مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (32) العدد (2) 2010
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (32) No. (2) 2010

دراسة تحليلية حول تكاليف تخفيض إصدار محركات السفن لأكاسيد الكبريت

الدكتور بسام حمود*

(تاريخ الإيداع 30 / 12 / 2009. قُبِل للنشر في 23/ 3 / 2010)

□ ملخّص □

مع تفاقم المشاكل البيئية ازداد الوعي البيئي بشكل عام. ولكن لم يؤخذ بعين الاعتبار القطاع البحري رغم اضطلاعه بـ 90% من التجارة العالمية إلا منذ التسعينيات من القرن العشرين. منذئذٍ بدئ بجدية بدراسة الآثار البيئية للنقل البحري، ريثما أصبح الأثر السلبي للسفن على البيئة حقيقة ثابتة في الوقت الحاضر، وقابلاً للمقارنة بمصادر التلوث الأخرى.

يهدف هذا البحث إلى تقديم فكرة واضحةً عن آخر المستجدات المتعلقة بالإصدارات المختلفة الضارة بالبيئة الناتجة عن المحركات البحرية من حيث مكوناتها وأضرارها بشكل عام، وتركّز على أحدث وأهم الطرائق المطروحة للتخلص من أكاسيد الكبريت، بحيث تجعلها ضمن المجالات المحددة من قبل المنظمة البحرية الدولية IMO.

لمقارنة اقتصادية طرائق التخلص من غازات SO_x التي تطلقها السفن، تم تحليل بيانات سفينتي نقل عام خلال ستة أشهر من عام 2008، وحساب تكاليف تقليل إصدارهما لأكاسيد الكبريت بنسبة 90%.

تبين هذه الدراسة بأنه في ظل عدم استقرار أسعار الوقود واحتمالات تصاعدها، فمن المفضل اللجوء إلى طريقة تركيب أجهزة تقوم بسحب أكاسيد الكبريت باستخدام ماء البحر، لأنها الأكثر اقتصاديةً وكفاءةً حتى في الوضع الحالي لأسعار الوقود.

الكلمات المفتاحية: محركات الديزل البحرية، الإصدارات، تلوث البيئة البحرية.

* أستاذ مساعد – قسم الهندسة البحرية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (32) العدد (2) 2010
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (32) No. (2) 2010

Analytical Study About The Costs of Sulphur Oxides Reduction from Ship Engines

Dr. Bassam Hammoud *

(Received 30 / 12 / 2009. Accepted 23 / 3 / 2010)

□ ABSTRACT □

With increasing of environmental problems, the general awareness increased too. But the marine sector has not been realized till 90th of 20 century, despite its 90% participation of international trade. The environmental impact of ships is now a fact.

This paper aims to give a clear and actual idea about the different harmful emissions of marine engines, and concentrates on the most important and modern methods for reduction of sulphur oxides and making it in the allowable levels of IMO.

For the comparison of economy of different methods to reduce Sox from ships, the data of two ships during 6 months in 2008 have been analyzed and the costs have been calculated. The study proved that the use of Seawater Scrubbers is convenient, because of the high prices of light marine fuels.

Key Words: Marine Diesel Engines, Emissions, Marine Environment Pollution.

مقدمة:

***Associate Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Tishreen University, Lattakia , Syria.**

أصبحت إصدارات السفن للغازات الضارة موضوعاً مهماً في وسائل الإعلام، الأمر الذي دفع المنظمة البحرية الدولية لدراسة هذه الإصدارات ووضع تعليمات ولوائح تحدد القيم القصوى المسموح بها لكل من الإصدارات، مع الإشارة إلى أن التعليمات تزداد صرامةً مع الوقت.

في تسعينيات القرن الماضي توصل الباحثون إلى أن للنقل البحري آثاراً بيئية كبيرة على الصعيد المحلي والإقليمي والعام. وأكدت الدراسات التالية ذلك، و في الوقت الحاضر أصبح الأثر السلبي للسفن على البيئة حقيقة ثابتة.

كان تركيز الأبحاث في البداية على أكاسيد الكبريت والآزوت، ثم امتد للتعرض لآثار ثاني أوكسيد الكربون السلبية، وارتباط إطلاق هذا الغاز إلى الوسط الجوي بظاهرة الاحتباس الحراري.

وقد قامت المنظمة البحرية العالمية IMO بنشر التقارير المقدمة إليها عن إصدارات السفن المختلفة بما فيها CO_2، وبدئ بالنظر إلى هذه القضية بجدية أكبر مما ظُنّ بالبداية. كذلك تم التعمق ببحث الآثار السلبية لإصدار السفن للحبيبات Particles Matter (PM).

أهمية البحث وأهدافه:

نظراً لأهمية النقل البحري وكون السفن هي وسيلة النقل الأكثر اقتصادية والأقل ضرراً بالبيئة، واعتبارها العمود الفقري للتجارة الدولية عبر اضطلاعها بنقل ما يزيد على 90% من التجارة العالمية، فقد تم التركيز في السنوات الأخيرة بشدة على مسألة الضرر البيئي الناتج عن النقل البحري، خاصةً بعد أن تبين أن إصدارات السفن لا يُستهَان بها وبأنها مقاربة لإصدارات وسائل النقل الأخرى.

يهدف هذا البحث إلى إلقاء الضوء على آخر المستجدات المتعلقة بالمشاكل البيئية التي تُسبّبها غازات الاحتراق التي تطلقها محركات السفن، وحساب تكاليف إجراءات تخفيض انطلاق المركبات الضارة عبر استخدام طريقتين مختلفتين، تقوم أولاهما على استخدام أنواع من الوقود منخفضة المحتوى من الكبريت وأخرى عبر تركيب أجهزة لسحب أكاسيد الكبريت من غازات الاحتراق بواسطة غاسلات تستخدم ماء البحر.

طرائق البحث ومواده:

لتحقيق الأهداف المذكورة، تم أولاً استعراض غازات الاحتراق التي تطلقها محركات السفن من حيث تركيبها وآلية نشوئها وأضرارها البيئية، ثم عرضت باختصار الأساليب المختلفة لتخفيض هذه الإصدارات.

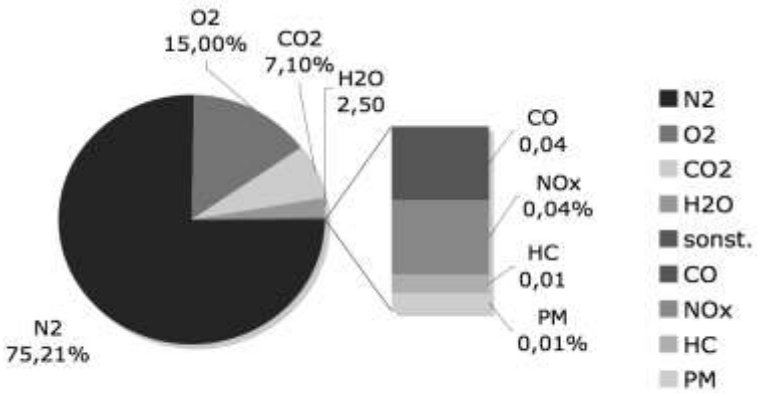
وللإيضاح الدقيق لتكاليف التخلص من الغازات الضارة الصادرة عن السفن، فقد تم الاعتماد على بيانات سفينتي نقل عام بالتعاون مع شركة النقل البحري التي تستثمر هاتين السفينتين، وأجريت مقارنة حسابية بين تكاليف طريقتين مختلفتين لتخفيض أكاسيد الكبريت في غازات الاحتراق بنسبة 90%.

