محطات توليد الطاقة

مقدمة :

التطور التاريخي لمحطات توليد الطاقة

بدأ تزويد المنشآت الصناعية بالطاقة الكهربائية من محطات التوليد منذ العام 1880. حيث كانت المولدات البسيطة تعتمد على احتراق الفحم لتحريك مولدات البخار وكانت تنقل الكهرباء إلى مسافات قصيرة نسبياً بقصد الإنارة فقط. لقد كانت محطة التوليد المركزية الأولى قد افتتحت من قبل توماس أديسون في أيلول 1882 في منها تن سيتي واستخدمت للإنارة فقط ولم تستخدم في المحلات التجارية من ناحية اقتصادية لأن كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية كانت عالية.

نظراً لازدياد الطلب على الطاقة كانت الدراسات تهتم بتأمين الحاجة إلى الكهرباء وخاصة بعد تم اعتماد الترومواية الكهربائية في وسائل النقل، حيث صممت أول محطة طاقة ذات مولد بخار (مرجل) لتوليد البخار من مرجل ذو أنبوب مياه بسيط تستخدم الفحم أو غاز الفحم في عملية الاحتراق. كانت هذه العملية نوعية فقد تم توليد البخار بضغط [MPa] 0.9 أي ما يعادل 8.6 [bar] ودرجة حرارة [c] 150 وباستطاعة توليد [kW] 30. ومنذ ذلك الحين دخلت محطات توليد الطاقة الكهربائية مجال الأنظمة العالية التعقيد.

حالياً إن تصميم تجهيزات العنفة والمرجل تحتاج لخلائط معدنية تستطيع تحمل شروط تشغيل فوق الحرجة تصل فيها بارامترات التشغيل إلى [MPa] 28.5 ما يعادل [bar] 285 ودرجة حرارة [c] 600 واستطاعة توليد [MW] 1300 كهرباء. ومن خلال البحث والدراسة لتخفيض كلفة الإنتاج صممت محطات تعمل وفق دورة كلاوزيوس– رانكين التي يتراوح مردودها ما بين 30% و 40%، أما حالياً التوجه العام نحو زيادة المردود من خلال تصميم محطات تعمل وفق الدورة المركبة (المشتركة) التي تتألف من عنفة غازية (CCGT) وعنفة بخارية من خلال الاستفادة من استرداد حرارة البخار المولد (HRSG) للمحطة الذي يؤدي لزيادة المردود الحراري ليصبح في المجال (60% - 50%). وهذا ما استدعى اعتماد محطات التوليد الغازية ذات الدورات المشتركة وزيادة عددها.

إن تطور تصميم محطات الطاقة ذات الاستطاعات العالية ترافق مع التطور التكنولوجي واستخدام التجهيزات الحاسوبية وأنظمة التحكم في استقرار عمل المحطة وتخفيض الانبعاثات الغازية. إن التطورات الحديثة في تصميم المحطات تعتمد حاليا على إنشاء محطات تعمل وفق الدورة المشتركة المدمجة Integrated gasification combined cycle (IGCC) وتجهيزات يحصل فيها الاحتراق تحت تأثير مخدة ضغط سائلة (PFBC) Pressurized fluidized bed combustion تتحمل طاقة كبيرة تؤدي إلى انبعاثات قليلة ومردود عالي. يصل مردود هذه المحطات حسب نوع الوقود المستعمل إلى 60% من أجل

الوقود الصلب والفحم و 75% من أجل الغاز الطبيعي مع انخفاض كبير في الانبعاثات يصل للصفر.

الفصل الأول

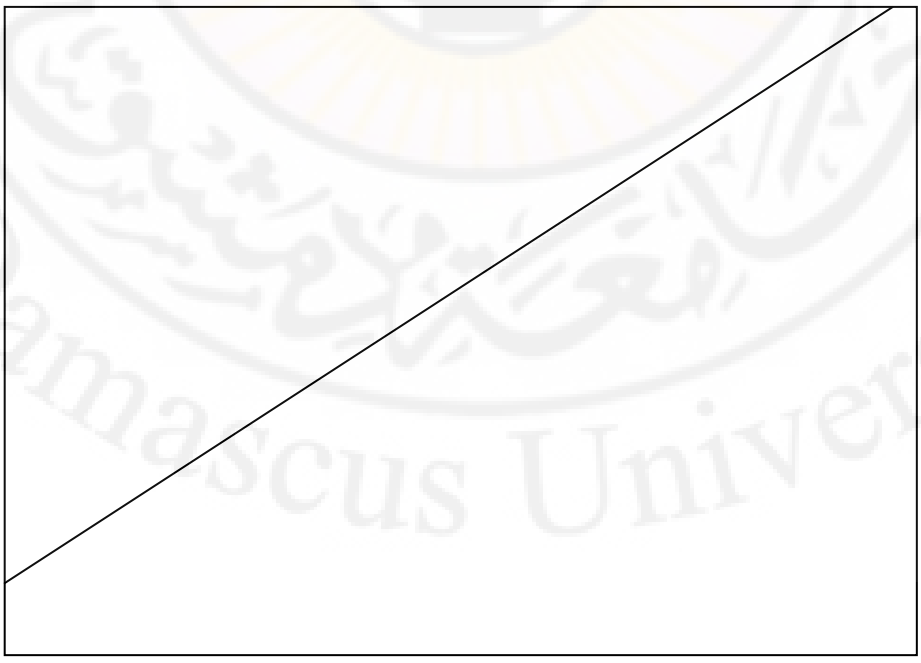
مخطط الحمولة

تعتبر الطاقة الكهربائية أحد أهم العوامل الأساسية لتطور الاقتصاد الوطني، حيث يزداد الطلب سنويا على استهلاك الطاقة الكهربائية بالتوازي مع ازدياد الإنتاج الصناعي ونمو عدد السكان ومستوى معيشتهم. عالمياً يزداد استهلاك الطاقة الكهربائية بشكل سريع. حيث يعتبر مؤشر استهلاك الطاقة بالنسبة للفرد من المؤشرات المهمة التي يمكن من خلالها تقييم مستوى تطور المجتمع (تطور الدولة)، إن العلاقة الوثيقة والمباشرة بين استهلاك الطاقة ومستوى الحياة الاقتصادية أدت إلى إجراء الدراسات لتحقيق التوازن بين استهلاك الطاقة ودخل الفرد.

الجدول رقم (1) يبين مستوى تطور إنتاج الطاقة الكهربائية في بعض الدول.

ويبين الشكل (1) العلاقة بين استهلاك الطاقة الكهربائية للفرد بالنسبة للدخل القومي.

kWh/hum



Dol/hum

نلاحظ من المخطط أنه مع زيادة مؤشر الدخل القومي للفرد وسرعة النمو الاقتصادي يؤدي إلى زيادة الطلب على استهلاك الطاقة الكهربائية، وبنفس الوقت إن هذا الأمر يتعلق أيضا بنوعية التطور الاقتصادي أي أن تطور الصناعات الخفيفة يؤدي إلى زيادة أقل في استهلاك الطاقة الكهربائية من حالة نمو الصناعات الثقيلة التي تحصل بشكل خاص في الدول الغنية ذات التطور السريع مع الأخذ بعين الاعتبار الزمن اللازم لإنشاء محطة توليد الطاقة.
أما الجدول رقم (2) يبين إنتاج الطاقة الكهربائية في بعض الدول.

من هنا نجد أنه مع كبر مؤشر زيادة الدخل القومي يزداد بسرعة التطور الاقتصادي للبلد وبالتالي يزداد بنفس الوقت استهلاك الطاقة الكهربائية الذي يتعلق بمميزات التطور الاقتصادي (الاجتماعي).
الجدول رقم (3) يبين الاستطاعة المركبة في بعض الدول

الجدول رقم (4) يبين متوسط نمو زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية في بعض الدول

حقيقةً إن زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية يتطلب تحديد متطلبات الطاقة في المستقبل لأن فترة بناء المحطة يتطلب من (4-6) سنوات منذ تاريخ اتخاذ القرار بإنشائها أما حالياً يتطلب من سنة إلى سنتين حسب استطاعتها. وهذا مرتبط أيضا بالزمن اللازم لبناء شبكة التوزيع لوضع المحطة في الخدمة. كما أن التأخر في إقلاع المحطة يؤدي إلى نقص بالطاقة المنتجة.
يجب الأخذ بالاعتبار عدة ملاحظات للتخطيط لتأمين الاستهلاك وبناء محطات وشبكات توزيع وبما أن العلاقة بين زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية والتطور الاقتصادي غير ثابتة سنويا يكون هذا المؤشر غير دقيق لذلك يجب الاعتماد على طرق أكثر دقة.
إن إحدى هذه الطرق تدعى بالطريقة الجزئية وهي المستعملة في الدول التي تعتمد الخطط الخمسية في التخطيط الاقتصادي وتكون العلاقة بين استهلاك الطاقة والتخطيط الاقتصادي محددة بكمية الإنتاج الصناعي والزراعي والتجاري والتطور السكاني والنقل ..... وعلى أساسه يتم تحديد استهلاك الطاقة لواحدة المنتج في السنة وعندها يمكن حساب الطاقة الضرورية المطلوب إنتاجها بعد إضافة الضياعات في الشبكة وجميع الاحتياجات في المحطات خلال عدة سنوات (خمس أو عشر سنوات) .
نظرياً هذه الطريقة تعطي نتائج دقيقة مرتبطة مع التخطيط (الخطة الخمسية) لكن استعمالها يؤدي إلى أخطاء كبيرة وهي:

– لا يمكن تحديد زيادة الإنتاج بدقة بالنسبة لفترات طويلة، عملياً تكون متعلقة بحاجتها للطاقة.
– تغير مؤشر استهلاك الطاقة بالنسبة لطول فترة الإنتاج الذي يأخذ بالاعتبار الواقع التكنولوجي من حيث إنقاص استهلاك الطاقة بالنسبة لواحدة الإنتاج.
– ليس دائما يمكن تصغير واحدة استهلاك الطاقة من الناحية التكنولوجية.

أما طريقة المؤشرات فتستخدم لفترات طويلة

- العامل الأول: لا يمكن دائما زيادة مؤشر استهلاك الطاقة. وعند ثباته من الضروري تحديده لمعرفة الوقت الذي يمكن إلغاؤه أو اعتباره متناقصا. إن الاختلاف في زيادة استهلاك الطاقة بين الدول ذات الاستهلاك الكبير والدول ذات الاستهلاك الأقل بالنسبة للفرد يبدو واضحاً، والتخطيط لفترة طويلة يؤدي بشكل عام إلى أن الزيادة السنوية لاستهلاك الطاقة ستكون أحيانا متناقصة.
- العامل الثاني: تناقص الوقود الطبيعي وبشكل رئيسي النفط– الغاز – الفحم– الطاقة النووية، بينما مصادر الطاقة الأخرى ومنها الطاقة المائية لا تأخذ دورا كبيرا لأن زيادة الطلب على الطاقة يكون أسرع من استخدام طاقة المياه.

إن المحطات الحرارية تلعب دوراً أساسياً في الإنتاج حسب الميزان الطاقي والجدول رقم (5) يبين تطور الطاقة في سوريا.

يستخدم الوقود بأنواعه المختلفة كمصدر للطاقة في المحطات الحرارية (صلب – سائل – غاز – نووي) التي تعتبر المصدر الأساسي لتوليد الطاقة الكهربائية. أما بالنسبة للمحطات الكهرومائية فإن استخداماتها قليلة وذلك حسب توفر المياه، حاليا التوجه في معظم دول العالم هو البحث عن مصادر بديلة لتوليد الطاقة الكهربائية مثل (الطاقة الشمسية – طاقة الرياح – الطاقة الحيوية –.....) .

مميزات مخطط الحمولة وكلفة إنتاج الطاقة

المؤشرات المميزة لمخطط الحمولة :

يبين الشكل (2) مخطط الحمولة اليومي لتغير الاستهلاك في محطة توليد طاقة أو في نظام طاقة كهر بائية خلال يوم واحد. إن توزع حمولة المحطة أو النظام الكهروطاقي خلال يوم واحد لا يوجد فيه اختلاف كبير بين الدول وبين الفترات إذا كان النظام الاقتصادي متشابه بينها.



