مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (29) العدد (4) 2007
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (29) No. (4) 2007

# تخفيض إصدار المحركات البحرية ذات سرعات الدوران المنخفضة للغازات الضارة

**الدكتور بسام حمود***

**(تاريخ الإيداع 26 / 7 / 2007. قُبِل للنشر في 2007/11/15)**

## □ الملخّص □

إن أفضل أسلوب لضبط انطلاق الغازات الضارة من السفن هو المواءمة بين تصميم السفينة وطريقة تشغيلها. وهذا البحث يعالج الجوانب التصميمية والاستثمارية التي تؤثر في مستوى الإصدار من الغازات الضارة. كما تعرض باختصار التقانات التي طورت في الفترة القريبة الماضية، التي تسهم في التخفيض الإضافي للإصدارات الضارة من محركات الديزل ثنائية الشوط ذات سرعات الدوران المنخفضة. وهذه التقانات تشمل: الإصدار المنخفض لأكاسيد الآزوت ($NO_x$)، و نظامَ الحقن ذا المجرى المشترك المضبوط إلكترونياً electronically – controlled common- rail system، و الحقن المباشر للماء مع إعادة تدوير غازات الاحتراق، والمعالجة اللاحقة لغازات الاحتراق بواسطة الحفازات SCR. كما تم التعرض لطريقة الاسترجاع الكامل للحرارة بغرض التخفيض الإجمالي للإصدارات بما فيها ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$).

أما ما يخصّ إصدار أكاسيد الكبريت ($SO_x$) فقد تطرقنا في هذا البحث إلى بعض المجالات الخاصة التي يُستخدم فيها للمحركات البحرية ثنائية الشوط أنواع الوقود ذات المحتوى المنخفض من الكبريت.

**الكلمات المفتاحية: محركات الديزل البحرية، الإصدارات**

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

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (29) العدد (4) 2007
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (29) No. (4) 2007

# Reducing Emissions from Low Speed Marine Diesel Engines

**Dr. Bassam Hammoud***

**(Received 26/ 7 / 2007. Accepted 15/11/2007)**

## □ ABSTRACT □

The paper outlines the various available technologies, being developed or already in use in low-speed two–stroke marine diesel engines, which have beneficial influence on lowering exhaust emissions.

These include low – $NO_x$ tuning, electronically-controlled common-rail systems, direct water injection with exhaust gas recirculation, and after treatment by selective catalytic reduction (SCR). A new total heat recovering concept offers a route to significant drop in overall emissions, including $CO_2$.

The paper also covers some aspects concerning the use of low-sulphur fuels in low-speed tow-stroke marine diesel engines.

**Keywords:** Marine diesel engines, Emissions.

* **Associate Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

## مقدمة:

أكثر من 95% من التجارة العالمية تتم عن طريق البحر، وهناك حوالي 86.000 سفينة تجارية تسافر عبر المحيطات، 97% منها تدفعها محركات ديزل بحرية كبيرة [1]. لذلك أصبحت الغازات الصادرة عن المحركات البحرية مسألةً مهمةً يناقشها العاملون في مجالات النقل البحري والسياسيون منذ عدة سنوات. وفي الآونة الأخيرة تم التركيز على هذا الموضوع وربطه بمسألة الاحتباس الحراري العام global warming.

بالنسبة للغازات الصادرة عن وسائل المواصلات البرية وعن محطات توليد الطاقة الكهربائية فقد تم ضبطها لتكون في الحدود الدنيا عبر سنّ قوانين صارمة. أما في المجال البحري فإن هذه الإصدارات تزداد مع الوقت بسبب نمو التجارة البحرية الدولية، حيث يستهلك القطاع البحري 5% من إجمالي الطاقة المستهلكة دولياً [2,1]، مما يجعل كمية الغازات المنطلقة سنوياً 12.57 مليون طن ($NO_x$) و 10.54 مليون طن ($SO_x$) [1].

في الولايات المتحدة الأمريكية عُدت الموانئ مصدراً مهماً للتلوث، وفي لوس أنجلوس وحدها تُصدِر الموانئ يومياً 31.5 طن ($NO_x$)، أي ما يعادل ما تطلقه 650.000 سيارة من ($NO_x$) [3].

وهكذا تتضح ضرورة وجود ضوابط للتلوث الصادر عن مجال النقل البحري، ولذلك يناقش المعنيون الآن العناصر الضارة التي يجب ضبطها وإلى أي حدّ يُسمح أن تصل ومتى يجب أن يتحقق هذا.

صدر بروتوكول كيوتو Kyoto المتعلق بغازات الاحتباس الحراري وخاصةً ($CO_2$) في شباط 2005، ثم قامت المنظمة البحرية الدولية IMO ، بوصفها مسؤولةً عن التجارة الدولية، بمناقشة هذا الموضوع. وقد تبين أن مجموع ما تصدره السفن سنوياً يبلغ 438 مليون طن من ($CO_2$) أي ما يعادل 1.8% من الإصدار العالمي لغاز ($CO_2$) [4]. أُدرجت قواعد منع تلوث الهواء من السفن في الملحق السادس لمعاهدة ماربول MARPOL 73/78 التي وضعتها منظمة IMO ، ودخلت حيز التطبيق بدءاً من 19 أيار 2005. وبالإضافة إلى القواعد العامة المتعلقة بإصدارات ($NO_x$) وتحديد القيم القصوى المسموح بها لمحتوى الوقود البحري من الكبريت، فإن الملحق السادس شدّد الضوابط على إصدار غازات ($SO_x$) في المناطق الخاصة التي تتشدد قوانينها البيئية في إصدار غازات ($SO_x$) (SECA)[1]. وقد تمت مراعاة الضوابط المذكورة في ملحق معاهدة ماربول لدى إنتاج المحركات البحرية وذلك بدءاً من عام 2005، الأمر الذي أدى إلى انخفاض إصدار السفن لـ ($NO_x$) بحدود 25 إلى 30% مقارنةً بالأجيال السابقة من السفن. ويناقش الساسة والمعنيون في دول الاتحاد الأوروبي والدول الأخرى حدود (SECA) وإدخال قواعد جديدة لهذه المناطق الخاصة. ويجب أن نتذكّر دائماً بأن النقل البحري هو الوسيلة الأكثر فعاليةً بين وسائل النقل، وبأنه سيظلّ مستقبلاً المجال الذي يُعتمد عليها بشدة في نقل البضائع بين دول العالم. ولكن على الرغم من النسبة العالية لإسهام القطاع البحري في إطلاق الغازات، فإنه الأقلّ إصداراً للغازات إذا أخذنا النسبة (طن/كلم) عند نقل البضائع، وهو أقل إصداراً للغازات من القطاع البري أو الجوي أو السكك الحديدية.

لقد حققت الصناعة البحرية عبر العقود السابقة تحسيناتٍ مهمة من ناحية مردود المحرك واستهلاكه للوقود وإصداره للغازات، وسنعرض هذه التحسينات من خلال مثال عن ناقلة للحاويات:

[1] $SO_x$ Emission Control Areas: مناطق خاصة تشمل بحري الشمال والبلطيق، لا يُسمح فيها لمحتوى الوقود من الكبريت أن يتجاوز 1.5%. وفي مناطق الملاحة النهرية والمرافئ فإنه بحسب تعليمات EU لا يجوز أن تتجاوز نسبة الكبريت في الوقود 0.2%.

في عام 1972 كانت سفينة Liverpool Bay الخطية ناقلة الحاويات تحمل 2300 TEU* وتتحرك بسرعة 26 عقدة، وكانت مزودةً برفاصين تحركهما عنفة بخارية استطاعتها 59.664 kW. وبلغ الاستهلاك النوعي للوقود في العنفة 270 g/kW-h أي ما يعادل 242 g/TEU-mile.

أما الآن فإن ناقلة الحاويات Post-Panamax الخطية تحمل 8000 TEU ويديرها محرك ديزل طراز Sulzer 12 Rt-flex96 تبلغ استطاعته القصوى 68.680 kW. تبلغ سرعة السفينة 25 عقدة عند 90% من حمولة المحرك الكلية، وأصبح الاستهلاك النوعي للوقود 166.8 g/kW-h أي ما يعادل 51.5g/TEU-mile.