إصدارات السفن للغازات الضارة

أنواع الإصدارات

تتعلق كمية وتركيب غازات الاحتراق الناتجة عن إحراق الوقود في المحركات البحرية بعوامل عدّة تضم نوع المحرك واستطاعته وحالته الفنية ونوع الوقود المستخدم. وتستخدم في النقل البحري بشكل رئيس محركات ديزل بطيئة الدوران (80 إلى 200 دورة بالدقيقة) ثنائية الشوط كمحركات رئيسة لدفع السفينة، ومحركات متوسطة سرعة الدوران (300 إلى 1200 دورة بالدقيقة) كمحركات مساعدة (لتوليد الكهرباء).

والغازات الرئيسة التي تطلقها محركات السفن هي ثاني أوكسيد الكربون **CO_2** و أول أوكسيد الكربون **CO** و أكاسيد الكبريت **SO_x** و حبيبات الكربون **PM**، إضافةً إلى غازات ثانوية تشمل أكاسيد النيتروجين **NO_x** والأوزون، ويبين الشكل (1) النسب المئوية لكل من المركبات المذكورة [1].



الشكل (1) النسب المئوية الكتلية لمكونات غازات احتراق محركات السفن

كما أشرنا سابقاً فإنه لم يتم إعلان الآثار السلبية لغازات محركات السفن على البيئة والإنسان إلا بشكل متأخر نسبياً مقارنةً بغازات السيارات. وأضرار هذه الإصدارات أصبحت معروفة، حيث تشكل **أكاسيد الكبريت SO_x** مع رطوبة الجو حموضاً كبريتية H_2SO_4 وتتسبّب أكاسيد النيتروجين **NO_x** بنشوء حمض الآزوت HNO_3 كما تبين المعادلات الآتية:

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2\ SO_3$$
$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$
$$2\ NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_2 + HNO_3$$

أما غاز **CO_2** فهو مسؤول عن ظاهرة البيت الزجاجي (احتباس الحرارة وارتفاع درجة الحرارة في الغلاف الجوي). كما يخفّض **CO** قدرة الدم على امتصاص الأوكسجين ويمكن أن يسبّب الاختناق. وتتألف حبيبات الكربون PM بدورها من فحوم هيدروجينية مختلفة، بعضها شديد السمية ويعدُّ مسبباً للسرطان.

ينشأ **الأوزون** بفعل تفاعل الفحوم الهيدروجينية وأكاسيد الكربون مع الأوكسجين بوجود ضوء الشمس، وارتفاع تركيز الأوزون في الجو يؤدي إلى نشوء الضباب الدخاني smog.

إن إصدارات السفن لـ CO_2 صغيرة مقارنة بوسائل المواصلات الأخرى، وتدل الإحصاءات أن نسبة مساهمة السفن بإصدار CO_2 هي فقط 2.7%. بينما يختلف الأمر عند مقارنة إصدارات السفن لكل من SO_x و NO_x حيث تحتل الموقع الأعلى. وسنعرض فيما يلي وباختصار أهم المعلومات المتعلقة بإصدارات المحركات البحرية.

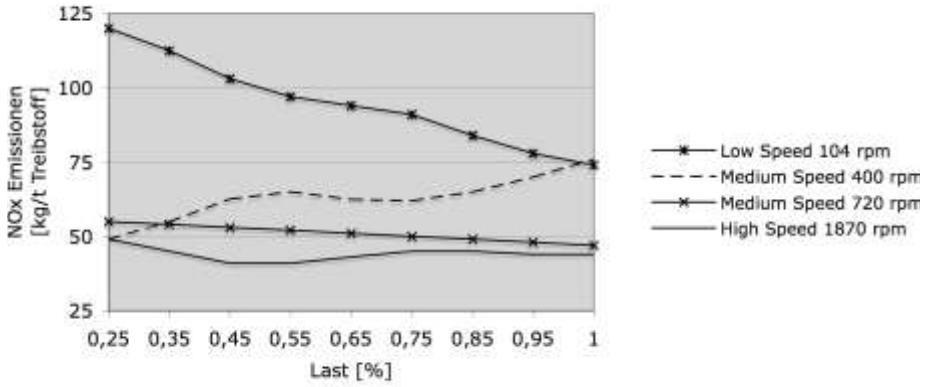
1- أكاسيد الكبريت SO_x

يرتبط إصدار سفينة ما لأكاسيد الكبريت مباشرة بمحتوى الوقود للكبريت، حيث يتحول 95% من هذا الكبريت إلى SO_2 و 5% إلى SO_3. ووفقاً للملحق السادس لمعاهدة ماربول، فإنه يسمح للوقود الثقيل المستخدم على السفن HFO أن يتضمن كحدٍّ أقصى 4.5% من وزنه كبريتاً أي ما يعادل 45000 ppm، مع العلم أنّ القيمة الوسطية عالمياً لمحتواه من الكبريت هي فقط 2.7% وزناً أي اقل مما هو مسموح به.

أحد الاقتراحات التي يتم تداولها الآن هو الاستغناء عن الوقود الثقيل HFO **الناتج عن رواسب مصافي النفط** (اختصار لـ Heavy Fuel Oil) على السفن واستخدام النواتج الخفيفة لتكرير النفط مثل MDO (Marine Diesel Oil) أي وقود الديزل البحري، و يسمح ذلك بتخفيض إطلاق محركات السفن لأكاسيد الكبريت بشكل كبير. إلا أن المشكلة هي غلاء الأخير، إذ يزيد سعره عن الوقود الثقيل بمقدار 50%

2- أكاسيد الآزوت NO_x

إن إصدار هذه الأكاسيد – بعكس سابقتها- غير مرتبط بنوع الوقود المستخدم، بل بسرعة دوران المحرك وحمولته كما يبين الشكل (2). تنشأ أكاسيد الآزوت بسبب درجات الحرارة المرتفعة في المحرك، إذ يتفاعل الأوكسجين الموجود في الهواء مع الآزوت الموجود في الوقود فينشأ 95% NO و 5% NO_2 ، ثم يتأكسد NO في الهواء المحيط خلال ساعات قليلة لينشأ NO_2 [2].



الشكل (2) كميات إصدار المحركات البحرية لـ NO_x $\left[\frac{kg}{ton_{fuel}}\right]$ وفقاً لنسبة حمولتها عند سرعات دوران مختلفة

يجري السعي لتخفيض استهلاك محركات الديزل للوقود عادةً من خلال رفع درجة الحرارة في الأسطوانات، الأمر الذي يساعد على زيادة إصدارات **NO_x**، أي إن ثمة تضارباً في السعي بالوقت نفسه لتحقيق الهدفين: تخفيض **NO_x** (ومعه CO_2 وإصدار الحبيبات) والاستهلاك النوعي للوقود. إن تخفيض إصدارات NO_x بنسبة 90% في الأوضاع الراهنة ممكن عبر تحقيق ظروف الاحتراق المثلى في داخل المحرك وتركيب الحفازات التي تعالج غازات الاحتراق المنطلقة من المحرك.

3- أول أوكسيد الكربون CO

ينتج عن عدم التأكسد الكامل للوقود المستحاثي في المحرك. يتعلق نشوء **CO** بجودة تحضير الشحنة وبدرجة حرارة الاحتراق، وكلما كانت كمية الهواء المتوفرة في حجرة الاحتراق أقلّ ودرجة الحرارة أعلى فإن إصدار **CO** يكون أكبر. وبما أن عامل فائض الهواء في محركات الديزل المشحنة أكبر من الواحد، فإن إصداراتها لـ **CO** قليلة الأهمية. لتخفيض إصدار المحركات لـ **CO**، فإنه يُلجأ إلى إجراءات متعلقة بعملية الاحتراق كالتحكم بالأبعاد الهندسية لحجرة الاحتراق أو معالجة غازات الاحتراق بواسطة الحفازات المؤكسدة.