حيث: P_t [kW] الحمولة في اللحظة t

P_{max}[kW] الحمولة الأعظمية

P_{mid}[kW] الحمولة الوسطية

P_{min}[kW] الحمولة الأصغرية

A [kWh] الطاقة الكهربائية المستهلكة خلال الزمن t_d

T [h] زمن استهلاك أكبر حمولة

T_a [h] = 24 hour الزمن الكامل للمخطط

تعطى العلاقة بين المؤشرات بالشكل : $A = \int_0^t Pdt$ (1)

$T = A / P_{max}$ $P_{min} = A / t_a$ (2)

يمكن استخدام معامل الحمولة m عوضا عن زمن استهلاك أكبر حمولة

$m= A / P_{max} t_a$ m = المساحة تحت المنحني / مساحة المستطيل عند أكبر حمولة

نستنتج من ذلك :

$m= P_{mid} / P_{max}$ $m= T / t_a < 1$

ومنه نجد أن : $T = t_a .m$ $P_{mid} = P_{max} . m$ (3)

أما معامل أصغر حمولة n والذي يعبر عن أصغر حمولة خلال فترة الليل يساوي :

$$n = P_{min} / P_{max}$$

إن مخطط الحمولة المبين في الشكل يشبه مخططات الحمولة لمختلف الأنظمة. مع الأخذ بعين الاعتبار أن المعامل n والزمن T يختلفان عن باقي الأنظمة بحسب تشغيل المصانع التي تعمل على نظام الورديات، حيث أن الاستطاعة لا تكون أصغرية خلال وردية الليل.

ويمكن رسم مخطط الحمولة الأسبوعي أو الشهري أو السنوي .

عندما يكون زمن الحمولة كبير فإن استهلاك الطاقة يتم في المنشآت الاقتصادية وهذا يقابله أقل قيمة لمؤشر أصغر حمولة n وأصغر قيمة لزمن أكبر حمولة T.

الشكل (3) يبين مخطط الحمولة في سوريا

الشكل (4) يبين طريقة تصحيح مخطط الحمولة

الشكل (5) يبين تصحيح مخطط الحمولة اليومي لأوقات مختلفة من استخدام الحمولة الأعظمية

الشكل (6) اعتماد الصيانة السنوية تصحيح مخطط الحمولة السنوي

أما بالنسبة لمخطط الحمولة لمحطة حرارية كهر بائية له مؤشرات مشابهة لمخطط الحمولة لمحطة كهر بائية. حيث أن أكبر حمولة حرارية Q_{max} ،بينما Q الطاقة الحرارية الضرورية.

$$Q = k\,(t_w - t_z)\,.V \quad [kcal/h] \qquad (4)$$

حيث :

Q [kcal/h] الطاقة الحرارية الضرورية

t_w [C] درجة حرارة المكان المدفأ

t_z [C] درجة حرارة الوسط المحيط

V [m3] حجم الفراغ المدفأ

k=0.5 [kcal/m3.h.C] معامل النفاذ الحراري عندما V = 1000 m3

k=0.25 [kcal/m3.h.C] عندما V = 500 m3

يمكن حساب الطاقة الحرارية الضرورية من العلاقة :

$$Q = 1.6\,V^{5/6}\,(t_w - t_z) \quad [kcal/h] \qquad (5)$$

الشكل (7) يبين تصحيح مخطط الحمولة الحرارية

الجدول رقم (5) يبين استهلاك الطاقة بالنسبة لواحدة المنتج

وبمعرفة المخطط السنوي المصحح للحمولة الحرارية بالنسبة لدرجة الحرارة الخارجية يمكن إنشاء مخطط الحرارة الضرورية كما في الشكل (7) والمخطط المصحح لدرجة الحرارة تابع للشروط المناخية.

من المخطط اليومي أو السنوي المصحح نستنتج أن فعالية الإنتاج للمحطة عملياً لا تكون مستخدمة بأكملها. مقياس الاستخدام هو الزمن المستخدم للاستطاعة المركبة خلال السنة.

وفي شروط التصميم يجب أن تكون أكبر حمولة للمحطات المصممة مساوية للاستطاعة المركبة. عملياً يصح ذلك في المحطات الجديدة، بينما حمولة المحطات القديمة غالباً لا تصل إلى قيمة الاستطاعة المركبة. للاختصار يؤخذ أكبر زمن استخدام للحمولة مساويا زمن استخدام الاستطاعة المركبة. كلما كان الزمن أصغر أو كان معامل الحمولة أصغر كلما ساء استخدام الاستطاعة المنتجة وزادت كلفتها.

تصنيف محطات توليد الطاقة

تصنف محطات توليد الطاقة الكهربائية حسب عدد ساعات العمل في السنة كما يلي :

- P محطات ذروة وتعمل أقل من [hr]2000 لتغطية الحمولة أثناء الاستهلاك الأعظم (الذروة)
- d/P محطات تعمل بين (2000 – 4000 hr) وتدعى محطات نصف ذروة
- d/b محطات تعمل بين (4000 – 6000 hr) وتدعى محطات نصف قاعدية (أساسية)
- b محطات تعمل بين (6000 – 7000 hr) وتدعى محطات قاعدية (أساسية)

يبين الشكل (8) توزع هذه المحطات حسب ساعات التشغيل والاستطاعة

وبمعرفة توزع المحطات واستطاعاتها مقارنة مع الحاجة إلى الطاقة الكهربائية والاستطاعة المطلوبة يتم التخطيط لإنشاء محطات توليد جديدة. مع العلم أنه لا يمكن استخدام كامل الاستطاعة التي تنتجها المحطات القائمة لأن البعض منها لا يعمل بالحمولة الكاملة أو يكون البعض في حالة الصيانة الدورية أو الطارئة، لذلك يؤخذ بالاعتبار هذا الأمر أيضا لتغطية النقص في إنتاج الطاقة الكهربائية.

المسألة المهمة التي يجب أن تؤخذ بالاعتبار هي مخطط الإصلاح والصيانة عند إخراج المحطة من الخدمة حيث الاستطاعة المنتجة تكون أقل من الاستطاعة الممكن إنتاجها وهذا الاختلاف يتعلق بمعامل الزمن المتاح للإصلاح d ويعطى بالعلاقة:

$$d = \frac{t_{pr} + t_{rez}}{8760} \qquad (6)$$

حيث: t_{pr}, t_{rez} زمن عمل التجهيزات الاحتياطية الجاهزة للعمل hour/year و زمن عمل التجهيزات في السنة hour/year

8760[hr] عدد الساعات في السنة

إن معامل الزمن المتاح للمراجل والعنفات الحديثة يتجاوز 90% وارتفاع هذه القيمة يتعلق بنوعية التجهيزات وقبل كل شيء بالوثوقية في العمل وسهولة الإصلاح والصيانة وسرعته.

تقييم محطات توليد الطاقة ووحدات التوليد:

عندما يتم التخطيط لإنشاء محطة توليد طاقة جديدة يؤخذ بالاعتبار بارا مترين أساسيين :

- الخرج الإجمالي جميع التجهيزات المركبة بال kW الذي يحدد من تقدير الاستطاعة المطلوبة الأعظمية
- حجم وحدات التوريد موزعا بالنسبة للـ kW ويعتمد على :

1- معامل الحمولة (مخطط الحمولة) اليومي أو الفصلي أو السنوي أو الأسبوعي

2- الحمولة الإجمالية للوحدات الموصولة إلى الشبكة الكهربائية .

3- الزمن الأصغري للإقلاع والتوقف للمحركات

4- مخطط برنامج الصيانة

5- المردود الحراري الموافق لحجم الوحدة

6- السعر والمكان منسوبا للـ kW الموافق لحجم الوحدة

وبناء على الحمولة الأعظمية للتجهيزات يتم إنشاء مخطط الحمولة المفترض .

مثال:

عند إنشاء مخطط الحمولة استنادا لشروط الحمولة بالنسبة للمستهلك فإذا كان مخطط الحمولة لا يحوي هبوطا أو ميولا فإن حاجة المستهلك تناسب القيمة المطلوبة الأعظمية للتجهيزات.

تحليل المحددات والعوامل المستعملة في الكهرباء الصناعية:

معامل الاستطاعة (معامل المحطة)

$$n = A / P * 8760 \quad [kWh/kW*h]$$

زمن التشغيل للاستطاعة الأعظمية

$$T = A / P_{ins} \qquad [kWh / kW] = [h]$$

معامل الحمولة

$$m = A / P_{max} * 8760 \quad [kWh /kW*h]$$

المعامل الاحتياطي

$$r = m / n = P_{max} / P_{ins}$$

معامل الاستخدام

$$u = A / P_{ins} * 8760 = n$$

وإذا كان عدد ساعات العمل لا يساوي 8760 hr فإن u لا تساوي n

معامل الطلب على الطاقة $dem = P_{max} / P_{com}$

حيث :

P_{max} الحاجة الأعظمية الآنية

P_{com} الحاجة الكلية الناتجة

معامل الفرق (الاختلاف) div = مجموع حمولات الذروة للمستهلك أو المجموعة / حمولة الذروة الآنية

مثال:

بفرض أن مجموعة المستهلك بحاجة إلى 1000 MW لتجهيزات الإنارة وأن dem = 0.54 فإن الحمولة الأعظمية للنظام :

$$P_{max} = P_{com} * dem = 1000 * 0.54 = 540 \text{ MW}$$

ومعامل الاختلاف $div = (a + b + c)/d$

حيث : a-b-c حمولات الذروة مجموعة المستهلك حسب المخططات المبينة على الشكل

d حمولة الذروة الآنية للنظام

يجب أن تكون الحمولة المولدة من المحطة مساوية للضياعات (الطاقة الاحتياطية) + المضخات + المراوح + الضواغط + الضياعات في خطوط انقل والتوزيع.

كلفة انتاج الطاقة الكهربائية والحرارية

أ- **كلفة انتاج الطاقة الكهربائية**

وتقسم إلى قسمين: كلفة ثابتة وكلفة متغيرة أو كلفة العمل

1- **الكلفة الثابتة** وتتعلق برأسمال التجهيزات (التأسيس) لبناء المحطة وببعض طرق الحسابات الاقتصادية وعمر المحطة. أما بالنسبة لعام محدد تكون الكلفة ثابتة القيمة وليست تابعة لعمل المحطة. الكلفة الثابتة هي مجموع مؤشرات (مركبات) استهلاك الدين وهدفه وضع مؤشرات ثابتة الذي يتغير أثناء التشغيل بالنسبة للمؤشر الاقتصادي ويمكن حذفه بشكل كامل أو إضافته في حال اعتبار التجهيزات مثالية. إن التغيرات التي يمكن أن تظهر فيزيائيا تتمثل بتصدع هيكل العنفة والتآكل في الأنابيب وقدم العزل والتجهيزات الذي يعرف عادة بالقدم الطبيعي (الاهتراء الطبيعي) الذي يدخل في إطار الفعالية التقنية للأجهزة التي تكون ليست بمستوى التجهيزات التي تعمل في شروط تشغيل أكثر اقتصادية.

رأسمال استهلاك الدين يتألف من عدد من انخفاضات السعر سنويا ففي كل عام يسجل المجموع المتماثل خلال N سنة ويسجل أيضا بعد N سنة.