يتضح من هذا المثال أنه برفع استطاعة سفينة Liverpool Bay بنسبة 15% فقط ، أمكن زيادة الحاويات المنقولة بنسبة 248%. كما أمكن عبر استخدام محركات الديزل البطيئة (بدل العنفات البخارية) وعبر تحسين مردود هذه المحركات في الـ 30 عاماً الماضية، أمكن تخفيض استهلاك الوقود بواحدة (g / TEU-mile) بنسبة 21% .

## أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في التعرف على التقانات الحديثة التي تم تطويرها في العقد الأخير للإسهام في تخفيض الإصدارات الضارة من السفن، وتطبيق متطلبات المنظمة البحرية العالمية IMO واتفاقية ماربول. كما يقدم البحث عرضاً واضحاً لنتائج استخدام هذه التقانات على بعض السفن.

## طريقة البحث ومواده:

يعتمد البحث طريقة التحليل العلمي لأساليب تخفيض إصدارات السفن مع المحافظة على الاستهلاك النوعي للوقود منخفضاً قدر الإمكان. كما يركز على المقارنة بين إسهام الطرق المختلفة في تخفيض كلٍّ من إصدارات $NO_x$ والاستهلاك النوعي للوقود.

## غازات الاحتراق الصادرة عن المحركات البحرية:

تتضمن الغازات الصادرة عن المحركات البحرية المجموعات التالية:

**A. أكاسيد الآزوت**

تم تحديد الكميات المسموح بها على نحو دقيق في الملحق السادس لمعاهدة ماربول MARPOL 73/78، وهي ترتبط بصورة رئيسية بعملية الاحتراق في المحرك، وهناك جزء من هذه الأكاسيد منشؤه الآزوت الموجود أصلاً في الوقود.

**B. أكاسيد الكبريت**

رغم مراعاتها جزئياً في الملحق السادس لمعاهدة ماربول سابقة الذكر، فقد عُدتْ مسألةً محلية، وتم ضبطها من خلال اتفاقية SECA. وهي تتعلق بالدرجة الأولى بمحتوى الوقود من الكبريت.

* TEU اختصار لـ Twenty foot Equivalent Unit أي حاوية يعادل حجمها عشرين قدماً مكعباً.

**C. الدخان smoke**

يتم ضبطه محلياً، وهو يتعلق بالعمليات التي تجري في المحرك.

**D. ثاني أكسيد الكربون $CO_2$**

يعدّ هذا الغاز مشكلةً عالميةً ومسؤولاً عن ظاهرة الاحتباس الحراري وفقاً لمحضر كيوتو، ولكنه بقي بدون ضبط في الوقت الحاضر. ولا يزال موضوع نقاش في المنظمة البحرية العالمية IMO. طبيعي أن كميات الـ $CO_2$المنطلقة ترتبط مباشرةً بكميات الوقود المحروقة.

**E. جزيئات (دقائق) HC و CO**

لم يجرِ ضبطها، وهي ترتبط بمستوى ضبط العمليات التي تجري في المحرك.

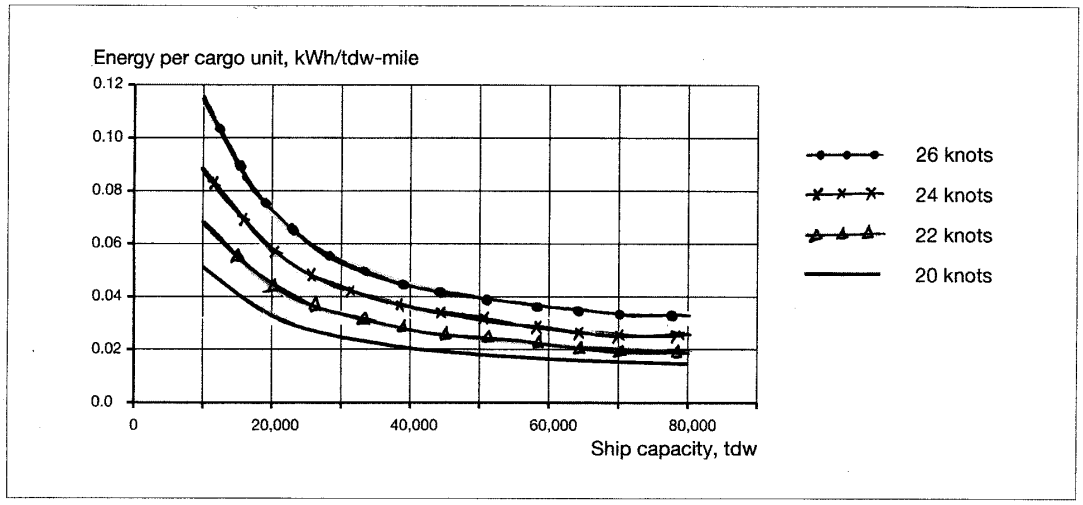
من خلال عرضنا هذا يتضح أن الإصدارات المختلفة قابلة للضبط بدرجات متفاوتة، وبأن ثمة تفاوتاً بين أنواع الإصدارات التي يجب مراعاتها. فمثلاً ضبط كميات $CO_2$ يزيد في العادة من كميات $NO_x$ وبالعكس.

## تأثير العوامل التصميمية للسفن في الإصدارات:

رغم تطبيق بعض التقانات لتخفيض إصدارات المحركات البحرية والمضي في تطوير تقانات أخرى، فإنه يمكن تحقيق تخفيض كبير للإصدارات عبر تشغيل السفن على النحو الأمثل، ولعل هذا الأسلوب فعالٌ ومن المناسب تطبيقه على جميع وسائل النقل.

مثلاً لوحظ أن السفن الكبيرة تتطلب كميات أقلّ من الوقود لنقل الحمولات مقاسةً بواحدة طن حمل ساكن– ميل (tdw-mile) أو TEU-mile ، وبأنها تصدر كميات أقل من المركبات الضارة. إضافةً إلى ذلك فإن السفن الكبيرة يمكن تشغيلها لتعمل أسرع من السفن الأصغر حجماً مع بقاء استهلاك الوقود.

وقد يبدو ذلك معاكساً للمنطق ولكن هذه الحقيقة يمكن تأكيدها بالأمثلة الواقعية، حيث يتضح من الشكل (1) بأنه من أجل استهلاك محدد للاستطاعة (أي ما يقابل كمية محددة من الإصدارات)، فإن السفن الأكبر يمكن أن تبحر بسرعة أكبر من السفن الصغيرة.




**الشكل (1) العلاقة بين القدرة اللازمة لنقل واحدة الحمولة مسافة ميل (kWh/tdw-mile) و حجم السفينة (tdw) حيث أن:**

**السفينة ذات السرعة 26 عقدة تبلغ حمولتها 80.000 tdw أو ما يعادل 7000TE**

**السفينة ذات السرعة 24 عقدة تبلغ حمولتها 47.000 tdw أو ما يعادل 5000TE**

**السفينة ذات السرعة 22 عقدة تبلغ حمولتها 30.000 tdw أو ما يعادل 3000TE**

**السفينة ذات السرعة 20 عقدة تبلغ حمولتها 20.000 tdw أو ما يعادل 1800TE**

وهذا يؤكد حقيقة أن تشغيل السفن الكبيرة السريعة أكثر اقتصادية وريعيةً للمستثمر. كذلك من وجهة النظر البيئية فإن تشغيل سفن كبيرة سريعة أفضل، لأنها ذات إصدارات ضارة أقل.

## تخفيض الإصدارات الضارة عبر التقانات الحديثة المستخدمة في المحركات:

بعد أن يتم التأكد بأن تصميم السفينة وشروط تشغيلها قد نُفِّذا بالوضع الأمثل من الناحية الاقتصادية ، فإنه يلزم البحث عن محطة دفع ذات إصدارات ضارة منخفضة.