4- ثاني أوكسيد الكربون CO_2

ينشأ **CO_2** في أي احتراق لوقود مستحاثي. المعادلة الكيميائية الناظمة لعملية احتراق الوقود المؤلف بالدرجة الأولى من الكربون والهيدروجين هي:

$$C_xH_y + (x + y/4)\ O_2 = x\ .\ CO_2 + (y/2)\ .\ (H_2O)$$

ويتضح من المعادلة بأن نواتج الاحتراق الماء و **CO_2** فقط، مع العلم أنّ كميات الإصدارات متعلقة بنسبة الهيدروجين إلى الكربون في الوقود، و تتناسب كمية **CO_2** طرداً مع الاستهلاك النوعي للوقود ومحتوى الوقود من الكربون.

لا يتم الاحتراق بشكل مثالي عملياً، بل تنشأ مواد أخرى ضارة. لم تضع منظمة IMO حدوداً بخصوص إصدار **CO_2** من السفن، ولكن توجد مداولات لابتداع قاعدة في هذا المجال لتقليل إصداره، كما هو الحال في الاقتراح المقدم من قبل لجنة حماية البيئة البحرية MEPC في تشرين الثاني 2008 لاعتماد دليل التصميم الاقتصادي للسفينة أي Energy Efficiency Design Index أو في اقتراح اللجنة نفسها عام 2005 لما يطلق عليه "دليل CO_2" [3] الذي يفترض أن يعبر عن فعالية النقل الذي يتوقع استخدامه مستقبلاً، وهو يعطى بالعلاقة:

$$CO_2\,Index\left[\frac{g_{co2}}{t\times sm}\right]=\frac{\sum FC\times C_{arbon}}{\sum m_{Cargo\,i}\times D_i}$$

حيث: FC استهلاك الوقود [t] ، C نسبة الكربون في الوقود [%] ، m مجموع أوزان الحمولات المنقولة [t] ، D الأميال البحرية المقطوعة.

ويشير هذا الدليل إلى كمية غاز **CO_2** المطروحة عبر حرق الوقود لكل طن من الحمولة عند نقلها لمسافة ميل بحري واحد.

5- الفحوم الهيدروجينية غير المحترقة HC والمركبات العضوية الطيارة VOCs

تنشأ الفحوم الهيدروجينية غير المحترقة في محركات الديزل عندما لا تتوفر درجات الحرارة العالية بالقدر الكافي لحدوث الاحتراق، ويحدث هذا بشكل خاص عند الحمولات الجزئية للمحرك. وبما أن إصدار الفحوم الهيدروجينية غير المحترقة من محركات السفن العاملة على وقود الديزل أو الفيول الثقيل مهمل، فإنه لا توجد تجهيزات خاصة لتخفيضها. واستخدام منقيات غازات الاحتراق العاملة بماء البحر لسحب أكاسيد الكبريت يسمح بتخفيض إصدار HC كذلك بنسبة 20%.

يقصد بـ VOCs مجموعة واسعة من الروابط العضوية الخفيفة ذات المواصفات الفيزيائية والكيميائية المختلفة. ومن بينها فحوم هيدروجينية صرفة مثل الألكانات والألكينات والأرومات، إضافةً إلى مجموعة من المركبات الغنية بالأوكسجين مثل الكحول والإيثر والألدهيدات والكيتونات، ومجموعة أخرى من الفحوم الهيدروجينية الهالوجينية. عموماً يقصد بـ **VOCs** المركبات العضوية التي يكون ضغط تبخرها عند الدرجة 20°C أقل من 0.13 kPa. نظراً للتأثير الشديد على البيئة وارتفاع محتوى الإصدارات فقد ثبت ضرورة مراعاة الميتان بشكل منفصل [4]، وبقية المركبات العضوية تحت التسمية **NVOC**.

يعتبر الميتان من الغازات المسؤولة عن الاحتباس الحراري وبالتالي تحول المناخ. أما **NVOC** فهي تتفاعل مع أكاسيد الآزوت بوجود أشعة الشمس لتشكل الأوزون والبيروكسيدات (pyroxides) التي يؤدي وجودها في الجو إلى تهييج العينين والحنجرة والأنف، ومع ازدياد تركيزها يتشكل ما يسمى الضباب الدخاني (Smog) الذي يتألف من دخان (Smoke) وضباب (Fog). يسبب الضباب الدخاني إتلاف المزروعات ويؤدي إلى تردي حالة المصابين بأمراض القلب والجهاز التنفسي. كما تؤدي مركبات C_nH_m في محركات الديزل عند تجاوز تركيزها لحدودٍ معينة (خاصةً الألدهيدات) إلى صدور الروائح الكريهة التي يُعرَف بها محرك الديزل لدى عمله في مجال الحمولات المنخفضة أو من دون حمل.

6- الحبيبات Particle Matters (PM)

يقصد بـ "**الحبيبات** " وفقاً لما هو مذكور ضمن معيار "إصدارات محركات الاحتراق الداخلي وفق ISO 8217 " : "*جميع مكونات غازات الاحتراق التي يمكن فصلها بالحالة الصلبة أو السائلة عن طريق مصفاة (فلتر) عند درجات أقل من 52°C*".

ينشأ الكربون الحر (السخام) والفحوم الهيدروجينية نتيجة عدم الاحتراق الكامل، ويمكن تخفيض هذه النواتج بوساطة إجراءات تتخذ ضمن المحرك، ولكنها لا تشكل إلا جزءاً صغيراً من إصدار الحبيبات.

وبالمقابل فإن كميات الكبريتات والمياه المتجمعة معها تشكل نسبة كبيرة من الحبيبات. أما كميات الرماد المتأكسد الصادرة فهي متعلقة بمحتوى الوقود من الرماد وبمدى تآكل المحرك وبنسبة المواد المضافة إلى زيت التزليق. وإجراءات تخفيض إصدار الحبيبات مرتبطة بإجراءات تخفيض محتوى الوقود من الكبريت.

تأثير الإصدارات على البيئة

نشرت المنظمة الدولية لتغيرات المناخ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) بأن المناخ قد تغير خلال الـ 150 عاماً الماضية، وبأن البشر هم المسؤولون عن هذا التغير. ومنذ الثورة الصناعية قبل حوالى مائتين وخمسين عاماً ارتفع تركيز بعض الغازات في الغلاف الجوي. وتؤكد الصور الملتقطة بالأقمار الصناعية

تأثير السفن في رفع نسبة تركيز أكاسيد النيتروجين في بعض مناطق النقل البحري، وينطبق الشيء نفسه على كميات أكاسيد الكبريت وهباب الفحم التي تسبب نشوء غيوم كثيفة في المناطق المأهولة بالسفن.

لتقدير تأثير الإصدارات على المناخ استخدم مقدار ارتفاع درجة حرارة الجو بفعل الإصدارات. كما تبين أن هناك جزءاً كبيراً من هذه الإصدارات يصل إلى مسافة تبلغ 400 كيلومتراً من موقع إطلاقه، وبأن ذلك يمكن أن يسبب في المدن الساحلية ذات النقل البحري الكثيف تردياً كبيراً في مواصفات الهواء. وتقدر الدراسات نسبة الوفيات بأمراض القلب والرئة والسرطانات الرئوية سنوياً بسبب إصدارات السفن بحوالى 8% من الوفيات الإجمالية الناتجة عن الإصدارت البشرية الكلية.

