مجلة جامعة تشرين للدراسات و البحوث العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (24) العدد (12)2002
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol (24) No (12) 2002

دراسة أسباب انفجار أنابيب مراجل محطة بانياس الكهروحرارية

الدكتور صلاح داوود*

(قبل للنشر في 2002/10/26)

□ الملخّص □

يعرض هذا البحث دراسة عملية تم اجراؤها على بعض أنابيب المراجل البخارية العاملة في محطة توليد بانياس والتي تعرضت إلى انفجارات أدت الى توقفات فجائية في عملها، مما أدى الى خسائر مالية وفنية في المحطة . ركزت الدراسة على المواقع الأكثر تعرضاً لدرجات الحرارة المرتفعة ذلك لأن معظم الانفجارات قد حدثت في هذه المواقع . كما تم دراسة التأثيرالمشترك لكل من الإجهادات الحرارية والتآكلات الكيميائية على معدن أنابيب المراجل العاملة عند ضغوط ودرجات حرارة عالية . وتهدف الدراسة الى وضع المقترحات والحلول الكفيلة بتفادي تكرار انهيار الأنابيب وبالتالي تقليل التكاليف المتعلقة بذلك . ويمكن الأستفادة من نتائج هذا البحث في معرفة أسباب انفجار أنابيب المراجل البخارية في المحطات الكهروحرارية الأخرى العاملة في القطر العربي السوري .

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

Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol (24) No (12) 2002

Study of the Reasons of Banies Power Station Steam Tubes Failure

Dr Salah Daoud*

(Accepted 26/10/2002)

□ ABSTRACT □

This research presents an applied study on some steam boiler tubes in power stations. These steam boiler tubes subject of study have really failed and caused immediate breakdowns in power stations. Such failures lead to a reduction in steam boiler tubes economical age, and an increase in financial and technical costs. Positions exposed to high temperature and pressure have been the focus of the study. In fact, the shared effect of temperature stress and chemical corrosion on boiler tubes metal has been also carefully studied. The purpose of the said study is to make propositions and put solutions that guarantee avoidance of repetitive failures and a reduction in money costs.

Results of this empirical research can definitely help to solve the same problem in other power stations.

***lecturer at mechanical power engineering department –faculty of mechanical and electrical engineering –tishreen university –lattakia-syria.**

مقدمة :

من المعلوم أن المرجل هو أحد العناصر الرئيسة في محطات توليد الطاقة الكهروحرارية، والتي يتم فيها تحويل الطاقة الكيميائية الخامية للوقود إلى طاقة حرارية تتمثل بالبخار الذي يدير عنفة بخارية لتنتج طاقة كهربائية. تتم عملية تحول الطاقة من خلال احتراق الوقود داخل فرن مولد البخار، الذي يتوجب عليه تأمين اشتعال دائم للوقود مع احتراق كامل وتأمين انتقال الحرارة بالإشعاع من اللهب إلى الأنابيب المائية [1]، ويتم تسخين المياه داخل أنابيب المرجل إلى درجات حرارة وضغوط مرتفعة عن طريق غازات الاحتراق المنتشرة في فرن المرجل. وعلى امتداد العقد الماضي عانت محطات الطاقة في القطر العربي السوري (محردة، بانياس، تشرين.....) من ظاهرة متكررة تمثلت في انفجار أنابيب المراجل مما أدى إلى توقف المحطات عن العمل لفترات مختلفة، وبالتالي حدوث خسائر مالية كبيرة جداً.

إن التوقفات المتكررة تسبب تآكلاً على معادن أنابيب المراجل، وكذلك على المسخنات والمبادلات الحرارية [2]. حيث ينتج عن التآكلات دخول شوائب من أوكسيد الحديد والنحاس عبر المكثف لتترسب على السطوح الداخلية للأنابيب مسببة انحرافاً في عملية انتقال الحرارة. ويكون الخطر الناتج عن هذه الترسبات أعظمياً إذا تجمعت في الأنابيب القريبة من منطقة الشعلة.

