مساحة المنطقة. وتظهر الفئة التي تتسم بإشعاع ملائم بصورة جيدة للسياحة حيث تتراوح ساعات الاشعاع بين ٧ - ٨ ساعات/يوم جنوب غرب ضياء وشمال غرب وجنوب غرب الوجه وغرب محافظتي امالج وينبع، بمساحة ٢٩١,٩٦ كم^٢، بنسبة ٠,٦٪ من مساحة المنطقة.

وتنتشر فئة الاشعاع معتدل الملاءمة للسياحة حيث ساعات الاشعاع بين ٧ - ٦ ساعات/يوم جنوب غرب وشمال غرب محافظتي ضياء والوجه وبمحاذاة الساحل لمحافظة امالج وينبع، بمساحة تصل الى ٩٣,٨١ كم^٢، بنسبة ٠,٢٪ من مساحة المنطقة. وتقع فئة الاشعاع المقبول للسياحة حيث تتراوح ساعات الاشعاع بين ٦ - ٥ ساعات/يوم، والفئة التي يتسم اشعاعها بضعف ملاءمته للسياحة حيث ساعات الاشعاع تتراوح بين ٥ - ٤ ساعات/يوم، وفئة ساعات الاشعاع التي تتسم بملاءمة ضعيفة جدا للسياحة بين ٤ - ٣ ساعات/يوم، وفئة ساعات الاشعاع غير الملائمة للسياحة بين ٣ - ٢ ساعة/يوم، في الجزر الواقعة في البحر الأحمر قبالة ساحلي محافظتي الوجه وامالج وجنوب غرب محافظة ينبع، بمساحة بلغت للفئات الأربعة حوالي ٩٤,٨ كم^٢، بنسبة ٠,٢٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة.

شكل رقم (٨) فئات معدل عدد ساعات الاشعاع الشمسي في المنطقة بين عامي ١٩٩٣-٢٠٢٣



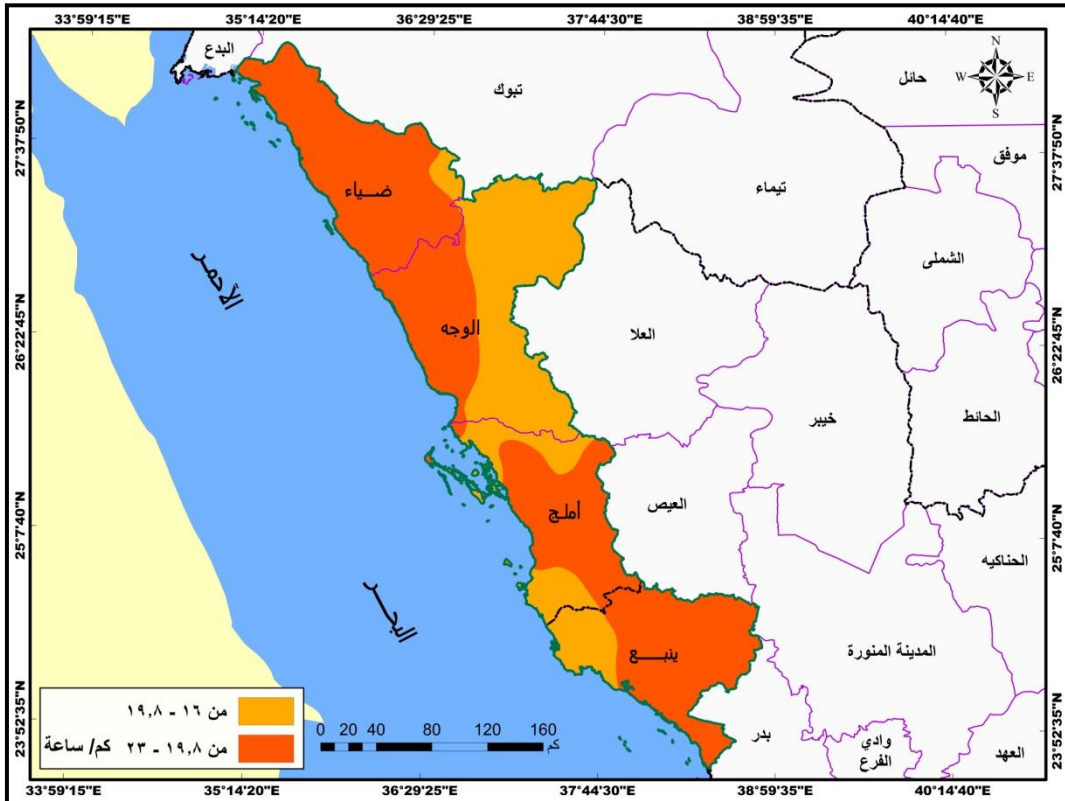
المصدر: الباحث بالاعتماد على بيانات القمر (FLDAS).

ز) الرياح: تتصف علاقة الملاءمة المناخية للسياحة بسرعة الرياح حسب مؤشر مناخ السياحة بالعكسية، فكلما زادت سرعة الرياح تقل الملاءمة المناخية لممارسة الأنشطة السياحية والعكس، وعليه فقد توصلت نتائج تحليل معدل سرعة الرياح بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣ الى تباين توزيعها من مكان لآخر في المنطقة، حيث ترتفع جنوب شرق وشرق ووسط المنطقة وتقل شمال غرب وجنوب شرقها، وتراوح معدل سرعتها بين ١٦,٩ كم/ساعة الى ٢٢,٩ كم/ساعة، بمعدل مكاني للمنطقة بلغ ١٩,٣ كم/ساعة، وتؤكد هذه القيمة وقوع غالبية المنطقة بفتة ذات ملاءمة مقبولة لممارسة السياحة حسب معيار سرعة الرياح.

وتبين نتائج تصنيف سرعة رياح المنطقة حسب الحدود الخاصة بمؤشر مناخ السياحة في الشكل (٩) وقوع الفتة التي تتسم بسرعة رياحها بملاءمة معتدلة للأنشطة السياحية حيث تتراوح سرعة الرياح بين ١٦ - ١٩,٨ كم/ساعة، جنوب شرق محافظة ضياء وشرق محافظة الوجه وشمال وجنوب شرق محافظة امليج وشمال غرب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ١٦٧٢٦,٥٥ كم^٢، بنسبة ٣٤,٥٪ من مساحة المنطقة.

وتغطي الفئة التي تتسم سرعة الرياح فيها بملاءمة مقبولة للسياحة حيث تراوح سرعة الرياح بين ١٩,٨ - ٢٣ كم/ساعة غالبية مساحة محافظة ضباء وشمال غرب وغرب محافظة الوجه ووسط وغرب وجنوب شرق محافظة امالج شرق وجنوب محافظة ينبع، بمساحة بلغت ٣١٧٤٩,١٩ كم^٢، بنسبة ٦٥,٥٪.

شكل رقم (٩) فئات سرعة الرياح في المنطقة بين عامي ١٩٩٣-٢٠٢٣



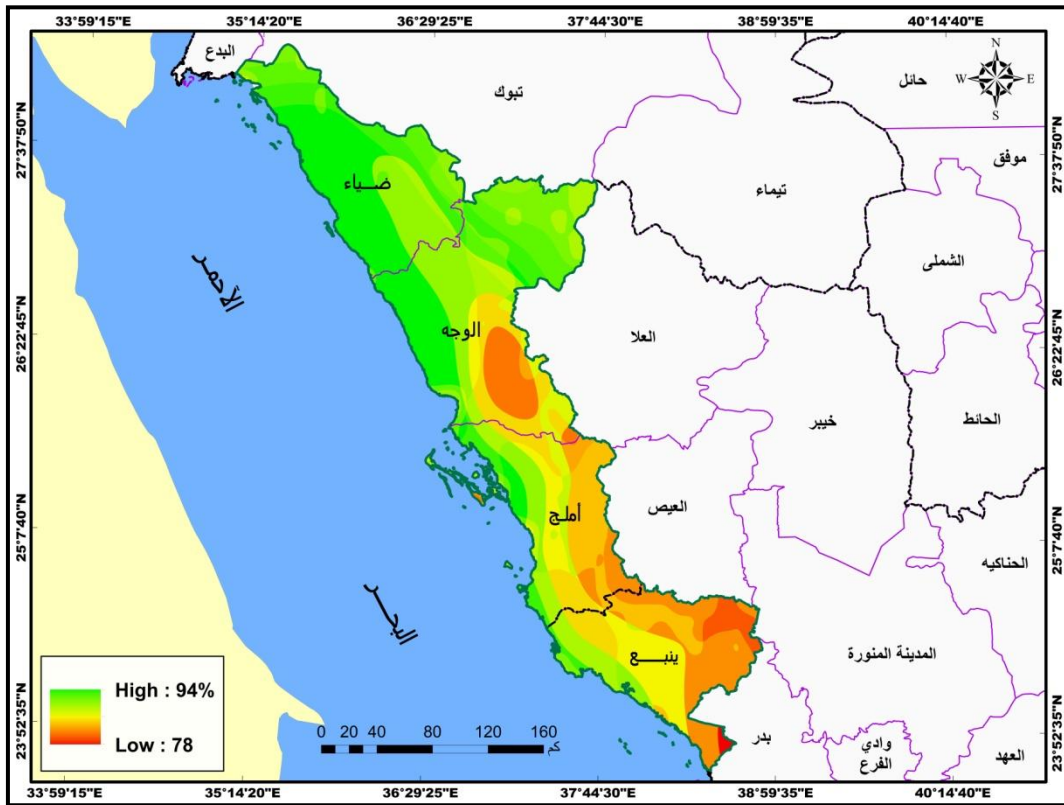
المصدر: الباحث بالاعتماد على بيانات القمر (FLDAS).

ثانياً) الملاءمة المناخية للسياحة: يعتبر مؤشر مناخ السياحة أداة فعالة لتقييم مدى ملاءمة الظروف المناخية للسياحة (Lewis, et al, 2009, p. 3). وتعتمد الملاءمة لتحديد نطاقات الراحة على الناحية الفسيولوجية لجسم الإنسان كمعيار، وتطبيقها على البيانات المناخية لتحديد الراحة المناخية للأنشطة الخارجية. ويعتبر العنصر الجمالي للملاءمة المناخية للسياحة على نطاق واسع شكلاً من أشكال التأثير النفسي المرتبط بالطبيعة (Fichett, et al, 2016, p. 361).

وبذلك توضح نتائج تطبيق مؤشر مناخ السياحة لتقييم ملاءمة المنطقة للأنشطة السياحية تباين نسب الملاءمة المناخية للسياحة في المنطقة، ومما يدل على ذلك شكل (١١) تراوح نسب مؤشر المناخ السياحي بين ٧٨٪ في المناطق التي تتصف بملاءمة مناخية جيد جداً للأنشطة السياحية، إلى ٩٤٪ في

المناطق التي تتسم بوجود مناخ مثالي للسياحة، بمعدل على المستوى المكاني لمنطقة الدراسة بلغ ٨٨,٥٪، وتؤكد هذه النسبة ان غالبية المنطقة تتصف بمناخ ممتاز لممارسة الانشطة السياحية.

شكل رقم (١١) نسب الملاءمة المناخية للسياحة بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



المصدر: الباحث بالاعتماد على طبقات الخرائط (٦، ٧، ٨، ٩، ١٠).

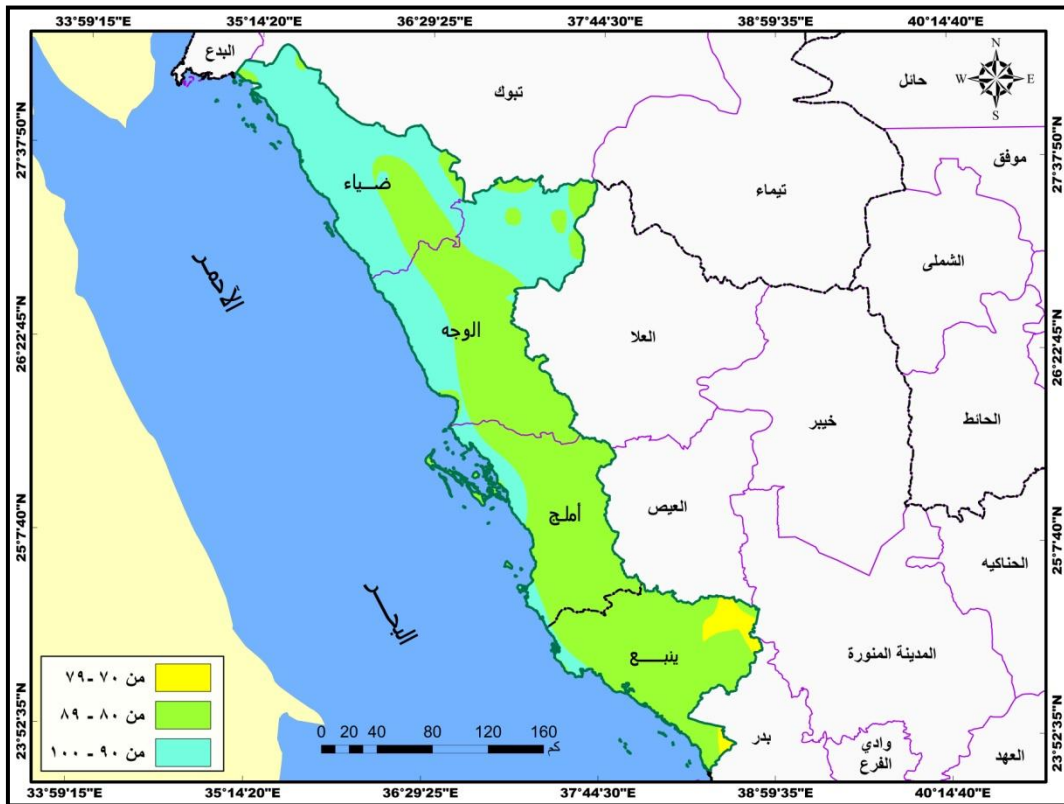
وتوضح نتائج تصنيف طبقة مؤشر المناخ السياحي في الشكل (١١) وذلك حسب حدود فئات التصنيف المعتمدة بهذا المؤشر وجود ثلاثة نطاقات للراحة المناخية للسياحة الأول: يتصف بمناخ جيد جدا لممارسة الانشطة السياحية، وذلك في المنطقة التي تتراوح فيها نسب مؤشر المناخ السياحي بين ٧٠ - ٧٩٪، ويقع هذا النطاق جنوب شرق وشرق محافظة ينبع، الجزر المنتشرة بمحاذاة سواحل محافظات شمال البحر الأحمر، وتتصف هذه المنطقة بملاءمة تتراوح بين المقبولة الى المرتفعة لكل من الراحة الحرارية النهارية واليومية والأمطار وعدد ساعات الاشعاع الشمسي اليومي وسرعة الرياح بمساحة ٩٣٤,٠٩ كم^٢، بنسبة ١,٩٢٪ من مساحة المنطقة.

ويغطي نطاق الراحة المناخية الممتازة لممارسة النشاط السياحي غالبية مساحة محافظتي ينبع واملج وأجزاء واسعة جنوب شرق ووسط وشرق محافظة الوجه، ووسط وجنوب شرق وشمال

وشمال غرب محافظة ضياء، وذلك حيث تتراوح نسب مؤشر المناخ السياحي بين ٨٠ - ٨٩٪، وتتسم هذه المنطقة بملاءمة عالية الى عالية جدا لغالبية عناصر مؤشر مناخ السياحة لاسيما الراحة الحرارية النهارية واليومية والأمطار وعدد ساعات الاشعاع الشمسي اليومي، وتبلغ مساحة هذه المنطقة ٢٩٥٠٨,٧٤ كم^٢، بنسبة ٦٠,٨٨٪ من إجمالي مساحة المنطقة.

ويظهر نطاق المناخ المثالي لممارسة الأنشطة السياحية شمال منطقة الدراسة، حيث يغطي شمال وغرب ووسط محافظة ضياء، وغرب ووسط شرق محافظة الوجه، وشمال غرب وجنوب غرب محافظة امالج، وشمال غرب محافظة ينبع في المناطق التي تتراوح فيها نسب مؤشر المناخ السياحي بين ٩٠ - ١٠٠٪، بمساحة ١٨٠٣٢,٩ كم^٢، بنسبة ٣٧,٢٪ من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتمتاز هذه المنطقة كما اظهرت النتائج في السابق بملاءمة عالية جدا لمستوى الراحة الحرارية في النهار، وملاءمة عالية الى عالية جدا لكل من الراحة الحرارية في اليوم وللأمطار وساعات الاشعاع الشمسي اليومي، وملاءمة مقبولة لسرعة الرياح.

شكل رقم (١٢) فئات الراحة المناخية حسب مؤشر المناخ السياحي بين عامي ١٩٩٣ - ٢٠٢٣



المصدر: الباحث بالاعتماد على شكل رقم (١١).

الخاتمة:

يعتبر المناخ من أهم المتغيرات البيئية المؤثرة في قطاع السياحة بمختلف أنحاء العالم، وتعتبر عناصر المناخ من الموارد التي يمكن استغلالها في صناعة السياحة بمدن المملكة الساحلية شمال البحر الأحمر، ويعتبر استغلال الموارد الطبيعية عامة؛ لاسيما ملاءمة المناخ مهم في تحقيق التنمية المستدامة للقطاع السياحي بهذه المدن.

وعلى ضوء هذه الأهمية القصوى أعطت رؤية المملكة ٢٠٢٠ - ٢٠٣٠ تنمية السياحة بهذه المدن أهمية كبيرة، وحصلت مشاريع السياحة في هذه المحافظات على اهتمام كبير ضمن خطط الرؤية، حيث عملت الدولة على اطلاق عدة مشاريع سياحية ضخمة مع بدء أعمال رؤية السعودية ٢٠٣٠، من أبرزها مشروع البحر الأحمر القائم على أحد أكثر المواقع الطبيعية جمالاً وتنوعاً، بالتعاون مع أهم الشركات العالمية في قطاع الضيافة والفندقة، لتطوير منتجعات سياحية استثنائية في محافظات ينبع وأملج والوجه وضياء، على بُعد مسافات قليلة من المحميات الطبيعية، والبراكين الخاملة في منطقة حرة الرهاة.

وتعتبر محافظات هذه المنطقة من أهم مناطق المملكة التي تتسم بملاءمة مناخية لممارسة وتنمية قطاع السياحة، وعلى ضوء هذه الأهمية قامت هذه الدراسة بتحليل الملاءمة المناخية للنشاط السياحي، وإبراز الامكانيات المناخية لممارسة الأنشطة السياحية بهذه المحافظات بالاعتماد على بيانات عناصر المناخ لمدة ٣٠ عام، وبموجبها حددت المناطق الملائمة مناخياً لتنمية السياحة في هذه المنطقة، بما يساعد الجهات التخطيطية المختصة في وزارة السياحة والمستثمرين، على معرفة المناطق الأكثر ملاءمة مناخياً لتركيز مشاريع التنمية المستدامة في المجال السياحي، وبما يساعد السائح على المواقع الملائمة مناخياً لممارسة نشاطهم السياحي.

وفي ظل اهتمام المملكة بتنمية السياحة كنشاط اقتصادي، ونظراً لارتباط استدامة تنمية السياحة في منطقة الدراسة بعناصر المناخ، استخدمت الدراسة أهم المؤشرات الكمية وأكثرها استعمالاً في تحديد مدى ملائمة مناخ المنطقة للترويج والسياحة، حيث يعتمد هذا المؤشر على العناصر الأساسية الطبيعية والحيوية لراحة الإنسان، فضلاً عن شموليته في تقييم أثر الحرارة والمقومات الجمالية والفيزيائية، وتسمح طبيعة التطبيق على مختلف الأنشطة السياحية، ومحاكاة تأثير تغير المناخ على نفقات السياحة في المستقبل.

وعليه فقد توصلت نتائج تطبيق هذا المؤشر مناخ السياحة الى أن ملاءمة مناخ هذه المحافظات لممارسة النشاط السياحي تراوحت بين ٧٨٪ في المناطق التي تتصف بملاءمة مناخية جيد جدا

للأنشطة السياحية، إلى ٩٤٪ في المناطق التي تتسم بوجود مناخ مثالي للسياحة، بمتوسط على مستوى المنطقة بلغ ٨٨,٥٪، أي أن المنطقة بصورة عامة تتصف بمناخ ممتاز لممارسة الأنشطة السياحية.

وبذلك توصي هذه الدراسة الجهات التخطيطية المختصة في وزارة السياحة إلى تركيز مشاريع تنمية السياحة شمال وغرب ووسط محافظة ضياء، وغرب ووسط شرق محافظة الوجه، وشمال غرب وجنوب غرب محافظة امالج، وشمال غرب محافظة ينبع في المناطق التي تجاوزت فيه ملاءمة المناخ للسياحة ٨٩٪، كما توصي الدراسة اصحاب رؤوس الاموال والمستثمرين في قطاع السياحة إلى الاستثمار بهذه المناطق، لأنها تتصف بملاءمة مثالية لعناصر المناخ التي بدورها تساعد على ديمومة استقطاب السائح لممارسة النشاط السياحي فيها غالبية أيام العام، وهذا يضمن للجهات التخطيطية في وزارة السياحة من تحقيق اهداف الرؤية في تنمية سياحية مستدامة، كما تضمن للمستثمرين نجاح مشاريع الاستثمارية في قطاع السياحة بهذه المناطق.

المصادر:

- توفيق، محمد. (٢٠١٩). مؤشر المناخ السياحي دراسة تطبيقية على مدينة الاقصر، مجلة كلية الآداب، جامعة سوهاج، العدد، ٥٠.
- زهران، مهران وائل. (٢٠٢١). تحليل الملاءمة المناخية للنشاط السياحي على ساحل البحر الأحمر باستخدام مؤشر المناخ السياحي: دراسة في المناخ السياحي. مجلة كلية الآداب بالوادي الجديد، العدد، ١٤، ص ٧٧٧ - ٨٣١.
- عبد النبي، شيماء السيد. (٢٠٢٤). تحديد العلاقة بين الراحة الحرارية والحركة السياحية بمدينة شرم الشيخ باستخدام مؤشر المناخ السياحي. مجلة مركز البحوث الجغرافية والكارتوجرافية، المجلد ٢١، العدد ٣٨، ص ٣٥٠-٤٠٠.
- ناسا، بيانات مناخ الأرض، تاريخ الحصول على بيانات عناصر المناخ (٢٠٢٤ / ٢ / ١٤)، رابط الموقع (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>)

- Adıgüzel, F., and Doğan, M. (2021). Determining Bioclimatic Comfort Areas in Summer with The Heat Index Method. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences, 7(2), 54-64.
- Andelkovic, G., Pavlovic, S., Durdic, S., Belij, M., Stojkovic, S. (2016). Tourism climate comfort index (TCCI) – an attempt to evaluate the climate comfort for tourism purposes: the example of Serbia, Glob NEST J. 18 (3), 482–493.
- Bakhtiari. B, Bakhtiari. A, Gorouh. A: (2018), Investigation of climate change impacts on tourism climate comfort in Iran, Global NEST Journal, 20 (2), 291-303.
- Bigano, A., Hamilton, J, Maddison, D., Tol, R. J. (2006). Predicting tourism flows under climate change, Climatic Change. 2006, 79, 175–180.

- Cao, K., Gao, J. (2022). Assessment of climatic conditions for tourism in Xinjiang, China Kaijun Cao EMAIL logo and Jun Gao, *Open Geosciences*, 14, 382–392. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0362>.
- Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR) Sri Lanka Build, *Environ*, 40, 1591–1601.
- Faraj, T. K., Tarawneh, Q.Y., Oroud. M. (2022). The applicability of the tourism climate index in a hot arid environment: Saudi Arabia as a case study, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (10), 1-20.
- Farajzadeh H, Matzarakis A. (2009). Quantification of climate for tourism in the northwest of Iran, *Meteorology Apple*, 16, 545–555.
- Fichett, J.M., Hoogendoorn, G., Robinson, D., 2016. Data challenges and solutions in the calculation of Tourism Climate Index (TCI) scores in South Africa. *Tourism* 64 (4), 359–370.
- Gungor, S., Cetin, M., and Adiguzel, F. (2021). Calculation of Comfortable Thermal Conditions for Mersin Urban City Planning in Turkey. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 14, 515-522.
- Hamilton, J., Tol, R. J. (2007). The impact of climate change on tourism in Germany, the UK and Ireland: a simulation study, *Reg Env Change*, 7, 161–172.
- Hasanah, N. A. I., Maryetnowati, D., Edelweis, F. N., Indriyani, F., Nugrahayu, Q. (2020). The climate comfort assessment for tourism purposes in Borobudur Temple Indonesia, *Heliyon*, 6, 1-9.
- Hein, L., Metzger, M. J., Moreno, A. (2009). Potential impacts of climate change on tourism; a case study for Spain, *Curr Opin Environ*, 1, 1- 8.
- Lewis, B. D., Howard, S., Moore, W. (2009). Climate change and tourism features in the Caribbean. Tenth annual Sir Arthur Lewis institute of social and economic studies conference: navigating risks and building resilience in small states, Cave Hill, Barbados[online]. <http://mpraubunimuenchende/21470>.
- Lin, T. P., Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan, *Int J Biometeorol*, 52, 281–290.
- Lin, T. P., Matzarakis, A. (2011). Tourism climate information based on human thermal perception in Taiwan and Eastern China, *Tour Manag*, 32, 492–500.
- Kovacs, A., Unger, J. (2014). Modification of the tourism climatic index to Central European climatic conditions – examples, *Idojaras*, 118, 147–165.
- Masoudi, M. (2021). Estimation of the spatial climate comfort distribution using tourism climate index (TCI) and inverse distance weighting (IDW) (case study: Fars Province, Iran), *Arab J Geosci*, 14 (363), 1-13.
- Mendezlazarro, P.A., Terrasa-soler, J.J., Torres-pena, C. (2014). Tourism and climate conditions in san juan, Puerto Rico 1993-2010, *Ecol Soc*, 19 (2).
- Mieczkowski, Z. (1985). The Tourism Climatic Index: A Method of Evaluating World Climates for Tourism, *Canadian Geographer/Le Géographe Canadien*, 29(3), 220-233.

-
- Perch, N. S., Amelung, B., Knutti, R. (2010). Future climate resources for tourism in Europe based on the daily Tourism Climatic Index, *Climatic Change*, 103, 363–381.
 - Perez, S. A., Solano, J. L., Mayor. L. R., Martínón. G.M. (2021). The Coastal Tourism Climate Index (CTCI): Development, Validation, and Application for Chinese Coastal Cities, *Sustainability*, 13, 1-12.
 - Scott, D., Mcboyle, G. (2001). Using a 'tourism climate index' to examine the implications of climate change for climate as a tourism resource, *Adaptation and Impacts Research Group, Environment Canada, at the Faculty of Environmental Studies, University of Waterloo, Ontario, Canada*, 69-88.
 - Sultana, F., Paul, A.K. (2023). Tourism Climate Index (TCI) for Assessing the Favourable Period for Tourism Recreation Activities with the Application of Geospatial Techniques. In: Paul, A.K., Paul, A. (eds) *Crisis on the Coast and Hinterland*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42231-7_28.
 - Yu, D.D., Rutty, M., Scott, D., Li, S. (2021). A comparison of the holiday climate index: beach and the tourism climate index across coastal destinations in China, *Int J Biometeorol*, 65, 741–748.

Climate suitability for sustainable tourism in the northwestern coastal provinces of Saudi Arabia by applying the tourism climate index in a geographic information systems environment

Dr. Ibrahim Abdullah Qaid Darwish¹

Abstract

The study aims to evaluate thermal suitability in particular and the climate in general for practicing tourism activity in northern Red Sea governorates of Saudi Arabia, through applying tourism climate index. the study's methodology included collecting data on climate elements necessary to apply tourism climate index, such as maximum and average temperature, minimum and average relative humidity, amount of rain, Number of hours of sunshine, and wind speed for several satellites from NASA's Earth Climate Data website. the study used geographic information systems to process data and derive maps of tourist climate elements, and relied on temperature and relative humidity to determine comfort index during the day and daily comfort index. Relying on two layers of thermal comfort, rain, radiation, and wind, tourism climate index equation was applied , and determine ranges of climate comfort for tourism.

The results of study confirmed that effective temperature during the day ranged between 22.1 - 29.5° C. Accordingly, the ranges of daytime comfort were distributed between moderate to very high comfort, with a spatial average of comfort across the study area 26.4 ° C. This confirms that the majority of them within high thermal comfort. the daily effective temperature ranged between 15.6-24.8° C, with daily comfort ranges ranging from acceptable to very high comfort. the spatial average of daily comfort in region reached 20.7° C, which means that In Yanbu, Umluj, Al Wajh and Duba governorates of it within very high thermal comfort. the percentages of tourism climate index ranged from 78% in areas characterized by very good climatic suitability for tourism activities, to 94% in areas characterized by an ideal climate for tourism, with an average at the spatial level for the study area of 88.5%, this percentage reflects that majority of region is characterized by excellent climatic suitability for tourism activities.

Keywords: non-profit sector, non-profit sector organizations, civil associations, civil institutions, sustainable development, spatial analysis, geographic information system

¹ Phd in Geography, Faculty of Arts, Department of Geography and Geographic information Systems, Ibb University, Yemen

رصد تلوث الهواء عبر غاز ثاني أكسيد الكبريت بمحافظه ينبع باستخدام التقنيات الجيومكانية

عالية علي عبدالله الاحمري^١ د. سلافة حاج الصافي^٢

الملخص :

تزايد أهمية مراقبة جودة الهواء في العصر الحالي نظرا لتأثيراته السلبية على البيئة والصحة العامة. يعتبر ثاني أكسيد الكبريت من الملوثات الهامة التي تؤثر على جودة الهواء وتتسبب في مشاكل صحية خطيرة عندما يتجاوز مستوى الحد المسموح به. وهدفت الدراسة إلى دراسة تركيز (غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2) في محافظه ينبع في المملكة العربية السعودية من خلال مرئيات القمر الصناعي Sentinel-5P)، وقياس ملوث SO_2 في المدّة من ٢٠١٨ إلى ٢٠٢١ م في منطقة الدراسة باستخدام الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية، وتقييم الصحة بين المرئيات الفضائية من القمر الصناعي (Sentinel-5P) ومحطات قياس جودة الهواء. وتم استخدام المنهج الاستقرائي التحليلي والمنهج الوصفي التحليلي، وتوصلت إلى عدد من النتائج أهمها: أنّ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) لمنطقة الدراسة ككل حسب بيانات المحطة الأرضية بلغ (١٢,١٢) ميكروجرام/متر مكعب، وايضاً حسب بيانات الاستشعار عن بعد بلغت (٨,٤٦) ميكروجرام/متر مكعب، وبالمقارنة مع المعدلات المصرح بها والمسموحة فإننا نجد أن النسبة المسموح بها (٨٠) ميكروجرام/متر مكعب، أي أن التركيز المقاس في منطقة الدراسة جاء أقل من الحدود المسموح بها عالمياً ومحلياً. كما أظهرت نتائج الدراسة الى وجود فروق ذات دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة ($\alpha = 0.05$) بين نتائج الطريقتين وفقاً لمتغير طريقة استخراج البيانات (الاستشعار عن بُعد وطريقة بيانات المحطات الأرضية). وتوصي الدراسة بإجراء مزيد من الدراسات التوسعية لتحسين النماذج الجيومكانية لرصد تلوث الهواء بثاني أكسيد الكبريت.

الكلمات المفتاحية: نظم معلومات جغرافية، مرئيات فضائية، جودة الهواء، الاستشعار عن بعد

^١ ماجستير جغرافيا -كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية- جامعة الملك سعود

^٢ أستاذ مشارك بقسم الجغرافيا- كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية- جامعة الملك سعود

مقدمة:

يُعدُّ التلوث البيئي الناتج من التنمية الصناعية من المصادر الأساسية التي تؤثر بشكل سلبي على صحة الإنسان، كما تؤدي بعض أنواع الملوثات ومستوياتها المرتفعة إلى حدوث تأثيرًا مباشرًا على صحة الإنسان كالتسمم الناتج من تلوث الهواء، ويمكن أن يكون التأثير غير مباشر أو بعيد المدى تتمثل باتصال الإنسان بمصدر التلوث بشكل مستمر، وتظهر أضراره على المدى البعيد (طاهر، ٢٠٠٩). يتم مراقبة جودة الهواء في جميع أنحاء العالم، ومنها المملكة العربية السعودية باستخدام محطات مراقبة جودة الهواء الأرضية التي تراقب ملوثات الهواء المختلفة في نقاط محددة، توفر شبكة المراقبة المستمرة معلومات حيوية لتقييم مستويات ملوثات الهواء. يتم استخدام البيانات المقاسة من محطات المراقبة هذه لأغراض مختلفة، ومن ذلك المقارنة مع معايير جودة الهواء لتحديد ما إذا كانت المستويات تتجاوز الحدود، وتحديد النقاط الساخنة للملوثات الهواء.

ومن أجل تغطية مكانية كاملة لمنطقة حضرية كبيرة؛ توجد حاجة إلى شبكة واسعة تتطلب قدرًا هائلًا من الموارد. بدلًا من ذلك يمكن استخدام أدوات الاستشعار عن بُعدٍ لتكملة المراقبة الأرضية. توفر مرئيات الأقمار الصناعية تغطية واسعة يمكن أن تساعد على تحسين برامج المراقبة. تُستخدم تقنيات الاستشعار عن بُعدٍ ونظم المعلومات الجغرافية أيضًا لتقييم عمود الأوزون الكلي، ورصد الفيضانات وتقييم الأضرار، واستخدام الأراضي وتناوب المحاصيل على سطح الأرض (De Sherbinin, 2014)، مما يؤكد أهمية مراقبة تلوث الهواء.

تعد محافظة ينبع ثاني أكبر مجمع صناعي في المملكة العربية السعودية. وقاعدة من قواعد التصنيع الثقيل فيها، تأسست في عهد الملك خالد بن عبد العزيز عام ١٩٧٩م (الخريف، ٢٠١٠). وبها شركات صناعية كبيرة مثل: سابك وأرامكو، وبها معالم عديدة منها المركز السياحي وتشتهر بكثرة الحدائق وتوفر الخدمات، وتحتوي على ميناء الملك فهد الصناعي بينبع، وتضم مشاريع ينبع الصناعية مشاريع بتروكيميائية، تركز على البترول وتصنيعه، وما يتعلق بذلك من معامل فنية، ومستودعات ضخمة، ومصفاة لتكرير البترول، وخطين ضخمين للأنابيب يمتدان على مسافة ١٢٠٠ كيلومتر بين الخليج العربي والبحر الأحمر.

وتؤدي هذه الصناعات إلى حدوث ملوثات وانتشار غازات سامة في المناطق المحيطة بالمدن الصناعية. وتؤثر سلبًا على مستوى جودة الهواء في هذه المناطق، ومن ثم تتأثر الحالة الصحية للسكان، وهذا يتفق مع دراسة كلٍّ من عويس (2013) ودراسة جعفر (2015) ودراسة الشباني (٢٠١٩) ودراسة خليفة وآخرين (٢٠١٦, Khalila, et al) ودراسة الشرقاوي (٢٠١٨) ودراسة سلمان وآخرين (Salman,

(et al: 2021). ولذلك تهدف الدراسة الحالية إلى دراسة ورصد التلوث في محافظة ينبع عبر الأقمار الاصطناعية.

يُعدُّ تلوث الهواء الناتج من التنمية الصناعية من المصادر الأساسية التي تؤثر سلبياً على صحة الإنسان. كما تؤدي بعض أنواع الملوثات ومستوياتها المرتفعة إلى حدوث تأثير مباشر على صحة الإنسان. وتتجه المملكة العربية السعودية إلى تنوع مصادر الدخل القومي، وهذا من شأنه أن يتم الاعتماد على الصناعات أكثر من النفط، ومن ثمَّ فإن مشكلة انبعاث الغازات من المدن الصناعية ستزداد. وينتج منها تلوث هواء يحتاج إلى اهتمام كبير من قبل الجهات المعنية بالحفاظ على البيئة وصحة الإنسان. وورد في تقرير الإدارة العامة للرصد البيئي للعام (٢٠١٩) لجودة الهواء في المملكة نتائج قياس تلوث الهواء في المملكة وتقدير جودة الهواء فيها، حيث كان الرقم الأساس السنوي (80) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) في حين بلغت نسبة غاز ثاني أكسيد الكبريت لعام ٢٠١٩ ما مجموعه (٩٦,٠٧) كمعدل أعلى في كل ساعة، وأقل نسبة في الساعة (٠,١٦) وكان المعدل المتوسط السنوي هو (١٢,٣٥) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) في محطة الرصد بمحافظة ينبع وهي أعلى نسبة في جميع محطات رصد منطقة المدينة المنورة (تقرير الإدارة العامة للرصد البيئي للعام ٢٠١٩). ومن هنا برزت مشكلة الدراسة الحالية بقصد التعرف على رصد تلوث الهواء في محافظة ينبع باستخدام الاستشعار عن بُعدٍ ونظم المعلومات الجغرافية.

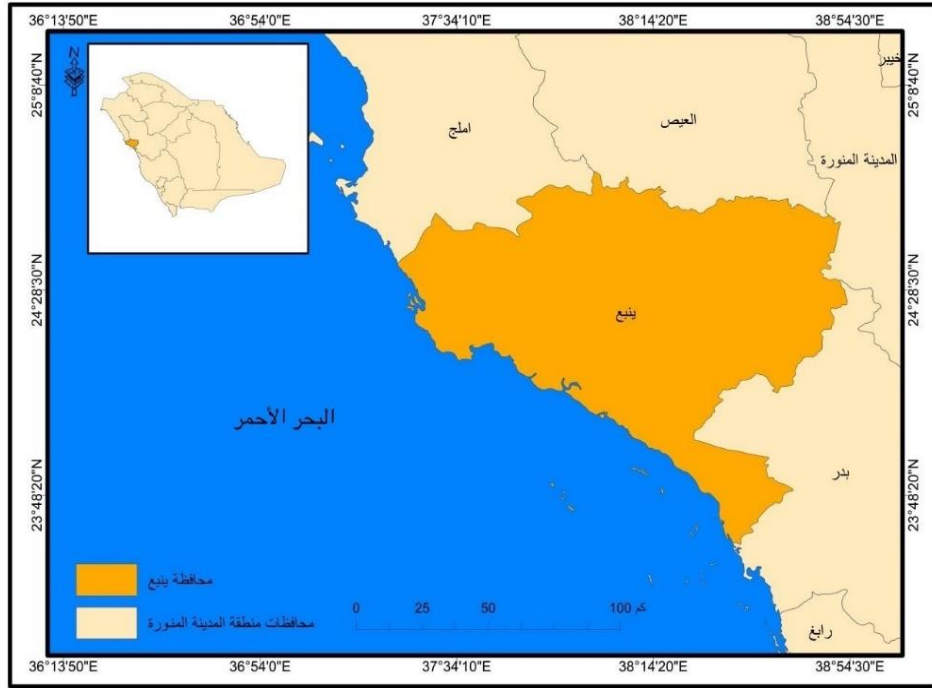
أهداف الدراسة: تهدف الدراسة الحالية إلى التعرف على ما يأتي: دراسة تركيز (غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2) في محافظة ينبع من خلال مرئيات القمر الصناعي (Sentinel-5P)، ثم مقارنة ملوث SO_2 في المدَّة من ٢٠١٨ إلى ٢٠٢١ في منطقة الدراسة باستخدام الاستشعار عن بُعدٍ ونظم المعلومات الجغرافية، ومن ثم تقييم الصحة بين المرئيات الفضائية من القمر الصناعي (Sentinel-5P) ومحطات قياس جودة الهواء.

