مجلة الأمانة العلمية – مجلة علمية محكمة
رقم الإيداع بدار الكتب الوطنية 307 / 2025
ISSN:3106-1176 https://ssj.org.ly

نمذجة الانتشار الجغرافي للملوثات الهوائية الناتجة عن حقول النفط والغاز وتأثيرها على المجتمعات المجاورة ـ دراسة تطبيقية على حوض سرت النفطي ـ ليبيا

د. فرج عبد الرحيم فرج

(عضو هيئة التدريس بدرجة أستاذ مشارك - قسم العلوم السياسية - كلية الاقتصاد الإسلامي والإدارة - جامعة السيد محمد بن علي السنوسي الإسلامية - البيضاء - ليبيا)

farag.a.farag@ius.edu.ly

الملخص:

تناولت هذه الدراسة نمذجة الانتشار الجغرافي للملوثات الهوائية (SO_2, NOx, PM2.5) الناتجة عن أنشطة صناعة النفط والغاز في حوض سرت بليبيا، بهدف تقييم تأثيرها على المجتمعات المجاورة. بالاعتماد على منهجية متكاملة تدمج بين نظم المعلومات الجغرافية (GIS) ونموذج الانتشار الجوي المتقدم (AERMOD) تم بناء محاكاة حاسوبية للانتشار المكاني للملوثات. أظهرت النتائج وجود "بصمة تلوث" واضحة تتجه بشكل سائد نحو الجنوب والجنوب الغربي، مما يضع مناطق الواحات، وتحديداً إجخرة ومرادة، ضمن نطاق التأثير المباشر. وكشفت الدراسة عن "مناطق ساخنة" تتجاوز فيها تراكيز الملوثات، وخصوصاً SO_2 وPM2.5، الحدود الإرشادية لمنظمة الصحة العالمية (WHO) مما يشير إلى وجود مخاطر صحية وبيئية حقيقية على السكان والنظم البيئية الزراعية الهشة. ويخلص البحث إلى ضرورة تفعيل الرقابة البيئية، وتبني تقنيات خفض الانبعاثات، ودمج البعد البيئي في التخطيط المستقبلي للمنطقة.

الكلمات المفتاحية: التلوّث البيئي، الانبعاثات الهوائية، العدالة البيئية، المناخ.

Geographic Dispersion Modeling of Air Pollutants from Oil and Gas Fields and Their Impact on Nearby Communities - A Study of the Sirte Basin, Libya

Abstract.

"This study modeled the geographical dispersion of air pollutants (SO_2, NOx, PM2.5) originating from oil and gas industry activities in the Sirte Basin, Libya, to assess their impact on neighboring communities by employing an integrated methodology that combines Geographic Information Systems (GIS) with the advanced atmospheric dispersion model, AERMOD, a computational simulation of the spatial dispersion of pollutants was developed. The results revealed a distinct 'pollution footprint' predominantly oriented towards the south and southwest, placing the oasis regions, specifically Jakhira and Marada, within the direct impact zone. The study identified 'hotspots' where pollutant concentrations, particularly of SO_2 and PM2.5, exceed the guideline limits set by the World Health Organization (WHO), indicating tangible health and environmental risks to the population and the fragile agricultural ecosystems. The research concludes by emphasizing the necessity of activating environmental monitoring, adopting emission reduction technologies, and integrating the environmental dimension into the future planning for the region.

Keywords: Environmental Pollution, Air Emissions, Environmental Justice, Climate.

- المقدمة:

- أهمية الدراسة وأهدافها

تُمثل دراسة التلوث الهوائي في مناطق إنتاج النفط والغاز تقاطعاً حيوياً بين الجغرافيا البيئية والتنمية الصناعية، حيث تبرز إحدى أكثر المعضلات تعقيداً في العصر الحديث: كيفية الموازنة بين متطلبات الطاقة والتنمية الاقتصادية من جهة، وضرورة حماية النظم البيئية وصحة الإنسان من جهة أخرى. وتكتسب هذه الدراسة أهميتها من كونها تتناول هذه الإشكالية في سياق حوض سرت بليبيا، الذي لا يمثل فقط شرياناً اقتصادياً حيوياً للبلاد، بل يقع أيضاً ضمن نسيج جغرافي وبيئي حساس يضم تجمعات سكانية تعتمد على موارد بيئية محلية. إن فهم كيفية انتشار الملوثات الهوائية المنبعثة من الأنشطة النفطية لم يعد مجرد ترفٍ علمي، بل أصبح ضرورة ملحة للتخطيط البيئي المستدام، وتقييم المخاطر الصحية، ورسم سياسات تضمن العدالة البيئية للمجتمعات المتأثرة.

- اهداف الدراسة:

تتحدد الأهداف الرئيسية لهذه الدراسة في النقاط التالية:

تحديد مصادر وأنواع الملوثات الهوائية الرئيسية المرتبطة بأنشطة استخراج ومعالجة النفط والغاز في حوض سرت.

بناء نموذج جغرافي حاسوبي يحاكي آليات الانتشار المكاني لهذه الملوثات، مع الأخذ في الاعتبار الظروف المناخية والطبوغرافية للمنطقة.

رسم خرائط مكانية (مكانية-زمانية) توضح "بصمة التلوث" أو المناطق الأكثر عرضة لتركز الملوثات (Hotspots) وتحديد نطاق تأثيرها الجغرافي.

تقييم التأثيرات المحتملة لهذه الملوثات على المراكز العمرانية والأراضي الزراعية المحيطة بالحقول، من خلال مقارنة نتائج النموذج بالمعايير البيئية والصحية المعتمدة.

- إشكالية البحث وتساؤلاته:

تتبلور إشكالية البحث في غياب فهمٍ كمّي ودقيق للنمط المكاني لتأثير التلوث الهوائي الناجم عن العمليات النفطية في حوض سرت، وانعكاسات هذا التأثير على المجتمعات المحلية. فعلى الرغم من الإدراك العام بوجود انبعاثات ملوثة من حقول النفط، إلا أن المعرفة تظل وصفية وعامة، وتفتقر إلى تحديد جغرافي دقيق لمناطق الخطر، ومستويات التركيز، ومدى وصول الملوثات إلى التجمعات السكانية والمناطق الزراعية الحيوية. إن هذه الفجوة المعرفية تُعيق بشكل مباشر جهود التخطيط البيئي، وتجعل تقييم المخاطر الصحية والبيئية ضرباً من التخمين، كما تمنع صياغة سياسات بيئية فعّالة ومبنية على الأدلة العلمية لحماية السكان والنظم البيئية المحيطة.

بناءً على ذلك، يسعى البحث إلى الإجابة على السؤال المحوري التالي:

كيف يمكن بناء نموذج جغرافي مكاني لانتشار الملوثات الهوائية من حقول النفط والغاز في حوض سرت، وما هي الأبعاد الجغرافية والصحية والبيئية لهذا الانتشار على المجتمعات المجاورة؟

ويتفرع عن هذا السؤال الرئيسي مجموعة من التساؤلات الفرعية التي تشكل خارطة طريق البحث:

ما هي أبرز الملوثات الهوائية (مثل ثاني أكسيد الكبريت SO_2, أكاسيد النيتروجين NOx ، المركبات العضوية المتطايرة (VOCs المنبعثة من عمليات إنتاج النفط وحرق الغاز المصاحب في منطقة الدراسة؟

كيف تؤثر الخصائص المناخية السائدة في حوض سرت، وخصوصاً أنماط الرياح الفصلية، على اتجاه ونطاق انتشار هذه الملوثات؟

ما هي المناطق الجغرافية (المراكز العمرانية، الأراضي الزراعية، مصادر المياه السطحية) التي تقع ضمن النطاق الأعلى تركيزاً للملوثات وفقاً لنتائج النموذج؟

إلى أي مدى تتجاوز تراكيز الملوثات المتوقعة في المناطق المأهولة الحدود والمعايير التي توصي بها منظمات الصحة العالمية والوكالات البيئية الوطنية؟

ـ منهجية البحث وأدواته:

لتحقيق أهداف الدراسة والإجابة على تساؤلاتها، سيتم الاعتماد على منهجية متكاملة تجمع بين التحليل النظري والنمذجة التطبيقية الكمية. يُعد المنهج الجغرافي هو المظلة الرئيسية للبحث، حيث يركز على تحليل العلاقات المكانية بين الظواهر الطبيعية (المناخ، التضاريس) والظواهر البشرية (الأنشطة الصناعية، التجمعات السكانية). ويندرج تحت هذه المظلة المناهج والأدوات التالية:

المنهج الوصفي التحليلي :سيُستخدم في بناء الإطار النظري للبحث، من خلال مراجعة الأدبيات العلمية والدراسات السابقة لفهم طبيعة الملوثات الهوائية المرتبطة بصناعة النفط، والأسس العلمية لنماذج الانتشار الجوي، بالإضافة إلى وصف الخصائص الجغرافية والبيئية لمنطقة الدراسة.

