

# مقایسه سیستم‌های رزین پیش‌اندوده و بستر مخلوط در تصفیه آب‌کندانس

## با در نظر گرفتن جنبه‌های کاربردی، مشخصات فنی و اقتصادی

علیرضا ظهیری، هدی مولوی\*

تهران، پژوهشگاه نیرو، مرکز شیمی و مواد

پیام‌نگار: hmolavi@nri.ac.ir

### چکیده

هدف از ساخت واحد تصفیه آب‌کندانس<sup>۱</sup> در نیروگاه‌ها، تصفیه تمام یا بخشی از جریان کندانس است، به گونه‌ای که کیفیت استاندارد آب جوش‌آور/آب تغذیه ثابت نگه داشته شود. ناخالصی‌های موجود ناشی از عواملی نظیر سوراخ شدن لوله‌های کندانسور، تغلیظ ناخالصی‌های بسیار جزئی آب ورودی به جوش‌آور در فاز بخار و یا به سبب محصولات ناشی از خوردگی فلزات در تماس با آب یا بخار می‌باشند. واحدهای تصفیه کندانس دو فرایند تصفیه فیزیکی و شیمیایی آب را توأم انجام می‌دهند و برای بی‌یون‌سازی آب در این واحدها از انواع رزین‌های تبادل یونی بصورت مخلوط یا پیش‌اندوده استفاده می‌گردد. انتخاب نوع رزین‌ها بستگی به آنالیز آب و شرایط بهره‌برداری دارد. در این مقاله به تشریح منابع ایجاد ناخالصی در کندانس و ضرورت تجهیز نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی به واحد تصفیه کندانس و مزایای بکارگیری این واحد پرداخته می‌شود. در ادامه، انواع سیستم‌های تصفیه کندانس معرفی و مقایسه آنها از جنبه‌های مختلف صورت می‌پذیرد.

کلمات کلیدی: واحد تصفیه کندانس، CPP، رزین پیش‌اندوده، رزین بستر مخلوط

### ۱- مقدمه

بوده و تصفیه کندانس فرایندی ضروری محسوب می‌گردد. تحت شرایط نرمال، کندانس دارای مواد جامد حل شده<sup>۲</sup> بسیار اندکی است، 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 گشته و منجر به کاهش کیفیت این جریان می‌شوند[۱].

در نیروگاه‌هایی که کندانسور مستقیماً با آب خنک کن در تماس نبوده و از آب دریا برای خنک کردن استفاده می‌شود، نشی آب دریا به داخل کندانسور باعث بروز مشکلات شدیدی می‌گردد. در

منابع متعددی برای ورود ناخالصی به چرخه آب و بخار نیروگاه‌ها وجود دارد. یکی از این منابع، آب جبرانی<sup>۲</sup> است که در صورت بهره‌برداری غیر صحیح (مانند بهره‌برداری بیش از زمان سرویس خطوط رزینی و یا ورود مواد شیمیایی مورد استفاده برای احیاء به داخل سیستم)، باعث ورود ناخالصی به چرخه آب و بخار می‌شود[۱]. عامل مهم دیگر خلوص، جریان برگشتی کندانس است. در حقیقت خلوص کندانس در نیروگاه‌های فشار بالا که بیشتر آب تغذیه جوش‌آور را جریان کندانس تشکیل می‌دهد، بسیار مورد توجه

3. Total Dissolved Solid (TDS)

1. Condensate Polishing Plant  
2. Makeup Water

• محصولات ناشی از احتراق شامل اکسید سولفور، مونواکسیدکربن، دی اکسید کربن، اگر گرمکن مجدداً سوراخ و یا نشتی داشته باشد [۳].

در سال‌های اخیر به دلیل نیاز به جوش‌آورهای فشار بالا، تصفیه کنندان، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. چرا که با در نظر گرفتن درجه حرارت، فشار و ظرفیت بالای جوش‌آورهای مذکور، مقادیر جزئی املاح و مواد معلق در آنها مشکل آفرین خواهد بود. در چنین حالت‌هایی صرفاً تصفیه آب جبرانی کافی نبوده و لازم است که آلودگی‌های کندانس بازگشتی به جوش‌آور نیز به حداقل مقدار ممکن برسد.

همچنین جوش‌آورهای جدید نسبت به تشکیک رسوب، بسیار حساس هستند. در واقع این رسوبات می‌توانند موجب بروز اورهیت (گرمایش بیش از حد) شده و یا به دیواره لوله‌های قسمت‌های مختلف آسیب برسانند. همچنین در نتیجه ناخالصی‌های موجود در آب جبرانی، احتمال بروز پدیده حمل قطرات<sup>۲</sup> افزایش یافته که موجب پایین آمدن کیفیت بخار و در نهایت کاهش بازدهی توربین شده و از طرف دیگر به صورت ترک خوردگی تنش<sup>۴</sup> پدیدار می‌شوند.

هدف از تاسیس واحد تصفیه کندانس، تصفیه کل جریان کندانس است به گونه‌ای که کیفیت استاندارد آب جوش‌آور/ آب تغذیه در صورت ورود هرگونه ناخالصی به کندانس، ثابت نگه داشته شود. واحدهای نیروگاهی با سیستم تصفیه بین راهی قادرند ساده‌تر و موثرتر عمل نمایند [۱۶].

