

قرنیو

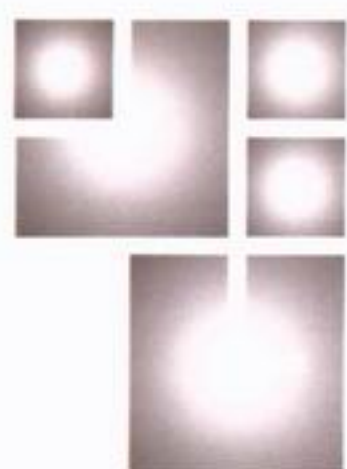
نشریه فنی تخصصی
شماره ۲۴ - زمستان ۱۳۸۶



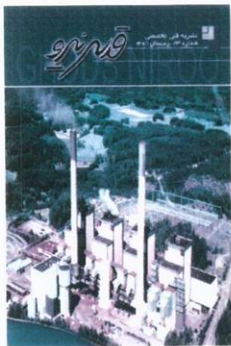
مدیریت مهندسی نیروگاههای گازی ۲

شرکت قدس نیرو در سال ۱۳۸۱ نسبت به تشکیل واحد مدیریت مهندسی نیروگاههای گازی ۲ با گردآوری تیمی متخصص و با تجربه در زمینه‌های ساختمان، مکانیک - شیمی، برق، کنترل و ابزار دقیق و کنترل پروژه اقدام نمود. خدمات مهندسی قابل ارائه در این تیم مواردی چون طراحی، بررسی طرح، کنترل پروژه، مدیریت پروژه (MC) و همکاری در پروژه‌های EPC را دربر می‌گیرد. پروژه‌های بزرگی که طی این مدت در مدیریت مهندسی نیروگاههای گازی ۲ انجام شده یا در دست انجام است شامل موارد زیر می‌باشد:

- در سال ۱۳۸۱ پروژه‌ای تحت عنوان "احداث ۳۰۰۰ مگاوات نیروگاه توربین گازی" از طرف سازمان توسعه برق ایران تعریف گردید که احداث ۱۸ واحد توربین گازی V94.2 در چهار نیروگاه پرند (جنوب تهران)، ارومیه، اردبیل و قائن را شامل می‌گردید که با افزایش نیروگاه چابهار به پنج نیروگاه و ۲۰ واحد افزایش یافت.
- مجتمع پارس جنوبی در عسلویه برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز در پالایشگاه‌های در دست احداث، ساخت نیروگاه‌های گازی را در دستور کار خود قرار داده که این مدیریت تهیه مشخصات فنی و طراحی پایه برای احداث نیروگاه در فازهای ۶ و ۷ و ۸ (4xGE Frame 6) و همچنین تهیه مشخصات فنی، انتخاب پیمانکار، ارائه خدمات مهندسی، نظارت عالی و نظارت کارگاهی نیروگاه متمرکز مجتمع پارس جنوبی (نیروگاه بعثت) شامل ۶ واحد V94.2 را بعهده داشته و دارد.



GNEC



نشریه فنی تخصصی قدس نیرو
شماره ۲۴ - زمستان ۱۳۸۶

مدیر مسئول: مهندس احمد شکوری راد

سر دبیر: مهندس فتانه دوستدار

با تشکر از همکاری آقایان:

- مهندس احمد اهرابی
- مهندس حسین بختیاری زاده
- مهندس احمد فریدون درافشان
- مهندس علی شاه حسینی
- دکتر همایون صحیحی
- مهندس منصور قزوینی
- مسعود نجمی

فهرست مطالب

از مدیر و همکاران محترم امور پشتیبانی سیاست‌گذاریم.

هیأت داوران:

- | | | |
|----|---|---|
| ۱ | معرفی | مهندس پیروزنگ پاینده، مهندس حسن تفرشی، |
| ۲ | سر مقاله | مهندس مسعود حبیب‌آبادی، مهندس فتانه دوستدار، |
| ۳ | دوار - مهندس رامتین نظام آبادی | مهندس محمد ابراهیم رئیسی، مهندس محمد حسن زرگر شوشتری، مهندس محمود زواری، مهندس |
| ۲۴ | حسین حق پرست | فرهاد شاهمنصوریان، مهندس فرهنگ شعفی، مهرداد صارمی، دکتر همایون صحیحی، مهندس غلامرضا |
| ۳۹ | سوزاندن زباله جامد شهری و استحصال انرژی از آن | صقارپور، دکتر جعفر عسگری، مهندس نرگس علیرمائی، مهندس امیر همایون فتحی، مهندس علی اصغر |
| ۵۹ | اسد کریمی | کسائیان، مهندس وحید مرتضوی، مهندس اکبر مقدر، مهندس محمدحیجی نصرالهی، مهندس محمدرضا نصرالهی، مهندس بهروز هنری. |

این نشریه از طریق اینترنت قدس نیرو نیز در دسترس علاقمندان می‌باشد. ارتباط مستقیم با مقاله‌دهندگان از طریق Email یا فاکس آنان در انتهای هر مقاله و همچنین ارائه نظرات، پیشنهادات و سؤالات احتمالی خوانندگان گرامی از طریق اینترنت قدس نیرو و یا شماره تلفن نشریه ۸۸۴۴۲۴۸۲ امکان پذیر می‌باشد.

نشریه داخلی فنی - تخصصی مهندسين مشاور قدس نیرو - شماره بیست و چهارم



به نام خدا

سر مقاله

تغییرات روزافزون شرایط بازار کار و پارادایم‌ها، نیاز به پویایی و قابلیت انعطاف، افزایش پیچیدگی و متغیرهای درونی کسب و کار از ویژگی‌های انکارناپذیر دنیای امروز بنگاه‌های اقتصادی است. مدیریت همزمان این ویژگی‌ها در سازمان‌های در حال توسعه کنونی، با توجه به گسترش حجم فعالیت‌ها یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران این گونه شرکت‌ها است. یکی از راهکارهای تعریف شده برای رویارویی بنگاه‌های اقتصادی بزرگ و در حال توسعه با ویژگی‌های جدید کسب و کار، گام برداشتن در راه تبدیل شدن به گروه (Holding) است.

تاکنون تعاریف متعددی از شرکت‌های Holding از منظر صاحب‌نظران و قوانین موجود در کشورها وجود دارد. لیکن در یک تعریف عمومی، شرکت مادر (Holding) یک شرکت سرمایه‌گذاری، مدیریتی و تخصصی است که دارنده بخش تعیین‌کننده‌ای از سهام شرکت‌های فرعی خود است و یا این که در صورت مالکیت اقلیت، حق رأی و کنترل را در حدود تعریف شده برای خود محفوظ داشته است. در حال حاضر علی‌رغم برخی تلاش‌های صورت گرفته و نیز وجود شرکت‌های متعدد Holding قوانین موجود متناسب با شرایط این گونه شرکت‌ها بازنگری نگردیده است و این یکی از نیازمندی‌های کشور در بخش قانون‌گذاری است. علی‌رغم این مهم، قوانین موجود هر چند در برخی بخش‌ها تناسب کافی با شرایط Holding را ندارند لیکن موانع جدی برای تشکیل گروه‌های اقتصادی ایجاد نمی‌کنند. شرکت قدس‌نیرو با آرمان تبدیل شدن به یک شرکت بزرگ و مطرح و در ادامه مسیر رشد خود، تبدیل شدن به یک گروه اقتصادی معتبر و مطرح را دنبال می‌نماید. شرکت قدس‌نیرو افزایش انعطاف‌پذیری و پویایی خود را در برآورده سازی نیازهای کارفرمایان به عنوان یکی از اهداف تبدیل شدن به گروه، قرار داده است. یکی از عارضه‌های مهم ورود بنگاه‌های اقتصادی به این مسیر، عدم مطالعه و طرح‌ریزی اولیه و در نظر نگرفتن مخاطرات پیش روی این اقدام است. این عارضه موجب می‌گردد شرکت‌های داخلی نه تنها نتایج قابل حصول از تغییر ساختار خود را به دست نیاورند، بلکه نکات مثبت ناشی از یکپارچگی سازمانی و نهادینه بودن ساختار قبلی را نیز از دست بدهند.



رامتین نظام‌آبادی

کارشناس کنترل و ابزار دقیق - مدیریت ارشد مهندسی صنایع نیروگاهی

چکیده

ماشین‌های دوار کاربرد وسیعی در صنایع دارند. ارتعاشات ناشی از نامیزانی ماشین‌های دوار یک پارامتر مهم محدودکننده راندمان و طول عمر سیستم‌های روتوری است. در مقاله قبیل روش‌های مختلف کنترل فعال ارتعاش در این ماشین‌ها معرفی و به اجمال مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه در این مقاله به بررسی روش‌های بالانسینگ فعال می‌پردازیم. روش‌های بالانسینگ بسیاری برای حذف این ارتعاشات ناشی از نامیزانی بکار گرفته شده‌اند. در میان همه این روش‌ها، روش‌های بالانسینگ مدار-خاموش^۱ در عمل بطور وسیعی استفاده شده‌اند. بهر حال، روش‌های مدار-خاموش در شرایط توزیع نامیزانی متغیر حین عملیات ماشین، قابل استفاده نیستند. به منظور غلبه بر این مشکل، تحقیقات متعددی بر روی بالانسینگ فعال سیستم‌های دوار با استفاده از محرک‌های توزیع مجدد جرمی انجام شده است [۱].

در این مقاله به بررسی روش‌های بالانسینگ تک‌صفحه‌ای یک روتور صلب، مبتنی بر تخمین نامیزانی سیستم براساس تخمین ضرایب اثر آنی و نیز روش‌های بهینه تخمین می‌پردازیم.

۱- مقدمه

در اکثر موارد سرعت چرخش روتور ثابت فرض شده، ولی در پاره‌ای از مواقع جهت افزایش کارایی و صرفه‌جویی زمانی، بالانسینگ در حین تغییرات گذرای سرعت و در زمان شتاب‌گرفتن ماشین انجام می‌شود [۲-۶]. به عنوان مثال در ماشین‌های تراش سرعت بالا، کاهش سیکل زمان برش ماشین (که پس از رسیدن به شرایط ماندگار وزنه‌ها در میزان ساز، امکانپذیر خواهد بود)، یک مسأله حیاتی است. در این ماشین‌ها در صورت استفاده از تکنیک‌های بالانسینگ فعال، اجباراً بالانسینگ باید در زمان شتاب‌گیری ماشین برای اجتناب از افزایش زمان سیکل برش انجام شود [۳]. از سوی دیگر، ماکزیمم ارتعاشات یک روتور معمولاً در حین عبور از سرعت‌های بحرانی آن،

رخ می‌دهد که برای اجتناب از ارتعاشات مخرب، بالانسینگ در زمان شتاب‌گرفتن ماشین نیاز خواهد بود. تعدادی از چالش‌های تکنیکی موجود در روش‌های بالانسینگ فعال در حین شتاب‌گیری ماشین در ادامه تشریح می‌شوند. اول اینکه، در شرایط سرعت ثابت چرخش، که ارتعاشات ناشی از نامیزانی بصورت تک فرکانسی می‌باشند (برابر با سرعت چرخش)، در این حالت، مدل ساده‌ای از روتور به منظور توسعه الگوریتم بالانسینگ فعال قابل استناد می‌باشد، اما در شرایط شتاب‌گیری، دینامیک کلی روتور تحریک می‌شود.

این مسأله که تحت شرایط خاصی پاسخ‌گذاری سرعت متغیر یک سیستم دوار از پاسخ سرعت ثابت آن کاملاً متفاوت است، قابل اثبات می‌باشد.

استفاده از میزان‌سازها، با هدف جبران‌سازی نامیزانی سیستم دوار در زمان شتاب گرفتن، بکار رفته‌اند. در این روش‌ها، ضرایب اثر آنی در سرعت‌های مختلف بدست‌آمده و در یک جدول جستجو ذخیره می‌شوند و سپس از روش‌های کنترلی مناسب نظیر استراتژی جدول بهره (که در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد) به منظور حذف ارتعاش در زمان شتاب گرفتن سیستم مبتنی بر جدول ضرایب اثر آنی استفاده می‌کنند [۲].

۲-۱- الگوریتم میزان‌سازی فعال

روش ضرایب اثر یک روش میزان‌سازی مدار-خاموش است که اخیراً در روش‌های کنترل فعال مورد توجه قرار گرفته است. فرمول کلی عبارتست از:

$$V = V_0 + CW \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V تحت عنوان ارتعاشات باقیمانده، یک بردار مختلط $m \times 1$ متناظر با ارتعاشات سنکرون روتور (دامنه و فاز) در m محل اندازه‌گیری است.

ارتعاش سنکرون، ارتعاشی همفرکانس با سرعت چرخش روتور است. V_0 نیز یک بردار مختلط $m \times 1$ ، متناظر با ارتعاش سنکرون روتور در m محل اندازه‌گیری سنسورها ناشی از نامیزانی ذاتی آن است. w ، یک بردار $n \times 1$ متناظر با نامیزانی (دامنه و محل) ایجاد شده توسط میزان‌سازها در n محل است. C ، یک ماتریس $m \times n$ مختلط با درایه‌های متناظر با نسبت نامیزانی ایجاد شده توسط میزان‌سازها به پاسخ ارتعاشی حاصل یا همان ضرایب اثر، می‌باشد. ضریب اثر تابعی از محل سنسور / محرک (میزانساز) و سرعت چرخش می‌باشد. فرضیات نهفته در رابطه (۱) عبارتند از:

بنابراین، یک مدل جامع‌تر برای تشریح سیستم روتوری در چنین مواردی نیاز است.

دوم، در سرعت‌های مختلف، پاسخ‌های سیستم روتوری به نامیزانی متفاوت است. به منظور بالانسینگ مناسب روتور در حین شتاب‌گیری، به استفاده از محرک‌های سریع برای رسیدن به تغییرات سرعت چرخش نیاز است. محرکی که در این موارد بکار می‌رود نوع جدیدی از ادوات توزیع مجدد جرمی است که پاسخ زمانی آن کسری از ثانیه می‌باشد. در این مقاله دو روش مرسوم در میزان‌سازی فعال مورد بررسی قرار گرفته است. بخش (۲)، به تشریح روش تعمیم‌یافته میزان‌سازی غیرفعال براساس ماتریس‌های ضرایب اثر می‌پردازد.

با توجه به اینکه این ماتریس‌ها بصورت تجربی و انجام آزمایشات پیش از راه‌اندازی سیستم بدست می‌آیند، نیازی به بررسی و ارائه مدل تحلیلی سیستم نمی‌باشد. بخش‌های بعدی به بررسی روش‌های مبتنی بر مدل سیستم اختصاص دارد. به این منظور در ابتدا به ارائه مدل تحلیلی یک سیستم روتوری در بخش (۳) خواهیم پرداخت. در ادامه روش بهینه میزان‌سازی این سیستم در بخش (۴) تشریح خواهد شد. نتایج شبیه‌سازیها و آزمایشات انجام شده در هر بخش ارائه شده است.

۲- شرح روش‌های ضرایب اثر تعمیم یافته

برای میزان‌سازی روتور

ارتعاشات ناشی از نامیزانی ماشین‌های دوار یک پارامتر مهم محدودکننده راندمان و طول عمر سیستم‌های روتوری است. مخصوصاً ارتعاشات شدید رزنانس یک روتور در زمان عبور از سرعت‌های بحرانش می‌تواند صدمات شدیدی به سیستم وارد کند. برای اجتناب از این ارتعاشات پیک، روش‌های میزان‌سازی با



الف- پاسخ ارتعاشات سنكرون روتور متناسب با نامیزانی است.

ب- اصل جمع آثار در محاسبه اثر مجموعه‌ای از نامیزانی‌ها معتبر است.

هر دوی این فرضیات در صورتیکه ارتعاشات ناشی از نامیزانی‌های روتور، خیلی بزرگ نباشند، قابل قبول هستند. به منظور مینیمم کردن ارتعاشات باقیمانده v ، از قانون کنترل زیر که براساس حل کمترین مربعات بازگشتی رابطه $V_0 + CW = 0$ بدست آمده است، استفاده می‌شود:

$$W = -(C^T C)^{-1} C^T V_0 \quad (2)$$

در قانون کنترل رابطه (2)، ماتریس ضرایب اثر (C) با انجام آزمایشات تجربی بر روی سیستم بدست می‌آید. بطور ایده‌آل، این قانون کنترل تنها در صورت کامل و بی‌عیب بودن ضرایب اثر از پیش تخمین زده شده و دقیق بودن ارتعاشات اندازه‌گیری شده با یک بار حرکت وزنه‌ها قابل پیاده‌سازی است. اما در عمل برای مینیمم کردن ارتعاشات ناشی از نامیزانی نیاز به چندین تکرار کنترلی¹ می‌باشد.

در تکرار k ام خواهیم داشت:

$$V_0 = V_k - CW_k \quad (3)$$

با ملاحظه (2) و (3) نتیجه می‌گیریم:

$$W_{k+1} = W_k - (C^T C)^{-1} C^T V_k \quad (4)$$

این قانون کنترل در سرعت چرخش ثابت معتبر است زیرا ضرایب اثر با تغییرات سرعت تغییر نمی‌کند. در شرایط سرعت متغیر، ضرایب اثر آنی می‌تواند برای توسعه این قانون کنترل بکار روند. پیش از این مشخص شد که پاسخ نامیزانی یک سیستم دوار بدون اثرات ژيروسکوپی شامل سه قسمت خواهد بود:

الف- یک ارتعاش گذرای کوچک در نتیجه شتاب ناگهانی.

ب- ارتعاش سنكرون با فرکانس آنی سرعت چرخش.

ج- یک ارتعاش گذرای ناگهانی.

در صورتیکه از ارتعاشات گذرای غیرسنكرون چشم‌پوشی کنیم، پاسخ سنكرون می‌تواند براساس رابطه (5) بدست آید (به پیوست 2 پاسخ تحلیلی نامیزانی روتور Jeffcott در حین شتاب گرفتن² مراجعه شود):

$$V(t) = W \sum_{k=1}^N u_k \left[e^{i(\omega t^2/2 + \rho_k(t))} M_{sk}(t) \right] + V_0(t) \quad (5)$$

که در این رابطه N تعداد موده‌های ارتعاشی، u_k یک مقدار مختلط متناظر با نامیزانی ناشی از میزان‌ساز در مود k ام و α شتاب روتور هستند. M_{sk} و ρ_k به ترتیب بعنوان دامنه و فاز ارتعاش سنكرون در مود k ام در صورتیکه نامیزانی ناشی از آن واحد باشد (باید توجه داشت که ρ_k و M_{sk} مرتبط با دینامیک سیستم هستند و نه نامیزانی آن).

بنابراین می‌توان ضریب اثر را بصورت زیر تعریف کرد:

$$C'(t) = \sum_{k=1}^N u_k \left[e^{i(\omega t^2/2 + \rho_k(t))} M_{sk}(t) \right] \quad (6)$$

که خواهیم داشت:

$$V(t) = W C'(t) + V_0 \quad (7)$$

ضریب اثر آنی در سرعت‌های مختلف تنها با دو اجرای آزمایشی در حالت شتابدار بدست خواهد آمد. سیگنال ارتعاش نامیزانی حاصل از موقعیت اولیه میزان‌ساز (W_1) در حین شتاب‌گیری ($V_1(t)$) ضبط می‌شود. سپس، می‌توان با تغییر موقعیت میزان‌ساز، نامیزانی حاصل (W_2) را ذخیره کرد. سیستم مجدداً شتاب داده می‌شود و سیگنال ارتعاش ($V_2(t)$) اندازه‌گیری و ضبط شده و در نهایت ضریب اثر آنی در سرعت مورد نظر (یا زمان) بصورت رابطه (8) بدست می‌آید:

$$C'(t) = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{W_1 - W_2} \quad (8)$$

1- control iterations



کوچک باشد، میان‌یابی خطی یک تقریب مناسب است.

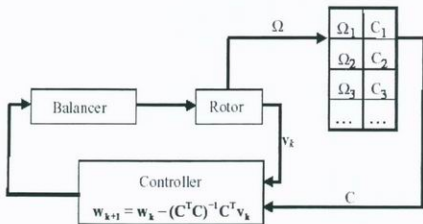
قانون کنترل بکاررفته در شکل (۱) مطابق با قانون کنترل بکاررفته توسط knospe است. در طرح کنترل آنها، محرک باتاقان مغناطیسی است. از آنجا که نامیازی، نیروی گریز از مرکز دواری تولید می‌کند، یک نیروی چرخشی سنکرون در باتاقان‌های مغناطیسی برای جبران نیروی گریز از مرکز تولید می‌شود. دامنه و فاز نیروی سنکرون مورد نیاز براساس مدل ضریب اثر روتور تعیین می‌شود. بنابراین قانون کنترل نیز یک تعمیم از روش میزان‌سازی فعال می‌باشد. به منظور بکارگیری این طرح میزان‌سازی فعال، دو مشکل باید مورد توجه قرار گیرد. اول، مسأله خروج از پایداری بعلت تأخیر در حرکت میزان‌ساز است. اگر یک ضریب اثر در گام k ام را در نظر بگیریم، و زمان انتهایی تکرارهای کنترل در زمان $k+1$ باشد، اختلاف زمانی بین این دو گام تأخیر ناشی از الگوریتم و حرکت میزان‌ساز است. از آنجا که قانون کنترل براساس C_k بدست می‌آید، نامیازی محاسبه شده در $k+1$ باید

$$W_{k+1} = W_k - (C_k^T C_k)^{-1} C_k^T V_k$$

براساس مفهوم ضریب اثر آنسی، روش میزان‌سازی ضریب اثر برای حالت سرعت متغیر قابل توسعه خواهد بود. یک دیاگرام از این توسعه در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۲)، v_k ارتعاشات روتور در موقعیت سنسور، Ω سرعت چرخش جاری و C ضریب اثر مربوط به آن سرعت است. C ، از یک جدول از پیش تعیین شده با انجام آزمایشات تجربی انتخاب می‌شود. در صورتیکه Ω در جدول بطور کامل قابل تطبیق نباشد از یک رابطه میان‌یابی خطی مطابق رابطه (۹) می‌توان استفاده کرد:

$$C^{ij}(t) = C_k^{ij} + \frac{\Omega - \Omega_k}{\Omega_{k+1} - \Omega_k} (C_{k+1}^{ij} - C_k^{ij}) \quad (9)$$

که $\Omega_k \leq \Omega < \Omega_{k+1}$ و اندیس‌های i و j اندیس المان‌های ماتریس هستند. علت استفاده از میان‌یابی برای یافتن المان‌های (i, j) ماتریس ضریب اثر C ، بطور کلی دامنه و فاز تابع تبدیل بین نامیازی Ω م و پاسخ در محل سنسور Ω م در سرعت چرخش است. برای یک سیستم مکانیکی، ماتریس تابع تبدیل می‌بایست هموار باشد و اگر فواصل زمانی بین Ω_k و Ω_{k+1}



شکل (۱): دیاگرام میزان‌سازی فعال براساس جدول ضریب اثر



بنابراین، ارتعاش در $k+1$ بصورت ذیل می‌باشد:

$$V_{k+1} = C_{k+1}W_{k+1} + V_0 = C_{k+1}(W_k - (C_k^T C_k)^{-1} C_k^T V_k) + V_0$$

است. اگر میزان‌ساز در مقدار اولیه صفر تنظیم شده باشد ($V_k = V_0$) و خطای تخمین ضریب اثر آبی چشم‌پوشی شده باشد، رابطه (۱۰) مستقیماً نتیجه خواهد شد:

$$V_{k+1} = (I - C_{k+1}(C_k^T C_k)^{-1} C_k^T) V_0 \quad (10)$$

برای اطمینان از کاهش مناسب نامیزانی، لازمست رابطه $\|V_{k+1}\| < \|V_0\|$ برقرار باشد، که به معنی شرایط لازم برای پایداری است:

$$\bar{\sigma}(I - C_{k+1}(C_k^T C_k)^{-1} C_k^T) < 1 \quad (11)$$

که $\bar{\sigma}(\cdot)$ ماکزیمم مقدار منفرد^۱ است. یک درک حسی با ملاحظه ساده‌ترین حالت یک بعدی بدست می‌آید. در این حالت، معیار پایداری بالا می‌گردد که اگر علامت C_k و C_{k+1} یکسان بماند، طرح میزان‌سازی فعال مؤثر خواهد بود. در این آنالیز، نامعینی در تخمین ضریب اثر منظور نشده است. در عمل با انجام چندین آزمایش و متوسط‌گیری از نتایج بدست آمده می‌توان از دقت تخمین اطمینان حاصل کرد. در اغلب موارد می‌توان از اختلاف بین ضرایب اثر و مقادیر جدول جستجو چشم‌پوشی نمود. دومین مشکلی که می‌بایست مورد توجه قرار گیرد اثر میرایی سیستم است. وجود یک میرایی خیلی کوچک سیستم (ضریب میرایی کمتر از ۰/۰۵ مطابق تجربیات وجود) می‌تواند موجب بروز دو مشکل در میزان‌سازی فعال شود:

الف- ارتعاشات گذرای غیر سنکرون، تحت شرایط میرایی کوچک و در زمان شتاب‌گیری، بصورت قابل ملاحظه‌ای، رخ خواهد داد. ارتعاشات گذرا مشکلات زیادی را در محاسبات اجزای ارتعاش سنکرون مخصوصاً در مواقعی که فرکانس آن نزدیک به فرکانس سنکرون است،

موجب می‌شوند. بهر حال، محاسبه ارتعاش سنکرون هم در تخمین ضریب اثر و هم در پیاده‌سازی قانون کنترل بهنگام^۲، بسیار حیاتی است. ارتعاش گذرای قابل ملاحظه، کارایی روش ضریب اثر را کاهش خواهد داد.

ب- حرکت میزان‌ساز می‌تواند منجر به ارتعاشات گذرای نامطلوب در شرایط میرایی کوچک سیستم شود. برای حل این مشکل، باید از عملیات میزان‌سازی در سرعت‌های نزدیک به سرعت بحرانی اجتناب کرد. محدوده میزان‌سازی می‌تواند بطور تجربی براساس نیازهای مهندسی برای ارتعاش گذرای قابل تحمل تعیین می‌شود.

بطور کلی میرایی کوچک اثر زیان‌آوری بر کارایی روش میزان‌سازی فعال پیشنهاد شده دارد. خوشبختانه، در بسیاری از ماشین‌های ابزار، مخصوصاً در نوع تسمه‌ای^۳، میرایی سیستم کوچک است ($\zeta > 0.05$) و اثر ارتعاش گذرا قابل صرف‌نظر است.

۲-۲- آزمایشات معتبرسازی روش ضرایب اثر

اصول عملکرد میزان‌سازهای الکترومغناطیسی مورد بحث که از نوع محرک‌های توزیع مجدد جرمی هستند در شکل (۲) نشان داده شده است. میزان‌ساز شامل دو رینگ مطابق شکل (۲-ا) می‌باشد. این دو رینگ بالانس نیستند و می‌توانند بصورت دو نقطه جرمی مطابق شکل (۲-ب) نشان داده شوند.

بعد از نصب بر روی میله گردان با ابزار گیر، میزان‌ساز می‌تواند با روتور بچرخد. این دو رینگ با نیروی مغناطیسی ثابت در محل خود ثابت نگهداشته می‌شوند.

1- singular value
2- Real-Time
3- Belt-Driven



هر دور. پالس‌ها بعنوان مرجع اندازه‌گیری موقعیت و سرعت استفاده می‌شوند.