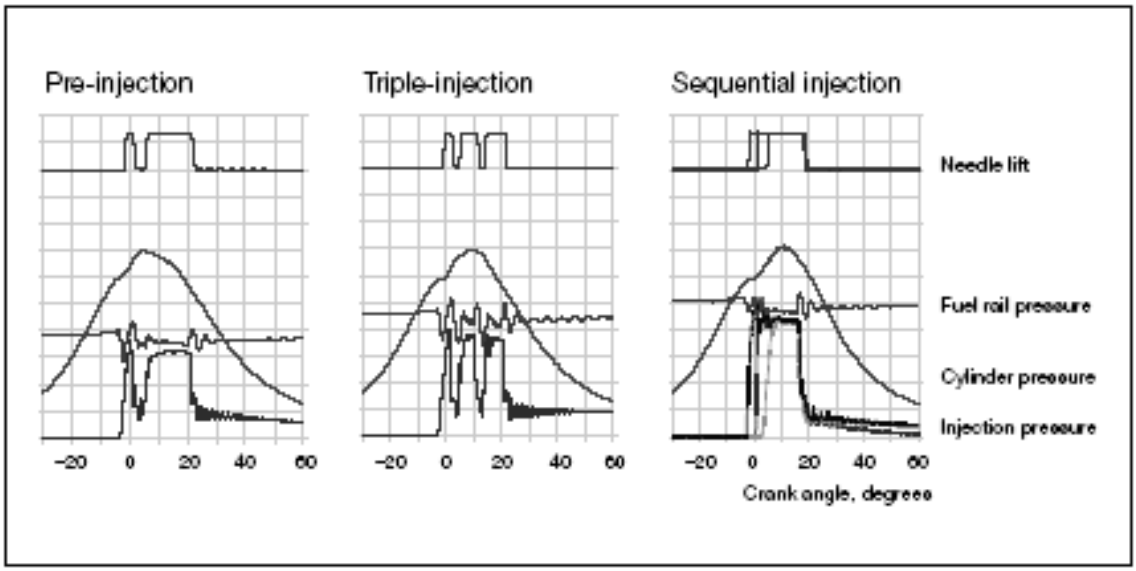
ثمة تقانات كثيرة متاحة أو هي قيد التطوير، بعضها يركّز مثلاً على تخفيض $NO_x$ عبر معايرة تشغيل المحرك، وبعضها الآخر يخفِّض الإصدارات بواسطة المعالجة اللاحقة لغازات الاحتراق باستخدام الحفازات SCR أو بإضافة جهاز إضافي لاسترجاع حرارة غازات الاحتراق. سنعرض فيما يلي أهم هذه التقانات.

تجدر الإشارة هنا أن تطبيق تعليمات المنظمة البحرية العالمية لا يتطلب تركيب تجهيزات إضافية، بل تنفيذ مجموعة من الإجراءات مثل زيادة نسبة الانضغاط للمحرك وتأخير عملية حقن الوقود والتحكم بزوايا فتح وإغلاق صمامات الإفلات واستخدام حواقن متعددة الفوهات.

### 1) تخفيض $NO_x$ عبر التحكم بعملية حقن الوقود:

يُتيح التحكم بعملية الحقن خفض إصدار $NO_x$ إلى نسبة تقلّ بمقدار 5% عن متطلبات المنظمة البحرية الدولية، ولكن ذلك يكلّف ارتفاعاً طفيفاً في الاستهلاك النوعي للوقود يبلغ 2 g / kWh. ويجب أن نتذكر دائماً أن هناك تضارباً بين الاستهلاك النوعي للوقود ومعدل إصدار $NO_x$، فتناقص أحدهما يؤدي إلى زيادة الآخر وبالعكس، وسبب ذلك هو الخضوع للقوانين الأساسية للفيزياء ولكيمياء الاحتراق.

ومن الطرق المقترحة للتحكم بإصدارات المحرك نذكر استخدام أساليب مختلفة في الحقن، كما هو مبين في الشكل (2).

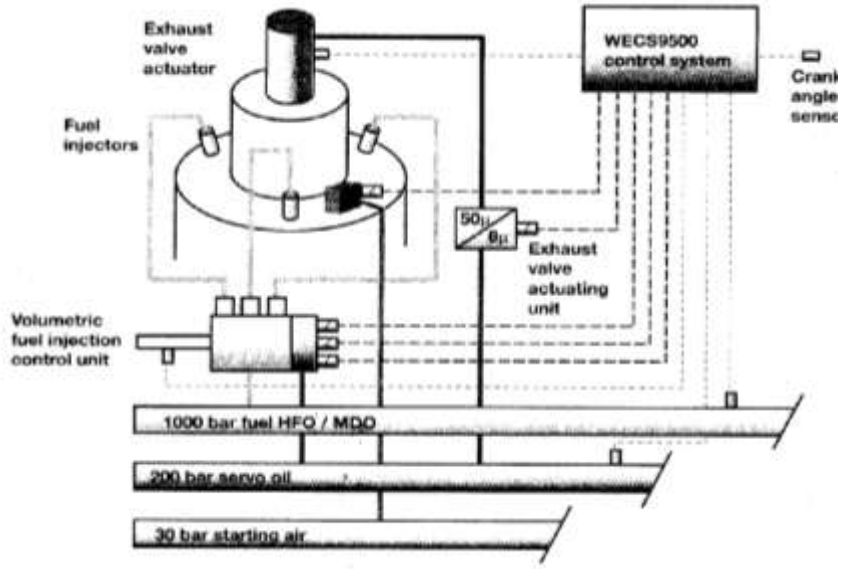



**الشكل (2) خواص عملية الحقن لثلاث طرق في الحقن:**

- **مع حقن جزء بشكل مبكر pre-injection**
- **بثلاث حواقن triple- injection تعمل في الوقت نفسه في كل أسطوانة**
- **بحواقن ثلاث في كل أسطوانة تعمل متتاليةً sequential injection.**

**2) استخدام جمل الحقن ذات مجرى التوزيع المشترك common rail system:**

تقوم في هذه الطريقة [5] مضخةٌ ذات ضغطٍ عالٍ H.P. pump بإرسال الوقود تحت ضغط عالٍ إلى أنبوب توصيل رئيسي header، وهذا الضغط العالي يجبر الوقود على الوصول إلى الفتحات الموجودة في الحواقن المختلفة المثبتة على رؤوس الأسطوانات كما هو مبين في الشكل (3).




**الشكل (3) مثال على جملة الحقن ذات مجرى التوزيع المشترك لمحرك ثنائي الأشواط ذي سرعة دوران منخفضة**

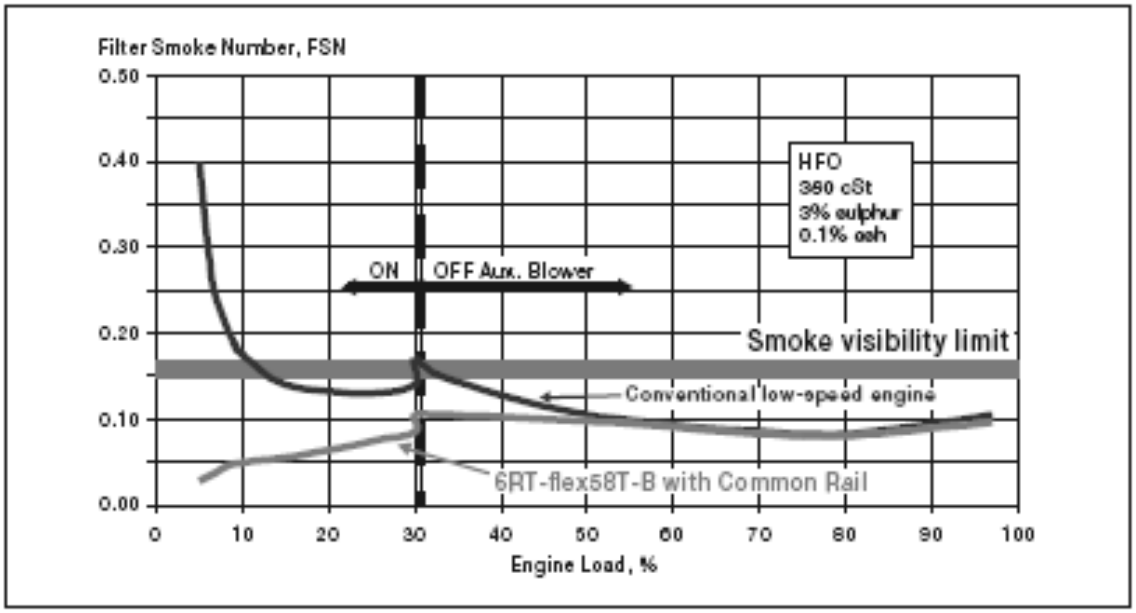
في اللحظة المناسبة يسمح الصمام للوقود بالدخول إلى الأسطوانة المناسبة. والضغط في الأنبوب الرئيسي يجب أن يكون كافياً بحيث يستطيع الوقود اختراق حجرة الاحتراق والتوزع فيها.

