التلوث الجوي - الهواء

Atmospheric - Air Pollution

مقدمة:

يعد تلوث الهواء من أكبر المشاكل التي تواجه المجتمعات المعاصرة وبخاصةً في الدول الصناعية وتزداد مأساة هذا النوع من التلوث عاماً بعد عام نتيجةً للزيادة التراكمية في حجم الملوثات التي تنبعث عن نشاطات الإنسان المختلفة.

وقبل الخوض في هذا المحور من التلوث البيئي لابد من التعرف على الغلاف الجوي ونوعية الهواء النقي.

الغلاف الجوي:

الغلاف الجوي أو الهوائي (Atmosphere) هو أحد أغلفة النظم البيئية الأربعة (الغلاف الجوي، الغلاف الأرضي، الغلاف المائي، الغلاف الحيوي) وهو ذلك الغلاف الغازي الذي يحيط بالكرة الأرضية إحاطة تامة، ممتداً بعيداً عن سطحها بضع مئات أو آلاف الكيلومترات لينتهي بما يعرف بالفراغ الكوني.

للغلاف الجوي أهمية قصوى للحياة على الأرض:

- المصدر الوحيد للأوكسجين الذي يشترك في جميع عمليات التنفس الخلوي.
- يحمي سطح الأرض من الإشعاعات الكونية القاتلة والأشعة فوق البنفسجية الضارة.
- يسمح بانتقال الصوت.
- يحافظ على درجة حرارة معتدلة بفعل ظاهرة البيت الزجاجي الطبيعية.

لو تخيلنا للحظة أن الغلاف الجوي لم يكن موجودًا، لانعدمت الحياة بشكل كامل بسبب غياب الأوكسجين وثاني أكسيد الكربون، ولما هطل المطر، ولتعرض سطح الأرض إلى الأشعة الكونية المدمرة، ولانعدم اللون الأزرق للسماء وبدت قبة السماء صفحة سوداء تلمع فيها الشمس كقرص أبيض، ولساد الأرض ظلام دائم وبدت النجوم ساطعة في السماء طوال الوقت، ولما كان هناك فرق كبير بين درجات الحرارة ليلاً ونهاراً، ولما أمكن انتقال الصوت، ولتوقف انكسار الضوء وأصبح انتشاره في خطوط مستقيمة.

الخصائص العامة للغلاف الجوي:

أظهرت القياسات الحديثة باستخدام الأقمار الصناعية أن ارتفاع الغلاف الجوي يصل إلى نحو 64400 كم فوق سطح البحر، بعد اكتشاف بعض ذرات غازية (هيدروجين وهيليوم) موجودة عند هذا الارتفاع. مع ذلك تجدر الإشارة إلى أن حوالي 99.99% من كتلة الغلاف الجوي تتركز دون ارتفاع 100 كم عن سطح الأرض.

ويقدر حجم الغلاف الجوي بأكثر من 5×10^{21} متر مكعب، وتقدر كتلته بحوالي 5.14×10^{18} كغ. لو توزعت هذه الكتلة بشكل متساو على سطح الأرض، لكان وزن عمود الهواء فوق كل سنتيمتر مربع يعادل نحو 1034

غراماً، وهو ما يعرف بالضغط الجوي القياسي (1 ضغط جوي). ومن الخصائص المهمة أيضًا أن كثافة الغلاف الجوي تتناقص بسرعة مع الارتفاع، حيث تكون أكثر من نصف كتلته موجودة في أول 5 كم فقط من سطح الأرض.

طبقات الغلاف الجوي:

في السابق كان الاعتقاد السائد أن الغلاف الجوي يتكون من طبقة واحدة تمتد من سطح البحر وحتى قمته، ويعود ذلك إلى ضعف الإمكانيات البحثية في مجال علم الفضاء أو الفلك. وبعد التطور العلمي ظهرت إمكانية تقسيم الغلاف الجوي إلى خمس طبقات متميزة بناءً على التغير في درجة الحرارة كما يوضحه جدول (1)

جدول (1): طبقات الغلاف الجوي وأهم الخصائص الرئيسية

	الطبقة	نطاق الارتفاع (تقريباً)	الخصائص الرئيسية
1.	**التروبوسفير (Troposphere)**	من سطح البحر إلى 11 كم (8 كم عند القطبين، 18 كم عند خط الاستواء).	•تحدث فيها جميع عمليات الطقس والمناخ (غيوم، رياح، أمطار). •تحتوي على معظم بخار الماء والغبار. •تنخفض درجة الحرارة مع الارتفاع. •تنتهي بحد انتقالي يسمى **التروبوبوز**.
2.	**الستراتوسفير (Stratosphere)**	من 11 كم إلى 50 كم.	•تحتوي على **طبقة الأوزون** التي تمتص الأشعة فوق البنفسجية الضارة. •ترتفع درجة الحرارة مع الارتفاع بسبب امتصاص الأوزون للأشعة فوق البنفسجية. •تنتهي بحد **الستراتوبوز**.
3.	**الميزوسفير (Mesosphere)**	من 50 كم إلى 80 كم.	•تُعرف مع الستراتوسفير بالغلاف الجوي الأوسط. •تنخفض درجة الحرارة بشدة. •تنتهي بحد **الميزوبوز**.
4.	**الثرموسفير (Thermosphere)**	من 80 كم إلى 500-750 كم.	•ترتفع درجة الحرارة بشكل كبير (من -93 إلى 1700 درجة مئوية) بسبب امتصاص الأشعة الشمسية. •تحتوي على طبقة **الأيونوسفير** المسؤولة عن عكس الموجات اللاسلكية القصيرة وظهور **الشفق القطبي**.
5.	**الإكسوسفير (Exosphere)**	من 750 كم إلى نهاية الغلاف الجوي (~64,400 كم).	•الطبقة الخارجية، الهواء نادر جداً (ذرات هيليوم، هيدروجين، أكسجين). •درجات حرارتها شاذة (أكثر في الظل منها في الشمس).

وهناك تقسيمات أُخرى لطبقات الغلاف الجوي تتضمن منطقة متأينة تسمى بطبقة الأيونوسفير (Ionosphere) التي تتميز بتأثيرها الفعال على إنعكاس الموجات اللاسلكية القصيرة، وذلك بسبب تأين جزيئات الغاز بتأثير الأشعة فوق البنفسجية وتتميز هذه الطبقة بظهور وهج أعالي الغلاف الهوائي يسمى بالوهج القطبي.

مكونات الهواء:

يتألف الهواء النقي من مزيج فيزيائي متجانس التركيب لعدة غازات، وهو قابل للتمدد والانضغاط، ويمثل نظاماً تيرموديناميكياً متكاملاً متوازناً، وهو متجانس التركيب في كل أجزائه من سطح البحر وحتى ارتفاع 80 كم، ويتكون من مجموعتين من الغازات:

- مجموعة الغازات الثابتة.
- مجموعة الغازات غير الثابتة.

فالغازات الثابتة هي الغازات التي تكون نسب التراكيز الحجمية لها ثابتة وتسمى أيضا بالغازات الدائمة، وهي كل من: غازات الأوكسجين، الآزوت (النتروجين)، الأرغون، النيون، الهيليوم، الهيدروجين ... الخ.

