

تلوث الهواء

Air Pollution

1

المقدمة

يعد الهواء من أساسيات الحياة فانقطاعه لدقائق معدودة يُعد كافياً لهلاك الإنسان. لذا أصبح موضوع تلوث الهواء في مقدمة الموضوعات التي تثير الجدل الحاد والنقاش المستمر ليس في أوساط العلماء المختصين فحسب بل في الأوساط والمؤسسات كافة وحتى بين المواطنين العاديين. وقد انشغل العديد من المشرعين في بلدان العالم في سن القوانين المتعددة لأجل المحافظة على نظافة الهواء والوقاية من تلوثه. ولعل رجال الأعمال وأصحاب المصانع والمؤسسات الإنتاجية في مقدمة من يعينهم الأمر لأنهم أول من يدفع الضرائب والغرامات التي تحملهم المسؤولية في النهاية. إن ما يزيد موضوع تلوث الهواء خطورة يأتي من ضعف الوسائل العلمية والتقنية المستخدمة للإقلال أو التخلص منه رغم التقدم الكبير الحاصل مؤخراً. إن تلوث الهواء بدأ منذ أزمنة قديمة عند معرفة الإنسان الأول للنار ثم أخذ بالازدياد في العصور اللاحقة حيث أصبح تلوث الهواء أكثر وضوحاً عندما ازدادت معدلات نمو المدن والصناعات. وعلينا أن نعرف أن تلوث الهواء لا يسببه الإنسان فقط وإنما ينتج من الكوارث الطبيعية كذلك كانهجار البراكين والأعاصير واندلاع الحرائق في الغابات وغيرها.

تكمّن خطورة تلوث الهواء في كونه قد لا يُرى ولكن الإنسان يتأثر به عن طريق جهاز التنفس ويدخل مباشرة إلى ثنايا الرئتين وهي أنسجة حساسة وطرية ومهيأة لعمليات التبادل الغازي. وبذلك فإن وجود أي أبخرة وغازات أو قطيرات سائلة، قادرة على اختراق الأغشية المبطنة للحويصلات الرئوية، وهذا يعني إمكانية وصولها إلى الدم ومن ثم إلى المراكز الحساسة في الجسم خلال عدة ثوان وإحداث تأثير بيولوجي فيه دون إدراك الإنسان في أحيان كثيرة لذلك.

إن الدول والحكومات بدأت التحسب من أخطار تلوث الهواء من خلال دراسة الظواهر والعمل على الحد منها. وتشكلت في إنكلترا عدة هيئات لدراسة تلوث الهواء الذي نجم عن استخدام الحطب عند تحويله إلى الفحم في أفران صناعة الجير وهكذا أخذت الملوثات في الزيادة مع الزيادات السريعة للتطور خلال الثورة الصناعية. كما أصبحت الملوثات بعد الحرب الأهلية الأمريكية من المشاكل المزمنة في الولايات المتحدة الأمريكية حتى أصبح تلوث الهواء مسؤولاً عن حجب أشعة الشمس من الوصول إلى سطح الأرض في بعض المدن مثل نيويورك وشيكاغو وبنسبة 25% و 40% من الأشعة الساقطة على التوالي.

لا تعود الآثار الضارة لتلوث الهواء إلى كمية المواد المنبعثة بقدر ما تعود إلى تراكيزها في هذه الأجواء. فقد تنتشر كميات قليلة وبتراكيز عالية ضمن مساحة محدودة فتحدث تلوثاً كبيراً تفوق أضراره فيما لو انتشرت هذه الكميات في مساحات أوسع.

منذ عام 1750 عندما تطورت الصناعات الكيميائية حيث أدت إلى انطلاق الأبخرة الحامضية إلى الجو مما تسبب في وجود الدخان في تلك المناطق الصناعية. واتجهت مشكلة تلوث الهواء نحو الأسوأ بازدياد نسبة استخدام الفحم للأغراض المنزلية والصناعية بالإضافة لتأثير تطور التقنيات الحديثة التي رافقت العمليات الصناعية المعقدة والمصانع التي أصبحت تنتج كميات متزايدة من الفضلات الغازية والصلبة والسائلة وتطرحها إلى البيئة المحيطة بها دون معالجة. إن تطور التقنيات الجديدة لا يؤدي إلى تكوين الفضلات فحسب بل أنها عملت على ازدياد خطورة هذه الفضلات لكونها تشمل مواد سامة جديدة فأدى ذلك إلى مشكلة في إيجاد الطرق الملائمة لتصريف هذه السموم.

إن الكشف عن ملوثات الهواء يقتضي استخدام أجهزة غاية في الدقة وذلك بسبب التراكيز الضئيلة لهذه الملوثات التي تقدر ببضعة أجزاء من المليون ppm أو حتى أقل من ذلك. وربما تقاس بالميكروغرامات في المتر المكعب (الميكروغرام يعادل جزء بالمليون من الغرام) لذا فإن مسألة تطوير واستخدام الأجهزة العالية الحساسية لقياس تلوث الهواء تعتبر من أهم التحديات العلمية التي تواجه علماء البيئة والهندسة الكيميائية. وقد ظهر مؤخراً في التسعينات من القرن الماضي (القرن العشرين) عدد من هذه الأجهزة ذات الحساسية العالية والتي ترتبط بحاسوب جعلت مهمة مراقبة تلوث الهواء أكثر سهولة وأكثر دقة.

طبيعة الغلاف الجوي

يتكون الجو من مزيج من الغازات التي تغلف الكرة الأرضية بارتفاع يصل بين 80-100 كم فوق سطح الأرض. ويكون هذا الارتفاع أعلى عند خط الاستواء وأقل عند القطبين. وتتركز معظم كتلة الغلاف الغازي (99.9%) دون ارتفاع حوالي 75 كم. فالهواء هو ذلك الجزء من الغلاف الجوي الأقرب إلى سطح الأرض والذي عندما يكون جافاً وغير ملوث، فإنه يتألف من عدة غازات أهمها من حيث النسبة هو غاز النيتروجين الذي يؤلف 78.09% منه، ويليه غاز الأوكسجين الذي يؤلف ما نسبته 20.49% منه، ثم مجموعة كبيرة من الغازات الأخرى بنسب متناقصة لكنها ثابتة

في جميع أجزاء الغلاف الجوي لعموم الكرة الأرضية ولغاية ارتفاع يبلغ أقصاه حوالي 75 كم (الجدول 1). علماً بأن بخار الماء وغاز ثنائي أكسيد الكربون يختلفان كميّاً حسب ظروف وعوامل معينة، كما أن هناك غازات أخرى لم تدرج في الجدول لانخفاض تراكيزها كثيراً.

