ظواهر مناخية

3-2017

Acid rain, Global warming, Ozone depletion

SECOND LECTION -5TH YEAR

Dr. Eng. Bassam Al Aji

DAMASCUS UNIVERSITY –CIVIL ENGINEERING FACULTY-ENVIRONMENTAL DEPARTMENT

الاحتباس الحراري

الاحتباس الحراري **Warming Global** هي ظاهرة ارتفاع درجة الحرارة في بيئة ما نتيجةً لتغير في سيلان الطاقة الحرارية من البيئة وإليها. وعادة ما يطلق هذا الاسم على ظاهرة ارتفاع درجة حرارة الأرض في معدلها.

وينقسم العلماء في مسببات هذه الظاهرة على المستوى الأرضي أي في سبب ظاهرة ارتفاع حرارة كوكب الأرض. يقول بعض العلماء أن هذه الظاهرة هي ظاهرة طبيعية وأن مناخ الأرض يشهد بشكل طبيعي فترات ساخنة وأخرى باردة مستشهدين بذلك بالفترة الجليدية أو الباردة نوعاً ما التي حدثت خلال القرنين السابع عشر والثامن عشر في أوروبا، هذا التفسير يريح الكثير من الشركات الملوثة للبيئة مما يجعلها دائما تعود إلى الأعمال العلمية التي تشير إلى طبيعية الظاهرة لتتهرب من مسؤوليتها أو من ذنبها في ارتفاع درجات الحرارة. ويعتبر علماء آخرون ظاهرة الانحباس الحراري ظاهرة من صنع الإنسان تسبب فيها البشر من خلال نشاطاتهم المختلفة، أي يعزون الانحباس الحراري للإصدارات الغازية الملوثة للبيئة كثاني أوكسيد الكربون والآزوت وغيرها فقط، حيث يؤكدون بأن هذه الظاهرة شبيهة إلى حد كبير بظاهرة الدفيئة الزجاجية، أو ما تسمى أيضاً بظاهرة البيت الزجاجي (affect house green) وأن هذه الغازات مع التلوث البيئي تمنع أو تقوي مفعول التدفئة لأشعة الشمس. وفي حين أن الغالبية العظمى من العلماء لا تنفي أن هذه الظاهرة طبيعية أصلاً، إلا أنها تتفق على أن الإصدارات الغازية الملوثة للبيئة تقوي هذه الظاهرة.

وحتى نفهم ظاهرة الانحباس الحراري لابد من شرح ظاهرة الدفيئة الزجاجية الشبيهة بهذه الظاهرة، ففي حالة ظاهرة الدفيئة الزجاجية، أو ما تسمى أيضاً بظاهرة البيت الزجاجي تدخل أشعة الشمس إلى داخل الدفيئة حاملةً حرارتها، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة داخل الدفيئة نظراً لعدم تسرب الحرارة إلى خارج الدفيئة بنفس المعدل الذي دخلت فيه. تشتد الظاهرة السابقة في تواجد الغازات الضارة التي تنبعث من مداخن المصانع ومحطات تكرير النفط ومحطات توليد الطاقة ومن عوادم السيارات، مثل غازات ثاني أكسيد الكربون، والميثان، وأكسيد النيتروز، والهالوكربونات، وسادس أكسيد الفلوريد، وكلور الفلور الكربونات chlorofluorocarbons (CFCs) وغيرها مسببةً ارتفاع درجة حرارة الأرض.

قبل أكثر من عقدين من الزمن، جرى تقسيم مراقبي ارتفاع درجة حرارة الأرض إلى ثلاثة مجموعات: الصقور والحمائم والبوم. أبدى الصقور في منتصف الثمانينات قناعتهم بدون أي شكّ بأن النشاطات البشرية تؤثّر مباشرةً على التركيب الكيميائي للغلاف الجوّي وتنعكس مباشرةً على المناخ العالمي؛ أما الحمائم فكان اعتقادهم بأن جوّ الأرض متين جداً بحيث يمكنه أن يمتصّ أيّ إساءة يتعرض لها، إضافةً إلى أنه لا بد من وجود تقنية خاصة ستنقذنا عندما تصبح المشكلة جدّية وخطيرة جداً؛ أما البوم فهؤلاء يتبنون إما وجهة نظر الصقور أو وجهة نظر الحمائم، لكنهم لا زالوا غير متأكّدين من أن هذه المشكلة هي مشكلة حقيقية. بعد ما يقارب 25 سنة ازداد الصقور عدداً، بينما تحول بعض الحمائم إلى شخصيات أكثر تخوفاً من ذي قبل، وانخفض عدد البوم بسبب المعلومات العلمية الجديدة، وتطور أجهزة الإعلام، إضافةً إلى بعض الصور المخيفة التي أظهرتها التحاليل التي أجريت لطبقات الجليد في الدائرة المتجمدة الجنوبية، وكذلك نضوب ثلج البحر في القطب الشمالي، والتقارير حول ظواهر الأعاصير القوية جداً superstorms، "وإعلانات شركات مثل شركة شلّ عن قلقها بشأن ارتفاع درجة حرارة الأرض. ظهر صنف آخر منذ العام 1985 هو صنف النعامات أولئك الذين يرفضون التفكير بأن ارتفاع درجة حرارة الأرض هي مشكلة، ويرفضون أيّ بحث علمي جديد، ويعتقدون بأنّ شخص ما في مكان ما سيحلّ هذه المشكلة قبل أن تصبح أزمة.

مخاطر ظاهرة الانحباس الحراري:

لو أننا قمنا قبل ثلاثين عاماً بمطالعة الدوريات العلمية في أية مكتبة عالمية بحثاً عن المقالات العلمية التي تتناول موضوع ارتفاع درجة حرارة الأرض لوجدنا بضعة ملخصات أو تعريفات لهذه الظاهرة في بعض المجلات الجغرافية، بينما عندما تحاول إجراء بحث حالي على شبكة الانترنت حول موضوع ظاهرة الانحباس الحراري لطالعتك آلافاً مؤلفة من المقالات التي تتناول خطورة هذه

الظاهرة وتأثيرها على كوكبنا، ولأحسست بأن هذا التهديد لا يضاهيه تهديد آخر سوى احتمال حرب عالمية جديدة، أو احتمال اصطدام كويكب عملاق بكوكب الأرض، أو انتشار وباء جرثومي قاتل ينقل العدوى عبر الهواء ويعيش طويلاً فيه.

إن التهديد الذي تشكله ظاهرة الانحباس الحراري على مستقبل كوكبنا لم يأت مبالغاً فيه. ولنبين أهمية التغير المناخي ومشاكل تأرجحه البيئية، فإننا نعيد إلى ذاكرتكم التاريخية أنه عندما انخفضت درجة الحرارة عن معدلها نصف درجة مئوية لمدة قرنين منذ العام 1570 مرت أوربا بعصر جليدي جعل الفلاحين خلاله يهجرون أراضيهم ويعانون من المجاعة لقلة المحاصيل التي أخذ الصقيع يقضي عليها. وعلى العكس لو زادت درجة حرارة كوكبنا زيادة طفيفة عن الوسطي فإن ذلك سيجعل فترات الدفء تطول وفترات الصقيع والبرد تقل، مما سيجعل النباتات تنمو والمحاصيل تتضاعف والحشرات المعمرة تسعي وتنتشر. أي أن المعادلة المناخية لكوكبنا معادلة دقيقة سيقود أي خرق فيها إلى كوارث بيئية من أشكال مختلفة.

إن الازدياد المستمر للارتفاع الحراري سيحدث تغيرا كبيرا في مناخ الأرض لا يحمد عقباه. ولقد شهد العالم في العقد الأخير من القرن الماضي أكبر موجة حرارية شهدتها الأرض منذ قرن، أدت إلى ظهور الفيضانات في بعض المناطق، وبدأ الجفاف والتصحر يصيب البعض الآخر، وكذلك أخذت الحرائق تكتسح الغابات في مناطق متعددة من العالم، وعمت المجاعات مناطق مختلفة من العالم.

كما يربط بعض العلماء التلوث الحاصل بظاهرة تغير عدد حيوانات البلانكتون في البحار نتيجة زيادة حموضة مياه البحار بفعل امتصاصها لغاز ثاني أوكسيد الكربون، ويفسرون أن التلوث الذي يحدثه الإنسان هو شبيه بمفعول الشعلة التي تعطي الدفعة الأولى لهذه العملية ،حيث يقوم البلانكتون بالباقي.

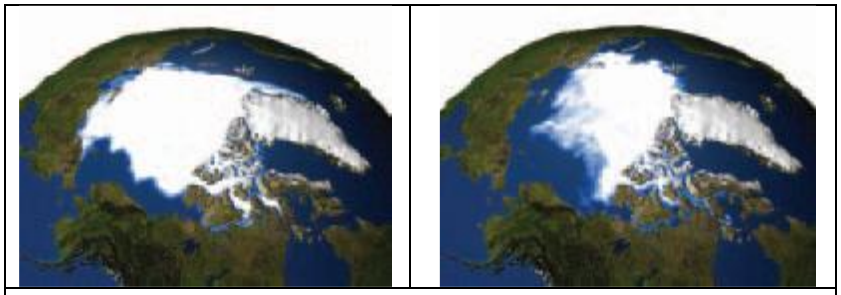
إن استمرار ظاهرة ارتفاع درجة حرارة الأرض سيعني أن الفيضانات والكوارث البيئية، والأوبئة، والأمراض المعدية ستكتسح عالمنا الأرضي. ويعتبر ذوبان الجليد عند القطبين من أهم مخاطر ارتفاع درجة حرارة الأرض، حيث سيؤدي في حال استمراره إلى إغراق الكثير من المدن الساحلية حول العالم. كما ستؤدي ظاهرة الانحباس الحراري إلى تغير المناخ العالمي وتصحر مساحات كبيرة من الأرض. وستتأثر المحيطات والتيارات الهوائية الباردة والساخنة الموجودة فوقها، والتي هي عبارة عن نظام تكييف للأرض، بارتفاع معدل درجة حرارة الأرض حيث لوحظ مؤخراً تغير مجرى هذه التيارات مما جعل التوازن الحراري الذي كان موجوداً ينقلب، ويمكن الاستدلال على ذلك بملاحظة ظهور الأعاصير في أماكن لم تكن تظهر بها من قبل.

هناك بعض الخلافات بين علماء المناخ حول التأثير المحتمل لتغير المناخ العالمي على الأعاصير المستقبلية وخصوصاً في المحيط الأطلسي. فقد ادعى بعض الباحثين أن شدة وتواتر الأعاصير تزداد بفعل ظاهرة الانحباس الحراري، وقد ازداد هذا الاعتقاد بعد قيام أعاصير بوني، وتشارلي، وفرانسيس Charley, Frances and Bonnie Hurricane بضرب ولاية فلوريدا في العام 2004. وقد قام العلماء الأمريكان على الفور بالرد معتبرين ذلك تضليلاً، معتبرين أن لا علاقة لظاهرة ارتفاع درجة حرارة الأرض بزيادة شدة وتواتر الأعاصير وأن من يشيع هذه الفكرة يعجز عن تقديم الدعم العلمي لها، وبأن ظاهرة الانحباس الحراري ليست هي التي تحدد تواتر أو شدة الأعاصير. أما فيما يتعلق بتوقع بعض علماء وخبراء الأعاصير زيادة عدد الأعاصير الأطلسية للسنوات الخمسة عشر القادمة مقارنةً بالسنوات الأخيرة، فيعتقد العلماء الأمريكيون بأن هذه التوقعات لا تأتي بالجديد فالذروة الأخيرة للأعاصير كانت بين الأعوام 1970-1930 ، وأن ذلك بسبب خاصية التفريغ للمحيط الأطلسي، حيث أن المياه تبرد في الشتاء في المحيط الأطلسي الشمالي في بحري Sea Gin and Labrador، ثم يغرق الماء البارد إلى القاع ليستبدل بماء تيارات الخليج الدافئ الذي يترك ساحل كارولاينا الشّمالية ويمضي نحو المنطقة الشمالية الشرقية إلى إيرلندة والنرويج. هذه الظاهرة تؤثر بشكل مباشر، بحسب اعتقادهم، على درجات حرارة مياه البحر السطحيّة، والتي تشتد وتخف تبعاً لعوامل مختلفة، فقد مرت في فترات شديدة كالفترة -1930 1970 والفترة 1995-2000-now ، حيث كانت عندها الأعاصير كثيرة ، كما مرت في فترات خفيفة كالفترة 1925-1905 والفترة -1975 1994. ويخلص الباحثون الأمريكيون إلى القول بأن الإعصار يتحرك بقوة أكبر بكثير عندما يتحرك فوق مياه دافئة بدرجة حرارة أكبر من 26.5 C ولهذا السبب بحسب رأيهم يعتقد بعض الباحثين بأن الأعاصير تشتد بفعل الانحباس الحراري.