من جهة أخرى تسبب هذه التوقفات إجهادات تعب على معدن الأنابيب مصدرها الاجهادات الحرارية الإضافية على المعدن والناتجة عن التسخين والتبريد في حالات العمل والتوقف، وكذلك عند العمل بحمولات متغيرة ليظهر تأثيرها على شكل شقوق بسيطة تتوضع على الطبقة السطحية للمعدن، كما يزداد امتدادها مع الزمن. أما تأثير هذه الإجهادات على معدن الأنابيب فيتم بسرعة أكبر أو أصغر حسب التركيب الكيميائي لمعدنها [3]. كما أن الوسيط العامل (ماء . بخار) المار في أنابيب المراجل فيسبب بدوره تآكلات كيميائية لا يمكن منع حدوثها أو القضاء عليها نهائياً [4]. وتأخذ التآكلات أشكالاً مختلفة على أسطح الأنابيب، لتؤدي مع الزمن إلى انخفاض في متانتها .

وكانت هذه المشكلة من أبرز النقاط التي طلبت فيها وزارة الكهرباء التعاون مع وزارة التعليم العالي في إيجاد الحلول لها، ونظراً لأهمية الموضوع من الناحية الاقتصادية والتقنية بالنسبة إلى محطات توليد الطاقة كان هذا البحث، حيث تمت الدراسة على محطة توليد بانياس الحرارية.

الغاية من البحث :

يهدف البحث إلى معرفة الأسباب الحقيقية للانهيار المتكرر لأنابيب مرجل المجموعة الثانية في محطة توليد بانياس، آخذاً بعين الاعتبار جميع العوامل التي تسبب هذه الانفجارات وخاصة في المواقع الأكثر تعرضاً لدرجات الحرارة المرتفعة وكيفية معالجة هذه الظاهرة لنتمكن من تفادي حدوث توقفات فجائية في عمل المحطة المذكورة وكذلك في المحطات الحرارية الأخرى، وإلى استمرار عمل أنابيب المراجل البخارية وصولاً إلى العمر الاقتصادي التصميمي لها.

طريقة البحث:

تم اجراء هذا البحث في محطة توليد بانياس البخارية، حيث تم التعرف على ظروف عمل الأنابيب المتواجدة في مرجل المجموعة الثانية وعلى مواصفات هذه الأنابيب. فهي أنابيب فولاذية من الدرجة A210:A-1 وفق الستاندر الأمريكي ASTM. تتوضع الأنابيب بشكل شاقولي في المرجل، ويجري بداخلها مياه معالجة تسخن عن طريق مصدر حراري تؤمنه تسعة من الحراقات المرتبة على ثلاثة صفوف في مقدمة المرجل الشكل (1).

أما الوقود المستخدم في عملية الاحتراق فهو الفيول والذي ينتج عن احتراقه غازات Co_2 و So_2 تنتشر في وسط محيط بأنابيب مياه المرجل ،لتقوم بتسخين الماء وتحويله في إحدى المراحل إلى بخار محمص بدرجة حرارة تصل إلى C° 540 وعند ضغط بخار ماء حتى 160bar وبطاقة إنتاجية 505 طن بخار/ساعة. تم أخذ ثلاثة نماذج من الأنابيب المتضررة الشكل (2) والمتوضعة على ارتفاعات مختلفة في المرجل 10m، 15m و 20m. وعند معاينة النماذج المدروسة لوحظ تغير كبير في سماكة جدران الأنابيب، وخاصة في المواقع المجاورة لأماكن الثقوب، لذلك كان لابد من قياس سماكة الأنابيب المعدنية في هذه الأماكن وكذلك قياس السماكة في الجهة المقابلة لمنطقة الانهيار وذلك بوساطة جهاز قياس ثخانة يعمل بالأمواج فوق الصوتية وذو دقة قياس عالية . نتائج القياس مبينة في الجدول (1). ولمعرفة التغيرات الطارئة على الإجهادات الميكانيكية لمادة الأنابيب قرب مناطق الانهيار أجريت اختبارات شد على العينات المأخوذة في مخابر جامعة تشرين وتمت مقارنة النتائج مع قيم الإجهادات الواردة في وثائق اختبار الشركة الصانعة [5]. نتائج الاختبارات مبينة في الجدول (2).

