دليل نمذجة وتنبؤ
جودة الهواء
لدول مجلس التعاون
لدول الخليج العربية

شباط
2022

UN environment programme 50 1972-2022

© 2021، مجلس التعاون لدول الخليج العربية، الأمين العام

يجوز إعادة نشر هذه الوثيقة كليًا أو جزئيًا وبأي شكل للأغراض التعليمية أو غير الربحية دون الحصول على إذن خاص من مالك حقوق الطبع والنشر، بشرط الإشارةإلى المصدر. إن الأمانة العامة لمجلس التعاون لدول الخليج العربية ممتنة استلام نسخة من أي مطبوعة تستخدم هذه الوثيقة كمصدر معلومات تم الاستعانة به.

ولا يجوز استخدام هذه الوثيقة لإعادة بيعها أو لأي غرض تجاري آخر على الإطلاق دون الحصول على إذن خطي مسبق من الأمانة العامة لمجلس التعاون لدول الخليج العربية.

الأمين العام
دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية – مكتب الأمين العام
الرياض
المملكة العربية السعودية
www.gcc-sg.org

إخلاء مسؤولية

لا تنطوي التسميات المستخدمة في هذه الوثيقة، ولا طريقة عرض المادة التي يتضمنها، على الإعراب عن أي رأي كان من جانب مجلس التعاون لدول الخليج العربية أو برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) بشأن المركز القانوني لأي بلد من البلدان، أو أي إقليم أو أية مدينة أو أية منطقة، أو أية سلطة من سلطات أي منها، أو بشأن تعيين حدودها أو تخومها.

لا يشير ذكر شركة تجارية أو منتج في هذه الوثيقة إلى مصادقة مجلس التعاون لدول الخليج العربية أو برنامج الأمم المتحدة للبيئة أو المؤلفين.

لا يُسمح باستخدام المعلومات الواردة في هذه الوثيقة للدعاية أو الإعلان. تُستخدم أسماء العلامات التجارية ورموزها بطريقة تحريرية مع عدم وجود نية لانتهاك قوانين العلامات التجارية أو حقوق النشر.

نأسف لأية أخطاء أو سهو قد حدث عن غير قصد.

تمهيد

يؤثر تلوث الهواء على الصحة والرفاهية العامة للجمهور بالإضافة إلى البيئة، ويعتبر أكبر خطر على الصحة البيئية في العالم، وكما هو الحال في أجزاء أخرى من العالم، تواجه دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية أيضًا تحدياً في جودة الهواء غير الصحي، بالإضافة إلى تحديات خاصة فيما يتعلق بتلوث الهواء حيث إن موقعها الجغرافي يجعلها عرضة لمصادر تلوث الهواء الطبيعي مثل الرمال والغبار وملح البحر.

إدراكًا لهذا التحدي، شرع مجلس التعاون لدول الخليج العربية وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة في مشروع طموح في إطار «المبادرة الخليجية الخضراء: تحقيق الأبعاد البيئية لأهداف التنمية المستدامة». وكان أحد أهداف المشروع تطوير دليل إقليمي لجمع بيانات جودة الهواء، وذلك للإسهام في دعم جمع بيانات جودة الهواء، وقد تم تطوير مجموعة من ثلاثة أدلة إرشادية كجزء من مشروع المبادرة الخليجية الخضراء وهي: **(1)** دليل جرد انبعاثات ملوثات الهواء لدول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، **(2)** دليل نمذجة وتنبؤ جودة الهواء لدول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، و**(3)** دليل مراقبة جودة الهواء وإدارة البيانات لدول مجلس التعاون لدول الخليج العربية.

يهدف هذا الدليل «دليل نمذجة وتنبؤ جودة الهواء لدول مجلس التعاون لدول الخليج العربية» إلى تقديم نماذج جودة الهواء المستخدمة على نطاق واسع والتي تستخدم أساليب نمذجة مختلفة لعمليات الغلاف الجوي وجودة الهواء، على مقاييس الطول التي تتراوح من المقياس المجهري (أقل من 1 كم) إلى المقياس العالمي (> 1000 كم). وتحقيقا لهذه الغاية، يتم التمييز بين النماذج التشغيلية والتجريبية، بين التشتت[1]، والكيمياء الضوئية[2]، ونماذج المستقبلات[3]، وبين نماذج التنبؤ[4] والتقييم[5]، وبين النماذج المعتمدة والنماذج التي أوصت بها الوكالات التنظيمية مثل وكالة حماية البيئة الأمريكية[6].

ويُسلط هذا الدليل الضوء أيضًا على التوصيات التي قدمتها الهيئات التنظيمية فيما يتعلق بنماذج جودة الهواء، وكيفية تقييمها، وإدخال البيانات، بالإضافة إلى متطلبات المهام الأخرى. ومن الضروري الإشارة مقدمًا إلى أنه لا يوجد نموذج واحد مثالي للاستخدام في مجموعة واسعة من المواقف. ويرجع ذلك جزئيًا إلى تعقيد ظواهر الأرصاد الجوية التي تفترض أساليب نمذجة مختلفة، واعتمادًا على العديد من الظروف.

إن هذا يعني أن اختيار نموذج جودة الهواء يعتمد على المشكلة. ومن الناحية المثالية، فإن نموذج جودة الهواء الأمثل لحالة معينة هو النموذج الذي يمثل بشكل دقيق أكثر عمليات النقل في الغلاف الجوي، وتشتت الملوثات، والتفاعلات الكيميائية في مجال الموضوع.

ويتم أيضًا في هذا الدليل تقديم ميزات وخصائص نماذج التشتت المستخدمة على نطاق واسع، والنماذج الكيميائية الضوئية، والنماذج التشغيلية للتنبؤ الكيميائي، ونماذج التشغيل المتكاملة (التي تشمل نمذجة الغبار). كما يتم عرض نماذج جودة الهواء المستخدمة لدراسة التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية. إنما لم يتم في هذا الدليل تناول النماذج الإحصائية لجودة الهواء.

وتجدر الإشارة إلى أن الإرشادات الواردة في هذا الدليل ليست ملزمة قانونًا ولكنها تهدف إلى مساعدة دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية من فهم مصادر تلوث الهواء واتخاذ قرارات مستنيرة للتحكم في تلوث الهواء والوقاية منه.

1- تستخدم لتقدير تركيز ملوثات الهواء في مواقع محددة بالقرب من مصادر الانبعاثات.
2- تستخدم لدراسة تأثير مصادر انبعاث الملوثات الخاملة والمتفاعلة كيميائيًا على نطاق مكاني واسع.
3- تستخدم لتحديد مساهمة المصدر في تركيزات المستقبلات.
4- تستخدم للتنبؤ بجودة الهواء في المستقبل، بدءا من مجموعة من الشروط الأولية.
5- تستخدم لتقييم جودة الهواء في المتوسط الزمني في المواقع التي تكون فيها الملاحظات غير كافية أو غير موجودة.
6- تستخدم في تحليل المطابقة والقرارات التنظيمية المتعلقة بتراخيص المصدر ومتطلبات التحكم في الانبعاثات (تطبيقات مراجعة المصدر الجديد ومنع التدهور الكبير) (US EPA, 2017).

شكر وتقدير

تم دعم تطوير هذا الدليل من خلال المشروع بعنوان «المبادرة الخليجية الخضراء: تحقيق البعد البيئي لأهداف التنمية المستدامة». وقد تم تنفيذ المبادرة الخليجية الخضراء من قبل مكتب غرب آسيا التابع لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة بالشراكة مع الأمانة العامة لمجلس التعاون لدول الخليج العربية ونقاط الاتصال الوطنية في كل من دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية.

الفرق الرئيسية:

المؤلفون المساهمون

عصام لقيس الجامعة الأمريكية في بيروت؛ سامر سلوم، الجامعة الأمريكية في بيروت؛ نجاة عون صليبا الجامعة الأمريكية في بيروت؛ إنغاراراسان ميلفانام، المكتب الإقليمي لغرب آسيا التابع لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة

المراجعون والمساهمون

لمى عباس المحروس، البحرين؛ مريم محمد الأنصاري، البحرين؛ نوف بهبهاني، الكويت؛ شريف سليمان الخياط، الكويت؛ عهود حمد الحميدي، الكويت؛ مريم البوسعيدي، عمان؛ سعود العريمي، عُمان؛ سعد عبد الله الحاتمي، قطر؛ عبد الله العوضي، قطر؛ فيصل أحمد غشاح، المملكة العربية السعودية؛ علي بن عمير بن مشاري، السعودية؛ فاطمة الحمادي، الإمارات العربية المتحدة؛ ميرا علي محمد الطاهري، الإمارات العربية المتحدة

شكر وتقدير خاص

المراجعون الأقران

عبد السلام، جامعة دكا. بيرت فابيان، برنامج الأمم المتحدة للبيئة؛ سوبات وانغونغواتانا، المعهد الآسيوي للتكنولوجيا؛ تسويوشي أوهيزومي، المركز الآسيوي لبحوث تلوث الهواء؛ كييتشي ساتو، المركز الآسيوي لبحوث تلوث الهواء؛ يوسوكي كيرياما، المركز الآسيوي لأبحاث تلوث الهواء؛ كين ياماشيتا، المركز الآسيوي لأبحاث تلوث الهواء

شكر خاص للزملاء في برنامج الأمم المتحدة للبيئة، ولا سيما:

سامي ديماسي، عبد المجيد حداد، إنغاراراسان ميلفانام، سابين صقر، كارلا أيوب، أمية أتياني.

شكر خاص للأمانة العامة لمجلس التعاون، ولا سيما:

عادل الزياني، أحمد القرينيس، وليد الحمود، ماجد العقيل.

تحرير اللغة

ستيفن جراهام (Zoï Environment Network)

التصميم والإخراج

سابرينا أورسيني (Zoï Environment Network)

جدول المحتويات

1 مقدمة لتقييم تلوث الهواء في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية 07
1.1. تأثير تلوث الهواء على المناخ 07
1.2. أسباب تلوث الهواء 08
1.3. حالة تلوث الهواء وتحدياته في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية 08
1.4. النظرة المستقبلية 09
1.5. التخفيف والوقاية: إدارة جودة الهواء 09
1.6. نمذجة جودة الهواء 09

2 مقدمة لنماذج جودة الهواء 11
2.1. رصد جودة الهواء مقابل نمذجة جودة الهواء 12
2.2. نماذج جودة الهواء الحتمية 12
2.2.1. تقييم جودة الهواء مقابل توقع جودة الهواء 12
2.3. ما فائدة نماذج جودة الهواء الحتمية ؟ 13
2.4. ملاءمة نماذج جودة الهواء الحتمية لتقييم تأثيرات المصدر 14
2.5. مرحلة التحضير لاختيار النموذج 14

3 فئات نماذج جودة الهواء الحتمية 15
3.1. التصنيف على أساس أنواع المكونات الكيميائية 15
3.2. التصنيف على أساس أنواع مصادر الانبعاث 15
3.3. التصنيف على أساس نهج النمذجة 16
3.3.1. نموذج الصندوق 16
3.3.2. نموذج عمود غوسي 17
3.3.3. نموذج أوبلريان 18
3.3.4. نموذج لاغرانجي 18
3.4. التصنيف على أساس النطاق الزمني والمكاني 20
3.4.1. مقاييس عمليات الغلاف الجوي 20
3.4.1.1. عمليات مقياس كبير (> 1000 كم) 20
3.4.1.2. مقياس متوسط (1 كم – 1000 كم) 20
3.4.1.3. مقياس متناهي الصغر (< 1 كم) 21
3.4.2. مقاييس عمليات جودة الهواء 21
3.4.2.1. نماذج تلوث الهواء على النطاق العالمي (>10000 كم) 22
3.4.2.2. نماذج تلوث الهواء على النطاق الإقليمي إلى القاري 22
3.4.2.3. نماذج تلوث الهواء على النطاق المحلي إلى الإقليمي 23
3.4.2.4. نماذج تلوث الهواء على النطاق المحلي 24

4 نماذج جودة الهواء الحتمية 26
4.1. نماذج التشتت 26
4.1.1. ما هي نماذج التشتت؟ 26
4.1.2. لماذا تستخدم نماذج التشتت ؟ 26
4.1.3. أنواع نماذج التشتت 27
4.1.4. متطلبات بيانات الإدخال 27
4.1.5. كيف يتم استخدامها ؟ 27
4.1.6. كيفية اختيار نموذج التشتت؟ 28

4.2 النماذج الكيميائية الضوئية 33
4.2.1. ما هي النماذج الكيميائية الضوئية؟ 33
4.2.2. لماذا تستخدم النماذج الكيميائية الضوئية؟ 33
4.2.3. أنواع النماذج الكيميائية الضوئية 33
4.2.4. مكونات النموذج الكيميائي الضوئي وعملياته 34
4.2.4.1. الانتشار الأفقي والعمودي 34
4.2.4.2. الانتشار المضطرب الأفقي والعمودي 35
4.2.4.3. ديناميكيات السحاب 36
4.2.4.4. الكيمياء الحيوية 36
4.2.4.5. عمليات الهباء الجوي والفيزياء الدقيقة 38
4.2.4.6. الترسب 38
4.2.4.6.1. الترسب الجاف 38
4.2.4.6.2. الترسب الرطب ومعالجة المطر والضباب والسحب 38
4.2.4.7. نمذجة العمود 39
4.2.5. متطلبات بيانات الإدخال 39
4.2.5.1. مدخلات الأرصاد الجوية 40
4.2.5.2. مدخلات الانبعاثات 40
4.2.5.3. الشروط الأولية والحدودية الجانبية 41
4.2.5.4. الطبوغرافيا 41
4.2.5.5. بنية الشبكة 41
4.2.6. تقييم أداء النماذج الكيميائية الضوئية 42
4.2.7. كيفية اختيار نموذج كيميائي ضوئي 42
4.3. نماذج المستقبلات 47

5 التنبؤ الكيميائي بالطقس 48

6 نماذج الغبار ومنتجات الاستيعاب 50
6.1. جزيئات الهباء الجوي 50
6.1.1. التأثير على المناخ 50
6.1.2. التأثير على البيئة والحياة البشرية 50
6.1.3. أنواع الهباء الجوي وتكوينه 50
6.1.4. توزيع حجم جسيمات الهباء الجوي 52
6.2. تقييم الغبار في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية 53
6.2.1. تأثير الغبار على المناخ والبيئة والبشر 53
6.2.2. تلوث الهباء الجوي في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية 53
6.3. نماذج الغبار المتكاملة 55
6.3.1. رصد الغبار 56
6.3.2. نماذج الانبعاثات 56
6.3.3. استيعاب البيانات 56
6.3.4. النماذج التشغيلية المتكاملة 57

7 نماذج جودة الهواء لدول مجلس التعاون لدول الخليج العربية 59

المراجع 64

01

1. مقدمة لتقييم تلوث الهواء والتنبؤ به في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

تلوث الهواء هو عبارة عن وجود مواد في الغلاف الجوي ضارة للإنسان والكائنات الحية الأخرى والأنشطة البشرية والبيئة.

تشمل الملوثات الرئيسية الجسيمات (PM) وأول أكسيد الكربون (CO) والهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs) والمركبات العضوية المتطايرة (VOC_s) وأكاسيد النيتروجين (NO_x) والأوزون (O_3) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والملوثات العضوية الثابتة (POPs) (Omidvarborna et al., 2018). ينتج تلوث الهواء عن كل من الأنشطة البشرية (من صنع الانسان) والطبيعية (التغيرات التي تحدث في الطبيعة).

نلاحظ هنا أنه من بين المصادر الطبيعية للجزيئات، يوجد الغبار الطبيعي (بما في ذلك الغبار الصحراوي)، وإن كان مصدر إزعاج، إنما ليس لها تأثير خطير على صحة الإنسان (Environmental Protection, UK)، ما لم يتم استنشاقها بكميات كبيرة. ومع ذلك، وفي ظل وجود جسيمات أخرى من مصادر بشرية المنشأ (مثل احتراق الوقود الأحفوري)، فمن المرجح أن تحاصر جزيئات غبار الصحراء هذه الجسيمات الضارة وتحملها بالاتجاه العكسي. وبعبارة أخرى، فإن التأثير المشترك للجسيمات الطبيعية والبشرية يمكن أن يكون ضارا بصحة الإنسان (EEA, 2012).

1.1. تأثير تلوث الهواء على المناخ

لتلوث الهواء تأثير مناخي إقليمي قصير المدى (Moore, 2009)، إذ من خلال تغيير كمية ضوء الشمس المنعكس أو الممتص، ومن خلال التأثير على جوانب مختلفة من تكوين السحب، تتسبب بعض أنواع تلوث الهواء في تبريد المناخ (مثل الكبريتات والنترات)، بينما يكون للبعض الآخر تأثير احترار مؤقت يستمر بضعة أيام أو أسابيع (مثل الكربون الأسود). وعلى وجه الخصوص، يُقدر أن الكربون الأسود (المعروف أيضًا باسم السخام - أحد مكونات الجسيمات الدقيقة $PM_{2.5}$) مسؤول عن حوالي 15 في المائة من الاحترار المفرط الحالي لدرجات الحرارة العالمية (Forster et al, 2007)، ويعتبر ثاني أكبر مساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري بعد ثاني أكسيد الكربون(CO_2) (Ramanathan & Carmichael, 2008). ومن ثم، فإن هذه الملوثات، المناخية قصيرة الأجل تساهم في تغير المناخ (Smith et al., 2020).

ومن ناحية أخرى، يمكن أن يؤثر تغير المناخ على جودة الهواء. وعلى وجه الخصوص، من المرجح أن يؤدي الاحتباس الحراري العالمي إلى زيادة تركيز تلوث الأوزون على مستوى الأرض، لأن معدل تكوين الأوزون يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة. وعلى الرغم من أن تلوث الهواء وتغير المناخ يرتبطان ارتباطا وثيقا (Moore, 2009)، وعلى الرغم من أنهما يشتركان في أصول طبيعية واصطناعية مشتركة، فإنهما يعاملان عادة على أنهما مشكلتان منفصلتان بسبب الاختلاف الكبير في الجداول الزمنية المرتبطة بذلك. وبالتالي، فإن تغير المناخ لا يذكر بصورة تفصيلية في هذا الدليل، والمخصص لتقييم جودة الهواء، وعلى هذا النحو، ويقتصر على ملوثات الهواء التي تسبب تدهورًا في جودة الهواء.

1.2. أسباب تلوث الهواء

ينتج التلوث البشري عن الأنشطة البشرية. وتشمل هذه، الانبعاثات من حرق الوقود الأحفوري (بما في ذلك النقل وتوليد الطاقة) من النفط والغاز والصناعات الكيماوية وأنشطة البناء والزراعة. إن هذه الصناعات التي تميز الاقتصادات سريعة النمو هي الأسباب الرئيسية للتلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية (Ebinger et al., 2011). يتفاقم التدهور اللاحق في جودة الهواء في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية بسبب المناخ الحار والجاف / شبه الجاف، والذي يؤدي في غياب الأمطار إلى تعزيز إنتاج ونقل الهباء الجوي، المكون بشكل أساسي من جزيئات الغبار (Al-Ghamdi et al., 2015; Reiche, 2010; Omidvarborna et al., 2018).

1.3. حالة تلوث الهواء وتحدياته في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

يمكن تقييم الوضع الراهن والحديث للتلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية من عدد من المصادر، بما في ذلك دراسات التعرض. وقد أفادت هذه الدراسات عن انبعاثات غاز SO2 كبيرة من المصافي ومحطات توليد الطاقة ومحطات تحلية المياه في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية (Al-Rashidi et al., 2005; Al-Jahdali & Bisher, 2008). علاوة على ذلك، وجد أن التركيزات السنوية المقاسة للجسيمات PM_{10} و$PM_{2.5}$ في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية تتجاوز بشكل كبير معايير جودة الهواء لمنظمة الصحة العالمية (Lanouar et al., 2016; Brown et al. (2008) ; Munir et al., 2013; Habeebullah, 2014, 2016; Habeebullah et al., 2015). يرتبط هذا المستوى المرتفع من الجسيمات بشكل أساسي بالمناخ الصحراوي في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية الذي يتميز بوجود تركيز كبير من الغبار الطبيعي. على الرغم من أن منظمة الصحة العالمية تعتبره ملوثًا، إلا أن الأدلة الحديثة تظهر أن الغبار الطبيعي ليس له تأثير خطير على صحة الإنسان، ما لم يتم استنشاقه بكميات كبيرة (Environmental Protection, UK). لا يزال هناك نقص في الدراسات التي تقدم تقريرًا شاملاً وقاطعًا عن التأثير المشترك لغبار الرمال والجسيمات الدقيقة البشرية المنشأ على صحة الإنسان.

إن تحديد مصادر الانبعاث التي تساهم في تركيز الملوثات المرصودة يتيح التحكم في الانبعاثات لتخفيف الآثار الصحية، وقد أظهرت دراسات تقسيم المصادر أن المساهمين الرئيسيين في تلوث الهواء العام الملحوظ في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية هم الرمل والغبار (الطبيعي والبشري) والصناعات الكيماوية والنفطية، بالإضافة إلى أنشطة النقل (Omidvarborna et al., 2018). أظهرت دراسات نمذجة الانبعاثات والتشتت التي أجرتها السلطات البيئية في البحرين والكويت وقطر في 2012-2013 أن مصادر الانبعاثات الرئيسية **(1)** للجسيمات PM_{10} و$PM_{2.5}$ هي محطات النقل والطاقة، **(2)** للجسيمات الخشنة (PM10 >) وهو عبارة عن غبار معلق، و**(3)** لثاني أكسيد الكربون والمركبات العضوية المتطايرة وأكاسيد النيتروجين وثاني أكسيد الكبريت هي صناعات النفط والغاز ومحطات الطاقة (Naber, 2015).

تمثلت إحدى المساهمات المهمة لهذه الدراسات في تحديد مصادر التلوث الرئيسية[7] التالية (حسب ترتيب التأثير): الغبار الطبيعي، والمصافي، ومحطات الطاقة، ومحطات التحلية، وحركة المرور والشحن. وكشفت هذه الدراسات أيضًا أن من بين التحديات التي تواجه دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية عدم كفاية الرصد، وعدم وجود مؤشر مشترك ومنصات استيعاب البيانات.

يعتبر الغبار من المصادر الرئيسية لانبعاثات $PM_{2.5}$ في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، وهو مصدر طبيعي. في دراسة حديثة أجراها Ukhov (Ukhov et al, 2020)، ذكر أن مساهمة عنصر عدم الغبار في PM2.5 أقل من 25٪ في الشرق الأوسط، مما يحد من تأثير التحكم في الانبعاثات على جودة الهواء. وقد حقق Alolayan et al. في المصادر الرئيسية ل $PM_{2.5}$ في أجواء الكويت (Alolayan et al, 2013) وخلصوا إلى أن حوالي 54٪ من $PM_{2.5}$ تم نقلها من الغبار الرملي.

7- تلوث الهواء العام

1.4. النظرة المستقبلية

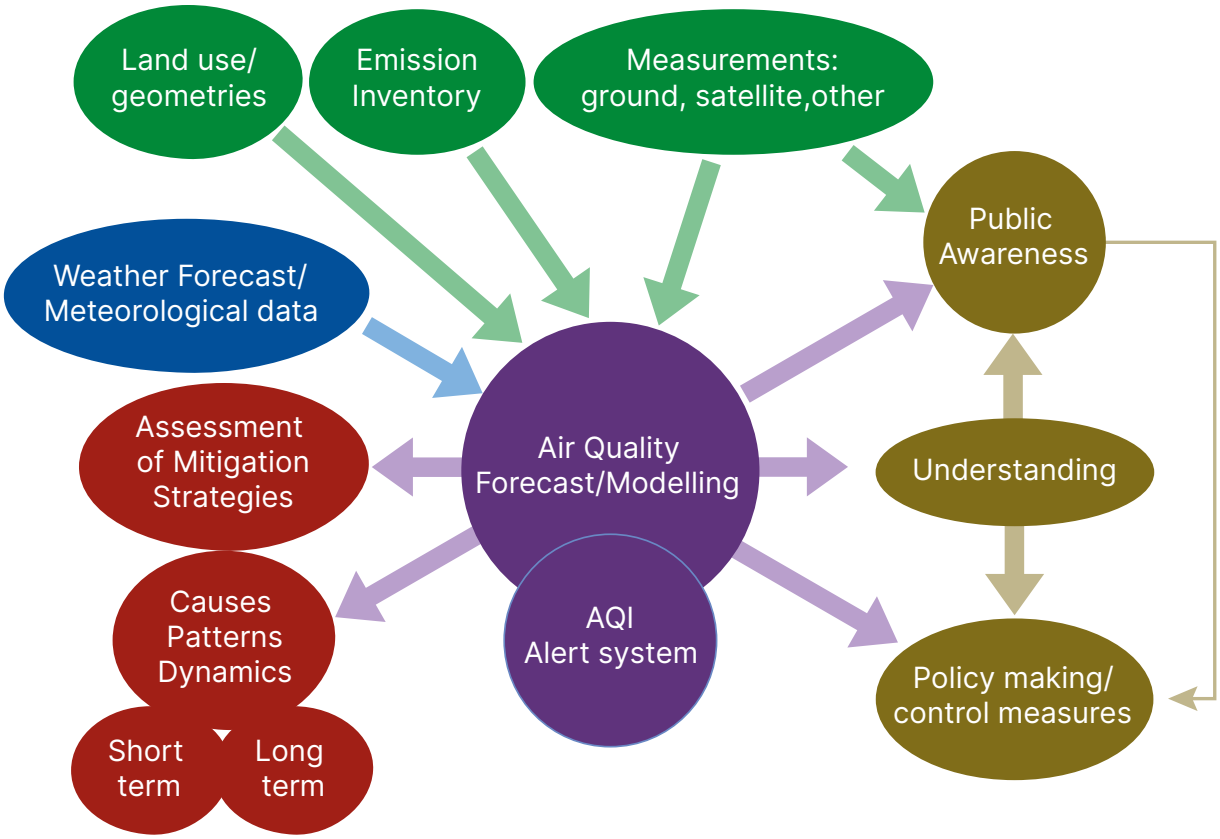
على هامش مؤتمر الأمم المتحدة الثامن عشر لتغير المناخ في الدوحة، قطر في عام 2012، تم تنظيم مؤتمر لمواجهة التحديات البيئية في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، بما في ذلك تلوث الهواء (Klemes et al.، 2012). وحدد المؤتمر كعوامل رئيسية النمو السكاني، والتحضر السريع، والنقل (حالة نظم النقل الحضري، والازدحام المروري، وانخفاض أسعار الوقود، والعدد الكبير من المركبات) (Elmi & Al-Rifai, 2012). ويتمثل التحدي الآخر في صعوبة التحديد الدقيق، خاصة في البلدان الأصغر، للمساهمات من الانبعاثات المحلية والانبعاثات الناتجة عن النقل العابر للحدود. ولتحسين جودة الهواء، يلزم بذل جهود إضافية لتقييم جودة الهواء على المستويين الحضري والوطني من خلال تحسين الرصد والنمذجة وبناء قوائم جرد الانبعاثات (Omidvarborna et al., 2018a).

1.5. التخفيف والوقاية: إدارة جودة الهواء

يتطلب التخفيف من الآثار الضارة لتلوث الهواء ومنعها إطار لإدارة جودة الهواء لتنظيم الانبعاثات والتحكم فيها، ووجود سياسات بيئية (التخطيط الحضري، وتحديد المواقع)، وأنظمة إنذار مبكر لتقليل تعرض الناس للملوثات. يتطلب الإطار العلمي والنجاح التحكم في التلوث، وزيادة الوعي العام، وبناء قوائم جرد دقيقة وحديثة للانبعاثات، وتخصيص المصادر والتنبؤ بالتلوث على المدى القصير والطويل والمقاييس الزمنية، وفهم عمليات النقل والآليات الفيزيائية الكيميائية الأساسية، بالإضافة إلى القدرة على استكشاف سيناريوهات ماذا لو، هي أيضا من المكونات الرئيسية لإطار إدارة جودة الهواء.

1.6. نمذجة جودة الهواء

وفي حالة عدم وجود مراقبة لتلوث الهواء تعمل على حل الزمان والمكان بشكل كاف، تظهر نماذج جودة الهواء كحل مناسب يمكنه التنبؤ بالتوزيع المكاني والزماني للعديد من الملوثات (Omidvarborna et al., 2018a). ومع ذلك، لا يزال التحقق من صحة نتائج نمذجة جودة الهواء يتطلب بيانات من مراقبة تمثيلية عالية الجودة لجودة الهواء. يُظهر **الشكل 1** مخططًا يوضح عناصر نظام التنبؤ / نمذجة جودة الهواء الذي يتم نشره بشكل شائع ضمن إطار عمل إدارة جودة الهواء.

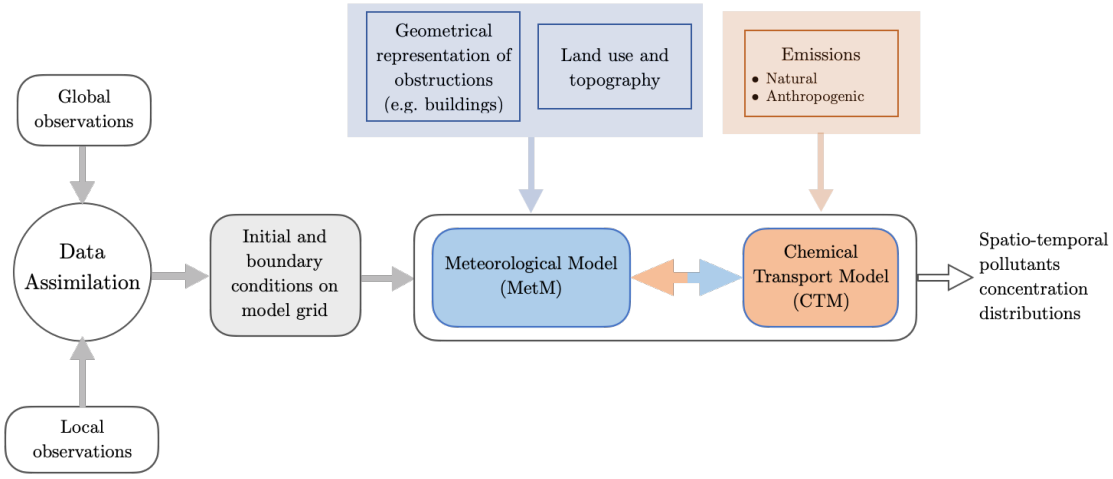


الشكل 1: عناصر نظام التنبؤ / نمذجة جودة الهواء.

02

2. مقدمة لنماذج جودة الهواء

النموذج هو وصف حسابي مُبسّط (نسبيا) لنظام حقيقي يلتقط الآليات الفيزيائية والكيميائية الرئيسية في المقياس الزمني مقاييس الوقت والطول التي يتم اختيارهما بشكل مناسب للإجابة على السؤال العلمي المطروح. وتُستخدم نماذج جودة الهواء للتنبؤ الطقس وجودة الهواء، ولتقييم التأثيرات البيئية قصيرة وطويلة المدى على مجالات الحجم التي تتراوح من النطاق المجهري (أقل من 1 كم) إلى النطاق العالمي (أكثر من 1000 كم)، وتحديد حلول لإدارة المشاكل البيئية (El-Harbawi, 2013). وكما هو مبين في الشكل 2، ينطوي نموذج جودة الهواء على اقتران الزخم ونقل الطاقة الذي يحكم ديناميات الغلاف الجوي (نموذج الأرصاد الجوية) مع نقل أنواع الملوثات (نموذج النقل الكيميائي)، والذي بالإضافة إلى حركة الهواء الأفقية والخلط، يشتمل على تفاعلات كيميائية. وغالبًا ما يتم تحسين تمثيلات الشروط الأولية والحدودية على شبكة النموذج عن طريق استيعاب القياسات. بالإضافة إلى ذلك، يتطلب نموذج جودة الهواء إدخال بيانات الانبعاثات واستخدام الأراضي والتضاريس والعوائق. ونظرًا لتعقيد الأنظمة التي يتم تصميمها، ، لا يزال بناء نماذج جودة الهواء دقيقة وفعالة من حيث التكلفة، والتي يتم تمكينها من خلال التقدم في القدرة الحسابية والسرعة، يُمثل مسعىً صعبًا (Baklanov et al., 2014).



الشكل 2: عناصر نموذج جودة الهواء للتقييم والتنبؤ.

يفرض اقتران عمليات الأرصاد الجوية والعمليات الكيميائية نهجًا متكاملًا للنمذجة يمكنه التعامل مع نقل الملوثات المتعددة على النطاقات الزمانية المكانية اللازمة لتحديد استراتيجيات التحكم لتحسين جودة الهواء.