منطقة الدراسة:

محافظة ينبع إحدى المحافظات التابعة لمنطقة المدينة المنورة في المملكة العربية السعودية، وتقع فلكياً بين دائرتي عرض ($23^{\circ}28'15''$ _ $24^{\circ}48'35''$) شمالاً، وعلى خطِّي طول ($38^{\circ}54'30''$ _ $37^{\circ}14'5''$) شرقاً. وتقع في غرب المملكة العربية السعودية على الساحل الشرقي للبحر الأحمر كما في الشكل (١)، وتُعدُّ ثانية مدينة سعودية على البحر الأحمر من حيث المساحة بعد مدينة جُدَّة، حيث تبلغ مساحتها نحو (١٨٠٥٨ كم^٢). وبلغ عدد السكان عام ٢٠١٧ م نحو ٢٧٠ ألف نسمة. (الهيئة العامة للإحصاء، ٢٠١٧). وتمثل مدينة ينبع الصناعية ما نسبته ٢٥% من الناتج المحلي الصناعي بالمملكة و٢٢% من إجمالي الاستثمارات الصناعية الأجنبية بها. ومن الجدير بالذكر أنه وعلى الرغم من الطبيعة الصناعية للمدينة - إن جاز التعبير - فإنها تحتوي على كثير من المشروعات السكنية والترفيهية العملاقة،

ومن هذه المشروعات مشروع الواجبة البحرية، جزيرة النور، وجزيرة النورس، وحديقة الأمير سعود بن عبد الله بن ثنيان آل سعود الرياضية، وبحيرة ينبع الصناعية وتمتاز المدينة بحداثة نشأتها، حيث تأسست الهيئة الملكية للجبيل وينبع عام ١٩٧٥م، بموجب المرسوم الملكي رقم (م/٧٥)، الصادر في عهد الملك خالد بن عبد العزيز، وقد أنيط بالهيئة مسؤولية تخطيط وإنشاء وتطوير التجهيزات الأساسية، لمدينتي الجبيل وينبع الصناعيتين، لتحويلهما إلى مدينتين صناعيتين عالميتين. تضمنت الخطة التي وضعتها الهيئة الملكية، لتشييد مدينة ينبع الصناعية الخطوط العريضة لتحويل هذه المساحات الصحراوية إلى منطقة صناعية ومرافق سكنية مكثفة خلال ثلاثين عاما، بدأت في الفترة ما بين ١٩٧٥: ١٩٨٠م، ووضع حجر الأساس للمدينة الصناعية في ينبع في ١٩٧٩م.

الشكل رقم (١): منطقة الدراسة



المصدر: أمانة منطقة المدينة المنورة.

الخلفية العلمية:

دراسة سلمان وآخرين (Salman, et al: 2021): هدفت الدراسة إلى تقييم تلوث الهواء والحرارة في الضاحية الجنوبية لمدينة الرياض، حيث يعاني الناس من سوء نوعية الهواء نتيجة التطور السريع للمنشآت الصناعية في المنطقة. اشتملت الدراسة على توزيع استبيانات على ٤٠٥ من سكان تلك المنطقة من أجل الحصول على آرائهم حول تلوث الهواء. بالإضافة إلى ذلك، تم قياس درجة حرارة سطح الأرض و١٢ مكثفًا للهواء عند ١٨ نقطة. كما تم تقييم بيانات جودة الهواء من ٢٠١٦ إلى ٢٠٢٠ لمحطتي الخالدية

والطريق الدائري الجنوبي. تُعدّ المصفاة (مصفاة النفط) والمدينة الصناعية الثانية من العوامل الرئيسية المساهمة في تلوث الهواء، وتؤدي أيضًا إلى تأثير جزيرة الحرارة الحضرية من ارتفاع درجة الحرارة بسبب المصانع والأنشطة الصناعية. ومع ذلك، فإن جميع مكونات جودة الهواء التي تم قياسها أقل من الحدود القياسية باستثناء عنصر الجسيمات 10 (PM)، والذي يتجاوز الحدود القياسية في عدة أجزاء من منطقة الدراسة جزيرة الحرارة الحضرية وخلال عدة أشهر من العام. هذا يمكن أن يكون له بالتأكيد تأثير سلبي على صحة السكان. في الوقت نفسه، وجدت هذه الدراسة أن الإجراءات الوقائية المتخذة لوقف انتشار عدوى COVID-19 أدت إلى تأثير إيجابي في المنطقة من حيث تحسين جودة الهواء.

دراسة الشرقاوي (٢٠١٨): هدفت الدراسة إلى استخدام نظم المعلومات الجغرافية لتقييم مستويات تلوث الهواء في مدن حاضرة الدمام الثلاث: (الدمام والخبر والظهران). وكان الغرض الرئيس من استخدام نظام المعلومات الجغرافية هو وصف البيانات المتعلقة بجودة الهواء ورسم تخطيط لتركيزات ملوثات الهواء في المدن الثلاث. وفي كل مدينة تم وضع عدة معايير للاختيار العشوائي لموقعين أحدهما يمثل منطقة تجارية ذات نشاط مروري كبير، والآخر يمثل منطقة سكنية ذات نشاط مروري منخفض جدًا. ومن أهم نتائجها أنه قد وُجدَ أن تركيزات جميع الملوثات، باستثناء O_3 ، كانت الأعلى في الشوارع المرورية الثلاثة مقارنةً بتلك الموجودة في المناطق السكنية. وكانت تركيزات O_3 في جميع المواقع المختارة متساوية تقريبًا؛ مما يشير إلى أن تكوين غاز الأوزون الكيميائي الضوئي لا يعتمد فقط على تركيزات العناصر المكونة له، ولكن أيضًا على عوامل أخرى مثل الفترة اليومية وعوامل الأرصاد الجوية. وكان متوسط تركيزات PM و CO و SO_2 و VOCs في جميع الشوارع المرورية المختارة أعلى من معايير جودة الهواء الموصى بها AQGs، وقد كان من الاستنتاجات المهمة أن استخدام نظام المعلومات الجغرافية يُعدُّ أداة جيدة للتوزيع والتغيرات المكانية الملوثة للهواء.

دراسة يوسف وآخرين (٢٠١٦): هدفت الدراسة إلى فحص تركيزات وتأثيرات الجسيمات الدقيقة في المملكة العربية السعودية من خلال استكشاف التحليل العنقودي للبيانات الجديدة. تم استخدام بيانات الاستشعار عن بُعد لرصد اتجاه تركيزات الجسيمات عن طريق اشتقاق العمق البصري للهباء الجوي (AOD) من صور الأقمار الصناعية. يتم إجراء التحليل العنقودي لقيم $PM_{2.5}$ للمدن السعودية باستخدام إحصاء Anselin المحلي Moran's. تظهر النتائج اتجاهًا متزايدًا في تركيزات الجسيمات في المملكة العربية السعودية، وخاصة في بعض المناطق الحضرية المختارة. تتميز الأجزاء الشرقية والجنوبية الغربية من المملكة بتجمع قيم عالية بشكل ملحوظ. لقد تجاوزت بعض قيم $PM_{2.5}$ الحد الذي أشار إليه معيار منظمة الصحة العالمية (WHO) والأهداف التي تشكل أخطارًا صحية على سكان الحضر السعوديين.

دراسة خليلية وآخرين (Khalila, et al,2016): هدفت الدراسة إلى قياس جودة الهواء في ينبع، وتم تحليل ست سنوات من الملاحظات للملوثات المعايير O₃ وSO₂ والجسيمات (PM₁₀ وPM_{2.5}) وسلائف الأوزون المعروفة - المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) وأكاسيد النيتروجين (NO_x). تشير النتائج إلى ظروف متكررة محدودة المركبات العضوية المتطايرة حيث تزداد تركيزات الأوزون مع تناقص أكاسيد النيتروجين ومع زيادة المركبات العضوية المتطايرة عندما تكون أكاسيد النيتروجين وفيروسًا. بالنسبة للظروف المتبقية، يكون للأوزون علاقة معقدة غير خطية مع المركبات العضوية المتطايرة. تؤدي التفاعلات بين هذه العوامل في ينبع إلى تأثيرات قابلة للقياس على تلوث الهواء، ومن ذلك تأثير عطلة نهاية الأسبوع حيث تظل تركيزات الأوزون كما هي أو حتى تزيد على الرغم من انخفاض انبعاثات السلانف بشكل ملحوظ في عطلات نهاية الأسبوع. كان تلوث الهواء أقل خلال العيدين (الفطر والأضحى) ورمضان والحج. خلال شهر رمضان، كانت هناك انبعاثات كبيرة أثناء الليل حيث تنعكس دورة الحياة اليومية تقريبًا بين الليل والنهار. تم تقييم تجاوز معايير تلوث الهواء باستخدام معايير من وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، ومنظمة الصحة العالمية (WHO)، والرئاسة السعودية للأرصاد والبيئة (PME) واللوائح البيئية للهيئة الملكية (RCER). وبالنسبة للجسيمات الدقيقة (PM_{2.5})، أظهر تحليل الرياح تأثيرًا كبيرًا من الغبار الصحراوي. كما تم العثور على تجاوزات أقل لثاني أكسيد الكبريت، وأقل من ذلك بالنسبة للأوزون. وتم العثور على ظروف محدودة من المركبات العضوية المتطايرة المتكررة في ينبع بالمملكة العربية السعودية والتي تزيد من تلوث الأوزون إذا تم تقليل أكاسيد النيتروجين. في هذه البيئة الصحراوية، ينتج من زيادة الحياة الليلية أعلى مستويات المركبات العضوية المتطايرة وأكاسيد النيتروجين في الليل بدلاً من النهار. تزداد الآثار خلال شهر رمضان. تبلغ ذروة الجسيمات الدقيقة ذروتها مرتين في اليوم، وتحدث الذروة الصباحية بسبب حركة المرور وتزداد مع انخفاض الرياح، مما قد يمثل مخاوف صحية، ولكن ذروة الظهيرة الأكبر ناتجة من الرياح، وتزداد مع زيادة سرعة الرياح. تشير هذه الميزات إلى أنه يجب إعادة تعريف التعرض للملوثات لمثل هذه البيئة.

دراسة مذکور (٢٠٢١): الهدف الرئيس من هذه الدراسة هو رصد تأثير جائحة COVID-19 الذي ظهر في ديسمبر ٢٠١٩ وأعلنته منظمة الصحة العالمية جائحة عالمية في ١١ مارس ٢٠٢٠، على تغير المناخ والبيئة من خلال هذه الإجراءات. مثل فرض حظر تجول جزئي والحفاظ على إجراءات التباعد الاجتماعي، وقد عاقت هذه الإجراءات معدلات تحركات الناس. وقد أدت هذه الأحداث إلى انخفاض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وملوثات الهواء، مما أدى إلى تحسين الظروف البيئية وتعزيز الحد من أسباب تغير المناخ في مصر. واعتمدت الدراسة على تحليل منتجات الاستشعار عن بُعد "صور Sentinel-5P لرصد التغير في ملوثات الهواء في منطقة القاهرة الكبرى قبل تفشي وباء COVID-19 وأثناءه وبعده. كما اعتمدت على استخدام منهجية البصمة الكربونية، وفقًا للهيئة الحكومية الدولية لتغير المناخ

(IPCC)، لتحديد حجم انبعاثات غازات الدفيئة التي تم تجنبها، نتيجة حظر التجول في مصر خلال الفترة من يناير إلى أغسطس ٢٠٢٠. مقارنةً بنفس المستوى في عام ٢٠١٩. استنتجت الدراسة أن تدابير حظر التجول الجزئي والمسافة الاجتماعية المتعلقة بوباء COVID-19 قللت من انبعاثات غازات الدفيئة في مصر بنحو ١٥٪ ونحو ١٧٪ لانبعاثات ثاني أكسيد النيتروجين في القاهرة الكبرى، و١٥,٦٪ لثاني أكسيد الكبريت، ونحو ٧,٧٪ لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، مقارنة بنفس النسبة في عام ٢٠١٩.

دراسة الشباني (٢٠١٩): تمثلت منطقة الدراسة بمدينة الديوانية، وقد هدفت الدراسة إلى التعرف على النمذجة المكانية لانبعاثات مصادر تلوث الهواء ومستويات تعرض السكان لها، وقد تم استعمال برنامج AERMOD VEIW في بناء نماذج الانبعاثات للمصادر المختلفة وحساب المساحات المعرضة لانبعاثاتها، على وفق الظروف المناخية المسجلة في محطة الديوانية المناخية لسنة ٢٠١٧. واستخدمت الدراسة المناهج الجغرافية المعروفة بالمنهج الوصفي التحليلي والتحليل المقارن والمنهج المورفولوجي، أما دراسة الحالة فقد تم اعتمادها في بعض نماذج محاكاة حركة الرياح. وقد استعملت أيضاً أساليب التحليل الآلي في نظم المعلومات الجغرافية. وتوصلت إلى عدد من النتائج أهمها: أن المركبات الخاصة شكلت نسبة ٤٤% من عدد المركبات الكلي في مدينة الديوانية؛ مما يعني اتجاه النقل في المدينة نحو المركبات الخاصة بدل استعمال وسائل النقل العام؛ مما يزيد من عدد الرحلات وزيادة الانبعاثات الصادرة عنها. وأن أعلى مقدار تركيز الملوثات كان في بعض التقاطعات المحيطة بالمنطقة المركزية للمدينة التي تمثل حلقة وصل للأحياء الكثيفة السكان. كما أوصت بضرورة توظيف نماذج التشتت في دراسة التباين المكاني لتراكيز الملوثات في الانبعاثات واختيار نقاط الرصد الميداني لتلوث الهواء المحيط في الدراسات الجغرافية نظراً لاعتمادها على الخصائص الجغرافية التي يعتمد عليها الجغرافي عادة في دراساته.

دراسة عبد الستار (AbdelSattar, 2019): هدفت الدراسة إلى عرض قدرات الاستشعار عن بُعد للأقمار الصناعية المختلفة في قياس ملوثات الهواء وطرق معالجة والوصول إلى بيانات الأقمار الصناعية لرسم خرائط لتركيزات الملوثات. في عام ٢٠١٧، تم إطلاق TROPOMI بمدى طيفي ٢٧.٧٧٥ ميكرومتر، ودقة مكانية عالية، وتغطية عالمية يومية. أتاح تنوع الاستبانة الطيفية للأجهزة الفضائية رصد أنواع مختلفة من ملوثات الهواء. تُعدّ الملاحظات الفضائية لملوثات الهواء ذات قيمة لرصد حالة جودة الهواء، ودراسة الاتجاه طويل الأجل لتركيز الملوثات المحيطة.

دراسة جعفر (2015) : هدفت هذه الدراسة إلى التعرف على دور استخدام نظم المعلومات الجغرافية في عملية اتخاذ القرار البيئي، وأهم معوقات ومحفزات هذا الدور من وجهة نظر المؤسسات المستخدمة لها. وتم استخدام المنهج الوصفي والمقابلة أداةً بحثية، وتوصلت إلى عدد من النتائج منها: أن أهم مجالات القرارات البيئية التي تتخذها المؤسسة بالاستناد إلى نظم المعلومات الجغرافية هو ضرورة

وضع استراتيجيات وخطط مكافحة التلوث ووضع السياسات البيئية المختلفة، أما أهم المعوقات فكانت قلة الخبرة وعدم توفر كادر كافٍ، ومن وسائل مواجهة المعوقات استخدام الامكانيات المتاحة، التشبيك بين المؤسسات واستخدام أفضل البيانات المتوفرة. واوصت بضرورة شمولية تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المجالات كافة، أما أهم التوصيات فكانت إنشاء إدارة هيكلية مستقلة على مستوى الوطن قائمة على الإدارة التشاركية التكاملية بين القطاعات متخصصة بنظم المعلومات الجغرافية، تقوم بجمع وتحديث بيانات الأساس لجميع المستويات والاستخدامات في جميع المشاريع.

دراسة عويس (2013): وقد هدفت هذه الدراسة إلى إجراء تحليل مكاني للتلوث داخل محافظة الإسماعيلية والتي تقع في منتصف قناة السويس. لقد تم استخدام الاستشعار من بعد ونظم المعلومات الجغرافية، والتحليل الإحصائي وأظهرت الدراسة عددًا من النتائج أهمها أن مياه مأخذ محطات تنقية المياه بمحافظة الإسماعيلية هي مياه صالحة للاستخدام الآدمي بعد معالجتها داخل محطة تنقية المياه كما أظهرت الدراسة أن المصارف الزراعية لمحافظة الإسماعيلية تعاني من زيادة عناصر التلوث بها، كما أظهرت أنه لا يمكن إلقاء مياه الصرف الصناعي داخل المنطقة الصناعية بمحافظة الإسماعيلية على شبكة الصرف العامة، أو الغابة الشجرية قبل أن تتم معالجتها .

دراسة فيرغيلانو وآخرين (Virghileanu, et al. 2020) وقد هدفت هذه الدراسة إلى اقتراح تحليل مقارن للتكوين المكاني لعمود التروبوسفير NO₂ في أوروبا بين فترات مماثلة في ٢٠١٩ و ٢٠٢٠، بناءً على منتجات ESA Copernicus Sentinel-5P. وركزت النتائج على ديناميكيات التلوث بثاني أكسيد النيتروجين على الانتقال المفاجئ من حالة طبيعية إلى سياق تفشي COVID-19، والذي يتميز بانخفاض قصير في كثافة حركة المرور والأنشطة الصناعية، مما يكشف عن انخفاض ملحوظ في كثافة غاز ثاني أكسيد النيتروجين NO₂ في طبقة التروبوسفير حتى بنسبة ٨٥٪ في بعض المدن الأوروبية الكبرى. قدم نهج التحقق من صحة البيانات المشتقة من القمر الصناعي، استنادًا إلى تحليل الارتباط المتبادل مع البيانات المستقلة من الملاحظات الأرضية، قيمًا مشجعة لمعاملات الارتباط (R²)، تتراوح بين ٠,٥ و ٠,٧٥ في مواقع مختلفة. تم التركيز على الانخفاض الملحوظ في تلوث ثاني أكسيد النيتروجين فوق أوروبا خلال إغلاق COVID-19 من خلال منتجات S-5P وأكدته مؤشر الإنتاج الصناعي وأحجام الحركة الجوية.

دراسة سيزار وآخرين (Cesar, et al, 2019): هدفت هذه الدراسة إلى تقديم طريقة لتقدير تركيز الجسيمات التي يقل قطرها عن ١٠ ميكرومتر (PM₁₀) باستخدام نموذج انحدار استخدام الأراضي التجريبي (LUR) والنظر في بيانات الاستشعار عن بُعد المختلفة كمدخلات. منطقة الدراسة هي كيتو، عاصمة الإكوادور، وتم جمع البيانات بين عامي ٢٠١٣ و ٢٠١٧. المتنبئون النموذجيون هم نطاقات الانعكاس السطحي (المرئية والأشعة تحت الحمراء) لـ Landsat-7 ETM + و Landsat-8 OLI / TIRS

Aqua- مستشعرات Terra / MODIS وبعض الفهارس البيئية (فهرس الغطاء النباتي للفرق المعياري - NDVI؛ مؤشر التربة بفرق طبيعي - NDSI، مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة - SAVI؛ مؤشر الماء بالفرق الطبيعي - NDWI؛ ودرجة حرارة سطح الأرض (LST). المتغير التابع هو القياسات الأرضية PM10. كما هدفت هذه الدراسة إلى مقارنة ثلاثة مصادر مختلفة لبيانات الاستشعار عن بُعد (Landsat-8 OLI + 7 ETM و Aqua-Terra / MODIS) لتقدير تركيز PM10 وثلاث تقنيات تنبؤية مختلفة (الانحدار التدريجي، الجزئي الأقل. الانحدار المربع، والشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) لبناء النموذج. النماذج التي تم الحصول عليها قادرة على تقدير PM10 في المناطق التي يكون فيها الحصول على بيانات الهواء محدودًا أو غير موجود. أفضل نموذج هو النموذج الذي تم إنشاؤه باستخدام ANN، حيث يكون معامل التحديد ($R^2 = 0.68$) هو الأعلى، ويكون خطأ الجذر التربيعي ($RMSE = 6.22$) هو الأدنى بين جميع النماذج. ومن ثم، يسمح النموذج المختار بتوليد خرائط تركيز PM10 من بيانات الاستشعار عن بُعد العامة، مما يشكل بديلاً عن التقنيات الأخرى لتقدير الملوثات، خاصةً عند توفر عدد قليل من المحطات الأرضية لجودة الهواء.

دراسة كورتشينكو وآخرين (Korchenko, et al, 2019): قد هدفت هذه الدراسة إلى تقديم نماذج لرسم الخرائط لتقييم جودة التربة والمياه السطحية، والتبرير العلمي لتحسين المراقبة القائمة، واتخاذ قرارات إدارية تشغيلية لمشكلات الأمن البيئي على أساس استخدام الوسائل الحديثة لنظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وطرق الاستشعار عن بُعد. كما أن الهدف من هذه الدراسة هو استكشاف إمكانية دمج أنظمة المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بُعد وتقنيات النمذجة المختلفة في مجال تقييم التلوث البيئي وحماية البيئة. استخدمت ترجمة البيانات إلى خرائط موضوعية برنامج ArcGIS وبرنامج الاستشعار عن بُعد ERDAS. تم استخدام وحدة التحليل الإحصائي الجغرافي في ArcGIS لاستيفاء البيانات حول التلوث البيئي وحساب دقة الاستيفاء. اعتمدت المنهجية المستخدمة على تفسير صور الاستشعار عن بُعد والبيانات الأخرى (البيانات الإحصائية والمواضيعية). كما تمت ترجمة البيانات المدخلة من جميع المصادر المذكورة سابقًا إلى الخرائط الموضوعية من خلال طرائق التفسير والتصنيف والمعالجة، والتكامل، والتحرير، والتحليل. تم إنشاء الخرائط الموضوعية لتقدير معالم الكائنات الطبيعية والبشرية المنشأ، بناءً على نموذج لمناطق معينة من أوكرانيا. ومن أهم نتائج هذه الدراسة: إمكانية تحسين الإدارة البيئية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية لجمع البيانات وإدارتها. تعد بيانات الاستشعار عن بُعد مصدرًا مفيدًا للغاية للمعلومات الدقيقة والمتقدمة للإدارة البيئية ودراسات الأثر.

دراسة سومفانشي وآخرين (Somvanshi, et al, 2019): هدفت هذه الدراسة إلى إجراء محاولة لتطوير نموذج GIS الذي سيساعد بسهولة على الحصول على معلومات جودة الهواء مباشرة من

بيانات الاستشعار عن بُعد. ضمن إطار نمذجة الانحدار الخطي المتعدد، يسمح النموذج بعلاقات متغيرة مكانياً بين قياسات الأرض والعوامل الأخرى التي تقدر جودة الهواء. كما توضح هذه الدراسة إمكانات Landsat 8 OLI-TIRS في مراقبة جودة الهواء باستخدام نظم المعلومات الجغرافية أداة مساعدة. وقد أثبتت الدراسة أن النموذج المشتق باستخدام نطاقات مختلفة من صور القمر الصناعي لاندسات ٨ يمكن إجراء تقدير دقيق للمواد الجسيمية (PM_{2.5} و PM₁₀)، بينما لا يمكن تطبيقه على الملوثات الغازية (أكاسيد النيتروجين، ثاني أكسيد الكربون، إلخ). علاوة على ذلك، تم التحقق من صحة النموذج باستخدام بيانات الحقيقة الأساسية لعام ٢٠١٧.

دراسة بالف وآخرين (Palve, et al, 2016): هدفت هذه الدراسة إلى التحقيق في التأثير المحتمل للملوثات الهواء على تغير المناخ في شبه القارة الهندية. العمق البصري لعمود الهباء الجوي المشتق من القمر الصناعي (AOD) هو وسيلة فعالة من حيث التكلفة لرصد ودراسة توزيع الهباء الجوي وتأثيراته على مدى فترة زمنية طويلة. وجد أن AOD يتزايد بسرعة منذ عام ٢٠٠٠ في موسم الصيف مما قد يتسبب في آثار ضارة للمحاصيل الزراعية، وكذلك على صحة الإنسان. من المحتمل أن تؤثر زيادة تحميل الهباء الجوي على هطول الأمطار المسؤول عن ظروف الجفاف الملحوظة في شبه القارة الهندية. ينبعث أول أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عن طريق أنشطة حرق الكتلة الحيوية، والهند تحتل المرتبة الثانية في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في آسيا. تُظهر عمليات استرجاع قياسات التلوث في التروبوسفير عند ٨٥٠ hPa انبعاثات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون من منطقة IG. يؤدي تطوير نشاط الحمل الحراري المرتبط بالتعدين الحرفي والصغير الحجم إلى انتقال عمودي واسع النطاق للطبقة الحدودية من ثاني أكسيد الكربون من المنطقة الهندية إلى طبقة التروبوسفير العليا. TCO على شبه القارة الهندية خلال عام ٢٠٠٧ له تباين منهجي وتدرجي مكاني، وكذلك الزماني. تشير الكمية الأعلى من إجمالي التكلفة الإجمالية للملكية في خطوط العرض الشمالية والتكلفة الإجمالية للملكية المنخفضة المتزامنة عند خطوط العرض القريبة من خط الاستواء إلى استنفاد الأوزون بالقرب من خط الاستواء والتراكم عند خطوط العرض الأعلى داخل شبه القارة الهندية. بالإضافة إلى ذلك، فإن التغيرات في أوزون الستراتوسفير ووفرة الهباء الجوي في الغلاف الجوي تغير توازن الطاقة في النظام المناخي.

دراسة نجويان وآخرين (Nguyen, et al. 2014): وقد هدفت هذه الدراسة إلى التعرف على الآثار البيئية لأنشطة التعدين، مع دراسة حالة في محور التعدين في محافظة نغي أن، واعتمدت الدراسة على المنهج التحليلي وقد خلصت الدراسة إلى مجموعة من النتائج: من أهمها أن مواقع التعدين المرتفع أكثر عرضة للأخطار البيئية، وأيضاً النتيجة من هذه الدراسة هو خطوة إلى الأمام في إدارة المخاطر البيئية

في مناطق التعدين، وأنها يمكن أن توفر معلومات مفيدة للغاية لصنع القرار وتخطيط السياسات في مواقع التعدين في المستقبل.

دراسة والكر وآخرين (Walker, et al, 2012): هدفت هذه الدراسة إلى فحص إمكانات قياسات الأشعة تحت الحمراء الحرارية الفائقة الطيفية لتمييز الانبعاثات من الأحداث المماثلة عن طريق قياس SO_2 باستخدام مقياس التداخل السبر للغلاف الجوي بالأشعة تحت الحمراء (IASI). تم وصف طريقة سريعة لاكتشاف ثاني أكسيد الكبريت والتي تستخدم العديد من القنوات الطيفية لفصل مساهمة ثاني أكسيد الكبريت عن مساهمة الملغمة الأخرى التي تؤثر على القياس. تم إجراء جميع النمذجة الطيفية باستخدام النموذج المرجعي الأمامي (RFM) وهو رمز نقل إشعاعي سطحيًا، ومن ذلك قاعدة البيانات الطيفية، تم تطبيق تصحيح زاوية الرؤية على الأطياف لمراعاة الطول الأكبر للمسار الذي يتم قطعه عبر الغلاف الجوي في مناظر خارج النظر. تم قياس الأطياف بواسطة عامل كتلة الهواء $\cos(f)$ حيث f هي زاوية ذروة القمر الصناعي. يُفترض أن القياسات الطيفية $y \in m$ يمكن تمثيلها بالنموذج الأمامي F ، بالإضافة إلى خطأ القياس الكلي c $y = Fx + c$ حيث x هو إجمالي مقدار العمود لـ SO_2 ، ويمثل u أفضل تقدير للملغمة الأخرى المتعلقة بالغلاف الجوي والسطح والأداة، و rnd هو خطأ القياس العشوائي الذي تحدده ضوضاء الجهاز. وبينت النتائج أنّ العمود المنقول في المراحل الأولى من المرحلة التفجيرية يحتوي على كميات منخفضة من ثاني أكسيد الكبريت على ارتفاع منخفض مما وضعه في حد الكشف عن أجهزة الاستشعار الفضائية المستخدمة لرصد التهديد البركاني للطيران باستخدام الأساليب الحالية. يتم تطبيق تقنية تم تطويرها مؤخرًا للاسترداد السريع لثاني أكسيد الكبريت من IASI في سياق ثوران Eyjafjallajökull لإظهار أن IASI قادر بسهولة على استشعار ثاني أكسيد الكبريت في العمود في هذه المرحلة حيث تخفق الطرق الحالية.

تشابه الدراسة الحالية مع جميع الدراسات السابقة في دراستها لموضوع التلوث البيئي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بُعد، لكنها اختلفت عنها في أنها لم تبحث في مقارنة مؤشرات التطور الزمني والتباين المكاني خلال فترة الدراسة بين مرئيات القمر الصناعي (Sentinel-5P) ومحطات قياس جودة الهواء، وإنما بحثت في متغيرات أخرى. وقد استفادت هذه الدراسة من الدراسات السابقة في بناء الإطار النظري للبحث والمنهجية العلمية للدراسة.

منهجية الدراسة:

تعتمد الدراسة على استخدام المنهج الاستقرائي التحليلي، وهو: "المنهج الذي يعتمد على دراسة الظاهرة كما توجد في الواقع، ويهتم بوصفها وصفًا دقيقًا، ويعبر عنها كميًا بوصفها وتوضيح خصائصها. وكميًا بإعطائها وصفًا رقميًا من خلال أرقام وجدول توضيح مقدار هذه الظاهرة أو حجمها أو درجة

ارتباطها مع الظواهر الأخرى" (ملحم، ٢٠١٧، ٢٣). كما ستستخدم الدراسة الحالية المنهج الوصفي التحليلي لملاءمته لطبيعة الدراسة والحصول على البيانات المطلوبة لإجراء الدراسة من مصادرها الرئيسية.

البيانات المستخدمة ومصادرها:

تم الاعتماد على مجموعة من البيانات في عمليات التحليل ضمن البحث، وأهمها مرئيات الاستشعار عن بُعدٍ، حيث تم الحصول على البيانات من موقع Sentinel Hub (<https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>) خلال القمر الصناعي (Sentinel 5p) ومعالجتها واستخلاص تراكيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2). تم استخدام الحمولة النافعة (Sentinel-5) لمراقبة بيئة الغلاف الجوي، وتم نقلها على الجيل الثاني من القمر الصناعي الأوروبي (MetOp). وتم استخدام القمر الصناعي (Sentinel-5P) لتقليل فجوة البيانات بين الحمولة الأوروبية (Envisat) والحمولة الصافية (Sentinel-5).

تم الحصول على بيانات أرضية لتراكيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) لسنوات (٢٠١٨، ٢٠١٩، ٢٠٢٠، ٢٠٢١) من محطات رصد جودة الهواء (محطة ينبع الأرضية) من المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي الموجودة في المنطقة، علمًا بأنّ البيانات التي تم الحصول عليها كبيانات ساعية فقد تم استخدام برنامج إكسل لجمع البيانات للحصول عليها بشكل يومي، ثم بالشهر، ثم بالسنة، وقد كانت وَحْدَةُ القياس للبيانات جزء من بليون (ppb) وتم تحويلها لوحدة ميكرو جرام/م³ ($\mu g/m^3$) لتتناسب مع مقاييس البيئة لجودة الهواء المسموح بها في المملكة العربية السعودية، تحويل وحدات متوسط تركيز ثاني أكسيد الكبريت من (ppb) الى ($\mu g/m^3$) كالتالي:

$$\text{متوسط ثاني أكسيد الكبريت } (\mu g/m^3) = (\text{متوسط تركيز ثاني أكسيد الكبريت (ppb)}) \times 2.6202994X$$

ألية تحليل البيانات:

تعاملت الدراسة مع عدة برامج:

برنامج SNAP: هو برنامج مختص لتصحيح ومعالجة بيانات سلسلة الأقمار الاصطناعية Sentinel التابعة لهيئة الفضاء الأوروبية، يعد SNAP بنية مثالية لمعالجة وتحليل مراقبة سطح الأرض نظرًا لمميزاته من حيث القابلية للتوسعة (والتي تعني هي مقياس قدرة النظام على زيادة أو نقصان الأداء والتكلفة استجابة للتغيرات في متطلبات معالجة التطبيق والنظام). وتم استخدام هذا البرنامج من أجل عرض بيانات الدراسة الأصلية وعرض نطاق البيانات على الأرض ثلاثية الأبعاد.

برنامج نظم المعلومات الجغرافية (ArcGIS): تم استخدام هذا البرنامج لاستخراج الخرائط الجغرافية لمنطقة الدراسة من خلال مجموعة من الإجراءات والعمليات المنظمة مثل: جمع، وتوثيق، ومعالجة المعلومات، واسترجاعها. ونظام المعلومات الجغرافي هو آلية وإجراءات منظمة تسمح بتجميع وتصنيف وفرز البيانات (Data) ومن ثم معالجتها داخل نظام الحاسوب وتحويلها إلى معلومات (Information) يسترجعها الإنسان عند الحاجة ليتمكن من إنجاز العمل أو اتخاذ القرار.

استخدام المرئية من القمر الصناعي (sentinel 5p):

من أجل إيجاد نسبة تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في منطقة الدراسة تم اللجوء إلى صور الاستشعار عن بُعد بحيث تم استخراج صورة لكل شهر واستخراج المتوسط الشهري ثم استخراج المتوسط السنوي لكل سنة من سنوات الدراسة مبين عليها نسب تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في مدينة ينبع.

وتعد المعالجة الرقمية للصور من أهم التَّقْنِيَّات المستخدمة في مجال الاستشعار عن بُعد، وقد ساعد على تطبيق هذه التقنية إمكان الحصول على المعطيات بشكل رقمي، ولأطوال موجية متعددة من جهة، وإمكانية سرعة معالجتها للبيانات، والإمكانية الكبيرة على تخزينها.

يتميز القمر الصناعي (sentinel 5p) بدقة زمنية عالية حيث يمكن أن يمر لنفس المكان في اليوم الواحد أكثر من مرة، بينما تتراوح دقته المكانية بين ٣,٥ كم إلى ٧,٥ كم للخلية الواحدة، وهو بذلك يصلح للدراسات متوسطة المقياس وصغيرة المقياس.

تمت معالجة بيانات القمر الصناعي (Sentinel 5p) لتراكيز الغاز SO_2 من خلال البرنامج (Snap) التابع لنفس الجهة المطورة لتلك الأقمار الصناعية. وتمت معالجة هذه الملفات من النوع (NetCDF)، حيث إنها مصفوفات من الطبقات الرقمية، والتي يتم معالجتها لتصحيحها هندسيًا بشكل آلي داخل البرنامج، ومن ثم الاقتطاع المكاني واقتطاع نطاق البيانات المرغوب العمل عليها.

١/ القمر الصناعي مثبت عليه مطياف تروبومي Tropomi، وهو مطياف التصوير متعدد الأطياف الأكثر تقدمًا حتى الآن، ولذلك فإن جودة الصور التي يتم الحصول عليها عالية جدًا (<https://www.meteorologiaenred.com>).

٢/ وقد تم من خلال هذا القمر الصناعي قياس تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت الموجود في الغلاف الغازي في ينبع من أجل تحقيق أهداف هذه الدراسة.

٣/ يتيح حجم بكسل تروبومي (٧ × ٣,٥ كيلومتر مربع) تغطية عالمية يومية ويوفر ما يقرب من ٢ جيجابايت من المعلومات والبيانات يوميًا (<https://www.meteorologiaenred.com>).

خطوات العمل: توجد عدة مراحل لمعالجة وتصوير بيانات S5P:

NASA Panoply: مرحلة عارض بيانات Grib / Grib / HDF / NetCDF مقيم Java الذي

طوره ناسا، حيث يستخدم Panoply لرؤية بيانات S5P في ملفات بيانية بصيغة NetCDF

S5 Processor Language: في هذه المرحلة يتم تحويل بيانات (NetCDF) ويرمز لها بالرمز

NC في S5P إلى بيانات TIFF التي تحفظ فيها بيانات تراكيز الغازات بعد تنسيق بيانات S5P يصبح من السهل تحليلها، وبذلك يمكن فتح البيانات المحولة في ArcGIS، وتحديد نظام الإحداثيات (<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>).

تصدير البيانات إلى صيغة TIFF التي توضح تراكيز الغازات داخل برنامج (ArcGIS) حيث يتم

عمل تصنيف لتراكيز الغازات ثم إخراج خرائط لتوضيح التوزيع المكاني للغاز محل الدراسة.

تم تحميل خرائط تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت يوميًا، ثم استخراج متوسط شهري، ثم من

المتوسطات الشهرية استخراج المتوسط السنوي، ويتم من خلال خرائط المتوسطات الشهرية باستخدام أداة إحصائيات الخلية، عن طريق حساب قيمة كل موقع على البيانات النقطية للإخراج كدالة لقيم الخلية من جميع المدخلات في هذا الموقع.

تظهر نتائج خرائط توزيع ثاني أكسيد الكبريت خلال سنوات الدراسة في محافظة ينبع

بوحدة (mol/m^3) . لذلك لابد من تحويل الوحدة إلى $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ لتتناسب مع مقاييس البيئة لجودة الهواء المسموح بها في المملكة العربية السعودية، تحويل وحدات متوسط تركيز ثاني أكسيد الكبريت من (mol/m^3) إلى $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ كالتالي:

(متوسط تركيز ثاني أكسيد الكبريت $(\text{mol}/\text{m}^3) \times \text{الوزن الجزيئي لثاني أكسيد الكبريت} (10^6)$)

الوزن الجزيئي لثاني أكسيد الكبريت = 64.0638

ومن ثم تقييم الصحة بين متوسطات خرائط الأقمار الصناعية ومتوسطات المحطات

الأرضية بعد تحويلها لوحدة ميكروجرام/متر مكعب $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$.

تقييم دقة بيانات سنتينل 5p: لتحليل الإحصائي هو العملية التي يتم من خلالها تجهيز

البيانات العلمية، وتحضيرها لكي يتم إجراء التحليل عليها، وتم استخدام التحليل الإحصائي لكشف العلاقة ذات الدلالة الإحصائية (المتوسطات الحسابية واختبار - One-Sample - T-test) والتي تعبر عن مدى التغير بين بيانات الاستشعار عن بعد وبيانات المحطات الأرضية في منطقة الدراسة، وذلك من أجل تحقيق أهداف البحث والتوصل إلى نتائج من شأنها المساهمة في تحسين التحليل واستخدام الوسائل التي تؤدي إلى رفع مستوى جودة الهواء في محافظة ينبع.

للكشف عن العلاقة ذات الدلالة الاحصائية تم حساب (المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية، واختبار-ت (T-test)، والتي تعبر عن مدى التغير بين بيانات الاستشعار عن بُعد وبيانات المحطات الأرضية في منطقة الدراسة كما هو موضح في الجدول (٤-١٨)، وتحسب قيمة اختبار (ت) وفق المعادلة الآتية:

حيث إن:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

t: اختبار (ت) لعينة واحدة مستقلة.

\bar{x} : المتوسط الحسابي للعينة.

μ : المتوسط الحسابي العام.

s: الانحراف المعياري للعينة. n: عدد العينة.

النتائج والمناقشة:

عرض النتائج التي تم الحصول عليها من خلال القمر الصناعي (Sentinel 5p) لتراكيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2). والبيانات الأرضية التي تم الحصول عليها من المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي لغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) لمحافظة ينبع.

تمت دراسة تركيز (غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2) في محافظة ينبع من خلال مرئيات القمر الصناعي (Sentinel-5P) لاستخراج خريطة تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 للفترة (٢٠١٨-٢٠٢١)، حيث تم إنتاج خرائط يومية أولاً، ثم بعد ذلك خرائط للأشهر من كل عام، ثم إنتاج خريطة واحدة لكل عام من أعوام الدراسة، وذلك من خلال استخراج صور القمر الصناعي لكل يوم من أيام الشهر، وإنتاج صورة واحدة لكل شهر من خلال حساب المتوسط الشهري لمجموع الصور، ومن ثم تم إنتاج صورة واحدة لكل سنة من سنوات الدراسة عن طريق استخراج المتوسط السنوي لمجموع متوسط الصور الشهرية (١٢) ولتحديد انتشار عنصر SO_2 في منطقة الدراسة.