به طور کلی، دو سیستم متداول جهت تصفیه کندانس در نیروگاه‌ها وجود دارد که عبارتند از سیستم‌های با رزین پیش‌اندوده<sup>۵</sup> و سیستم‌های با رزین بستر مخلوط<sup>۶</sup>. رزین پیش‌اندوده شامل رزین‌های آنیونی، کاتیونی و فیبرهای بی‌اثر می‌باشند. این رزین‌ها پودری و یکبار مصرف بوده و نیازی به سیستم احیاء ندارند. سیستم‌های تصفیه کندانس بستر مخلوط از یک بستر پرشده از رزین‌های کاتیونی و آنیونی تشکیل شده است که بعد از مدت معینی نیاز به عملیات احیاء دارند.

بعضی از سیستم‌ها نیز در اثر استفاده از خنک‌کننده هوا، نشتی هوا در کندانسور منجر به ورود ناخالصی‌هایی به سیکل آب و بخار می‌شود. همچنین مواد شیمیایی که برای حفاظت سیکل به آب اضافه می‌شوند، در صورتی که حذف آنها توسط واحد پالایش کندانس ضروری باشد، به عنوان ناخالصی در نظر گرفته می‌شوند [۱].

ناخالصی‌ها می‌توانند به شکل ذرات جامد، ذرات کلوئیدی، ذرات حل شده و یا ذرات ژل گونه باشند [۱ و ۲] که مهمترین آنها عبارتند از:

- آهن، مس، دیگر فلزات، اکسیدهای آنها و دیگر محصولات خوردگی [۳]
- سدیم، کلرید، سولفات و دیگر نمک‌های موجود در آب خنک‌کننده که معمولاً به منظور حفاظت شیمیایی به محفظه آب جوش‌آور اضافه می‌شوند [۳].
- کربن دی اکسید و اسیدهای آلی که در اثر نشت هوا به داخل کندانسور وارد می‌شوند.
- ترکیبات آلی که معمولاً زمانی که از منابع آب طبیعی به عنوان آب جبرانی استفاده می‌شود، یافت می‌گردند. همچنین این ترکیبات آلی می‌توانند از تخریب جزئی رزین‌های تعویض یون و همچنین از موادی که برای بازرسی‌های غیر مخرب جوش‌آور مورد استفاده قرار می‌گیرند، وارد سیستم شوند [۴].
- سیلیس و دیگر ناخالصی‌های نامحلول از مواد سیمانی و دیگر مواد باقی مانده به کاررفته در هنگام تعمیر و یا بررسی سیستم در شرایط خاموش ماندن سیستم به وجود می‌آیند [۵].
- مواد افزودنی برای تنظیم pH هاش<sup>۱</sup> مانند آمونیاک، هیدرازین، سدیم فسفات و دیگر مواد افزودنی برای کنترل شیمیایی [۳ و ۵]
- مواد احیاء کننده
- هیدروکسید آلومینیم و هیدروکسید آهن دو ظرفیتی که در اثر واکنش آهن و آلومینیم محلول حاصل از خوردگی با هیدروکسید آزاد شده در اثر تبادل یون‌ها با رزین‌های آنیونی تولید ناخالصی‌های ژله‌ای هیدروکسید آلومینیم و ذرات کلوئیدی هیدروکسید آهن دو ظرفیتی را می‌نمایند که به عنوان نقاط شروع خوردگی عمل می‌کنند [۱].

2. Reheater  
3. Carry Over  
4. Stress Corrosion Cracking  
5. Precoat  
6. Mixed Bed

1. pH

## ۲- مزایای بکارگیری سیستم تصفیه کندانس

### ۱-۲ حذف یا کاهش قابل توجه زمان آغاز به کار واحد

تصفیه کندانس نقش اصلی را در آماده شدن شرایط در طول راه‌اندازی گرم و سرد ایفاء می‌کند. در زمان راه‌اندازی، مادامی که شرایط سیکل از نظر پارامترهای شیمیایی در حد مطلوب نباشد اجازه ورود بخار به توربین داده نمی‌شود. سیستم تصفیه با حذف ناخالصی‌ها به طور سریع باعث کاهش زمان آغاز به کار واحد می‌گردد [۳ و ۷].

### ۲-۲ حفاظت از بویلر و توربین

حلالیت ناخالصی‌هایی چون سدیم، سیلیس، آلومینیم، آهن و ناخالصی‌های دیگر در بخار ورودی به توربین به علت پدیده حمل قطرات با کاهش بخار از طریق انجام کار توسط توربین، کم می‌گردد. این امر منجر به ایجاد رسوب بر روی پره‌های توربین گشته و مسبب نیاز سیستم به شستشوی شیمیایی می‌شود [۳ و ۷].

### ۳-۲ حفظ کیفیت آب سیکل در شرایط مطلوب

آب مورد استفاده در کاهنده دما<sup>۱</sup> که جهت کنترل دمای بخار سوپر هیت استفاده می‌شود، معمولاً بعد از پمپ تغذیه جوش‌آور برداشت می‌گردد. این آب اسپری باید دارای خلوص بالا و عاری از هرگونه آلودگی باشد زیرا در صورت وجود آلودگی در آن منجر به حمل آلودگی‌ها به توربین و ایجاد رسوب و خوردگی می‌شود. در صورت عدم وجود تصفیه بین راهی، کیفیت آب تغذیه، بسته به وجود نشتی‌ها در کندانسور یا ورود هر نوع ناخالصی در مسیر، می‌تواند متغیر باشد [۳ و ۷].