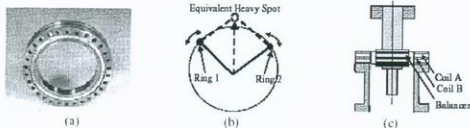
(ب): یک سنسور اپتیکال انعکاسی و یک نوار انعکاسی متصل شده به میله گردان که می‌تواند در هر دور یک پالس تولید کند. لبه بالا رونده این پالس بعنوان موقعیت صفر مرجع بکار می‌رود. موقعیت رینگ‌های میزان‌ساز و فاز ارتعاش، همگی نسبت به این مرجع سنجیده می‌شوند. (ج): دو سنسور مغناطیسی اثرهال موقعیت دو رینگ میزان‌ساز را تشخیص می‌دهند.

(د): ارتعاش روتور با شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. این سیگنال از نوع آنالوگ است که با یک مبدل A/D نمونه‌برداری و به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌شود. نکته‌ای که باید توجه شود این است که نمونه‌برداری از سیگنال ارتعاش با سیگنال انکودر تریگر می‌شود. بنابراین، سیگنال ارتعاش در هر گام افزایش زاویه میله گردان، نمونه‌برداری می‌شود (بجای هر گام زمانی افزایشی). مزیت استراتژی اتخاذ شده در این نمونه‌برداری این است که پراحتی می‌توان از این سیگنال، ارتعاشات سنکرون را تخمین زد. این سیگنال‌ها در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

زمانیکه میزان‌ساز فعال می‌شود، یک جریان الکتریکی از سیم‌پیچی مربوطه مطابق شکل (۲-۲) عبور می‌کند، رینگ‌ها می‌توانند با نیروی الکترومغناطیسی نسبت به میله گردان حرکت کنند. در یک مجموعه، دو سیم‌پیچی مجزا وجود دارد. بنابراین، دو رینگ می‌توانند بصورت مجزا حرکت کنند. ترکیب این دو جرم نقطه‌ای معادل با یک جرم نقطه‌ای مطابق شکل (۲-۲) است. علاوه بر این، دو سنسور مغناطیسی اثرهال^۱ روی دو سیم‌پیچ نصب می‌شوند. با کمک این دو سنسور می‌توان محل نسبی این دو رینگ نسبت به موقعیت مرجع را تشخیص داد. همچنین فیدبکی از محل جرم‌های نقطه‌ای خواهیم داشت.

۲-۳- پیاده‌سازی آزمایشگاهی

یک میز آزمایشگاهی روی یک مرکز براده‌برداری عمودی مدل HS88 ساخته شده است. یک دیگرام و یک عکس از میز آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده شده است. چهار نوع سنسور در سیستم وجود دارد: (الف): یک دیسک انکودر^۲ نصب شده روی میزان‌ساز و یک سنسور اپتیکال فرستنده با توانایی تولید ۳۰ پالس هموار توزیع شده^۳ در

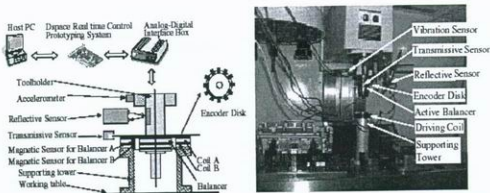


شکل (۲): میزان‌ساز فعال الکترومغناطیسی شرکت BalaDyne.

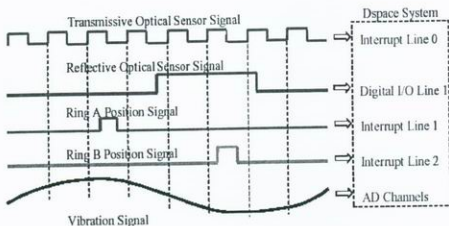
(a) یک نما از میزان‌ساز الکترومغناطیسی (b) دیگرام اصول کار میزان‌ساز (c) نمایی از یک میزان‌ساز نصب شده بر روی ابزارگیر و سیم‌پیچ‌های تغذیه الکتریکی برای حرکت میزان‌ساز

- 1- Magnetic Hall
- 2- Encoder disk
- 3- Evenly distributed pulses





شکل (۳): ساختار پایه میز آزمایشگاهی میزان ساز فعال

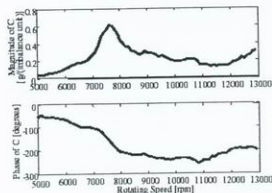


شکل (۴): دیاگرام سیگنال آزمایش میزان سازی فعال

است. ضریب اثر بعنوان یک تابع سرعت برای مرکز براده برداری در شکل (۵) نشان داده شده است. ضرایب اثر تحت شتاب 1000rpm/s بدست می آیند. برای این ماشین بخصوص شرح داده شده، تأثیر شتاب های مختلف در ضریب اثر آنی قابل چشم پوشی است.

۴-۲- نتایج معتبر سازی تجربی

برای پیاده سازی طرح میزان سازی فعال، باید یک جدول ضریب اثر برای اجراهای آزمایشی بدست آورد. یک واحد نامیزانی حاصل از یک رینگ میزان ساز را تعریف کنید. بنابراین، ماکزیمم نامیزانی حاصل از میزان ساز دو واحد

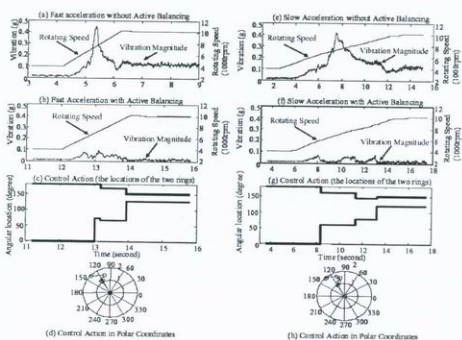


شکل (۵): ضرایب اثر مرکز براده برداری Fadal در سرعت های مختلف



زاویه‌ای رینگ‌های میزان‌ساز را نسبت به محل مرجع (محل نوار انعکاسی) تشریح می‌کند. در شرایط اولیه رینگ‌ها با زاویه ۱۸۰ درجه قرار دارند که عبارت دیگر میزان‌ساز خود بالانس^۱ است و بنابراین هیچ نامیزانی ناشی از میزان‌ساز نخواهیم داشت. میزان‌ساز فعال با دامنه ارتعاشات سنکرون فعال می‌شود. اگر دامنه از ۰/۵ گرم بیشتر باشد، سیستم کنترل طرح شده فعال می‌شود. علاوه بر این به منظور اجتناب از تاثیر حرکت میزان‌ساز، سیستم کنترل در زمانی که سرعت چرخش در محدوده 7500 rpm تا 8500 rpm است غیرفعال می‌شود. از شکل (۶-۲) مشخص است که میزان‌ساز در پرلود شتاب‌گیری چندین بار فعال می‌شود. شکل (۶-۳) فعالیت کنترلی را در یک سیستم مختصات قطبی نشان می‌دهد. دامنه و فاز نامیزانی کلی ناشی از دو رینگ میزان‌ساز در این شکل تشریح شده است. همانطور که مشخص است دو پرش قابل ملاحظه در فعالیت کنترلی وجود دارد.

ضرایب اثر تابع تبدیل سیستم دوار از تحریک در موقعیت میزان‌ساز به ارتعاش در موقعیت سنسور را نشان می‌دهد. بطور واضح، سیستم می‌تواند بصورت یک دینامیک مرتبه دو در زمانیکه سرعت پایین‌تر از 11000rpm است، در نظر گرفته شود. پیک رزنانس سیستم بین 7500 ~ 8500rpm رخ می‌دهد. مقایسه بین ارتعاش سیستم با و بدون میزان‌سازی فعال در شکل (۶-۴) نشان داده شده است. شکل (۶-۵) ~ (۶-۸) کارایی میزان‌سازی فعال را تحت شرایط شتاب‌گیری سریع نشان می‌دهند. نرخ شتاب از 4000rpm به 10000rpm در ۲ ثانیه است. شکل (۶-۵) ارتعاش سنکرون را بدون میزان‌سازی فعال نشان می‌دهد. پروفیل سرعت نیز در شکل (۶-۵) نشان داده شده است. شکل (۶-۶) ارتعاشات سنکرون را در حین شتاب‌گیری سریع با میزان‌سازی فعال تشریح می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود ارتعاشات سنکرون به میزان زیادی حذف شده است. شکل (۶-۷) محل



شکل (۶): نتایج آزمایشات معتبرسازی



شکل (e-6) ~ (g-6) کارایی میزان‌سازی فعال را تحت شرایط شتاب کند تشریح می‌کند. یک شتاب کند از 4000rpm تا 10000rpm در ۱۰ ثانیه بکار برده می‌شود. مجدداً ارتعاش ناشی از نامیزانی در پرپود شتاب‌گیری بطور قابل ملاحظه حذف شده است. از آنجا که میزان‌ساز زمان کافی برای پاسخ به ارتعاشات سیستم را در شتاب‌گیری کند دارد، ارتعاشات مضر را در بیک رزنانس تقریباً بطور کامل حذف می‌کند. این دیدگاه ملزومات مهندسی با ارزشی را می‌طلبد. در حین راه‌اندازی شتاب توربوماشین‌های صنایع انرژی یا شیمیایی، معمولاً خیلی کند است. مشکل‌ترین هدف در زمان راه‌اندازی ماشین، عبور از سرعت‌های بحرانی است. نتایج آزمایشگاهی اثبات کرده است که میزان‌سازی فعال می‌تواند برای حذف ارتعاشات مضر در پرپود راه‌اندازی بکار برده شود. بنابراین، این تکنولوژی می‌تواند کاربردهای وسیعی در صنایع داشته باشد.

شده به بدنه^۱ است. فرضیات پایه عبارتند از:
 (۱) روتور صلب است. نامیزانی بصورت یک جرم متمرکز در روتور مدل می‌شود.
 (۲) یاتاقان‌ها ایزوتروپیک هستند و با مجموعه‌های از فنر و دمپرها خطی مدل می‌شوند.
 (۳) شتاب زاویه‌ای ثابت است. حرکت انتقالی در جهت Y صفر فرض می‌شود.
 (۴) حرکات ارتعاشی جانبی برای سادگی دینامیکی کوچک فرض می‌شوند.

با فرض اینکه حرکت اسپین حول محور Y شناخته شده باشد و حرکت انتقالی حول محور Y صفر باشد، براساس قانون نیوتن داریم:
 (لیست علائم در پیوست ۱ ارائه شده است):

$$\left. \begin{aligned} M_x &= I_{xx}W_x + (I_{zz} - I_{yy})W_yW_z \\ M_z &= I_{zz}W_z + (I_{yy} - I_{xx})W_xW_y \\ F_x &= m\ddot{R}_x \\ F_z &= m\ddot{R}_z \end{aligned} \right\} (12)$$

سه نیروی اعمال شده به شفت صلب وجود دارد که عبارتند از:

- نیروی الاستیکی
- نیروی میرایی
- نیروی اینرسیال ناشی از نامیزانی

۳- تشریح مدل تحلیلی یک روتور صلب

نمایش هندسی مدل یک روتور صلب در شکل (۷) نشان داده شده است. XYZ دستگاه مختصات اینرسی و XYZ دستگاه مختصات ثابت

الف- نیرو و گشتاور الاستیکی

$$M_k = \left[-\frac{1}{2}KL^2\theta, -\frac{1}{2}KL^2\psi \right]^T, F_c = -2K[R_x, R_z]^T \quad (13)$$

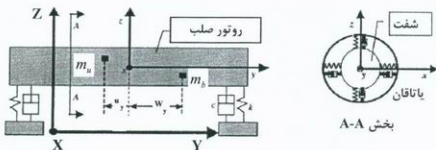
ب- نیرو و گشتاور میرایی

$$M_c = \left[-\frac{1}{2}CL^2\dot{\theta}, -\frac{1}{2}CL^2\dot{\psi} \right]^T, F_c = -2C[R_x, R_z]^T \quad (14)$$

ج- نیرو و گشتاور اینرسیال القاشده از نامیزانی

$$\begin{aligned} F_i &= -m_u d \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \sin(\alpha - \phi) - \dot{\phi}^2 \cos(\alpha - \phi) \\ -\dot{\phi}^2 \sin(\alpha - \phi) - \ddot{\phi} \cos(\alpha - \phi) \end{bmatrix}, \\ M_i &= \begin{bmatrix} m_u d (\dot{\phi}^2 \sin(\alpha - \phi) + \ddot{\phi} \cos(\alpha - \phi)) u_y \\ m_u d (-\dot{\phi}^2 \cos(\alpha - \phi) + \ddot{\phi} \sin(\alpha - \phi)) u_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

1- Body - Fixed



شکل (۷): نمایش هندسه مدل روتور صلب

می‌توان معادلات حرکت روتور صلب در حین شتاب‌گیری را بدست آورد [۲]:

$$\dot{x} = A(t)x + B \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

که $f_2 = \ddot{\varphi} \sin \varphi - \dot{\varphi}^2 \cos \varphi$ و $f_1 = \ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi$ توابع زمانی شناخته شده‌ای هستند. مدل از نوع خطی متغیر با زمان است یعنی $A(t)$ شامل درایه‌های متغیر با زمان نظیر $I_p \dot{\varphi}(t)/I_t$ می‌باشد. ولی از سوی دیگر این درایه‌های متغیر با زمان در عمل بعلت اینکه قطر روتور از طول آن بسیار کوچکتر و در نتیجه I_p بسیار کوچکتر از I_t است، از سایر درایه‌های ماتریس $A(t)$ بسیار کوچکتر هستند. در معادلات، از این درایه‌های متغیر با زمان چشم‌پوشی شده است و رفتار سیستم مشابه یک سیستم خطی غیر متغیر با زمان در نظر گرفته شده است.

۴- بالاتسینگ فعال تک صفحه‌ای^۱ بهینه

یک روتور صلب در حین شتاب گرفتن

از جمله کارهایی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به طرح پیشنهادی در مرجع [۴] (با استفاده از بکارگیری یک محرک توزیع

جرم نامیزئی m_u در محل $[d \cos \alpha, u_y, d \sin \alpha]^T$ قرار دارد که (در مختصات ثابت‌شده به پدنه)^۱ با جایگزینی این ترم‌ها در معادلات $(A-I)$ و با توجه به اینکه $u_z = d \sin \alpha, u_x = d \cos \alpha$ می‌توان معادلات حرکت روتور صلب را بدست آورد با در نظر گرفتن $x = [R_X R_Z \theta \psi R_X R_Z \theta \psi]^T$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-2k}{m} & 0 & 0 & 0 & \frac{-2c}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-2k}{m} & 0 & 0 & 0 & \frac{-2c}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-kL^2}{2I_t} & \frac{I_p \ddot{\varphi}}{I_t} & 0 & 0 & \frac{-kL^2}{2I_t} & \frac{I_p \ddot{\varphi}}{I_t} \\ 0 & 0 & \frac{I_p \ddot{\varphi}}{I_t} & \frac{-kL^2}{2I_t} & 0 & 0 & \frac{-I_p \ddot{\varphi}}{I_t} & \frac{-kL^2}{2I_t} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{-m_b w_z - m_u u_z}{m} & \frac{m_b w_x + m_u u_x}{m} \\ \frac{m_b w_x + m_u u_x}{m} & \frac{-m_b w_z - m_u u_z}{m} \\ \frac{m_b w_x w_y + m_u u_x u_y}{I_t} & \frac{m_b w_y w_z + m_u u_y u_z}{I_t} \\ \frac{m_b w_y w_z + m_u u_y u_z}{I_t} & \frac{-m_b w_x w_y - m_u u_x u_y}{I_t} \end{bmatrix}$$

1- Body Fixed Coordinate

مجدد جرمی ابداعی) برای بالانسینگ در حین شتابگیری ماشین اشاره کرد.

بطور کلی یک روتور دارای چندین مود ارتعاشی می‌باشد. در صورت در نظر گرفتن بالانسینگ بصورت تک صفحه‌ای نامیزانی‌های جبران‌ساز بهینه برای مودهای مختلف متفاوت می‌باشند. بهر حال، از آنجا که توزیع نامیزانی میزان‌ساز می‌تواند در حین عملیات تغییر کند، ارتعاشات هر دو مود مختلف تنها با یک میزان‌ساز بطور مؤثری حذف خواهد شد.

برای بالانسینگ چندین مود تنها با استفاده از یک میزان‌ساز، نیاز به یک تابع سوئیچینگ می‌باشد. در این بخش، با فرض اینکه میزان‌ساز

در هیچ گروه‌ای از مودهای ارتعاشی قرار نگرفته باشد، یک تابع سوئیچینگ بهینه برای شرایط شتابگیری سیستم بدست می‌آید (به بخش ۴-۲ مراجعه شود). برای این منظور مدل یک روتور صلب مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی تعمیم آن به یک مدل روتور ارتجاعی با چندین مود ارتعاشی آسان و سراسر است.

۱-۴- تشریح مراحل تخمین نامیزانی روتور صلب به منظور نمایش مسأله تخمین، مدل پیوسته به یک مدل گسسته تبدیل می‌شود. حال در معادلات حرکت روتور (رابطه ۱۶) پارامترهای مجهول را بصورت ذیل تعریف می‌کنیم:

$$b_1 = \frac{m_u u_x}{m}, b_2 = \frac{m_u u_z}{m}, b_3 = \frac{m_u u_x u_y}{m}, b_4 = \frac{m_u u_z u_y}{m} \quad (17)$$

و پارامترهای معلوم نیز بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a_1 = \frac{k}{m}, a_2 = \frac{c}{m}, b_0 = \frac{l}{m}, g_0 = \frac{m}{I_t}, g_1 = \frac{mL^2}{2I_t}, g_2 = \frac{I_p}{I_t} \quad (18)$$

بنابراین معادلات حالت سیستم را می‌توان بصورت معادلات (۱۹) در فرم گسسته بازنویسی کرد:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{\dot{R}_X[(k+1)T] - \dot{R}_X[kT]}{T} - \left[(m_b w_x f_2 - m_b w_z f_1) b_0 - 2a_2 \dot{R}_X - 2a_1 R_X \right]_{t=kT}, \\ x_1 &= [f_2 \quad -f_1]^T \Big|_{t=kT}, \quad \varphi_1 = [b_1 \quad b_2]^T, \\ y_2 &= \frac{\dot{\theta}[(k+1)T] - \dot{\theta}[kT]}{T} - [b_0 m_b w_y g_0 (w_x f_1 + w_z f_2) - g_1 a_2 \dot{\theta} - g_1 a_1 \theta]_{t=kT}, \\ x_2 &= [g_0 f_1 \quad g_0 f_2]^T \Big|_{t=kT}, \quad \varphi_2 = [b_3 \quad b_4]^T \end{aligned} \right\} (19)$$

بنابراین می‌توان فرمول رگرسیون را بصورت معادلات (۲۰) بدست آورد:

$$y_1 = x_1^T \varphi_1 + \varepsilon_1 \quad \& \quad y_2 = x_2^T \varphi_2 + \varepsilon_2 \quad (20)$$

۴-۲- بالانسینگ فعال بهینه سیستم دوار با

چندین مود ارتعاشی

به منظور بدست آوردن موقعیت بهینه میزان ساز لازم است که ارتعاشات ناشی از نامیزانی در حین شتاب‌گیری مطالعه شود. در گذشته اغلب کارهای انجام شده برای بدست آوردن ارتعاش گذرای یک روتور در حین شتاب‌گیری براساس تکنیک‌های عددی استوار بود که این تکنیک‌ها برای طراحی میزان‌ساز فعال بهینه مناسب نیستند. اخیراً یک روش تحلیلی برای تشریح پاسخ نامیزانی یک روتور صلب در حین شتاب‌گیری ابداع شده است [۳].

پاسخ نامیزانی یک روتور صلب با شتاب ثابت دقیقاً بصورت تابعی از نامیزانی سیستم نوشته می‌شود. پاسخ کلی شامل سه قسمت است:

- (۱) ارتعاش گذرا در فرکانس طبیعی میراثونده
- (۲) ارتعاش سنکرون در فرکانس سنکرون آنی
- (۳) ارتعاش ناگهانی رخ داده در فرکانس طبیعی میراثونده

بخش (۱) ارتعاش معمولاً بسیار کوچک است. اگر تنها قسمت‌های (۲) و (۳) مورد لحاظ قرار گیرند، پاسخ گذرای یک سیستم دوار می‌تواند برای یک روتور دلخواه بصورت رابطه (۲۴) نوشته شود (به پیوست ۲- پاسخ تحلیلی نامیزانی روتور Jeffcott در حین شتاب گرفتن* مراجعه شود):

$$\hat{\varphi}_1 = (x_1 x_1^T)^{-1} x_1 y_1 \quad \& \quad \hat{\varphi}_2 = (x_2 x_2^T)^{-1} x_2 y_2 \quad (21)$$

$$w_z = -m_u u_z / m_b \quad \& \quad w_x = -m_u u_x / m_b \quad (22)$$

$$w_z = -m_u z u_y / (m_b w_y) \quad \& \quad w_x = -m_u x u_y / (m_b w_y) \quad (23)$$

$$v = \sum_{k=1}^N U_k e^{\left[i \left[\frac{\alpha t^2}{2} + \rho_k(t) \right] M_{sk}(t) + U_k e^{i[\omega_{dk} t + \gamma_k(t)]} M_{nk}(t) \right]} \quad (24)$$

نویز با توزیع نرمال، شامل نویز اندازه‌گیری و نویز مدلسازی می‌باشند (ϵ_1, ϵ_2). کاملاً مشخص است که بهترین تخمین برای نامیزانی سیستم براساس معیار کمترین مربعات خطا از رابطه (۲۱) بدست می‌آید.

محاسبات رابطه (۱۷) می‌تواند با یک روش بازگشتی انجام شود. براساس این راه‌حل، تخمین پارامترهای b_1 تا b_4 مقدور خواهد بود. محرک بکاررفته در این موارد از نوع توزیع مجدد جرمی می‌باشد. اگر هدف مینیمم کردن ارتعاش سنکرون ناشی از نامیزانی باشد، بهترین راه برای این مسأله صفر کردن ترم‌های نیروی گریز از مرکز ناشی از نامیزانی می‌باشد. به منظور کنترل مود ارتعاشی انتقالی و جبران‌سازی نیروی ناشی از نامیزانی برقراری روابط (۲۲) لازم است:

به منظور کنترل مود ذاتی و جبران‌سازی گشتاور ناشی از نامیزانی برقراری روابط (۲۳) لازمست: مشخص است که اگر میزان‌ساز در همان صفحه عرضی نامیزانی سیستم دوار نباشد، بعبارت دیگر $w_y \neq u_y$ ، این محرک به تنهایی قادر به کنترل همزمان هر دو مود ارتعاشی نخواهد بود و برای کنترل مناسب هر دو مود با یک محرک نیاز به استفاده از یک استراتژی بهینه می‌باشد، در بخش بعدی یک استراتژی بهینه براساس تخمین نامیزانی تشریح خواهد شد.



بالانسینگ بهینه می‌تواند بصورت رابطه (۲۵) باشد [۴]:

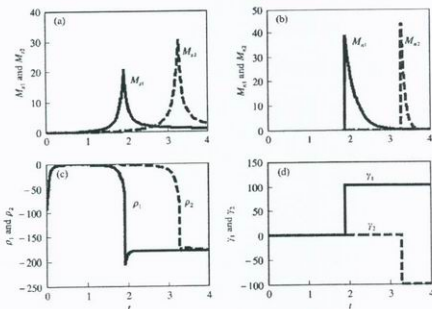
$$c_1 = \min_{u_{bk}} \left[\sum_{k=1}^N \|V_{sk}\| + \sum_{k=1}^N \|V_{nk}\| \right] \quad (25)$$

که u_{bk} نامیزانی حاصل از میزان‌ساز در مود k ام است، V_{sk} و V_{nk} ارتعاش سنکرون و رخ داده ناگهانی برای مود k ام هستند. معنی این تابع هزینه این است که ما در تلاش برای مینیمم کردن دامنه کلی ارتعاش حاصل از N مود ارتعاش در حین شتاب‌گیری وجود دارد. ارتعاش در هر مود مجموعی از ارتعاشات سنکرون و رخ داده ناگهانی است. با جایگزینی عبارت تحلیلی برای V_{sk} و V_{nk} در رابطه (۲۶) خواهیم داشت:

$$c_1 = \min_{u_{bk}} \left[\sum_{k=1}^N \|(u_{bk} + u_{sk})\| M_k(t) \right] \quad (26)$$

که v یک عدد مختلط معرف ارتعاش روتور در دو جهت، N تعداد مودهای ارتعاشی قابل ملاحظه، U_k یک عدد مختلط معرف نامیزانی سیستم در مود k ام، t زمان، α شتاب، ω_{dk} فرکانس طبیعی میراثونده مود k ام، و M_{sk} و ρ_k و M_{nk} به ترتیب دامنه و فاز ارتعاش سنکرون و ارتعاش رخ داده ناگهانی در مود k ام هستند.

در روتور صلب تنها دو مود ارتعاشی وجود دارد: حرکت انتقالی و حرکت ذاتی. این دو مود در مجموعه سیستم شکل (۷) دکوپله می‌شوند. M_{nk} و γ_k و M_{sk} و ρ_k برای یک روتور صلب با $C = 1000 \text{ Ns/m}$, $k = 4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ و $\alpha = 300 \text{ rad/s}^2$ و $r = 0.1 \text{ m}$ و $L = 1.0 \text{ m}$ در شکل (۸) نشان داده شده است. تابع هزینه^۱ استراتژی



شکل (۸): تجزیه ارتعاش گذرای یک روتور صلب: (a) و (c) $M_{sk}(t)$, $M_{nk}(t)$ و (b) و (d) $\rho_k(t)$, $\gamma_k(t)$ در رابطه (۱۸)

1- Cost function

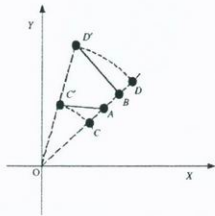
در این معادله، $\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2} M_1$ معرف ارتعاش انتقالی با واحد اندازه گیری "متر" است.

$\sqrt{(cb+dy)^2 + (ca+dx)^2} M_2$ معرف ارتعاش چرخشی است که واحد فیزیکی آن "رادیان" می باشد. برای اینکه این دو ترم، جمع پذیر باشند، یک فاکتور I_0 را در M_2 ضرب می کنیم و هر دو ترم بر حسب "متر" بیان می شوند. معنای فیزیکی این مضر این است که ارتعاش چرخشی متناظر با ارتعاش یک نقطه در محل $(0, I_0)$ است.

می توان از روش هندسی برای تشریح حل مسأله بهینه سازی فوق استفاده کرد.

مسأله می تواند بصورت زیر بازنویسی شود: برای دو نقطه داده شده $B: (caM_2, cbM_2)$ و $A: (aM_1, bM_1)$ ، x و y را بگونه ای می یابیم که مجموع فواصل از A و B به دو نقطه $D: (-M_2dx, -M_2dy)$ و $C: (-M_1x, -M_1y)$ منیمیم شوند.

راه حل مسأله در شکل (۹) نشان داده شده است و واضح است که نقاط O و A و B در یک خط و نقاط O و C و D نیز روی یک خط قرار دارند.



شکل (۹): راه حل هندسی مسأله بهینه سازی

که u_{sk} نامیزانی سیستم و M_k برابر با $M_{sk} + M_{nk}$ است. نکته ای که باید به آن توجه کرد این است که حرکت میزان ساز بدلیل کندی آن صرف نظر می شود. این فرض تنها در صورتیکه حرکات میزان ساز خیلی دورتر از پیک های رزنانس باشد درست است.