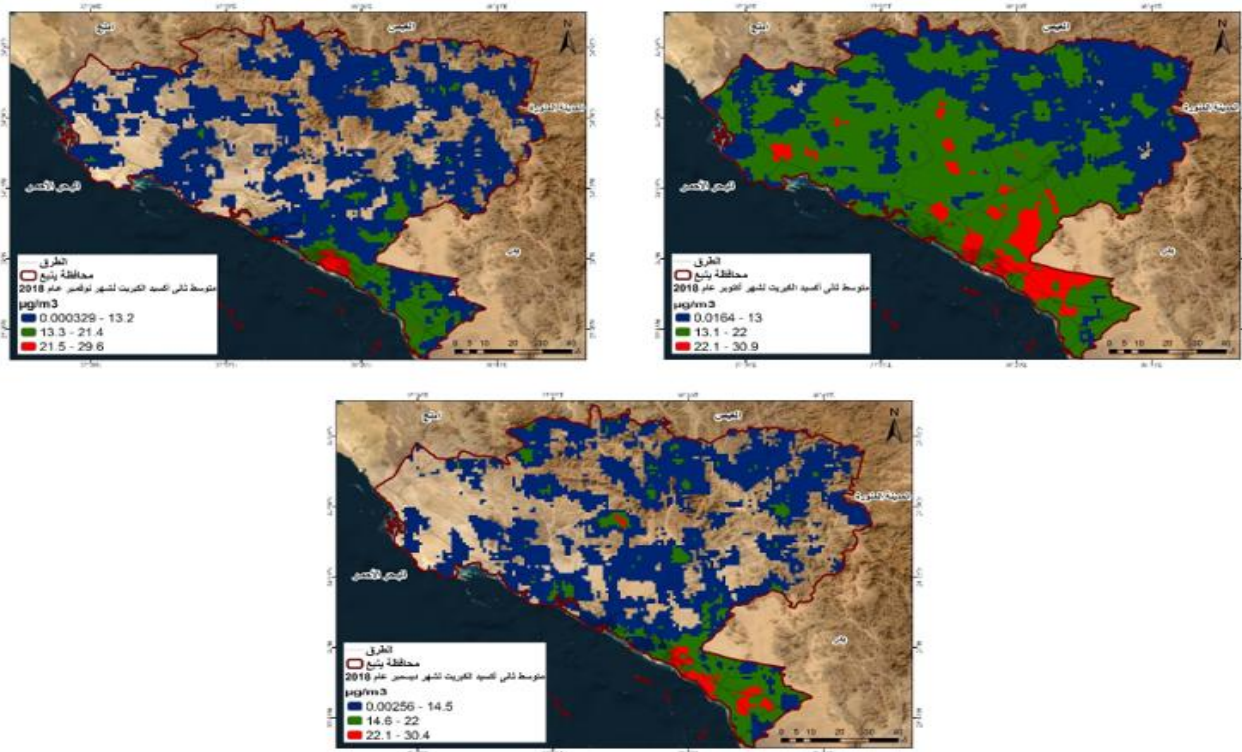
- مقارنة ملوث SO_2 في المدّة من ٢٠١٨ إلى ٢٠٢١ في منطقة الدراسة باستخدام الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية: تم الحصول على مرئيات يومية لمنطقة الدراسة (ينبع/ المدينة المنورة)، ومن ثم الحصول على المتوسط الشهري للمرئيات لكل شهر من شهور السنة من سنوات الدراسة ومعالجتها واستخراج متوسطاتها حتى تم الحصول في النهاية على خريطة واحدة لكل سنة من سنوات

الدراسة تبين تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في منطقة الدراسة على النحو الآتي: تم إخراج الخرائط التي تُعبر عن المتوسط السنوي من خلال خرائط المتوسطات الشهرية باستخدام أداة إحصائيات الخلية، عن طريق حساب قيمة كل موقع على البيانات النقطية للإخراج كدالة لقيم الخلية من جميع المدخلات في هذا الموقع، بمعنى أن تحدد متوسط قيمة المدخلات على أساس خلية بخلية. تم تقسيم كل مرئية لثلاث فئات حيث تعبر الفئة الأولى عن أقل تركيز والفئة الثالثة عن أكبر تركيز على حسب القيم الموجودة في المرئية، وفيما يلي نتائج خرائط الاستشعار عن بُعد لمحافظة ينبع مقسمة شهرياً وسنوياً.

التركيزات الشهرية لغاز SO_2 في محافظة ينبع للعام ٢٠١٨م:

تم إنتاج مرئيات يومية لأشهر: أكتوبر ونوفمبر، وديسمبر وهذا المتاح فقط من القمر الاصطناعي (Sentinel-5P) لعام ٢٠١٨ م ومن ثم المتوسطات الشهرية للخرائط، كما هو واضح في الشكل (٢):

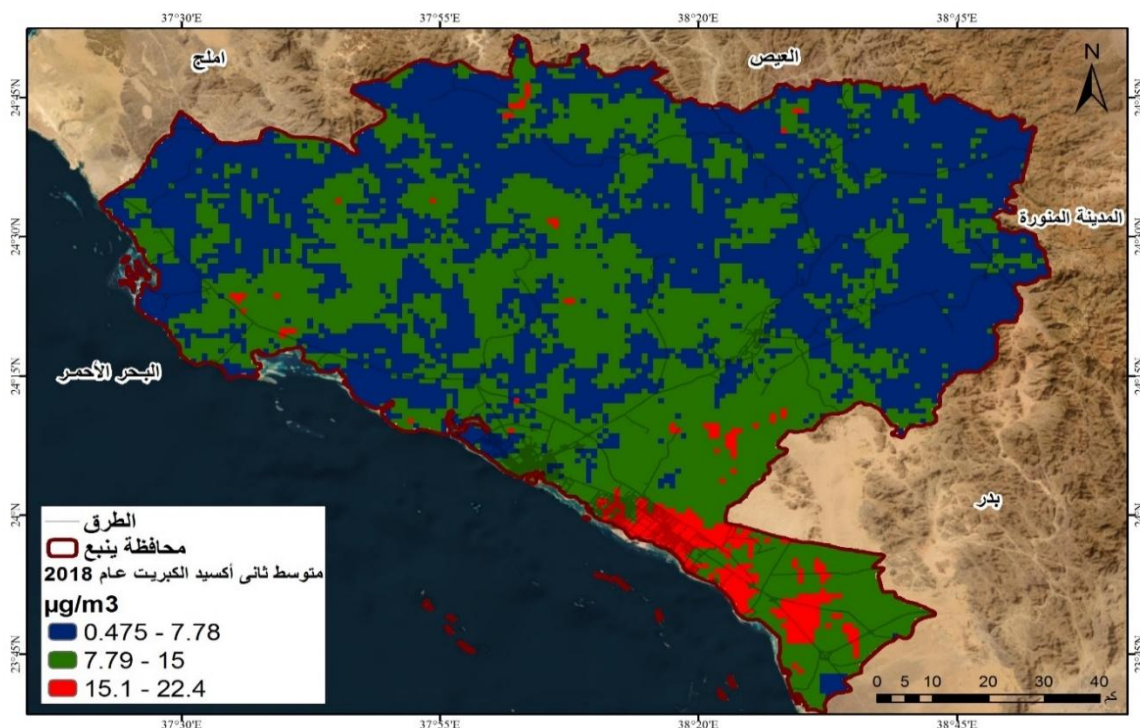
شكل (٢): المتوسط الشهري لتركيز ثاني أكسيد الكبريت في محافظة ينبع لشهور أكتوبر، نوفمبر، ديسمبر لعام ٢٠١٨م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠١٨ م.

المتوسط السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠١٨م: تم حساب المتوسط السنوي لعام ٢٠١٨ م من حساب متوسط الأشهر المتوفرة (أكتوبر، نوفمبر، ديسمبر) وتم إخراج الخريطة شكل (٣) الذي يوضح تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠١٨م:

شكل رقم (٣): المتوسط السنوي لغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في محافظة ينبع لعام (٢٠١٨ م).



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠١٨ م.

من خلال دراسة وتحليل المرئيات الفضائية التي تم الحصول عليها من نظام الاستشعار عن بُعْدٍ، تم حساب مساحة المنطقة التي تمت دراستها من خلال نظام الاستشعار عن بُعْدٍ، وأظهرت نتائج الصور نسب تراكيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في منطقة الدراسة من خلال تمييز نسبة التركيز كما هو مبين في الشكل (٣). من الشكل (٣) تم استخراج مساحات تركيز غاز SO_2 حسب الفئات الموضحة في الجدول رقم (١).

الجدول رقم (١): مساحات توزيع تركيز غاز SO_2 حسب الفئات لعام ٢٠١٨ م في محافظة ينبع.

٢٠١٨			
الفئة	القيم	المساحة كم ^٢	النسبة المئوية
1	7.78-0.475	5166.233	%50
2	15-7.79	4810.577	%46.5
3	22.4-15.1	353.5894	%3.5

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠١٨ م.

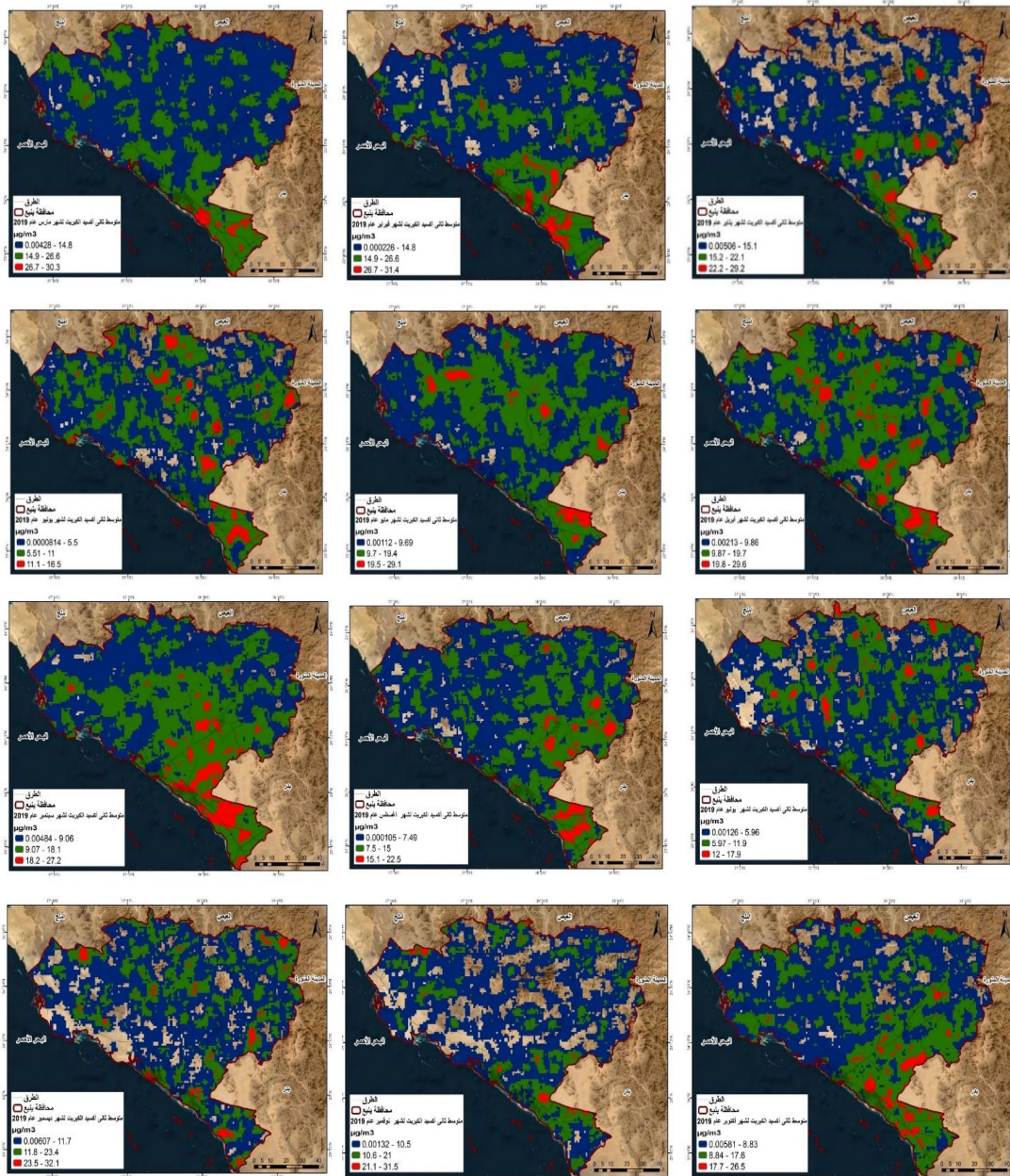
ومن الجدول (١) والشكل (٣) يتضح أنه في عام ٢٠١٨ م تدرج توزيع غاز ثاني أكسيد الكبريت في المرئية حسب الفئات الثلاثة، وتعتبر هذه الفئات عن تركيز الغاز حسب القيم الموجودة في المرئية فقد كانت الفئة الاولى الأكبر من حيث المساحة، فقد بلغت ٥١٦٦,٢٣٣ كم^٢ بنسبة ٥٠٪ من منطقة الدراسة، ثم امتدت إلى الفئة الثانية بمساحة ٤٨١٠,٥٧٧ كم^٢ بنسبة ٤٦,٥٪ من منطقة الدراسة، ثم انتشرت في

الفئة الثالثة والتي تُعدّ الأعلى تركيزًا لغاز ثاني أكسيد الكبريت من الفئات السابقة بمساحة تقدر بـ ٣٥٣,٥٨٩٤ كم^٢ بنسبة ٣,٥٪ من منطقة الدراسة، ولم تتجاوز قيمها الحد المسموح.

التركيزات الشهرية لغاز SO₂ في محافظة ينبع للعام ٢٠١٩م:

تمت إضافة المرئيات اليومية لمتوسط تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO₂، ثم الحصول على المتوسطات الشهرية لشهور السنة لمحافظة ينبع للعام ٢٠١٩ م كما هو موضح في الاشكال (٤):

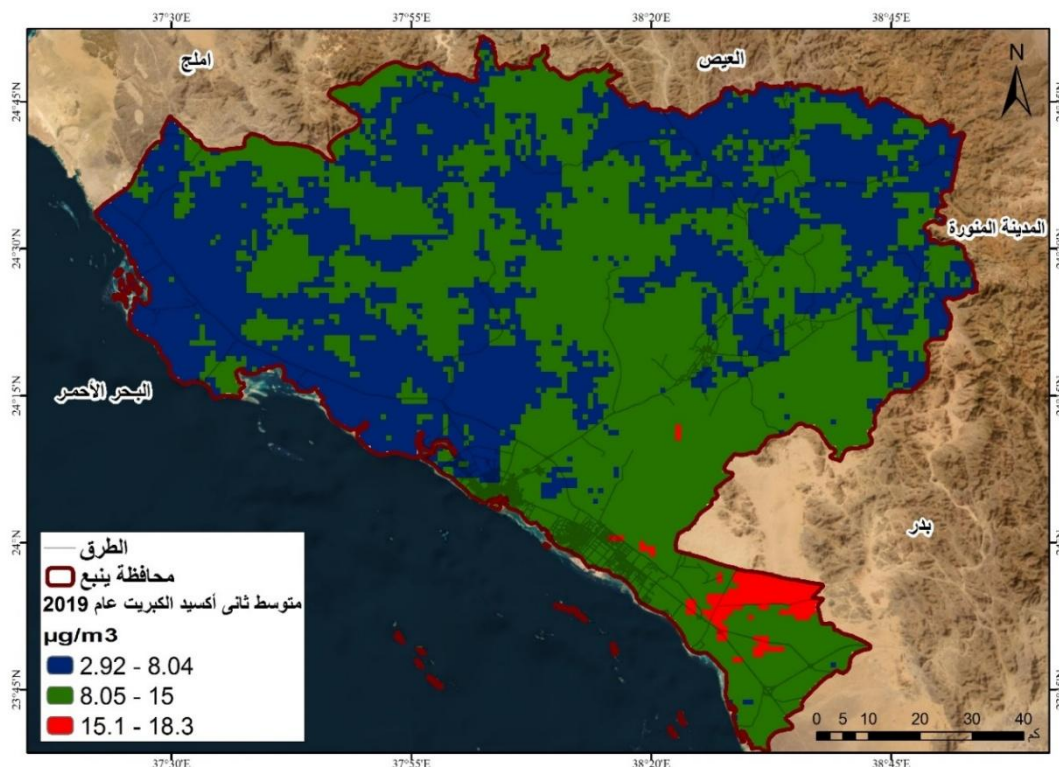
الشكل رقم (٤): المتوسط الشهري لتركيز ثاني أكسيد الكبريت في محافظة ينبع لعام ٢٠١٩م.



المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠١٩م.

المتوسط السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠١٩م: تم حساب المتوسط السنوي من المرئيات الشهرية، وتم استخراج المعدل السنوي كما موضح في الشكل (٥).

الشكل رقم (٥): المتوسط السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في محافظة ينبع لعام ٢٠١٩م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠١٩م.

من الشكل رقم (٥) تم حساب توزيع تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 إلى فئات كما هو موضح في الجدول رقم (٢).

الجدول رقم (٢): مساحات توزيع تركيز غاز SO_2 حسب الفئات لعام ٢٠١٩م في محافظة ينبع.

٢٠١٩			
النسبة المئوية	المساحة كم ^٢	القيم	الفئة
43.8%	4523.179	8.04-2.92	1
54.7%	5648.071	15-8.05	2
1.5%	159.1484	18.3-15.1	3

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠١٩م.

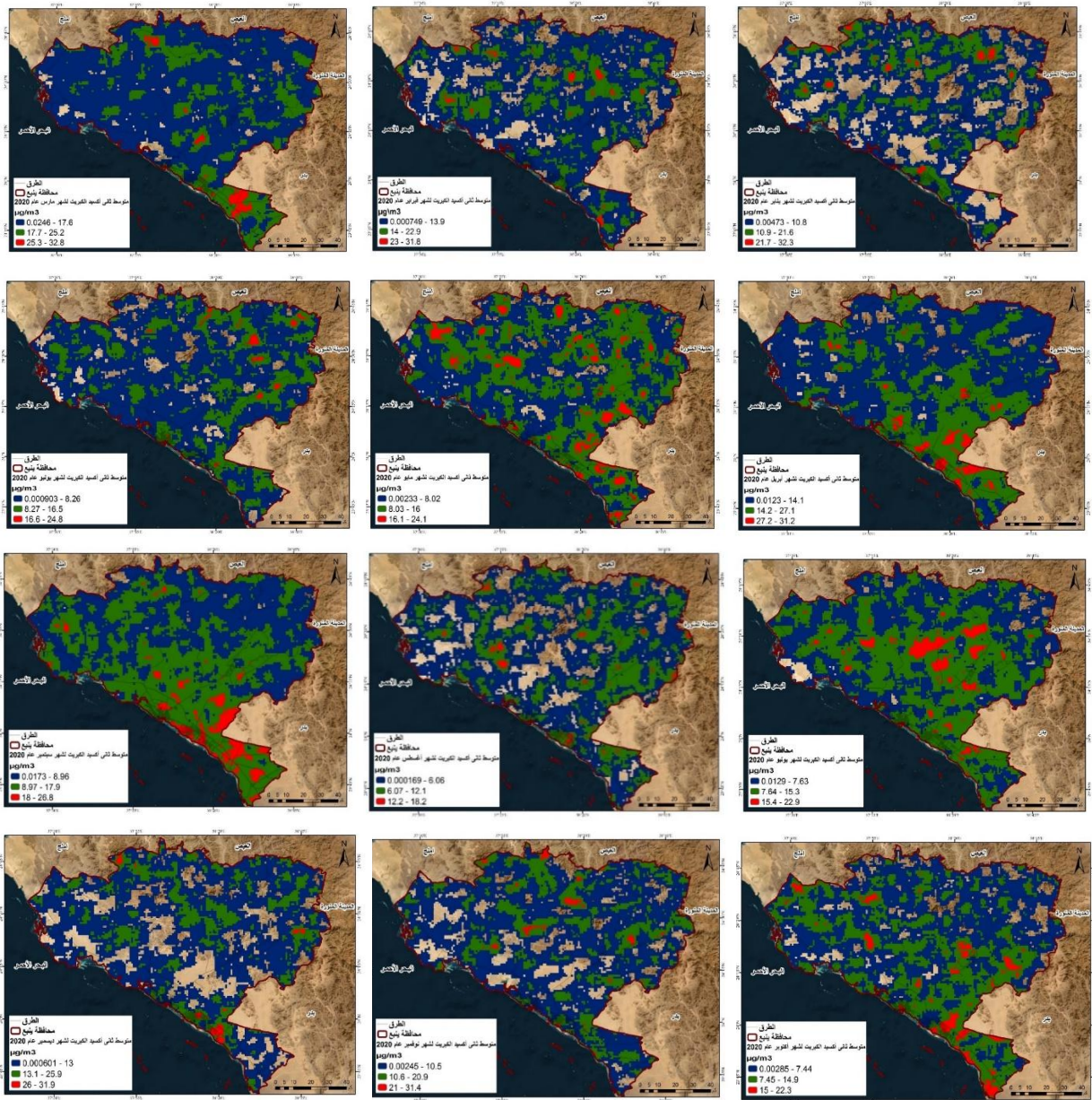
ومن الجدول (٢) والشكل (٥) يتضح أنه في عام ٢٠١٩م تدرج توزيع غاز ثاني أكسيد الكبريت حسب الفئات الثلاثة، وتعتبر هذه الفئات عن تركيز الغاز حسب القيم الموجودة في المرئية فقد كانت الفئة الثانية الأكبر من حيث المساحة، فقد بلغت ٥٦٤٨,٠٧١ كم^٢ بنسبة ٥٤,٧% من منطقة الدراسة، ثم امتدت إلى الفئة الأولى

بمساحة ٤٥٢٣,١٧٩ كم^٢ بنسبة ٤٣,٨٪ من منطقة الدراسة، ثم انتشرت في الفئة الثالثة والتي تُعدّ الأعلى تركيزًا لغاز ثاني أكسيد الكبريت من الفئات السابقة بمساحة تقدر بـ ١٥٩,١٤٨٤ كم^٢ بنسبة ١,٥٪ من منطقة الدراسة، ولم تتجاوز قيمها الحد المسموح.

التركيزات الشهرية لغاز SO₂ في محافظة ينبع للعام ٢٠٢٠م:

تمت إضافة المرئيات اليومية لمتوسط تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO₂، ثم الحصول على المتوسطات الشهرية لشهور السنة لمحافظة ينبع للعام ٢٠٢٠ م كما هو موضح في الأشكال (٦):

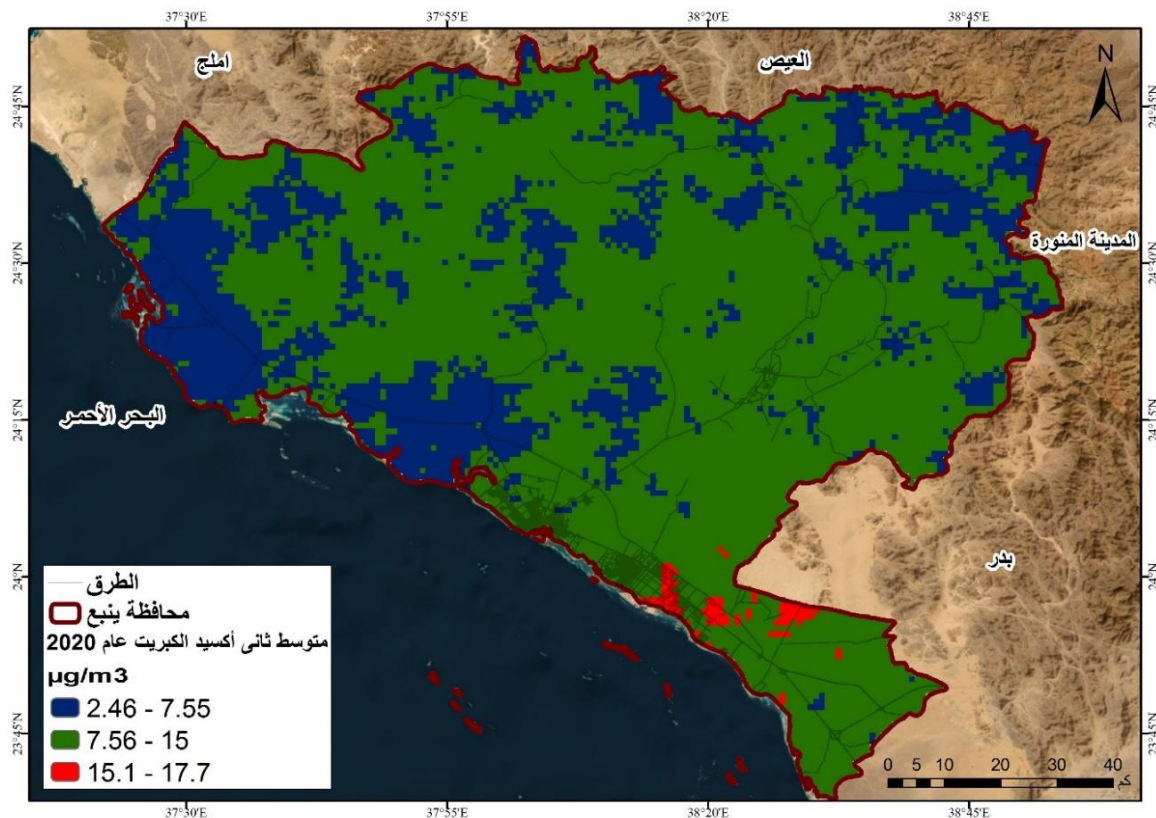
الشكل رقم (٦): المتوسط الشهري لتركيز ثاني أكسيد الكبريت في محافظة ينبع لعام ٢٠٢٠م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠٢٠م.

المتوسط السنوي لغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠٢٠م: تم حساب المتوسط السنوي من المرئيات الشهرية، وتم استخراج المعدل السنوي كما هو موضح في الشكل (٧):

شكل رقم (٧): المتوسط السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في محافظة ينبع لعام ٢٠٢٠م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠٢٠م

من الشكل رقم (٧) تم حساب توزيع تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت الى فئات كما هو موضح في الجدول (٣).

الجدول رقم (٣): مساحات توزيع تركيز غاز SO_2 حسب الفئات لعام ٢٠٢٠م في محافظة ينبع.

٢٠٢٠			
النسبة المئوية	المساحة كم ^٢	القيم	الفئة
%25	2605.599	7.55-2.46	1
%74	7641.154	15-7.56	2
%1	83.64598	17.7-15.1	3

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠٢٠م

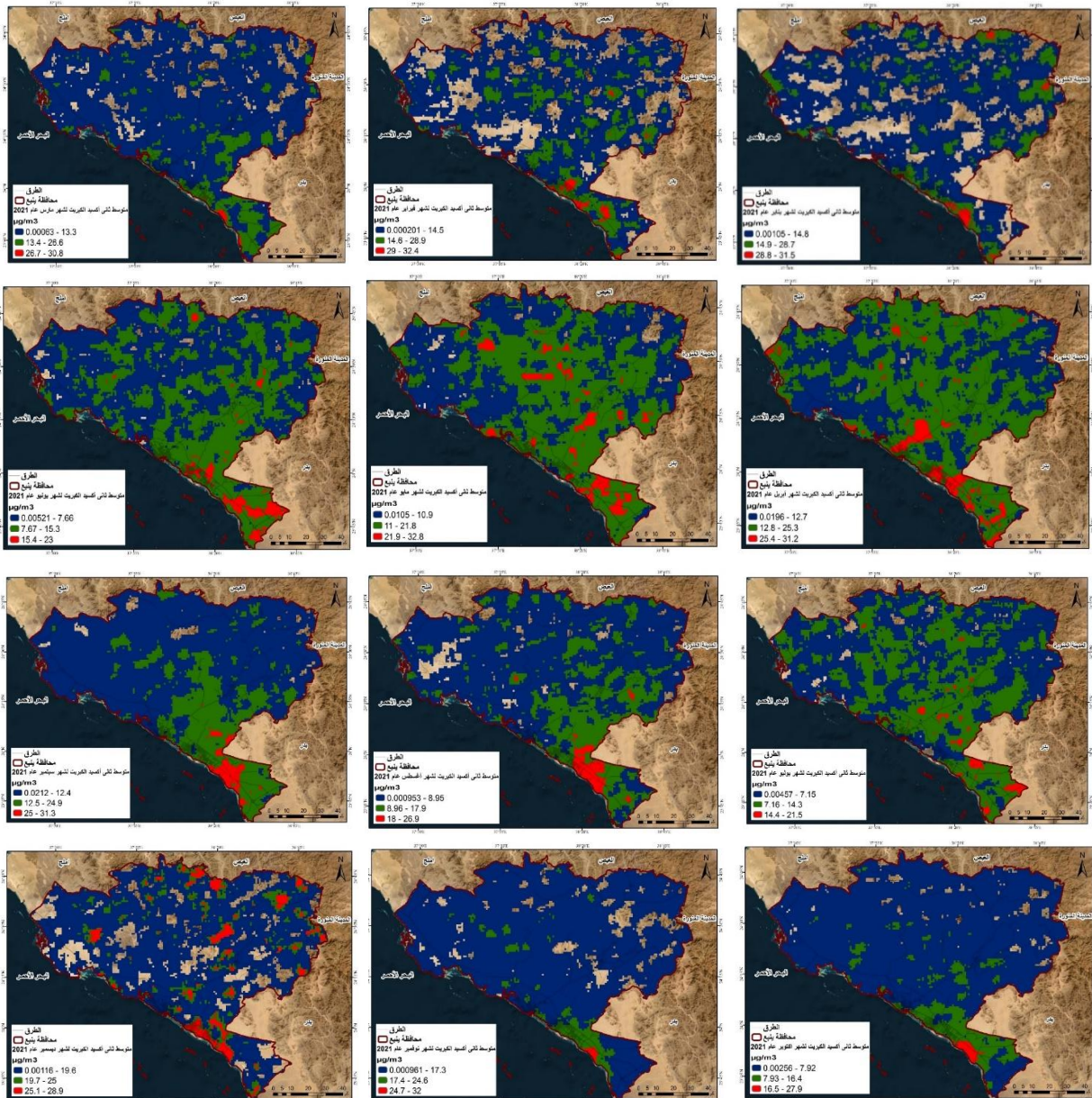
ومن الجدول رقم (٣) والشكل رقم (٧) يتضح أنه في عام ٢٠٢٠ أيضاً تم حساب الفئات لتوزيع غاز ثاني أكسيد الكبريت من حيث المساحة حسب القيم الموجودة في المرئية، فقد كانت الفئة الثانية أكبر مساحة حيث بلغت ٧٦٤١,١٥٤ كم^٢ بنسبة ٧٤٪ من منطقة الدراسة، ثم تلتها الفئة الاولى بمساحة

٢٦٠,٥٩٩ كم^٢ بنسبة ٢٥٪ من منطقة الدراسة، أما من حيث تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت فقد كان الأعلى في الفئة الثالثة بمساحة ٨٣,٦٤٥٩٨ كم^٢ بنسبة ١٪ من منطقة الدراسة، ولم تتجاوز قيمها الحدود المسموحة.

تركيز غاز SO₂ في محافظة ينبع للعام ٢٠٢١ م:

تمت إضافة المرئيات اليومية لمتوسط تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO₂، ثم الحصول على المتوسطات الشهرية لشهور السنة لمحافظة ينبع للعام ٢٠٢١ م كما هو موضح في الأشكال (٨):

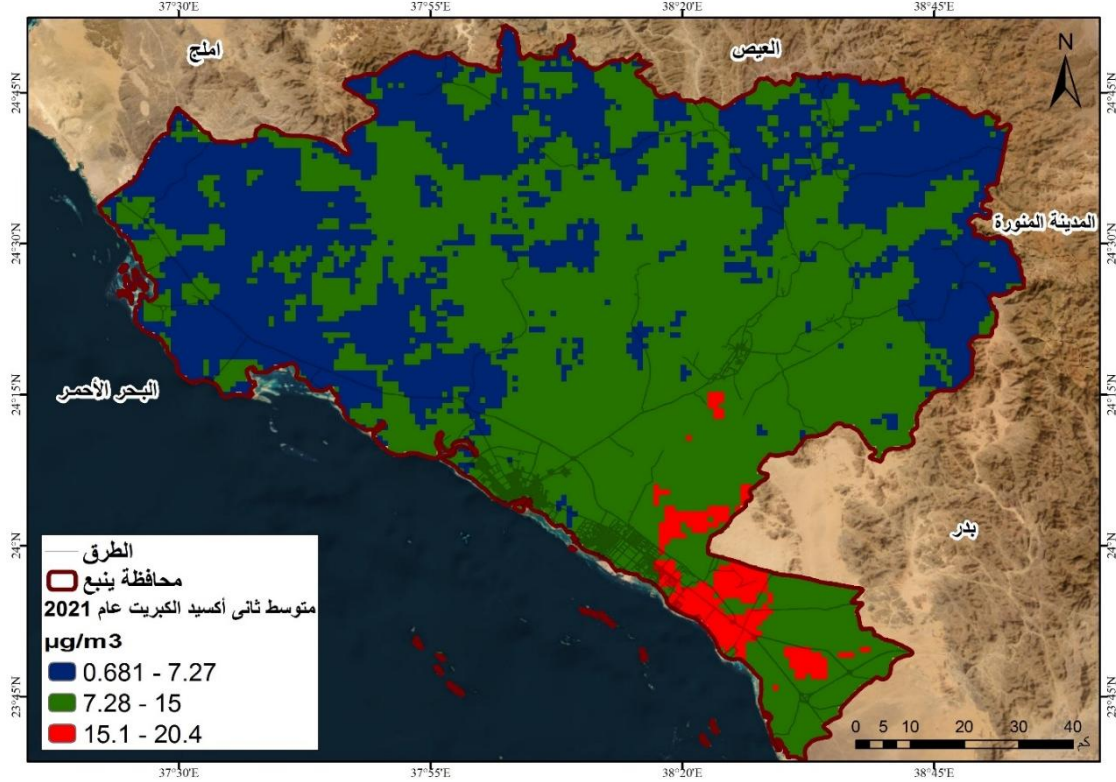
شكل رقم (٨): المتوسط الشهري لتركيز ثاني أكسيد الكبريت في محافظة ينبع لعام ٢٠٢١ م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠٢١ م.

المتوسط السنوي لغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠٢١ م: تم حساب المتوسط السنوي من المرئيات الشهرية، ثم استخراج المعدل السنوي كما هو موضح في الشكل رقم (٩):

شكل رقم (٩): المتوسط السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في محافظة ينبع لعام ٢٠٢١ م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠٢١ م.

من الشكل (٩) تم حساب توزيع تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت الى فئات كما هو موضح في الجدول (٤) جدول رقم (٤): مساحات توزيع تركيز غاز SO_2 حسب الفئات لعام ٢٠٢١ م في محافظة ينبع.

٢٠٢١			
الفئة	القيم	المساحة بكم ^٢	النسبة المئوية
1	7.27-0.681	3840.987	37%
2	15-7.28	6197.547	60%
3	20.4-15.1	291.865	3%

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المرئيات الفضائية ٢٠٢١ م.

ومن الجدول (٤) والشكل (٩) يتضح أنه في عام ٢٠٢١ تدرج توزيع غاز ثاني أكسيد الكبريت حسب الفئات الثلاثة، وتعتبر هذه الفئات عن تركز الغاز حسب القيم الموجودة في المرئية فقد كانت الفئة الثانية الأكبر من حيث المساحة، فقد بلغت ٦١٩٧,٥٤٧ كم^٢ بنسبة ٦٠٪ من منطقة الدراسة، ثم امتدت إلى الفئة الأولى بمساحة ٣٨٤٠,٩٨٧ كم^٢ بنسبة ٣٧٪ من منطقة الدراسة، ثم انتشرت في الفئة الثالثة

والتي تُعدّ الأعلى تركيزًا لغاز ثاني أكسيد الكبريت من الفئات السابقة بمساحة تقدر بـ ٢٩١,٨٦٥ كم^٢ بنسبة ٣٪ من منطقة الدراسة، ولم تتجاوز قيمها الحد المسموح.

المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في الفترة من عام ٢٠١٨ إلى عام ٢٠٢١ - تم تقسيم هذا الجدول بناء على التركيزات المستخرجة من الخرائط من البيانات التي تمت في الدراسة، تم تقسيم التوزيع لغاز ثاني أكسيد الكبريت حسب المتوسطات الشهرية إلى ثلاث فئات: فئة، منخفضة، وفئة مرتفعة، وفئة متوسطة، كما في الجدول (٥).

جدول رقم (٥): المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في الفترة من عام ٢٠١٨ إلى عام ٢٠٢١ م.

السنة الاشهر	2018	2019	2020	2021
يناير	-	↑ 11.0	→ 7.9	→ 9.1
فبراير	-	↑ 12.5	↑ 10.2	→ 9.2
مارس	-	↑ 12.7	↑ 12.3	↓ 7.6
ابريل	-	↑ 10.7	↑ 11.9	↑ 11.5
مايو	-	→ 9.5	→ 8.4	↑ 10.9
يونيو	-	↓ 5.4	↓ 6.5	↓ 7.6
يوليو	-	↓ 5.3	→ 8.3	↓ 7.0
اغسطس	-	↓ 7.1	↓ 4.9	↓ 7.2
سبتمبر	-	→ 10.1	↑ 9.9	→ 10.1
اكتوبر	↑ 11.9	→ 8.6	↓ 7.0	→ 8.9
نوفمبر	↓ 6.2	↓ 7.1	→ 7.8	↑ 11.6
ديسمبر	↓ 5.9	→ 9.6	→ 8.9	↑ 10.9

ملاحظة: تم تقسيم كل سنة على حدا حيث ↓ يعبر عن الفئة المنخفضة و → عن الفئة المتوسطة و ↑ عن الفئة المرتفعة.

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت.

المعدلات السنوية لغاز ثاني أكسيد الكبريت SO₂ في محافظة ينبع: المعدلات السنوية لمحافظة ينبع لكل من عام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١) حسب نتائج صور الاستشعار عن بُعد، وتم استخراج المتوسطات السنوية من داخل برنامج (ArcGIS) كما في الجدول (٦).

الجدول رقم (٦): المعدل السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في محافظة ينبع للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١).

المتوسط السنوي لغاز SO ₂ (µg/m ³)	السنة
6.711	2018
9.144	2019
8.676	2020
9.318	2021
8.462	المتوسط الحسابي العام

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المعدل السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت.

يبين الجدول (٦) ما يأتي:

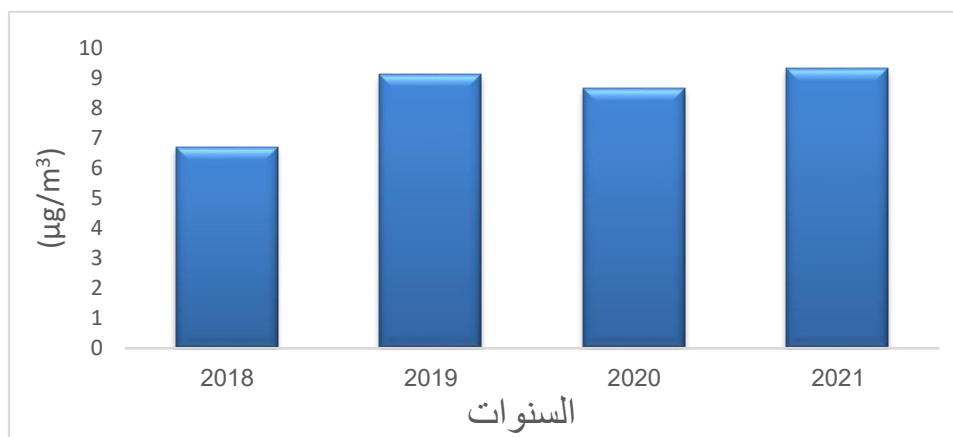
١. بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) لمنطقة الدراسة ككل (٨,٤٦٢).

٢. أعلى نسبة تركيز في منطقة الدراسة كانت في العام (٢٠٢١) حيث بلغت (٩,٣١٨).

٣. أقل نسبة تركيز في منطقة الدراسة كانت في العام (٢٠١٨) حيث بلغت (٦,٧١١).

وقد تم توضيح التغير في التركيز لغاز ثاني أكسيد الكبريت SO₂ في الشكل (١٠).

الشكل رقم (١٠): المعدل السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت في محافظة ينبع للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١م).



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المعدل السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت.

ويتضح من الجدول رقم (٦) والشكل رقم (١٠) أن متوسط التركيز غير مستقر؛ إذ إنه ينخفض

سنة ويرتفع أخرى، والجدير بالذكر أنه على طول فترة الدراسة لم يتجاوز (٩,٣١٨) (µg/m³)، وأقل

متوسط (٦,٧١١) (µg/m³).