طرق تخفيض إصدار أكاسيد الكبريت

ثمة أساليب متعددة لتقليل إصدارات النقل البحري من أكاسيد الكبريت سنعرضها فيما يأتي:

1- استخدام وقود ذي نسبة كبريت منخفضة

تبلغ القيمة الوسطية للكبريت في الوقود المستخدم عالمياً للنقل البحري 2.7% ، وهناك نسبة قليلة من الوقود تصل فيها نسبة الكبريت إلى 4.5%، وهي ضمن الحدود المسموح بها عالمياً من قبل المنظمة البحرية الدولية IMO.

في الجلسة السابعة والخمسين (نيسان 2008) للجنة المسؤولة عن حماية البحار (MEPC) اقترح تعديل الحدود القصوى لمحتوى الوقود الثقيل من الكبريت بحيث لا تزيد بعد كانون الثاني 2012 عن 3.5% وقد أقر ذلك بشكل أولي في تشرين أول 2008. في أيار 2005 كانت أدخلت جملة قواعد لتقليل إصدار الكبريت في بعض المناطق الحساسة بشكل خاص تابعة للبحر البلطيق، الغاية منها مراقبة إصدار أكاسيد الكبريت وأطلق على هذه المناطق Sulphur Emission Control Areas، اختصاراً (SECA) ، وأضيف إليها في عام 2006 بحر الشمال. لا يُسمح في هذه المناطق أن يستخدم للنقل البحري وقود تزيد نسبة الكبريت فيه على 1.5%. وفي الجلسة الـ 58 لـ MEPC في 2008 أضيفت تعليمات جديدات بخصوص إصدار أكاسيد الكبريت بحيث لا تزيد نسبة الكبريت في الوقود البحري المستخدم في مناطق SECA بعد آذار 2010 على 1% وبعد كانون الثاني 2015 على 0.1%. ويُنتظر أن تؤدي هذه التشريعات إلى تخفيض الأذى البيئي المرتبط بالكبريت.

2- سحب أكاسيد الكبريت من غازات الاحتراق

بدلاً من الطريقة سابقة الذكر واستخدام أنواع الوقود البحري الغالية التي تتضمن كميات منخفضة من الكبريت، فإن من الممكن مراعاة تعليمات IMO المتضمنة الحدود 6 g/kWh عبر استخدام تجهيزات تلتقط أكاسيد الكبريت من الغازات، وتمنعها من الانطلاق إلى الوسط المحيط وتلويثه.

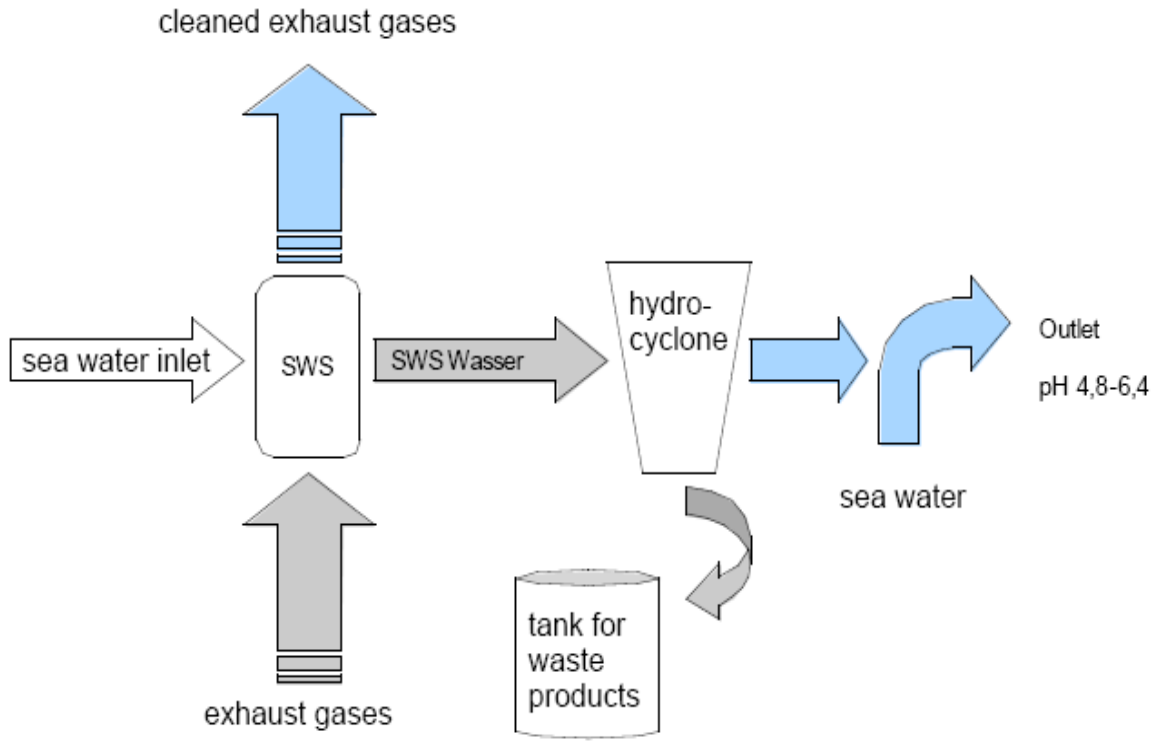
كما أشرنا تبلغ نسبة الكبريت في الوقود البحري حوالى 2.7%. فإذا أردنا إبقاء نسبة الإصدارات في الحدود المقابلة لـ 1.5% كبريت في الوقود، يجب استخدام تجهيزات لسحب أكاسيد الكبريت من الغازات قادرة على سحب 44% من SO_2 الموجود في الغازات. ومن أجل تحقيق تخفيض في إصدار أكاسيد الكبريت يعادل إصدار الوقود المتضمن 0.1% فقط كبريت في منطقة SECA بعد عام 2015، يجب أن يكون مردود تجهيزات سحب SO_2 بحدود 96.3%.

سبق أن استخدمت هذه التجهيزات بأنواعها الرطبة والجافة على البر، ولكن يجري الآن إدخالها إلى المجال البحري.

أ- التنقية باستخدام ماء البحر Sea Water Scrubbing (SWS)

يقوم ماء البحر في هذه الطريقة المبينة في الشكل (3) بسبب قلويته الطبيعية بمهمة التنقية. ترسل نواتج الاحتراق exhaust gases إلى حجرة تنقية (SWS) مركبة في المدخنة، يجري بها حقن ماء من البحر Sea Water. هنا يقوم الماء بامتصاص أكاسيد الكبريت، وعبر إرسال الهواء يتم تحويل الأكاسيد إلى حمض الكبريت. ثم يتم سحب المواد الضارة والسخام Waste products من ماء البحر في الفاصل الدوراني Hydro cyclone وإرسال الفضلات إلى خزان الأوحال Tank الذي يسلم على اليابسة. تتعلق كمية ماء التنظيف اللازمة بمستوى التنظيف المطلوب للغازات ودرجة حرارة الماء بحيث:

- يؤدي ارتفاع محتوى الغازات من أكاسيد الكبريت إلى ازدياد استهلاك الماء
- بانخفاض درجة حرارة الماء تقل كمية الماء اللازمة.