الغازات غير الثابتة (المتغيرة): هي الغازات التي تتغير نسبها في الجو من مكان إلى آخر ومن زمن إلى زمن. وأهمها:

- **بخار الماء (H_2O)** تتراوح نسبته من 0% (في الصحاري القطبية) إلى 4% (في الغابات الاستوائية الماطرة). وهو غاز دفيئة قوي، وهو أساس تشكل الغيوم والهطول.
- **ثاني أكسيد الكربون (CO_2)** يتراوح تركيزه حاليًا حول 335-420 ppm حسب الموقع والزمان، مع اتجاه تصاعدي مستمر بسبب حرق الوقود الأحفوري.
- **الأوزون (O_3)** يتغير تركيزه بشكل كبير بين الستراتوسفير (200-300 ppb) والتروبوسفير (10-30 ppb في المناطق النظيفة ويمكن أن يزيد عن 200 ppb في المدن الملوثة صيفاً).
- **أكاسيد الكبريت والآزوت** تراكيزها قريبة من الصفر في الهواء النقي، ولكنها تزداد بشكل حاد بالقرب من المصادر الصناعية وعوادم السيارات.

من هذه الغازات ما تزيد نسب تركيزها كثيراً عن مقاديرها العادية أحيانا في بقع وأماكن محدودة قرب مصادر انبعاثها، كما هو الحال قرب المواقع الصناعية وقرب البراكين الناشطة، كما أيضاً يمكن أن يحتوي على الجزيئات المعلقة من مصادر مختلفة (جدول 2).

جدول (2): تركيب الهواء الجوي.

اسم العنصر	الرمز	النسبة المئوية حجماً %	التركيز ppm
الآزوت	N_2	78.08 ± 0.004	
الأوكسجين	O_2	20.95 ± 0.002	
أرغون	Ar	0.93 ± 0.001	
ثاني أكسيد الكربون	CO_2	0.035 ± 0.001	335
نيون	Ne	0.0018	18.18 ± 0.04
هيليوم	He	0.0005	5.24 ± 0.004
كريبتون	Kr	0.00014	1.14 ± 0.01
كزيون	Xe	0.000008	0.087 ± 0.001
هيدروجين	H_2	0.00005	0.5
ميتان	CH_4	0.0002	2
بروبان	C_3H_8	0.0002	2
أكسيد النتروز	N_2O		0.5 ± 0.01
الأوزون	O_3		0.04
بخار الماء	H_2O	0 -5	5300

تلوث الهواء:

ليس هناك تعريف شامل للتلوث غير أنه يمكن القول بيئيًا بأن **التلوث** هو كل تغير كمي أو كيفي في مكونات البيئة الحية وغير الحية بحيث لا يمكن للبيئة استيعابه دون أن يختل توازنها، أو بشكل آخر فإن التلوث هو وجود أية مادة أو طاقة في غير مكانها وزمانها وكميتها المناسبة.

وفي عام 1967عرف المجلس الأوروبي التلوث الجوي على الشكل التالي يتلوث الهواء عندما تتواجد فيه مادة غريبة، أو عندما يحدث تغير هام في نسب المواد المكونة له يترتب عليها حدوث نتائج ضارة، وتسبب مضايقات وانزعاجات."

قد يكون التلوث **كمياً** ويعني زيادة أحد المكونات الطبيعية الموجودة أصلاً في النظام البيئي، مثل زيادة ثاني أكسيد الكربون (CO_2) عن نسبته الطبيعية، فرغم أنه ضروري للحياة (البناء الضوئي) وضروري لظاهرة البيت الزجاجي الطبيعية، إلا أن زيادته المفرطة تؤدي إلى تغير خطير في التوازن الحراري للكرة الأرضية.

وقد يكون التلوث **كيفياً** ويعني إدخال مواد اصطناعية غريبة لم يسبق لها أن وجدت في دورات وسلاسل الأنظمة البيئية الطبيعية، مثل مركبات الكلوروفلوروكربون (CFCs) والنايلون والمبيدات الحشرية الكلورية العضوية (DDT). كما يعتبر الماء بحد ذاته ملوثًا فيما لو أضيف إلى التربة بكميات كبيرة تؤدي إلى طرد الهواء من مسامات التربة (سوء التهوية)، وتعد الأملاح التي تتراكم في الأراضي الزراعية بفعل قصور نظم الصرف ملوثات أيضاً.

يعتبر تلوث الهواء من أسوأ أشكال التلوث وأخطرها، وكلما ازداد عدد السكان في المنطقة الملوثة كلما زاد التأثير الخطر لهذه الملوثات. ومن الأسباب التي تجعل تلوث الهواء من أخطر المشاكل البيئية هي:

1. سهولة وسرعة الانتشار: ينتقل الهواء الملوث بسرعة كبيرة من منطقة إلى أخرى تبعاً لسرعة الرياح واتجاهها. وقد تنتقل الملوثات لمسافات تصل إلى آلاف الكيلومترات (مثل غبار الصحراء الكبرى الذي يصل إلى الأمازون، أو أكاسيد الكبريت المنبعثة في أوروبا الغربية والتي تسبب أمطاراً حامضية في الدول الاسكندنافية). هذه الخاصية تجعل من الصعب تفادي التلوث أو السيطرة عليه، وتجعل التلوث الجوي مشكلة إقليمية ودولية وليس فقط محلية.
2. الكمية الهائلة التي يستنشقها الإنسان يومياً: يستنشق الإنسان يومياً كمية كبيرة من الهواء تقدر بحوالي 15 كغ (حوالي 10-12 متر مكعب). بالمقارنة يحتاج الإنسان إلى 1.5 كغ من الغذاء و2.5 كغ من الماء يومياً. أي أن كمية الهواء التي تدخل جسم الإنسان أكبر بأكثر من 5 أضعاف كمية الماء والغذاء مجتمعين. هذا يعني أن أي ملوث موجود في الهواء حتى بتركيزات صغيرة، سيدخل بكميات كبيرة إلى الجهاز التنفسي ويصل إلى الدم والأعضاء الحيوية خلال فترة قصيرة.

إن هذا التأثير المباشر لتلوث الهواء قد دفع الكثير من المؤسسات الحكومية والجمعيات والمنظمات العالمية ومنظمات المجتمع المدني إلى اتخاذ إجراءات معينة للحد من تلوث الهواء والسيطرة عليه ورصد مصادره. إذ تشير الدراسات الخاصة بتلوث الهواء في شتى بقاع العالم إلى أن معظم ملوثات الهواء تنتج عن عمليات الاحتراق في القطاع الصناعي إضافة إلى قطاع النقل.

مصادر تلوث الهواء:

تنقسم المصادر بشكل عام إلى قسمين رئيسيين:

A. المصادر الطبيعية:

تتمثل في الغبار والأتربة المثارة بفعل الرياح من الصحاري والأراضي الجافة، الدخان الناتج عن حرائق الغابات الطبيعية، حبوب اللقاح والأبواغ الفطرية، الكائنات الحية الدقيقة، والغازات المنبعثة من تحلل المواد العضوية في الأراضي الرطبة والمحيطات (الميثان، كبريتيد الهيدروجين، وأكاسيد الآزوت). النشاط البركاني (الرماد والغازات مثل SO_2, H_2S, CO_2).