يُحقن الوقود في المحركات الحديثة بضغطٍ عالٍ يصل إلى 1000bar وتتم عملية ضبط قيمة الضغط في المجرى المشترك تبعاً لحاجة المحرك عبر التحكم بمضخة توريد الوقود. يُرسَل الوقود مسخناً بعد مجرى التوزيع إلى وحدة التحكم بالحقن المخصصة لكل أسطوانة، ثم يصل إلى صمامات حقن نظامية يتم التحكم بعملها هيدروليكياً (دارة زيت ذات ضغط عالٍ يصل إلى 200bar ). تقوم وحدات التحكم بالحقن بضبط حجم الوقود الذي يحقن وبتحديد شكل حزمة الحقن. في بعض الأنواع الحديثة من المحركات توجد ثلاثة صمامات حقن على رأس كل أسطوانة، ويتم التحكم بكل صمام على نحو منفصل بحيث يمكن برمجتها لتعمل منفردةً أو مجتمعةً بحسب الحاجة. وتعد إمكانية تشغيل الصمامات بهذه الطريقة ميزة مهمة تسمح بالحصول على تابع الحقن الملائم للحمل ولتصميم الأسطوانة. عموماً يمكن اختصار مزايا هذه المحركات الحديثة كما يلي:

- عدم إصدار دخان smoke عند أية سرعة دوران للمحرك.
- العمل عند سرعات الدوران المنخفضة جداً على نحو مستقر، حتى عند السرعة 10% من السرعة الاسمية.
- انخفاض استهلاك الوقود حتى عند الحمولات الجزئية.
- إطالة الفترة الفاصلة بين الصيانات من خلال موازنة الاستطاعة بين الأسطوانات المختلفة ومن خلال نظافة الاحتراق عند جميع الحمولات.

**3) التشغيل بدون إصدار دخان smoke :**

يمكن تحقيق ذلك عند جميع الحمولات عبر إبقاء ضغط حقن الوقود في المجال المناسب لسرعة المحرك. كما يساعد الفصل على نحو مدروس لبعض الحاقنات، والتحكم بتوقيت صمام التصريف في إبقاء الدخان الصادر عن المحرك أدنى من الحدّ الذي يمكن رؤيته حتى عند السرعات المنخفضة، انظر الشكل (4).




**الشكل (4) انخفاض إصدار محرك 6RT-flex 58T-B للدخان عبر تطوير أسلوب الحقن والتشغيل**

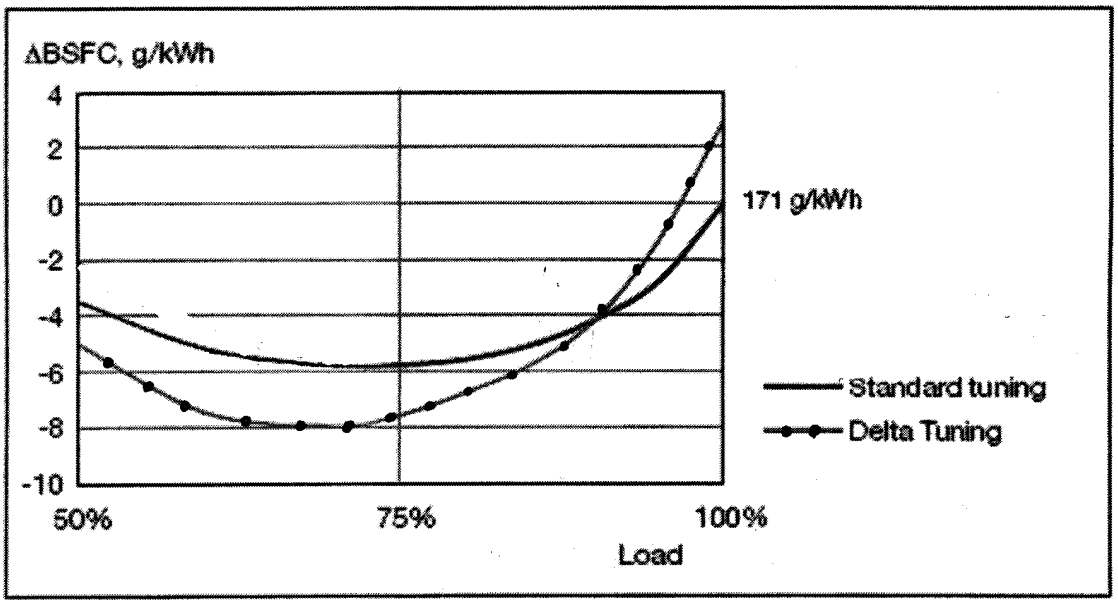
فالفصل المدروس لبعض الحاقنات عن العمل عند الحمولات المنخفضة يجعل المحرك أكثر توازناً مما لو تم فصل بعض الأسطوانات عن العمل على نحو كامل.

إن عمل المحرك بدون إصدار دخان يبقيه نظيفاً ويخفِّض رواسب الاحتراق داخله، ويقلّل احتمالات انسداد الموفرات economizers التي تعمل بالطاقة الحرارية لغازات الاحتراق.

**4) التحكم بزاوية تسبيق الحقن:**

عبر التحكم بزاوية تسبيق الحقن زادت مرونة المحرك وانخفض استهلاكه النوعي للوقود حتى عند الحمولات المنخفضة [6]، وأصبح منحنى استهلاك المحرك للوقود يناسب مجال تشغيل محركات معظم السفن، انظر الشكل (5).

وهكذا فإن انخفاض إصدار المحرك لـ $NO_x$ عند الحمولات العالية يكون قد عدّل ارتفاعَ إصدار $NO_x$ عند الحمولات المنخفضة، وفي المحصلة أمكن بذلك جعل منحنى استهلاك الوقود يحقق متطلبات منطمة IMO بخصوص إصدارات المحرك لـ $NO_x$.




**الشكل (5) تأثير التحكم بزاوية تسبيق الحقن على الاستهلاك النوعي للوقود**

**5) استخدام مستحلبات الوقود والماء Water-fuel emulsions:**

عُرِف منذ أمد طويل أن إدخال الماء إلى حجرة الاحتراق يخفِّض نشوء $NO_x$. ومن أوائل التقانات التي استخدمت في هذا الصدد صنع مستحلب الوقود مع الماء. إذا تم تشغيل المحرك بمستحلب ماء مع وقود فإنه يمكن نظرياً تخفيض إصدار $NO_x$ حتى 50%. ولكن نسبة الماء التي يمكن إضافتها محدودة بالاستطاعة القصوى لمضخات حقن الوقود، حيث يؤدي ذلك في الواقع إما إلى تقليل استطاعة المحرك أو إلى الاكتفاء بتخفيض معدل إصدار $NO_x$ ليصبح 10% أو 20% فقط.

وللحصول على التخفيض الأقصى لـ $NO_x$ عند الحمولة الكاملة، فقد يلزم إعادة تصميم كلٍّ من جملة الحقن ومحور الكامات مع ملحقاته.

كذلك فإن كمية الماء التي يمكن إضافتها محدّدة بلزوجة المستحلب الناتج وبدرجة حرارة التسخين اللازمة لتخفيض لزوجته وجعله قابلاً للحقن. وبما أن اللزوجة خاصية مرتبطة بالمستحلب نفسه فإنه لا يمكن ربطها بتصميم المحرك ولا بجملة حقنه.

وثمة قضية هامة تتعلق باستخدام مستحلب الوقود والماء، هي ضرورة تعديل تصميم فوهات الحاقن (قطر الثقوب) لتتوافق مع زيادة كمية الوقود المطلوب حقنها، ولكن ذلك سيؤدي إلى ارتفاع استهلاك الوقود وإلى تغير درجات حرارة الفوهات لدى عمل المحرك بالوقود العادي (بلا ماء).

