

الأثر البيئي لاستهلاك الطاقة

ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY CONSUMPTION

(٥, ٠) خلفية تاريخية

Historical Perspective

تُعرّف الطاقة على أنها القدرة على بذل الشغل ، وتُعرّف البيئة على أنها المادة والوسط الحضاري المحيط بنا. وازداد الاهتمام العام منذ ستينيات القرن العشرين بأزمة الطاقة والبيئة بشكل سريع بناءً على القناعة بأن الاستغلال المفرط للطاقة من قبل مجتمع غني سيؤدي إلى تدهور شديد في البيئة المحلية والعالمية. وثار جدل كثير حول ما إذا كان هناك تعارض بين الطاقة والبيئة وما إذا كانت هناك أزمة بالفعل. لقد أصبح المنظور العالمي للقضية جلياً نتيجة الاهتمام العالمي بالتغيرات في الظواهر الجوية وتأثيرها على المناخ العالمي بسبب انبعاث ثاني أكسيد الكربون من احتراق الوقود الأحفوري. أما المنظور المحلي فقد كان ولا يزال يتجلى في كل مكان من العالم على شكل قلق على المستوى القومي وعلى مستوى المناطق بسبب انبعاث الملوثات بكميات كبيرة في أجواء المدن الكبرى من محطات توليد القدرة الكهربائية ومن عوادم السيارات.

وأدى الوعي القومي في الولايات المتحدة إلى إقرار القانون الوطني لحماية البيئة عام ١٩٦٩م الذي تمت المصادقة عليه في ١ يناير ١٩٧٠م ليصبح بذلك أول قانون في

العقد الجديد، تأكيداً على أهمية موازنة النمو الأسّي للحضارة مع أخذ تأثيره على البيئة في الاعتبار. وقد زُعم أنه بإقرار هذا القانون، تم وللمرة الأولى في تاريخ التطور الصناعي أخذ المشكلات الكبرى مثل نمو السكان والتنمية العمرانية واستغلال الموارد والتقنيات المناسبة في الاعتبار في عملية التخطيط القومي. إن الجدل حول ما إذا كان هناك تعارض بين استخدام الطاقة وبين البيئة وما إذا كانت هناك بالفعل أزمة في علاقة الطاقة بالبيئة هو جدل لا يزال مستمراً حتى يومنا هذا.

ومع تزايد الأدلة من جميع أنحاء العالم على التأثيرات السلبية للأمطار الحمضية الناتجة من إنتاج القدرة الكهربائية وعلى التلوث المحلي للهواء من انبعاث الغازات من عوادم السيارات، وعلى إمكانية حدوث تغير في المناخ العالمي من تسارع انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري إلى الأجواء في العالم، فقد قبل العالم عموماً بالفلسفة القائلة بأن الحد من الانبعاثات الملوثة هو هدف مرغوب فيه. وكانت الاستجابة الرسمية قد بدأت عام ١٩٩٢م من خلال مؤتمر الأمم المتحدة التنظيمي حول التغيرات المناخية، وتسارعت الخطوات بتبني بروتوكول كيوتو في طوكيو باليابان عام ١٩٩٧م. لقد أدت العلوم والتقنية والضغط الاجتماعي إلى القيام بأبحاث ضخمة في السنوات الخمسين (أو ما يزيد) الماضية حول ماهية الأثر البيئي وكيفية قياسه وكيفية وضع معايير للسلامة في حالة وجود قيود اقتصادية أو عدمها في الوقت الذي يستمر فيه الإنسان في التنمية الصناعية.

(٥,١) مبادئ الأثر البيئي

Basics of Environmental Impact

يقصد بمفهوم الأثر البيئي أن هناك تهديداً ضاراً للبيئة بسبب بعض الأنشطة الإنسانية التي يهدف القيام بها إلى الفائدة الاقتصادية، إذ تؤدي الأنشطة الإنسانية مثل التنمية العمرانية ومنظومات النقل إلى تهديد ضار. وكما أشرنا في المسألة الثانية من

مُسَلِّمات البحث الإنساني عن الطاقة الوفيرة فإن الناس يتطلعون إلى العيش براحة وسهولة في بيئة آمنة مسالمة. إلا أن المشكلة الحقيقية تظهر في كيفية قياس الأهمية المطلقة و/أو النسبية (بطريقة كمية هندسية) للأثر البيئي للأنشطة الإنسانية في ظل وجود عدة خيارات، وكيفية تقييم عواقب كل من هذه الخيارات في معرض التوصل إلى قرار حول اختيار أي منها. تبقى الخيارات في مجال تزويد تجمع سكاني ما بالطاقة الكافية هي نوعية موارد الطاقة الأولية الممكن استخدامها وكمية الطاقة اللازمة من كل مورد لتحقيق مستوى المعيشة المرغوب. لقد تم إحراز تقدم كبير في علم البيئة في السنوات الخمسين الماضية فيما يتعلق بتحديد الأثر البيئي الناتج من كل دورة وقود للطاقة، وقد كان الأمل دائماً هو الوصول إلى خطة مثلى للطاقة لا تقبل الجدل، بحيث تكون هناك كمية كافية من الطاقة لتحقيق المستوى المعيشي المأمول بحد أدنى من الأثر البيئي. إلا أن هناك مع الأسف خلافاً كبيراً حول المعنى الدقيق لكلمة "المثلى" و"الكافية" و"المأمول" و"الحد الأدنى" بالنسبة للأثر البيئي، مما يؤدي إلى عدم توفر طريقة واضحة لاختيار خطة فريدة من نوعها للطاقة.

وللتوصل إلى طريقة هندسية لقياس وتقييم الأثر البيئي، أصبح هناك عاملان ذوا أهمية كبيرة: عامل "الكمية" وعامل "الخطورة". يحاول عامل "الكمية" الإجابة عن السؤال: ما حجم الأثر؟ ويقاس هذا العامل بدلالة الكمية المنبعثة من ملوث معين ومدى الحيز الذي يؤثر فيه (من الحيز المحلي إلى الحيز العالمي) والمدة الزمنية للأثر (من الأثر اللحظي إلى الأثر الذي يستمر إلى ما لا نهاية). أما عامل "الخطورة" فإنه يحاول الإجابة على السؤال: ما مدى خطورة الأثر؟ ويقاس هذا العامل عموماً بدلالة علاقة معينة بالحد الأقصى المسموح به من معيار معين، ويتضمن هذا العامل عدة مفاهيم وهي أعداد الناس المتأثرين ودرجة الضرر المادي ومدى كون الضرر غير قابل للعكس أو كونه قابلاً للإصلاح.

(٥, ١, ١) العلاقة بين "الكمية" و"الخطورة"

Relationship Between Magnitude and Severity

تقييم الأثر البيئي يتطلب علاقة بين عاملي "الكمية" و"الخطورة"، ويفضل أن تكون علاقة ذات شكل مستمر من السبب والنتيجة (cause and effect). تصف هذه العلاقة سلسلة الخطوات في مسألة الأثر كما يأتي :

الانبعاث	←	الأثر	←	التهديد
(فعل)		(الكمية)		(الخطورة)
المتبقي		المتضرر		
فيما يأتي بعض الأمثلة على مكونات هذه السلسلة :				
الانبعاث	الأثر	التهديد	الخطورة	الخطورة
حرق الفحم ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)	كمية الأثر	طبيعة الضرر	الخطورة	الخطورة
الاحتراق	الأطنان	الرئتان	الاختناق	الاختناق
الطاقة النووية	التحللات/ثانية	الغدة الدرقية	السرطان	السرطان
اليود-١٣١ (^{131}I)	الأمطار	خسارة مالية	انهيار المنزل	انهيار المنزل
هبوط المياه	ديسيبل (dB)	الأذنان	فقدان السمع	فقدان السمع
الإزعاج				
التشديد				

(٥, ١, ٢) عواقب التهديد البيئي Consequences of Environmental Threat

عادة ما يكون من الصعب تعريف عواقب التهديد البيئي، فقد تتراوح ما بين الانخفاض التدريجي في جودة [نظافة] البيئة (وهو أمر تصعب ملاحظته أحياناً) وبين الكارثة البيئية (الزوال المحتمل لأجناس مهددة بالانقراض). يتضمن التنوع الكبير في العوامل المؤثرة في مدى الخطورة جوانب مادية (مثل معدل التعرض ومدته)، وجوانب سكانية (مثل عمر الشخص ووظيفته وحالته الصحية العامة). وهناك درجتان مهمتان من الخطورة: الحدود التي تدل على أدنى مستوى من التعرض للملوث ما (المستوى الطبيعي) والحد الأقصى من التعرض (وهي النقطة التي تدخل فيها السمية في الاعتبار). يوجد مستوى طبيعي من التعرض للملوثات في جميع أوجه المجال الحيوي

التي تضيف فيها الأنشطة البيئية عبئاً بيولوجياً، والمقصود هنا الانبعاثات الملوثة التي تحدث في الطبيعة بفعل عمليات جيولوجية دون أي تدخل من البشر، ومن الأمثلة على ذلك ما يأتي:

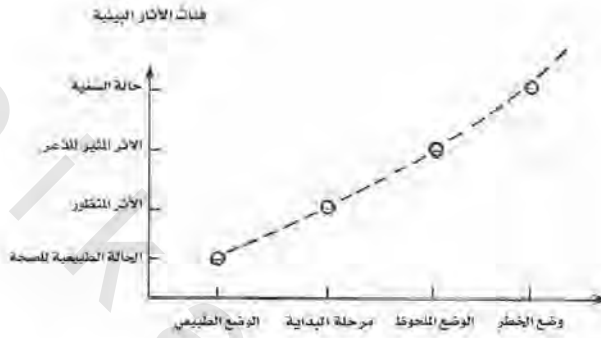
العملية الطبيعية الملوثات المنبعثة

الثورات البركانية ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، بعض الجسيمات حرائق الغابات ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، جسيمات الرماد العواصف الرعدية الأوزون (O_3)، أكسيد النيتروجين (NO_x) الدورة المائية التعرية، حلحلة المعادن (leaching)

تؤدي هذه الانبعاثات إلى وجود حد أدنى دائم من التركيز لكل نوع من الملوثات في البيئة، تتوزع جغرافياً في أماكن وأزمنة مختلفة. يتركز القلق العام بشأن خطورة هذه الانبعاثات حول احتمال حدوث تغيرات دارونية على مدى أزمنة أثروبولوجية، بسبب التعرض طويل المدى للمستويات الطبيعية المتزايدة للملوثات والنتيجة عن إضافات صغيرة ومستمرة من هذه الملوثات.

