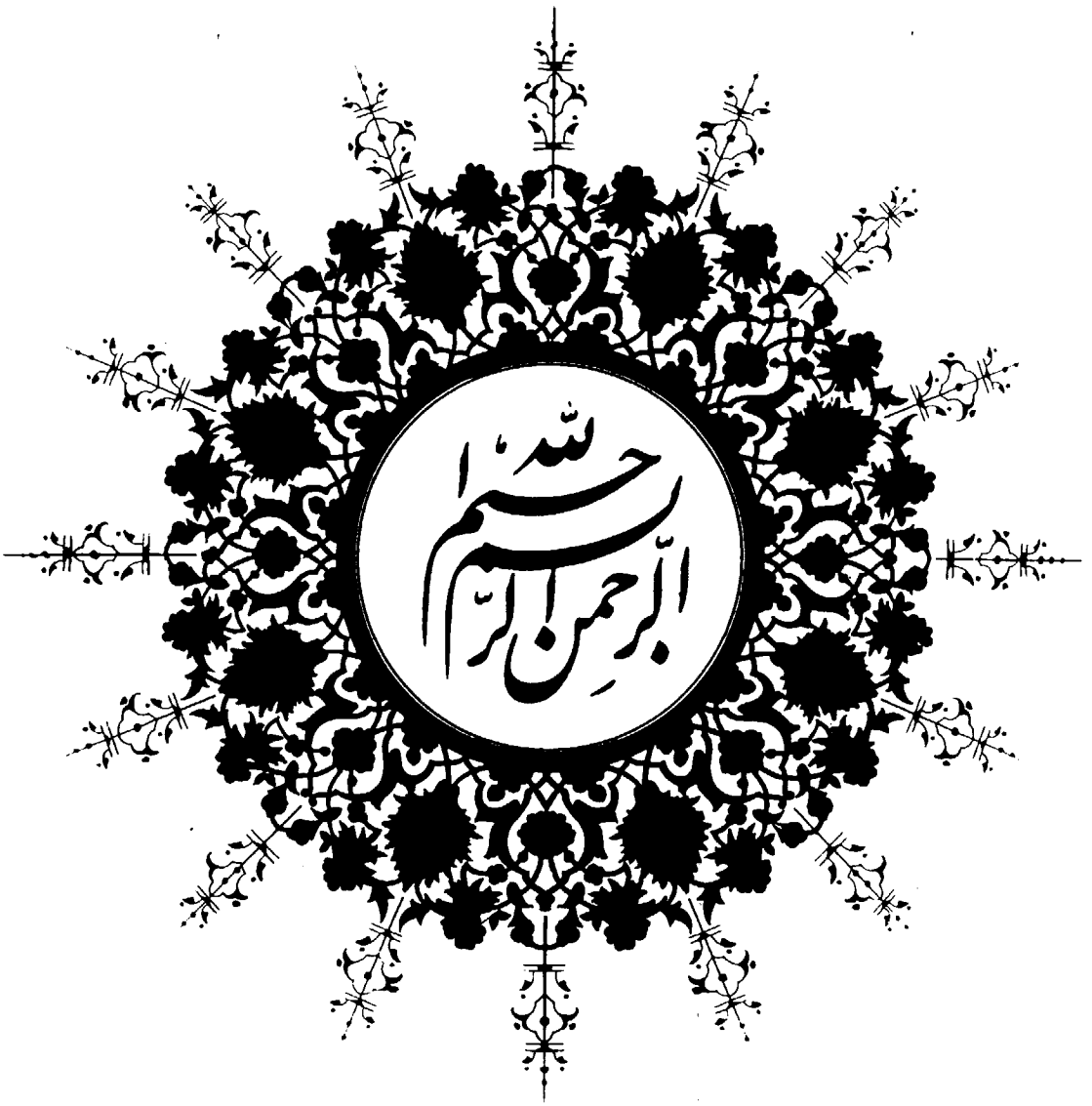

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی علل سوراخ شدن لوله های گرم کن های فشارقوی نیروگاه اصفهان

پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

محمد انصاری

استاد راهنما

دکتر علی اکبر عالم رجبی

۱۰۰۸۱

۱۳۷۹

۳۳۳۴

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تمبیت مدارک

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

۱۳۸۰ /۱۱/ ۱۰

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی آقای محمد انصاری

تحت عنوان

بررسی علل سوراخ شدن لوله های گرم کن های فشارقوی نیروگاه اصفهان

در تاریخ ۱۳۷۹/۹/۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی وتصویب نهائی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه — دکتر علی اکبر عالم رجبی

۲- استاد مشاور پایان نامه — دکتر ابراهیم شیرانی

۳- استاد مشاور پایان نامه — دکتر محسن دوازده امامی

٤- استاد داور — دکتر محمود اشرفی زاده

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر حسن خادمی زاده

حمد نامحدود وسپاس نامتناهی ، حکیمی را که دفتری از مجموعه عالم آفرینش ترتیب داده و چراغ عقل و بینش را فراراه بشر قرار داد و درود و سلام بی منتها بر اولین سطر هستی و آخرین راهنمای حق پرستی ، حضرت محمدبن عبدا... (ص) و خاندان گرامیشان به ویژه آخرین حجت الهی و عصاره هستی حضرت ولی عصر (عج).

لازم می دانم مراتب تشکر وامتنان خود را اعلام نمایم از :

پدر و مادر بزرگوارم که همواره مدیون تلاش ، رنجها ، محبت ها و فداکاریهای بی دریغشان هستم.

آقای دکتر علی اکبر عالم رجبی که در تمامی مراحل انجام این پروژه ، راهگشای اینجانب بودند و از موهبت همکاری و مساعدت ایشان بهره مند بودم.

آقایان دکتر ابراهیم شیرانی و دکتر محسن دوازده امامی که زحمت مطالعه و بازبینی پایان نامه را تقبل فرمودند.

آقای دکتر محمود اشرفی زاده که در جلسه دفاعیه ، شرکت فرمودند.

کلیه اساتید محترم دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان که در طول دوره های کارشناسی و کارشناسی ارشد ، از محضر آنان بهره مند گشتم و نیز همه اساتید ارجمند ، مربیان گرامی و معلمان دلسوزی که در طول دوران تحصیل ، افتخار شاگردی آنها را داشته ام.

کلیه کارکنان و کارمندان دانشکده مکانیک.

مدیریت محترم نیروگاه اصفهان ، جناب آقای مهندس افتخاری و کلیه کارکنان سخت کوش آن نیروگاه ، به ویژه واحدهای بهره برداری و تعمیرات مکانیک که در انجام این پروژه ، همکاری فرمودند.

شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان به خاطر فراهم نمودن امکان انجام این پروژه و نیز همکاران محترم شهرک علمی و تحقیقاتی به ویژه ، آقای مهندس محمد عباسپور.

در پایان ، یاد استاد عزیزم ، مرحوم دکتر قهرمانی را گرامی داشته ، از خداوند بزرگ برای ایشان ارتقاء درجه و برای همه عزیزان نامبرده ، سلامتی و توفیق روزافزون جهت خدمت بیشتر به جامعه علمی کشور مسالت می نمایم.

محمد انصاری

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعـــــات ،
ابتکارات و نو آوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است .

تقدیم به پدر و مادر بزرگوارم
برادر عزیز و خواهر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... شش

چکیده ۱

فصل اول : مقدمه

۱-۱- ضرورت گرمایش آب تغذیه ۳

۱-۲- انواع گرم‌کن‌های آب تغذیه ۳

۱-۲-۱- گرم‌کن آب تغذیه نوع باز یا تماس مستقیم ۳

۱-۲-۲- گرم‌کن آب تغذیه نوع بسته با تخلیه پس رونده ۵

۱-۲-۳- گرم‌کن آب تغذیه نوع بسته با تخلیه پیش رونده ۷

۱-۲-۴- کلیات گرم‌کن‌های آب تغذیه بسته ۸

۱-۳- شناخت و بررسی ساختار گرم‌کن‌های آب تغذیه نیروگاه‌ها ۱۳

۱-۳-۱- طبقه‌بندی مبدل‌های لوله پوسته‌ای از نظر نحوه اتصال محفظه‌های سمت لوله و پوسته ۱۴