يعتمد اختيار نموذج جودة الهواء على العديد من العوامل بما في ذلك حجم مجال الدراسة ومدتها، وتوافر بيانات الإدخال، وما إذا كانت التفاعلات الكيميائية ذات صلة. وتفرض هذه العوامل، إلى حد كبير، نوع نموذج جودة الهواء الذي سيتم استخدامه. وتحقيقا لهذه الغاية، يتم تصنيف نماذج جودة الهواء على أساس المكونات الكيميائية ومصادر الانبعاث ونهج النمذجة والمقاييس الزمنية والطول للعمليات الجوية والكيميائية المعنية. وسيتم توضيح مناقشة هذه الفئات في التفاصيل أدناه.

2.1. رصد جودة الهواء مقابل نمذجة جودة الهواء

إن رصد جودة الهواء هو التجميع المنهجي للقياسات المكانية والزمانية لتحديد تركيزات الملوثات والكميات الأخرى ذات الصلة مثل التعرض البشري والتدفقات إلى السطح (الأرض أو الماء). ويجب جمع قياسات جودة الهواء بشكل مستمر، بطريقة مُمثلة مكانيًا، لرصد وتوصيف معايير تركيزات الملوثات في الغلاف الجوي. ونظرًا للقيود في تغطيتها المكانية، نادرًا ما تكون قياسات جودة الهواء كافية للخروج بوصف مقبول لمجالات التركيز المكاني، ولتقييم تأثير مصادر الانبعاث على جودة الهواء المحيط (US EPA, 2017). وفي حال أو عندما لا تكون القياسات كافية، تُستخدم النماذج لحساب التوزيعات المكانية والزمانية لمستويات تركيزات الملوثات وحقول الترسيبات (Moussiopoulos et al., 1997).

وعند استخداما بشكل مكمل لقياسات جودة الهواء، فإن نماذج جودة الهواء توفر تقييمًا أكثر دقة. ويجب أيضًا استخدام القياسات للتحقق من صحة النموذج وحتى ضبطه وبالتالي تقليل حالة عدم اليقين في النموذج، والذي قد ينشأ عن الشك في المدخلات و/أو النموذج نفسه. بالإضافة إلى ذلك، يوفر نموذج جودة الهواء وسائل قيّمة لاستيفاء القياسات في المواقع التي لا تتوفر فيها قياسات.

يمكن أن تكون نماذج جودة الهواء حتمية أو إحصائية أو مزيج منها[8]. لم يتم تناول النماذج الإحصائية والهجينة لجودة الهواء في هذا المستند.

2.2. وصف عام لنماذج جودة الهواء القطعية

تحاكي نماذج جودة الهواء الحتمية تشتت الملوثات والتفاعلات في الغلاف الجوي عن طريق حل المعادلات الرياضية التي تصف القوانين التي تحكم العمليات الفيزيائية والكيميائية المرتبطة بها، بشكل رقمي في الغالب (Gea et al., 2017). وكما هو موضح في الشكل 2، تأخذ هذه النماذج كمدخلات مصادر الانبعاث (مثل معدلات الانبعاث وارتفاعات المداخن)، وتمثيلًا هندسيًا للمجال، بالإضافة إلى مجالات الأرصاد الجوية (سرعة الرياح ودرجة الحرارة والضغط). كذلك، نموذج النقل الكيميائي (CTM) ضمن تقديرات مستويات الملوثات الأولية في الغلاف الجوي، وفي بعض الحالات، مستويات الملوثات الثانوية. على هذا النحو، على عكس الأساليب الإحصائية، تصف نماذج جودة الهواء الحتمية، من الناحية الكمية، العلاقة السببية بين الأرصاد الجوية، وتركيزات الغلاف الجوي، والانبعاثات، والترسب، من بين عوامل أخرى. ويتم تحديد اختيار نوع نموذج جودة الهواء الحتمي من خلال مجال التطبيق، والمجال الجغرافي، والفترات الزمنية ذات الأهمية، والدقة المكانية والزمانية المرغوبة، واختيار مستوى التفاصيل في نمذجة العمليات الكيميائية (Moussiopoulos et al., 1997).

2.2.1. تقييم جودة الهواء مقابل توقع جودة الهواء

يمكن تقسيم نمذجة جودة الهواء بشكل عام إلى فئتين رئيسيتين: تقييم جودة الهواء والتوقع بجودة الهواء. يستلزم تقييم جودة الهواء استنتاج متوسط جودة الهواء بالوقت في المواقع التي تكون فيها الملاحظات غير كافية أو غير موجودة. كما يمكن أن نعمل متوسط الوقت على أساس شهري أو موسمي أو سنوي. وفي هذه الدراسات، تتيح خرائط تركيزات الملوثات تحديد المناطق الساخنة، وعندما تقترن بالأنماط السكانية، فإنها توفر رؤى قيّمة حول التعرّض. بالإضافة إلى ذلك، تسمح بعض أدوات النمذجة باستكشاف سيناريوهات ماذا لو، وبالتالي توفير إطار عمل فعال للتخفيف، وإعلام صانعي السياسات، والتخطيط. ومن ناحية أخرى، يستلزم توقع جودة الهواء التنبؤ بجودة الهواء في المستقبل، بدءًا من مجموعة من الشروط الأولية. يُعدّ التنبؤ الدقيق والموثوق بجودة الهواء مكونًا رئيسيًا لنظام إدارة جودة الهواء الذي **(1)** يوفر تنبيهات صحية في الوقت المناسب للسكان المعرضين للخطر، **(2)** يكمل برامج التحكم في الانبعاثات التقليدية، **(3)** تمكين التخطيط التشغيلي، و**(4)** التمكين نحو استجابة أكثر فعالية للطوارئ.

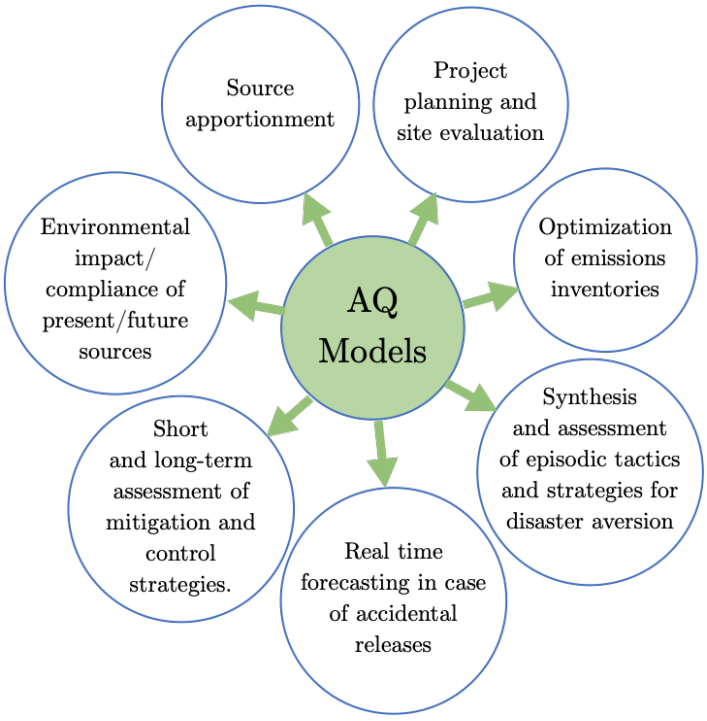
8- غالبًا ما تشير الأدبيات إلى النموذج القائم على أساس مادي كنماذج حتمية. في حين أن النماذج الإحصائية البحتة لا تعتمد على أي نمذجة فيزيائية، إلا أن القائمة المادية قد تكون حتمية بحتة أو قد تحتوي على مكون إحصائي. مثال على ذلك هو نمذجة معامل الخلط باستخدام توزيع «غوص» الاحتمالي.

تتطلب كل من نماذج التقييم والتوقع بيانات الأرصاد الجوية، ويتطلب التوقع بجودة الهواء تنبؤات أرصاد جوية. تتنبأ توقعات الطقس بالوقت الذي يعتمد على الخصائص الحرارية الفيزيائية للهواء التي تدفع وتميز النقل المحلي للملوثات. وبالتالي، فإن دقة التوقع بجودة الهواء تعتمد جزئيًا على موثوقية التوقع بالطقس، لإنتاج توقعات طقس ذو أكثر دقة ممكنة، عادةً ما يتم دمج مخرجات العديد من نماذج التوقع مع الخبرة والمعرفة المحلية. لذلك نتوقع أن تكون توقعات جودة الهواء الأكثر دقة هي تلك التي تتبع نهجًا مشابهًا.

2.3. ما فائدة نماذج جودة الهواء الحتمية؟

تمكّن نماذج جودة الهواء المحددة علوم الغلاف الجوي وإدارة جودة الهواء (انظر **الشكل 1**) من خلال توفير وصف 360 درجة لمشكلة جودة الهواء، بما في ذلك تحليل العوامل والأسباب، وتقييم الأهمية النسبية للعمليات ذات الصلة، وتحديد الأنماط، والتحقيق فيما- إذا كانت السيناريوهات، وتقييم استراتيجيات التخفيف / التحكم المقترحة، وكل ذلك يساهم في تطوير السياسات والاستراتيجيات للتحكم الفعال في تلوث الهواء (Nguyen, 2014).

تستخدم نماذج جودة الهواء الحتمية على نطاق واسع من قبل الوكالات، مثل وكالة حماية البيئة الأمريكية (US EPA)، المكلفة بالتحكم في تلوث الهواء وتنظيمه. كما تمكن نماذج هذه الوكالات من تحديد المصادر المساهمة وتصميم استراتيجيات تخفيف فعالة. وتُستخدم نماذج جودة الهواء أيضًا بشكل شائع أثناء عملية التصريح للتحقق مما إذا كانت الملوثات من مصدر جديد تؤدي إلى مستويات محيطة تزيد عن معيار جودة الهواء أم لا. وفي حالة عدم وجود أي بدائل عملية، يتم استخدام نماذج جودة الهواء كأدوات تنبؤ لتقييم فعالية (واتخاذ قرار بشأنه) البرامج التنظيمية الجديدة (على سبيل المثال للحصول على تصاريح المصدر ومتطلبات التحكم في الانبعاثات) في تقليل التعرض البشري والبيئي (US EPA, 2017). تم تلخيص تطبيقات نماذج جودة الهواء الحتمية في **الشكل 3** (Collett & Oduyemi, 1997).



الشكل 3: تطبيقات نماذج جودة الهواء الحتمية.

2.4. ملاءمة نماذج جودة الهواء الحتمية لتقييم تأثيرات المصدر

يجب مراعاة العوامل التالية عند تقييم مدى ملاءمة نموذج جودة الهواء المحدد لتقييم تأثيرات المصدر على جودة الهواء المحيط (US EPA, 2017).

تعقيد التضاريس الأرضية ومجال التدفق: عادةً ما تكون نماذج جودة الهواء أكثر دقة للتضاريس الأرضية ذات الانتقالات المكانية الأكثر سلاسة في التضاريس واستخدام الأراضي. تُترجم هذه التضاريس البسيطة إلى ظروف أرصاد جوية أكثر اتساقًا، مما يسمح لأبسط نماذج جودة الهواء إنتاج تنبؤات تمثيلية. وتتوفر نماذج جودة الهواء الملائمة للبيئات المعقدة ولكنها أكثر تكلفة من الناحية الحسابية، وتتطلب قياسات في الموقع، وفي كثير من الحالات تتضمن تعديل النماذج الفرعية أو معايرتها. ويُعدّ التحقق من صحة نماذج جودة الهواء، خاصة عند استخدامها في البيئات المعقدة، أمرًا بالغ الأهمية لبناء الثقة في تنبؤاتها.

دقة ومستوى تفاصيل المدخلات (بيانات الأرصاد الجوية، والانبعاثات، وبيانات جودة الهواء)**:** يُعدّ توافر البيانات المطلوبة لنموذج جودة الهواء عاملاً حاسمًا في إمكانية استخدام النموذج. بالإضافة إلى بيانات التضاريس الأرضية والأرصاد الجوية، فإن التمثيل المكاني والزماني المُفصل لمصادر الانبعاث يُمكّن النموذج من تقييم تأثير المصدر بشكل أكثر دقة.

كيفية نمذجة عمليات الغلاف الجوي: تسمح نماذج جودة الهواء التي تتضمن عمليات الغلاف الجوي المعقدة والمتنوعة باختبار مجموعة متنوعة من ظروف الأرصاد الجوية المثيرة للاهتمام، والتي تتيح في النهاية التقييم الفعال لاستراتيجيات التحكم المختلفة.

الموارد المتاحة.

الكفاءة الفنية للمستخدم.

2.5. مرحلة التحضير لاختيار النموذج

لتحديد لنهج النمذجة الأمثل يُوصى باتباع الخطوات المقترحة في موقع الوكالة الأوروبية للبيئة (EEA, 1998, Ch. 5).

1. تحديد الملوثات وكمية المخرجات التي سيتم نمذجتها (حقول التركيز، أو (الحد الأقصى المكاني) للتركيزات في الشوارع أو بالقرب من مصادر النقطة، وعادةً لإحصاءات التركيز، على سبيل المثال المتوسط السنوي، أو 98 بالمائة من قيم الساعة...).
2. تحديد دقة الوقت المطلوب (متوسط الوقت للتركيز).
3. تعريف «منطقة مخرجات النموذج» التي يجب إجراء حسابات النموذج لها (عادة منطقة أو تكتل) والدقة المكانية المطلوبة.
4. تحديد الدقة في كمية المخرجات المطلوبة.
5. تحديد منطقة النموذج (قد يمتد هذا إلى ما وراء منطقة الإنتاج، لا سيما في حالة الملوثات ذات النقل بعيد المدى).
6. التحقيق في توافر بيانات الانبعاثات (في منطقة النموذج).
7. التحقيق في توافر بيانات الأرصاد الجوية والبيانات الطبوغرافية (في منطقة النموذج).
8. التحقيق في بيانات جودة الهواء المتاحة (في منطقة مخرجات النموذج).
9. التحقق من موارد الحاسوب المتوفرة.
10. اختيار النماذج المناسبة للملوثات (مع مراعاة التركيب الكيميائي والترسيب)، وكمية المخرجات ذات الصلة، مع الدقة المناسبة في المكان والزمان، وضمن الدقة المطلوبة، وللمنطقة قيد البحث (مع مراعاة طبوغرافيا والخصائص الجوية للمنطقة).
11. مراعاة متطلبات الحاسوب للنموذج أو النماذج؛ إذا تجاوزت هذه موارد الحاسوب المتاحة، وإعادة النظر في اختيار النموذج.
12. إعادة النظر في متطلبات بيانات الانبعاثات والأرصاد الجوية للنموذج أو النماذج المختارة، وجمع بيانات مدخلات أكثر تفصيلا عند الضرورة (أو إعادة النظر في اختيار النموذج).
13. إعداد بيانات الإدخال.
14. تشغيل النموذج.
15. المقارنة بين نتائج بيانات جودة الهواء المتاحة وإجراء تقييم ناقد.

3. فئات نماذج جودة الهواء الحتمية

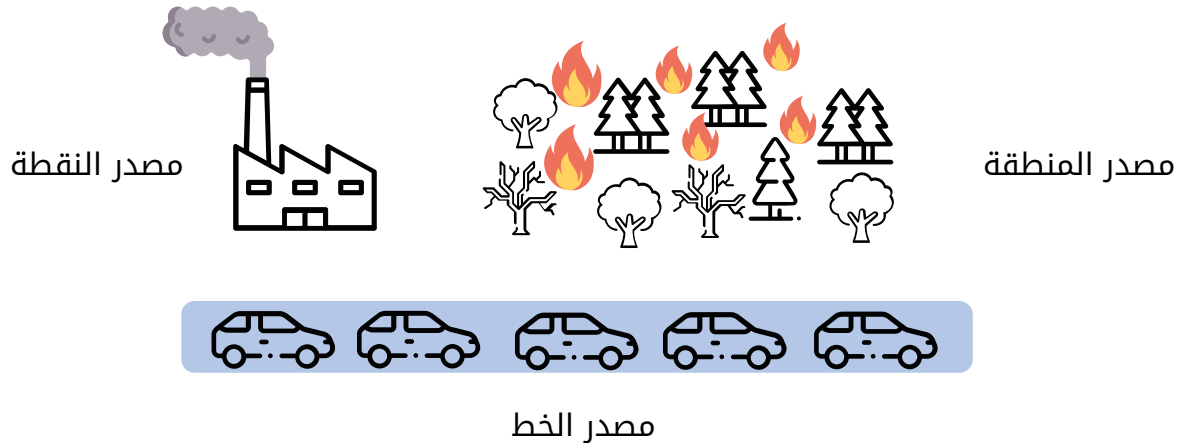
يمكن تصنيف نماذج جودة الهواء الحتمية بطرق مختلفة، ونقدم أدناه التصنيفات بناءً على: **(1)** نوع المكونات الكيميائية، **(2)** نوع مصادر الانبعاث، **(3)** الفيزياء النموذجية (نوع النموذج)، **(4)** المقاييس الزمنية والمكانية (EEA, 1998).

3.1. ملاءمة نماذج جودة الهواء الحتمية لتقييم تأثيرات المصدر

بناءً على نوع المكونات والتفاعلات الكيميائية المعنية، يمكن أن تكون نماذج جودة الهواء الحتمية غير تفاعلية أو تفاعلية. ويتم تطبيق النماذج غير التفاعلية على الملوثات مثل ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت حيث يمكن وصف تفاعلاتها الكيميائية بطريقة بسيطة باستخدام معايير نصف العمر الملوث أو التحلل (Nguyen, 2014). في المقابل، تتناول النماذج التفاعلية آليات تفاعل معقدة متعددة الأنواع شائعة في الكيمياء الضوئية للغلاف الجوي والتي تتضمن ملوثات مثل NO و NO_2 و O_3 (Conti, 2017).

3.2. التصنيف على أساس أنواع مصادر الانبعاث

بناءً على التمثيل الهندسي لمصادر الانبعاث، يمكن تقسيم نماذج جودة الهواء الحتمية إلى ثلاث فئات رئيسية **(الشكل 4)** (El-Harbawi, 2013):

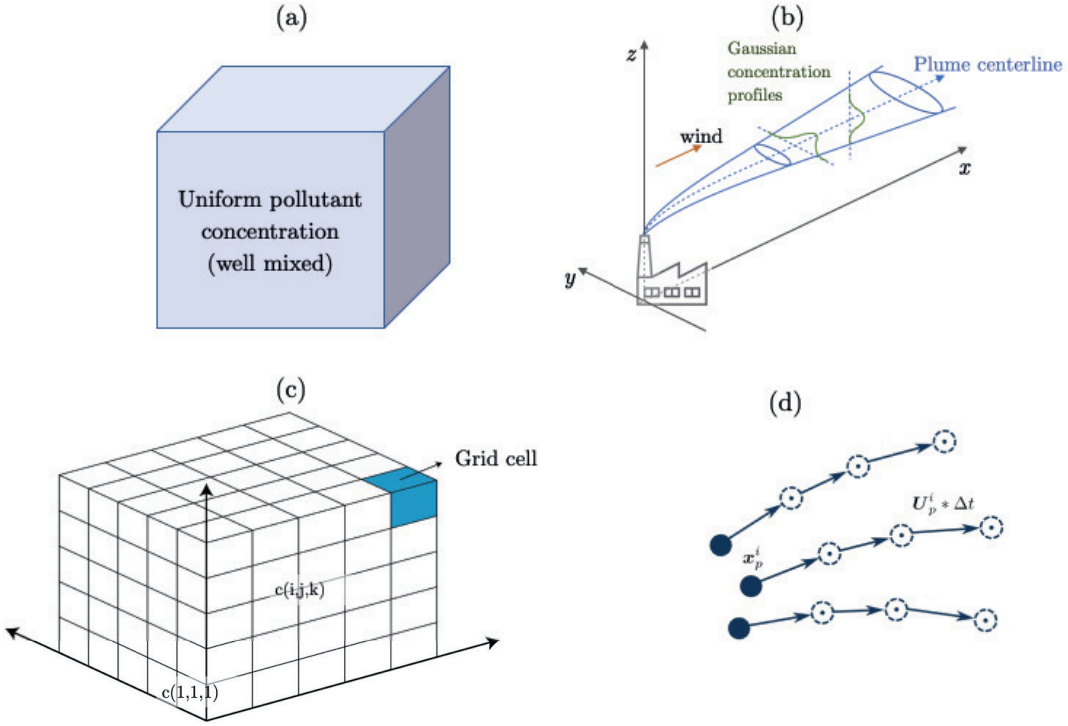


الشكل 4: مصادر الانبعاث المستخدمة في تصنيف نماذج جودة الهواء

- نماذج جودة هواء مصدر النقطة المستخدمة للمصادر الصناعية،
- نماذج جودة هواء مصدر الخط المستخدمة في نمذجة تشتت الهواء في المطارات والطرق،
- نماذج جودة هواء مصدر المنطقة المستخدمة في حرائق الغابات أو العواصف الترابية أو تمثيل الانبعاثات الخشنة للمناطق الحضرية أو الصناعية الكبيرة

3.3. التصنيف على أساس نهج النمذجة

إن نماذج جودة الهواء الأكثر استخداما هي نموذج الصندوق، نموذج عمود غوسي، نماذج لاغرانجي، ونماذج أويلريان (القائمة على الشبكة) **(الشكل 5)** (Gea et al., 2017, US EPA, 2017).



الشكل 5: مناهج نمذجة عبر القدير :(A) نموذج الصندوق، (B) نموذج عمود غوسي، (C) نموذج أويلريان، و (D) نموذج لاغرانجي.

3.3.1. نموذج الصندوق

إن نموذج الصندوق (Lettau, 1970) هو أبسط أنواع من نماذج جودة الهواء وهذا يعتمد على الحفظ الشامل للملوثات داخل صندوق ثابت، والذي يمثل عمومًا مساحة كبيرة مثل المدينة (Zannetti, 2013). ويفترض النموذج أن ملوثات الهواء داخل الصندوق موزعة بشكل متجانس، ويستخدم هذا الافتراض لتقدير متوسط تركيزات الملوثات في أي مكان داخل الصندوق. وعلى الرغم من أن هذا النموذج مفيد في بعض الحالات، إلا أنه محدود للغاية في قدرته على التنبؤ بدقة بتشتت ملوثات الهواء لأن افتراض توزيع الملوثات المتجانس مفرط في البساطة وغير الواقعي (Gea et al., 2017). تمت مناقشة نهج نمذجة الصندوق جيدًا في (Lettau, 1970; Derwent et al., 1995; Middleton, 1995 & 1998; Sportisse, 2001; Cheng et al., 2007; Johnson et al., 2011, El-Harbawi, 2013).

3.3.2. نموذج عمود غوسي

يستخدم نموذج عمود غاوسي في الغالب للتنبؤ بالتشتت في المجال القريب لأعمدة تلوث الهواء المستمر الناشئة من مستوى الأرض أو المصادر المرتفعة. يعتمد نموذج غوسي على افتراض أن جميع مدخلات النموذج ثابتة في جميع أنحاء المنطقة خلال الخطوة الزمنية للنموذج، مما يؤدي إلى تركيز عمود، في كل مسافة في اتجاه الريح، لتوزيعات غوسي المستقلة في كل من الأفقي والعمودي(Moussiopoulos et al., 1997; US EPA, 2017) ، كما هو مبين في **الشكل 5- ب.** يُعرَّف تركيز الأنواع بأنه متناسب مع معدل انبعاث المصدر، مخففًا بسرعة الرياح عند مصدر الانبعاث. ويتم تحديد سلوك تشتت الملوث من خلال الانحرافات المعيارية المرتبطة بوظيفة توزيع غوسي. هذه الانحرافات المعيارية هي عادة وظائف لاستقرار الغلاف الجوي والاضطراب المحلي والمسافة في اتجاه الريح من المصدر (Collett & Oduyemi, 1997).

يُستخدم نموذج عمود غوسي عالميًا كأسلوب قياسي لحساب ارتفاع المدخنة المطلوب لمنح على تصاريح (Daly & Zannetti, 2007) ويعتبر أكثر الطرق الحسابية المقبولة لتقدير تركيز الملوث عند نقطة معينة (El-Harbawi, 2013). لا يزال نموذج عمود غوسي يعاني من قيود شديدة تحد من قابليته للتطبيق ودقته، وبالتالي فهو غير دقيق في حالات الاستجابة في الوقت الفعلي (Bluett et al. 2004). وتجعل هذه القيود النموذج غير دقيق **(1)** على مسافة كبيرة من المصدر (أكثر من 10 كم)، **(2)** للظروف غير المستقرة (مصدر الانبعاث و / أو الأرصاد الجوية)، **(3)** فوق التضاريس المعقدة، وغير مناسب لنمذجة الأحداث المعقدة مثل أحداث التبخير لتفكك الانعكاسي وأحداث الركود، و**(4)** عندما يلزم إدراج ترسب الملوثات والتفاعلات الكيميائية.

وقد كان نموذج غوسي موضوع بحث مكثف يهدف إلى توسيع قابلية تطبيقه على المواقف المعقدة في العالم الحقيقي (Zannetti, 2013).

وللتعامل مع الظروف غير الثابتة وغير المتجانسة، تم اقتراح نهج العمود المجزأ (Chan and Tombach, 1978; Chan, 1979) ونهج النفخ (Roberts et al., 1970); للتعامل مع ظروف الحالة المستقرة الزائفة. تقسم كلتا الطريقتين العمود إلى سلسلة من العناصر المستقلة (مقاطع أو نفث) التي تتطور بمرور الوقت كدالة لظروف الأرصاد الجوية المتغيرة زمنيا ومكانيا (Zannetti, 2013).

قام المصممون بتعديل معادلة غوسي للنظر في الانعكاس الكلي أو الجزئي على السطح وفي الجزء العلوي من طبقة الحدود الجوية (ABL). كما تم تعديل نماذج غوسي لمراعاة التضاريس المعقدة، بالإضافة إلى ذلك، إنه يمكن استخدام نسخة مبسطة من نموذج غوسي، نموذج غوسي المناخي، لحساب المتوسطات طويلة الأجل (مثل القيم السنوية) (Moussiopoulos et al., 1997).

3.3.3. نموذج أويلريان

إن معظم النماذج الكيميائية الضوئية الإقليمية الحالية هي نماذج أويلريان، والتي يمكن القول إنها الأقوى بين أنواع النماذج المختلفة لأنها تتضمن الافتراضات الأقل تقييدًا. ومع ذلك، فإن نماذج أويلريان هي الأكثر كثافة من الناحية الحسابية. كما أنها تحل بالتقريب المحدود للمعادلات التي تحكم فيزياء وكيمياء عمليات الغلاف الجوي عن طريق تقسيم منطقة النمذجة إلى عدد كبير من الخلايا (انظر **الشكل 5-(c)**)، أفقيا وعموديا، والتي تتفاعل مع بعضها البعض لمحاكاة التفاعلات المختلفة التي تؤثر على تطور تركيزات الملوثات، بما في ذلك الكيمياء، والانتشار، وحركة الهواء الأفقية، والترسيب (للجسيمات)، والترسب (الرطب والجاف).

كما هو مبين في **الشكل 5-(c)**، يستخدم نموذج التشتت أويلريان شبكة ديكارتية ثابتة ثلاثية الأبعاد كإطار مرجعي، وعادةً ما يكون التدفق داخل المجال مضطربًا (Brown, 1991) ويتم وصفه رياضيًا بالتعبير عن أي متغير تابع كمجموع مكون متوسط محلي ومكون متقلب (Collett & Oduyemi, 1997). وتشمل نماذج أويلريان المتقدمة نماذج فرعية مكررة لوصف الاضطراب (مثل نماذج الإغلاق من الدرجة الثانية ونماذج المحاكاة ذات الدوامة الكبيرة) وغيرها من الفيزياء على نطاق مجهري.

تشمل متطلبات بيانات الإدخال لنماذج أويلريان حقول الانبعاثات التي تم حلها زمنيا ومكانيا (تحل حسب الأنواع)، والأرصاد الجوية (مثل سرعات الرياح، ودرجات الحرارة، والإشعاعات الشمسية، وما إلى ذلك)، والسمات الطبوغرافية، وتركيزات الملوثات الأولية والخلفية (للظروف الأولية والحدودية)، وتعريف النطاق (Russel, 1997).

3.3.4. نموذج لاغرانجي

تُستخدم نماذج لاغرانجي لتحديد تأثيرات المجال القريب والبعيد التي تعتمد على الوقت من عدد محدود من المصادر (US EPA, 2017). في هذه النماذج، يتم توجيه جزيئات سائل لاغرانجي (أو مقاطع أو نفث)، التي يتم حقنها بشكل دوري من مصادر الانبعاث في النطاق، بواسطة مجال التدفق الفوري، كما هو موضح في الشكل 5- (d). تحمل الجسيمات، التي تعمل كتقدير لتوزيعات كثافة الملوثات في النطاق، حصصها من كتل الملوثات المختلفة، بالإضافة إلى كميات متكاملة أخرى مثل الطاقة الداخلية، والتي تتيح محاكاة ديناميات العناصر المرتبطة المعلمات الفيزيائية. ونظرًا لأنه غير مستقر، فإن نموذج لاغرانجي (يشار إليه أحيانًا باسم نموذج لاغرانجي باف)، على عكس نموذج عمود غوسي، الذي يسمح بانبعاثات متفاوتة الزمن وظروف الأرصاد الجوية.

يمكن إنتاج حركة الجسيمات في نماذج لاغرانجي من خلال كل من السرعات الحتمية والسرعات الزائفة شبه العشوائية المتولدة باستخدام تقنيات مونت كارلو، ومن ثم، يتم حساب النقل المضطرب عن طريق فرض تقلب سرعة شبه عشوائي على سرعة الرياح المتوسطة محليًا (Moussiopoulos et al., 1997). ونظرًا لأن مركز كتلة الجسيم يتم تحديده بواسطة سرعة الرياح المحلية، تتم محاكاة الانتشار بترجمة عشوائية إضافية تتوافق مع معدل الانتشار الجوي (Russel, 1997). وبعد ذلك، يحسب نموذج لاغرانجي تشتت تلوث الهواء عن طريق حساب إحصائيات مسارات عدد كبير من طرود أعمدة التلوث (Gea et al., 2017).

تتطلب نماذج لاغرانجي حقول رياح تم حلها مكانيا وزمانيا، وحقولا لخلط الارتفاع، ومعلمات ترسيب، وبيانات عن التوزيع المكاني للانبعاثات (Russel, 1997).

تتصف نمذجة لاغرانجي بمزايا عديدة مقارنة بنمذجة أويلريان(Pearson 2001; Gertler et al. 2004; El-Harbawi, 2013) . وتشمل هذه التكلفة الحسابية المعقولة والنمذجة العددية السلسة لمصطلح التأفق[9] (الانتشار الأفقي) والقدرة على تتبع الجسيمات إلى المصدر، مما يتيح التقييم السريع لتأثير قوائم جرد الانبعاثات على مستويات الملوثات. ومع ذلك، لا تزال نماذج لاغرانجي تواجه التحدي الكبير المتمثل في التعامل مع الكيمياء المعقدة عن طريق النمذجة الدقيقة للتفاعلات الكيميائية بين الجسيمات المختلفة.

وعلى وجه الخصوص، يتطلب تكوين الملوثات الثانوية تمثيلًا مكانيًا وزمنيًا مناسبًا للأنواع المعنية في الغلاف الجوي الخلفي، مثل المؤكسدات والأمونيا (US EPA, 2017 والمراجع داخله). على هذا النحو، شهدت نماذج لاغرانجي استخدامًا محدودًا للغاية في النمذجة الكيميائية الضوئية مؤخرًا، وقد تم استخدامها في الغالب للملوثات الخاملة نسبيًا، مع بعض القدرات للترسيب.

في المقابل، فإن الميزة الرئيسية لنماذج أويلريان هي التمثيل العددي المستمر ثلاثي الأبعاد المحدد جيدًا للمجال والذي يتيح الصياغة العددية للتفاعلات المعقدة. جعلت هذه الميزة نماذج Eulerian كنماذج مفضلة لدراسة مشاكل تلوث الهواء على النطاق الإقليمي، ويمكن العثور على شرح أكثر تفصيلاً لمزايا وعيوب نماذج جودة الهواء المختلفة في (Gertler et al. 2004).