در واقع ما نباید در پیک های رزنانسی، میزان ساز را حرکت دهیم زیرا که حرکت کند میزان ساز موجب ارتعاشات گذرای بزرگی خواهد شد. رابطه (۲۶) تابع هزینه کلی یک سیستم روتوری است. یک روتور صلب با دو مود ارتعاشی بعنوان یک مثال برای توصیف مراحل حل مسأله بهینه سازی یکار خواهد رفت. برای یک روتور صلب که با $a = m_{11}u_x/m$ و $x = m_b\omega_x/m$ و $c = m_{12}u_z/m$ و $b = m_{11}u_z/m$ و $y = m_b\omega_z/m$ و $d = m\omega_y/I_t$ تعریف می شود داریم (رابطه ۲۷):

$$U_{b1} = x + yi \quad \text{و} \quad U_{b2} = dy - dx i$$
$$U_{s1} = a + bi \quad \text{و} \quad U_{s2} = cb - cai \quad (27)$$

در اینصورت، رابطه (۲۶) بصورت رابطه (۲۸) تغییر می کند:

$$\min_{x,y} [\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2} M_1 + \sqrt{(cb+dy)^2 + (ca+dx)^2} M_2] \quad (28)$$



بدون از دست دادن کلیت مسأله، می‌توان فرض کرد که OD از OC و OB از OA درازتر است. در ابتدا می‌توان ثابت کرد که موقعیت‌های بهینه C و D در روی خط OAB هستند. نقاط دلخواه C' و D' که روی خط OAB قرار ندارند، داده شده‌اند. می‌توان دو نقطه دیگر C و D را بگونه‌ای یافت که روی خط OAB باشند و $|OC| = |OC'|$ و $|OD| = |OD'|$ ؛ | | به معنای طول است. واضح است که (از نامساوی مثلثی) $|OA| = |OC| + |CA|$ و $|OB| = |OD| + |DB|$ و $|OC| \leq |OC'| + |C'A|$ و $|OD| \leq |OD'| + |D'B|$. بنابراین $|CA| \leq |C'A|$ و $|DB| \leq |D'B|$. بنابراین، C و D بهینه باید روی خط OAB قرار گیرند. سپس محل بهینه C و D در روی خط OAB می‌تواند بصورت زیر یافت شود:

از آنجا که جهات OAB و OCD یکسان است، $x/y = a/b$ با جایگزینی $y = \frac{b}{a}x$ در رابطه (۲۸) مسأله بهینه‌سازی بصورت رابطه (۲۹) تغییر می‌کند:

$$\min_x \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} [a + x|M_1 + ca + dx|M_2] \quad (29)$$

فرض می‌کنیم $x = -a$ و $M_1 > |d|M_2$ تابع هزینه $\left| \frac{ca}{d} - a \right| |d|M_2$ است.

اگر $x = -a + q$ ، در جاییکه q یک مقدار دلخواه است، تابع هزینه $|q|M_1 + \left| \frac{ca}{d} - a + q \right| |d|M_2$ که بزرگتر یا مساوی مقدار $|q|M_1 + \left| \frac{ca}{d} - a \right| |d|M_2 - |q||d|M_2$ می‌باشد. اما از آنجا که $M_1 > |d|M_2$ و $|q|M_1 - |q||d|M_2 \geq 0$ بنابراین، تابع هزینه در صورتیکه $x = -a + q$ باشد، بزرگتر از تابع

هزینه با $x = -a$ است. بطور مشابه اگر $M_1 < |d|M_2$ باشد حل مسأله منجر به $x = -\frac{ca}{d}$ می‌شود.

این راه‌حل بهینه می‌تواند به استراتژی بالانسینگ فعال بهینه تبدیل شود. در یک نقطه معین، زمانی که ارتعاشات ناشی از مود دوم ضرب شده در d بزرگتر از ارتعاش ناشی از مود اول شود، میزان‌ساز از بالانسینگ مود اول به بالانسینگ مود دوم منتقل می‌شود.

شکل‌های (۱۰) نتایج شبیه‌سازی را با بکار بردن استراتژی بالانسینگ بهینه توسعه‌یافته نشان می‌دهند. در این شبیه‌سازی، نامیزانی سیستم به میزان ۰/۵ کیلوگرم در (۰/۵ و ۰/۳ و ۰/۱) و میزان‌ساز ۰/۵ کیلوگرمی در $(\omega_x, 0.3, \omega_z)$ قرار دارند و ω_x و ω_z ورودیهای کنترلی هستند. خروجی، ارتعاش محور چرخش است. پارامترهای دیگر دینامیکی بکاررفته مطابق با شکل (۸) می‌باشند.

با استفاده از استراتژی بالانسینگ فعال توسعه‌یافته، زمان سوییچینگ به مود دوم برابر با $t = 2.95$ s بدست می‌آید. طرح بالانسینگ فعال بهینه، تخمین کمترین مربعات بازگشتی^۱ نامیزانی و قانون کنترل بهینه را ترکیب می‌کند. این استراتژی در شکل (۱۰-g) بصورت ذیل می‌باشد:

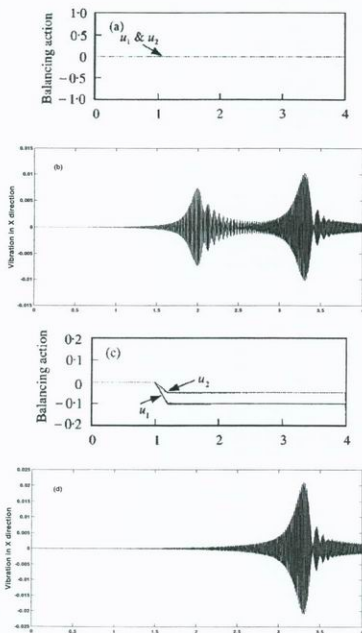
الف- موقعیت را در موقعیت صفر نگهداشته و موقعیت و دامنه نامیزانی سیستم را تخمین می‌زنیم.
ب- میزان‌ساز را به سمت مقابل نامیزانی تخمین‌زده‌شده برای کاهش اثر نامیزانی در اولین مود ارتعاشی حرکت می‌دهیم و تخمین نامیزانی سیستم را بصورت مداوم ادامه می‌دهیم.



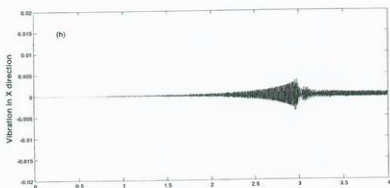
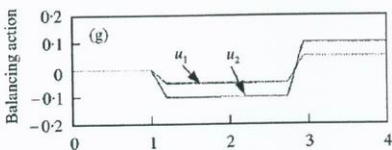
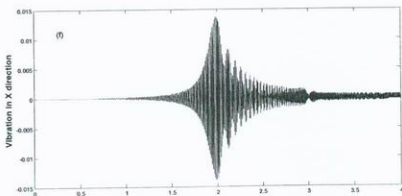
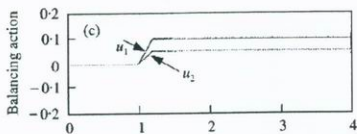
خطی ساده می‌شود. مدت حرکت 0.2 ثانیه است. با مقایسه خروجی حاصل از استراتژی بالانسینگ تک‌مود مطابق با شکل (d-10) و (f-10) مشخص می‌شود که روش کنترل بهینه می‌تواند ارتعاش القاشده از نامیزانی را بطور موثری کاهش دهد.

ج- در زمان $t = 2.95$ s، میزان‌ساز را برای کنترل مود دوم حرکت می‌دهیم و تخمین نامیزانی را بروز می‌کنیم.

د- مود دوم را بعد از زمان $t = 2.95$ s بالانس کرده و تخمین نامیزانی را به روز می‌کنیم. حرکت میزان‌ساز بصورت یک تابع



شکل (10-1): نتایج استراتژی‌های کنترل مختلف (a) و (c) استراتژی‌های مختلف: (a) بدون بالانسینگ؛ (c) بالانسینگ تک‌مود ارتعاشی اول (b) و (d) خروجی‌های ارتعاش متناظر با هر استراتژی



شکل (۱۰-۲): نتایج استراتژی‌های کنترل مختلف (e) و (g) استراتژی‌های مختلف: (e) بالانسینگ تک‌مود ارتعاشی دوم، (g) بالانسینگ هر دو مود ارتعاشی با تابع سونچینگ بهینه: (f) و (h) خروجی‌های ارتعاش متناظر با هر استراتژی

- rotors during acceleration", Transactions of NAMRI/SME, Vol. 27, 2000, pp.425-430.
- 3- Zhou, S., and Shi, J., "The analytical unbalance response of jeffcott rotor during acceleration," ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, 2001, pp. 299-302.
- 4- Zhou, S., and Shi, J., "Optimal one-Plane active balancing of rigid rotor during acceleration", Journal of Sound and Vibration, Vol. 249, 2002, pp. 196-205.
- 5- Zhou, S., and Shi, J., "Imbalance estimation for speed-varying rigid rotors using time-varying observer," ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123, 2001, pp. 637-644.
- 6- Zhou, S., Shin, K., Dyer, S., Shi, J., and Ni, J., "Active balancing and optimal balancing plane selection of rotors during acceleration", ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001.

آقای رامتین نظام‌آبادی دارای مدرک کارشناسی برق- کنترل از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و کارشناسی ارشد برق- کنترل از دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. ایشان دارای ۷ سال سابقه کار در شرکت قدس نیرو است. زمینه علاقه‌مندی آقای رامتین نظام‌آبادی کنترل غیرخطی و مقاوم و طراحی سیستم‌های کنترل و ابزار دقیق صنعتی می‌باشد.
Email: Ramtin.nezamabadi@gmail.com

روش‌های ضرایب اثر تعمیم یافته برای میزان‌سازی روتور به بررسی مشکلات میزان‌سازی فعال در پیوند شتاب‌گیری اختصاص داشت. برای غلبه بر این مشکل از استراتژی جدول‌بندی بهره استفاده شده است. آزمایشات عملی نیز مؤید کارایی این استراتژی است. این تکنولوژی می‌تواند بطور وسیعی در ماشین‌ابزارها و توربوماشین‌های سرعت بالا بکار رود. نکته‌ای که در رابطه با این استراتژی حائز اهمیت است دقت لازم در تخمین ارتعاش سنکرون است که در حین افزایش سرعت از فرکانس طبیعی روتور (در سرعت‌های بحرانی)، ارتعاش‌گذرای سیستم در صورت کوچک بودن میرایی آن قابل صرف‌نظر نبوده و در این استراتژی ایجاد مشکلاتی خواهد کرد. در استراتژی بالاتسینگ فعال تک‌صفحه‌ای بهینه یک روتور صلب با دو مسأله مواجه هستیم: الف- تخمین نامیزانی سیستم در حین شتاب گرفتن که این مسأله با یک روش کمترین مربعات بازگشتی حل شده است.

ب- استفاده از یک تابع سونیچینگ بهینه برای کاهش دو مود ارتعاشی با توجه به اینکه در حین شتاب گرفتن معمولاً با دو مود ارتعاشی مواجه هستیم. در این روش از مدل تحلیلی روتور صلب در حین شتاب گرفتن استفاده شد و نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی مناسب این روش است.

مراجع

- 1- Shiyu Zhou And Jianjun Shi, "Active balancing and vibration control of rotating machinery : a survey ", The Shock And Vibration Digest, Vol. 33 , No. 4 , July 2001, pp. 361-371.
- 2- Zhou, S, and Shi, J, "Supervisory adaptive balancing of rigid



پیوست یک: لیست علائم

- Ω - سرعت چرخش روتور
- $\bar{\sigma}(0)$ - ماکزیمم مقدار منفرد
- m_b - جرم میزان ساز
- m_u - جرم نامیزانی
- (w_x, w_y, w_z) - مختصات قرارگیری جرم میزان ساز
- (u_x, u_y, u_z) - مختصات قرارگیری جرم نامیزانی
- m - جرم روتور
- k - ضریب فنر یاتاقان ها
- c - ضریب میرایی یاتاقان ها
- L - طول شفت روتور
- l - نصف طول شفت روتور
- I_p, I_t - ممان اینرسی قطبی و قطری
- R_x, R_z - جابجایی مرکز جرم شفت در جهات X و Z
- J_a - ممان اینرسی در جهت محوری
- J_r - ممان اینرسی در جهت شعاعی
- ρ - سرعت زاویه‌ای روتور
- β - ضریب خروج از مرکز محوری
- γ - ضریب میرایی در جهت محوری
- θ - جابجایی زاویه‌ای روتور حول محور X
- ψ - جابجایی زاویه‌ای روتور حول محور Y
- f_{t1} و f_{t2} و f_{t3} و f_{t4} - نیروهای مغناطیسی حاصل از یاتاقانهای شعاعی بالایی به روتور
- f_{b1} و f_{b2} و f_{b3} و f_{b4} - نیروهای مغناطیسی حاصل از یاتاقانهای شعاعی پایینی به روتور
- f_{t5} و f_{t5} - نیروهای مغناطیسی حاصل از یاتاقانهای محوری به روتور
- f_{dx} و f_{dy} و f_{dz} و $f_{d\theta}$ و $f_{d\psi}$ - نیروهای اغتشاش
- f_j - نیروی الکترومغناطیسی تولیدشده با الکترومگنت ژام
- ϕ_j - فلوی فاصله هوایی
- g_j - طول فاصله هوایی
- h - پهناي قطب
- e_j - ولتاژ دو سر کوپل الکترومغناطیسی ژام
- N - تعداد دور هر کوپل
- R - مقاومت کوپل
- L - اندوکتانس کوپل
- A - سطح زیر یک قطب الکترومغناطیسی
- F_0 - مقادیر نامی نیروهای مغناطیسی حاصل از یاتاقانها
- Φ_0 - مقادیر نامی فلوی فاصله هوایی
- G_0 - مقادیر نامی ولتاژ الکترومگنت
- E_0 - مقادیر نامی طول فاصله هوایی
- μ_0 - قابلیت نفوذپذیری فضای آزاد

پیوست دو: پاسخ تحلیلی نامیزانی روتور Jeffcott در حین شتاب گرفتن

معادله روتور Jeffcott عبارتست از :

$$\ddot{r} + 2\zeta\omega_n \dot{r} + \omega_n^2 r = W(\omega^2 - i\alpha)e^{i\varphi} \quad (B-1)$$

که r بردار موقعیت مرکزی هندسی روتور Jeffcott، Z و ω_n ضریب میرایی و فرکانس طبیعی روتور، W متناظر با نامیزانی سیستم، ω سرعت چرخش روتور، α شتاب زاویه‌ای و φ زاویه چرخش است. اگر فقط قسمت حقیقی را در نظر بگیریم، داریم:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = C_1 \cos\left(\frac{1}{2}\alpha t^2 + \sigma'\right) + C_2 t^2 \cos\left(\frac{1}{2}\alpha t^2 + \sigma\right) \quad (B-2)$$

که C_1 و C_2 اطلاعات دامنه σ و σ' اطلاعات فاز نامیزانی را شامل می‌شوند. برای یک سیستم رتبه ۲، پاسخ به یک تابع نیروی دلخواه عبارتست از:

$$x = \frac{1}{x(\alpha_0 - \beta_0)} \{ e^{\alpha_0 t} \int_0^t f(t) e^{-\alpha_0 t} dt - e^{\beta_0 t} \int_0^t f(t) e^{-\beta_0 t} dt \},$$

$$\alpha_0 = -\zeta\omega_n + i\sqrt{\omega_n^2 - \zeta^2\omega_n^2}, \quad \beta_0 = -\zeta\omega_n - i\sqrt{\omega_n^2 - \zeta^2\omega_n^2} \quad (B-3)$$

برای ارزیابی این عبارت، یک تغییر متغیر بصورت زیر را اعمال می‌کنیم:

$$\begin{aligned} Z_1(t) &= -\frac{i}{2}(\alpha t - i\omega_n \zeta - \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2})^2 / \alpha \\ Z_2(t) &= -\frac{i}{2}(\alpha t - i\omega_n \zeta + \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2})^2 / \alpha \end{aligned} \quad (B-4)$$

بر اساس قضیه باقیمانده کوشی، ارتعاش کلی سیستم می‌تواند در سه قسمت زیر نوشته شود.
۱- پاسخ گذرا منتج از شرایط اولیه روتور:

$$\begin{aligned} x_t = R_e \left[\frac{C_2 e^{i\sigma}}{m(\alpha_0 - \beta_0)} \{ e^{\alpha_0 t - Z_1'} [C_4 \psi(Z_1') + C_5 + C_6 \phi(Z_1')] - e^{\beta_0 t - Z_2'} [C_8 \psi(Z_2') + C_9 + \right. \\ \left. C_{10} \phi(Z_2')] \} \right] + R_e \left[\frac{C_1 e^{i\sigma'}}{m(\alpha_0 - \beta_0) \sqrt{2i\alpha}} \{ e^{\alpha_0 t - Z_1'} C_3 \psi(Z_1') - e^{\beta_0 t - Z_2'} C_7 \psi(Z_2') \} \right] \end{aligned} \quad (B-5)$$

۲- ارتعاش سنکرون:

$$\begin{aligned} x_s = R_e \left[\frac{C_2 e^{i\sigma}}{m(\alpha_0 - \beta_0)} \{ -e^{\alpha_0 t - Z_1} [C_4 \psi(Z_1) + C_5 + C_6 \phi(Z_1)] + e^{\beta_0 t - Z_2} [C_8 \psi(Z_2) + C_9 + \right. \\ \left. C_{10} \phi(Z_2)] \} \right] + R_e \left[\frac{C_1 e^{i\sigma'}}{m(\alpha_0 - \beta_0) \sqrt{2i\alpha}} \{ e^{\alpha_0 t - Z_1} C_3 \psi(Z_1) + e^{\beta_0 t - Z_2} C_7 \psi(Z_2) \} \right] \end{aligned} \quad (B-6)$$



۳- ارتعاش گذرای رخ داده ناگهانی:

$$x_n = R_e \left[\frac{C_2 e^{i\sigma t}}{m(\alpha_0 - \beta_0)} e^{\alpha_0 t} (\sqrt{\pi} KC_4 + 2\sqrt{\pi} KC_6) + \frac{C_1 e^{i\sigma t}}{m(\alpha_0 - \beta_0)\sqrt{2i\alpha}} (2\sqrt{\pi} KC_3 e^{\alpha_0 t}) \right] \quad (B-7)$$

با توجه به معادلات فوق،

$$C_1 \approx C_{10}, \quad \phi(z) = \int_0^\infty \frac{e^{-v}}{\sqrt{z+v}} dv, \quad \psi(z) = \int_0^\infty e^{-v} \sqrt{z+v} dv$$

$$K = \begin{cases} 0 & t \leq \omega_n (\zeta + \sqrt{1-\zeta^2}) / \alpha \\ 1 & t > \omega_n (\zeta + \sqrt{1-\zeta^2}) / \alpha \end{cases} \quad \text{مقادیر ثابت مختلط هستند و}$$

یک نتیجه مفید از این حل تحلیلی این است که فقط x_n و x_s قابل ملاحظه هستند و پاسخ گذرا برای یک سیستم دوار می‌تواند بصورت زیر بازنویسی شود:

$$V = \sum_{k=1}^N [W_k e^{i[\alpha t^2/2 + \rho_k(t)]} M_{sk}(t) + W_k e^{i[\omega_{dk}t + \gamma_k(t)]} M_{nk}(t)]$$

V یک مقدار مختلط است که متناظر با ارتعاش روتور می‌باشد N تعداد ارتعاشات قابل ملاحظه مودها و W_k یک مقدار مختلط متناظر با نامیزاتی سیستم در مود k ام است. W_{dk} فرکانس طبیعی میراشونده مود k ام است. M_{sk} و ρ_k و M_{nk} و γ_k بترتیب بصورت دامنه‌ها و فازهای ارتعاش سنکرون و ارتعاش رخ داده ناگهانی در مود k ام در صورتیکه نامیزاتی به میزان یک واحد باشد، تعریف می‌شوند.



انتخاب سیستم پالایشینگ کندانس در نیروگاههای سیکل ترکیبی با سیستم خنک کن غیر مستقیم هلر

حسین حق پرست

کارشناس ارشد شیمی - شرکت مدیریت تولید برق یزد

چکیده

پالایشینگ کندانس کاربرد منحصر بفردی برای رزینهای تبادل یونی می‌باشد. فیلترهای پریکوت و مخازن رزینی بستر مخلوط دو سیستم متداول برای پالایشینگ کندانس می‌باشند که به طور گسترده استفاده می‌شوند. بهره‌برداری از سیستم پالایشینگ کندانس در چرخه آمونیاکی مزایایی بر چرخه هیدروژنی دارد که از جمله آنها کاهش مصرف مواد شیمیایی و افزایش زمان سرویس پالشر کندانس می‌باشند. با این وجود بهره‌برداری در چرخه آمونیاکی برای کندانس با pH نزدیک به خنثی مناسب نمی‌باشد. در این مقاله یک تجربه ناموفق در مورد استفاده از چرخه آمونیاکی برای نیروگاههای سیکل ترکیبی با سیستم خنک کن غیرمستقیم هلر با المنتهای خنک کن آلومینیومی ارائه می‌گردد و نتایج به کلیه نیروگاههای مشابه تعمیم داده می‌شود.

۱- مقدمه

پالایشینگ کندانس اصطلاحی است که معمولاً برای تصفیه بخار کندانس شده توربینهای نیروگاهی بکار می‌رود. پالایشینگ کندانس یکی از بخش‌های مهم تصفیه آب کندانس در هر نیروگاه بخار می‌باشد (این نیروگاهها شامل نیروگاههایی هستند که دارای مولدهای بخار یک طرفه، مولدهای بخار بحرانی و فوق بحرانی، راکتورهای آب جوشان یا سوخت هسته‌ای و راکتورهای آب فشاردار می‌باشند). دلایل متعددی برای تصفیه کندانس که دارای خلوص بسیار بالایی نیز می‌باشد وجود دارد که از جمله مهمترین آنها وارد شدن ناخالصیهای بسیار جزئی آب ورودی به بویلر و تغلیظ شدن آن در بخار است. برای مثال مقادیر ناخالصیهای با غلظتی در حد ppb و یا کمتر، می‌توانند تا حد ppm تغلیظ شوند. یکی دیگر از دلایل ضرورت تصفیه کندانس حذف محصولات ناشی از خوردگی آهن، مس و سایر فلزات در تماس با بخار یا آب چه به صورت محلول و چه بصورت غیر محلول می‌باشد.

منابع متعددی برای ورود ناخالصی به چرخه آب و بخار نیروگاهی وجود دارد. یکی از این منابع آب جبرانی است که در صورت بهره‌برداری غیرصحیح مثلاً ورود مواد شیمیایی مورد استفاده برای احیا به داخل سیستم بهره‌برداری بیش از زمان سرویس خطوط رزینی می‌باشد. در نیروگاههایی که کندانس مستقیماً با آب خنک کن در تماس نمی‌باشند و از آب دریا برای خنک کردن استفاده می‌شود نشتی آب دریا به داخل کندانسور باعث بروز مشکل شدیدی می‌شود. مواد شیمیایی که برای حفاظت چرخه به آب اضافه می‌شوند نیز در صورتیکه به وسیله پالایش کندانس حذف گردند به عنوان ناخالصی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین سیستم پالایش کندانس باید قادر باشد تا هم ناخالصیهای محلول و هم ناخالصیهای نامحلول را حذف نماید. مزایای کلیدی استفاده از سیستم پالایش کندانس شامل جلوگیری از کاهش کارایی توربین، راه‌اندازیهای سریعتر و شستشوی شیمیایی کمتر می‌باشد. لزوم پالایش کندانس



برای سیستمهایی که از آلیاژهای مس استفاده می‌کنند شدیدتر است. کاهش یافتن کارایی توربین یک واحد ۴۰۰ مگاوات به میزان ۱۰٪ در طول شش ماه بدون استفاده از واحد پالایش کندانسیت غیرمعمول نیست. در شکل (۱) دیاگرام چرخه کندانس در یک نیروگاه سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کن غیرمستقیم هلو و بویلر بازیافت نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد بخار بویلر پس از عبور از توربین و از دست‌دادن انرژی به بخار کم فشاری تبدیل می‌شود که درون کندانسور به وسیله پاشش آب بر روی آن کندانس می‌گردد و در ته کندانسور جمع می‌شود. بخشی از این کندانس که معادل بخار کندانس شده است برای استفاده مجدد به بویلر باز می‌گردد و بخش عمده آن برای خنک‌شدن وارد برج خنک‌کن می‌شود. بسته به نوع، میزان جریان چرخه خنک‌کن حدود ۵۰ برابر چرخه توان می‌باشد. بازیافت و استفاده مجدد از کندانس یک روش اصلی برای کاهش هزینه بهره‌برداری می‌باشد. داخل این چرخه مقداری از آب به علت نشستها و بلودانه‌های بویلر از دست می‌رود که برای جبران آن نیاز به یک منبع آب جبرانی می‌باشد. در اغلب موارد آب جبرانی به مخزن آب داغ کندانسور اضافه می‌گردد. آب جبرانی تنها یکی از عوامل تعیین‌کننده خلوص آب تغذیه بویلر می‌باشد.

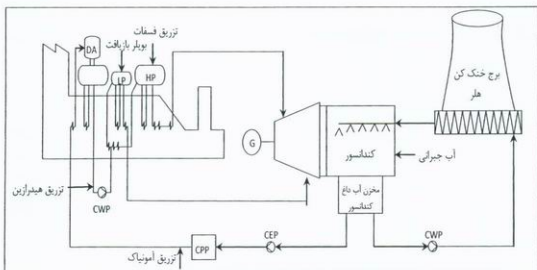
عامل مهم دیگر خلوص جریان کندانس بازگشتی می‌باشد. در حقیقت خلوص کندانس در نیروگاههای پرفشار که کندانس عمده آب تغذیه بویلر را تشکیل می‌دهد بسیار مورد توجه می‌باشد و یکی از راههای ورود ناخالصی به بویلر همین کندانس می‌باشد. بنابراین تصفیه این کندانس برای تضمین کیفیت آب ورودی به بویلر و تجهیزات بعد از آن (توربین) ضروری می‌باشد.

۲- نقش تبادل یون در پالیشینگ کندانس

تبادل یون، نقش اساسی را در تصفیه کندانس ایفا می‌کند و پالیشینگ کندانس کاربرد منحصر به فردی برای رزینهای تبادل یونی می‌باشند. برخلاف روشهای تصفیه آب جبرانی سیستم پالیشینگ کندانس با ناخالصیهایی سر و کار دارد که درون خود سیستم به وجود می‌آید. این ناخالصیها شامل ذرات جامد، ذرات حل‌شده و ذرات ژل گونه می‌باشند. این ناخالصیها از منابع مختلفی نظیر نشئی هوا، خوردگی سطوح فلزی و کارهای تعمیراتی غیرصحیح تشکیل می‌گردند. تحت شرایط نرمال، کندانس دارای مقادیر جامدات حل شده بسیار اندک می‌باشد ولی محصولات خوردگی با عبور بخار و آب کندانس از درون لوله‌ها و مبدلهای حرارتی و سایر تجهیزات در چرخه آب و بخار وارد کندانس می‌گردد. به این دلایل پالیشینگ کندانس، عملیاتی است که نمی‌توان از آن صرف نظر نمود.

یک جنبه دیگر پالیشینگ کندانس، طراحی آن برای ظرفیت‌های زیاد می‌باشد، چرا که اغلب لازم است کل جریان کندانس که دارای ظرفیت زیادی است، تصفیه گردد. به علاوه دمای کندانس اغلب بالا بوده و در برخی از سیستمها نزدیک ماکزیمم درجه حرارت قابل تحمل رزینهای تبادل یونی می‌باشد.

برای طراحی یک واحد CPP اجباراً از دو گزینه سیستمهای mixed-bed با استفاده از رزینهای دانهای (که احیای آنها در خارج از محل سرویس می‌باشد) یا سیستم فیلترهای پریکوت که از رزینهای تبادل یونی پودری به صورت پوششی بر روی فیلترهای کارتریج اعمال می‌شود، یکی انتخاب شود. هر یک از این دو سیستم مزایا و معایب مخصوص به خود داشته و انتخاب باید بر اساس طراحی و پارامترهای بهره‌برداری و شرایط محیطی انجام



شکل (۱): چرخه کندانس در یک نیروگاه سیکل ترکیبی با برج خنک کن هار

در سیستم‌های رزینی با بستر عمیق حذف محصولات خوردگی معلق به وسیله فیلتراسیون عمقی صورت می‌گیرد.