۱-۴- وضعیت نصب گرم‌کن‌های نیروگاهی ۲۳

۱-۵- آرایش جریان سیال‌ها در گرم‌کن‌های نیروگاهی ۲۴

فصل دوم : بررسی‌های آماری از شکست لوله‌ها در گرم‌کن‌های فشار قوی نیروگاه اصفهان

۲-۱- تشریح موضوع مورد بحث ۲۸

۲-۲- بررسی‌های آماری ۲۹

۲-۲-۱- تجزیه و تحلیل بررسی‌های آماری ۳۰

۲-۲-۲- رشد آهنگ سوراخ شدگی ۳۲

فصل سوم : بررسی تست انجام شده در نیروگاه اصفهان

۳-۱- بررسی تست eddy current انجام شده روی گرم‌کن 5B نیروگاه اصفهان ۳۶

۳-۲- مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده در مورد سوراخ شدگی لوله‌ها در گرم‌کن فشار قوی ۴۲

عنوان | صفحه

فصل چهارم : مسائل اساسی در شکست لوله‌ها

۴-۱- ارتعاش لوله‌ها ۴۶
۴-۱-۱- آسیب‌های ناشی از ارتعاش لوله ۴۹
۴-۱-۲- ناحیه‌های مستعد شکست لوله در گرم‌کن ۵۲
۴-۱-۳- شناخت ساز و کارهایی مؤثر در ارتعاش ایجاد شده توسط جریان سیال ۵۴
۴-۱-۴- ارتعاشات صوتی ۵۷
۴-۱-۵- میرایی ۵۸
۴-۲- خوردگی ۶۱
۴-۲-۱- خوردگی شیاری ۶۱
۴-۲-۲ خوردگی حفره‌ای ۶۲
۴-۲-۳- خوردگی سایشی ۶۳
۴-۲-۴- خوردگی فرسایشی ۶۵
۴-۲-۵- خوردگی تنشی یا خوردگی توأم با تنش ۶۸
۴-۲-۶- خستگی در محیط خورنده ۷۰
۴-۳- توزیع غیر یکنواخت جریان در لوله‌ها ۷۲
۴-۴- نواحی ساکن (مرده) ۷۲

فصل پنجم : روش طراحی و بررسی حرارتی و ارتعاشاتی گرم‌کن‌های آب تغذیه

۵-۱- مقدمه ۷۶
۵-۲- روش طراحی حرارتی ۷۷
۵-۲-۱- بررسی بعضی از حالت‌های خاص ۷۹
۵-۲-۲- روش محاسبه اختلاف دمای متوسط ۸۱
۵-۲-۳- روش محاسبه سطح انتقال حرارت ۸۲
۵-۲-۴- روش محاسبه ضریب انتقال حرارت متوسط برای جریان هر سیال ۸۴
۵-۳- روش محاسبه و معیارهای پیش‌بینی ارتعاشات قابل وقوع در لوله‌های گرم‌کن آب تغذیه ۸۴
۵-۳-۱- روش محاسبه ارتعاشات ۸۴