يقسم الغلاف الغازي عادة إلى أربع طبقات. فالطبقة السفلى الملاصقة لسطح الأرض تدعى طبقة التروبوسفير **Troposphere** حيث يصل ارتفاعها إلى حوالي 8 كم عند القطبين و 16 كم عند خط الاستواء. وتحتوي هذه الطبقة على كميات متفاوتة من الماء تتراوح ما بين 1-4% حجماً، ويبلغ أقصى تركيز له عند ارتفاع يتراوح ما بين 10-15 كم حيث يكون الماء موجوداً بحالته الغازية أو متكاثراً على هيئته السائلة بشكل غيوم أو ضباب وقد يكون بهيئته الصلبة على شكل بَرَد أو ثلج. وهذه الطبقة هي الأكثر عرضة للتغيرات المناخية وكذلك للتأثيرات السلبية المباشرة لأنشطة الإنسان. ويرى علماء المناخ والأرصاد الجوية أن طبيعة التروبوسفير قد بدأت بالتغير بظهور طبقة كثيفة من الملوثات تشاهد فوق المحيطات والقطب الشمالي، بل أحياناً تظهر مثل هذه الطبقة عند النظر من بناية مرتفعة فوق منطقة صناعية أو سكنية.

الجدول (1) مكونات الهواء الجاف غير الملوث، والنسب الحجمية (التركيز) ومجموع الكتلة لكل منها.

الغاز	الرمز الكيماوي	النسبة المئوية (التركيز)	المجموع الكتلي مقدراً بملايين الأطنان المترية
النيتروجين	N ₂	78.09	3850000000
الأوكسجين	O ₂	20.49	1180000000
الأرغون	Ar	0.93	65000000
ثاني أكسيد الكربون	CO ₂	0.032	2500000
النيون	Ne	18	64000
الهليوم	He	5.2	3700
الميثان	CH ₄	1.3	3700
الكريبتون	Kr	1	1500

180	0.5	H ₂	الهيدروجين
1900	0.25	NO	أحادي أكسيد النيتروجين
500	0.1	CO	أحادي أكسيد الكربون
200	0.02	O ₃	الأوزون
11	0.001	SO ₂	ثنائي أكسيد الكبريت
8	0.001	NO ₂	ثنائي أكسيد النيتروجين

تقع الطبقة الثانية المسماة الستراتوسفير **Stratosphere** فوق طبقة التروبوسفير حيث تتراوح ارتفاعها بين 12-50 كم فوق سطح الأرض. وتختلف عن طبقة التروبوسفير باحتوائها على كميات قليلة جداً من بخار الماء لا تتجاوز عن 3 جزء بالمليون وزناً. لذا فإنها تخلو من الغيوم بينما تكون درجات الحرارة فيها ثابتة أو تزداد مع الارتفاع بعكس طبقة التروبوسفير التي تتناقص فيها الحرارة مع الارتفاع. أما بخصوص مكونات الغلاف الغازي لهذه الطبقة فتكون مماثلة للطبقة السابقة وتبلغ الكتلة الغازية لهذه الطبقة ما يعادل 15% من كتلة الغلاف الجوي الكلي ولكنها تحتوي على نسب أعلى من الأوزون.

يتواجد الأوزون بهيئة طبقة على ارتفاع يتراوح ما بين 15-60 كم في الجزء العلوي من طبقة الستراتوسفير والطبقة التي تعلوها والمسماة الميزوسفير **Mesosphere** ويبلغ تركيزه الأعلى عند ارتفاع 20-30 كم فوق سطح الأرض. وتقوم طبقة الأوزون بامتصاص كميات كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية **Ultraviolet Rays** ذات الطول الموجي القصير وإن استطاعت هذه الأشعة المؤينة أن تخترق الغلاف الجوي في مناطق غياب طبقة الأوزون أو في مناطق قلة سماكتها (ثقب الأوزون **Ozone Hole**) قد يؤدي ذلك إلى هلاك جميع أو معظم الأحياء على سطح الأرض. ومن ذلك تتضح أهمية طبقة الأوزون لحماية و استقرار الحياة.

أما الطبقة الثالثة الميزوسفير **Mesosphere** فإنها تمتد لارتفاع يتراوح بين 50-80 كم فوق سطح الأرض. وتحتوي على كتل غازية أقل من الطبقتين السابقتين. وتكون هذه الطبقة خالية من

بخار الماء. أما الأوزون فإنه يوجد في هذه الطبقة. وتتناقص درجات الحرارة مع الارتفاع في هذه الطبقة.

تعرف الطبقة الجوية الرابعة بطبقة **الثرموسفير Thermosphere** وتدعى أيضاً **بالهيتروسفير Heterosphere** والتي تبدأ عند ارتفاع يقدر بحوالي 80 كم فوق سطح الأرض. وتكون هذه الطبقة خالية كذلك من الماء. وترتفع درجات الحرارة فيها تدريجياً مع الارتفاع. أما الغازات المتواجدة فيها فإنها تكون بالحالة الذرية حيث نجد أن غازات النيتروجين والأكسجين تتركز عند ارتفاع يتراوح ما بين 80-115 كم في حين يشكل الهيدروجين والهيليوم نسباً أساسية عند ارتفاع 500 كم. وهكذا تصبح الطبقات الأعلى مشغولة بنسب قليلة من الغازات حيث تمتد هذه الطبقة إلى نهاية الغلاف الجوي على بعد 40 ألف كم من سطح الأرض. ويعرف الجزء العلوي من طبقة الميزوسفير والجزء السفلي من طبقة **الثرموسفير** بطبقة **الأيونوسفير Ionosphere**. ويعود سبب هذه التسمية لوجود الأيونات الحرة فيها.