لدى استخدام جمل الحقن ذات مجرى التوزيع المشترك التي يتم التحكم بها إلكترونياً، فإنه يمكن التغلب على الإشكالات سابقة الذكر، وتزداد مرونة المحرك، حيث يصبح ممكناً استخدام مستحلب الوقود والماء أو الوقود وحده. كما يتيح هذا التحكم معايرة المحرك بدقة وعلى نحو يتناسب مع الحمولة والسرعة. ويفكر المصممون الآن في تطوير جهاز التحكم الإلكتروني لمواءمة نسبة مزج الماء والوقود مع الحمولات المختلفة.

**6) الحقن المباشر للماء Direct water injection (DWI):**

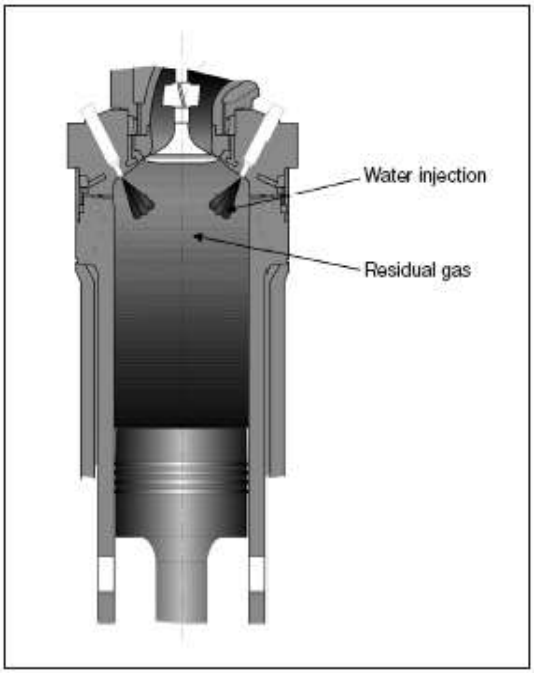
من تقانات إدخال الماء إلى حجرة الاحتراق لتخفيض إصدار $NO_x$ نذكر الحقن المباشر للماء على نحو منفصل في حجرة الاحتراق. تتيح هذه الطريقة تخفيض درجة حرارة الدارة من ثمة بالتالي نشوء $NO_x$. وطريقة DWI هذه بخلاف طرق إرسال الماء الأخرى (إلى حجرة الاحتراق) تسمح بحقن الماء في اللحظة المناسبة والموقع المناسب، مما يسمح بالحصول على أعلى معدل لتخفيض إصدار $NO_x$.

وهناك طريقة أخرى هي Water- Cold Residual Gas (Wa Co ReG) يتم وفقها تبريد الغازات المتبقية في الأسطوانة بواسطة الماء، وهي مبينة في الشكل (6)، حيث يتم بواسطتها تخفيض نقاء الشحنة في الأسطوانة عبر زيادة محتواها من الغازات المتبقية بالحقن المباشر للماء في أثناء شوط الانضغاط.

في طريقة DWI يُرسَل الماء عبر مجرى آخر للحقن غير مجرى حقن الوقود، ويتم التحكم بهذه العملية إلكترونياً. لهذه التقانة ميزتان هما:

- إمكانية حقن كمياتٍ كبيرة جداً من الماء دون انخفاض استطاعة المحرك.
- إمكانية حقن الماء والوقود عند لحظات زمنية مختلفة (كل لوحده).

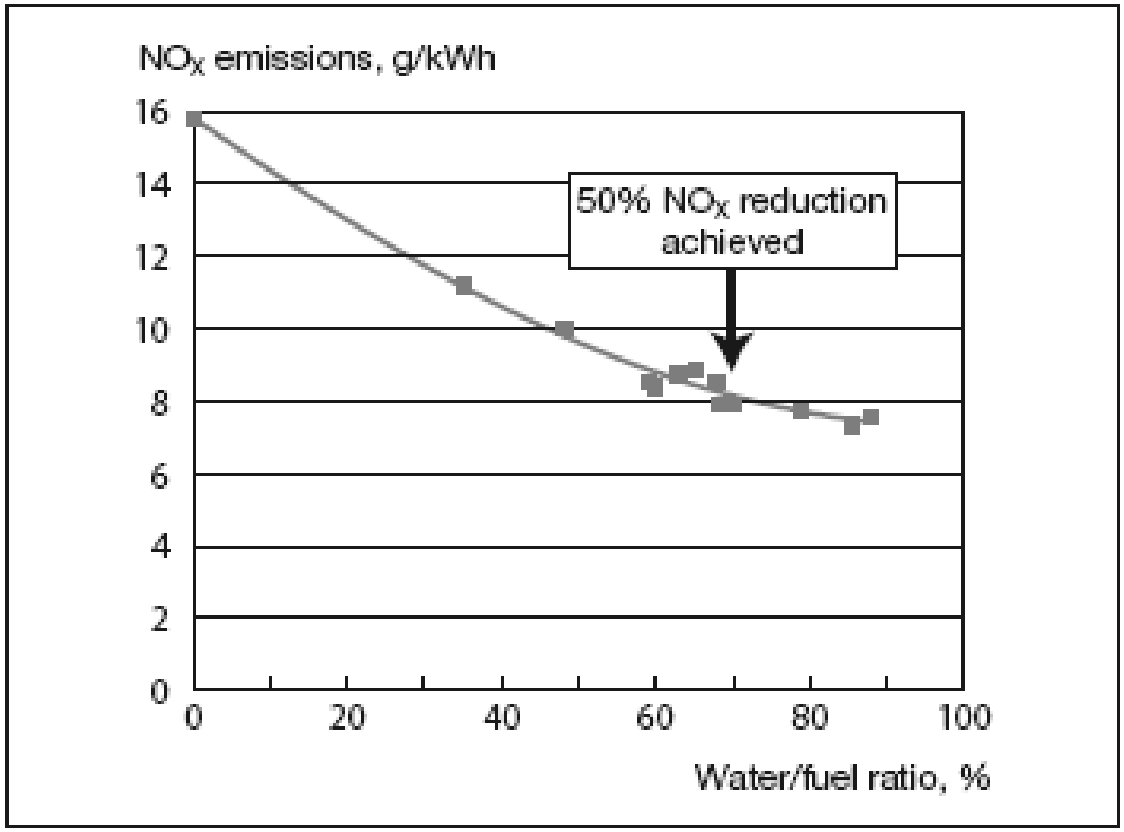
يمكن حقن الماء على نحو موازٍ لحقن الوقود أو حقنه في أثناء شوط الانضغاط، أي يمكن اختيار اللحظات المناسبة للحقن لمراعاة استهلاك الوقود والماء وإصدار $NO_x$ والمواد الأخرى مثل الهيدروكربونات و CO، وهذا كله دون التأثير في موثوقية عمل المحرك.




**الشكل (6) مبدأ طريقة تبريد الغازات المتبقية في الأسطوانة بواسطة الماء Wa Co ReG**

لدى استخدام تقانة DWI في محرك مزود بجملة ذات مجرى حقن مشترك، فإنه يمكن جعل جملة الحقن قابلةً للمعايرة بحيث يمكن حقن الماء أو إيقاف حقنه دون أن يتأثر في ذلك سلوك الحقن، ولن يكون لكمية الماء التي يمكن حقنها حدود، بل يمكن لنسبة الماء إلى الوقود أن تتجاوز القيمة $\frac{1}{1}$.

وقد أثبتت التجربة أنه عند النسبة 70% للماء إلى الوقود فإن طريقة DWI تخفِّض إصدار $NO_x$ حتى 8 g/kwh أو حتى نسبة 50% أقلّ من الحدود المسموحة وفق IMO كما هو مبين في الشكل (7).




**الشكل (7) تأثير كمية الماء المحقونة على إصدار المحرك لأكاسيد الآزوت.**

لكنّ ثمة أمراً يجب مراعاته هو تأمين الماء العذب على متن السفينة، حيث أنه عندما يلزم تأمين 20 إلى 50% كميات إضافية من الماء، فإن كميات الماء الإجمالية الواجب توفرها على السفينة تصبح كبيرة.