تقييم الصحة بين المرئيات الفضائية من القمر الصناعي (Sentinel-5P) ومحطات قياس جودة الهواء:

لتقييم الصحة تم إجراء مقارنة لعنصر SO₂ في المدة من ٢٠١٨ إلى ٢٠٢١ في منطقة الدراسة باستخدام الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية مع البيانات المتوفرة من محطات الرصد الأرضية، فقد تم الحصول على بيانات الدراسة من محطات رصد جودة الهواء في ينبع حيث تتوفر فيها محطة ينبع، التي احداثياتها ٣٨,٤٣٧٤١٢° شرقاً - ٢٣,٨٦٢٣٥٩° شمالاً، فقد تم الحصول على بيانات الدراسة من محطات رصد جودة الهواء في ينبع حيث تتوفر فيها بوحدّة (ppb)، وتم تحويلها إلى وَحدّة ميكروجرام /متر مكعب (µg/m³) وقد كانت على شكل بيانات بالساعة، ثم تم استخراجها إلى بيانات يومية، ومن ثم تم حساب المتوسطات لكل شهر للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١) ومقارنتها ببيانات الاستشعار عن بعد كما في الجدول رقم (٧):

جدول رقم (٧): المتوسطات الشهرية لمحنة ينبع البيانات الأرضية وبيانات الاستشعار عن بعد للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١) بوحدّة (µg/m³).

السنة		٢٠١٨		٢٠١٩		٢٠٢٠		٢٠٢١	
الشهر		بيانات أرضية	بيانات استشعار عن بعد	بيانات أرضية	بيانات استشعار عن بعد	بيانات أرضية	بيانات استشعار عن بعد	بيانات أرضية	بيانات استشعار عن بعد
يناير		8.52	**	11.74	11	7.9	**	7.60	9.1
فبراير		11.45	**	12.73	12.5	10.2	**	7.07	9.2
مارس		15.96	**	13.99	12.7	12.3	**	8.38	7.6
إبريل		11.42	**	22.51	10.7	11.9	**	7.34	11.5
مايو		11.66	**	24.73	9.5	8.4	**	6.81	10.9
يونيو		12.76	**	17.32	5.4	6.5	**	4.45	7.6
يوليو		9.17	**	15.43	5.3	8.3	**	4.98	7.0
أغسطس		19.20	**	36.29	7.1	4.9	**	5.24	7.2
سبتمبر		30.58	**	16.40	10.1	9.9	**	5.50	10.1
أكتوبر		31.47	11.9	22.03	8.6	7.0	**	5.24	8.9
نوفمبر		20.02	6.2	16.19	7.1	7.60	7.60	4.72	11.6
ديسمبر		12.76	5.9	13.36	9.6	8.9	7.34	7.34	10.9
المتوسط العام للسنة		16.25	7	18.56	9.144	8.676	7.47	6.22	9.3

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على بيانات المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي للبيانات الأرضية وبيانات الاستشعار عن بعد للأعوام (٢٠١٨، ٢٠١٩، ٢٠٢٠، ٢٠٢١).

-الحدود القياسية المسموح بها محلياً وعالمياً لجودة الهواء فيما يتعلق بغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 :

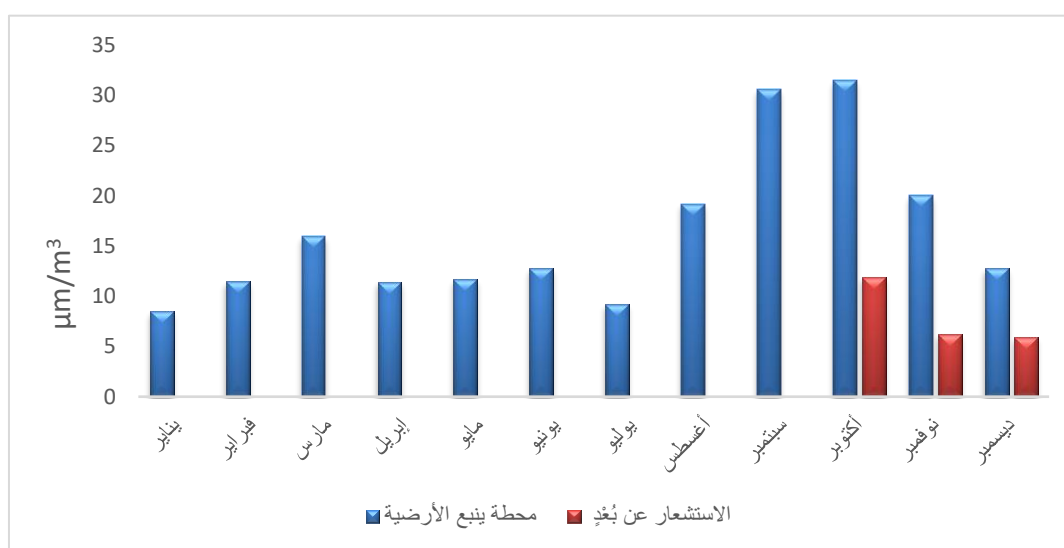
الجدول رقم (٨): الحدود القياسية المسموح بها لجودة الهواء المحيط طبقاً للنظام العام للبيئة واللائحة التنفيذية بالمملكة العربية السعودية فيما يتعلق بغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 .

المعامل	المتوسط المرجح زمنياً ميكروجرام/متر مكعب (جزء من المليون)	متوسط الوقت	الحدود المسموح بها من التجاوزات
غاز ثاني أكسيد SO_2 الكبريت	730 (0.28)	ساعة واحدة	مرتان في السنة
	365 (0.14)	24 ساعة	مرة واحدة في السنة
	80 (0.03)	سنوياً	غير متاح

المصدر: الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة. ٢٠١٩ حسب التقرير السنوي ٢٠١٩ لجودة الهواء في المملكة العربية السعودية.

مقارنة بيانات تركيزات SO_2 بين القيم المقاسة بالمحطات الأرضية والمقدرة بالمرئيات الفضائية لعام ٢٠١٨ م: المقارنة الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠١٨ م في محافظة ينبع للبيانات الأرضية وبيانات الاستشعار عن بُعد، كما يتبين في الشكل (١١) على النحو الآتي:

الشكل رقم (١١): النسب الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) للعام ٢٠١٨ م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام ٢٠١٨ م.

تم توضيح المتوسطات الشهرية للمحطة الأرضية وقراءات مرئيات الاستشعار عن بُعد في الشكل (١١). ومن الجدول (٧) والشكل رقم (١١) تم استنتاج ما يأتي:

١. بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام (٢٠١٨) لمنطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية ينبع (١٦,٢٥) ($\mu g/m^3$)، حيث لم يتجاوز الحد المسموح فيه كما هو موضح في الجدول (٨)، في حين كان المتوسط الحسابي حسب بيانات الاستشعار عن بُعد (٧) ($\mu g/m^3$)، أيضاً لم يتجاوز الحد المسموح به كما هو موضح في الجدول رقم (٨).

٢. أعلى نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية ينبع كانت في شهر أكتوبر، حيث بلغت (٣١,٤٧) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، أيضًا لم تتجاوز الحد المسموح به، في حين كان أعلى نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعد في شهر أكتوبر (١١,٩) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، وهنا نلاحظ أيضًا أنها لم تتجاوز الحد المسموح به.

٣. أقل نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية ينبع كانت في شهر يناير، حيث بلغت (٨,٥٢) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، وحسب بيانات الاستشعار عن بُعد كانت في شهر ديسمبر (٥,٩) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

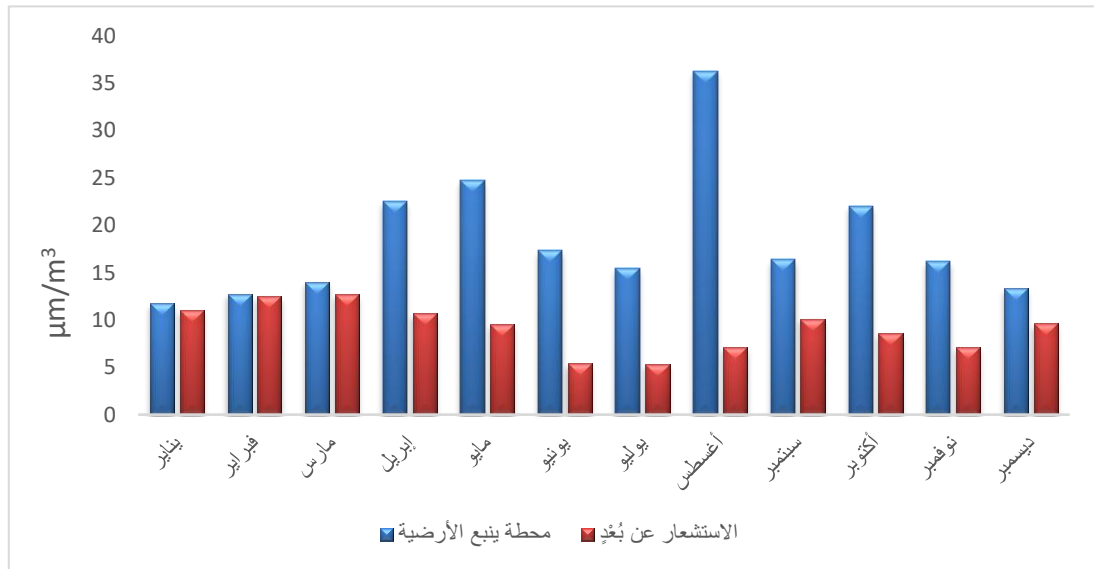
٤. ونلاحظ أن النسبة التي تم حسابها من المتوسط العام لبيانات المحطة الأرضية لعام ٢٠١٨ التي بلغت (١٦,٢٥) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كانت أقل من الحد المصرح به محليًا، حيث إن الحد المسموح به لجودة الهواء المحيط في المملكة العربية السعودية فيما يتعلق بغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 يساوي (٨٠) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كما هو موضح في الجدول (٨).

مقارنة بيانات تركيزات SO_2 بين القيم المقاسة بالمحطات الأرضية والمقدرة بالمرئيات الفضائية لعام ٢٠١٩م:

المقارنة الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠١٩م في محافظة ينبع للبيانات الأرضية وبيانات الاستشعار عن بُعد كما يتبين في الشكل (١٢) على النحو الآتي:

تم توضيح المتوسطات الشهرية للمحطة الأرضية وقراءات مرئيات الاستشعار عن بُعد في الشكل (١٢).

الشكل رقم (١٢): النسب الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) للعام ٢٠١٩.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام ٢٠١٩م.

من الجدول رقم (٧) والشكل لاقم (١٢) تم استنتاج ما يأتي:

١. بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام (٢٠١٩) حسب بيانات المحطة الأرضية ينبع لمنطقة الدراسة (١٨,٥٦) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، حيث لم يتجاوز الحد المسموح به كما هو موضح

في الجدول (٤-١٢)، في حين كان المتوسط الحسابي حسب بيانات الاستشعار عن بُعْدٍ (٩,١٤٤) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، أيضًا لم يتجاوز الحد المسموح به كما هو موضح في الجدول (٤-١٢).

٢. أعلى نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية ينبع كانت في شهر أغسطس حيث بلغت (٣٦,٢٩) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، أيضًا لم تتجاوز الحد المسموح به، في حين كانت أعلى نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعْدٍ في شهر مارس (١٢,٧) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، وهنا نلاحظ أيضًا أنها لم تتجاوز الحد المسموح به.

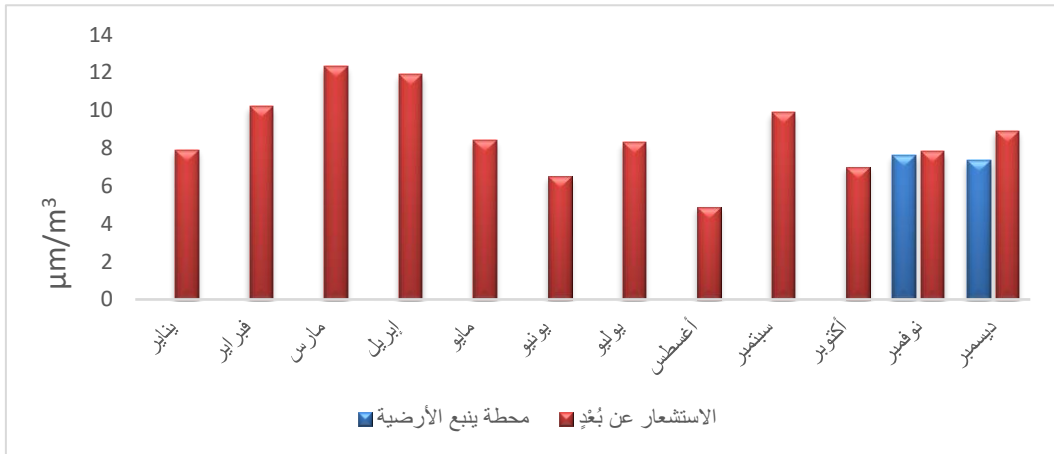
٣. أقل نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية ينبع كانت في شهر يناير، حيث بلغت (١١,٧٤) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، في حين كانت أقل نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعْدٍ في شهر يوليو (٥,٣) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

٤. أيضًا نلاحظ أن النسبة التي تم حسابها للمتوسط العام لبيانات المحطة الأرضية لعام ٢٠١٩ التي بلغت (١٨,٥٦) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كانت أقل من الحد المصرح به محليًا، حيث إن الحد المسموح به لجودة الهواء المحيط في المملكة العربية السعودية فيما يتعلق بغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 يساوي (٨٠) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كما هو موضح في الجدول (٨).

مقارنة بيانات تركيزات SO_2 بين القيم المقاسة بالمحطات الأرضية والمقدرة بالمرئيات الفضائية لعام ٢٠٢٠م: المقارنة الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠٢٠م في محافظة ينبع للبيانات الأرضية وبيانات الاستشعار عن بُعْدٍ كما يتبين لنا الشكل (١٣) على النحو الآتي:

تم توضيح المتوسطات الشهرية للمحطة الأرضية وقراءات مرئيات الاستشعار عن بُعْدٍ في الشكل رقم (١٣).

الشكل رقم (١٣): النسب الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) للعام ٢٠٢٠م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام ٢٠٢٠م.

من الجدول رقم (٧) والشكل رقم (١٣) تم استنتاج ما يأتي:

١. بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام (٢٠٢٠) لمحطة ينبع (٧,٤٧) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، حيث لم يتجاوز الحد المسموح فيه، كما هو موضح في الجدول (٨) في حين كان المتوسط الحسابي حسب بيانات الاستشعار عن بُعد (٨,٧) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، أيضًا نلاحظ هنا أنه لم يتجاوز الحد المسموح به كما هو موضح في الجدول (٨).

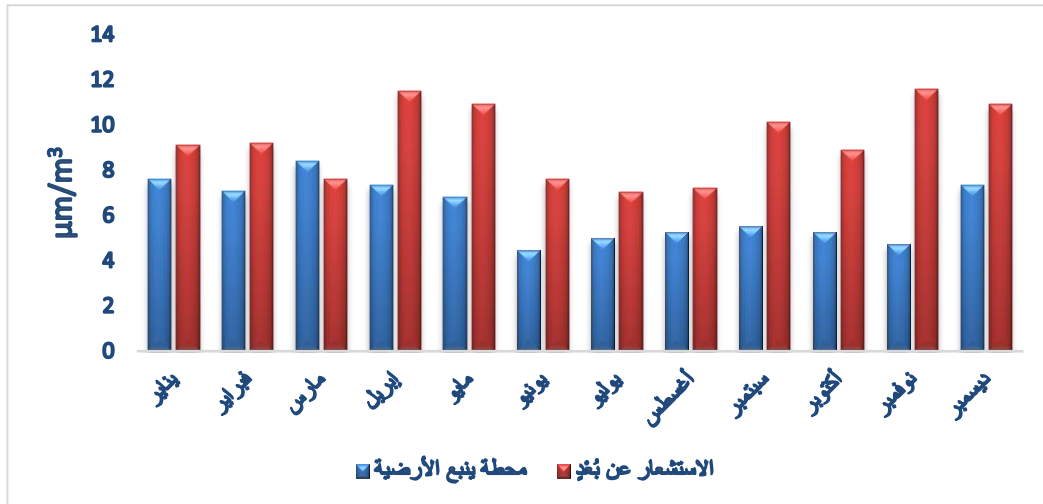
٢. أعلى نسبة تركيز في محطة ينبع كانت في شهر نوفمبر، حيث بلغت (٧,٦٠) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). أيضًا لم تتجاوز الحد المسموح، في حين أن أعلى نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعد كانت في شهر مارس (١٢,٣) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، وهنا نلاحظ أيضًا لم تتجاوز الحد المسموح به.

٣. أقل نسبة تركيز في محطة ينبع كانت في شهر ديسمبر أجزاء حيث بلغت (٧,٣٤) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، في حين كانت أقل نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعد كانت في شهر أغسطس (٤,٩) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

٤. وهنا أيضًا نلاحظ أن النسبة التي تم حسابها لمتوسط بيانات المحطة الأرضية لعام ٢٠٢٠ قد بلغت (٧,٤٧) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كانت أقل من الحد المصرح به محليًا. حيث إن الحد المسموح به لوجود الهواء في المملكة العربية السعودية فيما يتعلق بغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 ويساوي (٨٠) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، كما هو موضح في الجدول (٨).

مقارنة بيانات تركيزات SO_2 بين القيم المقاسة بالمحطات الأرضية والمقدرة بالمرئيات الفضائية لعام ٢٠٢١ م: المقارنة الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 لعام ٢٠٢١ م في محافظة ينبع للبيانات الأرضية وبيانات الاستشعار عن بُعد كما يتبين لنا في الشكل (١٤) على النحو الآتي: تم توضيح المتوسطات الشهرية للمحطة الأرضية وقراءات مرئيات الاستشعار عن بُعد في الشكل (١٤).

الشكل رقم (١٤): النسب الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) للعام ٢٠٢١ م.



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المتوسطات الشهرية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت للعام ٢٠٢١ م.

من الجدول رقم (٧) والشكل رقم (١٤) تم استنتاج ما يأتي:

١. أعلى نسبة تركيز في محطة ينبع كانت في شهر مارس حيث بلغت (٨,٣٨) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ، أيضاً لم تتجاوز الحد المسموح به،
٢. في حين كانت أعلى نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعد في شهر نوفمبر (١١,٦) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، وهنا نلاحظ أيضاً أنها لم تتجاوز الحد المسموح به.
٣. أقل نسبة تركيز في محطة ينبع كانت في شهر يونيو، حيث بلغت (٤,٤٥) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، في حين كانت أقل نسبة تركيز حسب بيانات الاستشعار عن بُعد في شهر يوليو (٧) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
٤. ونلاحظ أن النسبة التي تم حسابها من المتوسط العام للبيانات المحطة الأرضية لعام ٢٠٢١ التي بلغت (٦,٢٢) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كانت أقل من الحد المصرح به محلياً، حيث إن الحد المسموح به لجودة الهواء المحيط في المملكة العربية السعودية فيما يتعلق بغاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 يساوي (٨٠) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) كما هو موضح في الجدول (٨).

المقارنة السنوية لبيانات تركيزات غاز SO_2 بين القيم المقاسة بالمحطات الأرضية والمقدرة بالمرئيات الفضائية للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١م):

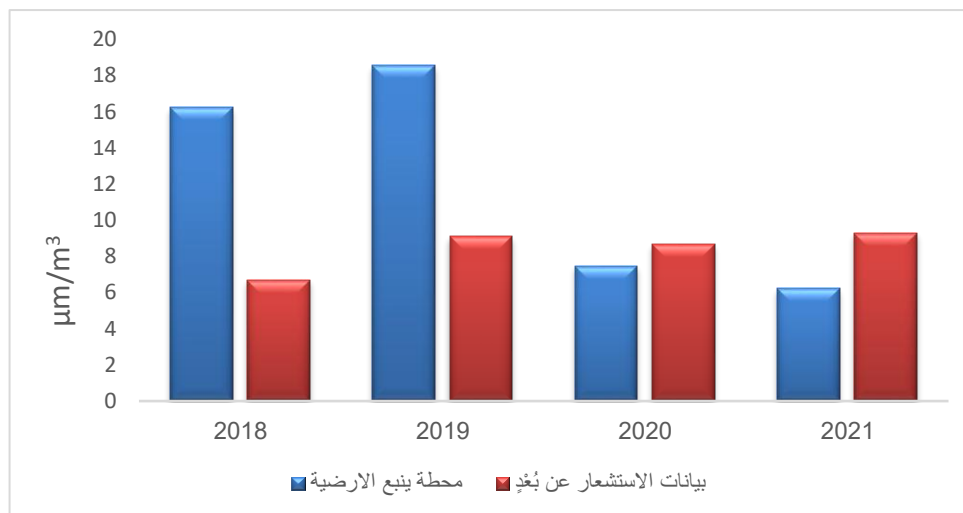
المقارنة السنوية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2 في محافظة ينبع لمتوسط البيانات الأرضية ومنتوسط بيانات الاستشعار عن بُعد للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١م) كما هو موضح في الجدول (٩) والشكل (١٥):

الجدول رقم (٩): المتوسطات السنوية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١م).

السنة	محطة ينبع الأرضية ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	بيانات الاستشعار عن بُعد ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
٢٠١٨	16.25	6.7
٢٠١٩	18.56	9.1
٢٠٢٠	7.47	8.7
٢٠٢١	6.22	9.3
المتوسط الحسابي العام	12.12	8.46

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المعدل السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت.

الشكل رقم (١٥): المتوسطات السنوية لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) للأعوام (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١ م).



المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على المعدل السنوي لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت.

من الجدول (٩) والشكل (١٥) تم استنتاج ما يأتي:

١. بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) حسب بيانات المحطة الارضية (محطة ينبع) لمنطقة الدراسة ككل (١٢,١٢) $\mu g/m^3$ ، حيث لم يتجاوز الحد المسموح فيه في المملكة العربية السعودية كما هو موضح في الجدول (٨).
٢. بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) حسب بيانات الاستشعار عن بُعد لمنطقة الدراسة ككل (٨,٤٦) $\mu g/m^3$ ، وهنا أيضاً نلاحظ عدم تجاوز الحد المسموح.
٣. أعلى نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية (محطة ينبع) كانت في العام (٢٠١٩)، حيث بلغت (١٨,٥٦) $\mu g/m^3$ ، أيضاً لم تتجاوز الحد المسموح به، كما هو موضح في الجدول (٨).
٤. أعلى نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات الاستشعار عن بُعد كانت في العام (٢٠٢١) حيث بلغت (٩,٣) $\mu g/m^3$ ، وهنا أيضاً لم تتجاوز الحد المسموح به، كما هو موضح في الجدول (٨).
٥. أقل نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات المحطة الأرضية (محطة ينبع) كانت في العام (٢٠٢١) حيث بلغت (٦,٢٢) $\mu g/m^3$.
٦. أقل نسبة تركيز في منطقة الدراسة حسب بيانات الاستشعار عن بُعد كانت في العام (٢٠١٨) حيث بلغت (٦,٧) $\mu g/m^3$.

٧. بالمقارنة مع المعدلات المصرح بها والمسموحة فإننا نجد أن النسبة المسموح بها لم يتم تجاوزها في البيانات الشهرية او السنوية، في حين بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) لمحطة ينبع (١٢,١٢) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)، أي أنّ التركيز المقاس في منطقة الدراسة جاء أقل من الحدود المسموح بها محلياً، وأيضاً بلغ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) لبيانات الاستشعار عن بُعد (٨,٤٦) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) المقاس في منطقة الدراسة جاء أقل من الحدود المسموح به.

وتشير نتائج هذا الجدول إلى أن تركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت يتناقص تدريجياً في بيانات المحطة الأرضية ويميل إلى الثبات في بيانات الاستشعار عن بعد بسبب الاهتمام العالمي والمحلي في الحد من خطر انتشار الغازات الملوثة للجو، واتخاذ إجراءات صارمة من قبل الحكومة السعودية من خلال جهود لجنة المحافظة على جودة الهواء في المملكة.

المقارنة الإحصائية بين بيانات الاستشعار عن بعد وبيانات المحطات الأرضية في منطقة الدراسة:

للكشف عن العلاقة ذات الدلالة الإحصائية تم حساب (المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية، واختبار ت (T-test) والتي تعبر عن مدى التغير بين بيانات الاستشعار عن بُعد وبيانات المحطات الأرضية في منطقة الدراسة كما موضح في الجدول (٩)، تم عمل اختبار ت (T-test) ف برنامج الإحصاء spss، حيث تم استخدام المتوسط الإجمالي لسنوات الدراسة (٢٠١٨-٢٠١٩-٢٠٢٠-٢٠٢١) بالنسبة لبيانات المحطة الأرضية (محطة ينبع) وأيضاً تم استخدام المتوسط الإجمالي لبيانات الاستشعار عن بُعد كما هو مبين في الجدول (١٠).

جدول رقم (١٠): المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية ونتائج اختبار (t) لتقديرات عينة الدراسة وفقاً لمتغير طريقة استخراج البيانات.

طريقة استخراج البيانات	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	قيمة ت	درجات الحرية	مستوى الدلالة
الاستشعار عن بُعد	8.45	1.19	3.917	3	**0.030
بيانات المحطات الأرضية	12.13	6.19	14.166	3	** 0.001

المصدر: من اعداد الباحثة بالاعتماد على مخرجات التحليل الاحصائي.

يتبين من الجدول رقم (١٠) ما يلي:

١. وجود فروق ذات دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة ($\alpha = 0.05$) وفقاً لمتغير طريقة استخراج البيانات، حيث بلغ المتوسط الحسابي لبيانات المحطات الأرضية (١٢,١٣) وانحراف معياري

(٦,١٩)، أما المتوسط الحسابي للاستشعار عن بعد قد بلغ (٨,٤٥) وبانحراف معياري (١,١٩) أي أنه يوجد فرقا ظاهريا في المتوسط الحسابي بين أداتي الدراسة.

٢. فيما يتعلق بقيمة "ت" فتشير نتائج التحليل إلى أن قيمة اختبار "ت" لبيانات للمحطات الأرضية قد بلغت (١٤,١٦٦) عند درجة حرية (٣) بدلالة إحصائية بلغت (٠,٠٠١) مما يدل على وجود فروق دالة إحصائية عند مستوى دلالة (٠,٠٥) بين أداتي الدراسة.

٣. فيما يتعلق بقيمة "ت" فتشير نتائج التحليل إلى أن قيمة اختبار "ت" للاستشعار عن بعد قد بلغت (٣,٩١٧) عند درجة حرية (٣) بدلالة إحصائية بلغت (٠,٠٣٠) مما يدل على وجود فروق دالة إحصائية عند مستوى دلالة (٠,٠٥) بين أداتي الدراسة.

الخاتمة:

ان التحليل الجغرافي والتقنيات الجيومكانية توفر أساليب فعالة لرصد وتقييم تلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد الكبريت، تم توضيح تأثيرات ثاني أكسيد الكبريت على جودة الهواء وتحديد المناطق ذات المخاطر العالية بشكل دقيق حيث تم تحليل البيانات الجغرافية واستخدام أساليب تحليل البيانات المأخوذة من القمر سنتيال ومن المحطات الأرضية حيث تم دراسة تركيز (غاز ثاني أكسيد الكبريت SO_2) في محافظلة ينبع من خلال مرئيات القمر الصناعي Sentinel 5p ومحطات قياس جودة الهواء الأرضية في المدة من ٢٠١٨ إلى ٢٠٢١ م في منطقة الدراسة وتم استخدام المنهج الاستقرائي التحليلي والمنهج الوصفي التحليلي وتم عمل تقييم الصحة بين المرئيات الفضائية ومحطات قياس جودة الهواء وتوصلت الدراسة الى عدد من النتائج أهمها: أنّ المتوسط الحسابي العام لتركيز غاز ثاني أكسيد الكبريت خلال السنوات (٢٠١٨-٢٠٢١) لمنطقة الدراسة ككل حسب بيانات المحطة الأرضية بلغ (١٢,١٢) ميكروجرام/متر مكعب، وايضاً حسب بيانات الاستشعار عن بعد بلغت (٨,٤٦) ميكروجرام/متر مكعب، وبالمقارنة مع المعدلات المصرح بها والمسموحة فإننا نجد أن النسبة المسموح بها (٨٠) ميكروجرام/متر مكعب، أي أن التركيز المقاس في منطقة الدراسة جاء أقل من الحدود المسموح بها عالمياً ومحلياً. وأظهرت نتائج الدراسة أيضاً الى وجود فروق ذات دلالة إحصائية عند مستوى الدلالة ($\alpha = 0,05$) بين نتائج الطريقتين وفقاً لمتغير طريقة استخراج البيانات (الاستشعار عن بُعد وطريقة بيانات المحطات الأرضية).

وتوصي الدراسة بما يأتي:

ضرورة تطوير وتحسين نظام المراقبة لجودة الهواء في المنطقة المدروسة باستخدام التقنيات الجيومكانية. يجب توسيع شبكة محطات الرصد وتحديثها باستخدام أحدث التقنيات الجيومكانية وأجهزة الاستشعار الجوي.

يجب التعاون مع الجهات الحكومية والصناعية لتطوير خطط فعالة للحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت. يمكن تحسين أداء المصانع والمنشآت الصناعية عن طريق تبني أفضل الممارسات الصناعية النظيفة واستخدام التكنولوجيا الحديثة للحد من الانبعاثات الضارة.

توصي بإجراء مزيد من الدراسات التوسعية لتحسين النماذج الجيومكانية لرصد تلوث الهواء بثاني أكسيد الكبريت.

المراجع:

أولاً: المراجع العربية:

جعفر، فادي يعقوب علي، (٢٠١٥م)، دور نظم المعلومات الجغرافية في اتخاذ القرار البيئي بين المعايير والمحفزات من وجهة نظر المؤسسات المستخدمة لها، [رسالة ماجستير]، معهد التنمية المستدامة، جامعة القدس.

الخریف، بدر، (٢٠١٠م)، الملك خالد... عهد الطفرة والازدهار الاقتصادي والاجتماعي، <https://web.archive.org>، اطلع عليه بتاريخ ٢٥ يوليو ٢٠٢١م.

الرويثي، محمد أحمد، (١٤٠٣هـ)، الموانئ السعودية على البحر الأحمر، دراسة في الجغرافية الاقتصادية، مؤسسة الرسالة، بيروت، لبنان.

الشباني، إبراهيم ناجي عباس. (٢٠١٩). النمذجة المكانية لانبعاثات مصادر تلوث الهواء في مدينة الديوانية ومستويات تعرض السكان لها [أطروحة دكتوراه]. كلية الآداب - جامعة القادسية، العراق.

الشرقاوي، محمود. (٢٠١٨). استخدام نظم المعلومات الجغرافية لتقييم وإدارة تلوث الهواء المروري في مدن حاضرة الدمام. الملتقى الثاني عشر لنظم المعلومات الجغرافية بالملكة العربية السعودية، جامعة الإمام عبد الرحمن بن فيصل، ١-٢ إبريل ٢٠١٨، ص ٣١٤-٣٢٥.

طاهر، جمال أمين. (٢٠٠٩). التلوث البيئي - إدارة النفايات ومعالجتها. مجلة أسبوت للدراسات البيئية، (٣٣).

عبيد، مصطفى. (٢٠٢٠). أساسيات الفيزياء، مركز البحوث والدراسات متعدد التخصصات. تركيا إسطنبول، <https://www.mdrscenter.com>

عويس، رشاش سعيد محمد. (٢٠١٣). التحليل المكاني للتلوث في محافظة الإسمايلية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار من البعد [رسالة ماجستير]. جامعة بنها. كلية الآداب. قسم الجغرافيا. مصر.

عينا، يوسف، آدم، الهادي محمد، وأحمد، فتحي. (٢٠١٦). فحص الديناميكيات المكانية والزمانية للجسيمات الدقيقة PM2.5 في المملكة العربية السعودية باستخدام البيانات المشتقة من الأقمار الصناعية: دراسة عنقودية. المؤتمر السعودي الأول للبيئة، ٧-٩ مارس ٢٠١٦، جامعة الملك خالد، المملكة العربية السعودية.

كردي، خالد نائل. (٢٠٢٠). *التلوث الهوائي الناجم عن انبعاثات عوادم السيارات بالمدينة المنورة ومدى أثرها على الصحة العامة لسكان المدينة* [رسالة دكتوراه]. جامعة نيوكاسل، بريطانيا.

مذكور، خالد محمد. (٢٠٢١). *رصد آثار وباء COVID-19 على تغير المناخ والبيئة على مصر باستخدام صور Sentinel-5P* ومنهجية البصمة الكربونية. *المجلة المصرية للاستشعار عن بُعد وعلوم الفضاء*، القاهرة.

ملحم، سامي محمد. (٢٠١٧). *مناهج البحث في التربة وعلم النفس*، دار المسيرة للنشر والتوزيع والطباعة، عمان، الأردن.

منظمة الصحة العالمية. (٢٠٠٥). *دلائل جودة الهواء فيما يخص المواد الجسيمية والأوزون وثاني أكسيد النتروجين وثاني أكسيد الكبريت*. مطبوعات منظمة الصحة العالمية.

منير، سعيد، جبر، صفوت، وحبيب الله، تركي محمد، وجناجرة، مأمون. (٢٠١٦). *التحليل الزمني المكاني للجسيمات الدقيقة (PM2.5) في المملكة العربية السعودية باستخدام بيانات الاستشعار عن بُعد*. الهيئة القومية للاستشعار عن بُعد وعلوم الفضاء. *المجلة المصرية للاستشعار عن بُعد وعلوم الفضاء*.

الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة. (٢٠١٩). *التقرير السنوي لجودة الهواء في المملكة العربية السعودية*.

ثانياً: المراجع الأجنبية:

Abdel Sattar, A. (2016). *Monitoring Air Pollution Using Satellite Data*. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Riyadh, Saudi Arabia, November 26-28, 2019, © IEOM Society International

Can, Li., Nickolay A., & Krotkov, P. L. (2020). *OMI/Aura Sulfur dioxide (SO2) column total L3 1-day best pixels at 0.25° x 0.25° V3, Greenbelt, MD*. USA, Earth Science Data, and Information from Goddard Service Center (GES DISC), Accessed: [Data Access History] 10.5067 / Aura / OMI / DATA3008.

Cesar, i., Alvarez, M., Ana Claudia, T., Nelly, T., & Valeria, V. (2019). *Evaluation of remote sensing data for PM10 model estimation in cities with few air quality stations: a case study in Quito, Ecuador*. *Environments*, 6, 85; doi:10.3390/environments6070085

Greenpeace International, <https://www.greenpeace.org/international/> retrieved 20 jan 2023

Hou, Y., Wang, L., Zhou, Y., Wang, S., & Wang, F. (2018). *Analysis of the Sulfur Dioxide Column Concentration over Jing-Jin-Ji, China, Based on Satellite Observations during the Past Decade*. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(4), 1551-1557. doi:10.15244/pjoes/77035.

Kawka, M., Struzewska, J., & Jacek, W. K. (2021). *Spatial and Temporal Variation of NO2 Vertical Column Densities (VCDs) over Poland: Comparison of the Sentinel-5P TROPOMI Observations and the GEM-AQ Model Simulations*. *Atmosphere*, 12, 896. <https://doi.org/10.3390/atmos12070896>

Khalila, M.A.K., Christopher, L., Butenhoffa, W. C., Portera, M. A., Abdulrahman A., & Mohammed, S. A. (2016). *Air quality in Yanbu, Saudi Arabia*. *JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION*, 66, (4), 341–355 <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2015.1129999>

- Korchenko, O., Pohrebennyk, V., Kreta, D., Klymenko, V., & Anpilova, Y. (2019). *GIS AND REMOTE SENSING AS IMPORTANT TOOLS FOR ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION*. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, Vol. 19, Iss. 2.1, (2019). DOI:10.5593/sgem2019/2.1/S07.039
- Kyriacos, Th., Diofantos, G., Hadjimitsisa, A., & Retalis, N. Ch. (2012). *The development of air quality indices through image retrieved AOT and PM10 measurements in Limassol Cyprus*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 8534 DOI:10.1117/12.974701.
- Nguyen, Q., Nguyen, P., Nguyen, T., & Nguyen, T. (2014). *GIS and Remote Sensing for Geohazard Assessment and Environmental Impact Evaluation of Mining Activities at Quy Hop, Nghe An, Vietnam*. Vietnam
- Palve, N. S., & Nemade, P.D., & Ghude, S.D. (2016). *The application of remote sensing techniques for air pollution analysis and climate change on Indian subcontinent*. 8th IGRSM International Conference and Exhibition on Remote Sensing & GIS.
- Salman, A., Al-Tayib, M., Hag-Elsafi, S., Zaidi, F.K., & Al-Duwarij, N. (2021). *Spatiotemporal Assessment of Air Quality and Heat Island Effect Due to Industrial Activities and Urbanization in Southern Riyadh, Saudi Arabia*. Appl. Sci, 11, 2107. <https://doi.org/10.3390/app11052107>.
- Somvanshi, Sh. S., & Aditi, V., & Umesh, Ch., & Geetanjali, K. (2019). *Delhi Air Pollution Modeling Using Remote Sensing Technique*. *Handbook of Environmental Materials Management*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_174-1
- Staehelin, J. (2008). *Global atmospheric ozone monitoring*. *WMO Bulletin*. 57(1).
- University Corporation for Atmospheric Research. (2023). *UCAR Community Programs, Unidata*. <https://www.unidata.ucar.edu>, retrieved 20 jan 2023.
- Jillian, M. (2016). *Air Pollution: Everything You Need to Know*. www.nrdc.org
- Virghileanu, M., & Ionut, S., & Bogdan-Andrei, M., & Constantin, N., & Robert, D. (2020). *Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak*. *Remote Sensing*, 3575; doi:10.3390/rs12213575.
- Walker, J. C., Carboni, E. Dudhia, A. & Grainger, R. G. (2012). *Improved detection of sulphur dioxide in volcanic plumes using satellite-based hyperspectral infrared measurements: Application to the Eyjafjallajökull 2010 eruption*, *J. Geophys. Res.*, 117, D00U16, doi:10.1029/2011JD016810. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel->

Monitoring air pollution with sulfur dioxide in Yanbu governorate using geospatial techniques

Alyah Ali Al Ahmari¹

Dr. Sulafa Hag- ElSafi²

Abstract

The importance of monitoring air quality is increasing in the current era due to its negative impacts on the environment and public health. Sulfur dioxide is an important pollutant that affects air quality and causes serious health problems when the level exceeds the permissible limit. The study aimed to study the concentration of (sulfur dioxide gas, SO₂) in Yanbu in KSA governorate through the Sentinel-5P satellite images), and to compare the SO₂ pollutant in the period from 2018 to 2021 AD in the study area using remote sensing and geographic information systems, and to assess health among satellite images from the satellite. Industrial (Sentinel-5P) and air quality measurement stations. The analytical inductive approach and the analytical descriptive approach were used, and a number of results were reached, the most important of which are: that the general arithmetic average of the concentration of sulfur dioxide gas during the years (2018-2021) for the study area as a whole according to the data of the ground station was (12.12) micrograms / cubic meter, Also, according to remote sensing data, it amounted to (8.46) micrograms / cubic meter, and compared to the authorized and permitted rates, we find that the permissible percentage is (80) micrograms / cubic meter, meaning that the measured concentration in the study area was less than the permissible limits globally and locally. The results of the study also showed that there were statistically significant differences at the significance level ($\alpha = 0.05$) between the results of the two methods according to the variable of the data extraction method (remote sensing and the ground station data method). The study recommends conducting further expansionary studies to improve geospatial models for monitoring air pollution with sulfur dioxide.

Keywords: Geographic information systems, satellite visualization, air quality, remote sensing.