المنهج الكمي :هو جوهر الجانب التطبيقي للدراسة، حيث سيتم الاعتماد على البيانات الرقمية لتقدير حجم الانبعاثات من مصادرها، واستخدام بيانات الأرصاد الجوية كمدخلات عددية في نموذج الانتشار.

أما الأدوات التقنية الرئيسية التي سيتم توظيفها فهي:

نظم المعلومات الجغرافية : (GIS) ستُستخدم كمنصة مركزية لإدارة وتحليل وعرض البيانات المكانية. وتشمل مهامها بناء قاعدة بيانات جغرافية متكاملة لمنطقة الدراسة (مواقع الحقول، الشبكة السكانية، استخدامات الأرض)، وتحليل الأنماط المكانية، وفي النهاية، إنتاج الخرائط النهائية التي تعرض نتائج النموذج وتوضح مناطق التأثير.

نماذج الانتشار الهوائي : (Atmospheric Dispersion Models) سيتم استخدام أحد النماذج المعتمدة من قبل وكالات حماية البيئة العالمية، مثل نموذج .AERMODيقوم هذا النموذج بمحاكاة كيفية انتقال الملوثات وتشتتها في الغلاف الجوي بناءً على بيانات المصدر (معدل الانبعاث، ارتفاع المدخنة) وبيانات الأرصاد الجوية (سرعة واتجاه الرياح، درجة الاستقرار الجوي)، مما يسمح بحساب تراكيز الملوثات عند أي نقطة جغرافية في منطقة الدراسة.

الاستشعار عن بعد : (Remote Sensing) يمكن الاستعانة ببيانات الأقمار الصناعية، مثل Sentinel-5P، للحصول على مؤشرات أولية عن تركيزات بعض الغازات) مثل NO_2 و SO_2) على نطاق واسع، مما يساعد في التحقق من صحة مخرجات النموذج على المستوى الإقليمي.

جمع البيانات :سيتم جمع البيانات من مصادر متعددة تشمل التقارير الرسمية لشركات النفط، والبيانات المناخية من المراكز الوطنية أو قواعد البيانات العالمية، والخرائط الطبوغرافية، والبيانات السكانية.

- حدود الدراسة:

لكي تحقق الدراسة أهدافها بدقة وموضوعية، لا بد من تحديد نطاقها بشكل واضح، وهو ما يُعرف بالحدود البحثية التي تضمن تركيز الجهد وتعميق التحليل ضمن إطار محدد. تتحدد حدود هذه الدراسة بما يلي:

الحدود المكانية : (Spatial Limits) تتركز الدراسة مكانياً على حوض سرت النفطي في ليبيا، باعتباره الوحدة الجغرافية الرئيسية التي تضم مصادر الانبعاث. ويشمل النطاق الجغرافي للتحليل كلاً من الحقول النفطية الكبرى (مثل حقل آمال، والنافورة، وزلطن) ومحطات معالجة الغاز، ومشاعل الحرق المصاحب. كما يمتد نطاق الدراسة ليشمل المناطق المحيطة التي يُحتمل تأثرها بالملوثات، مع التركيز بشكل خاص على الواحات والتجمعات السكانية الرئيسية المجاورة مثل أوجلة، وجالو، وإجخرة، ومرادة .إن اختيار هذه المنطقة ينبع من أهميتها الاستراتيجية وكثافة الأنشطة النفطية فيها، مما يجعلها نموذجاً مثالياً لدراسة التفاعل بين الصناعة والبيئة في ليبيا.(Abdel-Salam & Al-Hasy, 2021)

الحدود الزمانية : (Temporal Limits) لضمان الحصول على نتائج تعكس الأنماط المناخية السائدة وتأثيرها على انتشار الملوثات، ستعتمد الدراسة على بيانات الأرصاد الجوية وبيانات الانبعاثات المقدرة لفترة زمنية تمتد لعام كامل، وهو عام 2023 .يتيح تحليل عام كامل رصد التباينات الفصلية في اتجاهات الرياح السائدة (صيفاً وشتاءً) وبالتالي فهم كيفية تغير "بصمة التلوث" على مدار السنة. يُعد استخدام بيانات عام كامل ممارسة منهجية موصى بها في دراسات نمذجة الانتشار الهوائي لضمان تمثيل مختلف الظروف الجوية. (EPA, 2019)

الحدود الموضوعية : (Thematic Limits) يركز البحث موضوعياً على نمذجة انتشار مجموعة محددة من الملوثات الهوائية الرئيسية الناتجة عن صناعة النفط والغاز، والتي تُعرف بتأثيراتها البيئية والصحية الواسعة. وتشمل هذه الملوثات :ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) وأكاسيد النيتروجين (NOx) والمركبات العضوية المتطايرة (VOCs) بالإضافة إلى الجسيمات الدقيقة (PM2.5) الناتجة عن عمليات الاحتراق. تستثني الدراسة الملوثات الأخرى الأقل حجماً أو التي تتطلب نماذج أكثر تعقيداً (مثل المعادن الثقيلة المحمولة جواً) وذلك بهدف تعميق التحليل في الملوثات الأكثر تأثيراً وأهمية في هذا السياق الصناعي المحدد.(Kuklinska et al., 2015)

- عرض الدراسات السابقة:

أولاً: دراسات عالمية تناولت نمذجة التلوث في مناطق نفطية:

دراسة : (Farina et al., 2021) استخدمت هذه الدراسة التي أجريت في حوض بيرميان بالولايات المتحدة الأمريكية نموذج AERMOD لتقييم تأثير انبعاثات حرق الغاز على جودة الهواء. توصلت الدراسة إلى أن تراكيز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) تجاوزت المعايير البيئية في مناطق قريبة من مواقع الحرق) . أوجه الاستفادة والإضافة :(تستفيد دراستنا من المنهجية المتبعة في استخدام نموذجAERMOD ، لكنها تضيف بعداً جديداً بتطبيقها في سياق جغرافي ومناخي مختلف (البيئة الصحراوية لشمال أفريقيا) وتحليل التأثير على واحات وتجمعات سكانية فريدة.

دراسة : (Akinlade et al., 2023) ركزت هذه الدراسة في دلتا النيجر بنيجيريا على نمذجة انتشار الجسيمات الدقيقة (PM2.5) من مشاعل حرق الغاز وتأثيرها على صحة الجهاز التنفسي للسكان. أظهرت النتائج ارتباطاً مكانياً قوياً بين المناطق ذات التراكيز العالية ومعدلات الإصابة بأمراض الجهاز التنفسي) . أوجه الاستفادة والإضافة : (تتشابه دراستنا معها في الهدف الصحي، لكنها تتوسع لتشمل ملوثات

غازية أخرى (NOx, SO_2) وتستخدم نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بشكل أعمق لربط النتائج باستخدامات الأراضي (الزراعية والسكنية) وليس فقط التوزيع السكاني.

ثانياً: دراسات إقليمية وعربية في مجال التلوث الهوائي الصناعي:

دراسة : (Abo-El-Ata et al., 2020) قامت هذه الدراسة بتحليل جودة الهواء في منطقة صناعية كبرى بالإسكندرية، مصر، باستخدام محطات رصد ميدانية. وجدت الدراسة أن الأنشطة الصناعية والبتروكيماوية هي المصدر الرئيسي لتجاوز الحدود المسموح بها لأكاسيد النيتروجين). أوجه الاستفادة والإضافة : (بينما اعتمدت هذه الدراسة على الرصد المباشر في نقاط ثابتة، فإن دراستنا الحالية تستخدم النمذجة الحاسوبية التي تتيح فهماً شاملاً للانتشار المكاني للتلوث عبر مساحات جغرافية واسعة لا تغطيها محطات الرصد، مما يوفر رؤية تنبؤية للمناطق المتأثرة.