إن الكلفة الثابتة في الدول الغنية تتعلق بنسبة رأسمال المخصص للبناء ومقدار التخزين الذي يتعلق بالحالة الاقتصادية للبلد كما في الجدول رقم (6) الذي يبين كلفة صيانة التجهيزات بالنسبة للكلفة التأسيسية. إن الكلفة الناتجة عن التوقف والتشغيل وبشكل أساسي للتجهيزات تصل سنويا إلى حوالي 1% من الكلفة التأسيسية أما كلفة اليد العاملة تحسب من العلاقة:

$$K_o = (1.22 - 1.28)\, RZ \quad [\text{pound/kW}] \qquad (7)$$

حيث أن:

R عدد العاملين لكل واحد كيلو واط عامل/كيلو واط

Z متوسط أجر العامل سنويا عامل/ليرة سورية

(1.22 – 1.28) معامل يأخذ بالاعتبار تغير الأسعار

وفي المحطات الحديثة تحسب R من العلاقة:

$$R = \frac{0.09}{iP} + \frac{0.06}{\sqrt{P}} \qquad (\text{عامل/MW}) \qquad (8)$$

حيث أن:

i عدد البلوكات في وحدات التوليد

P [kW] استطاعة البلوك الواحد

إن قيمة الكلفة الثابتة تقسم إلى ما يلي:

- كلفة توزع الإنتاج
- كلفة صيانة
- كلفة إقلاع و إصلاح
- كلفة عاملين
- كلفة اهتلاك
- كلفة إدارة

تحسب الكلفة السنوية الثابتة K_s من العلاقة:

$$K_s = k.J.P \quad [\text{pound}] \qquad (9)$$

J [pound/kW] الكلفة النوعية أو كلفة واحد كيلو واط

k معامل الكلفة الثابتة

2- **الكلفة المتغيرة** وتتألف من كلفة الوقود والماء وذلك حسب العلاقة:

$$K_z = B.C_p + M \quad [\text{pound}] \qquad (10)$$

حيث أن:

B [kg] استهلاك الوقود

C_p [pound/kg] سعر كيلو غرام من الوقود

M [pound] ثمن الماء في السنة

ويعطى استهلاك الوقود بالعلاقة:

$$B = b.P.T \quad [kg] \qquad (11)$$

حيث أن:

b[kg/kWh] استهلاك الوقود النوعي

P [kW] استطاعة المحطة

T [hour] زمن استهلاك أكبر حمولة

وتكون الكلفة الإجمالية للمحطة $K_e = K_s + K_z$ (12)

أما الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة الكهربائية تكون حسب العلاقة:

$$k_e = \frac{K_e}{A} = \frac{K_s}{A} + \frac{k_z}{A} \quad [\text{pound/kWh}] \qquad (13)$$

ولدينا من مخطط الحمولة $A = P.T$

$$k_e = \frac{k.J.P}{P.T} + \frac{b.P.T}{P.T} C_p + \frac{M}{P.T}$$

$$k_e = \frac{k.J}{T} + b.C_p + \frac{M}{P.T}$$

وبما أن: $\frac{M}{PT}$ << $b.C_p$ يمكن إهمال قيمتها فتصبح علاقة الكلفة النوعية الإجمالية لإنتاج الطاقة

$$k_e = \frac{k.J.}{T} + b.C_p \qquad (14)$$

أما الكلفة الثابتة النوعية $k_s = \frac{k.J}{T}$

والكلفة المتغيرة النوعية $k_z = b.C_p$

نستنتج من العلاقات السابقة أن الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة تتعلق بزمن استخدام أكبر حمولة وتكون الكلفة النوعية الثابتة أقل كلما زاد زمن استخدام أكبر حمولة مع التذكر بأنه أثناء استخدام حمولة النظام الطاقي فإن أجهزة القيادة للمحطة واستطاعة التجهيزات لا يطرأ عليها أي تغير.

عملياً ولكامل النظام الطاقي فإن الكلفة الثابتة لا تتعلق بالتجهيزات، بينما مجموع الكلف المتغيرة يمكن إنقاصه كلما زادت حمولة المحطة وبالعكس. عندما تزداد الحمولة المتغيرة ازدادت معها الكلفة النوعية للوقود وكانت الطاقة المنتجة وزمن استخدامها أقل.

حتى يكون منحني الحمولة خطاً أفقياً يتم تصحيح المخطط من خلال رسم مخطط حمولة لكل محطة على حدة. عملياً هناك صعوبة تقنية للمحطات البخارية والتي تعمل بزمن أقل من 1300 hr الشكل (9) يبين مجال العمل لمحطة بخارية نظرياً وعملياً.

ب-**كلفة إنتاج الطاقة الحرارية**

وتحسب من خلال توزيع الكلفة السنوية للمحطات الكهروحرارية على كلفة الطاقة الحرارية وكلفة الطاقة الكهربائية حيث تقسم الكلفة السنوية إلى:

k_k كلفة التجهيزات في المحطة الكهروحرارية (مراجل- ومراجل مساعدة .....)

k_m كلفة الآلات (العنفات .....)

k_r كلفة التوزيع

k_t كلفة التجهيزات الحرارية

بناء على ما سبق تكون كلفة انتاج الطاقة الكهربائية السنوية هي:

$$K_e = K_k \frac{B_e}{B} + K_m + K_r \qquad (15)$$

وكلفة إنتاج الطاقة الحرارية السنوية هي:

$$K_c = K_k \frac{B_c}{B} + K_t \qquad (16)$$

حيث أن:

B الكلفة السنوية لاستهلاك الوقود

B_c الكلفة السنوية لإنتاج الطاقة الحرارية

B_e الكلفة السنوية لإنتاج الطاقة الكهربائية

$$B_c = B\frac{Q_c - Q_{str}}{Q_k}[ton] \qquad (17)$$

Q_c [Gcal] الطاقة الحرارية المرسلة من المحطة

Q_{str} [Gcal] مجموع الضياعات الحرارية في التجهيزات الحرارية

Q_k [Gcal] الطاقة الحرارية المنتجة في المراجل

$$B_e = B - B_c \ [ton]$$

هناك طرق أخرى لحساب كلفة الإنتاج منها حساب كلفة انتاج الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية كل على حدة والفرق بين الكلفة يقسم تناسبيا مع الكلفة الإجمالية مع الأخذ بالاعتبار بارمترات البخار وكلفة إرسال الطاقة الحرارية.

أفضل طريقة معتمدة للحساب هي التي تعتبر أن كلفة الطاقة الحرارية تكون الفرق بين الكلفة الإجمالية لإنتاج المحطة الكهروحرارية والكلفة المقدمة للشبكة الكهربائية محسوبة حسب سعر انتاج الطاقة من المحطات البخارية الحديثة.

$$K_c = K_{Ec} - A_{netto}.\ K_c \qquad [pound] \qquad (18)$$

K_{Ec}[pound] الكلفة السنوية لإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية

A_{netto}[kWh] الطاقة الكهربائية المقدمة للشبكة

K_c[pond/kWh] الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة في المحطة التكثيفية

تحليل الكلفة الثابتة

تعرف الكلفة الثابتة السنوية منسوبة إلى وحدة الاستطاعة بكلفة الاستطاعة حسب العلاقة الواردة أعلاه رقم ....

الشكل (10) يبين العلاقة بين معامل الكلفة الثابتة والكلفة النوعية للمبنى ويتعلق رأس المال النوعي بما يلي:

- الاستطاعة أو التدفق عبر التجهيزات
- بارامترات جسم التشغيل
- نوع الوقود
- طريقة التبريد في المكثف
- الشروط المكانية

الشكل (11) يبين العلاقة بين رأس المال وزيادة المردود

مع ازدياد استطاعة التجهيزات (استطاعة الوحدة) أو التدفق في المرجل فإن كلفتها تزداد بشكل طردي ولكن هذا التناسب الطردي يتم وفق العلاقة:

$$C = k.p^{a} \qquad (19)$$

حيث a< 1

للتجهيزات المتشابهة وعند زيادة الاستطاعة المستهلكة فإن المعامل a يزداد لتصل قيمته إلى a=0.7 وتزداد كلفة عنصرين متشابهين بمقدار 1.62 مرة، بينما الكلفة النوعية تتناقص بمقدار 19%. وتصبح العلاقة بالشكل:

$$C = k.p^{a-1} \qquad (20)$$

وإذا ازدادت الاستطاعة مع ازدياد عدد عناصر الآلة مثلا زيادة عدد مقاطع العنفة أو عدد المخارج فإن المعامل a يزداد وقد تصل قيمته حتى الواحد.

الجدول رقم (7) يبين زيادة الاستطاعة مع ازدياد عدد العناصر

الشكل (12) يبين أن تغير الكلفة يكون على شكل منحني لوغاريتمي وعندها المعامل a يمكن أن يكون أكبر من الواحد وفي مجال الاستطاعة MW (600 – 500) يصبح خطا مستقيما كلفة مجموعة العنفة الثنائية تزداد بحوالي 10% عن كلفة العنفة الأحادية ولكن يمكن إنقاص كلفتها عند الاستطاعات العالية وتزداد الكلفة الإجمالية للمحطة حسب زيادة استطاعة البلوك (الوحدة).

الكلفة النوعية لبناء المحطة تعطى بالعلاقة:

$$j = K.P^{a-1}(0.22n^3 + 0.78)[pound/kW] \quad (21)$$

حيث أن:

j الكلفة النوعية لبناء المحطة

P استطاعة البلوك

K معامل تصحيح

i عدد البلوكات

a معامل أسي

عندما a=0.7 تكون كلفة المحطة محسوبة من المخطط على الشكل (13)

الشكل (14) يبين العلاقة بين كلفة المحطة التقليدية والمحطة النووية حيث أن a=0.75 للمحطة النووية وبالمقارنة بين محطة تحوي بلوك واحد ومحطة ذات بلوكين فإن الكلفة النوعية تنخفض بمقدار 3.5% للتقليدية وللنووية تنخفض 7%.

إن كلفة المحطة التي تعمل على الوقود السائل والغاز أقل من كلفة المحطة التي تعمل على الوقود الصلب حيث تصل إلى 20% (لا يوجد أجهزة إمداد بالوقود والتخلص من نواتج الفحم بالإضافة إلى أن المراجل تختلف من حيث الاحتراق والمداخن وأفضل بيئيا).

إن المحطات التي تعمل على احتراق المازوت كلفتها عالية بالنسبة للخزان وتجهيزات تحضير الوقود ونواتج الاحتراق التي تحوي الكبريت الذي يتم التخلص منه ببناء مداخن عالية. وبنفس الوقت هذه المحطات أرخص من المحطات التي تعمل على الفحم حوالي %(15 – 10) كما إنشاء محطة بدون بناء يخفض الكلفة لأن كلفة البناء تتعلق بالمكان واليد العاملة.

كلما زاد ضغط البخار المستخدم في التدفئة انخفضت الاستطاعة الكهربائية للمحطة وكلفتها تقترب من كلفة مرجل المحطة الكهربائية التكثيفية عند نفس البارامترات وتدفق البخار وتكون كلفة التجهيزات المساعدة والآلات أقل منها بالنسبة للمحطة الكهربائية التكثيفية ولنفس الاستطاعة.

إن كلفة بناء المحطة النووية يتعلق قبل كل شيء بنوع المفاعل النووي، كلما كان كبيرا كان البناء مكلفا وانخفضت الكلفة النوعية للوقود التي تتحدد بشكل أساسي من اقتصادية النيترون الذي يسمح بإنتاج الطاقة الحرارية ولا تتحدد من المردود الحراري للمحطة الجدول رقم (8).

يضاف لكلفة بناء المحطة النووية كلفة تجهيزات الأمان والتجهيزات المساعدة التابعة للمفاعل التي تحسب من ضمن الكلف الثابتة وكلفة بناء المحطة النووية أكبر من بناء المحطة التكثيفية لنفس الاستطاعة.

كلفة المحطات ذات العنفات الغازية التي تتراوح استطاعاتها بين [MW] 30 و [MW]200 تكون كلفتها أقل بحوالي % 40 من كلفة المحطة العاملة على المازوت ذات الاستطاعات التي

تتراوح بين [MW] 300 و [MW] 600 . وبالنسبة للعنفات الغازية المستعملة كمحركات نفاثة يستخدم فيها وقود غالي الثمن وهذا يؤدي لزيادة الكلفة النوعية للوقود بالمقارنة مع المحطة البخارية حسب الجدول رقم (8). ورغم ذلك فإن المحطات الغازية أفضل بالنسبة لاستخدامها لفترات قصيرة لا تتجاوز [hr/year] 1000.

تحليل الكلفة المتغيرة

كم لاحظنا من العلاقة السابقة $K_z = B.C_p + M$ [pound]

أن الكلفة المتغيرة تتألف من كلفة الماء وكلفة الوقود، وباعتبار أن كلفة الماء مرتبطة بالمصدر قد تصل قيمتها مساوية الصفر لأن كلفة الصيانة للمضخات ترتبط بالكلفة الثابتة.

إن كلفة شراء الماء إذا كانت المحطة بعيدة عن المصادر الطبيعية وحسب هذه المسافات قد تصل إلى قيمة أكبر حوالي 4% من كلفة الوقود. وفي الحسابات المختصرة يمكن اختصار قيمة كلفة الماء النوعية وتبقى كلفة استهلاك الوقود النوعية التي تتعلق بمردود المحطة محسوبة من العلاقة:

$$b = \frac{860}{\eta_e W}[kg/kW.h] \qquad (22)$$

بينما كلفة استهلاك الوقود النووي النوعية تعطى بالعلاقة:

$$b = \frac{0.0417}{\eta_e B}[kg/kW.h]$$

حيث أن:

η_e المردود العام للمحطة

W [kcal/kg] القيمة الحرارية للوقود

$B[MWday/ton]$ القيمة الحرارية للوقود النووي

يتعلق المردود بالقيمة الوسطية السنوية التي تكون أقل من القيمة المثالية، وتأثير ذلك على انحراف القيمة الحقيقية للحمولة عن القيمة المثالية.

