

بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه برق آبی - مطالعه موردی نیروگاه دز

ایمان جعفری¹، احسان نجف پور²

¹شرکت نصب، تعمیر و نگهداری نیروگاههای برق آبی خوزستان، iman_jafari@yahoo.com

²مربی، گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، ایران

چکیده

هدف از این پژوهش ارائه راهکار برای افزایش کارایی سیستم خنک کاری و مقابله با پدیده نامطلوب انباشت رسوب در مبدل های حرارتی نیروگاه دز می باشد. در نیروگاه دز بدلیل عدم وجود سیستم فیلتراسیون مناسب و به تبع آن انباشت رسوب در جداره داخلی لوله های مبدل های حرارتی، توانایی سیستم خنک کاری در دفع حرارت محدود می گردد. چنین شرایطی در ماههای شهریور و مهر بدلیل پایین رفتن ارتفاع آب دریاچه و افزایش دمای آب ورودی به سیستم خنک کاری تشدید می گردد. بدین منظور برای مقابله با پدیده نامطلوب رسوب، در طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز تغییر سیستم مدار باز به مدار بسته در دستور کار قرار گرفته است. این تحقیق به امکان سنجی طرح یاد شده می پردازد و پس از بیان مزایا و محدودیت های طرح بهینه سازی، با حفظ مزایای ذکر شده، طرحی کم هزینه تر، ساده تر، با حداقل تغییرات ساختاری و از همه مهمتر طرحی آزموده شده را ارائه خواهد داد. در طرح پیشنهادی، سیستم فیلتراسیون جدید مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی

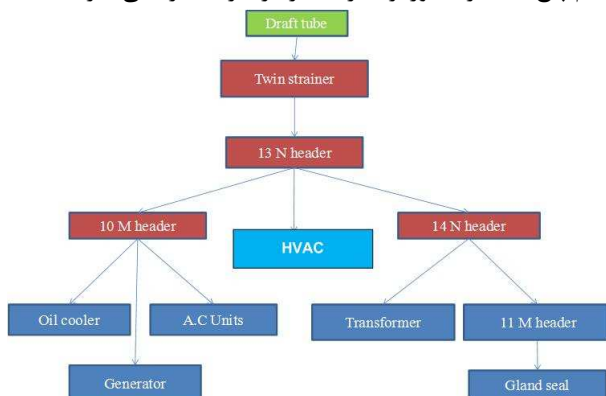
سیستم خنک کاری، مبدل حرارتی، انباشت رسوب، سیستم فیلتراسیون

شرح سیستم صنعتی

نیروگاه دز دارای هشت واحد با ظرفیت تولید هر واحد 65 MW در هد و دبی نامی به ترتیب 165m و 52 m³/s دهه پنجم از عمر خود را سپری می کند. بدین منظور برای افزایش تولید نیروگاه و ارتقاء راندمان بخشهای مختلف، طرح بهینه سازی نیروگاه در دستور کار قرار گرفته است. یکی از قسمت های بسیار مهم و حساس نیروگاه سیستم خنک کاریست که در طرح بهینه سازی تغییرات عمده ای برای آن پیش بینی گردیده است. سیستم خنک کاری نیروگاه دز با هدف خنک کاری سیم پیچ ژنراتور، روغن یاتاقان های هادی و کفگرد ژنراتور، روغن یاتاقان های توربین، روغن ترانسفورمرها، آب بند توربین و راه اندازی واحدهای ایرکاندیشن و تهویه نیروگاه طرح ریزی گردیده است. شکل (1) شماتیکی از قسمت های مختلف سیستم خنک کاری نیروگاه دز را نمایش می دهد. سیال خنک کننده این سیستم از درافت تیوب تامین می گردد و پس از

خنک کاری قسمت های مختلف از طریق یک مدار باز به رودخانه تخلیه می گردد.