إلا أنه يجدر الذكر أنه عندما انتهى الإعصار ميتش في العام 1998 فوق الهندوراس تسبّب بسقوط أكثر من 6 أقدام من المطر على الناس الفقراء في الهندوراس ونيكاراغوا . وقاد إلى تلف المحاصيل وتخريب الكثير من النظم البيئية وإغراق العديد من المناطق وخسارة مليارات الدولارات، إضافة إلى قتل وتشريد الكثير من الناس.

ورغم التقنيات المتقدمة والأبحاث المضنية نجد أن ظاهرة الاحتباس الحراري هي مأساة حقيقية من الصعوبة بمكان التكهن الدقيق بعواقبها، فنتيجة ارتفاع درجة حرارة الأرض خلال القرن الماضي نصف درجة مئوية أخذ الجليد في القطبين وفوق قمم الجبال الأسترالية في الذوبان بشكل ملحوظ، وقد لاحظ علماء المناخ أن موسم الشتاء قد قصرت فترته وازداد دفءً خلال العقود الثلاث الأخيرة عما كان عليه من قبل. فالربيع يأتي مبكراً عن مواعيده، وهذا كله يعود لظاهرة الاحتباس الحراري. أن تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري قد تحدث تلفاً بيئياً فوق كوكبنا، فقد يزول الجليد من فوق سطحه تماماً خلال هذا القرن وكلنا يدرك أهمية وتأثير هذا الجليد على الحرارة والمناخ والرياح الموسمية وعلى المناطق الساحلية، حيث سيرتفع مستوى البحر وستهدد بالغرق الكثير من المدن الساحلية وستختفي أغلب الجزر المتناثرة في المحيطات والبحار، فعلى سبيل المثال وجدت فوق قمة جبال الهيملايا الجليدية 20 بحيرة جليدية في نيبال و24 بحيرة جليدية في بوهيتان قد غمرت بالمياه الذائبة، ما سيهدد المزروعات والممتلكات بالغرق خلال السنوات القادمة. ويرجح العلماء أن سبب امتلاء هذه البحيرات يعود لظاهرة ارتفاع درجة حرارة الأرض، فحسب برنامج البيئة العالمي وجد أن معدل درجة الحرارة في نيبال قد ازداد درجة مئوية واحدة وقد لوحظ أن الغطاء الجليدي فوق بوهتان يتراجع حوالي 30 –40 مترا في السنة. وهذه الذوبانات لمياه الجليد فرضت على سلطات بوهتان ونيبال إنشاء السدود لدرأ أخطار الفيضانات المحتملة.

ويتوقع تقرير نشرته إحدى وكالات حماية البيئة استناداً إلى علماء وخبراء المناخ أن ارتفاع مستوى سطح البحر 48 سم يمكن أن يهدد المباني والطرق وخطوط الكهرباء وغيرها من البنية الأساسية في المناطق ذات الحساسية المناخية. وتجدر الإشارة إلى أن ارتفاع مستوى البحر بالمعدلات الواردة في التقرير يمكن أن يغمر حي مانهاتن في نيويورك بالماء حتى شارع وول ستريت. إضافة إلى ما سبق فإن الانحباس الحراري سيقود إلى تأثر صحة الأطفال بالموجات الحرارية، كما سيسرّع تطور الملاريا الطفيلي، وستذبل المحاصيل وسيواجه السكان والماشية المجاعة والإمدادات المتضائلة من مياه الشرب والتلوث البيئي بمياه الصرف والنفايات الصلبة.



الشكل (1): مقارنة للمناطق القطبية الشمالية بين عام 1970 والآن

أسباب ظاهرة الانحباس الحراري:

وفي هذا السيناريو البيئي نجد أن المتهم الأول هو غاز ثاني أكسيد الكربون الذي أصبح شبحاً تلاحق لعنته مستقبل الأرض. وهذا ما جناه الإنسان على نفسه عندما أفرط في إحراق النفط والفحم والخشب والقش ومخلفات المحاصيل الزراعية فزاد معدلات غاز الكربون في الجو. وكذلك فإن اجتثاث اَشجار الغابات أدى إلى انتشار ظاهرة التصحر، مما قلل من اليخضور النباتي الذي يمتص غاز ثاني أكسيد الكربون من الجو، مما جعل تركيزه يزيد في غلافنا الجوي.

وتعتبر الولايات المتحدة هي أكبر منتج لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن النشاطات البشرية (من محطات تكرير النفط ومصانع إنتاج الطاقة ومن السيارات وعن عمليات التحلل البيولوجي ومن الكثير من الصناعات الأخرى)، والتي يقول العلماء إنها الغازات الرئيسية المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري، حيث يقوم هذا الغاز باحتجاز جزء من الطاقة الحرارية المنبعثة من سطح الأرض ماصاً إياها ومحتفظاً بها داخل الغلاف الجوي رافعاً بذلك درجة حرارة سطح الأرض، وهذا تماماً ما يفسر ارتفاع درجة حرارة كوكب الزهرة الذي يتكون غلافه الجوي بغالبيته من غاز ثاني أوكسيد الكربون.

وبدون أدنى شك فإن غازات الميثان، وأكسيد النيتروز، والهالوكربونات، وسادس أكسيد الفلوريد، وكلور الفلور الكربونات chlorofluorocarbons (CFCs) أو الفريونات، وكذلك أكاسيد النتروجين التي تطلقها الطائرات النفاثة والغازات الناتجة عن التفجيرات النووية وغيرها تسبب ارتفاع درجة حرارة الأرض، إلا أن انتشار هذه الغازات في الغلاف الجوي أقل من انتشار غاز ثاني أكسيد الكربون، على الرغم من أن فعالية تأثيرها تفوق فعالية تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون بمرات عديدة فعلى سبيل المثال يفوق تأثير غاز الميثان على هذه الظاهرة تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون بـ 23 مرة ، بينما يفوق تأثير غازات الفريون على هذه الظاهرة تأثير غاز ثاني أكسيد الكربون بـ 1000 مرة. أما مصادر هذه الغازات فهي كثيرة جداً ابتداءً بالغازات الناتجة عن عمليات التحلل البيولوجي وانتهاءً بالصناعات المختلفة التي تشمل بعض صناعات التبريد وتقنيات إطفاء الحرائق والغازات العادمة للطيران النفاث...الخ.

وقد وجد أن الإشعاعات الكونية والغيوم تؤثر على تغيرات مناخ الأرض. فلقد اكتشف فريق من علماء المناخ الألمان بمعهد ماكس بلانك بهايدلبرج كتلاً من الشحنات الجزيئية في الطبقات السفلى من الغلاف الجوي تولدت عن الإشعاع الفضائي أدت إلي ظهور أشكال نووية المكثفة تحولت إلى غيوم كثيفة قامت بدور أساسي في العمليات المناخية على الرغم من أنه لم يتم التعرف حتى الآن وبشكل كامل على عمل هذه الغيوم، حيث أن كميات الإشعاعات الكونية القادمة نحو الأرض تخضع بشكل كبير لتأثير الشمس.

ويقول البعض أن النجوم لها تأثير غير مباشر على المناخ العام فوق الأرض. ويرى بعض العلماء الأمريكيين أن جزءاً هاماً من الزيادة التي شهدتها درجات حرارة الأرض في القرن العشرين، ربما يكون مرده إلى تغيرات حدثت في أنشطة الشمس، وليس فقط إلى الاحتباس الحراري الناجم عن الإفراط في استخدام المحروقات. وقد أشاروا في دراستهم للمناخ التي نشرت مؤخراً ضمن إصدارات الاتحاد الجيوفيزيائي الأمريكي إلى أنهم عثروا على أدلة على العلاقة ما بين هذه الأشعة والتغيرات المناخية فوق الأرض ، وقد أيد فريق بحث ألماني قام بتركيب عدسة أيونية ضخمة في إحدى الطائرات لدراسة الأشعة الكونية النظرية القائلة بأن الأشعة الكونية يمكن أن تساهم في التغيرات المناخية وتؤثر على قدرة الغيوم على حجب الضوء.

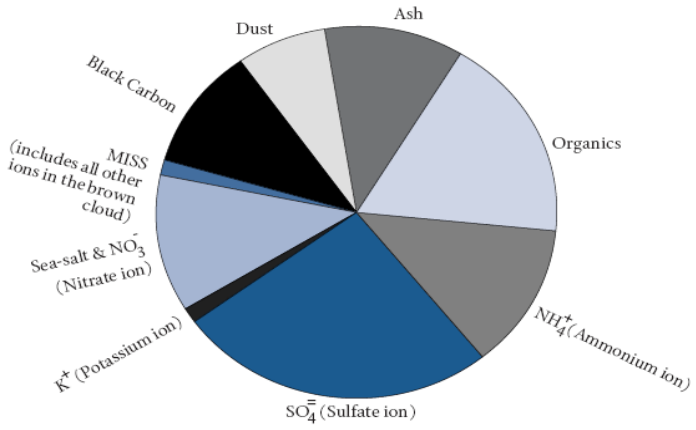
تملك الغيوم الرمادية المشبعة بغازات ثاني أوكسيد الكربون قدرة عالية على امتصاص الأشعة تحت الحمراء وبالتالي على احتجاز الحرارة وعكسها إلى سطح الأرض .

تتعلق درجة حرارة الأرض بخصائص سطحها وبوجود الجليد في القطبين، أو فوق قمم الجبال، وبوجود الرطوبة في التربة، وكذلك بوجود المياه في المحيطات، حيث تمتص المياه معظم حرارة الشمس التي تقع على سطح الأرض. ولولا ذلك لارتفعت حرارة الأرض، ولأصبحت اليابسة فوقها جحيماً لا يطاق. كما تؤثر الرياح والعواصف في مساراتها على المناخ الإقليمي أو العالمي من خلال المطبات والمنخفضات الجوية، وقد لوحظ أنه كلما ازدادت نسبة بخار الماء في الجو المحيط ازدادت ظاهرة الاحتباس الحراري شدة، وذلك لأن بخار الماء يحتفظ بالحرارة ثم يشعها للأرض. لهذا نجد أن المناخ العالمي يعتمد على منظومة معقدة من الآليات والعوامل والمتغيرات في الجو المحيط أو فوق سطح الأرض.