**7) الجمع بين حقن الماء وتدوير غازات الاحتراق:**

رغم إمكانية تطبيق طريقة DWI وحدها، فمن المفيد استخدام هذه الطريقة مع التدوير الداخلي لغازات الاحتراق Exhaust Gas Recirculation (EGR)، حيث يتوقع الباحثون أن تتيح طريقة الجمع هذه تخفيض إصدار $NO_x$ حتى 5 g/kWh أي إلى حدود أدنى بكثير من متطلبات IMO.

يرفع التدوير الداخلي للغازات عادةً الإجهاد الحراري للمحرك، ومن ثمة فإن حقن الماء يستخدم لتخفيض مستويات درجات الحرارة وإبقاء الحمولات الحرارية عند الحدود التي تقابل تشغيل المحرك بلا تدوير للغازات EGR.

مبدئياً يخفِّض التدوير الداخلي للغازات عملية نشوء $NO_x$ عبر تخفيض كمية الأوكسجين الموجودة في الأسطوانة وكمية حرارة الشحنة فيها. وبعكس ما هو مألوف في المحركات رباعية الشوط حيث يتم تدوير الغازات خارجياً عبر مجاري تصريف خارجية، فإنه في المحركات ثنائية الشوط ذات سرعات الدوران المنخفضة يُفَضَّل تعديل

عملية تكنيس المحرك لتخفيض نقاء الغازات في الأسطوانة عبر تخفيض ارتفاع فتحات التكنيس لتقليل كمية هواء الكسح الذي يجتاز الأسطوانة.

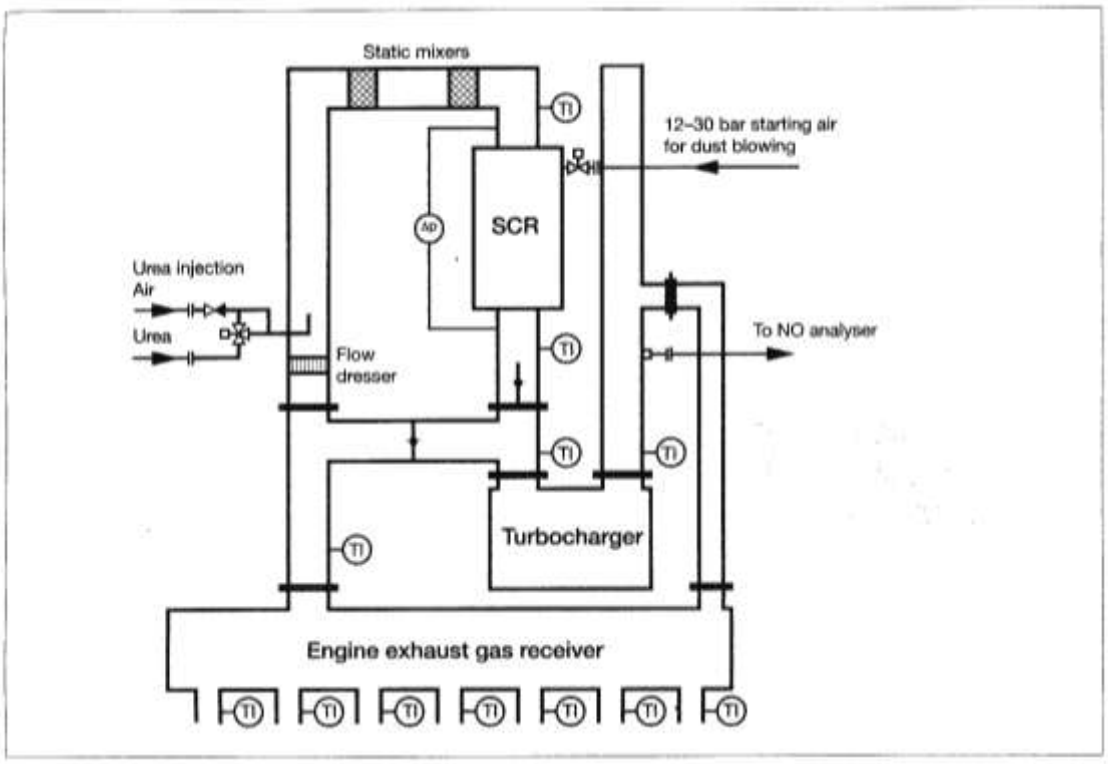
من النتائج الإيجابية لذلك نذكر تخفيض حجم الشاحن التوربيني اللازم، بسبب انخفاض تدفق غازات الاحتراق. كذلك فإنه كلما انخفضت فتحات الكسح تزداد الاستفادة من عملية تمدد الغازات في الأسطوانة ومن ثمة يتحسن استهلاك الوقود. ولتخفيض تدفق الغازات مزية أخرى هي ارتفاع درجة حرارة الغازات، مما يدعم عمل منظومة استرجاع حرارة الغازات كما سيرد في فقرة لاحقة.

**8) التخفيض الانتقائي لبعض نواتج الاحتراق باستخدام الحفازات Selective Catalyst Reduction (SCR):**

في الحالات التي يلزم بها الوصول إلى الحدّ الأدنى من إصدارات $NO_x$ فإننا نلجأ إلى استخدام التخفيض الانتقائي باستخدام الحفازات، مما يسمح بتخفيض مستويات إصدار $NO_x$ إلى 90%.

وفي هذه التقانة المطبقة الآن على نطاقٍ واسع في السيارات تُحقن كميات صغيرة ومحددة من محلول اليوريا(البولة) urea ذي الصيغة الكيميائية $(NH_2)_2CO$ على تيار غازات الاحتراق قبل وحدة الحفاز.

في المحركات ثنائية الشوط البحرية يُفضَّل تركيب وحدة التحفيز بين مجرى تصريف غازات الاحتراق ومدخل العنفة التابعة للشاحن التوربيني كما هو مبين في الشكل (8).




**الشكل (8) مبدأ طريقة التخفيض الانتقائي للغازات الضارة SCR (استخدام الحفاز)**

اختير هذا الموقع لضمان أن درجة حرارة غازات الاحتراق مرتفعة بما يكفي لعملية التحفيز. تقانة SCR مطبقة في السفن في الوقت الحاضر فقط في حالات خاصة، وهناك على سبيل المثال ثلاث سفن لنقل المنتجات الورقية مزودة بمحركات سولزر مجهزة بتقانة SCR يبلغ إصدارها من $NO_x$ القيمة 2 g/kWh أو أقلّ.

يجدر القول: إن تركيب حفازات على المحركات ذات المجرى المشترك لحقن الوقود سيكون حلاً أمثل من ناحيتي استهلاك للوقود، وإصدار $NO_x$.

**9) الوقود ذو المحتوى المنخفض من الكبريت وإصدار $SO_x$:**

يعتمد إصدار $SO_x$ تماماً على محتوى الوقود من الكبريت، وعلى الاستهلاك الإجمالي للوقود. ثمة تقانات للتخلص من غازات $SO_x$ في نواتج الاحتراق ولكنها تحتاج لتجهيزات كبيرة وغالية. ولذلك فإن الحل الأنسب لتخفيض إصدار $SO_x$ من محركات السفن هو ببساطةٍ تخفيض نسبة الكبريت في الوقود.

وفق الملحق السادس لاتفاقية ماربول 73/78 فإن الحدّ الأعلى لمحتوى الوقود البحري من الكبريت يجب ألا يزيد على 4.5%. ولكن في المناطق التي تجتازها السفن وتشترط إصداراً أقلّ لـ $SO_x$ (مناطق SECA)، فإنه يجب على السفن استخدام أنواع من الوقود لا يتجاوز محتواها من الكبريت 1.5% وزناً.

تستطيع المحركات الحديثة حرق أنواع من الوقود ذات محتوى منخفض من الكبريت (أقلّ من 1.5% كبريت) دون صعوبات، بشرط الانتباه إلى مواصفات زيت التزليق المستخدم للأسطوانات، وإلى معدل تدفق الزيت، ودرجة حرارة ماء تبريد جدار الأسطوانات [7]. ومن أجل العمل لفترات طويلة باستخدام أنواع من الوقود ذات محتوى منخفض من الكبريت، فإنه يُنصَح باستخدام زيوت تزليق ذات رقم أساس إجمالي (TBN) أخفض.