B. المصادر البشرية:

وهي مصادر غير طبيعية ناجمة عن نشاطات الإنسان الصناعية وغير الصناعية، وتشمل:

- **قطاع النقل والمواصلات:** السيارات، الشاحنات، الحافلات، الطائرات، السفن، والقطارات. يعتبر قطاع النقل المسؤول الأول عن انبعاثات أول أكسيد الكربون (75-85%)، وأكاسيد الآزوت (50-75%)، والهيدروكربونات (40-50%) في معظم البلدان الصناعية.
- **مراكز الاحتراق الثابتة:** محطات توليد الكهرباء التي تعمل بالفحم أو الفيول أو الغاز الطبيعي، مصافي النفط، محارق النفايات البلدية والصناعية، مراكز التدفئة الصناعية والمنزلية، الأفران الصناعية (الإسمنت، الجير، الزجاج).
- **التجمعات الصناعية:** مصانع الحديد والصلب، الصناعات الكيميائية (الأسمدة، المبيدات، البلاستيك، الورق)، مصانع الألمنيوم (انبعاثات الفلور)، مصانع الإسمنت (غبار كبير الحجم)، الصناعات الغذائية (روائح، جسيمات عضوية).
- **الأنشطة المنزلية:** استخدام المذيبات، الدهانات، معطرات الجو، منتجات التنظيف، حرق الخشب للتدفئة، الطهي بالفحم.
- **الزراعة:** حرق المخلفات الزراعية، استخدام الأسمدة الآزوتية، رش المبيدات، تربية الحيوانات (انبعاث الميثان والأمونيا).

أنواع تلوث الهواء:

يمكن تصنيف تلوث الهواء إلى خمسة أنواع رئيسية:

1. **التلوث بالمواد الصلبة العالقة:** وتشمل كل من الدخان وانبعاثات عوادم السيارات ومولدات الكهرباء وتصاعد الأتربة، وكذلك حبوب اللقاح وغبار القطن وأتربة معامل الإسمنت ويعبر عنها بالرمز (PM_{10}) وهي المواد العالقة التي تقل أحجامها عن 10 ميكرون و($PM_{2.5}$) والتي تقل عن 2.5 ميكرون. تعتبر الجسيمات الأصغر حجماً هي الأخطر لأنها تستطيع اختراق الحويصلات الهوائية في الرئة والوصول إلى مجرى الدم.
2. **التلوث بالمواد الغازية والأبخرة:** يشمل غازات مثل غاز الكلور وأكاسيد النتروجين والكاربون وثاني أوكسيد الكبريت وغاز الأوزون إضافة إلى الغازات المنبعثة عن عمليات التحلل مثل الميثان وكبريتيد الهيدروجين.
3. **التلوث بالأحياء المجهرية**: ويشمل مخلفات عمليات تحلل المواد العضوية مثل البكتيريا (مثل بكتيريا الليجيونيلا المسببة لمرض الفيلقيات)، الفيروسات (مثل فيروس الإنفلونزا الذي ينتقل بالهواء)، العفن (الفطريات) وأبواغها، وحبوب اللقاح المسببة للحساسية. يمكن لهذه الكائنات أن تسبب أمراضًا تنفسية وحساسية عند الإنسان والحيوان.
4. **تلوث الهواء بالصوت (الضجيج/الضوضاء)**: يتضمن الأصوات المرتفعة غير المنسقة الناتجة عن وسائل النقل (السيارات، الطائرات، القطارات)، والآلات والمعدات (معدات البناء، المصانع، المولدات)، وكذلك تلك الناتجة عن الأماكن المزدحمة كالأسواق التجارية والمطاعم والمهرجانات. يمكن أن يتسبب التلوث الصوتي بفقدان السمع التدريجي، الإجهاد، اضطرابات النوم، وأمراض القلب والأوعية الدموية. سيتم تفصيل هذا الموضوع في محاضرة لاحقة.

5. التلوث بالإشعاع: حيث تنبعث عن بعض الأنشطة العلمية والعسكرية إشعاعات مختلفة (أشعة غاما، نيوترونات، جسيمات ألفا وبيتا) تسبب خطورة كبيرة على الإنسان والكائنات الحية. مصادر التلوث الإشعاعي تشمل: التجارب النووية، الحوادث النووية (مثل تشرنوبيل 1986 وفوكوشيما 2011)، النفايات المشعة، وأجهزة العلاج الإشعاعي الطبية. سيتم تفصيل هذا الموضوع في محاضرة لاحقة.

أنواع الملوثات الجوية:

تتنوع الملوثات الجوية وتختلف باختلاف مصادرها، وقلما يوجد ملوث جوي بمفرده في الجو، يمكن تقسيم الملوثات في الهواء إلى **مجموعتين رئيسيتين:** الدقائقيات العالقة والملوثات الغازية.

أولاً – الدقائقيات / الملوثات الصلبة:

المادة الدقائقية (Particulate Matter - PM) : هي الجسيمات التي تنبعث من خلال مداخن المصانع وكذلك عوادم السيارات نتيجة لاحتراق الوقود. هناك العديد من الجسيمات التي لها آثار صحية سيئة على الإنسان، مثل انبعاثات الرصاص الذي كان يضاف إلى البنزين للمساعدة في عملية الاحتراق وتقليل ظاهرة الفرقعة (الطرق) في المحرك. إن احتواء الجو على مادة دقائقية يعني وجود جزيئات صلبة أو سائلة عالقة فيه، ويعرف هذا الخليط باسم **الهباء الجوي (Aerosol)** أو المادة الدقائقية ويتكون عادةً من:

(1) مواد صلبة غير غازية عضوية ولا عضوية، (2) عناصر معدنية، (3) قطرات حامضية وهيدروكربونية، (4) دخان من مختلف الأصناف والأحجام.

تقل أقطار المادة الدقائقية كثيراً عن 100 ميكرومتر(μm) ، ويقدر تركيزها في الغلاف الجوي فوق اليابسة بحوالي 10000 جسيمة/سم^3 كمعدل عام. وهي تتخذ شكلين رئيسيين:

- **الهباء السائل (Liquid Aerosol)** ينتج عن عمليات التكثف ويسمى بالسديم (Mist).
- **المادة الصلبة العالقة (Suspended Solids)** تنتج عن عمليات التعرية أو السحق أو الرش وتسمى بالهباء الصلب أو الغبار (Dust).

تصنيف الدقائقيات: تصنف المادة الدقائقية اعتماداً على عدة معايير:

1. حسب المنشأ (آلية التكوين):

- **الدقائق الأولية (Primary particles)** وهي الدقائق الكبيرة العملاقة التي تنشأ عن عمليات الانتشار لأنها تحقن مباشرة إلى الجو من المصادر الطبيعية (غبار التربة، رماد بركاني، حبوب اللقاح) أو المصادر البشرية (غبار الطرق، دخان المصانع)، أقطارها غالباً أكبر من 2 ميكرومتر.
- **الدقائق الثانوية (Secondary particles)** وهي الدقائق الأصغر حجماً (غالباً أقل من 2 ميكرومتر) التي تكون عبارة عن كبريتات ونترات وهيدروكربونات تنتج عن تفاعلات كيميائية في الغلاف الجوي تشمل نواتج الاحتراق (مثل تحويل SO_2 إلى كبريتات، أو NO_x إلى نترات، أو أكسدة الهيدروكربونات).

2. حسب الحجم (القطر):

يوضح الجدول التالي الأنواع المختلفة من الجزيئات المعلقة في الجو حسب الحجم والطبيعة:

جدول (3): يبين الأنواع المختلفة من الجزيئات المعلقة في الجو.

