سال پنجم، شماره ۱، ۱۳۹۷، صفحات ۲۱ تا ۲۸
نشریه آب و توسعه پایدار

2018, Vol.5, No.1, Pages 21 to 28
Journal of Water and Sustainable Development

معرفی و تحلیل اقتصادی تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند

محسن عزیزی[۱]،علی شهیدی[۲*]

۱، ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری منابع آب و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: ashahidi@birjand.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۰۶
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۰

چکیده

کیفیت شیمیایی و میکروبیولوژیک منابع زیرزمینی تأمین آب شهر بیرجند به دلیل ساختار زمین‌شناسی منطقه، ضخامت بالای رسوبات آبرفتی که شهر بر روی آن قرار گرفته است و برداشت‌های مستمر و روز افزون از این منابع به علت افزایش جمعیت، سبب شده شاخص‌های کیفی آب، از حدود مطلوب فاصله بگیرد. در این تحقیق ضمن معرفی تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند یک تحلیل اقتصادی در خصوص سرمایه اولیه ساخت، تعمیر و نگهداری و راهبری ماهانه این تصفیه‌خانه ارائه شده است. آب خام ورودی به تصفیه‌خانه بیرجند، که از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود، دارای میزان بیش‌ازحد مجاز کروم، سختی و شوری می‌باشد. در طراحی فرآیند تصفیه‌خانه، تلاش شده است با دو روش اصلی سختی‌گیری به کمک پلت راکتور و فیلتر غشایی به روش‌های نانو فیلتر و اسمز معکوس، هم‌زمان حذف سولفات، فلزات سنگین و تبدیل کروم ۶ ظرفیتی به ۳ ظرفیتی، قابلیت حذف آلودگی‌های احتمالی نیز ایجاد شود. استفاده از فناوری پلت راکتور آب موجب کاهش پساب تصفیه از ۱۶۰ لیتر در ثانیه به ۵۰ لیتر در ثانیه می‌شود، که یک تفاوت منحصربه‌فرد تصفیه‌خانه بیرجند با سایر تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پلت راکتور، سختی‌گیری، فیلتر غشایی.

Introduction and Economic Analysis of the City of Birjand's Water Treatment Plant

M. Azizi[1], A. Shahidi[2*]

1,2- PhD. Student & Associate Professor, Department. of Science and Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

*(Corresponding Author Email: ashahidi@birjand.ac.ir)

Received: 24-02-2017
Accepted: 11-03-2018

Abstract

The chemical and microbiological quality of Birjand's underground water sources are lower than the desirable range of water quality indicators due to the geological structure of the area, the high thickness of the alluvial deposits on which the city is located, and the continuous and increasing harvesting of these sources as a result of population growth. In this research, along with the introduction of the Birjand Drinking Water Refinery, an economic analysis is presented regarding the initial capital of construction and monthly maintenance and management of this refinery. The raw water entering the Birjand refinery, which is supplied from underground water sources, has an excess amount of chromium, hardness, and salinity. In the design of the refinery process, two main methods of hardness removal via reactor pellet and filter membrane using Nano-filter and reverse osmosis techniques were used to simultaneously remove sulfate and heavy metals, convert chromium VI to III, and eliminate the possible contaminations. Using the water reactor pellet technology reduces the purification effluent from 160 to 50 liters per second, which is a unique difference between the Birjand refinery and other refineries.

Keywords: Pellet Reactor, Hardenss Removal, Filter Membranes.

DOI: 10.22067/jwsd.v5i1.62862

مقدمه

بسیاری از مشکلات بهداشتی کشورهای درحال پیشرفت، عدم برخورداری از آب آشامیدنی سالم است. از آنجایی که محور توسعه پایدار، انسان سالم است و انسان سالم در گرو بهره‌مندی از آب آشامیدنی مطلوب می‌باشد بدون تأمین آب سالم، جایی برای سلامت و رفاه جامعه، وجود ندارد. آب از دو بعد بهداشتی و اقتصادی حائز اهمیت است. از بعد اقتصادی به حرکت درآورنده چرخ صنعت و رونق بخش فعالیت کشاورزی است. از بعد بهداشتی آب با کیفیت، تضمین کننده سلامت انسان است. بنابراین برنامه‌ریزی و هزینه در جهت تأمین آب سالم، سرمایه‌گذاری قابل توجهی برای آینده خواهد بود (قوی‌پنجه و احسانی، ۱۳۹۲).