أما حد السمية فإنه يصبح المصدر الأكبر للقلق في علاقة الكمية بالخطورة عندما يصل أثر السمية إلى درجة من الحدة بحيث يظهر أثر على صحة الإنسان تسهل ملاحظته. تتحول التأثيرات على الأفراد عند الوصول إلى هذه الدرجات إلى إحصاءات سكانية. كما تصبح الآثار على الدورات الطبيعية عند هذا الحد مصدراً للقلق، كما في حالة دورة ثاني أكسيد الكربون، والتي أدت عواقبها المحتملة على التغير المناخي العالمي، بفعل انبعاث ثاني أكسيد الكربون إلى الجو من جراء احتراق الوقود الأحفوري، إلى ازدياد الاهتمام بها على مستوى العالم. ومن خلال البحث عن طرق

كمية لقياس الأثر البيئي وتقييمه، أصبح هناك عدد من فئات العبء البيئي والعواقب البيئية الناتجة عنها، والتي تفيد في تحديد درجات متميزة من مصادر القلق. ويقدم الشكل رقم (٥، ١) نظرة عامة عن هذه الدرجات.



الشكل رقم (٥، ١). العلاقة العامة بين الآثار البيئية والعبء على البيئة.

(٥، ١، ٣) مثال افتراضي لتحليل الكمية والخطورة

A Hypothetical Example of Magnitude-Severity Analysis

أحد أهم الأمثلة على الأثر البيئي التي تمت دراستها بعمق خلال الفترة الأولى من ظهور علم البيئة وهندستها هو مثال مشكلة الأمطار الحمضية الناتجة من انبعاث ثاني أكسيد الكبريت (وثنائي أكسيد النيتروجين) من مداخن محطات توليد الكهرباء التي تحرق الفحم والتي أدت إلى تكوين الحمض الكبريتي (والحمض النيتري) في الجو. يتميز المطر الطبيعي، والذي يحتوي على التركيز المعتاد من حمض الكربونيك (H_2CO_3) الناتج من ثاني أكسيد الكربون الموجود طبيعياً في الجو، برقمه الهيدروجيني (pH) البالغ حوالي ٥,٥. عندما يمتص المطر الطبيعي حمض الكبريتيك (H_2SO_4) (وكذلك حمض النيتريك - HNO_3) يصبح مطراً حمضياً وينخفض رقمه الهيدروجيني إلى

حوالي ٤,٣. يؤدي تساقط المطر الحمضي (والجسيمات الحمضية التي تحملها الرياح) إلى عدد من التأثيرات السيئة من ضمنها حدوث تلف للغابات والترتة وحدث أضرار للحيوانات البرية والبحرية وأضرار للمباني والمنشآت الأخرى ولصحة الإنسان.

نظراً لكم الهائل من الأبحاث المنشورة حول جوانب الكمية والخطورة للأمطار الحمضية فإنه من الصعب تقديم صورة مبسطة عن علاقة السبب والنتيجة. أما معلوماتنا عن مصير عنصر الفلورين فهي قليلة للغاية، فالفلورين موجود في الفحم بتركيز أقل بكثير من تركيز الكبريت. ولكون الفلورين عنصراً شديداً التطاير فإنه ينبعث بشكل أكثر سهولة من المداخل، وهناك عدة درجات من العواقب التي تنتج عن وجود الفلورايد في مياه الشرب وهي معروفة بشكل جيد. لذا فإن هذا المثال الافتراضي يعتبر مثيراً للاهتمام في دراسة علاقة الكمية والخطورة الخاصة بالعبء البيئي الناتج عن انبعاث الفلورايد من الفحم وعلاقة ذلك بالتهديد الذي يشكله تركيز الفلورايد في مياه الشرب.

يوضح الشكل رقم (٥,٢) الميل الخطي الناتج عن الحرق المستمر للفحم بمتوسط تركيز ثابت للفلورايد. ويبين الشكل علاقة كمية الفلورايد المنبعثة (بوحدة كجم لكل طن من الفحم) بكمية الفحم الذي يتم حرقه (بوحدة الطن). يتضح من ذلك أن تركيز الفلورايد في إمدادات مياه الشرب نتيجة لحرق الفحم هو دالة متعددة العوامل في التاريخ المناخي خلال فترة انتقال الفلورايد المنبعث مع الدخان من المدخنة إلى مياه الشرب. يبين الشكل رسماً توضيحياً للكمية المحتملة (تركيز الفلورايد، $[F]$ ، بوحدة ملجم لكل لتر) الناتج من تفاوت مستويات تساقط المطر ومن تركيز الفلورايد في مياه الشرب نتيجة عمليات الخلط التي تتم في المياه.

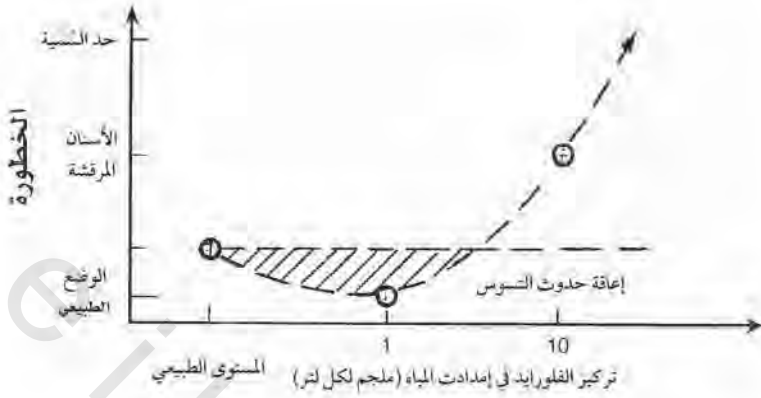
يُعد العبء البيئي من تركيز الفلورايد في إمدادات مياه الشرب الناتج عن إنتاج الكهرباء (من خلال حرق الفحم المحتوي على الفلورايد) دالة في عدد من عمليات بيئية طبيعية (هي في غالبيتها عمليات مناخية وهيدرولوجية) تتضمن ما يأتي :

- ١- مستوى تطاير الفلورايد الموجود في كمية الفحم المستخدمة يومياً في محطات توليد الطاقة والكمية المنبعثة من المداخل بعد عملية التنظيف (scrubbing).
- ٢- اجتراف الفلورايد وترسيبه بعد أي تغيرات كيميائية في الجو بالإضافة إلى تساقط المطر وشدة تساقطه.
- ٣- الخلط الهيدرولوجي لرواسب الفلورايد الجافة أو الناتجة من تساقط المطر مع مياه الشرب.



الشكل رقم (٥,٢). مصدر الفلورايد بعد البعثة من مداخل محطات القدرة التي تستخدم الفحم.

والنتائج الذي نحصل عليه من مخرجات هذه العمليات هو تاريخ زمني لمتوسط تركيز الفلورايد في إمدادات معينة من مياه الشرب. ويوضح الشكل رقم (٥,٣) علاقة الخطورة والكمية. لقد تم اختيار مثال الفلورايد الموجود في الفحم لمغزى أبعد وهو فكرة توضيح ما يمكن تسميته *الفائدة البيئية* من إنتاج الطاقة الكهربائية.



الشكل رقم (٥,٣). علاقة الكمية والخطورة في حالة تركيز الفلورايد في إمدادات مياه الشرب.

يُعد التركيز الطبيعي للفلورايد في مياه الشرب عاملاً محدداً لمدى تأثير الفلورايد الموجود في الماء على الصحة، فالمستوى الطبيعي للفلورايد أقل بكثير من ١ ملجم/لتر. وقد اختارت الكثير من التجمعات السكانية في الولايات المتحدة والعالم أن يضاف الفلورايد إلى إمدادات المياه لإيصال التركيز إلى ١ ملجم/لتر أو أكثر، وذلك لإيصال نسبته في الماء إلى ٤ ملجم/لتر، وهي النسبة التي تسميها وكالة حماية البيئة الأمريكية "درجة تلوث مياه الشرب القصوى المسموح بها"، لأن خبراء طب الأسنان قد برهنوا على أن وجود الفلورايد بهذا التركيز يقلل حدوث تسوس الأسنان عند الأطفال. إلا أنه من المعلوم كذلك أن وجود الفلورايد في الماء بتركيز ١٠ ملجم/لتر تقريباً يمكن أن يؤدي إلى تبدل لون الأسنان (mottled teeth)، وأن الماء يصبح ساماً عندما يزداد تركيز الفلورايد بشكل كبير. وبالرغم من الفوائد الصحية لإضافة الفلورايد، فإن هذه العملية تواجه تحدياً باستمرار. فعلى سبيل المثال، كان أحد العناوين الصحفية عام ١٩٩٩م كما يأتي: "قضية ضد مدينة ماونت فيو (كاليفورنيا) بسبب خطة إضافة

الفلورايد إلى الماء: الدعوى القضائية تهدف إلى منع مشروع معالجة الماء [1]. وبعد أربع سنوات، كان أحد العناوين الصحفية الرئيسة في بالو آلتو (وهي بلدة قريبة من ماونتن فيو) كما يأتي "عريضة تهدف إلى سحب الفلورايد من الماء". في تلك السنة نشرت مجلة أخبار الكيمياء والهندسة [3] ما يأتي "القلق بشأن الفلورايد يظهر مرة أخرى". وهكذا فإن عدم الوضوح بشأن هذا الموضوع لا يزال قائماً.