وبما أن الأنابيب تعمل في أوساط يستحيل فيها منع التآكلات الكيميائية، توجب إجراء اختبارات كيميائية على النماذج المذكورة من أنابيب المرجل لتحديد النسب المئوية للعناصر المكونة لمعدن هذه الأنابيب ومقارنتها مع المواصفات الفنية الخاصة بهذه الأنابيب [5]. نتائج الاختبارات الكيميائية مبينة في الجدول (3). من جهة أخرى تشير الدراسات الكيميائية [4] إلى أنه ينتج عن تآكل المعادن الموجودة في أوساط مؤكسدة (بخار – ماء) نواتج منحلة وأخرى غير منحلة، خاصة على سطوح التسخين ذات الضغط العالي. وبالتالي يحدث تركيز لنواتج التآكل في المسامات الداخلية للأنابيب المائية ويؤدي ذلك إلى تعرض المعدن وطبقة حمايته إلى هجوم كيميائي كبير. لذلك كان لابد من معرفة تأثير المياه الجارية في أنابيب المرجل على عملية تآكل أنابيب الجدران المائية. لذلك تم تسجيل نسبة الحديد في مياه المرجل خلال الفترة الزمنية التي سبقت حدوث انهيار الأنابيب بثلاثة أشهر [6]. حيث بلغت القيمة الوسطى للقراءات التي تم تسجيلها خلال الفترة المذكورة بأن نسبة الحديد في مياه المرجل قد بلغت 41ppm جزء بالمليون . وبما أن الترسبات المتوضعة على الجدران الداخلية للأنابيب تعتبرمن العوامل المخربة لطبقة الحماية الداخلية للأنابيب المعدنية[2،4]. لذلك تم تحليل هذه الترسبات في مخابر الجامعة لمعرفة تركيبها الكيميائي وتأثيرها على طبقة الحماية الداخلية للأنابيب. نتائج الاختبارات مبينة في الجدول (4).

النتائج والمناقشة:

1- يظهر الفحص البصري للنماذج الثلاثة من الأنابيب المدروسة بأنها تعرضت إلى انفجارات على شكل ثقوب بقياسات مختلفة وذات مقاطع غير منتظمة. وأن المناطق المحيطة بهذه الثقوب قد انخفضت سماكتها إلى مجال يتراوح بين $(\frac{1}{3}، \frac{2}{3})$ من السماكة الفعلية، انظر الجدول (1). وهذا يعني أن المناطق المشار إليها قد

تعرضت إلى إجهادات حرارية مرتفعة سببت انصهارا موضعياً في جدران الأنابيب، مما أدى إلى انخفاض متانتها. ومع وجود ضغط داخلي مرتفع جداً للوسيط العامل (ماء – بخار) داخل هذه الأنابيب حدثت انفجارات في هذه المواقع. كما أن الضغط المرتفع قد سبب انتفاخا لحواف الثقوب وهذا ما يظهر واضحاً على النموذج رقم (2)، حيث يمكن ملاحظة شفة كبيرة ذات سماكة 1.77mm وأخرى صغيرة المقطع بسماكة 1.81mm. أي أن الانتفاخ قد حدث في المواقع ذات المقاومة الميكانيكية المنخفضة.

