

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران

وزارت راه و شهرسازی

بررسی عملکرد سیستم‌های سختی‌گیر در تأسیسات گرمایش و سرمایش آبی ساختمان‌های مسکونی کوچک

مجریان:

آسیه عطاردی کاشانی، شهرام دلفانی

شماره نشر: گ - ۸۲۴

چاپ اول: ۱۳۹۷

سرشناسه	دلفانی، شهرام، ۱۳۵۲
عنوان و نام پدیدآور	بررسی عملکرد سیستم‌های سختی‌گیر در تاسیسات گرمایش و سرمایش آبی ساختمانهای مسکونی کوچک/ مجریان شهرام دلفانی، آسیه عطاردی کاشانی
مشخصات نشر	تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	و، ۹۸ ص: مصور، جدول
فروست	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره نشر: گ- ۸۲۴
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۱۱۳-۱۹۶-۷
وضعیت فهرست‌نویسی	فیبا
موضوع	هیدرونیک
موضوع	Hydronics
موضوع	هیدرونیک -- ابزار و وسایل
موضوع	Hydronics -- Equipment and supplies
موضوع	گرمایش با آب
موضوع	Hot-water heating
موضوع	تهویه مطبوع
موضوع	Air conditioning
شناسه افزوده	عطاردی کاشانی، آسیه، ۱۳۵۶
شناسه افزوده	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
شناسه افزوده	Road, Housing and Urban Development Research Center
رده بندی کنگره	THV۴۶۷/د۸ب۴ ۱۳۹۷
رده بندی دیویی	۶۹۷
شماره کتابشناسی ملی	۵۲۷۴۷۷۸



نام کتاب: بررسی عملکرد سیستم‌های سختی‌گیر در تاسیسات گرمایش و سرمایش آبی ساختمانهای مسکونی کوچک
 مجریان: شهرام دلفانی، آسیه عطاردی کاشانی
 شماره نشر: گ- ۸۲۴
 ناشر: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
 نوبت چاپ: اول ۱۳۹۷
 تیراژ: ۱۰۰ نسخه

قطع: وزیری
 لیتوگرافی، چاپ و صحافی: اداره انتشارات و چاپ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
 قیمت: ۸۸۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-113-196-7

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۱۳-۱۹۶-۷

مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده نگارندگان محترم می‌باشد.
 کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر برای مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی محفوظ است.

نشانی ناشر: تهران، بزرگراه شیخ فضل ... نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵-۶ تلفن: ۸۸۲۵۵۹۴۲-۶ دورنگار: ۸۸۳۸۴۱۳۲
 پست الکترونیکی: pub@bhrc.ac.ir فروش الکترونیکی: http://pub.bhrc.ac.ir

پیشگفتار

آب بهینه‌ترین سیال عامل در سیستم‌های گرمایش و سرمایش می‌باشد، چرا که ظرفیت گرمایی نسبتاً بالایی دارد و همچنین ارزان و در دسترس است. مواد قطبی و بسیاری از نمک‌ها به مقدار متفاوت در آب حل می‌شوند و این حلالیت به دما، فشار، PH، پتانسیل شیمیایی و غلظت نسبی مواد در آب بستگی دارد. عمده نمک‌های محلول در آب شامل کاتیون‌ها مانند کلسیم، منیزیم، آهن، ... و آنیون‌ها شامل بی‌کربنات، کربنات، هیدروکسید، سولفات، کلرید، ... می‌باشند. این نمک‌ها در شرایط مناسب باعث ایجاد رسوب و یا خوردگی سیستم لوله‌کشی و تجهیزات گرمایشی یا سرمایشی می‌شوند که بالطبع بر تاسیسات ساختمانی و صنعتی اثرات نامطلوبی چون کاهش انتقال حرارت، کاهش دبی آب و فشار مسیر و ... می‌گذارد.

یکی از راه‌های کاهش سختی آب، استفاده از سختی‌گیرهای مختلف است. برخی انواع سختی‌گیرهای مرسوم شامل سختی‌گیر رزینی کاتیونی، اسمز معکوس، الکترومغناطیسی و گالوانیک می‌باشد که در این پروژه، عملکرد آن‌ها در کاهش رسوب و خوردگی بصورت تجربی با هم مقایسه شده است.

محمد شکرچی زاده

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول : معرفی و هدف تحقیق
۱	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ شاخص های املاح محلول در آب
۲	۱-۲-۱ غلظت کل املاح محلول آب (TDS)
۲	۲-۲-۱ هدایت الکتریکی آب (EC)
۳	۳-۲-۱ غلظت یون هیدروژن
۳	۴-۲-۱ pH تعادل و تعادل کربناتی
۵	۵-۲-۱ سختی کل آب (TH)
۶	۶-۲-۱ شاخص قلیائیت آب
۹	فصل دوم : رسوب، خوردگی و راه های جلوگیری از آنها
۹	۱-۲ رسوبگذاری
۹	۱-۱-۲ فوق اشباع بودن
۱۰	۲-۱-۲ تشکیل هسته های اولیه
۱۰	۳-۱-۲ زمان تماس
۱۰	۴-۱-۲ pH
۱۰	۵-۱-۲ تاثیر عوامل دیگر
۱۱	۲-۲ خوردگی
۱۲	۱-۲-۲ عوامل موثر بر خوردگی
۱۲	۱-۱-۲-۲ اثر گازهای محلول در آب
۱۳	۲-۱-۲-۲ pH
۱۴	۳-۱-۲-۲ درجه حرارت
۱۴	۴-۱-۲-۲ اثر نمکهای محلول
۱۵	۵-۱-۲-۲ مواد آلی موجود در آب

۱۵	..... ۲-۲-۲ انواع خوردگی
۱۵	..... ۱-۱-۲-۲ خوردگی یکنواخت
۱۶	..... ۲-۲-۲ خوردگی گالوانیک یا دو فلزی
۱۷	..... ۳-۲-۲ خوردگی شیاری
۱۷	..... ۴-۲-۲ حفره‌دار شدن
۱۸	..... ۵-۲-۲ خوردگی بین دانه‌ای
۱۸	..... ۶-۲-۲ جدایش انتخابی (زدایش آلیاژی)
۱۸	..... ۷-۲-۲ خوردگی سایشی
۱۹	..... ۸-۲-۲ خوردگی توأم با تنش
۱۹	..... ۹-۲-۲ خرابی هیدروژنی
۱۹	..... ۳-۲ کلیات
۲۰	..... ۱-۳-۲ سختی‌گیر رزینی کاتیونی
۲۱	..... ۲-۳-۲ سختی‌گیر اسمز معکوس
۲۳	..... ۳-۳-۲ سختی‌گیر مغناطیسی
۲۳	..... ۴-۳-۲ سختی‌گیر الکترومغناطیسی
۲۴	..... ۵-۳-۲ سختی‌گیر گالوانیک
۲۵	..... فصل سوم : روش انجام و نتایج طرح
۲۵	..... ۱-۳ شرح کار و مدل مورد تحقیق
۲۸	..... ۲-۳ روند داده برداری
۳۲	..... ۳-۳ نتایج آزمون‌ها
۳۲	..... ۱-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات بدون عبور از هرگونه سختی‌گیر
۳۹	..... ۲-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات با عبور از سختی‌گیر رزینی کاتیونی
۴۵	..... ۳-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات با عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس
۵۱	..... ۴-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی
۵۶	..... ۵-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت بدون عبور از سختی‌گیر
۶۲	..... ۶-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت با عبور از سختی‌گیر رزینی کاتیونی
۶۸	..... ۷-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت با عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس
۷۴	..... ۸-۳-۳ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی

فصل چهارم : جمع‌بندی و بررسی نتایج ۸۱

۴ بررسی و خلاصه نتایج ۸۱

۴-۱ استفاده از آب بدون سختی‌گیر در تاسیسات ۸۴

۴-۲ استفاده از آب نرم شده توسط سختی‌گیر رزینی در تاسیسات ۸۶

۴-۳ استفاده از آب نرم شده توسط سختی‌گیر اسمز معکوس در تاسیسات ۸۸

۴-۴ استفاده از آب نرم شده توسط سختی‌گیر الکترومغناطیس در تاسیسات ۹۰

۴-۵ نتیجه‌گیری ۹۶

مراجع ۹۸



پیشگفتار مؤلف

در سیستم‌های گرمایش و سرمایش شامل بویلر، برج خنک‌کن، سیستم لوله‌کشی آنها و کلاً هر قسمتی که با آب سر و کار دارد، به دلایل مختلف چون سرعت پایین عبور آب، دمایی که نتیجه آن کاهش انحلال یون‌ها می‌باشد و ... پتانسیل ایجاد رسوب افزایش می‌یابد و شرایط ایجاد خوردگی و رسوبات سخت را فراهم می‌کند. شکل‌گیری رسوب باعث کاهش انتقال حرارت و گرم شدن بیش از حد کویل‌ها و المنت‌ها شده و در نتیجه عملکرد را کاهش می‌دهد و سیستم دچار نقص می‌شود.

از اینرو در سیستم‌هایی که نیاز مکرر به آب جبرانی دارند، لازم است تدابیری برای جلوگیری از ایجاد رسوب اتخاذ کرد.

هدف از انجام این پروژه آن است که کارایی برخی سختی‌گیرهای مرسوم در بازار در محدوده‌ای از غلظت یون‌ها و سختی‌ها در کاهش ایجاد رسوب و خوردگی در سیستم گرمایشی (در اینجا پکیج) و سرمایشی (در اینجا برج خنک‌کن) با هم مقایسه و بهترین نتیجه در آنها ارائه شود.



چکیده

زمانیکه آب گرم شود و یا در اثر مجاورت با هوا تبخیر و در نتیجه تغلیظ شود، تشکیل رسوب غیر محلول باعث مشکلات جدی در تاسیسات ساختمانی می‌شود. اگر چه این رسوب ممکن است تشکیل پوشش محافظی دهد که باعث کاهش خوردگی شود، اما باعث کاهش ضریب انتقال حرارت و افزایش افت فشار می‌شود. متداولترین رسوب سختی که در سیستم‌های تاسیساتی تشکیل می‌شود، کربنات کلسیم است که تشکیل آن به فاکتورهایی چون غلظت، قلیائیت، pH، دما و ... بستگی دارد. همچنین فاکتورهای زیادی وجود دارد باعث خوردگی قطعات مختلف در سیستم‌های تاسیساتی می‌شود که مهمترین آن اکسیژن محلول در آب می‌باشد. در پروژه حاضر، تاثیر دو نمونه آب با TDS های مختلف در میزان رسوبگذاری و خوردگی، ابتدا بدون استفاده از سختی گیر و سپس با استفاده از چند سختی گیر مرسوم شامل رزینی کاتیونی، اسمز معکوس، الکترومغناطیسی و گالوانیک بررسی و مقایسه و نتایج آن ارائه شده است.

فصل اول

معرفی و هدف تحقیق

۱-۱ مقدمه

آب مهمترین سیال عامل در حال چرخش در سیستم‌های گرمایش و سرمایش بوده که وظیفه حمل انرژی را از محل تولید (بویلر، چیلر، ...) تا پایانه‌های مصرف آن بر عهده دارد، آب می‌باشد. ارزانی، در دسترس بودن، ظرفیت گرمایی نسبتاً بالا و ... از جمله مزایای این سیال است. مواد قطبی و بسیاری از نمک‌ها به مقدار متفاوت در آب حل می‌شوند و این حلالیت به دما، فشار، PH، پتانسیل شیمیایی و غلظت نسبی مواد در آب بستگی دارد. نمک‌های محلول در آب به صورت کاتیون‌ها شامل کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، سدیم و ...، و آنیون‌ها شامل بی‌کربنات، کربنات، هیدروکسید، سولفات، کلرید، فسفات، نترات و ... می‌باشند. این مواد با عبور از تک تک تجهیزات گرمایشی یا سرمایشی موجب بروز رسوب و یا خوردگی می‌شوند.

برخی مشکلات بوجود آمده ناشی از تشکیل رسوب در تاسیسات ساختمانی و صنعتی شامل موارد زیر است:

- ۱) کاهش دبی آب و فشار مسیر
- ۲) کاهش انتقال حرارت
- ۳) افزایش مصرف سوخت و کاهش راندمان، همچنین کوتاه شدن عمر تجهیزات
- ۴) ایجاد خوردگی از طریق الکترولیز بین لایه رسوب و فلز بدنه

۱-۲ شاخص‌های املاح محلول در آب

آبها حاوی مواد محلول زیادی هستند که دانستن غلظت همه آنها بسیار پرهزینه و طولانی می‌باشد. تعیین چند شاخص مهم، می‌توان اطلاعات کافی از آنها بدست آورد.

۱-۲-۱ غلظت کل املاح محلول آب^۱ (TDS)

مجموع غلظت همه یون‌های موجود در آب بر حسب معادل کربناتی با واحد ppm می‌باشد.

نحوه اندازه‌گیری آن به این صورت است که حجم مشخصی از آب از صافی عبور داده می‌شود تا مواد معلق و کلوئیدی آن گرفته شود و سپس در یک بوتله چینی با وزن مشخص خشک می‌شود. تفاوت وزن بوتله قبل از ریختن آب و پس از خشک شدن آن به حجم اولیه آب بیانگر TDS می‌باشد. برای آنکه بتوان غلظت یون‌های مختلف را با هم جمع کرد، غلظت یون‌ها بر حسب واحد کربناتی بیان می‌شوند. جدول ۱-۱ محدودده TDS آبهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱: محدودده TDS آب‌های مختلف بر حسب ppm

آب	مطلوب صنعتی	مطلوب آشامیدنی	مجاز آشامیدنی	آبهای شور	آب دریا
TDS	کمتر از ۱۰۰	حدود ۵۰۰	کمتر از ۱۰۰۰	حدود ۱۰۰۰۰	حدود ۴۰۰۰۰

۱-۲-۲ هدایت الکتریکی آب^۲ (EC)

هدایت الکتریکی آب، معرف قدرت یونی یک محلول برای انتقال جریان برق با واحد مو بر سانتی‌متر (mho/cm) یا زیمنس بر سانتی‌متر (s/cm) است. هدایت الکتریکی آب خالص در $25^{\circ}C$ برابر $0.056 \mu mho/cm$ است. از آنجا که یون‌های محلول، عامل انتقال جریان برق هستند، EC با TDS ارتباط مستقیم دارد. اما رابطه آنها برای

^۱ Total Dissolved Solids

^۲ Electrical Conductivity

هر نمونه آب متفاوت است و به غلظت و نوع ناخالصی‌های موجود در آب بستگی دارد. f ضریبی است که به هدایت الکتریکی ارتباط دارد و مطابق جدول ۱-۲ می‌باشد.

$$TDS (ppm) = f \times EC$$

با افزایش EC یا TDS، سرعت خوردگی آب افزایش و درجه یونیزاسیون نمک‌های موجود در آب کاهش می‌یابد. دو نمونه آب با شرایط یکسان از لحاظ اکسیژن و pH، آن که EC بیشتری دارد تمایل به خوردگی بیشتر دارد.

جدول ۱-۲: ارتباط ضریب f به هدایت الکتریکی

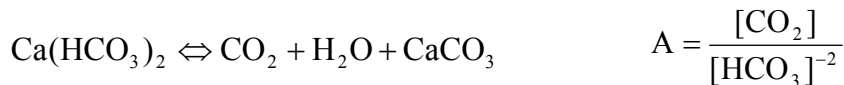
f	EC ($\mu s / cm$)	f	EC ($\mu s / cm$)
۰/۵	۰-۱۰	۰/۸	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰
۰/۶	۱۰-۱۰۰	۰/۹	۱۰۰۰۰-۲۰۰۰۰
۰/۶۴	۱۰۰-۵۰۰	۱/۰	۲۰۰۰۰-۳۰۰۰۰
۰/۷	۵۰۰-۱۰۰۰	۲/۱	>۳۰۰۰۰

۱-۲-۳ غلظت یون هیدروژن

آب به مقدار خیلی کم و به صورت برگشت پذیر یونیزه می‌شود. هر چه pH آب کمتر از pH آب خنثی باشد، حلالیت آهن در آن بیشتر است. از اینرو در صنایع مختلف برای جلوگیری از خوردگی آب، pH آن را بالاتر از pH خنثی تنظیم می‌کنند. با توجه به اینکه سرعت خوردگی ناشی از اسیدی بودن آب با افزایش دما افزایش می‌یابد، نگهداشتن pH آب در دماهای بالا ضروری است.

۱-۲-۴ pH تعادل و تعادل کربناتی

گاز کربنیک که از طریق اتمسفر یا تجزیه مواد آلی وارد آب می‌گردد، به صورت آزاد و کربنات در آب وجود دارد. میزان این گاز در آبهای سطحی کمتر از ۱۰ ppm و در آبهای زیرزمینی ممکن است به چند صد ppm برسد. در آبهای طبیعی، بین بی‌کربنات، کربنات کلسیم و گاز دی‌اکسید کربن، تعادل زیر وجود دارد که با بهم خوردن این تعادل، آب خاصیت رسوب کنندگی یا خوردگی پیدا می‌کند.



در تعادل بالا، در صورتیکه A کمتر از K تعادل باشد (غلظت CO_2 در آب کمتر از CO_2 تعادل باشد)، بی کربنات های کلسیم و منیزیم محلول به کربنات نامحلول تبدیل می‌شوند و این آب خصلت رسوبگذاری دارد. اگر A بیشتر از K تعادل باشد (غلظت CO_2 در آب بیشتر از CO_2 تعادل باشد)، CO_2 ، کربنات‌های نامحلول را به صورت بی‌کربنات در خود حل کرده و این آب خصلت خورندگی دارد.

به میزان CO_2 مورد نیاز برای ایجاد تعادل، گاز کربنیک تعادل و pH مربوط به آن را، pH تعادل یا اشباع (pH_s)¹ گویند. با اندازه‌گیری غلظت کلسیم، قلیائیت، املاح محلول و ... به صورت زیر محاسبه می‌شود. غلظت‌ها بر حسب ppm معادل کربنات کلسیم است.

$$a = 0.1 * \log[\text{TDS}] + 12.65 - T * 0.0142 \quad : \quad \text{اگر } T < 77^\circ\text{F}$$

$$a = 0.1 * \log[\text{TDS}] + 12.27 - T * 0.00915 \quad : \quad \text{اگر } T > 77^\circ\text{F}$$

$$b = \log[\text{Ca}^{2+}] * \text{total alkalinity}$$

$$\text{pH}_s = a - b$$

پارامتر اندیس اشباع (اندیس رسوب یا اندیس لانجلیر، IS) که از رابطه زیر بدست می‌آید تمایل به رسوب گذاری یا خوردگی را نشان می‌دهد.

$$\text{IS} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

در این رابطه:

اگر $\text{IS} = 0$ باشد، یک تعادل اشباع برقرار است و آب تمایلی به رسوب گذاری یا خوردگی ندارد.

اگر $\text{IS} > 0$ باشد، pH واقعی بیشتر از pH اشباع است و آب در حالت فوق اشباع از کربنات کلسیم بوده و بنابراین تمایل به رسوبگذاری دارد.

اگر $\text{IS} < 0$ باشد، pH واقعی کمتر از pH اشباع است. در این صورت اگر رسوبی در سیستم وجود داشته باشد در آب حل خواهد شد و ممکن است آب، فلز را هم مورد حمله قرار دهد (خوردگی).

¹ Saturated pH

روش لانجیر فقط برای آبهای شهری (با TDS کم) و در محدوده $9/5 < pH < 7/5$ مفید است. همچنین اندیس لانجیر تمایل به رسوبگذاری یا خوردگی را تنها بصورت کیفی نشان می‌دهد و میزان رسوب یا خوردگی را تعیین نمی‌کند. مثلاً آبی با سختی بالا و اندیس اشباع مثبت منجر به مقدار زیاد رسوب می‌شود در حالی که آبی با سختی پایین و همان مقدار اندیس اشباع ممکن است تولید رسوب قابل توجهی نکند. در مورد برج خنک‌کن pH واقعی برای رسوب گذاری، pH_c^1 می‌باشد که حدود $1/7$ تا 2 واحد از pH_s بدست آمده از اندیس لانجیر بیشتر است. همچنین، رایزنار با توجه به نتایج رسوبگذاری و خوردگی در شبکه‌های آب شهری، SI را به عنوان اندیس پایداری و با رابطه زیر تعریف نموده است:

$$SI = 2pH_s - pH$$

اگر اندیس پایداری بیش از 6 باشد، آب تمایل به خوردگی و اگر کمتر باشد، تمایل به رسوبگذاری دارد. اندیس رسوب گذاری تجربی بوده و برای آبهای جاری (آب داخل لوله‌ها) با سرعت بیش از $0/6$ متر بر ثانیه صادق است.

۱-۲-۵ سختی کل آب $(TH)^2$

سختی کل به مجموع غلظت کاتیون‌های دو ظرفیتی موجود در آب گفته می‌شود، اما چون غلظت کلسیم و منیزیم در آب‌های طبیعی بسیار بیشتر از یون‌های دیگر است، از این رو، مجموع غلظت این دو یون، مترادف با سختی کل در نظر گرفته می‌شود. بسته به میزان pH و قلیائیت، سختی بیش از 200ppm در اثر حرارت رسوب ایجاد می‌کند. آبهای سبک با سختی کمتر از 100 ، ظرفیت بافری کمی داشته و ممکن است باعث خوردگی شود.

انواع سختی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

سختی کلسیمی: قسمتی از سختی کل که ناشی از وجود یون کلسیم است.

¹ Critical pH

² Total Hardness

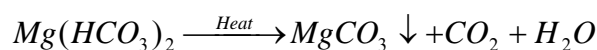
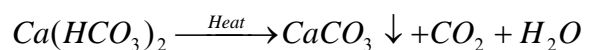
سختی منیزیمی: قسمتی از سختی کل که ناشی از وجود یون منیزیم است.

همچنین سختی کل شامل سختی دائم و موقت است.

سختی دائم^۱: این سختی شامل نمک‌های کربنات کلسیم و منیزیم، همچنین نمک‌های غیرکربناتی مانند سولفات، کلرور، نیترات، فسفات و سیلیکات کلسیم و منیزیم می‌باشد که در اثر حرارت تجزیه نمی‌شود. حد اشباع این سختی‌ها در آب 1800 ppm است.

معمول‌ترین روش اندازه‌گیری سختی کل، تیتراسیون توسط محلول EDTA (اتیلن دی آمین تتراستات سدیم) در حضور معرف اریوکروم بلاک T است.

سختی موقت یا بی کربناتی^۲: این سختی ناشی از وجود بی کربنات کلسیم و منیزیم در آب می‌باشد که در اثر حرارت دادن، تجزیه و به کربنات کلسیم و منیزیم تبدیل می‌شود. حد اشباع این سختی‌ها در آب 450 ppm است.



یادآوری: در اندازه‌گیری سختی کل محلول‌های غلیظ به روش تیتراسیون، مقدار بدست آمده بیش از مقدار واقعی یون‌های تولیدکننده سختی است. اختلاف این دو را سختی کاذب^۳ می‌نامند.

۱-۲-۶ شاخص قلیائیت آب^۴

قلیائیت آب عمدتاً برابر مجموع غلظت یون‌های کربنات، بی کربنات و هیدروکسید موجود در آب در نظر گرفته می‌شود و معرف مقاومت آب در برابر تغییرات pH است. هر چه قلیائیت آب بیشتر باشد ظرفیت بافری آن بیشتر است.

در تصفیه آب، نه تنها دانستن مجموع غلظت آنیون‌های تشکیل دهنده قلیائیت مهم است، بلکه دانستن غلظت هر یک از آنیون‌ها هم مهم است. در pH های مختلف، از ۳

¹ Permanent Hardness

² Temporary Hardness

³ Pseudo Hardness

⁴ Alkalinity

آنیون تشکیل دهنده قلیائیت، غلظت حداقل یکی از آنها قابل صرفنظر کردن است. مثلاً در $pH < 9$ ، غلظت OH^- در مقایسه با غلظت کربنات یا بی کربنات قابل صرفنظر کردن است و در $pH > 11/5$ ، غلظت بی کربنات تقریباً صفر است. قلیائیت یک نمونه آب، با تیتراژ کردن آن توسط اسید اندازه‌گیری می‌شود. دو نوع قلیائیت عبارتند از:

- قلیائیت ساده (قلیائیت نسبت به فنل فتالین، P) : این قلیائیت شامل آنیون‌های هیدروکسید و کربنات است که در pH های قلیایی ($pH > 8/3$) دارای غلظت قابل توجهی هستند و بوسیله یک اسید استاندارد و در حضور معرف فتالین تیتراژ می‌شوند. - قلیائیت کل (قلیائیت نسبت به متیل اورانژ، M) : این قلیائیت شامل کل آنیون‌هایی است که در $pH > 4/3$ بوسیله یک اسید استاندارد و در حضور معرف متیل اورانژ تیتراژ می‌شوند.

بنابراین هر چه قلیائیت ساده کمتر و قلیائیت کل بیشتر باشد، pH آب کمتر است و اگر خیلی کم باشد، این امر باعث خورده شدن دیواره دیگ‌ها می‌شود و هر چه قلیائیت ساده بیشتر شود (غلظت هیدروکسیدها و کربنات‌ها بالاتر باشد) pH آب بیشتر می‌شود. اما نباید به حدی بالا باشد که سبب انتقال مواد جامد بوسیله بخار شود و یا سبب شکنندگی قلیایی^۱ و ایجاد ترک در دیواره دیگ‌ها گردد. در $pH < 8/3$ ، قلیائیت ساده صفر و در $pH < 4/5$ ، قلیائیت کل صفر است.

^۱ Caustic embrittlement

فصل دوم

رسوب، خوردگی و راه‌های جلوگیری از آنها

۱-۲ رسوبگذاری

رسوب در تجهیزات و سیستم لوله‌کشی، به واسطه ته‌نشینی مواد مرکب شیمیایی خاص شکل می‌گیرد که به عنوان نمک‌های معدنی شناخته می‌شوند و در همه منابع آب معدنی وجود دارند. نمک‌های معدنی رایج مانند منیزیم و کربنات کلسیم، حلالیت پذیری کمی دارند و حلالیت آنها تابعی از دما می‌باشد. تغییر درجه حرارت در نقاط مختلف یک سیستم کافی است که این نمک‌ها را به صورت اشباع در آورد. هنگامی که یک محلول فوق اشباع می‌شود، در صورت ایجاد هسته‌های اولیه کریستال، بهترین شرایط برای رشد کریستال فراهم می‌شود. شکل‌گیری رسوب باعث کاهش انتقال حرارت و گرم شدن بیش از حد کویل‌ها و المنت‌ها شده و در نتیجه عملکرد را کاهش می‌دهد و سیستم دچار نقص می‌شود. عوامل زیر باعث ته‌نشینی املاح آب می‌شود:

۱-۱-۲ فوق اشباع بودن

فوق اشباع بودن محلول عامل درجه اول در رسوبگذاری است. یک محلول می‌تواند به دلایلی چون تغییرات دما، pH ، تبخیر، تغلیظ و اضافه شدن موادی که می‌توانند نقش هسته اولیه را بازی کنند، فوق اشباع شود. پدیده فوق اشباع می‌تواند یک پدیده موضعی



(مانند مجاورت سیال با یک سطح گرم، محل تماس مایع و گاز، شکاف میکروسکوپی و یا خلل و فرج رسوب های قبلی) باشد.

حالت فوق اشباع می‌تواند مدت زمان طولانی بدون آنکه رسوبی ایجاد شود و یا کریستالی رشد کند، باقی بماند که به این مدت زمان، زمان تاخیر گویند. زمان تاخیر برای محلول های مختلف، متفاوت است و تحت تاثیر عوامل مختلفی می‌باشد. مثلا وجود منیزیم یک مانع مهم برای رسوب کردن کربنات کلسیم آب دریا است. حضور منیزیم باعث تمایل به حفظ درجه بالاتری از فوق اشباع و زمان تاخیر بیشتری می‌شود.