(٥,٢) قضية ظاهرة (الاحتباس الحراري)

The Saga of the Greenhouse Effect

هل سيؤدي تزايد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى تغير في مناخ العالم؟ تجمعت خلال السنوات الخمسين الأخيرة أدلة كثيرة تشير إلى ازدياد لتركيز ثاني أكسيد الكربون بثبات في الغلاف الجوي على مستوى العالم، يعزى إلى احتراق الوقود الأحفوري (المحتوي على الكربون) منذ الثورة الصناعية. وقد أصبح من المسلّم به لدى معظم علماء البيئة أن هذه الزيادة صاحبها ازدياد ملحوظ في متوسط درجة حرارة الغلاف الجوي، وهو أمر قد يؤثر على المناخ العالمي بشكل كبير. يتفق بعض العلماء على أن متوسط درجة حرارة الغلاف الجوي للأرض يتزايد، إلا أن ذلك قد يكون جزءاً من تفاوت طويل المدى في درجات حرارة الغلاف الجوي بدليل حدوث عدد من العصور الجليدية على مر الأزمنة الجيولوجية، والتي لم يكن لانبعاث ثاني أكسيد الكربون من الوقود الأحفوري إلى الغلاف الجوي علاقة بها. ويرى علماء آخرون أن إضافة ثاني أكسيد الكربون تزيد درجة حرارة الغلاف الجوي بالفعل فوق مستوى التفاوت الطبيعي، لكن تأثيرها على المناخ العالمي سيكون مهماً. وهناك مجموعة أخرى من العلماء يعتقدون أنه حتى مع حدوث تغيرات في مناخ العالم فإن "خطورة" ذلك على البيئة سيكون بسيطاً. لقد شرحت عدة كتب (مثل [4]، [5]) "لماذا لا ينبغي علينا أن نقلق بشأن ظاهرة ارتفاع درجة الحرارة العالمي (global warming)؟".

كيف يمكننا التعامل مع هذا القدر الكبير من عدم الوضوح حول سلسلة الكمية والخطورة، والتي يمكن أن تسمى "قضية ظاهرة الاحتباس الحراري"؟ إحدى الطرق للقيام بذلك هي النظر في الأساسيات المعرفية للجوانب الكثيرة الخاصة بانبعاث ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي و"خطورة" ذلك على عمليات التغير المناخي العالمي. وللوصول إلى فهم كامل إلى العملية بمجملها، فإنه من المفيد دراسة كل واحد من العوامل المتعددة الموجودة في هذه السلسلة والتي يمكن إدراجها كما يأتي:

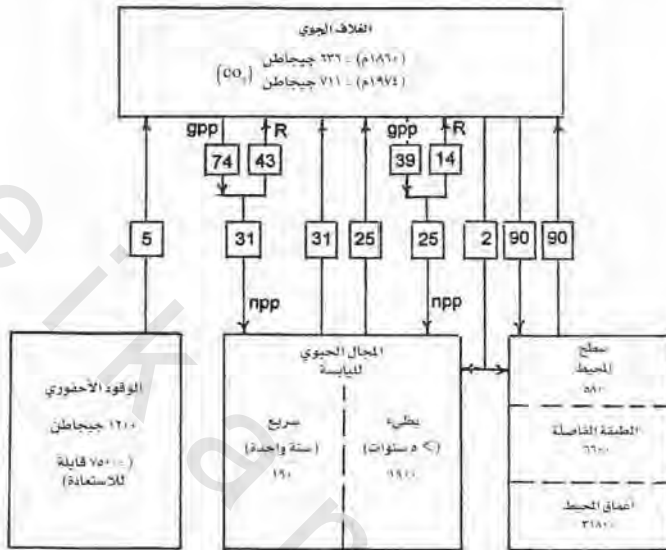
- ١- الدورة الطبيعية لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي.
- ٢- كمية تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي.
- ٣- كمية الانبعاثات الإضافية لثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي.
- ٤- كمية تركيز ثاني أكسيد الكربون المستقبلي في الغلاف الجوي.
- ٥- التفاوت الطبيعي لمناخ الأرض.
- ٦- تغيرات درجة حرارة الجو المفروضة بسبب انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري.
- ٧- "خطورة" بعض التغيرات المناخية.

(١, ٢, ٥) عناصر القضية Components of the Saga

١- الدورة الطبيعية لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي

تُصوّر دورة الكربون العالمية عموماً على أنها "مخطط بياني صندوقي" تكون فيه مخزونات الكربون الموجودة في مكائنها الكبرى على الأرض موجودة في صناديق، وتُمثّل عملية انتقال الكربون بين هذه الصناديق بأسهم تدل على الاتجاه. يوضح الشكل رقم (٤, ٥) واحداً من أوائل تلك المخططات البيانية والذي أعدته منظمة الأرصاد الجوية العالمية (WMO) عام ١٩٧٧ م [6].

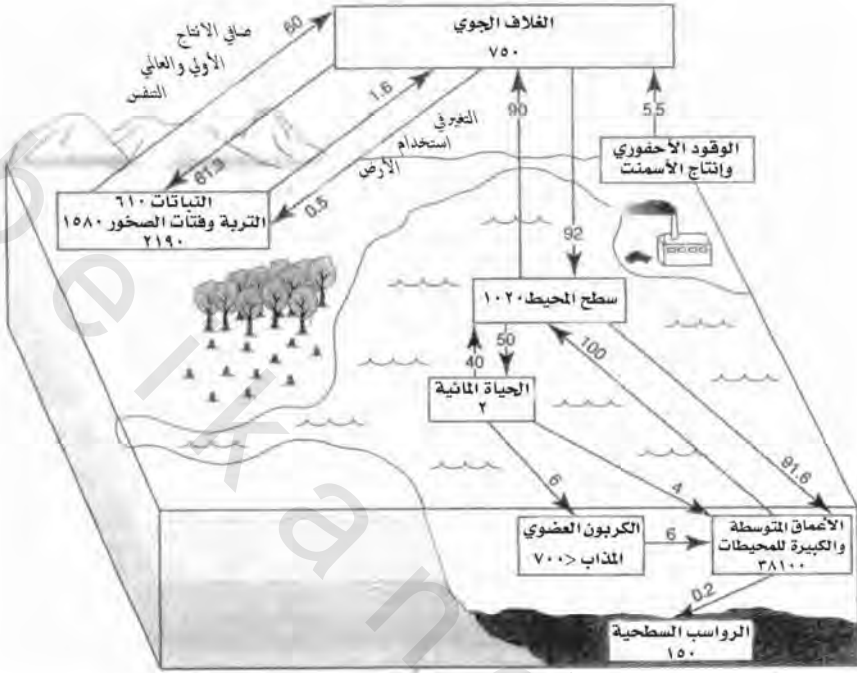
دورة ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي*



مكامن الكربون القابلة للتبادل وتدفعاته
 جيجاطن = 10^9 طن متري من الكربون في المكان
 * تدفق الكربون في السنة الواحدة بوحدة 10^9 طن متري
 npp = الإنتاج الأولي الإجمالي = R = تنفس النباتات = الإنتاج الأولي الصافي
 المصدر: تقرير ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، WMO، 1997، ص 197.

الشكل رقم (٥، ٤). النموذج الصندوقي لدورة الكربون العالمية [6].

الكثير من الأبحاث المنشورة اليوم موجودة في تقارير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) [7] والتي أعدت عام ١٩٩٦م وكذلك في الكتاب الأحدث والذي يتألف من عدة مجلدات نشرت عام ٢٠٠١م [8]، وتحتوي هذه المطبوعات على تفاصيل أعمق بكثير عن هذا العلم وبياناته. ويوضح الشكل رقم (٥، ٥) قيمة عام ٢٠٠١م والخاصة بالمخطط البياني الصندوقي.



الشكل رقم (٥، ٥). النموذج الصندوقي لدورة الكربون العالمية [٨].

قسمت لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) الدورة إلى أربعة أجزاء:

- ١- الدورة الطبيعية.
- ٢- التدخل الإنساني.
- ٣- التدوير في المحيطات.
- ٤- التدوير على اليابسة.

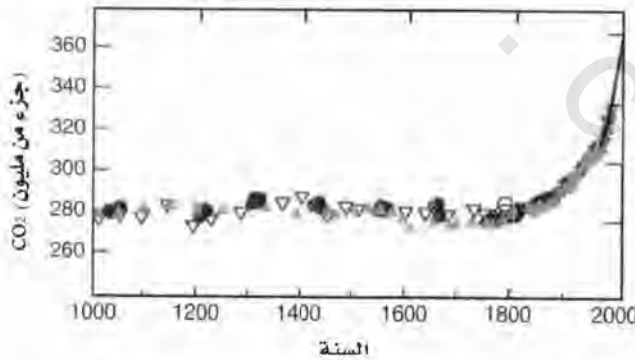
ويوضح الشكل رقم (٥، ٦) الجزأين الأولين. يمكن ملاحظة الزيادة الكبيرة في حجم المعرفة التي تم اكتسابها خلال فترة الخمس والعشرين سنة بمقارنة المخططين البيانيين.