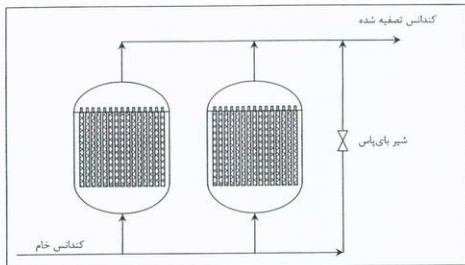
به این صورت که ذرات معلق به جای انباشته شدن بر روی سطح بالایی به صورت عمقی درون بستر نفوذ می‌کنند. ظرفیت‌های زیاد و اندازه ذرات دانه‌های رزین برای این نوع فیلتراسیون عمقی بحرانی می‌باشند رزین‌های مورد استفاده برای این کار باید از نوع condensate grade باشند. حتی تحت ظرفیت‌های زیاد نیز آلاینده‌های حل شده باید به آسانی به وسیله بستر عمیق دانه‌های رزین‌های تبادل‌یونی حذف شوند. معمولاً رزین کاتیونی در این بسترهای مختلط به فرم هیدروژنی و رزین آنیونی به فرم هیدروکسید می‌باشد. در برخی موارد از رزین کاتیونی در فرم آمونیاکی استفاده می‌گردد که این کار روشی برای افزایش زمان سرویس و کاهش هزینه‌های همراه احیا می‌باشد. سیستم‌های پریکوت با استفاده از رزین‌های پودری دارای قابلیت زیاد فیلتراسیون می‌باشند ولی ظرفیت یونزدایی آنها به دلیل اینکه حجم کمی از رزین برای پوشش فیلتر استفاده می‌گردد، محدود است.

گیرد (شکل‌های ۲ و ۳). در کلیه موارد هدف سیستم پالایشینگ کندانس انجام دو عمل است: حذف ذرات معلق به وسیله فرایند فیلتراسیون و حذف ذرات حل‌شده به وسیله فرایند تبادل‌یون. در صورتیکه از آب با کندانکتیویته بالا مثلاً آب دریا برای سیستم خنک‌کن استفاده شود، یا نیاز به بهره‌برداری دراز مدت باشد و یا کنترل ورود هوا به داخل سیکل دشوار باشد استفاده از یک سیستم mixed-bed بر سیستم پریکوت ترجیح دارد. با شرایط زیر استفاده از یک سیستم پریکوت بر سیستم mixed-bed برتری دارد:

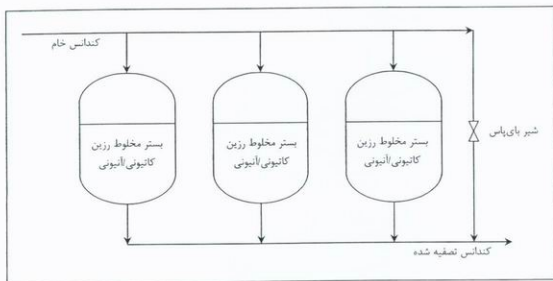
- استفاده از آب دمین برای خنک‌کردن
- وجود کندانسورهای تیتانیومی
- محدود بودن اپراتور و آموزش (احیای سیستم‌های mixed-bed یک سلسله احیای پیچیده بوده و مستلزم استفاده از مواد شیمیایی مخاطره آمیز سود و اسید می‌باشد)

- نیاز به راه‌اندازیهای سریع
- نیاز به افت کمتر فشار کندانس
- محدود بودن فضای واحد





شکل (۲): پالیشرهای پریکوت



شکل (۳): گروهی از پالیشرهای بستر مختلف

به صورت موازی در مدار قرار دارند. رزینهای مستعمل برای احیا و شستشو به یک سیستم خارجی منتقل می‌گردند. احیای خارجی یا انجام عمل احیای هر یک از رزینها در خارج از مخازن سیستم پالیشینگ عملی‌ترین روش برای احیا می‌باشد. ایزولاسیون مواد شیمیایی مورد استفاده برای احیا از آب چرخشی به طور قابل ملاحظه‌ای از ورود مواد شیمیایی مورد استفاده برای احیا در

متداولترین سیستم تبادل یونی که در پالیشینگ کندانس بکار برده می‌شود بستر مخلوطی از رزینهای اسیدی قوی و رزینهای بازی قوی می‌باشد. بسترهای مختلف، آب بسیار خالصی تولید می‌کنند و هر گونه نشستی یون از هر یک از رزینها به سرعت به وسیله سایر رزینها حذف می‌گردد. در اغلب موارد یک سیستم پالیشر کندانس بستر مخلوط شامل چندین مخزن می‌باشد که

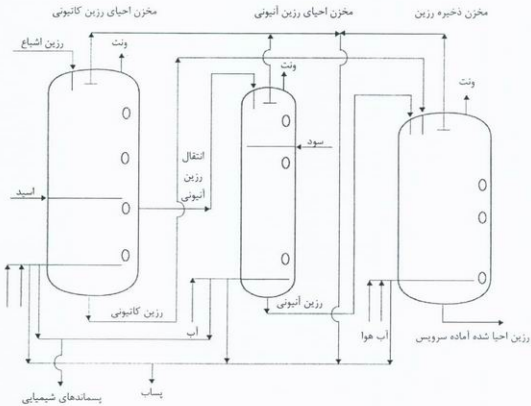


کندانس می‌کاهد، همچنین زمانی که پالیشر کندانس خارج از سرویس است را نیز کاهش می‌دهد. تنها وقفه، زمانی است که صرف انتقال رزینهای اشباع به سیستم احیای خارجی و انتقال رزینهای احیاشده از سیستم احیای خارجی به مخازن سرویس می‌شود. یک سیستم احیای خارجی برای سرویس دادن به چندین مخزن پالیشر کفایت می‌کند. یک نوع سیستم احیا در شکل (۴) نشان داده شده است. این سیستم معمولترین سیستم در آمریکای شمالی بوده و شامل مراحل اساسی ذیل می‌باشد:

۱- رزینهای اشباع به طور کامل از مخازن سرویس به سیستم احیا منتقل می‌شوند.

- ۲- رزینها از ذرات معلق که به وسیله فرایند فیلتراسیون حذف شده‌اند، تمیز می‌گردد.
- ۳- رزینهای کاتیونی و آنیونی برای احیا به طور کامل از هم جدا می‌شوند
- ۴- هر یک از رزینها به طور مستقل با استفاده از مواد شیمیایی مناسب احیا می‌گردند.
- ۵- رزینها به طور کامل با استفاده از آب بدون یون آبکشی می‌شوند.
- ۶- رزینها با دقت با هم مخلوط می‌گردند.
- ۷- رزینها به مخزن سرویس انتقال می‌یابند.

برای انجام این مراحل طی سالیان متمادی سیستمهای زیادی برای انتقال و جداسازی رزینها گسترش یافته‌اند.



شکل (۴): یک سیستم احیای خارجی نمونه



براساس نوع کاربرد از نسبت‌های مختلف رزین کاتیون به آنیون استفاده می‌گردد. این نسبت در برخی موارد به صورت نسبت حجمی، وزنی یا نسبت اکی‌والانی بیان می‌شود. انتخاب نسبت مناسب بستگی به نوع چرخه و منبع آب خنک‌کن کندانسور دارد. در جدول (۱) نمونه‌هایی از نسبت‌های مختلف رزینهای کاتیونی به آنیونی که برای پالیشینگ کندانس استفاده می‌شود، داده شده است.

۳- بهره‌برداری یا استفاده از چرخه هیدروژنی

معمولترین روش پالایش کندانس استفاده از سیستم mixed-bed می‌باشد. رزین کاتیونی می‌تواند به فرم H^+ یا NH_4^+ باشد. در صورت استفاده از رزین کاتیونی با فرم H^+ پایان کار با نشستی آمونیاک مشخص می‌گردد. این رزین، آمونیاک (که بار اصلی کندانس می‌باشد) را نیز حذف می‌کند و هر چه pH کندانس بالاتر باشد بار رزین کاتیونی نیز بیشتر می‌شود. در صورت وجود نشستی کندانسور (در واحدهایی که از آب دریا استفاده می‌کنند) بار یونی رزین کاتیونی افزایش می‌یابد. بهره‌برداری در چرخه هیدروژنی به این معنی است که رزین کاتیونی در بستر مختلط همیشه ظرفیت تبادل هیدروژنی داشته باشد. زمانی که کاتیونهای

نظیر سدیم با رزین مبادله می‌شوند، یون هیدروژن آزاد می‌گردد و اسید مربوطه HCl تشکیل می‌شود که در اثر تبادل با رزین آنیونی، یونهای هیدروکسید آزاد می‌شود. یونهای هیدروژن و هیدروکسید آزاد شده تشکیل مولکول آب می‌دهند و به این ترتیب آب خروجی فوق‌العاده خالص بدست می‌آید. در هنگام استفاده از رزیم شیمیایی AVT (استفاده از مواد قلیایی کننده فرار) بار روی رزین کاتیونی در حدود ۱ ppm می‌باشد که در شرایط نرمال بسیار بزرگتر از غلظت مواد آلاینده کندانس (مثلا سدیم) در حالت پایدار می‌باشد. آمینی که در رزیم شیمیایی AVT استفاده می‌شود با گروه عاملی رزین کاتیونی مبادله می‌گردد. به منظور افزایش زمان سرویس پالیشر کندانس در چرخه هیدروژنی از نسبت رزین کاتیون به آنیون ۲ به ۱ استفاده می‌شود. افزایش زمان سرویس باعث کاهش فرکانس احیا و کاهش هزینه‌های مربوط به آن یعنی هزینه مواد شیمیایی، نیروی کار و دفع پساب می‌شود. اگر از آب خنک کن با TDS زیاد نظیر آب دریا استفاده شود برای حفاظت در مقابل آنیونهای ورودی ممکن است لازم باشد درصد رزین آنیونی را در بستر مختلط افزایش دهیم.

جدول (۱): استفاده از نسبت‌های مختلف رزین کاتیونی به آنیونی برای پالیشینگ کندانس

نسبت حجمی کاتیون به آنیون	نسبت اکی‌والان کاتیون به آنیون	نوع واحد	توضیح
۲ به ۱	۱:۱	راکتور هسته‌ای آب جوشان	سیکل هیدروژنی با pH خنثی
۱ به ۱	-	راکتور هسته‌ای آب فشاردار	چرخه هیدروژنی با pH قلیایی
-	-	راکتور هسته‌ای آب فشاردار	برای واحدهایی که از آب دریا برای خنک‌کاری استفاده می‌کنند.

۴- بهره‌برداری در چرخه آمونیاکی

برای تصفیه داخلی آب تغذیه بویلر به آن آمونیاک اضافه می‌شود تا pH افزایش یابد، همچنین برای حذف اکسیژن، هیدرازین افزوده می‌شود. آمونیاکی که برای افزایش pH به آب اضافه می‌شود بار اصلی رزین کاتیونی در فرم H^+ را تشکیل می‌دهد و هر چه این pH بیشتر باشد بار رزین کاتیونی نیز بیشتر خواهد بود. یکی از معایب آن این است که فرکانس احیای مخزن بستر مخلوط را افزایش می‌دهد.

یکی از روشهای کاهش هزینه بهره‌برداری در یک سیستم با رژیم شیمیایی AVT استفاده از فرم آمونیاکی رزین کاتیونی می‌باشد. زمانی که در سیکل آمونیاکی بهره‌برداری شود، شیمی تبادلیون از H^+/OH^- به NH_4^+/OH^- شیفت می‌یابد. در این چرخه یون آمونیم رزین کاتیونی با یونهای آلاینده مبادله می‌گردد. با استفاده از سیکل آمونیمی دیگر آمونیاک موجود در کندانس به وسیله رزین حذف نمی‌گردد ولی کاتیونهای مضر مثل سدیم توسط رزین حذف می‌شود.

هر چند که گزینش‌پذیری رزین کاتیونی برای آمونیم و هیدروژن بسیار اندک است به طریقی محتوی سدیم رزین باید در غلظت بسیار پایینی نگه داشته شود تا سدیم در آب خروجی از فیلتر به اندازه مطلوب کم باشد. pH خروجی یک مخزن بستر مختلط، با رزین کاتیونی در فرم آمونیاکی بین ۹ تا ۹/۶ می‌باشد.

۵- سیستم پریکوت، استفاده از رزینهای

تبادل یونی پودری

سیستم پریکوت اولین بار در سال ۱۹۶۲ به وسیله شرکت گراور (Graver) اختراع گردید. در این روش از رزینهای تبادل یونی که به صورت پودرهای ریزی آسیاب شده است،

استفاده می‌شود. این رزینهای پودری یکبار مصرف بوده و به صورت پوششی بر روی فیلترها بکار برده می‌شود. با استفاده از این سیستم دیگر نیازی به احیا نمی‌باشد. فیلم نازکی از رزینهای کاتیونی و آنیونی بر روی سطح خارجی یک سیلندر تو خالی تشکیل می‌گردد و کندانس با عبور از رزینهای تبادل یونی تصفیه می‌گردد.

اندازه ذرات رزینهای پودری تقریباً ۳۰ میکرون می‌باشد و زمانی که رزینهای کاتیونی و آنیونی با هم مخلوط شوند یک توده حجیم تشکیل می‌شود که مشخصات این توده با تغییر نسبت رزین کاتیونی/ آنیونی متغیر است. برای پوشش‌دادن بر روی فیلتر کارتریج، توده رزین وارد مخزن کارتریج فیلتر می‌گردد و تا زمانی که پوشش مطلوب بدست آید آب، سیرکوله می‌گردد و بعد از آن فیلتر درون سرویس قرار می‌گیرد تا زمانی که افت فشار از حد مشخصی بالاتر رود یا رزینها اشباع گردند. این پوشش مقاومت کمی در برابر جریان دارد و اختلاف فشار متداول برای یک پریکوت تازه بین ۰/۱ تا ۰/۲ بار می‌باشد. زمانی که پایان کار پریکوت رسید رزینهای استفاده شده با استفاده از جریان آب در جهت معکوس جدا شده و دفع می‌گردند. رزین پودری کاتیونی در فرمهای H^+ و NH_4^+ موجود می‌باشند ولی رزین آنیونی تنها به فرم OH^- می‌باشد. رزینها هم به صورت از پیش مخلوط شده با نسبتهای مختلف و هم به صورت مجزا موجود می‌باشند. همانگونه که انتظار می‌رود رزینهای پودری دارای قابلیت عالی فیلتراسیون می‌باشند و حتی در شرایط وجود ذرات معلق زیاد در ورودی، کیفیت آب تصفیه شده خروجی بسیار بالا است.

با این وجود در زمانهایی مثل زمان راه‌اندازی می‌توان به جای رزینهای یونی از الیاف سلولز



جرم). یک سیکل واسط حرارت را از چرخه بخار به مخزن آب داغ کندانسور دفع می‌کند. این سیکل واسط معمولاً جدا از سیکل توان نیست و نقطه تماس این دو سیکل، کندانسور مستقیم پاششی می‌باشد.

آب خنک سیکل واسط از طریق نازل‌هایی درون کندانسور پاشیده می‌شود که فیلم‌های نازکی از آب تشکیل می‌گردد و با بخار بصورت جریان مخالف برخورد می‌کند و تراکم در سطح این فیلم‌ها اتفاق می‌افتد. معمولاً دبی آب سیکل خنک‌کن در حدود ۵۰ برابر دبی سیکل توان می‌باشد. توان مورد نیاز برای گردش آب در این نوع سیستم نصف توان مورد نیاز برای فن‌های کندانسورهای هوایی (ACC^2) می‌باشد. آب گرم شده سیکل واسط، گرما را از طریق فن‌های صفحه ای تک فلزی (آلومینیم)، مبدل‌های حرارتی آب به هوا که به صورت ستون‌هایی عمودی به شکل V (دل‌تاه) پیرامون پایه برج، به هوا دفع می‌کند. این سیستم خنک‌کن بیشتر در کشورهای مجارستان، ایران، ترکیه، سوریه، انگلستان و آلمان معمول می‌باشد. سیستم خنک‌کن هلر برای هر واحدی که در رژیم شیمیایی آن محدوده pH بین ۷ تا ۸/۵ می‌باشد مناسب است.

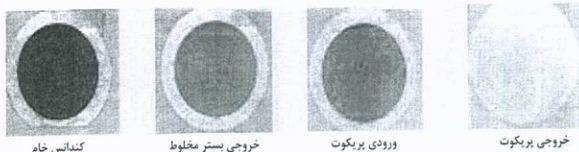
استفاده نمود. بازده سیستم‌های پریکوت برای جداسازی محصولات خوردگی نسبت به سیستم‌های بستر مخلوط بیشتر است. بازده جداسازی سیستم بستر مخلوط برای اکسید سیاه آهن (مگنتیت Fe_3O_4) معمولاً ۹۰ درصد و برای جداسازی اکسیدهای زرد و قرمز (Fe_2O_3) ۵۰ درصد می‌باشد. با استفاده از سیستم‌های پریکوت بازده جداسازی برای کلیه اکسیدها بیش از ۹۵ درصد می‌باشد.

در شکل (۵) قابلیت جداسازی زنگ سیستم بستر مخلوط و پریکوت با استفاده از فیلترهای میلی‌پور مقایسه شده است. قابلیت عالی فیلترهای پریکوت برای حذف محصولات خوردگی ($Crud^1$) در مقایسه با سیستم بستر مخلوط رزین‌های دانه‌ای کاملاً مشخص می‌باشد.

۶- پالیشینگ کندانس در نیروگاه‌های

سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کن خشک هلر

سیستم خنک‌کن غیر مستقیم خشک هلر در اوایل دهه ۱۹۵۰ بعنوان اولین سیستم خنک‌کن خشک برای چرخه رانکین ابداع گردید. هدف اصلی این سیستم استفاده از هوای محیط بعنوان چاله گرمایی برج خنک‌کن با مکش طبیعی می‌باشد (مشابه برج‌های خنک‌کن‌تر هذلولی شکل اما بدون انتقال



شکل (۵): نمونه‌های میلی‌پور قبل و بعد از بستر مخلوط و پریکوت

1- Corrosion Residual and Unknown Deposits
Air Cooled Condenser

خوردگی آهن با افزایش pH کاهش می‌یابد. نیروگاهها با بویلرهای یک طرفه تنها می‌توانند از رژیم شیمیایی AVT استفاده کنند. اما بویلرهای درام‌دار معمولاً نیاز به استفاده از مواد قلیایی‌کننده فرار نیز دارند. آمونیاک متداولترین ماده قلیایی‌کننده فراری است که استفاده می‌شود.

خوردگی آهن در لوله‌های کربن استیل و فولادهای آلیاژی در pH حول ۹/۵ به حداقل می‌رسد. در سیکلهای ترکیبی که از برجهای خنک‌کن خشک هلر با مبدلهای حرارتی آلومینیم استفاده می‌کنند به علت اینکه فلز آلومینیم در مقابل شرایط قلیایی ضعیف می‌باشد و خوردگی آن افزایش می‌یابد باید pH آب خنک‌کن در محدوده ۷/۷ تا ۸/۳ تنظیم گردد تا از خوردگی آلومینیم جلوگیری شود. از طرف دیگر pH بویلر با استفاده از آمونیاک یا هیدرازین تا ۸/۳ و با استفاده از مواد قلیایی‌کننده جامد نظیر فسفات سدیم تا ۹/۵ افزایش می‌یابد تا از خوردگی عناصر آهنی بویلر نیز جلوگیری شود.

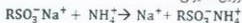
در صورتیکه pH بویلر با استفاده از مواد قلیایی‌کننده فرار بیشتر از ۸/۳ شود منجر به افزایش pH کندانس و در نتیجه افزایش pH آب گردش خنک‌کن شده و خوردگی آلومینیم افزایش می‌یابد. سیستم متداول پالیشر کندانس برای نیروگاههای سیکل ترکیبی با برج خنک‌کن خشک هلر سیستم بستر مخلوط رزینهای دانه‌ای می‌باشد و رزین کاتیونی باید در فرم هیدروژنی باشد. در این صورت pH کندانس بعد از واحد پالیشر کندانس به علت حذف آمونیاک کاهش می‌یابد که باید به وسیله تزریق هیدرازین یا آمونیاک بعد از پالیشر کندانس این افت pH جبران شود. همچنین سیستم پریکوت با استفاده از

رزین در فرم هیدروژنی نیز به علت اینکه این رزین، آمونیاک را حذف خواهد نمود و ظرفیت رزین بسیار محدود می‌باشد، متداول نیست. هیچ گونه مرجعی برای استفاده از رزینهای دانه‌ای به فرم آمونیم یا استفاده از رزینهای پودری به فرم آمونیم برای این نیروگاهها وجود ندارد.

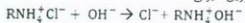
طراحی واحد پالیشر کندانس نیروگاه سیکل ترکیبی یزد به صورت سیستم پریکوت با استفاده از رزین پودری Finex 767N می‌باشد. این رزین، مخلوط آماده‌ای از رزینهای کاتیونی و آنیونی با نسبت ۲ به ۱ و رزین کاتیونی آن در فرم آمونیم می‌باشد. بعد از راه اندازی سیستم پالیشر کندانس و در سرویس قرار گرفتن آن pH خروجی کندانس تا حدود ۹ افزایش یافت که این امر باعث افزایش pH بخار و کندانس و نهایتاً افزایش pH آب خنک‌کن گردید. در نتیجه، این افزایش pH باعث افزایش سریع غلظت آلومینیم گردید تا حدی که پالیشر کندانس اجباراً بای پاس گردید.

واکنشهای انجام شده برای پالیشینگ کندانس با استفاده از فرم آمونیمی رزین کاتیونی در بستریهای رزینهای دانه‌ای یا رزینهای پودری به صورت ذیل است:

رزین کاتیونی



رزین آنیونی



pH خروجی رزین بستگی به میزان تبادل ناخالصی با رزین به علت تشکیل آمونیاک بیشتر از pH ورودی رزین می‌باشد.

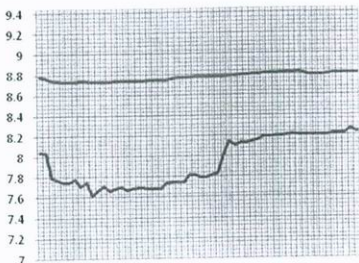


جدول (۲): مشخصات کندانس نیروگاه سیکل ترکیبی یزد با سیستم خنک کن خشک مستقیم هلر

پارامتر	واحد	مقدار
کنداکتیویته مستقیم در ۲۵°	μS/cm	۰/۲-۱/۰
کاتیون کنداکتیویته در ۲۵°	μS/cm	۰/۲ >
pH کندانس در ۲۵°	μS/cm	۸/۰-۸/۳
سدیم (Na)	ppb	۹ >
آلومینیم (Al)	ppb	۱۰
آهن کل (Fe)	ppb	۲۰ >
آمونیاک (NH ₃)	ppb	۱۰-۵۰
سیلیس (SiO ₂)	ppb	۲۰ >

معمولاً در مشخصات این نوع رزینها اشاره‌ای به pH نشده است و ذکر گردیده که pH خروجی با pH ورودی برابر می‌باشد (به جز مقدار کمی افزایش به علت تبادل یونهای سدیم)، اما در تجربه عملی مشاهده شده که pH خروجی پالیشر کندانس به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از pH ورودی می‌باشد. روند تغییرات pH ورودی و خروجی رزین پودری

Finex 767N که یک رزین پیش مخلوط شده‌ای از رزین کاتیونی و آنیونی به نسبت ۲ به ۱ می‌باشد و رزین کاتیونی آن به فرم آمونیم است، در نمودار (۱) نشان داده شده است. منحنی پایینی مربوط به pH کندانس ورودی CPP و منحنی بالایی pH خروجی سیستم پریکوت با استفاده از رزینهای Finex 767N می‌باشد.



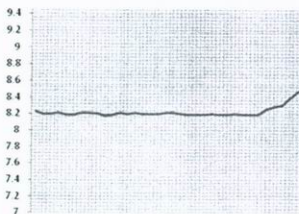
نمودار (۱): تغییرات pH ورودی (کندانس توربین) و خروجی رزین پودری Finex 767N



سرویس یک افت pH نشان می‌دهد که به علت تجزیه مقداری از رزینهای کاتیونی می‌باشد و نشان دهنده تبدیل مقداری از رزین آمونیمی به فرم هیدروژنی است. بعد از گذشت مدتی، pH رزین افزایش و از pH کندانس نیز فراتر می‌رود. لذا نتیجه‌ای که گرفته می‌شود این است که مسأله افزایش pH کندانس با استفاده از رزین Finex 767N مربوط به رزین کاتیونی آن می‌شود و نتیجه تبادل یون می‌باشد. مخلوط رزین پودری فرم آمونیمی با رزین پودری فرم هیدروژنی نیز رفتاری شبیه نمودار (۳) نشان می‌دهد که نشان دهنده این است که ابتدا فرم هیدروژنی رزین وارد واکنش شده و بعد از اشباع شدن آن رزین فرم آمونیمی وارد عمل می‌گردد و pH خروجی آن نیز همانند قبل افزایش می‌یابد و خارج از محدوده مجاز برای عناصر آلومینیومی برج خنک‌کن هلر می‌باشد. روند تغییرات pH قبل و بعد از فیلتر پریکوت با استفاده از رزین کاتیونی خالص در نمودار (۳) نشان داده شده است. همچنین روند تغییرات pH مخلوطی از رزینهای پریکوت به فرم آمونیمی و فرم هیدروژنی در نمودار (۴) داده شده است.

همچنین روند تغییرات pH سیستم خنک‌کن هلر قبل و بعد از در سرویس قرار گرفتن پالیشر کندانس در نمودار (۲) نشان داده شده است. قبل از راه‌اندازی پالیشر کندانس pH سیستم خنک‌کن در محدوده مجاز بین ۷/۷ تا ۸/۳ قرار داشت ولی همزمان با قرار گرفتن پالیشر کندانس در سرویس pH سیستم خنک‌کن نیز افزایش یافت و از محدوده مجاز فراتر رفت و منجر به افزایش غلظت آلومینیم گردید. این افزایش pH مربوط به آزاد شدن آمونیاک از پالیشر کندانس می‌شود که بعد از ورود به بویلر وارد بخار و کندانس گشته و نهایتاً وارد آب خنک‌کن سیستم هلر می‌شود. همانگونه که از نمودار (۲) مشخص شده است pH بهره‌برداری سیستم خنک‌کن با قرار گرفتن CPP در مدار از ۷/۷-۸/۳ به حدود ۹ افزایش می‌یابد.

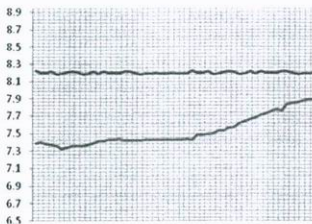
برای یافتن علت اصلی افزایش pH آزمایشی با استفاده از یک پریکوت کاتیونی خالص انجام گرفت و تغییرات pH خروجی آن ثبت گردید. pH خروجی این رزین نیز به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از pH ورودی آن و خارج از محدوده مجاز برای عناصر کولینگ آلومینیومی می‌باشد. این رزین در ابتدای



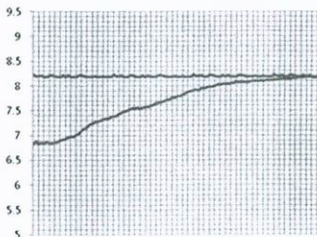
نمودار (۲): تغییرات pH آب سیستم خنک‌کن هلر قبل و بعد از در سرویس قرار گرفتن پالیشر

کندانس با استفاده از رزین Finex 767N





نمودار (۳): نمودار تغییرات pH کندانس پس از عبور از فیلتر پریکوت با رزین کاتیونی پودری فرم آمونیمی خالص



نمودار (۴): نمودار تغییرات pH کندانس پس از عبور از مخلوط ۱:۱ رزین HOH با رزین کاتیونی NH₄

۷- رفتار تبادل یونی آلومینیم و آهن

رزینهای پریکوت قادر هستند تا هیدروکسیدهای کلونیدی فلزات نظیر $Al(OH)_3$ و $Fe(OH)_3$ را از کندانس جذب کنند، که در غیر اینصورت به عنوان نقاط شروع خوردگی عمل می‌کنند. آلومینیم بر خلاف آهن یک فلز آفوتر است و در pHهای

خنثی به شکل هیدروکسید آلومینیم وجود دارد. به علت ماهیت آفوتر آلومینیم، در pHهای بالا هیدروکسید آلومینیم با یون هیدروکسید ترکیب شده و آلومینات را تشکیل می‌دهد. در pHهای بالا آلومینیم به صورت $Al(OH)_4^-$ و از طریق تبادل یونی جذب رزین می‌گردد.