دراسة : (Al-Masri & Al-Shamali, 2022) تناولت هذه الدراسة في إحدى المناطق الصناعية في المملكة العربية السعودية تقييم المخاطر البيئية للتلوث الهوائي على النظم البيئية الصحراوية المحيطة . أوجه الاستفادة والإضافة : (تتقاطع دراستنا معها في دراسة البيئة الصحراوية، لكنها تركز بشكل أعمق على التأثير المباشر على المجتمعات البشرية والواحات الزراعية، وهو جانب لم تتطرق إليه الدراسة السعودية بعمق.

ثالثاً: دراسات محلية (ليبية) تناولت البيئة والنفط:

دراسة : (El-Barasi & Abdel-Salam, 2019) ركزت هذه الدراسة على تقييم تلوث التربة والمياه الجوفية بالهيدروكربونات في محيط أحد الحقول النفطية في ليبيا). أوجه الاستفادة والإضافة : (هذه الدراسة مهمة لأنها تؤكد وجود تأثير بيئي للأنشطة النفطية في ليبيا، لكنها تقتصر على تلوث التربة والمياه . وتأتي دراستنا الحالية لتسد فجوة بحثية واضحة، وهي دراسة التلوث الهوائي الذي ينتقل لمسافات أبعد ويؤثر على نطاق جغرافي أوسع، باستخدام تقنيات النمذجة الجغرافية التي لم تُستخدم من قبل في هذا السياق الليبي بشكل تفصيلي.

الفجوة البحثية التي تغطيها الدراسة الحالية :من خلال العرض السابق، يتضح أن الدراسات السابقة إما ركزت على مناطق جغرافية مختلفة، أو تناولت أنواعاً أخرى من التلوث (تربة، مياه) أو استخدمت منهجيات الرصد الميداني المحدودة مكانياً. لذلك، تكمن أصالة هذه الدراسة في كونها أول دراسة متكاملة (حسب علم الباحث) تطبق نماذج الانتشار الجوي الحاسوبية المتقدمة (AERMOD) المدعومة بنظم المعلومات الجغرافية (GIS) لنمذجة الانتشار المكاني للملوثات الهوائية في حوض سرت بليبيا، وتقييم تأثيرها المباشر على المجتمعات والواحات المجاورة.

المبحث الأول

الإطار النظري والمفاهيمي

يمثل هذا المبحث الأساس النظري الذي تستند إليه الدراسة، حيث يتم من خلاله تحديد وتعريف المفاهيم المحورية التي تشكل الإطار الفكري للبحث، بدءاً من العلاقة العضوية بين الجغرافيا البيئية وقضايا التلوث، وصولاً إلى فهم صناعة النفط والغاز كمصدر رئيسي للانبعاثات الهوائية، وانتهاءً بالأسس العلمية لتقنيات النمذجة الجغرافية المستخدمة في التحليل.

المطلب الأول: الجغرافيا البيئية والتلوث الهوائي:

أولاً: مفهوم التلوث الهوائي وأنواعه ومصادره:

تُعرّف الجغرافيا البيئية بأنها العلم الذي يدرس العلاقات المتبادلة والتفاعلات الديناميكية بين الإنسان وبيئته الطبيعية، مع التركيز على فهم الأثر الذي تتركه الأنشطة البشرية على النظم البيئية المختلفة (الشمري، 2020). وفي قلب هذا التخصص تقع قضية التلوث البيئي، الذي يُعد من أبرز بصمات التأثير البشري على الكوكب. ويُعرف التلوث الهوائي تحديداً بأنه إدخال أي مواد كيميائية أو جسيمية أو بيولوجية إلى الغلاف الجوي، بتركيزات تسبب ضرراً أو إزعاجاً للإنسان والكائنات الحية الأخرى، أو تلحق أذى بالبيئة الطبيعية والمواد (العبيدي، 2021).

يمكن تصنيف ملوثات الهواء إلى فئتين رئيسيتين:

الملوثات الأولية : (Primary Pollutants) وهي المواد التي تنبعث مباشرة من مصدرها إلى الغلاف الجوي، مثل ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) الناتج عن حرق الوقود الأحفوري، وأول أكسيد الكربون (CO) من عوادم السيارات.

الملوثات الثانوية : (Secondary Pollutants) وهي المواد التي لا تنبعث بشكل مباشر، بل تتكون في الغلاف الجوي نتيجة تفاعل الملوثات الأولية مع بعضها البعض أو مع مكونات الهواء الأخرى بوجود ضوء الشمس، ومن أشهر أمثلتها غاز الأوزون الأرضي (O_3) الذي يتكون من تفاعل أكاسيد النيتروجين مع المركبات العضوية المتطايرة (الخالدي، 2019).

وتتنوع مصادر التلوث الهوائي بين مصادر طبيعية (كالبراكين والعواصف الترابية) ومصادر بشرية (Anthropogenic Sources) وهذه الأخيرة هي الأكثر تأثيراً وخطورة، وتُعد الأنشطة الصناعية، ووسائل النقل، ومحطات توليد الطاقة، وعمليات استخراج وحرق الوقود الأحفوري من أبرز المصادر البشرية للتلوث الهوائي على مستوى العالم (العبيدي، 2021).

ثانياً: العلاقة بين الأنشطة الصناعية (النفط والغاز) وتدهور جودة الهواء:

تُشكل العلاقة بين التوسع الصناعي وتدهور جودة الهواء محوراً رئيسياً في دراسات الجغرافيا البيئية المعاصرة. فالصناعة، رغم كونها محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي، إلا أنها تمثل المصدر الأكبر للانبعاثات الملوثة التي تغير من التركيب الكيميائي للغلاف الجوي. وتعتبر صناعة النفط والغاز تحديداً من أكثر القطاعات الصناعية تأثيراً على جودة الهواء، نظراً لطبيعة عملياتها التي تمتد من الاستكشاف والحفر إلى المعالجة والنقل، حيث تنبعث خلال كل مرحلة مجموعة معقدة من الملوثات (الشمري، 2020). إن تركّز هذه الصناعات في مناطق جغرافية محددة، كما هو الحال في حوض سرت، يؤدي إلى خلق "بؤر تلوث" (Pollution Hotspots) ذات ضغط بيئي شديد على محيطها المباشر، مما يجعل دراسة انتشار هذه الملوثات جغرافياً أمراً ضرورياً لفهم حجم المشكلة الحقيقي (الخالدي، 2019).

ثالثاً: مفهوم العدالة البيئية وتطبيقاته في دراسات التلوث:

ظهر مفهوم العدالة البيئية (Environmental Justice) في الأدبيات الجغرافية والبيئية ليشير إلى التوزيع العادل للأعباء والمنافع البيئية بين جميع فئات المجتمع، بغض النظر عن عرقهم أو دخلهم أو انتمائهم. ويفترض هذا المفهوم أن أي مجتمع لا يجب أن يتحمل عبئاً غير متناسب من المخاطر البيئية، مثل القرب من المصانع الملوثة أو مكبات النفايات (العبيدي، 2021). تُعد دراسات نمذجة انتشار التلوث الهوائي أداة قوية في خدمة أبحاث العدالة البيئية، فهي لا تكتفي بتحديد وجود التلوث، بل تحدد مكانياً "من" يتأثر به أكثر من غيره. ومن خلال رسم خرائط التلوث وربطها بالتوزيع السكاني، يمكن الكشف عما إذا كانت مجتمعات معينة، غالباً ما تكون الأكثر فقراً أو تهميشاً، هي التي تتحمل العبء الأكبر من تلوث الهواء الناتج عن الأنشطة الصناعية التي يستفيد من ريعها نطاق أوسع (الشمري، 2020).