وتمت على وجه التحديد الإشارة إلى القيم التقديرية للعبء على الغلاف الجوي في تقرير منظمة الأرصاد الجوية العالمية (WMO) عام ١٩٧٧م على أنها كانت ٦٣٦ جيجاطن من الكربون (١ جيجاطن = 10^9 طن متري من الكربون الموجود في خزان معين) عام ١٨٦٠م، مرتفعة بمقدار ٧٤ جيجاطن بحلول عام ١٩٧٤م لتصل إلى ٧١١ جيجاطن. أما القيمة المقابلة للكربون في الغلاف الجوي حسب تقرير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) [8] فقد ازدادت منذ فترة ما قبل الثورة الصناعية إلى نهاية تسعينيات القرن العشرين بمقدار ٧٣٠ بيتاجرام من الكربون (حيث إن البيتاجرام من الكربون = 10^{10} جرام = 10^9 طن متري). وقد أشار تقرير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) [8] إلى أن الزيادة في محتوى ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي نتجت عن انبعاثات بفعل الإنسان، حيث إن حرق الوقود الأحفوري (مع إسهام بسيط من إنتاج الإسمت) أدى إلى انبعاثات يبلغ متوسط مقدارها ٥,٤ بيتاجرام من الكربون في السنة خلال ثمانينيات القرن العشرين و٦,٣ بيتاجرام من الكربون في السنة خلال التسعينيات من القرن نفسه.

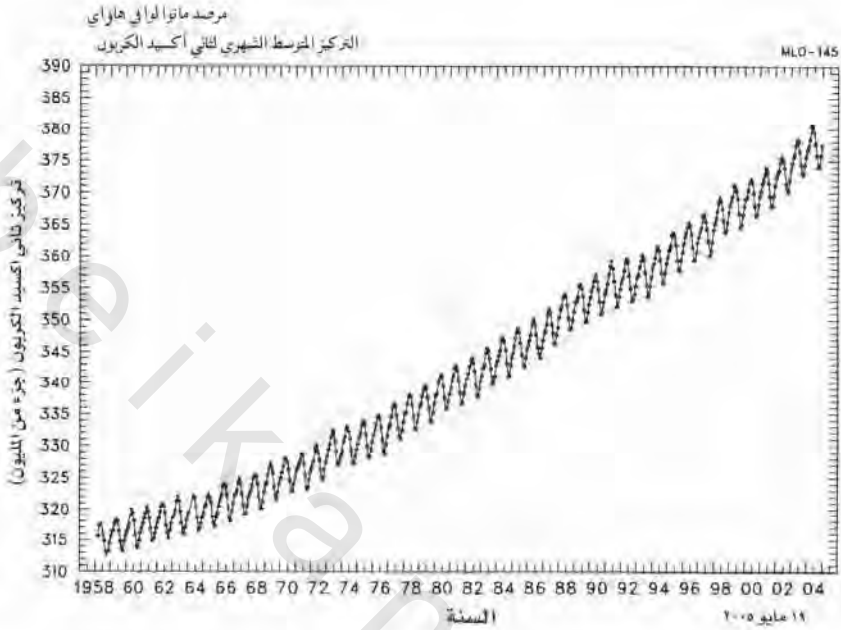
٢ - كمية تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي

أظهرت القياسات الفعلية لتركيز ثاني أكسيد الكربون $[CO_2]$ في الغلاف الجوي (والاستنتاجات من القياسات غير المباشرة) أن التركيز في عصر ما قبل الثورة الصناعية قد ازداد بشكل منتظم خلال تلك الفترة. وقد أشار تقرير منظمة الأرصاد الجوية العالمية (WMO) لعام ١٩٧٧م إلى أن متوسط تركيز ثاني أكسيد الكربون $[CO_2]$ كان 295 ± 10 ج.م.م.ح (جزء من مليون حجمياً) عام ١٨٦٠م وكان ٣٣٠ ج.م.م.ح عام ١٩٧٤م. ويبين الشكل رقم (٥,٤) أن العبء على الغلاف الجوي قد ارتفع بمقدار (٧١١ - ٦٣٦) = ٧٥ جيجاطن خلال السنوات المائة والأربعة عشر تلك (بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ٠,٦٦ جيجاطن / سنة مقابل معدل انبعاث سنوي متوسط من الوقود الأحفوري مقداره ٥ جيجاطن / سنة). وعليه فإن التغير الناتج في تركيز ثاني أكسيد الكربون كان (٣٣٠ - ٢٩٥) = ٣٥ ج.م.م.ح خلال ١١٤ سنة (بمعدل نمو سنوي متوسط

مقداره ٠,٣ ج.م.م.ح / سنة). هل كان انبعاث ٧٥ جيغاطن من الكربون هو السبب في زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بمقدار ٣٥ ج.م.م.ح؟ يشير تقرير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) لعام ٢٠٠١م إلى أن متوسط تركيز ثاني أكسيد الكربون كان 280 ± 10 ج.م.م.ح لبضع آلاف من السنين، كما يتضح من الشكل رقم (٥,٧) الذي يمثل الفترة من عام ١٠٠٠م إلى ١٧٥٠م، وقد ازداد التركيز بشكل سريع حتى وصل إلى حوالي ٣٣٥ ج.م.م.ح في القرن العشرين. ولعل أكثر سلسلة من القياسات الفعلية شمولاً هي تلك التي قام بها كيلنج وزملاؤه (انظر على سبيل المثال المرجع [9]) بشكل مستمر منذ عام ١٩٥٨م في ظروف جوية منعزلة على قمة جبل مانوا لوا (Manua Loa) البركاني في جزر هاواي. توضح البيانات التي تم تجميعها (الشكل رقم ٥,٨) إلى نهاية عام ٢٠٠٤م (مع أخذ التغيرات الموسمية في الاعتبار) ارتفاع التركيز من حوالي ٣١٥ ج.م.م.ح عام ١٩٥٨م إلى ٣٨٠ ج.م.م.ح عام ٢٠٠٤م (بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ١,٣ ج.م.م.ح/سنة تقريباً). وتوحي هذه البيانات بأن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي سيستمر في الارتفاع في المستقبل بمعدل نمو متزايد إذا استمرت عملية ضخ ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي.



الشكل رقم (٥,٧). تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ ١٠٠٠ - ٢٠٠٠م [8].



الشكل رقم (٥,٨). تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من مرصد مانيلا لواء من ١٩٥٨ - ٢٠٠٤ م [9].

٣- كمية الانبعاثات الإضافية لثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي

ليس هناك الكثير من الشك في أوساط معظم علماء الأرض في أن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قد ارتفع بشكل ملحوظ منذ الثورة الصناعية. إلا أنه لا تزال هناك تساؤلات حول كمية ثاني أكسيد الكربون التي انبعثت خلال تلك الفترة. حسب تقرير منظمة الأرصاد الجوية العالمية (WMO) لعام ١٩٧٧م [6] فإن معدل انبعاث ثاني أكسيد الكربون (انظر الشكل رقم ٥,٤) كان ٥ جيجاطن / سنة (أو بيتاجرام من الكربون) ليكون إجمالي انبعاث ثاني أكسيد الكربون من مصادر الوقود الأحفوري ١٣٦ جيجاطن. وقد سبقت الإشارة إلى أن زيادة ثاني أكسيد الكربون في

الغلاف الجوي كانت ٧٥ جيجاطن، مما يعني أن حوالي ٥٥٪ فقط من انبعاث ثاني أكسيد الكربون قد بقي في الغلاف الجوي. لذا يمكن أن يطرح هذا السؤال: أين ذهب الباقي؟ لقد تعاملت الكثير من الدراسات في تقارير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) مع هذا السؤال. فقد أوضح تقرير اللجنة لعام ٢٠٠١م [8] (انظر الشكل رقم ٥,٦ ب) أن معدل الانبعاث الحالي من حرق الوقود الأحفوري (وهو ٥,٣ بيتاجرام كربون في السنة) ومن إنتاج الإسمنت (وهو ٠,١ بيتاجرام كربون في السنة) يساوي ٥,٤ بيتاجرام كربون في السنة، وهو معدل يتفق مع تقديرات تقرير منظمة الأرصاد الجوية العالمية (WMO) لعام ١٩٧٧م. ويبلغ معدل امتصاص الأرض الصافي والذي يسمى "الخوض الأرضي للفضالة" [وهو صافي الإنتاج الأولي (NPP) من الكتلة الحيوية مطروح منه فقدان الكربون الناتج عن التنفس والاحتراق] ١,٩ بيتاجرام كربون في السنة، ويقابل هذا الامتصاص عمليات انبعاث من الأرض (مثل اجتثاث الغابات والتغير في استخدام الأرض) تؤدي إلى انبعاث -١,٧ بيتاجرام كربون في السنة، مما يعني أن الفارق يبلغ $٠,٢ \pm ٠,٧$ بيتاجرام كربون في السنة (وهو فارق لا يمكن الوثوق في دقته). أما صافي الامتصاص من قبل المحيطات والذي تتحكم فيه بالدرجة الأولى عملية الدوران في المحيطات والكيمياء الكرونية، فقد تم توضيح أن قيمته ١,٩ بيتاجرام كربون في السنة. إذا أخذنا في الاعتبار القيم المقدرة حديثاً للانبعاث والتي تبلغ ٥,٤ بيتاجرام كربون في السنة وطرحنا منها القيمة الراجعة إلى اليابسة والمحيطات البالغة ٢,١ بيتاجرام كربون في السنة، فسيكون صافي الانبعاث ٣,٣ بيتاجرام كربون في السنة وهي نسبة تمثل ٦١٪ من إجمالي الانبعاث مما يتفق مع تقدير عام ١٩٧٧م البالغ ٥٥٪.