الشكل (3) تنقية أكاسيد الكبريت باستخدام ماء البحر

وفقاً لمعطيات الشركة المنتجة krystallon ، فإنه من أجل وقود نسبة الكبريت فيه 3%، تسمح هذه الطريقة بتخفيض SO_2 في الغازات بنسبة (90– 95%) والـ NO_x بنسبة (10 – 20%) والسخام soot بنسبة 80% والهيدروكربونات بنسبة (10 - 20%) [5]. ولتنقية للغازات بنسبة 100% تلزم كمية من ماء البحر قدرها 45 t/h لكل MW، وكمية من الطاقة تقارب 1% من الاستطاعة الإجمالية للمحرك الذي تعالج غازاته في هذه الوحدة. وتنشأ في النهاية كمية من الفضلات الحاوية على (5– 10%) زيت، وهذه يجب التخلص منها على البر.

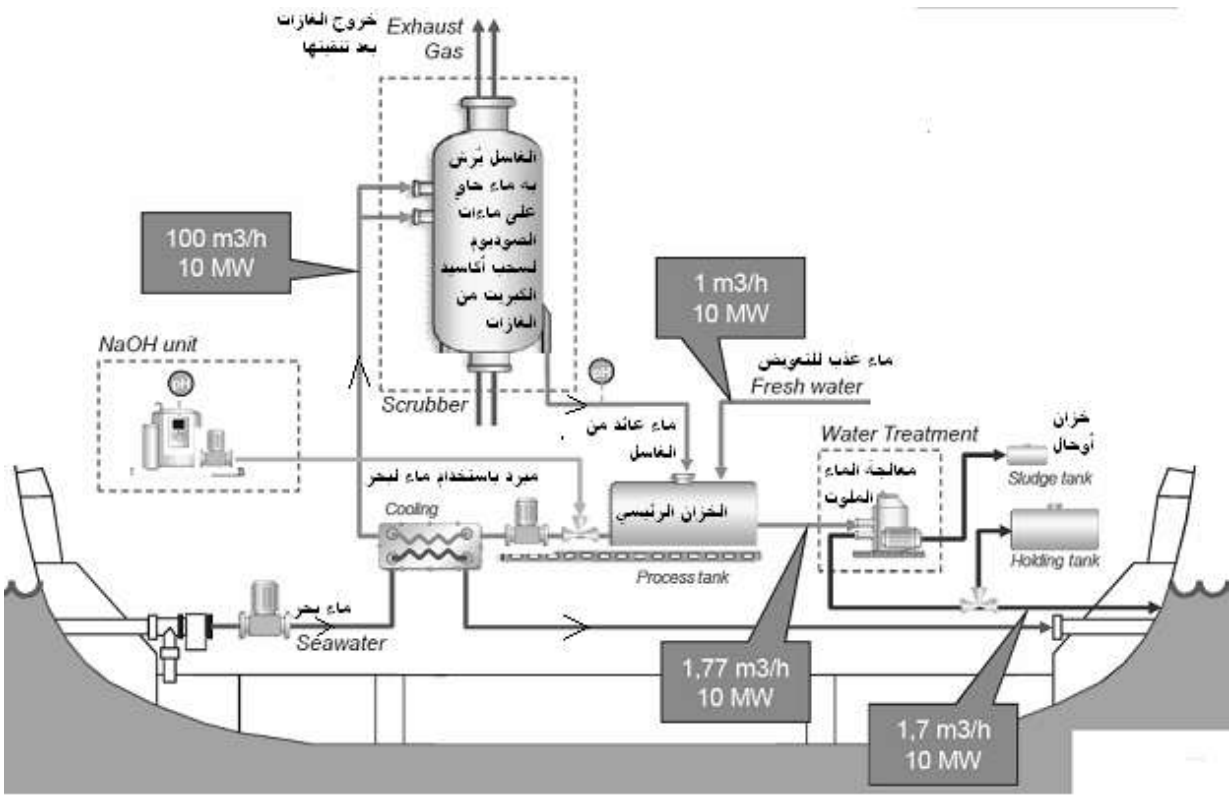
ب– التنقية باستخدام الماء العذب Fresh Water Scrubbing

تستخدم لهذا الغرض دارة مغلقة تتضمن خزاناً رئيساً للماء ووحدةً لإرسال ماءات الصوديوم ومبرداً (يجتازه ماء البحر). يُرشّ محلول ماءات الصوديوم في الغاسل Scrubber على الغازات المراد تنقيتها من أكاسيد الكبريت، فيتفاعل المحلول مع SO_2 الموجودة في غازات الاحتراق منتجاً $NaHSO_3$ ويتأكسد لاحقاً إلى Na_2SO_4.

كما هو مبين في الشكل (4) يمرر الماء العذب قبل استخدامه إلى الغاسل على مبرّد cooling، وكمية الماء اللازمة تبلغ 15 t /MWh. وللتعويض عن الكميات المتبخرة من الماء (بحدود 1 m^3/h فقط) نضيف عند الحاجة ماءً عذباً. تصل نسبة تخفيض SO_x الموجودة بغازات الاحتراق عبر استخدام هذه الطريقة 90% [6].

يبلغ تدفق تيار الماء الملوث حوالي 1.77 m^3/h ، وهو يُسحب من الخزان الرئيس ويُرسل إلى منشأة معالجة water treatment، حيث تفصل عنه الحمأة sludge (بحدود 0.07 m^3/h) وتُجمع في خزانات لتسليمها والتخلص منها على البر.أما المياه المتبقية فيمكن إرسالها إلى البحر أو جمعها في خزانات خاصة Holding tank.

للوصول إلى تخفيض أكاسيد الكبريت بنسبة 50% يلزم 80 ليتراً من NaOH في الساعة وكمية من الطاقة أقل من 1% من الاستطاعة الإجمالية للمحرك الذي تعالج غازاته في هذه الوحدة. تعادل تكاليف NaOH النسبة 0.5 إلى 4% من تكاليف الوقود.



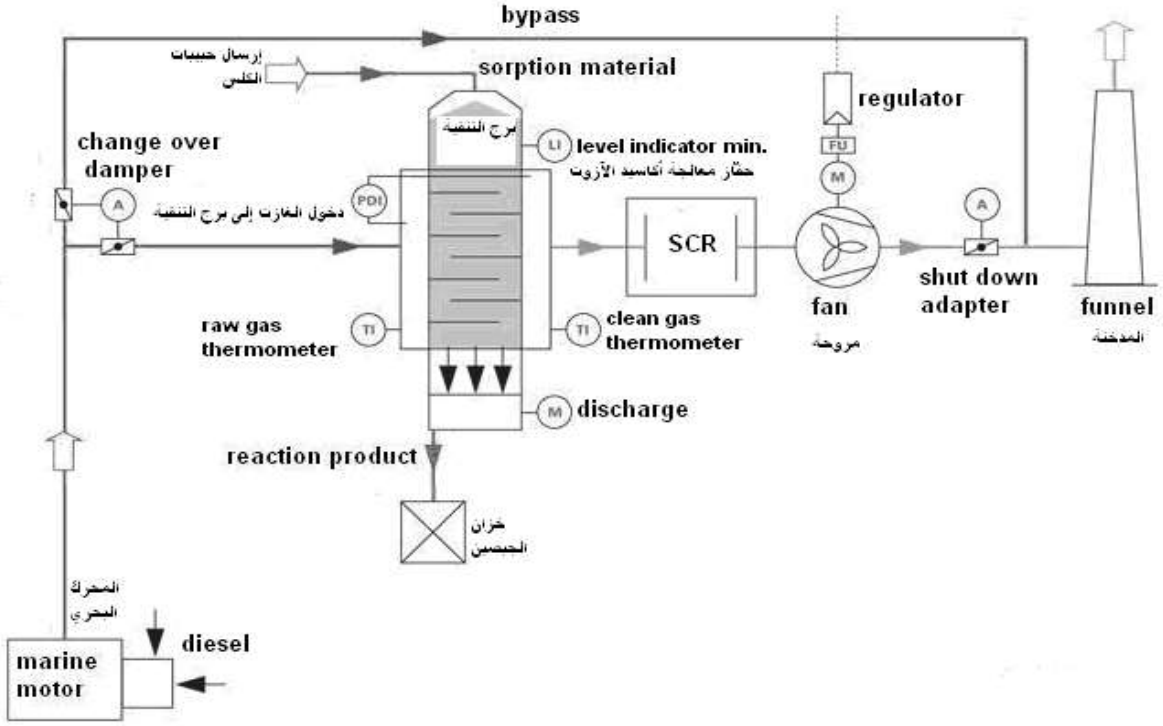
الشكل (4) تنقية أكاسيد الكبريت باستخدام الماء العذب