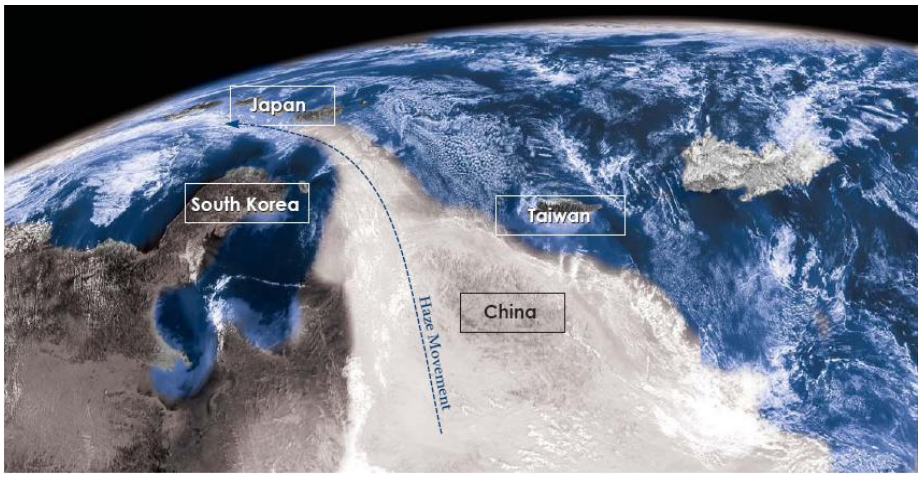
كل ما سبق جعل علماء وزعماء العالم يقلقون ويعقدون المؤتمرات للحد من هذه الظاهرة التي باتت تؤرق الضمير العالمي وتصيبنا بالهلع لمجرد التفكير في نتائجها. وبعد أكثر من عقد من المفاوضات والتخطيط للإتفاقية الهيكلية لتغير المناخ Framework Change Climate on Convention (FCCC) تم التأكيد في معاهدة كايوتو Protocol Kyoto بضرورة السيطرة على إصدارات غازات البيت الزجاجي، وخصوصاً غاز ثاني أوكسيد الكربون، كما جرى التركيز على ذلك في الاتفاقات اللاحقة.

إن مكافحة ارتفاع درجة حرارة الأرض يجب أن يبدأ الآن وبالدعم الحكومي المادي والمعنوي وبالوعي البيئي لدى صانعي التلوث. ومن الآليات المستخدمة لتخفيف ظاهرة ارتفاع درجة حرارة الأرض:

- رفع كفاءة محركات السيارات .
- التخفيف من قطع أشجار الغابات .
- الاعتماد على مصادر طاقة أقل تلويثاً باستخدام الطاقات البديلة .
- التحول عن استخدام الغازات الضارة بالبيئة.
- الاستفادة من غازات الميتان المنطلقة من مختلف العمليات البيولوجية وعدم طرحها إلى الغلاف الجوي.



الشكل (2): تركيب الغيوم الرمادية المحملة بغاز ثاني أوكسيد الكربون.



الشكل (3): صورة فضائية تبين حركة الضباب الرمادي في منطقة شرقي بحر الصين.

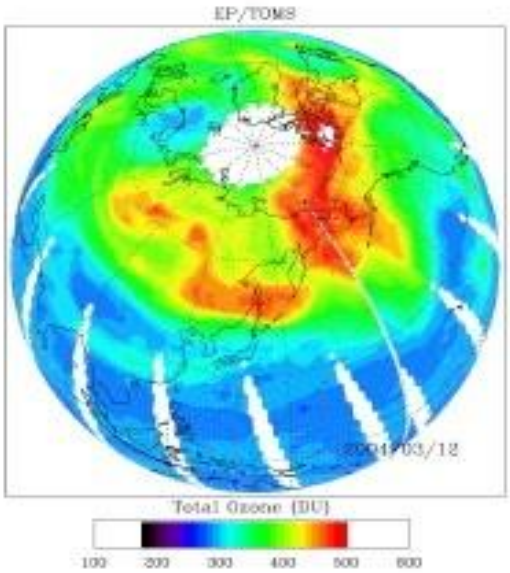
استنزاف طبقة الأوزون (ثقب الأوزون)

تشكل الأوزون Ozone(O_3) بشكل طبيعي في طبقة الستراتوسفير stratosphere (أعلى الغلاف الجوّي) بتراكيز صغيرة جداً لا تتجاوز عدة أعشار للجزء من المليون، وعلى الرغم من أنّه يعتبر مكوّن صغير جداً في الجوّ، يلعب الأوزون دوراً كبيراً في تشكيل النظام الحراري للطبقات السفلى من الغلاف الجوي وكذلك في حركة الهواء، كما أنه يلعب دوراً حيوياً في تخفيض كمية الإشعاع فوق البنفسجي الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض، وبالتالي يعتبر الأوزون، نتيجة قدرته على امتصاص كميات كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية الشمسية الضارة، درعاً واقياً لسطح الأرض وأنظمته البيئية من هذه الأشعة المدمرة. ومن المهم الإشارة إلى أن أوزون طبقة الستراتوسفير الذي يعتبر درعاً واقياً يعتبر ملوثاً عند تواجده في المستوى الأرضي، حيث يعتبر الأوزون الأرضي ملوثاً للهواء ومساهماً في الضباب الدخاني على المدن الكبيرة، كما أنه يعيق عمل الأنزيمات ويخفف معدلات التمثيل الضوئي للنباتات ذاتية التغذية، إضافةً لتأثيره على الكثير من المحاصيل ذات الحساسية الخاصة للتركيز العالي من الأوزون. ومن الجدير بالذكر أن استنزاف الأوزون في طبقة الستراتوسفير قد يزيد من كميته عند سطح الأرض.

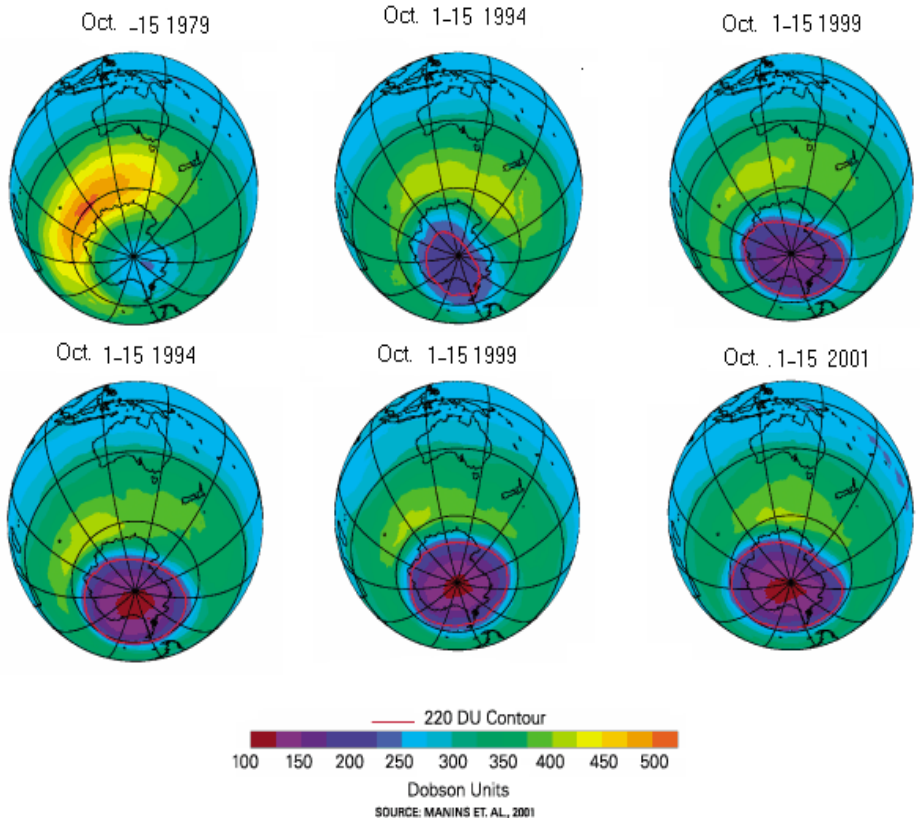
بدأت القياسات الأرضية للأوزون في العام 1956 ، في خليج هالي في القارة القطبية الجنوبية، أما القياسات الفضائية للأوزون فقد بدأت بعد ذلك في العام 1970، لكن المقاييس العالمية الشاملة الأولى له فقد بدأت في العام 1978 باستخدام القمر الصناعي Nimbus-7 ، واليوم هناك عدّة أقمار صناعية مختلفة تقوم بقياس تركيز الأوزون والغازات الجوّية الأخرى. ويمكن اختبار الغازات في طبقة التروبوسفير troposphere والطبقة السفلى من الستراتوسفير بواسطة مناطيد الطقس أو باستخدام الطائرات مثل ER-2 التي يجري استخدامها من قبل وكالة الفضاء الأمريكية ناسا NASA .

وقد أظهرت الدراسات أن مساحة ثقب الأوزون أكبر مما يمكنك أن تتخيّلها، فالفتحة التي اتسعت خلال الشتاء القطبي لعام 1998 غطّت منطقة تقدر بحوالي 26 مليون كيلومتر مربّع، وللمقارنة إنّ مساحة أمريكا الشمالية حوالي 21 مليون كيلومتر مربع، والدائرة المتجمدة الجنوبية تغطي مساحة حوالي 14 مليون كيلومتر مربع. إن ثقب الأوزون القطبي المقاس عام 1998 كان الأكبر منذ قياس هذا الثقب لأول مرة عام 1980 ، بينما كان ثقب الأوزون القطبي المقاس عام 1999 الأصغر بحسب قياسات وكالة الفضاء الأمريكية NASA والإدارة القومية للمحيطات والغلاف الجوي NOAA .

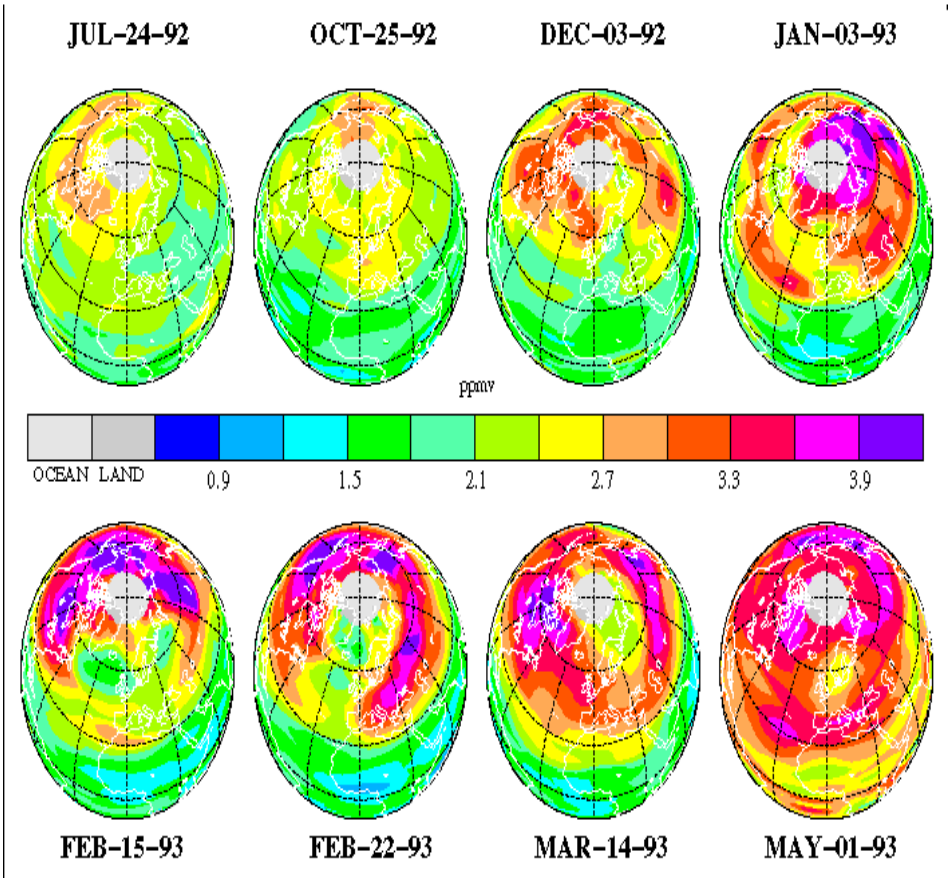
انكمش الثقب المفتوح في طبقة الأوزون على القارة القطبية الجنوبية فجأة في العام 2002 وشرح في وقتها بأن ذلك كان شذوذاً بسبب الظروف الجوية، وعاد الثقب ليتسع بشكل كبير في الأسبوع الثاني من أيلول September 12, 2003 وليسجل أبعاداً قياسية لهذا الوقت من السنة حيث بلغ اتساع الثقب حوالي 11 مليون ميل مربع.