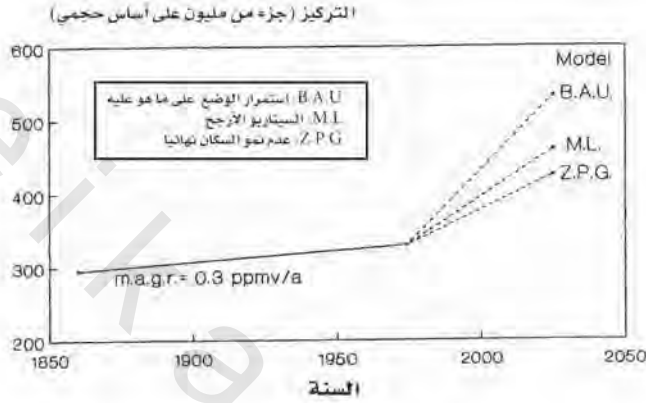
٤- كمية تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في المستقبل

إن المشكلة الأكثر صعوبة في تقييم علاقة الكمية والخطورة الخاصة بالانبعاث غازات الاحتباس الحراري، والتي تركزت دراستها على ثاني أكسيد الكربون، هي تقدير كمية الانبعاثات لمدة بعيدة في المستقبل، بحيث لا تصبح "الخطورة" واضحة للعيان. ويوضح التقريران في هذه الحالة أيضاً زيادة ملحوظة، فقد قام تقرير منظمة الأرصاد

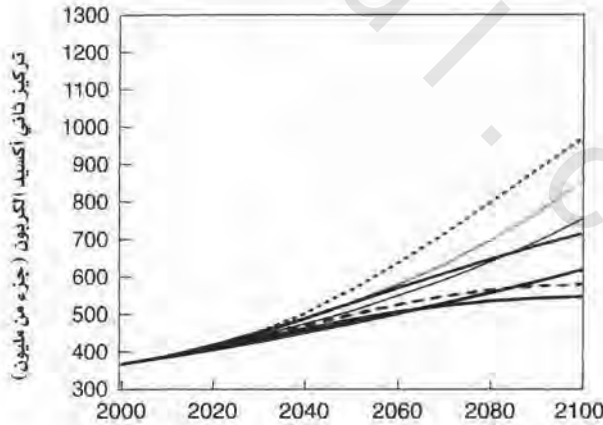
الجوية العالمية (WMO) لعام ١٩٧٧م بتقديم تقدير استقرائي للعبء المحتمل على الغلاف الجوي في المستقبل بثلاثة سيناريوهات حتى عام ٢٠٢٥م: (١) استمرار الوضع على ما هو عليه و(٢) السيناريو الأرجح و(٣) حالة عدم نمو السكان نهائياً. يوضح الشكل رقم (٥،٩) التغيرات النسبية في الميل مقارنة بمعدل النمو التاريخي البالغ ٠,٣ ج.م.م.ح / سنة من عام ١٨٦٠ - ١٩٧٤م للنماذج الثلاثة. وعليه فسيتراوح التركيز من ٤٢٥ إلى ٥٣٠ ج.م.م.ح بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره من ٠,٥٪ إلى ١٪ سنوياً. إن معدل النمو السنوي المتوسط للتركيز الناتج من النموذج "الأرجح" (٤٦٠ ج.م.م.ح) سيكون ٠,٦٥٪ / سنة، أي حوالي ضعف المعدل الخاص بالفترة السابقة [6].

وأما التوقعات الخاصة بالأمر ذاته في تقرير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) لعام ٢٠٠١م فقد تم التوصل إليها باستخدام نموذجين متطورين قاما بتقييم ستة سيناريوهات خاصة بالانبعاث بهدف توقع قيم تركيز ثاني أكسيد الكربون المستقبلية إلى نهاية القرن الحادي والعشرين. وغطت هذه السيناريوهات إطاراً متكاملاً لعدد من المسارات المختارة من التنمية الاجتماعية والاقتصادية. وقد تم توقع انبعاثات وقيم تركيز الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري والرداذ العالق في الهواء لكل من هذه السيناريوهات. وقد استخدمت هذه النتائج بعد ذلك في تقدير التغيرات المناخية المحتملة مثل ارتفاع درجة الحرارة وارتفاع منسوب مياه البحر، ثم استخدمت مرة أخيرة لتوقع الأثر الحاصل على الأنظمة الإنسانية والطبيعية. إن الزيادة في تركيز ثاني أكسيد الكربون التي يتوقعها النموذجان للسيناريوهات الستة تتراوح ما بين ٥٤٠ إلى ٩٧٠ ج.م.م.ح، كما يوضح الشكل رقم (٥،١٠). ويعكس الفرق الشاسع بين معدلات النمو التي تتوقعها هذه السيناريوهات الاختلافات الشاسعة في الفرضيات كالفرض بالتشديد على الأهداف الاقتصادية مقابل التشديد على الأهداف البيئية وكذلك الفرض بانتشار التأثير على مستوى إقليمي مقابل انتشاره على المستوى العالمي. يمثل العمل الذي قامت به لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية ملخصاً للمجهود البحثي على مستوى العالم حول مشكلة تحليل الكمية والخطورة الخاص بانبعاث الغازات المسببة

لظاهرة الاحتباس الحراري من احتراق الوقود الأحفوري ومن مصادر أخرى، وهو عمل جدير باهتمام قارئ هذا الكتاب، ويمكن قراءة المطبوعات الرئيسة لبرنامج لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) على الموقع الإلكتروني: www.ipcc.ch.



الشكل رقم (٩، ٥). التوقع لنمو تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من ١٩٧٤ - ٢٠٢٥ م [6].



الشكل رقم (١٠، ٥). التوقع لتركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من ٢٠٠٠ - ٢١٠٠ م [8].

٥- التفاوت الطبيعي في مناخ الأرض

يمكننا أن نقول إن حجم مشكلة الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري معروف بشكل لا بأس به، فزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي منذ الثورة الصناعية قد تم قياسها على مر الزمن بشكل جيد. أما النصف الثاني من المشكلة وهو مقدار التغير المناخي الناتج عن تلك الزيادة فلا بد من دراسته بالتفصيل. إن هذا النصف من المشكلة هو الأكثر صعوبة من حيث إن البعض ينظر إلى مناخ الأرض برؤية فنية، بينما يراه آخرون على أنه مصدر للمتاعب. والسبب في ذلك هو أنه على الرغم من أن المناخ هو جزء من علوم الأرصاد الجوية إلا أن قاعدة البيانات له محدودة للغاية من حيث القياسات الفعلية سواء من ناحية زمنية أو جغرافية.

لذا فإن نطاق التفاوت الطبيعي في مناخ الأرض غير أكيد. من ضمن العوامل التي تؤثر على مناخ الأرض ما يأتي:

- الوضع الفلكي: التفاوت في الإشعاع الشمسي.
- التركيب الكيميائي وكمية الجسيمات.
- محتوى بخار الماء: القوة الدافعة للدورة المائية.
- محتوى ثاني أكسيد الكربون: التوازن الإشعاعي للغلاف الجوي.
- الأجسام الدقيقة: نوى التكثيف والانعكاسية.
- التفاعل الهيدروديناميكي والثيرموديناميكي مع المحيطات وكتل الجليد وسطح اليابسة وتدخل الإنسان.

وكل من هذه العوامل هو دالة في الزمن وفي الدورات الزمنية الطبيعية. لذا فإن المشكلة تكمن في كيفية تحديد ما إذا كانت التغيرات التي نلاحظها في هذه القائمة ترجع إلى الظواهر الطبيعية ذات الدورات الزمنية الثابتة (أو المتغيرة) أم أنها

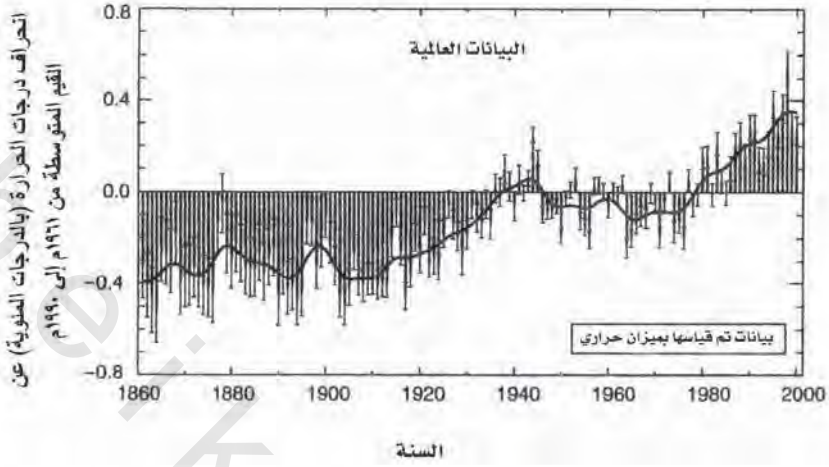
ترجع إلى النشاط الإنساني. إن قياس التغير المناخي بالنسبة لأي عامل مؤثر على المناخ يجب أن يفسر على أساس المعادلة التي تربط بينهم وعلى أساس عوامل الشك (uncertainties) في كل واحد من هذه العوامل :

$$\Delta Climate \pm \sigma(change) = f(\Delta Parameter \pm \sigma(parameter)) \quad (5, 1)$$

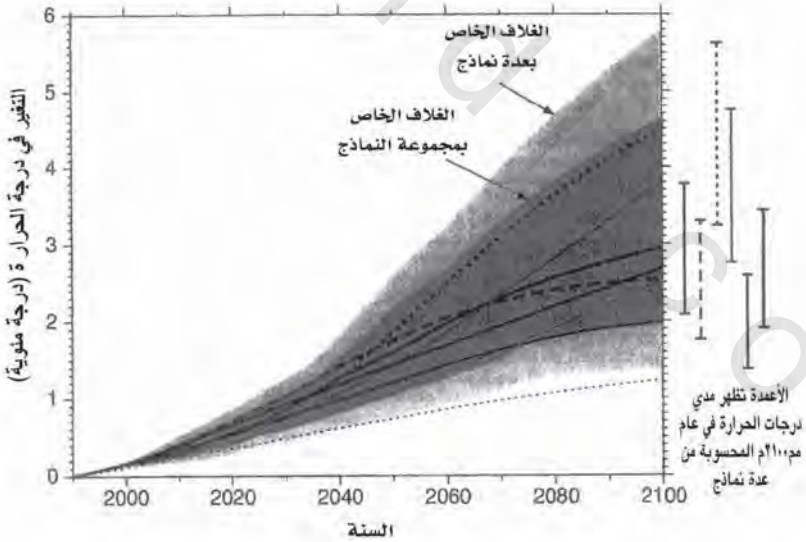
لذا فإن لكل عنصر من عناصر المناخ (درجة حرارة الجو وأنماط تساقط الأمطار والثلوج ودرجة حرارة المحيطات ومعدل الخلط ومعدل ذوبان كتل الجليد وارتفاع منسوب مياه البحر) أربعة قيم لا بد من الحصول عليها ومقارنتها: كمية التغير في العنصر المناخي وعامل الشك في الكمية وكمية التغير في العامل المؤثر وعامل الشك في كمية التغير هذه. وتشكل هذه العملية عنصراً رئيساً في علم المناخ.