كلما انخفض التخلخل (الضغط) في المكثف رغم ارتفاع درجة حرارة مياه التبريد أو عدم نظافة أنابيب المكثف وعدم نظافة سطوح التسخين في المرجل رغم كون درجة حرارة الهواء مناسبة يسوء مردود المرجل. وتزداد الضياعات في الآلات أثناء الإقلاع وتقترب عند الحمولة الطبيعية من الضياعات عند الحمولة المثالية أثناء الإقلاع والعمل في المحطات التي تعمل في أنظمة الطاقة الكهربائية الكبيرة، حيث حمولة الآلات موجهة بقرار مركزي يتعلق بتغير الحمولة أثناء عمل وتوقف كل آلة وبعمل جميع التجهيزات على التوازي كعنصر واحد في المحطة. ينخفض المردود حوالي 10% في المجموعات التي تعمل في ساعات الليل بالنسبة للمحطات التي تعمل أكثر من [hr]6500 لذلك يؤخذ المردود الوسطي السنوي. عمليا لا يمكن الوصول إلى المردود

المثالي للمحطات التكثيفية كبيرة الاستطاعة، حيث الاستهلاك الحراري النوعي (2200-2500) [kcal/kWh].

إن ثمن الوقود يتعلق بالشروط المكانية وبموقع المحطة مما يؤدي إلى إنقاص القيمة الحرارية للوقود وبالتالي إنقاص التلوث البيئي. وغالبا ما يتعلق بالوضع السياسي والاقتصادي وبالدخل القومي للدولة. بينما ثمن الوقود الخام يتعلق بكلفة الإنتاج وظروف المناجم ..... كما أن ثمن الوقود المعالج يتعلق بالنقل جوا أو بحرا أو برا ..... ويعتبر مؤشر الإنتاج أهم مؤشر لتحديد كلفة الوقود فإذا كان الإنتاج مريحا كان ثمن الوقود منخفضا.

أما بالنسبة للوقود السائل والغازي فإن قيمته الحرارية أكبر بحوالي 40% منها للوقود الصلب ولكن سعره أعلى. عمليا ثمن الوقود النووي لا يتعلق بزمن بقائه في المحطة، حيث أن استهلاك حوالي [MWday/ton] 30000 أي استهلاك نوعي [mg/kWh] 4 يكون أقل بمقدار 100000 مرة من **استهلاك الفحم ويمكن إهمال كلفة الفحم مقارنة مع ثمن** الوقود النووي.

الشكل (15) يبين العلاقة بين الكلفة المتغيرة لإنتاج الطاقة في محطة نووية مع مفاعل PWR واستهلاك وقود نووي [MWday/ton] 3300 بالنسبة لكلفة اليورانيوم [$/kg]

تحليل كلف إنتاج الطاقة

إن كلفة إنتاج الطاقة تختلف حسب ثمن الوقود ومردود المحطة ورأسمال المحطة وزمن استخدام أكبر حمولة ونسبة الإنفاق كما هو مبين في الجدولين رقم (9) و (10).

وحسب الشروط المختلفة نجد أن مردود المحطة الأمثل يتعلق باختيار موقع المحطة أما إضافات رأس المال بهدف رفع المردود تكون محسوبة دائما من الصرفيات والتي تحسب من الشكل المبسط للعلاقة:

$$\frac{J_2 - J_1}{T} \rangle (b_1 - b_2)\frac{C_P}{k} \qquad (23)$$

$$J_2 - J_1 \rangle (b_1 - b_2)\frac{C_P}{k}T$$

J_1 [pound/kW] زيادة الكلفة النوعية الطبيعية (الاسمية)

J_2 [pound/kW] زيادة الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة

b_1 [kg/kWh] الاستهلاك النوعي للوقود عند الشروط الاسمية

b_2 [kg/kWh] الاستهلاك النوعي للوقود عند شروط العمل

C_P [pound/kg] ثمن واحد كيلو غرام وقود

k معامل الكلفة الثابتة

T [hour] زمن استهلاك أكبر حمولة

$J_1 < J_2$ و $b_2 < b_1$

كما هو مبين سابقا في تحليل الكلفة الثابتة فإن مردود المحطة واستهلاك الوقود النوعي يتعلقان بكلفة رأس المال وحسب العلاقة التالية يمنك حساب الكلفة الأفضل المرتبطة بأفضل مردود.

$$k_e = \frac{JP}{T} + f(J)C_P \qquad (24)$$

فتكون k_e أصغرية عندما $\frac{dk_e}{dJ} = 0$ أي $\frac{P}{T} + \frac{df(J)}{dJ}C_P = 0$

الفصل الثاني

اختيار مكان بناء المحطة

الشروط الأساسية لاختيار مكان بناء المحطة

يتعلق اختيار مكان بناء المحطة بكلفة الطاقة الكهربائية مع الأخذ بالاعتبار كلفة النقل إلى المستهلك التي يجب أن تكون أقل ما يمكن.

عند اختيار المكان يؤخذ بالاعتبار ما يلي:

–المستهلك – الوقود – الماء – المكان

يفضل اختيار مكان بناء المحطة بالقرب من مصادر الطاقة بالإضافة إلى توفر المياه اللازمة (نهر- بحيرة- بحر...). تحتاج المحطة إلى مساحة كبيرة للبناء وجميع التجهيزات المساعدة لتحضير الفحم مثلا ... وبما أنها مضرة للبيئة فيتم البحث عن مكان يكون فيه الضرر أقل ما يمكن بشكل عام.

المساحة اللازمة لبناء المحطة يجب أن تكون كافية حسب الاستطاعة المحددة بالإضافة إلى الأبنية المساعدة وكلفتها أقل ما يمكن. يبين الجدول رقم (11) المساحة الضرورية لبناء المحطة ويبين الشكل (16) تأثير المساحة على استطاعة المحطة حسب توضع تجهيزات الوقود.

1- مركبات الوقود خارج المحطة

2- مركبات الوقود داخل المحطة

إن تحقيق أحد الشروط مكلف مثال: بناء محطة بالقرب من وسط ذو استهلاك كبير للطاقة العاصمة مثلاً: فمن الضروري نقل الوقود أو استيراده إضافة إلى أنها بعيدة عن مصادر المياه أيضاً.

المحطة ذات الاستطاعة [MW]1000 تستهلك كل ساعة [ton]500 وحوالي [m3]120000-150000 ماء عندما يكون التبريد بدورة مفتوحة. وتكون الضياعات حوالي [m3]2000-2500 إذا استخدمت دورة مغلقة (برج تبريد). بالتأكيد لتقليل كلفة تحضير الطاقة من المحطة إلى المستهلك يجب اختيار مكان بناء المحطة بحيث يؤمن أقل كلفة. وبالنسبة لبناء محطة نووية فإن كلفة نقل الوقود غير موجودة.

مستهلك الطاقة

إن حالات استهلاك الطاقة مباشرة من المحطة هي:

- المحطات الصغيرة والمتوسطة والمبنية على الأنهار
- المحطات الكهرو حرارية الصناعية تبنى في مكان المعامل الكيميائية مثلاً

أما بالنسبة للمحطات التكثيفية كبيرة الاستطاعة فهي تغذي الأماكن البعيدة وعند تغذية المدن لا يؤخذ بالاعتبار عادة موضوع الوقود. هذه المحطات تغذي مساحات كبيرة من المستهلكين لذلك يتم النقل بواسطة خطوط نقل عالية الجهد التي تتطلب زيادة في كلفة نقل الطاقة.

إن توضع المحطة بالقرب من المستهلك مفيد من ناحية كلفة نقل الطاقة مقارنة مع زيادة الوثوقية وانخفاض هبوط التوتر في خطوط التوتر العالي. إضافة إلى أن خطوط النقل الممتدة إلى مسافات بعيدة تؤدي لانقطاعات وعدم استقرار في عمل المحطة والتجهيزات التابعة لها، وبنفس الوقت كلفة النقل أقل لمسافات بعيدة بينما التوتر يكون أعلى. الشكل (17) والشكل (18).

تحضير الوقود

مع ازدياد استطاعة المحطة تزداد مساحة التغذية وكلفة نقل الطاقة إلى المستهلك بالإضافة إلى تعقيدات البناء والعامل الذي يحدد استطاعة المحطة كمية مياه التبريد والوقود ذو القيمة الحرارية العالية ومحتوياته من الكبريت وانطلاقها في الوسط المحيط.

إن كلفة نقل الوقود السائل تكون غير كبيرة، مثل الفيول أو الوقود ذو القيمة الحرارية 10000 [kcal/kg] لذلك من المفيد نقلها من أماكن بعيدة واحتراقها في المحطة المبنية بالقرب من المستهلك. يمكن نقل الوقود السائل بالقطارات والصهاريج والخزانات في البر والبحر وبكميات كبيرة أو في الأنابيب يبين الجدول رقم (12) كلفة نقل الوقود حسب الطرق المختلفة.

إن حرق الوقود السائل سهل ولا يسبب أدخنة ولا يحوي خبث وقبل كل شيء يمكن استخدامه بالقرب من المدن مقارنة مع التغذية باحتراق الفحم. في الدول الغنية بالفحم يستعمل الوقود السائل في المحطات الكهروحرارية المستخدمة أثناء الذروة وخاصة المبنية بالقرب من المدن بينما يستخدم الفحم في المحطات كبيرة الاستطاعة والبعيدة. من مساوئ الوقود السائل احتوائه على كميات كبيرة من الكبريت التي يمكن التقليل من نسبة انتشارها في الوسط المحيط للمنشآت ببناء مداخن عالية، بالإضافة إلى محتويات الأدخنة وثاني أكسيد الكبريت وأكسيد الآزوت.

إن القيمة الحرارية للغاز الطبيعي [kcal/kg] 8500 ونقله لمسافات طويلة بواسطة الأنابيب مربح. وكلفة نقله قد تكون أقل أو مشابهة لكلفة نقل الطاقة الكهربائية.

تبين الحسابات الاقتصادية عملياً: أنه يتم اختيار مكان بناء المحطة بالقرب من المستهلك إذا كان الوقود المستخدم ذو قيمة حرارية عالية. ومع زيادة الاستطاعة المرسلة يزداد زمن الاستخدام وطول خطوط النقل، ففي حالة التوتر العالي كلفة نقل الطاقة تنخفض وتؤخذ القيمة قريبة من كلفة نقل الوقود ويتعلقان بنفس المؤشرات (طول خطوط النقل، المدخرات، القيمة الحرارية للوقود، طريقة النقل الوقود.....).

إذا كان الوقود ذو قيمة حرارية عالية (سائل، صلب) و زمن استخدام الاستطاعة المرسلة ليس كبيراً والاستهلاك النوعي للطاقة صغيراً تكون تعقيدات نقل الوقود أقل منها لنقل الطاقة الكهربائية. أما الوقود ذو القيمة الحرارية المنخفضة يؤدي لازدياد الاستهلاك النوعي للحرارة في

المحطة وازدياد زمن استخدام الاستطاعة المرسلة. وهذا يخفض الكلفة التي تتعلق بظروف الدولة.

يبين الشكل (19) مقارنة بين كلفة إرسال الطاقة الكهربائية وكلفة نقل الوقود.

والجدول رقم (13) كلفة نقل الوقود والطاقة بالنسبة ل 200km في العام 1966

مياه التبريد

تحتاج العنفة التكثيفية لكمية كبيرة من المياه لتكثيف البخار، و لتبريد الزيت أو الهيدروجين أو الهواء في المولدة، ولتبريد المضاجع.

إن الحاجة لمياه التبريد في المكثف تصل حوالي (60-70) مرة من كمية البخار المتكاثف.

تحتاج العنفات القديمة وغير المجهزة بنظام استرجاعي وتستهلك من البخار حوالي 6 [kg/kW.h] تحتاج إلى كمية من المياه تبلغ [m3/MW.h] (300-400).

حالياً: العنفة ذات الضغط الابتدائي (عند المدخل) الذي يزيد عن [bar] 100 مع محمص بين مراحل العنفة ووحدة استهلاك البخار أقل من [kg/kW.h]3. وبوجود مسخن استرجاعي تصبح [kg/kW.h]2 تحتاج في الحالتين إلى [m3/MW.h] (100-140) مياه تبريد.

العنفة نوع TK120 تحتاج [m3/h] 16000 مياه تبريد

العنفة نوع TK200 تحتاج [m3/h] 27000 مياه تبريد

بينما حاجة المحطة النووية من مياه التبريد (مفاعل مائي) ولنفس الاستطاعة ضعف الكمية ورغم أن البخار الرطب يزيد من الطاقة الحرارية المنقولة إلى المكثف يكون مردود الدورة صغيراً.