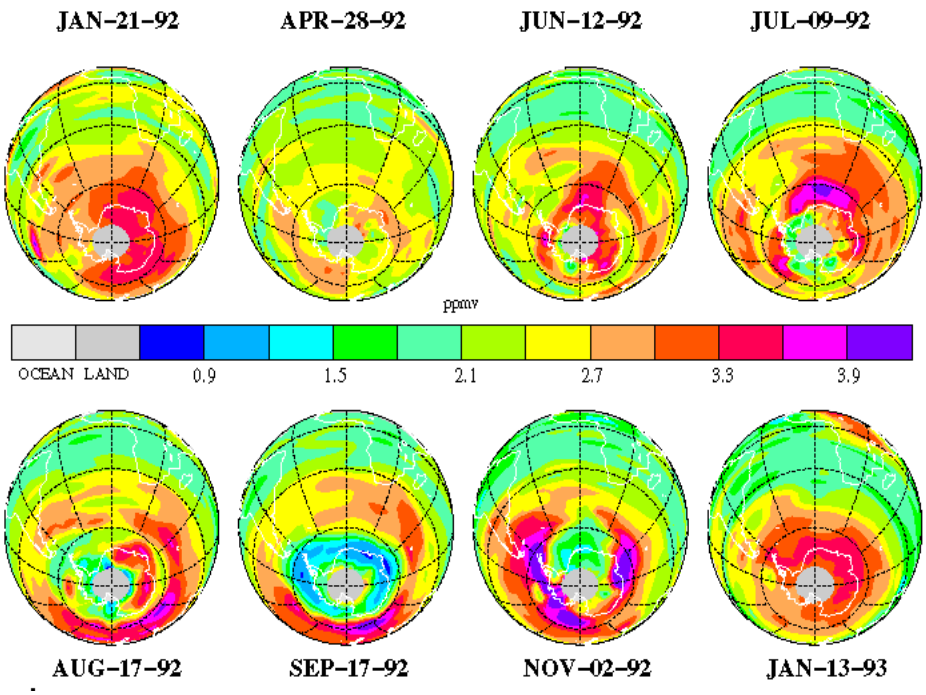
خريطة الأوزون كما يظهرها القمر الصناعي في 12 آذار 2004 . يبدو في الصورة التراكيز المنخفضة للأوزون في الأجزاء الزرقاء، التراكيز المرتفعة للأوزون في الأجزاء الحمراء، وبيانات غير متوفرة في الأجزاء البيضاء. تظهر الصورة نقصاً حاداً في الأوزون فوق المناطق الإسكندنافية.



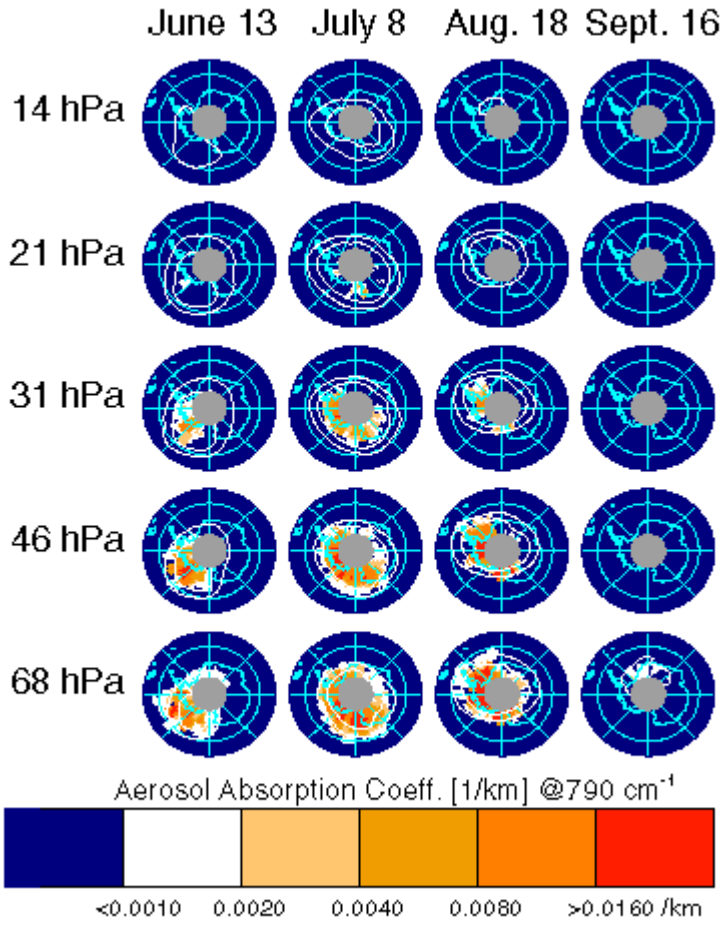
تغير مساحة ثقب الأوزون فوق منطقة القطب الجنوبي كما يظهرها القمر الصناعي في 15-1 تشرين الأول من أعوام مختلفة.



تغيرات بيانات الأوزون القطبية لـ 24 ساعة في 21 كيلومتر كما جرت دراستها من قبل CLAES في طبقة الستراتوسفير القطبية لأيام فردية بين تموز 1992 أيار 1993 .



تغيرات بيانات الأوزون القطبية لـ 24 ساعة في 21 كيلومتر كما كما جرت دراستها من قبل CLAES في طبقة الستراتوسفير القطبية لأيام فردية بين كانون الثّاني 1992 وكانون الثّاني 1993.



صور قطبية لأيام مختارة أثناء الشتاء القطبي من العام 1992 كما جرت دراستها من قبل CLAES وقد جرى أخذ البيانات السابقة خلال الليل القطبي.

هذا التذبذب في اتساع ثقب الأوزون جعل الدراسات العلمية تتفاوت في تفسير الظاهرة، فعزى بعضهم ثقب الأوزون إلى أسباب طبيعية ناتجة عن استمرارية الليل القطبي لفترة زمنية طويلة فوق المناطق القطبية، وبالتالي فإن غياب أشعة الشمس يساهم في إيقاف تجدد الأوزون فوق هذه المناطق ليبلغ حده الأقصى خلال شهر أيلول من كل عام، وكذلك تساهم أكاسيد الآزوت المتشكلة طبيعياً لدى انتقالها خلال فترة الليل القطبي إلى المناطق القطبية في تحلل هذا الأوزون، بينما أصرت دراسات أخرى على دور الملوثات الصناعية في استنزاف الأوزون في طبقة الستراتوسفير. وقد أكّدت العديد من الدراسات على وجود الثقبين القطبيين، كما أشارت إلى نقص عالمي عامّ في كمية الأوزون في طبقة الستراتوسفير، حيث أكدت إحدى الدراسات أنّ الأوزون العالمي نقص بحدود 2.5 % من العام 1969 حتى العام 1986، وأكدت دراسة أخرى نقصاً قدره 3% من العام 1986 حتى العام 1993). كما أظهر قمر المراقبة الصناعي البيئي الخاص بوكالة الفضاء الأوربية Envisat تناقصاً في مستويات أوزون طبقة الستراتوسفير فوق أوروبا بنسبة حوالي 6% في العقد الواحد. الصدمة الكبرى جاءت في بحث نشر في أيار العام 1985 من قبل Farman, Gardinar and Shanklin أكدت عبر عرضها للمسح القطبي البريطاني أنّ مستويات الأوزون هبطت إلى ما دون 10 % من المستويات الطبيعية لها في شهر كانون الثّاني فوق القارة القطبية الجنوبية. وكان المؤلفون متردّدين بعض الشّيء بشأن النشر لأن بيانات القمر الصناعي Nimbus-7 لم تظهر مثل ذلك الهبوط أثناء الربيع القطبي، لكن ناسا سرعان ما اكتشفت بأنّ لديها خطأ في برنامجها الحاسوبي نظراً لأن البرنامج قد صمم أساساً لدراسة الهبوطات الكبيرة المفاجئة في تركيز الأوزون.

الملوثات الصناعية المؤثرة على استنزاف الأوزون في طبقة الستراتوسفير:

بدأ العالم يلاحظ أن استخدام بعض المواد الصناعية قد تسببت باستنزاف طبقة الأوزون خلال القرن العشرين وبدأ بإزعاج الموازنة الطبيعية للعمليات التي تحافظ على طبقة الأوزون، مما أدى إلى تخفيف طبقة الأوزون في كلّ مناطق الكرة الأرضية، وبشكل خاص فوق القارة القطبية الجنوبية. ومن هذه المواد نذكر:

-مركبات الكلوروفلوروكربون CFC's **والمعروفة باسم غازات الفريون:**

إن خاصة استقرار (عدم نشاط) مركبات الكلوروفلوروكربون يجعلها مرغوبةً جداً في الصناعة، إلا أن هذه الخاصية تسمح لها بالانجراف لسنوات طويلة في البيئة (قد تمتد إلى حوالي 100 سنة) حتى تصل في النهاية إلى طبقة الستراتوسفير، أي أننا لو أوقفنا تماماً إنتاج هذه الملوثات في الوقت الحالي فإننا سنعاني لفترات طويلة جداً من الملوثات التي أصدرها العالم الصناعي في خمسينيات القرن الماضي. يساعد المستوى العالي للأشعة فوق البنفسجية الشمسية في طبقة الستراتوسفير في فصل الكلور من هذه المركبات. يقوم الكلور المنفصل بتحفيز عملية تحول جزيئات الأوزون إلى جزيئات الأوكسجين (أي تفكك الأوزون). ونظراً لأن مصطلح 'محفز' يعني مساعد للتفاعل، أي يمكن استخدامها مراراً وتكراراً قبل أن تستهلك وهذا يعني بأنّ كمية صغيرة من المحفّز (الكلور أو البروم) يمكن أن تهدم كميات كبيرة جداً من الأوزون. ويعتقد بأنّ ذرّة كلور واحدة يمكنها أن تحوّل 100,000 جزيء من جزيئات الأوزون إلى الأوكسجين قبل أن يصبح ذلك الكلور جزءً من مركّب أقل نشاطاً ، مثل حمض كلور الماء HCl والذي يسقط في النهاية خارج طبقة الستراتوسفير بواسطة بخار الماء.

-الهالونات Halons **(المركبات الحاوية على البروم):**

يعتبر البروم الموجود في هذه المركبات أشد خطراً على طبقة الأوزون من الكلور الموجود في الفريونات، كما أنها أطول عمراً منها. استخدمت هذه المركبات لإطفاء الحرائق الكيميائية، ويجري استخدامها في بعض المبيدات وفي استخدامات صناعية أخرى. يعتبر مبيد الحشرات، ميثيل البروميد methyl bromide ، المهاجم الأخطر للأوزون في الدول الصناعية، وتعتبر الولايات المتّحدة الأمريكية مسؤولة عن ربع الاستهلاك العالمي من هذه المادة الكيميائية، كما تعتبر هذه المادة المسبب المتوقع لأمراض سرطان البروستات المتزايدة بين المزارعين.

-أكاسيد النيتروجين:

على الرغم من كون هذه الأكاسيد شديدة التأثير على الأوزون، إلا أنها قليلة البقاء، وتكمن خطورتها في حالات حقنها مباشرةً في طبقة الأوزون وذلك من خلال الطائرات النفاثة (وهذا ما قاد إلى منع طيران طائرات الكونكورد فوق الأجواء العالمية)، وكذلك خلال

عمليات إطلاق الصواريخ إلى الفضاء. وتؤدي عمليات الطيران السريع عبر طبقة الأوزون إلى تدمير هذه الطبقة بفعل الموجات الهوائية الناتجة عن عمليات الطيران. كما تعمل التفجيرات النووية على تدمير هذه الطبقة بفعل الموجات الصوتية والإشعاعية والحرارية الناتجة.

المشاكل الصحية والبيئية المتوقعة نتيجة ظاهرة ثقب الأوزون:

الأوزون في طبقة الستراتوسفير يحمي أرضنا من خطر وصول كميات من الأشعة فوق البنفسجية الشمسية الضارّة إلى سطح الأرض، حيث يعتقد أن استنزافاً قدره % 1 لأوزون طبقة الستراتوسفير سيزيد خطورة التعرّض للأشعة فوق البنفسجية الضارّة بمقدار 1.5-2 %.