قرار داشتن ایران در منطقه گرم و خشک موجب شده تا استحصال و بهره‌وری از آب، به‌ویژه آب شرب و سالم برای تأمین نیازهای حیاتی جوامع انسانی کشور، موضوع مهمی به‌شمار رود. دراین‌راستا استان‌های مرکزی و شرقی به‌ویژه استان خراسان جنوبی، باتوجه‌به شرایط نامساعد اقلیمی، کانون توجه می‌باشند و ایجاد بسترهای مناسب به‌منظور دسترسی به منابع آبی سالم جزء اهداف و برنامه‌های مسئولین و دستگاه‌های اجرایی در این منطقه می‌باشد.

این تحقیق به بررسی فرآیند منحصربه‌فرد تصفیه آب شرب شهر بیرجند، به‌منظور تأمین آب سالم، باتوجه‌به وضعیت نامناسب کیفی منابع آب موجود در این شهر می‌پردازد. شهر بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی و مرکز شهرستان بیرجند در شرق ایران است. این شهر در سال ۱۳۹۰، تعداد ۱۸۴۶۴۷ نفر جمعیت داشته و چهل و نهمین شهر ایران بوده است. بیرجند نخستین شهر در ایران است که دارای سازمان آبرسانی بوده و دومین شهر در ایران است که در سال ۱۳۰۲ و پیش از تهران از لوله‌کشی آب شهری برخوردار شد. از نظر تأمین آب شرب، این شهر به‌طورکامل به منابع آب زیرزمینی وابسته است. در رابطه با آب‌های زیرزمینی دشت بیرجند، دو محدودیت کلی وجود دارد:

الف) محدودیت کمی: توسعه شدید بهره‌برداری در سال‌های اخیر، وضعیت تعادلی سفره آب بیرجند را به‌هم‌زده و کسری مخزن نگران‌کننده‌ای در آبخوان ایجاد نموده است.

ب) محدودیت کیفی: از منظر کیفی، منابع آب تأمین کننده، شرایط مطلوبی را دارا نمی‌باشند. نتایج آنالیز شیمیایی آب چاه‌ها، وجود میزان بالای کروم شش ظرفیتی در برخی از چاه‌های منطقه را نشان می‌دهد که به دلیل ویژگی‌های بیماری‌زای ناشی از آن، گزینه‌ی تصفیه و پالایش آن امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. علاوه‌بر میزان بالای کروم، مقادیر سولفات و شوری نیز در بسیاری از چاه‌ها بیش‌ازحد مجاز استاندارد است.

باتوجه‌به موارد فوق برای تأمین آب با کیفیت مطلوب مورد نیاز شهر بیرجند، احداث تصفیه‌خانه آب با دو هدف حذف کروم شش ظرفیتی و یا تبدیل آن به کروم سه ظرفیتی و همچنین بهبود کیفیت شیمیایی، گامی موثر در جهت بهبود کیفیت آب آشامیدنی این شهر تلقی می‌شود.

عملیات اجرایی ساخت تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند در سال ۱۳۸۶ در زمینی به مساحت پنج هکتار آغاز شده و در سال ۱۳۹۴ به بهره‌برداری رسیده است. به نقل از گزارشات شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، هزینه پروژه آبرسانی به شهر بیرجند ۶۲ میلیارد تومان می‌باشد که از این مبلغ ۲۳ میلیارد تومان در اجرای تصفیه‌خانه آب شرب، ۳۳ میلیارد تومان خطوط انتقال آن و مبلغ ۶ میلیارد تومان در طرح انتقال آب از سربیشه به بیرجند هزینه شده است.

تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند از دو واحد اسمز معکوس[1] و سختی‌گیری آب پلت راکتور[2] تشکیل شده که استفاده از واحد سختی‌گیری آب موجب کاهش پساب تصفیه از ۱۶۰ لیتر در ثانیه به ۵۰ لیتر در ثانیه می‌شود، این موضوع زمینه استفاده بهینه از آب زیرزمینی را فراهم آورده است، همچنین استفاده از این روش کاهش مصرف انرژی را نیز به‌دنبال خواهد داشت این مهم تفاوت منحصربه‌فرد تصفیه خانه شیمیایی بیرجند با دیگر تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد.

به‌دنبال ورود دانش و تکنولوژی ساخت این تصفیه‌خانه به ایران و بومی‌سازی آن در استان خراسان جنوبی، درحال‌حاضر توانایی ساخت چنین تصفیه‌خانه‌ای در سایر نقاط کشور نیز فراهم شده است.

مواد و روش‌ها

• معرفی منطقه مورد مطالعه

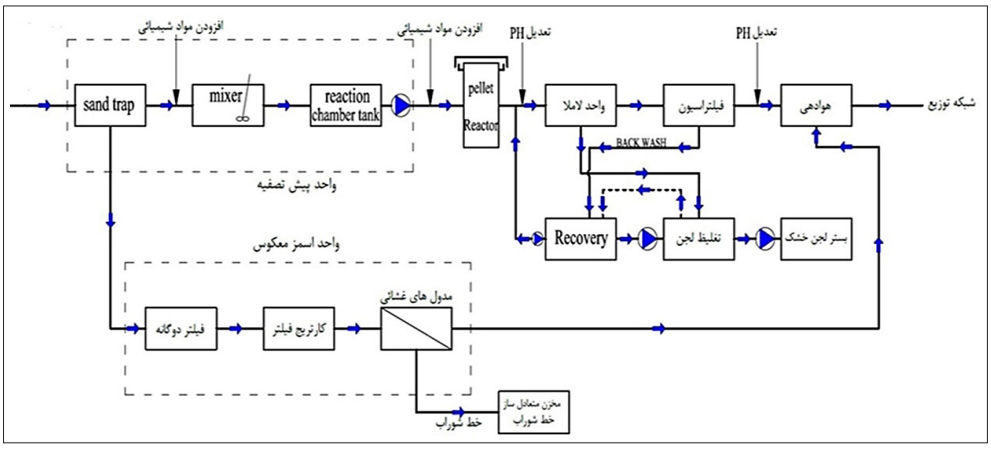
شهرستان بیرجند با وسعتی معادل ۶۸۰۰ کیلومتر مربع (حدود ۵ درصد مساحت کل استان)، در مرکز استان خراسان جنوبی قرار دارد. براساس آخرین تقسیمات کشوری این شهرستان دارای ۱ بخش، ۱ شهر، ۶ دهستان می‌باشد. طبق سرشماری انجام شده در سال ۱۳۹۰ در سطح شهرستان بیرجند در مجموع ۳۲۴ آبادی دارای سکنه گزارش شده است. از این تعداد ۱۸۶ روستای کمتر از ۲۰ خانوار و ۱۳۸ روستای بالای ۲۰ خانوار در استان وجود دارد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی شهرستان بیرجند را نشان می‌دهد.