المصادر الرئيسية لتلوث الهواء

يمكن تلخيص أهم مصادر تلوث الهواء بما يأتي:

- 1- إحراق مختلف أشكال الوقود للحصول على الطاقة كما هو مألوف في العديد من الاستخدامات الصناعية والتجارية والمنزلية.
- 2- الملوثات المطروحة من قبل مختلف وسائط النقل التي تستخدم البنزين أو الديزل أو الكيروسين.
- 3- الفضلات الغازية والغبار والدقائق المتطايرة والمواد المشعة وغيرها من العناصر التي تنفث إلى الهواء من مداخل المصانع والمعامل مثل معامل صناعة الاسبست (الأميانت) والاسمنت وغيرها.

أنواع ملوثات الهواء

يمكن تقسيم الملوثات في الهواء إلى مجموعتين رئيسيتين هما الدقائق العالقة والملوثات الغازية.

أولاً : الدقائق **Particulates**

يقصد بالدقائق المواد المنتشرة في الهواء سواء كانت دقائق صلبة أم قطيرات سائلة عالقة. وتشمل الدقائق الكبيرة كلاً من الرمال والرماد المتطاير والغبار والسخام Soot في حين تشمل

الدقائق الصغيرة كلاً من الدخان والضباب والغبار الجوي Aerosols. وتشكل الدقائق مجموعة واسعة من ملوثات الهواء وتكون معلقة في الهواء. وتتنوع أشكالها وتركيبها الكيميائي وتأثيراتها السمية أو الصحية. وكذلك العمق الذي تدخله في الجهاز التنفسي حسب قطر الدقيقة أو القطيرة العالقة. وهذه الدقائق لا يشترط فيها أن تكون قابلة للرؤية بالعين المجردة. فهي قد تكون أليفاً متناهية الدقة أو قطيرات ضبابية أو بكتيريا أو فيروسات أو حبيبات لقاح الأزهار أو غبار صناعي أو طبيعي وغيرها.

إن الغالبية العظمى من الدقائق هي ذات منشأ طبيعي مثل الدقائق الترابية والرملية المتطايرة من الأراضي الجرداء والصحاري. أما المصادر غير الطبيعية (البشرية المنشأ) فتشمل عمليات حرق الوقود في الصناعة وإنتاج الطاقة ومعامل إنتاج الاسمنت ومطاحن الحبوب وغيرها أو في المواصلات وما ينبعث عنها من كميات كبيرة من الدقائق الكربونية التي تدعى بالسخام Soot. وقد تصدر من رش المبيدات في الحقول بخاصة عند استخدام الطائرات. فضلاً عن عمليات الإنشاء والبناء وتعبيد الطرق وغيره. من أهم المجاميع الرئيسية للدقائق في الهواء هي:

1- الرمال Grit: هي الدقائق الصلبة العالقة في الهواء والتي يزيد قطرها عن 500 ميكرون (الميكرون = 10^{-6} م).

2- الغبار الطبيعي Natural dust: هي الدقائق الصلبة العالقة في الهواء والتي يتراوح قطرها بين 25-200 ميكرون. وهي من أكثر أنواع الدقائق في الهواء شيوعاً وانتشاراً ومصدرها طبيعي وهو من طبقات القشرة الأرضية المخلفة والمعرضة إلى تيارات الهواء حيث تتطاير عند توفر الظروف المناخية الملائمة. وتساهم عمليات إزالة الغطاء الخضري مثل قطع الأشجار ورعي الحيوانات الجائر في توفير مزيد من المساحات من القشرة الأرضية المعرضة لتطاير دقائقها مع الرياح. وتساهم حركة السيارات ووسائل النقل الأخرى على الطرق غير المعبدة في زيادة انتشار الدقائق الصلبة (الغبار).

3- الدخان Smoke: هو عبارة عن المواد الدقيقة الناتجة من عمليات الحرق المختلفة والتي تطلق دقائق لا يزيد قطرها عن 2 ميكرون. ويشكل الكربون غالبيتها العظمى.

4- الغبار الجوي Aerosol: هي الدقائق الصلبة أو السائلة العالقة في الهواء والتي يقل قطرها بصورة عامة عن واحد ميكرون.

- 5- الضباب Mist: يشمل الضباب القطيرات السائلة والعالقة في الهواء التي تصل أقطارها إلى 100 ميكرون أحياناً، أما دقائقه التي لا تزيد أقطارها عن 10 ميكرون فتدعى Fog.
- 6- السخام Soot: يتمثل بجزيئات الكربون المتناهية الدقة والتي تتجمع بصورة سلاسل طويلة.
- 7- الغبار الصناعي Artificial dust: يصدر من نشاط الصناعات المختلفة مثل صناعة الإسمنت والجبس والأجر وعند تقطيع الحجارة لإنتاج قطع البناء وتقطيع جذوع الأشجار في إنتاج الخشب وغيرها مما يتسبب عنه تطاير كميات كبيرة من جسيمات دقيقة في الهواء (نشارة الخشب). وتتطلق من العديد من الصناعات المعدنية جسيمات تكون أدق حجماً عادة وتتألف إما من دقائق المعدن نفسه والتي تنتج عن عمليات القطع أو الصقل وغير ذلك، أو تكون متكونة من أملاح المعدن كما هو الحال في صناعة البطاريات السائلة التي تنبعث عنها دقائق أكسيد الرصاص أو كبريتاته.
- 8- حبوب اللقاح Pollen grains: تكثر في موسم الربيع حيث تنطلق حبوب اللقاح من النباتات الزهرية وتمتاز حبوب اللقاح بكبر حجمها وقد تسبب للكثير من البشر حساسية جلدية أو تورم العينين أو رشح الأنف وغيرها.