يعرض **الجدول 1** تاليا مقارنة بين نماذج عمود غوسي ولاغرانجي وأويلريان:

فئة النموذج	عمود غوسي	لاغرانجي (نفخ)	أويلريان (على أساس الشبكة)
ثابت / متغير	ثابت	متغير	متغير
مقياس زمني	من ساعة إلى سنة	من ساعة إلى سنة	مقياس زمني من ساعة إلى قرن
مقياس مكاني	المقاييس المحلية والحضرية	المقاييس المحلية إلى القارية	المقاييس المحلية والعالمية
ترسب الملوثات	ترسب جاف محدود	ترسب جاف ورطب محدود	ترسبات جافة ورطبة متطورة
التفاعلات الكيميائية	ردة فعل محدودة، وعادة ما يتم تفسيرها بواسطة معامل الاضمحلال	رد فعل محدود داخل كل نفخة؛ فقط الكيمياء من الدرجة الأولى	تفاعلات معقدة ومتعددة الأنواع؛ الدرجة الثانية والكيمياء العالية
التطبيقات الأكثر ملاءمة	تقييم الملوثات غير التفاعلية للأغراض التنظيمية على المستوى المحلي (أقل من 50 كم)	نقل الملوثات في التضاريس المعقدة؛ تحليل المسار الخلفي لتحديد أصل الكتل الهوائية	انتقال بعيد المدى مع تفاعلات كيميائية معقدة
مساوئ رئيسية	بعض الصعوبة في محاكاة التشتت عند سرعة الرياح المنخفضة	من الصعب نمذجة الملوثات التفاعلية	الانتشار العددي؛ تكلفة حسابية عالية

الجدول 1: مقارنة بين نماذج عمود غوسي ولاغرانجي وأويلريان.

9- كان أحد التحديات الرئيسية في طرق أويلريان هو النمذجة الدقيقة والمستقرة للمصطلح غير الخطي $\vec{u} \Delta \cdot \vec{u}$، حيث $\vec{u}$ هو مجال متجه السرعة.

3.4. التصنيف على أساس النطاق الزمني والمكاني

تدرس نماذج جودة الهواء نقل الملوثات في مجال الدراسة بدقة مكانية وزمنية يمليها بيان المشكلة. تعتبر المقاييس المكانية والزمنية المطلوبة لحل انتقال الكتلة والزخم والطاقة، بالإضافة إلى تلك التي تحكم التفاعلات الكيميائية، العامل الحاسم الرئيسي المحدد لنموذج جودة الهواء الذي يجب اختياره. يتم تحديد الملوثات وقفاً لسرعة الرياح المحلية، والتي تحددها قوانين الحفظ الفيزيائي (الكتلة والزخم والطاقة) التي تحكم عمليات الغلاف الجوي. بالإضافة إلى ذلك، فإن التطور المكاني والزماني لمجالات تركيز الملوثات يخضع للخلط الناجم عن الاضطرابات والتفاعلات الكيميائية.

ونوضح في النقاط ادناه الشرح للآليات الفيزيائية الرئيسية التي تميز عمليات الغلاف الجوي بمقاييس امتداد مختلفة، وبالتالي تحديد مدى تعقيد النموذج الأساسي للتنبؤ بمجال التدفق. وما يلي هو شرح عن التفاعلات الكيميائية التي تميز عمليات جودة الهواء بمقاييس امتداد مختلفة، وبالتالي تحديد مدى تعقيد النموذج الأساسي للتمثيل الدقيق بالامتداد والمقاييس الزمنية المرغوبة.

3.4.1. مقاييس عمليات الغلاف الجوي

تتأثر نماذج جودة الهواء بشكل حاسم بعمليات الغلاف الجوي التي يتم تصنيفها بشكل عام فيما يتعلق بنطاقها المكاني. يوصي Orlanski (1975) بالتمييز بين مقاييس عمليات الغلاف الجوي عند المقياس الكبير (أكثر من 1000 كيلومتر) والمقياس المتوسط (ما بين كيلومتر واحد حتى 1000 كيلو متر) والمقياس الصغير (أقل من كيلومتر واحد) **(الشكل 6)**.

3.4.1.1. عمليات مقياس كبيرة

في مقاييس مميزة الامتداد التي تتجاوز 1000 كم (وهي من حيث حجم نصف قطر الأرض)، يرتبط التدفق الجوي بشكل أساسي بالظواهر السينوبتيكية، أي التوزيع الجغرافي لأنظمة الضغط. ويتطور مجال التدفق السينوبتيكي الذي يحكم عمليات الغلاف الجوي الكبيرة نتيجة للتوازن بين قوى الضغط وقوة كوريوليس، في حين أن الضغط هيدروستاتيكي على طول الاتجاه الشعاعي، كما يمكن الاستدلال عليه من خلال قياس مكونات السرعة، وإن التباين المكاني للضغط في مستوى خطوط الطول والعرض يتم إملاؤه من خلال التجانس واسع النطاق لتوازن الطاقة السطحية. وترتبط معظم ظواهر التشتت على نطاق إقليمي إلى قاري ارتباطًا وثيقًا بعمليات الغلاف الجوي الكبيرة (Moussiopoulos et al., 1997).

3.4.1.2. عمليات مقياس وسطى

يعتمد تكوين التدفق في المقياس المتوسط (مميزة الامتداد بين 1 و1000 كم) على كل من التأثيرات الهيدروديناميكية (مثل توجيه التدفق وتأثيرات الخشونة) وعدم تجانس توازن الطاقة. وعندما يكون التأثير السينوبتيكي ضعيفًا (أي في حالة عدم وجود تهوية)، فإن تشتت الملوثات يخضع بشدة للتأثيرات الحرارية.

تؤثر عمليات الغلاف الجوي متوسطة الحجم في المقام الأول على ظواهر التشتت من نطاق محلي إلى إقليمي، والتي تعتبر الدراسات الحضرية أهم الأمثلة عليها. يتطلب وصف هذه الظواهر، حتى بالنسبة للتطبيقات العملية، استخدام أدوات نمذجة معقدة إلى حد ما (Moussiopoulos et al., 1997) نظرًا لأن نماذج الأرصاد الجوية متوسطة الحجم يجب أن تكون قادرة على محاكاة أنظمة الدوران المحلية، مثل نسائم البحر والأرض.

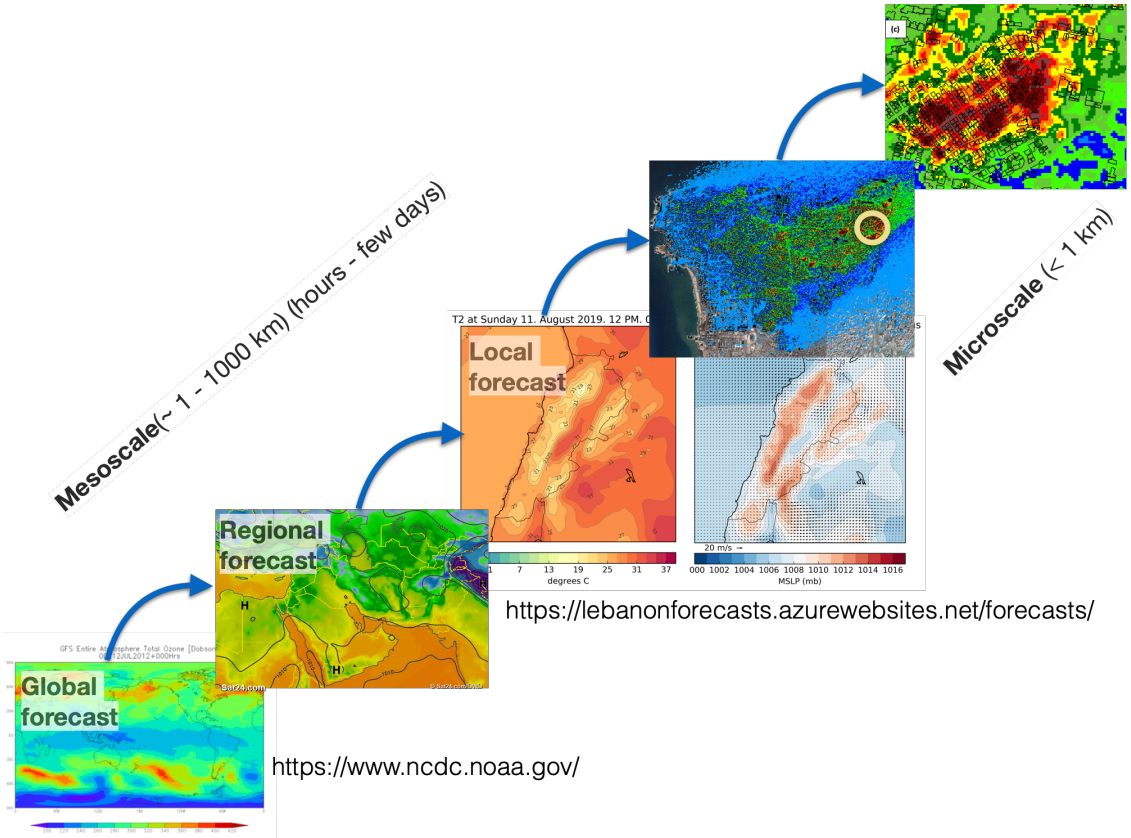
3.4.1.3. عمليات مقياس متناهي الصغر

بشكل عام، يكون تدفق الهواء معقدًا للغاية على المستوى المتناهى الصغر (مميزة الامتداد أقل من 1 كم)، لأنه يعتمد بشدة على خصائص السطح التفصيلية (على السبيل المثال، شكل المباني واتجاهها بالنسبة لاتجاه الرياح). وعلى الرغم من أن التأثيرات الحرارية قد تساهم في توليد هذه التدفقات، إلا أنه يتم تحديدها بشكل أساسي من خلال التأثيرات الهيدروديناميكية (مثل قنوات التدفق، وتأثيرات الخشونة) التي يجب وصفها جيدًا في نموذج محاكاة مناسب. وفي ضوء الطبيعة المعقدة لمثل هذه التأثيرات، يتم وصف ظواهر التشتت على نطاق محلي (والتي ترتبط إلى حد كبير بعمليات الغلاف الجوي الدقيقة) بشكل أساسي بنماذج «بسيطة» مُحكمة في حالة التطبيقات العملية، مثل نماذج شارع الوادي (Moussiopoulos et al., 1997).

3.4.2. مقاييس عمليات جودة الهواء

يعد تلوث الهواء الجوي مشكلة متعددة المقاييس تتراوح من النطاق الصغير (جزيرة الحرارة الحضرية)، إلى النطاق المتوسط (نقل الملوثات الإقليمية، والعواصف الترابية)، إلى النطاق الكلي (الاحتباس الحراري، ونضوب طبقة الأوزون).

واستنادًا إلى النطاق المكاني، يمكن تقسيم نماذج جودة الهواء إلى الفئات الأربع التالية **(الشكل 6)**: **(1)** النطاق العالمي، **(2)** النطاق الإقليمي إلى القاري، **(3)** النطاق المحلي إلى الإقليمي، **(4)** النماذج المحلية لتلوث الهواء (Moussiopoulos et al., 1997). يُبيّن **الجدول 2** نوع النموذج الأكثر شيوعا، ومدخلات الأرصاد الجوية، والعمليات الفيزيائية الكيميائية المستخدمة في تقييم جودة الهواء عند مقاييس متعددة.



الشكل 6: مقاييس عمليات جودة الهواء

3.4.2.1. نماذج تلوث الهواء على النطاق العالمي

بتُستخدم نماذج تلوث الهواء على المستوى العالمي (أكثر من 10000 كم) للتنبؤ، على النطاق العالمي، بالتركيب الكيميائي لطبقة التروبوسفير ودراسة تفاعلاتها مع طبقة الستراتوسفير التي تعلوها. بالإضافة إلى ذلك، غالبًا ما تُستخدم هذه النماذج في دراسات المناخ لتقييم التأثير المستقبلي طويل المدى. وتوفر النماذج واسعة النطاق أيضًا نماذج أصغر حجمًا مع شروط الحدود المطلوبة لتمكين التنبؤ على نطاق أصغر[10] (Moussiopoulos et al., 1997).

تم تطوير العديد من النماذج ثلاثية الأبعاد على نطاق عالمي أو نصف كروي. وتشمل هذه MOCAGE وSILAM وNAAPS. في هذه النماذج، تتم نمذجة العمليات الفيزيائية التي تحدث بمقاييس امتداد أصغر (مثل العمليات السحابية، والاختلاط بالحمل الحراري، والنقل بين الطبقة الحدودية وطبقة التروبوسفير الحرة، والتبادل بين طبقة الستراتوسفير والتروبوسفير) على مقياس شبكة فرعية باستخدام معايير (Donnell et al., 2001). يتم توفير مدخلات الأرصاد الجوية لنماذج التلوث واسعة النطاق هذه من خلال نماذج الدوران العامة (GCM) أو عن طريق استيعاب الملاحظات.

3.4.2.2. نماذج تلوث الهواء على النطاق الإقليمي إلى القاري

ظهرت النماذج الإقليمية (250-10000 كم) كأدوات أساسية لدراسة تكوين ونقل وترسب الملوثات الرئيسية (مثل الأوزون والجسيمات والأحماض) على النطاق الإقليمي. وبالإضافة إلى المساعدة في فهم العمليات الفيزيائية والكيميائية الأساسية وتأثيرها، تتيح هذه النماذج تحديد **(1)** مستويات التلوث الجوي واستجابتها للتحكم في الانبعاثات، **(2)** التدفقات عبر الحدود، **(3)** الترسب في النظام البيئي و**(4)** العلاقة بين الانبعاثات والترسيبات (Russel, 1997).

تعمل النماذج الإقليمية إلى القارية، مثل نماذج EMEP الموحدة وWRF-Chem و REMSAD، على حل المجال المكاني مع تباعد الشبكة من 10 - 150 كم، وتغطي فترات زمنية تصل إلى عامين. يتم استخدام كل من مخططات لاغرانجي (أحادية الطبقة وطبقتين) وأويلريان (Moussiopoulos et al., 1997). كمدخلات لها، تتطلب هذه النماذج حقول الأرصاد الجوية وبيانات الانبعاثات من قوائم جرد الانبعاثات واستخدام الأراضي وبيانات الطبوغرافيا من نظم المعلومات الجغرافية، بالإضافة إلى تركيزات الملوثات على الحدود (شروط الحدود). عادةً ما يتم توفير مجالات الأرصاد الجوية بواسطة معالج أولي للأرصاد الجوية، مثل نماذج التنبؤ العددي بالطقس (NWP). ونظرًا للتحديات المرتبطة بإنشاء قائمة جرد دقيقة وحديثة للانبعاثات، تظل الانبعاثات من بين أكبر مصادر غير المؤكدة في المدخلات.

10- التركيز بشكل أساسي على الميثان (CH_4) وأول أكسيد الكربون (CO) وأكاسيد النيتروجين (NO_x) وهيدروكربونات غير الميثان (NMHC) ومركبات الكلوروفلوروكربونات (CFC) ومركبات الكربون الهيدروفلورية (HFC) ومركبات الكربون الهيدروكلورية فلورية (HCFC) ومركبات الكبريت (SO_2، جزيئات الهباء الجوي، H_2S، DMS)، جنبًا إلى جنب مع آثارها المشتركة على تركيزات الأوزون (O_3) والقدرة المؤكسدة في الغلاف الجوي (لمحددة إلى حد كبير من خلال تركيزاتO_3، الهيدروكسيل (OH) وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)).

3.4.2.3. نماذج تلوث الهواء على النطاق المحلي إلى الإقليمي

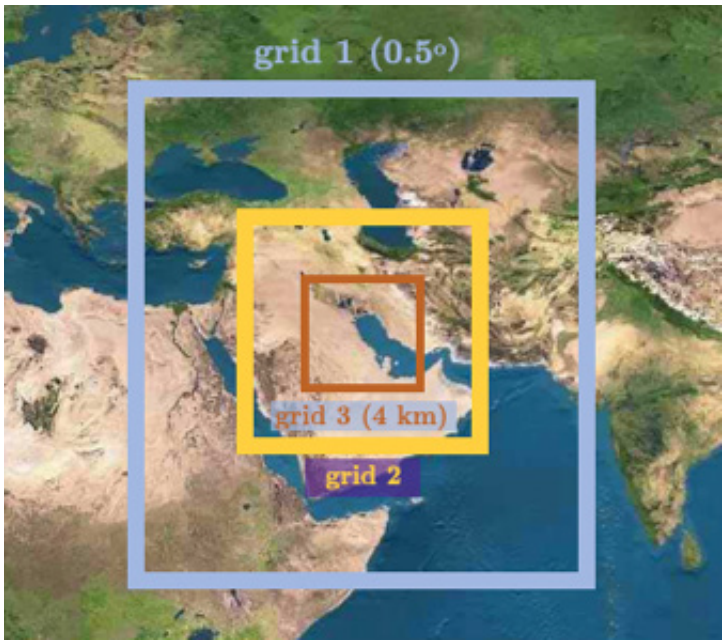
على المستوى المحلي إلى الإقليمي، أو الحضري، مقياس (1-300 كم)، فإن وصف مجال التدفق المضطرب الناتج عن التفاعلات المعقدة بين تدفق الطبقة الحدودية للغلاف الجوي والعقبات (مثل المباني)، يمثل تحديًا لنماذج التلوث على هذا النطاق (Salim, 2011; Easom, 2000; Lateb et al., 2016). قد تؤدي هذه التفاعلات إلى تهوية سيئة في أجزاء من المجال، مما يؤدي إلى حبس الملوثات، وفي الطرف الآخر قد يؤدي إلى تهوية قوية تؤدي إلى إزالة سريعة للملوثات. للحصول على نظرة عامة على هذه التفاعلات في المدن، النظر الى (Deck, 2005; Chang & Meroney, 2001; Easom, 2000; Lateb et al., 2016).

إن أحد الأساليب، وإن كان مكلفًا، لدراسة تشتت الملوثات في البيئة الحضرية هو إجراء قياسات في المجال بأكمله. وبدلاً من ذلك، يمكن استخدام النماذج شبه التجريبية المستندة إلى غوسي لحل المشاكل البسيطة للتدفق الثابت على أرض مسطحة بدون عوائق. وللحصول على تكوينات تدفق أكثر تعقيدًا، يتم استخدام نماذج جودة الهواء متوسطة الحجم (لاغرانجي وأويلريان) التي تحل المعادلات التي تحكم نقل الأنواع (EEA, 1998). تتطلب نماذج تلوث الهواء متوسطة الحجم عدة أنواع من مدخلات البيانات بما في ذلك البيانات الجغرافية وبيانات الأرصاد الجوية وبيانات الانبعاث. ويتم استخدام جميع أنواع مصادر الانبعاث (نقطة، خط، منطقة)، حيث يكون من الشائع دمج العديد من المصادر الصغيرة في مصدر منطقة واحدة. إذا تفاعلت الملوثات المنبعثة خلال النطاق الزمني المطلوب للدراسة، يتم استخدام وحدات كيميائية، تتراوح من تفاعل واحد بسيط (SO_2 إلى كبريتات) إلى تفاعلات كيميائية ضوئية أكثر تعقيدًا (الأوزون وأكاسيد النيتروجين).

تتراوح المسافات الشبكية في نماذج جودة الهواء المتوسطة عادة من 4 إلى 5 كيلومترات. مقارنة بنماذج المقياس الإقليمية (تباعد الشبكة بين 18 و100 كم)، حيث تتيح هذه الدقة المنخفضة للنماذج متوسطة الحجم التقاط تباين التركيز في المناطق ذات الانبعاثات الشديدة ودراسة تكوين الملوثات الثانوية (مثل الأوزون) عبر التفاعلات الكيميائية غير الخطية بدقة معقولة.

على الرغم من أن هذه الشبكة الدقيقة أمر بالغ الأهمية لمعالجة تكوين الملوثات غير الخطية في المدن وبالقرب من المصادر، إلا أن الشبكة الخشنة مقبولة في المناطق الريفية وبعيدة عن المصادر وتوفر مدخرات حسابية كبيرة. أدى ذلك إلى تطوير تقنية جديدة تسمى النمذجة المتداخلة و / أو متعددة النطاقات التي تتيح استخدام دقة الشبكة الدقيقة داخل المدن ودقة الشبكة خشنة في المناطق الريفية. كما تعتبر النماذج متعددة النطاقات (النماذج المتداخلة) من آخر ما توصل إليه العلم لنمذجة الملوثات عالية التفاعل.

علاوة على ذلك، يتم استخدامها على نطاق واسع لتوفير شروط حدودية لنماذج الدقة الدقيقة. وفي هذا الصدد، يمكن تطبيق عدة مستويات من التعشيش **(الشكل 7)**.



الشكل 7: يتضمن التداخل نشر المحلول بين شبكة خشنة (الشبكة 1) وشبكة دقيقة (الشبكة 2)، وبين الشبكة الدقيقة (الشبكة 2) والشبكة الدقيقة (الشبكة 3). حجم خلية الشبكة الخشنة مشابه لحجم الشبكة المستخدم في المحاليل المتزامنة (0.5 - 1 درجة). يمكن أن يصل حجم الشبكة في الشبكة الدقيقة إلى أقل من 3 كيلومترات.

تشمل نماذج تلوث الهواء المعروفة على نطاق واسع لمعالجة المشاكل على النطاق المحلي إلى الإقليمي HYPACT و UDM-FMI وDISPERSION وEURAD وUAM-V.

3.4.2.4. نماذج تلوث الهواء على النطاق المحلي

على نطاقات تتراوح من 1-1000 متر، تعتمد نماذج تلوث الغلاف الجوي على توزيع غوسي. هذه النماذج، التي تُستخدم على نطاق واسع للأغراض التنظيمية والتخطيطية، تطورت لتلبي إرشادات جودة الهواء الصارمة والمفصلة بشكل متزايد. استندت نماذج غاوسي المحلية الأولى إلى فئات Pasquill-Gifford التي تصنف الاضطرابات الجوية إلى ست فئات من الاستقرار. في الآونة الأخيرة، تم تطوير نماذج تستند إلى معلمات الطبقة الحدودية، وتستخدم هذه النماذج بيانات الأرصاد الجوية (مثل سرعة الرياح واتجاهها ودرجة الحرارة المحيطة) وخصائص السطح (مثل خشونة السطح ونسبة بوين Bowen ودرجة إشعاع البياض) لحساب بعض معلمات تحجيم طبقة الحدود الجوية (مثل سرعة الاحتكاك وطول Monin-Obukhov، مقياس سرعة الحمل الحراري، مقياس درجة الحرارة، كل من حدود الاختلاط المدفوعة بالقص والحمل الحراري). تُستخدم بعد ذلك معلمات القياس هذه لإنشاء ملفات تعريف تشابه درجة الحرارة والسرعة عبر طبقة حدود الغلاف الجوي.

تشمل نماذج تلوث الهواء المعروفة على نطاق واسع للمشاكل في النطاق المحلي AERMOD وUK-ADMS وOCD وISC3 و CTDMPLUS وCAR-FMI وCAL3QHC وOSPM وGRAL.

الوصف	محلي (1 – 1000 متر)	حضري/محلي إلى إقليمي (1 – 300 كم)[11]	إقليمي/قاري (25 – 10000 كم)	عالمي
نوع النموذج	نماذج غوسي؛ النماذج الإحصائية؛ نماذج الجسيمات لاغرانجي؛	نماذج غوسي؛ نماذج نقل المواد الكيميائية في أويلريان؛ نماذج الجسيمات لاغرانجي؛	نماذج نقل المواد الكيميائية في أويلريان؛ نماذج كيميائية لاغرانجي؛	نماذج أويلريان؛
علم الأرصاد الجوية	قياسات الأرصاد الجوية المحلية؛ نماذج حقل الرياح التشخيصية؛	نماذج الأرصاد الجوية متوسطة الحج؛ قياسات الأرصاد الجوية المحلية؛ نماذج حقل الرياح التشخيصية؛	نماذج الأرصاد الجوية الشاملة / متوسطة الحجم؛	نماذج الدوران العامة؛
PM_{10}	لا توجد عمليات كيميائية	ترسب جاف ورطب؛ تكوين الجسيمات غير العضوية الثانوية؛	ترسب جاف ورطب؛ تكوين الجسيمات الثانوية غير العضوية والعضوية؛	مثل الإقليمية القارية
$PM_{2.5}$	لا توجد عمليات كيميائية	ترسب جاف ورطب؛ تكوين الجسيمات غير العضوية الثانوية؛	ترسب جاف ورطب؛ تكوين الجسيمات الثانوية غير العضوية والعضوية؛	مثل الإقليمية القارية
NO_2	كيمياء مؤكسدة ضوئية بسيطة؛	ترسب جاف ورطب؛ كيمياء مؤكسدة ضوئية محدودة؛	ترسب جاف ورطب؛ كيمياء مؤكسدة ضوئية كاملة؛	مثل الإقليمية القارية
O_3	مثل NO_2؛	مثل NO_2؛	مثل NO_2؛	مثل NO_2؛
SO_2	لا توجد عمليات كيميائية	ترسب جاف ورطب؛ تكوين الجسيمات غير العضوية الثانوية؛	ترسب جاف ورطب؛ تكوين الجسيمات غير العضوية الثانوية؛ كيمياء مؤكسدة ضوئية كاملة؛	مثل الإقليمية القارية

الجدول 2: نوع النموذج، ومدخلات الأرصاد الجوية، والعمليات الفيزيائية/الكيميائية لتقييم جودة الهواء على مستويات مختلفة.

11- يمكن لبعض النماذج (مثل CMAQ) أيضًا معالجة $PM_{2.5}$ وNO_2 وO_3 وSO_2 والمكونات العضوية الثانوية مع تفاعلات كيميائية ضوئية كاملة على هذا المقياس.

04

4. نماذج جودة الهواء الحتمية

تم تطوير وتطبيق عدد من نماذج جودة الهواء في جميع أنحاء العالم في مجالات إدارة جودة الهواء والبحث في علوم الغلاف الجوي. تنقسم هذه النماذج بشكل أساسي إلى ثلاث فئات (Nguyen, 2014):

- تُستخدم نماذج التشتت عادةً لتقدير تركيز ملوثات الهواء في مواقع محددة (مستقبلات أو أهداف) بالقرب من مصادر الانبعاثات.
- تُستخدم النماذج الكيميائية الضوئية عادةً لدراسة تأثير مصادر الانبعاث عن طريق تقدير تركيزات الملوثات وترسب كل من الملوثات الخاملة والمتفاعلة كيميائيًا على نطاقات مكانية كبيرة.
- نماذج المستقبلات هي تقنيات مراقبة تستخدم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للغازات والجسيمات المقاسة عند المصدر والمستقبلات لتقدير مساهمة المصدر في تركيزات المستقبلات (توزيع المصدر).

4.1. نماذج التشتت

4.1.1. ما هي نماذج التشتت؟

تحل نمذجة التشتت رقميا المعادلات الرياضية التي تصف عمليات الغلاف الجوي لمحاكاة تشتت ملوثات الهواء الناشئة عن مصادر انبعاث مختلفة (مصادر خطية ونقطة ومنطقة) على المستويين المحلي والإقليمي (Luong, 2014; Irwin, 2014; Pan et al., 2014; Batterman et al., 2010)، مما يعطي تقديرًا كميًا دقيقًا لتأثير المصادر على توزيع التركيزات المكانية والزمانية (Gea et al., 2017).

4.1.2. لماذا تستخدم نماذج التشتت؟

بناءً على الانبعاثات ومدخلات الأرصاد الجوية، يمكن استخدام نموذج التشتت للتنبؤ بتركيزات الملوثات في مواقع مستقبلات الريح المختارة. على هذا النحو، يمكن استخدام نماذج التشتت لتحديد الامتثال للمعايير الوطنية لجودة الهواء المحيط. تُستخدم نماذج التشتت على نطاق واسع في تقييم مخاطر الآثار الخطرة لتلوث الهواء على البشر والبيئة (Van Leuken et al., 2016) وتقييم استراتيجيات التخفيف والسيطرة المحتملة. تشمل التطبيقات الأخرى لنمذجة التشتت ما يلي:

- تقييم الامتثال للانبعاثات مع المبادئ التوجيهية والمعايير، والمعايير للهواء النظيف
- تقييم الأثر البيئي للمصانع الجديدة
- تحديد الارتفاعات المناسبة للمداخن
- إدارة الانبعاثات القائمة الحالية
- تخطيط شبكات رصد الهواء
- تحديد المصادر الرئيسية لتلوث الهواء

4.1.3. أنواع نماذج التشتت

بناء على ما تم توضيحه في **الفصل 3**، هناك أنواع مختلفة من نماذج التشتت بمتطلبات محددة للمقاييس المكانية المختلفة وأوجه القصور فيما يتعلق بتشتت الجسيمات وديناميات الهباء ضمن تلك المقاييس. ونماذج التشتت الأكثر استخدامًا، والمقدمة في **3.3**، هي الصندوق وعمود غوسي ونفخة غوسي ونماذج أويلريان ولاغرانجي الأكثر تفصيلاً والتي يمكن تطبيقها لمحاكاة تركيزات ملوثات الهواء من مصادر انبعاث مختلفة (مصادر خط ونقطة ومنطقة) على المستويين المحلي والإقليمي.

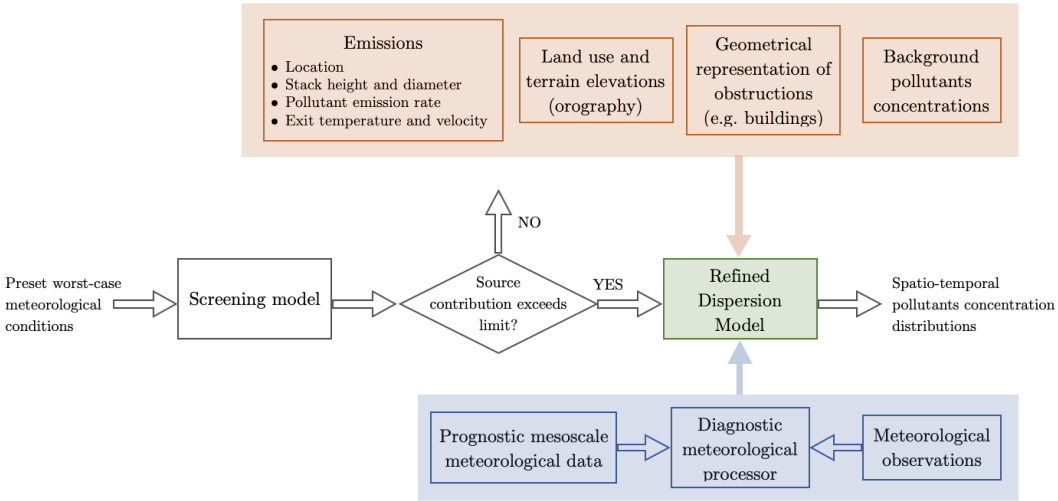
4.1.4. متطلبات بيانات الإدخال

تشمل مدخلات البيانات المطلوبة في نماذج التشتت (Turner, 1970; El-Harbawi, 2013):

- بيانات الأرصاد الجوية مثل سرعة الرياح واتجاهها، واستقرار الغلاف الجوي، ودرجة حرارة الهواء المحيط، وحد الاختلاط؛
- معلمات المصدر والانبعاثات بما في ذلك موقع المصدر وارتفاع المدخنة وقطرها وسرعة الخروج ودرجة حرارة الخروج ومعدل انبعاث الملوثات؛
- استخدام الأراضي وارتفاعات التضاريس في الموقع المستقبل ؛
- موقع وارتفاع وعرض أي عوائق في مسار عمود الغازات المنبعثة.
- تركيزات الملوثات المحيطة أو الخلفية

4.1.5. كيف يتم استخدام نماذج التشتت

في كثير من الحالات، يتم استخدام نموذج الغربلة أولاً لتوفير تقديرات متحفظة لتأثير جودة الهواء لمصدر معين (أو فئة مصدر) بافتراض ظروف أرصاد جوية أسوأ حالة محددة مسبقًا، كما هو موضح في مخطط التدفق في **الشكل 8**. يمكن أن يوضح هذا النموذج البسيط ما إذا كانت هناك حاجة إلى نمذجة أكثر تفصيلاً بناءً على ما إذا كانت مساهمة المصادر في التركيزات المحيطة تزيد أم لا عن معايير جودة الهواء أو زيادات التركيز المسموح بها. تتضمن نمذجة التشتت المفصلة حلًا رقميًا للقوانين التي تحكم العمليات الفيزيائية والكيميائية في الغلاف الجوي بمستوى أعلى من التفاصيل. تتطلب نماذج التشتت المكررة أيضًا بيانات إدخال أكثر تفصيلاً ودقة. ونتيجة لذلك، فإنها توفر تقديرًا أكثر دقة، وعلى الأقل من الناحية النظرية، أكثر دقة لتأثير المصدر وفعالية استراتيجيات التحكم (Nguyen, 2014).