ومن جهة أخرى، أبعاد الفتحة الموجودة على النموذج رقم (2) والتي قياسها 96×36mm تعتبر كبيرة بالمقارنة مع أبعاد الفتحات على الأنابيب الأخرى، وهذا يعكس خطأً فنياً من وجهة نظر المتانة عند إصلاح الأعطال المتعلقة بمعالجة انهيار أنابيب المراجل عن طريق لحام ثقوب أنابيب المرجل بوساطة رقع معدنية تثبت باللحام الكهربائي.

2- تغير السماكة في المناطق المحيطة بالثقوب كما هو واضح في الجدول (1) يعني أن الأنابيب قد تعرضت إلى تآكلات كيميائية ملحوظة في هذه المواقع، ترافقت مع إجهادات حرارية عالية مما ساهم في انخفاض متانة المعدن وبالتالي حدوث التشوهات في جدران الأنابيب ومن ثم الانفجارات.

3- أظهرت القياسات التي تمت على الجهة المقابلة لمواقع الانفجارات أن تغير سماكة الأنابيب يعتبر بسيطاً. وأن ذلك يعود إلى تآكل كيميائي بسيط من جهة وإلى غياب الإجهادات الحرارية العالية من جهة أخرى. كما بينت اختبارات الشد أن قيم إجهادات الخضوع والانكسار قد انخفضت عن قيم الإجهادات في أنبوب سليم، كما هو مبين في الجدول (2)، وذلك رغم بقاء قيم الإجهادات ضمن حدود المواصفة القاسية الدولية للفولاذ ST-45وفق DIN 17175/82 .وكذلك ضمن حدود المواصفة القياسية الأمريكية ASTM-A210. حيث يعود الانخفاض في قيم الإجهادات إلى سقاية المعدن بسبب خروج السائل من الأنابيب بعد انفجارها. كما يؤدي ذلك إلى انتفاخ الأنابيب في منطقة الانفجار بسبب ضعف مقاومة معدن الأنابيب على تحمل الضغط العالي الداخلي.

4- أظهرت نتائج الاختبارات الكيميائية على النماذج من الأنابيب المتضررة، الجدول (3). أن العناصر المكونة لمعدن الأنابيب ذات نسب مئوية متقاربة مع مثيلتها في أنبوب سليم. وذلك رغم الانخفاض البسيط في النسب المئوية لبعض العناصر. مما يدل على بقاء الخواص الكيميائية لمعدن الأنابيب ضمن حدود المواصفات القياسية الدولية الخاصة بمثل هذه الأنابيب.

5- تم ملاحظة تشكل طبقة سوداء مترسبة على الجدران الداخلية للنماذج المدروسة. وعند إجراء التحليل على هذه الطبقة تبين أنها مكونة من أوكسيد الحديد المغناطيسي بشكل أساسي إضافة إلى النحاس والسيليكون والكالسيوم. وهذه الرواسب تسبب أضراراً على معدن الأنابيب للأسباب التالية:

أ- راسب أوكسيد الحديد المغناطيسي المتشكل على السطح الداخلي للأنبوب يعتبر مسامياً. وبالتالي فإن الماء أو البخار أو كليهما يركد في تجاويف الراسب مما يغذي المقاومة الحرارية للأنابيب، وهذا يسبب أضراراً في معدن الأنابيب بسبب فرط التسخين.

ب- مع ازدياد كمية الراسب المتشكلة على جدران الأنابيب تزداد سرعة التغيرات الكيميائية في مياه المراجل، وهذا يزيد من سرعة عملية التآكل الموضعي الشديد ، وبالتالي تقل سماكة المعدن في هذه المواقع لتؤدي بالنتيجة إلى انهيار المعدن في منطقة التآكل وخاصة بوجود ضغط داخلي مرتفع.

جـ- إن تعاقب المياه المعالجة الكيميائية في الأنابيب تساعد في تكون طبقات متراكبة من الرواسب فوق بعضها البعض، ومن ثم تتقشر هذه الطبقات خاصة مع تواجد كميات كبيرة مركزة من النحاس والكالسيوم. كما تقوم طبقات الرواسب هذه بشغل الحيز في الجزء المتقشر، مما يساعد في ارتفاع درجة حرارة الأنبوب كثيراً.