جميع القيم السابقة محسوبة من أجل آلة استطاعتها 10 MW تعمل بوقود نسبة الكبريت فيه 2.7%.

المزية المهمة لهذه الطريقة هي عدم إطلاقها لأي فضلات (Zero-Discharge)، لذلك تستطيع المنشأة العمل في الميناء بدون أية أضرار للماء أو للهواء. كما تعمل المنشأة بصرف النظر عن تركيب ماء البحر وبفعالية ثابتة. أما محذورها فهو الحاجة إلى ماءات الصوديوم وضرورة حملها على السفينة.

ج- التنقية بالطريقة الجافة عبر امتصاص أكاسيد الكبريت بواسطة حبيبات الكلس Dry Absorption Method

في هذه الطريقة يُضاف الكلس الجاف على شكل حبيبات إلى مفاعل (برج) من أعلاه، وترسل غازات الاحتراق من الجانب الأيسر للمفاعل كما هو مبين في الشكل (5). تُقسم الغازات المغادرة للمحرك البحري إلى جزأين، أولهما يُرسَل إلى برج التنقية والآخر إلى المدخنة مباشرة. وثمة خانق damper لتنظيم السحب ومنظم regulator للتحكم بكمية كل من الجزأين. تتحرك الغازات في برج التنقية بشكل أفقي محاطة بالكلس، حيث يتفاعل الكلس مع أكاسيد الكبريت الموجودة في الغازات. ويمكن تعديل التصميم – بقصد رفع فعالية التنظيف من الغازات الضارة – بحيث تتم التنقية على مرحلتين (أي في برجين).



الشكل (5) تنقية أكاسيد الكبريت باستخدام الطريقة الجافة

يلي برج التنقية حفاز من النوع SCR (Selective Catalytic Reduction) يحوّل أكاسيد النيتروجين إلى نيتروجين عديم الضرر وماء. يتم تزويد المفاعل بالكلس الجديد من الأعلى، وسحب الفضلات (تصبح بعد التفاعلات جبصين plaster) من الأسفل، وهذه يجب أن تخزنها السفينة وتدفع في الميناء رسوماً لقاء التخلص منها. يمكن بهذه الطريقة التخلص من 75% من أكاسيد الكبريت الموجودة في غازات الاحتراق. من أجل استطاعة قدرها 10MW تلزم لمنشأة التنقية استطاعة 64 kW/h وتبلغ كمية الكلس اللازمةkg 150، مع العلم بأن

تكاليف حبيبات الكلس تقارب 250$/t [7]. لم تستخدم هذه الطريقة بعد على السفن، ويستبعد انتشارها في السوق في المستقبل القريب بسبب كبر كميات الفضلات المتبقية وعدم توفر الحبيبات بالدرجة الكافية المأمونة.

3- استخدام أنواع أخرى من الوقود

من أجل الاستثمار الفعال للطاقة المختزنة في الوقود يجب السعي لجعل الطاقة متاحة للاستخدام بأقصى قدر ممكن من خلال العمليات الترموديناميكية. وتختلف مواصفات الأنواع المتوفرة من الوقود وفقاً لقيمتها الحرارية ولإصداراتها لـ CO_2 والإصدارات الضارة بالهواء. كلما انخفض محتوى الوقود من المركبات غير الهيدروكربونات (رماد، شوائب، ماء ...إلخ) قلّ إصداره للمواد الضارة وأمكن حرقه بشكل أكمل. إن معظم أنواع الوقود السائد استخدامها في الوقت الحاضر على السفن ناتجة عن تكرير النفط، ولكن ثمة تجارب ومحاولات لاستخدام أنواع غازية من الوقود ولتطبيق تكنولوجيا خلايا الوقود في مجال النقل البحري العالمي.

النتائج والمناقشة:

يبين الجدول (1) المواصفات والبيانات المختلفة للسفينتين **Beluga N-1** و **Beluga N-2** المتشابهتين.

الجدول (1) مواصفات السفينتين المدروستين

الأبعاد	
124.56 m	الطول بين العمودين
132.2 m	الطول الإجمالي
15.87 m	العرض
7.73 m	الغاطس الصيفي
الحمولات	
6296	BRZ
3617	NRZ
9821 t	الحمولة
المحرك الرئيسي	
Output: 3840 kW	MAK 8M32C
المحرك المساعد	
Output: 315 kW	2 x Scania DI 1262
سعة الخزانات	
3540 m3	خزانات الموازنة
73.10 m3	خزانات الماء العذب
621.70 m3	وقود ثقيلHFO
58.90 m3	وقود خفيفMDO

تمت دراسة الإصدارات خلال الأشهر الستة الواقعة بين نيسان و أيلول من عام 2008 من خلال التقارير المتعلقة بالسفينتين. **حساب الأضرار البيئية**

بما أن نسبة الكبريت في وقود MGO لا تعطى عادةً، فستعتبر في الحسابات 1%. أما حساب الإصدارات إلى الجو فسيتم من خلال معرفة استهلاك الوقود وبالاستعانة بالجدول (2) [3].

الجدول (2) عامل حساب الإصدارات

	عامل الإصدار[kg / t fuel]
57	NOx
7.4	CO
0.05	CH4
2.4	NMVOC

كمية أكاسيد الكبريت الناتجة يمكن حسابها بالعلاقة الآتية:

$$SO_2\ [t_{SO2}/t_{fuel}] = 0{,}02 \cdot M_{fuel}\ [t] \cdot S_{fuel}\ [\%]$$

ويبين الجدول (3) البيانات المختلفة المتعلقة باستهلاك السفينتين للأنواع المختلفة من الوقود والمسافات المقطوعة والحمولات.