الاسم	الأصل	القطر
حبيبات الرمل Grit	صلبة، تترسب بسرعة	> 500 µm
الغبار Dust	صلبة، تترسب ببطء	2 – 500 µm
الدخان Smoke	جزيئات غاز محمولة صلبة	< 2 µm
الضباب (السديم) Mist	قطرات سائلة	0.1 – 2 µm
نويات إيتكن Aitken nuclei	قطرات سائلة أو صلبة	0.003 – 0.1 µm

ملاحظات هامة:

- الجسيمات ذات أقطار أكبر من 50 ميكرومتر تكون مرئية بالعين المجردة وتترسب بسرعة قرب مصدرها.
- الجسيمات ذات أقطار بين 10 و50 ميكرومتر تبقى معلقة فترة قصيرة.
- الجسيمات ذات أقطار أقل من 10 ميكرومتر (PM_{10}) تبقى معلقة فترة أطول، وإذا كانت صغيرة جدًا (0.1-2 ميكرومتر) فإنها تعمل كنوى لتكاثف الماء خلال تشكل الغيوم، وهي فقط التي تترسب مع المطر الهاطل.
- الجسيمات ذات أقطار أقل من 2.5 ميكرومتر ($PM_{2.5}$) هي الأخطر لأنها تصل إلى الحويصلات الهوائية في الرئة.
- إذا هربت هذه الجزيئات من التروبوسفير إلى الستراتوسفير فإنها تبقى هناك لشهور أو سنوات.
- الجسيمات ذات أقطار 0.003-0.1 ميكرومتر تعرف بنوى إيتكن وتتكون كمنتجات تكاثف من البخار الساخن، وتتجمع لتشكل جزيئات أكبر (0.1-2 ميكرومتر) التي تنقل بالتدريج مع المطر. تساهم المركبات الهيدروكربونية غير المحترقة أيضاً في تشكل هذه النوى الكبيرة.

أضرار الدقائقيات:

1. تسبب تأثيرات مناخية محلية من خلال حجب أشعة الشمس وخفض درجات الحرارة عند سطح الأرض.
2. توفير أنوية للتكاثف مما يزيد ظهور الضباب والأمطار في المدن.
3. تسبب أضرار على صحة الإنسان والحيوان: مثل أمراض الجهاز التنفسي، الأمراض الجلدية، أمراض العيون.

4. تسبب أضرار على النباتات: تثبيط عملية النتح نتيجة سد الثغور عند تراكمها على الأوراق، تقليل شدة الإضاءة الواصلة مما يؤثر سلباً في عملية البناء الضوئي.
5. تسبب انخفاض الرؤية في المدن مما يزيد الحاجة لاستخدام إنارة اصطناعية بدرجة أكبر، وبالتالي زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية.

الجسيمات المعدنية السامة:

1. الرصاص(Lead – Pb)

يعد الرصاص من أكثر المعادن السامة انتشاراً في الهواء. وتعد **وسائط النقل (السيارات)** أهم مصدر للرصاص الجوي. فمنذ عام 1924، يُضاف الرصاص إلى البنزين على هيئة **رابع إيثيل الرصاص** كعامل لكتم الصوت، أي أن الرصاص يرفع الرقم الأوكتيني للبنزين، وهو مقياس عددي يمثل الخصائص المانعة للصوت في الوقود.

يخرج الرصاص من عوادم السيارات على هيئة جزيئات أو غبار محمل بأملاح الرصاص بروميد الرصاص أو كلوريد الرصاص. تساهم السيارات في فرنسا بحوالي 90% من انبعاث الرصاص، و10% منه يترسب ضمن محيط 100 متر حول الطريق.

معظم جزيئات الرصاص ذات أقطار أقل من 0.5 ميكرومتر مما يسهل انتشارها وبذلك تحمل إلى مسافات بعيدة بالهواء ولا تترسب إلا بعد عدة أيام. يدخل الرصاص أيضا في تركيب **المبيدات الحشرية** على هيئة أوسيانات الرصاص، كما كان يستعمل في بعض **الدهانات** (خاصة دهانات المنازل القديمة قبل حظرها). غالباً ما تكون أقنية المياه المنزلية (**المواسير**) في المباني القديمة مصنوعة من الرصاص. فعندما يكون الماء قلوياً يتشكل على الجدار الداخلي لتلك الأقنية طبقة رقيقة من فحمات الكالسيوم تمنع انحلال الرصاص وبالتالي انتقاله إلى مياه الشرب. أما إذا كان الماء حامضياً وغنياً بالكلور والنتريت والنترات، فإن رصاص جدار الأقنية ينحل ويصبح الماء غنياً بالرصاص. ويتعلق ذلك أيضاً بفترة بقاء الماء في تلك الأقنية، لذلك ينصح دائماً بفتح الصنبور ليتدفق بضعة لترات من الماء الراكد أثناء الليل قبل استعماله للشرب في الصباح.

السمية المزمنة بالرصاص (الساتورنزم): تعني وجود الرصاص في الدم فوق 200 ميكروغرام/لتر، وتسبب لدى البالغين مغصاً بطنياً، وشللاً في العضلة الباسطة للساعد، وخطاً أحمر على اللثة، وفقر الدم.

أما عند الأطفال فتؤدي إلى تأخر النمو العقلي، وضعف الذاكرة، وانخفاض الذكاء، واضطرابات سلوكية، ويمر الرصاص عبر المشيمة ليؤثر على الجنين. وقد خفض استخدام البنزين الخالي من الرصاص تراكيزه في الهواء، وتتراوح القيمة الحدية السنوية المقبولة بين 0.5 و2 ميكروغرام/م^3 حسب منظمة الصحة العالمية WHO، أما في مياه الشرب فحدها 10 ميكروغرام/لتر.

2. الكادميوم(Cadmium – Cd)

يتواجد الكادميوم كمركب طبيعي في التربة والماء بتراكيز منخفضة جدًا (أقل من 1 ppm). وهو عادة يُعدن ويُستخلص من خامات الزنك (خاصة كبريتيد الزنك – سفاليريت) حيث يوجد بنسبة 0.1-0.5% كشائب. يستخدم الكادميوم صناعياً كمادة مضادة للاحتكاك وغير قابلة للصدأ في السبائك المعدنية (مثل سبائك النحاس والكادميوم

للأسلاك الكهربائية عالية التحمل)، وفي صناعة البطاريات القلوية القابلة لإعادة الشحن (بطاريات النيكل-كادميوم)، وأصباغ المواد البلاستيكية والدهانات (صبغة الكادميوم الصفراء والحمراء)، وطلاء الخزف والمعادن لحمايتها من الصدأ (طلاء الكادميوم الكهربائي).

يحدث التلوث بالكادميوم عن طريق انطلاق غبار الكادميوم من المصانع (مصانع الزنك، مصانع البطاريات، مصانع السبائك) مما يؤدي إلى تلوث المياه والنباتات (خاصة الأوراق الخارجية للنباتات مثل الخس والسبانخ). وكنتيجة لتلوث المياه يمكن أن نجد تراكيز غير طبيعية من الكادميوم عند بعض الأسماك والمحاريات (خاصة المحار الذي يركز الكادميوم في أنسجته).

أشهر حوادث التلوث بالكادميوم: حدثت في اليابان بين 1912 و1945، حين تلوثت حقول الأرز بمياه صرف منجم زنك احتوت على 0.18 ppm من شوارد الكادميوم، مما تسبب بمرض "إيتاي-إيتاي" الذي اتسم بآلام عظمية مبرحة وكسور متعددة وتلين العظام، خاصة لدى النساء بسبب نقص الحديد والكالسيوم. تكمن خطورة الكادميوم في عمره النصفي الطويل (10-30 سنة) وتراكمه في الكبد والكلية، مما يؤدي إلى بروتينية بولية واضطرابات قلبية وعائية وارتفاع ضغط الدم وحصى كلوية، وقد ينتهي بفشل كلوي مزمن.