در pHهای بالا:



و برای آهن :



استفاده نمود و تنها گاهی اوقات برای حذف بار یونی کندانس از رزین فرم هیدروژنی استفاده می‌شود. لذا توصیه می‌گردد در مشخصات فنی این رزینها به این نکته اشاره گردد که این نوع رزین صرفاً برای کندانسهایی که pH آنها در محدوده ۹/۲ تا ۹/۶ هستند مناسب می‌باشند. ارتباط بین pH و غلظت برای آمونیاک و CO₂ در شکل (۶) نشان داده شده است. برای هر غلظت آمونیاک یک pH مشخص وجود دارد که می‌توان آنرا با استفاده از داده‌های کنداکتیویته و تفکیک محاسبه نمود. به این دلیل که اندازه‌گیرهای کنداکتیویته بسیار معتبرتر از داده‌های اندازه‌گیری pH آب فوق خالص می‌باشد، از اندازه‌گیرهای کنداکتیویته برای کنترل غلظت آمونیاک در آب تغذیه بویلر استفاده می‌گردد.

۸- نتیجه گیری

در انتخاب سیستم پالیشینگ کندانس دو موضوع اساسی مطرح می‌گردد: یکی انتخاب سیستم بستر مخلوط یا سیستم پریکوت و دیگری موضوع انتخاب فرم رزین کاتیونی که به صورت آمونیمی یا هیدروژنی می‌باشد. هر چند که بهره برداری از پالیشر کندانس با استفاده از رزینهای دانهای در فرم آمونیاکی یا با استفاده از سیستم پریکوت در فرم آمونیاکی نسبت به بهره‌برداری در سیکل هیدروژنی دارای مزایایی بوده و مواد شیمیایی مصرفی کاهش می‌یابد و دارای هزینه بهره‌برداری کمتری می‌باشند ولی این نوع پالیشرهای کندانس دارای محدودیتهایی نیز می‌باشند و برای همه انواع نیروگاهها مناسب نیستند. لذا در طراحی پالیشر کندانس برای یک نیروگاه باید در نظر گرفته شود. نیروگاههای سیکل ترکیبی که دارای سیستم

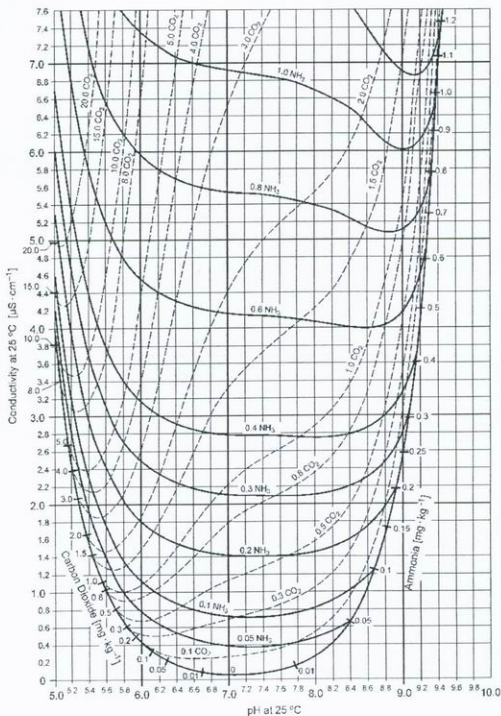
وجود CO₂ در آب کندانس می‌تواند باعث افزایش pH خروجی سیستم پالیشر کندانس با استفاده از رزین کاتیونی فرم آمونیمی گردد. دی‌اکسید کربن در آب به یونهای بیکربنات و هیدروژن تفکیک می‌گردد. یونهای بیکربنات توسط رزین آنیونی جذب شده و یون هیدروکسید آزاد می‌گردد و در خروجی پالیشر کندانس NH₄OH وجود خواهد داشت.

یکی دیگر از دلایل افزایش pH در خروجی فیلتر پریکوت با استفاده از رزینهای پودری فرم آمونیمی می‌تواند عدم فراوری مناسب رزین در مرحله شستشوی رزین بعد از عامل‌دار کردن رزین باشد. همچنین وجود CO₂ در کندانس می‌تواند با اشباع نمودن رزین آنیونی باعث افزایش pH گردد. با انجام آزمایش و شستشوی رزین و اندازه‌گیری تغییرات pH مشخص گردید که pH خروجی رزین در اثر شستشو، تغییرات محسوسی نشان نمی‌دهد و در نتیجه امکان شستشوی ناکافی رزین رد گردید. با انجام محاسبات تئوری میزان آمونیاک آزاد شده در اثر تبادل یون می‌تواند باعث افزایش pH کندانس تا ۸/۶ گردد. این نوع سیستم پالیشر کندانس برای این نوع نیروگاهها مناسب نمی‌باشد و یک محاسبه ساده نشان می‌دهد که pH خروجی این نوع رزین در بهترین شرایط نمی‌تواند کمتر از ۸/۵ باشد. به این علت اجباراً نوع رزین را تغییر داده و از رزین فرم هیدروژنی استفاده می‌گردد که این رزین نیز به علت حذف آمونیاک که بار اصلی کندانس می‌باشد، در یک دوره پریکوت بیش از ۳ روز کار نمی‌کند و با استفاده از این رزین هزینه بهره‌برداری و هزینه خرید رزین به شدت افزایش می‌یابد و مقرون به صرفه نمی‌باشد. در نهایت اجباراً تنها با استفاده از رزین غیرفعال از سیستم پریکوت می‌توان



یکی می‌باشند ضرورتی به استفاده از تبادل یون در این نیروگاهها وجود ندارد و تنها با استفاده از یک رزین بی‌اثر می‌توان وظیفه اصلی CPP، که حذف محصولات خوردگی است، را انجام داد.

خنک‌کن غیر مستقیم هار می‌باشند از جمله نیروگاههایی هستند که نمی‌توانند با استفاده از فرم آمونیمی بهره‌برداری گردند. البته به دلیل اینکه در این نوع نیروگاهها آب خنک‌کن هم از درجه خود کندانس بوده و در حقیقت



شکل (۶): نمودار کندانسیویته در مقابل pH محلولهای آمونیاک و دی‌اکسید کربن در آب فوق خالص
(مندرج در Power Plant Chemistry 2005,7(4),214-218)



مراجع

- 1- David M. Gray, pH and CO₂ Determinations Based on Power Plant Conductivity Measurements, Power Plant Chemistry 2005,7(4),214-218.
- 2- Personal communications with Dr. Hans Peter Koest, Finex Representative, Germany
- 3- Communication with Dr. Albert Bursik president of Power Plant Chemistry®
- 4- Personal Communication to Andras Balogh, president and CEO, EGI Contracting Engineering Co Ltd.
- 5- Personal communication to Michelangelo Altafin Technologic Supervisor, IDRECO
- 6- Michael A. Sadler, Ammonium Form Operation of Condensate Polishing Plants-Position and Possible Developments, Power Plant Chemistry, 2001, 3(10).

آقای حسین حق پرست دارای فوق لیسانس مهندسی شیمی از دانشگاه صنعتی شریف بوده و جمعاً ۵ سال سابقه کار دارد. ایشان در حال حاضر کارشناس ارشد شیمی دفتر فنی شرکت مدیریت تولید برق یزد می باشد. زمینه علاقمندی آقای حق پرست روشهای مختلف تصفیه آب می باشد.

hhaghpast@yahoo.com

نگارنده از حمایت و مساعدت جناب آقای مهندس منوچهر نوذری، مدیریت محترم عامل شرکت مدیریت تولید برق یزد سپاسگزاری می نماید.



سوزاندن زباله جامد شهری و استحصال انرژی از آن (قسمت دوم)

علیرضا شفیعی ده آباد

کارشناس ارشد مکانیک - مدیریت ارشد مهندسی نیروگاههای بخار و انرژیهای نو

چکیده

در قسمت اول این مقاله (که در شماره قبل به چاپ رسید)، کلیاتی در خصوص تاریخچه زباله‌سوزی و جایگاه آن در مدیریت زباله‌های جامد شهری، وضعیت استحصال انرژی از آن، ماهیت زباله جامد شهری و ویژگیهای آن به عنوان یک سوخت جامد، فن‌آوریهای استحصال انرژی از زباله، ملاحظات در خصوص امکان‌سنجی استفاده از زباله برای تولید انرژی، پیش‌بینی مقدار و ترکیب زباله و تعیین ارزش حرارتی و محتوای رطوبت آن، شرح فرآیند زباله‌سوزی، شرح کار و اجزاء یک واحد زباله‌سوزی و انواع زباله‌سوزها ارائه گردید.

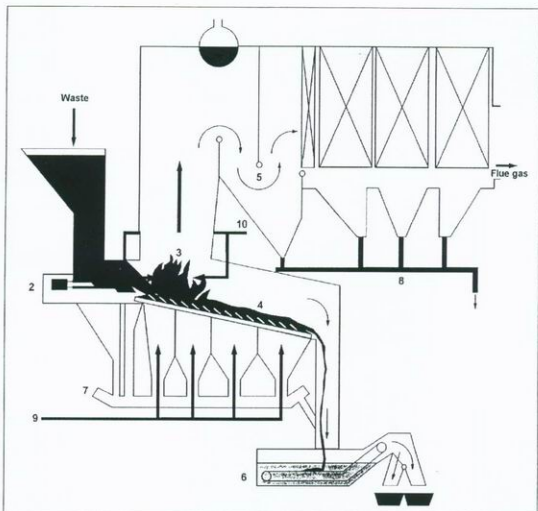
در این قسمت بیشتر به جزئیات زباله‌سوزهای توده‌سوز از نوع شبکه‌ای، که متداول‌ترین نوع زباله‌سوزها می‌باشند پرداخته شده است. ویژگیها و شرایط کوره و محفظه احتراق، وضعیت بویلر و سطوح انتقال حرارت آن، علل و عوامل خوردگی لوله‌های بویلر، نحوه حفاظت سطوح انتقال حرارت بویلر در مقابل خوردگی، چرخه بخار و تولید انرژی الکتریکی و میزان بازده استحصال انرژی از زباله، مباحث مطرح شده در این قسمت می‌باشند.

۱۵- فن‌آوری توده‌سوز با دیواره‌های آبی

اکثر واحدهای زباله‌سوزی زباله‌های جامد شهری در سراسر دنیا، از نوع توده‌سوز با دیواره‌های آبی می‌باشند. در این زباله‌سوزها، زباله جامد شهری در یک کوره از نوع شبکه متحرک سوزانده می‌شود. زباله جامد شهری پردازش نشده از طریق شوتر یا قیف تغذیه و توسط یک سیستم تغذیه پیستونی به داخل محفظه احتراق رانده شده، روی شبکه قرار می‌گیرد. شبکه یکی از مهمترین اجزاء زباله‌سوز است که بر روی آن زباله خشک شده و می‌سوزد. گازهای داغ حاصل از احتراق با عبور از نواحی تابشی (محفظه احتراق و مسیر عبور گازها) و همرفت^۱ (محل قرارگیری

سوپرهیترا، اکونومایزر و گاهی هم، تبخیرکننده^۲) بویلر و انتقال حرارت به آب/بخار، تولید بخار خشک با دما و فشار بالا می‌نمایند. گازهای سرد شده، پس از عبور از تجهیزات کنترل آلودگی هوا، از طریق دودکش به اتمسفر تخلیه می‌شوند. خاکستر برجامانده از سوختن زباله نیز، از انتهای شبکه به داخل وان خاکستر^۳، جایی که در آن با آب سرد می‌شود، تخلیه می‌گردد. اساس کارکرد یک زباله‌سوز از نوع توده سوز با دیواره آبی در شکل (۸) نشان داده شده است.

- 1- Convection
- 2- Evaporator
- 3- Ash Bath



شکل (A): طرح شماتیک زیاله‌سوز شبکه‌ای با بازیافت حرارت [۱۳]

۱) شوتر تغذیه زیاله (۲) سیستم تغذیه زیاله (۳) ناحیه اشتعال زیاله (۴) ناحیه زیاله‌سوزی اصلی (۵) جداکننده ذرات معلق (۶) وان و سیستم تخلیه خاکستر (۷) سیستم حذف ذرات فروریزنده از شبکه (و تخلیه به سیستم خاکستر زیرین) (۸) تخلیه خاکستر بویلر (۹) تأمین هوای اولیه (۱۰) تأمین هوای ثانویه

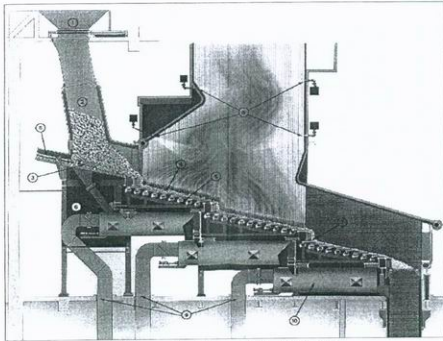
به سقف و یا سطوح حرارتی بویلر محدود می‌گردد. محفظه احتراق می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد تا قبل از آنکه گازهای فرار این محل را ترک کنند، فرایند احتراق آنها کامل گردد.

محفظة احتراق شامل کوره، که مواد جامد و بخشی از گازهای فرار قابل احتراق در آن می‌سوزند و ناحیه تابشی بعد از کوره، که باقیمانده گازها در آن می‌سوزند می‌باشد. محفظه احتراق در حقیقت بخشی از بویلر تلقی می‌گردد.

۱۵-۱- کوره و محفظه احتراق

همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، فرایند احتراق در کوره و بر روی شبکه‌ها صورت می‌گیرد. اما از آنجایی که محتوای مواد فرار زیاله‌های جامد شهری معمولاً زیاد می‌باشد، با شروع احتراق، گازهای فرار خارج شده و تنها بخش اندکی از کل فرایند زیاله‌سوزی بر روی (ویا نزدیک) شبکه صورت می‌گیرد. محفظه احتراق (و یا محفظه زیاله‌سوزی)، در کل، فضایی است که از پایین به شبکه، از جوانب به دیواره‌های کوره و از بالا





شکل (۹): نمونه یک محفظه زباله‌سوزی [۱۷]

(۱) شوتر تغذیه (۲) گلوبی تغذیه (۳) سیستم تغذیه هیدرولیکی (۴) شبکه‌ها (۵) بلبرینگهای غلطک مخروطی (۶) سیلندره‌های قدرت سیستم هیدرولیکی و شیرهای کنترلی (۷) تغییر ارتفاع (برای چرخش زباله‌ها) (۸) نازل‌های تأمین هوای ثانویه (هوای روی آتش) (۹) کانال‌های تأمین هوای اولیه (هوای زیر آتش) (۱۰) سیستم اتوماتیک حذف ذرات فروریزنده از شبکه (و تخلیه به سیستم خاکستر زیرین)

طولانی‌تر بودن زمان ماند گازها در ناحیه اشتعال، و عبور آنها از ناحیه با دمای حداکثر است. برای سهولت اشتعال، هوای اولیه در این طرح، نیازمند اندکی پیش‌گرمایش است.

(۲) جریان مخالف یا معکوس^۱: در این طرح، جریان گازهای احتراق و جریان زباله در خلاف جهت یکدیگر بوده و خروجی گازهای حاصل از احتراق در ابتدای شبکه قرار دارد. مزیت این طرح آن است که، گازهای داغ حاصل از احتراق به خشک کردن زباله ورودی کمک می‌کند. ضمن آنکه می‌بایست با استفاده از هوای ثانویه بیشتر، از خروج جریان گازهای نسوخته ممانعت به عمل آورد.

شکل و اندازه شبکه، میزان اختلاط و همگن بودن گازهای حاصل از احتراق، زمان ماند لازم برای کامل شدن احتراق گازها، و حداکثر دمای مجاز گازها در خروج از محفظه احتراق، از عوامل مؤثر در طراحی محفظه احتراق می‌باشند.

بسته به جهت جریانهای زباله ورودی و گازهای حاصل از احتراق، سه طرح ذیل برای محفظه احتراق قابل تمیز است:

(۱) جریان هم جهت یا موازی^۱: در این طرح، جریان گازهای احتراق و جریان زباله هم جهت می‌باشند. بنابراین، همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، خروجی گازهای حاصل از احتراق در انتهای شبکه قرار می‌گیرد. به همین دلیل تبادل انرژی نسبتاً کمی بین گازهای حاصل از احتراق و زباله صورت می‌گیرد. مزیت این طرح،

1- Unidirectional Current
2- Counter Current

ورود به کوره، برای برقراری یک جریان یکنواخت تر می‌باشد. طراحی شوتر به گونه‌ای است که از بالا آمدن زباله و مسدود شدن مسیر آن جلوگیری گردد. علاوه بر این، شوتر مجهز به یک سیستم مکانیکی ممانعت از پس زدن آتش نیز می‌باشد.

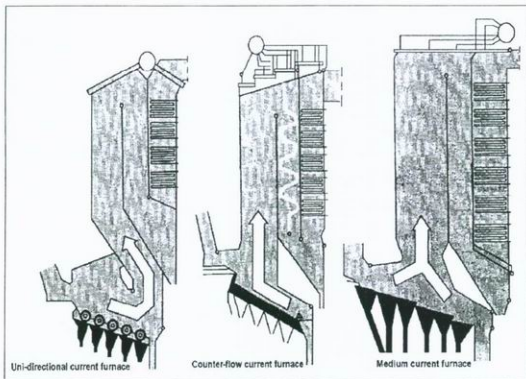
۱۵-۱-۲- شبکه

شبکه که یکی از مهمترین اجزاء زباله‌سوز می‌باشد، تشکیل شده از میله‌ها و یا تسمه‌های فلزی قابل حرکتی که زباله‌ها توسط آنها به داخل کوره رانده می‌شود. شبکه‌ها دارای طرحهای مختلفی می‌باشند که برخی از آنها به طور شماتیک در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

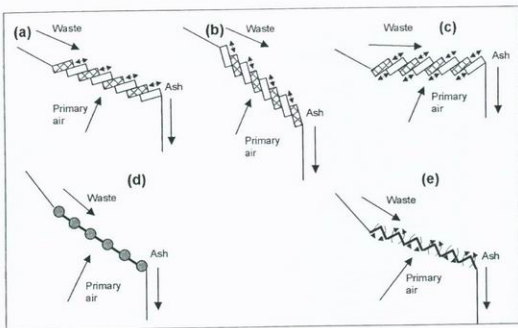
۳) جریان متوسط یا میانی^۱: در این طرح که با طیف وسیعی از زباله‌های ورودی (با توجه به تغییرات قابل ملاحظه ترکیب زباله‌جامد شهری) سازگار می‌باشد، خروجی گازهای حاصل از احتراق در وسط شبکه قرار دارد. در این طرح لازم است گازهای حاصل از احتراق، از طریق محیطهای اختلاط ساز و یا تزریق هوای ثانویه به خوبی مخلوط گردد.

۱۵-۱-۱- شوتر تغذیه

هدف از شوتر و یا کیف تغذیه، فراهم آوردن سدی در مقابل هوای داخل کوره، به منظور جلوگیری از پس زدن آتش؛ و همچنین فراهم ساختن امکان ذخیره موقت زباله، قبل از



شکل (۱۰): طرحهای گوناگون محفظه احتراق، بر حسب جهت جریانهای گازهای حاصل از احتراق و زباله ورودی [۱۲]



شکل (۱۱): طرح‌های مختلف شبکه [۱۸]

(a) شبکه فشار آورنده به سمت جلو (b) شبکه فشار آورنده به سمت عقب
(c) شبکه سرریز (d) شبکه غلطکی (e) شبکه باز و جمع شونده

طول کافی برخوردار باشد. شبکه‌ها نوعاً به طول ۷ تا ۱۰ متر بوده و پهنای آنها تا حدود زیادی به ظرفیت واحد زباله‌سوزی بستگی داشته و در واحدهای با ظرفیت بالا (بیش از ۲۵ تن بر ساعت) به بیش از ۱۰ متر نیز می‌رسد. [۱۵] شبکه باید قادر به فراهم ساختن یک احتراق مناسب، صرف‌نظر از تغییرات بالقوه در ترکیب و ارزش حرارتی زباله باشد. شبکه باید قادر به تمیز کردن خود در حین عمل بوده و به گونه‌ای طراحی گردد که تعمیرات و تعویض قطعات آن به سهولت انجام پذیرد. برای افزایش طول عمر شبکه، لازم است که دمای آن با خنک کردن، کنترل گردد. ماده خنک‌کننده می‌تواند هوا یا آب (و یا یک سیال دیگر) باشد. در شبکه‌های خنک شونده با هوا، هوا از زیر شبکه تأمین شده و از میان فضاهای موجود در شبکه عبور می‌نماید. کار اصلی این هوا فراهم ساختن اکسیژن لازم برای فرآیند اکسیداسیون بوده و مقدار آن نیز بر همین مبنا تعیین می‌گردد.

در واحدهای زباله‌سوزی جدید، عمدتاً از دو طرح شبکه پله‌ای شیب‌دار (طرح‌های a و b) و شبکه غلطکی شیب‌دار (طرح d) استفاده می‌شود. در هر دو طرح، زباله در حال سوختن به آهستگی بر روی شبکه به سمت جلو حرکت می‌کند. حضور پله‌ها و یا غلطکها امکان چرخش زباله را (که موجب اختلاط بهتر و کمک به فرآیندهای خشک کردن، گاززدایی و سوختن کامل است) فراهم می‌سازد. معمولاً شبکه شامل چند بخش می‌باشد. هدف اصلی از به کارگیری شبکه، اطمینان از هوادهی مناسب، اختلاط زباله و توزیع لایه زباله بر روی شبکه برای احتراق مناسب می‌باشد. با حرکت زباله بر روی شبکه به داخل کوره، به طور مقدماتی خشک شده، پیرولیز مواد صورت گرفته و گازهای فرار تبخیر و در بالای لایه زباله مشتعل می‌شوند؛ و در نهایت، اجزاء جامد در درونی‌ترین قسمت‌ها، بر روی شبکه مشتعل شده و می‌سوزند. برای اطمینان از احتراق کامل مواد، شبکه باید از

این هوا در عین حال، خنک کردن شبکه‌ها را نیز میسر می‌سازد. در شبکه‌های خنک شونده با مایع، سیال عامل (آب) درون مداری در داخل شبکه جریان می‌یابد. در مواردی که میزان خنک کردن شبکه با هوا محدود باشد، شبکه‌های خنک شونده با مایع، به سبب ظرفیت بالاتر مایع برای انتقال حرارت، گزینه‌ای مناسب‌تر به نظر می‌رسد؛ به ویژه، هنگامی که ارزش حرارتی زباله نسبتاً بالا (بالاتر از ۱۰ مگاژول بر کیلوگرم) باشد. [۱۵و۱۳]

۱۵-۱-۳- تأمین هوای احتراق

هوای احتراق هم از زیر شبکه (هوای اولیه) و هم از بالای آن (هوای ثانویه) تأمین می‌گردد. هوای اولیه (هوای زیر آتش) از زیر شبکه و توسط یک فن دمنده تأمین می‌شود. هوای ثانویه (هوای روی آتش) در بالای لایه زباله، از طریق نازلهایی که در دیوارهٔ محفظهٔ احتراق برای این منظور تعبیه شده است به محفظهٔ احتراق تزریق می‌گردد. برای اختلاط مناسب گازها و احتراق کامل گازهای فرار، تراز نسبتاً بالایی از هوای ثانویه (معمولاً حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد کل هوای احتراق [۱۳و۱۵]) مورد نیاز است. عیب عمدهٔ این مصرف زیاد هوا، بالا رفتن حجم گازهای حاصل از احتراق و در نتیجه، به هدر رفتن بخشی از انرژی با خروج گازها از طریق دودکش، و همچنین نیاز به یک بویلر حجیم، برای به کارگیری این گازها است. در برخی سیستمها، از بازچرخش ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی گازهای حاصل از احتراق به ورودی هوای ثانویه استفاده می‌کنند که این علاوه بر بهبود بازده بویلر، موجب کاهش اکسیدهای نیتروژن می‌گردد. [۱۳] گاز مورد استفاده برای بازچرخش، معمولاً از پایین دست فیلتر جاذب ذرات معلق گرفته می‌شود.

۱۵-۱-۴- پیش‌گرم‌کن هوا^۱

در صورت بالا بودن محتوای رطوبت زباله (و پایین بودن ارزش حرارتی آن)، به منظور کمک به خشک شدن و اشتعال بهتر زباله، از پیش‌گرم‌کن هوا برای گرم کردن هوای اولیه استفاده می‌شود. همچنین ممکن است برای بهبود بازده حرارتی بویلر نیز از پیش‌گرم‌کن هوا استفاده شود. در واحدهای زباله‌سوزی از نوع شبکه‌ای، معمولاً از بخار فشار پایین برای پیش‌گرم کردن هوا استفاده شده و از گازهای حاصل از احتراق، به علت نیاز به کانالهای پیچیده و مطرح بودن مسائل خوردگی استفاده نمی‌شود.

۱۵-۱-۵- مشعل کمکی^۲

برای اطمینان از حفظ دمای گازها در بالاتر از ۸۵۰ درجهٔ سانتیگراد، هر واحد زباله‌سوز می‌بایست مجهز به حداقل یک دستگاه مشعل کمکی باشد. طراحی سیستم باید به گونه‌ای باشد که با پایین‌تر آمدن دمای گازها (بعد از آخرین تأمین هوای احتراق) از ۸۵۰ درجهٔ سانتیگراد، مشعل کمکی به‌طور اتوماتیک به کار افتد. مشعل کمکی همچنین می‌بایست در هنگام راه‌اندازی و خاموش کردن واحد نیز، برای اطمینان از اینکه در طول این عملیات و تا زمانی که زباله‌های نسوخته در محفظهٔ احتراق باقی است، دما از ۸۵۰ درجهٔ سانتیگراد پایین‌تر نخواهد آمد، مورد استفاده قرار گیرد. [۱۴]

۱۵-۱-۶- تخلیهٔ خاکستر زیرین

در انتهای شبکه، خاکستر زیرین به داخل وان خاکستر، که در آنجا با آب سرد می‌شود، تخلیه

1- Air Pre-Heater
2- Auxiliary Burner



می‌گردد. طراحی وان به گونه‌ای است که از نشت هوای کوره به بیرون جلوگیری گردد. خاکستر سرد شده، پس از تخلیه از وان برای عملیات بعدی انبار می‌شود.