¹ Master's degree in Geography Department - College of Humanities and Social Sciences - King Saud University

² Associate Professor, Department of Geography - College of Humanities and Social Sciences - King Saud University

تحليل التغيرات الزمانية والمكانية لخط الشاطئ واتصالها المناخي المحلي لمحافظة امّلع، المملكة العربية السعودية

د. علي بن سعيد الغامدي^٢

خالد بن حامد الحربي^١

الملخص:

يواجه حوالي ثلثي خطوط شواطئ العالم خطر الانجراف والتعرية؛ لذا اهتمت الدراسات الجيومورفولوجية بتتبع تغيراتها الزمانية والمكانية بهدف دعم خطط حمايتها. ولندرة الدراسات على مستوى المملكة العربية السعودية، هدفت هذه الدراسة إلى (١) الكشف عن أنماط التغير السائدة في بيئات شاطئية متنوعة (صخرية، حصوية، ورملية) ضمن سلسلة زمنية متصلة تمتد لعشرين سنة (٢٠٠٠ - ٢٠١٩)، باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد لخط شاطئ محافظة امّلع، غرب المملكة العربية السعودية، ومن ثم (٢) دراسة اتصال تلك التغيرات بالظروف المناخية المحلية (الرياح، ودرجة حرارة سطح البحر) خلال فصل الدفء (مايو-ديسمبر). لرسم خط الشاطئ الأكثر تمثيلاً، طوّرت الدراسة مؤشر خط الشاطئ الفعلي لكل فصل دفء بالاعتماد على مؤشر الفرق المعياري المعدل للمياه (MNDWI)، ثم قاست اتجاه التغير باستخدام معدل الانحدار الخطي وصافي حركة خط الشاطئ. أظهرت النتائج سيادة الاستقرار على المستوى العام (٠,٢٣ م/سنة)، مقابل تراجع منخفض في شاطئ مدينة امّلع (-٠,٨٧ م/سنة) والشاطئ الحصوي (-٠,٦٧ م/سنة)، وتقدم منخفض في الشاطئ الصخري (٠,٣٠ م/سنة) والرملية (٠,٥٧ م/سنة). مناخياً، ظهرت علاقة ارتباط موجبة ذات دلالة إحصائية بين معدلات التغير السنوية لصافي حركة خط الشاطئ وسرعة الرياح في معظم البيئات باستثناء الشاطئ الصخري، وتراوحت نسب الارتباط ذات الدلالة بين ٢٧,٥٪ و ٤٢,٧٪. وتؤكد الدراسة قيمة النتائج في دعم قرارات إدارة الساحل، وتوجيه سياسات الاستدامة عبر تحديد البيئات الأكثر حساسية للتغير، وترتيب أولويات التدخل الوقائي.

الكلمات المفتاحية:

خط الشاطئ، MNDWI، المناخ المحلي، الرياح، البحر الأحمر، محافظة امّلع.

^١ طالب دكتوراة - قسم الجغرافيا- كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية- جامعة الملك سعود ومحاضر بقسم الجغرافيا جامعة طيبة
^٢ أستاذ مشارك - قسم الجغرافيا- كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية - جامعة الملك سعود

المقدمة:

يحظى قياس التغير الزماني والمكاني لخط الشاطئ باهتمام متزايد، حيث يشكل سكان المناطق الساحلية حوالي ٣٨% من مجموع سكان العالم (Cosby et al., 2024). كما تتميز تلك المناطق بتزايد النشاط الاقتصادي فيها، والذي يظهر في بناء الموانئ والمرافئ والمنشآت الاقتصادية والسياحية (Luijendijk et al., 2018). وتُعد ظاهرة تعرية السواحل مشكلة عالمية (Prasad & Kumar, 2014)، إذ يواجه أكثر من ٧٠% من خطوط الشواطئ العالمية خطر التعرية (Martínez et al., 2007; Sheeja & Ajay-Gokul, 2016). خاصة المناطق المنخفضة (مناطق السهول المدية) أو مناطق الفتحات والخلجان البحرية (Ranasinghe, 2016). ولقد أسهم التغير المناخي، الذي من مظاهره ارتفاع مستوى البحر، في التأثير على العوامل البيئية المحلية الفاعلة، مثل الأمواج، والمد، والتيارات البحرية، في تغير خط الشاطئ (Vousdoukas et al., 2020). ولقد اعتبرت اللجنة الدولية للبيانات الجغرافية خط الشاطئ واحداً من ٢٧ ظاهرة من ظواهر الأرض القادرة على عكس حالة التفاعل بين البيئات الطبيعية والبشرية (Li et al., 2001).

يُعرف خط الشاطئ (Shoreline) بأنه الحد الفاصل بين اليابس والماء، كشرطي أرضي متصل يفصل بين الشاطئ من جهة، والبحر أو المحيط من جهة أخرى (Boak & Turner, 2005). ويُعد رسم خرائط خطوط الشاطئ ورصد التغيرات الزمانية والمكانية لمواضعها مهمة لمسارات الملاحية الأمانة، وحماية البيئة الساحلية وإدارتها، وأيضاً لبناء خطط الحماية من تأثيرات التغير المناخي (Paravolidakis et al., 2018). كما يُعد قياس معدلات تغير الخط زمانياً ومكانياً ركيزة أساسية تقوم عليها الدراسات التخطيطية لبناء مواضع حماية الشواطئ من خطر الانجراف، وبناء نماذج التنبؤ المستقبلية لمعدلات التغير، وكذلك دراسات حجم الإرسابات للشواطئ (Maiti & Bhattacharya, 2009)، حيث يتغير موضع خط الشاطئ زماناً ومكاناً بفعل شبكة ديناميكية متداخلة من العوامل المناخية والبحرية والبشرية (سليم، ١٩٩١). وتشمل هذه العوامل الرياح، سرعة واتجاهاً، ودرجة حرارة سطح البحر، والأمواج، والمد والجزر، وخصائص البيئات الشاطئية، إضافةً إلى أنشطة الحفر والردم والنشاط الاقتصادي الساحلي (Boak & Turner, 2005). وقد بيّنت الدراسات الجيومورفولوجية أن زيادة سرعة الرياح يمكن أن تسهم في زيادة ارتفاع مستوى الموج، بما يزيد من قابلية خط الشاطئ للتعرية والتآكل (Nazeer et al., 2020). كما قد تسهم زيادة درجة حرارة سطح البحر في رفع الكتلة المائية، بما يرتبط بتراجع مواضع الخط نحو اليابسة (Wibisana et al., 2020).

يمكن تتبع تغيرات خط الشاطئ الزمانية والمكانية باستخدام طرق كشف التغيرات الرقمية (Digital Change Detection)، عبر اشتقاق هذه التغيرات من السلاسل الزمنية الرقمية، كالمريئات

الفضائية (العمران، ٢٠١٢). غير أنّ كثيراً من الأدبيات يغلب عليها قياس تغير الخط باستخدام بيانات فترتين زمنييتين، بداية ونهاية فقط، وهو ما يسمى بأسلوب الحدين الزمني، أي القياس في بداية ونهاية زمن الدراسة. وعلى الرغم من أنّ هذا الأسلوب يتميز بالسهولة وقلة التكلفة، إلا أنّه يغفل العديد من البيانات للسنوات التي تقع بين الفترتين، والتي يمكنها أن توضح الطبيعة الديناميكية الشمولية لتغير الخط بشكل أفضل، لكون خط الشاطئ ظاهرة طبيعية ذات تغير/تذبذب دائم على المستوى الزمني. كما يشوب هذا الأسلوب أيضاً تحيزاً إلى فترات زمنية قد لا تمثل الطبيعة الديناميكية للخط، كالاقتصار -مثلاً- على دراسته في فترات زمنية ذات ظروف جوية/مناخية خارجة عن النمط السائد، مثل عقب الأعاصير، وفترات الجفاف، والردم السيلي. كما أن التساهل في تطبيق معايير ضبط جودة البيانات عند جمعها وتثبيتها، مثل التصحيح الراديومتري، وتصحيح الغلاف الجوي، والتسجيل البيئي، وتحديد الخط وتحليل تغيراته، يؤثر على جودة النتائج النهائية (Almonacid-Caballer et al., 2016; Burningham & French, 2017; Kuleli et al., 2011). انعكست هذه الجوانب جميعها على الدراسات المحلية المحدودة لساحل البحر الأحمر الشرقي، حيث ظهر تباينٌ في النتائج، مع شيوع الاعتماد على بيانات قصيرة وفترات زمنية متقطعة، وغياب معايير ضابطة لإجراءات القياس في كثيرٍ من الحالات (الحافظي، ٢٠١٦؛ الشيخ، ٢٠١٢؛ المثلوثي، ٢٠٠٤) (Al-Zubieri et al., 2018, 2020; Alharbi, 2020; Alharbi et al., 2017; Niang, 2020; Nofal & Abboud, 2016).

ساهم ظهور تقنيات الاستشعار عن بعد للأغراض المدنية في سبعينيات القرن الماضي، وقدرتها على توفير بيانات لخطوط الشواطئ، وانخفاض تكلفتها وزمن معالجتها، في التغلب على بعضاً من تلك التحديات، مما جعلها من المصادر الرئيسية التي يعتمد عليها الباحثون في قياس التغير الزمني والمكاني للخط. فلقد وفّرت بيانات الاستشعار عن بُعد إمكانية مراقبة خط الشاطئ باستمرار وبكلفة أقل من مثيلاتها من مصادر البيانات الأخرى، كالبيانات الحقلية والصور الجوية (Gens, 2010; Guariglia et al., 2006; Toure et al., 2019). فعلى سبيل المثال، وفرت سلسلة برنامج أقمار لاندسات (Landsat) أرشيف متكامل بصيغة جاهزة للتحليل (applications-ready)، مما يجعلها مناسبة للاستخدام المباشر في عمليات تحديد واقتطاع خط الشاطئ، وأصبحت متاحة مجاناً على موقع هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (Toure et al., 2019). وقد صاحب هذا التطور في مصادر البيانات تطوراً مماثل في برامج معالجة البيانات الفضائية وتحليلها، مما أتاح تتبع وقياس التغير الزمني والمكاني للخط، والكشف عن الدورات الزمنية المتعاقبة التي تحدث ضمن سلسلة زمنية متصلة تمكّن من الدراسة الشمولية لتغيرات الخط بشكل أفضل.

تكتسب دراسة تغير خط الشاطئ في محافظ امالج أهمية خاصة في ضوء وقوعها ضمن نطاق تنموي ساحلي متوقع، يرتبط بمشاريع السياحة الشاطئية، والممرات البحرية، والمنشآت الاقتصادية ضمن سياق مشروع البحر الأحمر، الأمر الذي يجعل رصد حالة خط الشاطئ قبل اتساع التدخلات البشرية أساساً مهماً لدعم الإدارة الساحلية المستدامة. وإلى جانب هذا السياق التنموي، تبرز محافظة امالج كحالة دراسة فريدة لما يمتاز به خط شاطئها من تنوع جيومورفولوجي ضمن بيئات ساحلية صخرية، وحصوية، ورملية، مما يجعلها بيئة مثالية لدراسة التغير الزماني والمكاني لخط الشاطئ. فلكل بيئة ساحلية استجابة مختلفة لعوامل التعرية، وخاصة تلك التي تنتج بفعل حركة الأمواج والتيارات البحرية، مما يزيد من فهم الطبيعة الديناميكية لاستجابة خط الشاطئ لتلك التفاعلات، وبيان مدى تأثير تلك البيئات على ذلك التغير. وعليه فقد هدفت الدراسة إلى:

١. الكشف عن الأنماط الزمانية والمكانية للتغيرات التي طرأت على خط شاطئ محافظة امالج في الفترة من ٢٠٠٠ إلى ٢٠١٩م، ضمن تنوع البيئة الشاطئية لمنطقة الدراسة.
٢. دراسة طبيعة اتصال (ارتباط) الأنماط الزمانية والمكانية لخط شاطئها بعوامل الرياح، سرعة واتجاهاً، ودرجة حرارة سطح البحر على مستوى المناخ المحلي.

منطقة الدراسة:

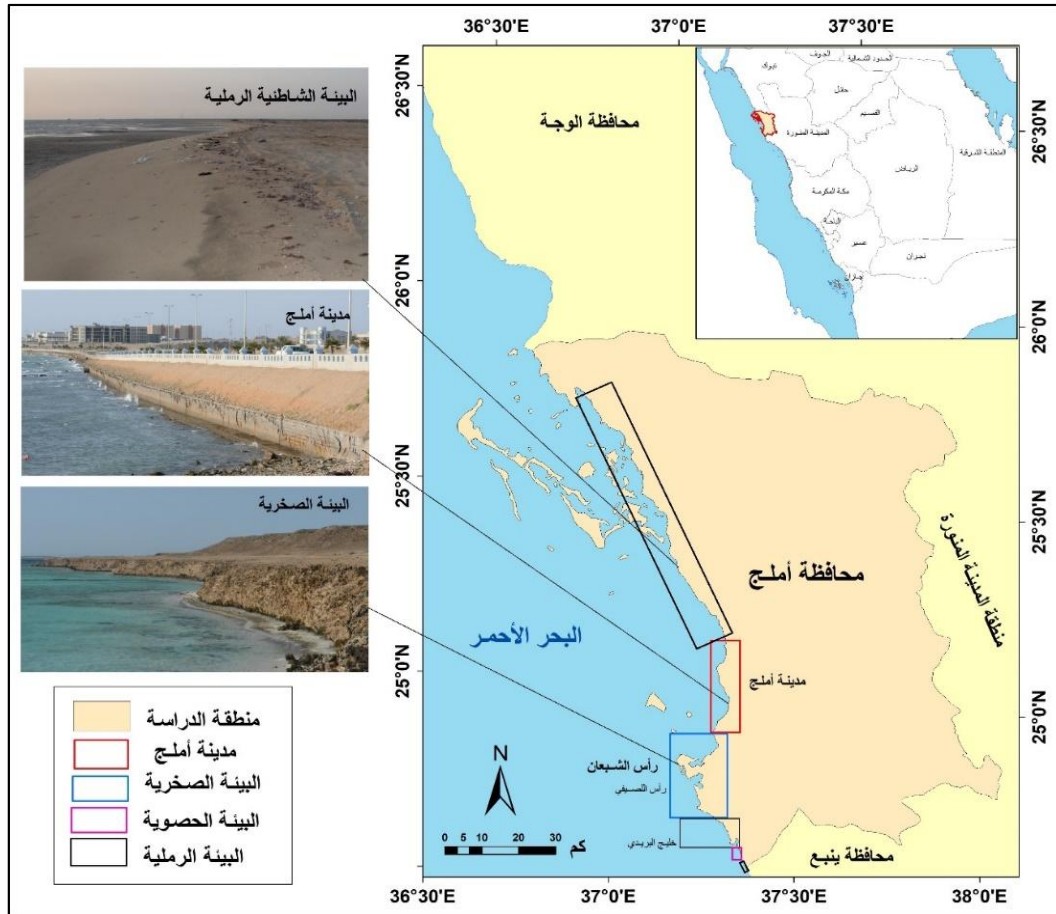
تقع محافظة امالج -التابعة إدارياً لإمارة منطقة تبوك- على الساحل الشرقي للبحر الأحمر، ويحدها شمالاً محافظة الوجه، وجنوباً محافظة ينبع، وشرقاً منطقة المدينة المنورة، وغرباً البحر الأحمر (شكل ١). ويبلغ امتداد خط شاطئ المحافظة نحو (١٧٥ كم)، مع ميل عام نحو الاستقامة وقلة التعرج في أغلب قطاعاته. وتشير الطبيعة الطبوغرافية والتقارير الجيولوجي-الجيومورفولوجي للمنطقة إلى تنوع جيومورفولوجي وشاطئ واضح ضمن نطاق الدراسة. ويُعد هذا التنوع إطاراً تفسيرياً لفروق استجابة خط الشاطئ للتعرية والترسيب؛ لذلك صُنِّفت بيئات الساحل إلى ثلاث بيئات رئيسية: صخرية، وحصوية، ورملية، إضافة إلى قطاع شاطئ مدينة امالج بوصفه قطاعاً حضرياً ذا تدخلات بشرية موضعية (شكل ١).

في الجزء الأوسط من المحافظة، تقع مدينة امالج كقطاع حضري يقع بين البيئة الرملية شمالاً والبيئة الصخرية (رأس الشبعان) جنوباً، بطول ٣٥ كم، مع وجود مرفأ صغير للصيد ومحطة تحلية للمياه في الجزء الجنوبي، وظهور عناصر حماية ساحلية موضعية (كتل خرسانية/حواجز حجرية) في وسط الشاطئ، إضافة إلى انتشار السبخات جنوباً. بينما تمتد البيئة الصخرية جنوب مدينة امالج بطول يقارب ٦٥ كم، وتتميز بضيق عرض الشاطئ، وكثرة الجروف البحرية، والكهوف الصغيرة، والرؤوس المتباينة

مساحيًا، وتجاورات مورفولوجية مثل الشروم، وبحيرات اللاقون، والفتحات البحرية، والسبخات، وجيوب رملية صغيرة.

أما البيئة الحصوية، فتتألف من رواسب رملية خشنة وحصباء متنوعة المصدر، وتمتد جنوب منطقة الدراسة، ويُلاحظ على خطها قلة التعرج وضعف النشاط البشري. وتتكون البيئة الرملية من رواسب ناعمة تتباين أطوالها موضعياً على امتداد منطقة الدراسة، ويتراوح متوسط اتساعها بين ١٧٠-١٣٦ م، وبمتوسط انحدار ٣,١-٢,٦ درجة (AlSayari & Zotl, 1979). وتتوزع هذه البيئة في ثلاث قطاعات على طول خط شاطئ المحافظة، ويبلغ طول خطها نحو ٧٥ كم. ويجعل هذا التباين البنيوي بين البيئات الشاطئية منطقة الدراسة ملائمة لرصد التغير الزمني-المكاني لخط الشاطئ، ومقارنة الاستجابات بين بيئات ذات صلابة ومقاومة مختلفة ضمن إطار مكاني واحد.

شكل (١): منطقة الدراسة والبيئات الشاطئية المتنوعة بمحافظة أمّالج اعتماداً على بيانات الهيئة العامة للمساحة والمعلومات الجيومكانية (١٤٤٠هـ).



الإجراءات المنهجية للدراسة:

١ اختيار وجمع بيانات خط الشاطئ

اعتمد اختيار بيانات خط الشاطئ المستمدة من الاستشعار عن بُعد على ثلاثة معايير رئيسية: زمن الالتقاط، والظروف البيئية المصاحبة، وملاءمة مصدر البيانات. وتستند هذه المعايير إلى أن موضع خط الشاطئ يتأثر بالتذبذب الموسمي والمدى، وبالذقة المكانية والطيفية للمرئيات (Gorman et al., 1998). استُخدمت بيانات لاندسات من المستوى الثاني (Level 2) لما توفره من تصحيح هندسي ورايومتري وجوي، واتساق مناسب للسلاسل الزمنية الطويلة (Pinto et al., 2020). ورغم ملاءمة بيانات (Level 2) لهدف الدراسة، فإنها لا تتوافر بدورية مثالية لجميع التواريخ المطلوبة؛ إذ قد تتأثر بدورة المرور المداري، والغطاء السحابي، وجودة المرئية، ومدى ملاءمة زمن الالتقاط لحالة سطح الماء. لذلك، جُمعت المرئيات ضمن فصل الدفء، الذي يمتد من شهر مايو إلى أواخر سبتمبر (Alghamdi & Harrington, 2018)، مع مراعاة تقارب أيام الشهر القمري، واختيار فترات تمثل مستوى ماء منخفضاً نسبياً للحد من أثر اختلاف حالة المد على موضع خط الشاطئ.

بلغ مجموع المرئيات المستخدمة (٦٠) مرئية للفترة من ٢٠٠٠-٢٠١٩، بواقع ثلاث مرئيات لكل فصل دفء سنوي قدر الإمكان، موزعة على ثلاث مجسات: بيانات الماسح الخرائطي الموضوعي-الجيل الخامس (TM) بعدد (٣٦) مرئية، و بيانات الماسح الخرائطي الموضوعي المحسن-الجيل السابع (ETM) بعدد (٦) مرئيات، وبيانات ماسح صور العمليات الأرضية-الجيل الثامن (OLI) بعدد (١٨) مرئية. ولقد اقتضت طبيعة السلسلة الزمنية الطويلة للدراسة استخدام أكثر من مجس، مع الحد من أثر الاختلافات الطيفية والرايومتري المحتملة من خلال استخدام بيانات المستوى الثاني، واشتقاق مؤشر MNDWI لكل مرئية وفق الحزم المناسبة لكل مجس، وتوحيد خطوات المعالجة اللاحقة، وأجراء التسجيل البيئي بين المرئيات (Lu et al., 2004)، مع المحافظة على خطأ الجذر التربيعي لمتوسط المربعات بأقل من ٠,٠١.

٢ تحديد خط الشاطئ

اعتمدت الدراسة على التحديد الآلي لخط الشاطئ بالاستناد إلى السلوك الطيفي للماء واليابس، باستخدام مؤشر الفرق المعياري المعدل للمياه (MNDWI) (Xu, 2006)، وليس مؤشر NDWI التقليدي. وقد اختير مؤشر MNDWI لملاءمته للبيئات الساحلية التي قد تتداخل فيها انعكاسات المنشآت العمرانية والتربة الجافة مع الظواهر المائية (Xu, 2006). ولم يقتصر الأمر على تطبيق المؤشر فقط، بل جرى اختبار ملاءمة القيمة العتبية من خلال مصفوفة خطأ اعتمدت على ١٤٤ عينة تحقق بصري-رقمي

عشوائية غير منتظمة، موزعة بين فئتي الماء واليابس، قبل اعتماد خطوط الشاطئ المستخرجة في التحليل المكاني والزمني.

٣ تمثيل خط الشاطئ الفعلي

نتج عن الخطوة السابقة تحديد خلوي لخط الشاطئ في كل مرئية، بواقع ثلاث مؤشرات مائية لكل فصل دفة، وإجمالي ٦٠ مؤشراً. وتمثل هذه النتائج خطأً لحظياً يعبر عن موضع التقاء اليابس بالماء وقت التقاط المرئية (Boak & Turner, 2005; Gens, 2010). ولأن خط الشاطئ يتذبذب يومياً، وشهرياً، وفصلياً تبعاً للنشاط الموجي، والمد والجزر، وحركة الرياح، طُوّر مؤشر خط الشاطئ الفعلي السنوي عبر حساب متوسط القياسات اللحظية الثلاث لكل فصل دفة، ثم تطبيق قيمة عتبية مقدارها صفر للفصل بين الماء واليابس، وتحويل الناتج إلى هيئة خطية، مما يسمح بإمكانية تقليل إشكالية استخدام الخط اللحظي.

استُخرج خط الشاطئ لكل فصل دفة في كل سنة من سنوات الدراسة، بإجمالي ٢٠ خطأً. ولاستخراج خط الشاطئ العام، حُسب المتوسط العام لمؤشر فرق الماء باستخدام جميع السنوات، ثم طبقت قيمة عتبية مقدارها صفر للفصل بين الماء واليابس، وحُوّل الناتج إلى هيئة خطية. ولم تعتمد الدراسة خط شاطئ في السنة الأولى بوصفه خط أساس، لأن سنة مفردة قد تتأثر بحالة مديدة، أو موسمية، أو مناخية لا تمثل الوضع العام؛ لذلك استُخدم خط متوسط عام بوصفه خطأً مرجعياً أكثر اتساقاً لإنشاء القطاعات المتعامدة في بيئة DSAS وقياس اتجاهات التغير.

٤ مؤشرات قياس التغيرات الزمانية والمكانية

قيس التغير الزمني والمكاني لخط الشاطئ باستخدام أداة نظام تحليل خط الشاطئ الرقمي DSAS من خلال إنشاء قطاعات متعامدة منتظمة على خط الأساس، بمسافة تباعد مقدارها ٣٠ م، بما يوازي الدقة المكانية للمرئيات. واستُخدمت هذه القطاعات بوصفها وحدات قياس لاشتقاق مؤشرات التغير؛ إذ بلغ عددها في تحليل النمط العام لمحافظة امالج ٥٨٢٣ قطاعاً. وبلغ عددها في مدينة امالج والشواطئ الصخرية والرملية والحصوية ١١٨٤، و٢١٧٤، و٢٤٠٤، و٤٠ قطاعاً، على التوالي. واستُخدم معدل الانحدار الخطي (LRR) للكشف عن النمط العام، وصافي حركة خط الشاطئ (NSM) لقياس أنماط التغير الفتري والسنوي، مع تصنيف درجات التغير وفق جدول (١).

جدول (١): تصنيف درجات تغير خط الشاطئ وفق هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية بتصريف من (Himmelstoss et al., 2018).

التمثيل اللوني*	التصنيف	(NSM)	(LRR)
	تراجع مرتفع جدا	قيمة أدنى ≤ -473	قيمة أدنى $\leq -3,00$
	تراجع مرتفع	$-473 \leq -315$	$-3,00 \leq -2,00$
	تراجع متوسط	$-315 \leq -157$	$-2,00 \leq -1,00$
	تراجع منخفض	$-157 \leq -10$	$-1,00 \leq -0,5$
	مستقر (حياد)	$-10 \leq 10$	$-0,5 \leq 0,5$
	تقدم منخفض	$10 \leq 175$	$0,5 \leq 1,00$
	تقدم متوسط	$175 \leq 350$	$1,00 \leq 2,00$
	تقدم مرتفع	$350 \leq 525$	$2,00 \leq 3,00$
	تقدم مرتفع جدا	قيمة أعلى ≤ 525	قيمة أعلى $\leq 3,00$

*ملاحظة: أعدّ التمثيل اللوني في هذه الدراسة لأغراض العرض الخرائطي، بما يوضح اتجاه التغير وشدته بين التراجع والاستقرار والتقدم، ولا يُعد جزءاً من التصنيف الأصلي الوارد في المرجع.

٥ ضبط عدم اليقين (Uncertainty) وخطأ القياس

حرصت الدراسة على التقليل من أثر الأخطاء المتعلقة برصد وقياس مواضع خط الشاطئ على نتائج القياس. وبشكل عام، ترجع مصادر الخطأ في قياس تغير خط الشاطئ إلى أخطاء ترتبط بزمن القياس، وتنوع مصادر البيانات، وخطأ القياس المرتبط بالتهيئة والاستخلاص. ولكون الدراسة اعتمدت على منهجية جمع البيانات من مصدر واحد، وهو قمر لاندسات، بوضوح مكاني موحد (٣٠ م)، وجمعت ضمن مستوى مد بحري متقارب، مع إنجاز التسجيل البيئي، فإن الأخطاء المرتبطة بالمصدر الأول والثاني قد ضُبطت. ولمعالجة خطأ أداة الاستخلاص الطيفي (Um)، فقد قُدِّر وضُبط في بيئة أداة دساس (DSAS)، عبر منهجية اعتمدت على مصفوفة الخطأ باستخدام عينة من ١٤٤ نقطة تقدير؛ إذ عُدَّت الخلايا الخاطئة وضُربت في مساحة الخلية (٣٠ م) لإنتاج Um، بوصفه مساحة خطأ، ثم اشتُقت القيمة الاجمالية (Eti) (معادلة 1). وقد تكررت هذه الالية على جميع الخطوط الفعلية (٢٠ خطأ)، ثم استُخدمت قيم Eti في معادلة تجميع لإنتاج Ety (معادلة ٢)، وأدخلت القيم الناتجة في DSAS قبل اجراء التحليل (Hapke et al., 2006; Crowell et al., 1993; Ruggiero et al., 2013).

معادلة (١):

$$Eti = \pm \sqrt{Um}$$

معادلة (2):

$$Ety = \pm \frac{\sqrt{Eti1 + Eti2 + Eti3 + Eti \dots n}}{\text{مجموع السنوات الدراسة}}$$

٦ تحليل الاتصال المناخي المحلي لخط الشاطئ

لتحقيق الهدف الثاني للدراسة، قيس الاتصال المناخي المحلي عبر تقدير درجة الارتباط بين أنماط تغير خط الشاطئ ومتغيري الرياح، سرعة واتجاهًا، ودرجة حرارة سطح البحر. ونظرًا لعدم توافر محطة رصد محلية داخل نطاق محافظة أمالج تغطي فترة الدراسة كاملة، استُخدمت بيانات إعادة التحليل ERA-Interim لاستخراج درجة حرارة سطح البحر والرياح السطحية، سرعة واتجاهًا، على ارتفاع ١٠ متر خلال فصل الدفء للفترة ٢٠٠٠-٢٠١٩. ورغم وجود محطة رصد في ينبع البحر، فإن الاعتماد على محطة واحدة خارج نطاق الدراسة لا يعكس بالضرورة التباين المكاني على امتداد ساحل امالج، كما لا يوفر تمثيلًا مباشرًا لدرجة حرارة سطح البحر؛ لذلك استُخدمت بيانات إعادة التحليل لما توفره من اتساق زمني وتغطية مكانية منتظمة، مع الإقرار بأنها تمثيل شبكي لا قياسات ميدانية مباشرة.

ولضمان تغطية البُعد المكاني للمناخ المحلي تم الحصول على هذه البيانات لمنطقة الدراسة بحدود إضافية بواقع درجتين طولية وعرضية.

قيست العلاقة بين متوسط معدلات التغير الفترى الدوري (NSM) لخط الشاطئ في محافظة امّالج، ومدينة امّالج، والشواطئ الثلاث (الصخرية، الحصوية، والرملية)، وبين معدلات التغير الدوري، المحسوبة بين كل عامين على غرار معدل التغير الدوري لخط الشاطئ، وسرعة الرياح ودرجة حرارة سطح البحر، باستخدام اختبار كيندال الرتبى (Kendall Rank). ويُعد اختباراً من الاختبارات اللامعلمية التي لا تشترط وجود توزيع طبيعي للبيانات، ويمتاز بقلة تأثره بالقيم المتطرفة. ولقد عُدت بيانات سرعة الرياح ودرجة حرارة سطح البحر متغيرين مستقلين، ومقاييس تغير الخط متغيرات تابعة. أما متغير اتجاه الرياح، فاستُخدم معه منهج تحليل الملاحظة (Observation analysis)، وذلك بإنتاج خريطة تُبين الاتجاه العام لحركة الرياح المحلية، ثم مقارنة اتجاه الرياح بالتغيرات العامة لخط الشاطئ.

النتائج:

١ التغيرات الزمانية والمكانية لخط شاطئ محافظة امّالج

أولاً: النمط العام السائد وفقاً لمقياس معدل الانحدار الخطي (LRR)

اجمالياً، تُظهر نتائج تحليل النمط العام، باستخدام مقياس معدل الانحدار الخطي (LRR) لتغير خط الشاطئ خلال فصل الدفء للفترة من عام ٢٠٠٠ الى ٢٠١٩، سيادة نمط شبه الاستقرار على مستوى المحافظة بوصفه معدلاً عاماً، مع بروز تباينات زمانية ومكانية داخلية في بيئات خطوط شاطئ بمنطقة الدراسة. إذ سُجّل تراجع منخفض لخط شاطئ مدينة امّالج والشواطئ الحصوي، مقابل تقدم منخفض في خطي الشاطئ الصخري والرملي. وعليه، استُعرضت النتائج على مستوى منطقة الدراسة ككل، ممثلة في محافظة امّالج، وعلى مستوى مدينة امّالج، وعلى مستوى البيئات الشاطئية.

فعلى مستوى محافظة امّالج، هيمن نمط الاستقرار، حسب التصنيف المستخدم في جدول (1)، إذ بلغ متوسط المعدل العام 0.23م/سنة ضمن مجال ثقة قدره ± 0.13 م (جدول 2). ورغم أن القراءات الإحصائية للقطاعات البيئية داخل المحافظة تميل للتراجع، فلقد تقاربت نسبة القطاعات المتراجعة، البالغة 59.45%، مع نسبة القطاعات المتقدمة، البالغة 40.6%. وبلغ متوسط معدل التراجع -1.21م/سنة، بينما بلغ متوسط معدل التقدم 2.33م/سنة. وتُظهر القراءات الإحصائية لنتائج القطاعات المتعامدة على طول امتداد خط شاطئ المحافظة، وعددها 5823 قطاعاً متعامداً، أن النمط المكاني للتغير غير موحد (شكل 2). فقد تركّز التراجع المنخفض شمال المحافظة، وتناسف التراجع المتوسط والمنخفض على ساحل مدينة امّالج، مع ظهور تقدم منخفض على الحافة الشمالية لرأس الشبعان، ممثلاً للشواطئ الصخري، مقابل تراجع منخفض على أغلب حافته الجنوبية، ثم سيادة التقدم

المنخفض جنوب الرأس حتى جنوب المحافظة. وقد تركّز نمط الاستقرار غالباً في شمال المحافظة، حيث بلغ متوسط تغير 1402 قطاعاً -0.50م/سنة عند مستوى ثقة احصائي 90٪، تراوح بين 10 و 0.36م/سنة، مع استمرار سيادة نمط التراجع المنخفض حتى الذراع الشمالي لرأس الشبعان، ثم تناوب التقدم والتراجع جنوباً.

أما على مستوى مدينة امالج، فقد سيطر نمط التراجع المنخفض لخط الشاطئ على امتداد شاطئ المدينة، بمتوسط عام بلغ -0.87م/سنة ضمن مجال ثقة قدره ± 0.18 م (جدول 2). وبلغ متوسط معدل تراجع الخط فيها -1.26م/سنة محققاً ما نسبته 84.46% من اجمالي عدد القطاعات المتعامدة، مقابل معدل تقدم بلغ 1.25م/سنة بنسبة % من اجمالي عدد القطاعات المتعامدة. ولقد أكّدت البيانات الإحصائية لقيم تغير خط الشاطئ على مستوى القطاع المتعامد استمرارية سيادة نمط التراجع المنخفض؛ إذ وُجدت 503 قطاعاً متراجعة، من مجموع 1184 قطاعاً متعامداً، بمتوسط تغير بلغ -0.66م/سنة عند مجال ثقة 90% تراوح بين -0.69 و -1.05م/سنة. وبالنظر إلى طبيعة التوزيع المكاني للقطاعات المتعامدة، يُلاحظ تفاوت درجات استمرارية نمط التراجع على امتداد الشاطئ، وتزايدها باتجاه وسط المدينة ضمن نطاق يمتاز بكثافة المنشآت الحضرية، مع ظهور جيوب صغيرة من قطاعات نمط التقدم في شمال المدينة. ويظهر نمط الاستقرار أيضاً بوضوح قرب مناطق الحماية، مثل الجداريات الخرسانية والحواجز الصخرية الشاطئية. في حين تتحول قيم تراجع الخط المرتفعة إلى قيم منخفضة في جنوب المدينة، مع استمرار ظهور جيوب صغيرة من التقدم والاستقرار.

وفي الشاطئ الصخري، جنوب المحافظة، بلغ متوسط المعدل العام 0.30م/سنة ضمن مجال ثقة ± 0.15 م، مشيراً إلى سيادة نمط التقدم المنخفض (جدول 2). وتُظهر قيم المتوسطات تقارباً نسبياً بين معدلات التغير، تراجعاً أو تقدماً، على مستوى القطاع المتعامد. إذ بلغت نسبة القطاعات المتراجعة 50.37% من مجموع عدد القطاعات المتعامدة، البالغ 2174 قطاعاً، بمتوسط تراجع بلغ -0.96م/سنة، في حين سجّلت القطاعات المتقدمة نسبة 49.63%، وبمعدل تقدم بلغ 1.59م/سنة. ويُظهر التوزيع المكاني لقيم التغير في القطاعات المتعامدة تبايناً اتجاهياً (شكل 3). فقد سجّل خط شاطئ الحافات الشمالية للرأس الصخري، المواجهة للرياح، قيم تقدم أعلى من 1.50م/سنة، مقابل تراجع الحافات الجنوبية، بأقل من -1.50م/سنة، حيث تكثرت الكهوف البحرية الصغيرة أسفل قاعدة الجروف الصخرية. وقد أوضح مجال الثقة، البالغ 0.15-0.45م/سنة، سيادة نمط التقدم بمتوسط بلغ 1.13م/سنة في نحو 652 قطاعاً، بنسبة 29.99%، مع انحصار هذا التقدم في الراس الصخري خلو ذراعيه منه.

أما في الشاطئ الرملي، فقد ساد نمط التقدم المنخفض لتغير خط الشاطئ، بمتوسط بلغ 0.56م/سنة ضمن مجال ثقة ± 0.21 م (جدول 2). غير أن المتوسطات التفصيلية على مستوى قيم

القطاع الواحد تشير إلى تقارب نسبي بين قيم التراجع والتقدم، بنسبة 53.45% للتراجع مقابل 46.55% للتقدم. ويشير التوزيع المكاني لنتائج التغير في القطاعات المتعامدة إلى أن التقدم العام ناتج عن تعادل جزئي بين شمال يميل إلى التراجع وجنوب يميل إلى التقدم، مع وسط انتقالي. وقد بلغ عدد القطاعات الواقعة ضمن نمط التراجع 406 قطاعاً، بنسبة 16.88%، وبمتوسط تغير بلغ -0.39 م/سنة، وهي قيم منخفضة جداً، بما يعني استمرار سيادة الاستقرار داخل الأجزاء الأعلى موثوقية، مع استمرار التراجع المنخفض في الشمال والوسط، وتناوب التراجع/التقدم جنوباً.

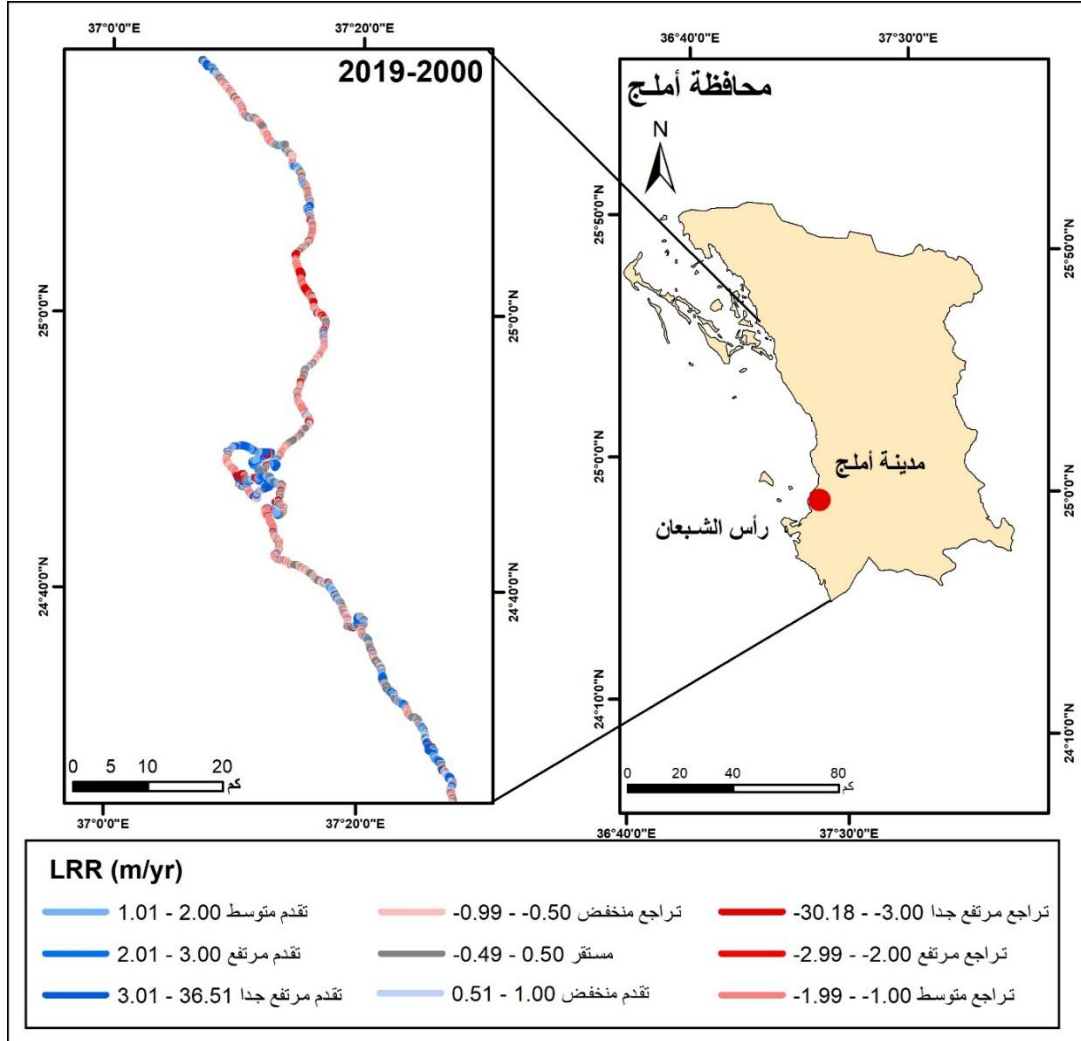
وأخيراً، في الشاطئ الحصوي، وهو أقل البيئات الشاطئية امتداداً بطول 1 كم، ساد نمط التراجع المنخفض في تغير خط الشاطئ، بمتوسط معدل بلغ -0.67 م/سنة ضمن مجال ثقة قدره ± 0.29 م (جدول 2). وقد أظهرت القيم الإحصائية للقطاعات المتعامدة سيادة نمط التراجع في عدد كبير منها، بنسبة مئوية بلغت 96.74%، مقابل 5.26% ساد فيها نمط التقدم. وأيد ذلك التوزيع المكاني للقطاعات المتعامدة؛ إذ أظهر بوضوح سيادة نمط التراجع على أغلب القطاعات، مع جيوب تقدم منخفض محدودة في أقصى الجنوب، وقطاعات استقرار قليلة.