المطلب الثاني: صناعة النفط والغاز كأحد مصادر التلوث:

أولاً: مراحل إنتاج النفط والغاز والملوثات المنبعثة من كل مرحلة:

تعتبر صناعة النفط والغاز سلسلة عمليات متكاملة ومعقدة، كل حلقة فيها تحمل بصمتها البيئية الخاصة، وتحديداً فيما يتعلق بالانبعاثات الهوائية. يمكن تقسيم هذه السلسلة إلى ثلاث مراحل رئيسية، لكل منها ملوثاتها المميزة:

مرحلة الاستكشاف والحفر : (Upstream) تشمل هذه المرحلة المسح الجيولوجي وحفر الآبار الاستكشافية والإنتاجية. تنبعث خلالها ملوثات من محركات الديزل الضخمة التي تشغل منصات الحفر، والتي تطلق كميات كبيرة من أكاسيد النيتروجين(NOx) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والجسيمات الدقيقة (PM). كما أن عمليات تجهيز الموقع وإعداد الطرق المؤدية إليه تساهم في انبعاث الغبار والأتربة (الجبوري، 2022).

مرحلة الإنتاج والمعالجة : (Midstream) بعد اكتشاف النفط، تبدأ مرحلة الإنتاج التي يتم فيها فصل النفط الخام عن الماء والغاز المصاحب. هذه هي المرحلة الأكثر إطلاقاً للملوثات. فعمليات المعالجة تتطلب طاقة حرارية هائلة، مما يعني احتراق كميات كبيرة من الوقود، ينتج عنها انبعاثات NOx و SO_2. والأهم من ذلك، هو انبعاث المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) وهي مجموعة واسعة من المواد الهيدروكربونية (مثل البنزين والتولوين) التي تتبخر وتتسرب من الخزانات والصمامات ووصلات الأنابيب، وتُعرف هذه الانبعاثات بـ "الانبعاثات الهاربة) (Fugitive Emissions) "العامري والساعدي، 2021.

مرحلة النقل والتخزين :تشمل نقل النفط الخام والغاز عبر خطوط الأنابيب أو الناقلات. ورغم أن هذه المرحلة أقل إطلاقاً للملوثات مقارنة بالإنتاج، إلا أنها لا تزال مصدراً للانبعاثات الهاربة من محطات ضخ الأنابيب وصمامات التحكم، بالإضافة إلى انبعاثات محركات الناقلات (الجبوري، 2022).

ثانياً: ظاهرة حرق الغاز المصاحب (Gas Flaring) وأثرها البيئي:

تُعد ظاهرة حرق الغاز المصاحب من أكبر التحديات البيئية المرتبطة بصناعة النفط في العديد من دول العالم. والغاز المصاحب هو كميات الغاز الطبيعي التي تخرج مع النفط الخام من البئر. وفي غياب بنية تحتية لجمع هذا الغاز واستغلاله اقتصادياً، أو بسبب اعتبارات فنية وتشغيلية، تلجأ الشركات إلى حرقه في الموقع عبر مشاعل ضخمة تُعرف بـ "مشاعل الحرق (Flares) " (البياتي، 2020).

عملية الحرق هذه، وإن كانت تبدو كحل للتخلص من الغاز، إلا أنها في الواقع عملية احتراق غير كامل، ينتج عنها كوكتيل معقد من الملوثات الخطرة التي تُقذف مباشرة إلى الغلاف الجوي، وأبرزها :ثاني أكسيد الكربون ** (CO_2) بكميات هائلة مما يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري، والكربون الأسود **(Black Carbon)وهو أحد المكونات الرئيسية للجسيمات الدقيقة (PM2.5) وله تأثيرات صحية ومناخية خطيرة، بالإضافة إلى أكاسيد النيتروجين (NOx) وكميات من الميثان (CH_4) غير المحترق، وهو غاز دفيئة أقوى بكثير من ثاني أكسيد الكربون (العامري والساعدي، 2021).

ثالثاً: المعايير والتشريعات البيئية المتعلقة بالانبعاثات الهوائية:

إدراكاً لخطورة التلوث الهوائي، وضعت معظم دول العالم، بالإضافة إلى المنظمات الدولية كهيئة الصحة العالمية والبنك الدولي، مجموعة من المعايير والتشريعات لتنظيم جودة الهواء والحد من الانبعاثات الصناعية. تُعرف هذه بالـ "معايير جودة الهواء المحيط (Ambient Air Quality Standards)" وهي تحدد التراكيز القصوى المسموح بها للملوثات المختلفة في الهواء الذي يتنفسه الناس. كما توجد "معايير أداء المصدر (Source Performance Standards)" التي تفرض على المنشآت الصناعية حدوداً لكمية الملوثات المسموح بإطلاقها (الشربيني والوكيل، 2022). على الرغم من وجود تشريعات بيئية في ليبيا،

إلا أن التحدي الأكبر غالباً ما يكمن في مدى الالتزام بهذه التشريعات وقدرة المؤسسات الرقابية على فرضها ومراقبة تطبيقها بشكل فعال، خاصة في المناطق النائية التي تتركز فيها الأنشطة النفطية (الخزعلي، 2021).

المطلب الثالث: تقنيات النمذجة الجغرافية والاستشعار عن بعد:

أولاً: دور نظم المعلومات الجغرافية (GIS) في تحليل التوزع المكاني للملوثات:

تُعد نظم المعلومات الجغرافية (GIS) العمود الفقري للدراسات البيئية الحديثة التي تتعامل مع البيانات ذات الطبيعة المكانية. فهي ليست مجرد برامج لإنشاء الخرائط، بل هي أنظمة متكاملة قادرة على جمع وتخزين ومعالجة وتحليل وعرض كافة أشكال البيانات الجغرافية. في سياق دراسة تلوث الهواء، تلعب نظم المعلومات الجغرافية دوراً محورياً متعدد الأوجه؛ فهي المنصة التي يتم من خلالها بناء قاعدة البيانات المكانية للبحث، حيث يتم إدخال مواقع مصادر التلوث (الحقول والمشاعل) وتوزع التجمعات السكانية، وشبكة الطرق، واستخدامات الأراضي (زراعية، رعوية، صحراوية) كطبقات (Layers) منفصلة (النجار، 2021).

بعد تشغيل نماذج الانتشار الهوائي، يتم استيراد النتائج (وهي عبارة عن شبكة من النقاط التي تحمل قيم تركيز الملوثات) إلى بيئة نظم المعلومات الجغرافية. وهنا يبرز الدور التحليلي القوي لهذه التقنية، حيث تتيح أدوات التحليل المكاني (Spatial Analysis) إجراء عمليات استعلام متقدمة، مثل تحديد المناطق السكنية التي تتجاوز فيها تراكيز الملوثات الحدود المسموح بها، أو حساب مساحة الأراضي الزراعية المتأثرة، أو إنشاء خرائط "العزل (Iso-concentration maps) "التي تربط النقاط ذات التركيز المتساوي، مما يوفر تصوراً بصرياً واضحاً ومباشراً لنطاق ومدى بصمة التلوث (السيلاوي، 2020).

ثانياً: أساسيات نماذج الانتشار الجوي (Atmospheric Dispersion Models):

نماذج الانتشار الجوي هي عبارة عن محاكاة رياضية حاسوبية تصف ما يحدث للملوثات بعد إطلاقها في الغلاف الجوي. تعتمد هذه النماذج على مجموعة من المعادلات الفيزيائية التي تحاكي عمليات النقل (الحمل مع الرياح) والتشتت (الانتشار بفعل الاضطرابات الجوية) والترسيب (الجاف والرطب) للملوثات (الجبوري، 2022). ولكي تعمل هذه النماذج، فإنها تتطلب مجموعة من المدخلات الدقيقة:

بيانات المصدر: وتشمل الموقع الجغرافي الدقيق للمصدر، وارتفاعه (ارتفاع المدخنة أو الشعلة) ومعدل انبعاث الملوثات (جرام/ثانية) ودرجة حرارة وسرعة خروج الغازات.

بيانات الأرصاد الجوية: وهي العامل الأكثر حساسية وتأثيراً في دقة النموذج. وتشمل بيانات ساعة بساعة لسرعة الرياح، واتجاهها، ودرجة حرارة الهواء، ودرجة الاستقرار الجوي التي تصف مدى اضطراب الغلاف الجوي.

بيانات التضاريس :حيث يؤثر ارتفاع وانخفاض سطح الأرض على حركة الرياح وانتشار الملوثات.

يُعد نموذج AERMOD، الذي تم تطويره من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية، أحد أكثر النماذج تقدماً واستخداماً على مستوى العالم، لقدرته على التعامل مع التضاريس المعقدة ومصادر الانبعاث المتعددة، مما يجعله أداة مثالية لدراسة حالة حوض سرت (السيلاوي، 2020).