٦- تغيرات درجة حرارة الجو المفروضة بسبب انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري

أوضح القسمان الثالث والرابع من قضية ظاهرة الاحتباس الحراري أن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قد ارتفع على مر قرنين من الزمن وسيستمر في الارتفاع في المستقبل. ويشير تقرير لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC) لعام ٢٠٠١م [8] إلى أن متوسط درجة الحرارة السطحية في العالم قد ازداد بمقدار 0.6 ± 0.2 درجة مئوية منذ أواخر القرن التاسع عشر. كما يوضح الشكل رقم (٥، ١١) الفروقات في درجة حرارة سطح البحر واليابسة مجتمعة، وذلك من عام ١٨٦١ - ٢٠٠٠م، مقارنة بالفترة من ١٩٦١ - ١٩٩٠م. وتمثل الأعمدة المرافقة للأرقام السنوية عدم يقين مقداره خطآن معياريان. أما التوقعات لارتفاع درجة الحرارة خلال القرن الحادي والعشرين المبينة على عدة نماذج [8] فهي موضحة في الشكل رقم (٥، ١٢).



الشكل رقم (٥, ١١). درجات الحرارة السطحية العالمية في الفترة من ١٨٦١ - ٢٠٠٠ م مقارنة بالفترة من ١٩٦١ - ١٩٩٠ م [٨].



الشكل رقم (٥, ١٢). مدى درجات الحرارة المحسوبة من نموذج السيناريوهات المختلفة للانبعاثات [٨].

تتراوح الارتفاعات المتوقعة في درجة الحرارة بين ما يزيد على درجة مئوية واحدة إلى حوالي ست درجات مئوية. وسوف تكون "الخطورة" الناتجة من أي من هذه الاحتمالات على التغير المناخي دالة في الكمية الفعلية للانبعاثات الإضافية للغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري في ظل الاتفاقيات التنظيمية العالمية في المستقبل.

يشير التقرير كذلك إلى أن السجلات التي رصدتها البالونات والأقمار الصناعية منذ عام ١٩٧٩م تبين أن التروبوسفير قد ازدادت حرارته، بينما انخفضت حرارة الستراتوسفير. وتتفق هذه التغيرات في درجة الحرارة تحت وفوق التروبوبوز[الغلاف البيئي بين التروبوسفير والستراتوسفير] مع توقعاتنا لتأثير انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري والأجسام الدقيقة على الغلاف الجوي. إن الأهمية النسبية للعنصرين اللذين يؤثران على الإشعاع الشمسي من خلال الغلاف الجوي واللذين يحسبان باستخدام المعادلة رقم (١، ٥) يعبر عنها على أنها مقدار معدلي الانحدار في درجة الحرارة في العالم: $\Delta T_w / \Delta [CO_2]$ وهو معدل انحدار موجب في طبقة التروبوسفير بفعل ظاهرة الاحتباس الحراري، و $\Delta T_w / \Delta [particulates]$ وهو معدل انحدار سالب بفعل زيادة انعكاسية الإشعاع القادم من الشمس.

٧- "خطورة" بعض التغيرات المناخية

يُعد ضرورياً الربط بين التغير العالمي في المناخ وبين التغيرات في انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري والأجسام الدقيقة. إلا أن "خطورة" تغيرات المناخ العالمي لها كذلك أهمية بالغة في مسألة النظر في التأثير على البيئة العالمية بصرف النظر عن السبب. إن الجدل حول ظاهرة الاحتباس الحراري، كما يوجز تقرير برنامج لجنة الحكومات الخاصة بالتغيرات المناخية (IPCC)، سيستمر مع الأبحاث الحالية والمستقبلية التي يفترض أن تكشف النقاب عن معرفة متزايدة عن تأثيرات تغيرات المناخ، وذلك على شكل أسئلة، هي كالاتي:

التأثيرات الحرارية: هل ستستمر زيادة حرارة الغلاف الجوي والمحيطات

والقارات؟

التأثيرات الحيوية: هل سيحدث تغيير في عملية التمثيل الضوئي؟

التأثيرات البحرية: هل ستكون المحيطات على المدى البعيد مصباً مستقبلاً

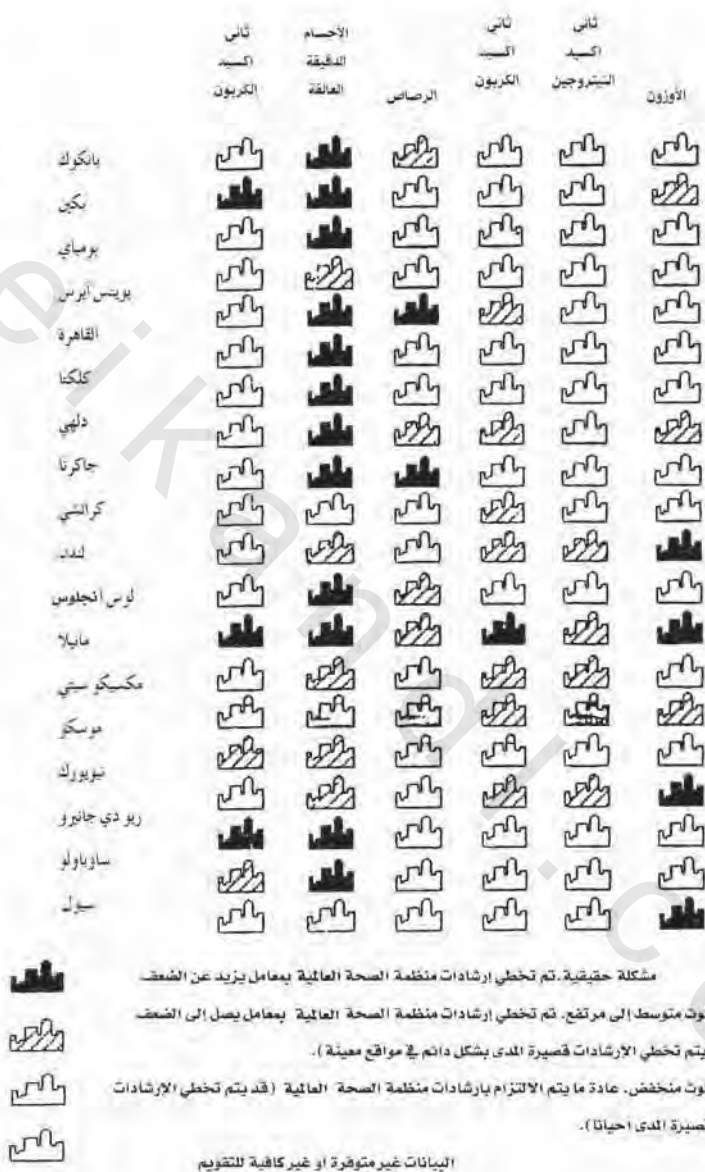
لـ $\Delta[CO_2]$ ؟

(٥,٣) التلوث المحلي للهواء بسبب عوادم السيارات

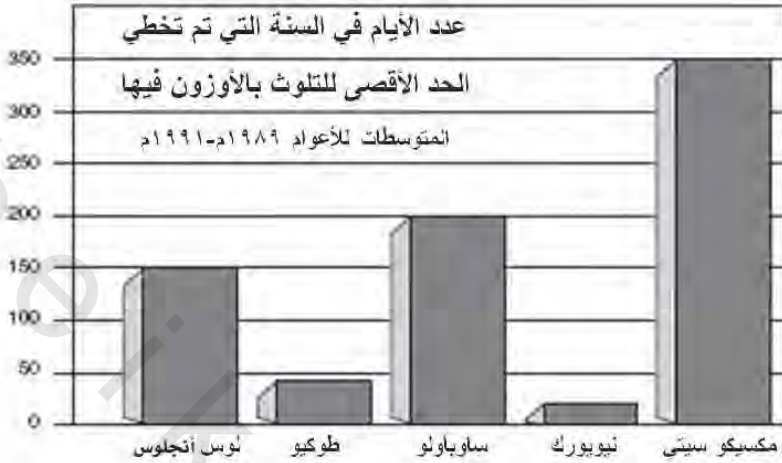
Local Air Pollution from Automobile Exhaust

بالرغم من أن تحليل الكمية والخطورة للتلوث العالمي في الجو يصعب تقييمه، إلا أن مشكلة تلوث الهواء في المدن الكبرى قد تم توثيقها على مستوى العالم. ويوضح الشكل رقم (٥,١٣) توزيع مشكلات تلوث الهواء في مدن العالم الكبرى والمشار إليه من قبل منظمة الصحة العالمية [10]، وذلك للملوثات الرئيسة للهواء وهي: ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والأجسام الدقيقة العالقة (SPM) والرصاص (Pb) وأول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) والأوزون (O_3). وتدل الأشكال المصمتة على المدن التي تجاوزت الحدود التي وضعتها منظمة الصحة العالمية بأكثر من الضعف.

يبين الشكل رقم (٥,١٤) المشكلة الخاصة بتركيز الأوزون (المؤدي إلى تكون الضباب الدخاني smog) في المدن الخمسة الأكثر تلوثاً بالضباب الدخاني في العالم، كما يفيد أحد تقارير برنامج الأمم المتحدة للبيئة [11]. وتوضح البيانات الخاصة بالسنوات من ١٩٨٩ - ١٩٩١ م أن تركيز الأوزون في مدينة مكسيكو سيتي كان أقل من المستوى القياسي في ١٥ يوماً فقط في السنة.