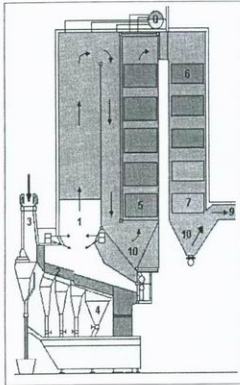
۱۵-۲- بویلر و سطوح انتقال حرارت

برای بازیافت انرژی حرارتی گازهای داغ حاصل از احتراق و تولید بخار (یا آب گرم)، عموماً از بویلرهای لوله‌ای (با جریان آب در داخل لوله‌ها) استفاده می‌شود. بخار (یا آب گرم) در مجموعه لوله‌هایی که در مسیر جریان گازها قرار دارند، تولید می‌شود. دیواره‌های کوره و محفظه احتراق، کانالهای عبور گازهای احتراق و به دنبال آن، فضایی که مجموعه لوله‌های تبخیرکننده و سوپرهیتر قرار می‌گیرند، معمولاً متشکل از لوله‌های محتوی آب طراحی می‌شوند.

در یک بویلر، سه سطح انتقال حرارت ذیل قابل تمیز است:

- اکونومایزر یا پیش گرم کن آب تغذیه (که در شکل (۱۲) با شماره ۷ مشخص شده است): در این محل آب تغذیه ورودی (به بویلر)، به وسیله گازهای حاصل از احتراق تا دمایی نزدیک به نقطه جوش حرارت داده می‌شود. این سطوح انتقال حرارت به صورت مجموعه لوله طراحی می‌گردد.
- تبخیرکننده (که در شکل (۱۲) با شماره ۶ مشخص شده است): در این محل آب ورودی از اکونومایزر (و یا درام) تا رسیدن به بخار اشباع حرارت داده می‌شود. این سطوح انتقال حرارت به صورت مجموعه لوله و دیواره‌های بویلر طراحی می‌شوند.
- سوپرهیتر (که در شکل (۱۲) با شماره ۵ مشخص شده است): در این محل بخار

اشباع ورودی از تبخیرکننده (و یا درام) تا درجه حرارت نهایی (مورد نظر) سوپرهیتر می‌شود. این سطوح انتقال حرارت به صورت مجموعه لوله و یا سطوح حرارتی طاق نما^۱ طراحی می‌گردد.



شکل (۱۲): سطوح مجزای انتقال حرارت در یک مولد بخار (بویلر) [۱۳]

دمای گازهای حاصل از احتراق در اولین مسیر عبور آنها (یعنی محفظه احتراق)، اغلب بین ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد است؛ هرچند گاهی به ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد. [۱۱] مطابق دستور العمل اتحادیه اروپا برای احتراق زیاده‌های جامد، درجه حرارت گازهای حاصل از احتراق، بعد از آخرین نقطه تزریق هوا، نباید کمتر از ۸۵۰ درجه سانتیگراد باشد. [۱۴] در محفظه احتراق و مسیر عبور

- 1- Water Tube Boiler
- 2- Tube Bundle or Tube Bank
- 3- Drum
- 4- Bulkhead Heating Surfaces





گازها، بخشی از حرارت گازهای حاصل از احتراق به دیواره‌های بویلر که متشکل از لوله‌های تبخیرکننده است منتقل می‌شود. و به این ترتیب درجه حرارت گازها کاهش یافته و در مواجهه با سوپرهیترها، به حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. [۱۱] گازها با عبور از لابلای مجموعه لوله‌های سوپرهیتر، تبخیرکننده و اکونومایزر، بخش اعظم حرارت خود را به بخار/ آب منتقل می‌نمایند. دمای گازها در خروج از بویلر و ورود به سیستم کنترل آلودگی هوا، به طور معمول، حدود ۱۶۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. [۱۰]

سرعت گازهای حاصل از احتراق در نواحی مختلف بویلر، از دیگر موارد حائز اهمیت در طراحی بویلر است. سرعت بالای گازها موجب سایش^۱ لوله‌های بویلر می‌گردد. بسته به تجارب سازنده، مصالح به کار گرفته شده، ریخت^۲ بویلر و دیگر عواملی از این دست، ممکن است سرعت گازها در نواحی مختلف بویلر از سازنده‌ای به سازنده دیگر تغییر کند. تعیین شرایط بخار خروجی از بویلر زباله‌سوز مستلزم یک سنجش و ارزیابی (سبک - سنگین کردن) است؛ چراکه افزایش درجه حرارت و فشار بخار، بهبود بازده استحصال انرژی از زباله را به دنبال دارد. اما در عین حال، منجر به افزایش قابل توجه ریسکهای خوردگی، به ویژه در سطوح سوپرهیتر و تبخیرکننده می‌گردد. در زباله‌سوزهای زباله جامد شهری، هنگامی که صرفاً تولید الکتریسیته مد نظر است، بخار خروجی، معمولاً با فشار ۴۰ بار و دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود. شرایط بالاتر بخار (تا فشار ۶۰ بار و دمای ۵۲۰ درجه سانتیگراد) نیز، به ویژه هنگام استفاده از زباله جامد شهری به صورت پیش‌پردازش شده و در قالب RDF، با به کارگیری تدابیر ویژه برای

جلوگیری از خوردگی، استفاده شده است. [۱۲] هنگامی که تولید حرارت مد نظر باشد، بخار فشار پایین و یا آب سوپرهیت^۳ (آب با دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد) تولید می‌شود. سیستمهای متداول جریان سیال در تبخیرکننده عبارتند از:

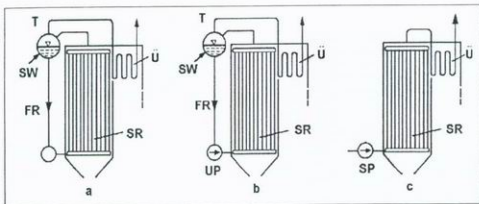
۱- سیستم با گردش طبیعی^۴: که در آن گردش آب / بخار در لوله‌های تبخیرکننده، ناشی از اختلاف دانسیته سیال در لوله‌های گرم شده و گرم نشده می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، مخلوط آب / بخار به یک درام منتهی می‌شود که در آنجا بخار از آب جدا شده، سپس، بخار اشباع به سوپرهیتر هدایت می‌شود.

۲- سیستم با گردش اجباری^۵: در این سیستم گردش سیال در تبخیرکننده، توسط یک پمپ گردش^۶ برقرار می‌شود.

۳- سیستم جریان پیوسته اجباری^۷ و یا بویلر یک جریان (یا یک سره)^۸: در این سیستم، آب تغذیه، تحت فشار و در یک جریان پیوسته، از میان اکونومایزر، تبخیرکننده و سوپرهیتر عبور داده می‌شود.

با توجه به پایین بودن شرایط بخار در بویلرهای واحدهای زباله سوزی (در مقایسه با بویلرهای نیروگاههای با سوخت فسیلی)، تقریباً در همه آنها از سیستم با گردش طبیعی استفاده می‌گردد. در این بویلرها، برای کنترل دمای بخار و حفظ آن در حد تعیین شده، معمولاً از اتمپریتور^۹

- 1- Erosion
- 2- Configuration
- 3- Superheated Water
- 4- Natural Circulation
- 5- Forced Circulation
- 6- Circulation Pump
- 7- Forced Continuous Flow
- 8- Once Through Boiler
- 9- Attemperator



شکل (۱۳): سیستم‌های اصلی جریان سیال در بویلر [۱۳]

(a) سیستم گردش طبیعی (b) سیستم گردش اجباری (c) سیستم جریان پیوسته اجباری
 T: درام، SW: آب تغذیه، FR: لوله پایین آورنده آب، SR: لوله‌های تبخیرکننده، \bar{U} : سوپر هیتر،
 UP: پمپ گردش آب و SP: پمپ آب تغذیه

تمیز کردن سطح خارجی لوله‌ها نقش مهمی در بهره‌برداری از این بویلرها ایفا می‌کند. سیستم‌های زداینده دوده^۲ بویلر با کمک بخار و یا هوا، متداول‌ترین سیستم‌های مورد استفاده برای این منظور می‌باشند. بخار اشباع، به سبب دانسیته بالاتر و قابلیت تمیزکنندگی بیشتر، ارجح‌تر است. عیب این سیستمها، امکان سایش و خوردگی موضعی در نقاطی است که مستقیماً در معرض جریان بوده و بیش از اندازه تمیز می‌شوند. این مشکل می‌تواند با نصب حفاظ بر روی لوله‌های نزدیک به زداینده‌های دوده، رفع گردد.

در واحدهای زباله‌سوزی طرح‌های مختلفی از بویلر (به صورت‌های افقی، عمودی و یا ترکیبی از آنها) مورد استفاده قرار می‌گیرد، که در شکل (۱۴) نمای شماتیک برخی از آنها نشان داده شده است. از نظر پروفیل دما، اختلاط گازها، سطوح انتقال حرارت و جدا شدن خاکستر معلق، هر طرح ویژگی‌های (مزایا و معایب) خاص خود را دارد. انتخاب بویلر بستگی به نوع زباله‌سوز و شرایط بخار مورد نظر دارد.

(یا خنک‌کننده پاششی^۱) استفاده می‌شود. وظیفه اتمپریتور متعادل نمودن تغییرات درجه حرارت بخار است؛ تغییراتی که حاصل از نوسانات بار، تغییر در کیفیت آب، هوای اضافی، و همچنین جرم گرفتگی سطوح انتقال حرارت است. یکی از ویژگی‌های زباله‌سوزی، خاکستر معلق آن است که با جریان گازهای حاصل از احتراق به سمت بویلر رانده می‌شود. برای جلوگیری از رسوب آنها بر روی سطوح بویلر، از روش‌های زیر برای جداسازی ثقلی این ذرات استفاده می‌شود:

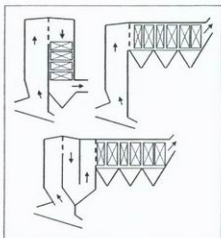
- استفاده از سرعت‌های پایین در حرکت گازهای حاصل از احتراق
 - ایجاد چرخش در مسیر جریان گازهای حاصل از احتراق
- سهم نسبتاً بالای خاکستر معلق در گازهای حاصل از احتراق، ریسک رسوب گرفتگی سطوح انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. رسوب گرفتگی سطح بیرونی لوله‌ها، علاوه بر کاهش سطح مقطع عبور جریان گازها، سبب کاهش انتقال حرارت و در نتیجه افزایش دمای گازهای خروجی از بویلر شده، افت عملکردی و کاهش بازده واحد را به دنبال دارد. از این رو

1- Spray Cooler
 2- Soot Blower

مخلوطی از کلرایدها، روی سطوح انتقال حرارت بویلر نشسته، با لایه اکسیدی سطح فلز وارد واکنش می‌شوند. با از بین رفتن لایه اکسیدی محافظ، خوردگی افزایش می‌یابد. کیفیت پایین احتراق زباله، همچنین منجر به تولید محصولات احتراق ناقص، نظیر C_2H_4 ، ذرات نسوخته چسبنده و غلظت بالایی از منواکسید کربن شده و در مواردی نیز، به علت برخورد شعله، فلوئ حرارتی بالایی را بر روی دیواره کوره موجب می‌گردد. به علاوه، طبیعت ناهمگن زباله، حفظ شرایط یکنواخت برای احتراق در کوره را دشوار می‌سازد.

عامل اصلی خوردگی در بویلرهای زباله‌سوز، ترکیبات محتوی گاز کلر است که منبع اصلی آنها پلی وینیل کلراید (PVC) موجود در زباله است. رسوبهای جامد کلرایدها همچنین می‌توانند در حضور دی‌اکسید گوگرد موجود در گازهای حاصل از احتراق، موجب خوردگی شوند. اگرچه سولفات‌ها نیز بر سطح لوله‌ها تشکیل رسوب (جرم گرفتگی) می‌دهند، ولی دمای ذوب آنها نوعاً بالاتر از دمایی است که در سطوح انتقال حرارت واحدهای زباله‌سوزی متداول با آنها مواجه بوده، بنابراین به صورت مشخص خورنده نمی‌باشند. ضمن آنکه در بویلرهای زباله‌سوز، غلظت نسبی ترکیبات گوگردی کمتر از مقدار آن در بویلرهای با سوخت زغال سنگ است، که در آنها خوردگی ناشی از این ترکیبات، موردی کلیدی و حائز اهمیت است.

در شرایط حاکم بر بویلرهای زباله‌سوز، دیواره‌های بویلر در مسیر اول (کوره) و محفظه احتراق، لوله‌های صفحات مشبک و سوپرهیترا اجزائی هستند که به طور مشخص در معرض خوردگی می‌باشند.



شکل (۱۴): طرح‌های مختلف بویلر [۱۱]

۱۶- خوردگی لوله‌های بویلر

مشکل عمده در بهره‌برداری از واحدهای استحصال انرژی از زباله، نرخ بالای خوردگی در بویلرهای آنها است. نرخ خوردگی در بویلرهای زباله‌سوز، بسیار بالاتر از میزان آن در بویلرهای با سوخت زغال سنگ است، که در ماهای بالاتر نیز عمل می‌کنند. این نرخ‌های بالای خوردگی از عوامل اصلی توقفهای مکرر بویلرهای زباله‌سوز است. برآورد شده است که حدود ۷۰ درصد از توقفهای پیش آمده در عملکرد واحدهای زباله‌سوزی، ناشی از خوردگی (دمای بالای) لوله‌های بویلر بوده است. [۳] دارا بودن ترکیبات محتوی کلر و ناهمگن بودن، دو خصلت ذاتی زباله است که در واقع، خوردگی بالای محصولات احتراق آن را سبب می‌گردد. زباله جامد شهری، به طور نوعی، محتوی پلاستیک، چرم، باتری، پسماندهای غذایی و مواد قلیایی است؛ که با سوختن، تشکیل گازهای خورنده‌ای نظیر کلر (Cl_2)، اسید کلریدریک (HCl)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، همچنین فلزات قلیایی مانند سدیم (Na) و پتاسیم (K) و فلزات سنگین مانند سرب (Pb)، روی (Zn) و قلع (Sn) می‌دهند. کلرایدهای با نقطه ذوب پایین این فلزات و با

1- Flame Impingement
2- Screen Tubes

در اولین مسیر عبور گازها (محفظه احتراق)، در بالای شبکه، عوامل اصلی زیر موجبات خوردگی را فراهم می‌سازند:

- ترازهای بالای گاز منواکسید کربن و اتمسفر تقلیل یافته (به طور موضعی)؛

- اختلاف دمای قابل ملاحظه بین گازهای حاصل از احتراق و سطح فلز (لوله‌های تشکیل دهنده) دیواره‌های بویلر، که سبب تشکیل رسوبهای محتوی کلرایدهای فلزی می‌گردد؛

- شرایط تقلیل یافته در زیر این رسوبها که توسط مواد نسوخته (و چسبنده موجود در این رسوبها) افزایش می‌یابد.

لوله‌های بویلر، معمولاً با یک لایه اکسیدی سخت و محکم، اساساً شامل Fe_2O_3 و Fe_3O_4 پوشش داده می‌شوند. این لایه (که در ترازهای بالای اکسیژن تشکیل می‌شود) با محدود کردن اکسیداسیونهای بعدی، کاهش نرخ اکسیداسیون را موجب می‌گردد. با اعمال این پوشش، نرخ اکسیداسیون به صورت یک تابع سهموی (شلجمی) و یا لگاریتمی بر حسب زمان تغییر می‌کند. در شرایط تقلیل یافته، یعنی ترازهای پایین اکسیژن و ترازهای بالای منواکسید کربن، خواص حفاظتی این لایه‌ها از بین رفته و نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. این فرآیند با حضور عناصری نظیر کربن و گوگرد تسریع می‌گردد.

هنگامی که اکسیژن کافی موجود نباشد، احتراق به صورت کامل انجام نشده، غلظت منواکسید کربن افزایش می‌یابد. اگر شرایط کمبود اکسیژن و غلظت بالای منواکسید کربن برای یک مدت طولانی حاکم باشد، پوشش اکسیدی تشکیل خواهد شد که متخلخل و لایه لایه می‌باشد. در این حالت، نرخ

اکسیداسیون به صورت یک تابع خطی بر حسب زمان تغییر می‌کند. چنانچه این شرایط با حضور گوگرد و یا کلر همراه گردد، آهن به جای تشکیل Fe_2O_3 تمایل به تشکیل FeS و یا $FeCl_2$ خواهد داشت. این خود سبب پایین‌تر آمدن کیفیت لایه‌های اکسیدی و همچنین تبدیل لایه اکسیدی از قبل موجود به FeS و $FeCl_2$ می‌گردد. در نهایت با از بین رفتن لایه اکسیدی محافظ، خوردگی افزایش می‌یابد (نمکهای FeS و $FeCl_2$ هیچ یک لایه محافظ محکمی بر سطح فلز تشکیل نمی‌دهند).

علاوه بر این، نزدیک دیواره‌های بویلر اختلاف دمای بین گازها و سطح فلز بسیار زیاد بوده، این اختلاف (گرادیان) دما، تشکیل رسوبهای محتوی کلرایدهای فلزات قلیایی و نیز فلزات سنگین را افزایش می‌دهد. مخلوط این نمکها تشکیل مواد زودگدازی^۱ (با نقطه ذوب پایینی) می‌دهد که در حالت مذاب بسیار واکنش پذیر بوده و می‌توانند موجبات خوردگی شدید فولاد را فراهم سازند. دمای ذوب ترکیبات زودگدازی که در بویلرهای زباله‌سوز مطرح می‌باشند، در جدول (۲) درج شده است. در واقع با حضور فاز مایع بر سطح فلز، واکنشهای شیمیایی تسریع و به علت امکان انتقال یونها و نیز حملات الکتروشیمیایی، خوردگی تسریع می‌گردد. نمکهای کلرایدی مذاب با لایه اکسیدی سطح فلز وارد واکنش شده، لایه اکسیدی متخلخل و لایه لایه شده، و با از بین رفتن لایه اکسیدی محافظ، خوردگی افزایش می‌یابد.

تصور می‌شود تشکیل رسوبهای سرشار از کلرایدها، همراه با ترازهای بالای منواکسید کربن (کمبود اکسیژن) موضعی، دلایل اصلی خوردگی دیواره‌های بویلر باشد.

1- Eutectic

جدول (۲): نقاط ذوب ترکیبات زودگداز مطرح در بویلرهای زباله‌سوز [۱۱]

Composition in weight %	Melting point Tm (°C)
48ZnCl ₂ + 52 KCl	250
82ZnCl ₂ + 18KCl	262
84ZnCl ₂ + 16KCl	262
73ZnCl ₂ + 27PbCl ₂	300
31NaCl + 69PbCl ₂	410
21KCl + 79PbCl ₂	411
17NaCl + 83 PbCl ₂	415
39ZnCl ₂ + 50KCl + 11PbCl ₂	275
35ZnCl ₂ + 48NaCl + 17PbCl ₂	350
16NaCl + 40KCl + 44PbCl ₂	400
K ₂ SO ₄ + Na ₂ SO ₄ + ZnSO ₄	384
KCl + ZnCl ₂ + K ₂ SO ₄ + ZnSO ₄	292

۱۶-۲- خوردگی سوپرهیترها

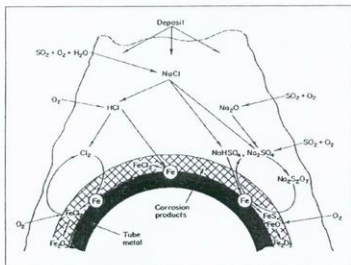
در پایین دست جریان گازها (در بویلر)، انتظار می‌رود فرآیندهای زیر سبب از دست رفتن فلز، به ویژه در سوپرهیترها گردند:

– خوردگی توسط کلر (در شکل‌های HCl و Cl₂) و گوگرد (به صورت‌های SO₂ و SO₃) موجود در گازها، تحت شرایط اکسیداسیون و یا تقلیل یافته؛

– خوردگی به وسیله رسوبهای محتوی کلرایدها و سولفاتهای فلزات.

مکانیزم خوردگی در این حالت شامل واکنشهای دوری (سیکلی) است که مطابق آنچه در شکل (۱۵) نشان داده شده است، در داخل رسوب تشکیل یافته بر روی لوله صورت می‌گیرد. واکنشهای اصلی شامل تشکیل کلر از

سولفات‌ها شدن کلرایدهای قلیایی، نفوذ آن به داخل رسوب تا فصل مشترک فلز/ لایه اکسیدی، تشکیل کلرایدهای فرار آهن در نزدیکی سطح فلز و در نبود اکسیژن، فرار این کلرایدها به بیرون تا سطح رسوب، اکسیداسیون آنها و تشکیل گاز کلر و تکرار فرآیند با نفوذ مجدد کلر به داخل می‌باشد. این خوردگی که با نفوذ به داخل لایه اکسیدی محافظ صورت می‌گیرد، اکسیداسیون فعال نامیده شده و منجر به خوردگی با نرخ بالایی می‌گردد. این نوع خوردگی در دمای گازهای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد و دمای سطح فلز بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. [۱۳]



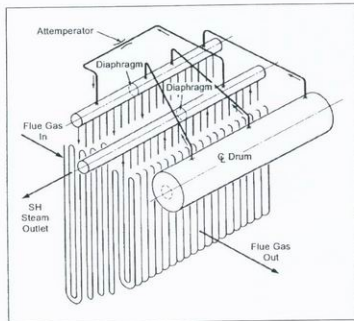
شکل (۱۵): توالی واکنشهای شیمیایی در فرآیند خوردگی لوله‌های بویلر واحدهای زباله‌سوزی [۱۱]

نوع دیگری از خوردگی که در بویلرهای زباله‌سوز مطرح می‌باشد، خوردگی ناشی از توقف و یا تعطیلی واحد است. به علت محتوای بالای نمکهای کلرایدی، بویژه کلراید کلسیم (CaCl_2)، رسوبهای تشکیل شده بر روی لوله‌های بویلر، در مقابل رطوبت حساس بوده و با جذب رطوبت هوا، این ترکیبات تجزیه شده، موجبات خوردگی فلز را فراهم می‌سازند.

۱۷- حفاظت در مقابل خوردگی

روشهای موجود برای کاهش میزان خوردگی در لوله‌های بویلر، بهبود شرایط عملکردی بویلر و استفاده از مواد مقاوم در مقابل خوردگی است. برخی از راههای موجود برای بهبود شرایط عملکردی بویلر عبارتند از: اصلاح فرآیند احتراق به منظور نیل به محیطی با خوردگی کمتر؛ کنترل فرآیند اصلاح شده یعنی کنترل گازهای حاصل از احتراق و دما، به‌طور ویژه؛ و اصلاح طراحی، به ویژه دینامیک جریان گازها و اختلاط آنها. طراحی محفظه احتراق باید به گونه‌ای صورت گیرد که احتراق

سوختم در قسمت پایینی آن کامل گردد. با تغییر مکان و یا جهت نازل‌های هوای ثانویه، اصلاحات قابل توجهی در آشفنگی جریان و به حداقل رساندن لایه لایه شدن گازها قابل حصول است. از آنجایی که دماهای بالای گاز و فلز لوله، همچنین اختلاف بین آنها، نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد، پایین نگه داشتن آنها حائز اهمیت است. با استفاده از لوله‌های صفحات مشبک و نصب مجموعه لوله‌های تبخیرکننده در جلو سوپرهیترها، می‌توان دمای گاز ورودی به سوپرهیترها را کاهش داد. علاوه بر این، لوله‌های صفحات مشبک با کاهش سرعت جریان گاز، سایش ناشی از آن را نیز به حداقل می‌رسانند. برای کاهش خوردگی (ناشی از اکسیداسیون فعال) در لوله‌های سوپرهیتر می‌توان از طرح جریان موازی استفاده نمود. در این طرح، که به طور شماتیک در شکل (۱۶) نشان داده شده است، بخار با دمای پایین‌تر در معرض گازهای با حداکثر دما؛ و بخار با دمای حداکثر، در معرض گازهای با حداقل دما قرار می‌گیرند.



شکل (۱۶): طرح سوپرهیتر با جریان موازی [۱۹]

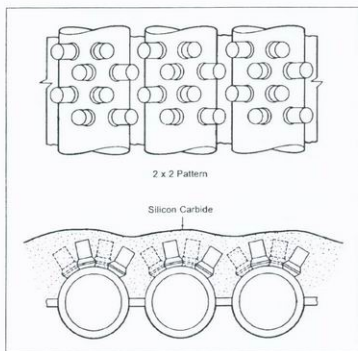


استفاده از مواد مقاوم در مقابل خوردگی را می‌توان شامل دو بخش دانست: یکی انجام لایه نسوزکاری (و یا استفاده از آجر نسوز) از جنس کاربید سیلیس (SiC) بر روی (لوله‌های) دیواره‌های بویلر در قسمت پایین محفظه احتراق (در ناحیه شعله)؛ و دیگری استفاده از آلیاژهای با پایه نیکل، به صورت لوله صلب و یا به صورت اندود جوشی^۱ بر روی لوله‌های تبخیرکننده و سوپرهیتر.

۱۷-۱- دیواره‌های آبی (تبخیرکننده‌ها)

تقریباً در همه بویلرهای زیاله‌سوز، برای حفاظت دیواره‌های کوره (و قسمت پایینی محفظه احتراق) در مقابل خوردگی، برخورد شعله و سایش و خراش ناشی از مواد ذره‌ای^۲، از یک لایه نسوز از جنس کاربید سیلیس به صورت ریختگی (درمحل) و یا آجر سرامیکی استفاده می‌شود. نسوزکاری تا ارتفاعی ادامه می‌یابد که

اطمینان کافی از وجود شرایط (اتمفر) اکسیدکننده وجود داشته باشد. ماده نسوزکاری می‌بایست از هدایت الکتریکی بالایی برخوردار باشد، تا انتقال حرارت از طریق دیواره‌ها (ی تحت حفاظت) به نحو مؤثری صورت گیرد. برای تثبیت لایه نسوز، همانطور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است، از نگهدارنده‌های فلزی که به دیواره‌ها جوش می‌شوند، استفاده می‌شود. با این همه، این لایه‌ها بدون مشکل نیز نیستند. بررسیها نشان داده است که در برخی از بویلرها، درست در بالای لایه نسوز، خوردگی شدیدی واقع شده است. به عبارت دیگر، بسط و توسعه لایه نسوز، موجب جابجایی ناحیه مورد تهاجم شده است. علاوه بر این، این لایه با کاهش انتقال حرارت به دیواره‌ها، موجب افزایش دمای گازهای حاصل از احتراق شده، که آن نیز به نوبه خود، میزان نشست رسوب بر سطح لایه نسوز را افزایش می‌دهد.



شکل (۱۷): لایه نسوز و میله‌های نگهدارنده آن، در قسمت پایینی کوره [۱۹]

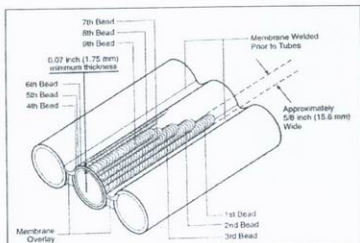
- 1- Weld Overlay
- 2- Particulate Matter



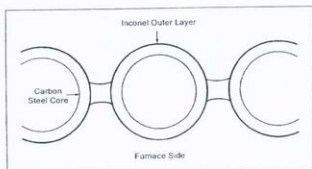
لوله از جنس اینتگنل^۱ از بیرون در بر گرفته شده است (شکل ۱۹). نیز، به طور رضایت‌بخشی تجربه شده است [۱۹].

از آنجایی که شرایط لوله‌های صفحات مشبک (از نظر دمای سطح فلز و دمای گازها)، همانند شرایط دیواره‌های بویلر در قسمت بالایی محفظه احتراق است، حفاظت آنها در مقابل خوردگی نیز به همان روش، یعنی با لایه جوشی آلیاژی با پایه نیکل صورت می‌گیرد. مجموعه لوله‌های تیخیرکننده نیز، در صورت استفاده، توسط لایه جوشی آلیاژی مقاوم در مقابل خوردگی محافظت شده و یا از جنس فولادهای ضدزنگ^۵ به کار می‌روند.