در ابتدای انشعاب گرفته شده از درافت تیوب، صافی های زوجی با تراکم شبکه 8 میلیمتر وظیفه تصفیه آب خنک کننده و جلوگیری از نفوذ املاح و رسوبات را بر عهده دارند. آشکار است که این تراکم شبکه قادر به جلوگیری از املاح و رسوبات با اندازه کوچکتر از 8 میلیمتر نخواهد بود. بنابراین سالانه طی یک برنامه زمانبندی مشخص تمامی مبدل های واحد برق آبی می بایست رسوب زدایی گردند. آب ورودی به سیستم خنک کاری پس از عبور از صافی های زوجی وارد خط اصلی 13N گردیده و از آنجا سه انشعاب، قسمت های مختلف سیستم خنک کاری نیروگاه را تغذیه می کنند. انشعاب اول خنک کننده های روغن یاتاقان های توربین و ژنراتور، رادیاتورهای سیم پیچ ژنراتور و واحدهای ایرکاندیشن طبقات مختلف نیروگاه، انشعاب دوم سیستم تهویه فضای نیروگاه و انشعاب سوم خنک کننده های روغن ترانسفورمرها و آب بند توربین را تامین می کنند. در بین قسمت های مختلف یادشده، عملکرد مناسب مبدل های حرارتی ژنراتور شامل خنک کننده های روغن یاتاقان ها، رادیاتورهای سیم پیچ ژنراتور و خنک کننده های روغن ترانسفورمر بسیار حائز اهمیت است. چنانچه مبدل های مذکور قادر به دفع شار حرارتی تولیدی در تجهیزات ژنراتور و ترانسفورمر نگردند، تولید الکتریسیته واحد برق آبی محدود می گردد. به گونه ای که ممکن است واحد برق آبی به علت دمای غیر مجاز سیم پیچ ژنراتور و یا سیم پیچ های ترانسفورمر قادر به کار در شرایط بار نامی نگردند.



شکل 1: طرح شماتیک سیستم خنک کاری نیروگاه دز

همراه با شاخه های اصلی هدایت سیال

نوع مبدل های حرارتی بکار گرفته شده در نیروگاه دز به ترتیب انشعابات ذکر شده عبارتند از: 1- خنک کننده های روغن لوله و

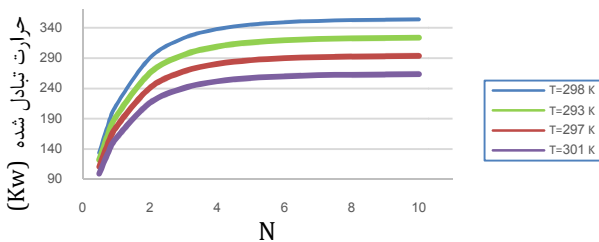
در این شکل N (تعداد واحدهای انتقال حرارت) با استفاده از رابطه (2) بدست می آید.

$$N = U.A/mC_p \quad (2)$$

در این رابطه U ، ضریب انتقال حرارت کلی و A ، سطح تبادل حرارت می باشند. شکل (3) تاثیر تغییر دمای آب ورودی به مبدل رادیاتور نیروگاه دز را با مشخصات موجود در جدول (1)، به عنوان نمونه نشان می دهد [3]. آشکاراست که هر چه دمای سیال خنک کننده ورودی افزایش یابد، توانایی مبدل در تبادل حرارت نیز کاسته می شود.

جدول 1: مشخصات مبدل ایر کولر ژنراتور نیروگاه دز

	Gas side (Air)		Tube side (Water)	
	دبی جرمی kg/s	7.5	6.94	
دما (ورود/خروج) °C	63	38	25	31.62
فشار bar	1		2.5	
مقاومت فولینگ m ² k/w	-		0.00015	
تعداد پاس	1		2	
تعداد لوله			108	
قطر لوله (خارجی/ضخامت) mm			(1.24/15.88)	
سطح تبادل حرارت m ²			13.2	
ضریب کلی انتقال حرارت در حالت تمیز W/m ² K			725.7	



شکل (3): تاثیر دمای سیال خنک کننده بر برداشت حرارت ایرکولر

پارامتر تاثیرگذار دوم انباشت رسوب روی جدار داخلی لوله های مبدل های حرارتی می باشد. رابطه (3) میزان تبادل حرارت مبدل را با استفاده از ضریب کلی انتقال حرارت نشان می دهد [2].

$$Q = UAF\Delta T_{Ln} \quad (3)$$

در این رابطه $U, F, A, \Delta T_{Ln}$ به ترتیب اختلاف دمای لگاریتمی، سطح تبادل حرارت، ضریب تصحیح مبدل و ضریب کلی انتقال حرارت می باشند. رابطه (4) ترم های تاثیرگذار در مقدار ضریب کلی انتقال حرارت، که رابطه عکس با مقاومت دارد را نشان می دهد [1].

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k l} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (4)$$

ضریب کلی انتقال حرارت وابسته به پنج ترم می باشد که به ترتیب از سمت چپ به راست عبارتند از: ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل لوله، مقاومت رسوب داخل لوله، مقاومت جدار فلز لوله، مقاومت رسوب جدار خارجی لوله و ضریب انتقال حرارت جابجایی خارج لوله. بنابراین هرچه میزان ضخامت رسوب تشکیل شده روی جدار لوله ها افزایش یابد میزان تبادل حرارت به دلیل کاهش ضریب

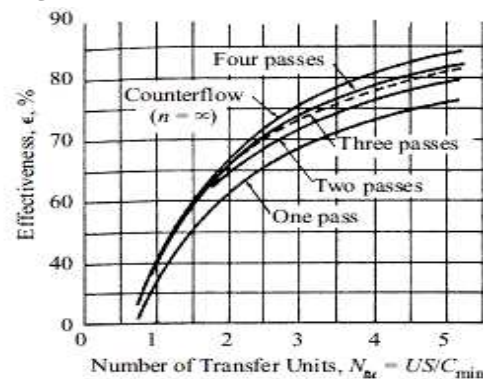
پوسته یاتاقان های هادی فوقانی و کفگرد ژنراتور 2- مبدل های لوله مارپیچ یاتاقان های تحتانی ژنراتور و یاتاقان های توربین 3- رادیاتورهای سیم پیچ ژنراتور 4- واحدهای ایرکاندیشن طبقات نیروگاه 5- رادیاتورهای سیستم تهویه نیروگاه 6- خنک کننده های روغن لوله و پوسته ترانسفورمر 7- خنک کاری تماس مستقیم آب بند توربین

طرح مسئله و موضوع پژوهشی

در تحلیل حرارتی مبدل های سیستم خنک کاری نیروگاه آبی دو پارامتر اساسی وجود دارد. این دو پارامتر عبارتند از: 1- دمای آب ورودی به سیستم خنک کننده (دمای سیال سرد ورودی) 2- مقاومت رسوب روی جدار داخلی لوله های مبدل های حرارتی. در نیروگاه آبی دز سیال سرد سیستم خنک کاری از درافت تیوب تامین می گردد. دمای آب درافت تیوب در طول سال متناسب با تغییر دمای هوای محیط و تغییر ارتفاع سطح آب دریاچه متغیر است. در سیستم های خنک کاری هر چه دمای سیال سرد کمتر باشد، توانایی مبدل در برداشت حرارت بیشتر خواهد بود و برعکس. زمان بحرانی در نیروگاه دز در ماههای انتهایی فصل تابستان و ابتدایی فصل پاییز رخ می دهد و این شرایطی است که دمای هوای محیط همچنان بالاست و علاوه بر آن سطح آب دریاچه در کمترین حد خود قرار دارد. بنابراین دمای لایه های زیرین آب دریاچه نیز به دنبال آن در بالاترین دمای خود قرار دارد. علاوه بر آن مبدل های حرارتی در انتهای دوره سالانه تعمیر و نگهداری قرار دارند. رابطه (1) میزان تبادل حرارت در مبدل های حرارتی را با استفاده از روش $\epsilon - NTU$ نشان می دهد. روش $\epsilon - NTU$ روشی بسیار کارآمد است که تنها با در اختیار داشتن دمای سیال های سرد و گرم ورودی و با استفاده از پارامترهای ورودی و ضریب تاثیر، میزان تبادل حرارت را بدست می آورد [1]:

$$Q = \epsilon \dot{m} C_p (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (1)$$

به ترتیب دبی جرمی و ظرفیت حرارتی سیال می باشند. در این رابطه $T_{c,in}, T_{h,in}$ به ترتیب دماهای سیال های گرم و سرد ورودی به مبدل حرارتی و ϵ ضریب تاثیر مبدل است. به عنوان مثال شکل (2) ضریب تاثیر مبدل های رادیاتور با دو سیال نیممخته را نسبت به تغییرات تعداد واحدهای انتقال حرارت نشان می دهد [2].



شکل 2: تغییرات ضریب تاثیر نسبت به واحدهای انتقال حرارت رادیاتور

کلی انتقال حرارت، کاهش می یابد. مقدار مقاومت رسوب با احتساب ضخامت رسوب با استفاده از رابطه (5) بدست می آید [1].

$$R_f = \frac{D_i \ln \left(\frac{D_i}{D_f} \right)}{2.K_d} \quad (3)$$

در این رابطه D_i و D_f به ترتیب قطر داخلی لوله در حالت تمیز و کثیف و K_d ضریب رسانایی حرارتی رسوب می باشند. جدول (2) تاثیر ضخامت رسوب بر واحدهای انتقال حرارت مبدل رادیاتور نیروگاه دز را به عنوان نمونه نشان می دهد. آشکاراست که هر چه ضخامت رسوب افزایش یابد میزان واحدهای انتقال حرارت و به دنبال آن میزان تبادل حرارت کاهش می یابد.

جدول 2: تاثیر ضخامت رسوب بر کاهش واحدهای انتقال حرارت

ضخامت رسوب (m)	0	0.0005	0.001
N	0.991	0.796	0.650

در نیروگاه دز هر دو عامل محدود کننده دمای سیال ورودی و مقاومت رسوب در محدودیت تولید نیروگاه تاثیر گذار می باشند. بنابراین برای رفع این مشکل طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه با هدف تبدیل مدار باز به سیستم خنک کاری شامل مدار باز اولیه و مدار بسته ثانویه در دستور کار قرار گرفته است. شکل (5) شماتیک طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز را نشان می دهد. در این طرح ارتباط مابین مدار باز اولیه و مدار بسته ثانویه از طریق یک مبدل حرارتی صفحه ای صورت می گیرد. در این سیستم مبدل های حرارتی درون مدار بسته قرار می گیرند و حرارت خود را از طریق مبدل حرارتی صفحه ای واسطه مابین دو مدار باز و بسته از دست می دهند. همچنین یک مبدل صفحه ای وظیفه تبادل حرارت سیال دو واحد برق آبی را بر عهده خواهد داشت [4].

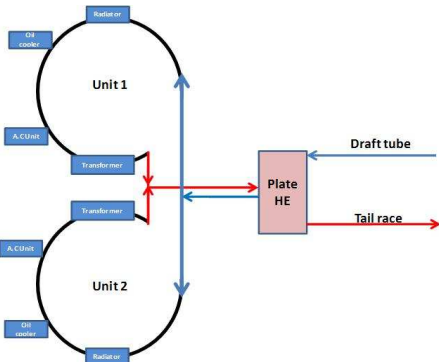
مزایای طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری عبارتند از: 1- برطرف نمودن مشکل انباشت رسوب درون لوله های مبدل حرارتی و افزایش نرخ تبادل حرارت 2- کاهش هزینه های مربوط به تعمیر و نگهداری مبدل های حرارتی صفحه ای 3- کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری

نگهداری پمپ های سیرکولاسیون سیستم بسته

در کنار مزایای ذکر شده، محدودیت هایی نیز برای اجرای طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری وجود دارد. این محدودیت ها عبارتند از: 1- جانمایی مبدل های صفحه ای و سیستم های جانبی به علت فضای محدود نیروگاه و حجم بالای تبادل حرارت و به تبع آن ابعاد بزرگ مبدل صفحه ای 2- افزایش توان خود مصرفی نیروگاه به واسطه اضافه نمودن پمپ های مدار باز 3- تغییرات ساختاری مورد نیاز برای اجرای طرح به خصوص برای اتصال مبدل های ترانسفورمر به مدار بسته به علت اختلاف ارتفاع حدود 70 متر 4- هزینه نسبتا بالای خرید تجهیزات مورد نیاز

همچنین علاوه بر محدودیت های ذکر شده سه مورد مهم نیز در طرح بهینه سازی لحاظ نگردیده است. این سه مورد عبارتند از: 1- در نظر نگرفتن سیستم فیلتراسیون مناسب برای مبدل های حرارتی صفحه ای. چرا که به علت فاصله کم مابین صفحات مبدل حرارتی صفحه ای، حساسیت این مبدل نسبت به پدیده رسوب بیشتر است.

2- احتمال تغییر در تعداد مبدل های صفحه ای به علت نرخ بالای جریان سیال و محدودیت فضای نیروگاه 3- تعبیه کردن مبدل صفحه ای به عنوان واسطه دو مدار باز و بسته، حداکثر دمای ورودی به مبدل ها را افزایش خواهد داد و این خود جزء عوامل محدود کننده ذکر شده می باشد. 4- سیستم مدار بسته جهت مقابله با پدیده رسوب طرح ریزی گردیده است. این سیستم به خوبی در مقابل رسوب های بیولوژیکی مقاوم است اما در مقابل رسوبات آلی کربنات که سهم اصلی در کاهش انتقال حرارت و انباشت دیگر انواع رسوب را دارند، ناتوان است. بنابراین با تغییر سیستم به مدار بسته همچنان مشکل رسوب به قوت خود باقی خواهد بود. 5- در طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری راه حلی برای برطرف نمودن رسوب تشکیل شده روی لوله های سیستم خنک کاری ارائه نگردیده است. در صورتیکه این لوله ها حاوی لایه ای از رسوب سخت می باشند.



شکل 5: طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز

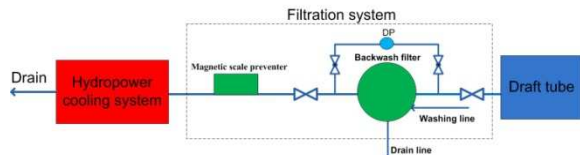
حال با توجه به موارد ذکر شده سوال قابل طرح اینست که، آیا می توان با حفظ مزایای ذکر شده و برطرف نمودن محدودیت ها و موارد پیش بینی نشده در طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری، طرحی کارآمد، کم هزینه تر و ساده تر ارائه نمود؟

مراحل کار و پژوهش پیشنهادی

بدون شک طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه نیازمند یک سیستم فیلتراسیون مناسب می باشد. لزوم استفاده از این سیستم بدلیل حساسیت بیشتر مبدل صفحه ای به انباشت رسوب می باشد. در طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز سیستم مدار بسته و مبدل های صفحه ای برای جلوگیری از عواقب نامطلوب انباشت رسوب پیش بینی گردیده اند. حال آنکه بدون استفاده از سیستم فیلتراسیون مناسب، توانایی تبادل حرارت در حد مطلوب در مبدل صفحه ای کاسته می شود. نکته قابل تامل دیگر اینکه همواره اولین راه حل برای برطرف نمودن مشکل رسوب استفاده از سیستم فیلتراسیون قوی و مناسب می باشد و معمولا سیستم های مدار بسته عمدتا با هدف کاهش مصرف در مواردی که سیال خنک کن به اندازه کافی موجود نیست مورد استفاده قرار می گیرد.

طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز پس از بازرسی انجام شده در سال 2002 میلادی توسط شرکت مشاور لامایر ارائه گردیده است [4]. در حال حاضر صنعت فیلتراسیون رشد چشمگیری

بوده اند، آزاد میشوند. علت دیگر افزایش درصد مولکولهای آزاد در اثر میدان مغناطیسی است. میدان مغناطیسی باعث وارد شدن نیرو به مجموعه ای از مولکولهای آب که تشکیل پیوند هیدروژنی داده اند میشود. با افزایش فراوانی مولکولهای آزاد آب، خاصیت حلالیت به شدت افزایش پیدا کرده و آب شروع به حل کردن رسوبهای پیشین موجود در دیواره های لوله های خطوط میکند، به این ترتیب فرایند رسوب زدایی به مرور زمان تکمیل تر می شود. بنابراین برای مقابله با سختی آب می توان از سختی گیرهای مغناطیسی استفاده نمود و برای جلوگیری از نفوذ گل و لای به سیستم خنک کاری استفاده از فیلترهای بک واش با قابلیت تمیزکاری خودکار پیشنهاد می گردد. این فیلترها مجهز به سنسورهای سنجش اختلاف فشار هستند و چنانچه افت فشار درون فیلتر از حد مجاز فراتر رود با اعمال یک فرمان، فیلتر بک واش با استفاده از یک فرآیند جریان معکوس و بازوهای جمع آوری توده رسوب، شبکه فیلتر را تمیز می کند. شکل (6) طرح شماتیک سیستم خنک کاری نیروگاه دز همراه با سیستم فیلتراسیون ذکر شده را نشان می دهد.



شکل 6: سیستم فیلتراسیون پیشنهادی سیستم خنک کاری نیروگاه دز این سیستم فیلتراسیون شامل یک عدد فیلتر بک واش برای مقابله با رسوبات بیولوژیکی و گل و لای و یک عدد سختی گیر مغناطیسی برای مقابله با رسوبات آلی می باشد. هر واحد برق آبی توسط یک سیستم فیلتراسیون مجزا تجهیز می شود. این سیستم فیلتراسیون در مسیر انشعاب گرفته شده از درافت تیوب قرار گرفته و جایگزین فیلترهای زوجی قدیمی با تراکم شبکه 8 میلیمتر می شوند. همچنین می توان برای افزایش کارایی سختی گیرهای مغناطیسی از چند سختی گیر کوچک تر روی انشعابات ورودی به مبدل های حرارتی بهره جست. بنابراین با استفاده از یک سیستم فیلتراسیون مناسب می توان بدون انجام تغییرات ساختاری و صرف هزینه های گزاف، بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز را با طرح پیشنهادی به انجام رسانید.

مراجع

- [1] Ozisik, M.N., 1985. *Heat Transfer: A Basic Approach*, McGraw-Hill, Singapore.
- [2] Kays W.M., London A.L. 1984. *Compact heat exchanger*, McGraw-Hill, New York.
- [3] گزارش فنی، دیتاشیت مبدل های حرارتی سیستم خنک کاری نیروگاه دز، 1387، شرکت هامون مبدل، شرکت تولید و بهره برداری نیروگاه دز.
- [4] گزارش فنی، طرح بهینه سازی سیستم خنک کاری نیروگاه دز، 1381، شرکت لامایر، سازمان آب و برق خوزستان.
- [5] گزارش فنی، آنالیز آب سیستم خنک کاری نیروگاه دز، 1392، شرکت بهره برداری تولید و انتقال آب جنوب شرق، شرکت تعمیرات نیروگاههای برق آبی خوزستان.

داشته و با استفاده از تجهیزات بسیار کارآمد و نسبتاً کم هزینه مقابله با پدیده رسوب را بسیار ساده نموده است. بنابراین منطقی به نظر می رسد که به جای استفاده از دو سیستم مدار باز اولیه و مدار بسته ثانویه همراه با یک سیستم فیلتراسیون مناسب در طرح بهینه سازی، سیستم خنک کاری مدار باز موجود در نیروگاه دز را با استفاده از یک سیستم فیلتراسیون قوی در مقابل پدیده رسوب ایمن نمود. آنالیز آب ورودی به سیستم خنک کاری نیروگاه دز، در جدول (3) ارائه شده است [5].

جدول 3: نتایج آنالیز آب ورودی به سیستم خنک کاری

291 mg/lit	TDS	26.22 mg/lit	Na ⁺
19°C	دما	1.17 mg/lit	K ⁺
7.97	PH	53.25 mg/lit	Cl ⁻
195 mg/lit	TH(CaCO ₃)	37.44 mg/lit	So ₄
472 μmoh/cm	EC	0	CL ₂
135 mg/lit	(CaCO ₃)	0	Co ₂
1392/04/02	تاریخ	26.22 mg/lit	Na ⁺

آشکار است که قسمت عمده رسوبات در ورودی سیستم خنک کننده، کلسیم کربنات (CaCO₃) می باشد. کلسیم کربنات دارای ترکیباتی با اشکال مختلف می باشد. یکی از انواع مختلف کلسیم کربنات، کلسیت است که پایدارتر از دیگر گونه های کلسیم کربنات می باشد. این کریستال بر جدار داخلی لوله های مبدل های حرارتی رسوب می کند. نوع دیگر رسوب کلسیم کربنات به صورت آراگونیت می باشد. آراگونیت نسبت به کلسیت پایداری کمتری دارد. این کریستال به صورت توده کریستالی بی شکل تشکیل می شود و تمایل به رسوبگذاری بر جداره تاسیسات در تماس با آب ندارد. مولکولهای دو قطبی آب یکدیگر را از طرف قطبهای مخالف جذب کرده و تشکیل پیوندهای هیدروژنی یا نیروی واندروالس را می دهند. اشکال سختی آب وابسته به همین پیوند می باشد در فاز بخار این پیوند بسیار ضعیف است درحالیکه در فازهای مایع و جامد این پیوند به ترتیب متوسط و قوی است.

هنگامیکه یک نمک در آب حل میشود همین خاصیت دو قطبی بودن باعث تجزیه نمک به یونهای مثبت و منفی و جذب و احاطه آن توسط مولکول آب میشود به این فرایند حل شدن در آب، هیدراته شدن می گویند هر چه تعداد مولکولهای آزادی که کم تر در پیوند هیدروژنی شرکت کرده باشند بیشتر باشد، خاصیت هیدراته شدن بیشتر بوده و حلالیت آب بالاتر میرود. در صورتیکه از سختی گیر مغناطیسی استفاده شود به دو دلیل حلالیت آب افزایش پیدا میکند: اولاً باعث تغییر شکل کریستالهای کلسیم کربنات از گونه کلسیت به آراگونیت می شود که در نهایت توده ای بی شکل از میکروکریستالهای آراگونیت تشکیل می شود که در آب شناور خواهد بود و تمایل به رسوبگذاری بر جداره تاسیسات در تماس با آب را نداشته و همراه با جریان آب در یک مدار باز از داخل سیستم عبور کرده و تخلیه می گردد. بنابراین فراوانی مولکولهای آزاد آب بیشتر میشود زیرا مولکولهایی که درگیر فرایند حلالیت یا هیدراته شدن