جدول (٢): الملخص الإحصائي لنتائج النمط العام السائد وفقاً لمقياس معدل الانحدار الخطي (LRR) لتغير خط شاطئ محافظة امالج والبيئات الشاطئية الأخرى في الفترة من ٢٠٠٠ إلى ٢٠١٩.

نتائج القياس					بند القياس
الشاطئ الحصوي	الشاطئ الرملي	الشاطئ الصخري	مدينة امالج	محافظة امالج	
١,١٣٧	٧٥	٦٥,٦٢٤	٣٥,٤٩٠	١٧٥,١٩٤	طول خط الشاطئ (كم)
٤٠	٢٤٠٤	٢١٧٤	١١٨٤	٥٨٢٣	عدد القطاعات المتعامدة
(٠,٢٩±) ٠,٦٧-	(٠,١٥±) ٠,٥٦	(٠,١٥±) ٠,٣	(٠,١٨±) ٠,٨٧-	(٠,١٣±) ٠,٢٣	متوسط المعدل العام لخط شاطئ (م/سنة)
٠,٦٧-	٠,٧٤-	٠,٩٦-	١,٢٦-	١,٢١-	متوسط معدل تراجع خط الشاطئ (م/سنة)
١,٧٤	٢,٠٧	١,٥٩	١,٢٥	٢,٣٣	متوسط معدل تقدم خط الشاطئ (م/سنة)

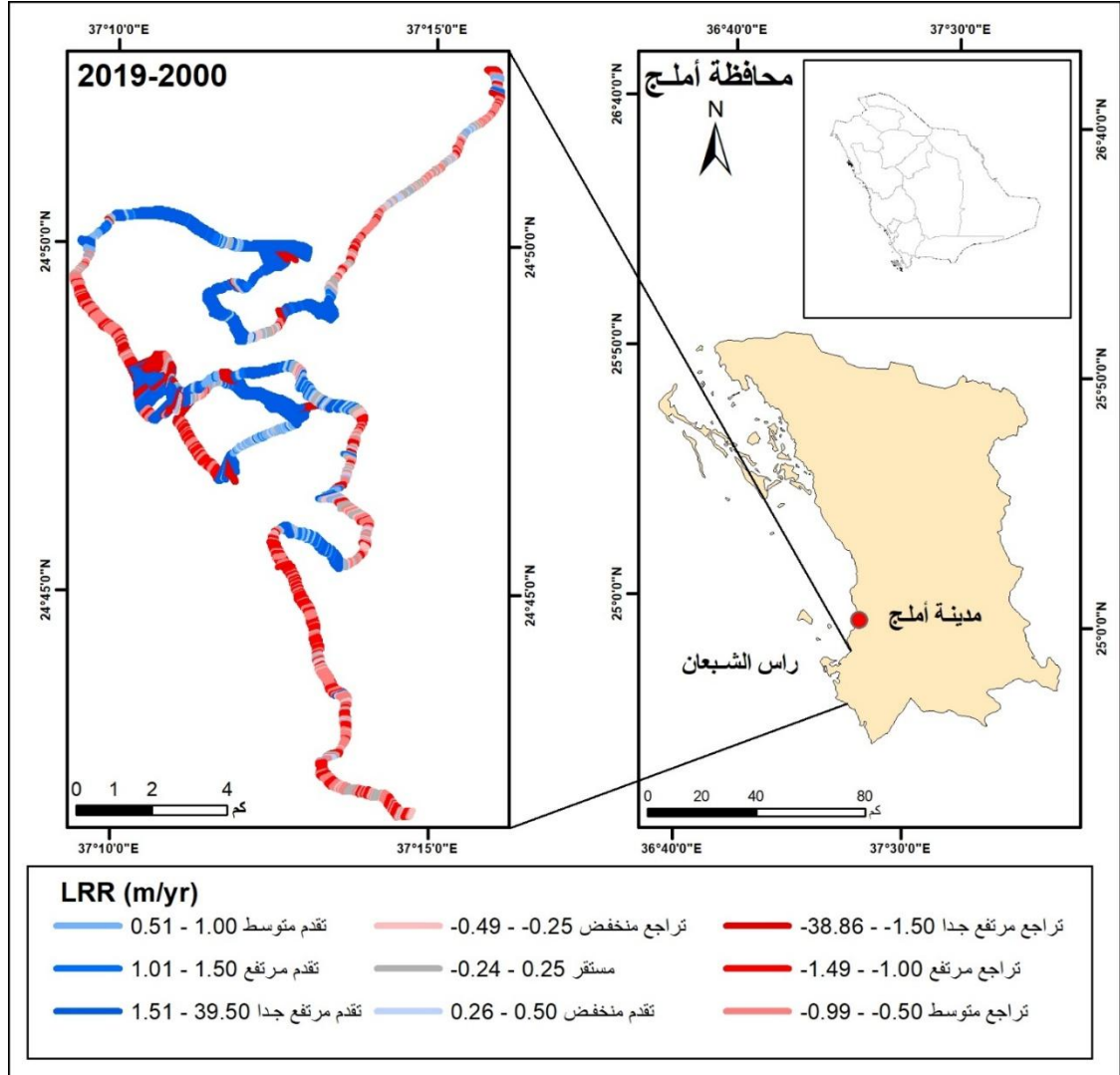
ملاحظة: استخدم خط شاطئ المحافظة بوصفه نطاقاً تحليلياً عاماً، في حين استخدمت النطاقات البيئية الفرعية بوصفها وحدات مقارنة جيومورفولوجية مستقلة. ولذلك، لا تُعامل هذه النطاقات بوصفها تقسيماً طولياً حصرياً ومغلقاً لخط شاطئ المحافظة، كما أن عدد القطاعات المتعامدة يتأثر بخط الأساس، ونطاق التحليل، وقابلية التقاطع مع خطوط الشاطئ المدخلة.

شكل (٢): التوزيع الجغرافي لنتائج النمط العام السائد لتغير خط شاطئ محافظة أمّالج في الفترة من ٢٠٠٠ إلى ٢٠١٩ وفقاً لمقياس معدل الانحدار الخطي (LRR).



ملاحظة: عُرضت النتائج الخرائطية وفق مستويات التحليل المعتمدة في الدراسة؛ إذ يوضح الشكل العام نمط التغير على امتداد خط شاطئ محافظة أمّالج، في حين تعرض الأشكال التفصيلية النطاقات التي تبرز تبايناً مكانياً أو بيئياً واضحاً في نتائج التغير. وتُقرأ هذه الأشكال بالاقتران مع الجداول الإحصائية التي تلخص نتائج النطاقات المدروسة.

شكل (٣): التوزيع الجغرافي لنتائج النمط العام السائد لتغير خط الشاطئ الصخري (رأس الشبعان) في الفترة من ٢٠٠٠ إلى ٢٠١٩ لمقياس معدل الانحدار الخطي (LRR).



ثانياً: صافي مسافة حركة خط الشاطئ (NSM) الفترتي المنتظم لكل خمس سنوات

أظهرت نتائج قياس التغير الفترتي المنتظم لكل خمس سنوات لخطوط شاطئ منطقة الدراسة، باستخدام مقياس صافي مسافة حركة خط الشاطئ (NSM)، تناوباً واضحاً في سيادة النمط بين التراجع المنخفض والاستقرار عبر الفترات الأربع: ٢٠٠٠-٢٠٠٤، ٢٠٠٥-٢٠٠٩، ٢٠١٠-٢٠١٤، ٢٠١٥-٢٠١٩، وفقاً للتصنيف المستخدم حسب الجدول ١، مع بروزٍ أوضح للتراجع في الفترة الأولى مقارنة بالفترات اللاحقة.

فعلى مستوى محافظة امالج بوصفها منطقة الدراسة ككل، تراوحت قيم المعدل العام للنمطين السائدين بين -34.24م و ٠,٧٩م. وبلغ متوسط معدل التراجع الأعلى -48.89م خلال فترة 2000-2004 والأدنى -13.38م خلال فترة 2010-2014، بينما سجلت الفترة الثانية -30.74م والرابعة -20م. في المقابل، سجّل متوسط معدل التقدم أعلى قيمه له، وهي 45.63م في الفترة الأولى، وأدنى قيمة له، هي 9.09م في الفترة الثانية. ويُشير ذلك الى انتقال تغير خط شاطئ المحافظة من نمط تراجع واضح في بداية السلسلة الزمنية إلى نمط استقرار أكبر نسبيًا في المراحل اللاحقة (جدول ٣).

أما على شاطئ مدينة امالج، فيشير مدى قيم متوسطات تغير خط الشاطئ خلال الفترات الأربع، الذي تراوح بين -0.06م و -57.52م، إلى تناوب سيادة نمطي الاستقرار والتراجع المنخفض. وبالمقارنة بين أعلى وأدنى متوسط لقيم التراجع أو التقدم، يتضح أن شاطئ المدينة شهد تراجعاً أوضح في بداية الفترة الزمنية، ثم اتجه نحو استقرار نسبي مع تقدم محدود. فقد تراوح متوسط معدل التراجع بين -57.87م، بوصفه الأعلى في الفترة الأولى، و 9.44م، بوصفه الأدنى في الفترة الثانية، في حين بقي متوسط معدل التقدم الأعلى منخفضاً نسبياً؛ إذ بلغ 10م في الفترات الأولى والثانية والرابعة، وبلغ أدنى معدل 4م في الفترة الثالثة (جدول ٣ وشكل ٤).

وعلى شاطئ رأس الشبعان، الذي يمثل البيئة الصخرية، تراوحت المعدلات العامة للفترات الأربع بين -٠,٣٩م و -9.26م، بما يشير إجمالاً إلى سيادة التراجع المنخفض على المستوى الفترى. وقد أشارت قيم معدلات التراجع والتقدم إلى وجود تعدد في أنماط التغير المهيمنة، مع بقاء المتوسطات ضمن نطاقات منخفضة. فقد بلغ متوسط التراجع -23.38م في الفترة الأولى، و -20.37م في الفترة الثانية، و -8م في الفترة الثالثة، و -18.78م في الفترة الرابعة. أما قيم معدلات التقدم، فقد أظهرت قيمها تقارباً في متوسطاتها خلال الفترتين الثالثة والرابعة، إذ تراوحت بين 7.69م و 8.69م، مع تباين أوضح بين الفترة الأولى، التي سجلت ٢٧,٢٧م، والفترة الثانية، إذ سجلت 3.91م (جدول ٣).

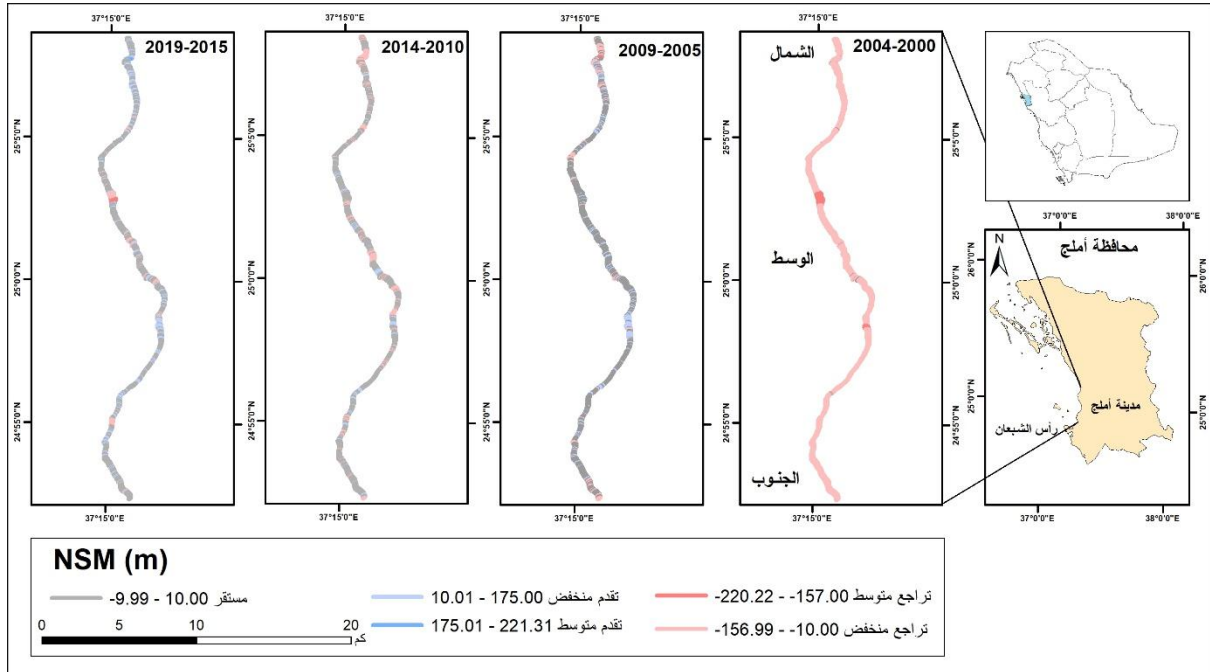
في المقابل، شهدت البيئة الرملية تقاسماً في سيادة نمط التراجع المنخفض ونمط الاستقرار عبر فترات تغير خط الشاطئ. فقد هيمن نمط التراجع المنخفض على الفترتين الأولى والثانية، بمعدل عام تراوح بين -33.2م و -18.62م، في حين هيمن نمط الاستقرار على الفترتين الثالثة والرابعة، بقيم بلغت 1.43م و -5.91م، على التوالي (جدول 3). وأظهرت المتوسطات التفصيلية لقيم التراجع والتقدم تراجعاً واضحاً في بداية السلسلة الزمنية، ثم اتجهت بعد ذلك نحو الاستقرار النسبي، مع تقدم متوسط مرتفع نسبياً في بداية الفترة مقارنة ببقية الفترات (جدول 3). فقد سجّل أعلى متوسط للتراجع، وهو -٤٤,٥٦م، في الفترة الأولى، وأدنى متوسط، وهو -٣,٩١م، في الفترة الرابعة. في حين سجّل أعلى متوسط للتقدم، وهو 86.81م، في الفترة الأولى، وأدنى متوسط، وهو 6.26م، في الفترة الثانية (جدول ٣).

أما في البيئة الحصوية، فقد هيمن نمط الاستقرار غالباً على معظم الفترات، إذ تراوحت قيمه بين 7.34م و 0.59م. وقد أيدت النتائج التفصيلية هذه الهيمنة، مع استثناء مبكر يميل للتراجع؛ إذ ظهر نمط التراجع المنخفض بوضوح في الفترة الأولى بمتوسط بلغ 38.64م.

جدول (٣): نتائج أنماط التغير الفترى المنتظم لكل خمس سنوات لخط شاطئ منطقة الدراسة وبيئاته الشاطئية المختلفة باستخدام مقياس صافي حركة خط الشاطئ (NSM).

نتائج القياس					بند القياس
الشاطئ الحصوي	الشاطئ الرملی	الشاطئ الصخري	مدينة املج	محافظة املج	
١,١٣٧	٧٥	٦٥,٦٢٤	٣٥,٤٩٠	١٧٥,١٩٤	طول خط الشاطئ (كم)
٣٨	٢٣٧١	٢١٧٤	١١٨٤	٥٧٧٥	عدد القطاعات المتعامدة
٣٠	٣٠	٣٠	٣٠	٣٠	مقدار المسافة التباعدية الثابتة بين كل القطاعات المتعامدة (م)
الفترة الأولى (٢٠٠٠-٢٠٠٤)					
٣٦,٥٢-	٣٣,٢-	٦,٢٤-	٥٧,٥٢-	٣٤,٢٤-	متوسط المعدل العام لخط الشاطئ (م)
٣٨,٦٤-	٤٤,٥٦-	٢٣,٣٨-	٥٧,٨٧-	٤٨,٨٩-	متوسط معدل تراجع خط الشاطئ (م)
٦٨,٧٧-	١٧٥,٥-	٣٦٠,٥٩-	٢٧٢,٨١-	٩١٧,١٣-	أعلى قيمة تراجع للقطاع المتعامد (م)
(٢٤)	(٧٣١)	(١٢٩٤)	(٤١٥)	(٣٣٦٧)	
١,٦٣	٨٦,٨١	٢٧,٢٧	١٠,٤٦	٤٥,٦٣	متوسط معدل تقدم خط الشاطئ (م)
٣,١٩	٦٤٤,٦٥	٤٦٥,٢١	٤١,٩٢	٦٧٣,٨٥	أعلى قيمة تقدم للقطاع المتعامد (م)
(٣٨)	(٢١٩)	(٩٠٨)	(٥٢٣)	(٣٣٧٥)	
الفترة الثانية (٢٠٠٥-٢٠٠٩)					
٧,٣٤-	١٨,٦٢-	٩,٢٦-	٠,٠٦-	١٥-١٥	متوسط المعدل العام لخط الشاطئ (م)
١٣,٠٧-	٣١,٠٨-	١٨,٧٨-	٩,٤٤-	٣٠,٧٤-	متوسط معدل تراجع خط الشاطئ (م)
٤٦,٢٨-	٧٢٧,٢٨-	٣٧٠,٢٩-	٢٨٨,٩٣-	٩٢٠,١٨-	أعلى قيمة تراجع للقطاع المتعامد (م)
(٣٧)	(١٩٢)	(٩٠٨)	(٥٣)	(٢٩٣٦)	
٢,٤٩	٦,٢٦	٣,٩١	٩,١٧	٩,٠٩	متوسط معدل تقدم خط الشاطئ (م)
١٦,٥٩	٣١٤,٠٨	٣٧٤,٤٩	٦٤,١٧	٦٨٤,٤٩	أعلى قيمة تقدم للقطاع المتعامد (م)
(١٤)	(٢٢٠)	(١٣٦٦)	(٧٢٦)	(٣٣٦٧)	
الفترة الثالثة (٢٠١٠-٢٠١٤)					
٠,٤	١,٤٣	٠,٣٩-	٤,٩٢-	٠,٧٩-	متوسط المعدل العام لخط الشاطئ (م)
١٠,٥١-	١٠,٢-	٨-	١٢,٥٧-	١٣,٣٨-	متوسط معدل تراجع خط الشاطئ (م)
٤٢,٨٨-	١١٦,٢٦-	٣٨٨,٥-	١٢٩,٥٧-	٦٦٤,٨٥-	أعلى قيمة تراجع للقطاع المتعامد (م)
(٣٥)	(١٥٦٢)	(٨٩٣)	(٥٦٧)	(٢٩٣٤)	
٢٢,٢١	١٣,٦٥	٧,٣٩	٣,٨٩	١٢,٤٣	متوسط معدل تقدم خط الشاطئ (م)
٦٤,٧٥	٣١٢,٥٢	٤٣٦,٤	٣٢,٥٢	٦٨٤,٨	أعلى قيمة تقدم للقطاع المتعامد (م)
(٣)	(٢٢٠)	(١١٦٣)	(٩٤٠)	(٢٩٧٣)	
الفترة الرابعة (٢٠١٥-٢٠١٩)					
٠,٥٩	٥,٩١	٧,٥٩-	٠,٤٢-	٢,٤١-	متوسط المعدل العام لخط الشاطئ (م)
٢,٥٦-	٣,٩١-	٢٠,٣٧-	١٢,٣٧-	٢٠-	متوسط معدل تراجع خط الشاطئ (م)
٢٠,٦٦-	٣٩٠,٨٨-	٣٧٦,٤٦-	٢٢٠,٢٢-	٦٨٣,١	أعلى قيمة تراجع للقطاع المتعامد (م)
(١٨)	(١٨٦)	(٩٥٠)	(٤١٣)	(٢٩٤٠)	
٣,١٣	١٢,٩٨	٨,٦٩	١٠,١١	١٣,١	متوسط معدل تقدم خط الشاطئ (م)
٤٠,٥٥	١٣٥,١١	٤٤٨,٥	٢٢١,٣١	٩١٢,٢٩	أعلى قيمة تقدم للقطاع المتعامد (م)
(٣٨)	(١٥٧٩)	(١١٦٣)	(٥٦)	(٣٣٦٦)	

شكل (٤): التوزيع الجغرافي لنتائج أنماط التغير الفترى لخط شاطئ مدينة امالج في الفترة من ٢٠٠٠ إلى ٢٠١٩ باستخدام مقياس صافي حركة خط الشاطئ (NSM).



ثالثاً: صافي مسافة حركة خط الشاطئ (NSM) الدوري السنوي

يساعد تتبع التغيرات السنوية في صافي مسافة حركة خط الشاطئ على الكشف عن ديناميكية أكثر تفصيلاً لتغير خط الشاطئ وحالات التذبذب من سنة إلى أخرى. واجمالياً، تُظهر النتائج الإحصائية لقياس التغير السنوي في منطقة الدراسة وجود تذبذب زمني قصير، وتناوب غير منتظم بين أنماط الاستقرار والتراجع المنخفض والتقدم المنخفض، مع اختلاف واضح بين البيئات الشاطئية في مقدار المتوسط العام وفي انتظام دورات التغير.

فعلى مستوى المحافظة، بلغ المتوسط العام لمقياس صافي حركة خط الشاطئ -19.41م، مما يشير إلى هيمنة نمط التراجع المنخفض طوال فترة الدراسة 2019-2000، وفق التصنيف المستخدم في جدول (١). وتُفصّل بيانات الشكل (٥) عن نتائج تفصيلية؛ إذ تأرجحت أنماط التغير بين الاستقرار، والتراجع المنخفض، والتقدم المنخفض على مستوى خط شاطئ المحافظة. فقد ساد نمط الاستقرار لمدة ثماني سنوات، بمتوسط تراوح بين 0.2م و 9.85م، ثم نشط نمط التراجع المنخفض لمدة سبع سنوات أخرى، بمتوسط تراوح بين -21.95م و -10.6م، ثم انتقل إلى نمط التقدم المنخفض لمدة أربع سنوات فقط، بمتوسط معدل تراوح بين 10.81م و 24.05م. وعلى الرغم من أن الاتجاه الزمني العام (Trend) لمعدلات النمط الدوري السنوي أظهر ارتفاعاً بمقدار 0.51م/سنة، استناداً إلى اختبار انحدار المربعات

الصغرى (Least Squares Regression)، فإنه لم يكن ذا دلالة إحصائية، إذ كانت قيمة الدلالة الإحصائية (p-value) أعلى من ٠,٣.

في المقابل، بلغ المتوسط العام لمقياس صافي حركة خط شاطئ مدينة امالج حوالي -52 م (شكل 5)، مما يشير إلى سيادة نمط التراجع المنخفض. وشهد الاتجاه الزمني العام (Trend) لمعدلات النمط الدوري السنوي تغيراً بمقدار 0.9 م/سنة، استناداً إلى اختبار انحدار المربعات الصغرى بدلالة إحصائية بلغت 0.015. وقد ساد نمط الاستقرار لدورتين طويلتين زمنياً؛ إذ استمرت الدورة الأولى سبع سنوات، خلال الفترة 2003-2009 بمتوسط بلغ -1.78 م، واستمرت الدورة الثانية تسع سنوات متتالية، خلال الفترة 2011-2019، بمتوسط بلغ -0.32 م. ولم يُسَد نمط التراجع المنخفض إلا لسنتين متتاليتين فقط، هما 2000-2001، وبمتوسط بلغ -24.35 م.

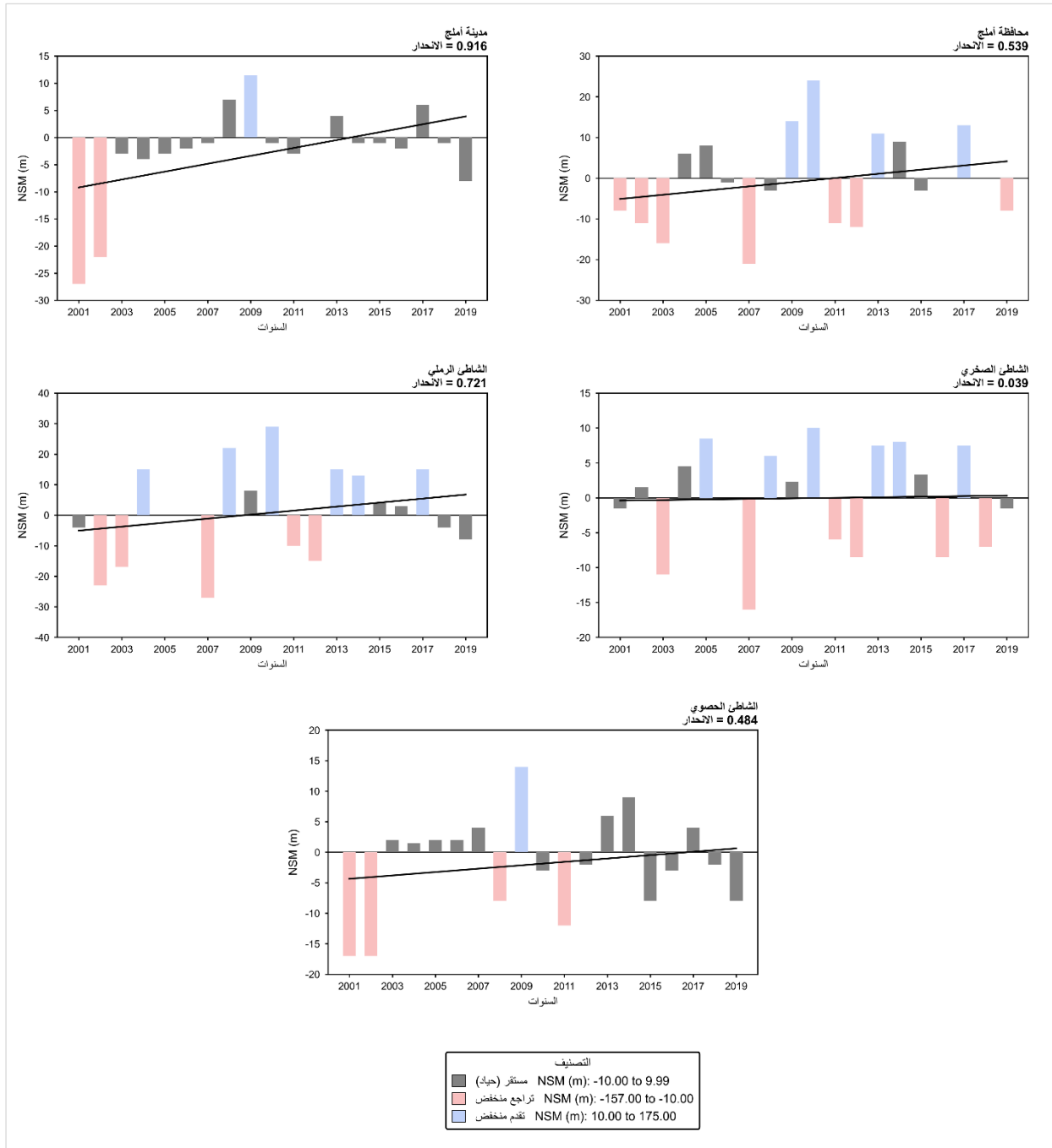
وفي الشاطئ الصخري، ممثلاً في رأس الشبعان (شكل 5)، بلغ المتوسط العام لمقياس صافي حركة خط الشاطئ حوالي -0.12 م، مما يشير إلى سيادة نمط الاستقرار طوال فترة الدراسة. وبالنظر إلى نتائج التحليل على مستوى السنة الواحدة، يتضح أن التذبذب والتباين هي السمة البارزة بين أنماط التغير الدوري السنوي للخط. فلم تدم سيادة أي نمط لأكثر من دورة واحدة، أي سنة واحدة، أو دورتين، أي سنتين على الأكثر. ويفسر ذلك ناتج اختبار انحدار المربعات الصغرى، الذي كان اقل من ٠,٠٤ م.

أما على الشاطئ الرملي، فقد ساد نمط التراجع المنخفض لدورة قصيرة مدتها سنتان، خلال الفترة 2002-2003، بمعدل بلغ -21.36 م، وساد نمط التقدم المنخفض لسنتين، خلال الفترة 2013-2014، بمعدل بلغ 14.25 م، كما ساد نمط الاستقرار لسنتين، هما 2015 و2016، بمتوسط بلغ 4.46 م. وأوضحت النتائج أن التغير في القطاعات المتعامدة على خط شاطئ البيئة الرملية لم يتخذ مساراً منتظماً طوال فترة الدراسة. ففي القطاع الشمالي، كان التغير ذا اتجاه مستقر (شكل 5). أما القطاع الأوسط، فقد ساد نمط التقدم المنخفض في أغلب قطاعاته طوال فترة الدراسة، ولا سيما في سنوات 2008، و2010، و2017. أما في قطاعه الجنوبي، ظهر نمط التراجع والتقدم المرتفعين لأول مرة في هذه البيئة في خليج سميليق خلال أغلب فترات الدراسة. وفيما عدا ذلك، فقد تناوبت أنماط التراجع المنخفض، والتقدم المنخفض، والاستقرار في السيادة على قطاعاته طوال فترة الدراسة.

أما في الشاطئ الحصوي شكل (هـ)، فقد سجّل المتوسط العام للفترة 2000-2019 تغيراً في خط الشاطئ بمعدل -36.05 م، مما يشير إلى سيادة نمط التراجع المنخفض. وعلى مستوى معدل السنة الواحدة، يتضح أن تغير خط الشاطئ مرّ بدورتين طويلتين ساد فيهما نمط الاستقرار. امتدت الأولى من عام 2003 إلى عام 2007، بمتوسط بلغ 0.52 م، وامتدت الثانية من عام 2012 إلى عام 2019، بمتوسط بلغ 0.48 م. وساد التراجع المنخفض لفترة قصيرة لا تتجاوز سنتين، خلال الفترة 2001-2002، بمعدل

متوسط (-17.20 م). كما ظهر نمط التقدم المنخفض لسنة واحدة، هي، 2010 بمعدل بلغ 14.42 م. وقد سجّل معدل الانحدار لتغير النمط الفترتي الدوري لهذا الخط اتجاهًا زمنيًا (Trend) بلغ 0.484 م/سنة، بقيمة دلالة إحصائية (p-value) أعلى من 0.05.

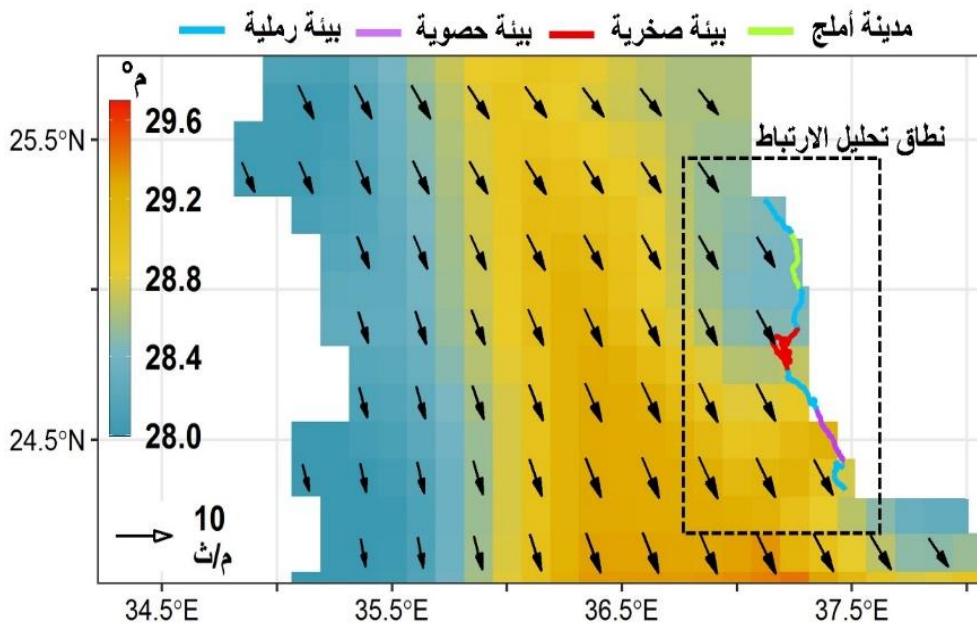
شكل (٥): التوزيع البياني لنتائج أنماط التغير الدورية لخط شاطئ محافظة أمّالج ومدينة أمّالج والبيئات الشاطئية في الفترة من 2000 إلى 2019 باستخدام مقياس صافي حركة خط الشاطئ (NSM) مع خط الاتجاه الزمني العام (Trend).



٤ الاتصال المناخي المحلي لخط الشاطئ

يوضح شكل (٦) نطاق تحليل الارتباط بين تغير خط شاطئ منطقة الدراسة والمتغيرات المناخية المحلية، وهي سرعة الرياح، واتجاهها، ودرجة حرارة سطح البحر، حيث يتضح غلبة الرياح الشمالية الغربية خلال فصل الدفء. ويشير تحليل الملاحظة إلى أن بعض خطوط الشاطئ المواجة لإتجاه الرياح تميل إلى تسجيل حالات تقدم باتجاه البحر، في حين تميل بعض الخطوط الواقعة في ظل الرؤوس البحرية إلى تسجيل حالات تراجع باتجاه اليابس. ويُقرأ هذا النمط بوصفه اقتراناً مكانياً محتملاً يرتبط بدرجة التعرض للرياح والأمواج وخصائص البيئة الشاطئية، لا بوصفه علاقة سببية مباشرة. وبوجه عام، تسود الرياح الشمالية الغربية في حوض البحر الأحمر من يونيو إلى سبتمبر، بما يتسق مع ظروف موجبة أكثر نشاطاً في شمال الحوض ووسطه (Nofal & Abboud, 2016). كما تصنف بيئة المد في منطقة الدراسة ضمن نظام المد المنخفض (Microtidal)، بمتوسط عام يتراوح بين 0.4 و0.08م (Morcos, 1970).

شكل (٦): التوزيع الجغرافي لمتوسط درجة حرارة سطح البحر، ومتوسط اتجاه الرياح وسرعتها، خلال فصل الدفء في محافظة أمالج للفترة ٢٠٠١-٢٠١٩، اعتماداً على بيانات إعادة التحليل ERA-Interim.



يمثل الشكل متوسطات مشتقة من بيانات ERA-Interim، وهي بيانات توفر تغطية مكانية منتظمة واتساقاً زمنياً مناسباً لتحليل الرياح ودرجة حرارة سطح البحر على امتداد منطقة الدراسة. ومع ذلك، فهي تمثيل شبكي مُعاد التحليل للمناخ المحلي، وليست قياسات ميدانية مباشرة من محطة رصد داخل محافظة امالج؛ لذلك فُسرت بوصفها مؤشرًا مكانيًا عامًا للظروف المناخية المحلية ضمن حدود هذا النوع من البيانات.

إحصائياً، وأوضحت نتائج تحليل الارتباط، بوجه عام، وجود علاقة ارتباط موجبة الاتجاه بين معدلات التغير الدوري السنوي (NSM) وسرعة الرياح (جدول ٤). وكانت جميع قياسات الارتباط ذات دلالة إحصائية عند مستوى ١٠٪، باستثناء القياسات الخاصة بالبيئة الصخرية. وتراوحت نسب الارتباط ذات الدلالة الإحصائية بين ٢٧,٥٪ في البيئة الحصوية و٤٢,٧٪ في مدينة امالج. وتشير هذه الارتباطات الموجبة إلى اقتران سرعات الرياح بزيادة حركة خط الشاطئ نحو اليابس، دون أن يعني ذلك إثبات علاقة سببية مباشرة. وفي المقابل، لم تُكشف قياسات ارتباط ذات دلالة إحصائية بين معدلات التغير الدوري السنوي ودرجة حرارة سطح البحر الأحمر.

جدول (٤) : ملخص نتائج اختبار كيندال الرتبتي بين المتغيرات المناخية (سرعة الرياح ودرجة حرارة سطح البحر) و معدل التغير الدوري السنوي (NSM) لخط شاطئ منطقة الدراسة في الفترة من سنة 2001 إلى سنة 2019.

سرعة الرياح		درجة حرارة سطح البحر		
مستوى الدلالة	معامل الارتباط	مستوى الدلالة	معامل الارتباط	
٠,٠٤٢	٠,٣٤٥٠	٠,٤٨٤	٠,١٢٣٠-	محافظة امالج
٠,٠١٢	٠,٤٢٧٠	٠,٦٢٤	٠,٠٨٧٧-	مدينة امالج
٠,١٦٢	٠,٢٤٠٠	٠,٣٦٣	٠,١٥٨٠-	البيئة الصخرية
٠,١٠٨	٠,٢٧٥٠	٠,٦٢٤	٠,٠٨٧٧	البيئة الحصوية
٠,٠٢٥	٠,٣٨٠٠	٠,٣٦٣	٠,١٥٨٠-	البيئة الرملية

٥- المناقشة:

بشكل اجمالي، تُظهر نتائج الدراسة أن التغير الزماني والمكاني لخط الشاطئ في منطقة الدراسة خلال الفترة 2000-2019 يميل نحو الاستقرار النسبي، مع تأرجح محدود بين التراجع والتقدم، وتباين واضح بين البيئات الشاطئية الثلاث. وتتفق النتائج على أن القيم المسجلة منخفضة في الاتجاهين، وأن المحصلة العامة تميل إلى تكرار الاستقرار النسبي في معظم فترات الدراسة، وفق تصنيف هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية لدرجات تغير خط الشاطئ (جدول ١). وتشير هذه القراءة إلى أن ديناميكية تغير الخط في المنطقة تتجسد في تغيرات محدودة الشدة تتوزع مكانياً، أكثر من كونها تحولات حادة ومستمرة ذات اتجاه واحد. وهو ما يدفع إلى اقتراح أن حالة تغير خط شاطئ منطقة الدراسة الزماني والمكاني لا يتخذ نمطاً متسقاً على امتداد جميع بيئاته الشاطئية.

تؤكد القراءة المقارنة بين أنماط القياس الثلاثة، وهي: النمط العام السائد، والنمط الفترتي المنتظم كل خمس سنوات، والنمط الدوري السنوي، أن الاعتماد على النمط العام السائد أو النمط

الفتري وحده لا يكفي لإظهار الطبيعة الديناميكية لتغير خط الشاطئ. لذلك، جاء القياس السنوي لتفكيك المتوسطات إلى دورات تعاقبية قصيرة تُظهر التذبذب من سنة لأخرى، وتكشف أن الأنماط السائدة في المتوسط قد لا تظهر بوصفها دورات متصلة زمنياً. ويبرز ذلك بوضوح في مثال محافظة امالج؛ إذ يظهر النمط العام السائد مستقرًا، بينما يُظهر النمط الفتري غلبة التراجع المنخفض في الفترتين الأولى والثانية، ثم الاستقرار في الثالثة والرابعة. في حين يبيّن النمط السنوي أن الاستقرار، والتراجع، والتقدم المنخفض جاءت موزعة في دورات قصيرة أو سنوات متفرقة.

من جهة تفسير الفروق بين تغير خطوط البيئات الشاطئية، تتباين معدلات التغير على نحو يتسق مع اختلاف درجة صلابة البيئة الشاطئية ومقاومتها؛ إذ تشير الأدبيات إلى وجود علاقة عكسية بين معدل التغير وبين صلابة البيئة (Sheeja & Ajay-Gokul, 2016). وبناءً على ذلك، يمكن قراءة اختلاف الأنماط بين البيئات الصخرية والحصوية والرملية بوصفه مؤشراً على ارتباط محتمل بتباين المقاومة، ووجود الحماية الطبيعية أو الاصطناعية أو غيابها، مع التأكيد أن النتائج الحالية، رغم اختلاف إشاراتها بين التراجع والتقدم، ظلت ضمن نطاق منخفض بحسب تصنيفات الدرجات المعتمدة في الدراسة.