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

• معرفی تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند

محل احداث تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند در منطقه جنوب شهری بیرجند محدود به دامنه کوه‌های باقران تعیین شده‌است. جانمایی مناسب تصفیه‌خانه سبب شده است تا امکان انتقال آب از تصفیه‌خانه به کلیه مخازن شهر به‌صورت ثقلی فراهم آید. تصفیه خانه آب شرب شهر بیرجند از دو واحد فیلتر غشایی و سختی‌گیری آب پلت راکتور تشکیل شده که استفاده از واحد سختی‌گیری آب موجب کاهش پساب تصفیه از ۱۶۰ لیتر در ثانیه به ۵۰ لیتر در ثانیه می‌شود، این موضوع زمینه استفاده بهینه از آب زیرزمینی را فراهم آورده است، همچنین استفاده از این روش کاهش مصرف انرژی را نیز به‌دنبال خواهد داشت این مهم تفاوت منحصربه‌فرد تصفیه‌خانه شیمیایی بیرجند با دیگر تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد. ظرفیت نهایی تصفیه‌خانه شهر بیرجند در پایان دوره طرح معادل ۹۲۰ لیتر در ثانیه پیش‌بینی شده است. بخش اعظم این ظرفیت به واحد پلت راکتور و باقیمانده به واحد اسمز معکوس اختصاص می‌یابد. براین‌اساس ظرفیت کل این تصفیه‌خانه در ابتدای طرح معادل ۶۴۰ لیتر در ثانیه طراحی شده است (قوی‌پنجه و احسانی، ۱۳۹۲).

تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند شامل واحدهای سختی‌گیری، واحد زلال‌سازی لاملا، تغلیظ لجن، بستر لجن‌خشک‌کن، واحد تنظیم pH واحد صاف‌سازی (فیلتراسیون)، واحد ریکاوری، واحد هوادهی و واحد فیلتر غشایی می‌باشد. فرآیند کلی تصفیه آب در تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند به شرح شکل (۲) ارائه می‌شود.



شکل ۲- فرآیند کلی تصفیه آب در تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند

• واحد سختی‌گیری

این واحد با ظرفیت ۴۲۰ لیتر در ثانیه شامل سه قسمت اصلی پیش‌تصفیه، تصفیه و تصفیه نهایی می‌باشد. واحد پیش‌تصفیه شامل تجهیزات ورودی آب، واحد هوادهی و تجهیزات دوزینگ، ته‌نشینی اولیه و واحد پلت راکتور شامل کل تجهیزات مورد نیاز جهت سختی‌گیری، تزریق مواد شیمیایی و کنترل pH آب می‌باشد.

در مرحله پیش‌تصفیه پس از ته‌نشینی اولیه، آب وارد بخش هیدرولیک میکسر می‌شود، در این بخش ماده منعقد کننده بیوسولفیت سدیم ($NaHSO_4$) با دوز مشخص تزریق می‌شود و در ادامه مسیر، آب وارد مخزن واکنش برای زمان ماند و اجازه واکنش شیمیایی برای تبدیل کروم شش ظرفیتی به سه ظرفیتی خواهد شد، به همین دلیل آب خروجی از این واحد فاقد کروم شش ظرفیتی می‌باشد. همچنین باتوجه‌به انجام واکنش شیمیایی تجهیزات تنظیم pH جهت تنظیم pH قبل از ورود به پلت راکتورها مدنظر قرار گرفته است(قوی‌پنجه و احسانی،۱۳۹۲).

• فرآیند حذف کروم

مهمترین فلزات سنگین کروم، مس، سرب، کادمیوم، آرسنیک، نیکل، نقره، آلومینیوم، وانادیم و کبالت می‌باشند. به‌دلیل بالا بودن میزان کروم در آب‌های بیرجند و اهمیت آن در این مطالعات، توجه بیشتر برروی این عنصر معطوف خواهد شد. اغلب صخره‌ها و خاک‌ها حاوی مقادیر کمی کروم می‌باشند. سنگ معدن متعارف آن کرومیت هست، که از آن فلز سه ظرفیتی کروم بدست می‌آید. کروم شش ظرفیتی به ندرت به‌صورت طبیعی یافت می‌شود. فقط شکل سه ظرفیتی کروم پایدار می‌باشد و کروم شش ظرفیتی به سرعت به‌وسیله مواد آلی احیا می‌شود. کروم در نتیجه سوختن سوخت‌های فسیلی چوب و کاغذ و نیز از ته نشست مواد در صنایع و اکسیداسیون کروم معدنی و غیره بوجود می‌آید.