وهناك أشكال مختلفة للأشعة فوق البنفسجية الشمسية UV radiation هي:

- الأشعة فوق البنفسجية من النوع UV-A وهي الأشعة ذات طول الموجة الأكبر من 320 nm: لا تحجب هذه الأشعة بشكل ملحوظ من قبل طبقة الأوزون، وتعتبر من الأشعة الضرورية للبشر لتشكيل فيتامين D .
- الأشعة فوق البنفسجية من النوع UV-B وهي الأشعة ذات طول الموجة 320 nm - 280 : تحجب هذه الأشعة جزئياً من قبل طبقة الأوزون. تؤدّي الأشعة UV-B إلى شيخوخة الجلد وإلى أشكال متقدمة من سرطان الجلد عند البشر في حالات التعرض الشديد، وتتعرض الأعضاء المكشوفة مثل الجلد والعيون لأكثر تأثيرات هذه الأشعة (استناداً لوكالة حماية البيئة الأمريكية EPA)، كما يمكنها أن تتسبب بأخطار شديدة للكائنات الحية الأخرى وللـ DNA الخاصة بها. وتزداد خطورة هذه الأشعة بانخفاض طول الموجة ولكن لحسن الحظ فإن قدرة الأوزون على امتصاص هذه الأشعة تزداد بشكل حادّ بانخفاض طول موجتها.
- الأشعة فوق البنفسجية من النوع UV- C وهي الأشعة ذات طول الموجة 280 nm - 200 : تحجب هذه الأشعة كلياً من قبل طبقة الأوزون ، يمكن أن يسبّب وصولها إلى سطح الأرض أضرار حيوية حادّة .

وبالتالي يكمن الخطر الأساسي من استنزاف طبقة الأوزون في وصول الأشعة فوق البنفسجية إلى سطح الأرض، حيث تملك هذه الأشعة أخطاراً متعددة على جميع الأشكال الحية على سطح الأرض ونذكر من أخطارها:

تأثير الأشعة فوق البنفسجية على الصحة البشرية :

زيادة في أمراض سرطان الجلد Skin Cancers : تبعاً لوكالة حماية البيئة الأمريكية هنالك ثلاثة أنواع بارزة من سرطان الجلد ستتزايد نتيجة استنزاف طبقة الأوزون. يعاني حوالي 500000 شخص سنوياً في الولايات المتّحدة من النوعين الأساسيين الشائعين والأقل خطراً والتي تسبب أمراضاً قابلة للمعالجة إذا اكتشفت بشكل مبكر، أما النوع الثالث فهو ورم خبيث أقلّ شيوعاً بكثير من النوعين السابقين، لكنه أكثر ضرراً، حيث يعاني من هذا النوع حوالي 25000 حالة سنوياً في الولايات المتّحدة يتوفى منها حوالي 5000 حالة سنوياً ، أي حوالي 65% من مجمل وفيّات سرطان الجلد للأنواع الثلاثة مجتمعة. يوافق العلماء عموماً بأنّ زيادة التعرّض لأشعة UV-B يمكن أن تزيد انتشار النوعين الأكثر اعتدالاً من أمراض سرطان الجلد، حيث هناك ارتباط مباشر بين زمن التعرض للشمس وشدة التأثر بسرطان الجلد للأشكال السرطانية الأكثر اعتدالاً، والتي تحدث عموماً للأشخاص ذوي الأعمار المتقدمة في المناطق المعرّضة عادةً لأشعة الشمس (مثل الوجه واليدين). ولا يوجد تفاصيل للعلاقة بين الورم الخبيث وهذه الأشعة.

تخمّن وكالة حماية البيئة الأمريكية أن زيادة التعرّض لأشعة UV-B بمقدار 2% ستؤدّي إلى زيادة في حوادث سرطان الجلد من الأشكال المعتدلة بمقدار 2-6 % ، وتشير إلى أن الورم الملاني الخبيث (النوع الثالث) يحدث عادةً عند الناس الأصغر سناً وفي مناطق من الجلد ليست بالضرورة تلك المعرّضة لضوء الشمس بشكل مباشر، إنما يرتبط الورم بشكل مباشر بحسّاسية جلد الأشخاص للشمس (فعلى سبيل المثال أبيض البشرة أكثر عرّضة للورم من ذوي البشرة الداكنة). وتشير وكالة حماية البيئة الأمريكية إلى أن التعرّض لأشعة **UV** الشمسية يضعف قدرة نظام المناعة في الجسم على مقاومة أمراض محددة.

ويسبب الإشعاع فوق البنفسجي الضرّر للعين البشرية، حيث يمكنه أن يتلف القرنية والملتحمة، كما يمكنه أن يؤذي عدسة العين. يمكن أن يسبّب الإشعاع فوق البنفسجي، أو عمى الثلج snow blindness (وهو مشابه لحرق الشمس للقرنية والملتحمة)، وأمراض أخرى. سيقود التعرّض المتزايد للإشعاع فوق البنفسجي المتوقّع نتيجة استنزاف الأوزون إلى زيادة عدد الناس الذين يواجهون مرض الكتاراكتا (cataracts إعتام عدسة العين)، أو الرؤية المحدودة، وإذا لم تجري المعالجة فإن ذلك قد يسبّب العمى. هذا بالإضافة إلى تأثيرات ضارّة محتملة أخرى ارتبطت باستنزاف أوزون وتفاوتت بحسب قدرة الكائن على امتصاص الإشعاع فوق البنفسجي.

تأثير الأشعة فوق البنفسجية على المحاصيل والأنظمة البيئية الأرضية الأخرى:

يؤثّر الإشعاع فوق البنفسجي على نمو النبات بشكل سلبي، فيؤدي إلى تخفيض حجم ورقة، وبالتالي تخفيض حجم المنطقة المتوفرة لاصطياد الطاقة، كما أنه يؤدي إلى إعاقة نمو النبات، وتخفيض وزنه الكليّ الجاف. طبقاً لوكالة حماية البيئة الأمريكية EPA فإن المعلومات العلمية الموثقة عن تأثيرات الإشعاع فوق البنفسجي على النباتات محدودة. وقد درست بالتفصيل أربعة أنظمة بيئية للنبات على الأرض من أصل عشرة أنظمة شائعة وهي: النظام البيئي للغابات المعتدلة، والنظام البيئي للأراضي الزراعية، والنظام البيئي للأراضي العشبية المعتدلة، والنظام البيئي للتوندرا، والألب)، وقد جمعت معظم البيانات من البيوت الزجاجيّة حيث النباتات أكثر حسّاسية إلى الإشعاع فوق البنفسجي UV-B من تلك النباتات التي تنمو خارج البيوت الزجاجيّة. أظهرت الدراسات العلمية في جامعة ميريلند أن ثلثي النباتات المدروسة معرضة لبعض درجات الحسّاسية للإشعاع فوق البنفسجي، وأشارت دراسات أخرى أن بعض الأعشاب الضارة أكثر مقاومة للإشعاع فوق البنفسجي من المحاصيل. وقد قدرت بعض الأبحاث أنّ استنزافاً للأوزون قدره **25%** يمكن أن يؤدّي إلى تخفيض مشابه في محصول الصويا على سبيل المثال.

وقد أظهرت الدراسات أن العديد من الكائنات الحية قد طوّرت آليات خاصة بحمايتها من الإشعاع فوق البنفسجي UV-B مثل: **تخفيض التعرّض للإشعاع**، فمثلاً تتجنب بعض الكائنات الحية المائية النشاط في منتصف اليوم عندما يكون الإشعاع فوق البنفسجي بأشد قواه؛ **حماية نفسها بالأصبغة، إصلاح ضرر الـ** DNA ، **إصلاح ضرر النسيج** ، فمثلاً تقوم بعض النباتات بإصلاح الضرر من الحروق الناتجة عن تأثير الإشعاع فوق البنفسجي، ومع ذلك قد لا تكون هذه الآليات كافية للحماية من المستويات المتزايدة من الإشعاع فوق البنفسجي UV-B للعديد من الكائنات الحية .

تأثير الأشعة فوق البنفسجية على بعض الكائنات الحية البحرية Marine Organisms :

إن الكائنات الحية البحرية كالبلانكتونات النباتية Phytoplankton ، والبلانكتونات الحيوانية zooplankton والكائنات الحية البحرية الأخرى، والتي تلعب دوراً حاسماً في شبكة الغذاء البيئيّة المعقّدة، هي كائنات حسّاسة للإشعاع فوق البنفسجي. تعتبر الأنظمة الحيوية الكبيرة أكثر حماية ضد الإشعاع فوق البنفسجي UV-B من الأنظمة الأصغر كالكائنات الحية أحادية الخلية في الأنظمة البيئية المائية والتي تتأثّر بشدّة بالإشعاع فوق البنفسجي ، وذلك لأن الإشعاع فوق البنفسجيُ يمتص من قبل بضعة طبقات من الخلايا فقط .

تأثير الأشعة فوق البنفسجية على ظاهرة الاحتباس الحراري:

يعتبر خرق أو استنزاف طبقة الأوزون وبالتالي وصول الأشعة الشمسية فوق البنفسجية إلى سطح الأرض أحد أسباب ظاهرة الاحتباس الحراري (ظاهرة ارتفاع درجة حرارة الأرض)، حيث إن استنزاف الأوزون وتغير المناخ ظاهرتان مترابطتان تؤثر كل منهما على الأخرى.

وتشير بعض الدراسات إلى أضرار أخرى قد تتسبب بها الأشعة فوق البنفسجية كتأثيرها على العمر الاستثماري لبعض المواد المخلقة صناعياً.

الإجراءات العالمية المتبعة لتخفيف هذه الظاهرة:

جرى منع استخدام الصولات الهوائية كدوافع في مرشّات البخّ في أمريكا، وكندا، والسويد في عام 1978. إلا أن إنتاج العالم من هذه المواد استمر في العديد من البلدان الأخرى فترة طويلة بعد عمليات المنع تلك، إلا أن ازدياد المخاوف العالمية حول استنزاف

أوزون طبقة الستراتوسفير العليا قاد إلى التصديق على اتفاقية مونتريال Montreal Protocol في خريف العام 1987 والقاضي بحظر المواد التي تستنفذ طبقة الأوزون، وذلك استناداً إلى مفاوضات سابقة بدأت بين البلدان الإسكندنافية الأوروبية والولايات المتّحدة الأمريكية حول استخدام مركبات الكلوروفلوروكربون في مرشّات البخّ. مرت اتفاقية مونتريال بسلسلة من التنقيحات (كلّ تنقيح سمّي على اسم المدينة التي اجتمعت فيها لجنة التنقيح)، وكان أهمها التنقيح الذي حصل في كوبنهاغن في تشرين الثّاني عام 1992 ، ووقّع من أكثر من 100 دولة تمثّل باستهلاكها لمركبات الكلوروفلوروكربون 95% من استهلاك العالم من هذه المواد. وقد جرت المقاطعة التجارية لمركبات الكلوروفلوروكربون، وتشجيع استخدام هالوكربونات أخرى أقل ضرراً بطبقة الأوزون.

تؤكّد الملاحظات الأولى لقمر ناسا الصناعي تحسّن طبقة أوزون، حيث تناقصت نسبة استنزاف الأوزون في طبقات الجوّ العليا، مما يشير إلى الخطوات الأولى في تحسن طبقة الأوزون. وقد اكتشف علماء ناسا حدوث انخفاض استنزاف الأوزون في طبقة الستراتوسفير العليا بعد انخفاض استخدام المواد المسببة لهذه الظاهرة. نشرت هذه النتائج في المجلة الأمريكية المعروفة The American Geophysical Union Journal of Geophysical Research، وقد جرى دعم النتائج السابقة بوسائل القياس الأرضية.

تعتبر مشكلة استنزاف الأوزون مشكلة عكوسة، وتظهر إنجازات بروتوكول مونتريال تحسّناً في طبقة الأوزون، ويتوقّع بأنّ الإشارات الأولى لتحسّن الأوزون ستلاحظ في العشر إلى الخمس عشرة سنة القادمة، إلا أن التحسّن الكليّ قد يبدأ بالظهور بحلول العام 2050 ، لكنه يمكن أن يكتمل في العام 2100.