يوجد في الهواء كذلك عدد من المواد التي تأخذ شكل جزيئات أو جسيمات أو حبيبات كالاسبست (الأميانت) الذي يسبب مرض الاسبستوس Asbestose (و هو التهاب طويل المدى وتليف رئوي للرئتين. قد تشمل الأعراض ضيق التنفس، والسعال ، وألم الصدر وقد تشمل المضاعفات سرطان الرئة، وأمراض القلب الرئوية). أثر مرض الاسبستوس على حوالي 157000 شخص وأسفر عن 3600 حالة وفاة في العالم في عام 2015. على إثرها تم حظر استخدام الأسبست في عدد من البلدان في محاولة للوقاية من المرض.

كما توجد أشكال أخرى للضباب الدخاني، ففي فصل الشتاء وعند تواجد تراكيزات عالية من غاز ثنائي أكسيد الكبريت SO_2 والهيدروكربونات يتكون الضباب الدخاني المعروف بضباب لندن London smog.

هناك علاقة بين نوعية هذه الدقائق وقطرها وتأثيرها في البيئة وفي صحة الإنسان كما أشير له سابقاً.

من وجهة نظر التلوث الهوائي فإن الدقائق الأكثر أهمية هي تلك التي يتراوح قطرها بين 0.1-10 ميكرون التي تكون تقريباً بحجم البكتيريا والتي لا تميزها العين المجردة. حيث أن عين الإنسان يمكن أن تميز الدقائق التي يزيد قطرها عن 100 ميكرون.

إن الجزيئات التي هي أصغر من واحد ميكرون تنتج بشكل أساسي من تكثف المواد المتبخرة بعد الاحتراق. أما الدقائق الأكبر من 10 ميكرون فإنها تنتج بشكل أساسي من العمليات الآلية مثل الطحن والاحتكاك.

هناك بعض الصعوبات المرتبطة بتعميم خصائص الدقائق حيث قد يتوقف نوع الضرر على حجم تلك الدقائق في حين يعود الضرر الآخر إلى سميتها. وتتوقف التأثيرات التي تحدثها الدقائق على الظروف الجوية المحلية وعلى الكائنات الحية كونها تعمل على حجب أشعة الشمس وكذلك تعمل على خفض درجات الحرارة عند سطح الأرض. كما أنها تساهم في توفير أنوية للتكاثف مما يزيد ظهور الضباب والأمطار في المدن.

كما أن هذه الدقائق تسبب ضرراً لصحة الإنسان والحيوان بخاصة أضرار الجهاز التنفسي والأمراض الجلدية وأمراض العيون فضلاً عن تأثيراتها على النباتات حيث عند تراكمها على أوراقها فتسبب تثبيط عملية النتج من خلال سد الثغور وكذلك تقليل شدة الإضاءة التي تصل إلى النسيج المتوسط للأوراق مما يؤثر في عملية البناء الضوئي.

كما تسبب هذه الدقائق ظاهرة انخفاض الرؤية فيتطلب ذلك استخدام الإنارة الاصطناعية بدرجة أكبر مما يبرز الحاجة لاستهلاك الطاقة الكهربائية أكثر وهذا يرافق إنتاج التلوث المعروف لمصانع الطاقة الكهربائية.

أدت التراكيز العالية للمواد الدقائقية في إحداث كوارث في تلوث الهواء. فقد بينت الدراسات الوبائية وجود ارتباط وثيق بين معدلات الوفيات من أمراض الجهاز التنفسي (كالربو والتهاب الحويصلات الرئوية والانتفاخ الرئوي وغيرها) وبين مستوى تركيز الدقائق في المناطق السكنية. ولوحظ أن الآثار الصحية تحدث عندما يفوق المعدل السنوي للمواد الدقائقية عن 80 ميكروغرام لكل متر مكعب. ويعتمد سلوك الملوثات على حجم الدقائق والزمن الذي تحتاجه للاستقرار في الأجواء. فالدقائق التي يزيد حجمها عن 50 ميكرون تكون خطورتها التلوثية قصيرة الأمد.

تبقى بعض الملوثات الدقائقية لفترات زمنية مختلفة حيث يمكن أن تتعرض لتفاعلات كيميائية تؤدي إلى تكوين ملوثات ثانوية. كما أن الدقائق الغازية والصلبة الصغيرة يمكنها أن تبقى عالقة في الأجواء لأيام أو أسابيع وربما لشهور أو سنوات وحسب موقعها في الطبقات الجوية المختلفة. وعلى سبيل المثال قد تبقى في طبقة التروبوسفير 6-14 يوماً، بينما تبقى في طبقة الستراتوسفير العليا لفترة تتراوح بين 1-3 سنوات، وفي طبقة الميزوسفير لمدة 5-10 سنوات.

إن زيادة نسبة الترسبات الدقائقية الكبيرة على سطح الأرض تؤدي إلى زيادة التآكل الكيماوي والتعرية للمواد البنائية والمعادن والتماثيل والمعالم الأثرية المختلفة. كما تؤثر الملوثات الغازية في الهواء والملوثات الدقائقية المترسبة على سطح الأرض على الغطاء النباتي حيث تتراكم على الأوراق النباتية وتعلق ثغورها فتؤدي بذلك إلى تثبيط نمو النباتات.

كذلك تتأثر الحيوانات الحقلية بالملوثات الدقائقية الجوية فقد تصاب بالأمراض المختلفة شأنها شأن الإنسان.

إن التأثير الأكثر ضرراً و انتشاراً للتلوث الهوائي على الإنسان ناجم عن الدخان وثنائي أوكسيد الكبريت اللذين يسببان الضباب الدخاني كالذي حصل فوق لندن عام 1952 م وأودى بحياة أكثر من أربعة آلاف شخص في يوم واحد كما أوردنا سابقاً.

كما أن غبار المعادن والألياف وعدد من المواد الكيماوية المصنعة وغيرها من دقائق الفحم والحجر والاسيست وألياف الزجاج والصوف الصخري يؤدي استنشاقها إلى العديد من الأمراض المعروفة التي تتركز في أجهزة التنفس والدوران والهضم.