الجدول (3) استهلاك الوقود والحمولات والمسافات المقطوعة

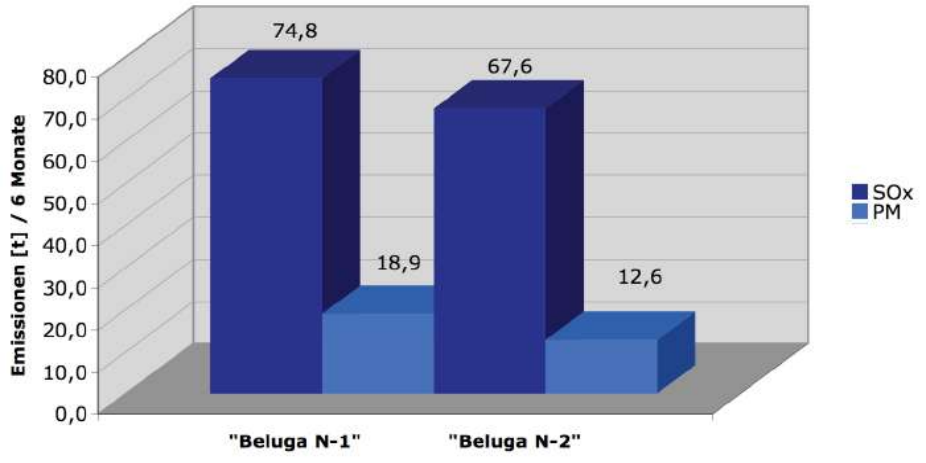
	استهلاك وقود MGO	استهلاك وقود IFO 380	استهلاك وقود IFO lS 380	المسافة المقطوعة sm	الحمولة المنقولة t	مدة البقاء بالبحر	مدة البقاء بالموانئ
Beluga N-1	85.8 t	1308.6 t	524.8 t	41592	75826.9	109أيام	71 يوم
Beluga N-2	75.3 t	743.0 t	1142.7 t	41647	82212.1	104 أيام	76 يوم

تجدر الإشارة إلى أن نسبة الكبريت في أنواع الوقود التي استخدمتها السفينتان خلال عملهما هي كما يأتي:

الجدول (4) محتوى الوقود المستخدم على السفينتين من الكبريت

	IFO 380	IFO LS 380
Beluga N-1	2.35%	1.42%
Beluga N-2	2.33%	1.36%

ويمكن حساب إصدارات السفينتين من أكاسيد الكبريت والحبيبات وتمثيلها في الشكل (6).



الشكل (7) إصدارات السفينتين من أكاسيد الكبريت والحبيبات

أما مجمل إصدارات السفينتين فيبينه الجدول (5).

الجدول (5) مجمل إصدارات السفينتين

	„Beluga N-1“		„Beluga N-2“	
	on port	in the sea	on port	in the sea
CO_2	274.47 t	5729.23 t	209.66 t	5946.10 t
NOx	4.94 t	104.46 t	3.78 t	108.00 t
SOx	2.28 t	72.49 t	1.97 t	65.60 t
PM	0.29 t	18.59 t	0.36 t	12.28 t

من المتعارف عليه أن يتم تقدير الأضرار البيئية الناتجة عن إطلاق غازات الاحتراق من السفن وفق الجدول(6) [8].

الجدول (6) تقدير تكاليف الأضرار البيئية الناتجة عن إطلاق طن واحد من غازات الاحتراق من السفن

	on port		In the see	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO_2	50 €/t	50 €/t	50 €/t	50 €/t
NOx	4 200 €/t	4 400 €/t	2 450 €/t	4 200 €/t
SOx	5 600 €/t	8 200 €/t	3 700 €/t	8 200 €/t
PM	26 000 €/t	29 000 €/t	9 000 €/t	12 600 €/t

وبالتالي تصبح تكاليف إصدارات السفينتين في الموانئ كما هو مبين في الجدول (7).

الجدول (7) إجمالي تكاليف إصدارات السفينتين في الموانئ

	Beluga N-1			Beluga N-2		
	Emissions	Min.	Max.	Emissions	Min.	Max.
CO_2	274.47 t	13723.5 €	13723.5 €	209.66 t	10483 €	10483 €
NO_x	4.94 t	20748 €	21736 €	3.78 t	15876 €	16632 €
SO_x	2.28 t	12768 €	18696 €	1.97 t	11032 €	16154 €
PM	0.29 t	7540 €	8410 €	0.36 t	9360 €	10440 €
Sum	-	54779.5 €	62565.5 €	–	46751 €	53709 €

وتكاليف الإصدارات في البحر كما في الجدول (8).

الجدول (8) إجمالي تكاليف الإصدارات في البحر

	Beluga N-1			Beluga N-2		
	Emissions	Min.	Max.	Emissions	Min.	Max.
CO_2	5729.23 t	286461.5 €	286461.5€	5946.10 t	297305 €	297305 €
NO_x	104.46 t	255927 €	438372 €	108 t	264600 €	453600 €
SO_x	72.49 t	268213 €	594418 €	65.6 t	268213 €	537920 €
PM	18.59 t	167310 €	234234 €	12.28 t	110520 €	154728 €
Sum	–	977911.5€	1553845.5 €	–	904638 €	1443553 €

وتكاليف الإصدارات الإجمالية (في الموانئ و البحر) كما في الجدول (9).

الجدول (9) تكاليف الإصدارات الإجمالية

	Beluga N-1		Beluga N-2	
	Min.	Max.	Min.	Max.
CO_2	300185 €	300185 €	307788 €	307788 €
NO_x	276675 €	460468 €	280476 €	470232 €
SO_x	280981 €	613114 €	279245 €	554074 €
PM	174850 €	242644 €	119980 €	165168 €
Sum	1032691 €	1616411€	987389 €	1497262 €

ويتضح من الحسابات المجراة أن مجموع الأضرار الناتجة عن سفينة نقل صغيرة نسبياً هي بحدود مليون يورو ونصف خلال نصف عام فقط. ويعطي هذا المثال فكرة عن القيم الكبيرة الناتجة لو درسنا سفن نقل الحاويات الكبيرة التي تستهلك يومياً 350 طن من HFO وتطلق بالتالي كميات من الغازات الضارة تعادل 23 ضعفاً من الكميات المحسوبة لهاتين السفينتين الصغيرتين. وهكذا تبدو جلياً ضرورة اتخاذ إجراءات فعالة تقلل الضرر البيئي الناتج عن السفن.

حساب التكاليف اللازمة لتحاشي أضرار أكاسيد الكبريت

بعد حساب تكاليف الأضرار البيئية الناتجة عن الغازات المنطلقة من السفينتين المدروستين سنقوم الآن بحساب تكاليف تحاشي هذه الأضرار البيئية عبر طريقتين مختلفتين:

- بالانتقال إلى استخدام وقود أغلى ويحتوي نسبة منخفضة من الكبريت
- بتركيب غاسل لغازات الاحتراق يستخدم ماء البحر.

- الانتقال إلى استخدام وقود أغلى ويحتوي نسبة منخفضة من الكبريت

انطلاقاً من التكاليف المقابلة للفترة المدروسة نحصل على الجدول رقم (10).

الجدول رقم (10) تكاليف استخدام أنواع الوقود المختلفة

	Costs [US $ /t]	Costs [US $ /year]
IFO 380	486.30	1 945 200
IFO LS 380	529.20	2 236 800
MGO	913.50	3 645 120

فإذا تم الانتقال من الوقود **IFO 380** ذي المحتوى من الكبريت 2.7% إلى الوقود **IFO 380 LS** ذي المحتوى من الكبريت 1.5% فإن التكاليف الإضافية ستبلغ 291600 US$، أما الانتقال إلى MGO الذي محتواه من الكبريت 0.5% فسيجعل التكاليف الإضافية في العام 1708920 US$. ويبين الجدول (11) مقدار الانخفاض في إصدارات SO_x عبر استخدام الأنواع المختلفة من الوقود البحري.