ظاهرة الأمطار الحامضية

لا يمكن لأحد أن يقلل اليوم من أهمية المشاكل الايكولوجية التي يعاني منها نظامنا الحيوي، ابتداءً من التلوث المباشر لعناصر البيئة المختلفة (الماء والهواء والتربة)، إلى الخرق في طبقة الأوزون، وانحسار الغابات، وظاهرة التصحر....الخ. وتعتبر مشكلة الأمطار الحامضية التي وصفها أحد علماء البيئة بأنها كارثة تسير ببطء وتدمر النباتات، والبحيرات، والأنهار، وأوساطها الحيوية، كما تسبب الاهتراءات في المنشآت الحجرية، والمعدنية. وقد أشار الكيميائي البريطاني روبرت سميث ولأول مرة عام 1872 إلى حموضة الأمطار التي هطلت في ذلك العام على مدينة مانشستر، وعزا السبب إلى الدخان المتصاعد من مداخن المصانع. وقد لاحظ العالم السويدي سفانت اودين في عام 1967 تزايد حموضة الأمطار الحامضية الهاطلة في السويد مع مرور الزمن، وأطلق على ظاهرة الأمطار الحامضية تسمية "حرب الانسان الكيميائية في الطبيعة".

تتشكل الأمطار الحامضية من تفاعل الغازات الناتجة عن محطات توليد الكهرباء والمراكز الصناعية الضخمة، والحاوية على أكاسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين مع الأوكسجين وبخار الماء في الجو. يتحد ثاني أوكسيد الكبريت مع أوكسجين الهواء بوجود الأشعة فوق البنفسجية منتجاً ثالث أوكسيد الكبريت الذي يتحد بعد ذلك مع بخار الماء الجوي معطياً حمض الكبريت. وقد يتحد حمض الكبريت مع بعض الغازات في الهواء مثل النشادر منتجاً كبريتات النشادر. وبنفس الطريقة تتحول أكاسيد النيتروجين بوجود الأوكسجين والأشعة فوق البنفسجية إلى حمض الآزوت.

ونبين فيما يأتي التفاعلات الكيميائية الجارية :

- تشكل أكاسيد الكبريت SO_2 وأكاسيد الآزوت (NO & NO_x) :

$$S(\text{in fuel}) + O_2 \rightarrow SO_2$$
$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$
$$NO + 0.5O_2 \rightarrow NO_2$$

- تشكل بيروكسيد الهيدروجين:

$$VOC + \text{sunlight} + HO_2\ (\text{in air}) \rightarrow H_2O_2$$

حيث VOC = Volatile Organic Compound – المركبات العضوية الطيارة.

- تشكل الأحماض:

$$SO_2 + H_2O_2 \text{ and } O_3\ (\text{in clouds}) \rightarrow H_2SO_4$$
$$SO_2 + OH + O_2\ (\text{in air}) \rightarrow H_2SO_4$$
$$SO_2 + \text{Oxidants (from wet surfaces)} \rightarrow H_2SO_4$$
$$NO_x + \text{sunlight} + OH\,(\text{air}) \rightarrow HNO_3$$

يبقى رذاذ حمض الكبريت وحمض الآزوت، وكذلك دقائق كبريتات النشادر معلقة في الهواء الساكن على شكل ضباب خفيف (هيدروصول) ينتقل مع التيارات الهوائية عندما يكون الجو جافاً، ولا توجد إمكانية لسقوط الأمطار . تذوب الملوثات السابقة في مياه الأمطار عندما تصبح الظروف مناسبة لتشكلها لتسقط على شكل أمطار حامضية.

إن إمكانية انتقال التلوث الدقائقي السابق مع التيارات الهوائية يجعل تأثيرها غير مقتصر على البلد الصناعي المنتج لملوثات الهواء، إنما يمكن أن ينتقل تبعاً لحركة الرياح والظروف المناخية المحيطة إلى البلدان المجاورة أو إلى بلدان أخرى بعيدة.

وقد وصلت حموضة مياه الأمطار في بعض مناطق العالم درجات متدنية جداً ، فقد وصلت في بريطانيا إلى 4.5 درجة في عام 1979، بينما وصلت في كندا إلى 3.8 وفي فرجينيا إلى 1.5 في العام نفسه. وتجدر الإشارة إلى أن درجة حموضة مياه المطر النقي هي بين 5.5 – 6 ؛ أي تميل قليلاً إلى الحموضة دون أن يكون لهذه الحموضة الخفيفة أية آثار سلبية. وتشير الدراسات العلمية إلى أن حموضة مياه الأمطار تزداد بشكل مستمر مع الزمن نتيجة زيادة معدلات تلوث الهواء في مختلف البلدان الصناعية

بالأكاسيد السابقة؛ فمثلاً إن حموضة مياه الأمطار التي سقطت فوق السويد عام 1982 كانت أعلى بعشر مرات من حموضة مياه الأمطار التي سقطت عام 1969.

وقد وافق الكونغرس الأمريكي في العام 1990على برنامج المطر الحامضيAcid Rain Program الذي يرمي للحصول على بيئة مرضية من خلال تخفيض إصدارات غاز ثاني أوكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين والتي تعتبر السبب الأساسي في ظاهرة الأمطار الحامضية. يقوم البرنامج على استخدام وجهات النظر التقليدية والخلاقة في عمليات السيطرة على تلوث الهواء وذلك من خلال وضع حدود للإصدارات الغازية المنطلقة إلى الهواء الخارجي من عدد كبير من محطات الطاقة المزمع إنشاؤها بما يسمح بتخفيض الإصدارات السابقة وبتحسين مردود الطاقة وبحماية البيئة المحيطة من التلوث.

لحل مشكلة الأمطار الحامضية يحتاج الإنسان لفهم آلية اتلاف الأمطار الحامضية للبيئة ، وكذلك التغيرات التي يمكن أن تطرأ على مصادر تلوث الهواء والتي تسبب هذه الظاهرة. يساعد هذا الفهم أصحاب القرار في اتخاذ القرارات الأفضل لضبط تلوث الهواء وبالتالي لتخفيض أو حتى القضاء على ظاهرة الأمطار الحامضية، وذلك لوجود العديد من الحلول لهذه المشكلة ، أي يمكن لأصحاب القرار انتقاء أفضل الخيارات المطروحة لحل المشكلة أو المزج بين عدة حلول للوصول إلى الحل الأمثل في درء خطر تلوث البيئة المحيطة من هذه الظاهرة.

لفهم أسباب ظاهرة الأمطار الحامضية وآثارها وتعقب التغييرات في البيئة المحيطة الناجمة عنها تقوم هيئات حماية البيئة الحكومية إضافةً إلى الحكومات والجامعات بدراسة مشاكل التحميض التي تسببها هذه الظاهرة ، حيث تقوم الهيئات السابقة بجمع عينات الهواء والماء من مختلف أجزاء الوسط الحيوي لتحليل خصائصها المختلفة وخصوصاً قيمة pH الوسط والتركيب الكيميائي، وتبحث في تأثيرات الأمطار الحامضية على البيئة الحيوية بشكل عام والأوساط المائية والغابات والترب والمواد الإنشائية كالرخام والبرونز والنحاس وغيرها.

الآثار التخريبية للأمطار الحامضية على البيئة المحيطة:

ظهرت التأثيرات الايكولوجية للأمطار الحامضية جلية على مياه البحيرات، والجداول، والأحياء المائية فيها، والنباتات المحيطة بها، وكذلك على الأبنية الأثرية، والتماثيل، والمنحوتات، وغيرها. ونبين فيما يأتي بعض الآثار التخريبية لهذه الأمطار:

- **أثر المطر الحامضي على النظام البيئي:**

تؤثر عملية التفكيك الحمضي عميقاً في نسيج النظام البيئي (Ecosystem) مؤثرةً على كيمياء الترب وعلى الأوساط المائية ، ومضيقةً في بعض الأحيان الوسط الذي تستطيع النباتات والحيوانات البقاء فيه، وذلك نظراً للعدد الكبير من التغيرات التي قد تأخذ عدة سنوات ليتم خلالها تعافي الأنظمة البيئية، ولتعود هذه الأنظمة إلى حالتها الطبيعية بعد المطر الحامضي، وحتى بعد تخفيض الإصدارات الغازية الضارة ، وتخفيض قيمة pH الوسط.

تملك المياه قابلية محدودة لتعديل المركبات الحامضية تسمى سعة التعديل (Buffering Capacity)، وتصبح البحيرات والجداول حامضية عند عدم قدرة مياه المجمعات المائية السابقة مع الترب المحيطة بها على تعديل حموضة المطر الحامضي بشكل كاف يحمي النظام البيئي من الآثار السلبية لهذا المطر. تقوم الأمطار الحامضية في المناطق التي تكون فيها سعة تعديل الترب منخفضة بتحرير الألمنيوم من هذه الترب أثناء سقوطها عليها، وتنقله معها إلى البحيرات والجداول. يعتبر الألمنيوم مركب عالي السمية للكثير من الأحياء المائية الدقيقة.

تملك الأمطار الحامضية عدداً كبيراً من التأثيرات البيئية التي قد تؤذي ، أو تقتل الأسماك، أو قد تخفض عددها ، أو تخفض وزنها، فحالما تنخفض قيمة pH الجداول والبحيرات يرتفع مستوى الألمنيوم فيها ، وكلا المؤشرين يعتبر سام للكائنات الحية وخصوصاً الأسماك. يمكن للمؤشرين السابقين ألا يقتلا الأسماك إنما قد يسببا إجهاداً مزمناً لها يخفض قدرتها على المنافسة في الغذاء والتأقلم.

يمكن تصنيف الأوساط المائية من نباتات وأحياء مائية تبعاً لحساسيتها للحموضة، وتعتبر صغار الأنواع الحية أكثر حساسية للحموضة من بالغيها، فأغلب بيوض الأسماك لا تفقس عندما ينخفض pH الوسط المائي إلى ما دون 5 ، ويموت السمك البالغ في المستويات الأخفض. تعتبر الضفادع أكثر تحملاً للحموضة من الأسماك لذلك فإن غيابها هو مؤشر لموت كامل تقريباً للأسماك،

إلا أن ذلك قد لا يبدو صحيحاً في بعض الأحيان، فمثلاً على الرغم من أن الضفادع تتحمل مستوىً عال من الحموضة ، لكنها إذا كانت تعتمد في غذائها على إحدى الحشرات التي تتأثر بالحموضة فإن الضفادع تتأثر لغياب مصدر التغذية الخاص بها. فالنباتات والحيوانات تعيش في نظام بيئي متشابك جداً ، لذلك فإن أي تغير في قيمة pH الوسط أو مستوى الألمنيوم سوف يؤثر على الجميع عند تأثيره على إحدى حلقات النظام البيئي المترابطة.

- **أثر المطر الحامضي على المجمعات المائية السطحية كالبحيرات والجداول:**

أشارت الدراسات العلمية إلى أن 15 ألف بحيرة من أصل 18 ألف بحيرة موجودة في العالم قد تأثرت بالأمطار الحامضية. وتدل الاحصائيات إلى أن عدد البحيرات التي كانت حموضتها أقل من 5 درجات في الولايات المتحدة الأمريكية في النصف الأول من القرن السابق كانت 8 بحيرات فقط لتصبح في نهاية القرن السابق 109 بحيرة، كما أحصيت أكثر من ألفي بحيرة في منطقة اونتاريو في كندا ذات حموضة لمياهها تقل من 5 درجات، وفي السويد اكثر من 20% من البحيرات تعاني من ارتفاع حموضة مياهها، مما يسبب الخلل البيئي والحيوي لهذه الأوساط، فتموت بذلك الكائنات الحية التي تعيش في هذه البحيرات وخاصة الاسماك والضفادع وتنخفض إمكانية التنقية الذاتية لهذه الأوساط فينتج عن ذلك ضرراً وآثاراً بيئيةً سلبيةً قد يكون البعض منها غير عكوس.