الشكل 8: يتم استخدام نموذج الغربلة بشكل شائع لتقرير ما إذا كانت هناك حاجة إلى نموذج تشتت مُحسّن

عندما يشتمل التطبيق استخدام نماذج التشتت غير المستقر لتقييم النقل بعيد المدى أو للتقييمات حيث تكون رياح النقل معقدة، يتم تشجيع استخدام المخرجات من نماذج الأرصاد الجوية متوسطة الحجم. تم تصميم بعض معالجات الأرصاد الجوية التشخيصية بحيث تمزج بشكل مناسب ملاحظات الأرصاد الجوية القابلة للمقارنة المتاحة، ورصد الأرصاد الجوية المحلية الخاصة بالموقع، وبيانات الأرصاد الجوية المتوسطة النطاق، باستخدام العلاقات التجريبية، لضبط مجال الرياح تشخيصيًا للتأثيرات على النطاق المتوسط والمحلي. ويمكن في بعض الأحيان تحسين هذه التعديلات التشخيصية باستخدام ملاحظات الأرصاد الجوية الخاصة بالمواقع الموضوعة استراتيجيًا (Nguyen, 2014). يجب اختيار بيانات الأرصاد الجوية المستخدمة كمدخلات لنموذج التشتت على أساس التمثيل المكاني والزماني. لمزيد من المناقشة التفصيلية، يرجى الرجوع إلى Gea et al., 2017.

4.1.6. كيفية اختيار نموذج التشتت؟

لاختيار نموذج التشتت الأنسب لتطبيق أو سؤال معين، يجب مراعاة الاعتبارات التالية (Bluett et al. 2004; El-Harbawi, 2013):

- تعقيد التشتت (على سبيل المثال، تأثيرات التضاريس والأرصاد الجوية)
- المقياس والأهمية المحتملة للتأثيرات المحتملة، بما في ذلك حساسية البيئة المستقبلة (على سبيل آثار صحة الإنسان مقابل وسائل الراحة)
- نوع الملوثات (مثل الغاز والجسيمات والتفاعلية)

تمت مناقشة العديد من نماذج تشتت الهواء أو تطبيقها، كما أن عدم تجانسها يجعل من الصعب تحديد نهج واحد فوق الأساليب الأخرى. يتم عرض مقارنة بين نماذج التشتت المستخدمة على نطاق واسع في **الجدول 3** أدناه.

اختصار	الاسم الكامل	التطبيق	ثابت/غير مستقر	نوع النموذج	النطاق	الميزات الهامة	المطور / التحديث الأخير
ADMS	نظام نمذجة التشتت الجوي	الأغراض التنظيمية والامتثال للمدن الصغيرة وشبكات الطرق الريفية والمطارات والمصادر الصناعية	ثابت	نموذج غوسي مطور	تشتت المجال القريب (بضع مئات من الأمتار أو بضع كيلومترات)	النموذج الأكثر استخدامًا في المملكة المتحدة؛ حسابات لتأثيرات الانهيار للمباني المجاورة؛ تضمين تأثيرات التضاريس المعقدة؛	مستشاري كامبريدج للبحوث البيئية CERC (2020)
AERMOD	النموذج التنظيمي للجمعية الأمريكية للأرصاد الجوية/ وكالة حماية البيئة	تأثيرات المجال القريب من مجموعة متنوعة من أنواع المصادر الصناعية والمصادر المتنقلة	ثابت	نموذج عمود غوسي	قصير المدى (حتى 50 كم)	تفضل وكالة حماية البيئة نموذج التشتت للعديد من التطبيقات التنظيمية؛ يتعامل مع تأثيرات الملوثات في كل من التضاريس المستوية والمعقدة ضمن نفس إطار النمذجة؛ يعالج «عمود العلية»؛ يتتبع أي كتلة عمودية تخترق الطبقة المستقرة المرتفعة؛ يشمل الترسيب الجاف أو الرطب؛	جمعية الأرصاد الجوية الأمريكية / لجنة تحسين النموذج التنظيمي لوكالة حماية البيئة AERMIC (2021)

الجدول 3: ميزات وخصائص نماذج التشتيت المستخدمة على نطاق واسع

CTDM-PLUS	النموذج المحسن لتشتت التضاريس المعقدة	تشتت الملوثات في جميع ظروف الاستقرار للأراضي المعقدة في المناطق الريفية أو الحضرية للمصادر النقطية المرتفعة	ثابت	نموذج عمود غوسي	المدى القصير؛ مسافات النقل أقل من 50 كم	تم إدراجه كنموذج مفضل لدى وكالة حماية البيئة؛ يتضمن نسخة الفرز (CTSCREEN)؛ استخدم ارتفاع تبسيط التقسيم الحرج لفصل التدفق في محيط الهضبة إلى طبقتين منفصلتين	الولايات المتحدة - وكالة حماية البيئة (1993)
DISPER-SION21	نموذج تشتت الغلاف الجوي على النطاق المحلي	تقييم التأثيرات على جودة الهواء من المصادر الحالية أو المخطط لها بما في ذلك مصادر حركة المرور والمصانع.	ثابت	نموذج غوسي	المدى القصير؛ البعد الأفقي للمجال حتى 20 كم	يستخدم على نطاق واسع في السويد. يشمل ارتفاع عمود المياه وتأثيرات يقظة المبنى. كما أنها تمثل تغلغل العمود؛	المعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا SMHI
HGSY-STEM	نماذج التشتت للغازات المثالية وفلوراید الهيدروجين	تقييم الانطلاقات العارضة للمواد الكيميائية مع التركيز على السلوك الأكثر كثافة من الهواء (الغاز الكثيف)؛	ثابت / غير مستقر	نموذج عمود غوسي / نفخ غوسي	وصف المجال القريب (AEROPLUME, HFPLUME، HEGABOX) والمجال البعيد (HEGADAS, PGPLUME) لعملية التشتت؛	يتضمن أحدث خوارزميات التشتت للغازات الكثيفة ويعالج الكيمياء والديناميكا الحرارية لفلوريد الهيدروجين (HF)	شركة شل للأبحاث المحدودة ثورنتون (المملكة المتحدة) (1994)
ISC3	مجمع المصادر الصناعية	تركيزات الملوثات من مجموعة متنوعة من المصادر المرتبطة بمجمع صناعي لأغراض تنظيمية	ثابت	نموذج عمود غوسي	النطاق المحلي، قصير المدى (ISCST3) أو طويل المدى (ISCLT3)	يضع في الاعتبار ما يلي: التضاريس المعقدة والبسيطة، والتشتت الناجم عن الطفو، وارتفاع عمود الدوران كدالة لمسافة الريح؛ فصل المصادر النقطية، والانحلال الأسي وتعديل محدود للتضاريس؛ تحتوي النماذج على خوارزميات لنمذجة تأثيرات الغسيل العكسي الديناميكي الهوائي	الولايات المتحدة - وكالة حماية البيئة (2002)

الجدول 3: ميزات وخصائص نماذج التشتيت المستخدمة على نطاق واسع

OCD	نموذج التشتت البحري والساحلي	تأثير الانبعاثات البحرية والبرية من نقطة أو منطقة أو مصادر خطية على جودة الهواء في المناطق الساحلية؛	ثابت	نموذج غوسي	المدى القصير (حتى كيلومترات قليلة)	نموذج وكالة حماية البيئة المفضل؛ يشتمل على النقل فوق الماء؛ يضع في الاعتبار غسيل الأبنية وارتفاع عمود المياه؛ يعالج تشتت العمود فوق التضاريس المعقدة؛ دمج انعكاس عمود من التضاريس المرتفعة؛ حساب لإزالة الملوثات	الولايات المتحدة - وكالة حماية البيئة (2000)
OSPM	نموذج تلوث الشارع التشغيلي	محاكاة تلوث الهواء من حركة المرور في شوارع المدن	حالة ثابتة	نموذج عمود وصندوق مشترك	النطاق المحلي (حتى 30 كم)	يمكن استخدام النموذج للشوارع ذات المباني غير المنتظمة؛ يتم توفير التعبيرات المعتمدة على السرعة لعوامل الانبعاث الخاصة بالمركبة مع النموذج.	المعهد الوطني للبحوث البيئية، الدنمارك
UDM-FMI	نظام نمذجة التشتت الحضري - المعهد الفنلندي للأرصاد الجوية	تأثيرات المجال القريب من مجموعة متنوعة من أنواع المصادر الصناعية -؛ تأثير شبكة مصادر الخط (تلوث الطرق)	حالة ثابتة	نموذج غوسي	النطاق المحلي أبعاد المجال تصل إلى 50 * 50 كم	يشمل معالجة التحول الكيميائي (لثاني أكسيد النيتروجين)، والترسب الرطب والجاف (لثاني أكسيد الكبريت)، وارتفاع عمود الماء، وظواهر الانهيار وتشتت الجسيمات الخاملة	المعهد الفنلندي للأرصاد الجوية؛
CALPUFF	نموذج النفخ لكاليفورنيا (نموذج تلوث الشارع التشغيلي)	تأثيرات المجال القريب في التدفق المعقد (التضاريس المعقدة، النقل فوق الماء والظروف الساحلية، سرعة الرياح الخفيفة وظروف الرياح الهادئة)	غير مستقر	نموذج تشتت نفخ لاغرانجي	موازين من عشرات إلى مئات الكيلومترات	يتضمن خوارزميات لتأثيرات مقياس الشبكة الفرعية وكذلك التأثيرات طويلة المدى؛ يحتوي على وحدات للتأثيرات القريبة من المصدر، والغسيل العكسي للمباني، وارتفاع العمود الانتقالي، وتأثيرات التضاريس المعقدة، والنقل فوق الماء، وتأثيرات التفاعل الساحلي	مؤسسة أبحاث سيجما / هيئة تنظيم قطاع البيئة؛ (2020)

الجدول 3: ميزات وخصائص نماذج التشتيت المستخدمة على نطاق واسع

FLEXPART	نموذج تشتت الجسيمات المرنه	التشتت طويل المدى والمتوسط لملوثات الهواء من مصادر النقطة أو الخط أو المنطقة أو الحجم	غير مستقر	نموذج لاغرانجي	محلي إلى عالمي؛ يمكن استخدامه للمقاييس من عشرات الأمتار إلى عدة مئات من الكيلومترات	مجتمع مستخدم دولي كبير؛ يشمل التنقية تحت السحابة والتنقية في السحابة؛ حساب التفاعلات الكيميائية مع جذور الهيدروكسيل (OH)؛ تم تضمين روتين تعبئة الغبار	الفريق الدولي[12] (2019)
HYPACT	حزمة نقل الجسيمات الهجينة والتركيز	نمذجة التدفقات شديدة القص، وإعادة تدوير أنظمة الرياح الساحلية والجبلية / الوادية، وجزر الحرارة الحضرية، والتبخير بالعمود والتشعب؛	غير مستقر	مزيج من نموذج الجسيمات لاغرانجي ونموذج نقل التركيز أويلريان	من المستوى المحلي إلى النطاق الإقليمي؛ يمتد المجال من بضعة أمتار إلى مئات الكيلومترات؛	يقدم مزايا كبيرة بالقرب من منطقة مصدر للتتبع عندما يكون المصدر صغيرا ولا يمكن حله على شبكة أويلريان؛ وقد أضيفت مؤخرا معلمات ارتفاع عمود ومخطط ترسب جاف؛	جامعة ولاية كولورادو ASTeR، Incg. (2009)
HYROAD	نموذج الطريق الهجين	الانبعاثات الناتجة عن حركة المرور والتشتت؛ العمليات في ظروف الازدحام	ثابت	نموذج تشتت نفخ لاغرانجي	المدى القصير (ضمن 500 متر من التقاطع)	مدرجة كنماذج بديلة لوكالة حماية البيئة؛ لديها ميزات تعزز نمذجة انبعاثات حركة المرور؛ قادرة على العمل كغربلة ونموذج محسن لتحليل تشتت ثاني أكسيد الكربون	الولايات المتحدة - وكالة حماية البيئة (2002)
HYSPLIT	نموذج المسار المتكامل الهجين أحادي الجسيمات لاغرانجي	تحليل المسار الخلفي لتحديد أصل الكتل الهوائية؛ تتبع وتوقع انطلاق المواد المشعة ودخان حرائق الغابات وغبار الرياح والملوثات	غير مستقر	هجين بين نموذج لاغرانجي ونموذج أويلريان	نطاقات محلية إلى عالمية	أحد أكثر نماذج النقل والتشتت في الغلاف الجوي استخدامًا؛ تشمل الترسب الرطب والجاف والاضمحلال الإشعاعي؛ دمج خوارزمية انبعاث العاصفة الترابية؛ دمج وحدات التحويل الكيميائي غير الخطية لمحاكاة الأوزون (O_3)؛	الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (2021)

الجدول 3: ميزات وخصائص نماذج التشتيت المستخدمة على نطاق واسع

12- جامعة ميونيخ، ألمانيا. جامعة العلوم الزراعية، فيينا، النمسا. المعهد المركزي للأرصاد الجوية والديناميكا الجيولوجية، فيينا، النمسا. القوات المسلحة النمساوية

SCIPUFF	نموذج النفخ مدمج للإغلاق من الدرجة الثانية	نمذجة تشتت عمود محطة توليد الطاقة تقييم التأثيرات الإشعاعية المصاحبة لحوادث المفاعلات النووية	غير مستقر	نموذج نفخ غوسي	النطاق الحضري: نطاقات تصل إلى 1000 كيلومترات؛	SCIPUFF هو مكون نمذجة التشتت الجوي لاثنين من أنظمة التنبؤ بالمخاطر التابعة لوزارة الدفاع الأمريكية. يستخدم خطوات زمنية تكيفية وشبكات مكانية تكيفية	شركة تيتان، قسم تيتان للأبحاث والتكنولوجيا (2020)
Caline3	نموذج مصدر خط كاليفورنيا	توقع تركيزات ملوثات الهواء في مواقع المستقبلات في اتجاه الريح من الطرق السريعة الواقعة في تضاريس غير معقدة نسبيًا	ثابت	نموذج عمود غوسي	تقدير مستويات تلوث الهواء في حدود 500 م من الطرق	نموذج بديل لوكالة حماية البيئة الأمريكية؛ يتطلب مدخلات قليلة نسبيًا؛ مرونة أكبر من حيث تعقيد مدخلات المستخدم؛ وقت حسابي صغير	قسم النقل بكاليفورنيا (CALTRANS) (1989)
CAL3QHC	نموذج مصدر خط كاليفورنيا مع قدرات إضافية	انبعاثات النماذج من المركبات التي تقف في طابور عند التقاطعات؛ تقدير إجمالي تركيزات ثاني أكسيد الكربون من كل من المركبات المتحركة والعاطلة	حالة ثابتة	نموذج غوسي	تشتت المجال القريب (في غضون بضع مئات من الأمتار)	أوصت به وكالة حماية البيئة الأمريكية؛ معتمد من قبل كل من مجلس موارد الهواء في كاليفورنيا ووكالة حماية البيئة لنمذجة ثاني أكسيد الكربون أو تركيزات الملوثات الخاملة الأخرى من المركبات ذات المحركات عند تقاطعات الطرق؛ يتضمن خوارزمية حركة المرور لتقدير عدد المركبات المصطفة عند التقاطع؛	قسم النقل بكاليفورنيا (CALTRANS) (2013)
CAR-FMI	الملوثات في الهواء من الطريق، المعهد الفنلندي للأرصاد الجوية	تقييم تشتت الغلاف الجوي والتحول الكيميائي من شبكة من المصادر الخطية في النطاق المحلي	حالة ثابتة	نموذج غوسي	نموذج النطاق المحلي؛ أبعاد المجال: حتى 10 كم	يشتمل على نموذج انبعاث ونموذج تشتت وتحليل إحصائي للسلسلة الزمنية المحسوبة للتركيزات وواجهة مستخدم رسومية قائمة على Windows؛ يتم تضمين الترسب الجاف في معالجة الجسيمات؛ تم اختبار النموذج على نطاق واسع مقابل نتائج شبكات القياس الحضرية	المعهد الفنلندي للأرصاد الجوية (FMI)

الجدول 3: ميزات وخصائص نماذج التشتيت المستخدمة على نطاق واسع

4.2. النماذج الكيميائية الضوئية

4.2.1. ما هي النماذج الكيميائية الضوئية؟

النماذج الكيميائية الضوئية هي نماذج لجودة الهواء واسعة النطاق تحاكي التغيرات في تركيزات الملوثات في الغلاف الجوي باستخدام مجموعة من المعادلات الرياضية التي تميز العمليات الكيميائية والفيزيائية في الغلاف الجوي. يتم تطبيق هذه النماذج على مستويات مكانية متعددة، بما في ذلك المقاييس من المحلية والإقليمية والوطنية والعالمية (US EPA, 2017). تتضمن أمثلة نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية RADM و UAM وREMSAD وCAMx وCMAQ (Nguyen, 2014) (Kukkonen et al., 2012).

4.2.2. لماذا تستخدم النماذج الكيميائية الضوئية؟

تُستخدم نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية على نطاق واسع للتحليل التنظيمي وإثبات بلوغ الهدف[13] من خلال تقييم فعالية استراتيجيات التحكم.

كان التطبيق الرئيسي للنموذج الكيميائي الضوئي في تقييم الأهمية النسبية للمركبات العضوية المتطايرة (Chen et al. 2013) وضوابط أكاسيد النيتروجين في تقليل مستويات الأوزون[14] ونمذجة ترسب الحمض وعلاقته بانبعاثات ثاني أكسيد الكبريت، على نطاقات تتراوح من الحضرية إلى الإقليمية (Gea et al., 2017).

4.2.3. أنواع النماذج الكيميائية الضوئية

يوجد نوعان من نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية المستخدمة بشكل شائع في تقييمات جودة الهواء: نموذج مسار لاغرانجي ونموذج أويلريان. وتتشابه خصائصها العامة مع نظيراتها المشتتة.

يتبع نموذج لاغرانجي مسارات الطرود (أو الأعمدة) حيث يتم تحديدها بواسطة سرعة الرياح المحلية وتخضع للانتشار والتفاعلات الكيميائية (Gea et al., 2017). ونظرًا لكونها فعالة من الناحية الحسابية، استخدمت الدراسات المبكرة نهج لاغرانجي لمحاكاة تكوين الملوثات (US EPA, 2017). وكما تمت مناقشته في القسم **3.3.3**، تواجه طرق لاغرانجي صعوبة في النمذجة الدقيقة لجميع عمليات الغلاف الجوي الفيزيائية والكيميائية.

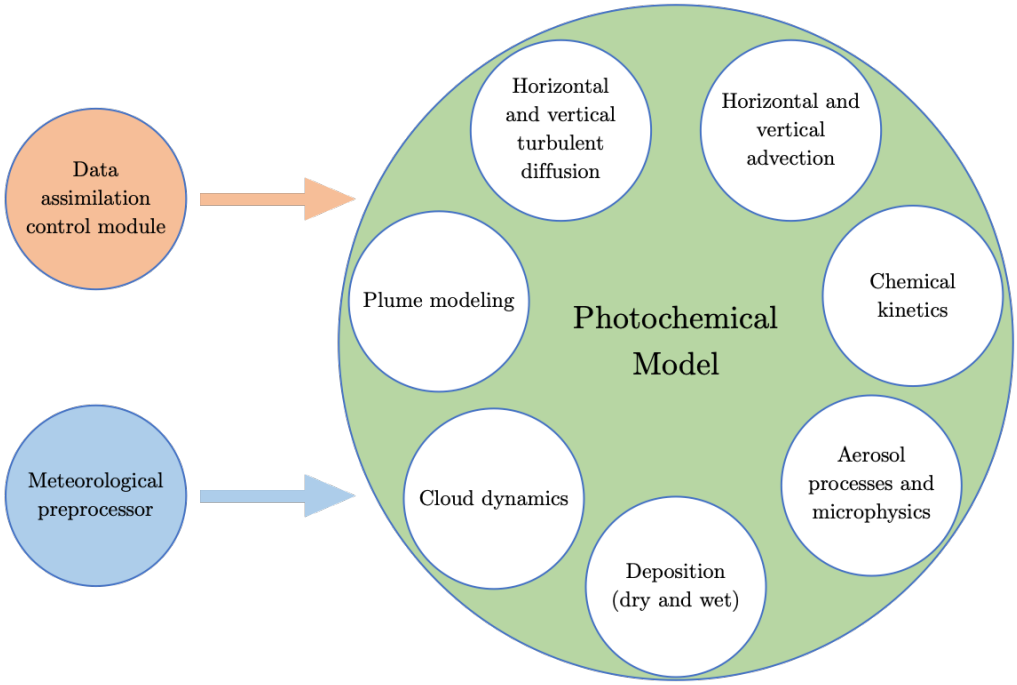
لهذا السبب، تستخدم معظم نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية التشغيلية الحالية نهج شبكة أويلريان ثلاثية الأبعاد نظرًا لقدرتها على حساب هذه العمليات بدقة وبشكل كامل، وبالتالي ، توقع مجالات تركيز الملوثات في مجال الدراسة بأكمله. يقوم نموذج شبكة أويلريان بنماذج رقمية لعمليات النقل على شبكة ثابتة ثلاثية الأبعاد تمثل مجال الدراسة، ويتم محاكاة جميع التفاعلات الكيميائية في كل خلية في كل خطوة زمنية.

13- يوضح إثبات بلوغ الهدف أن المعيار قد تم تحقيقه بأسرع ما يمكن عمليًا في منطقة معينة قبل تاريخ التحصيل المحدد لتصنيفه.

14- لا ينبعث O_3 مباشرة ولكنه يتكون من تفاعلات غير خطية NO_x وVOC_s

4.2.4. مكونات النموذج الكيميائي الضوئي وعملياته

تحت الغطاء، يجب أن يشتمل النموذج الكيميائي الضوئي على العمليات الرئيسية، (كما هو معروض في **الشكل 9**) ، والتي تساهم في التوزيعات المكانية والزمانية لتركيزات الملوثات (Kukkonen et al., 2012).



الشكل 9: العمليات الرئيسية في النماذج الكيميائية الضوئية.

4.2.4.1. مكونات النموذج الكيميائي الضوئي وعملياته

يشير التأفق إلى حركة أنواع الملوثات من خلال مجال سرعة الرياح المتوسطة، بينما يتضمن الانتشار خلطًا مضطربًا على نطاق الشبكة الفرعية للملوثات، مما يقلل بشكل فعال من تركيز الملوثات بسبب التخفيف. تتضمن بعض المتطلبات الرئيسية لخطط العرض الأفقي لحفظ الكتلة المحلية والعالمية، والحد الأدنى من اللزوجة العددية، والاستقرار العالي، والكفاءة العددية العالية (Kukkonen et al., 2012). ومن بين هذه المتطلبات، يُعدّ حفظ الشامل أمرًا بالغ الأهمية في النماذج الكيميائية الضوئية.
عندما لا تكون بيانات الأرصاد الجوية المدخلة ومخطط التأفق العددي غير متسقة مع الكتلة، يجب استخدام مخطط حفظ الكتلة. وفي مثل هذا المخطط ، يتم حساب مكون السرعة الرأسية في كل شبكة عن طريق حل معادلة الاستمرارية باستخدام السرعات الأفقية للأرصاد الجوية ومدخلات كثافة الهواء.

يُعتبر اختيار خوارزميات التأفق العددي أمرًا بالغ الأهمية لسرعة ودقة النموذج الكيميائي الضوئي خاصةً لعمليات المحاكاة طويلة المدى (Chock & Winkler, 1994). على هذا النحو، يجب اختبار هذه الخوارزميات في ظل ظروف مختلفة (Russel & Dennis, 2000).

4.2.4.2. لانتشار المضطرب الأفقي والعمودي

يتم تحديد النقل المضطرب في تطبيقات الغلاف الجوي من خلال التفاعلات المعقدة بين ظروف الأرصاد الجوية والتضاريس (الاضطراب الميكانيكي) والتسخين النهاري المحلي للأرض مما يؤدي إلى تيارات عمودية صعودية وهبوطية (اضطراب الحمل الحراري). ولاستكمال الخصائص الطبوغرافية الإجمالية، تم تصميم مقاييس «خشونة» السطح لتحديد خصائص السطح وفقًا لفئات استخدام الأراضي. يتم تعيين قيم صغيرة جدًا للماء أو الجليد الناعم، وقيم أعلى بشكل متزايد للأراضي العشبية والأراضي الزراعية والمناطق السكنية والمراكز الحضرية/الصناعية، بشكل عام، وكلما كان السطح أكثر خشونة، زاد الاضطراب المحلي (Russel, 1997). وبالنسبة لاضطراب الحمل الحراري، تتميز التيارات الصاعدة والهابطة بالتدفقات الشمسية الواردة وخصائص السطح مثل البياض. خلال الأيام المشمسة، يسود اضطراب الحمل الحراري، وتتميز طبقة الحدود الجوية بخلط عمودي قوي.

تتميز عمليات الخلط في التدفقات المضطربة بمجموعة واسعة من امتدادات الخلط المرتبطة بتحلل الدوامات المتتالية. ومن أجل حل جميع مقاييس المدى في مجال الاهتمام بشكل مباشر، يتطلب الحل العددي لمعادلات Navier-Stokes شبكة دقيقة للغاية بحيث تكون التكلفة باهظة، خاصة بالنسبة للتدفقات الجوية. ولتقليل التكلفة، يتم استخدام النماذج المضطربة لمحاكاة التدفقات عدديًا على شبكات ذات حجم معقول.(Russel & Dennis, 2000) ، تسمى التفاعلات المضطربة التي يتم حلها بواسطة الشبكة بالمقياس الشبكي وتلك التي تعمل على نطاقات أصغر تسمى مقاييس الشبكة الفرعية. من الطرق الشائعة لوصف التفاعلات على نطاق الشبكة الفرعية ما يسمى بالإغلاق المضطرب المستخدم لحل معادلات الاضطراب (Boussinesq,1877). وعلى وجه الخصوص، يقارب الإغلاق من الدرجة الأولى أي كمية مضطربة للشبكة الفرعية (عددية أو ناقلة) باستخدام القيم المتوسطة للمتغيرات التابعة والمستقلة فقط.

يمكن تطبيق الإغلاق من الدرجة الأولى محليًا (كما هو الحال في نظرية K ونظرية الخلط) أو غير محلي (كما في نظرية الاضطراب العابر). في منهجية نظرية K، يتناسب التدفق المضطرب لأي متغير مع تدرج المتغير المتوسط المرتبط، حيث يكون ثابت التناسب وهو انتشار الدوامة. في هذا النهج، يتم تحديد موتر انتشار الدوامة (لكميات المتجهات) كدالة لفئة الاستقرار الجوي وخلط الارتفاع باتباع بعض المعلمات. ومع ذلك، فإن نظرية K صالحة فقط على مسافات قصيرة ولا يمكنها محاكاة نقل التدرج المضاد، والذي يمكن أن يكون مهمًا في الطبقات المختلطة ذات الحمل الحراري العالي. تم تنفيذ طرق الإغلاق غير المحلية مثل نظرية المصفوفة العابرة والنموذج الحراري غير المتماثل، في بعض تطبيقات النمذجة الكيميائية الضوئية لالتقاط الخلط المحسن من سحب الحمل الحراري بشكل أفضل.

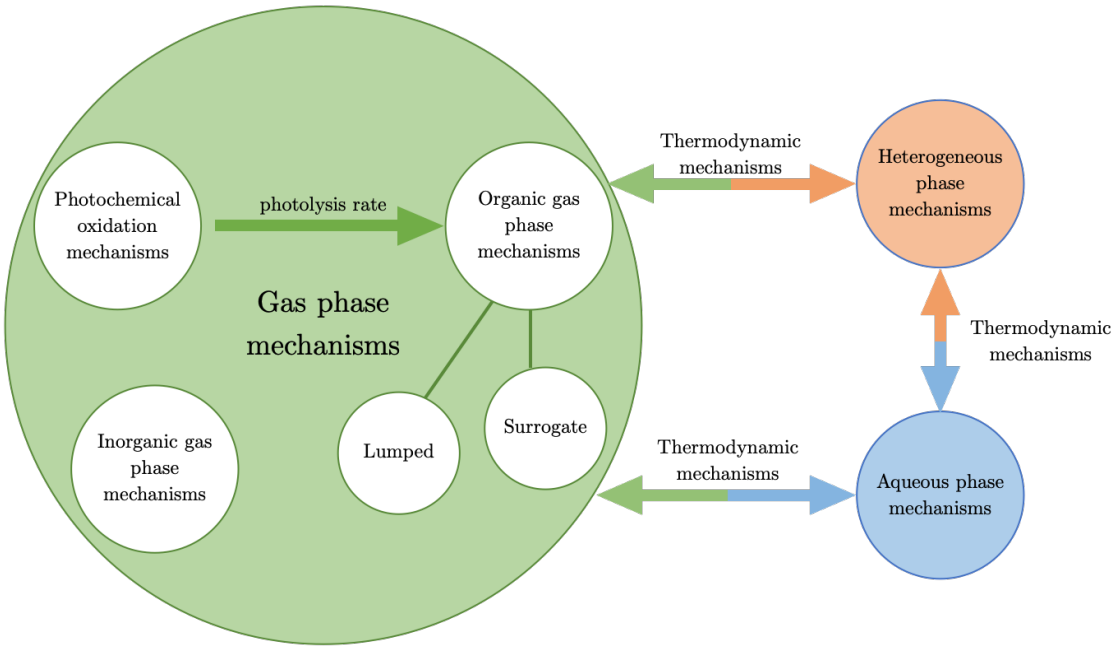
اقترح Smagorinski (1963) صيغة مفيدة للزوجة الدوّامية في النماذج العددية، بناء على المشتقات المحلية لسرعة الرياح ودقة النموذج، ولا يزال يستخدم من قبل العديد من نماذج ديناميكيات الغلاف الجوي لنمذجة الانتشار الأفقي (Kukkonen et al., 2012). بما في ذلك ALADIN-CAMx وSKIRON / Dusta وFARMg وCAMx-AMWFGg وCAMx-MM5g. وفي المقابل يستخدم CHIMERE -MM5 وCAMx-MM5g مخطط طبقة الحدود الكوكبية للتنبؤ متوسط المدى (MRF PBL). كما يعتمد الانتشار الأفقي في نموذج CMAQ على خوارزمية تعتمد على حجم الشبكة تجمع بين نهج Smagorinsky 1963 ومصطلح لتقليل الانتشار العددي (Byun and Schere, 2006). اما بالنسبة للانتشار العمودي، يتم استخدام مخطط الانتشار K على نطاق واسع (Kukkonen et al., 2012).

4.2.4.3. ديناميكيات السحاب

يعتبر أحد التحديات الرئيسية التي تواجه النماذج الكيميائية الضوئية لجودة الهواء هو احتساب السحب، والتي يؤثر وجودها بشكل كبير على ديناميكيات انتقال الملوثات، خاصة على المستوى الإقليمي. كما لا يزال التنبؤ بتكوين السحب وديناميكياتها يمثل تحديًا، حتى مع استخدام نماذج أرصاد جوية تنبؤية متقدمة يمكنها استيعاب الملاحظات. وفي نموذج جودة الهواء الكيميائي الضوئي، تعمل وحدة السحب عمومًا على تقدير توزيع الماء العمودي، والتساقط، والحركة العمودية في سحب الحمل الحراري (Russel, 1997).

4.2.4.4. الكيمياء الحركية

تعد كيمياء الغلاف الجوي مكونًا رئيسيًا لأي نموذج كيميائي ضوئي، وعدد المركبات والتفاعلات الكيميائية أكبر من أن يتم دمجها في النموذج. وعلى هذا النحو، فإن عمليات التبسيط التي تشمل المركبات والعمليات الرئيسية ضرورية لنموذج جودة الهواء ميسور التكلفة حسابيًا. ويعتمد اختيار المخطط الكيميائي على المقايضة بين التعقيد والتكلفة والأسئلة التي يجب الإجابة عليها (Kukkonen et al., 2012).



الشكل 10: الآليات الكيميائية.

يمكن تصنيف الآليات الكيميائية بناءً على المراحل المعنية: آليات مرحلة الغاز المتجانس، وآليات مرحلة السائل (المائي)، وآليات مرحلة غير المتجانسة (Russel, 1997). (انظر **الشكل 10**). تشتمل آليات مرحلة الغاز المتجانس على كلاً من الكيمياء العضوية وغير العضوية، حيث نماذج مرحلة الغاز غير العضوي راسخة ومضمنة في جميع النماذج الكيميائية الضوئية. تم تطوير آليات مرحلة الغاز العضوي المبسط بشكل أساسي لدراسة تكوين O_3 وNO_2 في الضباب الدخاني الكيميائي الضوئي ولترسب الحمض.