وبصرف النظر عن محتوى الوقود من الكبريت فإنه يجب المحافظة على درجات الحرارة الضرورية لتبريد الأسطوانات ضمن مجالات محددة، فمحركات RTA مثلاً مصممة لتعمل عند درجات حرارة أعلى من درجة حرارة الندى، الأمر الذي يجعل المحرك غير حسّاس لتغيرات محتوى الوقود من الكبريت.

إن استخدام الوقود ذي المحتوى المنخفض من الكبريت يحتاج بالطبع إلى معاملة خاصة من ناحية التخزين على السفينة والمناولة وجمل المعالجة، وينصح بفصله عن أنواع الوقود الأخرى، لأنه قد يكون غير متآلف معهاincompatible. كما يجب اتخاذ إجراءات مشابهة بخصوص زيت تزليق الأسطوانات.

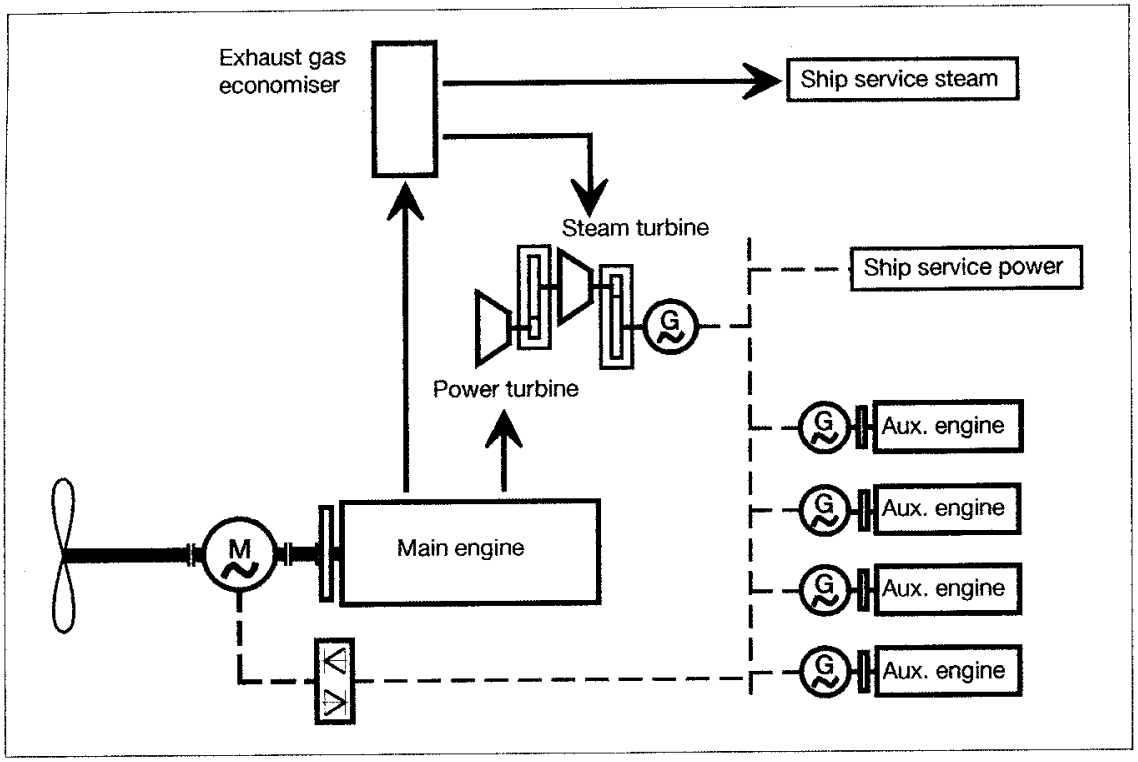
**10) منشأة الاسترجاع الكامل للحرارة Total Heat Recovery Plant:**

يمكن تخفيض المستوى الإجمالي للإصدارات من المحرك على نحو كبير عبر استخدام منظومة استرجاع الحرارة الضائعة. مثلاً قامت شركة Wärtsilä السويسرية بتطوير منشأة من هذا القبيل تستطيع استرجاع 11% من الاستطاعة المقدمة عند محور المحرك، والاستفادة منها كطاقة كهربائية إضافية تستخدم لدفع السفينة أو للخدمات المختلفة على متن السفينة [8]، ومن ثمة فإن مزية هذه المنشأة هي تخفيض استهلاك المحرك للوقود وتخفيض إصداره للغازات و زيادة استطاعة الدفع المتوفرة. هذا التصميم سمح بزيادة طاقة غازات الاحتراق في المجال الكلي للحمولة من خلال استخدام شاحن عنفي (توربيني) turbocharger يُرسل إليه الهواء من الوسط الخارجي بدلاً من سحبه من حجرة الآلات على السفينة.

تُصمَّم في العادة المحركات البحرية بحيث لا تتجاوز درجة حرارة الهواء المسحوب من حجرة الآلات في المناطق الاستوائية القيمة 45ºC. فإذا تم سحب الهواء من الوسط الخارجي (بدل حجرة الآلات) فإن درجة حرارة الامتصاص إلى المحرك ستصبح أدنى من 35ºC.

إن درجة الحرارة المنخفضة لهواء السحب ستدعم الشاحن العنفي في تخفيض الحمولة الحرارية للمحرك المعدّل وجعلها مقاربةً لحمولة المحرك المألوفة، وهكذا لن تنشأ أية تأثيرات في موثوقية المحرك.

وستكون كميات الغازات الناتجة أكبر، ولذلك فإن المنظومة المعدّلة تسمح برفع كلٍّ من درجة حرارة الغازات المرسلة إلى الموفر وتدفقاتها المرسلة إلى العنفة (محسوبةً عند الشروط النظامية).



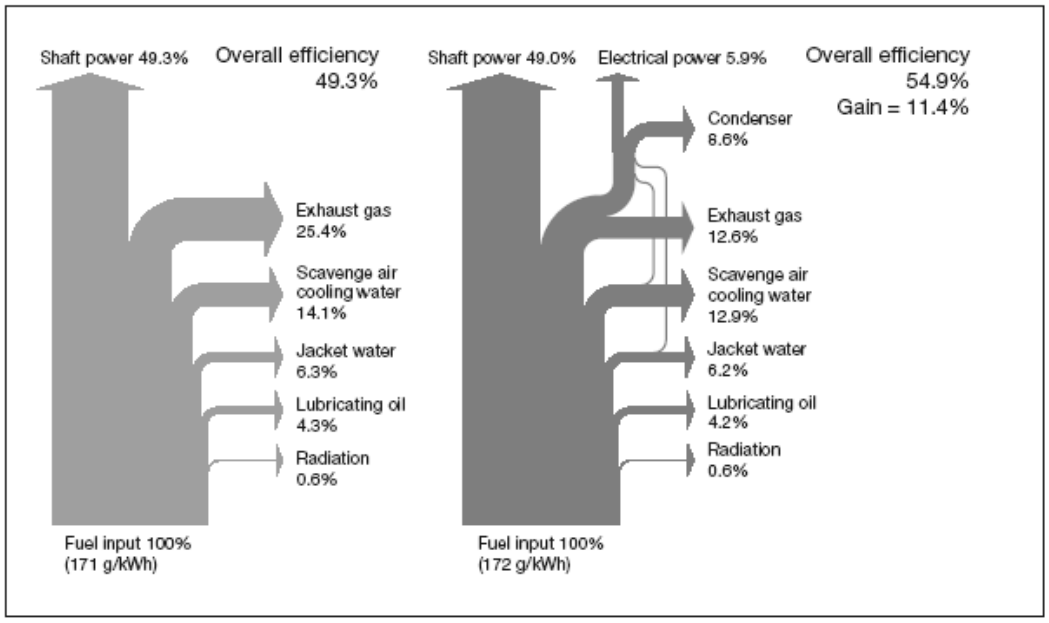

**الشكل (9) مخطط منشأة الاسترجاع الكامل للحرارة**

وهكذا يمكن استعادة طاقة غازات الاحتراق والاستفادة من هذه الطاقة في كلٍّ من العنفتين الغازية (للشاحن التوربيني) والبخارية، بحيث يمكن توليد طاقة كهربائية تكافئ حوالي 11% من طاقة المحرك. انظر الشكلين (9 و 10). يمكن الاستفادة من الطاقة الكهربائية الناتجة إما عبر المولد الكهربائي المركّب على محور الرفاص أو في تغذية بعض الآلات الموجودة على متن السفينة.

وهكذا يمكن الاستفادة من الطاقة المولدة التي يمكن أن تسهم كثيراً في تخفيض تكاليف الوقود وتقليل الإصدارات ($CO_2$ , $NO_x$ , $SO_x$...).

أما بخصوص زمن استرجاع التكاليف الإضافية لهذه المنشأة فإنه يعتمد على تصميم الأجهزة المركّبة وعلى تكاليف تشغيلها، ولكن يُتوقَّع أن يكون هذا الزمن أقلّ من خمس سنوات.

وثمة مزية إضافية لمنشأة الاسترجاع الكامل للحرارة هي الاستخدام في السفن الضخمة لنقل الحاويات ذات الاستطاعات العالية جداً التي لا تستطيع المحركات العادية تقديمها، حيث تتوفر الآن محركات تفوق استطاعتها 80.000kW.




**الشكل (10) مقارنة الموازنة الحرارية لمحركات 12RT-flex96C**

**على اليسار: بدون الاسترجاع الكامل للحرارة**

**على اليمين: بذات الاسترجاع الكامل للحرارة**

## الاستنتاجات والتوصيات:

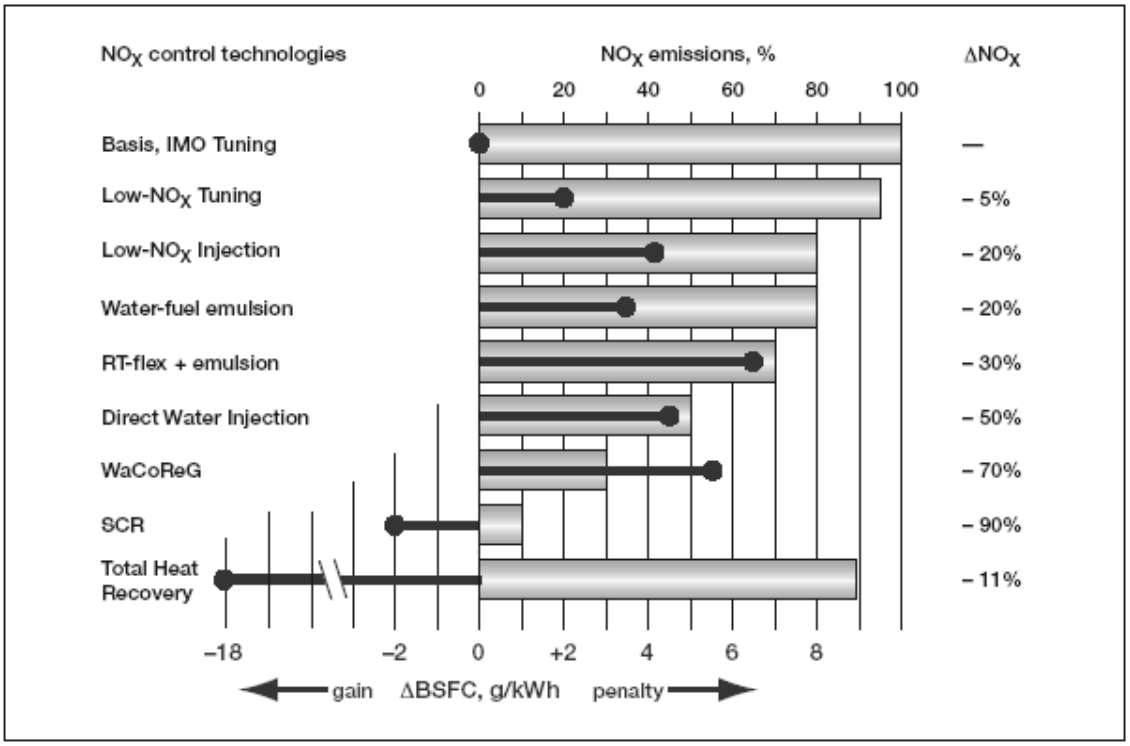
إن التقانات الحديثة كفيلة بإيجاد حلول للمتطلبات الحديثة للوائح إصدارات المحركات البحرية ذات سرعات الدوران المنخفضة. واستمرار التطوير سيضمن أن هذه التقانات لن تتضارب مع وثوقية المحرك ولا مع عمره الفني (فترة خدمته). ولكن في الوقت نفسه يجب تركيز الاهتمام للتأكد من الموازنة بين استمرار تطور اقتصادية استهلاك الوقود وتخفيض الإصدارات الضارة.

ثمة تقانتان هما الحقن المباشر للماء DWI وتبريد الغازات المتبقية في الأسطوانة بواسطة حقن الماء (Water- Cold Residual Gas) Wa Co ReG تسهمان على نحو رئيسي في تخفيض إصدارات $NO_x$.أما التخفيض الأشد لهذه الغازات فيتم عبر تركيب الحفازات SCR.

كل هذه الحلول قابلة للتطبيق في المحركات التقليدية التي يتم التحكم بمضخات حقنها ميكانيكياً. أما المحركات ذات المجرى المشترك لحقن الوقود فإنه يمكن إضافةً إلى تخفيض إصدارات $NO_x$ تخفيض استهلاك الوقود إلى الحد الذي يجعل إصدار $CO_2$ أصغرياً، ويمكن تحقيق ذلك عبر إجراء المعايرة اللازمة. كما يتيح استخدام تقانة المجرى المشترك لحقن الوقود تخفيض إصدار الدخان إلى الحد الذي لا يمكن عنده رؤية أي دخان في الغازات عند جميع سرعات السفينة، وستمكِّن هذه التطورات من جعل السفن الحديثة رفيقةً بالبيئة.

إن اختيار تقانة معينة يعتمد كثيراً على الدرجة المطلوبة لتحفيض $NO_x$، وقد تم في الشكل (11) تلخيص وعرض تخفيض الإصدارات باستخدام التقانات الحديثة المختلفة. كما تم في الشكل تمثيل ضريبة ارتفاع استهلاك الوقود المقابلة لكل تقانة. وللتوفيق بين مستوى إصدار $NO_x$ ومعدل استهلاك الوقود يجب القبول بأن اللجوء إلى تعديل التصميم الداخلي للمحرك يرافقه ازدياد في الإصدارات الأخرى ( $CO_2$ , $SO_x$... إلخ ).

أي أنه يوجد تضارب بين استراتيجيات تخفيض الإصدارات ولا بدّ من التريث الشديد عند اختيار أسلوب معين.




**الشكل (11) مقارنة بين الطرق المختلفة لتخفيض $NO_x$ والاستهلاك النوعي للوقود**

من المهم الإشارة بأنه لا بد من السعي لتحقيق تخفيض كلي لجميع الإصدارات من أجل معالجة مسألة الاحتباس الحراري المرتبطة بـ $CO_2$ ومسألة تلوث البيئة. وهذا يعني حتمية الاعتماد على الأجهزة الخارجية التي تُركَّب على المحرك مثل الحفازات (SCR) وأجهزة استرجاع الحرارة الضائعة. هذا إلى جانب التركيز على تشغيل محركات السفينة في الشروط المثلى.

## المراجع:

1. KOEHLER,H. *Field experience with considerably reduced NOx and smoke Emissions, Report of MAN B&W Diesel* , Copenhagen, Denemark, 2005, 1-10.
2. *BP Statistical Review of World Energy* , June 2004, 1-36.
3.SCHMID, H. *Marine Technologies for reduced emissions.* Marine News Waertsilae Corporation, Switzerland, April 2005, 25-40.
4. FLEICHER,F.; GRATZA,K-W. *Reduced soot/particulate emission during vessel Maneuvering.* MTZ Germany, June 2003, 31-36.
5. MEIER-PETER, H. *Handbuch Schiffsbetriebstechnik*. 1.Auflage, Seehafen Verlag, Germany, 2006, 84-100.
6. WEISER,G. *Wide choice in fuel consumption for Sulzer engines*. Marine News 3-Wärtsilä Corporation, Switzerland , 2004, 1-13.
7. WELSH, M. *Considerations for using low-sulphur fuels*. Marine News Wärtsilä Corporation , Switzerland, March 2002 , 1-21.
8. SHMID, H. *Less emissions through waste heat recovery*. Green Ship Technology Conference, London, 2004, 1-10.