3. الفلور(Fluorine – F)

تنطلق جسيمات الفلور الدقيقة على هيئة فلوريدات، فلور الهيدروجين HF، أو سيليكون رباعي الفلور SiF_4 إلى الجو من معامل الآجر، ومصانع الألمنيوم، الصناعات الفوسفاتية، والزجاج والسيراميك، فتترسب على المراعي المحيطة. تتغذى عليها الحيوانات (أبقار، أغنام، خيول) فتصاب بتخلخل الأسنان وتآكل المينا، وقد يصل الأمر إلى هشاشة العظام والكسور العفوية. كما أن وجود الفلور في مياه الشرب بتركيز 1.5 مغ/لتر يسبب بقعاً بنية على الأسنان (تسمم فلوري أسناني)، كما يشاهد عند سكان تدمر والمناطق ذات الفلور الطبيعي المرتفع في المياه الجوفية.

ثانياً – الملوثات الغازية:

تتمثل أهم الملوثات الغازية الملوثة للهواء فيما يلي:

- غاز أول أكسيد الكربون CO
- غازات الكبريت ($H_2S - SO_2$)
- غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2
- أكاسيد الآزوت NO_X
- الهيدروكربونات HC
- الأوزون O_3

بالنسبة للملوثات الغازية يمكن أن تقسم من حيث المنشأ إلى:

الملوثات الأولية Primary pollutants:

تنتج عن الاحتراق حيث تنبعث مباشرة من المصدر وتوجد بتراكيز كبيرة بالقرب منه، ويسمى هذا التلوث بالتلوث القريب.

من هذه الملوثات: أول أكسيد الكربون، أول أكسيد الآزوت، الغبار المعلق، الرصاص وبعض المركبات العضوية الطيارة (VOC: وهي كل المركبات التي تحتوي على الكربون والهيدروجين - ماعدا الميتان - الذي يمكن أن يستبدل مكانه بهالوجينات، الأوكسجين، الكبريت، الآزوت أو الفوسفور، باستثناء أكاسيد الكربون والكربونات، تتواجد هذه المركبات بحالة غاز أو بخار في الظروف الطبيعية من الحرارة والضغط)، ينخفض تركيز هذه الملوثات الأولية مع ابتعادها عن مصدرها من خلال التمديد.

الملوثات الثانوية Secondary pollutants:

تتشكل هذه الملوثات نتيجة التفاعلات الكيميائية التي تحدث في الهواء (تنتج بشكل غير مباشر) مثل: الأوزون، ثاني أكسيد الآزوت، بروكسي أسيتل نترات (البان -PAN- **P**eroxy**A**cetyl **N**itrate)، حمض الكبريت H_2SO_4، حمض الآزوت HNO_3.

أول أكسيد الكربون CO:

هو غاز عديم اللون والرائحة، ينتج أول أكسيد الكربون من كل تفاعلات الاحتراق الغير كاملة للوقود في السيارات، تكرير البترول، مصانع الحديد والصلب وحرائق الغابات وغيرها، كما ينبعث من مصادر طبيعية أهمها البراكين. تقدر مشاركة وسائل المواصلات في انبعاثات الـ CO بحولي 75% ، ويكمن تأثيره السلبي من خلال اتحاده مع هيموغلوبين الدم مكوناً كاربوكسي هيموغلوبين الدم الذي يتميز بعدم قدرته على الاتحاد مع الأوكسجين وبالتالي خفض كمية الأوكسجين في الدم.

يتميز هذا الغاز بكثافة مشابهة لكثافة الهواء مما يجعله ينتشر بشكل متجانس في مكان مغلق. يقدر تركيزه العادي بحوالي 0.1- 0.2 ppm، يمكن أن يصل تركيزه في جو المدن حتى 50- 100 ppm، وفي حالات الازدحام الشديد يصل إلى 600 ppm، يتأكسد CO في الجو بشكل بطيء جداً إلى CO_2 حيث يقدر عمره في الهواء إلى حوالي شهرين ونصف. يساهم في تشكل الأوزون في الطبقات السفلى من الغلاف الجوي، إن نسبة هذا الغاز في تناقص نتيجة المراقبة المستمرة لمحركات السيارات من خلال وضع علبة المرجع الذي يسمح بأكسدة أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون.

ثاني أكسيد الكربون CO_2:

هو مكون طبيعي في الجو ويشكل حوالي 0.03%، ينتج غاز ثاني أكسيد الكربون عن عمليات الاحتراق الكاملة، لكن عندما تزداد كميته تؤدي إلى تغيرات فيزيولوجية سلبية (هذه الزيادة ناتجة عن زيادة الاعتماد على الوقود الأحفوري – بترول – فحم في عملية إنتاج الطاقة، غازات عوادم السيارات، وقلة المسطحات الخضراء).

إن نصف كمية الـ CO_2 المنطلقة إلى الجو تبقى فيه والنصف الآخر يثبت في المحيطات أو يستعمل من قبل النبات في عملية التركيب الضوئي والتي تحوله إلى الأوكسجين (**هنا تكمن أهمية التشجير!**).

يلعب ثاني أكسيد الكربون دور أساسي في السلسلة الغذائية، حيث أن الأوكسجين، الآزوت، الكربون هي مواد غير عضوية لا تستقلب مباشرة من قبل الإنسان أو الحيوان، تلعب النباتات دوراً وسيطاً حيث تأخذ من التربة والجو هذه العناصر وعبر عملية التركيب الضوئي تكون المركبات العضوية (غليكوسيدات)، إذاً فقط مع استهلاك هذه المواد

تسمح للإنسان والحيوان بالحصول على هذه المركبات من أجل تغطية الاحتياجات الطاقية وكمواد بناء بالنسبة لأعضائها. يؤدي وجود هذا الغاز مع بخار الماء الجوي إلى امتصاص جزء من الأشعة تحت الحمراء في الجو وإعادتها إلى الأرض وهو ما يسمى بأثر البيت الزجاجي الذي يعدّل درجة حرارة الأرض وبدونه تصبح 20 درجة مئوية تحت الصفر.

المركبات الهيدروكربونية:

هي مركبات عضوية غازية مكونة من الهيدروجين والكربون وهي ذات صيغة عامة: $(CH)_n$ أو على شكل جسيمات، تتدرج من الميتان الغازي مروراً بهيدروكربونات (على شكل أبخرة) حتى هيدروكربونات عالية الوزن الجزيئي مثل المركبات الهيدروكربونية العطرية المتعددة الحلقات. التركيز الطبيعي للميتان في الجو هو 1.5ppm، بينما بقية المركبات الهيدروكربونية مجتمعة هو أقل من 1 ppb.

إن أغلب انبعاثات الميتان تكون طبيعية ومن أهمها التخمرات الميكروبية في الأراضي الرطبة اللاهوائية، والتسرب من مراكز إنتاج الفحم والغاز الطبيعي، عن طريق الأكسدة الغير كاملة للمواد العضوية خلال حرائق الغابات. تقدر الانبعاثات الطبيعية لغاز الميتان بحوالي 300 إلى 1600 مليون طن/سنة، بينما الانبعاثات الطبيعية للهيدروكربونات غير الميتان تقدر بحوالي 200 إلى 830 مليون طن/سنة، في الوقت الذي قدرت فيه الانبعاثات المستحدثة بحوالي 65 مليون طن/سنة.

أهم مصادرها هي النباتات الحية وبشكل خاص **الغابات**، وتسربها على هيئة هيدروكربونات خفيفة مثل ايتان، بروبان، بوتان، والبنتان من مراكز توضع الوقود الأحفوري. إن أهم الهيدروكربونات المنبعثة من الغابات هي الإيزوبرين وتربينات مختلفة. في الولايات المتحدة الأمريكية فإن نسبة 65% من الانبعاث السنوي للمواد الهيدروكربونية الغير ميتان يحدث في الأشهر الحارة من أيار حتى آب، إن انبعاث الهيدروكربونات الغير ميتان يختلف بشكل كبير بين أنواع النباتات وأشكال الغابات

يعتمد معدل ونوع الهيدروكربونات المنبعثة من **وسائط النقل السيارات** على نوع المحرك، وزن السيارة، درجة حرارة المحرك وخواص أخرى، حيث تؤثر كلها في فعالية الاحتراق وبالتالي تؤثر على معدل انبعاث الهيدروكربونات. من المصادر الأخرى المستحدثة هي **المصانع** التي تستخدم الوقود الأحفوري وتعتبر مصدراً صغيراً نسبياً 2% من مصادر الانبعاث المستحدثة، تقذف بعض المصانع بعض الهيدروكربونات السامة ومنها الهيدروكربونات العطرية المتعددة الحلقات مثل البنزوبيرين الذي ينبعث على هيئة جزيئات صغيرة ذات قطر أقل من 3 ميكرومتر.

لا توجد بشكل عام أضرار حادة للمركبات الهيدروكربونية بالنسبة للنبات والحيوان، بالرغم من ازدياد تراكيز هذه المواد في أجواء المدن إلا انه لم تكتشف بعد حقيقة أثرها المباشر على صحة الإنسان، لكن بعض هذه المواد تؤثر على صحة الإنسان، نذكر مادة البنزوبيرين التي تعد من أخطر المواد المسببة للسرطان، نذكر أيضاً مادة البنزين حيث أن زيادة التعرض له تؤدي إلى الإصابة باللوكيميا Leukemia (فقر الدم). من أهم أثارها البيئية السلبية تكمن في كونها تشترك في تشكل التلوث الكيميائي الضوئي: الضباب الدخاني smog (أوزون، بان) مع أكاسيد الآزوت بوجود أشعة الشمس.

غازات الكبريت: تنبعث غازات الكبريت بشكل واسع على هيئة SO_2 - H_2S.

غاز كبريت الهدروجين H_2S:

يحوي الهواء بشكل طبيعي على كبريت الهيدروجين نتيجة عمليات التخمر التي تقوم بها البكتريا الكبريتية في التربة والبحار، وينتج أيضاً عن البراكين، من مصادره الصناعية (صناعة الورق، الصناعة البتروكيميائية). غاز يتميز برائحته (رائحة البيض) والإنسان يمكن أن يتحسسه بتركيز أقل من 1ppb.

إن مدة استقرار غاز كبريت الهدرجين في الجو هي أقل من يوم واحد لأنه يتأكسد بسرعة إلى SO_2 وهذا الأخير يمكن أن يستقر في الجو لمدة 4 أيام مقارنة بغاز كبريت الهدرجين وهذا ما يفسر انتقاله إلى مناطق بعيدة عن مصدر انبعاثه قبل أن يؤكسد أو يترسب على الأرض.

ثاني أكسيد الكبريت SO_2:

ثاني أكسيد الكبريت هو ملوث **أولي** ويتكون بشكل أساسي عند احتراق الوقود الأحفوري (الفيول – فحم - غاز طبيعي) من خلال اتحاد الكبريت الموجود في الوقود مع الأكسجين في الهواء. إن الـ SO_2 هو غاز عديم اللون لكن يصبح غاز مخرش أو لاذع عند تركيز 1 ppm – 0.3، وهو قابل للذوبان في الماء.

المصادر الطبيعية لـ SO_2 هي البراكين وحرائق الغابات، يكون انبعاثه من خلال أكسدة الكبريت العضوي خلال حرائق الغابات (والتي لم تحدد كميته بعد)، ولكن انبعاثات البراكين قدرت بأكثر من 12 مليون طن من الكبريت في السنة، وتكون انبعاثات البراكين 90% SO_2، و 10% H_2S.

أما **المصادر الصناعية** (المستحدثة) لـ SO_2 فهي أعلى بكثير عنها من الانبعاثات الطبيعية والتي قدرت بحوالي 63 – 72 مليون طن/السنة منها 54% نتيجة استخدام الوقود الأحفوري الذي يحوي الكبريت بشكليه المعدني والعضوي وخلال عملية احتراقه فإن أكثر من 90% من الكبريت يتأكسد متحولاً إلى SO_2. انبعاثات الـ SO_2 ناتجة عن مصادر ثابتة (مداخن صناعية، منزلية: مراكز التدفئة الصناعية والمنزلية، الأفران الصناعية، بعض الصناعات مثل صناعة تحضير حمض الكبريت)، سيارات المازوت. وبالتأكيد فإن انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكبريت تتغير بحسب الاختلافات في: الكثافة السكانية, درجة ونوع التطور الصناعي، كمية ونوع الوقود المستخدم.

التراكيز النموذجية لـ SO_2 و H_2S في منطقة غير ملوثة تقدر بأقل من 0.2 ppb، أما تركيز الـ SO_2 في الهواء الملوث متغيرة وتقدر وسطياً في هواء المدن 0.2 ppm، ويمكن أن تصل إلى حوالي 3 ppm بالقرب من مصادر الانبعاث الرئيسة.

السمية لغازات الكبريت:

نادراً ما يتواجد H_2S بتراكيز كافية لإحداث أضرار بالنبات. إن سمية SO_2 معروفة وهناك الكثير من المشاهدات الحقلية والمخبرية التي تظهر الأضرار وقلة الإنتاج للمزروعات والنباتات البرية.

إن سمية SO_2 تتضمن:

1- أضرار **حادة**: وبها تتضرر الأنسجة على هيئة نكروزات (تكون هذه النكروزات بين العروق) وتكون عادةً كرد فعل لفترة تعرض قصيرة ولكمية أو تركيز عالي من الـ SO_2.

2- أضرار **مزمنة**: نلاحظ قلة في الإنتاج مترافقة مع أضرار قليلة مثل الكلوروز أو جفاف أو موت مبكر للأوراق وتكون عادةً كرد فعل لوقت طويل من التعرض مع تراكيز قليلة.

3- أضرار **مخفية** -غير ظاهرة-: ربما يحدث قلة في الإنتاج مع عدم ظهور أعراض إصابة مرئية.

بالطبـع إنـه من الصعوبة التعميم حول عتبة أو حد السمية النباتية بالنسبة لـ SO_2 في الهواء وذلك بسبب الاختلافات الواسعة ما بين: الأنواع، الأصناف ضمن النوع، الظروف المختلفة للإجهاد الناتج عن الجفاف، التغذية المعدنية وملوثات أخرى.

وعلى سبيل المثال: إن التعرض لمدة ساعة وبتركيز 0.7 ppm من SO_2 كافي لإحداث أضرار حادة لأغلب الأنواع النباتية وهي مثل التعرض لمدة 8 ساعات وبتركيز 0.18 ppm.