في السياق ذاته، قد يسهم وجود عوامل الحماية الطبيعية، مثل الشعب المرجانية، في تخفيف أثر الأمواج والتيارات، وخفض قابلية خط الشاطئ للتغير، وهو ما يساعد في تفسير سبب الانخفاض المحتمل في معدلات التغير في البيئة الرملية رغم توقع حساسيتها العالية. لذلك يبدو متوسط الحركة في البيئة الرملية أقرب إلى الاستقرار من تقدم منخفض حاسم. وتنتشر الشعب المرجانية في منطقة الدراسة بوصفها خطأً موازياً لخط الشاطئ الرملي، وتتركز في القطاع الشمالي، كما تحيط براس الشعبان الصخري على هيئة شريط من الشعب الحافية Fringer Reef.

وتُظهر نتائج الارتباط اقتراناً بين التغير وبعض المتغيرات المناخية المحلية؛ إذ وُجدت ارتباطات موجبة الاتجاه بين معدلات التغير الدوري السنوي (NSM) وسرعة الرياح في جميع الوحدات تقريباً عند مستوى دلالة (١٠٪)، باستثناء البيئة الصخرية. وتُقرأ هذه النتيجة بوصفها مؤشراً على أن سرعة الرياح ترتبط إيجابياً بتغير خط الشاطئ، وأن عدم دلالة العلاقة في البيئة الصخرية قد يفسّر جزئياً باختلاف الصلابة والمقاومة وسرعة الاستجابة. كما أن سيادة الرياح الشمالية الغربية صيفاً، ضمن بيئة مد منخفض (Microtidal)، توفر سياقاً مساعداً لفهم ارتباطات الرياح الملحوظة، دون الجزم بعلاقة سببية مباشرة (Morcos, 1970; Nofal & Abboud, 2016).

تُبرز النتائج مفارقة تفسيرية تتعلق باختلاف نتائج الدراسة الحالية عن تقديرات مرتفعة للتغير وردت في دراسات سابقة للرؤوس الصخرية. فقد قُدر في دراسة سابقة تغير كبير في خط شاطئ رأس

الشبعان الصخري خلال الفترة ١٩٩٠-٢٠١٠، وفُسر في ضوء الأمواج القوية، والرياح الشديدة، وتشكّل الكهوف البحرية وانهارات الكتل الصخرية (Nofal & Abboud, 2016). كما سجّلت دراسة أخرى تراجعاً كبيراً لرأس صخري آخر (Al-Zubieri et al., 2020). وقد يكون جانب من هذا التباين مرتبطاً باختلاف طبيعة البيانات وطريقة التحليل، ولا سيما الاقتصار على أسلوب التمثيل ثنائي الحدين في بعض الدراسات، وعدم وضوح شروط الالتقاط والمدّ، أكثر من كونه اختلافاً في البنية الساحلية نفسها.

وتتيح العوامل الهيدرولوجية-الرسوبية قراءة مكانية محتملة لجيوب التقدم، ولا سيما عند مصبات الأودية التي تصب في البحر الأحمر، حيث قد يتسق تزايد الإرسابات الفيضية مع مواضع التقدم باتجاه البحر. وقد شهدت أودية منطقة الدراسة زيادة في التدفقات سيلية خلال فترة مطرية محددة (Elhag & Bahrawi, 2019)، ويمكن مقارنتها مكانياً بقطاعات التقدم عند المصبّات وبتنتائج مماثلة في مدينة رايغ (Alharbi, 2020).

أما في مدينة امّالج، فيمكّ تفسير تقارب قيمة التراجع العام مع نطاق الاستقرار جزئياً في ضوء وجود منشآت حماية ساحلية فد تحدّ نسبياً من قابلية خط الشاطئ للتراجع، مع انخفاض نسبي في النشاط البشري مقارنة بمدن تدخلات حفر وردم أكبرن مثل ينبع ورايغ، وجدة (Alharbi, 2020; Alharbi, 2020). وتشير هذه المقارنة إلى أن العامل البشري قد يرتبط بارتفاع معدلات التغير في سياقات ساحلية معينة، لا إلى علاقة سببية مطلقة.

الخاتمة والتوصيات:

استندت الدراسة على اطار منهجي راعي عدد من الجوانب الأساسية في اختيار البيانات وتمثيل خط الشاطئ لقياس التغيرات المكاني والزمانية له على ساحل محافظة امّالج خلال (2000-2019)، بجانب تحليلات جرت ضمن ثلاثة أنماط زمنية (النمط العام السائد/النمط الفترتي المنتظم كل خمس سنوات/النمط الدوري لكل سنة)، وباستخدام مقياسين إحصائيين للكشف عن سلوك الخط (معدل خط الانحدار وصافي حركة خط الشاطئ)، وذلك في ثلاث بيئات شاطئية (صخرية، حصوية، رملية).

أوضحت نتائج الهدف الأول أن النمط العام السائد اتسم بسيادة الاستقرار على مستوى المحافظة، بمعدل بلغ 0.23 م/سنة. في حين ظهر تراجع منخفض في مدينة امّالج بمعدل 0.87 م/سنة، وتراجع منخفض في البيئة الحصوية بلغ 0.67 م/سنة، مقابل تقدم منخفض في البيئتين الصخرية والرملية بمعدلي 0.30 و 0.56 م/سنة، على التوالي. أما في النمط الفترتي المنتظم، فقد أظهرت النتائج تداوياً للهيمنة بين نمطي الاستقرار والتراجع المنخفض، مع سيادة معدلات تغير منخفضة. في حين كشف

النمط الدوري السنوي عن دورات تعاقبية تفصيلية تختلف عن الأنماط السائدة في النمطين السابقين، بما يساعد على قراءة الطبيعة الديناميكية للخط عند تتبّعه على وحدات زمنية أقصر.

وفي الهدف الثاني، أوضحت النتائج وجود علاقة ارتباط موجبة الاتجاه بين معدلات التغيّر الدوري السنوي (NSM) وسرعة الرياح؛ وكانت قياسات الارتباط ذات دلالة إحصائية في جميع الحالات، باستثناء البيئة الصخرية. وتراوحت نسب الارتباط الدالة بين 27.5% في البيئة الحصوية و42.7% في مدينة امّالج، بما يشير إلى ارتباط موجب بين سرعة الرياح وتغيّر خط الشاطئ، لا إلى تأثير سببي مباشر. ولم تكشف النتائج عن ارتباطات ذات دلالة إحصائية بين معدلات التغيّر الدوري السنوي ودرجة حرارة سطح البحر. كما أظهر تحليل الملاحظة أن بعض خطوط الشاطئ المواجهة لاتجاه الرياح غلب عليها إجمالاً التقدم نحو البحر، بينما اتسمت الخطوط الواقعة في ظل الرؤوس البحرية بالتراجع المجمع نحو اليابس.

خلصت الدراسة إلى أن ضبط قياس التغيّر الزماني-المكاني لخط الشاطئ يقتضي مراعاة ديناميكيته التفاعلية عبر منهجية تغطي مراحل اختيار البيانات، وتمثيل الخط، والحد من عدم اليقين. وتبرز هنا قيمة التركيز على خط الشاطئ الفعلي لا اللحظي، وتعزيز موثوقية القياس من خلال تحديد خط أساس متوسط أكثر اتساقاً من الاعتماد على سنة مفردة أو خط افتراضي، فضلاً عن الاستفادة من بيانات لاندسات المستوى الثاني بوصفها مصدرًا ملائمًا للسلاسل الزمنية طويلة المدى، ضمن حدودها المنهجية.

وبرغم ذلك، يظل نطاق الدراسة محدودًا باقتصار تحليل العلاقة المناخية المحلية على الرياح ودرجة حرارة سطح البحر، دون إدماج عوامل أخرى قد تُثري الصورة التفسيرية، مثل مستوى سطح البحر، والأمواج، والتيارات البحرية، والجريان السيلبي، وحركة الإرسابات، وذلك لعدم توافرها ضمن إطار الدراسة الحالي. كما اقتصر تحديد خط الشاطئ على مؤشر MNDWI، دون اختبار مؤشرات مركبة متعددة النطاقات. لذلك، توصي الدراسة بتوسيع التحليل في دراسات لاحقة ليشمل أدوار المتغيرات المناخية، والبحرية، والرسوبية في تغيّر خط الشاطئ، والتحقق من فعالية تصور خط الشاطئ الفعلي في بيئات ساحلية أخرى، وبحث إمكانية تحديد خط الحرم البيئي المبني على مواضع خط الشاطئ الطبيعية.

المراجع:

المراجع العربية:

- الحافظي، إيمان عواد (2016): *جيومورفولوجية السهل الساحلي الشرقي للبحر الأحمر فيما بين امّالج شمالاً وينبع جنوباً*. رسالة دكتوراة غير منشورة، جامعة الامام عبدالرحمن بن فيصل، الدمام.
- سليم، محمد صبري محسوب (١٩٩١): *جيومورفولوجية السواحل*، دار الثقافة للنشر والتوزيع، القاهرة، ٣٦٨، صفحة.
- الشيخ، أمال بنت يحيى. (٢٠١٢). إدارة التدهور البيئي لساحل جدة باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية: استراتيجية مقترحة للتنمية السياحية المستدامة. *المجلة الأردنية للعلوم الاجتماعية*، ٥(٣)، ٣١٧-٣٢٩.
- العمران، على ابراهيم (٢٠١٢): *مقدمة في الاستشعار عن بعد ومعالجة الصور رقمياً*، دار وجوه للنشر والتوزيع، الرياض، ٢٧٢، صفحة.
- المثلوثي، سمير محمد. (٢٠٠٤). ظاهرة انجراف ساحل البحر الأحمر في مدينة جدة بالمملكة العربية السعودية. *مجلة البحوث والدراسات في الآداب والعلوم والتربية*، جامعة الملك عبدالعزيز كلية المعلمين، ١(١)، ٥٣-٨٤.

المراجع الأجنبية:

- Alghamdi, A. S., & Harrington Jr., J. (2018). Time-sensitive analysis of a warming climate on heat waves in Saudi Arabia: Temporal patterns and trends. *International Journal of Climatology*, 38(8), 3123–3139.
<https://doi.org/10.1002/joc.5489>
- Alharbi, O. A. (2020). Shoreline Change Analysis Along the Rabigh Coast of Saudi Arabia, Using Multi-Temporal Satellite Imagery. *Journal of King Abdulaziz University, Marine Science*, 30(2), 33–57.
<https://doi.org/10.4197/Mar.30-2.3>
- Alharbi, O. A., Phillips, M. R., Williams, A. T., Thomas, T., Hakami, M., Kerbe, J., Niang, A. J., Hermas, E. S., & Al-Ghamdi, K. (2017). Temporal shoreline change and infrastructure influences along the southern Red Sea coast of Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(16), 1–21.
<https://doi.org/10.1007/s12517-017-3109-7>
- Almonacid-Caballer, J., Sánchez-García, E., Pardo-Pascual, J. E., Balaguer-Beser, A. A., & Palomar-Vázquez, J. (2016). Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, 372, 79–88.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.015>

- Al-Sayari, S. S., & Zötl, J. G. (Eds.). (1978). Quaternary period in Saudi Arabia (Vol. 1): Sedimentological, hydrogeological, hydrochemical, geomorphological, and climatological investigations in central and eastern Saudi Arabia (1st ed.)
- Al-Zubieri, A. G., Bantan, R. A., Abdalla, R., Antoni, S., Al-Dubai, T. A., & Majeed, J. (2018). Application of GIS and remote sensing to monitor the impact of development activities on the coastal zone of Jazan city on the Red sea, Saudi Arabia. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3W4), 45–50. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-45-2018>
- Al-Zubieri, A. G., Ghandour, I. M., Bantan, R. A., & Basaham, A. S. (2020). Shoreline Evolution Between Al Lith and Ras Mahāsin on the Red Sea Coast, Saudi Arabia Using GIS and DSAS Techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(10), 1455–1470. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01169-6>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Burningham, H., & French, J. (2017). Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. *Geomorphology*, 282, 131–149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.029>
- Crowell, M., Leatherman, S. P., & Buckley, M. K. (1993). Shoreline change rate analysis: Long term versus short term data. *Shore & Beach*, 61(2), 13–20.
- Cosby, A. G., Lebakula, V., Smith, C. N., Wanik, D. W., Bergene, K., Rose, A. N., ... & Bloom, D. E. (2024). Accelerating growth of human coastal populations at the global and continent levels: 2000–2018. *Scientific Reports*, 14(1), 22489.
- Elhag, M., & Bahrawi, J. A. (2019). Sedimentation mapping in shallow shoreline of arid environments using active remote sensing data. *Natural Hazards*, 99(2), 879–894. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03780-4>
- Gens, R. (2010). Remote sensing of coastlines: Detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7), 1819–1836. <https://doi.org/10.1080/01431160902926673>
- Gorman, L., Morang, A., & Larson, R. (1998). Monitoring the coastal environment; part IV: Mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis. *Journal of Coastal Research*, 14(1), 61–92.
- Guariglia, A., Buonamassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M. L., Zaccagnino, A., & Colangelo, A. (2006). A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes. *Annals of*

- Geophysics*, 49(1), 295–304. <https://doi.org/10.4401/ag-3155>
- Hapke, C. J., Reid, D., Richmond, B. M., Ruggiero, P., & List, J. (2006). National assessment of shoreline change, Part 3: Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California coast. *Change*, 69.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide. *Open-File Report 2018-1179*, 126.
- Kuleli, T., Guneroglu, A., Karsli, F., & Dihkan, M. (2011). Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38(10), 1141–1149.
- Li, R., Di, K., & Ma, R. (2001). *A comparative study of shoreline mapping techniques*. The Ohio State University, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2407. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863> (Taylor & Francis Online)
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, 8, 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Maiti, S., & Bhattacharya, A. K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 257(1–4), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.006>
- Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., & Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2–3), 254–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>
- Morcos, S. A. (1970). Physical and chemical oceanography of the Red Sea. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 8, 73–202.
- Nazeer, M., Waqas, M., Shahzad, M. I., Zia, I., & Wu, W. (2020). Coastline vulnerability assessment through Landsat and cubesats in a coastal mega city. *Remote Sensing*, 12(5), 749.
- Niang, A. J. (2020). Monitoring long-term shoreline changes along Yanbu, Kingdom of Saudi Arabia using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 762–776. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1773623>
- Nofal, R., & Abboud, I. A. (2016). Geomorphological evolution of marine heads on the eastern coast of Red Sea at Saudi Arabian region, using remote sensing techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2234-4>

- Paravolidakis, Vasilis, Ragia, L., Moirogiorgou, K., & Zervakis, M. E. (2018). Automatic coastline extraction using edge detection and optimization procedures. *Geosciences (Switzerland)*, 8(11).
<https://doi.org/10.3390/geosciences8110407>
- Pinto, C. T., Jing, X., & Leigh, L. (2020). Evaluation analysis of landsat level-1 and level-2 data products using in situ measurements. *Remote Sensing*, 12(16), 1–30. <https://doi.org/10.3390/RS12162597>
- Prasad, D. H., & Kumar, N. D. (2014). Coastal erosion studies—A review. *International Journal of Geosciences*, 5, 341–345.
<https://doi.org/10.4236/ijg.2014.53033>
- Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, 160, 320–332.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011>
- Ruggiero, P., Kratzmann, M. G., Himmelstoss, E. A., Reid, D., Allan, J., & Kaminsky, G. (2013). National assessment of shoreline change: Historical shoreline change along the Pacific Northwest coast. In *U. S. Geological Survey Open-File Report OF 2012-1007*.
- Sheeja, P. S., & Ajay-Gokul, A. J. (2016). Application of Digital Shoreline Analysis System in Coastal Erosion Assessment. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(6), 7876–7883.
<https://doi.org/10.4010/2016.1848>
- Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., & Maiga, A. S. (2019). Shoreline detection using optical remote sensing: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 75.
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(3), 260–263.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0> ([nature.com](https://www.nature.com))
- Wibisana, H., Kamandang, Z., R., & Zainab, S. (2020). Analysis of sea surface temperature and its correlation with changes in coastlines using Landsat 8 satellite image data (case study: Ujung Pangkah Gresik). In *Ist International Conference Eco-Innovation in Science, Engineering, and Technology* (NST Proceedings, pp. 57–63).
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.
<https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Spatiotemporal Shoreline Changes and it's Local Climate Teleconnection, Ummllajj Province, Saudi Arabia

Khalid H. Alharbi¹

Dr. Ali S. Alghamdi²

Abstract:

About two-thirds of the world's shorelines are at risk of erosion. Thus, geomorphological studies have been focusing on monitoring changes in shorelines from both temporal and spatial perspectives to support coastal protection planning. Due to limited research publishers at the local level, this article aimed to (1) examine changes in Ummllajj shoreline, along the eastern coast of the Red Sea, western Saudi Arabia, in different coastal environments (rocky, gravel, and sand) using a time series approach based on Level II Landsat data for 20 years (2000-2019). (2), the local climate teleconnection (wind and sea surface temperature) during the warm season for the detected patterns was examined. To delineate the most representative shoreline, several criteria have been formulated, including (data standards, criteria for the identification and deduction of the shoreline, and standards for detecting indicators ,and measuring the temporal and spatial change of the shoreline) to increase the scientific representative efficiency of the results. The amount of error in identifying, deducting and analyzing the change to the line was verified. A new method is developed to determine the actual shoreline and determine the appropriate threshold value for the (MNDWI). Shoreline-change direction was then quantified using the linear regression rate and net shoreline movement, and their climatic linkage was evaluated using the Mann–Kendall test. The results overall showed a prevailing pattern of stability (0.23) in the Ummllajj Provence shoreline and the low decline (-0.87, -0.67) in the city of Ummllajj and the gravel environment, low progress on the rocky environment (0.30) and the sandy environment (0.57). The relationship between local climatic conditions and annual shoreline change revealed a positive correlation (except the rocky shoreline), with significant correlation proportions ranging from 27.5% to 42.7%. These findings provide a vision and understanding of the nature of the change of the shoreline in the study area to guide the management of the coast and adopt policies that allow the maintenance of that stable state of the line.

Keywords: shorelines, MNDWI, local climate, wind, sea surface temperature, Umluj

¹ PhD Student, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, King Saud University; Lecturer, Department of Geography, Taibah University.

² Associate Professor of Climatology & Climate Planning, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, King Saud University.

التحليل المكاني-الزماني للمها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية باستخدام أطواق التتبع

د.أمانى بنت محمد الجهني^٢

نورة بنت إبراهيم الحصيبي^١

الملخص:

يعد المها العربي من الأنواع الفطرية ذات الأهمية البيئية في البيئات الصحراوية بالمملكة العربية السعودية، وتسهم دراسات سلوكه الحركي في دعم جهود الحفاظ عليه وإدارة موائله الطبيعية. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التباين الحركي بين إناث وذكور المها العربي وتحديد الأنماط المكانية-الزمانية لتحركاته بين موسمي الصيف والشتاء، إضافةً إلى تحديد الموائل الأكثر ملاءمة له داخل محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد.

استخدمت بيانات أطواق التتبع الفضائي GPS لعام ٢٠٢٤ م، وربطت بمتغيرات بيئية شملت الارتفاعات والغطاء النباتي والبعد عن العوامل البشرية، وذلك باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لإجراء التحليلات المكانية وإنتاج خرائط توضح نطاقات الحركة ومستويات الملاءمة البيئية.

أظهرت النتائج وجود فروق واضحة في الأنماط الحركية بين الذكور والإناث، حيث اتسع نطاق حركة الذكور مقارنةً بالإناث. كما أظهرت النتائج تباين الحركة تبعاً لتغير الموسم، حيث زيادة النشاط في موسم الشتاء مقارنةً بموسم الصيف. وتوصلت الدراسة إلى الموائل التي يفضلها المها العربي والتي ترتبط غالباً بتوفر الغطاء النباتي والتضاريس التي توفر الظل والأمان من التأثيرات البشرية والمفترسات.

توصي الدراسة بتعزيز مشاريع استزراع النباتات المحلية لتحسين جودة الغطاء النباتي وتوفير مناطق ظل طبيعية. والحد من الأنشطة البشرية داخل مناطق التواجد الحيوي للمها العربي، إلى جانب مواصلة الهيئة الملكية لتطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد جهودها في الحماية والتشديد على المناطق التي أظهرت الدراسة تفضيل المها العربي لها؛ لضمان استدامة النوع واستقرار بيئته الطبيعية.

الكلمات المفتاحية: المها العربي، محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد، التحليل المكاني-الزماني، أطواق التتبع، نظم معلومات جغرافية

^١ طالبة دراسات عليا، قسم الجغرافيا، كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية، جامعة الملك سعود
^٢ أستاذ مساعد، قسم الجغرافيا، كلية العلوم الإنسانية، جامعة الملك سعود

المقدمة:

تواجه الكائنات الحية أخطار وتحديات كبيرة في بيئتها التي تعيش فيها وذلك بسبب العديد من الظروف الطبيعية والبشرية التي تؤثر فيها مما يجعل الحفاظ عليها حاجة ضرورة لضبط وحماية التنوع البيولوجي. وبسبب التهديدات التي تتعرض لها الكائنات الحية، خاصة الأنواع المهددة بالانقراض، فقد برزت الحاجة إلى تفعيل دور نظم المعلومات الجغرافية المهم في إدارة هذه الأنواع الحيوية والحفاظ عليها في بيئتها. وفي هذا الصدد يرى (السلي، ٢٠١١، ٨٨) أن أهمية نظم المعلومات الجغرافية في البحث العلمي تأتي من كونها أداة تحقق مرونة كبيرة في إدارة المعلومات وتحليلها مكانياً، فضلاً عن دورها المهم في توفير النماذج التفسيرية التي تفيد في تحليل تلك البيانات مما يترتب عليه استخلاص معلومات ونتائج مفيدة بشكل واضح في اتخاذ القرار بما يضمن الحفاظ على الأنواع والحد من الخلل البيئي.

ويعد التحليل المكاني أحد أهم وظائف نظم المعلومات الجغرافية، إذ يدرس أنماط التوزيع ومواقعها على سطح الأرض ويفسر العوامل المؤثرة في توزيعها. هذه التحاليل تمكن الباحثين والمختصين من الربط بين توزيع الظاهرة والعوامل المؤثرة فيها، وتفسير البيانات التي لا يمكن تفسيرها بشكلها الوصفي فقط. وبفضل هذه الأدوات، يمكن تحويل البيانات الجغرافية إلى معلومات ذات قيمة تسهم في تفسير الظواهر الطبيعية واتخاذ القرارات المبنية على أسس علمية.

وفي نفس السياق السابق فإن تحديد الموقع الأمثل هي من الأدوات المتقدمة في نظم المعلومات الجغرافية والتي تهدف إلى اختيار أفضل موقع لتنفيذ مشروع أو نشاط ما بناءً على مجموعة من المعايير والمتغيرات، يعمل هذا التحليل على دمج طبقات بيانات مختلفة مثل الغطاء النباتي وتضاريس الأرض والموارد المائية للوصول إلى أكثر المواقع ملاءمة. تستخدم هذه الأداة على نطاق واسع في مجالات التخطيط العمراني وإدارة الموارد الطبيعية وإنشاء المحميات الطبيعية ونطاقاتها الإدارية وتحسين جودة إدارتها، حيث توفر رؤية مكانية تساعد على تقليل المخاطر وزيادة الكفاءة في استخدام الموارد.

وسوف تقوم هذه الدراسة بتقييم المواقع الجغرافية لتحركات المها في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية ومحمية الملك خالد الملكية لتحديد الموئل الأفضل له، مع ضمان توفر الغطاء النباتي وبعده عن المهددات البشرية، إضافةً إلى ملاءمة التوزيع المكاني للتحركات وفقاً للمتغيرات البيئية في منطقة الدراسة خلال فترتي الصيف والشتاء، هذا الربط سيسهم في إدارة المحمية بشكل مستدام وآمن مما يدعم جهود المحافظة على الأنواع المهددة بالانقراض.

وتكتسب الدراسة أهمية خاصة في ظل التوجه الوطني لحفظ التنوع الأحيائي وحماية البيئة، كما تتوافق أيضاً مع مستهدفات رؤية المملكة العربية السعودية ٢٠٣٠ في مجال الاستدامة البيئية، من خلال دعم حماية النظم البيئية والمحافظة على التنوع الأحيائي، والاستفادة من التقنيات الحديثة في

تطوير إدارة المناطق المحمية وتعزيز كفاءة المحافظة على الحياة الفطرية. حيث تسعى إلى توظيف بيانات التتبع بالأطواق وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية في تحليل أنماط التحركات المكانية-الزمانية للمها العربي داخل محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية وتقديم قاعدة معرفية لسلوك المها ونمط حركته خلال فترتي الصيف والشتاء، ومعرفة مدى التباين الحركي لدى ذكور وإناث المها العربي؛ مما يساهم في تحديد الموئل الأمثل من خلال وضع أسس علمية تساعد في تحسين إدارة المحمية لحفظه من المهددات البشرية والطبيعية.

ويمكن إبراز أهمية هذه الدراسة أيضًا في سد فجوة بحثية محلية وخطوة أولية يمكن أن تبني عليها دراسات لاحقة في مجال توظيف نظم المعلومات الجغرافية والتحليل المكاني لدراسات الحياة الفطرية، وتوفير بيانات علمية دقيقة يمكن الاستفادة منها في تنمية واستدامة الحياة الفطرية.

المشكلة البحثية:

تحظى تحركات المها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية بعناية كبيرة؛ إذ سعت إدارة المحمية إلى تتبع أنماط حركته عبر تزويده بأطواق تسجل مواقع بدقة. ورغم توفر هذه البيانات، لا يزال توظيفها العلمي محدودًا. ومن هنا تأتي هذه الدراسة لتحليل التحركات المكانية للمها العربي وأنماطها خلال فترتي الصيف والشتاء، وبيان مدى ملاءمتها لخصائص البيئة المحلية في المحمية، مثل توفر الغطاء النباتي ومصادر المياه. كما أن ضعف استثمار هذه البيانات يحد من قدرة إدارة المحمية على وضع خطط واستراتيجيات فعالة تضمن استدامة النوع وحمايته من المهددات البشرية والطبيعية.

أهداف البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة:

١. التباين الحركي لدى إناث وذكور المها العربي
٢. التعرف على أنماط تحركات المها وسلوكها الزماني-المكاني حسب المواسم (صيف وشتاء).
٣. تحديد الموئل الأمثل للمها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية

الحدود المكانية:

تقوم هذه الدراسة بتحليل حركة المها العربي الذي أطلق في موسم ٢٠٢٣ في محمية الملك خالد الملكية الواقعة ضمن النطاق الإداري لهيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية، الواقعة شمال شرق مدينة الرياض في المنطقة الوسطى من المملكة العربية السعودية "وشمال غرب هلال الدهناء، ويحدها من الجنوب طريق الرياض الدمام" (الهيئة الملكية لتطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن

واضحًا مع نمو أعداد المها، غير أن استئناف الصيد غير المشروع أدى إلى انهيار أعداد القطيع في البرية. وتبرز هذه الدراسة أهمية تحديد الموائل المثلى للمها العربي ووضع خطط إدارية فعّالة من قبل إدارات المحميات لضمان استدامة النوع وحمايته من خطر الانقراض.

٢. كشفت دراسة (Johnson, C.J., et al., 2002) عن أنماط حركة كاريبو الغابات باستخدام أطواق GPS بهدف التعرف على مقاييس الحركة المكانية-الزمانية والعوامل المؤثرة بها. وقد استخدمت في هذه الدراسة نماذج غير خطية للتمييز بين الحركات القصيرة داخل البقع والحركات الطويلة بين البقع، وارتباطها بالعوامل البيئية من نوع الغطاء النباتي وتكلفة الحركة من حيث الطاقة ومخاطر الافتراس. توصلت النتائج أن حركة الكاريبو تكون قصيرة وداخل البقعة في مناطق الرعي وتكون قريبة من الافتراس، بينما مثلت الحركات الكبيرة وسيلة الابتعاد عن مناطق الخطر والافتراس.

٣. كشفت دراسة (Davimes, J., et al., 2016) عن التكيفات السلوكية والفسيوولوجية للمها العربي خلال موسمي الصيف والشتاء. واستخدم الباحثون أجهزة لقياس إيقاع درجة حرارة الجسم وتقنية الأكتوغرافيا الدقيقة لعشرة أفراد من المها العربي للتعرف على فترات الخمول المرتبطة بدرجة الحرارة. توصلت الدراسة إلى أن المها العربي يقضي في المتوسط ٥ ساعات يوميًا في حالة خمول خلال الشتاء، بينما يزداد معدل الخمول إلى ٦,٦ ساعات يوميًا خلال الصيف، مما يشير إلى تكيف موسمي مع الحرارة المرتفعة.

٤. أجرى (Ndaimani, H., et al., 2017) دراسة هدفت إلى معرفة تواجدية الفيلة الأفريقية بالقرب من مصادر المياه. حيث اعتمد الباحثون على بيانات أطواق التتبع GPS لفيلة في متنزه غوناريزو بزمبابوي، مستخدمين خوارزمية MaxEnt في نمذجة التوزيع بالاعتماد على المتغيرات البيئية كالغطاء النباتي ومصادر المياه. توصلت هذه الدراسة إلى أن أبرز ما يؤثر على تواجدية الفيلة هي المسطحات المائية.

٥. هدفت دراسة (Albaqami, T., 2018) إلى تقييم دور المحميات الطبيعية في الحفاظ على المها العربي في المملكة العربية السعودية. وذلك من خلال إعداد خرائط للمناطق المحمية وتوزيع قطعان المها العربي فيها، ومقارنة أعداد المواليد والوفيات، وتحديد أسباب التغير السكاني في كل من محمية عروق بني معارض ومحمية محازة الصيد. تبين ألا يمكن مقارنة أعداد المواليد والوفيات بالمحميتين بشكل مباشر لاختلاف نظام الحماية بينهما (مسورة مقابل مفتوحة)، وأن نجاح إعادة التوطين في محمية عروق بني معارض يعود إلى تجربة إعادة التوطين في محمية محازة الصيد. وأوصت الباحثة بتعزيز الابتكارات البحثية على المستوى الدولي عبر تقديم المنح والتسهيلات الدراسية، وعلى المستوى المحلي أوصت برفع الوعي المجتمعي للحياة الفطرية عبر إدراجه في مناهج التعليم.

٦. هدفت دراسة (Stabach JA., et al., 2020) إلى تقييم التأثيرات قصيرة المدى لتركيب أطواق GPS على المها المقوسة القرون. ولتحديد التأثيرات أجريت الملاحظات السلوكية المباشرة، وقياس مستقبلات الكورتيكوستيرويد في البراز كمؤشر للتوتر، إضافة إلى تحليل بيانات مقاييس التسارع ثلاثية المحاور. توصلت النتائج إلى أن هنا تأثيرات قصيرة المدى، ولكن فوائد الأطواق تفوق تأثيراتها، حيث كانت التأثيرات محدودة زمنياً (لا تتجاوز ٥ أيام). وأوصى الباحثون بضرورة اختبار الأجهزة على الحيوانات قبل إطلاقها في البرية، وأخذ عوامل الملاءمة الجسدية والبيئة المناخية في الاعتبار لتقليل المخاطر.
٧. أجرى (Rumiano, F., et al., 2020) مراجعة أدبية هدفت إلى جمع المعرفة الحالية في مقال واحد حول الاستخدامات المحتملة لمنتجات الاستشعار عن بعد من قبل علماء بيئة الحركة لدراسة التداخل بين الحياة الفطرية والظلفيات في بيئات السافانا، من خلال مراجعة الأدبيات العلمية المحكمة التي تحتوي على كلمات مفتاحية محددة، وتوصلت هذه المراجعة إلى أن المياه السطحية والهطول المطري واستخدامات الأراضي والحرائق هي العوامل الرئيسية التي تؤثر على حركة الظلفيات.
٨. سعى (Naqibzadeh, A., et al., 2021) إلى تحديد الموائل الملائمة لظبي الأدمي في منطقة بيدويه المحمية بإيران. واستندت الدراسة إلى بيانات التواجد فقط للنوع، مع توظيف برنامج Biomapper وتحليل العوامل البيئية (ENFA) لنمذجة ملاءمة الموائل. وتوصل الباحثون إلى تحديد المناطق المثلى لوجود الظبي، إضافةً إلى أبرز العوامل البيئية المؤثرة في توزيعه داخل المنطقة المحمية.
٩. تناولت دراسة (Gatiso, T. T., et al., 2022) جوانب التآزر والمقايضة بين حفظ التنوع الأحيائي والتنمية الاجتماعية-الاقتصادية، وذلك من خلال مقابلات واستبيانات أجريت مع مديري ١١٤ منطقة محمية في إفريقيا وأوروبا، توصلت الدراسة إلى أن استدامة المناطق المحمية وحفظ التنوع الأحيائي مرتبط ارتباطاً وثيقاً بتمكين إدارة المنطقة المحمية ومشاركة المجتمع المحلي في الحماية وصنع القرار.
١٠. أجرى (Louhichi, M., et al., 2022) دراسة في حديقة سيدي توي الوطنية في تونس، هدفت الدراسة لتحديد نمط الحركة وفهم سلوك التعايش بين المها المقوسة والغزال الأدمي، وذلك من خلال وضع كاميرات فخية في الحديقة الوطنية وحساب مؤشرات النشاط النسبي وتحليل نماذج مكانية وزمانية أخرى، توصلت الدراسة إلى أن توزيع المها يرتبط بغطاء الأعشاب والارتفاعات الأعلى، بينما تفضل الغزال الأدمي النباتات العشبية العريضة والارتفاعات المنخفضة، كما أظهرت الدراسة

أيضاً أن النوعين لهما تداخلات زمانية مرتفعة عبر جميع المواسم خلال فترة الفجر والغسق، وأن الانفصال المكاني للنوعين مكن التعايش بينهما.

التعليق على الدراسات السابقة:

بالنظر إلى هذه الدراسات وبعد مراجعتها تبين أن هنالك فجوة بحثية في قواعد المعلومات العربية في المواضيع التي تناولت الأنماط الحركية للأنواع الفطرية باستخدام التقنيات الحديثة كالتتبع بأطواق نظام التحديد المكاني GPS، ومن هنا تبرز أهمية هذا البحث باعتباره من أوائل الدراسات العربية التي تسعى لتحليل حركة المها العربي.

وبناءً على ماورد في هذه الدراسات، يسعى هذا البحث إلى الاستفادة من المنهجيات المستخدمة وتطبيقها في دراسة حركة المها العربي الأمر الذي يساهم في تطوير ودعم جهود الحفاظ على النوع في بيئته الطبيعية. كما أظهرت الدراسات دور التقنيات الحديثة كأجهزة التتبع ونظم المعلومات الجغرافية في تحليل أنماط الحركة وتحديد الموائل المثلى للأنواع.

منهجية الدراسة:

تبني هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، حيث تقوم بتحليل نطاق الحركة للمها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية، وذلك من خلال تتبع حركتها بواسطة أطواق نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، ترسل هذه الأطواق إشارة إحدائيات كل ساعتين تقريباً، مما يمكننا من تحليل الحركة مكانيًا-زمنيًا.

البرامج المستخدمة:

جهزت البيانات في جداول Excel، وعولجت باستخدام برنامج ArcGIS Pro 3.5.2 لإنتاج الطبقات وتحليل الحركة لتحديد الاختلافات في أنماط الحركة حسب المواسم (صيف وشتاء)، والتباين الحركي لدى إناث وذكر المها العربي. كما استخدمت بيانات الاستشعار عن بعد مثل الصور الفضائية للوصول إلى مؤشرات الغطاء النباتي MSAVI خلال موسمي الصيف والشتاء لعام ٢٠٢٤، ونماذج الارتفاعات الرقمية DEM لمعرفة تضاريس المنطقة؛ لتفسير التوزيع المكاني للمها العربي.

مصادر بيانات الدراسة:

لتحقيق أهداف الدراسة، جرى الاعتماد على المصادر الآتية:

المصادر الثانوية:

اعتمدت الدراسة على بيانات أطواق التتبع لفردين من المها العربي ذكر وأنثى، باستخدام نظام التحديد العالمي للموقع GPS لجمع بيانات الحركة المها العربي من قاعدة البيانات الجغرافية لهيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥. كما حصل على بيانات وحدود المناطق المحمية والمباني ونموذج الارتفاعات الرقمية DEM بدقة ١٠ متر من المركز الوطني لتنمية الحياة الفطرية.

استطاعت الدراسة تكوين خلفية حول ما كتب عن الظلفيات بشكل عام والمها العربي بشكل خاص، من الأدبيات والكتب والأبحاث المنشورة التي تناولت مواضيع المها وإعادتها للبرية بعد انقراضها منها وتحركات الكائنات البرية.

جمعت بعض البيانات من قواعد بيانات جغرافية مفتوحة المصدر كبيانات الطرق لعام ٢٠٢٤ حيث صدرت من Open Street Map (OSM) والصور الفضائية من القمر الصناعي Landsat-8 لعام ٢٠٢٤ حملت من موقع هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS

الأساليب المستخدمة:

استخدمت في هذه الدراسة مجموعة من الأساليب والتحليلات المكانية والزمانية باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية GIS والاستشعار عن بعد RS لتحليل تحركات المها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية. وذلك بالاستفادة من بيانات أطواق التتبع المزودة بنظام التحديد العالمي GPS التي حصل عليها من قواعد البيانات الجغرافية للمركز الوطني لتنمية الحياة الفطرية على هيئة جداول Excel تتضمن الإحداثيات الجغرافية والتاريخ والوقت ومعرف الطوق والارتفاع والدقة المكانية للرصد. حولت بعد ذلك إلى طبقة بيانات نقطية Point Feature Class داخل بيئة ArcGIS حيث جرى استخدام العديد من الأساليب المكانية وهي كالآتي:

١. التحليل المكاني:

استخدمت عدة أدوات هدفها الرئيس هو تحديد أنماط الحركة للمها العربي والمناطق التي سجلت فيها تواجد المها بشكلٍ عالٍ، وفيما يلي تفصيل للأساليب المستخدمة

تحليل الحركة: جرى حساب المسافة بين كل نقطتين متتاليتين وذلك بعد تحويل البيانات من النقطة إلى الخط عن طريق أداة Point to Line، واستخدم مسقط يحافظ على المسافة Equidistant لضمان دقة الحسابات، حصل على بيانات المسقط من موقع Projection wizard بعد تحديد منطقة الدراسة.

هذا التحليل مكّن من استخراج نتائج التباين الحراري لدى ذكور وإناث المها العربي، وتحليل تأثير المواسم على حركة المها.

تحليل نطاق الحركة **Home Range**: استخدمت أداة Aggregate Points لاستخراج نطاق الحركة للمها العربي. تعمل هذه الأداة على تجميع النقاط التي تقع ضمن مسافة محددة من بعضها البعض وتنتج حولها مضلع تمثل مجموعات هذه النقاط.

٢. تحليل الملاءمة المكانية:

لتحديد الموئل الأمثل للمها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية، جمعت الطبقات المؤثرة على حركة المها وتواجده مثل (الغطاء النباتي، الارتفاعات، وبُعد المنطقة عن التأثيرات البشرية)، صُنفت الطبقات باستخدام Reclassify إلى درجات الملاءمة من ١-٤، حيث إن ٤ تعني المواقع الأكثر ملاءمة. دمجت الطبقات باستخدام أداة Weighted Overlay وأُعطيت كل طبقة وزن كالتالي:

جدول (١): معايير الملاءمة المكانية، وفتات إعادة التصنيف، والرتب، والأوزان المستخدمة في نموذج الملاءمة.