ثانياً: الملوثات الغازية **Pollutant gases** وتشمل:

1- الهيدروكربونات Hydrocarbons و هي عبارة عن مركبات عضوية غازية أو سائلة أو صلبة وتتألف أساساً من أعداد من ذرات الكربون والهيدروجين بأشكال وأنواع متعددة جداً. ولا تعد الهيدروكربونات مواد ملوثة خطيرة بذاتها باستثناء الأنواع الأروماتية منها غير أن خطورتها تكمن في تفاعلاتها اللاحقة مع الملوثات الأخرى وبوجود أشعة الشمس والأوكسجين والمواد الأخرى.

إن المصادر الرئيسية للهيدروكربونات هي مصادر طبيعية تتمثل في الميثان CH الذي ينتج بحدود أكثر من 200 مليون طن في السنة نتيجة لعمليات التحلل البكتيري في المستنقعات والغابات فضلاً عن إنتاج التربينات الطيارة والايذوبرينات والتي يقدر إنتاجها بحوالي 170 مليون طن في السنة. ولا بد من ذكر النسب القليلة من الهيدروكربونات التي تنتج طبيعياً من بعض التفاعلات الجيولوجية الحرارية. وهناك التطاير من خزانات الوقود ومحطات التعبئة.

يقدر التلوث الناجم من صنع الإنسان من المركبات الهيدروكربونية بحوالي أكثر من 88 مليون طن في السنة يعود معظمها إلى العمليات المتعلقة بالصناعات النفطية والغاز الطبيعي والفحم الحجري. يحتوي الهواء بصورة طبيعية في الأجواء الريفية ما يقرب من 1-1.5 جزء بالمليون من الميثان وقل من 0.1 جزء بالمليون من الهيدروكربونات الأخرى. وتتبعث الهيدروكربونات نتيجة لنوعين من العمليات هما:

1. الاحتراق غير التام

2. التبخر

على الرغم من أن تراكيز الهيدروكربونات في المدن لم تحدد بعد آثارها الضارة على الصحة بصورة مباشرة إلا أن اشتراكها في تكوين الضباب الأسود الضوء كيميائي من الأمور المعروفة بأخطارها الجسيمة.

يعد الميثان والإيثيلين من المركبات الهيدروكربونية الضارة حيث يؤدي الإيثيلين دوراً ضاراً مباشراً على النباتات. أما غاز الميثان فهو أبسط المركبات الهيدروكربونية تركيبياً وهو غاز طبيعي المنشأ وعديم السمية للأحياء. وأنه معروف منذ القدم بغاز المستنقعات لكنه ينتج أيضاً من عمليات تحلل المواد العضوية المظمورة في التربة أو المياه تحت تأثير نوع من البكتيريا تعرف بالبكتيريا الميثانية Methanobacterium. وتقدر كميات هذا الغاز المنبعثة من المصادر البيئية المختلفة بحوالي 1000 مليون طن متري سنوياً. إن هذا الغاز غير سام بحد ذاته للأحياء ولكن وجوده في أماكن مغلقة يجعله يزيح الهواء ويحل محله لكونه أثقل من الهواء وزناً. لذا فإنه قد يعرض الإنسان أو الكائنات الحية الأخرى إلى الموت لنقص الأوكسجين فيحصل الاختناق في مثل هذه الظروف. كما أن هنالك خطورة أخرى كامنة في هذا الغاز في قابليته للانفجار حتى دون مصدر اشتعال وذلك إذا كان موجودة في خليط بنسبة 15% في الهواء ووصل إلى درجة حرارته الكامنة للانفجار.

إن الملوثات الأولية التي يتضمنها الضباب الأسود الضوء كيميائي هي أكسيد النترينك NO والأوزون ونترات فوق أكسيد الاسيتايل PAN ($CH_3CO_3NO_2$).

ومن المعلوم أن الأوزون نفسه لا يسبب تهيج العين ولكنه يتفاعل مع الهيدروكربونات الأخرى فيتشكل مركب نترات فوق أكسيد البنزول Peroxybenzoyl nitrate والاكرولين Acrolin، وتؤدي هذه المواد الملوثة التي ينتجها تفاعل الأوزون مع الهيدروكربونات دوراً خطيراً في الإصابة بانقباض الغدد وتهيج الغشاء المخاطي والسعال والصداع والإجهاد فضلاً عن إتلافها لحويصلات الرئة وظهور أعراض الحساسية والربو كما أنها تتلف العديد من المواد كالمطاط والقطن والنايلون وتسبب نقرح أوراق النباتات وضعف نموها.

2- غاز أحادي أكسيد الكربون CO

ينتج هذا الغاز من اتحاد الكربون بالأكسجين عند احتراق الأول احتراقاً غير تاماً أو تحت ظروف معينة. ومصدر الكربون في هذه الحالات هو الوقود النفطي أو الفحم بأنواعه أو الغاز الطبيعي والتي تعد من الأنواع الرئيسية لمصادر الطاقة على وجه الأرض. وتعرف مجتمعة بالوقود الأحفوري Fossil Fuels. ويعود سبب هذه التسمية إلى منشئها وهو المواد العضوية الحيوانية والنباتية التي طُمرت في باطن الأرض قبل ملايين السنين وتحولت بفعل الحرارة والضغط الشديد إلى الوقود النفطي والفحم الحجري والغاز الطبيعي.

يعد هذا الغاز من أكبر الملوثات لأجواء المدن حيث تعمل المصادر الطبيعية على إنتاج تركيز أساس منه يقدر بحوالي جزء واحد بالمليون ويكون السبب في انبعاثه ناشئاً من الاحتراق غير الكامل للهيدروكربونات. ومن المعلوم أن مستويات هذا الغاز لا تزداد بصورة مستمرة مما يعزز الاعتقاد بحدوث بعض العمليات الطبيعية التي تقف وراء زواله من الجو. إذ ما تزال المعلومات في هذا الخصوص غير متكاملة.