تستخدم معظم نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية (على سبيل المثال، SAPRC-90; RADM/RACM) آلية مرحلة الغاز العضوي التي تكتل معظم الأنواع العضوية بناءً على النوع الجزيئي (أي تلك التي لها بنية وتفاعلية متشابهة) (Russel, 1997). يجب أن تتضمن نماذج جودة الهواء التي تهدف إلى التنبؤ بتركيز الأوزون إحدى آليات الأكسدة الكيميائية الضوئية للمركبات العضوية المتطايرة VOC_s من أجل تقييم معدلات التحلل الضوئي. وتتوفر آليات الأكسدة بمستويات مختلفة من التفاصيل والمعاملات (Kukkonen et al., 2012). بالإضافة إلى ذلك فإن كيمياء مرحلة الغاز المتجانس، يمكن أن تكون الكيمياء غير المتجانسة مهمة، خاصة لترسب الحمض وتكوين الهباء الجوي (Kukkonen et al., 2012).

نماذج جودة الهواء (على سبيل المثال، ADOM وRADM وSTEM-II) التي تهدف إلى نمذجة تطور الهباء الجوي و/أو ترسب الحمض أو التحميض / التخثث، خاصة في الحالات التي يوجد فيها ضباب و/أو غيوم، تنفذ الآليات الكيميائية للمرحلة المائية. يمكن أن تشمل هذه الآليات ما يصل إلى 100 نوع و200 تفاعل. ومع ذلك، يتم دمج أعداد كبيرة من الأنواع والتفاعلات في نماذج جودة الهواء بسبب التكلفة الحسابية الباهظة (Nguyen, 2014).

يجب أن تتضمن نماذج جودة الهواء التي تأخذ في الاعتبار مراحل متعددة في نفس الوقت إلى آلية ديناميكية حرارية من أجل حساب انتقال الكتلة بين المراحل (Russel, 1997). يستخدم مخطط التوازن الديناميكي الحراري ISORROPIA في معظم الآليات الكيميائية.

تم تجهيز النماذج الكيميائية الضوئية الحديثة لجودة الهواء بمترجم آلي يتيح التبديل بين الآليات. يوضح **الجدول رقم 4** أدناه النماذج الفرعية الكيميائية المختلفة (Kukkonen et al., 2012) المستخدمة من قبل نماذج التنبؤ بالطقس الكيميائي الرائدة، والتي يتم تقديمها في أوراق Excel المرفقة.

نموذج فرعي كيميائي	نموذج كيميائي ضوئي	التعليقات
CBM-IV	CAMx, CMAQ, Enviro-HIRLAM, LOTOS-EUROS, OPANA, RCG, SILAM	33 مركبا؛ 81 تفاعل
RADM2	CAMx, CHEM, CMAQ, Enviro-HIRLAM, EURAD, OPANA, WRF-Chem	36 مركبا؛ 156 تفاعل
RACM	Enviro-HIRLAM, EURAD, MOCAGE	77 مركبا؛ 214 رد فعل
MELCHIOR	CHIMERE	80 مركبا؛ 320 تفاعل (يمكن استخدامها مع آلية مخفضة)
SAPRC99-	CAMx, CMAQ, FARM, OPANA	80 مركبا؛ 214 تفاعل
NWP-Chem	Enviro-HIRLAM	17 مركبا؛ 27 تفاعل مرحلة الغاز
UNI-OZONE	EMEP model, MATCH (EMEP-MSC-W)	71 مركبا؛ 123 تفاعل

الجدول 4: النماذج الفرعية الكيميائية المستخدمة في النماذج الضوئية لجودة الهواء.

4.2.4.5. عمليات الهباء الجوي والفيزياء الدقيقة

تختلف ديناميكيات الهباء الجوي عن ديناميكيات الملوثات الغازية لأنها تتضمن بعمليات فيزيائية مختلفة تؤثر على توزيع حجم الهباء الجوي. تشمل هذه العمليات التنوي (الالتقاء في النواة) والتكثيف والتبخر والتخثر والترسب. ومن ثم فإن الهباء الجوي يتطلب معالجة خاصة في النماذج الكيميائية الضوئية. سيتم توضيح عمليات الهباء الجوي والفيزياء الدقيقة بمزيد من التفصيل في **القسم 6.1.**.

4.2.4.6. الترسب

الترسب هو العملية التي يتم من خلالها إزالة الملوثات من الغلاف الجوي وترسبها على التربة والغطاء النباتي (مما يؤدي إلى التحمض) أو في المسطحات المائية (مما يسبب على سبيل المثال زيادة المغذيات العضوية). يمكن أن تؤدي المحاسبة غير الدقيقة للترسب إلى المبالغة في التنبؤ بمستويات تلوث الغلاف الجوي (Kukkonen et al., 2012, Wesely & Hicks, 2000) بالإضافة إلى قلة التنبؤ بتنبؤات التلوث على مستوى الأرض. ويعتبر الترسب الجاف والرطب من المكونات الرئيسية للدراسات البيئية طويلة المدى أو برامج التقييم (مثل برنامج EMEP).

4.2.4.6.1. الترسب

الترسب الجاف هو عملية من خطوتين: الخطوة الأولى هي العملية الميكانيكية التي يتم من خلالها نقل الملوث إلى سطح الأرض والخطوة الثانية هي التفاعل الكيميائي بين الملوث والسطح. في نموذج كيميائي ضوئي، يتميز الترسب الجاف عمومًا بسرعة حدوثه كما استعرضها (Wesely & Hicks, 2000)، محددًا إذ يتطابق منتجها مع التركيز المرجعي (عند ارتفاع مرجعي) مع تدفق الأنواع على الأرض. كما إن سرعة الترسيب الجاف هي دليل على ثلاث مقاومات نقل هي: المقاومة الديناميكية الهوائية في الطبقة المضطربة (بشكل أساسي مستقل عن الأنواع)، والمقاومة في الطبقة الفرعية للسائل الرقائقي القريبة من السطح (تعتمد على انتشار الغاز)، ومقاومة السطح (وظيفة تقارب السطح للأنواع المنتشرة).

4.2.4.6.2. الترسب الرطب ومعالجة المطر والضباب والسحب

الترسب الرطب هو عملية يتم من خلالها تنظيف جزيئات الهباء الجوي عن طريق قطرات المطر المتساقطة و / أو جزيئات الثلج (تنقية الترسب)، أو كشطها في قطرات السحب أو بلورات الجليد السحابية (التنقية في السحب). يمكن أن تمتص قطرات المطر والضباب والسحب الغازات وتلتقط أو تتشكل على جزيئات الملوثات وتعزز التفاعلات الكيميائية. على هذا النحو، يعتبر الترسب الرطب وسيلة فعالة لتطهير الغلاف الجوي من الملوثات.

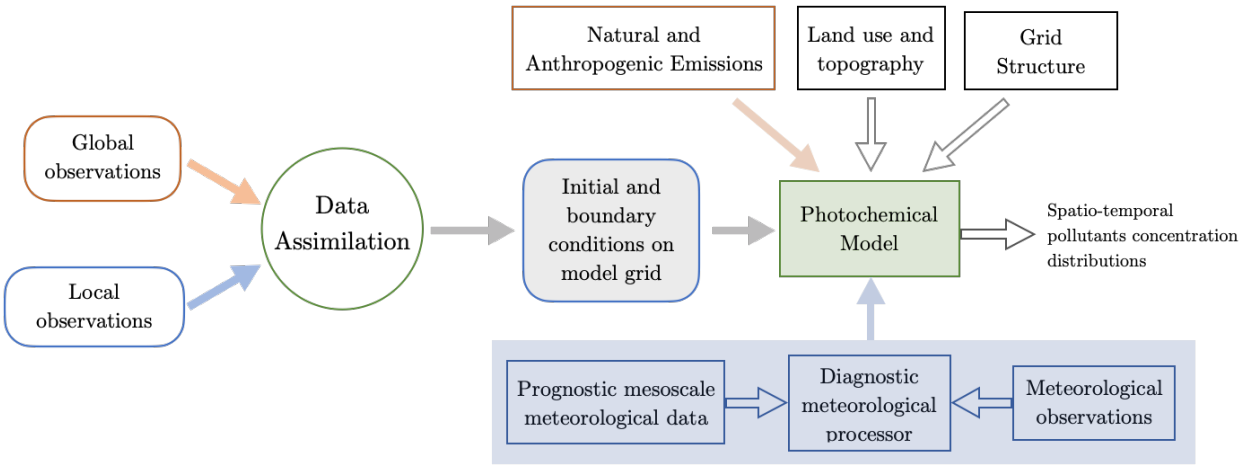
تتطلب النمذجة الدقيقة لعملية الترسب الرطب تمثيلًا دقيقًا لتوزيع حجم قطرات الماء وبلورات الجليد في السحب، بالإضافة إلى النمذجة الدقيقة لعمليات النقل التي تتفاعل من خلالها الجسيمات مع السحب. يتم توفير هذه المعلومات بشكل عام من خلال نماذج الأرصاد الجوية، والتي تتحسن بمرور الوقت من حيث يقين تنبؤاتها (Nguyen, 2014).

4.2.4.7. نمذجة العمود

تعتبر إحدى التقنيات القوية لحل الميزات الدقيقة (على سبيل المثال في المناطق الحضرية) دون تكبد تكلفة حسابية عالية في استخدام التداخل. في نمذجة جودة الهواء، تسمح الشبكات المتداخلة في النهج المستندة إلى شبكة أويلريان باستخدام شبكة خشنة نسبيًا مناسبة لحل تركيز الملوثات في المناطق (مثل المناطق الريفية) حيث لا تظهر مثل هذه التركيزات اختلافات مكانية كبيرة، أثناء استخدام شبكة دقيقة لتحديد المناطق (مثل المناطق الحضرية) حيث تكون هذه الاختلافات كبيرة. ومع ذلك، لا يزال هناك تحدي النمذجة الدقيقة للتلوث من المصادر المركزة، مثل محطات الكهرباء، في المنطقة التي تغطيها الشبكة الخشنة (Russel & Dennis, 2000). تتمثل إحدى الطرق الفعالة لمواجهة هذا التحدي في تضمين نموذج عمود في نموذج شبكة أويلريان (تسمى عادةً نماذج plume-in-network أو PiG)، مما يسمح بتحليل العمليات الفيزيائية والكيميائية بالمقاييس المناسبة بالقرب من مصدر الملوث. بعد تخفيف العمود بشكل كافٍ، يتم خلط الملوثات في الشبكات المناسبة (Russel & Dennis, 2000). وقد تم تطوير عدد قليل من نماذج العمود واستخدامها في النماذج الكيميائية الضوئية، وكان أحد النماذج الأولى هو نموذج PARIS الذي تم استخدامه في نموذج Airshed Model (UAM).

4.2.5. متطلبات بيانات الإدخال

تتطلب نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية الإقليمية عادةً الفئات التالية من المدخلات: **(1)** الأرصاد الجوية، **(2)** الانبعاثات، **(3)** التضاريس، **(4)** تركيزات المركبات الجوية المرصودة، و**(5)** هيكل الشبكة (Russel, 1997) **(الشكل 11)**.



الشكل 11: إدخال البيانات إلى نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية

4.2.5.1. مدخلات الأرصاد الجوية

تتحكم مدخلات الأرصاد الجوية في النماذج الكيميائية الضوئية، والتي تتكون من السرعة بالساعة ودرجة الحرارة والرطوبة وعمق الخلط ومجالات العزل الشمسي، في نقل الملوثات ومعدلات التفاعل الكيميائي وتدفق الترسب (Luong, 2014). ويتم توفير هذه المدخلات وغيرها من المدخلات التي قد يتطلبها نموذج جودة الهواء الكيميائي الضوئي، مثل البيانات السحابية (محتوى الماء السائل، وحجم القطرة، وما إلى ذلك) والانتشار العمودي، من خلال نماذج أرصاد جوية تشخيصية غير هيدروستاتيكية مقترنة ببيانات رباعية الأبعاد الاستيعاب (Russel 2003).

4.2.5.2. مدخلات الانبعاثات

يعد الوصف الدقيق لمدخلات الانبعاثات إلى نموذج ضوئي كيميائي لجودة الهواء ضروريًا للنموذج للتنبؤ بدقة لاستجابة توزيعات تركيز الملوثات. يجب أن تكون مدخلات الانبعاثات (Nguyen, 2014) متوافقة مع التفاعلات الكيميائية المستخدمة في النموذج، وأن يتم حلها بشكل كافٍ في الزمان والمكان وممثلة بشكل كافٍ على الشبكة.

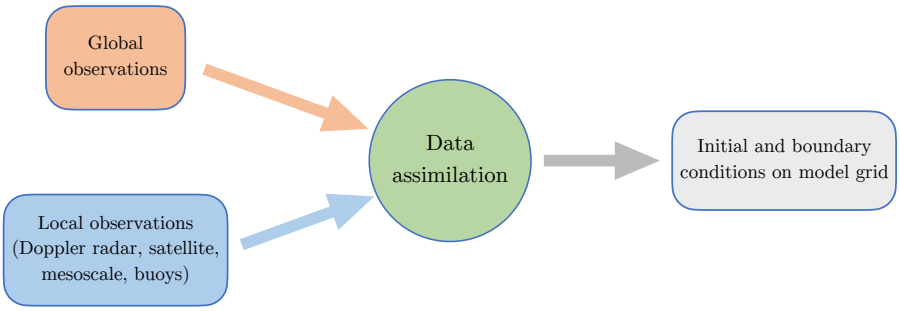
يوجد فئتان من الانبعاثات تحتاجان عمومًا إلى توصيفهما لإدخالهما في نماذج جودة الهواء وهما الانبعاثات الطبيعية والانبعاثات البشرية المنشأ. تنبعث الملوثات مثل PM، والمركبات العضوية المتطايرة غير المثانية، NO_x، والأمونيا، وCH_4 وSO_2 وCO من مصادر طبيعية مثل الغبار المنبعث من الرياح وجزيئات ملح البحر والتربة والحيوانات والنباتات والغابات. إن الانبعاثات البشرية هي تلك التي ينتجها النشاط البشري بما في ذلك المصانع وحركة المرور والمصادر المنزلية. يعتبر الوصف الدقيق للانبعاثات البشرية المنشأ أمرًا أساسيًا لتقييم التأثير البشري على جودة الهواء والبيئة، خاصة في المجالات التي تحتوي على مناطق مأهولة بالسكان (Kukkonen et al., 2012) (Russell and Dennis, 2000). في حين يتم وصف الانبعاثات البشرية المنشأ من المرافق والأنشطة الصناعية الرئيسية بشكل جيد، ويتم تمثيل الانبعاثات الطبيعية والبشرية الأخرى، والعضوية بشكل أساسي، يتم تمثيلها بشكل خشن بسبب الصعوبة الكامنة في جمع بياناتها. على هذا النحو، تظل الانبعاثات أحد المصادر الرئيسية غير المؤكدة في المدخلات لنماذج جودة الهواء.

تحتوي قوائم جرد الانبعاثات، بحسب طريقة بنائها، على بيانات تمثل مجال الاهتمام بدرجات متفاوتة من التفاصيل، من الناحيتين المكانية والزمانية. ومن أجل استخدامها كمدخلات متوافقة مع نموذج جودة الهواء، يتم استخدام معالج انبعاث لتعيين جرد الانبعاثات إلى شبكة نموذج جودة الهواء. إن المعالج المستخدم على نطاق واسع، والذي يدمج خوارزميات المصفوفة المتناثرة عالية الأداء، هو نظام نمذجة انبعاث نواة مشغل المصفوفة المتفرقة (SMOKE). ويتيح نظام SMOKE، الذي يمكن استخدامه للتطبيقات الحضرية والإقليمية على حد سواء، التنبؤ بجودة الهواء ويخدم كأداة مهمة لاتخاذ القرار بشأن التحكم في انبعاثات الهواء (Nguyen, 2014; Gea et al., 2017).

كما يتم حساب الانبعاثات الطبيعية، وخاصة جزيئات الغبار وملح البحر، في الغالب من نماذج الانبعاثات مثل MEGAN (نموذج انبعاثات الغازات والهباء الجوي من الطبيعة) (Kukkonen et al., 2012). وسيتم توضيح آليات ونماذج انبعاث الغبار في **الفصل 6**.

4.2.5.3. الشروط الأولية والحدودية الجانبية

توجد حاجة إلى تركيزات المركب المرصودة لتحديد الظروف الأولية والحدودية لمحاكاة نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية.



الشكل 12: يُستخدم تجميع البيانات لتحويل الملاحظات من مصادر مختلفة إلى الشروط الأولية والحدودية.

للوصول إلى التوزيعات الميدانية الأولية للمتغيرات التابعة، يتم تقريب الملاحظات المجمعة عالميًا ومحليًا على الشبكة بطريقة متسقة ماديًا ومتوازنة، باستخدام مناهج استيعاب البيانات (Kukkonen et al., 2012)، مثل طرق Kalman filter والطرق التغييرية ثلاثية الأبعاد (3DVAR) ورباعية الأبعاد (4DVAR) (Kalnay, 2003). **(الشكل 12)** يشيع استخدام استيعاب البيانات الآن في نماذج التنبؤ التشغيلي ونماذج التقييم الإقليمية لجودة الهواء.

بالإضافة إلى الشروط الأولية، فإن شروط الحدود مطلوبة للنماذج الضوئية الكيميائية لجودة الهواء في المجالات المحدودة. عادةً ما يتم استيفاء البيانات الموجودة على الحدود في الوقت المناسب من إخراج نموذج أكبر حجمًا، مثل النموذج العالمي، المتاح كل 3 أو 6 ساعات.

4.2.5.4. الطبوغرافيا

تعد بيانات الطبوغرافية أساسية للنمذجة الدقيقة للتلوث القريب من الأرض لأنه يؤثر على كل من نقل الملوثات وترسبها.

4.2.5.5. بنية الشبكة

يتم تحديد اختيار بنية الشبكة والمدى العمودي لمجالات الدراسة من خلال التطبيق المعين ومستوى التفاصيل المطلوبة للإجابة بشكل مناسب على الأسئلة، مثل الدقة المكانية والزمانية المرغوبة والمركبات الكيميائية المتبعة والتفاعلات الكيميائية المرتبطة بها. وعادةً ما تتطلب المجالات الأصغر حجم أصغر للشبكة أفقيًا (حوالي 1-20 كم) ولكنها لا تمتد إلى طبقة الستراتوسفير.
تستخدم نطاقات النطاق الإقليمية أو القارية حجمًا أكبر للشبكة أفقيًا (10-50 كم)، ولكنها قد تمتد عموديا على طول الطريق حتى الطبقة السفلى من الستراتوسفير (Kukkonen et al., 2012).

4.2.6. تقييم أداء النماذج الكيميائية الضوئية

يمكن استخدام العديد من الإجراءات والمقاييس الإحصائية لتقييم أداء النموذج الكيميائي الضوئي عبر التطبيقات والمقاييس والمدخلات المختلفة. إن الهدف الرئيسي من هذه الإجراءات والمقاييس هو إطلاع المنظمين على متانة النموذج وموثوقيته، وتحديد ومعالجة نقاط الضعف في النموذج (Emery et al, 2017).

اقترحت وكالة حماية البيئة الأمريكية (US EPA) منهجًا رباعي المستويات لتقييم أداء النموذج الكيميائي الضوئي (Dennis et al, 2010): **(1) «تشغيلي»**، حيث تتم مقارنة نتائج النموذج من الناحية الكمية بالبيانات المقاسة باستخدام مجموعة متنوعة من المقاييس الإحصائية؛ **(2) «ديناميكي»**، حيث يتم تحليل مخرجات النموذج لاضطرابات مختلفة للمدخلات الرئيسية؛ **(3) «تشخيصي»**، حيث يتم تحليل كل عملية داخل النموذج على حدة؛ و **(4) «احتمالي»**، حيث يتم تقييم ثقة النموذج الإجمالية داخل نظام ensemble[15].

عادة ما تكون النماذج الكيميائية الضوئية مصحوبة بتقييم كمي لأداء النموذج التشغيلي باستخدام مقاييس إحصائية مختلفة. تم تقديم المقاييس الإحصائية لتقييم الأداء النموذجي المستخدمة عبر 69 دراسة للنمذجة الكيميائية الضوئية المنشورة في أمريكا الشمالية في(2012) .Simon et al . إن المقاييس الأكثر استخدامًا هي متوسط التحيز المعياري (خطأ موقّع) ومتوسط الخطأ المعياري (غير موقع) ومعامل الارتباط. قام Emery et al. (2017) بوضع معايير للأوزون و$PM_{2.5}$ لهذه المقاييس الإحصائية الثلاثة للمقاييس المكانية والزمانية المختلفة. يمكن استخدام هذه المعايير لتحديد مكان وقوع النتائج في طيف النتائج المنشورة السابقة وبالتالي لتقييم أداء النموذج الكيميائي الضوئي لبعض التطبيقات.

4.2.7. كيفية اختيار نموذج كيميائي ضوئي

تشترك نماذج جودة الهواء الكيميائية الضوئية، التي تتنبأ بتوزيعات التركيزات المكانية والزمانية للملوثات عن طريق حل قوانين الحفظ التي تحكم نقلها، في العديد من القواسم المشتركة. للمساعدة في اختيار نموذج جودة الهواء الكيميائي الضوئي المناسب لتطبيق معين، يوضح **الجدول رقم 5** النماذج الأكثر استخدامًا إلى جانب خصائصها وميزاتها.

15- يقوم نظام ensemble على دمج نتائج النموذج من عدد من النماذج المختلفة لجودة الهواء. عادة ما يعطي أداءً أفضل من منتجات النماذج الفردية.

الاسم	التطبيق	نوع النموذج	النطاق	الميزات الهامة	المطور
CAMx	إسناد المصدر، والحساسية، وتحليلات العمليات؛ استراتيجيات التحكم في انبعاثات خفض الأوزون؛	نموذج شبكة أويلريان متعدد النطاقات، ثلاثي الأبعاد؛ شبكة متداخلة ثنائية الاتجاه؛	متعدد النطاقات من الحضري إلى الإقليمي؛ حجم الشبكة من 1 إلى 1000 كم؛	أربع آليات ذات مراحل غازية: CB05 CB6r2hg و CB6r4g و SAPRC07TC؛ تضمين العديد من "أدوات التحقيق" لدراسات التشخيص والحساسية؛ 16 نوعًا كيميائيًا من الهباء الجوي؛	مؤسسة ENVIRON International
CMAQ	يحاكي الأوزون، والجسيمات (PM)، والملوثات السامة المحمولة في الهواء، والرؤية، والأنواع الحمضية والملوثات المغذية في جميع أنحاء طبقة التروبوسفير؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد بقدرات متداخلة	متعدد النطاقات: من الحضري إلى نصف الكرة الأرضية؛	يمكن محاكاة كيمياء مرحلة الغاز باستخدام الآليات الكيميائية الضوئية CB05 أو SAPRC-99 أو RADM2؛ يمكن للمستخدمين المتقدمين تعديل الآليات الكيميائية الضوئية الموجودة، أو حتى إضافة آليات جديدة؛ يتم تمثيل PM باستخدام ثلاثة أنماط أو توزيعات فرعية لوغاريتمية طبيعية؛ يتضمن وحدة تحليل العملية (PA) التي تتعقب الكتلة في جميع العمليات الفردية (ردود الفعل، والتأفق ، والانتشار، وما إلى ذلك)	الوكالة الأمريكية لحماية البيئة
UAM-V	دراسات جودة الهواء التي تركز على الأوزون؛ تقييم التغييرات في جودة الهواء من سيناريوهات التحكم في الانبعاثات؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد متعدد الطبقات مع تداخل شبكي متعدد الاتجاهين؛	النطاقات الحضرية إلى الإقليمية؛ تتراوح أحجام الشبكة من 4 إلى 50 كم؛	CB-IV-TOX: امتداد للإصدار الرابع من آلية رابطة الكربون (CB-IV) لحل الخواص الحركية الكيميائية؛ يتم تعيين توزيع كتلة الهباء الجوي على ثمانية صناديق تلقائيًا عند تهيئة النموذج (نهج قطاعي)؛ تضمين امتدادات تحليل العملية ومعدلات التفاعل المتكاملة؛	تطبيقات النظم الدولية (SAI)؛
REMSAD	يحاكي الكيمياء ونقل وترسب الملوثات المحمولة جواً مع التركيز على الجسيمات (PM)؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد مع إمكانية التداخل في اتجاهين؛	من النطاق الإقليمي إلى القاري؛ مساحة الشبكة: 10-80 كم	آليتان ضوئيتان كيميائيتان: CB-V و "micro-CB" (نسخة مختصرة من CB-V)؛ معالجة مفصلة للهباء العضوي الثانوي (SOA) وتحسين الأداء في ظل ظروف الأرصاد الجوية الراكدة.	تطبيقات النظم الدولية (SAI)؛

الجدول 5: ميزات وخصائص النماذج الكيميائية الضوئية المستخدمة على نطاق واسع,

الاسم	التطبيق	نوع النموذج	النطاق	الميزات الهامة	المطور
Enviro-HIRLAM	التنبؤ بالطقس الكيميائي؛ نمذجة تغير المناخ؛ التلوث الناجم عن الانفجارات البركانية والعواصف الرملية والترابية وعواقب الانفجارات النووية	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد هيدروستاتي متكامل عبر الإنترنت مع إمكانات التداخل؛	متعدد النطاقات: النطاقات الإقليمية إلى الحضرية؛ الدقة المثلى 2.5 كم؛	أربع آليات لكيمياء مرحلة الغاز: RADM2g و NWP-Chem CBMZg و RACM؛ أربع وحدات ديناميكية للهباء الجوي: MADEg Modal CAC و SALSAg Sectional MOSAIC؛ يضع في الحسبان جميع الفيزياء الدقيقة للهباء الجوي	المعهد الدانمركي للأرصاد الجوية بالتعاون مع عدة جامعات أوروبية؛
EURAD	توقع نوبات واتجاهات تلوث الهواء؛ دراسة سيناريوهات خفض الانبعاثات؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد بقدرات متداخلة	نموذج من المناطق الحضرية إلى الإقليمية؛ حجم الشبكة الأفقية عادة من 2-80 كيلومتر مربع	ثلاث آليات لكيمياء مرحلة الغاز: RADM2 و RACMg Euro-RADM؛ خياران لنموذج ديناميكيات الهباء الجوي: SORGAMg MADE؛	معهد الجيوفيزياء والأرصاد الجوية
FARM	تحليل النوبات والتحقيق في عمليات تكوين الملوثات وتراكمها؛ تحليل السيناريوهات وتأثيرات السياسات الإقليمية للتحكم في الانبعاثات؛ توقعات التلوث في المواقف المعقدة	نموذج شبكة أويلريان ثلاثي الأبعاد؛	النطاقات الحضرية إلى الإقليمية؛ يتراوح حجم الشبكة عادة بين 500 م و 50 كم	آليتان لكيمياء مرحلة الغاز: نسخة محدثة من الآلية الكيميائية حمض EMEP أو SAPRC-99؛ خياران لديناميات الهباء الجوي: aero3 أو aero0؛ تشمل نماذج ISORROPIA و SORGAM الديناميكا الحرارية للهباء الجوي	ARIANET
LOTOS-EUROS	نمذجة الملوثات (المؤكسدات الضوئية، الهباء الجوي، المعادن الثقيلة) على التنبؤ بجودة الهواء في أوروبا؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد؛	من النطاق الإقليمي إلى القاري؛ الدقة الأفقية القياسية: 0.5 × 0.25 درجة (خط الطول)	آليتان كيميائيتان: مخطط TNO CBM-IV وCBM-IV بواسطة Adelman؛ مخطط الحجم مع عدة نطاقات حجم غير متفاعلة لتمثيل الهباء الجوي؛ تم تجهيز النموذج بحزمة استيعاب البيانات بتقنية مرشح مجموعة Kalman	معاهد TNO RIVMg وKNMIg: وكالة التقييم البيئي الهولندية PBL؛الدولية (SAI)؛

الجدول 5: ميزات وخصائص النماذج الكيميائية الضوئية المستخدمة على نطاق واسع,

الاسم	التطبيق	نوع النموذج	النطاق	الميزات الهامة	المطور
MATCH	دراسات كيمياء طبقة التروبوسفير والأوزون على مستوى الأرض؛ دراسات ترسب الكبريت على المقاييس القارية؛ تقييمات ترسب مفصلة بدقة أفقية أعلى (5 كم) في المناطق؛	نموذج أويلريان متعدد النطاقات ثلاثي الأبعاد غير متصل بالإنترنت؛	النطاق الأفقي الحضري إلى القاري؛ دقة أفقية بين 1 و 50 كم	تمديد كيمياء نموذج EMEP MSC-W؛ مخطط الحجم مع عدة نطاقات حجم غير متفاعلة لتمثيل الهباء الجوي؛ يتم تضمين التوازن بين الجسيم ومرحلة الغاز؛	المعهد السويدي للأرصاد الجوية والهيدرولوجيا (SMHI)؛
CHIMERE	التنبؤات اليومية بالأوزون والهباء الجوي وغيرها من الملوثات؛ عمليات المحاكاة طويلة الأجل لسيناريوهات التحكم في الانبعاثات؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد متعدد المقاييس غير متصل بالإنترنت	لنطاق الحضري إلى الإقليمي؛ مناطق أفقية من 50-5000 كم؛ دقة أفقية من 1-100 كم	يمكن تضمين آليتين كيميائيتين في مرحلة الغاز: MELCHIOR1 و MELCHIOR2 ؛ مخطط الهباء الجوي المقطعي مع 6 صناديق بحجم (كل حاوية مختلطة داخليًا) ؛ تم تضمين جميع العمليات الفيزيائية الدقيقة. تؤخذ في الاعتبار تشكيلات الأيروسولات العضوية الثانوية؛	IPSL / LISA / INERIS؛
MOCAGE	التنبؤ بالطقس الكيميائي؛ التتبع والتعقب الخلفي للإطلاقات العرضية المصدر النقطي؛ تقييم التلوث عبر الحدود؛	نموذج ثلاثي الأبعاد متعدد المقاييس شبه لاغرانجي	النطاقات الإقليمية إلى العالمية؛ دقة الشبكة العالمية النموذجية 2 ° × 2 ° درجة ودقة الشبكة الإقليمية 0.5 ° × 0.5 ° درجة	المخطط الكيميائي المستخدم هو RACMOBUS؛ يتم وصف الهباء الجوي باستخدام نهج مجمّع مع صناديق ذات حجم (نموذجيًا من 5 إلى 20 حاوية لكل نوع)؛	الأرصاد الجوية الفرنسية

الجدول 5: ميزات وخصائص النماذج الكيميائية الضوئية المستخدمة على نطاق واسع,

الاسم	التطبيق	نوع النموذج	النطاق	الميزات الهامة	المطور
OPANA	دراسات تقييم تأثير جودة الهواء للحصول على إذن من الحكومة لتركيب مختلف محطات الطاقة والمحارق ذات الدورة المركبة؛ أنظمة التنبؤ في الوقت الحقيقي على المدن والمناطق؛ دراسة حساسية تدفقات الترسب الجاف	نموذج متوسط الحجم غير هيدروستاتي ثلاثي الأبعاد.	النطاقات الحضرية إلى الإقليمية؛ أبعاد المجال: 10-500 كم؛ الدقة الأفقية: 1 - 10000 م؛	آلية كيميائية CBM-IV قصيرة وطويلة؛ تم أيضًا تضمين نموذج RADM والمخطط الكيميائي SAPRC-99؛ مخطط Modal بثلاثة أوضاع وجميع الفيزياء الدقيقة؛	مجموعة البرمجيات البيئية والنمذجة، كلية علوم الحاسوب، جامعة تكنيكآل مدريد (إسبانيا)
SILAM	محاكاة الحلقات أو الفترات طويلة للتنبؤ التشغيلي ودراسة سيناريوهات الانبعاثات؛ يحسب الاحتمالات في الوضع «المعكوس» للنموذج؛	نموذج هجين أوليريان ولاغرانجيان؛	محاكاة عالمية وإقليمية (عدة آلاف من الكيلومترات) ومتوسطة النطاق (50-200 كيلومتر)؛ تباعد الشبكة حتى 1 كم؛	الآلية الكيميائية الرئيسية في المرحلة الغازية هي CBM-4؛ مخطط السائبة ADB (وضع بحث Aerosol Dynamics Basic فقط) مخططات؛ كلا المخططين يستخدمان مجموعة الصناديق المعرفة من قبل المستخدم.	المعهد الفنلندي للأرصاد الجوية (FMI)؛
WRF-Chem	نمذجة انبعاث ونقل وخلط وتحويل كيميائي للغازات النزرة والهباء الجوي في وقت واحد مع الأرصاد الجوية؛ التنبؤ بالطقس الكيميائي؛	نموذج أوليريان المتكامل ثلاثي الأبعاد عبر الإنترنت مع إمكانات التداخل؛	نموذج متوسط الحجم تشغيل بشكل روتيني بدقة عالية من 1-4 كم تباعد الشبكة	العديد من الخيارات للآليات الكيميائية ذات المرحلة الغازية بما في ذلك الآليات الكيميائية RADM2 و RACM و CB-05 و CBM-Z؛ إعطاء خيارات لنماذج الهباء الجوي: لنماذج ثلاثة نماذج Modal (MADE / SORGAM MADE / VBS)، نموذج مقطعي واحد الهباء الجوي (MOSAIC) ونموذج حجم الهباء الجوي من GOCART	NOAA / ESRL؛
EMEP Unified Model	نمذجة التحمض عبر الحدود، التخثر، الأوزون على مستوى الأرض والجسيمات ($PM_{2.5}$، PM_{10})؛ نمذجة الأوزون العرضي قصير الأجل والأوزون طويل الأجل (موسم النمو)؛	نموذج أويلريان ثلاثي الأبعاد؛	من النطاق الإقليمي إلى القاري؛ الدقة الأفقية: 50x50 كم؛	اثنين من الكيميائيات القياسية، UNI-ACID وUNI-OZO؛ يصف نموذج الهباء الجوي EMEP (UNI-AERO)) الانبعاثات، والتحول الكيميائي، والديناميكيات، والنقل، والترسب الجاف والرطب للهباء الجوي.	المعهد النرويجي للأرصاد الجوية؛

الجدول 5: ميزات وخصائص النماذج الكيميائية الضوئية المستخدمة على نطاق واسع.