المعيار	الوصف	الرتبة	الفتة	وزن المعيار
الغطاء النباتي (MSAVI)	انعدام الغطاء النباتي	١	> ٠,١٧٥	٥٠٪
	غطاء نباتي منخفض	٢	٠,٢٥ - ٠,١٧٥	
	غطاء نباتي متوسط	٣	٠,٣٧٥ - ٠,٢٥	
	غطاء نباتي كثيف	٤	< ٠,٣٧٥	
الارتفاع	ملاءمة منخفضة	١	> ٥٧٠	٢٥٪
	ملاءمة متوسطة	٢	٥٨٩ - ٥٧٠	
	ملاءمة عالية	٣	٦٧٠ - ٦٤٠	
	ملاءمة عالية جدًا	٤	٦٤٠ - ٥٨٩ ٩٠٠ - ٦٧٠	
التأثيرات البشرية	غير ملائم إطلاقاً	١	> ٥٠٠م	٢٥٪
	ملاءمة منخفضة	٢	١٥٠٠ - ٥٠٠	
	ملاءمة متوسطة	٣	٣٥٠٠ - ١٥٠٠	
	ملاءمة عالية	٤	< ٣٥٠٠م	

المصدر: من إعداد الباحثة

تحليل الغطاء النباتي:

بالاعتماد على مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة (MSAVI (modified soil-adjusted Vegetation Index) المستخرج من صور القمر الصناعي Landsat 8، وهو مؤشر نباتي يحاول التقليل من تأثيرات التربة العارية العنزي وآخرون (٢٠٢١ م. ص ٩١)، يحسب بواسطة أداة Raster Calculator.

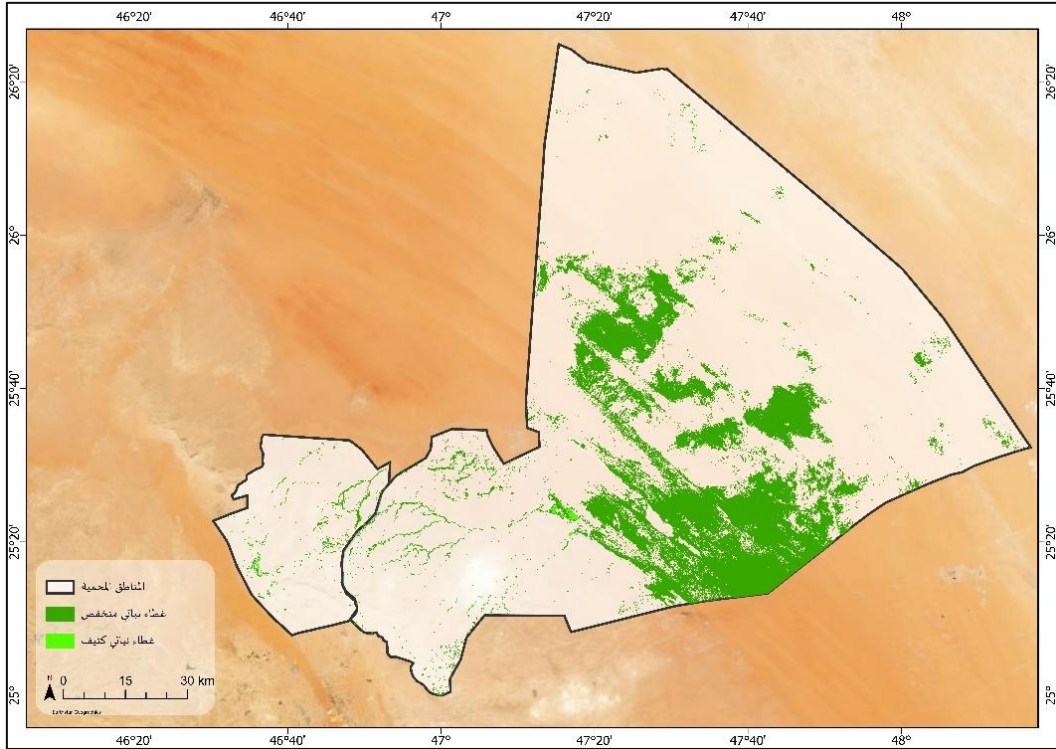
$$MSAVI = \frac{2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - R)}}{2}$$

المصدر: (United States Geological Survey, [USGS], 2025)

حيث أن NIR يعبر عن النطاق الطيفي الخامس أشعة تحت الحمراء القريبة و R يعبر عن النطاق الطيفي الرابع الأشعة الحمراء.

بعد حساب المؤشر، أُجري إعادة تصنيف المخرجات بأداة Reclassify، تنقسم إلى خمس فئات من منطقة معدومة الغطاء النباتي إلى غطاء نباتي كثيف. استخدمت نتائج التحليل كأحد المعايير البيئية الهامة ضمن نموذج تحليل الملاءمة البيئية Habitat Suitability Analysis للمها العربي.

الشكل (٢): نتيجة تحليل الغطاء النباتي MSAVI

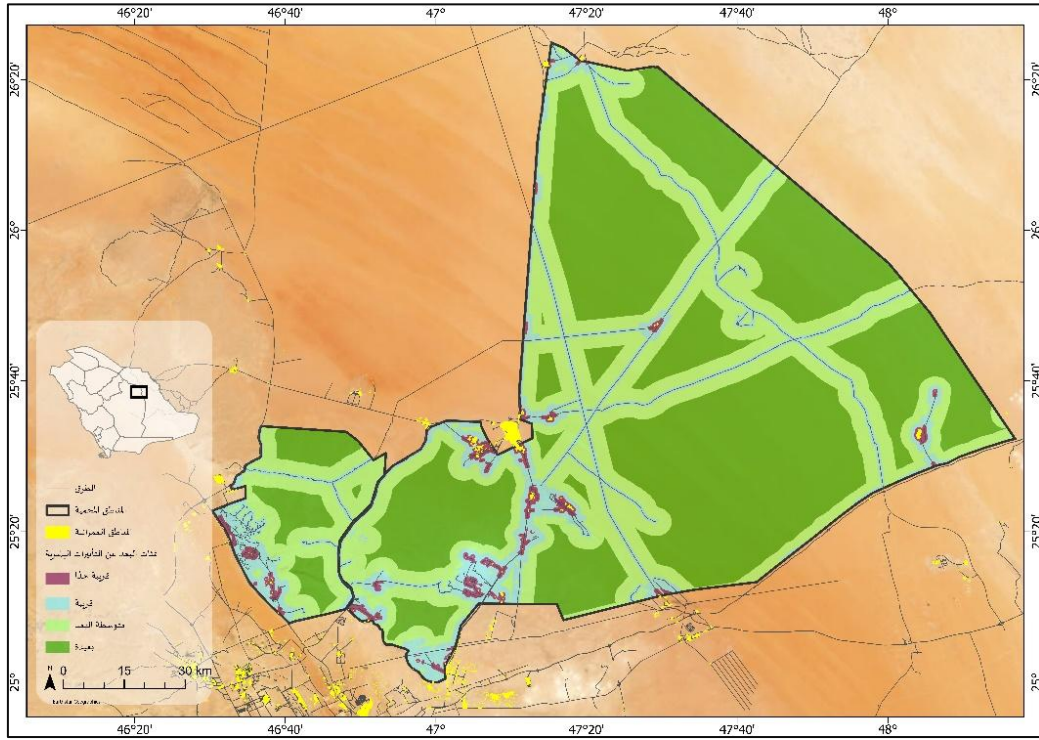


المصدر: من إعداد الباحثة اعتماداً على المرئيات الفضائية من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS

البعد عن التأثيرات البشرية:

خُلّلت التأثيرات البشرية في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية ومحمية الملك خالد، بعد حصر طبقات التأثير البشري (الطرق، المباني) على هيئة طبقات خطية Line ومضلعات Polygon. أُجري تحليل المسافة الإقليدية Euclidean Distance، وذلك بغرض تحديد التأثير البشري وتحويلها إلى طبقة خلوية Raster. بعد ذلك أُعيد تصنيف المخرجات بأداة Reclassify إلى فئات تمثل درجات التأثير، حيث تمثل القيم القريبة إلى تأثير بشري مرتفع، والقيم البعيدة إلى تأثير بشري منخفض. دمجت الطبقتين في طبقة واحدة باستخدام أداة Raster Calculator.

الشكل (٣): نتيجة تحليل البعد عن التأثيرات البشرية



التحليل والمناقشة:

١. التباين الحركي لدى إناث وذكور المها العربي في المحميتين:

حركة أنثى المها العربي

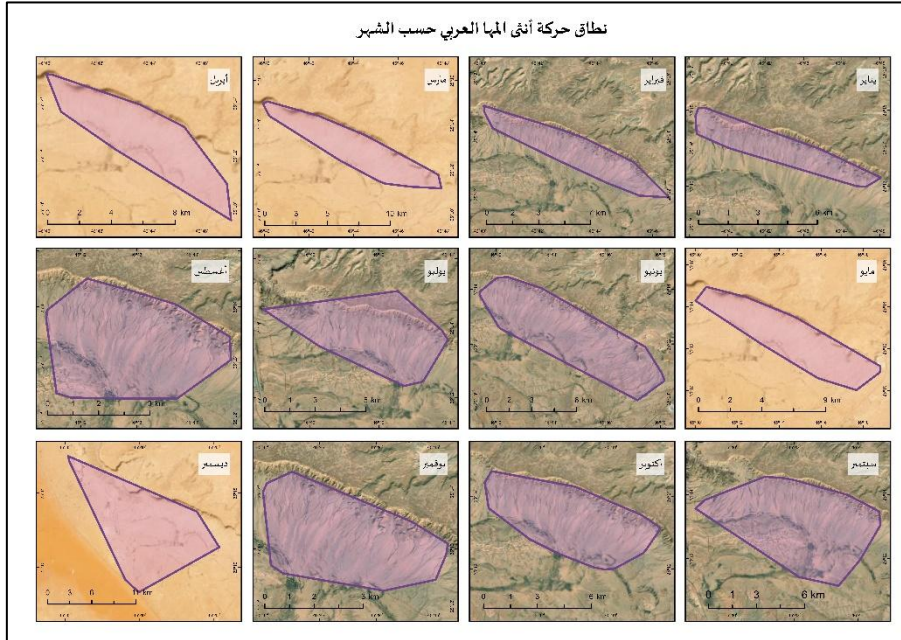
الجدول (٢): مساحة نطاق الحركة لأنثى المها العربي

الشهر	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
مساحة نطاق الحركة (كم ^٢)	10.2	18.2	31	40.4	46.5	39.7	24.6	16.5	36.4	23	13.6	130.4

المصدر: من إعداد الباحثة، وفقاً للبيانات الصادرة من هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥

أظهرت نتائج التحليل الشهري لحركة أنثى المها العربي تبايناً في مساحة نطاق الحركة Home Range خلال العام، حيث تراوحت مساحة النطاق بين ١٠,٢ كم^٢ في شهر يناير كأصغر مساحة، و١٣٠,٤ كم^٢ في شهر سبتمبر كأكبر مساحة. يلاحظ أن مساحات الحركة في بداية العام كانت محدودة نوعاً ما، ومع الربع الثاني من العام بدأت المساحة بالالتساع حتى بلغت ٤٦,٥ كم^٢ حيث إنها ثاني أكبر مساحة مسجلة بعد مساحة شهر ديسمبر، ومع منتصف السنة أخذت المساحة بالتذبذب بين الارتفاع والانخفاض. بشكل عام أظهرت أنثى المها نمطاً متغيراً عبر العام، يتسم بانخفاض في بداية السنة وارتفاع واضح في نهايتها.

الشكل (٤): نطاق حركة أنثى المها حسب الشهر



المصدر: من إعداد الباحثة، وفقاً للبيانات الصادرة من هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥

حركة ذكر المها العربي

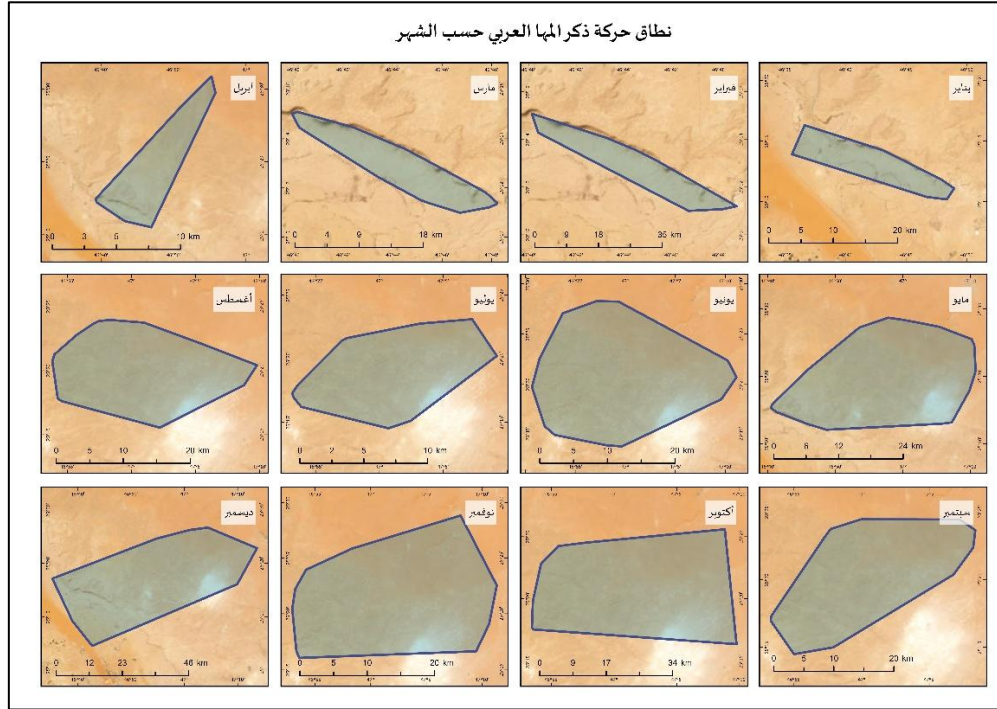
الجدول (٣): مساحة نطاق الحركة لذكر المها العربي

الشهر	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
مساحة نطاق الحركة (كم ^٢)	96	28	32	366	1095	622	263	271	277	375	544	1417

المصدر: من إعداد الباحثة وفقاً للبيانات الصادرة من هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥

أظهرت نتائج التحليل الشهري لحركة ذكر المها العربي تبايناً كبيراً في مساحة نطاق الحركة Home Range خلال فترة الدراسة، حيث تراوحت بين ٢٨ كم^٢ في شهر مارس كأدنى مساحة خلال العام و١٤١٧ كم^٢ في شهر ديسمبر كأكبر مساحة مسجلة. في الربع الأول من السنة كانت المساحات محدودة نسبياً وهي أصغر المساحات المسجلة خلال العام. ثم بدأت المساحة بالاتساع بدءاً من أبريل بشكل ملحوظ، وسجلت ثاني أكبر مساحة في شهر مايو بنطاق حركي بلغ ١٠٩٥ كم^٢، انخفض بعدها بشكل تدريجي، وسجل قيم مستقرة نوعاً ما خلال شهري أغسطس وسبتمبر، زادت بعدها القيم إلى أن وصلت ذروتها بشهر ديسمبر.

الشكل (٥): نطاق حركة ذكر المها حسب الشهر



المصدر: من إعداد الباحثة، وفقاً للبيانات الصادرة من هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥

أظهرت النتائج تباين في نطاق الحركة Home Range لدى ذكور وإناث المها، وهذا الاختلاف يرجع إلى تباين الأدوار السلوكية بين الجنسين. كما تشير الدراسات إلى أن خطر الافتراس يمكن أن يعزز درجة الافتراق الجنسي المكاني Sexual segregation لأن الإناث وصغارها أكثر عرضة للمفترسات من الذكور الكبيرة. قد تبحث الإناث في فترة الولادة عن مناطق توفر الحد الأدنى من خطر الافتراس لكنهما في المقابل تضحي بجودة المراعي (Bowyer et al. (2020, 5166p، على عكس الذكر الذي يميل إلى الترحال في مناطق واسعة بحثاً عن مناطق يفرض فيها نفوذه وبحثاً عن الموارد. يعتبر المها من الأنواع الاجتماعية التي تعيش ضمن قطعان ومجموعات مستقرة، وقد يفسر ابتعاد الذكر في بعض الفترات واتساع نطاق حركته بأنه فرد غير سائد، مما يدفعه إلى التحرك في نطاقات أوسع خارج القطيع.

ومن جانب آخر، فإن صغر مساحة نطاق الحركة لكلا الفردين قد يرتبط بكونهما أطلقا حديثاً في المنطقة، مما جعل حركتهما محدودة في الأشهر الأولى نتيجةً لمرحلة التكيف والتعرف على البيئة الجديدة. كما يلاحظ صغر نطاق حركة الذكر في شهر مارس يتزامن مع موسم التزاوج، حيث يقل نشاطه مقارنةً بالأشهر الأخرى، بسبب انشغاله في السلوك التناسلي بالقرب من مواقع الإناث.

٢. أنماط تحركات المها وسلوكها الزماني-المكاني حسب المواسم (صيف وشتاء)

الجدول (٤): المسافة المقطوعة للمها العربي خلال شتاء ٢٠٢٤

الموسم	معرف الطوق	الشهر	متوسط المسافة المقطوعة (ساعتان/م)	مجموع المسافة المقطوعة (ساعتان/م)
الشتاء	١٥٢٦٦٧ ذكر المها العربي	يناير	885	327,488
		فبراير	567	195,807
		مارس	657	289,913
		أبريل	739	264,748
		نوفمبر	1,039	370,996
		ديسمبر	2,307	514,670
الصيف	١٥٢٦٦٨ أنثى المها العربي	يناير	193	71,608
		فبراير	369	127,235
		مارس	601	266,002
		أبريل	521	184,624
		نوفمبر	232	83,091
		ديسمبر	786	186,303

المصدر: من إعداد الباحثة، وفقاً للبيانات الصادرة من هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥

أظهرت نتائج التحليل الشهري للمسافة المقطوعة بواسطة أطواق التتبع (الجدول ٣) اختلافاً في قيم الحركة بين شهور الموسم الشتوي لكل من فردين المها العربي الذكر والأنثى. تراوحت متوسط المسافة المقطوعة لذكر المها العربي بين ٥٦٧ م في شهر فبراير إلى ٢٣٠٧ م في شهر ديسمبر، حيث كانت أقل في بداية الفترة وازدادت تدريجياً في الأشهر اللاحقة، مع الإشارة إلى أن كانت ذروة متوسط المسافات

المقطوعة خلال بداية الموسم الشتوي لعام ٢٠٢٥. فيما أظهرت نتائج تحليل متوسط المسافات المقطوعة لأنثى المها العربي نتائج تراوحت بين ١٩٣ م إلى ٧٨٦ م، وتزداد القيمة تدريجيًا مع تباين في القيم مع ذكر المها.

الجدول (٥): المسافة المقطوعة للمها العربي خلال شتاء ٢٠٢٤

الموسم	معرف الطوق	الشهر	متوسط المسافة المقطوعة (ساعتان/م)	مجموع المسافة المقطوعة (ساعتان/م)
ذكر المها العربي	١٥٢٦٦٧	مايو	1,700	627,462
		يونيو	1,098	393,247
		يوليو	800	288,813
		أغسطس	983	358,876
		سبتمبر	838	291,088
		أكتوبر	1,136	280,680
أنثى المها العربي	١٥٢٦٦٨	مايو	699	258,683
		يونيو	614	207,797
		يوليو	546	194,507
		أغسطس	508	183,515
		سبتمبر	506	173,463
		أكتوبر	333	81,367

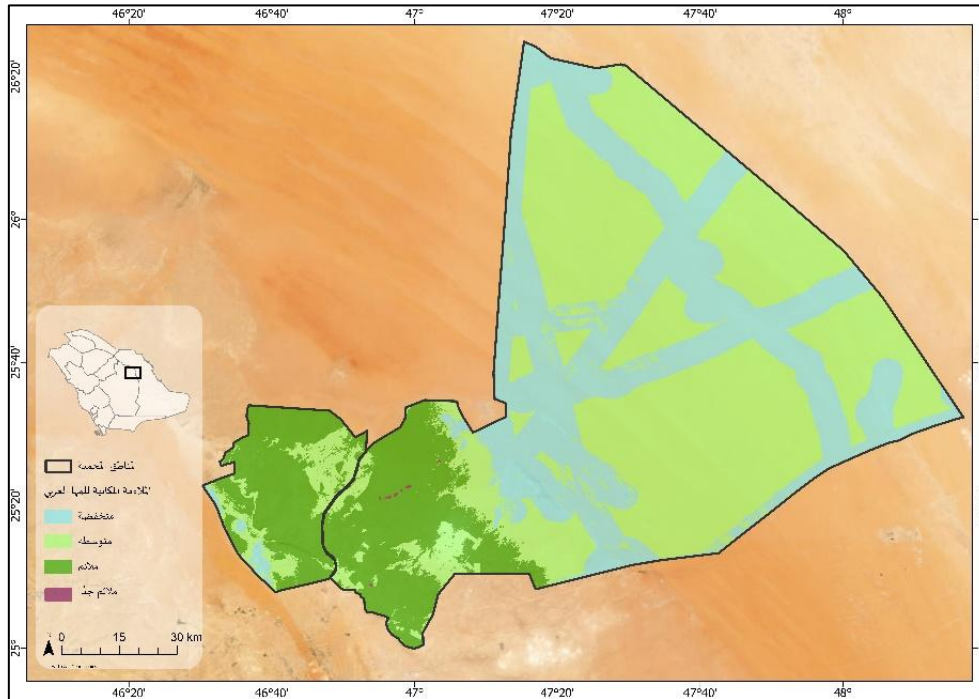
المصدر: من إعداد الباحثة، وفقًا للبيانات الصادرة من هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية لعام ٢٠٢٥

أظهرت نتائج التحليل الشهري للمسافة المقطوعة بواسطة أطواق التتبع (الجدول ٤) اختلافًا في قيم الحركة بين شهور الموسم الصيفي لكل من فردين المها العربي الذكر والأنثى. تراوحت متوسط المسافة المقطوعة لذكر المها العربي بين ٨٠٠ م في شهر يوليو إلى ١١٣٦ م في شهر أكتوبر، حيث يلاحظ وجود تذبذب في المسافات المقطوعة خلال الموسم، مع ارتفاع في بداية الفترة وانخفاض نسبي في منتصفها، ثم ارتفاع محدود في نهايتها. فيما أظهرت نتائج تحليل متوسط المسافات المقطوعة لأنثى المها العربي نتائج تراوحت بين ٣٣٣ م إلى ٦٩٩ م، وتظهر القيم المسجلة تدرجًا تنازليًا في المسافة المقطوعة خلال الأشهر الصيفية. عمومًا، تبين البيانات المسجلة خلال الفترة الصيفية تباينًا شهريًا في معدلات الحركة لدى كلا الفردين، مع اختلاف مستويات المسافة المقطوعة ضمن النطاق الزمني للموسم.

تظهر النتائج أن حركة المها تختلف بين موسمي الصيف والشتاء، مما يتوافق مع ما أشار إليه Whyte et al. (2025, 1p) أن المها المقنعة *Oryx dammah* المعاد توطينها في تشاد تمر بثلاث فصول متميزة في السنة من حيث السلوك الحركي: انخفاض كبير في مع دلالات الحركة خلال الفصل الحار الجاف، وزيادة واضحة خلال الفصل الممطر والفصل البارد الجاف، مما يعكس تأثير المناخ والتغير البيئي المباشر على نشاط الأفراد. بناءً على ذلك تظهر النتائج أن الموسم الشتوي يمثل فترة نشاط حركي مرتفع نسبيًا للمها العربي نتيجة تحسن الظروف البيئية، بينما يمثل الصيف فترة تقل فيها الحركة بسبب الإجهاد الحراري وضعف الغطاء النباتي. وهو نمط موسمي متكرر يعزز ما توصلت إليه الدراسات السابقة عن الأنواع الصحراوية المشابهة.

٣. تحديد الموئل الأمثل للمها العربي في محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية

الشكل (٦): خريطة الموئل الأمثل للمها العربي في محمي الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية والملك خالد الملكية



أعدت خريطة الملاءمة (شكل ٤) بالاعتماد على ثلاثة معايير رئيسية ذات علاقة بتوزيع المها العربي، وهي: الارتفاعات بنسبة (٢٥٪)، والتأثيرات البشرية شاملةً على الطرق والمباني بنسبة (٢٥٪)، والغطاء النباتي الذي يمثل النسبة الأكبر بنسبة (٥٠٪). حيث أظهرت الخريطة تباينًا في درجات الملاءمة داخل حدود المحمية، حيث تراوحت القيم بين (١-٤) حيث إن ٤ تعني ملائم جدًا. توزعت فئات الملاءمة في أجزاء مختلفة من المحمية، توزعت فئات الملاءمة المكانية داخل حدود المحمية بشكل متباين، حيث استحوذت فئة (متوسطة الملاءمة) على أكبر مساحة بلغت ٦٤٦٠ كم^٢ بما يعادل ٥١,٩٨٪ من إجمالي

مساحة منطقة الدراسة، تلتها فئة (منخفضة الملاءمة) بمساحة ٣٨٦١,١٣ كم^٢ بنسبة ٣١,٠٧٪، ثم فئة (ملائم) بمساحة ٢١٠٦,٣٩ كم^٢ بنسبة ١٦,٩٥٪، في حين لم تشغل الفئة الأعلى للملاءمة سوى ٠,٠٥ كم^٢ بنسبة ٠,٠٤٪، مما يدل على أن غالبية المحمية تتمتع بدرجات ملاءمة متوسطة إلى منخفضة، بينما تتركز أعلى درجات الملاءمة في نطاقات محدودة.

أظهرت نتائج الملاءمة المكانية قيم تراوحت بين ١-٤، تشير هذه النتائج إلى أن المناطق الواقعة ضمن الفئتين الثالثة والرابعة تمثل الموائل الأكثر ملاءمة للمها العربي من حيث توافر الغطاء النباتي، واعتدال الارتفاعات، وانخفاض مستوى التأثيرات البشرية. كما يظهر التوزيع المكاني لهذه الفئتين أن الموائل الملائمة تتركز في الجزء الجنوبي والجنوبي الغربي من منطقة الدراسة تتكامل فيها خصائص البيئة الطبيعية مع محدودية التأثيرات البشرية، وهو ما يعكس أهمية هذه المواقع في حفظ المها العربي واستدامته في موئله الطبيعي. كما تؤكد هذه النتائج أن تحديد الموائل الأمثل للمها العربي يعتمد على التكامل بين العوامل البيئية والبشرية، الأمر الذي يعزز من دقة النماذج المكانية في توجيه خطط الإدارة والحماية المستقبلية للمها العربي.

الخاتمة

خلصت هذه الدراسة إلى أن المها العربي يظهر أنماطاً حركية متأثرة بعدة عوامل بيئية وجغرافية وبشرية، مما يعكس قدرته على التكيف مع التغيرات التي تطرأ على بيئته. فقد أظهرت نتائج الدراسة التباين الحركي للمها العربي وفقاً للجنس والموسم، حيث تميل الذكور إلى الحركة بنطاق أوسع من حركة الإناث متأثرة بذلك الاعتبارات الفسيولوجية والحركية وتوفر الغذاء. كما أوضحت هذه الدراسة فعالية دمج بيانات التتبع الفضائي GPS عبر الأطواق مع بيانات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في تحديد الموائل المثلى وتفسير الأنماط الحركية بدقة.

وبناءً على ما سبق من تحليل ومناقشة، يمكن تلخيص أبرز النتائج التي توصلت إليها

الدراسة فيما يلي:

- وجود تباين حركي واضح بين ذكور وإناث المها تبعاً لاختلاف الوظائف الحيوية والسلوكية.
- تباين موسمي في أنماط الحركة، حيث يزداد النشاط في فصل الشتاء.
- تفضيل المها العربي للمناطق ذات الغطاء النباتي المتوسط طالما تكفل له وجود الظل والأمن من المؤثرات البشرية والمفترسات.
- العوامل والنشاط البشري لها تأثير سلبي على توزيع وحركة المها داخل المحمية.

- فاعلية استخدام نظم المعلومات الجغرافية في تحليل حركة المها العربي وتحديد الموئل الأمثل لها. ومن خلال النتائج التي توصلت إليها الدراسة، برزت عدة توصيات لتعزيز جهود إعادة توطين المها العربي بعد انقراضه من البرية، والتي يمكن أن تسهم في توجيه الجهود المستقبلية:
- الاستمرار في مراقبة المها العربي في مختلف الفصول باستخدام أطواق التتبع لتحليل التغيرات الموسمية.
- تنفيذ مشاريع استزراع للنباتات المحلية المناسبة للمنطقة لتحسين جودة الغطاء النباتي مما يرفع من جودة المراعي وتوفير مناطق ظل طبيعي يقلل من الإجهاد الحراري، وبما لا يخل بالمنظومة البيئية ولا يشكل خطراً في المستقبل على عناصر البيئة.
- ضبط الأنشطة البشرية داخل مناطق التواجد الحيوي للمها للحفاظ على استقراره.
- توسيع نطاق الدراسات لتشمل محميات أخرى مما يمكن من إجراء مقارنة بين السلوك الحركي وفقاً لتغير جغرافية المكان.
- تكثيف الوعي البيئي في أهمية الحفاظ على الموائل البيئية الطبيعية ودعم الجهات القائمة على برامج إعادة التوطين.
- إعطاء أولوية والتشديد الرقابي على الموائل التي أظهرت الدراسة تفضيل المها العربي لها، وذلك للحد من التأثيرات البشرية.

المراجع:

المراجع العربية

- ١- السلمي، سامي بن صقر، والتويجري، حمد بن أحمد. (٢٠٢١). اختيار الموقع الأمثل لإنشاء مجمع تعليمي بين المراكز والهجر في منطقة المدينة المنورة. *المجلة العربية لنظم المعلومات الجغرافية*، مج ١٤، ٣٤، ٨٦، 109. - مسترجع من <http://search.mandumah.com/Record/1196667>
- ٢- العنزي، فادي عبدالله، وآل زنان، ياسر راشد، ونحاس، فاتن حامد. (٢٠٢١). التباين المكاني والزمني للغطاء النباتي بمنطقة السودة وعلاقته بالتساقط خلال الفترة (٢٠١٤-٢٠١٨ م) باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية. *المجلة العربية للعلوم ونشر الأبحاث*، مجلة العلوم الطبيعية والحياتية والتطبيقية، ٥(٣)، ٨٧-١٠٧.
- ٣- مجمع الملك سلمان العالمي للغة العربية. (٢٠٢٥ م). *معجم مصطلحات الحياة الفطرية*. [معجم مصطلحات الحياة الفطرية](#)
- ٤- هيئة تطوير محمية الإمام عبدالعزيز بن محمد الملكية. (٢٠٢٥). [Imam Abdulaziz Bin Mohammed Royal Reserve Development Authority](#)

المراجع الإنجليزية

- 5- Albaqami ، T. S. M. (2018). Impact of Natural Reserves on the Rehabilitation of the Arabian Oryx in the Protected Areas of Mahazat as-Sayd and Uruq Bani Ma'arid, Kingdom of Saudi Arabia from 1980 until 2011. ١٥٠ - ١٣٢، ٩٤، ٢، مج ٢، ٩٤، ١٣٢. - مسترجع من *مجلة العلوم الإنسانية والاجتماعية*، مج ٢، ٩٤، ١٣٢. - <http://search.mandumah.com/Record/941417>.
- 6- Bowyer, R. T., McCullough, D. R., Rachlow, J. L., Ciuti, S., & Whiting, J. C. (٢٠٢٠). Evolution of ungulate mating systems: Integrating social and environmental factors. *Ecology and Evolution*, 10(11), 5160–5178. <https://doi.org/10.1002/ece3.6246>.
- 7- Davimes, J., Alagaili, A., Gravett, N., Bertelsen, M., Mohammed, O., Ismail, K., Bennett, N., Manger, P. (2016) Arabian Oryx (*Oryx leucoryx*) Respond to Increased Ambient Temperatures with a Seasonal Shift in the Timing of Their Daily Inactivity Patterns. *Journal of Biological Rhythms*. 2016;31(4):365-374. doi:[10.1177/0748730416645729](https://doi.org/10.1177/0748730416645729)
- 8- Gatiso, T. T., Kulik, L., Bachmann, M., Bonn, A., Bösch, L., Freytag, A., Heurich, M., Wesche, K., Winter, M., Ordaz-Németh, I., Sop, T., & Kühl, H. S. (2022). Sustainable protected areas: Synergies

- between biodiversity conservation and socioeconomic development. *People and Nature*, 4(2), 385–403. <https://doi.org/10.1002/pan3.10326>
- 9- Johnson, C.J., Parker, K.L., Heard, D.C. and Gillingham, M.P. (2002), Movement parameters of ungulates and scale-specific responses to the environment. *Journal of Animal Ecology*, 71: 225-235. <https://doi-org.sdl.idm.oclc.org/10.1046/j.1365-2656.2002.00595.x>
- 10- Louhichi, M., Khorchani, T., Petretto, M., Eifler, D., Eifler, M., Dadi, K., Zaidi, A., Karsene, Y., & Chammem, M. (2024). Spatiotemporal Mechanisms of the Coexistence of Reintroduced Scimitar-Horned Oryx and Native Dorcas Gazelle in Sidi Toui National Park, Tunisia. *Animals*, 14(10), 1475. <https://doi.org/10.3390/ani14101475>
- 11- Naqibzadeh, A. ., Sarhangzadeh, J. ., & Sayedi, N. . (2021). Habitat desirability modeling of Goitered Gazelle (*Gazella subgutturosa*) by Ecological Niche Factor Analysis in the Bidouyeh Protected Area, Iran. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 5(4), 15–27. <https://doi.org/10.22120/jwb.2021.528662.1223>
- 12- Ndaimani, H., Murwira, A., Masocha, M., & Zengeya, F. M. (2017). Elephant (*Loxodonta africana*) GPS collar data show multiple peaks of occurrence farther from water sources. *Cogent Environmental Science*, 3(1). <https://doi-org.sdl.idm.oclc.org/10.1080/23311843.2017.1420364>
- 13- Ostrowski, S., Bedin, E., Lenain, D. M., & Abuzinada, A. H. (1998). Ten years of Arabian oryx conservation breeding in Saudi Arabia – achievements and regional perspectives. *Oryx*, 32(3), 209–222. doi:10.1046/j.1365-3008.1998.d01-38.x
- 14- Rumiano, F., Wielgus, E., Miguel, E., Chamaillé-Jammes, S., Valls-Fox, H., Cornélis, D., Garine-Wichatitsky, M. D., Fritz, H., Caron, A., & Tran, A. (2020). Remote Sensing of Environmental Drivers Influencing the Movement Ecology of Sympatric Wild and Domestic Ungulates in Semi-Arid Savannas, a Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3218. <https://doi.org/10.3390/rs12193218>
- 15- Spalton, J. A., Lawrence, M. W., & Brend, S. A. (1999). Arabian oryx reintroduction in Oman: successes and setbacks. *Oryx*, 33(2), 168–175. doi:10.1046/j.1365-3008.1999.00062.x
- 16- Stabach JA, Cunningham SA, Connette G, Mota JL, Reed D, et al. (2020) Short-term effects of GPS collars on the activity, behavior, and adrenal response of scimitar-horned oryx (*Oryx dammah*). *PLOS ONE* 15(2): e0221843. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221843>
- 17- U.S. Geological Survey. (2025). Landsat Missions: Landsat Modified Soil Adjusted Vegetation Index. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-modified-soil-adjusted-vegetation-index>
- 18- Whyte, K., Mertes, K., Pusey, R. et al. What is a season to an oryx? Movement rates identify three seasons for scimitar-horned oryx reintroduced into their native range. *Mov Ecol* 13, 56 (2025). <https://doi.org/10.1186/s40462-025-00536-7>

Spatiotemporal Analysis of the Arabian Oryx in Imam Abdulaziz Bin Mohammed Royal Reserve Area Using GPS Tracking Collar

Noorh Ibrahim Alhussaini¹

Amani M. Aljohani²

Abstract:

The Arabian oryx is one of the ecologically significant native species inhabiting the desert environments of Saudi Arabia. Understanding its movement behavior plays a pivotal role in supporting conservation efforts and guiding the management of its natural habitats. This study aims to analyze the spatial-temporal variability in the movements of male and female Arabian oryx and to identify their seasonal patterns between summer and winter. It further seeks to determine the most suitable habitats for the species within Imam Abdulaziz bin Mohammed Royal Reserve.

GPS collar data collected in 2024 were utilized and integrated with key environmental variables, including elevation, vegetation cover, and distance from anthropogenic features. Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing techniques were employed to conduct spatial analyses and generate maps illustrating movement ranges and habitat suitability levels.

The results revealed pronounced differences between males and females, with males exhibiting wider movement ranges than females. Seasonal variations were also evident, as higher movement activity was recorded in winter compared to summer. The study identified preferred habitats characterized by adequate vegetation cover and terrain features that offer shade, security from human disturbance, and protection from predators.

The study recommends enhancing native vegetation restoration programs to improve habitat quality and provide natural shade areas. It also emphasizes minimizing human activities within the core distribution areas of the Arabian oryx and encourages continued protection efforts by the Royal Commission for Imam Abdulaziz bin Mohammed Royal Reserve, particularly in the zones identified as preferred habitats, to ensure the species' long-term sustainability and ecological stability.

Keywords: Arabian Oryx, Imam Abdulaziz Bin Mohammed Royal Reserve Area, Spatiotemporal Analysis, GPS Tracking Collar, GIS

¹ Graduate Student, Department of Geography , College of Humanities and Social Sciences, King Saud University

² Assistant Professor, Department of Geography , College of Humanities and Social Sciences, King Saud University



The Arabian Journal of Geographical Information System

Vol. (18) Issue No. (1)

doi: 10.33948/KSU-sgsajgis-18-1

A Peer-reviewed Bi-Annual Journal Issued by
The Saudi Geographical Society

Editorial Board

Dr. Fahad Abdulaziz AlMutlaq	Editor-in-Chief
Prof. Ziyad Mufdi Makharmeh	Member
Prof. Hossam Bilbisi	Member
Dr. Adel Mutamad Abdulhamid	Member
Dr. Sabah Saleh AlJonaid	Member
Randa Abdullah AlHarbi	Managing Editor

Advisory Board

Mr. Jack Dangermond	President, ESRI Company , United States of America
Prof. Michael Batty	Center for Statistical Studies , United Kingdom
Prof. Khaled Ali Eldrandaly	President, Zagazig University , Egypt
Prof. Mohamed Zaki AlSidiemy	President, Egyptian Geographical Society ,Egypt
Prof. Mohamed AlKhuzami Aziz	Fayoum University , Egypt

Correspondence Address

P.O.Box 2456 Riyadh 11451, Kingdom of Saudi Arabia

Tel: +966 01 4678798 Fax: +966 11 4677732

email: GISJournal@ksu.edu.sa

The research and studies published in the Arab Journal of Geographic Information Systems express the opinions of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board or the Saudi Geographical Society.



Administrative Board of the Saudi Geographical Society

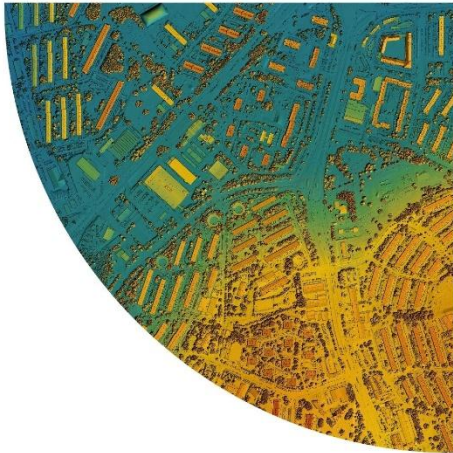
Dr. Ali Abdullah AlDosari	Chairman
Mr. Mohammed Ahmed AlRashid	Vice Chairman
Dr. Fahad Abdulaziz AlMutlaq	Treasurer
Dr. Sultan Ayad AlHarbi	Secretary of the Board
Dr. Anbarah Khamis AlSaud	Member
Dr. Hamoud bin Hadi AlOnaizy	Member
Prof. Awatif Shajaa AlSharif	Member
Prof. Amal Hussein AlMoshait	Member
Dr. Maha Abdullah AlDubaihi	Member

Deposit Number: 7849-1443 AH

ISSN: 1658-9254

The Arabian Journal of Geographical Information Systems

Vol. (18) Issue no. (2)



WWW.SCS.KSU.EDU.SA