در حال حاضر، متداول‌ترین روش برای حفاظت لوله‌های بویلر در مقابل خوردگی ناشی از نمک‌های کلرایدی مذاب و اکسیداسیون فعال، استفاده از آلیاژهای با پایه نیکل است. در این روش، همانطور که در شکل (۱۸) نشان داده شده است، از آلیاژهای با پایه نیکل، بویژه آلیاژ ۶۲۵، به صورت یک اندود جوشی، برای پوشش سمت داخلی دیواره‌های بویلر در قسمت بالایی محفظه احتراق استفاده می‌شود. به این ترتیب، پوشش جوشی با تأثیر جزئی در میزان انتقال حرارت، خوردگی را به حداقل می‌رساند. استفاده از لوله‌های دو لایه^۱ (و یا دو فلزی^۲) که متشکل است از یک لوله داخلی فولادی^۳ که توسط یک



شکل (۱۸): اجرای پوشش جوشی بر روی دیواره بویلر [۲۰]



شکل (۱۹): مقطع شماتیک یک دیواره بویلر با لوله‌های دو لایه [۱۹]

- 1- Clad Pipe
- 2- Bimetal
- 3- Carbon Steel
- 4- Inconel
- 5- Stainless Steel



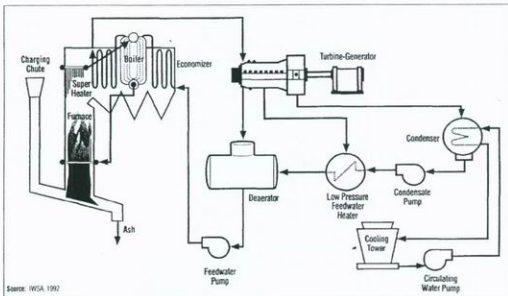
آلیاژهای ۶۲۵ و ۸۲۵ رایج‌ترین موادی هستند که در حال حاضر برای لوله‌های سوپرهیترها در بویلرهای زباله‌سوز به کار می‌روند؛ آلیاژ ۶۲۵ به صورت پوشش جوشی و آلیاژ ۸۲۵ به صورت لوله صلب. تصمیم‌گیری در خصوص استفاده از لوله صلب و یا پوشش جوشی، به جنبه‌های اقتصادی مسأله بازمی‌گردد.

۱۸- چرخه بخار و تولید انرژی الکتریکی

در یک واحد استحصال انرژی از زباله، انرژی حرارتی حاصل از احتراق زباله، توسط بویلر بازیافت و به سیکل (چرخه) بخار منتقل می‌شود. سیکل بخار مورد استفاده در این واحدها، همانند دیگر نیروگاههای بخار، بر مبنای سیکل رانکین^۱ می‌باشد. نمودار شماتیک سیکل آب/بخار یک واحد استحصال انرژی از زباله در شکل (۲۰) نشان داده شده است. انتقال حرارت به آب ورودی (آب تغذیه^۲)، ابتدا دمای آن را تا نزدیک به مایع اشباع

افزایش می‌دهد. سپس با تبخیر آن، تولید بخار اشباع می‌نماید. پس از آن نیز مطابق معمول، افزایش دما تا تولید بخار خشک ادامه می‌یابد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، در زباله‌سوزهای زباله جامد شهری، هنگامی که صرفاً تولید الکتریسیته مد نظر باشد، معمولاً بخار خروجی با فشار ۴۰ بار و دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. [۱۵ و ۱۳، ۱۰] اما هنگامی که از زباله جامد شهری به صورت پیش‌پردازش شده و در قالب RDF استفاده شود، شرایط بالاتر بخار (تا فشار ۶۰ بار و دمای ۵۲۰ درجه سانتیگراد) نیز با به کارگیری تدابیر ویژه برای جلوگیری از خوردگی، استفاده شده است. [۱۳]

بخار خشک با فشار و دمای بالا، سپس به سمت توربین بخار هدایت می‌شود. در آنجا بخار منبسط شده، انرژی حرارتی آن تبدیل به انرژی مکانیکی محور توربین می‌گردد، که آن نیز به نوبه خود، با به گردش درآوردن مولد برق (ژنراتور)، تولید الکتریسیته (برق) می‌نماید.



شکل (۲۰): نمودار شماتیک چرخه آب/بخار در یک واحد استحصال انرژی از زباله [۲۱]

- 1- Rankine Thermodynamic Cycle
- 2- Feed Water



هنگامی که هدف صرفاً تولید الکتریسیته باشد، از توربین چکاننده^۱ و چنانچه هدف تولید همزمان الکتریسیته و حرارت باشد، معمولاً از توربین پی فشار^۲ استفاده می‌شود.

توربینهای مورد استفاده در واحدهای زباله‌سوزی معمولاً خیلی بزرگ نبوده و نوعاً حدود ۱۰ مگاوات می‌باشند. محدوده آنها بین ۱ تا ۶۰ مگاوات است. [۱۲]

بعد از انجام کار مفید در توربین (چکاننده)، بخار خروجی به سمت کندانسور^۳، جایی که در آن میعان گشته و به آب تبدیل می‌گردد، هدایت می‌شود. علاوه بر میعان نمودن بخار خروجی از توربین، کندانسور وظیفه هوازدايي و حفظ فشار توربین در شرایط خلاء را نیز برعهده دارد.

برای تبدیل هرچه بیشتر انرژی حرارتی بخار به انرژی مکانیکی، بخار توربین را در دما و فشاری بسیار پایین‌تر از دما و فشار ورودی به آن ترک می‌کند. به محض اینکه شرایط بخار خط، اشباع را در دیاگرام مولیر قطع کند، بخار شروع به مرطوب شدن می‌کند. با انبساط بیشتر بخار در توربین، درصد رطوبت افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی مراحل انتهایی توربین در اثر سایش ناشی از قطرات آب، می‌بایست میزان رطوبت محدود باشد.

بخار میعان شده (آب کندانسه^۴)، از کندانسور به سمت دی‌اریتور^۵ پمپاژ می‌شود. کار دی‌اریتور کاهش میزان اکسیژن نامحلول در آب کندانسه و همچنین بالا بردن دمای آب کندانسه (که همان آب تغذیه بویلر است) توسط بخار زیرکش شده از توربین می‌باشد.

پمپ آب تغذیه^۶، آب تغذیه را از دی‌اریتور به اکونومایزر بویلر می‌راند. در اکونومایزر، آب تغذیه به وسیله جریان گازهای داغ خارج شونده از بویلر گرم‌تر شده، برای تولید بخار

خشک و داغ^۷ وارد درام بویلر، که تبخیرکننده‌ها (دیواره‌های متشکل از لوله) و سوپرهیترهای بویلر به آن متصل هستند می‌شود. در کندانسور، حرارت باقیمانده (یا پذیرفته نشده^۸) بخار ورودی، به یک مدار مجزای آب خنک‌کننده منتقل می‌شود که آن هم به نوبه خود این انرژی را به یک دریاچه، رودخانه و یا اتمسفر منتقل می‌نماید.

سیستمهای خنک‌کننده مورد استفاده در نیروگاههای بخاری، معمولاً در چهار دسته کلی: سیستمهای خنک‌کننده یک‌سره^۹، سیستمهای خنک‌کننده تر بازچرخشی^{۱۰}، سیستمهای خنک‌کننده خشک^{۱۱} و سیستمهای خنک‌کننده مرکب^{۱۲} دسته بندی می‌شوند. از آنجایی که هر یک از سیستمهای خنک‌کننده مزایا و معایبی دارد، انتخاب سیستم مناسب، در حقیقت نوعی مقایسه و ارزیابی است.

در این سیستمها، انتقال حرارت به صورت همرفتی به آب رودخانه، دریاچه، ... ویا هوای محیط و یا به صورت تبخیر آب انجام می‌گیرد. بازده یک سیستم خنک‌کننده بسته به نوع آن، به دمای آب مورد استفاده، هوای محیط و یا میزان رطوبت هوا بستگی دارد.

انتخاب سیستم خنک‌کننده اغلب به ویژگیهای محلی بازمی‌گردد. وضعیت جغرافیایی، شرایط آب و هوایی، دسترسی به منابع آب، امکان دفع پساب، میزان قدرت خروجی مد نظر واحد،

- 1- Condensing Turbine
- 2- Back Pressure Turbine
- 3- Condenser
- 4- Condensate Water
- 5- Deaerator
- 6- Feed Water Pump
- 7- Superheated Steam
- 8- Rejected Heat
- 9- Once Through Cooling Systems
- 10- Recirculation Wet Cooling Systems
- 11- Dry Cooling Systems
- 12- Hybrid Cooling Systems

میزان حرارت دفع شونده، فاکتورهای ارزیابی اقتصادی و هزینه‌های بهره‌برداری و سرویس و نگهداری، از جمله عوامل تعیین کننده در انتخاب یک سیستم خنک‌کننده می‌باشند.

۱۹- بازده استحصال انرژی از زباله

بازده هیچ یک از فرآیندهای صورت گرفته در یک واحد زباله‌سوزی ۱۰۰ درصد نمی‌باشد. به عنوان مثال، بازده احتراق معمولاً حدود ۹۸ تا ۹۹ درصد است. [۱۸] چرا که اغلب، مقداری مواد نسوخته در خاکستر و همینطور مقداری گاز منواکسید کربن در گازهای حاصل از احتراق وجود دارد. حدود ۳ درصد از انرژی حرارتی نیز از طریق خاکستر زیرین و تابش حرارت از دیواره‌های کوره به هدر می‌رود. [۲۲] فرآیندهای تبدیل انرژی نیز همواره با اتلاف انرژی همراه بوده و هیچگاه تبدیل کامل صورت نمی‌گیرد.

بازده تبدیل انرژی، بنا به تعریف متداول، نسبت خروجی مطلوب سیستم (انرژی تبدیل یافته مورد نظر) به ورودی آن است. هنگامی که صرفاً تولید الکتریسیته مد نظر باشد (و نه تولید همزمان حرارت و الکتریسیته)، خروجی مطلوب سیستم، انرژی الکتریکی تولیدی است. انرژی ورودی به سیستم نیز، در حقیقت، محتوای انرژی زباله ورودی به واحد است. بنابراین، بازده الکتریکی یک نیروگاه زباله‌سوزی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{fuel}} = \frac{P_{el}}{(m \cdot LHV)_{fuel}} \quad (5)$$

که در آن:

η_{el} : بازده الکتریکی واحد؛

P_{el} : توان الکتریکی خروجی واحد؛

P_{fuel} : توان ورودی واحد؛

$m \cdot fuel$: دبی جرمی زباله ورودی به واحد و LHV_{fuel} : ارزش حرارتی پایین زباله ورودی به واحد است.

بدیهی است در مواردی که ارزش حرارتی زباله پایین بوده و به صورت همسوزی با یک سوخت فسیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، توان ورودی، حاصل جمع توانهای نهفته در زباله ورودی و سوخت فسیلی مصرفی است.

بازده کلی (بازده الکتریکی) واحدهای زباله‌سوزی، به علت محدودیت در شرایط بخار تولیدی و مصارف داخلی بیشتر، کمتر از نیروگاههای بخار متداول است.

در یک واحد استحصال انرژی از زباله، بسته به شرایط بخار تولیدی، اولویت تولید حرارت/الکتریسیته و از همه مهم‌تر ارزش حرارتی پایین زباله، نوعاً بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلووات ساعت الکتریسیته از هرتن زباله قابل استحصال است. [۱۳]

از طرفی دیگر، بازده سیستم، حاصل ضرب بازده کلیه عوامل دخیل در آن است. چهار مرحله اصلی در تبدیل زباله به انرژی، تبدیل محتوای انرژی زباله به انرژی حرارتی گازهای حاصل از احتراق طی فرآیند احتراق در کوره (محفظه احتراق)، انتقال انرژی حرارتی گازهای داغ به آب و تولید بخار سوپرهیت در بویلر، تبدیل انرژی حرارتی بخار به انرژی مکانیکی در توربین بخار و تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی در ژنراتور می‌باشند. بنابراین:

$$\eta_{el} = \eta_{combustion} \times \eta_{boiler} \times \eta_{turbine} \times \eta_{generator} \quad (6)$$

که در آن:

$\eta_{combustion}$: بازده احتراق؛

η_{boiler} : بازده بویلر؛

$\eta_{turbine}$: بازده توربین و

$\eta_{generator}$: بازده ژنراتور می‌باشد.



- 2) INTUSER, "Geothermal Energy and Other Distinctive Energy Sources", 2005, ([www.intuser.net/6/1/WP6_df version.pdf](http://www.intuser.net/6/1/WP6_df_version.pdf)).
- 3) Dionel O. Albina, "Theory and Experience on Corrosion of Waterwall and Superheater Tubes of Waste-to-Energy Facilities", Columbia University, August 2005.
- 4) UNEP, "Draft Guidelines on Best Available Techniques (BAT) and Best Environmental Practices (BEP) for the Incineration of Municipal Waste", October 2003.
- 5) Friends of the Earth, "Greenhouse Gases and Waste Management Option", 2000.
- 6) U. S. DOE, Letter to IWSA from David Garman, 04/23/2003.
- 7) U. S. EPA, Letter to IWSA from Marianne Horinko & Jeffrey Holmstead, 02/14/2003.
- 8) People & Planet, "Green Power Options", 2002.
- 9) U. S. National Archives and Records Administration, Office of Federal Register, 40CFR Part 60, December 2005.
- 10) The World Bank, "Municipal Solid Waste Incineration" (Technical Guidance Report), Washington, D. C. , 1999.
- 11) P. Rademarkers, W. Hesseling, J. van de Wetering, "Review on Corrosion in Waste Incinerators, and Possible Effect of Bromine", TNO Report, 2002.
- 12) Nolan ITU Pty Ltd, "Guideline for Determining the Renewable Components in Waste for Electricity Generation", 2001.
- 13) "Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration", Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, European Commission, August 2006.

بویلرهای زباله‌سوز به علت استفاده از سوخت با کیفیت پایین (نسبت به سوخته‌های فسیلی)، در مقایسه با بویلرهای متداول نیروگاه‌های برق، از بازده نسبتاً کمتری برخوردار می‌باشند. بازده بویلرهای با کوره از نوع شبکه‌ای، در کل به حدود ۸۰ درصد می‌رسد. [۱۳]

با توجه به شرایط بخار تولیدی در واحدهای زباله‌سوزی، در بهترین شرایط تنها حدود ۲۵ درصد از انرژی تبدیلی بویلر (به صورت بخار)، توسط توربین-ژنراتور قابل تبدیل به الکتریسته است. بنابراین بازده کلی یک واحد زباله‌سوزی از نوع توده‌سوز شبکه‌ای تنها حدود ۲۰ درصد است. [۱۳]

مقداری از انرژی الکتریکی تولیدی صرف مصارف داخلی واحد می‌گردد. میزان مصرف انرژی الکتریکی (مصارف داخلی) یک واحد زباله‌سوزی بیشتر از میزان مورد نیاز یک نیروگاه بخاری متداول با ظرفیت مشابه است. علت آن نیز وجود تجهیزات و سیستم‌های جانبی زباله‌سوز، نظیر تجهیزات کنترل آلودگی هوا، فنهای هوا، جرثقیل سقفی چنگکی و نیز (در صورت استفاده) تجهیزات مربوط به پیش‌پردازش زباله می‌باشد. مصرف سیستم کنترل آلودگی هوا بسته به نوع سیستم به کار گرفته شده و تراز انتشار آلاینده‌های مورد نظر به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. برای یک واحد زباله‌سوزی زباله‌های جامد شهری، میزان الکتریسته مصرفی (مصارف داخلی)، بین ۶۰ تا ۱۹۰ کیلووات ساعت به ازای هر تن زباله است. [۱۳]

مراجع

- 1) Andrew Knox, "An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW)", Ontario, 2005.



دانشگاه صنعتی شریف در مقطع کارشناسی است. ایشان جمعاً ۱۹ سال تجربه کاری در زمینه‌های نفتی و نیروگاهی داشته و از سال ۱۳۸۵ همکاری خود را با قدس نیرو آغاز نموده است. زمینه کاری مورد علاقه آقای شفیع انزریهای نو می‌باشد.

Email:

alishafiei@ghods-niroo.com

14) Directive of the European Parliament and of the Council on "the Incineration of Waste" (2000/76/EC), December 2000.

15) InfoMil, "Dutch Notes on BAT for the Incineration of Waste", 2002.

16) "Environmental Engineering", fifth edition, Edited by Joseph A. Salvato, Nelson L. Nemerow, and Franklin J. Agardy, 2003, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, Section 5.

17) Walter R. Niessen, "Combustion and Incineration Processes", 3rd edition, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.

18) Tjalfe G. Poulsen, "Solid Waste Management", Aalborg University, 2003, Chapter 3.

19) J. S. Gittinger and W. J. Arvan, "Consideration for the Design of RDF-Fired Refuse Boiler", Babcock & Wilcox, presented to Power-Gen Europe, 1998.

20) George Y. Lai and Neil Blogg, "Unifuse Overlay Cladding for Surface Protection Against Corrosion and Erosion/Corrosion in Power Boilers and Waste Heat Recovery Systems", OMMI Journal, Vol.3, December 2004.

21) Jonathan V. L. Kiser and B. Kent Burton, "Energy from Municipal Waste: Picking Up Where Recycling Leaves Off", Journal of Waste Age, November 1992.

22) Okopol, "the Energy Efficiency Formula of Annex II of the Waste Framework Directive", 5th Draft Version, 2006.

آقای علیرضا شفیع ده آباد فارغ التحصیل رشته مهندسی مکانیک (گرایش حرارت و سیالات) از



چکیده

این مقاله به صورت کاربردی به بررسی برآوردهای اقتصادی در پروژه‌های جوشکاری پرداخته و شرح کاملی از کلیه عوامل مرتبط با هزینه جوش و عملیات جوشکاری و پارامترهای مهم و مؤثر در هزینه جوشکاری را بیان نموده است. در نهایت میزان تأثیر عوامل مختلف بر قیمت تمام شده، مقایسه گردیده و با ارائه مدل ساده اقتصادی با سه رویکرد تعداد، وزن، و طول، به همراه مثالهای مربوطه رسیدن به یک برآورد صحیح را میسر ساخته است.

۱- مقدمه

که استفاده از جوش اتوماتیک به جای جوش دستی چه تأثیری در قیمت نهایی دارد.

تخمین صحیح هزینه جوشکاری، که از مهم‌ترین فاکتورها جهت برآورد اقتصادی در یک پروژه مرتبط با جوشکاری می‌باشد، و عموماً بدون در نظر گرفتن عوامل مؤثر در هزینه جوشکاری و نظرات کارشناسی صورت می‌پذیرد. کلیه تولید کنندگان جهت مدیریت موفق تولید خود باید توجه داشته باشند که برای انجام هر کار، چه هزینه ای و تحت چه شرایطی باید بپردازند!

۲- عوامل مؤثر در هزینه جوشکاری

برآورد هزینه جوشکاری با محاسبه مجموعه عوامل مرتبط با یک پروژه خاص، بخصوص مسائل مربوط به حجم جوشکاری و عامل زمان (نفر - ساعت) انجام می‌شود. بطور معمول هزینه جوشکاری در هر موردی، مجموعه عوامل ذیل را شامل می‌شود [۲]:

برآورد صحیح هزینه جوشکاری و تعیین عوامل تأثیر گذار بر قیمت تمام شده، سبب می‌شود تمرکز انرژی سازنده بر روی تغییراتی صورت گیرد که قیمت تمام شده کاهش یافته و سود دهی بیشتر شود و در نهایت در بازار رقابت پیروز شود. توجه به مسائل اقتصادی جوش و داشتن یک مدل محاسباتی دقیق هزینه‌ها برای یک سازنده جهت تعیین تأثیر هر پارامتر در قیمت نهایی کمک قابل توجهی می‌نماید (به طور مثال تغییر یک پروسه جوش و تأثیر آن در قیمت تمام شده). همچنین داشتن یک مدل محاسباتی صحیح می‌تواند تعیین کننده باشد

۱- هزینه فلز پایه

۲- هزینه آماده سازی

۳- هزینه جوشکار

۴- هزینه فلز پر کننده

۵- هزینه گازهای محافظ

۶- هزینه ابزار و تجهیزات

۷- هزینه انرژی

۸- هزینه بالاسری

۹- هزینه بازرسی

۱۰- هزینه اتمام کار

1- If you can't measure it, you can't manage it

(از پیتر دراکر، نظریه پرداز علم مدیریت)



۱-۲- هزینه فلز پایه

این هزینه شامل خرید (به همراه کلیه عوارض مربوطه)، حمل و نقل، تضمین، هماهنگی، انبارداری، تستهای مربوطه و عرضه کلیه مواد با نظم و ترتیب، تعداد و کیفیت مناسب در محل نصب و آماده سازی، می‌باشد.

۲-۲- هزینه آماده سازی

این هزینه شامل هزینه برش و اندازه گذاری هر قطعه کوچک فلزی، یخ زنی (در صورت نیاز)، فیکسچر (بست و قرار)، زدن خال جوشها (در صورت دریافت مجوز از طرف ناظر)، تعیین موقعیت (یعنی قرار دادن قطعه در موقعیتی که باید جوش داده شود افقی، تخت، ...)، پیشگرم کردن در صورت نیاز و هر نوع عملیات مورد نیاز دیگر که به غیر از جوشکاری باشد. باید به این نکته توجه داشت که هزینه جوشکاری در صورت استفاده بلند مدت و بدون توجه از جرثقیلها و فیکسچرها و داربستها، افزایش می‌یابد. جهت ایجاد جوش بهینه، بهترین حالت، جوشکاری در حالت تخت است که نتیجه آن استفاده از ابزارهای است که قطعات در این حالت نگهداری شوند و این خود باعث افزایش هزینه نیز می‌گردد. به طور مثال استفاده از جوشکاری یکطرفه (به شرط آنکه سبب کاهش کیفیت نشود) در پروژه‌هایی که در آنها جوشکاری ورقهای ضخیم و متعددی صورت می‌پذیرد، از نظر وقت و زمان بسیار مقرون به صرفه است.

عملیات تمیز کاری قبل از جوشکاری به طور مثال سنگ زنی لایه‌های اکسیدی از مواردی هستند که انجام آن قبل از جوشکاری ضروری و حساس می‌باشد. در این مرحله نیاز به برنامه‌ریزی در جهت بازرسی وجود دارد که در مجموع روی زمان و هزینه‌های تمام شده

اثر گذار می‌باشند. چیدمان، تنظیمات، اندازه گیری گپها و فواصل، عملیات متداول و زمانبری هستند که در برنامه زمانبندی و محاسبات زمانی پروژه باید مد نظر قرار گیرد.

۳-۲- هزینه کار جوشکاری

این مرحله پر هزینه ترین مرحله پروژه می‌باشد. محاسبات مربوط به آن بایستی به دقت انجام گیرد زیرا با اطمینان بیشتر می‌توان راهها و ابزارهای پیشنهاد داد و با اعمال تغییرات، قدرت ساخت را بالاتر برد.

در این میان زمان لازم جهت انجام کار آماده سازی قالبها و شاسیها و فیکسچرهای مورد نیاز و استخدام دستیارها نیز باید در نظر گرفته شود. البته انجام کلیه این تدارکات در مجموع زمان کمتری نسبت به کار اصلی جوشکاری را در بر می‌گیرد.

شاخص سنجش کار جوشکاری معمولاً بر مبنای سرعت جوشکاری در یک ساعت محاسبه می‌شود که این زمان برای هر جوشکار با توجه به تجربه مهارت و توانایی آن متفاوت است. هزینه بیمه‌ای پرسنل ممکن است شامل این هزینه‌ها نبوده و در هزینه‌های بالاسری محاسبه شود.

با توجه به این موضوع ملاک حجم جوش انجام شده است و نه صرفاً حضور جوشکار در کارگاه. بنابراین باید حداکثر بهره‌وری از طریق کاهش خستگی فیزیکی جوشکار، تامین امنیت، استفاده از ابزارهای تشویقی و ایجاد حداکثر آسایش حین کار، فراهم شود.

۴-۲- هزینه فلز پر کننده

در کتب مرجع جهت انتخاب نوع و اندازه مناسب الکتروود پیشنهادات مناسبی آمده است. در کار جوشکاری با سایز مناسب الکتروود تأثیر



مستقیم روی هزینه جوشکاری دارد. استفاده از الکتروود با سایز پایین باعث افزایش دانسیته جریان و تأثیر آن روی نفوذ جوش می‌گردد و الکتروود سایز بالا باعث بالا رفتن میزان جریان و در نتیجه ذوب بیشتر در واحد زمان می‌شود. البته در هر صورت انتخاب الکتروود مناسب نباید به صورت اتفاقی و یا مطابق نظر جوشکار انجام گردد و مقادیر الکتروود مصرفی و یا ذوب فلز جهت تخمین هزینه جوشکاری می‌بایست مستند گردد.

یکی از روشهای تعیین وزن الکتروود مصرفی حاصل ضرب حجم الکتروود مصرفی در دانسیته آن می‌باشد تا مقادیر وزنی فلز پرکننده برای هر واحد طول آن به دست آید. مقادیر به دست آمده مقدار تئوری وزن فلز پرکننده مصرفی می‌باشد. برای به دست آوردن مقدار واقعی وزن فلز پرکننده مصرفی مقدار تئوری آن را که از روش بالا به دست آمده و یا مقادیر موجود در کتب مرجع را در نرخ رسوب (کمتر از ۱۰۰٪) ضرب کرده و مقدار واقعی وزن فلز پرکننده به دست می‌آید. حاصل ضرب طولی که در یک ساعت جوش داده می‌شود در مقادیر وزن فلز پرکننده، مشخص کننده مقدار وزنی فلز مصرفی در یک ساعت است که به آن "سرعت رسوب جوش" نیز گفته می‌شود و جهت مقایسه پروسه‌های مختلف از لحاظ فلز پرکننده مصرفی، و سایر متغیرهای اثر گذار بر اتصال جوش بسیار ضرورت دارد.

۲-۵- هزینه گاز محافظ

این هزینه زمانی در هزینه‌های جوشکاری اثر گذار است که در پروسه جوشکاری از گاز محافظ استفاده شود. در این صورت هزینه گاز مصرفی در هر ساعت (شامل حجم گاز در زمان مصرف گاز و در زمانی که جریان گاز صفر

می‌باشد) به دست می‌آید که با ضرب کردن آن در فاکتور مؤثر (نسبت زمان انجام جوش به کل زمان) و هزینه گاز در یک ساعت جریان، هزینه کل گاز محافظ مصرفی در یک ساعت مشخص می‌شود.

۲-۶- هزینه ابزار جوشکاری

امروزه بهترین و آسانترین روش محاسبه هزینه تجهیزات شامل ثبت هزینه اجاره آنهاست و در صورتی که ابزار خریداری شوند برای محاسبه هزینه استفاده از آنها، علاوه بر هزینه خرید، هزینه استهلاک، پشتیبانی، لوازم یدکی، و در نهایت هزینه بالاسری آنها نیز در نظر گرفته می‌شود.

۲-۷- هزینه انرژی

در محاسبه این هزینه باید به نوع مولد توجه نمود. در صورتی که از نوع گازوتیلی باشد می‌توان مقدار سوخت مصرفی را در یک ساعت تخمین زد و در صورتی که از نوع برقی باشد با در نظر گرفتن ولتاژ و آمپراژ و ضریب تاثیر (زمان واقعی جوشکاری در هر ساعت) می‌توان مقادیر انرژی مصرفی را مشخص کرد. در صورت استفاده از کوره‌های خشک کن الکتریکی و یا تجهیزات مربوط به پیشگرم و پسگرم، انرژی مصرف شده در این تجهیزات نیز باید در محاسبات مربوط به انرژی در نظر گرفته شود.