4.3. نماذج المستقبلات

على عكس نماذج التشتت، تحدد نماذج المستقبلات[16] وتقيس المساهمات من مصادر التلوث المختلفة (تخصيص المصدر) من خلال تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للملاحظات في مواقع المستقبلات (Watson et al., 2002). يمكن أن تكون المستقبلات ثابتة (داخلية أو خارجية) أو تتبع الأنشطة البشرية. نظرًا لأنها حساسة للقياسات، تتطلب نماذج المستقبلات قياسات في العديد من مواقع المستقبلات وعلى مدى فترة زمنية تمثيلية. هذه النماذج أيضاً حساسة جدًا للمسافة بين المصدر والمستقبل، نظرًا لأن دور عمليات الغلاف الجوي يكون أكبر بالنسبة للمسافات الأكبر (Nguyen, 2014).

تستخدم نماذج المستقبلات أدوات إحصائية لربط الانبعاثات بالملاحظات، وإن كانت تلتزم بتوازن الكتلة. إن نماذج المستقبلات الأكثر استخدامًا هي موازنة الكتلة الكيميائية (EPA-CMB)، وEPA-Unmix، وعامل المصفوفة الإيجابي (PMF) (Gea et al., 2017)، يمكن الاطلاع على الميزات الرئيسية لنماذج المستقبلات الثلاثة في (Nguyen, 2014).

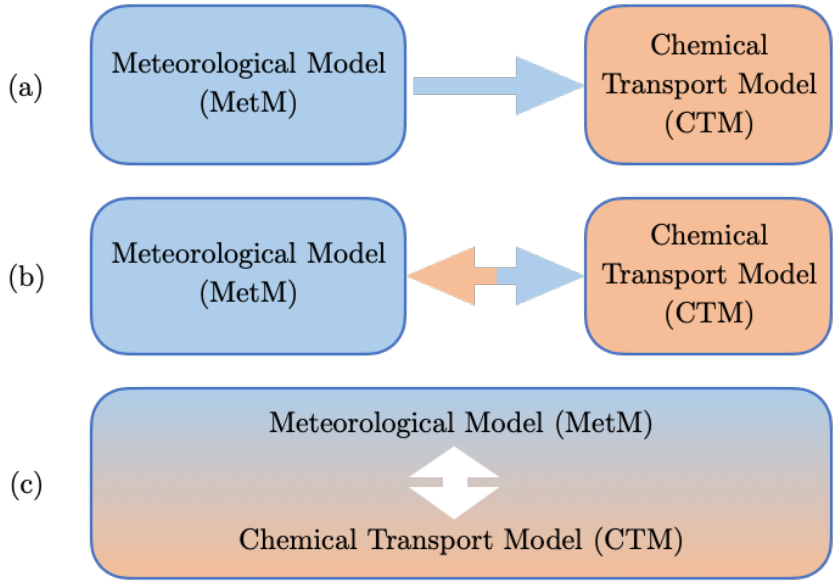
تشمل الدراسات البارزة التي تستخدم نماذج المستقبلات تحقيق Liu et al (2015a, 2015b). لمصادر ومساهمات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، والتي مكنت لاحقًا من تحديد أخطار الإصابة بالسرطان لكل مصدر من خلال دمج قيم مخاطر الإصابة بالسرطان مدى الحياة (ILCR). واستخدمت دراسة أخرى نماذج PMF لتقييم ILCR المرتبط بمصادر الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات المرتبطة بجسيمات $PM_{2.5}$ (Callén et al. 2014). Heo et al.) حيث استخدموا نموذج مستقبلات PMF لتقييم العلاقة بين $PM_{2.5}$ والوفيات في سيول، كوريا (Gea et al., 2017).

تشمل الاتجاهات الواعدة الحديثة في البحث حول تقسيم المصدر خلط التشتت ونمذجة المستقبلات.

16- تعد نماذج تشتت «المصدر» ونماذج «المستقبلات» مكملة وليست تنافسية (Nguyen, 2014).

5. التنبؤ الكيميائي بالطقس

يستلزم التنبؤ الكيميائي بالطقس (CWF) التنبؤ بالتركيب الكيميائي للغلاف الجوي على المدى القصير (أقل من أسبوعين). إن تنبؤات الطقس الكيميائية هي نتيجة اقتران نموذج الأرصاد الجوية (MetM)، الذي يقدر توزيع الخصائص الفيزيائية الحرارية (مثل السرعة ودرجة الحرارة والضغط والرطوبة)، مع نموذج النقل الكيميائي للغلاف الجوي (CTM) الذي تفسر تطور الملوثات من مصادر الانبعاث لأنها تخضع للحمل الحراري والخلط والتفاعلات الكيميائية والترسب (Kukonnen et al., 2012).



الشكل 13: (A) النموذج غير المتصل بالإنترنت، (B) النموذج النفاذ عبر الإنترنت، و (C) النموذج المتكامل عبر الإنترنت.

يمكن أن يكون الاقتران بين MetM وCTMg إما غير متصل بالإنترنت أو عبر الإنترنت (Baklanov et al., 2014)، كما هو موضح في **الشكل 13**. في النمذجة غير المتصلة بالإنترنت، يكون الاقتران في اتجاه واحد، حيث تكون البيانات المترولوجية من الأرصاد الجوية السابقة فيتم استخدام المعالج كمدخل إلى CTM. ويمكن أن تكون بيانات الأرصاد الجوية في شكل قياسات و / أو نتيجة نموذج تشخيصي أو نموذج تشغيل للتنبؤ العددي بالطقس (NWP) (Baklanov et al., 2014). على عكس النماذج غير المتصلة بالإنترنت، يكون الاقتران في نموذج عبر الإنترنت بين نموذجين MetM وCTMg ثنائي الاتجاه. هناك نوعان من نماذج CWF عبر الإنترنت: النماذج المتكاملة عبر الإنترنت ونماذج الوصول عبر الإنترنت. في نموذج الوصول عبر الإنترنت، يكون الاقتران بين MetM و CTM عبارة عن تبادل ثنائي الاتجاه عبر واجهة نموذج على أساس منتظم ومتكرر. لا يتم مشاركة جميع جوانب النموذج الأخرى، مثل الشبكة وخطوة الوقت، بين النموذجين (Mathur et al., 2010). ومن ناحية أخرى، تحسب النماذج المتكاملة عبر الإنترنت حقلي خصائص الأرصاد الجوية والكيميائية عن طريق حل نظام المعادلات المزدوجة التي تحكم القوانين الفيزيائية والكيميائية المرتبطة بها في وقت واحد، على شبكة الحفظ واستخدام نفس الخطوة الزمنية العالمية (Baklanov et al., 2014). بالإضافة إلى المزايا التي يوفرها الاتساق في التمثيل العددي في المكان والزمان، تعد النماذج المتكاملة أكثر ملاءمة لنمذجة آليات التغذية الراجعة مثل الهباء الجوي والتأثير الغازي على عمليات الغلاف الجوي.

وعلى الجانب الآخر، يعتبر الاقتران غير المتصل بنماذج الأرصاد الجوية وجودة الهواء أكثر مرونة، وله تكلفة حسابية أقل وهو أكثر ملاءمة لمجموعة متنوعة من الدراسات (مثل المجموعات والأنشطة التشغيلية، والنمذجة العكسية، وتحليل سيناريوهات الانبعاثات، وإدارة جودة الهواء) (Korsholm, 2008).

كما هو مذكور أعلاه، فإن NWP ليس مهمًا فقط لتوفير تنبؤات دورية بالطقس، ولكنه يعمل أيضًا كعنصر رئيسي في نماذج جودة الهواء، بما في ذلك تلك المستخدمة في CWF. إن معظم نماذج NWP المستخدمة حاليًا تنبؤية، وغير هيدروستاتيكية[17]، وتستخدم تباعدًا أفقيًا للشبكة يقل عن 10 كم، وتستخدم كإحداثي رأسي لتنسيق الضغط أو إحداثيات تتبع التضاريس. بينما تقدر النماذج التشخيصية مجالات الأرصاد الجوية عن طريق الاستيفاء، مع مراعاة بعض قيود الحفظ، والقياسات المتاحة، تتنبأ النماذج التنبؤية بهذه المجالات من خلال حل نظام المعادلات المزدوجة التي تحكم قوانين الحفظ المادي. وتستخدم نماذج التنبؤ العددي بالطقس (NWP) المعلمات الفيزيائية الدقيقة لحساب العمليات الفيزيائية التي تحدث على نطاق الشبكة الفرعية، مثل عمليات السحب والهطول، والطبقات الحدودية، وعمليات الحمل الحراري على الشبكات الخشنة (Baklanov et al., 2014). كما تتم معالجة الشروط الأولية والحدوديه في نماذج التنبؤ العددي بالطقس بطريقة مماثلة لتلك الموجودة في نماذج جودة الهواء، كما تم توضيحه في القسم **4.2.5.3.**.

تم تطوير عدد كبير من نماذج CWF التشغيلية عبر الإنترنت وغير المتصلة بها وصيانتها من قبل المؤسسات حول العالم من أجل إنتاج تنبؤات يومية حول جودة الهواء على المدى القصير. تعمل بعض هذه النماذج بكامل طاقتها منذ أكثر من 20 عامًا. يقدم الجدول 6 بعضًا من أكثر أنظمة التنبؤ بالطقس استخدامًا جنبًا إلى جنب مع نماذج الأرصاد الجوية والكيميائية المقترنة عبر الإنترنت / غير المتصلة بالإنترنت. ونعرض أيضًا البلدان التي يتم فيها تشغيل هذه النماذج وصيانتها.

اسم النموذج	MetM[18]	CTM / نموذج كيميائي ضوئي[19]	الاقتران	البلد[20]
ALADIN-CAMx	ALADIN	CAMx	غير متصل	النمسا
Enviro-HIRLAM	HIRLAM	Enviro	متكامل على الانترنت	الدانمارك
MATCH	ECMWF or HIRLAM	MATCH	غير متصل	السويد
MM-5CAMx	MM5	CAMx	غير متصل	اليونان
MM-5CHIMERE	MM5	CHIMERE	غير متصل	اليونان
MM5/WRF-CMAQ	MM5/WRF	CMAQ	غير متصل	إسبانيا
SKIRON/Dust	ETA	SKIRON	غير متصل	اليونان
WRF-Chem	WRF	CHEM	متكامل على الانترنت	الولايات المتحدة (تستخدم أيضا في ألمانيا والمملكة المتحدة وإسبانيا والنمسا وسلوفينيا وإيطاليا، الخ)
NMMB/BSC-CTM (BSC-CNS)	NMMB	BSC-mineral dust scheme	الوصول عبر الإنترنت	إسبانيا

الجدول 6: ميزات وخصائص النماذج التشغيلية للتنبؤ الكيميائي المستخدمة على نطاق واسع.

17- تعمل النماذج الهيدروستاتيكية، الأقل تكلفة من الناحية الحسابية، على تقييد التسارع العمودي ليكون صغيرًا مقارنة بالجاذبية، مما يؤدي، وفقًا لقانون نيوتن الثاني، إلى توازن عمودي بين قوة الضغط والجاذبية.

18- نموذج الأرصاد الجوية

19- نموذج النقل الكيميائي

20- البلد الذي يعمل فيه هذا النموذج

06

6. نماذج الغبار ومنتجات الاستيعاب

6.1. جزيئات الهباء الجوي

جزئيات الهباء الجوي، أو الجسميات (PM) عبارة عن مزيج من الجسيمات الصلبة أو السائلة المجهرية التي يبلغ من 1 نانومتر إلى 100 ميكرومتر) (مثل ملح البحر، والكبريتات، والكربون الأسود، والمواد العضوية، والغبار المعدني) المعلقة في الهواء (Ukhov et al., 2020). $PM_{2.5}$ وPM_{10} تشير إلى الجسيمات التي يقل قطرها عن 2.5 ميكرومتر و10 ميكرومتر على التوالي.

6.1.1. التأثير على المناخ

يلعب الهباء دورًا مهمًا في نظام المناخ العلمي من خلال التفاعل مع ميزانية طاقة الأرض. يتفاعل الهباء الجوي[21] بشكل مباشر مع ميزانية الطاقة عن طريق تعديل توازن الإشعاع من خلال امتصاص وتناثر الإشعاع الشمسي الوارد، مما يؤدي على التوالي إلى تسخين وتبريد السطح. بالإضافة إلى ذلك، من خلال العمل كنواة تكثيف للسحب، لا يقوم الهباء الجوي بتعديل خصائص الغيوم (العمق البصري والبياض) فحسب، بل تنظم أيضًا تكوينها، ومن ثم فإن الهباء الجوي يؤثر بشكل غير مباشر على ميزانية طاقة الأرض بفضل تفاعل السحب (الحجم والتكوين) مع الإشعاع الشمسي الوارد (Kim et al., 2008).

6.1.2. التأثير على البيئة والحياة البشرية

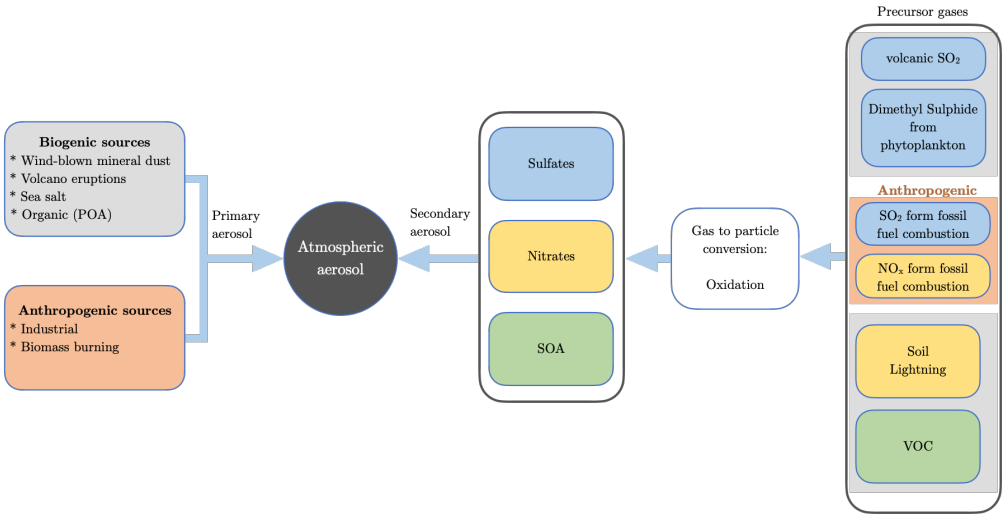
إن تلوث جزيئات الهباء الجوي مسؤول عن ملايين الوفيات المبكرة سنويًا (WHO, 2018). قد يتسبب التعرض الطويل للجسيمات في مجموعة متنوعة من الأمراض الخطيرة بما في ذلك أمراض القلب والأوعية الدموية والجهاز التنفسي وسرطان الرئة (Lelieveld et al., 2015; Ukhov et al., 2020). يعتبر الهباء الجوي، بوجود ثاني أكسيد الكبريت وثاني أكسيد النيتروجين، مسؤولاً عن الأمطار الحمضية التي تؤدي إلى تآكل التربة وتدهور جودة المياه.

6.1.3. أنواع الهباء الجوي وتكوينه

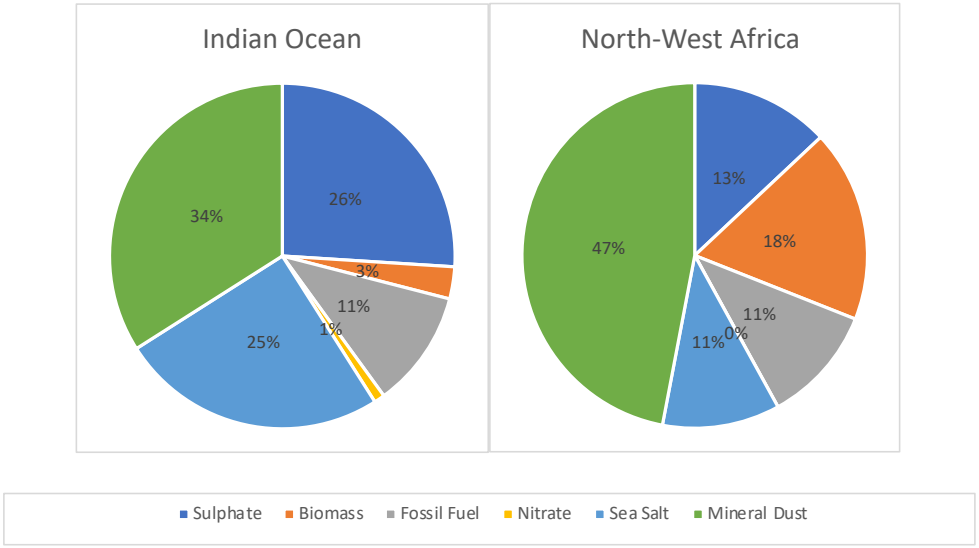
تسمى جزيئات الهباء الجوي التي تنشأ مباشرة من المصادر الطبيعية والبشرية بالهباء الجوي الأولي، انظر **الشكل 14**. يساهم الهباء الجوي الأولي من المصادر الطبيعية بشكل أكبر في ميزانية الهباء الجوي العالمية، حيث يمثل الغبار المعدني المنبعث من الرياح أكبر مساهم وملح البحر الناجم عن رذاذ البحر ثاني أكبر مساهم. في المقابل، ينتج الهباء الجوي الثانوي عن طريق تحويل الغاز إلى جسيم من خلال أكسدة المادة الأولية، والتي يمكن أن تكون بشرية المنشأ (أكاسيد النيتروجين من الوقود الأحفوري، الكبريتات) أو الطبيعية (الكبريتات، VOC). لاحظ أن الهباء الجوي العضوي يمكن أن يكون أوليًا أو ثانويًا (POA وSOA في **الشكل 14**).

يأتي حوالي 10٪ من مجموع الهباء الجوي في الغلاف الجوي من مصادر بشرية المنشأ. يوضح **الشكل 15** متوسط تكوين الهباء الجوي في موقعين خلال فترة 10 سنوات (2001-2010). يسود الغبار المعدني لقرب الموقعين من الصحراء.

21- خاصة تلك التي يبلغ قطرها حجم الجسيمات في نطاق الطول الموجي للإشعاع الشمسي الوارد (400-700 نانومتر).



الشكل 14: الهباء الجوي الابتدائي والثانوي.



الشكل 15: تظهر الرسوم البيانية الدائرية تركيبة الهباء الجوي في موقعين: المحيط الهندي ، وغرب إفريقيا (السنغال، غامبيا، غينيا بيساو). ومساهمة عرض الكتلة الحيوية والوقود الأحفوري للكربون العضوي والكربون الأسود الصلب (MYHRE ET AL., 2009).

6.1.4. توزيع حجم جسيمات الهباء الجوي

بالإضافة إلى التركيز والتركيبات، يُعدّ حجم جسيمات الهباء الجوي أحد العوامل الرئيسية التي تحدد دور الهباء الجوي في ميزانية طاقة الأرض، ومناخ الأرض، وعمليات الغلاف الجوي، والتأثير على صحة الإنسان والبيئة. عادة ما يكون الهباء الجوي متعدد التشتت، أي أن الجسيمات ليس لها نفس الحجم. عادة ما يتم تمثيل توزيع حجم الجسيمات إما بشكل منفصل من خلال توزيع الخانات أو باستخدام دالة رياضية متواصلة (توزيع لوغاريتمي عادي) (Mann et al., 2012).

عادةً ما تُستخدم ثلاثة مخططات مختلفة لتمثيل توزيع حجم الهباء الجوي وهي: مخططات الحجم والمخططات النموذجية والمخططات المقطعية (Kukkonen at al., 2012). في مخططات الحجم، يتم تمثيل توزيع حجم الهباء الجوي بعدد صغير من الاوضاع غير المتفاعلة (بشكل أساسي وضع واحد أو وضعين مثل TSP و$PM_{2.5}$ وPM_{10}). في المقابل، يتم تمثيل توزيع حجم الهباء الجوي في المخططات المقطعية (Jacobson, 2005) بعدد كبير من الاوضاع الصغيرة المتفاعلة لكل منها خصائصه الفيزيائية والكيميائية. علاوة على ذلك، فإن توزيع حجم الهباء الجوي في المخططات النموذجية (Whitby and McMurry, 1997) يتميز بعدد صغير من الأوضاع حيث يتم تمثيل كل وضع دالة رياضية متواصلة (توزيع لوغاريتمي عادي). من بين هذه المخططات الثلاثة، يعد المخطط المقطعي هو الأكثر تكلفة ومرونة.

يمكن أن يتغير توزيع حجم الجسيمات في الغلاف الجوي نتيجة لعملية واحدة أو أكثر من العمليات الفيزيائية والكيميائية: الانتشار، وترسب الجاذبية، والهجرة الكهربائية، والتنوي، والتبخر، والتفاعل الكيميائي، والتخثر. يمكن أن يحدث التنوي عن طريق تكثيف الغاز السلف على سطح جزيئات الهباء الجوي الموجودة (تنوي غير متجانس) أو عن طريق التكثيف في ظل ظروف التشبع الفائق (تنوي متجانس).

تؤدي عمليات التنوي والتخثر غير المتجانسة إلى تحول توزيع الحجم نحو الأحجام الأكبر. في المقابل، تؤدي عمليات التنوي والتبخر المتجانسة إلى تحويل توزيع الحجم نحو قيم أصغر. تم وصف تطور كثافة عدد الجسيمات في الهباء بسبب العمليات المذكورة أعلاه رياضيًا بواسطة المعادلة الديناميكية العامة للهباء الجوي (Gelbard, 1979).

6.2. تقييم الغبار في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

مع ملاحظة أن الغبار المعدني يشكل حوالي 75-95٪ من إجمالي الجسيمات المعلقة (TSP) (Ukhov et al., 2020)، فإن مشكلة النقل الإقليمي والعالمي لكميات كبيرة من الغبار المحمول جواً الناشئ من الصحاري ذات أهمية قصوى. إن نصف انبعاثات الغبار العالمية تأتي من منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (Prospero et al. 2002). ومن حيث توليد الغبار، تحتل الصحراء العربية (الأجزاء الشرقية والجنوبية من شبه الجزيرة العربية وصحراء عُمان) المرتبة الثالثة على مستوى العالم بعد الصحراء الكبرى وصحاري شرق آسيا (Cahill et al., 2017; Banks et al., 2017; Prakash et al., 2016; Farahat, 2016; Kalenderski & Stenchikov, 2016; Munir et al., 2013; Alghamdi et al., 2015; Lihavainen et al., 2016; Anisimov et al., 2017; Osipov & Stenchikov, 2018). يؤثر نقل الغبار من هذه المناطق على المناخ الإقليمي على نطاقات تصل إلى آلاف الكيلومترات (Fountoukis et al., 2020, Shao et al., 2011).

6.2.1. تأثير الغبار على المناخ والبيئة والبشر

يشمل تأثير رذاذ الغبار على المناخ والبيئة **(1)** التأثير الإشعاعي الذي يؤثر على التوازن الحراري العالمي وبالتالي جميع العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المعتمدة، **(2)** تغيير تكوين السحب، **(3)** الإنتاجية البحرية الأولية من خلال تخصيب المحيطات، **(4)** تغيير تركيبة الجسيمات، و **(5)** التأثير على الدورات الكيميائية الجيوكيميائية والهيدرولوجية. وعلى الرغم من أن الغبار الطبيعي قد لا يكون له تأثير سلبي مباشر على صحة الإنسان، إلا أنه يمكن أن يؤثر بشكل غير مباشر على انتقال وتشكيل بعض الملوثات عن طريق تغيير توزيع درجة حرارة الغلاف الجوي. ويمكن أن يحمل أيضًا عددًا كبيرًا من البكتيريا والفطريات. علاوة على ذلك، يؤثر الغبار بشدة على الأنشطة البشرية بما في ذلك الأرض والهواء والموارد الشمسية للطاقة المتجددة والاتصالات السلكية واللاسلكية والبنى التحتية الأخرى، بالإضافة إلى إتلاف المحاصيل (Fountoukis et al., 2018, b; Ahmadi & DadashiRoudbari, 2017, Li et al., 2017; Almasi et al. 2014; Goudie,2009; Ginoux et al. 2012; Basart et al., 2012; Goudie, 2009; Goudie & Middleton, 2001).

6.2.2. تلوث الهباء الجوي في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

تشمل المصادر المحلية للهباء الجوي في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، بالإضافة إلى الغبار الطبيعي، ثاني أكسيد الكبريت من المصادر البشرية (مثل توليد الطاقة وعمليات النفط وتحلية المياه)، والتي يتم تحويلها ضوئيًا إلى هباء كبريتات (Karagulian et al., 2015; Al-Taani et al., 2019; Alharbi et al., 2015; Khodeir et al., 2012; Al-Jahdali & Bisher, 2008). أظهرت دراسة حديثة أجراها (Ukhov et al. 2020) باستخدام نموذج WRF-Chem، تركيزات عالية من ثاني أكسيد الكبريت على طول السواحل الشرقية والغربية لشبه الجزيرة العربية. وجدت مساهمات الهباء الجوي الأخرى (مثل الكربون الأسود) للجسيمات في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية على انها ذات أهمية ثانوية (Randles et al., 2017). تتكرر أحداث الغبار في شبه الجزيرة العربية وتتسبب في ارتفاع مستويات $PM_{2.5}$ وPM_{10} التي تتجاوز حدود جودة الهواء في المملكة العربية السعودية (Ukhov et al., 2020).

وعلى مدى العقدين الماضيين، تم إجراء العديد من الدراسات بالتحقيق في نقل الغبار وتأثيره على جودة الهواء. يسرد **الجدول 7** دراسات حول أحداث الغبار في المجالات الفرعية لمنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا ودول مجلس التعاون لدول الخليج العربية. تلاحظ الدراسة المتكاملة التي أجراها Fountoukis et al., (2020) أن النهج المتكامل الذي يستخدم نموذج WRF-Chem بالإضافة إلى الملاحظات (AERONET، قياسات الأقمار الصناعية والسطح) يمكنه التقاط التطور المكاني والزماني للعاصفة الترابية والتغيرات المقابلة في الخصائص البصرية للهباء الجوي.

الدراسة	الفترة المشمولة	النموذج	النطاق	التعليقات
Kalenderski et al. (2013)	كانون الثاني /يناير 2009	WRF-Chem	البحر الأحمر	وجد أن الهباء الجوي غير بشكل كبير توازن الطاقة والمغذيات
Prakash et al. (2015)	4 أيام، آذار (مارس) 2012	WRF-Chem + ملاحظات AERONET AOD	شبه الجزيرة العربية + البحر الأحمر	التأثير على البيئة الأرضية والمحيطية
Fountoukis et al. (2016)	صيف 2015	WRF-Chem	الشرق الأوسط بما في ذلك دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية	توقعات PM_{10}
Anisimov et al. (2017)	2011-2009	CLM4 (1 كم دقة)	السهل الساحلي الضيق للبحر الأحمر العربي	تقدير التوزيع المكاني والزماني الدقيق لانبعاثات الغبار
Kontos et al. (2018)	نيسان (أبريل)- حزيران (يونيو) 2015	نموذج الانبعاث الطبيعي (NEMO)، مدفوعًا بنموذج أبحاث الطقس والتنبؤ (WRF)، (6 كيلومترات الدقة)	الجزء الأوسط من الشرق الأوسط	تقييم حساسية وحدات الغبار في المكونات المختلفة لمعلمات الغبار ذات الصلة في NEMO
Basart et al., 2012	2004	BSC-DREAM8b	منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا والبحر الأبيض المتوسط	تقييم نموذج BSC-DREAM8b من حيث العمق البصري للهباء الجوي (AOD) باستخدام بيانات كل ساعة من محطات AERONET ومتوسط ملاحظات الأقمار الصناعية
Fountoukis et al., 2020	مارس - أبريل 2015	WRF-Chem + بيانات الأقمار الصناعية + قياسات سطح PM + ملاحظات AERONET AOD	شبه الجزيرة العربية	درس التأثير على الخصائص البصرية والإشعاع السطحي

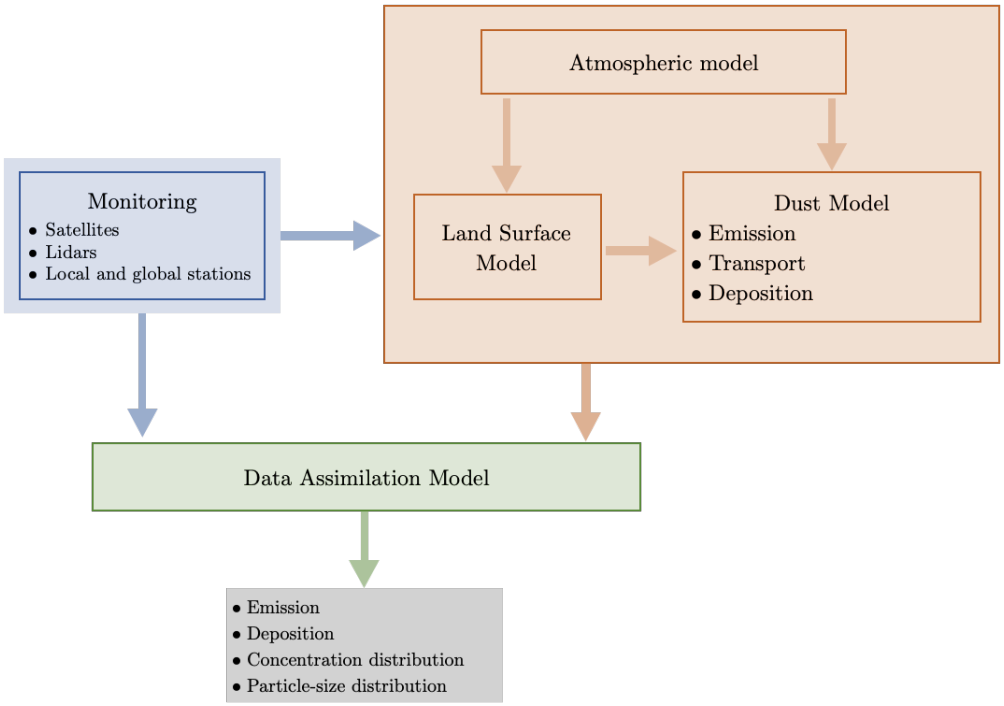
الجدول 7: دراسات أحداث الغبار في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية.

6.3. نماذج الغبار المتكاملة

مع يُعدّ نقل الغبار عملية معقدة تشمل آلية الرفع، بالإضافة إلى آليات الأرصاد الجوية الخاصة بنقله، أحيانًا عبر مسافات طويلة، عبر طبقة حدود الكوكب وفي طبقة التروبوسفير، وترسبه في نهاية المطاف على الأرض والمحيط (Liu et al., 2003). وقد استلزم ذلك تطوير نماذج غبار متكاملة معقدة بنفس القدر (Shao & Dong, 2006) من أجل التمكن من:

- فهم وقياس عمليات نقل الغبار على نطاقات زمنية وطول مختلفة، بما في ذلك دورات الغبار العالمية وإعادة بناء المناخات الماضية.
- التنبؤ بالعواصف الترابية وإصدار الإنذارات المبكرة،
- إجراء التقييمات

تعتمد هذه النماذج المتكاملة إلى رصد الاقتران من مصادر مختلفة بنمذجة عمليات نقل الغلاف الجوي والغبار، في بيئة استيعاب البيانات، كما هو موضح في **الشكل 16**. (Shao & Dong, 2006). وفيما يلي وصف موجز للعناصر الأساسية للإطار المتكامل.



الشكل 16: إطار عمل نظام متكامل لرصد الغبار ونمذجته والتنبؤ به.

6.3.1. رصد الغبار

تشتمل الملاحظات من أجهزة رصد الغبار المختلفة **(1)** بيانات AOD من الأقمار الصناعية (مثل الأقمار الصناعية Aquag Terra) المجهزة بـ MODIS (مطياف التصوير متوسط الدقة) ومن الشبكات الأرضية (مثل AERONET)، **(2)** توزيع حجم الهباء الجوي (AVSD) من AERONET و**(3)** قياسات تركيز $PM_{2.5}$ وPM_{10} السطحية في الموقع.

6.3.2. نماذج الانبعاثات

إن انبعاث الغبار هو نتيجة تفاعل غير خطي معقد بين أسطح الأرض والأرصاد الجوية المجاورة (Darmenova et al., 2009). على هذا النحو، فإن التوصيف المكاني والزماني لكل من خصائص الأرصاد الجوية وخصائص سطح الأرض هو مفتاح لنموذج انبعاث الغبار الناتج. يتم توفير العديد من هذه الخصائص، مثل العمليات الهيدرولوجية وديناميكيات الغطاء النباتي وتوازن الطاقة، بسهولة من خلال نموذج الغلاف الجوي. هذا ما يجعل نمذجة انبعاثات الغبار صعبة بشكل خاص وهو أنها تتطلب أيضًا توصيفًا دقيقًا لخصائص الطبقة العليا من التربة (أعلى 2 سم) بما في ذلك رطوبة التربة وتوزيع جزيئات التربة «غير المضطرب».

تم اقتراح العديد من مخططات انبعاث الغبار، حيث تعاني جميع المخططات المقترحة من عدم القدرة على حساب التغيرات المكانية والزمانية لمعلمات المخطط (Shao & Dong, 2006)

يكون معدل الانبعاث في مخططات الانبعاث البسيطة دالة لسرعة الرياح السطحية المتغيرة، في حين أن جميع الخصائص الأخرى ثابتة (Darmenova et al., 2009; Darmenova & Sokolik, 2007; Shao & Dong, 2006). وتتضمن المخططات الوسيطة، المستخدمة في نمذجة الغبار العالمية، أرصاد الأقمار الصناعية لضبط معلمات المخطط (Shao & Dong, 2006; Ginoux et al., 2001; Woodward, 2001). كما تعتمد مخططات انبعاث الغبار المعقدة على النمذجة الطيفية لآليات انبعاث الغبار (الحصر الديناميكي الهوائي والقصف الملحي وتفكك الركام) في فيزياء التعرية بالرياح (Shao, 2004; Shao & Dong, 2006). ومع ذلك، تتطلب هذه المخططات بيانات عن سطح الأرض والتربة والتي غالبًا ما تكون غير متوفرة.

نموذجان للانبعاثات مستخدما على نطاق واسع، طورهما Marticorena and Bergametti [1995] وShao et al. [1996]، وتم تنفيذه في إطار WRF، تم وصفه بعمق في (Darmenova et al. 2009).

6.3.3. استيعاب البيانات

تستطيع منتجات استيعاب بيانات الهباء الجوي تقدير تركيزات AOD وPMs القريبة من السطح في المناطق التي لا تتوفر فيها عمليات الرصد، وذلك عن طريق استيعاب AOD المتاحة وقياسات الجسيمات في الموقع (Ukhov et al., 2020).

إن النماذج المتكاملة الأكثر استخدامًا التي تستوعب PM في الغلاف الجوي هي MERRA-2[22] (Randles et al., 2017; Buchard et al., 2017) وCAMS-OA[23] (Inness et al., 2019; Flemming et al., 2015; Inness et al., 2015). ويستخدم هذان النموذجان العالميان قوائم جرد انبعاثات الملوثات البشرية المنشأ، وبالتالي تتدهور دقتها عندما تكون هذه المخزونات قديمة و/أو غير مكتملة، كما هو الحال في منطقة الشرق الأوسط (Ukhov et al., 2020; McLinden et al., 2016).

22- التحليل الاستعادي للعصر الحديث للأبحاث والتطبيقات، الإصدار 2، تم تنفيذه بواسطة الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء، مركز جودارد لرحلات الفضاء (NASA-GSFC).

23- التحليل التشغيلي لخدمة مراقبة الغلاف الجوي في كوبرنيكوس، الذي ينفذه المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (ECMWF).

6.3.4. النماذج التشغيلية المتكاملة

تتصف جميع نماذج الغبار التشغيلية المتكاملة أنها ذات هيكل مشابه لتلك المعروضة في **الشكل 16**. وإن النماذج التشغيلية المتكاملة الأكثر استخدامًا هي **COAMPS (1)** (نظام التنبؤ المتوسط النطاق المحيط/الغلاف الجوي)، **NAAPS (2)** (نظام تحليل وتوقع الهباء البحري) و**NMMB/MONARCH (3)** (نموذج متعدد النطاقات غير الهيدروستاتيكي/ نموذج متعدد النطاقات عبر الإنترنت غير الهيدروستاتيكي للقوة الجوية)، **VRF-Chem (4)**، **MOCAGE (5)** (نموذج كيمياء الغلاف الجوي على نطاق واسع)، و**ECMWF-IFS (6)** (نظام التنبؤ المتكامل للمركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى).

ويرد وصف هذه النماذج وخصائصها في **الجدول 8**

الاسم	الوصف	النطاق	الملاحظة	التشغيل	المطور
COAMPS	نظام التنبؤ بالطقس غير الهيدروستاتيكي القابل للضغط مع إمكانيات التداخل	نموذج منطقة محدودة النطاق؛ عادةً ما تتشابك نقطة الشبكة مع تباعد شبكي يبلغ حوالي 30 كم	NAVDAS: استيعاب البيانات المتغيرة ثلاثية الأبعاد التي تستوعب مجموعة متنوعة من المراقبة، بما في ذلك المسابير الراديوية، والرصد السطحي من الأرض والبحر، والإشعاع أو ملامح درجة الحرارة، وسرعة الرياح السطحية والكميات المشتقة من الأقمار الصناعية (AOD)؛	تشغيل من قبل البحرية الأمريكية للتنبؤ بالطقس العددي على المدى القصير	شعبة الأرصاد الجوية البحرية (MMD) التابعة لمختبر البحوث البحرية الأمريكية (NRL)
NAAPS	نموذج الهباء الجوي العالمي ثلاثي الأبعاد الذي ينتج تنبؤات مدتها 144 ساعة للغبار والدخان وملح البحر والجزئيات الدقيقة البشرية/الحيوية المنشأ؛	نطاق عالمي؛ شبكة 1080 × 540 بدقة مكانية (3/1) 42g مستوى عموديا	نظام استيعاب البيانات المتغير ثنائي الأبعاد (2D-Var) (NAVDAS-AOD) الذي يشتمل على عمليات استرجاع AOT من MODIS للتنبؤ بالظروف الأولية كل 6 ساعات	عمليًا في مختبر الأبحاث البحرية بالولايات المتحدة (NRL) منذ عام 1998؛	شعبة الأرصاد الجوية البحرية التابعة التابعة (MMD) لمختبر البحوث البحرية الأمريكية (NRL)
NMMB/ MONARCH	نظام التنبؤ بالطقس الكيميائي متعدد النطاقات عبر الإنترنت بالكامل للتطبيقات الإقليمية والعالمية	متعدد النطاقات: يُسمح بالمقاييس العالمية إلى الإقليمية (حتى 1 كم)	استيعاب ملاحظات MODIS Dark Target في Deep Blueg مكون غبار الهباء الجوي في NMMB-MONARCH باستخدام تقنية مرشح مجموعة Kalman القائمة على المجموعة	يوفر تنبؤات إقليمية تشغيلية بشأن الغبار المعدني للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية(WHO))، ويشارك في النظام الاستشاري وتقييم الإنذار بالعواصف الرملية والترابية التابعة للمنظمة (WMO) لشمال إفريقيا والشرق الأوسط وأوروبا	مركز برشلونة للترجمة الفائقة (BSC-CNS) بالتعاون مع المراكز الوطنية للتنبؤ البيئي التابعة للإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NCEP)

الجدول 8: الأطر التشغيلية لجودة الهواء المتكاملة (التي تشمل نماذج الغبار).

WRF-Chem	نموذج أويلريان المتكامل ثلاثي الأبعاد عبر الإنترنت مع إمكانات التداخل المستخدمة عادةً لنمذجة الانبعاثات، والنقل، والخلط، والتحول الكيميائي للغازات النزرة والهباء الجوي في وقت واحد مع الأرصاد الجوية؛	نموذج نطاق متوسط؛ يتم التشغيل بشكل روتيني بدقة عالية من 1-4 كم تباعد شبكي؛	تستوعب طريقة التغيّر ثلاثي الأبعاد Hybridg (3D-Var) 3DVAR-RTFDDA الملاحظات السطحية وبيانات الأقمار الصناعية (AOD من Modis) إلى نموذج WRF-Chem وتوفر ظروفًا أولية محسّنة لنظام التنبؤ.	يعمل بشكل كامل في العديد من البلدان حول العالم لإنتاج توقعات جودة الهواء عبر الإنترنت يوميًا (72 ساعة) بدقة أفقية تبلغ 4 كم (على سبيل المثال في الولايات المتحدة الأمريكية ، النمسا، ألمانيا، المملكة المتحدة، إسبانيا، سلوفينيا، إيطاليا)	الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي/ESRL؛
MOCAGE	نموذج ثلاثي الأبعاد متعدد النطاقات شبه لاغرانجي يستخدم في التنبؤ بالطقس الكيميائي، التتبع والتتبع الخلفي للإصدارات العرضية من مصدر نقطي وتقييم التلوث عبر الحدود؛	النطاقات الإقليمية إلى العالمية؛ شبكة عالمية نموذجية بدقة أفقية تبلغ 2° × 2° درجة ودقة شبكة إقليمية من 0.5° × 0.5° درجة	يمكن استخدام مجموعة متنوعة من الأساليب المتغيرة (3DVAR أو 3DFGAT أو 4DVAR) لاستيعاب الملامح الرئيسية أو الأعمدة أو القياسات السطحية لملوثات الغلاف الجوي الرئيسية؛	يعمل منذ عام 2001. وتوفر تنبؤات لمدة 72 ساعة بما في ذلك الأوزون والسلائف والهباء الجوي حول العلم وأوروبا وفرنسا	ميتيو فرنسا؛
ECM-WF-IFS (C-IFS)	نظام التنبؤ العددي العالمي بالطقس بما في ذلك وحدات لتكوين الغلاف الجوي (الهباء الجوي ومرحلة الغاز)	يمكن تشغيله بدرجات دقة عمودية وأفقية متفاوتة؛ أعلى دقة أفقية 9 كم.	تم تنفيذ 3D-Var و4D-Var في عمليات ECMWF لاستيعاب مجموعة واسعة من الملاحظات بما في ذلك القياس السطحي لسرعة الرياح ودرجة الحرارة وتركيز الأنواع وAOD المشتق من الأقمار الصناعية؛	يستخدم كل من ECMWF و Météo-France IFS لعمل تنبؤات جوية تشغيلية، ولكن باستخدام تكوين ودقة مختلفة	المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (ECMWF)؛

الجدول 8: الأطر التشغيلية لجودة الهواء المتكاملة (التي تشمل نماذج الغبار).

07

7. نماذج جودة الهواء لدول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

يتميز المناخ في منطقة دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية بتغيرات مكانية وزمنية كبيرة، بسبب دوران الغلاف الجوي على نطاق واسع، والتضاريس المتنوعة، والعمليات الكيميائية والإشعاعية التي تحدث في الغلاف الجوي (Patlakas et al, 2019). بشكل عام، تتميز المنطقة بشكل أساسي بمناخ صحراوي مع حرارة شديدة، لا سيما خلال النهار، وانخفاض هطول الأمطار ونادرًا، وبالتالي تعاني من بعض أقسى الظروف المناخية على الأرض (Farahat, 2016). بالإضافة إلى ذلك، تعتبر المنطقة من أهم مراكز إنتاج وانبعاث الغبار في العالم (Prijith et al. 2013). على وجه الخصوص، تعد الصحراء العربية ثالث أكبر مصدر للانبعاثات الغبار العالمية بعد الصحراء الكبرى وصحاري شرق آسيا (Ukhov et al, 2020). وبالتالي، يوجد غبار الصحراء بتركيزات عالية في الغلاف الجوي، على مدار العام، مما يؤدي إلى تأثيرات متنوعة على توازن طاقة الأرض. علاوة على ذلك، يمكن نقل الغبار من الصحراء، أكبر مصدر في العالم، عبر آلاف الكيلومترات، مما يؤثر أيضًا على جودة الهواء في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية (Fountoukis et al, 2020). علاوة على ذلك، فإن معظم المنطقة محاطة بالمحيط الذي هو مصدر لهباء ملح البحر. لكل هذه الميزات دور مهم في تكوين المناخ الإقليمي.

تشهد دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية بعضًا من أسرع معدلات النمو في النشاط الاقتصادي واستهلاك الطاقة في العالم بسبب التزايد السريع في عدد السكان والتنمية الصناعية والسيارات. يصاحب هذا النمو السريع انبعاث كميات هائلة من ملوثات الهواء من أنواع مختلفة في الغلاف الجوي، مع تأثيرات ضارة على جودة الهواء المحيط. كل نوع له خصائص الفيزيائية المختلفة، وهذا يسلط الضوء على ضرورة نمذجة نقل ملوثات الهواء هذه لتزويد الحكومات بالمعلومات التي تمكنها من اتخاذ تدابير وقائية وصياغة السياسات والتخطيط للمستقبل. فهذا مهم بشكل خاص لأنه في وجود غبار الصحراء، الذي يمكن أن يحبس وينقل الجسيمات من المصادر البشرية في اتجاه الرياح المصب، مما يؤدي إلى تركيزات الملوثات التي من المحتمل أن تكون ضارة بالبشر والبيئة (EAA, 1998)

ونظرًا لتنوع المناخ والتضاريس وخصائص الملوثات في منطقة دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية، لا يوجد نموذج واحد يمكنه الإجابة على جميع الأسئلة ذات الصلة. لقد تم إجراء عدد كبير من الدراسات لاستكشاف جوانب التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية. تشمل هذه الجوانب أنواعًا مختلفة من الملوثات والتطبيقات والمقاييس الخاصة.

وتجدر الإشارة إلى أن هناك بعض الأدلة على أن $PM_{2.5}$ المرتبط بالاحتراق قد يكون أكثر ضررًا على الصحة من $PM_{2.5}$ من المصادر الطبيعية ، مثل العواصف الترابية (Cooke et al., 2007; Laden et al., 2000). وبالتالي، يمكن أن تكون تأثيرات الانبعاثات من المصادر البشرية على الصحة العامة أكبر من مساهمتها في إجمالي كتلة $PM_{2.5}$ (Farahat, 2016). ونظرًا لأن أكثر من نصف مستويات $PM_{2.5}$ المقاسة ترجع إلى المواد القشرية من المصادر الطبيعية (Alolayan et al, 2013)، فهناك اهتمام متزايد في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية باستخدام نماذج جودة الهواء التي يمكنها تقييم مساهمات المصادر الفردية في إجمالي تركيزات كيميائية. على هذا النحو، يسلط **الجدول 9** الضوء على بعض نماذج جودة الهواء التي تمتلك مثل هذه القدرة.

يعرض **الجدول 9** نماذج جودة الهواء التي تم استخدامها للإجابة على العديد من الأسئلة البحثية حول نقل التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية. يوضح الجدول أيضًا أوصافًا للتطبيقات المختلفة لكل نموذج في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية كما ورد في الدراسات السابقة في الدليل.

اسم النموذج	التطبيق النموذجي في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية	المزايا / الدراسات السابقة ذات الصلة في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية
AERMOD	دراسة تأثير الملوثات غير التفاعلية (SO_2) ومواقع التركيز الأقصى حول المنطقة المجاورة للمصدر (محطة توليد الكهرباء، المصفاة)؛ تقييم مستويات التلوث الناتج عن المركبات؛ تقييم انبعاثات كبريتيد الهيدروجين؛ تقدير التشتت والترسيب لجسيمات الحديد الهارب؛	يتطلب بيانات إدخال معقولة وموارد حوسبة؛ يمكن تصدير النتائج إلى برنامج Google Earth؛ الدراسات السابقة: Al-Baroud et al, 2012; Amoatey et al, 2020; Baawain et al, 2017; Omidvarborna et al, 2018; Al-Jeelani, 2013; Abu-Eishah et al, 2014; AL-Haddad et al, 2012; Yassin et al,2010; Deb et al, 2014؛
ISCST3	حساب القيم القصوى للملوثات غير التفاعلية (SO_2) ومواقعها بالقرب من المصدر (محطة توليد الكهرباء، المصفاة)؛ تقييم تأثيرات انبعاثات غاز الميثان وانبعاثات الهيدروكربون غير الميثان من أنشطة الاحتراق؛ قياس التأثير على أطلاق ثاني أكسيد الكبريت عند تغيير محتوى الكبريت في الوقود ؛ التحقيق في كفاءة مواقع المراقبة الحالية	حساب التضاريس المعقدة والبسيطة، والتشتت الناجم عن الطفو، وارتفاع العمود، والغسيل السفلي للمباني؛ الدراسات السابقة: Al-Rashidi et al, 2005; Abdul-Wahab et al, 2002, 2003, 2004, 2006, 2011a, 2009; Al-Rashidi et al, 2005; AL-Azmi et al, 2009; Ramadan et al, 2008; Deb et al, 2014;
ADMS-Urban	دراسة تشتت انبعاثات المركبات؛	يحتوي على وحدات للتأثيرات القريبة من المصدر، والغسيل العكسي للمباني، والارتفاع الانتقالي للعمو، وتأثيرات التضاريس المعقدة، والنقل فوق المياه، وتأثيرات التفاعل الساحلي: يمكن أن يقترن بـ WRF؛ الدراسات السابقة: Abdul-Wahab et al., 2011a,, 2011b, 2012, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020; Abdul-Wahab and Fadlallah, 2014; Al-Naimi et al., 2015; Charabi et al., 2018; Al-Rawas et al., 2018; Deb et al., 2014
ENVIMAN: (مزيج من AERMOD (OSPMg	تقييم انبعاثات ملوثات الهواء من محطات التقطير	أوصت به وكالة حماية البيئة الأمريكية؛ يتضمن خوارزمية حركة المرور لتقدير عدد المركبات في الطابور عند التقاطع؛ الدراسات السابقة: Abdul-Wahab, 2004; Al Adwani et al, 2004
CALPUFF	توقع تركيزات CO وNO_x وCO_2 المنبعثة من حركة مرور مصدر الخط؛ تقييم تأثير بعض الملوثات المنبعثة من المنشآت الصناعية. تقييم تأثير موسم الرياح الموسمية على تشتت بعض الملوثات. نمذجة وتحليل تشتت فلوريد الهيدروجين وتشتت المركبات العضوية غير المثانية (NMOC).	نموذج بديل لوكالة حماية البيئة الأمريكية؛ يتطلب مدخلات قليلة نسبيًا؛ الدراسات السابقة: Albassam et al, 2009

الجدول 9: نماذج جودة الهواء المستخدمة في دراسة التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية[24]

24- لمزيد من المعلومات حول هذه النماذج، يرجى الرجوع إلى الجدولين 3 و 5.

CAL3QHC	التنبؤ بتركيزات ثاني أكسيد الكربون من المركبات الآلية بالقرب من تقاطع الطريق؛ نمذجة تأثير تغير الوقود على جودة الهواء؛	أوصت به وكالة حماية البيئة الأمريكية؛ يتضمن خوارزمية حركة المرور لتقدير عدد المركبات في الطابور عند التقاطع؛ الدراسات السابقة:Al ;Abdul-Wahab, 2004 Adwani et al, 2004
CALINE4	تقييم مستوى تلوث ثاني أكسيد الكربون من مصدر انبعاث مباشر؛	نموذج بديل لوكالة حماية البيئة الأمريكية؛ يتطلب مدخلات قليلة نسبيًا؛ الدراسات السابقة: Albassam et al, 2009
OpenAir	تقييم انبعاثات ملوثات الهواء الناتجة من حركة المرور	الدراسات السابقة:Hamoda et al, 2020
WRF-Chem	تقييم تأثير الغبار الأفريقي. نمذجة أحداث الغبار النموذجية؛ نمذجة عواصف الحبوب الترابية. نمذجة انبعاث الغبار؛ نمذجة الاختلافات الموسمية وتوزيعات ملوثات الهباء الجوي؛ تقييم حساسية مخططات الغبار؛ نمذجة الأوزون السطحي على المستوى الإقليمي؛	مناسب تمامًا لفحص التغذية المرتدة للأرصاد الجوية والكيمياء على المستويات المحلية والعالمية؛ خمس خيارات لنماذج الهباء الجوي؛ العديد من الخيارات للآليات الكيميائية ذات المرحلة الغازية بما في ذلك الآليات الكيميائية RADM2 و RACM و 05-CB و CBM-Z؛ ثلاثة خيارات لانبعاثات الغبار (المتولدة أثناء التشغيل الفعلي، لا حاجة إلى أي جرد للانبعاثات)؛ الدراسات السابقة:,Kalenderskti & Stenchikov 2016; Anisimov et al, 2018; Parajuli et al, 2019; Fountoukis et al, 2018; Prakash et al, 2015; Shahid et al, 2021; Fountoukis et al,2016; Karagulian et al, 2019; Kontos et al, 2018; Kalenderski et al, 2013؛
HYSPLIT	تحليل المسار الخلفي لتحديد أصل الكتل الهوائية (العواصف الترابية)؛ تقدير تركيزات الهواء PM_{10} من العواصف الترابية؛ توضيح التوزيعات الموسمية لتركيزات ملوثات الغلاف الجوي؛	أحد نماذج النقل والتشتت الجوي الأكثر استخدامًا في مجتمع علوم الغلاف الجوي؛ ا تم ربط خشونة السطح في نموذج الانبعاث بخصائص التربة في الكويت والعراق وسوريا والمملكة العربية السعودية وسلطنة عمان والإمارات العربية المتحدة؛ الدراسات السابقة:Yassin et al, 2018; Dasari et al, 2020; Ozdemir et al, 2018; Othman et al, 2021; Draxler et al, 2001

الجدول 9: نماذج جودة الهواء المستخدمة في دراسة التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

CHIMERE	التحقيق في إمكانية التنبؤ بأحداث الغبار؛ نمذجة الأوزون السطحي على النطاق الإقليمي؛	تم التحقق من صحة مخرجات نماذج المحاكاة مقابل بيانات الأرصاد الجوية وبيانات جودة الهواء التي تم جمعها من محطات المراقبة في قطر وأظهروا اتفاقًا مقبولًا عالميًا الدراسات السابقة: Beegum et al, 2018; Mulla et al, 2009؛
/NMMB BSC-Dust	تقييم تأثير دقة النموذج في انتشار الغبار في منطقة ذات تضاريس معقدة؛	نظام التنبؤ بالطقس الكيميائي متعدد النطاقات عبر الإنترنت بالكامل للتطبيقات الإقليمية والعالمية. نموذج الغبار مضمن بالكامل؛ يأخذ بعين الاعتبار ردود الفعل بين الغازات وجسيمات الهباء الجوي والأرصاد الجوية؛ الدراسات السابقة:;Basart et al, 2016
Bsc–Dream8b	فحص الأحوال الجوية المسببة للعاصفة الترابية؛	الدراسات السابقة: Ozdemir et al, 2018
2-MERRA	استيعاب AOD	الدراسات السابقة:;Parajuli et al, 2019 Roshan et al, 2019; Shahid et al, 2021
توازن الكتلة الكيميائية (CMB)	تحديد المساهم الرئيسي لجسيمات PM_{10} والملوثات الغازية؛	الدراسات السابقة: Al-Salem, 2008
عامل المصفوفة الإيجابي (PMF)	تحديد مصادر $PM_{2.5}$ وتوزيع مساهماتها؛	الدراسات السابقة:;Alolayan et al, 2013 Alahmad et al, 2021; Alghamdi et al, 2015
نموذج شامل لجودة الهواء مع ملحقات (CAMx)؛	محاكاة جودة الهواء على العديد من النطاقات الجغرافية؛ إجراء تحليل المصدر، والحساسية، والعملية؛	يتضمن العديد من "أدوات التحقيق" لدراسات التشخيص والحساسية في نموذج واحد: 1- أداة تخصيص المصادر (SAT) لتتبع نسبة الأوزون والجسيمات إلى الانبعاثات حسب الفئة والمنطقة؛ 2- أدوات الأسلوب المباشر المفككة (DDM، HDDM) لتتبع الحساسية الكيميائية للانبعاثات وغيرها من المعلمات حسب الفئة والمنطقة؛

الجدول 9: نماذج جودة الهواء المستخدمة في دراسة التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

جودة الهواء متعدد النطاقات في المجتمع (CMAQ)؛	يحاكي الأوزون، PM، والملوثات السامة المحمولة في الهواء، والرؤية، والأنواع الحمضية والملوثات المغذية في جميع أنحاء طبقة التروبوسفير؛ معالجة أدوات التقارن المعقدة بين العديد من مشكلات جودة الهواء في وقت واحد عبر نطاقات مكانية تتراوح من المناطق الحضرية إلى نصف الكرة الغربي (متعدد النطاقات)؛	يتضمن PA التي تتعقب الكتلة في جميع العمليات الفردية (الكيمياء، التأفق، الانتشار، وما إلى ذلك) وتوفر معلومات كمية حول كيفية تأثير كل عملية على تركيزات الأنواع المتوقعة كل ساعة؛
شبكة متغيرة من نموذج Airshed (UAM-V)؛	دراسات جودة الهواء التي تركز على الأوزون؛ تقييم التغييرات في جودة الهواء من سيناريوهات التحكم في الانبعاثات؛	يتضمن امتدادات تحليل العملية ومعدلات التفاعل المتكاملة: يمكن حفظ المعلومات حول تركيزات الملوثات من كل آلية (التأفق، والانتشار، والترسب، والانبعاثات، والكيمياء، في مناطق الشبكة المختارة) لكل خطوة زمنية، مما يسمح بمستوى غير مسبوق من التفاصيل في فهم حلقات المحاكاة.
نظام النمذجة الإقليمية للهباء الجوي والترسب (REMSAD)؛	يحاكي الكيمياء، والنقل (على النطاقات الإقليمية)، وترسب الملوثات المحمولة جواً (الخاملة والمتفاعلة كيميائياً على حد سواء) مع التركيز على PM؛	تسمح منهجية وضع العلامات على الجسيمات والسلائف (PPTM) للمستخدمين بوضع علامات على الإطلاق، والنقل، والتحول الكيميائي، وترسب الأنواع والمواد السامة (الكبريت، والنيتروجين، والزئبق، والكادميوم، والديوكسين، والرصاص) من مصادر الانبعاثات، وفئات المصادر، أو مناطق المصدر في جميع أنحاء مجال نمذجة REMSAD؛

الجدول 9: نماذج جودة الهواء المستخدمة في دراسة التلوث في دول مجلس التعاون لدول الخليج العربية

المراجع

Abdul-Wahab, S.A., Raman, K., Al-Riyamy, M. and Al-Barashdi, M., 2002. Environmental impact assessment for Oman LNG expansion project: NO_2 air quality analysis with a proposal for a third train. Toxicological and Environmental Chemistry, 83(1-4), pp.25-43.

Abdul-Wahab, S.A., 2003. SO_2 dispersion and monthly evaluation of the industrial source complex short-term (ISCST32) model at Mina Al-fahal refinery, Sultanate of Oman. Environmental management, 31(2), pp.0276-0291.

Abdul-Wahab, S.A., 2004a. An application and evaluation of the CAL3QHC model for predicting carbon monoxide concentrations from motor vehicles near a roadway intersection in Muscat, Oman. Environmental Management, 34(3), pp.372-382.

Abdul-Wahab, S.A., 2004b. Evaluation of the industrial source complex short-term model: dispersion over terrain. Journal of the Air & Waste Management Association, 54(4), pp.396-408.

Abdul-Wahab, S.A., 2006. The role of meteorology on predicting SO_2 concentrations around a refinery: A case study from Oman. Ecological modelling, 197(1-2), pp.13-20.

Abdul-Wahab, S., Sappurd, A. and Al-Damkhi, A., 2011a. Application of California Puff (CALPUFF) model: a case study for Oman. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(1), pp.177-189.

Abdul-Wahab, S.A., Ali, S., Sardar, S., Irfan, N. and Al-Damkhi, A., 2011b. Evaluating the performance of an integrated CALPUFF-MM5 modeling system for predicting SO_2 emission from a refinery. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(6), pp.841-854.

Abdul-Wahab, S., Ali, S., Sardar, S. and Irfan, N., 2012. Impacts on ambient air quality due to flaring activities in one of Oman's oilfields. Archives of environmental & occupational health, 67(1), pp.3-14.

Abdul-Wahab, S.A. and Fadlallah, S.O., 2014. A study of the effects of vehicle emissions on the atmosphere of Sultan Qaboos University in Oman. Atmospheric environment, 98, pp.158-167.

Abdul-Wahab, S.A., Al-Hajri, A. and Yetilmezsoy, K., 2016. Impact of the ambient air quality due to the dispersion of non-methane organic compounds from Barka Landfill. International journal of environmental science and technology, 13(4), pp.1099-1108.

Abdul-Wahab, S., Al-Rawas, G., Charabi, Y., Al-Wardy, M. and Fadlallah, S., 2017. A study to investigate the key sources of odors in Al-Multaqa Village, Sultanate of Oman. Environmental Forensics, 18(1), pp.15-35.

Abdul-Wahab, S., Fadlallah, S. and Al-Rashdi, M., 2018. Evaluation of the impact of ground-level concentrations of SO_2, NO_x, CO, and PM_{10} emitted from a steel melting plant on Muscat, Oman. Sustainable cities and society, 38, pp.675-683.

Abdul-Wahab, S. and Alsubhi, Z., 2019. Modeling and analysis of hydrogen fluoride pollution from an aluminum smelter located in Oman. Sustainable Cities and Society, 51, p.101802.

Abdul-Wahab, S.A., Fadlallah, S.O., Al-Riyami, M., Al-Souti, M. and Osman, I., 2020. A study of the effects of CO, NO_2, and PM_{10} emissions from the Oman Liquefied Natural Gas (LNG) plant on ambient air quality. Air Quality, Atmosphere & Health, 13(10), pp.1235-1245.

Abu-Eishah, S.I., Babahar, H.S.A. and Maraqa, M., 2014. Minimization of SO_2 emissions at ADGAS (Das Island, UAE): II-impact on air quality. J Pet Environ Biotechnol, 5(172), p.2.

Ahmadi, M. and Dadashi Roudbari, A., 2017. Regional modeling of dust storm of February 8, 2015 in the southwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *10*(21), pp.1-12.

Al-Adwani, H., Elkilani, A. and Bouhamra, W., 2004. Monitoring and modeling the effect of fuel change on air quality in a typical heavy traffic residential area in Kuwait. Environmental engineering science, 21(6), pp.678-690.

Alahmad, B., Al-Hemoud, A., Kang, C.M., Almarri, F., Kommula, V., Wolfson, J.M., Bernstein, A.S., Garshick, E., Schwartz, J. and Koutrakis, P., 2021. A two-year assessment of particulate air pollution and sources in Kuwait. Environmental Pollution, 282, p.117016.

Al-Azmi, B.N., Nassehi, V. and Khan, A.R., 2009. SO_2 and NO_x Emissions from Kuwait Power Stations in Years 2001 and 2004 and Evaluation of the Impact of These Emissions on Air Quality Using Industrial Sources Complex Short-Term (ISCST) Model. Water, air, and soil pollution, 203(1), pp.169-178.

Al-Baroud, A., Al-Baroud, F., Al-Sahali, M. and Ettouney, H., 2012. Annual variations of air pollution in Jahra, Kuwait. GSTF International Journal of Engineering Technology (JET), 1, pp.74-79.

Albassam, E., Khan, A. and Popov, V., 2009. Management of air quality in the vicinity of congested area in Kuwait. Environmental monitoring and assessment, 157(1), pp.539-555.

Alghamdi, M.A., Almazroui, M., Shamy, M., Redal, M.A., Alkhalaf, A.K., Hussein, M.A. and Khoder, M.I., 2015. Characterization and elemental composition of atmospheric aerosol loads during springtime dust storm in western Saudi Arabia. *Aerosol and Air Quality Research, 15*(2), pp.440-453.

Alghamdi, M.A., Alam, M.S., Yin, J., Stark, C., Jang, E., Harrison, R.M., Shamy, M., Khoder, M.I. and Shabbaj, I.I., 2015. Receptor modelling study of polycyclic aromatic hydrocarbons in Jeddah, Saudi Arabia. *Science of the Total Environment, 506*, pp.401-408.

Al-Haddad, A., Ettouney, H. and Saqer, S., 2012. Oil Refineries Emissions: Source and Impact: A Study using AERMOD.

Al-Hamad, K.K., Khan, A.R. and Nassehi, V., 2009. Methane and other hydrocarbon gas emissions resulting from flaring in Kuwait oilfields. INTECH Open Access Publisher.

Alharbi, B., Shareef, M.M. and Husain, T., 2015. Study of chemical characteristics of particulate matter concentrations in Riyadh, Saudi Arabia. *Atmospheric Pollution Research, 6*(1), pp.88-98.

Al-Jahdali, M.O. and Bisher, A.B., 2008. Sulfur dioxide (SO_2) accumulation in soil and plant's leaves around an oil refinery: A case study from Saudi Arabia. *American journal of environmental sciences, 4*(1), pp.84-88.

Al-Jeelani, H.A., 2013. The impact of traffic emission on air quality in an urban environment. Journal of Environmental Protection, 2013, 4, 205-217

Alkatheeri, E., Al Jallad, F. and Al Omar, M., 2012. Pollution Scenarios through Atmospheric Dispersion Modelling Based on Real Measurements of Selected Urban Areas in Abu Dhabi, UAE.

Almasi, A., Mousavi, A.R., Bakhshi, S. and Namdari, F., 2014. Dust storms and environmental health impacts. *Journal of Middle East Applied Science and Technology, 8*, pp.353-356.

Al-Mulla, A.H., Ahmed, A.F. and Lecoeur, D., 2009, December. Qatar Photochemical Modelling Platform: A New Tool to Optimize Air Pollution Control for the Oil and Gas Industries. In International Petroleum Technology Conference. OnePetro.Al-Naber, H.M.F., 2016. *Air pollution: evidence from the Gulf environmental partnership and action program*, No. 104069, pp. 1-8. The World Bank.

Al-Naimi, N., Balakrishnan, P. and Goktepe, I., 2015. Measurement and modelling of nitrogen dioxide (NO_2) emissions: a marker for traffic-related air pollution in Doha, Qatar. Annals of GIS, 21(3), pp.249-259.

Alolayan, M.A., Brown, K.W., Evans, J.S., Bouhamra, W.S. and Koutrakis, P., 2013. Source apportionment of fine particles in Kuwait City. Science of the total environment, 448, pp.14-25.

Al-Rashidi, M.S., Nassehi, V. and Wakeman, R.J., 2005. Investigation of the efficiency of existing air pollution monitoring sites in the state of Kuwait. *Environmental pollution, 138*(2), pp.219-229.

Al-Rawas, G., Abdul-Wahab, S., Charabi, Y., Al-Wardy, M. and Fadlallah, S., 2018. Modelling the trends of vehicle-emitted pollutants in Salalah, Sultanate of Oman, over a 10-year period. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 32(5), pp.1355-1373

Al-Salem, S.M., 2008. An overview of the PM_{10} pollution problem in Fahaheel urban area, Kuwait. Emirates Journal of Engineering Research, 13(3), pp.1-9.

Al-Taani, A.A., Nazzal, Y., Howari, F.M. and Yousef, A., 2019. Long-term trends in ambient fine particulate matter from 1980 to 2016 in United Arab Emirates. *Environmental monitoring and assessment, 191*(3), p.143.

Amoatey, P., Omidvarborna, H., Baawain, M.S. and Al-Mamun, A., 2020. Evaluation of vehicular pollution levels using line source model for hot spots in Muscat, Oman. Environmental Science and Pollution Research, 27, pp.31184-31201.

Anisimov, A., Tao, W., Stenchikov, G., Kalenderski, S., Prakash, P.J., Yang, Z.L. and Shi, M., 2017. Quantifying local-scale dust emission from the Arabian Red Sea coastal plain. *Atmospheric Chemistry and Physics, 17*(2), pp.993-1015.

Anisimov, A., Axisa, D., Kucera, P.A., Mostamandi, S. and Stenchikov, G., 2018. Observations and cloud-resolving modeling of Haboob dust storms over the Arabian Peninsula. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(21), pp.12-147.

Argyropoulos, G., Manoli, E., Kouras, A. and Samara, C., 2012. Concentrations and source apportionment of PM_{10} and associated major and trace elements in the Rhodes Island, Greece. *Science of the total environment, 432*, pp.12-22.

Baawain, M., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H. and Al-Jabri, A., 2017. Assessment of hydrogen sulfide emission from a sewage treatment plant using AERMOD. Environmental monitoring and assessment, 189(6), p.263.

Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., Carmichael, G., Douros, J., Flemming, J., Forkel, R. and Galmarini, S., 2014. Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: current status and prospects. *Atmospheric Chemistry and Physics, 14*(1), pp.317-398.

Banks, J.R., Brindley, H.E., Stenchikov, G. and Schepanski, K., 2017. Satellite retrievals of dust aerosol over the Red Sea and the Persian Gulf (2005–2015). Atmospheric Chemistry and Physics, 17(6), pp.3987-4003.

Basart, S., Pérez, C., Nickovic, S., Cuevas, E. and Baldasano, J., 2012. Development and evaluation of the BSC-DREAM8b dust regional model over Northern Africa, the Mediterranean and the Middle East. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 64*(1), p.18539.

Basart, S., Vendrell, L. and Baldasano, J.M., 2016. High-resolution dust modelling over complex terrains in West Asia. Aeolian research, 23, pp.37-50.

Batterman, S.A., Zhang, K. and Kononowech, R., 2010. Prediction and analysis of near-road concentrations using a reduced-form emission/dispersion model. *Environmental Health, 9*(1), pp.1-18.

Beegum, S.N., Gherboudj, I., Chaouch, N., Temimi, M. and Ghedira, H., 2018. Simulation and analysis of synoptic scale dust storms over the Arabian Peninsula. Atmospheric Research, 199, pp.62-81.

Bluett, J., Gimson, N., Fisher, G., Heydenrych, C., Freeman, T. and Godfrey, J., 2004. Good practice guide for atmospheric dispersion modelling: 2. Which dispersion model to use? *Good practice guide for atmospheric dispersion modelling*, pp.8-21.

Boussinesq, J., 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes. Impr. nationale.

Brown, K.W., Bouhamra, W., Lamoureux, D.P., Evans, J.S. and Koutrakis, P., 2008. Characterization of particulate matter for three sites in Kuwait. *Journal of the Air & Waste Management Association, 58*(8), pp.994-1003.

Brown, R.A., 1991. *Fluid mechanics of the atmosphere*. Academic Press.

Buchard, V., Randles, C.A., Da Silva, A.M., Darmenov, A., Colarco, P.R., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A.J., Ziemba, L.D. and Yu, H., 2017. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. *Journal of Climate, 30*(17), pp.6851-6872.

Byun, D. and Schere, K.L., 2006. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system.

Cahill, B., Toumi, R., Stenchikov, G., Osipov, S. and Brindley, H., 2017. Evaluation of thermal and dynamic impacts of summer dust aerosols on the Red Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 122*(2), pp.1325-1346.

Callén, M.S., Iturmendi, A. and López, J.M., 2014. Source apportionment of atmospheric $PM_{2.5}$ -bound polycyclic aromatic hydrocarbons by a PMF receptor model. Assessment of potential risk for human health. *Environmental pollution, 195*, pp.167-177.

Chan, M.W. and Tombach, I.H., 1978. AVACTA–Air pollution model for complex terrain applications. *AeroVironment Inc., Monrovia, CA*.

Chan, M.W., 1979. A tracer experiment to determine the transport and dispersion of an elevated plume in complex terrain. In *72nd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Cincinnati, Ohio*.

Chang, C.H. and Meroney, R.N., 2001. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89*(14-15), pp.1325-1334.

Charabi, Y., Abdul-Wahab, S., Al-Rawas, G., Al-Wardy, M. and Fadlallah, S., 2018. Investigating the impact of monsoon season on the dispersion of pollutants emitted from vehicles: A case study of Salalah City, Sultanate of Oman. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 59, pp.108-120.

Chen, C.F. and Liang, J.J., 2013. Using a source–receptor approach to characterize the volatile organic compounds from control device exhaust in a science park. *Environmental Science and Pollution Research, 20*(3), pp.1526-1536.

Cheng, S., Li, J., Feng, B., Jin, Y. and Hao, R., 2007. A gaussian-box modeling approach for urban air quality management in a northern chinese city I. model development. *Water, Air, and Soil Pollution, 178*(1), pp.37-57.

Chock, D.P., Winkler, S.L. and Sun, P., 1994. Comparison of stiff chemistry solvers for air quality modeling. *Environmental science & technology, 28*(11), pp.1882-1892.

Collett, R.S. and Oduyemi, K., 1997. Air quality modelling: a technical review of mathematical approaches. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling, 4*(3), pp.235-246.

Conti, G.O., Heibati, B., Kloog, I., Fiore, M. and Ferrante, M., 2017. A review of AirQ Models and their applications for forecasting the air pollution health outcomes. *Environmental Science and Pollution Research, 24*(7), pp.6426-6445.

Cooke, R.M., Wilson, A.M., Tuomisto, J.T., Morales, O., Tainio, M. and Evans, J.S., 2007. A probabilistic characterization of the relationship between fine particulate matter and mortality: elicitation of European experts. *Environmental science & technology, 41*(18), pp.6598-6605.

Daly, A. and Zannetti, P., 2007. Air pollution modeling–An overview. *Ambient air pollution*, pp.15-28.

Dasari, H.P., Desamsetti, S., Langodan, S., Krishna, L.R., Singh, S. and Hoteit, I., 2020, April. Air-quality assessment over the world's Most Ambitious Project, NEOM in Kingdom of Saudi Arabia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 489, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.

Darmenova, K., Sokolik, I.N., Shao, Y., Marticorena, B. and Bergametti, G., 2009. Development of a physically based dust emission module within the Weather Research and Forecasting (WRF) model: Assessment of dust emission parameterizations and input parameters for source regions in Central and East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114*(D14).

Darmenova, K. and Sokolik, I.N., 2007. Assessing uncertainties in dust emission in the Aral Sea region caused by meteorological fields predicted with a mesoscale model. *Global and Planetary Change, 56*(3-4), pp.297-310.

Deb, K., Doherty, B., Kanchan, A., Holland, B., Boger, W., Dai, W., Zhang, K. and Yang, X., 2014, September. Evolution of Air Quality Modelling of Ras Laffan, Qatar Airshed and Way Forward with WRF-CALPUFF Simulation in Near Real-Time. In SPE Middle East Health, Safety, Environment & Sustainable Development Conference and Exhibition. OnePetro.

Deck, S., 2005. Zonal-detached-eddy simulation of the flow around a high-lift configuration. *AIAA journal, 43*(11), pp.2372-2384.

Dennis, R., Fox, T., Fuentes, M., Gilliland, A., Hanna, S., Hogrefe, C., Irwin, J., Rao, S.T., Scheffe, R., Schere, K. and Steyn, D., 2010. A framework for evaluating regional-scale numerical photochemical modeling systems. *Environmental Fluid Mechanics, 10*(4), pp.471-489.

Derwent, R.G., Middleton, D.R., Field, R.A., Goldstone, M.E., Lester, J.N. and Perry, R., 1995. Analysis and interpretation of air quality data from an urban roadside location in central London over the period from July 1991 to July 1992. *Atmospheric Environment, 29*(8), pp.923-946.

Donnell, E.A., Fish, D.J., Dicks, E.M. and Thorpe, A.J., 2001. Mechanisms for pollutant transport between the boundary layer and the free troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106*(D8), pp.7847-7856.

Draxler, R.R., Gillette, D.A., Kirkpatrick, J.S. and Heller, J., 2001. Estimating PM_{10} air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. Atmospheric Environment, 35(25), pp.4315-4330.

Dubovik, O. and King, M.D., 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105*(D16), pp.20673-20696.

Easom, G., 2000. *Improved turbulence models for computational wind engineering* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

Ebinger, C., Hultman, N., Massy, K., Avasarala, G. and Rebois, D., 2011. Options for Low-Carbon Development in Countries of the Gulf Cooperation Council. *Brookings Policy Briefs*, (11-02).

El-Harbawi, M., 2013. Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review. *Environmental Reviews, 21*(3), pp.149-179.

Elmi, A. and Al Rifai, N., 2012. Pollutant emissions from passenger cars in traffic congestion situation in the State of Kuwait: options and challenges. *Clean Technologies and Environmental Policy, 14*(4), pp.619-624.

Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G. and Kumar, N., 2017. Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. *Journal of the Air & Waste Management Association, 67*(5), pp.582-598.

European Environment Agency (EEA) (1998). Guidance report on preliminary assessment under EC air quality directives. Technical report No 11.

European Environment Agency (EEA) (2012). Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009. EEA Technical Report No. 10/2012.

Farahat, A., 2016. Air pollution in the Arabian Peninsula (Saudi Arabia, the United Arab Emirates, Kuwait, Qatar, Bahrain, and Oman): causes, effects, and aerosol categorization. *Arabian Journal of Geosciences, 9*(3), pp.1-17.

Flemming, J., Huijnen, V., Arteta, J., Bechtold, P., Beljaars, A., Blechschmidt, A.M., Diamantakis, M., Engelen, R.J., Gaudel, A., Inness, A. and Jones, L., 2015. Tropospheric chemistry in the Integrated Forecasting System of ECMWF. *Geoscientific model development, 8*(4), pp.975-1003.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G. and Nganga, J., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. *Climate change 2007. The physical science basis.*

Fountoukis, C., Ackermann, L., Ayoub, M.A., Gladich, I., Hoehn, R.D. and Skillern, A., 2016. Impact of atmospheric dust emission schemes on dust production and concentration over the Arabian Peninsula. *Modeling Earth Systems and Environment, 2*(3), pp.1-6.

Fountoukis, C., Figgis, B., Ackermann, L. and Ayoub, M.A., 2018. Effects of atmospheric dust deposition on solar PV energy production in a desert environment. *Solar Energy, 164*, pp.94-100.

Fountoukis, C., Ayoub, M.A., Ackermann, L., Perez-Astudillo, D., Bachour, D., Gladich, I. and Hoehn, R.D., 2018. Vertical ozone concentration profiles in the Arabian Gulf region during summer and winter: Sensitivity of WRF-Chem to planetary boundary layer schemes. Aerosol and Air Quality Research, 18(5), pp.1183-1197.

Fountoukis, C., Harshvardhan, H., Gladich, I., Ackermann, L. and Ayoub, M.A., 2020. Anatomy of a severe dust storm in the Middle East: Impacts on aerosol optical properties and radiation budget. *Aerosol and Air Quality Research, 20*(1), pp.155-165.

Gelbard, F. and Seinfeld, J.H., 1979. The general dynamic equation for aerosols. Theory and application to aerosol formation and growth. *Journal of Colloid and Interface Science, 68*(2), pp.363-382.

Gertler, A.W., Koracin, D.R., Koracin, J., Lewis, J.M., Luria, M., Sagebiel, J.C. and Stockwell, W.R., 2004. Development and validation of a predictive model to assess the impact of coastal operations on urban scale air quality. In *Air Pollution Modeling and Its Application XVI* (pp. 619-620). Springer, Boston, MA.

Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O. and Lin, S.J., 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106*(D17), pp.20255-20273.

Ginoux, P., Prospero, J.M., Gill, T.E., Hsu, N.C. and Zhao, M., 2012. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics, 50*(3).

Goudie, A.S. and Middleton, N.J., 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-science reviews, 56*(1-4), pp.179-204.

Goudie, A.S., 2009. Dust storms: Recent developments. *Journal of environmental management, 90*(1), pp.89-94.

Habeebullah, T.M., 2014. Modeling particulate matter (PM_{10}) in Makkah, Saudi Arabia - a view point of health impact. *Journal of Clean Energy Technologies, 2*(3).

Habeebullah, T.M., Munir, S., Ropkins, K., Morsy, E., Mohammed, A. and Seroji, A.R., 2015. A comparison of air quality in arid and temperate climatic conditions–A case study of Leeds and Makkah. *Int. J. Environ. Ecol. Eng, 1*, p.661.

Habeebullah, T.M., 2016. Chemical composition of particulate matters in Makkah-focusing on cations, anions and heavy metals. *Aerosol and Air Quality Research, 16*(2), pp.336-347.

Hamoda, M.F., Al-Jaralla, R. and Al-Mahamel, S., 2020. Assessment of air pollutants emissions due to traffic in two residential areas in Kuwait. International Journal of Environmental Science and Technology, pp.1-10.

Heo, J., Schauer, J.J., Yi, O., Paek, D., Kim, H. and Yi, S.M., 2014. Fine particle air pollution and mortality: importance of specific sources and chemical species. *Epidemiology*, pp.379-388.

Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I.A., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T. and Lavenu, F., 1998. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment, 66*(1), pp.1-16.

Inness, A., Blechschmidt, A.M., Bouarar, I., Chabrillat, S., Crepulja, M., Engelen, R.J., Eskes, H., Flemming, J., Gaudel, A., Hendrick, F. and Huijnen, V., 2015. Data assimilation of satellite-retrieved ozone, carbon monoxide and nitrogen dioxide with ECMWF's Composition-IFS. *Atmospheric chemistry and physics, 15*(9), pp.5275-5303.

Inness, A., Ades, M., Agusti-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.M., Dominguez, J.J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J. and Huijnen, V., 2019. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics, 19*(6), pp.3515-3556.

Irwin, J.S., 2014. A suggested method for dispersion model evaluation. *Journal of the Air & Waste Management Association, 64*(3), pp.255-264.

Jacobson, M.Z. and Jacobson, M.Z., 2005. *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge university press.

Jish Prakash, P., Stenchikov, G., Kalenderski, S., Osipov, S. and Bangalath, H., 2015. The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics, 15*(1), pp.199-222.

Jish Prakash, P., Stenchikov, G., Tao, W., Yapici, T., Warsama, B. and Engelbrecht, J.P., 2016. Arabian Red Sea coastal soils as potential mineral dust sources. *Atmospheric Chemistry and Physics, 16*(18), pp.11991-12004.

Johnson, M., Lam, N., Brant, S., Gray, C. and Pennise, D., 2011. Modeling indoor air pollution from cookstove emissions in developing countries using a Monte Carlo single-box model. *Atmospheric Environment, 45*(19), pp.3237-3243.

Kalenderski, S., Stenchikov, G. and Zhao, C., 2013. Modeling a typical winter-time dust event over the Arabian Peninsula and the Red Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics, 13*(4), pp.1999-2014.

Kalenderski, S. and Stenchikov, G., 2016. High-resolution regional modeling of summertime transport and impact of African dust over the Red Sea and Arabian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121*(11), pp.6435-6458.

Kalnay, E., 2003. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge university press.

Karagulian, F., Belis, C.A., Dora, C.F.C., Prüss-Ustün, A.M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H. and Amann, M., 2015. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric environment, 120*, pp.475-483.

Karagulian, F., Temimi, M., Ghebreyesus, D., Weston, M., Kondapalli, N.K., Valappil, V.K., Aldababesh, A., Lyapustin, A., Chaouch, N., Al Hammadi, F. and Al Abdooli, A., 2019. Analysis of a severe dust storm and its impact on air quality conditions using WRF-Chem modeling, satellite imagery, and ground observations. Air Quality, Atmosphere & Health, 12(4), pp.453-470.

Khodeir, M., Shamy, M., Alghamdi, M., Zhong, M., Sun, H., Costa, M., Chen, L.C. and Maciejczyk, P., 2012. Source apportionment and elemental composition of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Jeddah City, Saudi Arabia. *Atmospheric pollution research, 3*(3), pp.331-340.

Kim, D. and Ramanathan, V., 2008. Solar radiation budget and radiative forcing due to aerosols and clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113*(D2).

Klemeš, J.J., Varbanov, P.S. and Huisingh, D., 2012. Recent cleaner production advances in process monitoring and optimisation. *Journal of Cleaner Production, 34*, pp.1-8.

Korsholm, U.S., Baklanov, A., Gross, A., Mahura, A., Sass, B.H. and Kaas, E., 2008. Online coupled chemical weather forecasting based on HIRLAM–overview and prospective of Enviro-HIRLAM. *HIRLAM newsletter, 54*, pp.151-168.

Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D.M., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A.I., Monteiro, A., Hirtl, M., Tarvainen, V., Boy, M. and Peuch, V.H., 2012. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics, 12*(1), pp.1-87.

Laden, F., Neas, L.M., Dockery, D.W. and Schwartz, J., 2000. Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities. *Environmental health perspectives, 108*(10), pp.941-947.

Lanouar, C., Al-Malk, A.Y. and Al Karbi, K., 2016. Air pollution in Qatar: Causes and challenges. *White Paper, 1*(3), pp.1-7.

Lateb, M., Meroney, R.N., Yataghene, M., Fellouah, H., Saleh, F. and Boufadel, M.C., 2016. On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments–A review. *Environmental Pollution, 208*, pp.271-283.

Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A., 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature, 525*(7569), pp.367-371.

Lettau, H.H., 1970. 2. Physical and meteorological basis for mathematical models. *Office of Air Programs Publication*, (86-87).

Li, X., Wagner, F., Peng, W., Yang, J. and Mauzerall, D.L., 2017. Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(45), pp.11867-11872.

Lihavainen, H., Alghamdi, M.A., Hyvärinen, A.P., Hussein, T., Aaltonen, V., Abdelmaksoud, A.S., Al-Jeelani, H., Almazroui, M., Almehmadi, F.M., Al Zawad, F.M. and Hakala, J., 2016. Aerosols physical properties at Hada Al Sham, western Saudi Arabia. *Atmospheric Environment, 135*, pp.109-117.

Liu, M., Westphal, D.L., Wang, S., Shimizu, A., Sugimoto, N., Zhou, J. and Chen, Y., 2003. A high-resolution numerical study of the Asian dust storms of April 2001. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108*(D23).

Liu, G.R., Peng, X., Wang, R.K., Tian, Y.Z., Shi, G.L., Wu, J.H., Zhang, P., Zhou, L.D. and Feng, Y.C., 2015a. A new receptor model-incremental lifetime cancer risk method to quantify the carcinogenic risks associated with sources of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from Chengdu in China. *Journal of hazardous materials, 283*, pp.462-468.

Liu, Y., Chen, X., Huang, S., Tian, L., Lu, Y.A., Mei, Y., Ren, M., Li, N., Liu, L. and Xiang, H., 2015b. Association between air pollutants and cardiovascular disease mortality in Wuhan, China. *International journal of environmental research and public health, 12*(4), pp.3506-3516.

Mann, G.W., Carslaw, K.S., Ridley, D.A., Spracklen, D.V., Pringle, K.J., Merikanto, J., Korhonen, H., Schwarz, J.P., Lee, L.A., Manktelow, P.T. and Woodhouse, M.T., 2012. Intercomparison of modal and sectional aerosol microphysics representations within the same 3-D global chemical transport model. *Atmospheric Chemistry and Physics, 12*(10), pp.4449-4476.

Marticorena, B. and Bergametti, G., 1995. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of geophysical research: atmospheres, 100*(D8), pp.16415-16430.

Mathur, R., Pleim, J., Wong, D., Otte, T., Gilliam, R., Roselle, S., Young, J., Binkowski, F. and Xiu, A., 2010. The WRF-CMAQ integrated on-line modeling system: development, testing, and initial applications. *Air Pollution Modeling and Its Application XX, Springer,* pp.155-159.

McLinden, C.A., Fioletov, V., Shephard, M.W., Krotkov, N., Li, C., Martin, R.V., Moran, M.D. and Joiner, J., 2016. Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution. *Nature Geoscience, 9*(7), pp.496-500.

Middleton, D.R., 1998. A new box model to forecast urban air quality: BOXURB. Environmental *Monitoring and Assessment, 52*(1), pp.315-335.

Moore, F.C., 2009. Climate change and air pollution: exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries. *Sustainability, 1*(1), pp.43-54.

Moussiopoulos, N., Berge, E., Bohler, T., Leeuw, F., Gronskei, K.E., Mylona, S. and Tombrou, M., 1997. Ambient Air Quality, Pollutant Dispersion and Transport Models, European Topic Centre on Air Quality, Topic Report 19. *European Environment Agency, EU Publications, Copenhagen.*

Munir, S., Habeebullah, T.M., Seroji, A.R., Morsy, E.A., Mohammed, A.M., Saud, W.A., Abdou, A.E. and Awad, A.H., 2013. Modeling particulate matter concentrations in Makkah, applying a statistical modeling approach. *Aerosol and Air Quality Research, 13*(3), pp.901-910.

Munir, S. and Habeebullah, T.M., 2018. Vehicular emissions on main roads in Makkah, Saudi Arabia-a dispersion modelling study. Arabian Journal of Geosciences, 11(18), pp.1-14.

Nguyen, D.L., 2014. A brief review of air quality models and their applications. *Open Journal of Atmospheric and Climate Change, 1*(2), pp.60-80.

Omidvarborna, H., Baawain, M. and Al-Mamun, A., 2018a. Ambient air quality and exposure assessment study of the Gulf Cooperation Council countries: a critical review. *Science of the Total Environment, 636*, pp.437-448.

Omidvarborna, H., Baawain, M., Al-Mamun, A. and Ala'a, H., 2018b. Dispersion and deposition estimation of fugitive iron particles from an iron industry on nearby communities via AERMOD. Environmental monitoring and assessment, 190(11), pp.1-13.

Orlanski, I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp.527-530.

Osipov, S. and Stenchikov, G., 2018. Simulating the regional impact of dust on the Middle East climate and the Red Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 123*(2), pp.1032-1047.

Othman, A.M., Bala, A.A. and Ahmed, A.A., 2021. Ambient Air Quality, Pollutant Behavior, and Distribution Pattern in Rabigh City Using an Air Dispersion Model. Pak. J. Anal. Environ. Chem. Vol, 22(1), pp.01-12.

Özdemir, E.T., Korkmaz, F.M. and Yavuz, V., 2018. Synoptic analysis of dust storm over Arabian Peninsula: a case study on February 28, 2009. Natural hazards, 92(2), pp.805-827.

Pan, X.L., Kanaya, Y., Wang, Z.F., Tang, X., Takigawa, M., Pakpong, P., Taketani, F. and Akimoto, H., 2014. Using Bayesian optimization method and FLEXPART tracer model to evaluate CO emission in East China in springtime. *Environmental Science and Pollution Research, 21*(5), pp.3873-3879.

Parajuli, S.P., Stenchikov, G.L., Ukhov, A. and Kim, H., 2019. Dust emission modeling using a new high-resolution dust source function in WRF-Chem with implications for air quality. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(17-18), pp.10109-10133.

Patlakas, P., Stathopoulos, C., Flocas, H., Kalogeri, C. and Kallos, G., 2019. Regional climatic features of the Arabian Peninsula. *Atmosphere, 10*(4), p.220.

Pearson, J., 2001. *Improving Air Quality* (pp. i-xi). SAE.

Prijith, S.S., Rajeev, K., Thampi, B.V., Nair, S.K. and Mohan, M., 2013. Multi-year observations of the spatial and vertical distribution of aerosols and the genesis of abnormal variations in aerosol loading over the Arabian Sea during Asian summer monsoon season. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 105, pp.142-151.

Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. and Gill, T.E., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of geophysics, 40*(1), pp.2-1.

Ramadan, A.A., Al-Sudairawi, M., Alhajraf, S. and Khan, A.R., 2008. Total SO_2 emissions from power stations and evaluation of their impact in Kuwait using a Gaussian plume dispersion model. American Journal of Environmental Sciences, 4(1), pp.1-12.

Ramanathan, V. and Carmichael, G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience, 1*(4), pp.221-227.

Randles, C.A., Da Silva, A.M., Buchard, V., Colarco, P.R., Darmenov, A., Govindaraju, R., Smirnov, A., Holben, B., Ferrare, R., Hair, J. and Shinozuka, Y., 2017. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *Journal of climate, 30*(17), pp.6823-6850.

Reiche, D., 2010. Energy Policies of Gulf Cooperation Council (GCC) countries possibilities and limitations of ecological modernization in rentier states. *Energy Policy, 38*(5), pp.2395-2403.

Roberts, J.J., Croke, E.J. and Kennedy, A.S., 1970. An urban atmospheric dispersion model. In *Proceedings of the Symposium on Multiple-Source Urban Diffusion Models, Research Triangle Park, North Carolina, US Government Printing Office, Washington DC.*

Roshan, D.R., Koc, M., Isaifan, R., Shahid, M.Z. and Fountoukis, C., 2019. Aerosol optical thickness over large urban environments of the Arabian Peninsula speciation, variability, and distributions. Atmosphere, 10(5), p.228.

Russell, A., 1997. Regional photochemical air quality modeling: Model formulations, history, and state of the science. *Annual Review of Energy and the Environment, 22*(1), pp.537-588.

Russell, A. and Dennis, R., 2000. NARSTO critical review of photochemical models and modeling. *Atmospheric environment, 34*(12-14), pp.2283-2324.

Salim, S.M. and BEng, A., 2011. *Computational study of wind flow and pollutant dispersion near tree canopies* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

Shao, Y.P., Raupach, M.R. and Leys, J.F., 1996. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Soil Research, 34*(3), pp.309-342.

Shao, Y., 2004. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. Journal of Geophysical Research: *Atmospheres, 109*(D10).

Shao, Y. and Dong, C.H., 2006. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring. *Global and Planetary Change, 52*(1-4), pp.1-22.

Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H., Mikami, M., Tanaka, T.Y., Wang, X. and Yoon, S., 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research, 2*(4), pp.181-204.

Simon, H., Baker, K.R. and Phillips, S., 2012. Compilation and interpretation of photochemical model performance statistics published between 2006 and 2012. *Atmospheric Environment, 61*, pp.124-139.

Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. Monthly weather review, 91(3), pp.99-164.

Smith, S.J., Chateau, J., Dorheim, K., Drouet, L., Durand-Lasserve, O., Fricko, O., Fujimori, S., Hanaoka, T., Harmsen, M., Hilaire, J. and Keramidas, K., 2020. Impact of methane and black carbon mitigation on forcing and temperature: a multi-model scenario analysis. *Climatic Change, 163*(3), pp.1427-1442.

Sportisse, B., 2001. Box models versus Eulerian models in air pollution modeling. *Atmospheric environment, 35*(1), pp.173-178.

Ukhov, A., Mostamandi, S., Krotkov, N., Flemming, J., da Silva, A., Li, C., Fioletov, V., McLinden, C., Anisimov, A., Alshehri, Y.M. and Stenchikov, G., 2020. Study of SO Pollution in the Middle East Using MERRA-2, CAMS Data Assimilation Products, and High-Resolution.

US EPA, 2017. *Revision to the Guideline on Air Quality Models: enhancements to the AERMOD dispersion modeling system and incorporation of approaches to address ozone and fine particulate matter. 40 CFR part 51, Appendix W.* EPA–HQ–OAR–2015–0310.

WRF-Chem Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125*(6), p.e2019JD031993.

Van Leuken, J.P.G., Swart, A.N., Havelaar, A.H., Van Pul, A., Van der Hoek, W. and Heederik, D., 2016. Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock–A review to inform risk assessment studies. *Microbial Risk Analysis, 1*, pp.19-39.

Watson, J.G., Zhu, T., Chow, J.C., Engelbrecht, J., Fujita, E.M. and Wilson, W.E., 2002. Receptor modeling application framework for particle source apportionment. *Chemosphere, 49*(9), pp.1093-1136.

Wesely, M.L. and Hicks, B.B., 2000. A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmospheric environment, 34*(12-14), pp.2261-2282.

Whitby, E.R. and McMurry, P.H., 1997. Modal aerosol dynamics modeling. *Aerosol Science and Technology, 27*(6), pp.673-688.

Woodward, S., 2001. Modeling the atmospheric life cycle and radiative impact of mineral dust in the Hadley Centre climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106*(D16), pp.18155-18166.

Yassin, M.F., 2010. Evaluating the impacts of SO_2 emissions from power stations in Kuwait. WIT Trans Ecol Environ, 136, pp.59-70.

Yassin, M.F., Almutairi, S.K. and Al-Hemoud, A., 2018. Dust storms backward Trajectories' and source identification over Kuwait. Atmospheric research, 212, pp.158-171.

Zannetti, P. ed., 2013. *Air pollution modeling: theories, computational methods and available software*. Springer Science & Business Media.