جرى في الولايات المتحدة الأمريكية مسح أكثر من 1000 بحيرة ذات مساحة كبيرة وآلاف الأميال من الجداول، وقد لوحظ أن المطر الحامضي سبب الحموضة لأكثر من 75% من هذه البحيرات وأكثر من 30% من هذه الجداول، كما لوحظ وجود عدة مناطق في الولايات الشمالية الشرقية حساسة للحموضة، حيث كانت سعة التعديل للترب سيئة جداً، وقد وصلت ، على سبيل المثال، نسبة الجداول الحامضية في نيوجيرسي 90% من العدد الكلي للجداول. وتجدر الإشارة إلى أن نسبة حموضة البحيرات الصغيرة أكبر منها للبحيرات الكبيرة.

وتجدر الإشارة إلى أن الحموضة الشديدة المؤقتة للجداول والبحيرات خلال بعض فترات السنة تسبب أيضاً موت الأسماك والأحياء المائية في هذه الأوساط.

- **أثر المطر الحامضي على الغابات والنباتات :**

لاحظ العلماء وحراس الغابات النمو البطيء لبعض الغابات ولأوراقها التي تضاءلت وسقطت بشكل مبكر قبل أوانها في وقت يجب أن تكون فيه خضراء، وماتت بعض الأشجار بدون سبب واضح في بعض الحالات. وبعد دراسات بحثية طويلة توصل الباحثون إلى أن الأمطار الحامضية هي أحد أسباب النمو البطيء وحتى موت الغابات وتدهور حالة الترب. ويبدو تأثير الأمطار الحامضية جلياً بوجود بعض المشاكل الطبيعية والبيئية الأخرى كتلوث الهواء والجفاف والطقس البارد جداً وتكاثر بعض الحشرات ...الخ.

تقوم الأمطار الحامضية بتدمير الغابات الحرجية والنباتات الاقتصادية ذات المحاصيل الموسمية وكذلك الغابات الصنوبرية، حيث أنها تجرد الأشجار من أوراقها، وتحدث خللاً كبيراً في التوازن الشاردي في التربة، كما تحدث اضطراباً في قدرة الجذور على امتصاص العناصر الغذائية الضرورية للنبات، وبالتالي تؤثر على أحد أهم مصادر المادة العضوية على سطح الأرض، وأحد أهم أركان استقرار النظام البيئي، حيث تشير الدراسات إلى أن غابات الحور المزروعة في واحد كم^2 تطلق حوالي 1300 طن من الأوكسجين، وتمتص نحو 1640 طن من ثاني أوكسيد الكربون خلال فصل النمو الواحد، إضافةً إلى أهمية الأشجار في صناعة الأخشاب حيث أن كمية الأخشاب التي يستعملها الإنسان في العالم تزيد عن 2.4 مليار طن سنوياً. كما تسبب الأمطار الحامضية الخسائر للمحاصيل الزراعية.وتشير التقارير إلى أن 14% من جميع أراضي الأحراج الأوروبية قد أصابها الضرر نتيجة الأمطار الحامضية، وأن معظم الغابات في شرقي الولايات المتحدة الاميركية تتأثر بالأمطار الحامضية ، لدرجة أنه أطلق على هذه الظاهرة اسم "موت الغابة".

لا تقوم الأمطار الحامضية بقتل الأشجار بشكل مباشر ، إنما تقوم بإتلاف أوراقها وخفض كمية المواد الغذائية المتوفرة للأشجار، أو تعريضها بشكل بطيء للمواد السامة المغسولة من الترب. فمن المعروف أن الأمطار الحامضية تحل المواد الغذائية والمعادن المساعدة الموجودة في تربة الغابات ، والتي تغسل مع حركة المياه قبل أن تستفيد الأشجار والنباتات الأخرى منها. إن

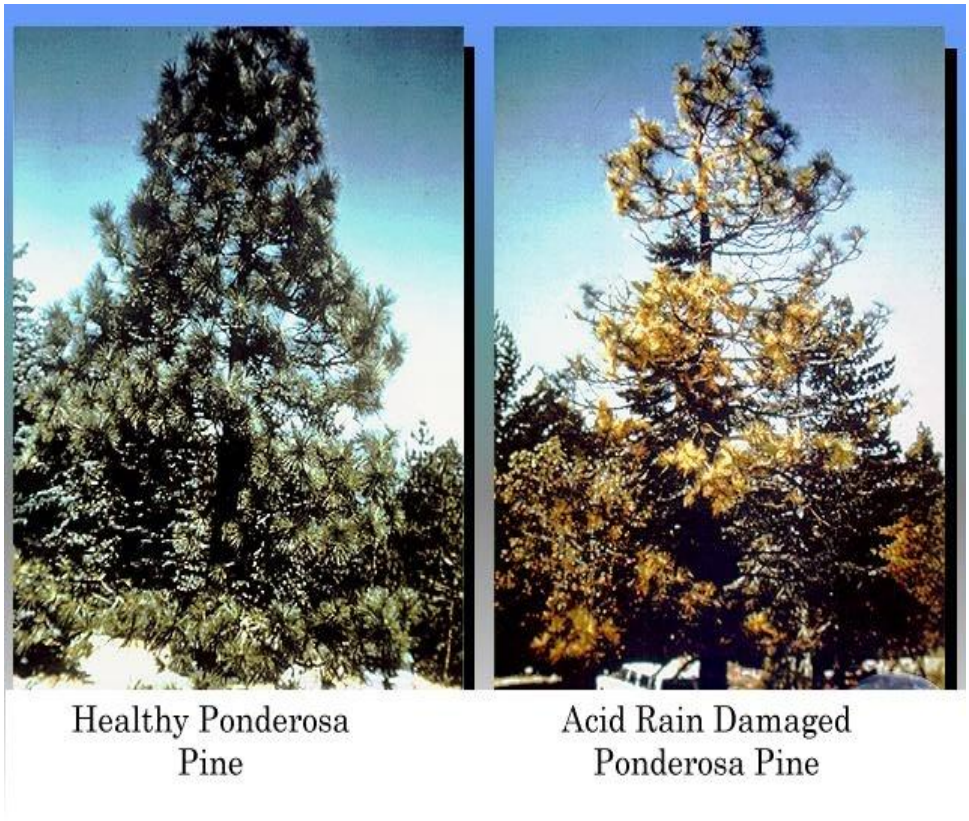
تعرّض أوراق النباتات للهواء الملوث بـ SO_2 لفترة طويلة يجعلها هشة وبلا لون، وهذا بسبب الحلمهة الحامضية لأواصر الكربون– الأوكسجين– الكربون في السيليلوز.

وفي نفس الوقت تسبب الأمطار الحامضية تحرر بعض السميات التي تتأثر بها الأشجار كالألمنيوم، عن طريق نقلها إلى التربة. ويعتقد العلماء أن خسارة المواد الغذائية وزيادة تركيز الألمنيوم السام هي الخطر الأكبر على الأشجار. تغسل المواد السابقة في حركة العواصف المطرية لتنتقل إلى الجداول والأنهار والبحيرات. تكون كمية المواد السامة أكبر عندما تكون العواصف المطرية أكثر حامضية.

يمكن أن تتأثر الأشجار بالأمطار الحامضية حتى في الحالات التي تكون فيها قدرة التعديل للترب عالية جداً، حيث يمكن أن تتأثر الأوراق بالضباب الحامضي المحيط بها لتخلصها من موادها المغذية، وبنفس الطريقة يمكن أن تتأثر النباتات الأخرى بالأمطار الحامضية.

ويذكر بأن أكثر الأشجار تأثراً بالأمطار الحامضية هي الصنوبريات نظرا لسقوط أوراقها قبل الأوان مما يفقد الأخشاب جودتها، ويلحق الضرر بالاقتصاد العالمي.

يقوم المزارعون عموماً بإضافة السماد لتعويض المواد المغذية المفقودة ، وينصح المزارعون بإضافة حجر الكلس لرفع قددرة التعديل للترب ضد الحموضة.



تأثر الأشجار بفعل الأمطار الحامضية.

- **أثر المطر الحامضي على الترب والمواد :**

تؤثر الأمطار الحامضية على الوسط الحيوي للتربة وخصوصاً الترب الحساسة للحموضة، فتحد من نشاط الكثير من البكتيريا المفيدة كالبكتريا المثبتة للنيتروجين، كما تخفض قدرة البكتريا الهوائية على تفكيك المادة العضوية مما يؤثر في النهاية على قدرة الإنبات لهذه التربة. تبين تقارير الأمم المتحدة للبيئة إلى تأثر التربة في العديد من مناطق اوروبا بالحموضة بفعل الأمطار الحامضية.

وقد تأثرت مواقع ومنشآت تاريخية قديمة في أوروبا بفعل الأمطار الحامضية وخصوصاً تلك الصروح التي صنعت من الرخام أو النحاس ، حيث يغير التفاعل الكيميائي بين حامض السولفوريك الموجود في المطر الحامضي وبين الرخام من مواصفات الأخير محولاً إياه إلى مادة قابلة للانهيار بسهولة يطلق عليها اسم plaster، كما أنه يسرع اهتراء المواد الإنشائية مثل الدولوميت؛

والحجر الكلسي؛ والدهان؛ وطلاء السيارات، ويؤثر على الأبنية الأثرية، والتماثيل، والمنحوتات، ويساهم المطر الحامضي في توسيخ المنشآت الهندسية ورفع كلف صيانتها. وكذلك تتآكل المواد النحاسية نتيجة تفاعلها مع المواد الموجودة في المطر الحامضي كما حدث للوحات النحاسية من تمثال الحرية في الولايات المتحدة الأمريكية. ويسبب المطر الحامضي تأكسد المعادن الأخرى أيضاً كالحديد على سبيل المثال:

$$Fe(s) + SO_2(g) + O_2(g) = FeSO_4(s)$$
$$Fe(s) + H_2SO_4(aq) = FeSO_4(aq) + H_2(g)$$

يزداد التآكل المعدني عند تشكل محاليل الحديد (II) والكبريتات (VI) لأنه يمكن للمحاليل أن تعمل كالالكتروليت (المحلول الكهربائي) بين معدنين مما يشكل خلية الكتروكيميائية.

ونبين في الأشكال (2، 3 ،4) بعض التماثيل الحجرية في أوربا التي تآكلت بفعل الأمطار الحامضية.

الشكل (2): أحد التماثيل الحجرية في أوربا وقد تآكل بفعل الأمطار الحامضية.

الشكل (3): أحد التماثيل في أوربا وقد تآكل بفعل الأمطار الحامضية.

- **أثر المطر الحامضي على الصحة البشرية :**

إن مذاق ومنظر الأمطار الحامضية شبيه بالمطر النظيف، ولا يوجد تأثير مباشر للمطر الحامضي على الإنسان خلال مشيه في المطر أو سباحته في البحيرات الحامضية. وتتأثر صحة الإنسان بالملوثات المسببة للأمطار الحامضية ، حيث يمكن لهذه الغازات أن تتفاعل في الجو لتشكل دقائق معلقة تنتقل مع التيارات الهوائية لمسافات بعيدة ويستنشقها الإنسان. وقد أشارت بعض الدراسات العلمية إلى العلاقة بين الجزيئات المعلقة السابقة واضطرابات الرئة كالربو والتهاب القصبات الهوائية. وتؤثر الأمطار الحامضية على شفافية الهواء وخصوصاً في المناطق السياحية كالحدائق العامة والمناطق الجبلية ومناطق الشلالات.

ويعتبر النيتروجين عاملاً هاماً في نضوب الأوكسجين من الأجسام المائية مسبباً تزهر البحيرات، وتدهور صحة الأسماك، وخسارة أسرة الأعشاب البحرية المائية، والشقوق المرجانية، إضافةً إلى التغيرات البيئية في شبكة الغذاء. كل ذلك يؤثر في توافر المأكولات البحرية ويسبب خطورة على الصحة البشرية من تناول الأسماك الملوثة.

الشكل (4): أحد التماثيل الحجرية في أوربا وقد تآكل بفعل الأمطار الحامضية.