اثر سرطان زایی کروم شش ظرفیتی دلیل خوبی برای محافظت آب‌های آشامیدنی، از وارد شدن این عنصر در آن است. کروم ممکن است در آب به دو صورت کروم شش ظرفیتی و سه ظرفیتی باشد، چون وجود کروم به‌ویژه به‌صورت کرومات در آب برای بهداشت خطرناک است، آبی که برای مصرف عمومی استفاده می‌شود باید عاری از کروم باشد. حداکثر غلظت مجاز کروم در آب آشامیدنی ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. بیماری‌ها و خطرات بهداشتی ناشی از اثر کروم شش ظرفیتی شامل خون دماغ شدید، سرطان ریه و مجاری تنفسی، زخم مجاری داخلی بینی، مشکلات کلیوی، بیماری‌های روده، سرطان کبد، سرطان معده و گوارش می‌باشد (فرهمند و گیفانی،۱۳۸۸).

کروم دارای خاصیت اکسایشی - کاهشی می‌باشد و باید کروم شش ظرفیتی به‌گونه‌ی بی‌ضرر کروم سه ظرفیتی تبدیل شود. لذا حذف کروم شش ظرفیتی با بهره‌گیری از یک ماده کاهنده و تبدیل آن به شکل کروم سه ظرفیتی امکان‌پذیر خواهد بود. در واقع کروم سه ظرفیتی به‌صورت $Cr(OH)_3$ با قابلیت حلالیت کم در pH بیشتر از ۹، به‌شکل رسوبات لخته‌ای یا کریستالی حذف می‌شود. این درحالی است که رگه‌هایی از کروم شش ظرفیتی نیز روی رسوبات لخته‌ای یا کریستالی تشکیل شده، جذب می‌شوند (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

واکنش احیای کروم شش ظرفیتی به کروم سه ظرفیتی به‌صورت واکنش ۱ خواهد بود:

$$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \longrightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O\ (+1.37V) \qquad (۱)$$

مسئله‌ای دیگر که در احیای کروم شش ظرفیتی مطرح می‌شود وجود غلظت‌های نسبتاً بالای اکسیژن است. برای رسیدن به پتانسیل اکسایش کافی جهت واکنش احیای کروم شش ظرفیتی در ابتدا باید اکسیژن کاهش پیدا کند. مقدار عامل کاهنده مورد نیاز برای احیای اکسیژن بیش از ۱۰۰۰ برابر مقدار مورد نیاز برای احیای کروم است (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

واکنش احیای اکسیژن به‌صورت واکنش (۲) خواهد بود:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O\ (+1.23V) \qquad (۲)$$

در طول تصفیه باید به این نکته توجه داشت که اکسیژن هوا بسیار راحت‌تر در آب بدون اکسیژن حل می‌شود بنابراین تماس آب و هوا تا حد ممکن باید به‌حداقل برسد.

برای پدید آوردن شرایط حذف کروم به‌صورت رسوبات کریستاله، ابتدا باید امکان حذف اکسیژن فراهم آید. به‌طورکلی عوامل کاهنده $FeSO_4$، NaHS و $NaHSO_3$ را می‌توان با واکنش های اکسایش متناظرشان برای کاهش اکسیژن به‌کار برد.

از نقطه‌نظر مصرف شیمیایی، مصرف $FeSO_4$ مناسب نمی‌باشد زیرا تا حد قابل ملاحظه‌ای غلظت سولفات را افزایش می‌دهد و مقدار بسیار زیادی آب غنی از لجن هیدروکسید آهن $Fe(OH)_3$ تولید می‌کند. از طرفی به‌خاطر پتانسیل اکسایش نسبتاً بالا می‌توان انتظار داشت که واکنش کاهش کند انجام شود و به زمان واکنش کافی و تانک واکنش نسبتاً بزرگی نیاز خواهیم داشت. این امر بخاطر اثر انعقاد شدید بر تشکیل کریستال اثرات منفی دارد. بنابراین پیشنهاد نمی‌شود کاهش از طریق $FeSO_4$ اعمال شود (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