تحتاج المحطة إلى حوالي ثلثي غزارة النهر لذلك لا تبنى المحطات إلا بالقرب من الأنهار الغزيرة أو البحر أو البحيرات ذات المساحات الواسعة حتى تكون درجة حرارة المياه الداخلة إلى المكثف لا تتجاوز [c] (26-28). إذا كانت مساحة البحيرة [hktar/MW] (0.7-1) تكون درجة حرارة الماء في البحيرة قريبة من درجة حرارة برج التبريد [c] 30 وارتفاعها عن هذه القيمة له تأثيرات سلبية على الظروف البيولوجية للبحيرة. ويسئ للمردود مقارنة مع التبريد بدورة مفتوحة.

يستخدم التبريد بدورة مغلقة عندما يتعذر استخدام التبريد بدورة مفتوحة وفي هذه الحالة يجب إضافة حوالي (1.5%-2%) ماء بسبب البخر. ولا ينصح باستخدام الدورات المغلقة إلا في حالات الضرورة.

إن الكلفة الرئيسية تكون للأنابيب ومحطة الضخ وعملية الضخ التي لها علاقة بكلفة إنتاج الطاقة. أما في الدول الفقيرة بالمياه تكون كلفتها عالية لذلك يتم بناء مكثف تبريد هوائي (تبريد جاف) الشكل (20) يبين توزع محطات الطاقة.

الفصل الثالث

اختيار الاستطاعات الأساسية للتجهيزات

ميزات استخدام التجهيزات الكبيرة:

إن الربح الأساسي من استخدام تجهيزات كبيرة الاستطاعة هو زيادة التدفق وإنقاص الكلفة التأسيسية بالنسبة لوحدة الاستطاعة المركبة. كلما زادت استطاعة المراجل والعنفات والتجهيزات الأخرى انخفضت كلفتها النوعية. (القسم 2)

يتم تحديد استطاعة مجموعة العنفات بشكل رئيسي وفق الشكل (21)

إن المراجل ومجموعة العنفات الكبيرة منسوبة لواحدة الاستطاعة تشغل مكان أقل كما هو مبين في الجدول رقم (14) والشكل (22) من المراجل والعنفات الصغيرة وبالتالي تقل كلفة البناء وسرعة بناء المحطة.

يتعلق عدد العاملين في المحطة بعدد الوحدات وليس باستطاعتها مما ينتج حسب العلاقة وفق المعطيات الفرنسية لمحطة مكونة من أربع وحدات متساوية

[MW] 4*125 تحتاج إلى 0.45 [عامل/ MW]

[MW] 4*250 تحتاج إلى 0.25 [عامل/ MW]

[MW] 4*600 تحتاج إلى 0.15 [عامل/ MW]

الجدول رقم (15) يبين نسبة كمية الحرارة المستهلكة في العنفات بالنسبة للاستطاعة. إن زيادة الاستطاعة يزيد في قيمة المردود وقبل كل شيء المردود الداخلي للعنفة ولكن مع زيادة الاستطاعة فإن الزيادة في المردود تكون أقل.

[MW] 125 يقابلها 2380 [kcal/kW.h]

[MW] 250 يقابلها 2245 [kcal/kW.h]

[MW] 600 يقابلها 2205 [kcal/kW.h]

الظواهر السلبية المرتبطة بكبر استطاعة التجهيزات

إن المؤشرات التقنية الناتجة عن زيادة استطاعة التجهيزات تظهر تأثيرات سلبية مثل صعوبة النقل بسبب الوزن الكبير والأبعاد الكبيرة (الأحجام الكبيرة) ومن هذه التجهيزات: المولد (المقلع)، المنوبة ولها نفس كتلة المقلع, المرجل, وفي المحطة النووية خزان الضغط للمفاعل, مولدة البخار عند استطاعة MW 600 حسب الجدول رقم (16) ويبين الشكل [23] العلاقة بين حجم التجهيزات واستطاعتها.

العيب الآخر المرتبط بزيادة الاستطاعة هو زيادة معامل الصيانة الذي يحدد من العلاقة:

$$a = \frac{t_a}{t_a - t_p} \qquad (25)$$

حيث: t_a [hr] زمن الصيانة والإصلاح

t_p [hr] زمن عمل التجهيزات

t_{rez} [hr] زمن التوقف للصيانة والإصلاح

فيكون معامل الاستثمار السنوي

$$d = \frac{t_p + t_{rez}}{8760} \qquad (26)$$

إن الصيانة الدورية في المحطات الكبيرة تستغرق زمنا طويلا، يتطلب ازدياد معامل الصيانة ما يلي:

- تحديد العمر وزمن الاستثمار
- مقارنة الاستطاعة الحالية مع المركبة
- تحديد مستوى التجهيزات
- تحديد المردود
- تحديد بارامترات البخار

الجدول رقم (17) يبين الإصلاحات

الشكل [24], الشكل [25], الشكل [26], الشكل [27]

تبين الأشكال السابقة العلاقة بين معامل الاستثمار السنوي وقيمة الضغط في الوحدة، العنفة, المرجل ...

الكلف المرتبطة بزيادة الصيانة

إن زيادة الحمولة الاحتياطية تتطلب وثوقية عالية للمحطة مما يزيد في الكلفة المتغيرة (زيادة استهلاك الوقود). وبهدف حساب الضياعات رغم انخفاض معامل الاستثمار يجب الانتباه إلى أن حالة تشغيل المحطة تكون عند الاستطاعة P_1

كما هو مبين في الشكل الجزء المهشر

ومع استمرار زمن الاهتراء T_{aw} فإن المحطة تعمل

عند الاستطاعة P_2 التي يزداد زمن تشغيلها والطاقة

المنتجة تكون أكبر بمقدار ΔA_2 وتكون $A_1=A_2+\Delta A_2$

نفس الشيء بالنسبة للوحدة P_3 .... وهكذا حتى P_n فتكون

الوحدة الاحتياطية $P_1, P_2, P_3, \ldots P_{n+1}$ متوافقة مع

الاستهلاك الحراري النوعي $q_1, q_2, q_3, \ldots q_{n+1}$

حيث $q_1<q_2<q_3\ldots\ldots<q_{n+1}$

هذا الفرق بالاستهلاك الحراري P_1 والذي يليه هو:

$$\Delta Q=\sum_{i=2}^{i=n+1}\Delta A_i q_i - A_i q_i \qquad [\text{kcal}] \qquad (27)$$

حيث:

$$\Delta A_2=\Delta A_3=\Delta A_4=\ldots.=\Delta A_{n+1}$$

$$\sum_{i=n}^{i=n+1}\Delta A_i = A_i$$

$$\Delta Q = A_1 \frac{\sum_{i=2}^{i=n+1} \Delta A_i q_i}{A_i} - A_i q_i$$

q_{sr} [kcal/kW.h] متوسط الاستهلاك الحراري النوعي للوحدة عند P_1

$$\Delta Q = (q_{sr} - q_1) A_1$$

ومع الأخذ بعين الاعتبار زمن التشغيل كامل السنة $A_1 = P_1 8760 \Delta d$ تكون الضياعات السنوية رغم صغر زمن الاستثمار مساوية

$$\Delta K = P_1 8760 \Delta d (q_{sr} - q_1) C_p \quad \text{[pound]} \qquad (28)$$

C_p [pound/kcal] ثمن واحد كيلو كالوري من كمية الحرارة

إن الفرق في زمن الاستثمار Δd يحسب عادة بالنسبة للوحدات الحديثة ويؤخذ عادة المردود الوسطي لمحطات الطاقة الحرارية وإذا كانت جميع الوحدات لها نفس القيمة الحرارية والمردود تكون الضياعات في الوقود معدومة $q_{sr} = q_1$.

اختيار المراجل ومجموعة العنفات للمحطات الكهروحرارية

الاهتمام العام لعلاقة كلفة التجهيزات، ومردودها، وعددها، بالاضافة لتأثير الاستطاعة على الصيانة وحالة التجهيزات وخاصة ذات الاستطاعة العالية، كما هو الحال في المحطات الكهربائية والكهروحرارية. حيث تهمل المسألة الاقتصادية بالنسبة للاستطاعة الاحتياطية وخاصة في المحطات الكهروحرارية الصناعية والمحطات الحرارية. مقارنة مع المحطات الكهروبائية الموصولة مع نظام الشبكات الكبيرة التي تؤخذ فيها بالاعتبار الاستطاعة الاحتياطية.

الحمولة الحرارية للتدفئة عند أقل درجة حرارة وسطية لأصغر شهر تساوي نصف أكبر حمولة حرارية للتدفئة بفرض:

D_{max}[t/h] – أكبر حمل كلي للمرجل

D_t[t/h] – جزء من D_{max} الضروري للأغراض التكنولوجية

D_g[t/h] – أكبر حمولة ضرورية للتدفئة

D_k[t/h] – تدفق المرجل

n العدد الكلي للمراجل

$$D_{max} = D_t + 0.5 D_g$$
$$(n-1)\, D_k > D_{max}$$

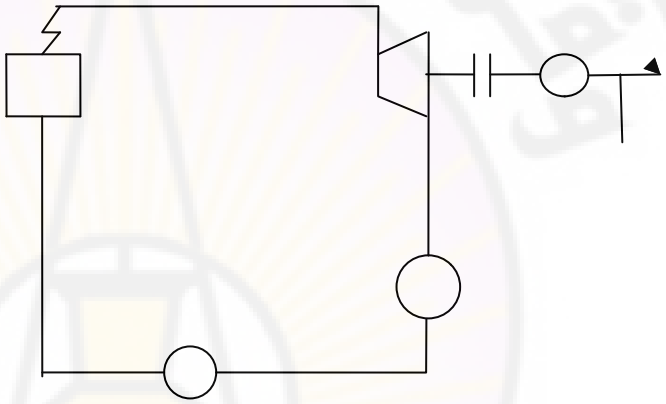
المرجل الاحتياطي في هذه الحالة يحقق الحاجة أوقات الذروة،

الفصل الرابع

اختيار بارامترات الدورة الحرارية – المردود

المردود العام للمحطة:

يبين الشكل (28) المخطط الحراري المبسط لمحطة تكثيفية



يحدد الاستهلاك النوعي للوقود من العلاقة:

$$b = \frac{860}{\eta_e W}[kg/kW.h] \qquad (29)$$

حيث: η_e مردود العام للمحطة

$W[kcal/kg]$ القيمة الحرارية للوقود

A – المكافئ الحراري للعمل الميكانيكي [kcal/kW.h] 860

يحدد المردود العام للمحطة من جداء مركبات المردود حسب العلاقة:

$$\eta_e = \eta_k.\eta_r.\eta_{th}.\eta_t.\eta_m.\eta_g.(1-\varepsilon)$$

$$\eta_e = \frac{i_1^{'} - t_k}{b^{'}W} \times \frac{i_1 - t_k}{i_1^{'} - t_k} \times \frac{i_1 - i_a}{i_1 - t_k} \times \frac{i_1 - i_k}{i_1 - i_a} \times \frac{AL_{sp}}{i_1 - i_k} \times \frac{AL_{gbr}}{AL_{sp}} \times \frac{AL_{netto}}{AL_{gbr}} \qquad (30)$$

$\eta_k = \frac{i_1^{'} - t_k}{b^{'}W}$ المردود الحراري للمرجل

$\eta_r = \frac{i_1 - t_k}{i_1' - t_k}$ مردود النقل في الأنابيب

$\eta_{th} = \frac{i_1 - t_a}{i_1 - t_k}$ المردود النظري للدورة

$\eta_t = \frac{i_1 - i_k}{i_1 - i_a}$ المردود الداخلي للعنفة

$\eta_m = \frac{AL_{sp}}{i_1 - i_k}$ المردود الميكانيكي ويكون قريب من الواحد

$\eta_g = \frac{AL_{gbr}}{AL_{sp}}$ مردود المولدة يقارب الواحد

$1 - \varepsilon = \frac{AL_{gnetto}}{AL_{gbr}}$ الطاقة الضرورية لأغراض المحطة (الاستهلاك الذاتي) ويمكن أن تصل إلى 0.05 في المحطات التكثيفية و 0.25 للمحطات الكهروحرارية ذات عنفات رد الفعل.

حيث واحدة الانتالبي [kcal/kg]:

i_1' انتالبي البخار الخارج من المرجل

t_k انتالبي مياه التغذية (تساوي انتالبي المياه المتكاثفة)

i_1 انتالبي البخار الداخل إلى العنفة

i_a انتالبي البخار الخارج من العنفة بعد التمدد الأديباتي

i_k انتالبي البخار الخارج من العنفة بعد التمدد الحقيقي

$b'[kg/kg]$ مصروف الوقود لإنتاج كيلو بخار

$AL_{sp}[kW.h/kg]$ العمل الميكانيكي المفيد

$AL_{gbr}[kW.h/kg]$ الاستطاعة اللازمة للاستهلاك الذاتي

$AL_{gnetto}[kW.h/kg]$ الاستطاعة المنتجة المقدمة للشبكة

ε معامل الاستهلاك الذاتي للمحطة

وتعطى علاقة المردود الحراري للمرجل بالشكل:

$$\eta_k = 1 - \sum s = 1 - (s_2 + s_3 + s_4 + s_5 + s_6) \quad (31)$$

حيث:

$$s_2 = a\frac{t_{sp} - t_p}{Co_2}\% \quad (32)$$

إن محتوى الفحم من Co_2 في نواتج الاحتراق وتعتبر النسبة %(17-12) أقل ما يمكن.

عند الإقلاع الجيد والاحتراق الجيد تعطى بالعلاقة $s_2 = \frac{t_{sp} - t_p}{20}\%$ (33)

عندما تتغير درجة حرارة نواتج الاحتراق t_{sp} بمقدار $20c^o$ مع بقاء درجة حرارة الهواء $t_p = const.$ يؤدي لتغير في مردود المرجل بمقدار 1%.

الضياعات في الأنابيب عند عزلها حراريا بشكل جيد ووضع المرجل بالقرب من العنفة لا تتجاوز 1% عند استخدام محمص واحد وتزداد عند استخدام التحميص المتكرر بين المراحل حيث يزداد عدد الأنابيب الواصلة بين العنفة والمرجل. عمليا في المحطات التكثيفية عند استعمال محمص واحد تستخدم ثلاثة أنابيب وعند استخدام محمصين تستخدم خمسة أنابيب.

إن الضياعات الحرارية القليلة لا تؤثر على الضياعات الترموديناميكية وذلك عند تغير مكان الحدين الثاني والثالث في علاقة المردود العام للمحطة، حيث أن المردود النظري منسوبا إلى البارامترات ما بع المرجل والضياعات في الأنابيب تكافئ ضياعات الاكزيرجي التي تكافئ بدورها الضياعات الحقيقية في الأنابيب.

وتصبح علاقة المردود بالشكل:

$$\eta_e^{'} = \frac{i_1^{'} - t_k}{b^{'}W} \times \frac{i_1^{'} - i_a^{'}}{i_1 - t_k} \times \frac{i_1 - i_a}{i_1^{'} - i_a^{'}} \times \frac{i_1 - i_k}{i_1 - i_a} \qquad (34)$$

بينما مردود الأنابيب (الضياعات في الأنابيب) بالشكل: $\eta_r = \frac{i_1 - i_a}{i_1^{'} - i_a^{'}}$

والضياعات المحسوبة حسب هذه العلاقة تكون أكبر عدة مرات من حسابها وفق العلاقة السابقة.

سيتم شرح المردود النظري للدورة لاحقا، وحسب الأشكال (29)، (30)، (31) فإن المردود الداخلي للعنفة يتعلق قبل كل شيء بحجم الجريان ومع ازدياد الضغط وثبات باقي البارامترات فإن المردود الداخلي للعنفة يقل. وزيادة درجة حرارة تحميص البخار واستخدام التحميص المتكرر (الثانوي) تزيد المردود ليس فقط بسبب زيادة الحجم النوعي للبخار في المرحلة الأخيرة وإنما بسبب انخفاض رطوبته بشكل رئيسي. تدل الدراسات أن زيادة رطوبة البخار في المرحلة الأخيرة بمقدار 1% يؤدي لانخفاض في قيمة المردود الداخلي للعنفة 1%.

تظهر المشكلة بشكل خاص في العنفات ذات البخار الرطب التي تعمل في المحطات ذات المفاعلات المائية. للتغلب على الضياعات الناتجة جراء هذا السبب تستعمل شفرات مركبة على القرص من جهة دخول البخار بهدف اصطياد وقذف قطرات الرطوبة إلى فتحات التصريف. يمكن استخدام فاصل رطوبة ميكانيكي وأحيانا محمص ثانوي للبخار النقي وتكون العنفة ذات مردود عالي وقابلة لتغيير الحمولة رغم الخلو صات القطرية الصغيرة ولكنها سهلة العطب.

المردود النظري – بارامترات الدورة

إن قيمة المردود النظري للدورة لها أكبر تأثير على المردود العام للمحطة

$\eta_{th} = \frac{i_1 - t_a}{i_1 - t_k}$ وأكبر قيمة له هي الناتجة عن دورة كارنو $\eta_{tc} = \frac{T_I - T_{II}}{T_I}$

T_I, T_{II} [k] درجة حرارة المنبع البارد والمنبع الحار على التتالي.

بينما قيمة مردود دورة رانكين للبخار المحمص عند نفس درجات الحرارة تكون أقل كما هو مبين في الجدول رقم (18) وتؤخذ درجة الحرارة الوسطية $T_{1sr} = \frac{i_1 - i_k}{s_2 - s_1}$ في علاقة مردود دورة رانكين.

يمكن زيادة المردود النظري للدورة بإحدى الطرق التالية:

1- تخفيض درجة حرارة المنبع البارد للدورة

2- زيادة درجة حرارة المنبع الساخن للدورة

3- تحويل دورة رانكين إلى دورة كارنو

يتم تخفيض درجة حرارة المنبع البارد أي تخفيض درجة حرارة البخار المتكاثف من خلال تخفيض الفرق الوسطي لدرجة حرارة البخار ومياه التبريد ويحصل ذلك من خلال:

أ- زيادة سطح التكاثف

ب-زيادة شدة جريان مياه التبريد

ت-تخفيض درجة حرارة مياه التبريد

سيتم الحديث عن تخفيض درجة حرارة مياه التبريد لاحقا يبين الشكل (32) والجدول رقم (19) حدود تخفيض درجة حرارة التكاثف التي تحددها إمكانية استخدام مياه التبريد. التخفيض الوسطي المثالي لدرجة حرارة المياه يتم على حساب زيادة عمل المضخات وزيادة الحجم النوعي للبخار الخارج من العنفة. ففي العنفات ذات الاستطاعات الكبيرة والمحددة بتدفقات كبيرة لخروج البخار يتم زيادة عدد فتحات الخروج من العنفة أو بزيادة ضياعات الخروج وهذا يطرح السؤال التالي: ما هو الهدف من تخفيض ضغط الخروج؟.

تخفيض درجة حرارة مياه التبريد من [c]22 إلى [c]12 للعنفات ذات الاستطاعة [MW]500 وضغط [bar] 160 ودرجة حرارة [c]565 يزيد في كتلة العنفة من [tons] 830 إلى 1000 [tons] وكتلة مجموعة العنفة (عنفة+مكثف+مسخنات) من [tons] 2670 إلى 2840 [tons].ويتناقص الاستهلاك الحراري النوعي من [kcal/kW.h] 1893 إلى 1847 [kcal/kW.h] أي حوالي 2.5% وتزداد الكلفة النوعية لمجموعة العنفة من [$/kW] 18.4 إلى [$/kW] 19.6.

وحسب النورم العالمي تؤخذ قيمتين للضغط في المكثف

[bar] 0.035 لدورة التبريد المفتوحة

0.065 [bar] لدورة التبريد المغلقة

إن زيادة درجة حرارة المنبع البارد من [k] 301.36 إلى [k] 310.3 يؤدي لزيادة الضياعات النسبية عند درجة حرارة T_1=550 [k] بالنسبة للدرجة T_1=700 [k]. والضغط المنخفض في المكثف له تأثير في تصحيح استهلاك الحرارة في المحطات ذات البارمترات المنخفضة وفي حالة عنفات رد الفعل ضغط الخروج يحدد بشكل يتناسب مع درجة حرارة التكاثف للبخار وزيادة ضياعات الضغط في الأنابيب بين العنفة والمآخذ الحرارية يقلل من درجة الحرارة في المأخذ، بينما انخفاضها مع زيادة هبوط الانتالبي الشكل (33) يزيد استطاعة العنفة وتزداد قيمة الطاقة المستخدمة في التدفئة.

الطريقة الثانية لزيادة مردود الدورة تتعلق بزيادة درجة حرارة المنبع الحار (زيادة الضغط ودرجة الحرارة عند الدخول للعنفة). إن زيادة الضغط يؤدي لزيادة هبوط الانتالبي وبالتالي زيادة كلفة الجزء العالي الضغط من مجموعة العنفة والمرجل. وإنقاص المردود الداخلي للعنفة يزيد معامل الصيانة وتزداد رطوبة البخار في الجزء الأخير من العنفة ويزداد استهلاك الطاقة الذاتي بسبب زيادة عمل مجموعة الضخ لمياه التغذية.

إن زيادة الهبوط بالانتالبي تكون أقل مع زيادة الضغط، بينما زيادة عمل الضخ تتناسب طردا مع الضغط في المرجل وتتعلق القيمة الحدية للضغط بمجرى العنفة وباستطاعتها ومراحل التحميص، كلما زادت الاستطاعة زادت درجة حرارة التحميص التي تزيد القيمة الحدية للضغط كما في الشكل (34) والشكل (35) ولكن مع زيادة الضغط يتناقص المردود وتكون الحدود الاقتصادية للعنفات ذات الاستطاعة أكبر من [MW] 300 تكون القيمة في المجال من [bar] 240 إلى [bar] 250 لأن المراجل المائية التي تعمل عند الضغوط فوق الحرجة تتطلب استخدام مياه عالية النوعية مع مجموعة عنفة ومرجل جيدين وبنفس الوقت تزداد الصيانة نسبيا.

تستخدم عنفات بضغط أقل في المحطات الكهروحرارية الذي تحسب قيمته بالعلاقة: $p = (8 \div 12)\sqrt{D}$ حيث: [t/hr] D كمية البخار والضغط [at]. زيادة الضغط عند مدخل العنفة يؤدي لزيادة الكلفة ودرجة الضغط العكسي كما هو مبين في الجدول رقم (20) والشكل (36) يبين زيادة كلفة المرجل بالنسبة للضغط ودرجة حرارة التحميص. لتجنب زيادة رطوبة البخار الخارج من العنفة التكثيفية نتيجة زيادة ضغط الدخول يتم التحميص عند درجات حرارة عالية (عند ضغط ثابت)، حيث يتناقص الاستهلاك الذاتي للطاقة واستهلاك الوقود والهواء اللازم للاحتراق ويزداد المردود. لكن تقنيا إن طبيعة معدن الأنابيب الواصلة إلى المحمص تحد من زيادة درجة الحرارة بشكل كبير.

يستعمل التحميص المتكرر (المرحلي) لزيادة تحميص البخار حيث يسخن البخار المحمص إلى درجة الحرارة الأولية يجب أن لا يتجاوز هبوط الضغط 10% من ضغط البخار الخارج من

العنفة إلى المحمص في نظام التحميص المرحلي. للضغوط فوق الحرجة يستعمل محمص ثنائي بعد المرحلة الأولى ومحمص بعد المرحلة الثانية ودرجة حرارة التحميص إما أن تكون متساوية لجميع المراحل أو أنها تزداد بعد كل مرحلة. إن استخدام التحميص المرحلي للبخار يؤدي لزيادة في المردود بمقدار 5% واستخدام التحميص المتكرر %(1.5-1) ويزيد درجة الحرارة الوسطية للدورة.

يمكن تحويل دورة رانكين إلى دورة كارنو من خلال استعمال التسخين الاسترجاعي لمياه التغذية باستخدام البخار المستنزف من العنفة. ومع إهمال ضياعات الانتالبي في أنابيب الاستنزاف واستخدام البخار الرطب مع عدد لانهائي لمراحل التسخين فإن مردود دورة رانكين يساوي مردود دورة كارنو.

يجب أن لا تتجاوز درجة حرارة التسخين الاسترجاعي لمياه التغذية مقاسة بالسيلزيوس (0.65-0.75) من قيمة درجة الغليان وللوصول إلى هذه الدرجة نستخدم التسخين الاسترجاعي متعدد المراحل. ففي العنفات الصغيرة الاستطاعة يستخدم تسخين بمرحلة واحدة ودرجة حرارة التسخين المثالية لا تتجاوز 0.5 من قيمة درجة حرارة الغليان في المرجل.

إن طريقة الحساب الدقيقة لتحديد الزيادة النسبية في المردود باستخدام التسخين الاسترجاعي لمياه التغذية مبينة على الشكل (37). بينما درجة الحرارة المثالية لمياه التغذية تحسب من العلاقة:

$$t_r = \frac{n}{n+1}(t' - t_k)[c^o] \qquad (35)$$

t_k درجة حرارة التكاثف في المكثف

t' درجة حرارة الغليان في المرجل

n عدد المسخنات الاسترجاعية

تكون نسبة زيادة المردود عند n مرحلة على نسبة زيادة المردود عند $n=\infty$ تحدد بالعلاقة: $\frac{\Delta\eta_n}{\Delta\eta_\infty} = \frac{n}{n+1}$ وعندما يزداد عدد المراحل مرحلة واحدة تصبح الزيادة في المردود بالشكل:

$$\frac{\Delta\eta_{n+1}}{\Delta\eta_\infty} - \frac{\Delta\eta_n}{\Delta\eta_\infty} = \frac{n+1}{n+1+1} - \frac{n}{n+1} = \frac{1}{n^2+3n+2} \qquad (36)$$

نستنتج من العلاقة السابقة أنه مع زيادة عدد مراحل التسخين الاسترجاعي تتناقص الزيادة في المردود، بينما تزداد كلفة التجهيزات بعد إضافة مسخن استرجاعي. يتحدد عدد المسخنات حسب استطاعة العنفة وبارامترات البخار الجدول رقم (21).

بالنسبة للعنفات كبيرة الاستطاعة والبارامترات المرتفعة يصل عدد المسخنات إلى 10 الشكل (38) وللمراجل التي يتم فيها تسخين الهواء أي تبريد نواتج الاحتراق في مسخن الهواء يكون عدد المسخنات الاسترجاعية أقل من المراجل التي تعمل دون تسخين استرجاعي.

لـلآلات غير الكبيرة والبارامترات المنخفضة للبخار نستعمل غالبا مرحلة تسخين واحدة وعادة يكون مسخن مزجي هو طارحة الهواء (الغازات)، حيث يسخن الماء إلى الدرجة [c]104 عند ضغط 1.2 at (1 bar) ومن غير المفيد أن تعمل عند ضغط أعلى، يتم استخدام خزان رخيص وسهل الصيانة لطرح الغازات بشكل جيد من الماء ويسخن الماء إلى درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة تكاثف البخار المسَّخن في المسخن المزجي. وفي المسخنات السطحية يحيط البخار بالأنابيب التي تمر فيها المياه ويكون هناك فرق بدرجات الحرارة Δt بين درجة حرارة تكاثف البخار ودرجة حرارة الماء الجدول رقم (22). هذا الفرق يؤدي لضياعات حرارية مقارنة مع المسخن المزجي عند التسخين لنفس الدرجة بالإضافة إلى زيادة ضغط البخار المستنزف من العنفة وعندها فإن العمل الناتج عن تمدد البخار في العنفة يكون أقل.

لا ينصح باستعمال مسخنات مزجية فقط لأن ذلك يتطلب وضع مضخة بعد كل مسخن لضخ المياه إلى المرحلة التي تليها حيث الضغط في كل مسخن يساوي ضغط البخار المستنزف. وبالتالي فالمضخات لن تكون كبيرة الرفع ولكنها يجب أن تعمل في كل مرحلة عند درجة حرارة أعلى وهذا يكون مكلفا ومعقدا للتجهيزات. عمليا نجد في نظام التسخين الاسترجاعي مسخن أو مسخنين (مرحلة أو مرحلتين) مزجيين (طارحة الهواء) ونادرا ما نصادف عدة مسخنات مزجية.

في المسخنات السطحية كلما نقص فرق درجات الحرارة Δt كلما ازداد مردود الدورة، ولكن بنفس الوقت يتطلب ذلك زيادة في سطوح التبادل الحراري وزيادة في الكلفة. البخار المستنزف من المرحلة الأولى للعنفة ليدخل إلى المحمص المرحلي يكون محمصا ويمثل منبعا إضافيا للضياعات وهو غير تابع لدرجة حرارة البخار الحقيقية. إن تحميص البخار يسبب إنقاص معامل التبادل الحراري لذلك يجب زيادة سطح التبادل الحراري وزيادة متانة المعدن وهذا يزيد في الكلفة. ولتخفيض الضياعات في ضغط البخار بين العنفة والمحمص وفي الأنابيب بين العنفة والمسخنات يتم وضع المسخنات بالقرب من العنفة لإنقاص طول الأنابيب، عادة في حالة المسخنات المنخفضة الضغط يوضع المسخنين الأقل ضغطا تحت العنفة وفوق المكثف (يجب أن لا تتجاوز ضياعات الضغط في الأنابيب 10% من ضغط البخار الخارج من العنفة).

إضافة لزيادة المردود النظري باستخدام التسخين الاسترجاعي يكون له تأثير على زيادة المردود الداخلي للعنفة. ويكون المردود الداخلي لعنفة تكثيفية مع تسخين استرجاعي أعلى منه لنفس العنفة وبدون تسخين استرجاعي، ويزداد الاستهلاك النوعي للبخار، ويزداد قطر أنبوب الدخول وينخفض للخروج رغم ذلك فإن الشفرات تكون أكبر وتزداد ضياعات الاحتكاك. الجدول رقم (23) يبين تأثير المسخنات الاسترجاعية على استطاعة العنفة.

عند p=90 [bar] و t=500[c] حوالي 25% من البخار الداخل للعنفة يؤخذ بالاستنزاف

عند [bar] p=127 و [c]t=538 يصل إلى حوالي 33% وبعد ذلك لا يعود له تأثير على تدفق البخار الخارج من العنفة

عناصر المخطط الحراري

إن استقرار بارامترات الدورة لا يؤدي لنفس القيم في حساب المردود. لأن التوصيلات بين العناصر لها تأثير كبير على المردود أيضا، لذلك يجب بناء مخطط حقيقي وحسب هذا المخطط يتم حساب المردود لكامل النظام. يجب تمثيل جميع العناصر الرئيسية للنظام في المخطط التي يحصل بداخلها تحولات ترموديناميكية وتوصيلات الأنابيب التي يمر فيها جسم التشغيل (بخار أو ماء أو غاز). ليس ضروريا التمثيل في المخطط الصمامات والعناصر الأخرى والتوصيلات المتشابهة (المتوازية) وصمامات الآمان والعناصر الاحتياطية.

يجب أن يكون المخطط الحراري مبسطا قدر الامكان وفي حال وجود عدة عناصر متشابهة وتعمل على التوازي ومعقدة التصميم يمكن تمثيلها رمزيا ويكون عندها المخطط عام يتم تمثيل جميع العناصر عليه لتقييم الأعطال ويختلف عن المخطط الحراري المبسط.

يصلح المخطط الحراري لحساب البارامترات وتدفق الجريان (جسم التشغيل) في كل أنبوب وذلك بمعرفة أو بفرض البيانات المميزة لعناصر النظام. في أنظمة محطات الطاقة نجد العناصر التالية: المراجل – العنفات المضخات – المسخنات الاسترجاعية السطحية والمزجية – محطة تحلية – مبرد البخار (المكثف) – عناصر التمدد – المبخرات – مولدات البخار ... لقد تم التكلم عن المراجل والعنفات سابقا.

يبين على المخطط الحراري المبسط جريان الماء والبخار في العناصر مع الأخذ بالاعتبار محطة التحلية. وذلك بمعرفة بارامترات البخار عند خروجه من المرجل وبارامترات البخار عند الدخول إلى العنفة وللبخار الذاهب إلى المسخن المرحلي وبارامترات الخروج من العنفة.

الضياعات في الأنابيب تضاف إلى ضياعات المرجل. وبشكل خاص تدرس التحولات الحاصلة في العنفة الرئيسية والمساعدة المستخدمة لتدوير مضخة مياه التغذية وذلك بمعرفة بارامترات البخار عند المدخل والضغط عند المخرج أو الضغط والمردود الداخلي للعنفة. تحسب بارامترات البخار الخارج من العنفة أو من فتحات الاستنزاف بالعلاقة:

$$i_2 = i_1 - \Delta h_a * \eta_i \qquad (37)$$

$\Delta h_a = i_2 - i_1$ هبوط الانتالبي أديباتيا بين مدخل ومخرج العنفة

وبشكل مشابه نحسب بارامترات جسم التشغيل المضغوط في مضخة التغذية الكبيرة، حيث يؤخذ بالاعتبار الارتفاع بدرجة حرارة جسم التشغيل في المضخة بسبب الاحتكاك الذي يحسب بالعلاقة:

$$\Delta t_p = \frac{0.234 H_z}{\rho * C_w} \frac{1-\eta_p}{\eta_p} [c^o] \qquad (38)$$

H_z [at] الرفع الكلي للمضخة

C_w[kcal/kg] الحرارة النوعية للماء

$\rho_p [kg/m^3]$ الكثافة

η_p مردود المضخة

في الأنظمة متعددة العنفات يستعمل نظام المبادلات السطحية (بخار– ماء) ويكون المكثف الرئيسي بعد العنفة و (ماء– ماء) و (بخار– بخار) وهي المسخنات الاسترجاعية ومبردة التكاثف والتحلية وتسخين البخار. يجري الجسم المراد تسخينه في الأنابيب والجسم المسخن يحيط بها.

يحسب التبادل الحراري في المبادلات السطحية بالعلاقة:

$$Q = k * F * \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} [kcal/h] \qquad (39)$$

$Q[kcal/h]$ كمية الحرارة المتبادلة في المبادل

$k[kcal/m^2 hc]$ معامل انتقال الحرارة

$F[m^2]$ سطح التبادل الحراري

$\Delta t_2[c]$ أكبر فرق بين درجات الحرارة للمبادل

$\Delta t_1[c]$ أصغر فرق بين درجات الحرارة للمبادل

المبادلات الحرارية المزجية

يتم فيها تكاثف البخار بشكل مباشر بواسطة الماء وتستخدم في طارحات الهواء (الغازات) ويكون الفرق بين درجات حرارة البخار والماء مهملا $\Delta t \to 0$.

محطة التعويض

تستخدم غالبا في المحطات الكهروحرارية حيث تصلح لتغذية المآخذ بالبخار في وقت قصير (خلال زمن الاستعمال). نفترض أن العملية هي خنق أي أن الانتالبي ثابت $i = const$ ويكون البخار المخنوق ذو درجة حرارة مرتفعة، لذلك فإن المحطة تجهز بمرذذات بخار التبريد. إذا خرج

البخار من المبردة بدرجة حرارة قريبة من حرارة الإشباع أو مساوية لها عندها فإن 70% من الماء المرذذ يتبخر والباقي يؤخذ عبر حوض التكاثف الشكل (39) ، وإذا خرج محمصا على الأقل بحدود c(40-30) أكبر من درجة حرارة الإشباع نفترض أن كامل كمية الماء تبخرت. وتكون قيمة انتالبي البخار بعد المبردة أقل ولكن كمية البخار تزداد بمقدار كمية الماء المبخرة، أما كمية الماء اللازمة للترذيذ تعطى بالعلاقة:

$$w = \frac{i_1 - i_2}{i_2^{'} - t_w + \varphi\left(i_2 - i_2^{'}\right)}[kg/kg] \qquad (40)$$

$w[kg/kg]$ كمية الماء اللازمة لترذيذ 1kg بخار

$i_1[kcal/kg]$ انتالبي البخار قبل المبرد

$i_2[kcal/kg]$ انتالبي البخار بعد المبرد

$i_2^{'}[kcal/kg]$ انتالبي الماء الخارج من المبرد

t_w انتالبي أو درجة حرارة الماء الداخل إلى المبرد

$\varphi[kg]$ كمية الماء المبخرة في المبرد

إذا كان زمن الاستعمال كبير فإن التبريد يخفض انتالبي البخار وتخرج كمية أكبر من البخار وفي هذه الحالة يجب استعمال مياه أقل ملوحة. والأفضل مياه متكاثفة لأن الملح يترسب ويؤدي لتآكل الأنابيب....

عنصر التمدد الشكل (40)

يستخدم لفصل لبخار عن الماء الساخن عندما ينخفض الضغط المناسب لدرجة حرارة الماء بشكل ملحوظ إلى قيمة أقل من ضغط البخر وبهذه الطريقة يمكن استعمال جزء من كمية الحرارة ومن البخار للتعويض في المراجل عالية الضغط وتخفيض فواقد جسم التشغيل.

كمية البخار المستخدم من 1kg ماء تعويض تحسب من العلاقة:

$$\chi = \frac{i_1^{'} - i_r^{'}}{i_r^{''} - i_r^{'}}[kg/kg]$$

$\chi[kg/kg]$ كمية البخار المستخدمة لكل 1kg ماء

$i_1^{'}[kcal/kg]$ انتالبي مياه التعويض

$i_r^{'}[kcal/kg]$ انتالبي مياه التعويض بعد عنصر التمدد

$i_r^{''}[kcal/kg]$ انتالبي البخار المستخدم

يمكن استخدام عنصر واحد (مرحلة واحدة) أو متعدد المراحل وفي هذه الحالة نستخدم لكل مرحلة بخار بضغط مختلف وكميته أقل من المستخدم بمرحلة واحدة ولكن إذا انخفض سحب البخار المستنزف يزداد مردود المحطة.