۲-۱-۲ تشکیل هسته‌های اولیه

هسته‌های اولیه در واقع تسهیل کننده راه رسوبگذاری در سیستم هستند و عوامل زیادی مانند ذرات غبار، ارتعاش، اصطحکاک، رسوبات قبلی و نیز محصولات خوردگی، می‌توانند نقش هسته اولیه را بازی کنند.

۲-۱-۳ زمان تماس

پس از عمل هسته گذاری اولیه در یک محلول فوق اشباع، باید زمان تماس کافی بین محلول و هسته های اولیه وجود داشته باشد تا کریستال ها رشد کنند. هر چه زمان تماس بیشتر باشد شانس ایجاد رسوب چسبنده بیشتر خواهد شد.

۲-۱-۴ pH

دانستن pH برای تعیین میزان رسوب‌گذار و یا خورنده بودن آب لازم است. افزایش PH معمولا باعث ترسیب املاحی مانند کربنات کلسیم، هیدروکسید منیزیم و ترکیبات آهن در دستگاه‌های تبادل حرارتی می‌شود، در حالیکه کاهش pH تمایل به نگهداری این املاح را بصورت محلول، افزایش می‌دهد، اما خاصیت خورندگی به آب می‌دهد.

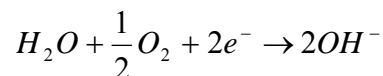
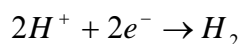
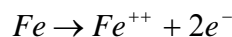
۲-۱-۵ تاثیر عوامل دیگر

وجود حباب در ایجاد رسوب موثر است. با افزایش دما، حلالیت گازها کاهش می‌یابد و در نتیجه گاز تمایل به خروج از آب دارد. خروج گاز کمک به ایجاد حباب بر روی

سطح مایع می‌کند و مقداری از مواد محلول آب در حباب‌ها حبس می‌شوند. در اثر افزایش دما، این نمک‌ها در فصل مشترک گاز-جامد-مایع رسوب می‌کنند.

۲-۲ خوردگی

خوردگی، تخریب فلز در اثر واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین فلز و محیط اطراف آن است. در این فرایند، فلز اکسید می‌شود و الکترون آزاد می‌کند. الکترون توسط احیای ماده دیگری مانند اکسیژن و یا یون‌های هیدروژن مصرف می‌شوند. طبق قرارداد الکتروشیمی، واکنش اکسایش در آند و کاهش در کاتد اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال در پدیده زنگ زدن، فلز آهن نقش آند را ایفا می‌کند و نتیجه آن تولید یون آهن و الکترون می‌باشد. واکنش احیا در کاتد انجام می‌شود و نتیجه آن تولید گاز هیدروژن یا یون هیدروکسید است.



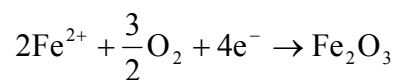
چند نکته در مورد خوردگی:

الف- اگر شرایط به گونه‌ای باشد که واکنش‌ها تمایل به سمت راست داشته باشند خوردگی تشدید می‌شود، چون آهن بیشتری حل می‌شود. مثلاً H_2 را از محیط دور کنیم یا یون OH^{-} را با افزودن اسید به محیط حذف کنیم. اگر شرایط به گونه‌ای باشد که واکنش‌ها تمایل به سمت چپ داشته باشند، مثلاً قلیایی کردن محیط، سرعت خوردگی کاهش می‌یابد.

ب- کاهش pH یا افزایش O_2 ، باعث مصرف سریعتر الکترون در کاتد و در نتیجه سرعت خوردگی تشدید می‌شود. به عکس، افزایش pH یا حذف O_2 ، باعث مصرف کندتر الکترون در کاتد می‌شود و در نتیجه سرعت خوردگی کم می‌شود.

III- آهن اکسید شده در آند (یون فرو)، ممکن است در شرایط مناسب (حضور اکسیژن در آب)، باز هم اکسید شود. در این صورت یون فرو با ترکیب شدن با اکسیژن به فریک اکسید (زنگ آهن) تبدیل شود. اگر شرایط به گونه‌ای باشد که زنگ آهن به

صورت رسوب سطح آهن را بیوشاند و بنابراین سرعت اکسیداسیون در آند را کمتر کند، در آن صورت سرعت خوردگی کاهش می‌یابد.



به طور خلاصه واکنش آهن، آب و اکسیژن را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد که محصول آن فریک هیدروکسید است که به طور محسوسی در آب غیر محلول است و روی سطح فلز رسوب می‌کند.



این رسوب خاصیت حفاظتی ندارد و در اثر مرور زمان و افزایش درجه حرارت به آلفا فریک اکسید یا هماتیت ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$) قرمز رنگ که محصول نهایی خوردگی است تبدیل می‌گردد. نباید هماتیت را با $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ که لایه محافظتی است اشتباه نمود. $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ در pH حدود ۷ و میزان کنترل شده اکسیژن (در حدود 250 ppb) تشکیل می‌شود. خوردگی توسط اکسیژن و تشکیل هماتیت با ایجاد حفره‌های آبله گون مشخص می‌گردد. کاهش pH ، سرعت خوردگی را همراه با افزایش بیشتر حفره‌ها و نیز رشد آن‌ها تشدید می‌کند. فیلم $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ تا حد کمی دارای خاصیت مغناطیسی است و حضور این فیلم دلیل بر خوردگی در حضور اکسیژن محلول است. افزایش pH و شرایط مناسب موجب تشکیل فیلم اکسید محافظ مگنتیت سیاه رنگ Fe_3O_4 می‌گردد. این اکسید در درجه حرارت‌های بالا تشکیل می‌شود.

۲-۱-۲ عوامل موثر بر خوردگی

خوردگی فلزات در محیط آبی بستگی زیادی به کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب دارد. از جمله پارامترهای مهم در این ارتباط در ذیل شرح داده شده است:

۲-۱-۲-۱ اثر گازهای محلول در آب

از بین گازهای حل شده در آب بیشتر از همه اکسیژن، دی‌اکسید کربن و گاز کلر باعث خوردگی می‌شوند. اکسیژن نقش دوگانه‌ای دارد، از طرفی می‌تواند واکنش کاتدی را تسریع کرده و باعث افزایش سرعت خوردگی شود، از طرف دیگر در غلظت‌های بالا و

شرایط مساعد سبب ایجاد لایه روئین در سطح فلز می‌شود که در این حالت خوردگی کاهش محسوسی خواهد داشت. تقریباً تمام فلزات (به جز طلا) در تماس با هوای خشک یا اکسیژن با یک لایه سطحی اکسید پوشیده می‌شوند. پایداری این لایه در تماس با آب، به کیفیت آب بستگی دارد. لایه اکسیدی در تعادل دینامیکی با محلول بوده و پایداری آن به ترمیم یا عدم ترمیم آن در نقاط شکسته شده بستگی دارد. وقتی مقدار اکسیژن در حد معمول باشد تعدادی از فلزات مانند فولاد زنگ نزن در آب روئین شده و اصطلاحاً حفاظت آندی ایجاد می‌شود. اگر غلظت اکسیژن بیش از حد کاهش یابد (بویژه در شیارها)، این مواد فعال شده و حل می‌گردند. مشابه این حالت برای آهن نیز صادق است. جالب اینکه حلالیت اکسیژن با افزایش دما کاهش یافته، بطوریکه در 100°C به صفر می‌رسد اما با افزایش بیشتر دما افزایش می‌یابد و حلالیت آن در 200°C و 25°C برابر می‌باشد.

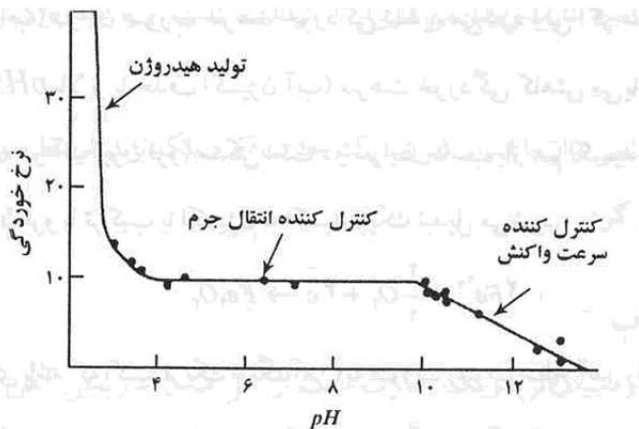
دی‌اکسید کربن به دلیل ایجاد اسید کربنیک و در نتیجه کاهش pH، سبب تشدید خوردگی می‌شود. گاز کلر محلول در آب، یک عامل اکسید کننده قوی‌تر از اکسیژن است از اینرو باعث مشکلاتی بیشتر از اکسیژن محلول در آب می‌شود.

۲-۲-۱-۲ pH

از آنجاکه حلالیت و سرعت واکنش بسیاری از مواد در آب وابسته به pH آب است، از این رو سرعت خوردگی به pH بستگی زیادی دارد.

اگر چه فلزات نجیب مثل طلا و پلاتین در محلول‌های اسیدی و بازی پایدار می‌باشند، اما برخی از فلزات در محیط‌های اسیدی محلول بوده و در محیط‌های قلیایی نامحلول هستند (به عنوان مثال، فلزات نیکل، مس، کبالت، کروم، منگنز و منیزیم).

برخی از فلزات، در pH های بالا یا پایین خوردگی زیاد دارند و در یک pH بهینه، کمترین خوردگی را دارند. مثلاً این pH برای آلومینیوم ۶/۵، سرب ۸، قلع ۸/۵ و روی برابر ۱۱/۵ می‌باشد. شکل ۱-۲ نتایج تجربی سرعت خوردگی آهن در pH های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: اثر pH بر سرعت خوردگی آهن در محلول هوادهی شده در دمای اتاق

۲-۱-۲-۳-۳ درجه حرارت

خوردگی در واقع، نتیجه یک واکنش شیمیایی است. از طرفی سرعت هر واکنش شیمیایی طبق معادله آرنیوس $k = Ae^{-E/RT}$ به دما بستگی دارد. تغییر دمای آب می‌تواند روی ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی ناخالصی‌های آب اثر بگذارد و نیز ویژگی رسوب و حتی طبیعت فلز را تحت تاثیر قرار دهد. از طرف دیگر، دما روی حلالیت گازها در آب از جمله اکسیژن نیز اثر می‌گذارد که نقش آن در بند ۲-۱-۲-۲ ذکر شده است.

۲-۱-۲-۲-۴ اثر نمکهای محلول

در بحث خوردگی، معمول است آنیون‌ها را به ۲ دسته اصلی تقسیم می‌کنند: ۱- آنیون‌هایی که مهاجم هستند که مهمترین آنها، یون کلر است و باعث تسریع انحلال اکثر فلزات و آلیاژها و در نتیجه تشدید خوردگی می‌شوند. ۲- آنیون‌هایی که نظیر یون‌های کربنات و بی‌کربنات که با تشکیل رسوب کربنات کلسیم، باعث کند شدن خوردگی می‌شوند.

خواص خوردگی و یا باز دارندگی یونها، علاوه بر نوع آنها به غلظت یون نیز بستگی دارد. غالباً مقدار یون‌هایی که خاصیت بازدارندگی دارند باید بیش از مقدار اکسیژن حل شده در محلول باشد تا سرعت واکنش کاتدی احیاء اکسیژن کاهش یابد.

۲-۱-۲-۵ مواد آلی موجود در آب

میکروارگانیزم ها به طور فعال محیط اطراف سطح فلز را تغییر داده تا فرایند خوردگی را تسهیل کنند. دخالت میکروب ها در خوردگی به ندرت از طریق یک مکانیسم تنها و یا تنها توسط یک گونه از میکروارگانیزم ها انجام می شود. این میکروارگانیزم ها می توانند در اکثر سیستم ها با تبدیل و تغییر شرایط محیطی موجب بروز یا تشدید خوردگی شوند.

۲-۲-۲ انواع خوردگی

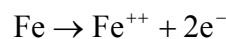
آشنایی و شناخت انواع خوردگی و علل آن، می تواند در بهبود طراحی و ساخت و جلوگیری از خوردگی مفید باشد. عمومی ترین طبقه بندی خوردگی، بر اساس ظاهر و شکل فلز خورده شده می باشد.

۲-۲-۲-۱ خوردگی یکنواخت^۱

این خوردگی متداول ترین نوع خوردگی است که معمولاً به وسیله یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی به طور یکنواخت در سرتاسر سطحی که در تماس با محلول خورنده است، ایجاد می شود. در این حالت آهنگ خوردگی یکسان است و لایه های سطحی فلز به تدریج از بین رفته و ضخامت فلز به تدریج و به طور یکنواخت کاهش می یابد که در آن تعیین آهنگ خوردگی با استفاده از روش "کاهش وزن" و یا روش "اندازه گیری چگالی جریان خوردگی، i_{corr} " به سادگی امکان پذیر است. i_{corr} توسط نظریه پتانسیل مختلط و در مدت چند ساعت و یا حتی کمتر بدست آورد. در حالیکه در روش های کاهش وزن یا روش های مشابه آن، برای به دست آوردن نتایج به روزها و یا حتی ماه ها زمان نیاز است.

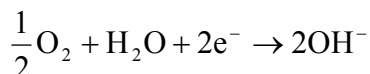
خوردگی نیاز به دو واکنش همزمان دارد که اغلب در سطح خود فلز انجام می شوند.

- واکنش اکسایش فلز و آزاد شدن الکترون در آند:



^۱ Uniform Attack

- واکنش احیای الکترولیت در تماس با سطح فلز و مصرف الکترون در کاتد:



اختلاف پتانسیل بین آند (قطب منفی) و کاتد (قطب مثبت)، نیروی محرکه انجام واکنش اکسایش- کاهش را فراهم کرده و در نتیجه آن خوردگی اتفاق می‌افتد. با فرض اینکه سطح شامل تعداد زیادی آند و کاتدهای بسیار کوچک که به طور اتفاقی توزیع شده اند باشد، خوردگی از نوع یکنواخت می‌باشد.

۲-۲-۲ خوردگی گالوانیک یا دو فلزی^۱

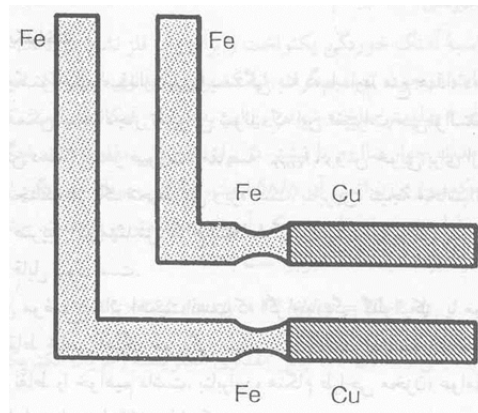
این نوع خوردگی زمانی رخ می‌دهد که دو فلز یا آلیاژ متفاوت در حضور یک ماده خورنده با یکدیگر تماس پیدا کنند (مانند مس و آهن). در منطقه تماس، فرایند الکتروشیمیایی رخ می‌دهد و فلز فعال تر با نرخ بیشتری خورده می‌شود و فلز نجیبتر حفاظت می‌گردد و میزان خوردگی آن بسیار کم خواهد بود.

شکل ۲-۲، یک زانوی فولادی متصل به لوله مسی را نشان می‌دهد. آهنگ خوردگی فولاد در نزدیکی لوله مسی افزایش یافته است. در اینجا آهن، اکسید و یون هیدروژن، احیا می‌شود. بنابراین پتانسیل خوردگی E_{corro} بین E_{H^+/H_2} و $E_{Fe^{2+}/Fe}$ برقرار می‌گردد. فلز مس پایدار بوده و خورده نمی‌شود و تنها یک سطح اضافی برای احیای یون های H^+ را فراهم می‌کند و این امر باعث افزایش آهنگ خوردگی می‌شود.

بنابراین طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که در محل‌هایی که محیط خورنده وجود دارد، فلزات مختلف که قادر به تشکیل زوج گالوانیکی اند، در تماس با یکدیگر قرار نگیرند یا اینکه از فلزات سازگار با هم استفاده شود.

البته از اصل گالوانیکی می‌توان برای حفاظت فلزات نجیب‌تر نیز استفاده کرد. به عنوان مثال از روی یا منیزیم می‌توان برای حفاظت آهن استفاده کرد. در اینجا فلز فعال‌تر به عنوان آند فداشونده عمل می‌کند.

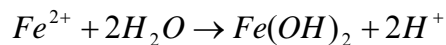
¹ Galvanic Two Metal .Corrosion



شکل ۲-۲: اتصال زانوی ساخته شده از فولاد معمولی به لوله مسی

۳-۲-۲-۲ خوردگی شیاری^۱

یک نوع خوردگی موضعی است که در داخل یک شیار باریک با سرعت زیاد پیش می‌رود. این نوع خوردگی، در اثر اختلاف غلظت اکسیژن ایجاد می‌شود. چون نفوذ اکسیژن به داخل شیارهای باریک مشکل است، غلظت اکسیژن در داخل شیار کمتر از بیرون است و یک پیل گالوانیکی بین داخل و بیرون شیار بوجود می‌آید که موجب خوردگی در داخل شیار می‌شود. الکترون‌های آزاد شده به بیرون از شیار که واکنش با اکسیژن غالب است می‌روند. یون‌های Fe^{2+} طبق رابطه زیر با آب واکنش می‌دهد که نتیجه آن کاهش PH (افزایش اسیدیته) در داخل شیار و بنابراین افزایش آهنگ خوردگی در داخل شیار می‌شود.



۴-۲-۲-۲ حفره‌دار شدن^۲

نوعی خوردگی موضعی است که به صورت نقاط کوچک تا عمق زیادی از فلز به سرعت نفوذ می‌کند و تا مرحله سوراخ شدن فلز ادامه می‌یابد. این نوع خوردگی اغلب بوسیله یون‌های کلرید ایجاد می‌شود و به ویژه برای فولاد ضد زنگ بسیار مخرب است. یون‌های کلرید، لایه اکسیدی را در بعضی از نقاط تخریب می‌کنند و در این

^۱ Crevice Corrosion

^۲ Pitting

نقاط، فلز عاری از پوشش اکسیدی، تشکیل آند را داده و حفره کوچکی تشکیل می‌شود. حفره‌دار شدن (پیشرفت حفره) با تشکیل پیل اختلاف اکسیژن و مشابه با خوردگی شیاری پیش می‌رود. چون در این خوردگی، حفره‌دار شدن وزن ناچیزی از فلز را کاهش می‌دهد اندازه‌گیری وزنی در پیش‌بینی مقاومت فلز کاربردی ندارد. از راه‌های جلوگیری از خوردگی حفره‌ای، استفاده از اکسیژن زداه‌ها، همزدن الکترولیت، کنترل غلظت کلرید، دما و حفاظت کاتدی است.

۲-۲-۲-۵ خوردگی بین دانه‌ای^۱

وقتی که فلزات منجمد و سرد می‌شوند، دانه‌ها در جهت‌های مختلف تشکیل می‌شوند. در بین این دانه‌ها، نواحی نامنظمی که غنی از ناخالصی‌هاست بوجود می‌آید. این نواحی که به مرزدانه‌ها موسوم‌اند، در مقایسه با خود دانه‌ها از پایداری کمتری برخوردارند و بنابراین از نظر شیمیایی فعالتر و نسبت به خوردگی حساسترند. عامل‌های مختلف چون جمله حضور ناخالصی‌ها و غنی بودن یا تهی بودن مرزدانه از یکی از عناصر آلیاژی می‌توانند آلیاژی مثل فولاد زنگ نزن آستنیتی را مستعد این نوع خوردگی سازند.

۲-۲-۲-۶ جدایش انتخابی (زدایش آلیاژی)^۲

شامل حل و جدا شدن یکی از عناصر آلیاژی جامد در فرایند خوردگی می‌باشد. این نوع خوردگی نتیجه عملکرد محیط‌های خاصی است که فعالترین عنصر جسم را در خود حل کرده و لذا یک جسم متخلخل که عمدتاً از نجیب‌ترین عنصر تشکیل شده بر جای می‌گذارد. متداول‌ترین مثال، جدا شدن روی از آلیاژ برنج است. آلومینیوم، آهن، کبالت و زیرکونیم نیز این قابلیت را دارند.

۲-۲-۲-۷ خوردگی سایشی^۳

در اثر حرکت نسبی بین مایع خورنده و سطح فلز رخ می‌دهد. هنگام تماس دو ماده با یکدیگر و حرکت نسبی آنها سایش بوجود می‌آید که این عمل می‌تواند پوشش‌های ضد خوردگی را از بین برده و باعث آغاز خوردگی شود.

¹ Inter Granular. Corrosion

² Selective Leaching (Dealloying)

³ Erosion Corrosion

۲-۲-۲-۸ خوردگی توأم با تنش^۱

این نوع خوردگی زمانی رخ می‌دهد که ماده‌ای تحت تنش کششی در معرض یک محیط خورنده قرار گیرد. ترکیب این عوامل با هم، ترک‌هایی را در جزء تحت تنش آغاز می‌کند.

۲-۲-۲-۹ خرابی هیدروژنی^۲

خسارت هیدروژنی یک اصطلاح کلی است که دلالت بر خسارت مکانیکی وارد شده به فلز در اثر واکنش با هیدروژن دارد. هیدروژنی که در اثر خوردگی، حفاظت کاتدی یا به نحو دیگری تولید می‌شود، می‌تواند به شکل هیدروژن اتمی در فلز نفوذ کرده و موجب خساراتی نظیر تاول زدن هیدروژنی یا تردی هیدروژنی شود.

۲-۳ انواع سختی‌گیرها

همانطور که قبلاً بیان شد عنوان رسوب به لایه‌ای چسبنده و پیوسته از مواد خارجی تشکیل شده روی سطحی که آب جریان دارد و انتقال حرارت صورت می‌گیرد اطلاق می‌شود. وقتی یک بویلر در فشار کم کار می‌کند، تنها $0/6\text{mm}$ لایه رسوب سولفات کلسیم می‌تواند 180°C افت حرارت ایجاد کند. همچنین وجود 25mm لایه رسوب کلسیت (CaCO_3) انتقال حرارت را تا ۹۵٪ و ضخامت $0/5\text{mm}$ رسوب سیلیس (SiO_2) می‌تواند ۹۰٪ انتقال حرارت را کاهش دهد.

املاح در دمای بالا از آب جدا می‌شوند و در سیستم‌های لوله‌کشی و مجاری دستگاه‌ها رسوب می‌کنند و این امر باعث می‌شود سالانه ده‌ها میلیارد دلار در جهان صرف تمیزکاری سیستمها و تعویض قطعات می‌گردد. یکی از راه‌های کاهش سختی آب، استفاده از سختی‌گیرهای مختلف است. برخی انواع سختی‌گیرهای مرسوم شامل رزینی کاتیونی، اسمز معکوس (RO)، مغناطیسی، الکترومغناطیسی و گالوانیک است که بطور مختصر ساختار و عملکرد آنها توضیح داده شده است.

¹ Stress Corrosion

² Hydrogen damage

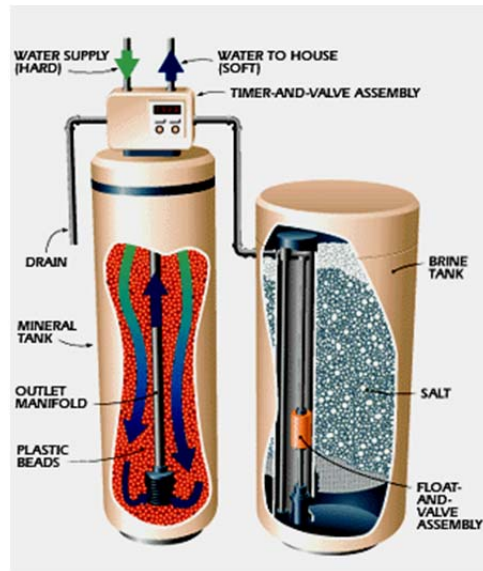


۲-۳-۱ سختی‌گیر رزینی کاتیونی

سختی‌گیر رزینی کاتیونی شامل یک بستر پلیمری متخلخل می‌باشد که به آن گروه‌های یونی غیرمتحرک آنیونی چسبیده و بنابراین بنیان رزین، دارای بار منفی است. برای خنثی شدن بار الکترونی رزین، کاتیون‌های متحرک مثبت مانند Na^+ در شبکه رزین جای می‌گیرند. وقتی آب دارای یون‌های کلسیم یا منیزیم‌دار از این رزین عبور می‌کند، یون‌های کلسیم و منیزیم جای خود را با سدیم عوض می‌کنند و بدینوسیله از سختی آب کاسته می‌گردد. زمانیکه تمام یون سدیم رزین مصرف شد (رزین اشباع شد)، می‌توان رزین را بوسیله عبور محلول آب نمک ۱۰٪ $NaCl$ احیا نمود. بدین ترتیب عمل عکس انجام گرفته، کلسیم و منیزیم از رزین جدا شده و یون سدیم جایگزین می‌گردد. ظرفیت رزین در واقع معیار توانایی رزین برای تعویض یون می‌باشد و به دو صورت ظرفیت جرمی و حجمی آن تعریف می‌شود. ظرفیت جرمی، تعداد اکی‌والان یون‌هایی است که هر گرم از رزین می‌تواند تعویض کند. ظرفیت حجمی، حجم ظاهری رزین است (چون اندازه‌گیری حجم واقعی با توجه به متخلخل بودن و نیز متورم شدن رزین مشکل است). ظرفیت حجمی رزین کاربردی تر از ظرفیت جرمی آن است. انتخاب اندازه سختی‌گیر بستگی به مقدار عبور آب در واحد زمان (دبی) از سختی‌گیر و مقدار املاح موجود در آب دارد.

محدوده pH عملکرد رزین نیز مهم است. این محدوده به گروه فعال چسبیده به شبکه رزین بستگی دارد و بطور کلی بصورت زیر است: رزین کاتیونی قوی در هر pH ، رزین کاتیونی ضعیف در $pH > 4$.

معمولاً بیشترین دمای مجاز برای رزین‌های کاتیونی، $120^\circ C$ می‌باشد. شکل ۲-۳ ساختار و عملکرد دستگاه سختی‌گیر رزینی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است آب سخت از بستر پلیمری حاوی یون‌های Na^+ عبور می‌کند و با جایگزین کردن یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و منیزیم بجای سدیم، آب نرم و بدون سختی خارج می‌شود.



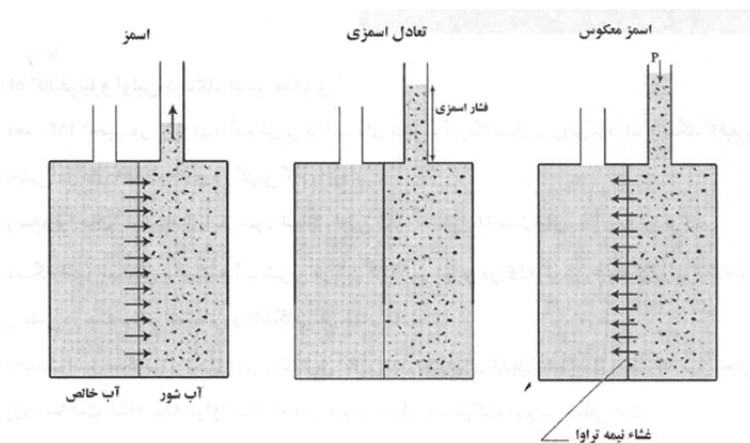
شکل ۳-۱: ساختار یک دستگاه سختی گیر رزینی

۲-۳-۲ سختی گیر اسمز معکوس

امروزه صنعت اسمز معکوس به یکی از پر رونق‌ترین بازارهای تکنولوژی تبدیل شده و پیشرفته‌ترین بخش این تکنولوژی، ساخت غشاء نیمه تراوا است. اگر یک غشاء نیمه تراوا بین دو محلول با غلظت‌های متفاوت قرار گیرد، مقداری از حلال از یک طرف غشاء به طرف دیگر منتقل می‌شود. جهت طبیعی حرکت حلال به گونه‌ای است که محلول غلیظ‌تر، رقیق می‌شود. شکل ۲-۴ نمایی از مفهوم اسمز، فشار اسمزی و اسمز معکوس آب خالص را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است آب خالص از غشاء عبور کرده و وارد آب شور می‌شود و سطح آب نمک (محلول غلیظ‌تر) از سطح آب خالص بالاتر خواهد رفت. این اختلاف سطح در دو طرف غشاء را فشار اسمزی، π ، می‌گویند.