كما ينبعث غاز أحادي أكسيد الكربون من احتراق وقود السيارات ويتميز هذا الغاز بقدرته على الاتحاد مع هيموغلوبين الدم مكوناً مركب كربوكسي هيموغلوبين COHB، مما يؤدي إلى تقليل كفاءة الهيموغلوبين في حمل الأوكسجين. وبذلك تصاب الحيوانات ومنها الإنسان بالدوار ويزداد جهد القلب والتنفس. وتتوقف كمية الكربوكسي هيموغلوبين على تركيز CO وطول مدة التعرض ومعدل نشاط التنفس. كما أنه يجب التمييز بين المدخنين وغير المدخنين، حيث تحتفظ المجموعة

الأولى بمستوى عال نوعاً ما من الكربوكسي هيموغلوبين (حوالي 5%) ، في حين لا يحمل غير المدخنين تركيزاً أعلى من 0.3%.

إن تراكم هذا الغاز في تناقض مستمر في أغلب مناطق العالم. وقد بدأ هذا التناقض بوضوح منذ عام 1985. ويعزى سبب هذا الانخفاض إلى عدة أسباب منها تحسين كفاءة احتراق الوقود من أماكن الاحتراق الداخلي، وتزايد انتشار واستخدام منظومات السيطرة على الملوثات الغازية في المصانع والمعامل وبعض وسائل النقل. ويمكن أن تدل هذه التطورات على تزايد الوعي البيئي وكذلك استخدام منظومات أكثر فاعلية في حماية البيئة.

هذا الغاز سام للإنسان والكائنات الحية الأخرى وهو عديم اللون والطعم والرائحة مما يجعله أكثر خطورة. إذ أن التعرض له قد يفقد وعيه دون أن يحس بوجود الغاز. وحسب مواصفات جودة الهواء المعتمدة في سوريا فإن أقصى تركيز يمكن التعرض له في حدود 30 ملغ بالمتر المكعب لمدة ساعة أي ما يعادل 25.8 جزء بالمليون. وتعتبر الحد الخطر منه في حدود 10 ملغ بالمتر المكعب لمدة 8 ساعة أي ما يعادل 8.6 جزء بالمليون.

3- ثنائي أكسيد الكربون CO₂

ينتج الإنسان كميات كبيرة من هذا الغاز خلال عمليات الاحتراق واستخدام الوقود كالفحم وزيوت البترول والغاز الطبيعي. ومع ذلك لا يعد هذا الغاز من المواد الملوثة للجو حيث أنه من أحد المكونات الطبيعية العادية للهواء كما ورد ذكره مسبقاً وكما ورد ذكره في الجزء العملي لهذا المقرر. ولكنه في حالة زيادة تراكيزه بما يفوق معدله الطبيعي (0.03 % حجماً من الهواء) يؤدي إلى ارتفاع درجات حرارة الغلاف المحيط بالأرض خلال ما يعرف بتأثير البيت الزجاجي Greenhouse effect، حيث تنعكس الحرارة المنبعثة من الأرض (المنعكسة عن سطح الأرض) وتتحصر في الأجواء بسبب تراكم غاز ثنائي أكسيد الكربون.

إن زيادة درجة الحرارة للغلاف الذي يحيط بسطح الكرة الأرضية بوضع درجات عن المعدل الطبيعي ستقود إلى ذوبان الجبال الثلجية في القطبين مما يؤدي إلى زيادة الكتلة المائية في المحيطات والبحار وبدورها تؤدي إلى غرق مساحات من اليابسة ابتداءً من السواحل وما عليها من مدن ومزارع ومصانع والتي تعني حدوث كوارث إنسانية.

ضمن دورة الكربون في الطبيعة، يُلاحظ أن غاز ثنائي أكسيد الكربون ينتقل بين الهواء والنباتات والحيوانات. فالنباتات تأخذه بوصفه مادة أولية في عملية البناء الضوئي Photosynthesis ويتم تثبيته على هيئة مادة عضوية. كما أن النباتات والحيوانات تنتج هذا الغاز خلال عملية التنفس Respiration. ويشمل الجزء الآخر من دورته في الطبيعة ذوبانه وانتقاله من الهواء إلى الماء. حيث يلعب عدد من العوامل دوراً مهماً في سرعة ذوبانه في الماء ومنها الحرارة والحموضة والملوحة. وقد يحصل العكس في المناطق الاستوائية حيث يطلق البخار المتصاعد من البحار والمحيطات كميات من ثنائي أكسيد الكربون إلى الهواء.

4- أكاسيد النيتروجين (NO_x)

إن من أهم الغازات النيتروجينية الملوثة للهواء هي غاز أكسيد النترينك أو أحادي أكسيد النيتروجين NO وغاز ثنائي أكسيد النيتروجين NO₂. وفي ظروف درجات الحرارة العالية (تفوق 1100 درجة مئوية) يتم انبعاث هذين الغازين خلال عملية الاحتراق واتحاد الغازين الأوكسجين والنيتروجين، فيتحد النيتروجين الجوي مع الأوكسجين ليكونا وبتركيز عالٍ غاز NO أكسيد النترينك (Nitrogen oxide) مع تركيز أقل من ثنائي أكسيد النيتروجين NO₂ (Nitrogen dioxide). أما الأشكال الأخرى من أكاسيد النيتروجين فليس لها أية أهمية بيئية ولعل من أهمها هو غاز أكسيد النترينك الذي كان يستخدم في الجراحة بوصفه غازاً مخدراً قبل تطور المركبات المخدرة الحديثة، وكان يعرف باسم "الغاز المضحك" نظراً لشكل الشخص المتعرض له الذي يبدو كما لو كان يضحك. بينما في حقيقة الأمر فإن الغاز يسبب تقلص عضلات الفكين فيبدو الشخص وكأنه يضحك. كما أن هناك أشكالاً أخرى من الأكاسيد الأقل أهمية مثل ثلاثي أكسيد النيتروجين N₂O₃ ورباعي أكسيد النيتروجين N₂O₄ وخماسي أكسيد النيتروجين N₂O₅.