المبخرات ومولدات البخار الشكل(31)

إن المخطط الحراري للمبخر ومولد البخار هو نفسه ولكن يختلفان بقيمة الضغط ففي حالة المبخرات يتكاثف البخار على جدران الأنابيب التي تمر فيها مياه التغذية وتتبخر الفرق بين درجة حرارة الماء والبخار تصل إلى c(25-15) وكلما نقصت هذه الدرجة كلما انخفضت ضياعات الدورة وأدى ذلك إلى زيادة كلفة المبخر، ومن جهة ثانية تكون درجة حرارة مياه التغذية المبخرة أقل من درجة حرارة الغليان لذلك من الضروري حساب الضياعات وبالتالي للتعويض. بشكل عام يتم وصل المبخرات في دورة الاسترجاع للعنفة كما في الشكل حيث يستنزف البخار من مرحلة العنفة عالية الضغط وتؤخذ المياه المبخرة إلى المرحلة الأدنى وبهذه الطريقة يزداد سحب البخار المستنزف وتنخفض استطاعة العنفة. تحسب الضياعات مع التقريب من العلاقة:

$$\Delta\eta_w = \frac{D_w(i_n - i_{n+1})}{D(i_1 - i_k)} \qquad (41)$$

$\Delta\eta_w$ تناقص مردود النظام باستخدام المبخر

$D_w[t/h]$ تدفق المبخر

$D[t/h]$ تدفق المرجل

$i_n[kcal/kg]$ انتالبي البخار من الاستنزاف n

$i_{n+1}[kcal/kg]$ انتالبي البخار من الاستنزاف n+1

$i_1[kcal/kg]$ انتالبي البخار عند الدخول

$i_k[kcal/kg]$ انتالبي البخار عند الخروج

النسبة $\frac{D_w}{D}$ تمثل ضياعات الدورة وتحدد قيمتها %(4-2) ويمكن اعتبار المبخرات التي تعمل عند ضغط بخار محمص at (5-1) في نظام العنفة التكثيفية عند ضغط at(90-40) ينقص المردود حوالي 0.05% عند قيمة $\frac{D_w}{D}$=1% وعند فرق درجات حرارة للبخار المتكاثف والمبخر يساوي $\Delta t = 10c^o$. المبخر يعوض 4% من الضياعات عند $\Delta t = 25[c^o]$ وينقص المردود بمقدار 0.5% كما ينتج من العلاقة السابقة وتقل هذه الضياعات كلما زاد هبوط الانتالبي على طرفي العنفة وكلما زادت البارامترات ازداد المردود الداخلي للعنفة.

إذا كان فرق الضغط بين خطي استنزاف متتاليين أكبر من القيمة الوسطية المفروضة وبهدف زيادة المردود يتم استخدام مكثف خاص موصول مع دورة مياه التغذية بين مسخنين استرجاعيين متتاليين كما في الشكل.

الجدول (24) يبين كمية البخر الناتجة من تبخر 1kg بخار نقي

طارحة الغازات ومضخة مياه التغذية في المخطط الحراري

إن استخدام المسخنات الاسترجاعية لتسخين مياه التغذية من الطرق المفيدة لزيادة مردود الدورة الحرارية للمحطة. وهذه المسخنات نوعين: مسخنات حرارية سطحية ومسخنات حرارية مزجية. وتعتبر طارحة الغازات مبادل حراري مزجي تفصل بين المسخنات الاسترجاعية منخفضة الضغط وعالية الضغط كما هو مبين على الشكل (32) حيث تقوم مضخة المياه المتكاثفة بضخ المياه إلى طارحة الغازات عبر المسخنات منخفضة الضغط (البخار المستنزف لها منخفض الضغط) ثم تضخ من الخزان المتوضع تحت طارحة الغازات إلى المرجل بواسطة مضخة مياه التغذية عبر المسخنات عالية الضغط (البخار المستنزف لها عالي الضغط).

الضغط المؤثر في طارحة الغازات يساوي ضغط البخار المستنزف إليها والتي تعمل عند ضغط عال تكون كلفتها ووثوقيتها عاليتين. إن اختيار درجة حرارة طارحة الغازات له تأثير كبير على كلفة المسخنات الاسترجاعية وشروط العمل (الاستثمار)، كلما زادت هذه الدرجة نقصت كلفة ووثوقية المسخنات عالية الضغط وانخفضت كلفة المسخنات منخفضة الضغط.

إن مضخة مياه التغذية تعمل عند درجة حرارة عالية وحجم نوعي كبير مما يزيد بقيمة العمل اللازم للضخ (تزداد استطاعة المضخة).

أثناء الاستثمار يوجد حلول مختلفة لتوضع طارحة الغازات. يمكن أن تكون آخر مرحلة استرجاع بع المسخنات الاسترجاعية المنخفضة الضغط وعندها تعمل المضخة عند درجة حرارة عالية. عمليا أقل درجة حرارة تكون 104c التي تقابل قيمة الضغط 1.2at وتدعى بطارحة غازات جوية وتعمل عند قيمة أكبر قليلا من الضغط الجوي وهي رخيصة الثمن ومضخة مياه التغذية تعمل عند درجة حرارة ليست مرتفعة.

تستخدم طارحة الغازات في المحطات الصناعية والكهروحرارية التي تستخدم المراجل rusztowym حيث لا ينصح بأن تكون درجة حرارة مسخن المياه أعلى من 150c وفي المحطات التكثيفية الصغيرة ذات ثلاث مراحل الاسترجاع كما في الشكل (33).

عندما تزداد البارامترات الابتدائية تزداد معها درجة الحرارة في طارحة الغازات. وينصح بأن لا تتجاوز درجة الحرارة فيها 135-145c عند ضغط 100at وهذا يعني أن عدد المسخنات منخفضة الضغط يزيد بمسخن واحد عن عدد المسخنات عالية الضغط، ومع ازدياد درجة حرارة مياه التغذية يزداد عدد المسخنات عالية الضغط.

يجب تخفيض عدد المسخنات ووضع مضختي تغذية عندما تكون البارامترات الابتدائية عالية والضغط قبل المرجل يتجاوز 200at.

عادة تعمل طارحة الغازات عند ضغط ثابت وعملها لا يتعلق بحمولة العنفة وعندها يجب أن تتم تغذيتها بالبخار من فتحة استنزاف ضغطها أعلى من قيمة الضغط المسيطر فيها والأنبوب الواصل بينها وبين العنفة يتم بشكل مباشر عبر صمامات تنظيم مع عدة خطوط استنزاف تغذي

المرحلة الأولى من المسخنات عالية الضغط. إن الضغط عند المدخل لا يتجاوز 90at والتغذية تتم بالبخار النقي، في الأنظمة ذات التحميص المرحلي يؤخذ البخار من الخط الواصل إلى المحمص.

وتستعمل كمسخن استرجاعي لأن ضغط البخار غير منتظم ويخفض من حمولة العنفة لأن تغير ضغط البخار في خطوط الاستنزاف لطارحة الغازات ينقص الحمولة.

الأنظمة التي لا تحوي طارحة غازات عندها يقوم المكثف بمهمتها ومضخة التكاثف تدفع الماء عبر المسخنات منخفضة الضغط مباشرة إلى مضخة التغذية إلى المرجل عبر المسخنات علية الضغط.

المسخنات الاسترجاعية

لقد تم سابقا مناقشة عدد مراحل التسخين الاسترجاعي ودرجة حرارة التسخين وفرق درجات الحرات الحرارة وأنواع المسخنات المستخدمة.

أما بالنسبة لعمل هذه المسخنات وكيفية توصيلها سيتم التكلم عنه في هذه الفقرة.

يتم تسخين البخار ذو الضغط العالي (180 bar حاليا) بواسطة المسخنات عالية الضغط. تتصل أنابيب البخار المتكاثف مع مسخن المرحلة الأدنى، حيث يعطي جزء من حرارته ويمتزج مع البخار المتكاثف في هذه المرحلة ويخرجان معا إلى المرحلة التالية، حتى المرحلة الأولى من مراحل التسخين الاسترجاعي عالي الضغط ليذهب فيما بع إلى طارحة الغازات. تدعى طريقة التوصيل هذه بطريقة الشلال. عموما هي الطريقة المستخدمة في توصيل خطوط البخار المتكاثف في المسخنات عالية الضغط.

عندما يكون فرق الضغط بين المسخن عالي الضغط الأول وطارحة الغازات صغيرا، توضع طارحة الغازات فوق المسخنات الاسترجاعية، والبخار المتكاثف يضخ بواسطة مضخة إلى طارحة الغازات.

خطوط البخار المتكاثف في المسخنات منخفضة الضغط توصل إلى خطوط مياه التغذية بعدة طرق. على الأغلب يتم الوصل بطريقة الشلال إلى المرحلة الأولى منخفضة الضغط، بعد ذلك يضخ بواسطة مضخة إلى الخط الرئيسي بعد المسخن، لأن درجة حرارة البخار المتكاثف فيها أعلى من درجة حرارة مياه التغذية في الخط الرئيسي بمقدار Δt ويدفع البخار المتكاثف إلى ما بعد المسخن الأعلى، مما يؤدي لإنقاص البخار المستنزف من فتحة الضغط الأعلى للعنفة.

دفع البخار المتكاثف إلى أنبوب مياه التغذية ما قبل المسخن يخفض من تدفق البخار المستنزف من فتحة الاستنزاف الأخيرة للعنفة، وبالتالي انخفاض قيمة الانتالبي، التي ستؤدي عملا في العنفة. وهو العامل الثاني ذو الفائدة القليلة.

القاعدة العامة تتعلق ، بأن زيادة التبادل الحراري تكون أكثر فائدة كلما نقص الفرق بين درجات الحرارة، بعد المبادل الحراري. يتحقق ذلك من خلال وصل مضخة دفع البخار المتكاثف مع أنابيب المياه بعد المسخن مباشرة. نادرا ما نصادف أنظمة تكون جميع خطوط البخار المتكاثف في المسخنات موصولة مباشرة إلى المكثف بشكل شلالي وهو نظام بسيط ولكنه غير اقتصادي.

المخطط الحراري للمحطة الكهروحرارية

في المحطات الكهروحرارية التي تغذي المدن يكون تغير الحمولة الحرارية كبير، وفي المحطات التي تغذي المنشآت الصناعية من الضروري وضع مرجل احتياطي، في المحطات الحديثة الفرق بين المنشأتين أن الصناعية تعمل بحمولة كبيرة عند زمن أكبر، لأن التي تغذي المدن تعطي الحرارة للتدفئة.

الأنظمة ذات محركات احتراق

استطاعة صغيرة يمكن الحصول عليها من محرك الاحتراق مقارنة مع التي نحصل عليها من العنفات البخارية، وبنفس الوقت يتعلق ذلك أيضا بنوعية الوقود الغازي أو السائل المستخدم، لكن من حسناتها: زمن الإقلاع صغير ، الكلفة التأسيسية قليلة، لذلك تستخدم على الأغلب كمحطات احتياطية أو لتغطية ساعات الذروة.

المخطط الحراري للعنفة الغازية

نظام مجموعة العنفة الغازية بسيط كما في الشكل. يضغط الهواء في الضاغط إلى قيمة الضغط المطلوبة ويدفع الهواء المضغوط إلى حجرة الاحتراق، يمتزج مع الوقود الغازي أو السائل ويحدث الاحتراق وتخرج نواتج الاحتراق (الغازات) بدرجة حرارية عالية تصل إلى أكثر من 800c. تتمدد الغازات في العنفة الغازية وتنتج عملا، يدير الضاغط والمولدة، ثم تخرج الغازات إلى الوسط المحيط بدرجة حرارة حوالي 400c.

المخطط الحراري لنظام مركب (غازي – بخاري)

صغر مردود نظام العنفة الغازية الناتج عن الضياعات الكبيرة عند مخرج العنفة مما يتطلب زيادة كمية الهواء اللازمة للاحتراق وعدم إمكانية زيادة درجة حرارة الغازات بسبب عدم توفر خلائط معدنية تتحمل الدرجات العالية، إن نواتج الاحتراق تحتوي على حوالي 17% من الأكسجين لم تستخدم في عملية الاحتراق.

نظام المحطة النووية

حسابات المخطط الحراري