عنوان	صفحه

۵-۳-۲- معیارهای پیش بینی ارتعاشات ۹۱

۵-۴- روش‌های بررسی برخی ملاحظات دیگر طراحی ۹۲

۵-۴-۱- روش محاسبه کمینه ضخامت لازم برای لوله‌های U شکل ۹۲

۵-۴-۲- بیشینه سرعت مجاز آب تغذیه داخل لوله ۹۲

۵-۴-۳- کمینه سرعت قابل قبول سیال داخل لوله ۹۳

۵-۴-۴- دمای بیشینه مجاز لوله ۹۳

۵-۴-۵- فاصله بافل‌ها ۹۴

فصل ششم : بررسی نتایج و ارائه پیشنهادات

۶-۱- نتایج ملاحظات کلی طراحی ۹۵

۶-۲- نتایج بررسی حرارتی و ارتعاشاتی ۹۷

۶-۳- ارائه پیشنهادات ۱۲۳

پیوست‌ها

پیوست ۱: نتایج تفصیلی تست cddy current انجام شده بر گرم کن 5B ۱۳۰

پیوست ۲: مشخصات طراحی گرم کن‌ها و مشخصات هندسی ناحیه فوق گرمازا در گرم کن‌های فشار قوی نیروگاه اصفهان ۱۳۶

پیوست ۳: مشخصات ترمودینامیکی و جدول بررسی موازنه انرژی در گرم کن‌های فشار قوی نیروگاه اصفهان ۱۳۷