باعتبار أن مصدر الغازين (NO₂ , NO) من عملية احتراق لذا فإن انبعاثهما أيضاً يتم من جميع وسائط النقل بالإضافة لمصادر أخرى ثابتة مثل محطات توليد الكهرباء وبعض الصناعات التي تحرق الوقود بدرجات حرارة عالية. كما تنبعث كميات كبيرة منها من حرق الوقود في المنازل. وتشكل هذه المصادر مجتمعة ما يعرف بالمصادر الاحتراقية بشرية المنشأ - made

Anthropogenic man combustional sources وتوجد مصادر أخرى لانبعاث أكاسيد النروجين من مصادر بشرية المنشأ أيضاً ولكنها غير احتراقية Anthropogenic non combustional sources, ومنها معامل صناعة الأسمدة الأزوتية. وكثيراً ما يشاهد غاز NO_2 منبعثاً من مثل هذه المعامل بلونه المميز البرتقالي المائل إلى الحمرة. كما أنه ينبعث من الحقول الزراعية بعد عمليات التسميد الكيماوي الأزوتي أو التسميد العضوي الحيواني ومن بعض الصناعات الكيماوية مثل إنتاج حمض النتريك وصناعة المتفجرات وغيرها. وتقدر الكميات المنبعثة سنوياً من المصادر غير الاحتراقية بحوالي 48 مليون طن سنوياً.

ليس لأوكسيد النتريك آثار صحية سيئة ومعروفة عند التراكيز الاعتيادية له في الهواء إلا أنه يعد غازاً مهيجاً وساماً بخاصة للعيون والمسالك التنفسية عند ازدياد تركيزه. ويؤدي غاز ثنائي أوكسيد النتروجين أيضاً إلى انحلال ألياف القطن والنايلون ويعمل على تآكل أسلاك النحاس والنيكل. وغاز NO_2 الأكثر وجوداً في الهواء ويمكن للإنسان أن يميز رائحته ابتداءً من تركيز 0.12 جزء بالمليون، إلا أن الأعراض السمية تبدأ بالظهور ابتداءً من تركيز 5 جزء بالمليون فأكثر. وأولى الأعراض التي يمكن أن تظهر هي التهاب الرئتين ودون علامات سابقة، يعقبها استسقاء الرئتين Pulmonary Oedema عدة أيام، ويعتبر تركيز 100 جزء بالمليون قاتلاً للإنسان خلال عدة دقائق فقط، ولو أن مثل هذا التركيز يعد عالياً ولا يمكن الوصول إليه إلا في حالات استثنائية. وحسب معايير جودة الهواء العالمية Ambient air quality standards الحد الأعلى المسموح به من التعرض لغاز ثنائي أوكسيد النتروجين في الهواء لمدة ساعة تعرض كما يأتي: 0.85 ملغ/م³ في المواصفات الروسية و0.2 جزء بالمليون في المواصفات الكندية. في حين تعتمد دول أخرى على المعدل اليومي (24 ساعة تعرض) كما في المواصفات اليابانية إذ يبلغ الحد ما بين 0.04-0.06 جزء بالمليون أو على المعدل السنوي للتعرض فيتراوح ما بين 10 ملغ/م³ في المواصفات الأمريكية و 50 ملغ/م³ في المواصفات البولندية و 0.08 ملغ/م³ في المواصفة الأسبانية (في حالة وجود عوالت صلبة في الهواء وبتركيز أعلى من 0.04 ملغ/م³ وفي حال عدم وجود عوالت صلبة في الهواء يكون الحد المسموح به من NO_2 هو 0.12 ملغ/م³).

يتحرر غاز ثنائي أوكسيد النتروجين مع عادم محركات السيارات ملوثاً المناطق القريبة من الطرقات ومؤثراً على النباتات بخاصة الحمضيات حيث يسبب تساقط أوراقها وإصابتها بالشحوب

الكلوروفيلي. علماً بأن النباتات أكثر تحملاً لتراكيز عالية من أكاسيد النتروجين مقارنة بالإنسان والحيوان.

يشترك غاز ثنائي أكسيد النتروجين مع الهيدروكربونات بوجود الضوء في مجموعة من التفاعلات المعقدة التي تؤدي إلى تكوين ظاهرة تعرف بالضبخان أو الضباب الكيماوي الضوئي Photochemical smog.

5-أكاسيد الكبريت Sulphur oxide SO_x

إن التلوث بأكاسيد الكبريت من أكثر مشاكل تلوث الهواء خطورة على البيئة وبخاصة صحة الإنسان. وتضم هذه الأكاسيد كلاً من غاز ثنائي أكسيد الكبريت Sulphur dioxide SO_2 بالدرجة الرئيسية وغاز ثلاثي أكسيد الكبريت Sulphur trioxide SO_3 بدرجة أدنى. وغاز ثنائي أكسيد الكبريت من الغازات ذات الرائحة الحادة وينتج القسم الأكبر منه عند احتراق أنواع الوقود الأحفوري حيث يحتوي هذا الوقود على الكبريت الذي يتأكسد إلى SO_2 ويتأكسد هذا الغاز متحولاً إلى ثالث أكسيد الكبريت الذي عند ذوبانه بالماء يتحول إلى حمض الكبريت Sulphuric H_2SO_4 acid فبذلك يساهم هذا الغاز بتكوين الأمطار الحامضية Acid rains التي تتساقط مسببة أضراراً جسيمة للنباتات والتربة والمياه.

يسبب غاز ثنائي أكسيد الكبريت أضراراً بالغة للصحة كالالتهابات الخطيرة في الجهاز التنفسي، كما أن امتصاصه عن طريق ثغور الأوراق يؤثر في نموها بسبب الخصائص الحامضية عند الذوبان في سيتوبلاسم الخلايا. علماً بأن غاز SO_2 عديم اللون وذو رائحة نفاذة ومميّزة ومخرشة للأنف، ويمكن للإنسان أن يحس بطعمه على اللسان ابتداءً من تركيز واحد جزء بالمليون في الهواء. ويصبح الغاز مخرشاً عند بلوغ تركيزه 3 جزء بالمليون. ويشعر الإنسان المتعرق بالاختناق عند وصول تراكيزه إلى مستوى يتراوح ما بين 5-10 جزء بالمليون. ويبلغ الحد الأعلى المسموح به من غاز ثنائي أكسيد الكبريت ولمدة 8 ساعات حوالي 10 ملغ/م³ حسب المواصفات الأمريكية لجودة الهواء، في حين يتفاوت هذا الحد في دول العالم الأخرى لساعة واحدة من التعرض ما بين 0.01 جزء بالمليون في المواصفات اليابانية إلى 0.34 جزء بالمليون في المواصفات الكندية و 0.132 جزء بالمليون حسب المواصفات السورية.