واضح است که هدف در تصفیه آب، تهیه آب شیرین از آب شور است. در اسمز معکوس، آب ورودی (تصفیه نشده) توسط پمپ با فشار به داخل محفظه‌ای که دارای غشای نیمه تراوا می‌باشد، رانده می‌شود و چون ناخالصی‌ها تقریباً قادر به عبور از غشاء نیستند، از این رو در یک طرف غشاء آب تقریباً خالص (آب شیرین) و در طرف دیگر

آن آب تغلیظ شده از ناخالصی‌ها (آب شور) وجود خواهد داشت. در این سیستم غشاء معمولاً از جنس استات سلولز، پلی‌آمید، پلی‌فنیل اکسید و ... می‌باشد.



شکل ۲-۴: اسمز، فشار اسمزی و اسمز معکوس. (فلش جهت جریان آب خالص را نشان می‌دهد)

دبی آب تصفیه شده به مساحت غشا و ضریب تراوایی آن بستگی دارد. هر چه مساحت غشا در واحد حجم بیشتر باشد، دبی آب بیشتر خواهد بود. غشاء مناسب برای اسمز معکوس باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- تراوایی زیاد برای آب و کم برای املاح

- قدرت تحمل فشار اعمال شده

- مقاوم در برابر تغییرات pH

- مقاوم در برابر حمله مواد شیمیایی یا بیولوژیکی

محدوده pH قابل تحمل برای غشاء استات سلولزی ۳ تا ۸ و برای تری استات سلولزی ۲ تا ۹ و برای پلی آمیدی ۲ تا ۱۰ می‌باشد. امروزه غشاءها را از مخلوط استات سلولز و تری استات سلولز می‌سازند. به تازگی نوع جدیدی از غشاءها از جنس پلی سولفان باردار به بازار عرضه شده است که ویژگی خوب استات سلولز (تحمل فشار) و ویژگی خوب پلی آمیدی (دبی زیاد) را داراست. ضروری است آب ورودی به دستگاه، قبلاً تصفیه مقدماتی شده باشد.

در روش RO همه یون‌ها از آب گرفته می‌شود. این سختی‌گیر برای تصفیه آب‌های

معمولی با TDS تا 5000 ppm ، یک روش کاملاً اطمینان بخش است.

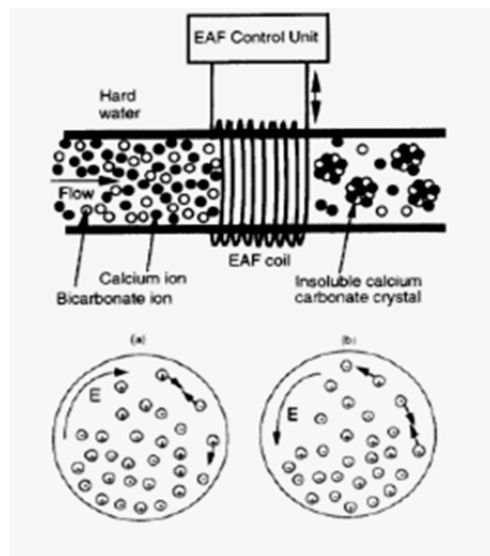
۲-۳-۳ سختی گیر مغناطیسی

دستگاه سختی گیر مغناطیسی که منبع انرژی آن یک مگنت مغناطیسی دائمی می باشد، با اعمال یک میدان مغناطیسی متغیر در مسیر جریان آب، املاح رسوب گذار موجود در آب (که عمدتاً بی کربنات ها هستند) را از حالت یونی خارج کرده و به حالت مولکولی تبدیل می کند که ماحصل آن تبدیل کریستال یونی (کلسیت که ساختار آن چسبنده و سخت است) به کریستال مولکولی (آراگونیت که ساختار آن نرم و غیر چسبان است) می باشد که این مولکول ها به هم ملحق شده و پدیده دانه برفی را بوجود می آورند که بصورت شناور در آب قرار دارند، به طوری که نه تنها دیگر رسوب نمی کنند، بلکه امکان حذف این دانه های درشت با فیلترهای نسبتاً ساده امکان پذیر است. در این سیستم، آب با قطعات مغناطیسی در تماس نبوده، همچنین به آب چیزی اضافه یا از آن کم نمی شود و تنها رسوبات بصورت محلول عبور می نمایند.

۲-۳-۴ سختی گیر الکترومغناطیسی

در این تکنولوژی از امواج الکترومغناطیسی بعنوان مانعی جهت جلوگیری از تشکیل رسوب بر دیواره سطوح حامل آب های سخت استفاده می شود و نسبت به مدل مغناطیسی، میزان اثرگذاری بیشتری دارد. انتقال امواج الکترومغناطیسی به داخل لوله های حاوی آب های سخت از یک سیم پیچ که به دور لوله پیچیده می شود صورت می گیرد. بنا به قانون آمپر، در صورت عبور جریان الکترونیکی از سیم پیچ، میدان مغناطیسی متناسب با آن در سیم پیچ پدیدار می گردد. در صورتیکه مقدار جریان نسبت به زمان تغییر کند، بنا به قانون القای فاراده، میدان الکتریکی متناسب با تغییرات میدان به دست می آید. میدان الکتریکی القاء کننده، باعث حرکت یون های مثبت و منفی نسبت به یکدیگر و ایجاد ذرات خنثی معلق در آب می گردد با تشکیل این هسته های کوچک، پدیده ای به نام اثر دانه برفی رخ می دهد که باعث جذب یون های معلق دیگر در آب شده و هسته های اولیه رشد پیدا می کنند. شکل ۲-۵ بطور شماتیک، عملکرد سختی گیر

الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: شکل شماتیک سختی‌گیر مغناطیسی و الکترومغناطیس

در کل مکانیسم عملکردی سختی‌گیر مغناطیسی و الکترومغناطیسی شبیه هم است، با این تفاوت که مدل مغناطیسی با دارا بودن مگنت (آهن ربا) مغناطیسی انرژی لازم خود را تولید می‌کند، در حالیکه سختی‌گیر الکترومغناطیس، انرژی خود را از برق می‌گیرد. از آنجا که انرژی سختی‌گیر مغناطیسی به دبی آب بستگی دارد و به مرور با گذشت زمان ضعیف می‌شود، میزان شدت تاثیر گذاری آن نسبت مدل الکترومغناطیسی کمتر است.

۲-۳-۵ سختی‌گیر گالوانیک

این سختی‌گیر یک سیستم الکترولیز با آند روی می‌باشد که در آن فلز روی اکسید می‌شود و مانع از اکسید شدن تاسیسات بویلر و برج خنک‌کن می‌گردد و در نتیجه مانع خوردگی می‌شود. از طرفی یون‌های روی با توده‌های غیر قابل حل پیوند داده و ذرات غیرمحلول را به صورت محلول در می‌آورد و مانع از رسوب می‌گردد.

فصل سوم

روش انجام و نتایج طرح

۳-۱ شرح کار و مدل مورد تحقیق

در این طرح سیستم گرمایشی و سرمایشی بصورت پایلوت مطابق شکل ۳-۱، طراحی و اجرا شد و تاثیر عواملی چون میزان سختی، رسوب و خوردگی در این سیستمها مورد بررسی قرار گرفت تا بر اساس نتایج حاصل از تاثیر متغیرها بر نوع و میزان خوردگی و رسوب بتوان راهکارهایی در جهت از بین رفتن یا کاهش این معضلات پیشنهاد نمود. در اینجا برای سیستم گرمایشی از پکیج و سیستم سرمایشی از برج خنک کن استفاده شده است. همچنین در این طرح از چهار سختی گیر رزینی کاتیونی، اسمز معکوس، مغناطیسی و آلتراسونیک بطور جداگانه استفاده گردید. مشخصات تجهیزات مورد استفاده در طرح بصورت ذیل می باشد:

۱- دستگاه دیجیتال پرتابل اندازه گیری نرخ خوردگی مدل Corrat9000 plus

۲- PH متر

۳- فتومتر مولتی پارامتر دیجیتال

۴- $EC / TDS / Salt / Temp$ متر

۵- سختی گیر رزینی مدل F.R.P.s-60 با میانگین دبی ۱/۵ متر مکعب در ساعت



۶- سختی‌گیر اسمز معکوس با ۳ فیلتر با ظرفیت ۳۰۰ گالن در روز

۷- سختی‌گیر الکترومغناطیسی مدل HS38

۸- پکیج دو مبدل ۲۴ کیلو وایت از شرکت ایران رادیاتور

۹- برج خنک کن به ظرفیت ۱۵ تن

۱۰- مبدل حرارتی صفحه‌ای به ظرفیت ۳۰/۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت

همانطور که در شکل مشخص است، این تست ریگ شامل دو مدار است که در یکی سیستم گرمایش (پکیج) و در دیگری سیستم سرمایش (برج خنک کننده) قرار دارد. در یک مدار، آب در داخل پکیج گرم می‌شود و توسط پمپ پکیج به گردش در آمده و در مبدل حرارتی خنک می‌شود، سپس مجدداً به پکیج بر می‌گردد. در مدار دوم که دارای برج خنک‌کننده است، آب پس از خنک شدن از مبدل حرارتی عبور کرده و دوباره گرم می‌شود، سپس مجدداً به برج برمی‌گردد.

در ورودی این مدارها، محل‌هایی برای نصب سختی‌گیر در نظر گرفته شده که می‌تواند آب تغذیه را پس از عبور از سختی‌گیر مورد نظر به داخل مدارها ارسال نمود. در محل‌های مختلف از مدارها، از شیر تخلیه برای برداشت آب استفاده شده است. برای استفاده از آب‌های مختلف، از یک مخزن ذخیره آب به عنوان منبع تغذیه در ورودی مدارها و قبل از سختی‌گیرها استفاده شد. مبدل حرارتی از نوع صفحه‌ای می‌باشد.

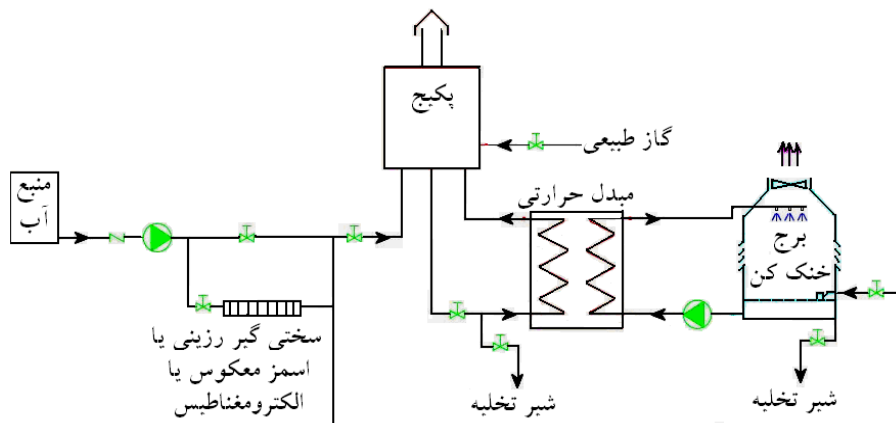
برای بررسی رسوب یا خوردگی، از سیستم کوپن‌گذاری استفاده گردید. کوپن، قطعه فلز کوچکی (از جنس لوله و با ابعاد استاندارد و وزن مشخص) است که برای مدت زمان مشخصی در مسیر جریان سیال گذاشته می‌شود. سپس آن را از سیستم خارج کرده و تمیز می‌کنند و از روی میزان وزن کاسته یا اضافه شده، سرعت و میزان خوردگی یا میزان رسوب را تعیین می‌کنند. کوپن‌ها در چهار نقطه مدار قرار گرفتند:

۱- مسیر ورودی آب پکیج و برج خنک‌کن

۲- مسیر خروجی آب گرم مصرفی.

۳- مسیر سیکل بسته و گردش پکیج

۴- مسیر سیکل گردش برج خنک کن



شکل ۳-۱: تست ریگ مربوط به این پروژه

برای بررسی میزان و نوع خوردگی، از دو الکتروود خوردگی از جنس استنسیل استیل، یکی در مسیر سیکل گردش پکیج و دیگری در مسیر سیکل گردش برج خنک کن استفاده شد. این دستگاه، نرخ خوردگی لحظه‌ای فلز را در سیال رسانا با استفاده از مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR) اندازه می‌گیرد و واحد آن بر حسب مایل در سال (mpy) می‌باشد. شکل ۳-۲، برخی مراحل نصب و تست ریگ را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲: مراحل نصب سیستم

در این سیستم آب با دبی ۶-۷ lit/min وارد پکیج می‌شود. آب ورودی به پکیج در دو



مسیر جریان می‌یابد. یک مسیر، سیکل بسته سیستم گرمایشی با دمای 80°C می‌باشد. در اینجا، آب توسط پمپ پکیج چرخش می‌کند و تنها زمانی که نمونه‌برداری آب از آن صورت گیرد، آب کم شده از منبع تغذیه جایگزین می‌گردد. مسیر دوم مسیر باز آب مصرفی با دمای 60°C می‌باشد. میزان عملکرد این دو مسیر (سیستم گرمایشی و آب مصرفی) توسط شیر برقی تنظیم شده است، به این صورت که بطور متوسط در هر ۲۴ ساعت، حدود ۱/۵ ساعت آب گرم مصرفی عبور می‌کند.

در مورد سیستم سرمایشی، آب با دبی 10lit/min به برج خنک کن وارد می‌شود و توسط پمپ به گردش در می‌آید و توسط هواکش خنک می‌شود. آب خنک شده در یک مسیر چرخشی حرکت می‌کند.

همانطور که در شکل ۳-۱ مشخص است، دو مدار سیستم گرمایشی و سرمایشی طوری کنار هم قرار گرفته اند که بتوانند به منظور مصرف انرژی (بصورت گرما یا سرما) تبادل حرارتی انجام دهند. این تبادل توسط یک مبدل صفحه‌ای حرارتی صورت می‌گیرد.

۳-۲ روند داده‌برداری

در این تحقیق، استفاده از دو منبع آب یکی با TDS بین صفر و 1000 ppm و دیگری با TDS بزرگتر از 1000 ppm در نظر گرفته شد. برای انتخاب آب، آب شهرهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخصات آن‌ها در جدول ۳-۱ ذکر شده است. از بین آنها با توجه به مشخصات و فاصله شهری، برای حالت اول از آب یکی از قنات‌های شهر تهران با TDS حدود 600 ppm و برای حالت دوم از آب پساب یکی از چاه‌های خرم‌دشت که با دستگاه RO سختی‌زدایی شده است و TDS آن متغیر بین 1000 ppm و 3000 ppm می‌باشد. در متن از این آب با نام آب خرم‌دشت استفاده شده است. برنامه زمان‌بندی برای نمونه‌برداری و انجام آزمون‌ها در هر مرحله دو ماه در نظر گرفته شد. مراحل انجام شده مطابق زیر است:

۱- آب یکی از قنات‌های شهر تهران با TDS حدود 600 ppm

۱-۱ بدون عبور از هر گونه سختی‌گیر

- ۲-۱ با عبور از سختی گیر رزینی کاتیونی
 ۳-۱ با عبور از سختی گیر اسمز معکوس
 ۴-۱ با عبور از سختی گیر الکترومغناطیسی
- ۲- آب پساب از چاه های خرمداشت با *TDS* متغیر بین ۱۰۰۰ ppm و ۳۰۰۰ ppm
- ۱-۲ بدون عبور از هر گونه سختی گیر
 ۲-۲ با عبور از سختی گیر رزینی کاتیونی
 ۳-۲ با عبور از سختی گیر اسمز معکوس
 ۴-۲ با عبور از سختی گیر الکترومغناطیسی

جدول ۱-۳: مشخصات آب در شهرهای مختلف ایران

ردیف	نام شهر	EC	TDS	Salt	PH	کل سختی	Ca ²⁺	Mg ²⁺	کل قلیائیت	pHs	لایچر SI
۱	قنات تهران	۹۱۹	۶۴۴	۴۳۹	۸/۹	۱۲۴	۸۸	۴۰	۲۲۵	۳/۶۷	۵/۲۵
۲	خرم دشت	۱۷۴۲	۱۳۹۳	۸۵۰	۸/۴۵	۴۴۸	۱۵۲	۲۹۵	۳۴۹	۷/۱۶	۱/۲۹
۳	مشهد	۷۸۳	۵۴۸	۳۷۷	۸/۲	۳۱۵	۱۴۲	۱۷۳	۱۵۶	۷/۵	۰/۷
۴	کمال شهر	۲۴۱	۱۵۴	۱۱۵	۷/۹	۱۸۰	۳۳	۱۴۷	۱۳۴	۸/۲	-۰/۳
۵	یزد	۳۱۶	۲۰۲	۱۵۲	۸/۱	۱۹۰	۷۲	۱۱۸	۱۵۴	۷/۲	۰/۷۷
۶	بومهن	۱۸۰۲	۱۴۴۲	۹۰۱	۸/۲	۲۸۵	۱۵۴	۱۳۱	۲۶۶	۷/۳	۰/۸۴
۷	قزوین	۴۸۴	۳۱۰	۲۳۱	۸/۳	۱۷۰	۱۰۰	۷۰	۱۸۶	۷/۶	۰/۷۲
۸	شهر قدس	۷۰۳	۴۹۲	۳۳۷	۸/۶	۳۷۰	۲۵۴	۱۱۶	۳۶۰	۶/۹	۱/۶۴
۹	گرگان	۷۷۵	۵۴۲	۳۶۶	۷/۸	۴۴۰	۲۸۰	۱۶۰	۳۴۰	۶/۹	۰/۸۶
۱۰	بوشهر	۷۰۳	۴۹۲	۳۳۷	۸/۲	۴۲۰	۳۶۰	۶۰	۲۳۶	۶/۹	۱/۲۹
۱۱	سبزوار	۵۰۶	۳۵۴	۲۴۱	۸	۱۲۴	۴۰	۸۴	۱۴۴	۸/۱	-۰/۱
۱۲	جی	۲۰۵	۱۳۱	۹۷	۶/۸	۲۰۰	۱۶۰	۴۰	۱۳۶	۷/۵	-۰/۷
۱۳	اصفهان	۲۰۶	۱۳۱	۹۸	۸	۲۰۰	۱۴۰	۶۰	۱۵۰	۷/۵	۰/۵
۱۴	گلپایگان	۷۳۸	۵۱۶	۳۵۳	۷/۵	۲۴۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۶۰	۷/۵	-۰/۰۴
۱۵	شهرری	۶۸۲	۴۵۴	۳۲۷	۸	۱۹۸	۱۴۲	۵۶	۲۲۰	۷/۳	۰/۶۷
۱۶	شیراز	۷۲۴	۵۰۷	۳۴۷	۷	۴۲۰	۳۹۰	۳۰	۲۸۸۰	۶/۸	۰/۱۴

مدت زمان بررسی هر مرحله، ۶۰ روز در نظر گرفته شد که در این مدت آزمون‌های مختلف بر روی سه نمونه آب به طور همزمان (منبع تغذیه، آب درون پکیج که در مسیر بسته گرمایشی در جریان است، آب درون برج خنک‌کن که در مسیر بسته سرمایشی در چرخش است) انجام شد.

این آزمون‌ها شامل اندازه‌گیری‌های پارامترهای دما، هدایت الکتریکی، *TDS* و *EC*، *pH*، سختی کل، سختی کلسیمی و منیزیمی، قلیابیت ساده و کل بود. همچنین غلظت یون‌های نظیر آهن، سولفات، سیلیس، فسفات، کلرید و مولکول‌هایی نظیر اکسیژن و کلر توسط دستگاه فوتومتر اندازه‌گیری شد. برای بررسی رسوب و خوردگی، کوپن‌ها پس از ۶۰ روز بررسی شدند. برای بررسی میزان و نوع خوردگی، نرخ خوردگی در سیکل‌های بسته‌گرایشی و سرمایشی در مدت ۶۰ روز اندازه‌گیری شدند. بعضی روش‌های اندازه‌گیری به صورت زیر انجام شده است:

- **اندازه‌گیری سختی کل به روش تیتراسیون:** سختی کل، مجموع غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم است که معمولترین روش اندازه‌گیری آن، تیتراسیون توسط محلول EDTA (اتیلن دی آمین تترا استات سدیم) می‌باشد. به این صورت که حجم مشخصی از آب (مثلاً 100 ml)، برداشته و با استفاده از محلول تامپون، *pH* آن روی ۱۰ تنظیم می‌شود. سپس در حضور معرف اریوکروم بلاک تی و با استفاده از EDTA (0.01 مولار) تیتراسیون می‌شود. با ضرب حجم EDTA مصرفی در عدد ۱۰، سختی کل بر حسب ppm معادل کربنات کلسیم بدست می‌آید. تغییر رنگ در نقطه تیتراسیون از قرمز به آبی می‌باشد.

- **سختی کلسیمی:** برای اندازه‌گیری سختی کلسیمی نیز، 100 ml از آب مورد نظر، برداشته و با سود نرمال، *pH* آن را به حدود ۱۲ رسانده می‌شود (تا منیزیم نمونه به صورت هیدروکسید منیزیم رسوب کند). سپس با استفاده از معرف مورکسید و محلول 0.01 مولار EDTA، تیتراسیون می‌شود تا از قرمز به بنفش تغییر رنگ دهد. با ضرب حجم

EDTA مصرفی در عدد ۱۰، سختی کلسیمی بر حسب ppm معادل کربنات کلسیم به دست می‌یابد.

- **سختی منیزیمی:** از آنجا که سختی کل مجموع سختی کلسیمی و سختی منیزیمی است، بنابراین از تفاضل سختی کل و سختی کلسیمی، سختی منیزیمی بدست می‌آید.

- **قلیابیت:** قلیابیت یک نمونه آب، با تیترا کردن آن توسط اسید اندازه گیری می‌شود و از معرف‌های رنگی می‌توان برای تعیین نقطه پایانی تیتراسیون استفاده کرد.

- **قلیابیت ساده:** برای اندازه گیری قلیابیت ساده، به 100 ml از نمونه آب مورد نظر، ۳ تا ۴ قطره فنل فتالین اضافه می‌شود، در صورتی که محلول ارغوانی شود، قلیابیت ساده دارد و در غیر این صورت، قلیابیت ساده نمونه صفر است. در صورت وجود قلیابیت ساده، باید نمونه با اسید سولفوریک 0.02% نرمال تا از بین رفتن تا رنگ ارغوانی تیترا شود. pH نمونه آب در نقطه پایانی تیتراسیون حدود $8/3$ خواهد بود. یون هیدروژن اسید تا این pH، برای خنثی کردن یون هیدروکسیل و تبدیل یون کربنات به یون بی-کربنات مصرف می‌شود. تعداد اکی والان‌های اسید مصرف شده با تعداد اکی والان‌های یون‌های تشکیل دهنده قلیابیت برابر می‌باشد. با توجه به آنکه اسید سولفوریک 0.02% نرمال حاوی 0.02% اکی والان یون هیدروژن در هر لیتر است، بنابراین هر سانتی‌متر مکعب اسید حاوی 0.02% میلی‌اکی‌والان یون هیدروژن است. پس مصرف هر سانتی‌متر مکعب اسید، معرف 0.02% میلی‌اکی‌والان قلیابیت است. با توجه به آن که نمونه آب انتخاب شده، 100 ml بوده، پس در هر لیتر نمونه آب ۱۰ برابر 0.02% میلی‌اکی‌والان یعنی 0.02% میلی‌اکی‌والان قلیابیت وجود دارد. اگر میلی‌اکی‌والان در لیتر، در ۵۰ ضرب شود، میلی‌گرم در لیتر معادل کربنات کلسیمی بدست خواهد آمد. پس هر میلی‌لیتر اسید مصرف شده معرف $0.02\% \times 50$ یا 10 ppm قلیابیت معادل کربنات کلسیمی می‌باشد.

- **قلیابیت کل:** برای اندازه‌گیری قلیابیت کل، به آبی که در مرحله اول، قلیابیت ساده آن محاسبه شده و اکنون بی‌رنگ است، معرف متیل اورانژ استفاده می‌شود تا رنگ

محللول زرد شود. سپس باید با اسید تیترا شود تا زمانیکه به نارنجی متمایل به قرمز تغییر رنگ دهد. pH در این نقطه به حدود ۴/۵ می‌رسد. با ضرب کردن حجم اسید مصرفی در ۱۰، قلیائیت کل بدست می‌آید.

۳-۳ نتایج آزمون‌ها

۳-۳-۱ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات بدون عبور از هرگونه سختی‌گیر پارامترهای اندازه‌گیری شده آب قنات (بدون عبور از سختی‌گیر)، در جدول‌های ۲-۳ تا ۳-۴ ذکر شده است. جدول ۳-۵، میانگین خواص آب قنات را بدون عبور از سختی‌گیر در مدت ۶۰ روز نشان می‌دهد.



جدول ۳-۵: خواص آب قنات بصورت متوسط بدون عبور از سختی‌گیر

نوع آب	متوسط سختی کل	$\bar{T} (^{\circ}F)$	\overline{Alk}	$\overline{Ca^{+2}}$	\overline{pH}	\overline{TDS}	pH_s	اندیس لانه‌جیر	اندیس رایزنار
آب خام	۱۲۲	۷۸/۲	۲۶۵	۸۷	۹	۶۴۳	۷/۴۷	۱/۵۳	۵/۹۴
آب درون پکیج	۵۲	۱۳۹	۲۰۹	۲۷	۹	۵۹۸	۷/۵	۱/۴۷	۶
آب درون برج خنک‌کن	۱۳۱	۸۱/۸	۱۷۸۴	۵۲	۱۰/۲	۱۱۹۶۰	۶/۹۶	۳/۲۳	۳/۷۲

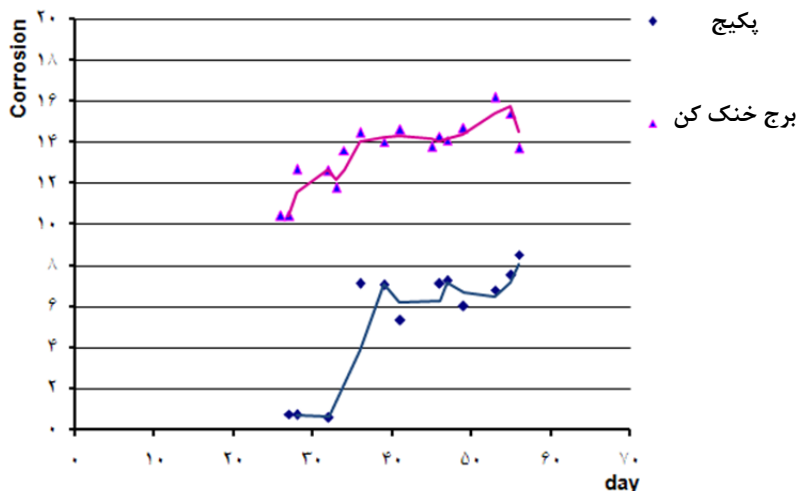
علت بالا بودن مقادیر متوسط در آب درون برج خنک‌کن، نسبت به آب درون پکیج این می‌باشد که چون در برج خنک‌کن تبخیر زیاد بوده است، آب جبرانی زیادی وارد برج شده و غلظت‌ها به مرور زمان زیاد شده است.

محاسبات اندیس لانه‌جیر نشان می‌دهد که آب در هر سه حالت بخصوص در برج خنک‌کن، خصلت رسوبگذاری دارد. اندیس رایزنار برای آب درون برج خنک‌کن رسوبگذاری زیاد، و برای آب خام و آب درون پکیج رسوبگذاری کم و یا خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. اما در عمل، در برج خنک‌کن خوردگی زیر رسوبی اتفاق افتاده و میزان آن هم زیاد است.

نمودار نرخ خوردگی بر حسب مدت زمان آزمون در سیستم گرمایشی و سرمایشی، به ترتیب برای آب در حال چرخش و عبور از درون پکیج و برج خنک‌کن، در شکل ۳-۳ و تصاویر کوپن‌های رسوبگذاری و الکترودهای خوردگی بعد از مدت دو ماه در شکل-های ۴-۴ تا ۶-۴ آورده شده است.

همانطور که در شکل ۳-۳ مشخص است، در این مدت زمان در پکیج، نرخ خوردگی ابتدا سیر صعودی دارد، اما سپس ثابت می‌شود. در این مسیر بخاطر دمای بالا، خوردگی و اکسایش از نوع مگنتیت سیاه رنگ ($\gamma - Fe_2O_3$) بوده است که خود یک لایه محافظتی است و مانع از خوردگی‌های بعدی می‌شود. این اکسید در درجه حرارت‌های بالا و در شرایط pH خنثی و شرایط مناسب تشکیل می‌شود و خود به عنوان لایه محافظ، مانع از خوردگی بیشتر می‌شود. این مساله در عکس‌های مربوط به کوپن

رسوبگذاری و الکترو خوردگی در سیستم آب گرم بوضوح مشاهده می شود.



شکل ۳-۳: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک کن

در برج خنک کن نیز نرخ خوردگی ابتدا شیب صعودی داشته و سپس تقریباً ثابت شده است. میزان خوردگی در برج بیشتر از پکیج است. در برج خنک کن بدلیل تقطیر آب و زیاد بودن سطح مقطع آب و تماس آن با هوا، حلالیت گازها از جمله اکسیژن در آن زیاد می شود که این امر میزان خوردگی را بیشتر می کند. مطابق شکل های ۳-۴ تا ۳-۶، رسوب زیادی در مسیر برج خنک کن تشکیل شده است و ظاهراً زیر این رسوب، خوردگی زیر رسوبی شکل گرفته است.

در مسیر آب ورودی به سیستم گرمایش و سرمایش، خوردگی اتفاق افتاده است که ضایعات ناشی از خوردگی روی کوپن رسوب کرده است. نتیجه، رسوب آجری رنگی را نشان می دهد که بیانگر هماتیت یا همان آلفا فریک اکسید ($\alpha - Fe_2O_3$) می باشد.

حضور فیلم $\alpha - Fe_2O_3$ دلیل بر خوردگی در حضور اکسیژن محلول است. در مسیر خروجی آب گرم مصرفی نیز خوردگی اتفاق افتاده است که مانند حالت قبل، ضایعات ناشی از خوردگی، روی کوپن رسوب کرده است. نتیجه، رسوب آجری رنگ $\alpha - Fe_2O_3$ می باشد.



شکل ۳-۴: کوپن‌های رسوبگذاری به ترتیب از سمت راست؛ ۱- کوپن سالم جهت مقایسه، ۲- کوپن در مسیر آب در سیکل بسته و گردش پکیج، ۳- کوپن در مسیر آب ورودی به پکیج و برج خنک‌کن، ۴- کوپن در مسیر آب گرم مصرفی، ۵- کوپن در مسیر سیکل گردش برج خنک‌کن



رسوب در قسمت معیان برج خنک‌کن



رسوب در لبه برج خنک‌کن

شکل ۳-۵: رسوب تشکیل شده در برج خنک طی دو ماه

همانطور که در شکل ۳-۶ مشخص است، الکتروود در مسیر سیستم گرمایشی پکیج، فقط دچار خوردگی از نوع یکنواخت و الکتروود در مسیر سیستم سرمایشی برج خنک-کن، دچار رسوب و خوردگی ناشی از پیوند رسوب با فلز شده است.



شکل ۳-۶: تصویر بالا: الکتروود خوردگی در مسیر سیکل بسته برج خنک کن، تصویر پایین: الکتروود خوردگی در مسیر سیکل بسته پکیج (تصویرهای سمت راست، تصاویر میکروسکوپی آنها می باشد)

۳-۲ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات با عبور از سختی گیر رزینی کاتیونی

پارامترهای اندازه‌گیری شده برای آب قنات قبل از عبور از سختی‌گیر رزینی کاتیونی، در جدول ۳-۶ و بعد از عبور از سختی‌گیر، در جدول‌های ۳-۷ و ۳-۸ ذکر شده است. جدول ۳-۹ میانگین خواص آب قنات با عبور از سختی‌گیر رزینی کاتیونی را در مدت ۶۰ روز نشان می‌دهد.

در سختی‌گیر رزینی کاتیونی یون‌های کلسیم و منیزیم که عامل سختی هستند، جای خود را به یون‌های سدیم که تمایلی برای رسوبگذاری ندارند می‌دهند. از اینرو میزان سختی پایین می‌آید، اما میزان آنیون‌ها و همچنین TDS ثابت می‌ماند. در برج خنک‌کن بخاطر تبخیر زیاد آب و جایگزین شدن آب تازه، به مرور بر میزان یون‌ها و مواد جامد افزوده می‌شود.

نمودار نرخ خوردگی بر حسب مدت زمان در سیستم گرمایشی برای آب در حال چرخش و عبور درون پکیج و سیستم سرمایشی برای آب در حال چرخش و عبور در برج خنک‌کن در شکل ۳-۷ رسم شده است. همچنین تصاویر کوپن‌های رسوبگذاری و الکتروودهای خوردگی بعد از مدت دو ماه در شکل‌های ۳-۸ و ۳-۹ آورده شده است.



جدول ۳-۶: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خام (قنات) قبل از عبور از سختی‌گیر رزینی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

قلیابیت کل	۲۰	۲۱۱	۷۳۲	۰۱۱	۰۱۱	۰۱۱	۰۶۱	۳۷۲	۰۱۱	۰۱۱	۰۷۱	۰۷۱	۰۳۱	۲۵۱
Mg ²⁺	۳۳	۵۳	۳۳	۸۳	۵۳	۸۱	۳۳	۰۳	۰۳	۳۳	۵۳	۰۳	۰۳	۰۳
Ca ²⁺	۰۷	۵۳	۲۷	۷۸	۵۸	۸۸	۶۸	۰۷	۵۶	۶۸	۰۶	۰۶	۰۶	۵۸
سختی کل	۱۱۱	۰۸۱	۳۱۱	۵۱۱	۳۱۱	۰۰۱	۸۱۱	۰۱۱	۵۱۱	۸۱۱	۰۱۱	۰۱۱	۳۱۱	۵۱۱
Cl ⁻	۳۳	۲۸	۶۳	۷۳	۱۳	۱۳	۶۸	۸۸	۵۸	۵۷	۶۵	۲۸	۶۳	۱۸
Cl ₂	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۰	۰	۰
PO ₄ ³⁻	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۶۱	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۳/۰
SiO ₂	۲۱	۲۱	۲۱	۰۱	۲۱	۲۱	۶۱	۰۱	۲۱	۰۱	۲۱	۲۱	۲۱	۶۱
SO ₄ ²⁻	۷/۱	۳/۸۳	۳/۵	۳/۷۸	۲/۵۵	۰۷	۵/۵	۷/۳۳	۳۳	۷/۲۱	۷۳	۳/۸۸	۳/۵	۸۳۳
O ₂	۶	۷	۷	۸	۸	۷	۵	۳	۷	۳	۸	۷	۸	۸
Fe ⁺³	۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۳/۰
Fe total	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۳/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰
PH	۶	۶/۷	۶/۷	۵/۷	۵/۷	۶/۷	۶/۷	۶/۷	۶/۷	۶/۷	۵/۷	۵/۷	۶/۷	۵/۷
Salt	۷۲۳	۵۱۳	۶۱۳	۱۲۳	۵۲۳	۱۲۳	۰۲۳	۱۱۳	۶۱۳	۷۰۳	۰۰۳	۱۲۳	۱۰۳	۶۲۳
TDS	۲۱۳	۶۰۳	۲۱۳	۵۱۳	۶۶۵	۳۱۳	۲۱۳	۲۰۳	۶۰۳	۵۵۵	۶۷۵	۵۱۳	۵۷۵	۱۳۳
EC (μs)	۷۷۷	۶۶۷	۳۸۷	۶۸۷	۵۷۷	۸۸۷	۵۸۷	۰۶۷	۶۶۷	۵۵۷	۱۳۷	۷۸۷	۵۸۷	۱۸۷
T	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۳۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
زمان (روز)	۰۱	۲۱	۳۱	۶۱	۱۲۱	۵۱	۸۱	۱۳۱	۲۳۱	۷۲۱	۱۳۱	۶۳۱	۵۵۱	۰۶۱
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴

جدول ۳-۷: پارامترهای اندازه گیری شده از آب قنات درون پکیج (سیستم گرمایشی و آب گرم مصرفی) با عبور از سختی گیر رزینی (غلظت ها بر حسب ppm می باشد)

خوردگی	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
قلیائیت ساده	۳۰	۰۰	۳۰	۰۱	۳۲	۰۳	۳۲	۰۲	۰۱	۰۳	۰۳	۰۳	۰۳	۰۳	۰۳	۰۳	۰۳	۰۳
قلیائیت کل	۰۶۱	۰۵۱	۰۵۱	۱۱۱	۳۳۱	۰۸۱	۰۸۱	۱۳۱	۰۷۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱	۰۸۱
Mg ²⁺	۱	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
Ca ²⁺	۷	۵	۵	۲	۳	۸	۳	۳	۵	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
سختی کل	۶	۱	۶	۵	۸	۶	۵	۵	۷	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱	۰۱
Cl ⁻	۵۱	۷۵	۳۳	۲۱	۱۱	۲۱	۱۱	۱۱	۳۱	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
Cl ₂	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
PO ₄ ³⁻	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
SiO ₂	۸۱	۱۱	۵۱	۱۱	۱۱	۱۱	۵۱	۱۱	۱۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱	۵۱
SO ₄ ²⁻	۰۵	۲۳	۵۳	۰۵	۲۲	۲۲	۲۳	۲۳	۲۳	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲
O ₂	۸	۵	۱	۲	۳	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
Fe ⁺³	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe total	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe ⁺²	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
PH	۶	۶	۸	۸	۶	۶	۷	۷	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
Salt	۳۳۳	۵۲۳	۴۵۳	۱۳۳	۱۳۳	۷۲۳	۱۳۳	۱۳۳	۱۰۳	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱	۸۵۱
TDS	۸۳۱	۱۲۱	۶۵۱	۵۳۱	۵۳۱	۲۲۱	۶۵۱	۶۵۱	۷۵۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱
EC (μs)	۳۲۶	۷۰۶	۲۳۶	۲۲۶	۲۲۶	۱۱۶	۲۳۶	۲۳۶	۲۰۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶	۱۵۶
T	۷۵	۷۵	۲۱	۷۵	۶۵	۸۵	۱۱	۱۱	۶۵	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
زمان (روز)	۰۱	۲۱	۳۱	۶۱	۱۱	۵۱	۸۱	۱۱	۱۱	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸



جدول ۳-۸: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب قنات درون برج خنک کن (سیستم سرمایشی) با عبور از

سختی‌گیر رزینی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خورده گی	...	...	...	۷۳/۶	۳۵/۶	۳۸/۶	۶۷/۶	۴۳/۱	۷۵/۵۱	۸۶/۱	۶۰/۵۱	...	۳۸/۶۱	۶۱/۸۱	۳۷/۶۱
قلیائیت ساده	۵۶۳	۵۱۳	۰۳۵	۰۵۱	۵۶۳	۰۰۶	۵۶۶	۵۶۸	۵۲۰۱	۵۲۰۱	۵۲۰۱	۵۲۱۱	۰۰۷۲۱	۰۰۳۱	۵۵۱
قلیائیت کل	۵۱۷	۵۸۱	۰۳۱۱	۰۰۵	۰۲۷	۰۰۵۱۱	۰۵۱۱	۵۶۸۱	۵۲۰۲	۵۲۰۲	۵۶۱	۰۶۳۲	۰۰۵۲	۵۶۱۱	۰۵۶
Mg ²⁺	۱	۱۱	۲	۶	۱۱	۷	۶	۱۱	۰۲	۱۱	۰	۰	۳	۰	۳
Ca ²⁺	۷	۶	۸۱	۷	۱۱	۸	۷	۳۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سختی کل	۸۱	۰۲	۶۱	۳۱	۲۱	۵۱	۳۱	۵۲	۵۲	۶۱	۵۱	۰	۷	۵۱	۷
Cl ⁻	۶۵	۷۸	۷/۵۵	۸/۴۷	۱/۶۶	۶/۳۷	۶/۸۷	۶/۸۷	۷/۸۷	۵۷	۷۷	۷۸	۳/۶	۵/۶۸	۱۷
Cl ₂	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
PO ₄ ³⁻	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۸/۰	۳/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
SiO ₂	۸	۵۵	۳۱۱	۸۶	۳۰۱	۵۷	۱۱۱	۳۱۱	۱۳۱	۷۸	۳۱۱	۳۸	۶۱۱	۰	۵۶
SO ₄ ²⁻	۲۰۳	۶۱۳	۱۳۵	۱۱۱	۵۱۱	۶۶۳	۵۳۵	۰۵۶	۱۰۸	۶۱۰۱	۸۷	۶۸۷	۶۶۱۱	۶۸۱۱	۳۶۶
O ₂	۳/۶	۵/۸	۸	۵/۶	۳/۵	۳/۳	۳/۵	۰	۵/۳	۱/۵	۰	۶/۵	۳/۳	۸/۵	۱۱
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۰
Fe total	۳/۰	۳/۰	۱/۰	۱/۰	۵/۰	۱۳/۰	۱/۰	۵/۰	۱۳/۰	۳/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۳/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۰	۱/۰	۰	۰	۰	۱/۰
PH	۶/۶	۷/۶	۷/۶	۳/۶	۸/۶	۶/۶	۶/۶	۶/۶	۶/۶	۰	۷/۶	۰	۰	۷/۶	۷/۶
Salt	۰۰۶۳	۰۰۸۳	۰۰۱۵	۰۰۳۱	۰۰۶۳	۰۰۸۳	۰۰۰۵	۰۰۳۶	۰۰۶۷	۰۰۰۷	۰۰۷۳	۰۰۶۶	۰۰۸۶	۰۰۲۱	۰۰۰۵۱
TDS	۱۱۵۵	۳۳۶۶	۷۷۰۸	۳۳۷۶	۳۶۶	۷۰۷۶	۷۰۰۸	۰۰۷۷	۰۶۸۱۱	۰۴۵۱۱	۰۰۰۲۱	۰۰۷۸۱	۰۰۳۸۱	۰۰۳۳۱	۶۵۳۸۱
EC (μs)	۰۶۷۶	۰۶۲۷	۰۶۷۷	۰۳۵۷	۰۳۷	۰۱۵۷	۰۶۸۷	۰۰۱۱	۰۰۸۳۱	۰۰۳۳۱	۰۰۰۵۱	۰۰۶۶۱	۰۰۵۶۱	۰۰۵۶۱	۳۸۵۶۱
T	۵۱	۳۸	۳۸	۳۸	۳۸	۵۲	۶۱	۳۸	۷۸	۷۸	۸۸	۷۸	۸۸	۸۸	۶۸
زمان (روز)	۰	۱۱	۳۱	۶۱	۱۸	۵۲	۸۸	۱۸	۳۳	۷۸	۱۳	۶۳	۵۵	۵۵	۰
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵



جدول ۳-۹: خواص آب قنات بصورت متوسط با عبور از سختی گیر رزینی

انديس رايژنار	انديس لانجیر	pH_s	\overline{TDS}	\overline{pH}	$\overline{Ca^{+2}}$	\overline{Alk}	$\overline{T} (^{\circ}F)$	متوسط سختی کل	نوع آب
۵/۶	۱	۷/۶	۶۰۵	۸/۶	۸۱	۲۵۰	۷۲	۱۲۱	آب خام
۷/۲	۰/۸۵	۸/۱	۶۵۴	۹	۵/۵	۲۳۴	۱۴۱	۷/۸	آب درون پکیج
۵/۵	۲/۱۴	۷/۶۵	۱۲۵۴۰	۹/۸	۸/۵	۲۳۴۰	۷۸	۱۶/۵	آب درون برج خنک کن

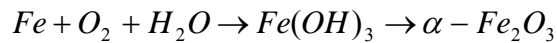
* خواص آب خام قبل از عبور از سختی گیر می باشد.

علت بالا بودن مقادیر متوسط در آب درون برج خنک کن نسبت به آب درون پکیج این می باشد که چون در برج خنک کن تبخیر زیاد بوده است، آب جبرانی زیادی وارد برج شده و غلظت ها به مرور زمان زیاد شده است. به دلیل اختلاف زیاد غلظت ها در برج خنک کن با زمان، مقدار متوسط قلیائیت کل و TDS، میانگین هفت داده آخر جدول در نظر گرفته شده است.

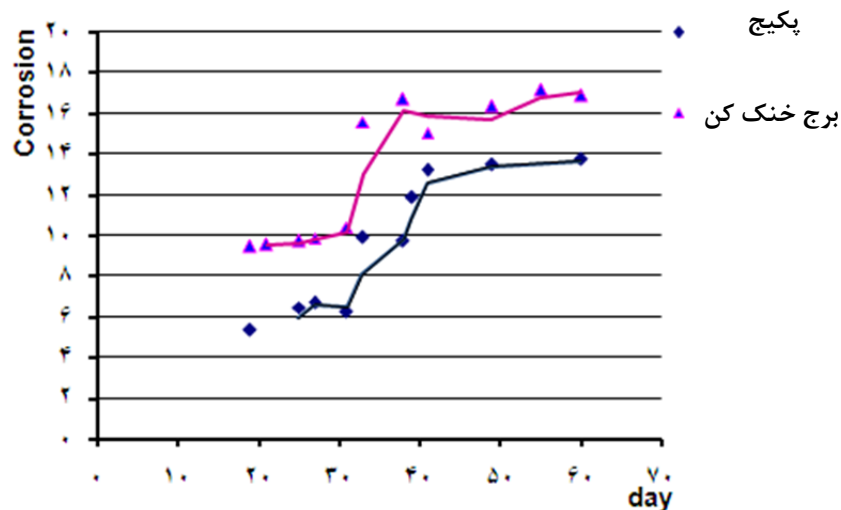
محاسبات اندیس لانجیر برای آب خام و آب درون پکیج، رسوبگذاری کم و یا خوردگی و اندیس رایژنار، خوردگی را پیش بینی می کند. همانطور که در شکل ۳-۷ مشخص است، نرخ خوردگی در پکیج سیر صعودی داشته و پس از مدتی با شیب کمتری رشد می کند. همچنین میزان خوردگی نسبت به حالتی که از سختی گیر استفاده نشده نیز بیشتر است (مقایسه با شکل ۳-۳). ظاهراً سختی پایین و pH پایین و عدم رسوبگذاری، نرخ خوردگی را بیشتر کرده است. خوردگی ها از نوع هماتیت یا همان آلفا فیریک اکسید ($\alpha - Fe_2O_3$) آجری رنگی و بصورت یکنواخت می باشد. (شکل های ۳-۸ و ۳-۹).

اندیس لانجیر برای آب درون برج خنک کن، رسوبگذاری زیاد و اندیس رایژنار، رسوبگذاری کم را پیش بینی می کند. مانند حالت های قبل، پیش بینی اندیس رایژنار بیشتر با نتایج همخوانی دارد. به دلیل پایین بودن میزان سختی در برج خنک کن، رسوب تشکیل نشده و فقط خوردگی اتفاق افتاده است (شکل های ۳-۸ و ۳-۹). همانطور که در شکل ۳-۷ مشخص است نرخ خوردگی در برج خنک کن سیر صعودی دارد. میزان

خوردگی در برج بیشتر از پکیج است. خوردگی در کوپن رسوبگذاری در مدار برج خنک‌کن، فریک هیدروکسید است. فریک هیدروکسید محصول اولیه اکسایش آهن است که نامحلول بوده و روی سطح فلز رسوب می‌کند که این محصول در اکسایش بعدی با گذشت زمان به هماتیت (آلفا فریک اکسید) تبدیل می‌شود.



خوردگی در الکتروود خوردگی مربوط به برج خنک‌کن تاویل گونه است (شکل ۳-۹). در برج خنک‌کن بدلیل تقطیر آب و زیاد بودن سطح مقطع آب و تماس آن با هوا، حلالیت گازهای اکسیژن، دی اکسید کربن ... در آن زیاد می‌شود که این امر میزان خوردگی را بیشتر می‌کند.



شکل ۳-۷: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک‌کن زمانیکه آب از سختی‌گیر رزینی کاتیونی عبور می‌کند.



شکل ۳-۸: تصویر کوپن های رسوب گذاری برای آب نرم شده توسط سختی گیر رزینی به ترتیب از سمت راست: ۱- برج، ۲- آب گرم مصرفی، ۳- آب ورودی به پکیج و برج پس از سختی گیر، ۴- پکیج



شکل ۳-۹: الکتروود خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش پکیج (تصویر سمت راست)، برج خنک کن (تصویر سمت چپ)،

۳-۳-۳ نتایج آزمون ها برای آب قنات با عبور از سختی گیر اسمز معکوس

پارامترهای اندازه گیری شده برای آب قنات، قبل از عبور از سختی گیر اسمز معکوس (RO) در جدول ۳-۱۰ و پس از عبور از سختی گیر در جدول های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ ذکر شده است. جدول ۳-۱۳، میانگین خواص آب را طی دو ماه نشان می دهد. سختی گیر اسمز معکوس با غشای نیمه تراوا و فشار اسمزی، مانع عبور کاتیون ها و آنیون ها می شود و آب نسبتاً خالص را عبور می دهد. بنابراین غلظت تمام آنیون ها و کاتیون ها در پکیج و برج، نسبت به آب اولیه بسیار کم شده است. غلظت ترکیبات در برج، بالاتر از پکیج است که بخاطر تبخیر آب و جبران آب تغذیه و تغلیظ یون ها می باشد. در اینجا، میزان سختی کل و میزان کلسیم در پکیج برخلاف موارد دیگر کمتر از برج بوده است. شاید به این دلیل که بخاطر pH بالا در برج، کلسیم رسوب کرده و غلظت آن و به تبع سختی در آب کمتر از آب در پکیج شده است. کاهش یون سولفات در این مدت در برج خنک کن هم تاییدی بر این موضوع است.



جدول ۳-۱۰: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خام (قنات) قبل از عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس

(غلظت ها بر حسب ppm می باشد)

قلیابیت کل	۰.۶۱	۳۸۱	۶۳۱	۷۳۱	۷۳۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱
Mg ²⁺	۱۵	۸۳	۰.۱	۱۸	۵۵	۱۸	۵۷	۵۳	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۱
Ca ²⁺	۸۸	۳۷	۰.۶	۵۳	۵۲	۵۷	۵۷	۰.۶	۱۷	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
سختی کل	۷۲۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۰.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۰.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱	۱.۱۱
Cl ⁻	۵۵	۵۵	۱۸	۱۶	۵۶	۸۸	۵۶	۵۶	۷۵	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳
Cl ₂	۱.۰/۰	۳.۰/۰	۸.۰/۰	۱.۰/۰	۱.۰/۰	۱.۰/۰	۱.۰/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
PO ₄ ³⁻	۶.۰	۳.۰	۳.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۰/۰	۰/۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰
SiO ₂	۱.۱	۱.۱	۳.۱	۱.۱	۰.۱	۳.۱	۷.۱	۰.۱	۰.۱	۷.۱	۷.۱	۷.۱	۷.۱	۷.۱	۷.۱	۷.۱	۷.۱
SO ₄ ²⁻	۵۵	۷۵	۱.۶	۸.۳	۵.۳	۶.۳	۱۳	۳۳	۱۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳
O ₂	۶.۵	۱.۶	۱.۶	۳.۸	۸.۶	۱.۸	۷.۶	۵.۷	۷.۶	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷	۵.۷
Fe ⁺³	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۳.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰
Fe (total)	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۳.۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe ⁺²	۱.۰	۱.۰	۱.۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
PH	۷.۷	۳.۷	۳.۷	۵.۷	۵.۷	۳.۷	۵.۷	۳.۷	۵.۷	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۳.۷	۳.۷
Salt	۵۲.۳	۱۱.۳	۳۵.۳	۷۲.۳	۶۱.۳	۷۱.۳	۱۱.۳	۷۵.۳	۱۱.۳	۷۵.۳	۷۵.۳	۷۵.۳	۷۵.۳	۷۵.۳	۷۵.۳	۷۵.۳	۷۵.۳
TDS	۱۵۶	۵۱.۶	۳۸.۵	۱۱۱.۶	۸۰.۶	۱۱۱.۶	۱۰.۶	۷۵.۵	۱۰.۶	۷۵.۵	۷۵.۵	۷۵.۵	۷۵.۵	۷۵.۵	۷۵.۵	۷۵.۵	۷۵.۵
EC (μs)	۰.۸۷	۷۸.۷	۰.۲۷	۰.۷۷	۸۶.۷	۳۸.۷	۰.۶۷	۷۲.۷	۰.۶۷	۷۲.۷	۷۲.۷	۷۲.۷	۷۲.۷	۷۲.۷	۷۲.۷	۷۲.۷	۷۲.۷
T	۳.۱	۱.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱
زمان (روز)	۳	۸۱	۱.۱	۵.۱	۳.۱	۸.۱	۳.۱	۱.۳	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱	۳.۱
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷

جدول ۳-۱۱: پارامترهای اندازه گیری شده از آب قنات درون پکیج (سیستم گرمایشی و آب گرم مصرفی)

با عبور از سختی گیر اسمز معکوس (غلظت ها بر حسب ppm می باشد)

خوردگی	۱۶/۴	۷/۳	۱۱/۳	۸/۷/۸	۷/۵/۳	۱۶/۳	۶/۱/۳	۲۱/۴	۶/۷/۳	۳/۶/۳	۳۳/۳	۳۱/۳
قلیائیت کل	۹۰	۹۶	۵۸	۰۷	۲۰	۰۸	۰۰/۱	۵۸	۲۰	۰۸	۰۵	۲۰
Mg ²⁺	۱۰	۸	۶	۶	۳	۵/۱	۷	۵/۱	۱۱	۵/۱	۵/۱	۱۰
Ca ²⁺	۲۰	۷/۱	۸/۱	۷/۱	۵/۱	۱۱	۸/۱	۰/۲	۶/۱	۳/۱	۳/۱	۳۳
سختی کل	۳۰	۵/۱	۳/۱	۳/۱	۶/۱	۳/۱	۵/۱	۵/۱	۳/۱	۷/۱	۶/۱	۳/۱
Cl ⁻	۱۰	۷/۸	۱۱	۳/۶	۱/۶	۳/۶	۶/۶	۵/۱	۳/۸	۶/۶	۶/۶	۱ >
Cl ₂	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۰
PO ₄ ³⁻	۳/۰	۳/۰	۶/۰	۳/۰	۳/۰	۱/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰
SiO ₂	۳/۵	۵	۷/۵	۳	۶/۳	۳/۳	۳/۵	۱/۸	۶/۵	۳/۶	۳/۵	۱/۸
SO ₄ ²⁻	۳۳	۳۳	۳۳	۶۳	۱۳	۳۳	۳۳	۰/۲	۱/۳	۶/۳	۲/۳	۳۳
O ₂	۱/۸	۳/۸	۶/۸	۳/۸	۷/۸	۳/۳	۸/۱	۳/۳	۸/۱	۳/۳	۳	۵/۵
Fe ⁺³	۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۳/۰	۰	۸/۰/۰	۰	۰	۱/۰	۰
Fe (total)	۱/۰	۱/۰	۷/۰/۰	۵/۱/۰	۳/۰	۷/۱/۰	۸/۰/۰	۸/۰/۰	۷/۰/۰	۳/۱/۰	۱/۱/۰	۷/۰/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۳/۰	۰	۱/۰	۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰
PH	۵/۷	۱/۶	۱/۶	۳/۶	۱/۶	۶/۷	۶	۶/۷	۷/۷	۸/۷	۱/۶	۷/۷
Salt	۳۳	۳۳	۶۳	۵۳	۳۱	۳۳	۷۱	۳۳	۰/۲	۵/۱	۷/۱	۳۳
TDS	۳۳	۷/۶/۱	۷/۱/۳	۳۳	۲/۶/۱	۳/۴/۳	۳/۳/۱	۳/۰/۳	۳/۰/۲	۶/۱/۱	۳/۳/۱	۳/۳/۱
EC (μs)	۰/۸	۷/۱	۳/۵	۵/۵	۳/۳	۳/۳	۶/۳	۳/۳	۳/۳	۶/۳	۶/۳	۶/۳
T	۷۵	۰/۵	۳/۵	۱/۵	۶/۵	۷/۵	۰/۵	۵/۵	۳/۵	۱/۵	۳/۵	۵/۵
زمان (روز)	۳۱	۸۱	۱/۱	۳/۱	۶/۱	۳/۱	۱/۳	۳/۳	۶/۳	۵/۵	۸/۵	۳/۳
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷	۶	۰/۱	۰/۱	۱/۱



جدول ۳-۱۲: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب قنات درون برج خنک کن (سیستم سرمایشی) با عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس (غلظت‌ها بر حسب ppm می باشد)

خوردگی	۵/۶۷	۱۱/۱	۶/۰۲	۶/۶۳	۱۶/۷	۵/۵۷	۷/۱۷	۲۸/۷	...	۸/۵۵	...	...
قلیابیت ساده	۲۷۵	۲۵۰	۲۴۰	۲۸۰	۲۵۰	۲۹۰	۲۶۰	۲۰۰	۵۱۱	۵۱۱	۲۷۰	۲۰۰
قلیابیت کل	۲۹۰	۵۵۶	۵۴۶	۵۵۶	۵۱۶	۵۰۶	۵۱۶	۴۸۶	۵۵۵	۵۵۵	۵۵۵	۵۰۵
Mg ²⁺	۷	۶	۵	۶	۷	۷	۲۱	۷	۶	۱۰	۱۱	۱۱
Ca ²⁺	۶	۵	۸	۶	۲۱	۳۱	۰۰۱	۲۱	۲۱	۶	۱۱	۰۰۱
سختی کل	۱۳	۱۱	۲۱	۵۱	۲۰	۱۱	۲۱	۲۰	۱۱	۶۱	۱۱	۱۱
Cl ⁻	۷۶	۴۶	۶۸	۷۶	۵۸	۵۸۳	۶۷	۳۸	۸۶	۴۸	۱۸	۵۶
Cl ₂	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰
PO ₄ ³⁻	۱/۰	۳/۰	۱/۰	۳/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰
SiO ₂	۳۷	۳۶	۷۷	۶۵	۶۵	۶۵	۰۸	۶۱	۶۶	۶۸	۵۷	۰۵
SO ₄ ²⁻	۰۰۳	۰۱۳	۱۱۳	۸۱۳	۶۱۳	۱۶۳	۱۰۳	۳۳۳	۶۳۳	۳۷۳	۶۳۳	۷۶۱
O ₂	۷/۶	۶	۲/۷	۷	۶/۶	۸/۸	۶/۶	۸/۵	۶/۶	۵	۶/۶	۷/۵
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰
Fe (total)	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe ⁺²	۰	۱/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
PH	۶/۶	۰۱	۶/۶	۶/۶	۷/۶	۸/۶	۸/۶	۸/۶	۰۱	۷/۶	۸/۶	۶/۶
Salt	۰۰۳۱	۰۰۱۱	۰۰۳۱	۰۰۳۱	۰۰۸۱	۰۰۰۱	۰۰۳۱	۰۰۳۱	۰۰۱۱	۰۰۷۱	۰۰۶۱	۰۰۶۱
TDS	۱۰۴۰	۷۶۳	۰۸۶	۷۷۰	۱۶۸۱	۱۵۵۱	۳۱۳	۷۶۵۱	۶۱۳	۶۵۶	۰۸۳	۱۱۶
EC (μs)	۰۰۷۸	۰۶۵	۰۵۳	۰۶۷	۰۳۳	۰۶۱	۰۳۳	۰۱۶۱	۰۰۳	۰۳۳	۰۵۶	۰۳۳
T	۷۸	۷۱	۱۱	۱۱	۵۲	۱۱	۷۱	۱۱	۱۱	۸۱	۰۱	۸۱
زمان (روز)	۱۳	۸۱	۱۱	۳۱	۶۲	۸۳	۱۳	۳۳	۶۳	۵۵	۸۵	۶۶
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲



جدول ۳-۱۳: خواص آب قنات بصورت متوسط با عبور از سختی گیر اسمز معکوس

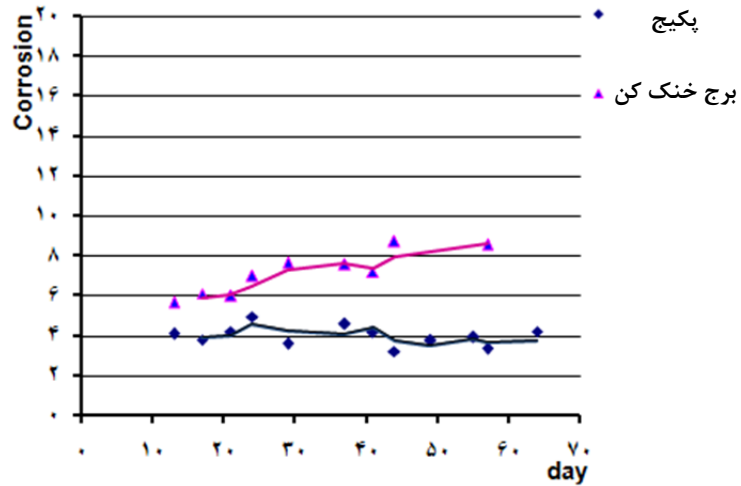
انديس رايژنار	انديس لانجیر	pH_s	TDS	pH	$\overline{Ca^{+2}}$	Alk	$\overline{T} (^{\circ}F)$	متوسط سختی کل	نوع آب
۶/۸۱	۰/۸۱	۷/۶۲	۵۹۷	۸/۴۳	۸۰	۲۴۳	۷۲	۱۲۴	آب خام
۷/۲۸	۰/۸۱	۸/۰۹	۲۷/۷	۸/۹	۱۹/۶	۷۳	۱۲۸	۳۳/۲	آب درون پکیج
۶/۷	۱/۵۵	۸/۲۵	۳۳۱۶	۹/۸	۹/۶	۶۰۳	۷۰	۱۸	آب درون برج خنک کن

* خواص آب خام قبل از عبور از سختی گیر می باشد.

محاسبات اندیس لانجیر و رایژنار در پکیج نشان‌دهنده رسوب کم یا خورنده بودن است. متنها چون خوردگی و اکسایش از نوع مگنتیت سیاه رنگ ($\gamma - Fe_2O_3$) بوده است، نرخ خوردگی پایین و ثابت است.

محاسبات اندیس لانجیر در برج نشان‌دهنده تشکیل رسوب و رایژنار نشان‌دهنده تشکیل رسوب کم یا خورنده بودن است. بخاطر بیشتر بودن یون‌های خورنده چون سولفات و کلرید، همچنین گازهای خورنده چون اکسیژن در پکیج، خوردگی در آن بیشتر بوده و نرخ خوردگی بصورت صعودی است. خوردگی و اکسایش در پکیج از نوع ($\alpha - Fe_2O_3$) آجری رنگی بوده است.

نمودار نرخ خوردگی بر حسب مدت زمان، برای آب در حال چرخش درون پکیج و برج خنک‌کن، در شکل ۳-۱۰ رسم شده است. همچنین تصاویر کوپن‌های رسوبگذاری و الکترودهای خوردگی بعد از مدت دو ماه در شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ آورده شده است.



شکل ۳-۱۰: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک کن زمانیکه آب از سختی‌گیر اسمز معکوس عبور می‌کند.



شکل ۳-۱۱: تصویر کوپن‌های رسوب‌گذاری برای آب نرم شده توسط سختی‌گیر اسمز معکوس (RO). به ترتیب از راست به چپ (۱: پکیج، ۲: ورودی، ۳: آب گرم مصرفی، ۴: برج خنک کن)



شکل ۳-۱۲: الکتروود خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش در پکیج (تصویر سمت چپ)، در برج خنک کن (تصویر سمت راست).

۳-۳-۴ نتایج آزمون‌ها برای آب قنات با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی

پارامترهای اندازه‌گیری شده برای آب قنات قبل از عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی در جدول ۳-۱۴ و پس از عبور از سختی‌گیر در جدول‌های ۳-۱۵ و ۳-۱۶ ذکر شده است. جدول ۳-۱۷ میانگین خواص آب را طی مدت دو ماه نشان می‌دهد. سختی‌گیر الکترومغناطیس با تغییر شکل بلورهای کربنات کلسیم و منیزیم، آنها را از حالت غیر قابل حل و چسبنده به حالتی قابل حل و غیر چسبنده تبدیل می‌کند. بنابراین این مواد بدون آنکه رسوب کنند، در آب معلق هستند. در آب درون برج خنک کن مقادیر متوسط نسبت به آب درون پکیج بخاطر وارد شدن آب جبرانی به برج بیشتر است. نمودار نرخ خوردگی بر حسب زمان در سیستم گرمایشی برای آب در حال چرخش و عبور درون پکیج و سرمایشی برای آب در حال چرخش و عبور در برج خنک‌کن در شکل ۳-۱۳ رسم شده است.



جدول ۳-۱۴: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خام (قنات) قبل از عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

قلیابیت کل	۶۱۱	۰۶۱	۰۷۲	۰۷۲	۰۶۱	۲۸۱	۲۸۱	۰۶۱	۰۳۱	۰۶۱
Mg ²⁺	۵۵	۲۳	۳۱	۱۱	۶۳	۲۱	۱۳	۰۲	۶۱	۸۱
Ca ²⁺	۵۸	۰۷	۷۷	۶۷	۶۶	۷۸	۴۸	۲۷	۵۷	۳۷
سختی کل	۰۳۱	۲۱۱	۲۱۱	۲۰۱	۵۱۱	۰۱۱	۳۱۱	۲۱۱	۱۱۱	۰۲۱
Cl ⁻	۸۳	۰۵	۳۵	۷۳	۸۳	۳۶	۱۵	۳۳	۳۳	۱۳
Cl ₂	۳۰/۰	۰	۲۰/۰	۰	۱۷/۰	...	۰	۱۰/۰	۳۰/۰	۰
PO ₄ ³⁻ (LR)	۲/۰	۶۳/۰	۸۱/۰	۶۱/۰	۲/۰	۱۲/۰	۲۲/۰	۲۲/۰	۳۲/۰	۲۲/۰
SiO ₂ (HR)	۵/۲۱	۷/۲۱	۱/۵۳	۳/۶۱	۶/۲۱	۷۱	۵/۲۱	۷/۲۱	۳/۰۳	۷/۳۱
SO ₄ ²⁻	۰۷	۶۵	۱۳	۶۳	۶۶	۰۶	۶۳	۰۳	۶۰۱	۵۵
O ₂	۱/۵	۱/۶	۸	۶/۵	۱/۶	۵	۷/۵	۱/۳	۷/۵	۵
Fe ³⁺	۳۰/۰	۳۰/۰	۳۱/۰	۱/۰	۱۰/۰	...	۱۰/۰	۱۰/۰	۷۰/۰	۱۰/۰
Fe (total)	۸۰/۰	۸۰/۰	۳۱/۰	۱/۰	۲۰/۰	۳۰/۰	۱۰/۰	۵۰/۰	۷۰/۰	۱/۰
Fe ²⁺	۳۰/۰	۳۰/۰	۰	۰	۳۰/۰	۱/۰	۰	۳۰/۰	۰	۶۰/۰
PH	۳۳/۷	۳۳/۷	۳۳/۷	۶۵/۷	۳۸/۷	۱۵/۷	۸۵/۷	۳۵/۷	۳۵/۷	۷۵/۷
Salt	۳۶۳	۳۶۳	۰۷۳	۷۵۳	۱۶۳	۶۷۳	۶۱۳	۳۳۳	۶۵۳	۵۳۳
TDS	۳۸۵	۶۸۵	۵۵۵	۶۶۶	۱۸۵	۳۶۵	۳۶۵	۰۰۵	۵۸۳	۸۷۳
EC (μs)	۰۲۷	۳۲۷	۳۶۸	۶۵۶	۳۱۷	۳۰۷	۴۳۷	۳۱۸	۳۸۶	۶۶۶
T	۱۲	۱۲	۰۲	۱۲	۰۲	۶۱	۷۱	۰۲	۰۲	۰۲
زمان (روز)	۸۱	۰۲	۳۲	۰۲	۳۳	۱۳	۵۳	۱۵	۳۵	۰۶
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷	۶	۰۱

جدول ۳-۱۵: پارامترهای اندازه گیری شده از آب قنات درون پکیج (سیستم گرمایشی و آب گرم مصرفی)

با عبور از سختی گیر الکترومغناطیسی (غلظت ها بر حسب ppm می باشد)

خوردگی	۱۰/۷	۵۷/۱ ۶۰/۱	...	۶۶/۱	۶۱/۱	...	...	...	۵/۱	۱۱/۱
قلیابیت کل	۶۶۱	۸۹۱	۰۱۱	۰۶۱	۲۵۲	۶۳۲	۰۲۲	۵۱۲	۰۵۲	۵۲۱
Mg ²⁺	۳۱	۸۱	۵۱	۸۱	۵۲	۲۱	۸	۲۱	۲۱	۳۳
Ca ²⁺	۳۱	۳۱	۷۱	۳۱	۵۲	۱۲	۰۲	۰۲	۲۱	۶۱
سختی کل	۷۸	۰۶	۲۵	۰۵	۰۶	۳۲	۸۱	۲۳	۵۶	۰۸
Cl ⁻	۲۳	۶۵	۲۵	۸۳	۲۵	۶۶	۶۶	۵۵	۵۵	۶۵
Cl ₂	۳۰/۰	۱/۰	۲۰/۰	۱۷/۰	۱۳/۰	۱۷/۰	۳۷/۰	۵۰/۰	۲۰/۰	۳۰/۰
PO ₄ ³⁻ (LR)	۵۷/۰	۶۷/۰	۸۷/۰	۲۲/۰	۸۴/۰	۷۳/۰	۷۰/۱	۶۲/۰	۶۲/۰	۲۳/۰
SiO ₂ (HR)	۳۱	۱۲	۵۲	۳۱	۶۲	۸۱	۲۳	۳۲	۶۲	۰۳
SO ₄ ²⁻	۰۶	۷۲	۱۳	۸۲	۰۵	۲۰۱	۰۵	۳۶	۶۰۱	۶۱۱
O ₂	۵/۵	۳/۲	۸	۷/۱	۲/۲	۲/۲	۸/۱	۶	۲	۷/۱
Fe ⁺³	۲۰/۰	۰	۲۱/۰	۶۰/۰	۱۰/۰	۷۰/۰	۰	۶۶/۰	۰	۰
Fe(total)	۸۰/۰	۰	۶۷/۰	۲۱/۰	۵۷/۰	۷۰/۰	۱۷/۰	۲/۰	۲۷/۰	۱۰/۰
Fe ⁺²	۵۰/۰	۰	۳۰/۰	۸۰/۰	۳۷/۰	۰	۷/۰	۳۰/۰	۲۷/۰	۰/۰
PH	۶۷/۷	۶۰/۷	۶۲/۷	۵۷/۷	۶۵/۷	۷۶/۷	۶۵/۷	۲۷/۷	۲/۷	۸۳/۷
Salt	۸۵۲	۰۲۳	۸۷۲	۰۶۲	۲۷۲	۸۸۲	۵۰۳	۲۱۲	۶۳۲	۲۵۲
TDS	۶۶۵	۶۶۶	۶۶۵	۷۶۵	۷۵۵	۲۵۵	۲۶۵	۳۵۳	۸۰۵	۵۱۵
EC (μs)	۲۵۸	۳۶۷	۷۰۷	۲۱۷	۸۶۸	۰۶۸	۸۳۷	۷۳۶	۳۲۸	۵۲۸
T	۲۵	۶۵	۷۵	۱۵	۰۵	۷۵	۰۶	۲۵	۷۵	۷۵
زمان(روز)	۸۱	۰۲	۳۱	۰۲	۲۱	۱۳	۵۳	۱۵	۲۵	۰۶
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷	۶	۱



جدول ۳-۱۶ : پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب قنات درون برج خنک‌کن (سیستم سرمایشی) با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

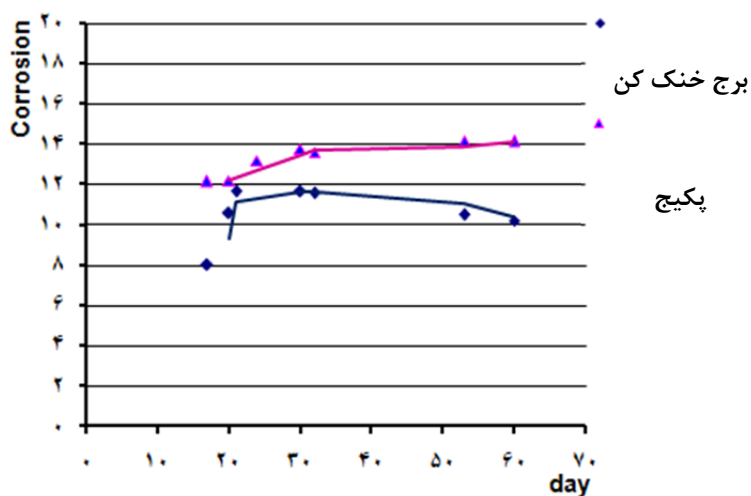
خوردگی	۸۷/۲۱	۶۷/۳۱ ۲/۸۱	...	۶۸/۳۱	۶/۸۱	...	...	...	۷/۳۱	۳/۳۱
قلیابیت ساده	۰۰۲	۰۰۱	۰۰۲	۰۰۲	۰۰۲	۰۰۱	۰۰۲	۰۰۱	۰۰۱	۰۰۲
قلیابیت کل	۰۳۱۱	۰۳۱۱	۰۳۳	۰۰۸	۰۰۸	۰۰۱۱	۰۰۵	۰۰۳۸	۰۰۵۷	۰۰۱۱
Mg ²⁺	۰۰۰	۰۰۱	۰۰۰	۰۰۳	۰۰۷	۰۰۶	۰۰۵	۰۰۸	۰۰۸	۰۰۱
Ca ²⁺	۰۰۳	۰۰۲	۰۰۰	۰۰۳	۰۰۲	۰۰۱۳	۰۰۰	۰۰۳	۰۰۳	۰۰۱
سختی کل	۰۰۰۱	۰۰۱	۰۰۰۱	۰۰۷	۰۰۱۱	۰۰۳۱	۰۰۱	۰۰۱۱	۰۰۵	۰۰۱۱
Cl ⁻	۳۰	۶/۳۶	۶/۶۶	۳/۸۳	۰/۷۰	۸	۶	۶/۳۰	۶/۳۰	۱/۶۰
Cl ₂	۸۰/۰	۲۰/۰	۸۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶/۰	۰	۰/۰	۲۰/۰	۳/۰
PO ₄ ³⁻	۶/۰	۰/۰	۳/۰	۸/۰	۶/۰	۰/۰	۶/۱	۶/۰	۶/۰	۱۳/۰
SiO ₂	۷/۰۸	۴/۸	۸/۳	۸/۶۶	۶/۸	۷/۸	۶/۷	۷/۳۱	۲/۳	۶/۶۶
SO ₄ ²⁻	۱۱۱	۶/۸	۳۱	۶/۱	۳/۱	۸/۸	۱۶۱	۳/۱	۶/۳	۶/۶
O ₂	۶/۰	۳/۳	۰	۶/۳	۶/۰	۶/۳	۶/۰	۶	۶/۰	۳/۳
Fe ⁺³	۲/۰	۱/۰	۰	۲/۰	۰	۱/۰	۶/۰	۰	۸/۰	۰
Fe(total)	۰/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۱/۰	۲/۰	۳/۰
Fe ⁺²	۴/۰	۳/۰	۶/۰	۱/۰	۰/۰	۳/۰	۷/۰	۱/۰	۰/۰	۳/۰
PH	۸/۶	۷/۶	۷/۶	۱۳/۶	۳/۶	۱۰/۶	۰۳/۶	۳/۶	۸/۶	۸/۶
Salt	۰۰۳	۰۰۰	۰۰۸	۰۰۱	۰۰۱	۰۰۰	۰۰۶	۰۰۳	۰۰۰	۰۰۰
TDS	۷۷۲	۶۳۳	۱۳۳	۷۰۳	۰۰۳	۰۰۳	۱۶۶	۱۸۳	۱۳۳	۰۳۳
EC (μs)	۰۱۳	۰۸۰	۰۶	۰۰۳	۰۰۰	۰۰۳	۰۳	۰۳	۰۳	۰۰
T	۷/۱	۳/۶	۸/۱	۳/۰	۸/۶	۶/۱	۳/۳	۷/۱	۲/۱	۶/۱
زمان(روز)	۸۱	۰۰	۳	۰۰	۲	۱۳	۰۳	۱۰	۴۰	۰۰
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۸	۷	۶	۰۱

جدول ۳-۱۷: خواص آب قنات بصورت متوسط با عبور از سختی گیر الکترومغناطیسی

انديس رايزنار	انديس لانجیر	pH_s	\overline{TDS}	\overline{pH}	$\overline{Ca^{+2}}$	\overline{Alk}	$\overline{T}(^{\circ}F)$	متوسط سختی کل	نوع آب
۶۷۵	۰/۸۹	۷/۶۴	۵۵۶	۸/۵۳	۸۰	۲۶۰	۶۸	۱۱۷	آب خام
۶/۶۵	۰/۹۴	۷/۵۹	۵۴۶	۸/۵۳	۲۵	۲۲۳	۱۳۲	۵۰	آب درون پکیج
۵/۵۴	۱/۹۸	۷/۵۸	۳۴۸۸	۹/۶۲	۳۳	۸۷۵	۶۴	۱۰۸	آب درون برج خنک کن

* خواص آب خام قبل از عبور از سختی گیر می باشد.

با توجه به اندیس های لانجیر و رايزنار، آب درون پکیج خورنده و آب درون برج رسوبگذار کم است. همانطور که در نمودار شکل ۳-۱۳ دیده می شود، به دلیل پایین بودن سختی در هر دو سیستم (پکیج و برج)، خوردگی غالب است. نرخ خوردگی در پکیج ثابت، اما مقدار آن زیاد است و مقداری هم سیر نزولی دارد.



شکل ۳-۱۳: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک کن زمانیکه آب از سختی گیر الکترومغناطیسی عبور می کند.

همانطور که در شکل های ۳-۱۴ و ۳-۱۵ که مربوط به تصاویر کوپن های رسوبگذاری و الکترودهای خوردگی بعد از مدت دو ماه می باشد، مشخص است، خوردگی ها از نوع هماتیت یا همان آلفا فریک اکسید ($\alpha - Fe_2O_3$) آجری رنگی می باشد.

در برج خنک‌کن رسوب تشکیل شده است. اما بخاطر خوردگی زیر رسوبی بوجود آمده، نرخ خوردگی در برج بیشتر از پکیج بوده و با شیب تقریباً ثابت در حال افزایش است.



شکل ۳-۱۴: تصویر کوپن‌های رسوب گذاری برای آب نرم شده توسط سختی‌گیر الکترومغناطیسی. به ترتیب از راست به چپ (۱: پکیج، ۲: ورودی، ۳: آب گرم مصرفی، ۴: برج)



شکل ۳-۱۵: الکترو خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش پکیج (تصویر سمت راست)، برج خنک کن (تصویر سمت چپ).

۳-۳-۵ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت بدون عبور از سختی‌گیر پارامترهای اندازه‌گیری شده برای آب خرم‌دشت بدون عبور از سختی‌گیر در جدول‌های ۳-۱۸ تا ۳-۲۰ ذکر شده است. جدول ۳-۲۱، میانگین خواص آب را در مدت دو ماه نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱۸: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خام (خرمدشت) بدون عبور از سختی گیر

(غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

قلیابیت کل	۵۲۸	۷۰۳	۵۲۸	۰۳۸	۵۳۸	۳۳۸	۸۱۸	۱۶۸	۱۸۸	۱۳۸
Mg ²⁺	۴۰۳	۳۰۳	۱۰۳	۳۰۳	۷۷۸	۳۶۸	۴۱۸	۶۰۳	۶۰۳	۸۱۸
Ca ²⁺	۴۵۱	۳۳۱	۴۵۱	۱۵۱	۵۳۱	۷۳۱	۶۳۱	۱۵۱	۱۳۱	۵۳۱
سختی کل	۸۵۳	۷۳۳	۸۵۳	۳۵۳	۸۸۳	۸۳۳	۱۶۳	۰۶۳	۴۵۳	۱۶۳
Cl ⁻	۱۶	۶۵	۸۱	۷۶	۸۱	۵۶	۶۵	۳۵	۶۵	۱۶
Cl ₂	۱۰/۰	۵۰/۰	۶۰/۰	۳۰/۰	۲۰/۰	۵۰/۰	۳۰/۰	۷۰/۰	۶۰/۰	۱۰/۰
PO ₄ ³⁻ (LR)	۵۳/۰	۳/۰	۶۳/۰	۴۵/۰	۸۱/۰	۳۱/۰	۳۵/۰	۶۳/۰	۳۳/۰	۷۸/۰
SiO ₂ (HR)	۶۱	۶۱	۶۱	۸۱	۷۱	۶۱	۷۱	۰۲	۶۱	۸۱
SO ₄ ²⁻	۶۸۱	۸۶۱	۸۶۱	۲۷۱	۰۶۱	۸۶۱	۵۰۲	۸۶۱	۶۰۲	۶۸۱
O ₂	۶/۸	۳/۸	۵۲/۸	۵۳/۸	۵۳/۸	۵/۸	۵۲/۸	۱/۸	۲/۸	۵۵/۸
Fe ⁺³	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe (total)	۲/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۱/۰
PH	۸/۷	۵/۷	۶/۷	۶/۷	۸/۷	۷/۷	۶/۷	۷/۷	۵/۷	۸/۷
Salt	۷۵۸	۰۷۸	۸۵۸	۷۸۸	۵۸۸	۸۶۸	۵۱۸	۸۵۶	۸۸۸	۸۸۸
TDS	۸۵۳۱	۸۸۳۱	۰۶۳۱	۳۱۳۱	۰۷۳۱	۷۶۳۱	۵۰۳۱	۰۰۳۱	۳۳۳۱	۵۷۳۱
EC (μs)	۱۸۷۱	۸۳۷۱	۱۶۷۱	۷۶۸۱	۰۵۷۱	۳۳۷۱	۶۵۸۱	۰۵۸۱	۵۰۷۱	۶۵۷۱
T	۳۲	۳۲	۵۲	۲۲	۳۲	۲۲	۳۲	۳۲	۳۲	۲۲
زمان (روز)	۸	۲۱	۶۱	۰۲	۳۱	۷۲	۳۲	۰۳	۷۳	۶۵
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷	۶	۱

جدول ۳-۲۰: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خرم‌دشت درون برج خنک‌کن (سیستم سرمایشی) بدون

عبور از سختی گیر (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خوردگی	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸	۳/۸
قلیابیت ساده		۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶	۳۳/۳۶
قلیابیت کل		۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳	۶۳۳
Mg ²⁺		۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸	۵۷۸
Ca ²⁺		۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱	۷/۱۱۱
سختی کل		۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵	۸۶۵
Cl ⁻		۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸
Cl ₂		۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
PO ₄ ³⁻		۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰
SiO ₂		۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱	۸/۳۱
SO ₄ ²⁻		۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱	۷۰۱
O ⁻		۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۲/۳
Fe ⁺³		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Fe(tot al)		۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
Fe ⁺²		۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
PH		۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
Salt		۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶	۳۳۶
TDS		۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱
EC (μs)		۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
T		۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱
زمان(رو ز)		۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
ردیف		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶



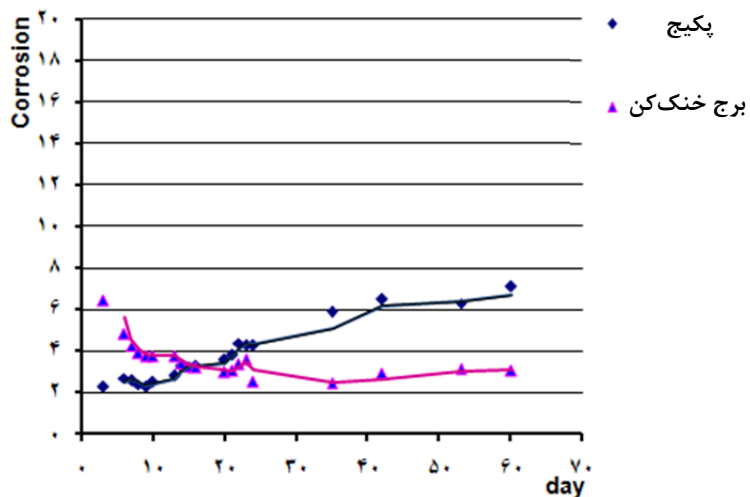
جدول ۳-۲۱: خواص آب خرم‌دشت بصورت متوسط بدون عبور از سختی‌گیر

انديس رايژنار	انديس لانجیر	pH_s	\overline{TDS}	\overline{pH}	$\overline{Ca^{+2}}$	\overline{Alk}	$\overline{T}(^{\circ}F)$	متوسط سختی کل	نوع آب
۵/۷۹	۱/۴۲	۷/۲۲	۱۴۵۶	۸/۶۵	۱۴۸	۳۳۰	۷۴	۴۵۱	آب خام
۴/۷۷	۱/۹۶	۶/۷۴	۱۴۴۶	۸/۷۱	۱۳۱	۳۳۶	۱۳۱	۳۸۲	آب درون پکیج
۴/۴۷	۲/۳۳	۶/۸۱	۱۸۱۹	۹/۱۵	۲۲۱	۶۰۱	۷۳	۶۴۵	آب درون برج خنک‌کن

خواص آب درون پکیج بگونه‌ایست که اندیس لانجیر و رايژنار برای آن رسوبگذاری زیاد را پیش‌بینی می‌کند. با توجه به اینکه آب از سختی‌گیر عبور نکرده است، خواص آب درون پکیج تفاوت چندانی با آب خام ندارد، جز اینکه دمای بالا، حلالیت موادی چون کربنات کلسیم را کم می‌کند و باعث ایجاد رسوب می‌شود. کوپنی که در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است، مقداری رسوب روی آن تشکیل شده است.

در آب درون برج خنک‌کن مقادیر متوسط نسبت به آب درون پکیج بخاطر وارد شدن آب جبرانی به برج بیشتر است. این قسمت از پروژه در فصل سرد انجام شد، بنابراین تبخیر آب و میزان آب جبرانی زیاد نبود. اندیس لانجیر و رايژنار با توجه به خواص آب، رسوبگذاری زیاد را پیش‌بینی می‌کند که این پیش‌بینی کاملاً درست است و رسوب زیادی روی کوپن و الکتروود خوردگی در مسیر برج خنک‌کن تشکیل شده است (شکل‌های ۳-۱۷ و ۳-۱۸). بخاطر تشکیل رسوب زیاد و سخت، میزان خوردگی در برج خنک‌کن بسیار کم بوده است. همانطور که در نمودار ۴-۱۶ مشخص است، نرخ خوردگی در برج خنک‌کن ابتدا حدود شش بوده است که به مرور زمان بخاطر تشکیل رسوب از میزان آن کم شده است. در حقیقت رسوب زیاد و چسبنده مانع از خوردگی شده است.

در پکیج که میزان رسوب کمتر از برج است، خوردگی بیشتر و نرخ آن با شیب کم نسبت به زمان افزایش یافته و نهایتاً ثابت شده است. خوردگی از نوع مگنتیت سیاه رنگ ($\gamma - Fe_2O_3$) بوده است که خود مانع از خوردگی‌های بعدی می‌شود.



شکل ۳-۱۶: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک کن زمانیکه آب از سختی گیر عبور نمی کند.



شکل ۳-۱۷: تصویر کوپن های رسوبگذاری برای آبی که از سختی گیر عبور نکرده است. تصویر بالا: مربوط به برج، تصویر پایین: مربوط به پکیج



شکل ۳-۱۸: الکتروود خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش برج خنک کن

۳-۶ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت با عبور از سختی‌گیر رزینی کاتیونی

پارامترهای اندازه‌گیری شده برای آب خرم دشت بدون عبور از سختی‌گیر رزینی در جدول ۳-۲۲ و پس از عبور از سختی‌گیر در جدول‌های ۳-۲۳ و ۳-۲۴ ذکر شده است. با مقایسه مقادیر ترکیبات در جدول‌ها به نتایج جالبی رسیده شد. زمانیکه آب از سختی‌گیر رزینی عبور می‌کند، یون‌های کلسیم و منیزیم که مسئول رسوب و سختی هستند، در شبکه‌های رزین گیر می‌افتند و بجای آنها یون‌های سدیم که قابل حل است وارد آب می‌شوند. بنابراین وقتی آب از سختی‌گیر رزینی عبور می‌کند، نباید TDS آن تغییر چندانی کند. آبی که در مدار پکیج در حال چرخش است، نسبت به آب خام دارای قلیائیت کل، یون‌های کلرید و سولفات، TDS، سختی و یون‌های کلسیم خیلی کمتری است. کاهش سختی و یون کلسیم بخاطر عبور از سختی‌گیر قابل توجه است. اما اتفاق دیگری که افتاده است رسوب سولفات کلسیم است. حلالیت سولفات کلسیم با افزایش دما کاهش می‌یابد و رسوب می‌کند. در رسوب سولفات کلسیم، یون‌های کلرید و بی‌کربنات نیز گیر افتاده‌اند و ته نشین شده‌اند. در برج خنک‌کن، غلظت همه این ترکیبات بخاطر آب جبرانی که وارد سیستم می‌شود، زیادتر شده است. بنابراین غلظت سولفات هم زیاد شده است و به سمت رسوب سولفات کلسیم رفته است. به طوری که میزان سختی در آب در مدار برج کمتر از آب در مدار پکیج شده است. جدول ۳-۲۵، میانگین خواص آب را در مدت دو ماه نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲۲: پارامترهای اندازه گیری شده از آب خام (خرم دشت) قبل از عبور از سختی گیر رزینی (غلظت ها بر حسب ppm می باشد)

قلیائیت کل	۳۰۸	۳۸۸	۳۷۸	۴۵۸	۴۲۸	۳۵۸	۵۳۸	۴۸۸
Mg ²⁺	۱۸۸	۲۲۸	۰۱۸	۲۵۸	۸۸۸	۲۰۸	۴۱۸	۶۱۸
Ca ²⁺	۳۵۱	۴۵۱	۳۲۱	۵۶۱	۷۵۱	۷۳۱	۴۱۱	۳۵۱
سختی کل	۳۸۳	۵۱۳	۳۸۸	۱۸۳	۵۷۳	۰۵۳	۶۸۳	۰۸۳
Cl ⁻	۱۵	۴۵	۶۵	۸۳	۵۵	۱۵	۶۵	۱۵
Cl ²	۳۰/۰	۲۰/۰	۳۰/۰	۲۰/۰	۵۰/۰	۳۰/۰	۲۰/۰	۲۰/۰
PO ₄ ³⁻ (LR)	۵۷/۰	۷۷/۰	۶۷/۰	۱۸/۰	۱۷/۰	۶۷/۰	۲۷/۰	۵۷/۰
SiO ₂ (HR)	۰۲	۳۲	۶۲	۶۱	۵۲	۳۲	۵۲	۱۲
SO ₄ ²⁻	۲۵۱	۶۸۱	۲۸۸	۱۸۸	۳۷۱	۵۸۸	۲۷۱	۳۸۸
O ₂	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۳
Fe ⁺³	۷/۰	۲/۰	۲/۰	۰	۲/۰	۷/۰	۲/۰	۷/۰
Fe (total)	۳/۰	۵/۰	۴/۰	۷/۰	۵/۰	۲/۰	۴/۰	۲/۰
Fe ⁺²	۴/۰	۴/۰	۷/۰	۷/۰	۴/۰	۷/۰	۷/۰	۷/۰
PH	۷/۷	۴/۷	۳/۷	۷/۷	۵/۷	۳/۷	۶/۷	۵/۷
Salt	۴۱۷	۴۱۷	۳۸۶	۳۰۶	۰۶۷	۵۱۶	۸۲۷	۲۰۶
TDS	۶۳۳۱	۴۳۳۱	۶۲۰۱	۶۳۳۱	۳۳۳۱	۴۷۳۱	۷۳۳۱	۸۳۳۱
EC (s)	۵۵۸۱	۰۵۸۱	۴۷۸۱	۱۱۷۱	۴۵۸۱	۳۵۷۱	۷۵۸۱	۶۰۷۱
T	۳۲	۶۲	۵۲	۲۲	۵۲	۳۲	۵۲	۶۲
زمان (روز)	۱۲	۳۲	۵۲	۵۲	۰۳	۵۳	۴۵	۰۶
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷



جدول ۳-۲۳: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب پکیج (سیستم گرمایشی و آب گرم مصرفی) با منبع آب خرم دشت با عبور از سختی‌گیر رزینی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خوردگی	۳/۳۱	۲/۳۱	۷/۳۱	۳/۳۱ ۱/۶۱	۱/۶۱	۵/۶۱	۵/۱۱	۳/۱۱
قلیابیت کل	۶۳۱	۰۳۱	۷۲۱	۰۶۱	۵۲۱	۵۳۱	۳۶۱	۲۳۱
Mg ²⁺	۸۳	۸۳	۱۳	۵۳	۵۳	۸۳	۵۳	۰۳
Ca ²⁺	۵۱	۷۱	۸۱	۷۱	۲۰۱	۶۱	۷۱	۲۰۱
سختی کل	۲۶	۵۶	۷۵	۳۶	۵۶	۶۵	۳۵	۶۰
Cl ⁻	۳/۲۱	۵/۱۱	۳/۱۱	۲/۶۱	۵/۲۱	۲۱	۳/۶۱	۱/۱۱
Cl ₂	۸۰/۰	۵۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰	۷۰/۰	۶۰/۰	۶۰/۰	۵۰/۰
PO ₄ ³⁻ (LR)	۵۱/۰	۸۱/۰	۳۱/۰	۸۱/۰	۶۱/۰	۳۱/۰	۶۱/۰	۱۱/۰
SiO ₂ (HR)	۵/۵۲	۷/۳۱	۵/۲۱	۵/۵۱	۳/۲۱	۷/۵۱	۵/۱۱	۳/۰۱
SO ₄ ²⁻	۵۲	۵۲	۳۶	۵۳	۷۵	۵۲	۵۲	۳۳
O ₂	۵	۶	۳	۳	۶	۵	۵	۵
Fe ⁺³	۲/۰	۱/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰
Fe(total)	۲/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe ⁺²	۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰
PH	۷/۷۷	۳/۶۷	۵/۳۷	۷/۷۷	۷/۵۷	۵/۸۷	۳/۸۷	۳/۳۷
Salt	۸۱	۷۸	۵۸	۳۷	۷۸	۵۵	۶۸	۳۷
TDS	۳/۷۵	۵۵	۷۲۱	۳۲۱	۶۲۱	۲۱۱	۵۱۱	۲۲۱
EC (μs)	۳۶۱	۵۶۱	۳۱۱	۶۰۱	۰۱۱	۶۷۱	۷۵۱	۱۱۱
T	۵۵	۵۵	۵۵	۶۵	۸۵	۸۵	۵۵	۸۵
زمان(روز)	۲	۳۱	۲۱	۵۳	۰۳	۵۳	۳۵	۶۰
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷

جدول ۳-۲۴: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب برج خنک‌کن (سیستم سرمایشی) با منبع آب خرم دشت با

عبور از سختی‌گیر رزینی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خوردگی	۶/۱۱	۳/۳۱	۵/۳۱	۱۱ ۵۱	۱/۵۱	۶/۵۱	۶/۵۱	۸/۵۱
قلیابیت ساده	۰۰۳	۵۰۳	۳۵۱	۰۱۳	۵۱۳	۰۷۸	۵۱۳	۱۰۳
قلیابیت کل	۰۰۱۰۱	۵۰۰۱	۰۸۰۱	۰۰۱۱۱	۷۵۰۱	۰۵۰۱	۶۱۱۱	۵۰۰۱
Mg ²⁺	۰۲	۶۱	۷۱	۲۱	۷۱	۷۱	۶۱	۶۱
Ca ²⁺	۵۱	۶۱	۶۱	۰۲	۰۲	۳۱	۸۱	۵۱
سختی کل	۵۳	۱۳	۸۳	۷۸	۷۸	۱۳	۶۳	۱۳
Cl ⁻	۵۶	۸۶	۸۵	۰۶	۷۶	۸۶	۵۶	۵۶
Cl ₂	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
PO ₄ ³⁻	۸۱/۰	۵/۰	۱/۰	۸۱/۰	۶/۰	۳۱/۰	۱۱/۰	۷/۰
SiO ₂	۸۵۱	۸۶۱	۶۳۱	۶۶۱	۷۸۱	۶۶۱	۵۸۱	۳۸۱
SO ₄ ²⁻	۷۳۳	۱۵۳	۶۵۳	۱۷۳	۷۸۳	۵/۳	۱۶۳	۱۸۳
O ₂	۶	۶	۵	۳	۶	۵	۵	۵
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۳/۰	۰	۱/۰	۳/۰	۱/۰	۳/۰
Fe (total)	۸۰/۰	۵۰/۰	۵۵/۰	۶۰/۰	۷۰/۰	۱۵/۰	۷/۰	۱۵/۰
Fe ⁺²	۰	۰	۵/۰	۱۱/۰	۸/۰	۳/۰	۱۱/۰	۸/۰
PH	۵/۷/۶	۳/۸/۶	۷/۶	۱/۸/۶	۵/۸/۶	۱/۷/۶	۳/۷/۶	۸/۷/۶
Salt	۰۰۱۱۳	۰۷۱۳	۰۶۷۳	۰۰۱۱۳	۰۸۳۳	۰۰۱۱۳	۰۵۳۳	۰۰۳۳
TDS	۱۵۵۵	۷۳۰۶	۷۳۷۵	۰۶۵۵	۱۱۱۶	۳۱۰۶	۱۶۱۶	۰۷۰۵
EC (μs)	۰۳۳۸	۰۶۵۸	۰۱۳۸	۰۵۳۸	۰۳۳۸	۰۳۵۸	۰۳۸۸	۰۵۸۸
T	۵۲	۵۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۱۲	۳۲
زمان(روز)	۱۲	۱۱	۶۱	۵۱	۰۳	۵۳	۳۵	۰۶
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۸	۷

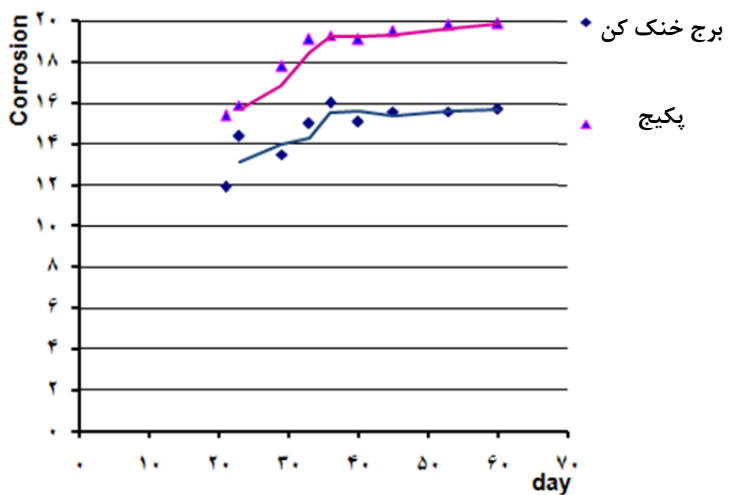


جدول ۳-۲۵: خواص آب خرم دشت بصورت متوسط با عبور از سختی‌گیر رزینی

انديس رايزنار	انديس لانجیر	pH_s	\overline{TDS}	\overline{pH}	$\overline{Ca^{+2}}$	\overline{Alk}	$\overline{T}(^{\circ}F)$	متوسط سختی کل	نوع آب
۵/۸۷	۱/۲۹	۷/۱۶	۱۳۹۳	۸/۴۵	۱۵۲	۳۴۹	۷۶	۴۴۸	آب خام
۷	۰/۸۳	۷/۸۴	۱۱۶	۸/۶۸	۱۸/۵	۱۴۰	۱۳۳	۶۰/۳	آب درون پکیج
۵/۲۸	۲/۲۵	۷/۵۳	۵۹۰۲	۹/۷۸	۲۵	۱۰۸۰	۷۵	۴۲	آب درون برج خنک کن

* خواص آب خام قبل از عبور از سختی‌گیر می باشد.

انديس لانجیر برای آب درون پکیج، نشان‌دهنده خوردگی و رسوب‌دهنده بودن کم است و انديس رايزنار، خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. همچنین انديس لانجیر برای آب درون برج خنک‌کن، نشان‌دهنده رسوب سنگین و انديس رايزنار، رسوب سبک را پیش‌بینی می‌کند. همانطور که از نمودار خوردگی در شکل ۳-۱۹ مشخص است، بخاطر پایین بودن سختی در پکیج و برج، مقدار خوردگی زیاد است و ابتدا سیر صعودی و سپس ثابت شده است. انديس‌های پیش‌بینی رسوب، تشکیل رسوب خیلی بیشتری را برای برج نسبت به پکیج پیش‌بینی می‌کند که البته این اتفاق افتاده است. اما بدلیل بالاتر بودن TDS، نرخ خوردگی در برج بیشتر بوده و خوردگی زیر رسوبی در برج رخ داده است. آثار خوردگی روی کویل‌ها و الکترودهای خوردگی کار گذاشته شده در مسیر پکیج و برج (شکل‌های ۳-۲۰ و ۳-۲۱) به خوبی قابل مشاهده است. همه خوردگی‌ها از نوع هماتیت یا همان آلفا فریک اکسید ($\alpha - Fe_2O_3$) آجری رنگی می‌باشد.



شکل ۳-۱۹: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک کن زمانیکه آب از سختی گیر رزینی عبور می کند.



شکل ۳-۲۰: تصویر کوپن‌های رسوب گذاری برای آب با عبور از سختی گیر رزینی بعد از دو ماه. به ترتیب از سمت راست (۱: برج، ۲: آب گرم مصرفی، ۳: ورودی، ۴: پکیج)



شکل ۳-۲۱: الکتروود خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش پکیج (تصویر سمت چپ)، برج خنک کن (تصویر سمت راست).

۳-۳-۷ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت با عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس

برای تست سختی‌گیر RO برای آب با TDS بالا، بطور استثناء سختی و TDS بالاتری برای آب در نظر گرفته شد. چرا که عمدتاً برای سختی‌های بالا، بهترین گزینه برای نرم کردن آب استفاده از سختی‌گیر RO می‌باشد. پارامترهای اندازه‌گیری شده برای این آب قبل از عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس (RO)، در جدول ۳-۲۶ و پس از عبور از سختی‌گیر، در جدول‌های ۳-۲۷ و ۳-۲۸ ذکر شده است. جدول ۳-۲۹، میانگین خواص آب قنات با عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس را در مدت دو ماه نشان می‌دهد. نمودار نرخ خوردگی بر حسب زمان در سیستم گرمایشی برای آب در حال چرخش و عبور درون پکیج و سرمایشی برای آب در حال چرخش و عبور در برج خنک‌کن در شکل ۳-۲۹ رسم شده است.

جدول ۳-۲۶: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خام (خرمدشت) قبل از عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

قلبایت کل	۲۱۵	۸۷۰	۲۱۰	۲۱۵	۷۵۱	۲۱۱	۲۱۱	۳۶۱
Mg ²⁺	۰۰۶	۸۶۵	۲۰۳	۵۶۵	۲۶۵	۰۰۶	۰۰۶	۶۶۵
Ca ²⁺	۰۵۰	۷۳۸	۶۵۸	۲۵۸	۰۶۸	۸۸۸	۵۶۸	۵۵۸
سختی کل	۳۵۰	۵۳۸۱	۱۳۸۱	۸۳۸۱	۱۵۳۸۱	۸۳۸۱	۵۶۳۸۱	۳۵۳۸۱
Cl ⁻	۶۵	۸۵	۵۵	۰۶	۷۵	۸۵	۵۵	۵۵
Cl ₂	۸/۸	۵/۸	۷/۸	۳/۸	۶/۸	۷/۸	۸/۸	۵/۸
PO ₄ ³⁻	۳/۰	۵/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰
SiO ₂	۲۱	۲۱۱	۲۱	۲۱	۷۲۱	۲۱۱	۲۱۱	۲۱۱
SO ₄ ²⁻	۶۲۶	۳۵۶	۶۳۶	۷۲۶	۷۲۶	۳۳۶	۳۳۶	۵۳۶
O ₂	۷/۵	۸/۵	۶/۵	۵/۵	۶/۵	۶/۵	۳/۵	۸/۵
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe کل	۲/۰	۲/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۱/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰
PH	۷/۷	۸/۷	۸/۷	۸/۷	۷/۷	۶/۷	۷/۷	۵/۷
Salt	۰۰۳۳	۰۰۳۳	۰۰۳۳	۰۰۳۳	۰۰۳۳	۰۰۳۳	۰۰۳۳	۰۰۳۳
TDS	۱۱۱۶	۶۱۱۶	۷۳۷۵	۰۰۲۶	۱۱۱۶	۳۰۱۶	۱۶۳۶	۰۷۷۵
EC	۰۳۶۸	۰۷۷۸	۰۱۶۸	۰۵۸۸	۰۳۶۸	۰۳۶۸	۰۳۸۸	۰۵۳۸
T	۳۱	۷۱	۳۱	۶۱	۶۱	۵۱	۶۱	۳۱
زمان (روز)	۵۱	۲۱	۶۱	۶۳	۱۳	۷۳	۳۵	۰۶
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۷

فصل سوم - روش انجام و نتایج طرح ... / ۷۱

جدول ۳-۲۸: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خرم‌دشت درون برج خنک‌کن (سیستم سرمایشی) با عبور

از سختی‌گیر اسمز معکوس (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خوردگی	۹/۵۳	۳۳/۰۱	۵۸/۰۱	۷۷/۱۱	۳۲/۱۱	۷۷/۱۱	۶۲/۱۱	۳۷/۱۱	۵/۲۱	۶۱/۳۱	۳۷/۳۱	۳۶/۳۱	۳۱/۳۱
قلیابیت کل	۰۵۶	۰۳۶	۰۳۶		۰۸۸			۰۵۷	۷۲۵	۰۵۶	۰۴۵	۰۴۵	۳۶۰۱
Mg ²⁺	۰۰۲	۵۳۲	۵۳۲		۲۱۲			۰۰۲	۲۵۲	۵۱۲	۲۷۲	۲۷۲	۰۷۲
Ca ²⁺	۰۲۱	۵۳۲	۵۳۲		۶۲۲			۲۵۲	۰۲۲	۵۲۲	۶۲۲	۶۲۲	۰۳۲
سختی کل	۰۲۳	۳۶۳	۳۶۳		۱۳۰			۸۵۵	۲۵۶	۳۳۶	۷۰۸	۷۰۸	۰۲۸
Cl ⁻	۶۶	۸۶	۸۶		۵۶			۰۶	۷۶	۲۸	۵۸	۵۸	۵۸
Cl ₂	۳	۳	۳		۳			۳	۵	۶	۶	۶	۶
PO ₄ ³⁻	۲/۰	۳/۰	۳/۰		۳/۰			۳/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۵/۰	۶/۰
SiO ₂	۲۲	۲۲	۲۲		۳۲			۰۳	۵۳	۰۶	۷۵	۷۵	۲۶
SO ₄ ²⁻	۶۲۱	۳۲۱	۳۲۱		۶۲۱			۵۲۱	۷۲۱	۲۲۱	۲۳۲	۲۳۲	۵۲۱
O ₂	۷	۵	۵		۷			۵	۵	۷	۷	۷	۵
Fe ³⁺	۱۲/۰	۱۲/۰	۱۲/۰		۵۷/۰			۳/۰	۲۲/۰	۶۷/۰	۲۲/۰	۲۲/۰	۷۷/۰
کل Fe	۲۲/۰	۲۲/۰	۲۲/۰		۲۲/۰			۲۲/۰	۲۲/۰	۲۲/۰	۲۲/۰	۲۲/۰	۲۲/۰
Fe ²⁺	۲/۰	۲/۰	۲/۰		۲/۰			۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
PH	۸/۷	۸/۷	۸/۷		۸/۸			۸/۷	۸/۷	۳/۵	۸/۵	۸/۵	۸/۵
Salt	۰۰۳۲	۰۰۷۲	۰۰۷۲		۰۰۵۳			۰۰۲۳	۰۰۳۵	۰۰۲۵	۰۰۳۶	۰۰۳۶	۰۰۲۶
TDS	۷۳۲۶	۳۳۵۶	۳۳۵۶		۷۳۲۶			۰۲۶۶	۵۲۱۸	۳۰۲۸	۲۵۸۸	۲۵۸۸	۰۲۱۷
EC	۰۱۷۸	۰۷۱۷	۰۷۱۷		۰۲۸۷			۰۵۶۷	۰۳۶۷	۰۲۱۵	۰۳۸۵	۰۳۸۵	۰۵۱۰۱
T	۲۲	۲۰	۲۰		۲۰			۲۰	۲۰	۲۲	۲۲	۲۲	۲۰
زمان (روز)	۵۱	۲۲	۲۲		۵۲			۶۲	۱۳	۷۳	۳۵	۳۵	۰۶
ردیف	۱	۲	۲		۳			۳	۵	۶	۸	۸	۷



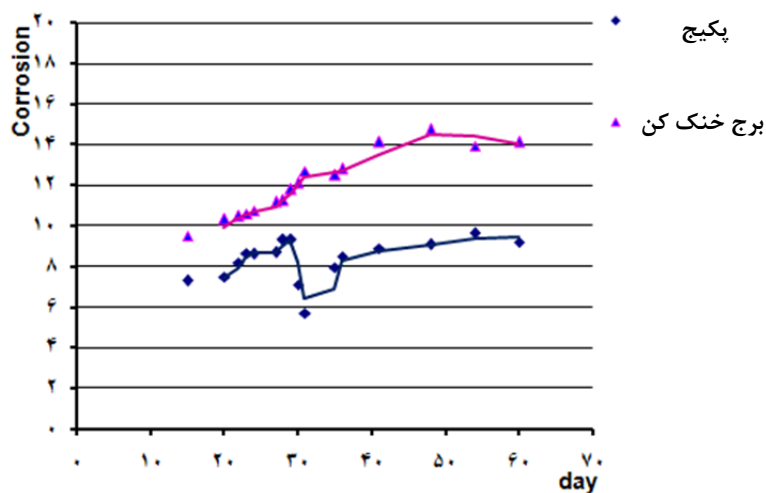
جدول ۳-۲۹: خواص آب خرم‌دشت بصورت متوسط با عبور از سختی‌گیر اسمز معکوس

انديس رايژنار	انديس لانجیر	pH_s	TDS	pH	Ca^{+2}	Alk	$\bar{T}(^{\circ}F)$	متوسط سختی کل	نوع آب
۲/۹	۲/۷	۵/۸	۶۰۸۳	۸/۷	۷۵۸	۲۱۶۴	۵۹	۱۳۵۶	آب خام
۵/۵۸	۱/۶۶	۷/۲۴	۱۷۹۴	۸/۹	۵۷	۲۳۶	۱۳۴	۱۰۲	آب درون پکیج
۴/۲	۲/۴۴	۶/۶۵	۷۰۹۱	۹/۱	۲۸۸	۸۵۰	۷۰	۵۹۳	آب درون برج خنک کن

* خواص آب خام قبل از عبور از سختی‌گیر می‌باشد.

انديس های لانجیر و رايژنار برای آب درون پکیج رسوب سبک و برای آب درون برج خنک کن، رسوب سنگین را پیش‌بینی می‌کند. بر روی کویل‌ها و الکترودهای خوردگی در مدار برج، رسوب زیادی نشسته است، اما در اثر خوردگی زیر رسوبی که یکی از دلایل آن در اینجا بالا رفتن قلیائیت موضعی (افزایش غلظت یون‌های کربنات و هیدروکسید) می‌باشد، در مدت دو ماه رسوب، از زیر متلاشی شده که در شکل‌های ۳-۲۳ و ۳-۲۴ کاملاً مشهود است.

نرخ خوردگی در پکیج ابتدا سیر صعودی، سپس یک کاهش، و دوباره مقدار آن بالا می‌رود و ثابت می‌شود. خوردگی در پکیج از نوع مگنتیت سیاه رنگ ($\gamma - Fe_2O_3$) بوده که خود یک لایه محافظتی است و مانع از خوردگی‌های بعدی می‌شود. این اکسید در درجه حرارت‌های بالا و شرایط مناسب تشکیل می‌شود. این مساله در عکس‌های مربوط به کویل رسوبگذاری و الکتروود خوردگی در مسیر آب پکیج مشخص است. (شکل‌های ۳-۲۳ و ۳-۲۴). در هر صورت خوردگی زیاد اولیه بخاطر TDS بالاست. خوردگی در مسیرهای دیگر از نوع هماتیت یا همان آلفا فریک اکسید ($\alpha - Fe_2O_3$) می‌باشد. خوردگی در برج خنک‌کن با یک شیب ثابت در حال افزایش و مقدار آن به حدی است که باعث تخریب رسوب تشکیل شده بر روی آن شده است (شکل ۳-۲۳).



شکل ۳-۲۲: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک کن زمانیکه آب از سختی گیر اسمز معکوس عبور می کند.



شکل ۳-۲۳: تصویر کوپن‌های رسوبگذاری برای آب نرم شده توسط سختی گیر اسمز معکوس (RO). به ترتیب از راست به چپ (۱: برج ، ۲: پکیج ، ۳: آب گرم مصرفی ، ۴: ورودی)



شکل ۳-۲۴: الکتروود خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش پکیج (تصویر سمت چپ)، برج خنک‌کن (تصویر سمت راست).

۳-۳-۸ نتایج آزمون‌ها برای آب خرم‌دشت با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی

پارامترهای اندازه‌گیری شده برای آب خرم‌دشت قبل از سختی‌گیر الکترومغناطیسی در جدول ۳-۳۰ و پس از عبور از سختی‌گیر در جدول‌های ۳-۳۱ و ۳-۳۲ ذکر شده است. جدول ۳-۳۳ میانگین خواص آب را در مدت دو ماه نشان می‌دهد. در آب درون پکیج یون کلرید شناسایی نشد، در آب درون برج هم مقدار آن کمتر از آب خام است، در حالیکه بخاطر تجمع یون‌ها باید بیشتر باشد. ظاهراً امواج الکترومغناطیس بر یون‌های کلرید اثر گذاشته و غلظت کلرید قابل شناسایی با دستگاه کم شده است. از طرفی با افزایش pH و قلیائیت، فسفات با کلسیم و منیزیم رسوب می‌کند که در حین رسوب با سولفات و سیلیس کمپلکس می‌دهد و آنها نیز ته‌نشین می‌شوند. مقدار سولفات و سیلیس در برج کم شده است، در عوض رسوب زیادی در برج نشست کرده است.

جدول ۳-۳۰: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خام (خرمدشت) قبل از عبور از سختی گیر
الکترومغناطیسی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

قلیابیت کل	۰.۲۵	۰.۶۳	۰.۷۳	۰.۲۵	۰.۷۳	۸.۸۵	۰.۳۵
Mg ²⁺	۸۷۱	۵۸۱	۱۲۱	۶۸۱	۸۶۱	۸۸۱	۷۷۱
Ca ²⁺	۵۰.۳	۷۶.۲	۳۲.۳	۷۸.۳	۳۰.۳	۲۱.۳	۱۳.۳
سختی کل	۱.۶۳	۳.۸۳	۵.۷۳	۸.۰۵	۱.۶۳	۶.۷۳	۰.۳۵
Cl ⁻	۳.۸	۰.۸	۳.۸	۳.۸	۸.۸	۳.۸	۱.۸
Cl ₂	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
PO ₄ ⁻³ (LR)	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
SiO ₂ (HR)	۶.۳	۶.۳	۵.۳	۶.۳	۴.۳	۷.۳	۷.۳
SO ₄ ²⁻	۱۰.۳	۱۱.۳	۵.۳	۰.۶۳	۵.۷۳	۵.۱۳	۵.۰۳
O ₂	۱	۱	۵	۱	۱	۵	۱
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe (total)	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe ⁺²	۰	۰	۱/۰	۰	۰	۰	۰
PH	۶.۷	۶.۷	۵.۷	۶.۷	۶.۷	۶.۷	۶.۷
Salt)	۰.۰۷۱	۰.۰۵۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۱
TDS	۳۳.۸۱	۷۸.۸۱	۳۳.۸۱	۰.۷۷۸	۰.۷۳۱	۰.۰۷۸	۰.۰۷۸
EC (μs)	۰.۳۳۳	۰.۱۶۱	۰.۳۵۱	۰.۰۶۳	۰.۰۱۳	۰.۰۵۱	۰.۰۰۵
T	۱.۸	۱.۸	۱.۸	۱.۸	۰.۲	۱.۸	۵.۱
زمان (روز)	۸۱	۳۸	۷۸	۸۳	۳۸	۴۳	۸۳
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸

جدول ۳-۳۱: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خردمشت درون پکیج (سیستم گرمایشی و آب گرم مصرفی) با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خوردگی	۷/۵	۸/۷	۸/۷	۸/۷	۸/۷	۸/۷	۸/۷	۸/۷
قلیائیت کل	۶۳۰	۶۳۰	۷۵۴	۸۱۳	۷۵۴	۶۳۴	۶۳۴	۶۳۴
Mg ²⁺	۸۱	۸۳۴	۶۲	۸۱۳	۸۱۳	۱۵۱	۸۱۳	۸۱۳
Ca ²⁺	۶۰	۶۳	۶۲	۸۱	۵۶	۱۶	۸	۸
سختی کل	۳۳۳	۸۳	۷۸۳	۵۳۳	۶۳۳	۸۱۳	۷۳۳	۷۳۳
Cl ⁻	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
Cl ₂	۰	۱/۰	۰	۱/۰	۳/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
PO ₄ ³⁻	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۲/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۱	۳/۱
SiO ₂ (HR)	۷۳	۷۳	۸۳	۶۳	۶۳	۷۳	۶۳	۶۳
SO ₄ ²⁻	۸۱۷	۳۸۷	۶۲۷	۸۱۷	۸۱۷	۶۲۷	۶۲۷	۶۲۷
O ₂	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۰	۰	۱/۰	۰	۰	۰
Fe(total)	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰
PH	۶/۷	۶/۷	۶/۷	۶	۶/۷	۷/۶/۷	۶	۶
Salt	۰/۵۸۱	۰/۳۸۱	۰/۳۷۱	۰/۳۸۱	۰/۰/۸۱	۰/۵۸۱	۰/۳۷۱	۰/۳۷۱
TDS	۶۵۶.۳	۰/۳۶.۳	۰/۳۶.۳	۰/۳۸.۳	۰/۳۶.۳	۰/۳۶.۳	۰/۳۸.۳	۰/۳۸.۳
EC (μs)	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۰/۳۳۳	۰/۰/۳۳	۰/۰/۳۳۳	۰/۰/۳۳۳	۰/۰/۳۳	۰/۰/۳۳
T	۳۵	۳۵	۳۵	۷۵	۵۵	۷۵	۷۵	۷۵
زمان(روز)	۸۱	۳۱	۷۸	۳۳	۳۳	۳۳	۸۳	۸۳
ردیف	۱	۲	۳	۳	۵	۶	۸	۸

جدول ۳-۳۲: پارامترهای اندازه‌گیری شده از آب خرم‌دشت درون برج خنک‌کن (سیستم سرمایشی) با عبور از سختی گیر الکترومغناطیسی (غلظت‌ها بر حسب ppm می‌باشد)

خوردگی	۱/۴	۳/۴	۲/۸	۱/۸	۲/۳	۳/۳	۲/۲	۳/۴
قلیابیت ساده	۲۱	۰۰	۵۱	۷۸	۵۰	۵۸	۲۰	۲۰
قلیابیت کل	۵۵	۰۰	۵۵	۰۲	۰۸	۰۶	۲۵	۲۵
Mg ²⁺	۵۰۳	۰۳۵	۵۵۵	۳۶۳	۶۷۵	۳۶۳	۲۰	۲۰
Ca ²⁺	۱۵	۰۷۵	۵۵	۳۲۵	۶۲۵	۱۷۵	۵۰	۵۰
سختی کل	۵۱۶	۰۱۱	۵۰۱	۸۷۶	۵۱۱	۳۳۶	۲۰	۲۰
Cl ⁻	۳۵	۵۵	۳۵	۵۵	۷۵	۲۵	۶۵	۶۵
Cl ₂	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۲/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
PO ₄ ³⁻	۶۱/۰	۶۱/۰	۳۱/۰	۸۱/۰	۶۱/۰	۵۱/۰	۶۱/۰	۶۱/۰
SiO ₂	۶۱/۸	۳۷/۸	۸۱	۸۷/۸	۶۷/۸	۷۷/۸	۵۷/۸	۵۷/۸
SO ₄ ²⁻	۲۵	۶۷	۲۵	۲۵	۳۶	۶۵	۲۶	۲۶
O ₂	۵	۳	۵	۵	۵	۵	۵	۵
Fe ⁺³	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe (total)	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
Fe ⁺²	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۰	۱/۰
PH	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۵/۶	۳/۶	۳/۶
Salt	۰۰۷۵	۰۰۷۶	۰۰۷۵	۰۰۲۶	۰۰۲۶	۰۰۳۸	۶۵	۶۵
TDS	۹۹	۰۳۰	۰۱۰	۰۱۷	۰۰۶	۰۳۰	۹۳	۹۳
EC (μs)	۹۹۵۰	۰۰۷۸	۰۰۳۳	۰۰۶۰	۰۰۱۱	۰۰۱۱	۰۰۷۰	۰۰۷۰
T	۶۱	۲	۶۱	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
زمان(روز)	۸۱	۲۴	۲۸	۳۲	۳۳	۳۳	۴۳	۴۳
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸

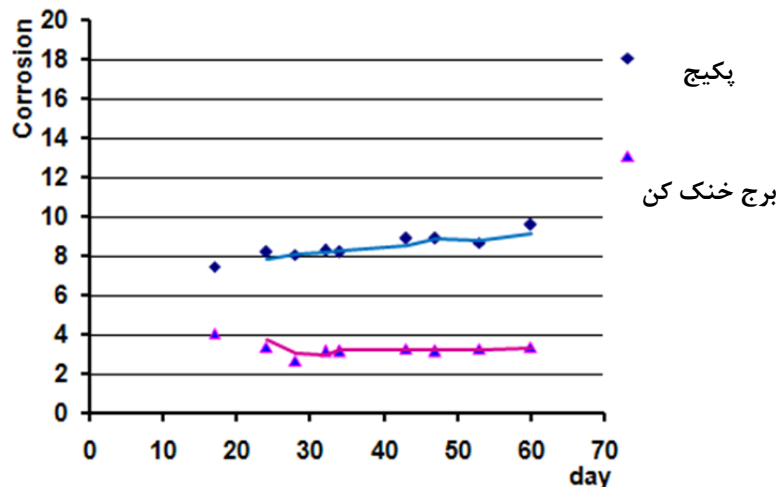


جدول ۳-۳: خواص آب خرم‌دشت بصورت متوسط با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیسی

نوع آب	متوسط سختی کل	$\bar{T}(^{\circ}F)$	\overline{Alk}	$\overline{Ca^{+2}}$	\overline{pH}	\overline{TDS}	pH_s	اندیس لانه‌جیر	اندیس رایزنار
آب خام	۴۲۶	۶۹	۴۹۶	۳۱۶	۸/۵۹	۲۶۲۵	۶/۸۲	۱/۷۷	۵/۱۱
آب درون پکیج	۳۲۶	۱۳۲	۳۵۷	۶۶	۷/۷	۲۶۶۵	۷/۰۳	۰/۶۶	۶/۳۶
آب درون برج خنک‌کن	۱۰۴۰	۶۸	۶۲۹	۵۳۸	۹/۳۷	۱۰۰۶۵	۶/۵۵	۲/۸۱	۳/۷۳

* خواص آب خام قبل از عبور از سختی‌گیر می‌باشد.

آب درون پکیج، دارای خصلت تشکیل رسوب کم یا خورنده بودن است. همانطور که در نمودار ۴-۲۵ مشخص است، نرخ خوردگی در پکیج با یک شیب کم در حال افزایش است. خوردگی‌ها از نوع هماتیت یا همان آلفا فریک اکسید ($\alpha - Fe_2O_3$) آجری رنگ می‌باشد (شکل ۳-۲۶)



شکل ۳-۲۵: نمودار خوردگی (mpy) بر حسب روز در پکیج و برج خنک‌کن زمانیکه آب از سختی‌گیر الکترومغناطیس عبور می‌کند.

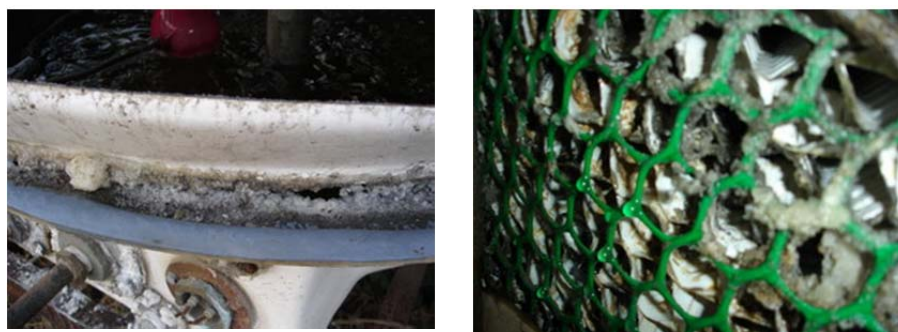
آب درون برج خنک‌کن به شدت رسوبگذار است و بخاطر رسوب سخت و یکنواخت، بدون خلل و فرج، خوردگی در آن کم و نرخ خوردگی هم ثابت و پایین بوده است. شکل ۳-۲۸ رسوب تشکیل شده در برج را نشان می‌دهد که مقدار آن قابل توجه است.



شکل ۳-۲۶: تصویر کوپن‌های رسوبگذاری برای آب نرم شده توسط سختی‌گیر الکترومغناطیسی. به ترتیب از راست به چپ (۱: پکیج، ۲: ورودی، ۳: برج خنک‌کن)



شکل ۳-۲۷: الکتروود خوردگی در مسیر بسته و در حال چرخش پکیج (تصویر سمت راست)، برج خنک‌کن (تصویر سمت چپ).



شکل ۳-۲۸: تصویر رسوب ایجاد شده در جداره‌ها و قسمت تقطیر برج خنک‌کن زمانیکه از آب خرم‌دشت و با عبور از سختی‌گیر الکترومغناطیس استفاده شده است.

فصل چهارم

جمع‌بندی و بررسی نتایج

۴ جمع‌بندی و بررسی نتایج

زمانیکه آب گرم یا تبخیر می‌شود، تشکیل رسوب غیر محلول باعث مشکلات جدی در تاسیسات ساختمانی می‌شود. اگر چه رسوب تشکیل پوشش محافظی می‌دهد که باعث کاهش خوردگی می‌شود، اما ضریب انتقال حرارت و ظرفیت در تاسیسات را کاهش می‌دهد. متداولترین رسوبی که در تاسیسات بوجود می‌آید، کربنات کلسیم است، اگر چه مقادیر کمی از کربنات منیزیم و سولفات کلسیم هم وجود دارد. همچنین آبهای حاوی میزان آهن بالا باعث رسوب اکسید آهن می‌شوند.

کربنات و سولفات کلسیم دو ماده محلول در آب هستند که حلالیت آنها با افزایش دما کاهش می‌یابد. حلالیت سولفات کلسیم در آب بالاست و تنها در مواردی که میزان سولفات بالاست می‌تواند مساله ساز باشد. فاکتورهای مهم در رسوب کربنات کلسیم موارد زیر می‌باشد:

۱- قلیائیت متیل اورانژ بالا

۲- میزان کربنات کلسیم بالا

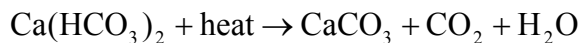
۳- pH بالا

۴- دمای بالا



۵- میزان بالای مواد جامد (TDS)

قلیابیت متیل اورانژ معیار خوبی از میزان بی‌کربنات کلسیم در آب است. کربنات کلسیم از تجزیه بی‌کربنات کلسیم مطابق واکنش زیر حاصل می‌شود:



کربنات کلسیم معمولاً جزء اصلی رسوب در سطوح انتقال حرارت در سیستم‌های سردکننده آبی است. رسوبی که تحت شرایط دمایی معتدل (۱۳۰-۵۰°F) تشکیل می‌شود بخاطر تبدیل بی‌کربنات به کربنات کلسیم در حضور گرماست.

pH تاثیر قابل توجهی در میزان حلالیت کربنات کلسیم دارد. با کاهش pH (اسیدی شدن محیط) حلالیت کربنات کلسیم افزایش پیدا می‌کند و به بی‌کربنات کلسیم تبدیل می‌شود. بی‌کربنات کلسیم چندین برابر محلول‌تر از کربنات کلسیم است. میزان مواد جامد بالا میزان رسوب را افزایش می‌دهد، اما تاثیر آن زیاد نیست. آبهایی که رسوب کمی تولید می‌کنند می‌توانند خورنده باشند، در حالیکه آبهایی که رسوب سنگین تولید می‌کنند کمتر خورنده هستند. یکی از راه‌های پیش‌بینی تمایل به رسوبگذاری یا خوردگی آبهای طبیعی، اندیس لانجیر می‌باشد:

انديس اشباع لانجیر	خاصیت آب
+۲/۰	رسوبگذار و غیر خورنده. آب با $I_s = +۲$ از نظر تئوری ۳۳ برابر رسوبگذارتر از $I_s = +۰/۵$ است. حتی اگر این مقدار بطور عددی درست نباشد، در هر صورت این آب رسوب سنگینی ایجاد می‌کند.
+۰/۵	به کم خورنده و رسوب‌دهنده
صفر	آب حالت تعادلی دارد. تمایلی به تشکیل رسوب ندارد. اما به کم خورنده است.
-۰/۵	به کم خورنده بدون تشکیل رسوب. اگر رسوبی وجود داشته باشد، آنرا حل خواهد کرد.
-۲/۰	بسیار خورنده

اندیس رایزنار روش دیگری برای پیش‌بینی خاصیت آب است که این روش مکمل اندیس اشباع لانجیر است:

خاصیت آب	اندیس اشباع رایزنار
رسوب سنگین	۴/۰ - ۵/۰
رسوب سبک	۵/۰ - ۶/۰
رسوب کم یا خورنده	۶/۰ - ۷/۰
خورنده	۷/۰ - ۷/۵
قابل توجه خورنده	۷/۵ - ۹/۰
شدیدا خورنده	> ۹/۰

اگر چه فاکتورهای زیادی برای خوردگی در سیستم‌های خنک‌کننده است، اکسیژن محلول در آب خنک‌کننده فاکتور اصلی خوردگی است. واکنش اکسیژن با آهن با دما افزایش می‌یابد. عوامل زیر در خوردگی موثرند:

- ۱- میزان اکسیژن محلول
- ۲- دما
- ۳- میزان دی‌اکسید کربن
- ۴- pH
- ۵- مواد جامد محلول
- ۶- مواد جامد سوسپانسیون
- ۷- سرعت جریان

آب خنثی (pH=7) اشباع با هوا نسبت به آب بدون هوا سه برابر بیشتر برای آهن خورنده است. آب گرم حاوی اکسیژن نسبت به آب سرد سه تا چهار برابر بیشتر باعث خوردگی آهن می‌شود.

در سیستم‌های گردشی باز مانند برج خنک‌کن بیشترین خوردگی بخاطر جذب ناخالصی‌های اسیدی از هواست.



بیشتر آبهای طبیعی شامل مواد محلول مانند دی‌اکسید کربن، اکسیژن، کلریدها و سولفات‌ها هستند که باعث خوردگی فلزات می‌شوند. مواد جامد محلول مخصوصاً کلریدها و سولفات‌ها، اثر خوردگی اکسیژن و کربن دی‌اکسید را تشدید می‌کنند. آب حاوی مواد جامد بیشتر هدایت الکتریکی بالاتر و در نتیجه خوردگی بیشتری را به همراه دارد. افزایش در سرعت فلو عموماً خوردگی را افزایش می‌دهد.

در زیر نتایج بدست آمده در سیستم‌های مختلف برای مقایسه کنار هم آورده شده است. این نتایج در شرایط آب و هوایی تهران طی دو سال و با تجهیزاتی که در گزارش ذکر شده است، بدست آمده است. در ابتدا آبهای قنات و خرمدشت به عنوان آب تغذیه در پکیج و برج خنک‌کن در هر سیستم بطور جداگانه مقایسه شده است. سپس تصاویر کوپن‌ها و الکترودهای خوردگی در مدار پکیج و برج خنک‌کن برای مقایسه در شکل-۴-۵ و ۴-۶ در کنار هم آورده شده است. در نهایت نمودارهای خوردگی برای آبهای قنات و خرمدشت بطور جداگانه برای پکیج و برج خنک‌کن بطور مقایسه در شکل‌های ۴-۷ تا ۴-۱۰ رسم شده است.

۴-۱ استفاده از آب بدون سختی‌گیر در تاسیسات

زمانیکه از آبهای قنات و خرمدشت به عنوان آب تغذیه در پکیج و برج خنک‌کن بدون سختی‌گیر با خواص زیر استفاده شد، محاسبات لانه‌جیر و رایزنار برای آب درون پکیج و برج خنک‌کن به صورت زیر است. نرخ خوردگی بصورت مقایسه‌ای در شکل ۴-۱ و تصویر کوپن‌ها و الکترودهای خوردگی در مسیر پکیج و برج خنک‌کن در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

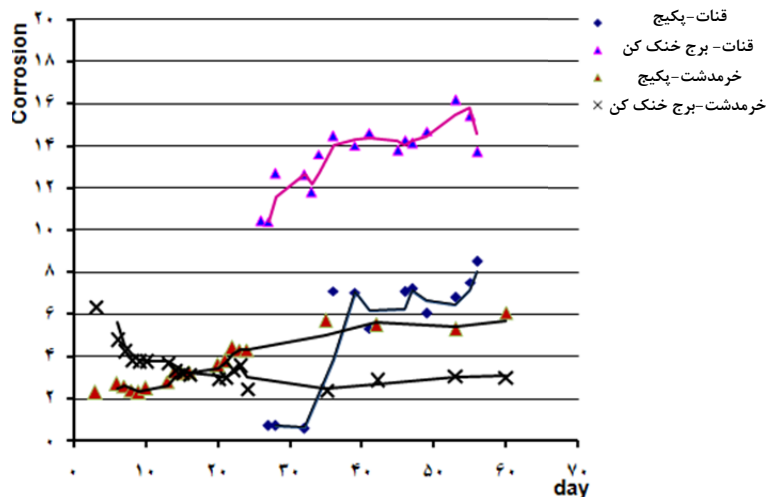
pH	TDS	متوسط سختی کل	
۹	۶۴۳	۱۲۲	آب قنات :
۸/۶۵	۱۴۵۶	۴۵۱	آب خرمدشت :

توضیحات	اندیس راینار	اندیس لانجیر	
هر دو اندیس رسوبگذاری کم و یا خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. رسوب تشکیل نشده، خوردگی یکنواخت از نوع $\gamma - Fe_2O_3$ را نشان می‌دهد. نرخ خوردگی متوسط و پس از چند روز ثابت شده است.	۶	۱/۴۷	آب قنات درون پکیج
هر دو اندیس رسوبگذاری زیاد را پیش‌بینی می‌کند، بگونه‌ای که از همه رسوبگذارتر باشد. رسوب زیاد تشکیل شده است، اما بدلیل تشکیل خوردگی زیر رسوبی، نرخ خوردگی نسبت به بقیه بالاتر است.	۳/۷۲	۳/۲۳	آب قنات درون برج خنک‌کن
هر دو اندیس رسوبگذاری زیاد را پیش‌بینی می‌کند. در آن تا حدودی رسوب تشکیل شد. خوردگی هم از نوع $\gamma - Fe_2O_3$ است که نرخ خوردگی را کاهش می‌دهد.	۴/۷۷	۱/۹۶	آب خرم‌دشت درون پکیج
اندیس‌ها رسوبگذاری زیاد را پیش‌بینی می‌کند. رسوب زیاد و سخت مانع از خوردگی شده و نرخ خوردگی نسبت به بقیه پایین‌تر است.	۴/۴۷	۲/۳۳	آب خرم‌دشت درون برج خنک‌کن

با توجه به اندیس‌ها، آب قنات در پکیج نسبت به برج خورنده‌تر است. اما بخاطر نوع خوردگی $\gamma - Fe_2O_3$ که به عنوان محافظ در برابر خوردگی‌های بعدی می‌شود، نرخ خوردگی آن بسیار کمتر بوده است و پس از ۳۵ روز تقریباً ثابت شده است.

آب درون برج خنک‌کن نسبت به آب درون پکیج در هر حالت رسوبگذارتر است که این امر بخاطر تبخیر زیاد آب در برج و جبران آب از منبع ذخیره می‌باشد که تجمع یون‌ها و سخت‌تر شدن آب را نتیجه می‌دهد. در آب قنات، رسوب تشکیل شده، اما بخاطر بوجود آمدن خوردگی از نوع زیر رسوبی، فرایند خوردگی شدیدتر شده و بنابراین نرخ خوردگی از همه موارد بالاتر است. خوردگی زیر رسوبی بخاطر غیریکنواخت بودن رسوب و خلل و فرج‌های موجود بوجود می‌آید. در کل در برج خنک‌کن به دلیل فرایند تقطیر آب و زیادتر شدن سطح مقطع آب، جذب گازها از جمله اکسیژن، دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید سولفات، ... بیشتر شده و خوردگی افزایش

می‌یابد. اما در آب خرم‌دشت بدلیل تشکیل رسوب زیاد و سخت و یکنواخت، مانع از خوردگی شده است.



شکل ۴-۱: نرخ خوردگی (mpy) در پکیج و برج خنک‌کن برای آب‌های قنات و خرم‌دشت زمانیکه از سختی‌گیر استفاده نشده است.

۴-۲ استفاده از آب نرم شده توسط سختی‌گیر رزینی در تاسیسات

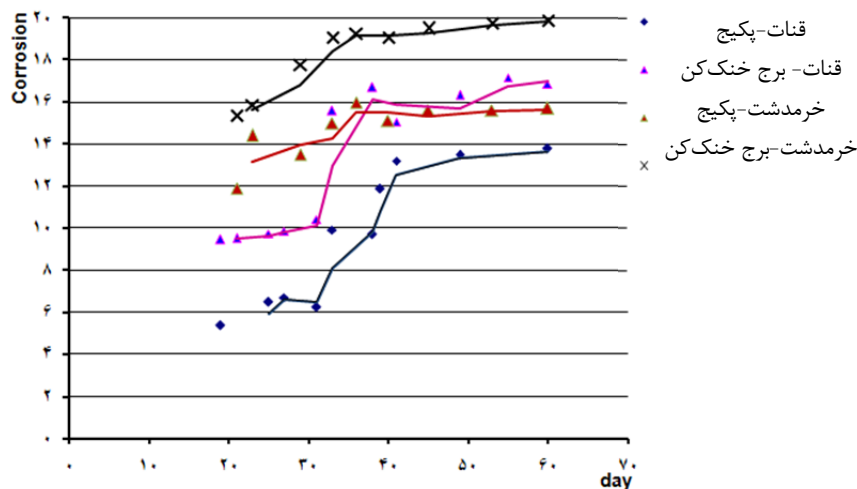
زمانیکه از سختی‌گیر رزینی کاتیونی برای آب‌های قنات و خرم‌دشت به عنوان آب تغذیه در پکیج و برج خنک‌کن با متوسط‌های زیر استفاده شد، نتایج پیش‌بینی لانسجیر و رایزنار برای آب درون پکیج و برج خنک‌کن به صورت زیر است. نرخ خوردگی بصورت مقایسه‌ای در شکل ۴-۲ و تصویر کوپن‌ها در مسیر پکیج و برج خنک‌کن در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

pH	TDS	متوسط سختی کل	
۸/۶	۶۰۵	۱۲۱	آب قنات :
۸/۴۵	۱۳۹۳	۴۴۸	آب خرم‌دشت :

توضیحات	اندیس راینار	اندیس لانجیر	
اندیس لانجیر رسوبگذاری کم و یا خوردگی، و اندیس راینار خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. خوردگی زیاد، از نوع $\alpha-Fe_2O_3$ و بصورت یکنواخت می‌باشد نرخ خوردگی با شیب تند بالا رفته و بعد از ۴۰ روز تقریباً ثابت شده است.	۷/۲	۰/۸۵	آب قنات درون پکیج
اندیس لانجیر رسوبگذاری زیاد و اندیس راینار رسوبگذاری کم را پیش‌بینی می‌کند. اما بدلیل سختی پایین، خوردگی بسیار زیاد و از نوع $\alpha-Fe_2O_3$ بوده و رسوبی از کربنات کلسیم و ... تشکیل نشده است. نرخ خوردگی با شیب تند بالا رفته و بعد از ۴۰ روز تقریباً ثابت شده است.	۵/۵	۲/۱۴	آب قنات درون برج خنک کن
اندیس لانجیر رسوبگذاری کم و یا خوردگی، و اندیس راینار خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. نرخ خوردگی ابتدا صعودی و سپس تقریباً ثابت شده است.	۷	۰/۸۳	آب خرم‌دشت درون پکیج
اندیس لانجیر رسوبگذاری زیاد و اندیس راینار رسوبگذاری سبک را پیش‌بینی می‌کند. رسوبگذاری و خوردگی هر دو اتفاق افتاده است و خوردگی بصورت زیر رسوبی بوده است.	۵/۲۸	۲/۲۵	آب خرم‌دشت درون برج خنک کن

آب درون برج خنک‌کن در هر دو حالت رسوب‌گذار زیاد است. اما همانطور که در شکل ۲-۴ مشخص است، نرخ خوردگی در برج بیشتر از پکیج است که این امر بنحاطر وجود گازهای محلول در برج است که باعث تشدید خوردگی می‌شوند. همچنین TDS بالاتر خوردگی را بیشتر می‌کند. یون‌های سولفات و کلرید موجود در آب هم هر چی بیشتر باشند، میزان خوردگی را افزایش می‌دهند. به همین دلایلی که ذکر شد با اینکه اندیس لانجیر و راینار میزان رسوبگذاری بیشتری را برای آب خرم‌دشت در برج نسبت به آب قنات در برج پیش‌بینی می‌کند، آب خرم‌دشت خورنده‌تر نیز عمل کرده است. خوردگی در برج برای آب خرم‌دشت بصورت زیر رسوبی بوده است که بنحاطر غیریکنواخت بودن رسوب و خلل و فرج‌های موجود بوجود آمده است.

آب درون پکیج در هر دو حالت خورنده است و خوردگی از نوع $\alpha - Fe_2O_3$ است که آخرین محصول خوردگی می‌باشد. در همه حالت‌ها، نرخ خوردگی پس از مدتی به ثبات می‌رسد.



شکل ۴-۲: نرخ خوردگی (mpy) در پکیج و برج خنک‌کن برای آب‌های قنات و خرم‌دشت زمانیکه از سختی‌گیر رزینی استفاده شده است.

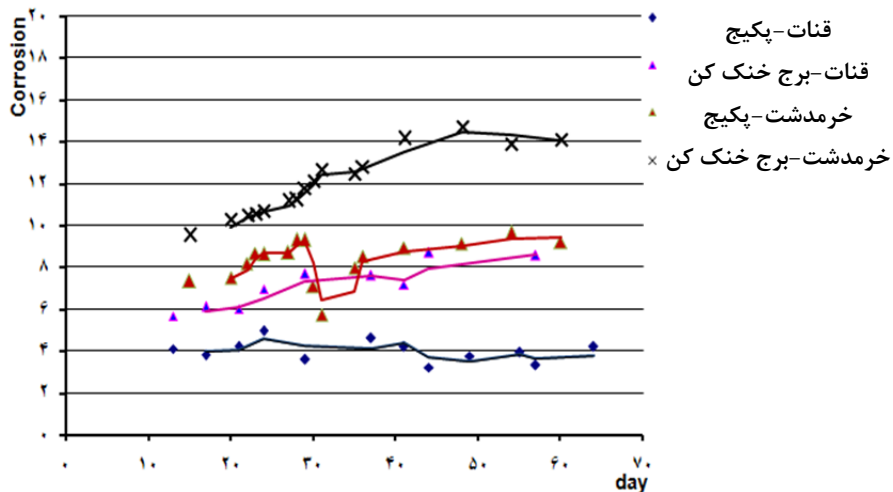
۴-۳ استفاده از آب نرم شده توسط سختی‌گیر اسمز معکوس در تاسیسات

زمانیکه از سختی‌گیر اسمز معکوس برای آب‌های قنات و خرم‌دشت به عنوان آب تغذیه در پکیج و برج خنک‌کن با متوسط‌های زیر استفاده شد، نتایج پیش‌بینی لانجیر و رایزنار برای آب درون پکیج و برج خنک‌کن به صورت زیر است. نرخ خوردگی بصورت مقایسه‌ای در شکل ۴-۳ و تصویر کوپن‌ها و الکترودهای خوردگی در مسیر پکیج و برج خنک‌کن در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

	$\overline{\text{pH}}$	$\overline{\text{TDS}}$	متوسط سختی کل	
آب قنات :	۸/۴۳	۵۹۷	۱۲۴	
آب خرم‌دشت :	۸/۷	۶۰۸۳	۱۳۵۶	

توضیحات	اندیس راینار	اندیس لانجیر	
اندیس لانجیر رسوبگذاری کم و یا خوردگی، و اندیس راینار خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. اما خوردگی از نوع $\gamma - Fe_2O_3$ و بصورت یکنواخت می‌باشد. بنابراین مقدار آن بسیار کم و نرخ آن ثابت بوده است.	۷/۲۸	۰/۸۱	آب قنات درون پکیج
اندیس‌ها نشانه رسوب کم یا خوردگی هستند. خوردگی زیاد و از نوع $\alpha - Fe_2O_3$ بوده است. نرخ خوردگی شیب صعودی دارد.	۶۷	۱/۵۵	آب قنات درون برج خنک‌کن
هر دو اندیس رسوبگذاری کم را پیش‌بینی می‌کند. اما رسوبی تشکیل نشده و خوردگی از نوع $\gamma - Fe_2O_3$ می‌باشد. میزان نرخ خوردگی تقریباً ثابت می‌باشد.	۵/۵۸	۱/۶۶	آب خرم‌دشت درون پکیج
طبق هر دو اندیس بسیار رسوبگذار می‌باشد. اما خوردگی زیر رسوبی اتفاق افتاده و باعث شکسته شدن رسوب شده است. میزان نرخ خوردگی زیاد بوده است.	۴/۲	۲/۴۴	آب خرم‌دشت درون برج خنک‌کن

برای آب درون پکیج در هر دو حالت خوردگی و اکسیداسیون از نوع $\gamma - Fe_2O_3$ بوده است و بنابراین نرخ خوردگی ثابت و مقدار آن نسبتاً کم بوده است. علت خوردگی بیشتر در آب خرم‌دشت بیشتر بودن TDS می‌باشد. برای آب درون برج، توضیحات مانند موارد قبل است.



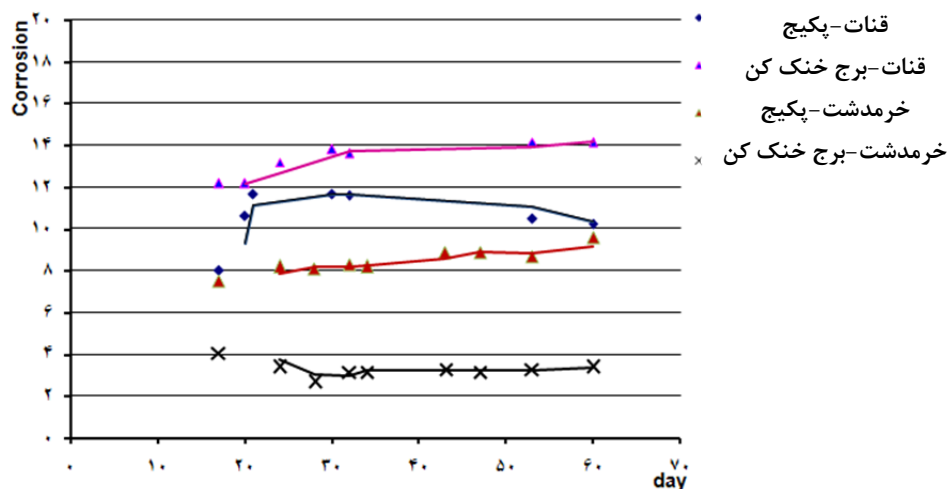
شکل ۴-۳: نرخ خوردگی (mpy) در پکیج و برج خنک کن برای آب های قنات و خرم‌دشت زمانیکه از سختی‌گیر اسمز معکوس استفاده شده است.

۴-۴ استفاده از آب نرم شده توسط سختی‌گیر الکترومغناطیسی در تاسیسات

زمانیکه از سختی‌گیر الکترومغناطیسی برای آبهای قنات و خرم‌دشت به عنوان آب تغذیه در پکیج و برج خنک‌کن با متوسط‌های زیر استفاده شد، نتایج پیش‌بینی لانجیر و رایزنار برای آب درون پکیج و برج خنک‌کن به صورت زیر است. نرخ خوردگی بصورت مقایسه‌ای در شکل ۴-۴ و تصویر کوپن‌ها و الکترودهای خوردگی در مسیر پکیج و برج خنک‌کن در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

pH	TDS	متوسط سختی کل	
۸/۵۳	۵۵۶	۱۱۷	آب قنات :
۸/۵۹	۲۶۲۵	۴۲۶	آب خرم‌دشت :

توضیحات	اندیس راینار	اندیس لانیجیر	
هر دو اندیس رسوبگذاری کم و یا خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. خوردگی از نوع $\alpha - Fe_2O_3$ و بصورت یکنواخت، نرخ خوردگی تقریباً ثابت با شیب ملایم نزولی می‌باشد.	۶/۶۵	۰/۹۴	آب قنات درون پکیج
اندیس لانیجیر رسوبگذاری زیاد و اندیس راینار رسوبگذاری سبک را پیش‌بینی می‌کند. بخاطر EC بالاتر، خوردگی آن بالاتر از پکیج است و خوردگی از نوع زیر رسوبی و نرخ آن زیاد است.	۵/۵۴	۱/۹۸	آب قنات درون برج خنک‌کن
هر دو اندیس خوردگی را پیش‌بینی می‌کند. خوردگی از نوع $\alpha - Fe_2O_3$ است.	۶/۳۶	۰/۶۶	آب خرم‌دشت درون پکیج
طبق هر دو اندیس بسیار رسوبگذار می‌باشد که در تصاویر آن کاملاً مشهود است. رسوب زیاد مانع از خوردگی شده است. میزان نرخ خوردگی بسیار پایین است.	۳/۷۳	۲/۸۱	آب خرم‌دشت درون برج خنک‌کن



شکل ۴-۴: نرخ خوردگی (mpy) در پکیج و برج خنک‌کن برای آبهای قنات و خرم‌دشت زمانیکه از سختی گیر الکترومغناطیسی استفاده شده است.



قنات - پکیج -
بدون سختی‌گیر



قنات - پکیج - سختی‌گیر
رزینی



قنات - پکیج - سختی‌گیر
اسمز معکوس



قنات - پکیج - سختی‌گیر
الکترومغناطیسی



خرمدشت - پکیج -
بدون سختی‌گیر



خرمدشت - پکیج -
سختی‌گیر رزینی



خرمدشت - پکیج -
سختی‌گیر اسمز معکوس



خرمدشت - پکیج -
سختی‌گیر
الکترومغناطیسی

شکل ۴-۵: مقایسه اثر سختی‌گیرهای رزینی، RO، الکترومغناطیس در آب در تماس با پکیج برای آبهای قنات تهران و خرم‌دشت



قنات-برج خنک کن-
بدون سختی گیر



قنات-برج خنک کن-
سختی گیر رزینی



قنات-برج خنک کن-
سختی گیر اسمز معکوس



قنات-برج خنک کن-
سختی گیر
الکترومغناطیسی



خرمدشت-برج خنک-
کن-
بدون سختی گیر



خرمدشت-برج خنک-
کن-سختی گیر رزینی

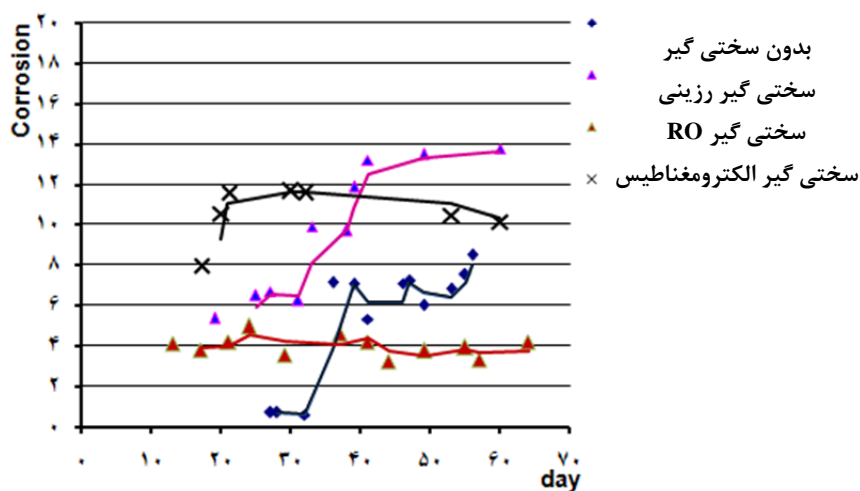


خرمدشت-برج خنک-
کن-سختی گیر اسمز
معکوس

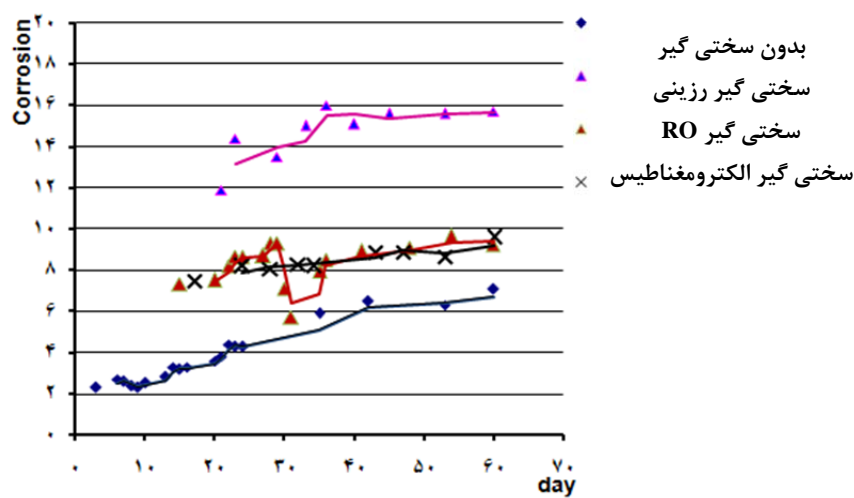


خرمدشت-برج خنک-
کن-سختی گیر
الکترومغناطیسی

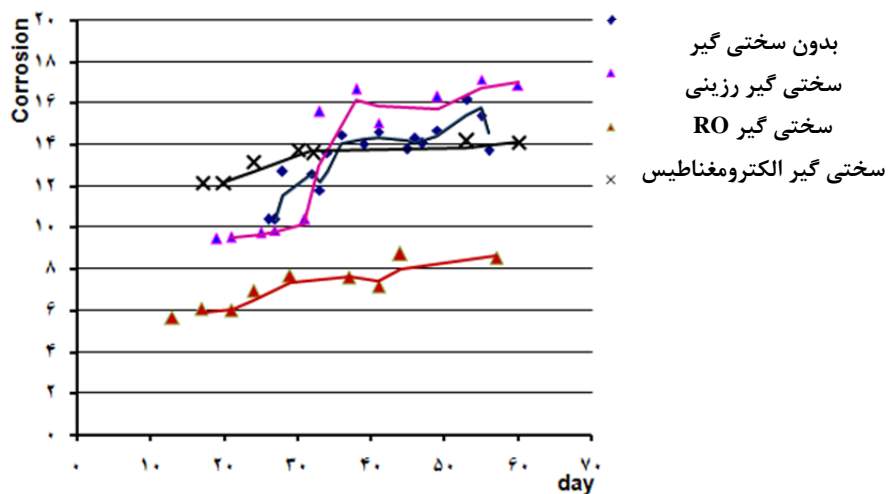
شکل ۴-۶: مقایسه اثر سختی گیرهای رزینی، RO، الکترومغناطیس در آب در تماس با برج خنک کن برای آبهای قنات تهران و خرمدشت



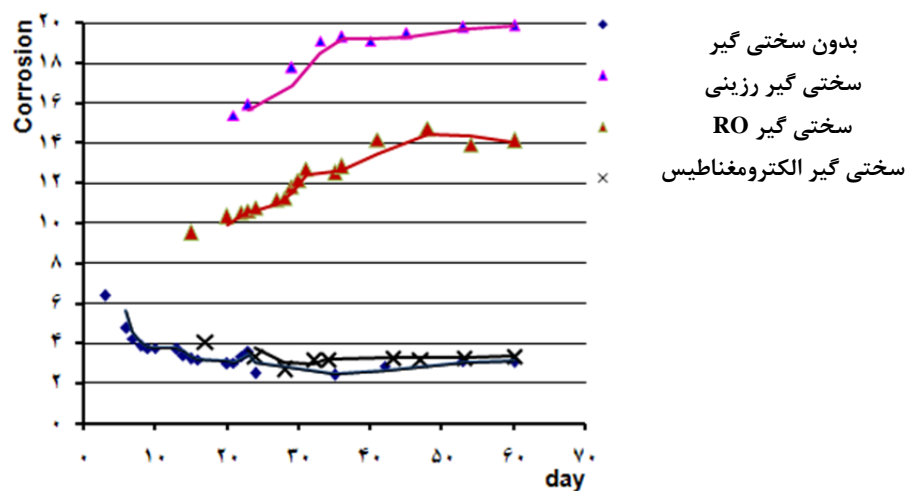
شکل ۴-۷: مقایسه اثر سختی‌گیرهای رزینی، RO، الکترومغناطیس در نرخ خوردگی (mpy) آب در تماس با پکیج برای آب قنات تهران



شکل ۴-۸: مقایسه اثر سختی‌گیرهای رزینی، RO، الکترومغناطیس در نرخ خوردگی (mpy) آب در تماس با پکیج برای آب خرم‌دشت



شکل ۴-۹: مقایسه اثر سختی گیرهای رزینی، RO، الکترومغناطیس در نرخ خوردگی (mpy) آب در تماس با برج خنک‌کن برای آب قنات تهران



شکل ۴-۱۰: مقایسه اثر سختی گیرهای رزینی، RO، الکترومغناطیس در نرخ خوردگی (mpy) آب در تماس با برج خنک‌کن برای آب خرمداشت



۴-۵ نتیجه‌گیری

یکی از نتایج اصلی این پروژه این است که باید تعادلی بین خوردگی و رسوبگذاری برقرار باشد. به عبارت دیگر دستگاه‌های سختی‌گیری و روش‌هایی ارجح هستند که نه تنها باعث کاهش رسوبگذاری در سیستم شوند، بلکه موجب از بین رفتن مشکل خوردگی در سیستم باشند. خوردگی در سیستم موجب می‌شود ضمن اضافه شدن هزینه‌های سرویس و نگهداری، ذرات فلزی جدا شده از لوله‌کشی و دستگاه‌های گرمایش و سرمایش باعث گرفتگی مسیرها و حتی از کارافتادگی این سیستم‌ها شوند. از طرفی حذف مشکل خوردگی نمی‌تواند به قیمت افزایش رسوبگذاری باشد. چرا که افزایش رسوب موجب عدم کارکرد صحیح برج خنک‌کن، گرم شدن بیش از حد بویلر و افزایش افت فشار مسیر و کاهش راندمان گرمایشی و سرمایشی می‌شود. مثلاً در برج خنک‌کن در TDS خیلی بالا، خوردگی صورت نمی‌گیرد، اما رسوبگذاری شدید است.

قطعاً برای کنترل خوردگی نیاز به استفاده از افزایشنده‌های شیمیایی یا روش‌های استاندارد می‌باشد. با توجه به اینکه در این پروژه از افزایشنده‌های شیمیایی استفاده نشد و از سه سختی‌گیر رزینی، اسمز معکوس و الکترومغناطیس استفاده شد و نتیجه به صورت زیر می‌باشد.

مطالعات نشان داد که اندیس رایزنار بیشتر از اندیس لانجیر برای با نتایج تجربی برای پیش‌بینی رسوب یا خوردگی همخوانی دارد. در این پروژه از سه نوع آب با TDSهای مختلف استفاده شد.

۱- آب با TDS حدود 600 ppm و اندیس رایزنار ۷-۵. اندیس رایزنار ۶-۵ رسوبگذار کم و ۷-۶ رسوبگذار کم و یا خورنده کم است، یعنی مرز رسوبگذاری و خوردگی. با توجه به نمودار خوردگی در شکل ۵-۷، زمانیکه از این آب در پکیج استفاده می‌شود، کمترین خوردگی مربوط به زمانی است که از سختی‌گیر RO استفاده می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۵-۵، در سیستم RO، نوع اکسایش $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ سیاه رنگ بوده

است که به عنوان لایه محافظ عمل می‌کند و مانع خوردگی‌های بعدی می‌شود و در سیستم الکترومغناطیس از نوع $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ آجری رنگ بوده است.

زمانیکه از این آب در برج خنک‌کن استفاده می‌شود، هم کمترین خوردگی مربوط به زمانی است که از سختی گیر RO استفاده می‌شود (شکل ۵-۹). اما نوع اکسایش $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ آجری رنگ بوده که آخرین محصول خوردگی است و نرخ خوردگی سیر صعودی دارد.

۲- آب با TDS بین (۳۰۰۰-۱۰۰۰)ppm و اندیس رایزنار ۶-۵ که رسوبگذاری سبک را پیش‌بینی می‌کند که در سیستم‌های بدون سختی‌گیر، رزینی و الکترومغناطیس استفاده شده و آب با TDS حدود ۶۰۰ppm و اندیس رایزنار نزدیک ۳ که رسوبگذاری سنگین را پیش‌بینی می‌کند و در سیستم RO از آن استفاده شده است.

با توجه به نمودار خوردگی در شکل ۵-۷، زمانیکه از این آب در پکیج استفاده می‌شود، با سختی‌گیرهای RO و الکترومغناطیسی، خوردگی‌ها کمتر از سیستم رزینی بوده است. البته اگر از آب با TDS بین (۳۰۰۰-۲۰۰۰)ppm برای سیستم RO استفاده می‌شد، نرخ خوردگی آن پایین‌تر می‌آمد. همچنین با توجه به شکل ۵-۵، نوع اکسایش $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ سیاه رنگ بوده است که به عنوان لایه محافظ عمل می‌کند و مانع خوردگی‌های بعدی می‌شود.

زمانیکه از این آب در برج خنک‌کن استفاده می‌شود، کمترین خوردگی مربوط به زمانی است که از سختی‌گیر الکترومغناطیس استفاده می‌شود که این بخاطر تشکیل رسوب زیاد و یکنواخت در این سیستم می‌باشد (شکل‌های ۵-۶ و ۵-۱۰).

مراجع

مطالب این گزارش برگرفته از منابع زیر و کار آزمایشگاهی می‌باشد:

- ۱- کتاب "اصول تصفیه آب" تألیف "دکتر محمد چالش امیری".
- ۲- کتاب "روشهای پیشگیری از رسوب و خوردگی در تاسیسات حرارتی و برودتی" تألیف "دکتر امید امیدبخش".
- ۳- کنترل خوردگی در صنایع جلد اول، تألیف دکتر سید محمد سید رضی، ناشر: انجمن خوردگی ایران، چاپ دوم ۱۳۷۶
- ۴- مهندسی خوردگی، تألیف مارس . ج. فونتانا ترجمه دکتر احمد ساعتچی ناشر جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، تابستان ۱۳۸۲
- ۵- نقش آب و کنترل خوردگی در صنایع تألیف سید احمد پیشنهادی، انتشارات ارکان بهار ۱۳۷۷.
- 6- Handbook of air conditioning system design. Carrier air conditioning company.
- 7-Side Stream Filtration for Cooling Towers; Prepared for the U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program By Pacific Northwest National Laboratory; X. Duan; October 2012.
- 8- Fouling and fouling mitigation on heated metal surfaces; S.N. Kazi et al.; *Desalination* 288 (2012) 126–134.
- 9-Effect of surface temperature on the fouling of heat transfer surfaces; Sharm El-Sheikh; *Eleventh International Water Technology Conference, IWTC11 2007*.
- 10-Effect of Mixed Corrosion Inhibitors in Cooling Water System; Dina Raheem Al-Khwarizmi; *Engineering Journal, Vol. 7, No. 4, PP 86-97(2011)*.
- 11-Scale and Corrosion Prevention in Cooling Water Systems Part I: Calcium Carbonate; T.Y. Soror; *The Open Corrosion Journal, 2009, 2, 45-50*.

Abstract

When the water is heated or evaporated in the presence of the air and thus condensed, the formation of insoluble fouling causes serious problems in the construction installations. Although, the fouling may form a protective coating that reduces corrosion, it reduces the heat transfer coefficient and increases the pressure drop. The most common fouling that forms in the installations systems is calcium carbonate, which its formation depends on factors such as concentration, alkalinity, pH, temperature, etc.

Also, There are many factors that cause corrosion of various parts in installations systems, the most important of which is the water-soluble oxygen.

In the present project, was investigated the effect of two samples of water with different TDS values on the amount of fouling and corrosion, first, without the use of softener, and then using a few conventional softeners including cationic resin, reverse osmosis, electromagnetic and galvanic. At last, the results were investigated and compared.



Road, Housing & Urban Development Research Center

**Investigation of Performance of Water
Softener Systems in Hydronic Heating
and Cooling Systems of Small
Residential Buildings.**

By:

Asieh Otaredi-Kashani

Shahram Delfani

Research Report

BHRC Publication No.: R-824

2018