الجدول (11) مقدار الانخفاض في إصدارات SO_x عبر استخدام الأنواع المختلفة من الوقود البحري

	SOx Results **[t]**	**SOx** Reduction **[t]**
IFO 380	216	0
IFO LS 380	120	96
MGO	40	176

لحساب اقتصادية هذا الإجراء يجب تقسيم الاستهلاك السنوي للوقود على انخفاض إصدار أكاسيد الكيريت بفعل تعديل الوقود المستخدم. فالانتقال إلى وقود IFO 380 LS يجعل الكلفة 23300 US$/$t_{SOx}$ والانتقال إلى وقود MGO يجعل الكلفة 20762 US$/$t_{SOx}$.

- تكاليف جهاز سحب أكاسيد الكبريت العامل بماء البحر

بحسب معطيات شركة Krystallon التي تنتج هذه الأجهزة، ومن أجل سفينة بحجم السفينة المدروسة في البحث Beluga فإن ثمن الجهاز هو 494340 US$، يضاف إلى ذلك 434420 US$ تكاليف جملة الأنابيب، و749000 US$ أجور التركيب. علاوةً على ذلك فإن تركيب الجهاز يجب أن يتم في بريطانيا.

تحدد الشركة الصانعة مدة تعمير الجهاز بـ 25 عاماً، وسننطلق في حساباتنا من أسوأ الأحوال أي من أجل 20 عاماً.

تبلغ التكاليف السنوية للصيانة 3745 US$، ومن أجل سفينة بحجم Beluga يبلغ استهلاك الطاقة الإضافية اللازمة لتشغيل الجهاز 1% من استهلاك الوقود على السفينة، أي ما يعادل 40 t وقود سنوياً. يضاف إلى ذلك تكاليف التخلص من الأوحال التي تتشكل بفعل استخدام الجهاز، حيث تنشأ فضلات تتضمن (5 - 10) % زيتاً. فإذا انطلقنا من القيمة 10% فإن ذلك يعني نشوء كمية من الأوحال قدرها 4 m^3 ، التي تبلغ الكلفة الوسطية للتخلص منها 117 US$/m3.

يلخص الجدول (12) تكاليف جهاز سحب أكاسيد الكبريت باستخدام ماء البحر.

الجدول (12) تكاليف جهاز سحب أكاسيد الكبريت باستخدام ماء البحر

التكاليف الإنشائية	
ثمن الجهاز	494340 US$
كلفة التمديدات	434420 US$
أجور التركيب	749000 US$
المجموع	1677760 US$
عمر الجهاز	20 عاماً
تكاليف الاستثمار	83888 US$/year
تكاليف الصيانة	3745 US$/ year
الحمأة الناتجة (+10%)	4 m^3
تكاليف التخلص من الحمأة	467,36 US$/ year
ثمن الوقود الإضافي	19452 US$/ year
المجموع	23664.36 US$/ year
مجموع تكاليف الجهاز بالعام	107552.36 US$/ year
تكاليف 4000 طن IFO 380	1964652US$/ year
المجموع	2072204.36 US$/ year

فإذا كان استهلاك الوقود IFO 380 هو 4040 t فإنه ينتج سنوياً 218.2 t SO2. بجعل نسبة التخفيض 90% فإننا نوفر إطلاق 196.3 t SO_2، وللنسبة 95% نوفر 207.3 t. وهكذا تتراوح التكاليف بين 10553.95 US$/$t_{SOx}$ و 9998.48 US$/$t_{SOx}$ تبعاً للمردود المطلوب.

ويبين الجدول (13) مقارنة للتكاليف الناتجة عن استخدام كل من الطريقتين المذكورتين. ويتضح منه أن كلفة جهاز التنظيف باستخدام ماء البحر أقلّ، وأكاسيد الكبريت المنطلقة إلى الجو لدى استخدامه أقلّ.

الجدول (13) مقارنة تكاليف تخفيض إصدار SO_x بالطريقتين

measurement	costs
IFO 380 – IFO LS 380	23300 US$/$t_{SOx}$
IFO 380 - MGO	20672 US$/$t_{SOx}$
Sea Water Scrubber 90%	10553 US$/$t_{SOx}$
Sea Water Scrubber 95%	9998 US$/$t_{SOx}$

من البديهي أن التكاليف مرتبطة إلى حدٍّ كبير بأسعار الوقود مستقبلاً، وبما أن أسعار الأنواع المختلفة من الوقود مثل MGO و IFO LS 380 و IFO 380 غير مرتبطة ببعضها بعضاً دوماً، فإن من المرجح أن تظل طريقة سحب أكاسيد الكبريت باستخدام الجهاز الذي يستخدم ماء البحر أكثر اقتصاديةً. يجدر القول إنّ تركيب الجهاز المذكور يسهم علاوة على ما ذكر في تخفيض إصدار كلٍّ من الحبيبات وأكاسيد الآزوت والهيدروكربونات غير المحترقة.

الاستنتاجات والتوصيات:

تتضح من العرض السابق أهمية دراسة ومعالجة التلوث الذي تسببه المحركات البحرية من خلال الغازات التي تطلقها، وكذلك الجدية التي يتم التعامل بها مع هذه المشكلة. فالبحث عن حلول لمشاكل البيئة البحرية لم يعد ترفاً فكرياً، بل قضية حقيقة ينظر إليها بواقعية واهتمام من أهم جهة رسمية معنية بالنقل البحري، وهي المنظمة البحرية الدولية IMO.

وانطلاقاً من المثال المعروض في هذه الدراسة، فإن على المؤسسات الوطنية المعنية بالنقل البحري أن تبين لشركات النقل البحري المحلية ولأصحاب السفن أهمية الموضوع وجدية النظر إليه عالمياً، بحيث تكون السفن السورية مستعدة لتلبية المتطلبات البيئية الدولية المتزايدة رغم تكاليفها العالية وقادرة على مراعاتها، ليسمح لها مستقبلاً بدخول المرافئ العالمية التي تطبق القوانين البيئية البحرية، التي تبدو أحياناً صارمة كما هو الحال في مثال منطقة SECA.

المراجع:

1. MOLLENHAUER, K.; TSCOEKEN, H. *Handbuch Dieselmotor*. Springer Verlag, Berlin 3. Auflage , 2007 , 461 – 518.
2. CORBETT, J.J.; KOEHLER, H. *Updated emissions from ocean ships*. Journal of geophysical Research, Vol. 108, ACH 9–1, 2003, 9–19.
3. EMEP, C . *Emission Inventory Guidebook.* Index to methodology chapters ordered by SNAP 97, Activity Group 8: Other Mobile Sources and Machinery 080404 International sea traffic (international bunkers), Hrsg. European Environment Agency, 2007. download at:
   http://reports.eea.europa.eu/EMEPCORINAIR5/en/page017.html
4. OECD . *Umweltausblick bis 203.* OECD Publishing, 2008, 161.
5. BEHRENDS, B.; LIEBEZEIT, G. *A theoretical Environment Impact Assessment of the Use of a Seawater Scrubber to Reduce SOx and NOx Emissions from Ships*. Research Centre Terramare, Wilhelmshaven , 2003,70.
6. HENEIKSSON, T. *SOx scrubbing of marine exhaust gases*. Wärtsilä Technical Journal 02.2007, Wärtsilä Finnland; 2007 , 55 – 58.
7. KLEINE, MOELLHOFF, P. *Kurzstudie über die Schiffsmotorabgasreinigung zur Entfernung von Schwefeloxiden nach dem Dry Exhaust Gas Cleaning Systems (Dry- EGCS)*. Steinbeis GmbH & Co. KG ,2008, 25.
8. IMPACT, M.; Schreyer, C. SUTTER, D.; VAN ESSEN, H.P.; BOON, B.H.; et al. *Handbook on estimation of external costs in the transport sector*. Produced within the study Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport, European Commission, 2008, 54.