ثالثاً: أهمية بيانات الاستشعار عن بعد في الدراسات البيئية:

يوفر الاستشعار عن بعد (Remote Sensing) من خلال الأقمار الصناعية، منظوراً شاملاً وواسع النطاق للظواهر البيئية لا يمكن الحصول عليه من خلال الرصد الأرضي وحده. في مجال تلوث الهواء، ظهرت أجيال جديدة من الأقمار الصناعية مزودة بمتحسسات متطورة قادرة على قياس تركيز بعض

الغازات الملوثة في العمود الهوائي بأكمله، مثل القمر الصناعي الأوروبي Sentinel- 5P ومتحسسه TROPOMI النجار، 2021.

على الرغم من أن دقة هذه البيانات المكانية قد لا تكون كافية لتحديد التركيز عند مستوى سطح الأرض بدقة متناهية، إلا أنها تلعب دوراً حيوياً في:

تحديد النقاط الساخنة الإقليمية :حيث يمكن لصور الأقمار الصناعية أن تكشف عن المناطق التي تشهد تركيزات عالية بشكل مستمر من ملوثات مثل ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) مما يساعد في توجيه الدراسات الميدانية والنمذجة التفصيلية.

التحقق من صحة مخرجات النماذج : (Model Validation) يمكن مقارنة الأنماط العامة للتلوث التي تظهرها صور الأقمار الصناعية مع الأنماط التي تتنبأ بها نماذج الانتشار الجوي، مما يعطي ثقة أكبر في نتائج النموذج.

رصد الانبعاثات من المصادر الكبرى :أصبحت هذه التقنية قادرة على رصد أعمدة التلوث الناتجة عن مصادر فردية كبيرة كمحطات الطاقة أو مشاعل الحرق الضخمة (البياتي، 2020).

المبحث الثاني

الخصائص الجغرافية والبيئية لمنطقة الدراسة

بعد أن تم وضع الأسس النظرية والمفاهيمية للبحث، ينتقل هذا المبحث إلى الجانب الوصفي التحليلي لمنطقة الدراسة، حوض سرت. إن فهم الخصائص الجغرافية الطبيعية والبشرية للمنطقة ليس مجرد سرد للمعلومات، بل هو خطوة منهجية ضرورية، حيث تشكل هذه الخصائص المدخلات الأساسية التي يعتمد عليها نموذج الانتشار الهوائي، كما أنها تمثل السياق الذي سيتم تفسير النتائج النهائية ضمنه.

المطلب الأول: الخصائص الطبيعية لحوض سرت:

أولاً: الموقع الجغرافي والفلكي والجيولوجي للحوض:

يقع حوض سرت في الجزء الشمالي الأوسط من ليبيا، ممتداً من ساحل خليج سرت على البحر المتوسط شمالاً، ومتوغلاً لمئات الكيلومترات جنوباً في الصحراء الليبية. فلكياً، يمتد الحوض بين خطي عرض 28 و 31 درجة شمالاً تقريباً، مما يضعه ضمن النطاق شبه المداري الجاف. جغرافياً، يمثل الحوض منخفضاً أرضياً واسعاً تحده من الغرب تضاريس الهروج السوداء ومن الشرق مرتفعات الجبل الأخضر وسهل بنغازي (الجروشي، 2018).

جيولوجياً، يكتسب الحوض أهميته من كونه حوضاً رسوبياً عظيماً يعود تكوينه إلى العصر الطباشيري، وقد أدت الحركات التكتونية إلى تكوين مصائد نفطية تركيبية وطبقية فريدة من نوعها، جعلت منه الخزان الأكبر للنفط والغاز في ليبيا وحوض البحر المتوسط بأكمله. وتغطي سطحه تكوينات حديثة من الرمال والحصى والكثبان الرملية التي تشكل المظهر العام للمنطقة (عطية، 2021).

ثانياً: الخصائص المناخية السائدة ودورها في حركة الملوثات:

يُعد المناخ العامل الأكثر ديناميكية وتأثيراً في تحديد سلوك الملوثات الهوائية. يسود حوض سرت المناخ الصحراوي الحار (BWh) وفقاً لتصنيف كوبن المناخي، والذي يتميز بصيف طويل شديد الحرارة

وشتاء قصير ومعتدل البرودة، مع ندرة شديدة في الأمطار التي لا يتجاوز متوسطها السنوي 50 ملم في معظم أجزائه الداخلية (الزاوي، 2019).

إن العنصر المناخي الأهم بالنسبة لهذه الدراسة هو نظام الرياح .تتأثر المنطقة بنمطين رئيسيين للرياح:

الرياح الشمالية والشمالية الشرقية :وهي الرياح السائدة خلال فصل الصيف، وتهب من البحر المتوسط، وتكون عادةً معتدلة السرعة وأكثر رطوبة. ستعمل هذه الرياح على نقل أعمدة التلوث (Pollution Plumes)باتجاه الجنوب والجنوب الغربي، أي نحو المناطق الداخلية من الحوض.

الرياح الجنوبية والجنوبية الغربية (رياح القبلي) :وهي رياح صحراوية حارة وجافة تنشط خلال فصلي الربيع والخريف، وتكون غالباً قوية ومحملة بالأتربة والرمال. ستعمل هذه الرياح على دفع الملوثات الهوائية شمالاً باتجاه المناطق الساحلية وخليج سرت (الجروشي، 2018). إن فهم هذا التباين الفصلي في اتجاه الرياح هو مفتاح التنبؤ بالمناطق التي ستتأثر بالتلوث في أوقات مختلفة من السنة.

ثالثاً: الغطاء النباتي والحياة الفطرية والتأثيرات المحتملة للتلوث:

نظراً للظروف المناخية القاسية، يتسم الغطاء النباتي الطبيعي في حوض سرت بالفقر والهشاشة، ويقتصر على بعض النباتات الصحراوية والشجيرات الشوكية التي تكيفت مع الجفاف، مثل الأثل والرتم. لكن الأهمية البيئية تكمن في وجود الواحات، مثل أوجلة وجالو وإجخرة، التي تمثل جزراً خضراء في بحر الصحراء، وتعتمد على المياه الجوفية للري، وتشتهر بزراعة النخيل. هذه النظم الزراعية الهشة تُعد حساسة للغاية للتلوث الهوائي، حيث يمكن للملوثات الحمضية) مثل (SO_2) أن تترسب على أوراق النباتات وتؤثر على نموها، أو تلوث التربة والمياه السطحية (عطية، 2021). كما تعتبر المنطقة موطناً لبعض أنواع الحيوانات البرية الصحراوية (كالغزلان والثعالب) والطيور المهاجرة، والتي قد تتأثر هي الأخرى بتدهور جودة الهواء والنظام البيئي بشكل عام.

المطلب الثاني: الخصائص البشرية والاقتصادية:

أولاً: توزيع حقول النفط والغاز الرئيسية ومحطات المعالجة في الحوض:

إن الخريطة الاقتصادية لحوض سرت هي في جوهرها خريطة لتوزيع الثروة النفطية. فالحوض يضم العشرات من الحقول النفطية، تتفاوت في حجمها وقدرتها الإنتاجية. ومن أبرز وأكبر هذه الحقول التي تشكل مصادر الانبعاث الرئيسية في هذه الدراسة: حقل آمال، حقل زلطن (أول حقل تم اكتشافه في ليبيا) حقل النافورة، حقل جالو، حقل السماح، وحقل البيضاء. لا تتوزع هذه الحقول بشكل عشوائي، بل تتبع اتجاهات تركيبية جيولوجية محددة داخل الحوض (عطية، 2021).

إلى جانب آبار الإنتاج، تنتشر في المنطقة بنية تحتية صناعية متكاملة تشمل محطات فرز ومعالجة النفط والغاز (Gas Oil Separation Plants - GOSPs) والتي تقوم بفصل النفط عن الغاز والماء والشوائب. وتُعد هذه المحطات، بالإضافة إلى مشاعل حرق الغاز المصاحب الملحقة بها، نقاطاً مركزية للانبعاثات الملوثة. كما يقطع الحوض شبكة معقدة من خطوط أنابيب النفط والغاز التي تنقل الإنتاج إلى موانئ التصدير على ساحل خليج سرت، مثل ميناء السدرة ورأس لانوف والبريقة (الجروشي، 2018). إن تحديد المواقع الجغرافية الدقيقة لهذه المنشآت هو حجر الزاوية في بناء نموذج انتشار الملوثات.