وبنتيجة التآكلات الكيميائية على السطح الداخلي للأنابيب يتحرر الهيدروجين كنتيجة تفاعل كيميائي وفق المعادلة:

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$

ليقوم الهيدروجين المتحرر بنزع كربون معدن الأنبوب عند درجات حرارة وضغوط مرتفعة، مما يؤدي إلى تقصف المعدن وبالتالي انخفاض متانته ومن ثم انهياره.

الخلاصة:

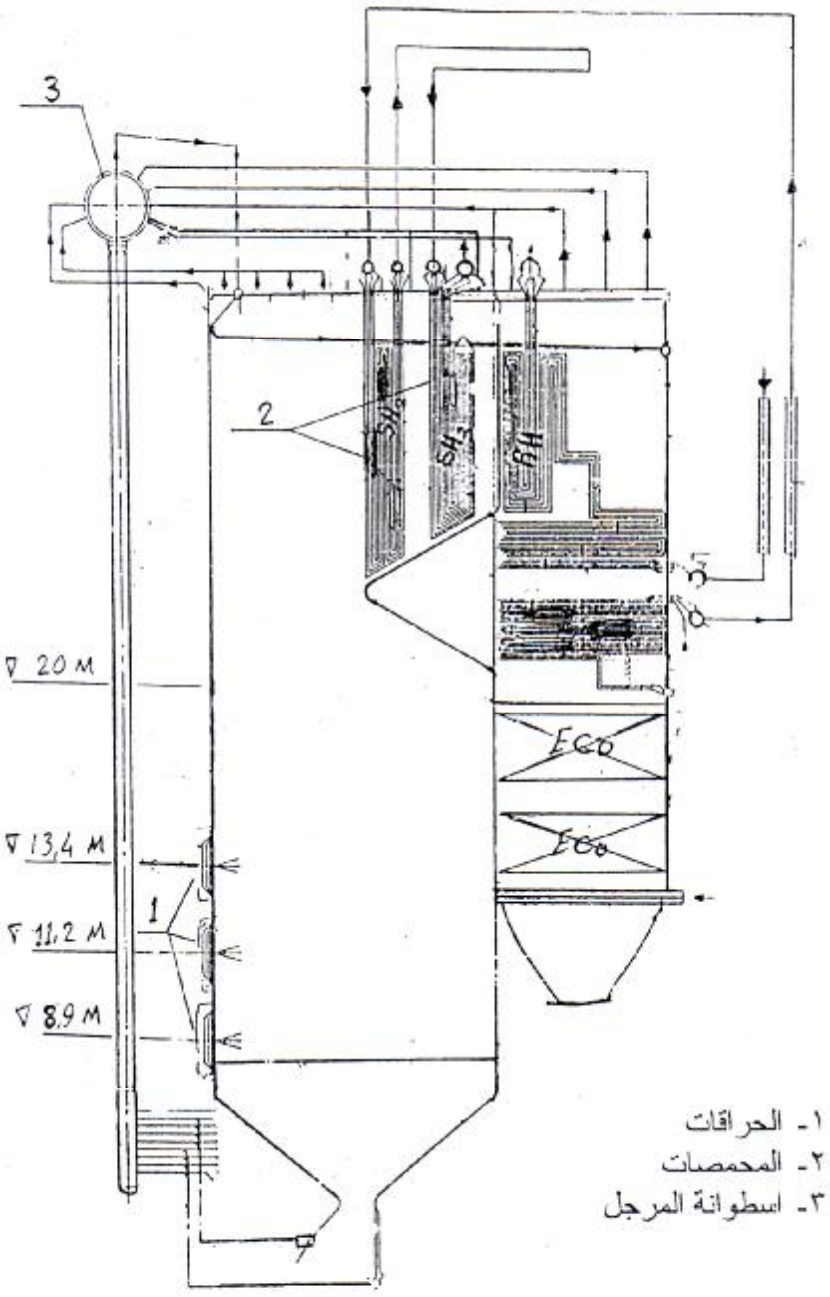
1- عند إجراء الصيانة الدورية السنوية أو في حالات الإصلاح داخل المرجل نقترح قياس سماكة جدران مجموعة من الأنابيب المواجهة للحراقات وكذلك للأنابيب المتوضعة على الجدران الجانبية من المرجل وعلى ارتفاعات مختلفة في المرجل واعتبارها كأنابيب مرجعية بالنسبة إلى فنيي الصيانة. ومتابعة التغيرات التي تطرأ على سماكة هذه الأنابيب مع الزمن عبر سجل خاص بها يقوم بإعداده قسم الصيانة المختص بالمرجل ليشكل دليلاً أولياً على مدى تآكل جدران الأنابيب وعلى تأثير الاجهادات الحرارية عليها.

2- الابتعاد عن القيام بلحامات طولانية للأنابيب المتشققة عند الكشف عنها وكذلك عدم إصلاح الأنابيب المثقوبة بوساطة رقع معدنية صغيرة تلحم على جدران الأنابيب لتغطي الثقوب وإنما نقترح تبديل الأنابيب المتضررة بأخرى جديدة. وأن يتم التبديل بعد قياس السماكة بوساطة أجهزة قياس دقيقة ولمسافات معينة في كلا الاتجاهين.

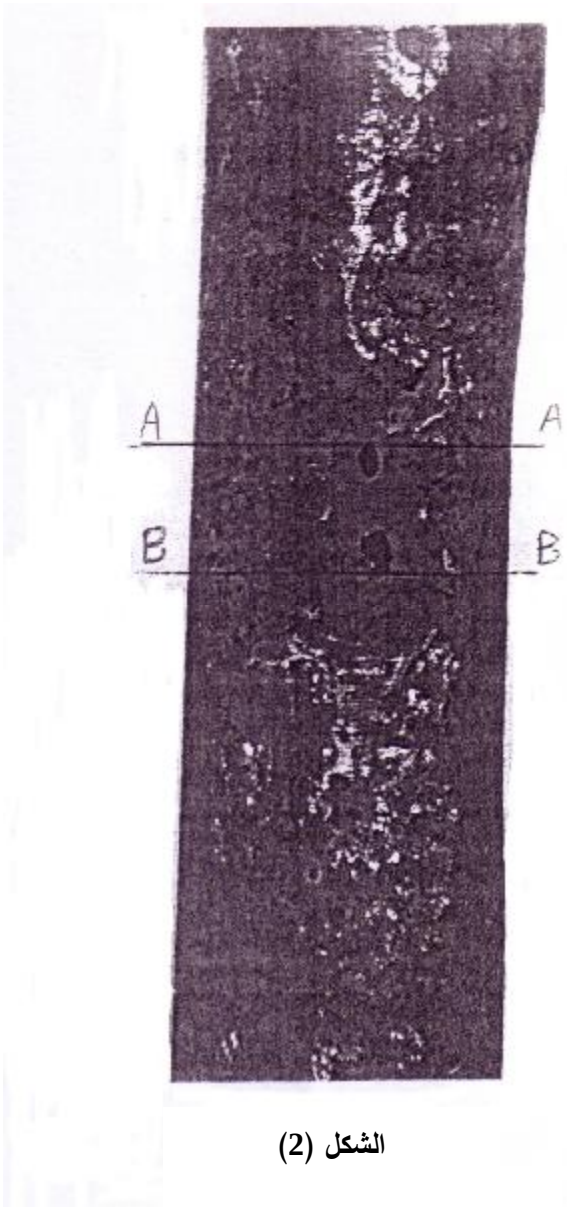
3- الابتعاد عن عملية تبريد المرجل قسرياً بوساطة مراوح خاصة عند حدوث أعطال في أنابيب المراجل. وإنما يجب فتح المرجل وترك الأنابيب تبرد بشكل طبيعي. لأن التبريد والتسخين يؤديان إلى إجهادات حرارية على معدن الأنابيب مما يسبب ضرراً كبيراً في طبقة الحماية الداخلية للأنابيب.وبنتيجة ذلك تتسارع عملية التآكل الداخلي للأنابيب ويقل عمرها الاقتصادي.