فقط مقدار کمی NaHS برای کاهش کروم شش ظرفیتی جهت تولید عنصر سولفور لازم است. حذف این عنصر کار آسانی نیست به دلیل اینکه دارای خاصیت کلوئیدی است. برای این کار به لخته‌سازها و منعقد کننده و فیلتراسیون نیاز است. عنصر سولفور به آب بو و مزه بسیار بدی می‌دهد که مجاز نیست. علاوه‌براین، در تانک ذخیره NaHS به‌مرور گاز سولفید هیدروژن (H_2S) تولید خواهد شد. گاز سولفید هیدورژن می‌تواند از تانک ذخیره NaHS فرار کند، به همین دلیل به سیستم تهویه و اخطار دهنده H_2S نیاز است. سولفید هیدروژن بالای ۱۰ میلی‌گرم در نانومترمکعب سمی می‌باشد که حد آشکارسازی انسان تقریباً ۰/۲ میلی‌گرم در نانومترمکعب می‌باشد. این گاز خطرات جدی برای ایمنی اشخاص ایجاد کرده و هر ساله موجب معلولیت‌های زیادی می‌شود. بخاطر پتانسیل اکسایش - کاهش نسبتاً بالای آن می‌توان انتظار داشت که واکنش کاهش کند باشد، به همین دلیل به زمان کافی و تانک واکنش بزرگتری نیاز دارد. به دلایل بالا پیشنهاد می‌شود از به‌کاربردن احیای سولفید خودداری شود (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

سدیم بی‌سولفیت ($NaHSO_3$) یک عامل کاهنده قوی است که به‌طور گسترده برای احیای کروم به‌کار می‌رود. غلظت سولفات در اینجا افزایش داده می‌شود اما هیچ‌گونه لجنی تولید نمی‌شود. برای این‌کار به یک تانک اختلاط و انجام واکنش با زمان ماند ۲۰ دقیقه‌ای و یک تانک ذخیره و چند پمپ تزریق نیاز است. سدیم بی‌سولفیت هیچ‌گونه خطری ندارد اما در تماس با اسیدهای قوی، گاز سمی دی‌سولفید هیدروژن آزاد می‌شود و به شدت با اکسنده‌های قوی مثل هیپرکلریت سدیم و کلسیم واکنش می‌دهد. می‌توان تمامی این مشکلات را با قراردادن تجهیزات تزریق، ذخیره و ترکیب‌کننده در یک اتاقک مجهز به تهویه، دور از اسیدها و اکسنده‌های قوی برطرف کرد. بنابراین توصیه می‌شود که برای کاهش کروم شش ظرفیتی از سدیم بی‌سولفیت استفاده شود (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

• شناخت سیستم پلت راکتور

امروزه یکی از روش‌هایی که در سطح دنیا به‌عنوان فرآیندی موثر و کارآمد در راستای حذف سختی، سولفات، سیلیس، فلورید، فلزات سنگین، ترکیبات فسفره و غیره مدنظر قرار گرفته، فرآیند کریستال‌سازی بسترهای غوطه‌ور موسوم به پلت راکتور می‌باشد (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰). در این مورد می‌توان گفت پلت راکتور توانایی حذف عواملی چون F، Fe، Mn، و Sr را به‌خوبی Ca و Mg دارد (Todd و همکاران، ۱۹۹۴). فرآیند کریستال‌سازی با بستر غوطه‌ور[۳]، یک پروسه فیزیکی- شیمیایی بوده که در طی آن ابتدا آب خام با جریان Up-Flow وارد یک راکتور استوانه‌ای شکل به قطر موثر ۰/۵ تا ۴ متر و ارتفاع ۶ تا ۱۲ متر می‌شود (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