پیوست ۴: نقشه گرم کن شماره ۵ واحدهای ۳۲۰ مگا واتی نیروگاه اصفهان ۱۳۸

منابع ۱۴۰

چکیده انگلیسی ۱۴۲

فهرست نمادها

Q_T: بار حرارتی

A_T: سطح انتقال حرارت

θ_m: اختلاف دمای متوسط

U_m: ضریب انتقال حرارت کلی متوسط

h_{sm}: ضریب انتقال حرارت متوسط جریان سیال

R_s: مقاومت لایه رسوب سمت پوسته

R_t: مقاومت لایه رسوب سمت لوله

d_o: قطر خارجی لوله

d_i: قطر داخلی لوله

K_w: ضریب هدایت حرارتی جدار لوله

U: ضریب انتقال حرارت کلی موضعی

θ: اختلاف دمای موضعی دو جریان

r: مجموع مقاومت‌های لایه‌های رسوب دو سمت گرم‌کن به علاوه مقاومت جدار لوله

θ_{ln}: اختلاف دمای لگاریتمی

F_T: فاکتور تصحیح اختلاف دما

H: انتالپی سیال سمت پوسته

h: انتالپی سیال سمت لوله

$\dot{m}_{sh}$: دبی جرمی سیال سمت پوسته

$\dot{m}_t$: دبی جرمی سیال سمت لوله

θ_z: اختلاف دمای متوسط لگاریتمی یک ناحیه

ΔH_z: تغییرات انتالپی یک ناحیه

ΔA_z: سطح انتقال حرارت یک ناحیه

M_a: ضریب افزایش جرم

f_{nu}: فرکانس طبیعی خم U شکل

sh: عدد اشتروهال

V: سرعت جریان متقاطع بر اساس کمینه سطح بین لوله‌هادر یک ردیف

V_n: سرعت جریان متقاطع بر اساس کمینه سطح بین لوله‌ها

P_1: گام طولی لوله‌ها در دسته لوله

P_t: گام عرضی لوله‌ها در دسته لوله

f_t: فرکانس ناشی از اغتشاش جریان سیال

f_a: فرکانس صوتی

n: شماره مد ارتعاش

C: سرعت صوت در سیال سمت پوسته

W: پهنای مجرای جریان در پوسته

F_B: ضریب افقی لوله - بافل

S_f: تنش خستگی لوله

A_m: سطح مقطع فلز لوله

B_t: ضخامت بافل

C_t: حداقل فاصله بین لوله‌های مجاور

F_r: فرکانس ناشی از تشکیل گردابه

N_{CD}: پارامتر خرابی تصادمی

N_{BD}: پارامتر خرابی بافل

t_{min}: کمینه ضخامت لوله

P_{Dt}: فشار طراحی لوله

U_z : ضریب انتقال حرارت کلی متوسط یک ناحیه

f_n : فرکانس طبیعی لوله

I : ممان اینرسی مقطع لوله

L : طول بدون تکیه‌گاه لوله

E : مدول الاسیسیته فلز لوله

m_e : جرم معادل لوله در واحد طول

C_n : ثابت فرکانس

ρ_i : چگالی سیال سمت لوله

ρ_o : چگالی سیال سمت پوسته

ρ_t : چگالی فلز لوله

S_D : استحکام فلز لوله در دمای طراحی

R : شعاع خم U شکل

S_U : استحکام نهایی فلز لوله

S_y : استحکام تسلیم فلز لوله

$V_{t,max}$: بیشینه سرعت مجاز آب تغذیه

$V_{t,min}$: کمینه سرعت مجاز آب تغذیه

K : ضریب افت فشار در اریفیس

ΔP : افت فشار

$\dot{m}_{orf}$: دبی جرمی عبوری از اریفیس

Δ_{orf} : قطر اریفیس

چکیده:

هر سال، تعداد زیادی از لوله های گرم کن های فشار قوی در چند نیروگاه بخاری کشور از جمله نیروگاه بندرعباس و نیز گرم کن های دو واحد ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اصفهان سوراخ می شود.که این امر باعث صرف هزینه زیاد ، اتلاف وقت و افت توان می شود .در این پایان نامه دلائل موضوع مذکور مورد مطالعه قرار گرفته است.

بررسی های آماری انجام شده نشان داد که گرم کن های شماره ٥ به دلایل مختلفی که در پایان نامه ذکر شده است دارای شرایط بحرانی تری نسبت به سایر گرم کن ها می باشند.

گرم کن شماره 5B از واحد شماره ٤ مورد مطالعه قرار گرفت ،کل تعداد لوله های کور شده این گرم کن ۱۳۷۲ لوله است.

تست eddy current بر روی لوله ها صورت گرفت و نشان داد که تقریباً ۱۸۰ لوله از ۱۳۷۲ لوله گرم کن دارای آسیب دیدگی خارجی ۷۰ درصد یا بیش از ۷۰ درصد می باشند و همچنین نشان داد که بیشتر آسیب دیدگی ها در ناحیه فوق گرمازدای گرم کن قرار دارد، به عبارت دیگر ناحیه فوق گرمازدا از نظر شکست لوله ها، بحرانی ترین ناحیه می باشد.

تحلیل طراحی ناحیه فوق گرمازدای گرم کن به وسیله نرم افزار کامپیوتری HTFS نیز نشان داد که ارتعاش لوله ها اساسی ترین دلیل شکست می باشد.

نتیجه نهائی آن است که ترکیبی از ارتعاش در بار کامل، سرعت بالای بخار در نازل ورودی به پوسته، فرسایش و خوردگی از عوامل شرکت کننده در شکست لوله ها می باشند.

فصل اول
ساختار گرم کن های نیروگاهی

مقدمه

نیروگاه های بخاری تأمین کننده بخش عمده نیروی برق ایران می باشند. گرچه احداث نیروگاه های بخاری در مقایسه با نیروگاه های گازی مستلزم صرف زمان و سرمایه بیشتری می باشند اما نیروگاه های بخاری از نظر طول عمر ، بعد از نیروگاه های آبی قرار دارند.

امروزه طراحی نیروگاه های بخاری برای طول عمر ۳۰ تا ٤۰ سال انجام می گیرد و انتظار می رود در صورت طراحی ، نصب و بهره برداری صحیح بتوانند در مدت زمان مذکور مورد استفاده قرار گیرند. اکثر نیروگاه های موجود کشور قبل از رسیدن به عمر پیش بینی شده و خروج از سرویس و در بعضی موارد از سال های نخست بهره برداری دچار معضلاتی می گردند که فراتر از مشکلات پیش بینی شده در آنها می باشد. بروز آسیب های متالورژیکی ، انواع خوردگی ها و مسائل دیگر منجر به فرسودگی زودرس و کاهش عمر تجهیزات نیروگاهی ، توقف واحدها و عدم بهره دهی و خسارت های مالی و خروج های اضطراری می گردد که علاوه بر خسارت های مربوط به کاهش تولید برق و هزینه های تعمیرات تجهیزات آسیب دیده ، زیان های وارده به صنایع کشور بر اثر کاهش تولید یا خاموشی را نیز باید در نظر گرفت.