ثانياً: التوزع الجغرافي للمراكز العمرانية والمجتمعات السكانية المجاورة للحقول:

على عكس التوزع المنتشر للحقول النفطية، يتركز السكان في حوض سرت في تجمعات عمرانية محددة، هي في معظمها واحات تاريخية قديمة قامت على توفر المياه الجوفية. هذه المراكز العمرانية تمثل

"المستقبلات (Receptors) "الرئيسية للملوثات الهوائية، وبالتالي فهي محور الاهتمام في تقييم الأثر الصحي والبيئي. وأهم هذه التجمعات السكانية التي تقع في محيط الحقول النفطية هي:

واحة أوجلة: وهي من أقدم الواحات الليبية وتقع في الجزء الشمالي الشرقي من الحوض.

واحة جالو: تقع إلى الجنوب من أوجلة وتعتبر مركزاً إدارياً مهماً في المنطقة.

واحة إجخرة: تقع في قلب منطقة غنية بالحقول النفطية.

واحة مرادة: تقع في الجزء الغربي من الحوض.

بالإضافة إلى هذه الواحات الرئيسية، توجد تجمعات سكنية أصغر نشأت كمخيمات سكنية للعاملين في قطاع النفط وأسرهم. إن قرب هذه التجمعات من مصادر الانبعاث يجعل سكانها في خط المواجهة المباشر مع المخاطر الصحية المحتملة للتلوث الهوائي (الزاوي، 2019).

ثالثاً: الأنشطة الاقتصادية السائدة للسكان ومدى تأثرها بالتلوث:

على الرغم من أن الاقتصاد الكلي للمنطقة يهيمن عليه قطاع النفط والغاز، إلا أن السكان المحليين في الواحات لا يزالون يعتمدون بشكل كبير على الأنشطة التقليدية التي ورثوها عبر الأجيال. ويأتي في مقدمة هذه الأنشطة الزراعة المعتمدة على الري من المياه الجوفية، وتحديداً زراعة نخيل التمر التي تشتهر به المنطقة، بالإضافة إلى بعض الزراعات المحدودة الأخرى كالشعير والخضروات للاستهلاك المحلي. كما يمارس بعض السكان نشاط الرعي وتربية الإبل والأغنام في المناطق المحيطة بالواحات (عطية، 2021).

هذه الأنشطة الاقتصادية التقليدية حساسة جداً للتغيرات البيئية. فالترسيب الجاف للملوثات الحمضية والجسيمات الدقيقة يمكن أن يلحق الضرر بأشجار النخيل ويقلل من إنتاجيتها، كما يمكن أن يلوث التربة ومصادر المياه السطحية القليلة، ويؤثر على المراعي الطبيعية التي تعتمد عليها الثروة الحيوانية. وبالتالي، فإن التلوث الهوائي لا يمثل تهديداً للصحة العامة فحسب، بل يمثل أيضاً تهديداً للأمن الغذائي وسبل العيش التقليدية لهذه المجتمعات (الزاوي، 2019).

المبحث الثالث

التحليل المكاني ونتائج نمذجة انتشار الملوثات

يمثل هذا المبحث الجزء التطبيقي من الدراسة، وفيه يتم تحويل البيانات والمعطيات التي تم جمعها إلى نتائج كمية وخرائط مكانية ملموسة. سيتم من خلال هذا المبحث بناء قاعدة البيانات الجغرافية اللازمة لتشغيل النموذج، ثم تطبيق نموذج الانتشار الجوي (AERMOD) لمحاكاة حركة الملوثات، وأخيراً تحليل النتائج لتقييم الأثر الفعلي على المجتمعات والنظم البيئية في منطقة الدراسة.

المطلب الأول: بناء قاعدة البيانات الجغرافية للنموذج:

تُعد عملية بناء قاعدة بيانات دقيقة ومتكاملة الخطوة الأولى والأساسية لضمان موثوقية نتائج النمذجة. وقد تم بناء هذه القاعدة داخل بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتضمنت الطبقات والبيانات التالية:

أولاً: تحديد مصادر الانبعاث وتقدير كمية الملوثات:

تم تحديد مصادر الانبعاث الرئيسية في حوض سرت، والتي تشمل حقول النفط الكبرى ومحطات المعالجة ومشاعل حرق الغاز. وباستخدام صور الأقمار الصناعية عالية الدقة والخرائط الصناعية، تم تحديد الإحداثيات الجغرافية الدقيقة لهذه المصادر. ونظراً لصعوبة الحصول على بيانات انبعاثات فعلية ومقاسة، تم اللجوء إلى تقدير معدلات الانبعاث (Emission Rates) بالاعتماد على "معاملات الانبعاث " (Emission Factors)التي توفرها وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) والبنك الدولي. وهي معاملات قياسية تربط كمية الإنتاج النفطي أو كمية الغاز المحروق بكمية الملوثات المنبعثة) مثل جرام من SO_2 لكل برميل نفط معالج .(وقد تم تقدير الانبعاثات للملوثات الرئيسية قيد الدراسة (SO_2, NOx, PM2.5) لكل مصدر على حدة.(EIB, 2020)

ثانياً: جمع وتحليل بيانات الأرصاد الجوية لمنطقة الدراسة:

تمثل بيانات الأرصاد الجوية "المحرك" الذي يدفع الملوثات في النموذج. لذا، تم الحصول على بيانات مناخية ساعة بساعة لعام كامل (2023) من إحدى محطات الرصد القريبة ومن قواعد البيانات العالمية المتاحة) مثل بيانات نموذج ERA5 من المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى .(شملت هذه البيانات المتغيرات الأساسية المطلوبة لتشغيل نموذجAERMOD ، وهي :سرعة الرياح، واتجاه الرياح، ودرجة حرارة الهواء، والغطاء السحابي، والارتفاع الشمسي .وقد تم تحليل هذه البيانات بشكل أولي لإنشاء "وردة الرياح (Wind Rose) "للمنطقة، والتي أظهرت بوضوح سيادة الرياح الشمالية في فصل الصيف والرياح الجنوبية في فترات الانتقال، وهو ما يتوافق مع ما تم ذكره في المبحث الثاني.(CAMS, 2023)

ثالثاً: إعداد الخرائط الأساسية للمنطقة:

تم إعداد مجموعة من الخرائط الرقمية الأساسية التي تشكل "مسرح" انتشار الملوثات. شمل ذلك:

نموذج الارتفاع الرقمي : (DEM) الذي يوضح طبوغرافية المنطقة وتضاريسها، وهو أمر ضروري للنموذج لحساب كيفية تأثير الارتفاعات والانخفاضات على مسار الرياح.

خريطة استخدامات الأراضي : (Land Use Map) تم من خلالها تحديد وتصنيف الأراضي إلى مناطق سكنية، ومناطق زراعية (الواحات) ومناطق صناعية (الحقول) ومناطق صحراوية. هذه الخريطة ضرورية لتقييم الأثر على مختلف القطاعات.

خريطة توزيع السكان (المستقبلات) : تم تحديد مواقع المراكز العمرانية الرئيسية (أوجلة، جالو، إجخرة، مرادة) كنقاط "مستقبلة (Receptors) "سيقوم النموذج بحساب تراكيز الملوثات عندها بشكل دقيق (السيلاوي، 2020).

المطلب الثاني: تطبيق نموذج الانتشار الجوي وتحليل النتائج:

بعد إدخال كافة البيانات التي تم تجهيزها في المطلب السابق إلى نموذجAERMOD ، تم تشغيل المحاكاة الحاسوبية لعام كامل (8760 ساعة) بهدف حساب متوسط التراكيز السنوية للملوثات الرئيسية (SO_2, NOx, PM2.5)في جميع أنحاء منطقة الدراسة. وقد تم استخلاص النتائج وتصديرها إلى بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لإنتاج الخرائط التحليلية وتفسيرها.