4- ضرورة إجراء الصيانة الدقيقة لحراقات الوقود ومعايرتها وخاصة التأكد من زاوية نفث اللهب من الحراقات داخل المرجل، بهدف تحقيق التوزع الحراري التصميمي في حجرة احتراق المرجل، وذلك لمنع حدوث تركيز حراري موضعي.

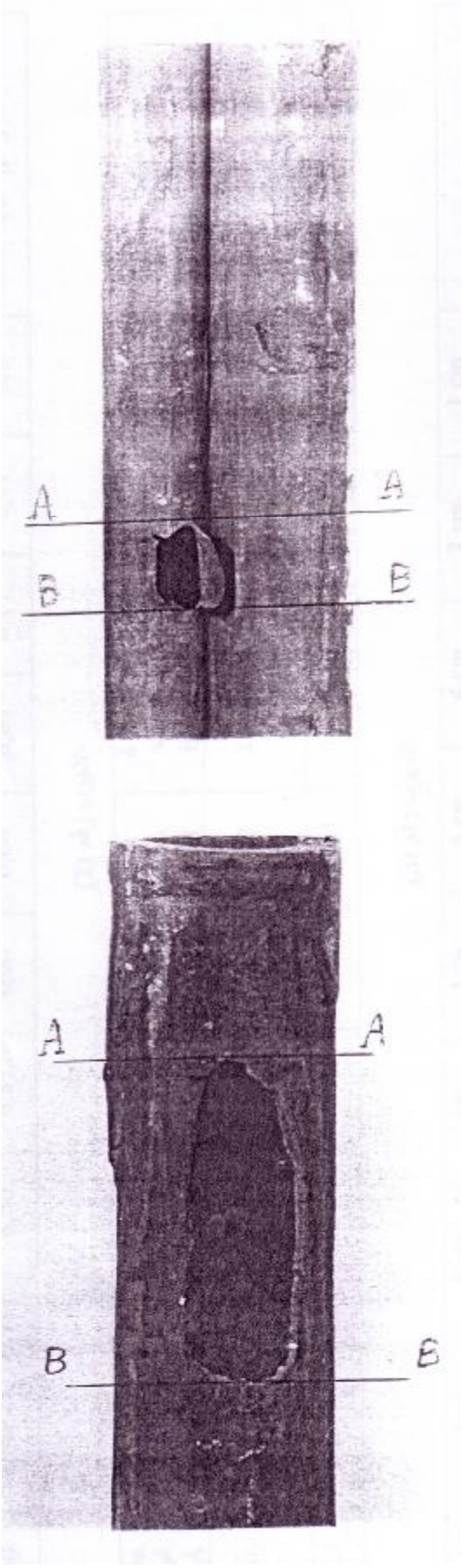
5- العمل على التخلص من الرواسب المتشكلة على السطوح الداخلية لأنابيب الماء عن طريق الغسل الكيميائي الدوري لها، يجب أخذ عدة نماذج من أماكن مختلفة من الأنابيب وإجراء الغسل الكيميائي عليها مخبرياً وبطرق مختلفة بغية الوصول إلى الطريقة الفضلى للغسل واعتمادها.