از جمله مشکلاتی که چند نیروگاه بخاری کشور ، از جمله نیروگاه بندرعباس و نیروگاه اصفهان با آن مواجه هستند سوراخ شدن لوله های گرم کن های آب تغذیه فشارقوی[1] می باشد که طی این پروژه به بررسی علل معضل مذکور خواهیم پرداخت.

---

1 – High Pressure Closed Feedwater Heater

۱-۱) ضرورت گرمایش آب تغذیه

استفاده از گرمایش آب تغذیه به دهه ۱۹۲۰ برمی گردد که در آن موقع دمای بخار تا $^{\circ}C$ ۳۸۵ می رسید. امروزه در نیروگاه های بخار بین ۵ تا ۸ مرحله گرمایش آب تغذیه وجود دارد و می توان گفت در صورتی که بهبود عملکرد چرخه بخار مورد نظر باشد گرمایش آب تغذیه امری ضروری می باشد.[۱]

نتایج آزمایش ها و مقایسه ها بین چرخه های بدون گرمایش و با گرمایش (گرم کن آب تغذیه) نشان می دهد ، استفاده از گرم کن آب تغذیه حتی به تعداد یک دستگاه ، منجر به افزایش زیاد بازده می شود. گفتنی است که تغییر اندکی در بازده نیروگاه ، به ویژه نیروگاه با سوخت فسیلی می تواند اختلاف قابل توجهی در هزینه های سالانه سوخت به وجود آورد زیرا هزینه سوخت در این نیروگاه ها بخش بزرگی از کل هزینه تولید برق را تشکیل می دهد.

اگر چرخه ای را که همراه با گرم کن آب تغذیه است با چرخه ای که فاقد گرم کن آب تغذیه است با همان شرائط ورودی توربین مقایسه کنیم خواهیم دید ، که در چرخه های همراه گرم کن آب تغذیه کار انجام شده توسط توربین به ازاء دبی جرمی یکسان در ورودی توربین کاهش می یابد زیرا دبی جرمی جریان در توربین ، پس از زیرکش کردن بخار کم می شود و کاری که به پمپ داده می شود افزایش می یابد. اما از طرف دیگر در گرمای دریافتی نیز کاهش بیشتری به وجود می آید که بیش از مقدار لازم برای جبران کاهش کار خالص است. بدین ترتیب در بازده چرخه ، بهبود محسوسی پدید می آید. گفتنی است به ازاء توان خروجی معینی برای نیروگاه ، تفاوت بازده می تواند موجب تفاوت اندازه نیروگاه (اجزاء مختلف نیروگاه ، از قبیل مبدل های حرارتی و...) شود و از این رو هزینه سرمایه گذاری را تغییر دهد.

۱-۲) انواع گرم کن های آب تغذیه

گرم کن های آب تغذیه از نظر ساختار ترمودینامیکی و نحوه قرار گرفتن در مدار آب تغذیه به سه دسته زیر تقسیم می شوند.

۱ - نوع باز یا تماس مستقیم

۲ - نوع بسته (سطحی) با تخلیه پس رونده

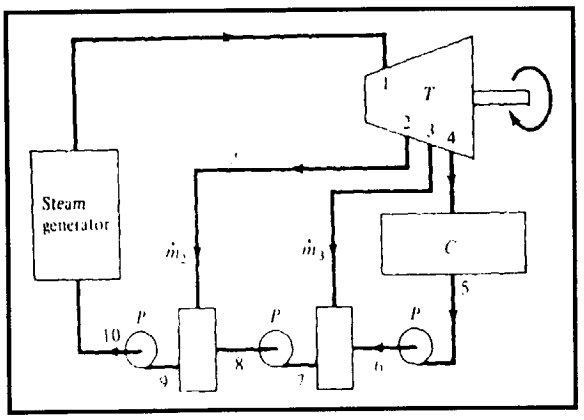
۳ - نوع بسته (سطحی) با تخلیه پیش رونده

در ادامه به تشریح این سه نوع گرم کن می پردازیم.