إن لثاني أكسيد الكبريت آثار عديدة:

- على الإنسان والحيوان: يسبب الكثير من الأمراض الخاصة بالجهاز التنفسي التي تظهر نتيجة التعرض لهذا الملوث منها: الربو، التهاب القصبات، انتفاخ الرئة.....
- على النبات: يسبب اصفرار للأوراق نتيجة تخرب الكلوروفيل (بين العروق) وبالتالي ضعف عملية التركيب الضوئي مما يؤدي إلى قلة النمو، وتعتبر الصنوبريات من أكثر النباتات الحساسة له. يساهم في تشكل الأمطار الحامضية التي تؤثر سلباً على الثروة السمكية والغابات. على الأبنية والتماثيل حيث يسبب تآكلها. ولكن مع استخدام وتقدم الطاقة النووية، واستخدام وقود ذو محتوى أقل من الكبريت، فإن تلوث الهواء بهذا الملوث في انخفاض حقيقي. في فرنسا وخلال الـ 15 سنة الماضية حدث انخفاض بحوالي 50%، ولكن فيما يختص بالتلوث الناجم عن السيارات (وبخاصة استخدام سيارات المازوت والتي هي في تزايد) فإن هذا التلوث زاد من 4 إلى 15 % بين عامي 1981-1994 على سبيل المثال.

أكاسيد الآزوت: إن أهم غازات النتروجين هي الأمونيا NH_3, أول أكسيد الآزوت NO , ثاني أكسيد الآزوت NO_2, وأكسيد النتروز N_2O , وبشكل عام نعبر عن NO, NO_2 بـ أكاسيد الآزوت NO_X.

الأمونيا NH_3 :

عبارة عن غاز عديم اللون، تعتبر الأراضي الرطبة من أهم المصادر الطبيعية لانبعاث NH_3 حيث إنها تنتج خلال تحلل المواد العضوية. قدرت كمية الأمونيا المنبعثة طبيعياً في الجو بأكثر من 10^9 طن/ سنة. بينما تعتبر المصادر الصناعية (ناتجة عن تدخل الإنسان) قليلة، تتأكسد الأمونيا إلى NO_X في الغلاف الجوي، وإن فترة بقائه في الجو حولي 7 أيام.

أكسيد النتروز N_2O :

عبارة عن غاز بدون لون وغير سام، له استخدامات طبية (تخدير، يسمى غاز الضحك). التركيز الطبيعي له في الجو هو 0.3 ppm وكونه غير فعال نسبياً فإنه يبقى لفترة طويلة (4 سنوات). إن الانبعاثات الصناعية لأكسيد النتروز هي في الغالب مرتبطة باحتراق الوقود وتقدر بحوالي 6 مليون طن/سنة، ولكن هناك كميات كبيرة من الانبعاثات البيولوجية والتي تقدر بـ 18 مليون طن/سنة ناتجة بشكل كبير عن تنفس لا هوائي للبكتريا ويتم بعملية انتزاع الأوكسجين من النترات في الماء والتربة، ويكون للتربة الزراعية المسمدة القسم الأكبر من انبعاث N_2O. وقد قدر بأن الزراعة الحديثة قد زادت من انبعاثه بنسبة 50% وتركيزه في الجو قد زاد من 0.2 - 0.3% خلال 20-30 السنة الماضية.

أول أكسيد الآزوت NO وثاني أكسيد الآزوت NO_2 :

يكون غاز **أول** أكسيد الآزوت بدون لون وبدون رائحة وطعم، بينما **ثاني** أكسيد الآزوت NO_2 يكون لونه أحمر بني. الحد الأدنى لتركيز NO في الجو 2 – 0.2 ppb، بينما NO_2 حوالي 0.5 – 4 ppb.

توجد هذه الغازات في الجو الملوث بتركيز 0.2 ppm (ويعبر عنها بـ NO_2).

إن لكل من NO، NO_2 مصادر طبيعية متعددة والتي تزيد مجتمعة عن تلك الناتجة عن الانبعاثات الصناعية ويمكننا ذكر الأرقام التالية:

- معدل انبعاثات NO الطبيعية: 340 مليون طن/سنة, لـ NO_2: 658 مليون طن/سنة.

- معدل انبعاثات NO_2 الصناعية: (الناتجة عن فعاليات الإنسان: 36-60 مليون طن/سنة).

أهم المصادر الطبيعية لأكاسيد الآزوت NO_X هي التالية:

- انبعاثات من التربة والماء كنتيجة لعمل البكتريا قي إزالة الأوكسجين denitrification من النترات وتقدر مجمل الانبعاثات من التربة بـ 40 مليون طن/سنة.
- تثبيت النتروجين الجوي N_2 عن طريق البرق: حيث يتأكسد N_2 إلى NO_X في الحرارة المرتفعة والضغط العالي، ومعدل التثبيت العام بهذه العملية يقدر بـ 9 مليون طن/ سنة (مقدرة على أساس NO_2).
- احتراق الكتلة الجوية biomass: أكسدة الآزوت العضوي Nإلى NOفي الحرارة المرتفعة، إضافة إلى بعض الأكسدة لـ N_2 خلال عمليات الاحتراق.

أهم المصادر الصناعية: هي التي تكون مرتبطة باحتراق الوقود الأحفوري والتي تنتج NO_X عن طريق أكسدة الآزوت العضوي N خلال عملية الاحتراق وعن طريق أكسدة N_2 إلى NO_X. وتكون العمليات الأخيرة هامة بشكل خاص إذا حدثت عمليات الاحتراق في درجة حرارة عالية (أكثر من 1000 م°) وضغط، كما يحدث في محركات الاحتراق الداخلي للسيارات. يكون أول أكسيد الآزوت NO أول الغازات الناتجة عن طريق عمليات الأكسدة هذه، بينما ثاني أكسيد الآزوت ينتج بشكل ثانوي في الجو عن طريق أكسدة أول أكسيد الآزوت المنبعث. تعتبر حالياً وسائط النقل في فرنسا مسؤولة عن 75 % من انبعاثات NO_X مقارنة معها عام 1980, تطرح سيارات المازوت كميات أقل بـ 50% من NO_X لأن درجات الاحتراق فيها أقل.

السمية لأكاسيد الآزوت:

- **NO_2** يسبب أضرارًا حادة للنبات بتراكيز عالية/ppm 20) ساعة أو 2 ppm/48 ساعة(، وأهميته الكبرى في تكوين الأوزون.
- **أعراض NO_2 الحادة:** بقع صفراء، فقدان انتباج الورقة، نكروزات في الأطراف، وتساقط ثمار البرتقال.
- **الأضرار المزمنة:** قلة النمو والإنتاج دون تغيرات ظاهرة على الأوراق.
- تشبه أعراضه أعراض غازات حامضية أخرى أو نقص المنغنيز أو الإجهاد المائي، لذا تستخدم نباتات دالة للتشخيص.
- **NO** يتأكسد سريعًا إلىNO_2 ، ويؤثر على التمثيل الضوئي دون أعراض مرئية.

- **N_2O** يخرب طبقة الأوزون، وهو غاز دفيء، ويساهم في الضباب الدخاني الكيميائي الضوئي والأمطار الحمضية.
- **تأثير NO على الإنسان:** يرتبط بالدم مثل CO ، يقلل نقل الأكسجين، ويضعف الجهاز التنفسي (مثل التهاب القصبات عند الأطفال).