۲-۸- هزینه بالاسری

هزینه بالاسری شامل هزینه دفتر، هزینه‌های غیر مستقیم پرسنل، مالیاتها، بیمه، حمل و نقل، آگهی و تبلیغات و حسابداری فروش و سایر موارد می‌باشد. برای جلوگیری از ضرر و زیانهای احتمالی می‌بایستی ضریب بالاسری را

جوش، پسگرم، رنگ آمیزی، اتصال جهت نصب و یا جداسازی برای حمل و نقل و هر نوع فعالیت مورد نظر مشتری، را شامل می‌شود. این موارد، نیاز به تجهیزات کمکی (مانند تجهیزات مربوط به رنگ و سندبلاست، دستگاه سنگ‌زنی در ابعاد مختلف، کوره مخصوص عملیات حرارتی و...) دارد که هزینه تأمین و تجهیز آنها بایستی در نظر گرفته شده و محاسبه گردد.

۳- ساده سازی مدل‌های اقتصادی

با توجه به عوامل ذکر شده یک دید کلی نسبت به هزینه‌های عملیات جوشکاری به دست می‌آید، اما به جهت ساده سازی و تعیین یک مدل اقتصادی جهت تعیین هزینه‌های جوشکاری در این مقاله کلیه عوامل بالا را در دو عامل ذیل خلاصه می‌کنیم. [۱]

۱- هزینه جوشکار و بالا سری (L&O)^۱

۲- هزینه مواد مصرفی جوشکاری و مواد پوششی (گاز محافظ و پودر جوشکاری و...).

* در بسیاری موارد هزینه انرژی در برابر کل هزینه‌ها قابل چشم پوشی است (شکل ۱).

بالا گرفت. در عمل این مقدار را ۱۵۰٪ کل هزینه‌ها در نظر می‌گیرند که در صورت وجود، هر نوع برآورد کاملتر دیگری نیز می‌تواند معتبر باشد، به شرط آنکه در کلیه موارد فاکتورهای مربوطه مد نظر قرار داده شود.

۲-۹- هزینه بازرسی

هزینه بازرسی شامل استفاده از فناوری دقیق مانند (تست RT/UT) و استفاده از تجربه بالا جهت انجام این تستها می‌باشد، اما در حالت ساده تر حداقل هزینه بازرسی به صورت کلی و حرفه ای باید در نظر گرفته شود. در حالت کلی استفاده از جوشکارانی که صلاحیت بازرسی نیز دارند مقرون به صرفه است. هزینه بازرسی جوشکاری معمولاً در مجموع محاسبه می‌شود و بر حسب درصد بازرسی متفاوت است و نظارت ساعتی در این مورد کاربرد ندارد.

۲-۱۰- هزینه اتمام کار

بخشی از عملیات، بعد از اتمام کلیه کارهای جوشکاری صورت می‌پذیرد و مواردی چون سند بلاست، سنگ زنی، برطرف کردن پاشش



شکل (۱): مقایسه هزینه‌ها در کار جوشکاری

1- Labor & Overhead

طریق جوشکاری باشد بهترین روش برآورد هزینه، مبنای وزنی می‌باشد.

۴-۱- رویکرد تعیین هزینه‌ها بر مبنای تعداد زمانی که قطعه مورد نظر از قطعات کوچک و بزرگ و متفاوتی تشکیل شده باشد که هر کدام از قطعات شامل انواع جوشهای گوشه و لب به لب، خال جوش و غیره باشد، در این صورت صحیح‌ترین روش محاسبه قیمت تمام شده، تعیین هزینه هر واحد تکمیل شده می‌باشد. در این روش زمان جوشکاری هر واحد (مهمترین متغیر این روش) به طور دقیق محاسبه می‌شود و این موضوع سبب شده است که این رویکرد در محاسبات اقتصادی در مقایسه با دو رویکرد دیگر (طولی و وزنی) دقیق‌تر باشد، لذا نیازی به محاسبه فاکتور عملکرد (زمانی که صرف پیمرفت جوش می‌شود تقسیم بر زمان کل عملیات جوشکاری) در این روش نمی‌باشد. در صورتی که از سیم جوش در پروسه استفاده شود محاسبات مربوط به فلز مصرفی بسیار آسان می‌باشد، ولی محاسبه الکتروود مصرفی در روش SMAW^۱ با توجه به پیچیدگی و تعدد جوشها مشکل‌تر است. به طور کلی طریقه محاسبه هزینه‌ها بر مبنای تعداد به صورت ذیل می‌باشد:

تفاوت هزینه در پروژه‌های مختلف بیشتر در هزینه بالاسری، شامل مکان و تجهیزات، نظارت، نیروهای ستادی و ... می‌باشد. هزینه این مقادیر را در بیشتر پروژه‌ها ۲ تا ۴ برابر هزینه نیروی انسانی در نظر می‌گیرند. گاهی اوقات نیز هزینه بالا سری با ضریبی روی نیروی انسانی اعمال می‌شود (در مدل‌های ساده L&O).

۴- سه رویکرد اولیه

هزینه جوشکاری را می‌توان (با در نظر گرفتن نوع کار) با یکی از رویکردهای ذیل تعیین کرد:

* الف - هزینه بر مبنای تعداد

در پروژه‌هایی که قطعه نیاز به جوشکاریهای متعدد ولی پراکنده دارد بهترین روش برآورد هزینه، مبنای تعداد می‌باشد.

* ب - هزینه بر مبنای طول

در جوشهای طولی - مانند جوشهای گوشه اتصال بال به جان و جوشهای ساده و طولانی بهترین روش برآورد هزینه، مبنای طولی می‌باشد.

* ج - هزینه بر مبنای وزن

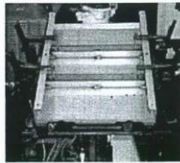
در مواردی که به منظور افزایش استحکام قطعات، نیاز به پوشش آنها با فلز دیگری از



(ج)



(ب)



(الف)

شکل (۲)

۱- SMAW: Shield Metal Arc Welding



(هزینه فلز پر کننده و گاز محافظ در هر واحد) + (هزینه جوش و بالاسری هر واحد) = کل هزینه برای هر واحد

$$\text{Cost/unit} = (\text{L\&O/unit}) + (\text{filler metal and shielding material cost/unit})$$

(هزینه جوشکار و بالاسری در هر ساعت) × (زمان لازم برای جوشکاری هر واحد) = هزینه جوشکاری و بالاسری در هر واحد

$$\text{L\&O/unit} = (\text{welding-related time/unit}) \times (\text{L\&O rate})$$

(هزینه هر پوند لکتروود) (اوزن هر اینچ لکتروود) (زمان جوشکاری هر واحد) (سرعت تغذیه سیم جوش) = هزینه سیم جوش مصرفی جهت هر واحد

$$\text{Filler metal cost/unit} = (\text{wire feed speed}) \times (\text{welding time}) \times (\text{weight of electrode/inch}) \times (\text{electrode cost/pound})$$

= هزینه سیم جوش مصرفی جهت هر واحد در روش SMAW

$$\left[\frac{\% \text{ الکتروود مصرفی}}{100} \right] + \left[\text{اوزن هر اینچ الکتروود} \right] \times \left[\text{کل زمان جوشکاری} \right] \times \left[\text{سرعت ذوب الکتروود} \right]$$

$$\text{Filler metal cost (SMAW)} = \left[(\text{electrode melt off rate}) \times (\text{welding time}) \times (\text{weight of electrode/inch}) \right] / (\% \text{ of electrode used})$$

(هزینه هر فوت مربع گاز مصرفی) × (زمان جوشکاری) × (سرعت خروج گاز) = هزینه گاز محافظ برای هر قطعه

$$\text{Shielding gas cost/piece} = (\text{flow rate}) \times (\text{welding time}) \times (\text{gas cost/ft.}^3)$$

(هزینه هر پوند پودر) × (وزن پودر مصرفی) = هزینه پودر محافظ در روش زیر بودری برای هر قطعه

$$\text{SAW}^1 \text{ flux cost/piece} = (\text{wt. of flux used}) \times (\text{cost of flux/lb.})$$

۱- الکتروود E70S-3 سایز ۰/۰۳۵ اینچ

۲- سرعت تغذیه سیم جوش 300 in./min

۳- غلظت گاز محافظ ۷۵٪ آرگون، ۲۵٪ CO₂

۴- سرعت خروج گاز محافظ 35 ft./hour

مجموع زمان لازم جهت جوشکاری ۷۴ ثانیه و باقیمانده مربوط به زمان قرار دادن قطعات در موقعیت مناسب، تمیز کاری، تنظیم بست و مهار، رفع پاشش جوش، بازرسی چشمی، قرار دادن قطعات تکمیل شده در محل مناسب می‌باشند.

مثال ۱ (محاسبات هزینه بر مبنای تعداد):

مجموعه‌ای با جوشهای پراکنده به شرح زیر در حال ساخت می‌باشد. زمان کامل ساخت هر مجموعه ۲ دقیقه و ۴۵ ثانیه می‌باشد. این جوشها عبارتند از:

- دو جوش گوشه به طول یک اینچ، زمان لازم جهت جوشکاری: ۲۰ ثانیه برای هر کدام

- دو عدد جوش کام^۲، زمان لازم جهت جوشکاری: ۸ ثانیه برای هر کدام

- یک جوش شیاری لبه گونیا^۳ [۲]، زمان لازم جهت جوشکاری: ۱۸ ثانیه

- برای کلیه جوشها روش^۴ GMAW با جزئیات ذیل کاربرد دارد:

1- SAW: Submerged Arc Welding

2- Plug Weld: جوش کام

3-Square Edge Groove: جوش شیاری لبه گونیا

4- GMAW: GAS Metal Arc Welding



(هزینه جوشکار و بالاسری در هر ساعت) × (زمان لازم برای جوشکاری هر واحد) = هزینه جوشکاری و بالاسری در هر واحد

$$(2.75 \text{ min.}) \times (1 \text{ hr.} / 60 \text{ min.}) \times (\$45/\text{hr.}) = \$2.0625/\text{piece}$$

(هزینه هر پونگکتروید) × (وزن هر اینچ الکتروید) × (سرعت تغذیه سیم جوش) = هزینه سیم جوش مصرفی جهت هر واحد

$$(300 \text{ in.} / \text{min.}) \times (74 \text{ sec.}) \times (1 \text{ min.} / 60 \text{ sec.}) \times (0.000275 \text{ lb.} / \text{in.}) \times (\$2.00/\text{lb.}) = \$0.2035/\text{piece}$$

(هزینه هر فوت مربع گاز مصرفی) × (زمان جوشکاری) × (سرعت خروج گاز) = هزینه گاز محافظ برای هر قطعه

$$(35 \text{ ft.}^3 / \text{hr.}) \times (74 \text{ sec.}) \times (1 \text{ hr.} / 3600 \text{ sec.}) \times (\$0.15/\text{ft.}^3) = \$0.108/\text{piece}$$

(هزینه فلز پرکننده و گاز محافظ در هر واحد) + (هزینه جوش و بالاسری هر واحد) = کل هزینه برای هر واحد

$$\$2.0625 + \$0.2035 + \$0.108 = \$2.374/\text{unit}$$

۲-۴- رویکرد تعیین هزینه‌ها بر مبنای طولی

این روش بهترین روش جهت محاسبه هزینه جوشکاری‌هایی است که به صورت طولی و تک پاسه (یا چند پاسه) می‌باشند. در این روش قیمت تمام شده جوشکاری در جوش با ابعاد متفاوت متغیر می‌باشد. مهمترین فاکتور در این روش سرعت حرکت در جوشکاری است. به طور کلی طریقه محاسبه هزینه‌ها بر مبنای طولی به صورت ذیل می‌باشد:

این روش بهترین روش جهت محاسبه هزینه جوشکاری‌هایی است که به صورت طولی و تک پاسه (یا چند پاسه) می‌باشند. در این روش قیمت تمام شده جوشکاری در جوش با ابعاد

(هزینه فلز پرکننده و گاز محافظ در هر واحد) + (هزینه جوش و بالاسری هر واحد) = کل هزینه در واحد طول

$$\text{Cost}/\text{length} = (\text{L\&O cost}/\text{length}) + (\text{filler metal and shielding cost}/\text{length})$$

{ فاکتور عملکرد} × (سرعت جوشکاری) ÷ (هزینه جوشکار و بالاسری در هر ساعت) = هزینه جوشکاری و بالاسری در واحد طول

$$\text{L\&O cost}/\text{length} = (\text{L\&O rate}) / (\text{travel speed}) \text{ (operating factor)}$$

= هزینه سیم جوش مصرفی در واحد طول

{ (سرعت حرکت) ÷ (هزینه هر پوند سیم جوش مصرفی) × (وزن هر اینچ سیم جوش مصرفی) × (سرعت تغذیه سیم جوش) }

Filler metal cost/length (wire fed processes) = { (wire feed speed) x (wt. of electrode/in.) x (cost of electrode/lb.) } / (travel speed)

= هزینه فلز پرکننده در واحد طول در روش SMAW

{ (هزینه هر پوند الکتروید) × (وزن الکتروید در واحد طول) × (نرخ رسوب) } ÷ (سرعت جوشکاری) × (%الکتروید مصرفی)

$$\text{Filler metal cost}/\text{length (SMAW)} = (\text{melt off rate}) \times (\text{wt. of electrode}/\text{length}) \times (\text{cost of electrode}/\text{lb.}) / (\text{travel speed}) \text{ (% of electrode used)}$$

(سرعت حرکت) ÷ (قیمت هر فوت مکعب گاز) × (سرعت گاز خروجی) = هزینه گاز محافظ در واحد طول

$$\text{Shielding gas cost}/\text{length} = (\text{gas flow rate}) \times (\text{gas cost}/\text{ft.}^3) / (\text{travel speed})$$

(قیمت هر پوند بودر) × (نسبت بودر به فلز جوش) = (وزن فلز جوش مصرفی در واحد طول) = هزینه بودر محافظ در واحد طول

$$\text{Shielding cost}/\text{length (flux)} = (\text{wt. of weld metal}/\text{length}) \times (\text{ratio of flux to weld metal}) \times (\text{cost of flux}/\text{lb.})$$



و یا 1,384 ft. در هر تیر ورق می‌باشد که با توجه به هزینه جوش با بعد 5/16 in. در واحد طول (\$3. 2436) هزینه کل جوشهای گوشه به دست می‌آید.

$$1,324 \text{ ft.} \times \$3. 2436 = \$4490$$

۴-۳- رویکرد تعیین هزینه‌ها بر مبنای وزنی
این روش ساده ترین روش محاسبه هزینه تمام‌شده جوشکاری بدون توجه به نوع پروسه جوش می‌باشد. از این رو کاربرد محدودتری دارد و به طور مشخص در مواردی کاربرد دارد که بخواهیم با حجم مشخصی از فلز جوش فلز پایه را (جهت افزایش استحکام و یا مقاومت به خوردگی) پوشش دهیم. مهمترین متغیر این روش سرعت رسوب فلز جوش می‌باشد. این روش بهترین روش جهت محاسبه جوشهای چند پاسه و نفوذی نیز می‌باشد. به طور کلی طریقه محاسبه هزینه‌ها بر مبنای وزنی به صورت توضیحات ارائه شده در صفحه بعد می‌باشد.

مثال ۲ (محاسبات هزینه بر مبنای طولی):
در جوشکاری تیر ورق یک پل جهت اتصال یال به جان از جوش سپری به ابعاد 5/16 اینچ استفاده می‌شود. طول تیر ورق 130 فوت و عمق آن 18 فوت می‌باشد. در هر 10 فوت از یک مهار استفاده می‌شود. فاکتور عملکرد در حدود 40٪ تخمین زده می‌شود. پروسه جوشکاری از نوع SAW و با جزئیات ذیل می‌باشد:

- الکتروود EM13K سایز 5/16 اینچ
- نوع پودر: F7A2 با نسبت 1/5 به 1 (پودر به الکتروود)
- سرعت تغذیه سیم جوش: 200in/min
- سرعت جوشکاری: 10 in. /min
- تعداد جوشهای این تیر ورق چهار جوش به طول 130 فوت می‌باشد و تعداد 24 عدد بست (stiffener) - 12 عدد در هر طرف- با دو جوش 18 فوتی در قسمت stiffener بال طول کل جوش (4 x 130) + (24 x 2 x 18)

{ (فاکتور عملکرد) × (سرعت جوشکاری) } + { (هزینه جوشکار و بالاسری در هر ساعت) × هزینه جوشکاری و بالاسری در واحد طول }

$$\{ (45/ \text{hr.}) \times (1 \text{ hr.} / 60 \text{ min.}) / \{ (10 \text{ in.} / \text{min.}) \times (1 \text{ ft.} / 12 \text{ in.}) \times (0. 40) \} = \$2. 250/\text{ft.}$$

= هزینه سیم جوش مصرفی در واحد طول

(سرعت حرکت) × { (هزینه هر پوند سیم جوش مصرفی) × (وزن هرا اینچ سیم جوش مصرفی) × (سرعت تغذیه سیم جوش) }

$$\{ (200 \text{ in.} / \text{min.}) \times (0. 00133 \text{ lb.} / \text{in.}) \times (\$1. 75/\text{lb.}) \} / (10 \text{ in.} / \text{min.}) \times (1 \text{ ft.} / 12 \text{ in.}) = \$0. 5586/\text{ft.}$$

(قیمت هر پوند پودر) × (نسبت پودر به فلز جوش) × (وزن فلز جوش مصرفی در واحد طول) = هزینه پودر محافظ در واحد طول

$$(0. 242 \text{ lb.} / \text{ft.}) \times (1. 5) \times (\$1. 20/\text{lb.}) = \$0. 4356/\text{ft.}$$

(هزینه فلز پرکننده و گاز محافظ در هر واحد) + (هزینه جوش و بالاسری هر واحد) = کل هزینه برای در واحد طول

$$2. 250/\text{ft.} + \$0. 5586/\text{ft.} + \$0. 4356/\text{ft.} = \$3. 2436/\text{ft.}$$



(هزینه فلز پرکننده و گاز محافظ به ازای هر پوند) + (هزینه جوش و بالاسری به ازای هر پوند) = کل هزینه‌ها به ازای هر پوند

$$\text{Cost/lb.} = (\text{L\&O cost/lb.}) + (\text{filler metal and shielding cost/lb.})$$

{ (فاکتور عملکرد) × (نرخ رسوب) } + (هزینه جوشکار و بالاسری در هر ساعت) = هزینه جوشکاری و بالاسری به ازای هر پوند

$$\text{L\&O Cost/lb.} = (\text{L\&O rate}) / \{ (\text{deposition rate}) \times (\text{operating factor}) \}$$

(درصد ذوب الکتروود) + (هزینه هر پوند سیم جوش مصرفی) = هزینه سیم جوش مصرفی به ازای هر پوند (در همه روشها)

$$\text{Filler metal cost/lb. (any process)} = (\text{cost of filler metal/lb.}) / (\text{electrode efficiency})$$

(نرخ رسوب) + (قیمت هرفوت مکعب گاز) × (سرعت گاز خروجی) = هزینه گاز محافظ به ازای هر پوند

$$\text{Shielding cost/lb. (gas)} = (\text{shielding gas flow rate}) \times (\text{cost of shielding gas/ft.}^3) / (\text{deposition rate})$$

(نسبت پودر به فلز جوش) × (هزینه فلز جوش مصرفی به ازای هر پوند) = هزینه پودر محافظ به ازای هر پوند

$$\text{Shielding cost/lb. (flux)} = (\text{cost of flux/lb.}) \times (\text{ratio of flux to filler metal})$$

مثال ۳ محاسبات هزینه بر مبنای وزنی:

در یک جوش پوششی لایه ای به ضخامت 1.2in بر روی لوله ای به قطر 12in. و به طول 48in بایستی بنشانیم. جزئیات جوشکاری به شرح زیر می‌باشد: - دو الکتروود به صورت موازی و سایز 5/16 اینچ - سرعت رسوب: 32 lb. /hr - سرعت تغذیه الکتروود ۲۰۰ اینچ بر دقیقه برای هر الکتروود - حجم فلز جوش داده شده را از طریق ذیل می‌توان محاسبه نمود:

$$(\text{final volume}) - (\text{initial volume}) = \{ (142/2 \times 3.14) \times 48 \} - \{ (122/2 \times 3.14) \times 48 \} = 1960 \text{ in.}^2$$

برای فولاد این حجم جوش برابر است با ۵۶۶ پوند (وزن فلز رسوب داده شده)

{ (فاکتور عملکرد) × (نرخ رسوب) } + (هزینه جوشکار و بالاسری در هر ساعت) = هزینه جوشکاری و بالاسری به ازای هر پوند

$$\{ (\$45/\text{hr.}) / (32 \text{ lb. /hr.}) \times 40\% \} = \$3.516/\text{lb.}$$

(درصد ذوب الکتروود) + (هزینه هر پوند سیم جوش مصرفی) = هزینه سیم جوش مصرفی به ازای هر پوند (در همه روشها)

$$\$0.80/\text{lb.} \times 100\% = \$0.80/\text{lb.}$$

(نسبت پودر به فلز جوش) × (هزینه فلز جوش مصرفی به ازای هر پوند) = هزینه پودر محافظ به ازای هر پوند

$$\$0.60 \times 1.5 = \$0.90/\text{lb.}$$

(هزینه فلز پرکننده و گاز محافظ به ازای هر پوند) + (هزینه جوش و بالاسری به ازای هر پوند) = کل هزینه‌ها به ازای هر پوند

$$3.5156/\text{lb.} + \$0.80/\text{lb.} + \$0.90/\text{lb.} = \$5.215/\text{lb.}$$

$$(\$66 \text{ lb.}) \times (\$5.215/\text{lb.}) = \$2,952 \text{ per roll}$$

هزینه ۵۶۶ پوند فلز جوش:



مثال تجربی [۴]:

می‌باشد. با توجه به کلیه عوامل، مشخص می‌شود که فاکتور زمان همواره کلیدی بوده و در کلیه پروژه‌ها و رویکردهای محاسباتی تأثیر بسزایی دارد.

در حقیقت قدم اول در مدیریت اقتصادی یک پروژه جوشکاری، شناخت نوع کار و فاکتورهای مرتبط و قدم بعدی استفاده از روش علمی محاسبات مربوط به نوع پروژه می‌باشد.

مراجع

۱- سایت اینترنتی

www.millerwelds.com

۲- سایت اینترنتی

www.welding-advisers.com

۳- تکنولوژی بازرسی جوش، ترجمه و تألیف

سعید رضا داد خواه

۴- تجارب عملی بازرسان شرکت قدس نیرو در

کارگاه جوشکاری

خانم سناز اسد گرمی دارای لیسانس مهندسی متالورژی صنعتی از دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و از شهریور سال ۸۴ همکاری خود را با شرکت قدس نیرو آغاز نموده است. زمینه علاقمندی ایشان انتخاب مواد در نیروگاه می‌باشد.

Email:

sasadkarami@ghods-niroo.com

در قراردادی که جهت ساخت اسکلت فلزی یک نیروگاه با پیمانکار ساخت اسکلت فلزی تنظیم شد، کلیه برآوردها بر اساس روش وزنی صورت گرفت. در صورتی که برآورد بسیاری از قطعات با توجه به نحوه طراحی آنها و وجود تعداد زیاد جوشهای پراکنده می‌بایستی از طریق روش اول (تعدادی) محاسبه می‌گردید. این موضوع سبب نارضایتی پیمانکار به دلیل کاهش سوددهی و در نتیجه عدم همکاری مناسب برای پیشرفت پروژه و در نهایت تحویل قطعات نا مرغوب و دیر کرد در تحویل و نصب قطعات توسط پیمانکار مربوطه شد.

۵- نتیجه گیری

تعیین صحیح هزینه جوشکاری برای سازندگانی که نیاز به تداوم حضور در بازار رقابت دارند. بسیار حیاتی می‌باشد. ساده‌سازی محاسبات مربوطه، رسیدن به این هدف را آسان تر می‌سازد. ضمناً این نکته را باید یادآوری نمود که ساده سازی هیچگاه بدون ریسک امکانپذیر نیست. تعیین هزینه‌ها در عملیات جوشکاری رمز و راز خاصی ندارد و با در نظر گرفتن عوامل هزینه بر می‌توان در کاهش هزینه‌ها موفق‌تر عمل کرد. در نتیجه دستیابی به محصولی رقابتی آسانتر

از خوانندگان محترمی که مایل به ارسال مقاله برای نشریه می‌باشند تقاضا می‌شود موارد ذیل را رعایت فرمایند:

- موضوع مقاله در چارچوب اهداف نشریه و در ارتباط با صنعت آب، برق، نفت و گاز و پتروشیمی باشد.
- مقاله‌های تألیفی یا تحلیلی مستند به منابع علمی معتبر و مقاله‌های ترجمه شده منضم به تصویر اصل مقاله باشد.
- مقاله‌های ارسالی بر روی یک کاغذ A4 و با خط خوانا و با نایب شده و شکل‌ها، عکس‌ها، نمودارها و جداول کاملاً واضح و قابل استفاده و حتی‌الامکان به روش گرافیک کامپیوتری ارائه گردد.
- توضیحات و زیرنویس‌ها به صورت مسلسل شماره‌گذاری شده و در پایان هر مقاله ذکر شوند.
- نشریه در نخچین، تکمیل، اقدام و ویرایش مطالب مقالات آزاد است.
- مقاله دارای چکیده، مقدمه، نتیجه‌گیری و لیست مراجع بوده. به همراه رزومه مختصری از صاحب مقاله ارائه گردد.
- مقاله ارسالی قبلاً در نشریه دیگری چاپ نشده‌باشد.
- موارد فوق‌الذکر برای دریافت مقاله از علاقمندان خارج از قدس نیرو نیز برقرار می‌باشد.





شرکت مهندسی قدس نیرو

با بیش از ۳۰ سال سابقه درخشان

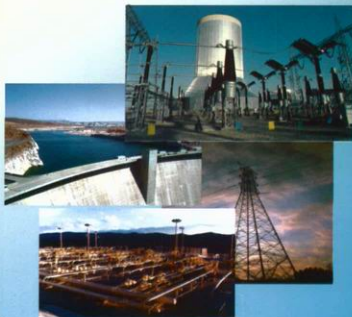
خدمات مشاوره، مهندسی و طراحی جزئیات، تهیه مشخصات فنی، نظارت عالی، نظارت بر اجرا و راه اندازی پروژه ها و مدیریت اجرایی را در زمینه های ذیل ارائه می نماید:

- نیروگاههای حرارتی (بخاری، گازی و سیکل ترکیبی)
- پستهای فشارقوی
- خطوط انتقال نیرو، شبکه های توزیع برق و مطالعات سیستم
- سد ها و نیروگاههای برق آبی، شبکه های آبیاری و زهکشی
- مطالعات زیست محیطی
- ایستگاههای خطوط انتقال گاز و نفت
- همکاری با کارفرمایان بصورت مدیریت پیمان "MC"
- اجرا و یا همکاری در پروژه های بزرگ بصورت "EPC"

GHODS NIROO ENGINEERING COMPANY (GNCE)

GNCE provides services, details design and engineering, project management and supervisory services in the following fields:

- Thermal power plants (Steam, Gas Turbine & Combined Cycle)
- Substation & Switchyards
- Transmission Lines, Distribution Networks & System studies
- Dams & Hydropower plants, Water Transmission Lines, Irrigation & Drainage Networks.
- Environmental Studies
- Pump-station of Oil and Gas Transmission Lines
- Cooperation with clients in Management Contract "MC"
- Execution or Participation in major "EPC" Contracts



GNCE



تهران، خیابان استاد مطهری، چهارراه سهروردی، شماره ۹۸
کد پستی: ۱۵۶۶۷۷۵۷۱۱

تلفن: ۸۸۴۰۳۶۱۳ - ۸۸۴۳۰۴۵۴
فکس: ۸۸۴۱۱۷۰۴

NO.98 OSTAD MOTAHARI AVE, TEHRAN 156675711 - IRAN

TEL:88403613 - 88430454

FAX:88411704

E-mail:info@ghods-niroo.com