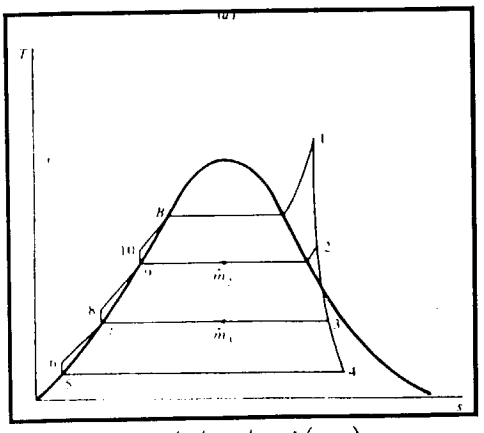
۱-۲-۱) گرم کن های آب تغذیه نوع باز یا تماس مستقیم

در گرم کن های آب تغذیه نوع باز یا تماس مستقیم بخار زیرکش به طور مستقیم با آب تغذیه مادون سرد ورودی آمیخته می شود ، به طوری که آب تغذیه در خروج از گرم کن به صورت مایع اشباع درفشار بخار زیرکش خواهد بود. (شکل ۱-۱ الف و ب) طرحی از نمودار جریان و نمودار دما - انتروپی

مربوط به آن را برای یک چرخه رانکین نشان می دهد. در این چرخه به خاطر سادگی شکل ، از دو گرم کن نوع باز ، یکی با فشار پائین و دیگری با فشار بالا استفاده شده است. به طور معمول در نیروگاه های بزرگ و پیشرفته از یک گرم کن آب تغذیه نوع باز و بین چهار تا هفت گرم کن نوع بسته استفاده می شود.



(الف) نمودار جریان



(ب) نمودار دما- انتروپی

شکل (۱-۱) گرم کن های نوع باز در چرخه رانکین

آب چگالیده ، چگالنده را به صورت اشباع در نقطه ٥ ترک می کند و تا نقطه ٦ که دارای فشاری برابر با فشار بخار زیرکش در ۳ است پمپ می شود. آب مادون سرد نقطه ٦ با بخار مرطوب نقطه ۳ در گرم کن آب تغذیه فشار پائین آمیخته می شود که نتیجه آن تولید آب اشباع در نقطه ۷ است از این رو مقدار بخار زیرکش m_3'' اساسا باید معادل مقداری باشد که بتواند مایع مادون سرد را در ٦ به صورت اشباع در آورد. اگر میزان بخار از آن مقدار کمتر باشد ، منجر به دمای پائین تر از دمای ٦ خواهد شد که تا اندازه ای مزایای ناشی از گرمایش آب تغذیه را منتفی می کند. اگر میزان بخار از آن مقدار بیشتر باشد منجر به از دست رفتن بی مورد کار توربین می شود و نیز سیال در خروج از گرم کن به صورت دو فازی خواهد بود که عمل پمپ کردن را با مشکل مواجه می سازد.

فشار ٦-۷ نمی تواند از فشار بخار زیرکش در ۳ بیشتر باشد زیرا در این صورت جریان معکوس آب چگالیده می تواند در ۳ وارد توربین شود. بنابراین برای افزایش فشار آب اشباع از نقطه ۷ تا حالت مادون سرد ۸ باید از پمپ دیگری استفاده کرد که در فشار بخار زیرکش در ۲ عمل می کند. در گرم کن آب تغذیه فشار بالا ، بخار فوق گرم نقطه ۲ با آب مادون سرد نقطه ۸ آمیخته می شود تا آب اشباع در ۹ حاصل شود . اکنون فشار آن باید تا فشار نقطه ۱۰ افزایش پیدا کند تا بتواند در فشار مورد نظر وارد مولد بخار شود .

بخار زیرکش در ۲ یا ۳ مقدار معتنابهی انرژی که تقریبا معادل گرمای نهان تبخیر آن است از دست می دهد.