الشكل رقم (١٣، ٥). توزيع مشكلات تلوث الهواء في أنحاء العالم [10].



الشكل رقم (٥، ١٤). عدد مرات تكرار التلوث بالأوزون فوق الحد الأقصى من ١٩٨٩ - ١٩٩١م [11].

قامت وكالة حماية البيئة الأمريكية بمهمة تجميع البيانات التاريخية لتلوث الهواء في البلاد. ويمكن رؤية التوجه في تلوث الهواء على مدى السنوات الثلاثين الماضية في تقرير الوكالة لعام ١٩٧٢م وعام ٢٠٠٢م. وبين الجدول رقم (٥، ١) الانبعاثات الملوثة للهواء الناتجة عن العناصر الخمسة الكبرى من عام ١٩٤٠ - ١٩٧٠م. والملوثات هي أول أكسيد الكربون (CO) وأكاسيد الكبريت (SO_x) والأجسام الدقيقة العالقة (SPM) والمركبات العضوية المتطايرة (VOC) وأكاسيد النيتروجين (NO_x). يشير الجدول رقم (٥، ٢) إلى التغير في كمية هذه الانبعاثات من عام ١٩٧٠ - ١٩٩٨م بالنظر إلى الجهود الرامية إلى تقليل تلوث الهواء في عدة قطاعات اقتصادية. تم التوزيع في هذا الجدول على أساس مصدر الانبعاث ويظهر بوحدة ملايين الأطنان في السنة.

الجدول رقم (٥, ١). الانبعاثات الملوثة للهواء في الولايات المتحدة من ١٩٤٠ - ١٩٧٠م [12].

المادة الملوثة	الكتلة (مليون طن)
أول أكسيد الكربون (CO)	١٥٠-٨٥
أكاسيد الكبريت (SO _x)	٣٤-٢٢
الأجسام الدقيقة العالقة (SPM)	٢٧-٢٥
المركبات العضوية المتطايرة (VOC)	٣٥-١٩
أكاسيد النيتروجين (NO _x)	٢٣-٧

(٥, ٣, ١) الأثر البيئي للضباب الدخاني Environmental Impact of Smog

تركز الجدول التاريخي حول الطاقة ومشكلتها مع البيئة على قطاعين اقتصاديين رئيسيين هما: المحطات الثابتة لتوليد الطاقة، وقطاع النقل بالمركبات. وتحول مصدر القلق حول انبعاثات محطات توليد الطاقة على مر السنين من المشكلة الإقليمية المتمثلة في ترسيب الأمطار الحمضية إلى مشكلة التغير المناخي ذات النطاق العالمي، والتي قد تكون ناتجة عن استمرار انبعاث كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون (وغازات أخرى تسبب الاحتباس الحراري) من جراء احتراق الأنواع المختلفة من الوقود الأحفوري. ويعتبر انبعاث الغازات من عوادم السيارات أيضاً مصدر قلق قائم منذ زمن بعيد ولكن على نطاق أضيق، وهو قلق متركز حول انبعاث الغازات التي تؤدي إلى تكون الضباب الدخاني في الهواء الموجود في المدن الكبيرة التي أدت التنمية الحضرية الواسعة فيها إلى اختناقات مرورية ومشكلة تلوث هواء حقيقية. إن الملوثين الأكثر أهمية نتيجة احتراق الوقود الأحفوري في المركبات والذين يُكوّنان الضباب الدخاني هما أكاسيد النيتروجين (NO_x) والمركبات العضوية المتطايرة (VOC). بما أن المركبات العضوية المتطايرة موجودة أيضاً بكميات كبيرة نتيجة أنشطة غير متعلقة بالمركبات، وبما أن تُكوّن أكاسيد النيتروجين ينتج في الغالب عن احتراق الوقود عند درجات حرارة مرتفعة، فإنه من المفيد التركيز على طبيعة أكاسيد النيتروجين (NO_x) في تلوث الهواء في المدن.

الجدول رقم (٥,٢). توزيع ملوثات الهواء حسب المصدر عام ١٩٧٠م مقارنة بعام ١٩٩٨م [12, 13].	١٩٨٠م		١٩٧٠م		١٩٨٠م		١٩٧٠م		١٩٨٠م		١٩٧٠م		المصدر
	أكاسيد النيتروجين NO _x	المركبات العضوية المتطايرة VOC	الجسيمات الدقيقة العالقة SPM	أكاسيد الكبريت SO ₂	أول أكسيد الكربون CO								
النقل	١٩٨٠م	١٩٧٠م	١٩٨٠م	١٩٧٠م	١٩٨٠م	١٩٧٠م	١٩٨٠م	١٩٧٠م	١٩٨٠م	١٩٧٠م			
	١٣,٠	١١,٧	٧,٨	١٩,٥	٠,٧	٠,٧	٠,٤	١,٠	٧٠,٢	١١١,٠			
	١٠,٢	١٠,٠	٠,٩	٠,٦	١,١	٦,٨	١٦,٧	٣٦,٥	٥,٤	٠,٨			
	٠,٨	٠,٢	١,٤	٥,٥	٠,٦	١٣,١	١,٥	٦,٠	٣,٦	١١,٤			
الصناعة	٠,١	٠,٤	٠,٤	٢,٠	٠,٣	١,٤	٠,١	٠,١	١,٣	٧,٢			
	٠,٣	٠,٤	٧,٤	٧,١	٣٢,٠	٣,٤	٠,٩	٠,٣	٩,١	١٦,٨			
مصادر أخرى	٢٤,٤	٢٢,٧	١٧,٩	٣٤,٧	٣٤,٧	٢٥,٤	١٩,٦	٣٣,٩	٨٩,٥	١٤٧,٢			
الإجمالي													

(٥,٣,٢) أكاسيد النيتروجين في الضباب الدخاني الكيميائي الضوئي

Nitrogen Oxides in Photochemical "Smog"

يتراوح تركيز أكسيد النيتروجين (NO) في الحالة الطبيعية للهواء الجاف "الاعتيادي" بين ٠,٢٥ و ٠,٥ ج.م.م.ح، بينما يتراوح تركيز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) بين ٠,٠٠١ و ٠,٠٠٢ ج.م.م.ح. يتكون أكسيد النيتروجين في الهواء عموماً من جراء عملية تثبيت النيتروجين (fixation)، وهو تفاعل النيتروجين الموجود في الهواء مع الأوكسجين كما يأتي :



وبفعل الاحتراق عند درجات حرارة مرتفعة كالاتي :



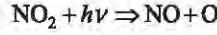
يتكون ثاني أكسيد النيتروجين من جراء تأكسد أول أكسيد النيتروجين (NO) بسبب تفاعل بطيء مع الأوكسجين :



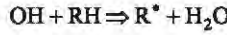
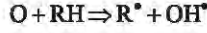
وبسبب تفاعل سريع مع الأوزون :



يتكون الضباب الدخاني بفعل تفاعلات كيميائية ضوئية مع ثاني أكسيد الكربون، تؤدي إلى تفاعل سلسلي مع ذرات الأوكسجين ومع المركبات الهيدروكربونية العضوية المتطايرة التي تنتج من تكون الجذرين الحرّين (R[•] و OH[•]) بفعل انتقال ذرة هيدروجين من المركب العضوي المتطاير إلى ذرة الأوكسجين :



(٥,٦)



حيث إن :

$h\nu$ = فوتونات الضوء فوق البنفسجي (من أشعة الشمس)

RH = الهيدروكربونات (من المركبات العضوية المتطايرة)

يبين الجدول رقم (٥,٣) التركيزات الدارجة للغازات في الضباب الدخاني الكيميائي الضوئي (بوحدة ج.م.م.ح.).

الجدول رقم (٥,٣). التركيزات المعتادة للغازات الموجودة في الضباب الدخاني البتروكيمياوي.

المكوّن	التركيز (جزء من المليون حسب الحجم)
الغازات الرئيسية	
بخار الماء	2×10^6
ثاني أكسيد الكربون	4×10^4
أول أكسيد الكربون	4×10^3
الميثان	٢٥٠
غازات الضباب الدخاني	
أكاسيد النيتروجين	٢٠
الأوزون	٥٠
المركبات العضوية المتطايرة	١٠-٦٠

(٥,٣,٣) جوانب الكمية والخطورة الخاصة بأكاسيد النيتروجين

Magnitude-Severity Aspects of Nitrogen Oxidesالكمية (انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NO_x) من المركبات)

يبين الجدول رقم (٥,٢) كمية انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NO_x) في الولايات المتحدة. كانت نسبة الانبعاث الناجمة عن قطاع النقل عام ١٩٧٠م تساوي ٥١,٥٪، بينما النسبة الناتجة من محطات توليد الكهرباء ٤٤٪ [11]. أما في عام ١٩٩٨م فقد كانت النسبتان من هذين المصدرين هما ٥٣,٣٪ و ٤١,٨٪ على التوالي، مما يشير إلى أنه مع ازدياد إجمالي استهلاك الطاقة فإن مشكلة الضباب الدخاني لن تتضاءل بشكل كبير إذا استمر استخدام الوقود الأحفوري في قطاع النقل.

الخطورة (التأثير على الصحة من "ملوثات الهواء الخطرة")

تشير وكالة حماية البيئة الأمريكية [13] إلى أن التأثيرات على الصحة والناجمة عن ملوثات الهواء الخطرة (HAPs) تتضمن السرطان والأمراض العصبية وأمراض القلب ومشكلات التنفس والتأثير على الكبد والكلية وجهاز المناعة والجهاز الجنسي بالإضافة إلى تأثيرات على نمو الأجنة والأطفال. لقد صنفت وكالة حماية البيئة الأمريكية أكثر من نصف ملوثات الهواء الخطرة على أنها مسببات "معروفة" أو "مرجحة" أو "ممكنة" للسرطان لدى الإنسان.