### ۴-۲ کاهش نیاز برای خروج واحد از مدار و افزایش میزان

#### تولید

در بسیاری از موارد سیستم تصفیه بین راهی از طریق کنترل بهتر شرایط سیکل (که باعث حداقل نمودن آسیب به واحد می‌شود)، بهبود کیفیت آب اسپری و حداقل نمودن خوردگی‌هایی که منجر به توقف و خروج بدون برنامه واحد می‌گردد، و همچنین کاهش نیاز برای خروج واحد از مدار برای تعمیرات و شستشوی شیمیایی، به طور مستقیم بر روی توان خروجی و میزان تولید تاثیر می‌گذارد [۳ و ۷].

## ۲-۵ کاهش میزان زیراب<sup>۲</sup> بویلر و آب جبرانی مورد نیاز

### سیکل

جهت کاهش و کنترل غلظت یون‌ها در سیکل آب و بخار از زیراب استفاده می‌شود. در این شرایط مقدار کمی از آب سیکل از طریق تخلیه مخزن‌ها به طور متناوب دور ریز می‌گردد تا شرایط سیکل مطابق با استفاده از آب جبرانی در شرایط استاندارد باقی بماند. در نیروگاه‌های فاقد سیستم تصفیه بین راهی، زیراب تنها راه کنترل شرایط سیکل می‌باشد. در حالی که بکارگیری سیستم تصفیه بین راهی منجر به کاهش یا حذف نیاز به تخلیه و در نتیجه کاهش آب جبرانی سیکل می‌گردد [۳ و ۷].

### ۲-۶ کاهش دفعات تمیزکاری شیمیایی

نیاز به تمیزکاری جوش‌آورها بستگی به میزان رسوبات بر روی لوله‌های عبور آب و عوامل دیگر دارد. در صورت افزایش ضخامت رسوبات یا تغییر در افت فشار جوش‌آور، تمیزکاری شیمیایی جهت به حداقل رساندن ریسک آسیب به لوله‌ها ضروری است. استفاده از سیستم تصفیه کندانس باعث حذف اکسیدها و ذرات جامد و همچنین کاهش ترسیب سولفات در ری هیتز (باز گرمکن) شده که در نهایت منجر به کاهش نیاز به شستشوی شیمیایی می‌گردد [۳ و ۷].

### ۳- معرفی انواع سیستم‌های تصفیه آب کندانس

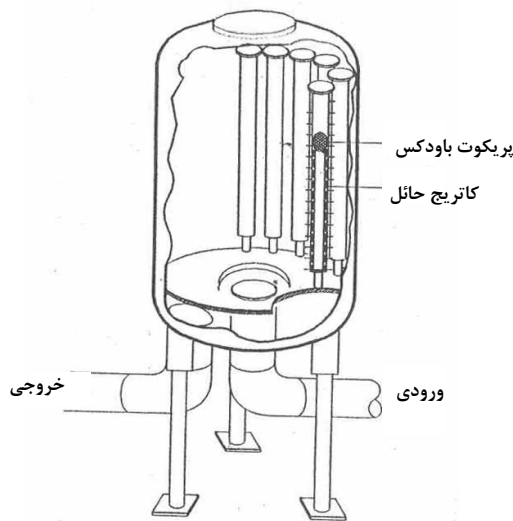
وارد شدن آلاینده‌های محلول و نامحلول به آب تغذیه جوش‌آور از هر طریق ممکن، خطر خوردگی را در بخش‌های مختلف جوش‌آور و توربین افزایش می‌دهد. همچنین خطر راسب شدن مواد در توربین منجر به کاهش بازدهی می‌شود. تجهیزات تصفیه کندانس بایستی قادر به حذف آلاینده‌های محلول و نامحلول از کندانس باشد. کیفیت آب تصفیه شده مورد نیاز واحد که توسط تصفیه کندانس تولید می‌شود بستگی به طراحی نیروگاه و شرایط بهره‌برداری از آن دارد. هرچه خطر خوردگی و زیان‌های اقتصادی متعاقب آن بیشتر باشد، لزوم افزایش کیفیت آب تصفیه شده بیشتر است. کیفیت آب مورد نیاز حاصل از تصفیه کندانس بایستی به گونه‌ای باشد که محافظت جوش‌آور و توربین را تضمین نماید. مقادیر مجاز اعلام شده توسط موسسه تحقیقات برق آمریکا<sup>۲</sup> برای سدیم در

2. Blowdown

3. Electric Power Research Institute (EPRI)

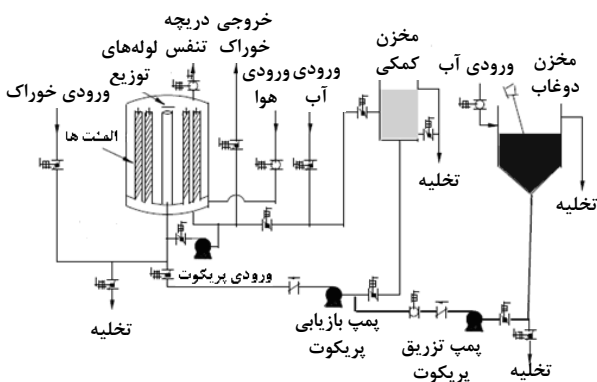
1. Attemprators

احتمال جرم گرفتگی<sup>۱</sup> یا تخریب آنها کمتر است. رزین های پیش اندوده شامل رزین های آنیونی و کاتیونی و فیبرهای بی اثر<sup>۲</sup> می باشند. رزین پودری کاتیونی در فرم های  $H^+$  و  $NH_4^+$  و رزین آنیونی تنها در فرم  $OH^-$  موجود است. به طور معمول، سیستم های پیش اندوده با رزین های کاتیونی فرم آمونیاکی کار می کنند. اندازه ذرات رزین های پودری تقریباً ۳۰ میکرون می باشد. زمانی که رزین های کاتیونی و آنیونی با هم مخلوط می شوند، توده حجیمی تشکیل می شود که مشخصات آن تابع نسبت کاتیون به آنیون است [۳].



شکل ۱- سیستم تصفیه کندانس از نوع رزین پودری [۸]

در شکل (۲) طراحی کلی سیستم پیش اندوده نشان داده شده است.



شکل ۲- طراحی کلی سیستم پیش اندوده [۳]

کندانس در محدوده ۲-۳ میکروگرم بر کیلوگرم است (بسته به مشخصات سیستم تصفیه و نوع تصفیه مورد استفاده). با این حال در همه موارد تثبیت سدیم در مقادیر کمتر از یک میکروگرم بر کیلوگرم، بهترین محافظت از خوردگی و تخریب را تأمین می نماید.

هدایت الکتریکی (اسید-کاتیون) که به طور گسترده در صنایع برق مورد استفاده قرار می گیرد در واقع اندازه گیری هدایت الکتریکی آب پس از عبور آن از رزین مبادله کننده کاتیون است که در نتیجه آن هدایت الکتریکی بالای حاصل از آمونیاک موجود در کندانس حذف و هدایت الکتریکی حاصل از آلاینده های باقیمانده نمایان تر می گردد. سیلیس موجود در کندانس مشکلی در خوردگی ایجاد نمی کند، ولی به دلیل حلالیت بالای آن در بخار به راحتی از آب جوش آور به توربین انتقال پیدا کرده که باعث ایجاد رسوب و کاهش بازدهی می گردد. خوشبختانه فرایندهای تصفیه آب جیرانی معمول در حذف سیلیس از آب خام قابلیت بالایی دارند لذا مشکلات ناشی از رسوبات سیلیس بر روی پره های توربین کمتر مشاهده می گردد.

همانطور که قبلاً اشاره گردید، دو سیستم متداول جهت تصفیه کندانس در نیروگاه ها عبارتند از :

- ۱- سیستم های با رزین پیش اندوده
- ۲- سیستم های با رزین بستر مخلوط

### ۳-۱ سیستم های تصفیه آب کندانس با رزین پیش اندوده

رزین های تبادل یونی پیش اندوده، به صورت پودری یکبار مصرف بوده و نیازی به سیستم احیاء ندارند. از این پودر به صورت پوششی بر روی فیلترهایی استفاده می شود [۱]. تصویری از این نوع سیستم تصفیه کندانس در شکل (۱) نمایش داده شده است.

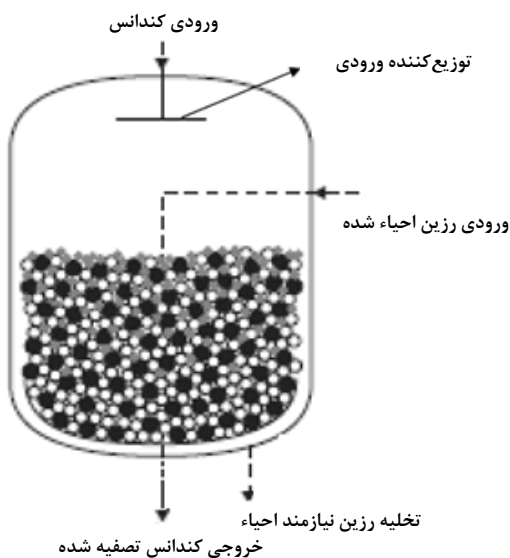
فرایند تصفیه در سیستم رزین پیش اندوده، با قابلیت حذف آهن محلول و معلق را در ماکزیمم مقدار ممکن، ترکیبی از فیلتراسیون و تبادل یون در یک واحد می باشد. همچنین، با استفاده از این رزین ها جداکردن سیلیس کلوئیدی نیز امکان پذیر است. در این روش سوسپانسیونی از رزین پودری بر روی استوانه فلزی پیش اندود می شود. کندانس با عبور از رزین های تبادل یونی تصفیه می گردد. پس از بهره برداری از رزین ها به مدت ۲ تا ۳ هفته، زمانی که افت فشار از حد مشخصی بالاتر رود و یا زمانی که رزین ها اشباع شوند، تخلیه رزین ها صورت می پذیرد. به دلیل یکبار مصرف بودن رزین ها

1. Fouling  
2. Inert

۲-۳ سیستم تصفیه کندانس با استفاده از بستر مخلوط به همراه سیستم احیاء

در شرایطی که سرعت جریان بالا باشد، استفاده از بسترهای کم عمق با قطر زیاد برای کار در میزان افت فشار قابل قبول، ضروری می‌باشد. بسترهای کم عمق، به دلیل عدم دستیابی به توزیع یکسان از رزین‌های احیاء شده، برای احیاء رزین‌های کاتیونی و آنیونی در درون مخزن رزین، نامناسب می‌باشند. از طرفی احیاء در درون ستون فیلتر خطر آلوده شدن آب ورودی به جوش‌آور را بالا می‌برد، همچنین، توزیع نامناسب و تجمع اضافی رزین‌ها در فصل مشترک دو نوع رزین باعث کاهش جریان بهره‌برداری می‌گردد. پس بسترهای مخلوط در واحد تصفیه کندانس بایستی دارای امکانات احیاء خارجی باشند.

طراحی‌های مختلفی از سیستم تصفیه کندانس بر مبنای بستر مخلوط براساس نوع رزین، نحوه احیاء و نیاز به وجود پیش فیلتر در سراسر دنیا در حال کار می‌باشند ولی این سیستم‌ها عموماً بدون فیلتر یا ستون رزین دیگری می‌باشند. شکل (۳) شمای کلی یک مخزن رزین به صورت بستر مخلوط را نشان می‌دهد. در شکل (۴) نیز شمای کلی سیستم تصفیه کندانس به صورت بستر مخلوط با سیستم احیاء نمایش داده شده است.



شکل ۳- شمای کلی یک مخزن رزین بستر مخلوط [۳]

به منظور پوشش دادن فیلتر کارتریج توسط این مخلوط، ابتدا رزین وارد مخزن کارتریج فیلتر شده و تا زمانی که پوشش مطلوب به دست آید آب سیرکوله می‌شود [۳].

توده تشکیل شده موقعی که رزین‌های آنیونی و کاتیونی مخلوط می‌شوند کلید استفاده از پیش‌انداخته‌های پودری می‌باشد. هنگام استفاده از توده به هم چسبیده تشکیل شده از ذرات رزین آنیونی و کاتیونی و فیبر، کنترل اندازه ذرات برای ایجاد سطح یکنواخت بر روی سیلندرهای پیش‌انداخته ضروری است. ترکیب سیستم پیش‌انداخته آماده شده بستگی به میزان خلوص مطلوب و همچنین میزان آلودگی‌هایی که باید از کندانس حذف شود، دارد. مقدار نرمال تزریق پیش‌انداخته روی سطح سیلندرها، بدون استفاده از پمپ تغذیه، ۰/۴ گرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. کمترین مقدار تزریق مورد نیاز ۰/۳ گرم بر سانتیمتر مربع و بیشترین آن ۰/۶ گرم بر سانتیمتر مربع است.

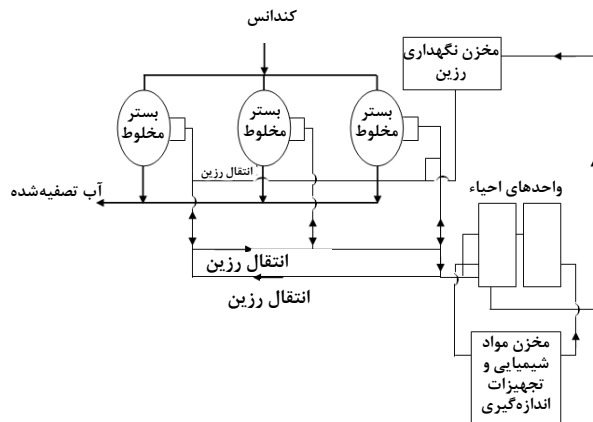
تحت شرایط نرمال بهره‌برداری نسبت وزنی رزین‌های کاتیونی به آنیونی ۲ به ۱ می‌باشد. مقدار رزین آنیونی مورد نیاز، به مخزن دوغاب که با آب بدون یون تمیز یا کندانس پر شده است اضافه می‌شود. پس از پخش کامل رزین آنیونی و مخلوط شدن بوسیله همزن، رزین کاتیونی به آرامی اضافه می‌گردد. هرچه رزین کاتیونی بیشتر اضافه گردد حجم توده‌های کوچک بزرگتر می‌شود. وقتی رزین کاتیونی به طور کافی اضافه شد، دوغاب به مدت ۱۵ دقیقه بوسیله همزن مخلوط می‌گردد. سپس یک نمونه از دوغاب گرفته می‌شود و آزمون‌های کدورت و حجم رزین ته نشین شده انجام می‌گردد. سپس محلول پلی‌اکریلیک اسید کم کم به مخزن دوغاب اضافه می‌شود تا اندازه توده مورد نیاز و کدورت محلول رویی، حاصل گردد. سپس درصد حجمی دوغاب، اندازه توده‌ها و کدورت محلول رویی دوغاب ثبت می‌گردد.

عملکرد یک سیستم دارای فیلتر پیش‌انداخته با کارایی یون زدایی، به طراحی خوب آن وابسته است. یک سیستم شستشوی معکوس موثر به نحوی که رزین‌های اشباع شده و همچنین جامدات جمع شده در مدت بهره‌برداری را به طور کامل حذف نماید باعث افزایش طول عمر ستون‌های حاوی پیش‌انداخته و همچنین افزایش بازدهی استفاده از سیستم مذکور می‌گردد.

کیفیت آب خروجی می‌گردد.

لازم به ذکر است که نیاز به فضای بیشتر، هزینه و سرمایه اولیه بالاتر و همچنین عدم استفاده از رزین آمونیاکی در این سیستم‌ها از جمله معایب سیستم کاتیون-بستر مخلوط می‌باشد.

سیستم‌های بستر مخلوط - فیلتر: در این سیستم، بستر مخلوط با استفاده از یک فیلتر از آلودگی‌ها محافظت می‌شود. فیلتر مورد استفاده در این سیستم‌ها غالباً رزین پودری است. هزینه سرمایه‌گذاری این سیستم تقریباً معادل هزینه سیستم کاتیون-بستر مخلوط است در صورتی که سیستم کاتیون-مخلوط مزایای بیشتری دارد [۳].



شکل ۴- شمای کلی سیستم تصفیه کندانس به صورت بستر مخلوط با سیستم احیاء [۳]

### ۳-۲-۲- احیاء رزین‌ها در سیستم‌های تصفیه کندانس با بستر مخلوط

هدف از احیاء، حذف آلودگی‌هایی می‌باشد که در مدت زمان کارکرد بر روی رزین‌ها ایجاد شده است. احیاء سیستم بستر مخلوط شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- انتقال رزین اشباع شده از مخزن بهره‌برداری به مخزن احیاء آنیونی

۲- جداسازی رزین‌های آنیونی و کاتیونی با استفاده از اختلاف چگالی

۳- انتقال رزین کاتیونی به مخزن مخصوص احیاء آن

۴- احیاء رزین کاتیونی با اسید و احیاء رزین آنیونی با سود

۵- شستشو و آبکشی (سریع و آهسته) رزین

۶- انتقال رزین‌های کاتیونی و آنیونی به مخزن اختلاط

۷- اختلاط رزین‌ها به وسیله هوا

### ۴- مقایسه سیستم‌های مختلف تصفیه کندانس

برای جوش‌آورهای جدید که دارای درجه حرارت، فشار و توان بالایی هستند، مقادیر ناچیز املاح و مواد معلق، مشکل‌آفرین است. در این موارد صرفاً تصفیه آب جبرانی کافی نبوده و آلودگی‌های کندانس بازگشتی به جوش‌آور نیز بایستی به حداقل میزان ممکن برسد. عوامل ناخالصی موجود در کندانس را می‌توان به کمک تصفیه داخلی به طرز صحیح کنترل نمود. تصفیه خارجی نیز برای جلوگیری از ایجاد رسوب در جوش‌آور و در نهایت پیشگیری از شکست لوله‌ها ضروری است. در ادامه به مقایسه دو سیستم تصفیه

### ۳-۲-۱ انواع طراحی‌های موجود برای سیستم بستر مخلوط

**بستر مخلوط معمولی:** این سیستم پایین‌ترین هزینه نصب را دارد. یک سیستم با **بسترهای جداگانه:** مخزن رزینی تصفیه کندانس می‌تواند ترکیبی از سه بستر جداگانه کاتیونی، آنیونی، کاتیونی باشد. از جمله مزیت‌های این سیستم عدم نیاز به جداسازی رزین‌ها در هنگام احیاء است [۳].

**سیستم کاتیون - بستر مخلوط:** استفاده از رزین کاتیونی قبل از بستر مخلوط در بعضی از نیروگاه‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۳]. مزایای آن به طور خلاصه عبارتند از:

- رزین کاتیونی به عنوان یک فیلتر محافظ قبل از بستر مخلوط عمل نموده و از رسوب گرفتگی و آلودگی بستر مخلوط جلوگیری می‌کند. این امر منجر به افزایش عمر بستر مخلوط می‌گردد.
- در این سیستم حجم رزین کاتیونی افزایش می‌یابد لذا برای واحدهایی با میزان آمونیاک بالا مفید می‌باشد.
- باتوجه به اینکه حجم رزین کاتیونی در سیستم زیاد شده، لذا امکان افزایش نسبت آنیون به کاتیون در بستر مخلوط تا نسبت ۲ به ۱ وجود دارد که این نسبت زیاد در هنگام نشی کندانسور حائز اهمیت است. زیرا ظرفیت رزین آنیونی موجود، در مدار بودن سیستم را تضمین می‌نماید.
- امکان بهره‌برداری از بستر مخلوط در شرایطی که رزین کاتیونی تحت عملیات احیاء قرار دارد. این امر منجر به صرفه‌جویی در مصرف مواد شیمیایی، کاهش فاضلاب احیاء و همچنین افزایش

#### ۳-۴ کیفیت آب‌کندانس

به طور کلی، سیستم‌های بستر مخلوط برای کندانس با مواد جامد محلول بالا و سیستم‌های پیش‌اندوده برای کندانس با مواد جامد محلول پایین، مناسب هستند.

#### ۴-۴ افت فشار

افت فشار سیستم‌های بستر مخلوط به دلیل تجهیزات، رزین‌ها و لوله‌کشی‌های متعدد، بیشتر از افت فشار سیستم‌های پیش‌اندوده می‌باشد.

#### ۴-۵ احیاء

از آنجایی که سیستم‌های پیش‌اندوده از رزین‌های یکبار مصرف استفاده می‌کنند، نیازی به احیاء رزین ندارند و هیچ نگرانی در خصوص درجه احیاء رزین در این سیستم‌ها وجود ندارد. در سیستم‌های بستر مخلوط چون تجهیزات احیاء رزین جدا از بستر بهره‌برداری رزین می‌باشد، انتقال هیدرولیکی رزین‌ها در مسافت‌های طولانی با تغییر جهت‌های زیاد باعث می‌شود که مقدار دانه‌های رزین خرد شده بطور قابل توجهی افزایش یابد. لذا حجم رزین‌های آنیونی و کاتیونی قبل و بعد از عملیات احیاء بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد و کاهش رزین جبران گردد. همچنین لازم به ذکر است که، جداسازی رزین‌های آنیونی و کاتیونی در سیستم‌های بستر مخلوط به دلیل فصل مشترک رزین‌های آنیونی و کاتیونی صددرصد نیست.

#### ۴-۶ ایمنی

سیستم‌های پیش‌اندوده به دلیل یکبار مصرف بودن رزین و عدم نیاز به فرایند احیاء مشکلات ایمنی ایجاد نمی‌کنند. این در حالی است که، در سیستم‌های بستر مخلوط ملاحظات ایمنی جدی برای اپراتورها به دلیل استفاده از مواد شیمیایی خطرناک، بایستی در نظر گرفته شود.

#### ۴-۷ ملاحظات زیست محیطی

در فرایند احیاء رزین‌های بستر مخلوط مقادیر قابل ملاحظه‌ای فاضلاب شیمیایی تولید می‌شود که بایستی به طور مناسب خنثی‌سازی و دفع شود. از طرفی دانه‌های رزین خرد شده در

بین راهی با استفاده از رزین‌های پیش‌اندوده و بستر مخلوط از جنبه‌های مختلف پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱-۱ دمای بهره‌برداری

رزین‌های آنیونی موجود در سیستم تصفیه کندانس بستر مخلوط حداکثر تا دمای ۶۰ درجه سلسیوس پایدار هستند. این در حالی است که امکان استفاده از رزین‌های پودری سیستم پیش‌اندوده تا ۱۰۵ درجه سلسیوس وجود دارد.

#### ۴-۲ حذف مواد معلق و محلول

محصولات خوردگی که در سیکل آب و بخار سیرکوله می‌شود عمدتاً از اکسیدهای آهن تشکیل شده‌اند. امکان حذف این مواد مزاحم که در چاه داغ کندانسور تجمع می‌یابند با بکارگیری یک تصفیه مطمئن در زمان توقف واحد وجود دارد. سیستم تصفیه کندانس امکان کاهش مقادیر این مواد را داراست. میزان حذف این مواد معلق در سیستم‌های بستر مخلوط کمتر از سیستم‌های پیش‌اندوده است. در زمان شروع به کار یک واحد، غلظت آهن کل به صدها یا حتی هزاران قسمت در بلیون<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد. سیستم‌های تصفیه کندانس بستر مخلوط ساده، توانایی حذف حدود ۹۰ درصد این آهن را دارند. لذا برای یک مدت کوتاه بیشتر از ۱۰۰ قسمت در بلیون آهن در کندانس باقی می‌ماند که به سمت جوش آور می‌رود. با کاهش غلظت آهن در کندانس، بازدهی فیلتراسیون به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. سیستم‌های تصفیه کندانس حاوی بی‌یون‌کننده‌ها و فیلتر پیش‌اندوده قابلیت حذف بالای ۹۰ درصد محصولات خوردگی معلق را دارند. اما در خصوص حذف ناخالصی‌های یونی بازدهی کمتری نسبت به سیستم‌های تصفیه کندانس با بستر عمیق دارند. راندمان حذف محصولات خوردگی در بسترهای عمیق وابسته به نوع و دانه‌بندی ذرات اکسیدهای فلزی معلق است. سیستم‌های تصفیه کندانس حاوی بی‌یون‌کننده‌ها و فیلتر پیش‌اندوده با بستر عمیق قادر به حذف ناخالصی‌ها در غلظت ۲ قسمت در بلیون و کمتر نیز هستند. این سیستم‌ها در کنترل میزان سیلیس نیز نقش به‌سزایی دارند. در واقع از مزیت‌های سیستم‌های پیش‌اندوده نسبت به سیستم‌های مخلوط ساده قابلیت حذف بیشتر سیلیس در آنها است.

1. Part per Billion (ppb)

مربوطه و دیگر تجهیزات احیاء و همچنین هزینه نصب تجهیزات فوق‌الذکر مورد نیاز است ولی در سیستم پیش‌اندوده نیازی به این سرمایه‌گذاری‌ها نیست. همچنین فضای مورد نیاز سیستم بستر مخلوط، دو تا سه برابر سیستم‌های پیش‌اندوده می‌باشد. همچنین در سیستم بستر مخلوط لازم است که تجهیزات مورد استفاده با مواد ضد اسید پوشانده شوند. با توضیحات فوق‌الذکر پی برده می‌شود که هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای سیستم‌های بستر مخلوط بیشتر از سیستم‌های پیش‌اندوده است.

#### ۴-۱۲ هزینه بهره‌برداری

به دلیل سادگی سیستم‌های پیش‌اندوده و عدم نیاز به فرایند احیاء، این سیستم‌ها به تعداد اپراتور کمتری نیاز دارند. همچنین هزینه‌های خرید مواد شیمیایی در پیش‌اندوده وجود نداشته و هزینه مصرف آب بدون یون در سیستم مذکور کمتر است. به طور کلی، بدون در نظر گرفتن هزینه اپراتور، هزینه جایگزینی رزین‌ها و هزینه برق در سیستم بستر مخلوط، بیشتر از سیستم پیش‌اندوده است.

با توجه به هزینه‌های نصب و بهره‌برداری، از نظر اقتصادی سیستم‌های پیش‌اندوده ارزان‌تر و مفیدتر از سیستم‌های رزینی قابل احیاء می‌باشد. البته در سیستم پیش‌اندوده استفاده از رزین فرم آمونیاکی دارای هزینه پایین‌تری نسبت به رزین فرم هیدروژنی است اما لزوم توجه به امکان ایجاد اشکال در سیکل نیروگاهی در اثر افزایش پ‌هاش (pH) در فرم آمونیاکی وجود دارد. بنابراین در هنگام انتخاب بین دو سیستم متداول تصفیه‌کنند (پیش‌اندوده و بستر مخلوط) بایستی به نوع نیروگاه، شرایط و رژیم کنترل شیمیایی، نوع برج خنک‌کن و عوامل دیگر توجه کرد.

#### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به اینکه جوش‌آورها دارای دما، فشار و ظرفیت بالایی هستند، وجود مقادیر جزئی املاح و مواد معلق در کنده‌انس می‌تواند مساله‌ساز باشد. از این رو تصفیه‌کننده ضروری بوده و بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

استفاده از واحد تصفیه‌کننده موجب حذف یا کاهش قابل توجه زمان استارت واحد، حذف ناخالصی‌های یونی و محصولات خوردگی، حفاظت جوش‌آور و توربین، نگهداری آب سیکل در کیفیت مطلوب،

سیستم‌های بستر مخلوط و همچنین تمامی رزین‌های پودری در سیستم پیش‌اندوده به محیط زیست دفع می‌شوند. از آنجایی که این رزین‌ها قابل بازیافت نیستند لذا تمهیدات لازم جهت کاهش مشکلات زیست‌محیطی بایستی صورت پذیرد.

#### ۴-۸ فاضلاب

حجم فاضلاب تولید شده در عملیات احیاء رزین‌های بستر مخلوط (انتقال، شستشو و احیاء) به طور قابل توجهی از عملیات شستشوی رزین‌های پودری پیش‌اندوده بیشتر است.

#### ۴-۹ زمان

زمان عملیات در سیستم‌های بستر مخلوط بیشتر از زمان عملیات در سیستم‌های پیش‌اندوده است. رزین‌های موجود در بستر مخلوط و پیش‌اندوده اساساً یکسان هستند فقط اندازه ذرات در دو رزین متفاوت است. رزین‌های پیش‌اندوده ریزتر بوده، لذا سطح تماس کنده‌انس با رزین در پیش‌اندوده بیشتر است و از طرفی مقدار رزین در سیستم پیش‌اندوده خیلی کمتر از مقدار آن در سیستم بستر مخلوط است لذا زمان عملیاتی در سیستم‌های بستر مخلوط نسبت به پیش‌اندوده بیشتر است.

#### ۴-۱۰ سادگی

سیستم پیش‌اندوده به دلیل نداشتن عملیات احیاء از سیستم بستر مخلوط ساده‌تر است.

#### ۴-۱۱ هزینه سرمایه‌گذاری

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای سیستم‌های بستر مخلوط بیشتر از سیستم‌های پیش‌اندوده است زیرا در سیستم پیش‌اندوده فیلتراسیون و تعویض یون در یک مخزن صورت می‌گیرد ولی در بستر مخلوط، فیلتراسیون در کارتریج و مبادله یونی در مخزن بستر مخلوط انجام می‌شود. پس تصفیه فیزیکی و شیمیایی در پیش‌اندوده با تعداد مخزن کمتری نسبت به بستر مخلوط صورت می‌گیرد.

در سیستم‌های بستر مخلوط، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه خرید تجهیزات احیاء شامل مخازن (جداسازی، احیاء و ذخیره)، پمپ‌ها (انتقال و تزریق)، مبدل حرارتی، ابزار دقیق، شیرآلات، لوله‌های



کاهش خروج‌های غیر ضروری واحد از مدار، کاهش میزان درین<sup>۱</sup> جوش آور، همچنین کاهش نیاز به آب جبرانی و مزایای دیگر می‌گردد.

دو سیستم متداول جهت تصفیه کندانس در نیروگاه‌ها وجود دارد که عبارتند از سیستم‌های با رزین پیش‌انداخته و سیستم‌های با رزین بستر مخلوط.

رزین پیش‌انداخته شامل رزین‌های آنیونی، کاتیونی و فیبرهای بی‌اثر می‌باشد. این رزین‌ها پودری و یکبار مصرف بوده و نیازی به سیستم احیاء ندارند.

سیستم‌های تصفیه کندانس بستر مخلوط از یک بستر پرشده از رزین‌های کاتیونی و آنیونی تشکیل شده‌اند. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا، معایب و نیز محدودیت‌هایی در کاربردشان می‌باشند.

از مهمترین پارامترهایی که در تعیین نوع سیستم تصفیه کندانس و اجزاء آن تاثیرگذار است می‌توان به آنالیز شیمیایی آب ورودی، میزان جریان آب ورودی و ظرفیت سیستم، طریقه فرایند و شرایط احیاء، زمان بهره‌برداری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، جنس تجهیزات (شامل مواد تشکیل دهنده توربین، مخازن، سیستم خنک‌کننده) اشاره نمود.

## مراجع

- [۱] حق‌پرست، ح.، دستخوان، ر.، "تحلیلی بر معضل مربوط به سیستم CPP نیروگاه‌های سیکل ترکیبی یزد و کازرون"، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، (۱۳۸۸).
- [۲] کیان بخش، م.، "جلوگیری از رسوبگذاری در جوش‌آورهای نیروگاه با تغییر نقطه کار دمایی بهره‌برداری از CPP"، چهارمین کنفرانس نیروگاه‌های برق، تهران، (۱۳۹۰).
- [3] EPRI report #1010181: Condensate polishing Guidelines for fossil plants, (2006).
- [۴] اطلاعات و مدارک اخذ شده از نیروگاه سیکل ترکیبی یزد
- [۵] کاظمی، ا.، "تجربیات نیروگاه‌های پیشرفته"، چاپ اول، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (۱۳۷۹).
- [۶] میرجلیلی، م.، کاظمی، م.، جوکار، م.، مجاهدی، ب.، "بررسی عملکرد سیستم CPP نیروگاه سیکل ترکیبی یزد و ارائه پیشنهاد جهت رفع معایب آن"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، (۱۳۸۹).
- [7] EPRI report #1003994: "Guidelines for chemical cleaning of conventional fossil plant equipment", (2001).
- [8] Limon, L., "Treatment of condensate returns at industrial plants", Journal of Engineering for power, 99 (2) 269-273, (1977).

1. drain