أولاً: عرض خرائط "أعمدة التلوث (Pollution Plumes)" وتحديد اتجاهاتها السائدة:

أظهرت نتائج النموذج بوضوح تشكّل "أعمدة تلوث (Plumes) "تمتد من المجمعات الصناعية وحقول النفط الكبرى. وعند حساب المتوسط السنوي، كشفت الخرائط عن نمط انتشار مكاني يتأثر بشكل مباشر بنظام الرياح السائد في المنطقة. وكما كان متوقعاً، أظهرت الخريطة) خريطة رقم 1: المتوسط

السنوي لانتشار (SO_2) اتجاهاً سائداً للانتشار نحو الجنوب والجنوب الغربي، وهو ما يعكس تأثير الرياح الشمالية المهيمنة على مدار العام. هذا يعني أن المناطق الواقعة جنوب وجنوب غرب المجمعات الصناعية الكبرى هي الأكثر تعرضاً للتلوث بشكل مستمر. كما أظهرت الخرائط وجود أعمدة تلوث ثانوية تتجه شمالاً، وهي ناتجة عن تأثير رياح "القبلي" الجنوبية خلال فترات زمنية أقصر في فصلي الربيع والخريف (CAMS, 2023).

ثانياً: تحديد "المناطق الساخنة (Hotspots) "ذات التركيزات الأعلى من الملوثات:

من خلال تحليل خرائط التراكيز، تم تحديد عدد من "المناطق الساخنة (Hotspots) " التي تسجل أعلى متوسط سنوي لتركيز الملوثات. تركزت هذه المناطق بشكل أساسي في المناطق الملاصقة مباشرة للحقول ذات الإنتاج الكثيف ومشاعل الحرق الضخمة، مثل محيط حقل آمال وحقل النافورة .في هذه المناطق، تجاوزت متوسطات التراكيز السنوية لغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) بشكل كبير الحدود الإرشادية لمنظمة الصحة العالمية .(WHO) تُظهر الخريطة) خريطة رقم 2: المناطق الساخنة لتركيز (PM2.5) أن هذه البؤر لا تقتصر على حدود المنشأة الصناعية، بل تمتد لعدة كيلومترات خارجها، مشكلة هالة من الهواء المتدهور بيئياً. (EIB, 2020)

ثالثاً: تحليل التغيرات في تركيز الملوثات بين الفصول (صيفاً وشتاءً):

للحصول على فهم أعمق لديناميكية التلوث، تم تحليل النتائج بشكل فصلي. أظهر التحليل تبايناً واضحاً في بصمة التلوث بين الصيف والشتاء:

في فصل الصيف : مع سيادة الرياح الشمالية القادمة من البحر المتوسط، اندفعت أعمدة التلوث بشكل مكثف نحو الجنوب، مما زاد من الضغط البيئي على المناطق الصحراوية الداخلية والواحات الجنوبية.

في فصلي الربيع والخريف (فترة نشاط رياح القبلي): تحركت أعمدة التلوث بشكل عكسي نحو الشمال والشمال الشرقي. وعلى الرغم من أن هذه الفترة أقصر، إلا أن سرعة الرياح العالية قد تنقل الملوثات لمسافات أبعد، لتصل إلى المناطق القريبة من الساحل.

هذا التحليل الفصلي مهم للغاية، لأنه يوضح أنه لا توجد منطقة في محيط الحقول في مأمن تام على مدار العام؛ فالخطر البيئي متغير ومتحرك جغرافياً تبعاً لتغير الفصول (النجار، 2021).

المطلب الثالث: تقييم الأثر على المجتمعات المجاورة:

إن الهدف النهائي من نمذجة انتشار الملوثات ليس فقط فهم سلوكها في الغلاف الجوي، بل تقييم تأثيرها المباشر على صحة الإنسان والنظم البيئية التي يعتمد عليها. في هذا المطلب، يتم استخدام نتائج النموذج كأداة لتقييم المخاطر المحتملة على المراكز العمرانية والأراضي الزراعية في منطقة الدراسة.

أولاً: تحديد المناطق السكنية والأراضي الزراعية الواقعة ضمن نطاق تأثير الملوثات:

باستخدام أدوات التحليل المكاني في نظم المعلومات الجغرافية، تم إجراء عملية "تراكب" (Overlay) بين طبقة خرائط تركيز الملوثات (الناتجة عن النموذج) وطبقة استخدامات الأراضي التي تضم مواقع الواحات والمناطق السكنية. أظهر التحليل المكاني أن أجزاء من واحة إجخرة وواحة مرادة، بحكم قربهما الجغرافي من بعض الحقول الكبرى، تقع ضمن نطاق التأثير المباشر لأعمدة التلوث، خاصة خلال الفترات التي تسود فيها الرياح الشمالية. كما تبين أن بعض المناطق الرعوية المحيطة بهذه الواحات تتعرض بشكل شبه دائم لتراكيز ملحوظة من الملوثات. أما الواحات الأبعد نسبياً مثل جالو وأوجلة، فقد أظهر النموذج وصول تراكيز أقل إليها، ولكنها لا تزال أعلى من مستويات الخلفية الطبيعية للمنطقة (السيلاوي، 2020).

ثانياً: مقارنة مستويات التركيز المتوقعة من النموذج مع معايير جودة الهواء المسموح بها:

تُعد هذه المقارنة المؤشر الكمي الأكثر أهمية لتقييم حجم الخطر. تم استخلاص قيم متوسط التركيز السنوي للملوثات (SO_2, NOx, PM2.5) عند نقاط المستقبلات التي تمثل المراكز السكانية، ومقارنتها بالقيم الإرشادية الصارمة التي وضعتها منظمة الصحة العالمية (WHO) في تحديثها لعام 2021. أظهرت النتائج أن متوسط التركيز السنوي المتوقع لغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والجسيمات الدقيقة (PM2.5) في المناطق السكنية الأقرب للحقول (مثل إجخرة) يتجاوز الحدود الإرشادية لمنظمة الصحة العالمية. هذا التجاوز يشير إلى وجود خطر صحي حقيقي ومستمر على السكان المقيمين في تلك المناطق، حيث يرتبط التعرض طويل الأمد لهذه الملوثات بزيادة معدلات الإصابة بأمراض الجهاز التنفسي وأمراض القلب والأوعية الدموية (WHO, 2021; الشمري، 2019).

ثالثاً: تحليل المخاطر الصحية المحتملة على السكان والمخاطر البيئية:

بناءً على النتائج السابقة، يمكن استنتاج وجود مخاطر متعددة الأبعاد:

المخاطر الصحية :يتمثل الخطر الرئيسي في التعرض المزمن (طويل الأمد) للملوثات الهوائية، مما قد يؤدي إلى زيادة انتشار أمراض الربو، والتهاب الشعب الهوائية المزمن، ومشاكل في وظائف الرئة، خاصة بين الفئات الحساسة كالأطفال وكبار السن.

المخاطر البيئية :يمثل الترسيب الجاف للملوثات الحمضية مثل (SO_2 و (NOx) تهديداً للنظم البيئية الهشة في الواحات. يمكن لهذا الترسيب أن يزيد من حموضة التربة الفقيرة أصلاً، مما يؤثر سلباً على إنتاجية أشجار النخيل والمحاصيل الزراعية الأخرى. كما يمكن أن يلوث مصادر المياه السطحية المحدودة، ويؤثر على جودة المراعي الطبيعية التي تعتمد عليها الثروة الحيوانية، مما يهدد سبل العيش التقليدية للسكان (البياتي، 2020).

- الخاتمة والتوصيات:

تُختتم هذه الدراسة بعد رحلة بحثية جمعت بين التأصيل النظري والتحليل المكاني التطبيقي، بهدف فك شفرة الأبعاد الجغرافية للتلوث الهوائي الناتج عن صناعة النفط والغاز في حوض سرت بليبيا. لقد سعت الدراسة إلى تجاوز الوصف العام للمشكلة، وتقديم رؤية كمية مدعومة بالنمذجة الحاسوبية لتقييم حجم التأثير ومداه، لتكون بذلك لبنة علمية يمكن البناء عليها في جهود التخطيط البيئي المستدام وحماية المجتمعات المتأثرة.

- النتائج:

بناءً على التحليل الذي تم في الفصول السابقة، توصلت الدراسة إلى مجموعة من النتائج الرئيسية، يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

تأكيد وجود بصمة تلوث واضحة :أثبتت نتائج النمذجة بشكل قاطع وجود "بصمة تلوث" مكانية واضحة للملوثات الهوائية (SO_2, NOx, PM2.5) تنطلق من حقول النفط ومحطات المعالجة في حوض سرت، وتنتشر على مساحات جغرافية واسعة.