(٥,٤) قيمة التحسن في جودة الهواء في مجال النقل

Value of Air Quality Improvement in Transportation

تمت دراسة التأثيرات الصحية لتلوث الهواء من قبل خبراء في المجال الطبي بشكل بالغ التفصيل. ولتسليط الضوء من وجهة نظر هندسية على هذه المشكلة المهمة في بحثنا عن الطاقة الوفيرة، فإنه من المفيد دراسة خطورة المشكلة بالأرقام قدر الإمكان، وذلك بدراسة قيمة التحسن في جودة الهواء. يفترض في أي نموذج يصبو إلى

القيام بذلك أن يأخذ في الاعتبار العوامل الرئيسة الآتية (والمذكورة مع الرموز المناسبة لكل منها):

العامل	الرمز المستخدم
الانبعاثات من المركبات	E_i (بوحدة ميغاطن/سنة مثلاً)
التشتيت المساري	D_j (يتبع العملية)
تعرض السكان للملوثات	P_k (بوحدة جرام/فرد مثلاً)
التأثيرات على الصحة	H_l (العدد/سنة)
القيمة الصحية	V_l (بوحدة سنت/ميل مثلاً)

الانبعاثات من المركبات

معدل الانبعاث السنوي هو:

$$E_j = 10^6 \sum N_j EF_{i,j} M_j \quad (٥,٧)$$

حيث إن:

E_j = معدل انبعاث المادة الملوثة i (ميغاطن/سنة)

i = أكاسيد النيتروجين (NO_x) ، وأكاسيد الكبريت (SO_x) ، والأجسام الدقيقة

الأصغر من ١٠ ميكرون (PM_{10})

N_j = عدد المركبات من النوع z (بالملايين)

z = السيارات ، والسيارات ذات الاستخدامات الرياضية ، والسيارات العائلية ،

والباصات ، الشاحنات

$EF_{i,j}$ = معامل انبعاث المادة الملوثة i من المركبة من النوع z (جرام/ميل)

M_j = متوسط المسافة التي تقطعها المركبة من النوع z في السنة (ميل/سنة)

كما أن :

$VMT = N_j M_j$ (عدد الأميال التي تقطعها المركبات في السنة) على أساس
المسافة M_j بالأميال

$VKT = N_j M_j$ (عدد الكيلومترات التي تقطعها المركبات في السنة) على أساس
المسافة M_j بالكيلومتر

التشتيت المساري

الدالة الخاصة بالتركيز المنتشت $[C]_j$ للملوثات هي :

$$[C]_j = f(D_j(p, x, t)) \quad (٥,٨)$$

حيث إن :

D_j = التشتيت الناتج عن العملية p في المكان x عند الزمن t
وبحيث يكون z = الانتشار (الهواء الساكن)

الانتقال بالحمل (تدفق الهواء والخلط)

التفاعلات الكيميائية (تشكل الضباب الدخاني مثلاً)

عمليات الإزالة (بسبب المطر أو الاجتراف أو غيرهما)

تعرض السكان للملوثات

العلاقة بين التعرض للملوثات وجرعة ذلك التعرض هي :

$$D_i(x, t) = \sum P_k [C_i](x, t) F(i, k, X, T) \quad (٥,٩)$$

حيث إن :

D_i (جرام/فرد) = الجرعة التي يحصل عليها السكان من الهواء في تلك المنطقة ،

وذلك لكل مجموعة سكانية رمزها k تتعرض لتركيز المادة الملوثة i الموجود في الهواء مع

معامل قياس جرعات رمزه F ، وذلك للتعرض للمادة الملوثة في المسار X على مدى فترة تعرض مقدارها T يومياً.

k = العمر، والجنس، ...، المجموعات

X = الاستنشاق، والهضم (الماء، الطعام)، والامتزاز (adsorption)

T = دالة في مقدار الزمن المنقضي في أجواء داخلية أو خارجية، ... إلخ.

التأثيرات على الصحة

عدد التأثيرات على الصحة في السنة هو:

$$H_{i,j} = \sum D_{i,k} R_{k,l} \quad (5,10)$$

حيث إن:

$H_{i,j}$ = عدد التأثيرات على الصحة من النوع l كدالة في الجرعة التي يحصل عليها

السكان والتي تؤثر على العضو k مع احتمال مقداره R أن تؤدي تلك الجرعة إلى التأثير على الصحة من النوع l .

l = سرطان الرئة، والربو، وتهيج العيون، ...

القيمة الصحية

القيمة الاقتصادية لتقليل انبعاثات المركبات بإحلال وقود الهيدروجين (H_2) محل

الوقود الأحفوري من النوع (ff) هي:

$$V_i = \sum (H_{i,j}(ff) - H_{i,j}(H_2)) W_i \quad (5,11)$$

حيث إن:

W_i = عامل الترجيح (weighting factor) للخطورة النسبية للمرض من النوع l

التي يعبر عنها بوحدات التكلفة مثل دولار/فرد أو سنت/ميل.

(٥,٥) بعض البيانات عن الهواء المحيط بمدينة لوس أنجلوس

Some Data for the Los Angeles Air Basin

تُعد مدينة لوس أنجلوس وضواحيها ، والتي تعتبر جزءاً من منطقة إدارة جودة الهواء في الساحل الجنوبي في ولاية كاليفورنيا ، واحدة من أشد المدن تعرضاً لتلوث الهواء (وأكثرها دراسة) في الولايات المتحدة. وتم تسجيل الآثار الصحية وتقييمها للملوثات الهواء وللآثار الصحية لها وهي :

الآثار الصحية	الملوث
مشكلات في التنفس وتلف الرئتين	تركيز أكاسيد النيتروجين
مشكلات في التنفس وتلف الرئتين	تركيز أكاسيد الكبريت
سام بسبب نقص الأوكسجين	تركيز أول أكسيد الكربون
مشكلات في التنفس وتلف الرئتين ، والربو ، تهيج العينين ، ضرر للأنف	تركيز الأوزون
الالتهاب الشعبي ، وتهيج العينين والأنف والحلق	تركيز الأجسام الدقيقة العالقة
التلف الدماغي	تركيز الرصاص

ونشر تقدير أولي للقيمة الاقتصادية لتقليل تلوث الهواء المحيط بمدينة لوس أنجلوس وما حولها عام ١٩٩٥ م (لويد [14]) بناءً على البيانات الطبية التي نشرها هول وزملاؤه عام ١٩٩٢ م [15] وقد كانت النتائج كما يأتي :

القيمة التقديرية لتقليل تلوث الهواء	٩,٨ مليار دولار سنوياً [15]
بيانات حركة المركبات في السنة	$VMT = 1.1 \times 10^{11}$ ميل/سنة [14]
القيمة الوبائية (epidemiological value)	٤,٥ سنت/ميل
بناءً على تلوث هواء مقداره ٥٠٪ من المركبات التي تعمل بالوقود	

يستعرض الفصل العاشر تقييماً أحدث للقيمة المرتبطة بتقليل تلوث الهواء عن طريق إحلال الهيدروجين محل الوقود الأحفوري.

(٥,٦) الخلاصة

Summary

قدم هذا الفصل المفهوم الأساسي للأثر البيئي بطريقة هندسية للتمييز بين عاملي الكمية والخطورة (مدى الأثر السلبي). وتمت دراسة العلاقة بينهما من خلال العبء البيئي والعواقب البيئية. وكان المثال الذي طرح على ذلك هو القلق الشعبي حول إضافة الفلورايد إلى مياه الشرب ومعجون الأسنان، وهي قضية مستمرة حتى اليوم. كما تمت دراسة جوانب الكمية والخطورة الخاصة بانبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري والتغير العالمي في المناخ على مستوى العالم وانبعاث أكاسيد النيتروجين من المركبات والتأثيرات الصحية الوبائية للضباب الدخاني على مستوى المدن. وسيتم في الفصل العاشر دراسة القيمة الظاهرية لتقليل تلوث الهواء عن طريق استخدام وقود الهيدروجين.

المراجع References

- [1] *San Francisco Chronicle*, December 15, 1999.
- [2] *Palo Alto Daily News*, May 17, 2003.
- [3] B. Hileman, "Fluoride Concerns Surface Again," *Chemical & Engineering News*, August 7, 2003.
- [4] R. L. Bradley, Jr., *The Increasing Sustainability of Conventional Energy*. Policy Analysis No. 341. Washington, DC: Cato Institute, April 1999.
- [5] T. G. Moore, *Climate of Fear: Why We Shouldn't Worry About Global Warming*. Washington, DC: Cato Institute, 1998.
- [6] World Meteorological Organization, *Report on Atmospheric Carbon Dioxide*. WMO-474, 1977.
- [7] J. T. Houghton et al., *Climate Change: 1995: The Science of Climate Change*. IPCC Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

- [9] C. D. Keeling and T. P. Whorf, *Atmospheric Carbon Dioxide Record from Manua Loa 1958-2004*. MLO-145, May 19, 2005. Available at cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm.
- [10] World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- [11] United Nations Environment Programme. *Urban Air Pollution in Mega Cities of the World*. Nairobi, Kenya: UNEP, 1992.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency, *National Air Pollutant Trends*, EPA 454/R-00-72, Washington, D.C. 1972.
- [13] U.S. Environmental Protection Agency, *National Air Pollutant Trends*, EPA 454/R-00-002, Washington, D.C. 2002.
- [14] A. C. Lloyd, "The Role of Hydrogen in Meeting Southern California's Air-Quality Goals." Proceedings, International Hydrogen and Clean Energy Symposium '95, Tokyo, Japan, February 1995.
- [15] J. V. Hall, A. M. Winer, M. T. Kleinman, F. W. Lurman, V. Brajer, and S. D. Colome, "Valuing the Health Benefits of Clean Air." *Science* 225: 812-817, 1992.