الأوزون:

يعتبر العالم الألماني شوبين أول من ذكر الأوزون عام 1840، وكلمة Ozone المشتقة من اللاتينية بمعنى "شم"، وهو جزيء غازي طبيعي يتألف من ثلاث ذرات أكسجين (O_3). يتوزع الأوزون بنسبة 90% في طبقة الستراتوسفير (10-50 كم)، ويبلغ تركيزه الأقصى عند ارتفاع 25 كم فيما يُعرف بطبقة الأوزون التي ترشح الأشعة فوق البنفسجية، أما النسبة المتبقية 10% فتوجد في طبقة التروبوسفير (0-10 كم).

في المدن تزداد تراكيز الأوزون بسبب أشعة الشمس ووجود محرضات مثل أكاسيد الآزوت والمركبات العضوية الطيارة (معظمها من السيارات والنباتات)، مما يجعله ملوثاً ثانوياً وصيفياً يبلغ ذروته بين أيار وأيلول.

يتراوح تركيز الأوزون الستراتوسفيري بين ppm0.3-0.2 ، بينما لا يتجاوز الحد الطبيعي قرب سطح الأرض 0.03-0.02 .ppm تتغير تراكيز الأوزون التروبوسفيري مكانياً وزمانياً، وتزداد مع الارتفاع وفي نصف الكرة الشمالي. **يومياً** يكون التركيز في أدنى مستوياته بين الساعة 5-6 صباحاً وأعلى مستوياته بين 13-15 ظهراً، وتكون التراكيز الليلية أقل بنسبة 10-30% من النهارية. **سنوياً** يزداد الأوزون من كانون الثاني حتى آب ثم يتناقص حتى كانون الأول، مع تسجيل أعلى التراكيز في الربيع والصيف.

السمية للأوزون:

يُعد الأوزون من أكثر مكونات الضباب الدخاني الكيميائي الضوئي سمية، ويساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري ويؤثر على الصحة العامة، كما يبطئ نمو العديد من النباتات والأشجار، ويعتقد العلماء أن الأوزون سيكون الملوث المميز للقرن الحادي والعشرين وأن الغابات المتوسطية ستكون الأكثر تضرراً به.

آلية تأثيره: يدخل الأوزون إلى الورقة عبر المسام أثناء التبادل الغازي، فيذوب في الماء ويتفكك سريعاً محرراً جذوراً حرة مثل HO_2 و HO و O_2^- وH_2O_2، التي تؤكسد المستقلبات الخلوية ومكونات الجدران مثل مجموعات HS والأحماض الأمينية والبروتينات والأحماض الدهنية غير المشبعة. عند موت الخلايا تظهر أعراض الإصابة على سطح الورقة: في الأشجار عريضة الأوراق تظهر على **الوجه العلوي**، وفي المخروطيات والنباتات ذات النسيج المتوسط غير المتمايز تظهر على **الوجهين**، وتتضرر الخلايا المجاورة للمسام أولاً. غالباً ما تبدأ الأعراض على الأطراف الطرفية للأوراق الصغيرة وتتفاقم مع تقدم عمر الورقة، مما يجعل الأوراق المعمرة الأكثر حساسية.

يمكن أن تصنف مظاهر الإصابة الظاهرية الناتجة عن الأوزون حسب مدة الظهور وتركيز الأوزون إلى:

تتنوع أضرار الأوزون بين: الأضرار الحادة على شكل نكروزات (موت خلوي) خلال ساعات أو أيام بعد التعرض لتراكيز عالية، ويرتبط انخفاض الإنتاج بنسبة المساحة الميتة من الورقة. أما الأضرار المزمنة فتتطور بشكل أبطأ (أيامًا أو أسابيع) وتظهر كاصفرار، أو تغير لون الأوراق إلى البني المحمر نتيجة تراكم صبغات فينولية، أو ذبول

وشيخوخة مبكرة. وتحدث الأضرار غير المرئية عندما يسبب الأوزون تغيرات في النشاط الحيوي للخلايا ويقلل النمو قبل ظهور أعراض مرئية.

من حيث الحساسية: تعتبر النباتات ثنائية الفلقة أكثر حساسية من أحادية الفلقة، والنباتات العشبية أكثر من الأشجار المتساقطة، والمخروطيات الأقل حساسية بسبب توصيلها المسامي الضعيف. تتضرر النباتات عمومًا عند تراكيز 200-300 ppb لمدة 2-4 ساعات، ويقدر التركيز الحدّي لانخفاض المحصول طويل الأمد بـ 100 .ppb فمثلًا، يصاب التبغ بحادة عند 50-60 ppb لمدة 2-3 ساعات، والسبانخ عند 60-80 ppb لمدة 1-2 ساعة، والصنوبريات الحساسة عند 80 ppb لمدة 12 ساعة.

فيما يخص الصحة العامة: يجب التذكير أن الأوزون يسبب احمرار في العيون وحساسية في المجاري التنفسية مسبباً بذلك السعلة، آلام في الرأس وبعض الاضطرابات التنفسية وخاصة عند الأطفال والأشخاص المصابين بالربو!

كما ينصح بعدم ممارسة التمارين الرياضة (رياضة الجري) في فترات بعد الظهر من أيام الصيف حيث تكون تراكيز الأوزون في مستواها الأعظمي.

جدول (4): مجمل الانبعاثات الاجمالية عالمياً وخصائص أخرى لأهم ملوثات الهواء

الملوث	الانبعاثات الصناعية مليون/طن/سنة	الانبعاثات الطبيعية مليون/طن/سنة	الحـد الأدنى ppb	مدة استقراره في الجو (الوقت)	التراكيز الأساسية ppm	
					هواء نظيف	هواء ملوث
SO_2	63-72	16-60	0.2	4 يوم	0.0002	0.2
H_2S	3	100	0.2	1 > يوم	0.0002	-
CO	304	33	100	3 > سنة	0.1	40-70
NO/NO_2	53	**430 : NO**	0.2-2	5 يوم	<0.004	
-	**as NO_2**	**658**	0.5-4	-	<0.004	0.2
NH_3	4	1160	6-20	7 يوم	0.01	0.02
N_2O	6	18	300	4 سنة	0.3	-
HC	88	200	<1	-	<0.001	-
CH_4	-	1600	1500	4 سنة	1.5	2.5
CO_2	14000	1000000	340000	2-4 سنة	340	400
O_3	-	-	-	-	0.03	0.5

الحلول المقترحة للحد أو التخفيف من تلوث الهواء:

1. التحول إلى استعمال مصادر طاقة نظيفة ومتجددة.
2. حظر استعمال بعض أنواع الوقود الرديء ذي الضرر العالي مثل مادة البتروكوك المسرطنة.
3. اعتماد سياسة بيئية في مشاريع إعادة تأهيل القطاع الكهربائي من خلال تطبيق مبدأ زيادة الطاقة المنتجة بإقامة معامل جديدة ذات ضرر بيئي محدود.
4. تخفيف استعمال السيارات والآليات.
5. التشجيع على استعمال البنزين الخالي من الرصاص، وكذلك استخدام الوقود النظيف.
6. تجهيز عوادم السيارات بالمحول المتحفز، الذي يحول بعض الغازات الضارة الناجمة عن الاحتراق مثل غازات أول أوكسيد الكاربون وأكاسيد النتروجين والغازات الهيدروكربونية إلى مواد أخرى أقل ضرراً مثل بخار الماء وثاني أوكسيد الكربون.
7. إلزام جميع الصناعات التي تنتج ملوثات هواء بضرورة إنشاء وحدات معالجة للملوثات الناتجة قبل إطلاقها إلى الجو.