الشكل (١)
مرجل بخار المجموعة الثانية في محطة توليد بانياس



الشكل (2)



الأنبوب رقم (3)

الجدول (1) يبين سماكة جدران الأنابيب المدروسة

الأنبوب رقم (1)

موقع القياس	المسافة بين الثقبين A,B	2 cm فوق A- A	4cm فوق A-A	6cm فوق A-A	8cm فوق A-A	10cm فوق A-A	2 cm تحت B-B	4 cm تحت B-B	6 cm تحت B-B	8 cm تحت B-B	10cm تحت B-B
سماكة جدار الأنبوب بـــ mm في الجهة المتضررة	1,67	3,20	4,34	5,79	5,74	5,80	3,1	4,92	5,83	5,85	6,12
سماكة الجدار في الجهة المقابلة	6,5	6,71	6,61	6,80	6,66	6,60	6,81	6,60	6,59	6,59	6,60

الأنبوب رقم (2)

موقع القياس	الشفة الكبيرة	الشفة الصغيرة	2 cm تحت B-B	4 cm تحت B-B	6 cm تحت B-B	8 cm تحت B-B	0.5 cm فوق A-A	2 cm فوق A-A	4 cm فوق A-A	6 cm فوق A-A	8cm فوق A-A
سماكة جدار الأنبوب بـــ mm في الجهة المتضررة	1,77	1.81	3.06	4.29	5.07	5.36	3.76	3.51	5.40	5.67	6.46
سماكة الجدار في الجهة المقابلة	6.57	6.63	6.21	6.38	6.40	6.6	6.45	6.57	6.86	6.37	6.33

الأنبوب رقم (3)

موقع القياس	1 cm فوق A- A	2 cm فوق A-A	4 cm فوق A-A	6 cm فوق A-A	1 cm تحت B-B	2 cm تحت B-B	4 cm تحت B-B	6 cm تحت B-B	8 cm تحت B-B
سماكة جدار الأنبوب بـــ mm في الجهة المتضررة	4.26	4.59	6.16	6.22	4.71	4.75	5.22	5.51	5.91
سماكة الجدار في الجهة المقابلة	6,32	6,41	6,51	6,53	6,28	6,39	6,44	6,48	6,54

الجدول (2) يبين الإجهادات الميكانيكية للأنابيب المنهارة ولأنبوب سليم:

رقم الأنبوب	إجهاد الخضوع N/mm^2	إجهاد الانكسار N/mm^2	الاستطالة %
1	290	500	33
2	279	479	28.4
3	283	458	29.6
أنبوب سليم	387	569	30

الجدول (3) يبين نتائج الاختبارات الكيميائية للعينات المدروسة ولأنبوب سليم:

رقم الأنبوب	C	S	P	Mn	Si
1	0.11	0.016	0.012	0.52	0.13
2	0.19	0.014	0.009	0.63	0.16
3	0.20	0.015	0.01	0.584	0.156
أنبوب سليم	£ 0.28	£ 0.058	£ 0.048	£ 0.84	0.29

الجدول (4) يبين نتائج تحليل الترسبات على الجدران الداخلية للأنابيب المدروسة:

رقم الأنبوب	النسب المئوية للعناصر المشكلة للرواسب		
	Cu	Si	Fe_3O_4
1	4.3	5.4	69.4
2	5.1	6.5	72.1
3	5.6	7.2	73.4

المراجع:

.....

[1]– نحاس، أحمد .1983. "مولدات البخار"، منشورات جامعة حلب . كلية الهندسة . حلب.

[2]– ميكلیار، أ.ب. المراجل البخارية في محطات الطاقة الكهربائية . موسكو 1974.(باللغة الروسية).

[3]– بليايف، أ. أ. إصلاح المراجل ذات الضغط العالي . موسكو 1989 (باللغة الروسية).

[4]- HENTHORNE , M. 1971- Fundamentas of Corrosion. London.

[5]– تقرير شركة ANSALDO GIE . ايطاليا 1993. والمتضمن إختبار الإجهادات الميكانيكية لأنابيب المجموعة الثانية في محطة توليد بانياس.

[6] – دفتر خدمة المجموعة الثانية في محطة توليد بانياس.