تحديد اتجاهات الانتشار السائدة :كشفت الخرائط الناتجة عن النموذج أن الاتجاه السائد لانتشار الملوثات على مدار العام هو نحو الجنوب والجنوب الغربي، وذلك بفعل هيمنة الرياح الشمالية، مما يضع المناطق الداخلية من الحوض تحت ضغط بيئي مستمر.

تحديد المناطق الساخنة والمجتمعات المتأثرة :تم تحديد "مناطق ساخنة (Hotspots) "ذات تراكيز عالية من الملوثات في المحيط المباشر للحقول الكبرى. والأهم من ذلك، أظهر التحليل أن أجزاء من التجمعات السكانية والزراعية، وتحديداً واحتي إجخرة ومرادة، تقع ضمن نطاق التأثير المباشر لهذه الملوثات.

تجاوز المعايير الصحية العالمية :أظهرت المقارنة الكمية أن متوسط التراكيز السنوية المتوقعة لملوثي SO_2 و PM2.5 في بعض المناطق المأهولة يتجاوز الحدود الإرشادية لمنظمة الصحة العالمية (WHO)، مما يشير إلى وجود خطر صحي قائم على السكان، ويهدد بزيادة معدلات الإصابة بالأمراض المرتبطة بتلوث الهواء.

وجود تهديد مزدوج (صحي وبيئي) :لم يقتصر التهديد على صحة الإنسان، بل امتد ليشمل النظم البيئية الهشة في الواحات، حيث يمثل الترسيب الجاف للملوثات خطراً على التربة والمياه والغطاء النباتي، وبالتالي على الأنشطة الاقتصادية التقليدية كازراعة والرعي.

- التوصيات:

انطلاقاً من النتائج التي تم التوصل إليها، تقترح الدراسة مجموعة من التوصيات الموجهة إلى الجهات المعنية:

أولاً: توصيات موجهة لشركات النفط والغاز:

الاستثمار في تقنيات خفض الانبعاثات :ضرورة العمل على تقليل حرق الغاز المصاحب قدر الإمكان، والاستثمار في مشاريع لجمعه واستغلاله، وتبني تقنيات حديثة لخفض انبعاثات الكبريت من محطات المعالجة.

إنشاء شبكة رصد بيئي ميدانية :تركيب محطات رصد مستمرة لجودة الهواء في محيط الحقول وفي المراكز السكانية المجاورة (خاصة إجخرة ومرادة) للتحقق من صحة نتائج النماذج وتوفير بيانات آنية للسلطات والمجتمع.

ثانياً: توصيات موجهة لصناع القرار والجهات البيئية:

تفعيل التشريعات البيئية :تشديد الرقابة على الأنشطة الصناعية وإلزامها بالمعايير البيئية الوطنية والدولية، مع إجراء تقييم دوري للأثر البيئي للمنشآت القائمة.

دمج البعد البيئي في التخطيط العمراني :عند التخطيط لأي توسع عمراني أو مشاريع تنموية جديدة في المنطقة، يجب الأخذ في الاعتبار خرائط انتشار التلوث لتجنب إقامة تجمعات سكنية أو مشاريع حساسة (كمدارس أو مستشفيات) في مناطق الخطر.

إجراء مسوحات صحية :القيام بدراسات وبائية ميدانية في الواحات المتأثرة لتقييم الوضع الصحي للسكان وربطه بمستويات تلوث الهواء.

ثالثاً: توصيات للبحث العلمي:

توسيع نطاق الدراسة :إجراء دراسات نمذجة مستقبلية تشمل ملوثات أخرى (مثل المركبات العضوية المتطايرة والمعادن الثقيلة).

دراسة الأثر على المياه والتربة :الانتقال من دراسة التلوث الهوائي إلى دراسة أثر ترسيب هذه الملوثات على كيمياء التربة والمياه الجوفية في الواحات.

التحقق الميداني :إجراء قياسات ميدانية فعلية للملوثات للتحقق من دقة مخرجات النموذج وتطوير معاملات انبعاث محلية خاصة بالبيئة الليبية.

ـ قائمة المصادر والمراجع:

أولاً: المراجع العربية

1. البياتي، علاء الدين حسين .(2020). الجغرافيا الصناعية والتلوث البيئي .عمان، الأردن: دار اليازوري العلمية للنشر والتوزيع.
2. الجبوري، صالح عبود .(2022). تلوث الهواء: مصادره، آثاره، وطرق التحكم فيه .بغداد، العراق: دار الكتب والوثائق الوطنية.
3. الجروشي، محمد مفتاح .(2018). جغرافية ليبيا الطبيعية .بنغازي، ليبيا: منشورات جامعة بنغازي.
4. الخالدي، فوزي .(2019). البيئة والتلوث: دراسة في المشكلات البيئية المعاصرة .الإسكندرية، مصر: دار التعليم الجامعي.
5. الخزعلي، عباس إبراهيم .(2021). العدالة البيئية والتخطيط الحضري .بيروت، لبنان: دار المناهج للنشر والتوزيع.
6. الزاوي، نوري .(2019). سكان ليبيا: دراسة في الجغرافيا البشرية .طرابلس، ليبيا: منشورات جامعة طرابلس.
7. السيلاوي، مهند .(2020). نظم المعلومات الجغرافية: تطبيقات بيئية متقدمة .الرياض، المملكة العربية السعودية: مكتبة الرشد.
8. الشربيني، السيد، والوكيل، أحمد .(2022). مقدمة في التشريعات البيئية وإدارة الجودة .القاهرة، مصر: مكتبة الأنجلو المصرية.
9. الشمري، أحمد علي .(2019). تلوث البيئة في المناطق النفطية: دراسة جغرافية .الكويت: منشورات جامعة الكويت.
10. الشمري، كامل كاظم .(2020). الجغرافيا البيئية المعاصرة .الكوت، العراق: دار ومكتبة الكتاب العربي.
11. العامري، سعدون، والساعدي، لمياء .(2021). صناعة النفط والغاز وأثرها البيئي .البصرة، العراق: منشورات جامعة البصرة.
12. العبيدي، زياد .(2021). مبادئ علم البيئة والتلوث .دمشق، سوريا: منشورات جامعة دمشق.
13. النجار، سامح .(2021). الاستشعار عن بعد وتحليل الصور الفضائية في الدراسات الجغرافية . القاهرة، مصر: دار الفكر العربي.
14. عطية، عبد القادر .(2021). جيولوجيا ليبيا: دراسة في الموارد الطبيعية والتكوينات .طرابلس، ليبيا: الهيئة العامة للكتب.

ثانياً: المراجع الأجنبية

1. Abdel-Salam, M., & Al-Hasy, A. (2021). Environmental Impacts of Oil and Gas Exploration in Libya. *Journal of African Earth Sciences, 178*, 104178.
2. Abo-El-Ata, A., et al. (2020). Air Quality Assessment in a Major Industrial Area in Alexandria, Egypt. *Atmospheric Pollution Research, 11*(10), 1723-1733.
3. Akinlade, O., et al. (2023). Modelling the Dispersion of Particulate Matter from Gas Flaring in the Niger Delta, Nigeria. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 1-15.
4. Al-Masri, M., & Al-Shamali, F. (2022). Environmental Risk Assessment of Air Pollution in an Industrial Area in Saudi Arabia. *Journal of Environmental Management, 302*, 114051.

5. CAMS. (2023). *Copernicus Atmosphere Monitoring Service: Global Fire Assimilation System (GFAS) Data*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).
6. EIB. (2020). *Environmental and Social Data Sheet: Gas Flaring Reduction Project*. European Investment Bank.
7. El-Barasi, M., & Abdel-Salam, M. (2019). Assessment of Soil and Groundwater Contamination by Hydrocarbons in the Vicinity of an Oilfield in Libya. *Geosciences Journal, 23*(4), 623-634.
8. EPA. (2019). *AERMOD Modeling System User's Guide*. U.S. Environmental Protection Agency.
9. Farina, S., et al. (2021). Air Quality Impacts of Flaring in the Permian Basin. *Environmental Science & Technology, 55*(14), 9636-9646.
10. Kuklinska, K., et al. (2015). The impact of oil and gas industry on the environment. *Environmental Science and Pollution Research, 22*(14), 10495-10507.
11. WHO. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization.