مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (2) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (2) 2012

حساب مردود مرجل البخار في محطات الطاقة الحرارية عند حمولات متغيرة وتحديد معامل الهواء الزائد الأمثل

الدكتور محمد علي*

(تاريخ الإيداع 3 / 1 / 2012. قُبِل للنشر في 10/ 4 / 2012)

□ ملخّص □

يتضمن البحث دراسة تأثير بعض العوامل المؤثرة على الضياعات الحرارية الناتجة عن الاحتراق غير الكامل للوقود، على مردود مرجل البخار في محطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية، ويشمل البحث أيضاً تقييم الطرق المستخدمة لحل مشاكل الضياعات الحرارية، وتحديد العلاقة التي تربط بين حمولات المرجل، ومعامل الهواء الزائد على الضياعات الحرارية، والتحكم المباشر بتدفق الهواء للحصول على اقتصادية جيدة في عملية احتراق الوقود، وتحديد القيمة المثلى لمعامل الهواء الزائد في شروط عمل المرجل، والتي يجب تأمينها عن طريق أجهزة التحكم والأتمتة لمعدات المرجل من أجل تحقيق التوفير في استهلاك الوقود والحصول على القيمة المثلى لمردود المرجل.

الكلمات المفتاحية: محطات الطاقة الحرارية–مردود مرجل البخار–الضياعات الحرارية–الاحتراق في مراجل البخار.

* مدرس–قسم هندسة القوى الميكانيكية–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة تشرين–اللاذقية–سورية

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (2) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (2) 2012

Calculation Of Boiler Efficiency In Thermal Power Plants At Variable Loads & Determining The Optimal Of Excess Air Coefficient

Dr. Mohammad Ali*

(Received 3 / 1 / 2012. Accepted 10 / 4 / 2012)

□ ABSTRACT □

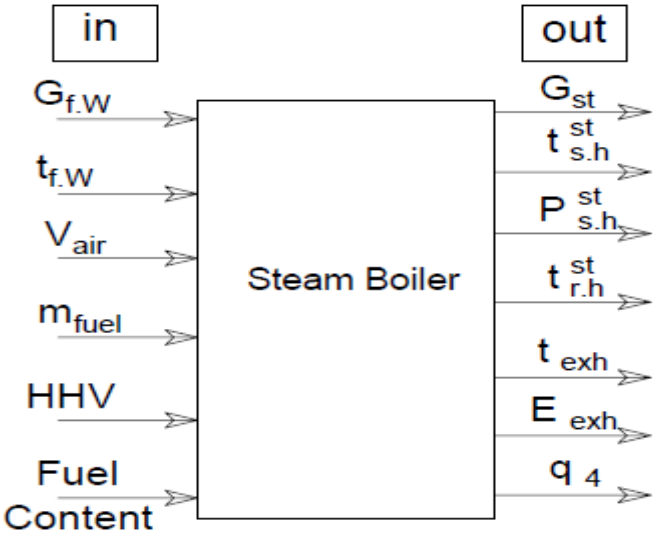
This research includes a study of the effect of some influencing factors on heat losses produced by the unburning fuel on the efficiency of Steam Boiler in the traditional Electric Power Plants. It contains a discussion of the used methods of losses problems, a determination of the relation between the boiler heat loads and the excess air coefficient on heat losses, the direct control of air flow in order to obtain a good economical burning of fuel process, and to determine the optimal value of excess air coefficient in condition of Boiler operation ,through using automatic controlled systems of boiler devices to economize fuel rate and the optimal value of Boiler Efficiency.

Keywords: Thermal Power Plant; Efficiency of Steam Boiler; Heat Losses; Combustion in The Steam Boiler.

*Assistant professor, Department of Mechanical power Engineering, Faculty of Mechanical &Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

مع تطور أساليب إنتاج الطاقة في العالم، فإن مسألة أتمتة معدات محطات الطاقة الحرارية يشغل حيزاً كبيراً كما يركز انتباه الباحثين حول أتمتة الحلقات المعقدة لمجموعة توليد الطاقة، وبالخصوص معدات احتراق الوقود في مرجل البخار، والذي يؤثر فيه عدد كبير من بارامترات الدخل وبارامترات الخرج – العناصر المتحكم بها [1] الموضحة في الشكل (1).



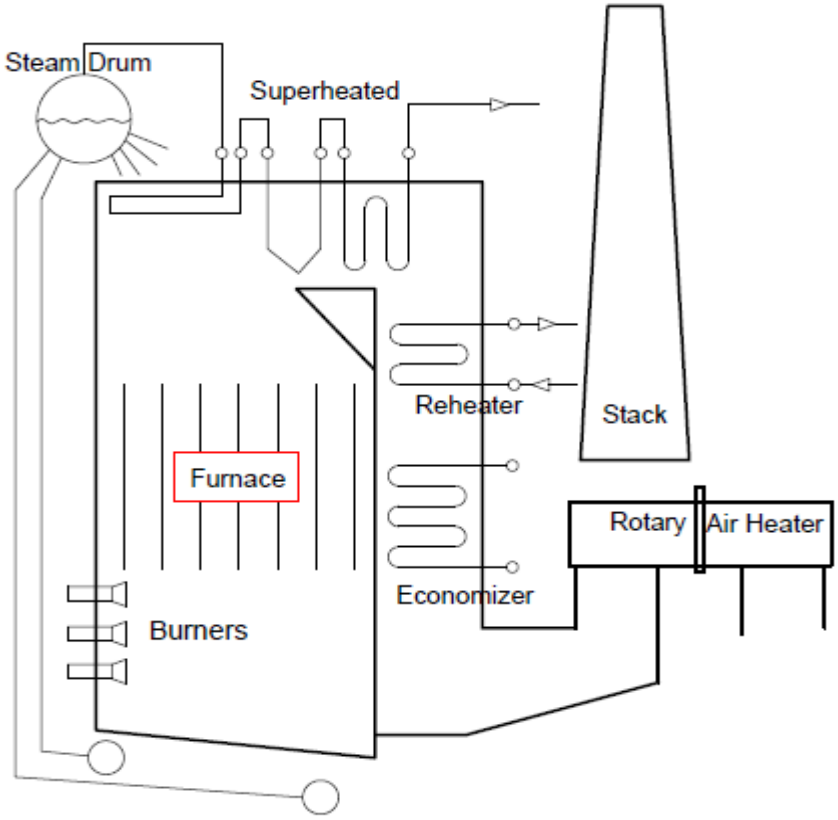
الشكل(1) مخطط رمزي لبارامترات الدخل والخرج في مرجل البخار.

تعدُّ عملية تأمين التشغيل الاقتصادي الموثوق لمرجل البخار من أهم الوظائف الرئيسة للتحكم الحديث بمعدات مرجل البخار، وهي تحدد المواصفات النوعية والكمية لبارامترات الدخل والخرج حيث يتم قياسها، أو حسابها بغية إعطاء الإشارات المناسبة للتحكم بمعدات احتراق الوقود [2].

إن هذه الغاية تتحقق عن طريق خمسة أنظمة تحكم أساسية (حمولة المرجل–ضغط البخار الأولي–اقتصادية عملية احتراق الوقود الأمثل–الضغط داخل حجرة الاحتراق–درجة حرارة البخار المحمص الثانوي–درجة حرارة ماء التغذية)، بالإضافة إلى بعض أنظمة التحكم ببارامترات أخرى.

إحدى أهم وظائف التحكم في المراجل الحديثة هي الحصول على مردود مرتفع للمرجل قدر الإمكان وتحقيق الاحتراق الكامل للوقود،حيث يمكن تحقيق هذه الوظيفة باستخدام نظام التحكم الأوتوماتيكي لعملية الاحتراق الاقتصادية والتي يمكن بنائها على شكل نظام طرفي للاحتراق، أو نظام تحكم يربط بين تدفق الوقود وتدفق الهواء، أي على شكل نظام الحل الأمثل غير المباشر.

تبين نتائج البحوث السابقة التي تم الحصول عليها في الوقت الحاضر، بأن الطرق المباشرة لحساب مردود المرجل باعتماد الحل الأمثل للاحتراق في المراجل البخارية المستخدمة في محطات توليد الطاقة الحرارية غير مناسبة وأن مسألة عملية الاحتراق الأمثل يمكن حلها بطريقة تقريبية باستخدام طريقة الحل الأمثل غير المباشر، أي طريقة التحكم بالعلاقة بين إشارات الدخل المعطاة ومعدل تدفق الهواء مع الإشارات الإضافية المصححة بالاضطراب والانحراف.يبين الشكل(2) أجزاء مرجل البخار في محطة توليد طاقة كهربائية.



الشكل(2) مخطط رمزي لمرجل البخار.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث بمعرفة فعالية وكفاءة تحويل الطاقة الكامنة في الوقود إلى طاقة حرارية، وما ينتج عنها من ضياعات حرارية مختلفة نتيجة عدم احتراق الوقود بشكل جيد وتحت الشروط الاستثمارية للمراجل البخارية كافة، وأيضاً إيجاد طريقة لتحديد الضياعات الحرارية الناتجة عن عدم الاحتراق الميكانيكي للوقود، وتحديد مردود المرجل والتحكم بالعوامل المؤثرة، وذلك من خلال حساب الضياعات الناتجة عن عدم احتراق الوقود بشكل كامل، وبدقة عالية إضافة إلى التحكم بهذه العملية عن طريق تغيير تدفق الهواء في الحراقات بعد معرفة تركيب غازات الاحتراق بشكل متواصل بطريقة سهلة وعملية وبالتالي توفير في استخدام الوقود.

طرائق البحث ومواده:

تعتمد طريقة البحث على مبدأ تقييم الطرق المعتمدة لحل مسألة عملية الاحتراق الأمثل ضمن مراجل البخار وتأثير بارامترات المحطة الرئيسة ومقارنتها وتطبيق نتائج البحث على محطات توليد الطاقة في سورية.

النتائج والمناقشة:

في هذا البحث العلمي تم وضع المسألة، وتم بحث عملية التحكم الاقتصادي بالاحتراق في المراجل بالاعتماد على استخدام أنظمة الأتمتة والتحكم غير المباشر. هذه المسألة تم دراستها عند شروط عمل مرجل البخار الذي يغطي حمل القاعدة، أو حمل متغير خلال اليوم،أي تم تحديد الظروف المثلى من أجل عملية الاحتراق.

تم تطبيق نتائج البحث هذا على المجموعة الثانية في محطة بانياس الحرارية.أهم بارامترات المحطة: الاستطاعة الكهربائية الإسمية 170ميغا واط،تدفق البخار 520 طن/سا عند مدخل العنفة،ضغط البخار الأولي142 بار،درجة حرارة البخار *542* م°.

كما هو محدد في العديد من البحوث العلمية[1] فإن مردود المرجل البخاري يتعلق بنظام عمله وعوامل استثمارية مختلفة أهمها:

$$\eta_{Boi} = f(W_S / W_S^N, E, t_{FW}, \text{خواص الوقود}) \qquad (1)$$

حيث:

- W_S / W_S^N الحمولة النسبية للمرجل– نسبة الحمولة الفعلية إلى الحمولة الاسمية للمرجل (إنتاجية النسبة من البخار *Kg/sec*)
- E : معامل الهواء الزائد عند مخرج حجرة الاحتراق.
- t_{FW} : درجة حرارة ماء التغذية .
- –مواصفات الوقود – القيمة الحرارية للوقود وتركيب الوقود.

يمكن تحديد مردود المرجل بالطريقة المباشرة وبالطريقة غير المباشرة[6] باستخدام المعادلتين:

$$\eta_{Boi} = Q_1 / HHV \qquad (2)$$

$$\eta_{Boi} = Q_1 / (Q_1 + \sum_{i=2}^{6} Q_i) \qquad (3)$$

حيث:

Q_1 : كمية الحرارة المفيدة في المرجل.

HHV : القيمة الحرارية للوقود.

$\sum_{i=2}^{6} Q_i$: مجموع الضياعات الحرارية.

Q_2 : كمية الحرارة الضائعة مع غازات الاحتراق.

Q_3 : كمية الحرارة الضائعة نتيجة الاحتراق غير الكامل للوقود.

Q_4 : كمية الحرارة الضائعة نتيجة الاحتراق الميكانيكي غير الكامل.

Q_5 : كمية الحرارة الضائعة نتيجة التسرب الحراري من جسم المرجل.

Q_6 : كمية الحرارة الضائعة مع الخبث.

يمكن تحديد قيمة المردود بطريقة الموازنة المباشرة بالعلاقة(2) في حال إمكانية قياس تدفق الوقود بدقة ومعرفة تركيب الوقود السائل، أو الغازي،أما عند استخدام الطريقة غير المباشرة بالعلاقة (3) لابد من معرفة قيم الضياعات الحرارية التي يمكن قياسها، أو حسابها كاملة.عند حرق الوقود الغازي أو السائل. كما لابد من الإشارة هنا أن الضياعات الناتجة عن الاحتراق غير الكامل لأسباب ميكانيكية صغيرة ولكن لا يجوز إهمالها.

في كثير من الأعمال العلمية حاول الباحثون في إعداد أجهزة قياس وحساسات بغية قياس الضياعات الناتجة عن الاحتراق الميكانيكي الناقص ولكن لم يتمكنوا بدقة من الوصول إلى ذلك .

لكن على أساس تحليل نتائج البحوث العلمية تبين أن تقيّيم اقتصادية عملية الاحتراق لابد من اعتمادها على المعيار الأمثل والذي تدخل به عملية ضياعات الاحتراق[3]و[4]واستهلاك الطاقة الكهربائية من قبل أجهزة سحب الهواء إلى الحراقات وطرد غازات الاحتراق بحسب العلاقة:

$$\eta_{Boi} = 1 - (\sum_{i=2}^{6} q_i + q_E) \qquad (4)$$

حيث:

$$q_i = Q_i / HHV$$

$\sum_{i=2}^{6} q_i$ – مجوع الضياعات النسبية في عملية الاحتراق

q_E –الطاقة الكهربائية المستهلكة في مراوح الدفع والسحب كنسبة من كمية الحرارة المستهلكة.

بما أن قيم: q_E, q_3, q_5, q_6 يمكن حسابها بالطريقة العيارية. إذاً تصبح المسألة الأساسية هنا كيفية دراسة العوامل المؤثرة على الضياع الحراري مع الغازات الخارجة إلى المدخنة (q_2)،والضياعات الناتجة عن الاحتراق الميكانيكي غير الكامل (q_4)،وتحديد درجة تأثير هذه العوامل على أداء المرجل.

إن العوامل المؤثرة على الضياعات السابقة تتعلق: بالإنتاجية النسبية للبخار في المرجل W_S / W_S^N،وبمعامل الهواء الزائد E (الشكل3)،وبرطوبة الوقود w_F ، وبدرجة ماء التغذية t_{FW} ،ومقدار امتصاص المرجل من الهواء المتسرب في مختلف أجزاء مجرى غازات الاحتراق في المرجل ΔE_i .

مما سبق، فإن الضياع (q_2) و(q_4) متعلقة بالعوامل السابقة كالتالي:

$$q_2 = f(W_S / W_S^N, E, t_{FW}, w_F, \Delta E_i) \qquad (5)$$

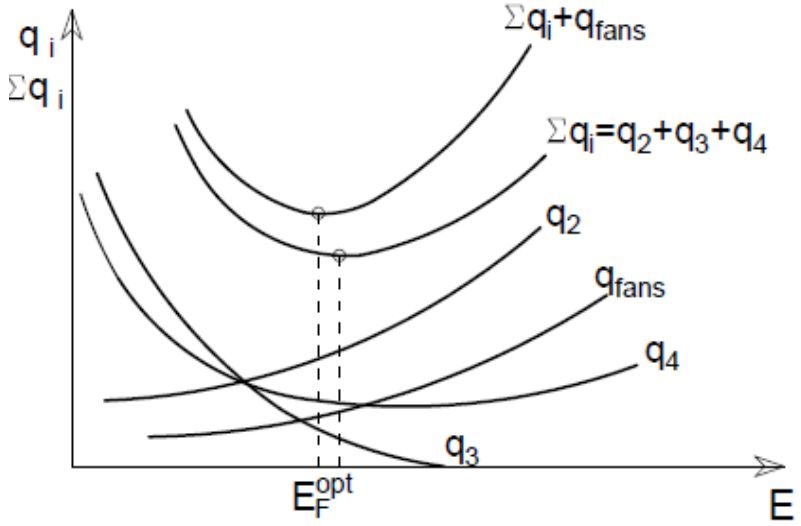
$$q_4 = f(W_S / W_S^N, E, t_{FW}, w_F, \Delta E_i) \qquad (6)$$

يعتبر معامل الهواء الزائد أي نسبة الأكسيجين الزائدO_2 [5] الموجود ضمن غازات الاحتراق عند مخرج حجرة الاحتراق عاملاً مهماً ورئيسياً،أما بقية العوامل فهي مرتبطة بالظروف الاستثمارية للمرجل.

يتم تحديد مواصفات العوامل المؤثرة(تغير محتوى رطوبة الهواء–درجة حرارة ماء التغذية، ومقدار امتصاص الهواء) في أقسام المرجل بقياس بارامترات مرجل البخار ،والمعطيات المبينة في الجدول رقم(1) والتي تم اعتمادها في البحث بناءً على الخبرات المتراكمة من استثمار، وتجريب المراجل.

الجدول (1)القيم الصغرى والعظمى لبارامترات مرجل البخار.

البارامترات	$t_{F.W}$	$w\%$	$\Delta E_{A.H}$	ΔE_{CON}	ΔE_F	$Ash\%$
القيمة العظمى	270	2	0.20	0.12	0.12	1
القيمة الدنيا	127	0.5	-	-	-	-



الشكل (3) معامل الهواء الزائد الأمثل في المرجل عند القيمة الدنيا للضياعات[3].

ومن أجل تحديد q_4 يمكن استخدام الطرق التالية:

1. طريقة القياس المباشر[6]: كما أشرنا سابقاً فإنه حتى الآن لا يوجد حساس قياس متواصل لتحديد الاحتراق الميكانيكي الناقص،أما عن نتائج القياس التجريبي فمن غير الممكن استعمالها في منظومة التحكم الآلي(عند العمل الطبيعي للمرجل).
2. طريقة التحليل المتوالي: تمَكن هذه الطريقة من حساب العديد من العوامل المؤثرة على q_4 وهذه العوامل من مميزات طريقة التحليل المتوالي،لكن وبسبب العدد الكبير من العوامل المؤثرة التي يتم الحصول عليها باستخدام المعادلة المتتالية ينبغي إجراء تجارب صعبة خلال فترة طويلة.لكن وفي بعض الأحيان تعطي المعادلة المتتالية نتائج غير دقيقة عند ظهور عوامل استثمارية لم يتم قياسها سابقاً(التغذية غير المنتظمة للوقود والهواء في بعض الحراقات المنفصلة للمرجل،اتساخ حجرة الاحتراق بنواتج الاحتراق،اتساخ الحراقات ... الخ)وبالأخص عند ترابط العوامل المقاسة ببعضها البعض مثال (تغير حمل المرجل،تغير درجة حرارة الهواء الساخن عند مدخل الحراقات).
3. الطريقة التحليلية لحساب q_4 بناءً على محتوى غازات الاحتراق: تعتمد هذه الطريقة على تحديد E و q_4، وذلك بإجراء القياس لمركبتين على الأقل من عناصر نواتج غازات الاحتراق للمرجل: وذلك لأن محتوى CO في غازات الاحتراق عند القيمة E، القريبة من قيمة معامل الهواء الزائد المثالية E_F^{opt} تكون قيمة صغيرة ،وهنا يمكن اعتبار قيمة $q_3 = 0$ ،ولهذا من الضروري قياس المحتوى الحجمي لتركيب غازات الاحتراق ومن المعطيات العملية المقاسة يمكن تحديد نسبة مركبات الغازات، وفق المعادلات:

$$P_{O2} = (V_{O2} / V_g)$$
$$P_{CO2} = (V_{CO2} / V_g)$$
$$P_{SO2} = (V_{SO2} / V_g) \qquad (7)$$

$$P_{H2O} = (V_{H2O} / V_g)$$
$$P_{RO2} = (V_{RO2} / V_g)$$

حيث: $V_{H2O}, V_g, V_{O2}, V_{CO2}, V_{RO2}$ النسب الحجمية للغازات .

إن قيمة كلٍ من المركبتين P_{RO2} ، P_{O2} مرتبطة عكسياً مع قيمة E و q_4 ويمكن كتابتها باستخدام المؤشرين G,K:

$$G = P_{RO2} - P_{O2} = \frac{V_{RO2}}{V_g} - \frac{V_{O2}}{V_g} \quad (8)$$

$$K = \frac{P_{RO2}}{P_{O2}} = \frac{V_{RO2}}{V_{O2}} \quad (9)$$

تحدد القيم العددية للمعاملين G و K وفق المعادلتين (10) و(11) كتابع لمعامل الهواء الزائد والضياعات E و q_4 كتالي:

$$G(E, q_4) = \frac{1.8660(1-q_4) - (1.8625+L)(E-1) - 1.8625q_4}{4.8500E(1.8625+L) + L + M + 0.0035(q_4 - 1)} \quad (10)$$

$$K(E, q_4) = \frac{1.8660(1-q_4)}{(1.8625+L)(E-1) + 1.8625q_4} \quad (11)$$

حيث يمكن كتابة المؤشرات M و L وفق المعادلة التالية بناءً على تركيب الوقود المستخدم (H_2, C, N_2, S, w):

$$L = \frac{5.55H_2 + 0.70O_2}{C + 0.375S} \quad ، \quad M = \frac{1.24w + 11.10H_2 + 0.80N_2}{C + 0.375S}$$

وبطريقة عكسية يمكن من العلاقتين (10) و(11) الحصول على المعادلة (12)، وذلك بمعرفة قيمة كلٍ من q_4 ، أو E ومحتوى غازات الاحتراق من الأكسيجين في كل منطقة من مناطق مرجل البخار الدليل (i) حيث يمكن تقسيم المرجل إلى حجرة احتراق، والقسم الأفقي لمجرى الغازات حيث توجد ملفات تحميص البخار الأولي والقسم النازل ملفات إعادة تحميص البخار،ثم الموفر ومسخن الهواء الشكل(2):

$$E^{(i)}(q_4^{(i)}, P_{O2}) = \frac{1.866(1-q_4^{(i)}) + L(1-P_{O2}) + \left[M + 0.0035(1-q_4^{(i)})\right]P_{O2}}{(1.8625+L)(1-4.8500P_{O2})} \quad (12)$$

ومن المعادلة السابقة(12) نحصل على المعادلة التالية بدلالة L وM:

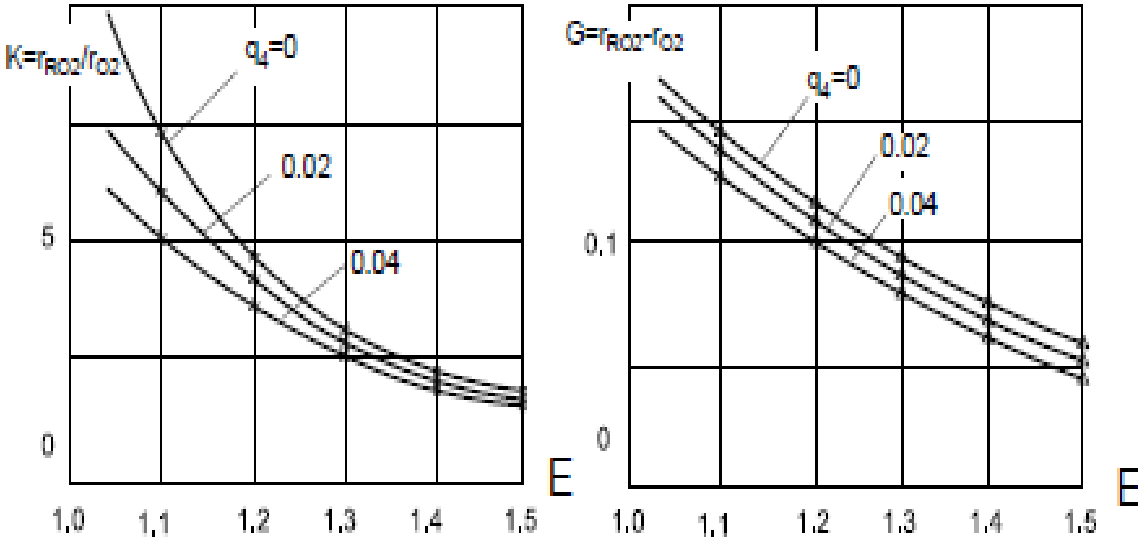
$$q_4^{(i+1)} = \frac{3.7285 - E^{(i)}(1.8625+L)(1+4.85G) - L(1+G) + (M-0.0035)G}{3.7285 - 0.0035G} \quad (13)$$

أو بدلالة L وK نحصل على:

$$q_4^{(i+1)} = \frac{1.8660 - (E^{(i)} - 1)K(1.8625 + L)}{1.8660 + 1.8625K} \qquad (14)$$

إن نتائج القيم G و K يوضحها الشكل(4) من أجل وقود تركيبه الكيميائي معروف:

C =83 % , S = 3 % , H2 =10.4 % , N2 =0.1% O2=1 % , w =3% , Ash =0.8



الشكل (4) العلاقة بين المعامل G و K ومعامل الهواء الزائد E عند قيم مختلفة للضياعات q_4.

الطريقة الحسابية التجريبية :

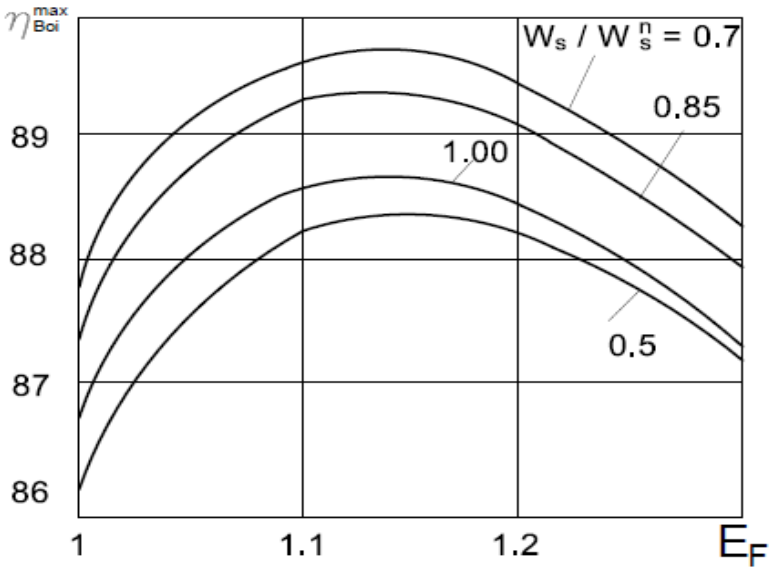
بالاعتماد على الخبرة الطويلة لاستثمار المراجل البخارية يمكن تحديد علاقة الاحتراق الميكانيكي الناقص بأهم العوامل الاستثمارية وذلك باستخدام القياسات[7] والمعطيات التجريبية،والتي يتم الحصول عليها من العلاقتين التحليليتين(15)و(16) اللتين تحددان قيمة ضياعات الاحتراق الميكانيكي عند الحمولة النسبية لمرجل البخار. عندما تكون قيمة الحمولة النسبية لمرجل البخار $(W_S / W_S^N \geq 0.7)$ تحدد قيمة ضياعات الاحتراق الميكانيكي من العلاقة التالية:

$$q_4 = 1.45 + 70.37\left(\frac{1{,}3 - E_F}{E_F}\right)^2 \qquad (15)$$

وعندما تتراوح قيمة الحمولة النسبية لمرجل البخار بين $(0.5 \leq W_S / W_S^N \leq 0.7)$ تحدد قيمة ضياعات الاحتراق الميكانيكي من العلاقة التالية:

$$q_4 = 1.45 + 70.37\left(\frac{1{,}3 - E_F}{E_F}\right)^2 + \frac{51}{E_F{}^2}(0.7 - W_S / W_S^N)^2 \qquad (16)$$

وبتطبيق المعادلتين (15)و(16) بعد تحديد قيم بقية الضياعات، نحصل على المردود عند حمولات مختلفة لمرجل البخار كما هو موضح بالشكل(5).



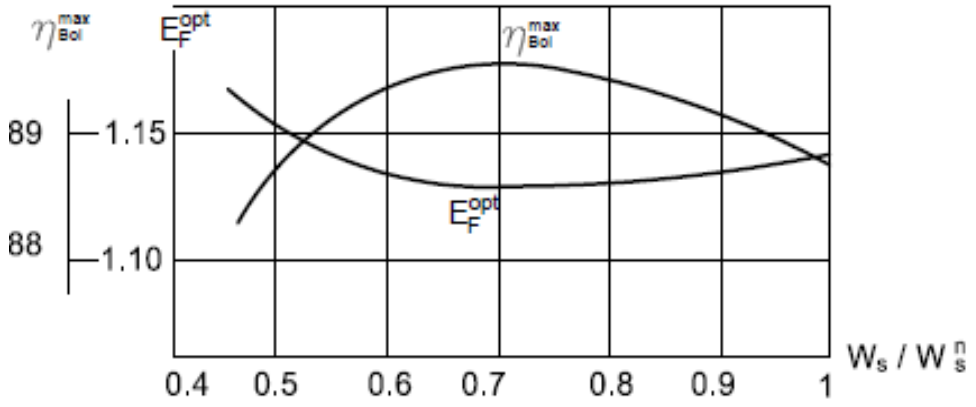
الشكل (5) تغير قيمة المردود مع تغير حمولة المرجل ومعامل الهواء الزائد.

تؤكد الحسابات المعطية إمكانية تحديد ضياع الاحتراق الميكانيكي غير الكامل بطريقة تحليلية وذلك من خلال تحديد محتوى CO_2 وO_2 في غازات الاحتراق أو بالطريقة الحسابية التجريبية.

تحدد الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق الخارجة في المدخنة بطريقة الحساب الحراري للمرجل وذلك عند قيم العوامل المؤثرة المختلفة والمتحكم بها[8]. ولقد أكدت نتائج الحسابات الأساسية تأثير العوامل المؤثرة المختلفة على المردود المفيد η_{Boi} للمرجل، منها: الحمولة النسبية للمرجل W_S / W_S^N،وتغير الرطوبة w_F في الوقود، ΔE_i امتصاص الهواء في أجزاء المرجل، t_{FW} درجة حرارة ماء التغذية،وعلى أساس النتائج العلمية المعطاة لتحديد المردود المفيد تم وضع النموذج (الموديل)الرياضي لمردود المرجل:

$$\eta_{Boi} = 1-[1-F_1(\overline{U},\overline{A_0})+F_2(\overline{U},\overline{A_0})]-(\overline{\Delta A})_t[\overline{\overline{A}}\,\overline{E}+\overline{B}] \qquad (17)$$

حيث: $F_1(\overline{U},\overline{A_0})$ دالة(متجهة) تحدد الضياعات الحرارية عند القيم الاسمية للعوامل المؤثرة المتبادلة،و $F_2(\overline{U},\overline{A_0})$ دالة تحددها استهلاك الطاقة الكهربائية الخاصة للمرجل مثل مراوح الهواء ومراوح سحب غازات الاحتراق عند القيم الاسمية،و $\overline{\Delta A}$ عامل الانحراف للتأثيرات التبادلية عن القيم الاسمية، و $\overline{\overline{A}}\,\overline{E}$ ($\overline{E}$متجهة الواحدة) ، $\overline{\overline{A}}$ مصفوفة العلاقات التي تربط بين الضياعات الحرارية والعوامل المؤثرة،و $\overline{B}$ دالة العلاقات بين الاحتياجات الخاصة للمرجل والعوامل المؤثرة.



الشكل (6) العلاقة بين الحمولة النسبية لمرجل البخار ومعامل الهواء الزائد ومردود المرجل.

يعطي الموديل الموضح بالمعادلة (17) إمكانية تحديد مردود المرجل η_{Boi} بناءً على العوامل المؤثرة أعلاه، وكذلك قيمة معامل الهواء الزائد الأمثل E_F^{opt} [8] المقدر بمحتوى غازات الاحتراق من الأكسيجين O_2. يبين الشكل (6) العلاقة بين قيم المردود عند تغير معامل الهواء الزائد عند حمولات مختلفة للمرجل ومن الشكل (6) نلاحظ أن القيمة العظمى لمردود المرجل η_{Boi}^{max} تكون عند الحمولة 70% من الحمولة الإسمية.

نلاحظ بنتيجة التحليل الرياضي وفق الموديل الذي تم الحصول عليه ووفق المنحنيات البيانية.أن القيمة العظمى للمردود لا توافق قيمة معامل الهواء الزائد الأمثل وهذه الإزاحة تعود لتأثير العوامل الأخرى مثل(درجة حرارة الهواء، درجة حرارة ماء التغذية، حمولة المرجل،مقدار امتصاص الهواء في أجزاء المرجل وغيرها)، وكل ما تتطلبه شروط الاستثمارية.

وعلى أساس تحليل النتائج، نقترح التحكم بتدفق الهواء وفق قيمة المتغيرات السابقة خلال الظروف الاستثمارية للمرجل من خلال تحديد العلاقة بين تغير حمولة المرجل وانحراف القيم السابقة عن القيمة الطبيعية.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. إن تحليل مشاكل عدم اكتمال عملية الاحتراق تؤثر بشكل كبير على اقتصادية عمل المرجل،ونؤكد أنه في الوقت الراهن ليس من المجدي استخدام طرق، ورسوم بيانية لعملية الاحتراق المثالية.
2. أثبتت الطريقة المقترحة باستخدام الموديل الرياضي إمكانية تحديد القيم الاستثمارية للاحتراق الميكانيكي الناقص بدقة عالية، وذلك بطريقة التحكم بمركبتين اثنتين لنواتج غازات الاحتراق CO_2 وO_2 بشكل مستمر، عند كافة ظروف استثمار المراجل.
3. على أساس الحسابات، والمعطيات النظرية، والأعمال المنشورة والمعطيات التجريبية والقياسات الأكثر دقة، وبإدخال تقويم الانحرافات، تم وضع النموذج الرياضي الذي يحدد العلاقة بين مردود المرجل η_{Boi} والعوامل المؤثرة الأساسية.
4. بمساعدة النموذج المقترح، والحسابات الموضحة التمهيدية، يمكن تحديد تغير قيمة المردود المفيد للمرجل عند تغير العوامل المؤثرة المختلفة وتصحيحه بإعطاء إشارة إلى أجهزة التحكم لتغيير تدفق الهواء لتحقيق عملية الاحتراق المثلى.

المراجع :

1. ian beaupeurt & alexander blatchford. calculate boiler efficiency using the losses methodology. report no: hlc/2005/094 october 2005,30p.
2. nattapong phanthuna , thaweesak trongtirakul. improvement program for heat balance analysis fuel to steam efficiency boiler and wireless transducer controlled. international journal of computers and communications issue 3, volume 2, 2008,8p.
3. عن اللغة الروسية: سكالوف ب.أ، تركيب واستثمار معدات مراجل البخار التي تعمل على الوقود الغازي أو السائل.أكاديمية موسكو،2007-304ص.
4. الدكتور سهيل حنا،الدكتور بسام حمود. مولدات البخار.منشورات جامعة تشرين-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، 1997، 260ص.
5. credit: 6 pdh a. bhatia. improving energy efficiency of boiler systems. course no: m06-022. engineering.com. 2005,71p.
6. energy management: 4.10.4 performance evaluation of boilers,7p. < http:// www.productivity.inknowledgebaseenergy%20management>.
7. combustion analysis basics. an overview of measurements, methods and calculations used in combustion analysis. copyright by tsi incorporated - 2004,35p.
8. payne, f. william. efficient boiler operations sourcebook. the fairmont press 1996,325p.