طرائق تخفيف ظاهرة الأمطار الحامضية:

هنالك عدة طرائق لتخفيف ظاهرة الأمطار الحامضية أكثرها انتشاراً تلك المسماة الهدم الحمضي والتي تنطلق من إجراءات اجتماعية إلى تصرفات مؤسساتية وفردية، حيث يمكن للحميع أن يشارك في الجهود المبذولة للمساعدة في عمليات الهدم الحمضي .تعتبر هذه الطريقة مناسبة لكافة أنحاء العالم وتقوم بالمحافظة على سلامة البيئة الطبيعية وتخفيف الأضرار الملحقة بالوسط الحيوي. ونعرض فيما يأتي لبعض إجراءات وطرائق تخفيف ظاهرة الأمطار الحامضية:

A. تخفيض تلوث الهواء بفعل الغازات الصادرة عن العوادم والمداخن:

إن أغلب محطات إنتاج الطاقة في العالم تعمل على حرق الوقود مثل الفحم والغاز الطبيعي والنفط . إن الملوثان الصادران عن عمليات حرق الوقود يعتبران السبب الأساسي لظاهرة المطر الحامضي. يصدر الفحم غاز SO_2 ونسبة كبيرة من إصدارات NO_x . يتواجد الكبريت في الفحم كشائبة، ويتفاعل مع أوكسجين الهواء عند الاحتراق لإنتاج SO_2 ، بينما يتشكل NO_x لدى حرق أي نوع من الوقود .

هناك عدة أساليب لخفض إصدارات SO_2 إلى الهواء الخارجي باستخدام الفحم غير الحاوي على الكبريت وذلك بغسل الفحم ، أو استخدام وسائل معالجة الهواء بالطرائق الكيميائية لإزالة ثاني أوكسيد الكبريت من الغازات المنطلقة من المداخن. يمكن بالنسبة لمحطات إنتاج الطاقة تغيير نوع الوقود ، فمثلاً استخدام الغاز الطبيعي الذي يعطي كميات من غاز SO_2 أقل بكثير من تلك المنطلقة من الفحم المحترق، أو بناء محطات إنتاج الطاقة التي تستخدم تكنولوجيات نظيفة لا يتم فيها حرق الوقود.

تحقق بعض اقتراحات تخفيض كمية غاز SO_2 فوائد بيئية أخرى كتخفيض كمية الزئبق وثاني أوكسيد الكربون المنطلقة مع الغازات، وهذا ما يجب أخذه بعين الاعتبار لدى دراسة استراتيجيات تخفيض تلوث الهواء.

لكل من الطرائق السابقة تكاليفه وفوائده ولا وجود لحل وحيد شامل، أي لا بد من دمج أكثر من طريقة في سبيل حل هذه المشكلة.

وقد وضعت قيود شديدة على عوادم السيارات بحيث تسمح بخفض اصدارات NO_x منها. وتتواصل الدراسات العالمية في الوقت الحاضر للانتقال إلى وقود نظيف لبيئة نظيفة. وكذلك بشكل مشابه لمحطات إنتاج الطاقة يمكن استخدام المحولات الحفازة التي تخفض اصدارات NO_x من عوادم السيارات، إلا أن محولات مشابهة قد تحتاج لأكثر من عشرين سنة حتى تجد طريقها إلى أسواق الولايات المتحدة الأمريكية.

وتعتبر الإصدارات الغازية الملوثة إحدى أكبر المصادر المعروفة حتى الآن لظاهرة الأمطار الحامضية، مما يفرض علينا البدء بمعالجة المشكلة من ضرورة الحد من تلوث الهواء بهذه الإصدارات . وقد قامت وكالة حماية البيئة الأمريكية EPA باتخاذ خطوات هامة لتخفيض كمية SO_2 و NO_x المنطلقة إلى الهواء الخارجي والمساهمة بشكل رئيسي في ظاهرة الأمطار الحامضية .

B. استخدام مصادر الطاقة البديلة:

جرى في الكثير من دول العالم التحول في إنتاج الطاقة إلى أساليب أخرى كالمحطات النووية، والمحطات الكهرومائية، والمحطات التي تستخدم طاقة الرياح، والمحطات التي تستخدم حرارة جوف الأرض في توليد الكهرباء، إضافةً إلى الطاقة الشمسية وغيرها.

إن المحطات النووية، والمحطات الكهرومائية مستخدمة على نطاق واسع في العالم، بينما لا تعتبر المحطات التي تستخدم طاقة الرياح، والمحطات التي تستخدم الطاقة الشمسية، والمحطات التي تستخدم حرارة جوف الأرض في توليد الكهرباء، بدائل عملية اقتصادية لتوليد الطاقة.

هنالك طاقات بديلة أخرى أيضاً مثل الغاز الطبيعي ، والمدخرات ، وخلايا الوقود وهي متوفرة لتشغيل السيارات.

إن جميع مصادر الطاقة تملك تكاليف بيئية مختلفة ، فبعض منها يعتبر غالياً جداً في إنتاج الطاقة مقارنةً مع المصادر الأخرى ، ولا يمكن للكثير من المؤسسات تحمل هذه التكاليف. وتعتبر محطات الطاقة النووية ومحطات الطاقة الكهرومائية والمحطات التي تستخدم الفحم في إنتاج الطاقة من أرخص وسائل الحصول على الكهرباء حتى اليوم، إلا أن التقدم في التكنولوجيات والتطور العلمي قد يغير ذلك في المستقبل.

C. المبادرات الفردية والاجتماعية:

إن المشكلة تبدو وكأن فرداً واحداً لا يمكنه أن يقوم بأي عمل لإيقاف أثر الأمطار الحامضية، إلا أنه كما العديد من المشاكل البيئية فإن الأمطار الحامضية حدثت نتيجةً لتراكم أفعال أعداد كبيرة جداً من الأشخاص الفرديين ، لذا فإن كل فرد يمكنه أن يخفض إنتشار المشكلة ويصبح جزءً من حلها بشكل مباشر ، كأن يقوم بتوفير الطاقة ، حيث أن النصيب الأكبر من الإصدارات الغازية إلى الغلاف الجوي والمسببة للأمطار الحامضية تأتي من محطات توليد الطاقة .

D. إصلاح التلف البيئي:

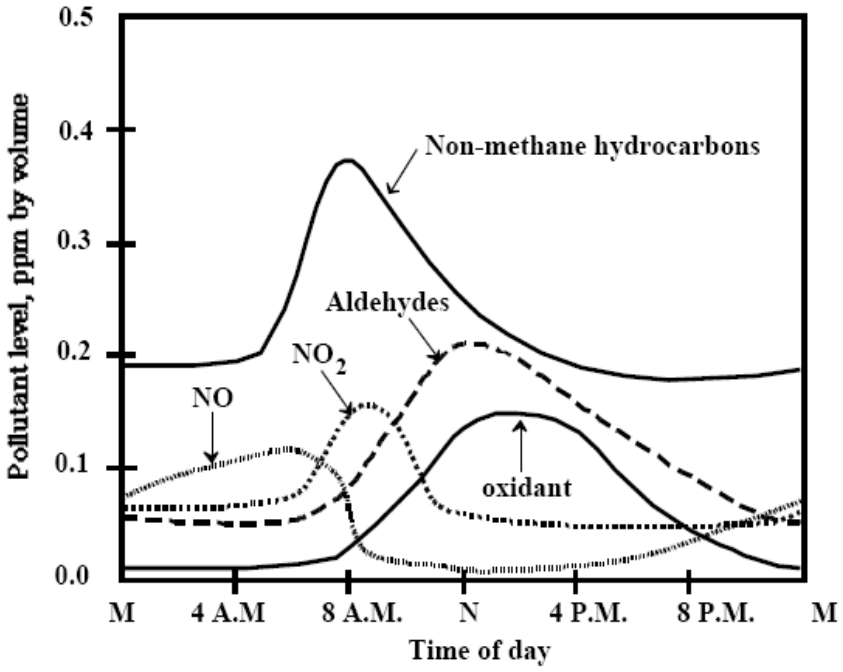
تحتاج البحيرات، والجداول، والغابات، والترب التي تعرضت للمطر الحامضي إلى فترات طويلة جداً لتتعافى. تختلف هذه الفترة الزمنية تبعاً لنوع الضرر المعالج وللوسط المتضرر، فمثلاً قد تتحسن الرؤية خلال أيام ، بينما قد يحتاج التغير الكيميائي في

مسيل مائي إلى عدة شهور ، وقد يحتاج الوسط الحيوي للمسطحات المائية وللغابات والترب إلى عدة سنوات وحتى عدة عقود للتعافي.

هنالك عدة إجراءات قد تتخذ من قبل السكان لإحياء البحيرات والمسيلات بسرعة، فيمكن للسكان على سبيل المثال استخدام عملية التجيير (Liming)، أي إضافة الحجر الكلسي أو الكلس وهو مركب قاعدي طبيعي يساعد البحيرات التي تعاني من الحموضة من تعديل هذه الحموضة. وقد استخدمت عملية التجيير هذه في السويد والنرويج على نطاق واسع في إحياء بعض البحيرات والمسيلات المائية. ولم تستخدم الطريقة السابقة في الولايات المتحدة الأمريكية نظراً لارتفاع تكاليفها ونظراً لكون التجيير طريقة علاجية قصيرة الأمد لاتمنع حدوث الظاهرة، أي لا تحل المشاكل الأوسع لظاهرة الأمطار الحامضية كالتغير الكيميائي للترب والتدهور في صحة الأشجار ...الخ، إنما يمكن بهذه الطريقة المحافظة على حياة الأسماك في البحيرات والمحافظة على التواجد البشري المحيط بالبحيرة حتى نقوم بتقليص الاصدارات المسببة لحموضة الأمطار.

الضباب الدخاني

جاءت تسمية الضباب الدخاني Smog من دمج كلمتي دخان Smok وضباب Fog . تشكل مركبات NO, NO2 وبروكسي ايتانول النترات PAN (peroxyethanoyl nitrate) والهيدروكربونات hydrocarbons (RH) ، والأوزون والألديهيدات سحابة فوق المدن تعرف بالضباب الدخاني، ونميز عادةً بين نوعين من الضباب الدخاني تبعاً لزمن حدوثها شتاءً أو صيفاً، وتبعاً للغازات الملوثة، فالضباب الدخاني الذي يحدث شتاءً يسمى بضباب لندن (الضباب الكلاسيكي) نتيجة تزايد تراكيز أكاسيد الكبريت والهيدروكربونات وبخار الماء بوجود أشعة الشمس في حالات سكون الهواء، مما يبقي الخليط الغازي السابق معلقاً في الجو على شكل ضباب، أما النوع الآخر فيسمى ضباب لوس انجلوس (الضباب الكيمياضوئي) ويحدث صيفاً نتيجة تزايد تراكيز أكاسيد النتروجين والهيدروكربونات وبتأثير الأشعة فوق البنفسجية. ويظهر الهواء الملوث بالضباب الدخاني اختلافات مميزة خلال ساعات اليوم لمستويات NO, NO2، والهيدروكربونات، والألديهيدات، والمؤكسدات. وتبين المتابعات الرقمية لتركيز الملوثات أن تركيز NO ينخفض في الهواء لدرجة كبيرة بعد فترة قليلة من شروق الشمس، وتحوله المؤكسدات القوية كالأوزون إلى NO2 وأوكسجين. يترافق نقصان تركيز أوكسيد النتروجين بارتفاع حدي في تركيز NO2 خلال منتصف النهار، وخصوصاً بعد انخفاض تركيز NO إلى المستويات المنخفضة جداً، وتصل تراكيز الألديهيدات والمؤكسدات إلى المستويات العالية نسبياً خلال النهار وبعد فترة قليلة من شروق الشمس، حيث يرتفع تركيز الهيدروكربونات الكلية في ساعات الصباح بشكل حاد، ثم ينقص خلال ساعات النهار المتبقية. ويظهر الشكل (2-6) الرسم البياني العام لتركيز ملوثات الهواء المسؤولة عن تشكيل الدخان الضبابي خلال ساعات اليوم.



الرسم البياني العام لتركيز ملوثات الهواء المسؤولة عن تشكيل الدخان الضبابي خلال ساعات اليوم.