من المصادر الأخرى لغاز ثنائي أكسيد الكبريت هو غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S في الجو وتحلل المواد العضوية في المحيطات وعلى اليابسة حيث يقدر الغاز الناتج من التحلل بحدود 98 مليون طن في السنة. كما يخرج الغاز أيضاً بعد انفجار البراكين كما يتسرب من الحقول النفطية والغازية والمصادر الجيولوجية الأخرى مثل المياه الكبريتية وتقدر كمياته بحوالي مليون طن سنوياً. أما تلك المصادر الناجمة من فعاليات الإنسان والعمليات الصناعية فتقدر بحدود ثلاثة ملايين طن سنوياً. وتزداد الآثار الضارة للغاز عند ترافقه مع دقائق الغبار الصناعي حيث يتكون بما يعرف بأيروسول الكبريتات وهي مادة خطيرة تفوق آثارها الضارة أربعة أضعاف آثار غاز ثنائي أكسيد الكبريت. حيث أن للأيروسول القدرة على اختراق الرئة وبذلك يعد الأيروسول من أخطر الملوثات الهوائية الضارة بصحة كبار السن.

يتضح مما تقدم أن المصادر بشرية المنشأ تعد المصدر الرئيسي التي ترفد الهواء بكميات هائلة من غاز ثنائي أكسيد الكبريت. ومما يزيد من خطورة هذه المشكلة أن منظومات معالجة الانبعاثات الغازية للحد من تركيزه تعد معقدة وباهظة التكاليف مما يصعب التوسع في استعمالها في العالم. لذا فقد تم التوجه نحو تصفية الوقود النفطي لتخليصه من آثار عنصر الكبريت بعملية إزالة الكبريت Desulphurization مما يؤدي إلى الحد من انبعاثه إلى الهواء. ويعد المتخصصون في هذا المجال أن هذا الغاز قد وصل إلى حدوده المندرة بالخطر في جميع أنحاء العالم مما سيكون له أثر كبير على سلامة البيئة وبالتالي صحة الإنسان.

يدخل غاز ثنائي أكسيد الكبريت في تكوين الضباب الدخاني (الضبخان Somg) وهو الملوث الرئيسي المسؤول عن وفيات حوالي أربعة آلاف شخص في كارثة وقعت في مدينة لندن عام 1952م كما تم ذكره سابقاً بالإضافة لتأثيره على المكونات المادية غير الحية في البيئة وعلى النباتات والحيوانات. كما يمكن أن يتفاعل مع الأوكسجين الجوي ليكون ثلاثي أكسيد الكبريت الذي يميل بشدة للذوبان في مياه الأمطار وتكون الأمطار الحامضية Acid rains.

6- غاز كبريتيد الهيدروجين Hydrogen Sulphide

غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S ينبعث من مصادر طبيعية مختلفة مثل ثوران البراكين التي تنطلق منها كميات لا بأس بها من هذا الغاز بالإضافة لكميات أكبر منه ناتجة من تحلل المواد العضوية ذات الأصل النباتي والحيواني بخاصة في البيئات الرطبة والمائية وتحت تأثير البكتيريا اللاهوائية

التي تهاجم الكبريتات وتحولها بعملية اختزال إلى كبريتيت Sulphit. ويمكن أن تحدث نفس عملية التحلل هذه في مواقع طمر النفايات تحت الأرض، بما يكون السبب في ظهور هذا الغاز بشكل ذائب في المياه الجوفية، وبمعنى آخر تسبب في تلوث هذه المياه. كما ينبعث الغاز كذلك في مواقع طبيعية كالينابيع الكبريتية لاسيما الساخنة منها ومن أحواض تنقية مياه الصرف الصحي بسبب عمليات تحلل الفضلات العضوية البروتينية.

ينتج غاز كبريتيد الهيدروجين أيضاً أثناء الأنشطة الصناعية مثل عمليات الدباغة بسبب استخدام بعض المركبات الكيميائية التي تسبب في انبعائه. كما أن عمليات تصفية النفط الحاوي على تراكيز عالية من الكبريت قد ينبعث منها هذا الغاز.

إن غاز كبريتيد الهيدروجين عديم اللون وسام جداً وتبلغ درجة سميته بنفس سمية غاز السيانيد تقريباً. وله رائحة نفاذة وكريهة تشابه رائحة البيض الفاسد. ويمكن للإنسان أن يتحسس بهذه الرائحة في تراكيز ضئيلة جداً ولا تتجاوز 0.0005 جزء بالمليون (0.5 جزء بالليون).

تكمّن خطورة هذا الغاز على صحة الإنسان خلال التعرض له لمدة طويلة أو عند التعرض إلى تراكيز عالية منه لمدة قصيرة. حيث يمكن لهذا الغاز اختراق أغشية الحويصلات الرئوية بسهولة ليصل على الدم ومنه إلى أعضاء الجسم كافة مسبباً الصداع والغثيان مع تخرش العينين يصاحبها أحياناً حالات من التراخي والكسل أو الخمول العام وقد يؤدي إلى الموت عند استمرار التعرض إلى تراكيز أعلى. وبعض المصادر تذكر أن بعض مواصفات جودة الهواء تبين أن الحد المسموح به من التعرض لهذا الغاز يتراوح ما بين 7 جزء بالمليون لثمان ساعات عمل و 10 جزء بالمليون للتعرض القصير الأمد وبحدود أقل من نصف ساعة.