این راکتورها حاوی دانه‌های ریز ماسه در ابعاد ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر بوده که به‌واسطه نوع جریان حاکم در حالت غوطه‌ور، امکان تماس آن‌ها با فلوک‌های بسیار ریز ناخالصی که به‌واسطه افزایش مواد منعقدکننده تبلور یافته‌اند را فراهم می‌آورد. درواقع ذرات ناخالصی براساس خاصیت جذب سطحی برروی دانه‌های ریز ماسه نشسته و با گذشت زمان ضمن تمرکز بیشتر، پلت‌های کریستاله شده را در ابعاد ۱ تا ۲ میلی‌متر پدید می‌آورند. براین‌اساس چهار فرآیند انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و آب‌گیری در یک راکتور انجام پذیرفته و عملاً پلت‌های کریستاله دفعی باتوجه‌به ساختار متبلور خود به‌راحتی و بدون نیاز به آب‌گیری قابل حمل و استفاده در راه‌سازی یا برخی صنایع دیگر خواهند بود (Dijk و همکاران، ۱۹۸۳).

شدت فرآیند کریستالیزاسیون به عواملی چون دما، کیفیت آب خام ورودی و میزان تزریق مواد شیمیایی وابسته می‌باشد. ازاین‌رو

مجموعه راکتور مجهز به سنسورهای اندازه‌گیری فشار، قلیائیت، سختی و دما در بخش‌های ورودی و خروجی خواهد بود. با رشد اندازه پلت‌ها، به‌مرور افت فشار در بخش انتهایی سیستم افزایش می‌یابد. درحالی‌که کیفیت آب خروجی نیز به‌مرور دست‌خوش تغییر شده و از ماهیت کیفی آن کاسته خواهد شد. کاهش کیفیت و بالا رفتن افت فشار از حد مجاز ۱۶/۲ تا ۱۶/۹ کیلوپاسکال بیانگر ضرورت خروج ذرات کریستاله انتهایی و جایگزینی ذرات ماسه شسته شده تازه خواهد بود. اثبات شده است که تعیین میزان اختلاف فشار در فاصله ۵۰ سانتی‌متری بالای کف بستر نتایج دقیق‌تری جهت تخلیه پلت‌ها می‌دهد. دراین‌حالت با عمل اتوماتیک شیرهای خروج ذرات کریستاله، بخشی از آن‌ها تخلیه می‌شود. در شرایط عدم تخلیه ذرات کریستال شده درشت، در پروسه راکتور به‌واسطه افت ناگهانی جریان اختلال ایجاد شده و منجر به بروز برخی تلاطم‌های ناهمسان در راستای کریستالیزاسیون ذرات و نهایتاً تخریب آن‌ها خواهد شد. ازاین‌رو شیر تخلیه ذرات کریستاله پلت می‌بایست متناوباً با بازه‌های زمانی مناسب باز و بسته گشته تا افت فشار موجود مرتفع شود. با عبور آب از بستر غوطه‌ور و کریستالیزاسیون ناخالصی‌ها برروی ذرات ماسه، مقدار ناخالصی‌های هدف در آب به‌صورت چشمگیری کاهش یافته و خروجی راکتور از کیفیت خوبی برخوردار می‌باشد. اما نکته قابل توجه عبور بخشی از ناخالصی‌های هدف به‌همراه آب خروجی و نیز افزایش تدریجی آن به‌واسطه بالا رفتن کریستالیزاسیون ذرات خواهد بود. در این حالت راندمان سیستم بسته به نوع ناخالصی تحلیل رفته و غلظت افزایش می‌یابد. ازاین‌رو جهت کنترل کیفیت آب استحصالی و ارتقا آن همواره بخشی از آب خروجی سرریزها دوباره به محفظه ورودی راکتور بازگشت داده می‌شود تا ضمن پدید آمدن فرصت کریستال‌سازی دوباره درصد خلوص آب استحصالی افزایش یابد (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰). در جدول (۱) مشخصات سیستم پلت راکتور تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سیستم پلت راکتور تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند (قوی‌پنجه و احسانی، ۱۳۹۲)

شرح	واحد	مقدار
تعداد راکتور pH بالا	مورد	۱
تعداد راکتور pH پایین	مورد	۳
دبی راکتور pH بالا	مترمکعب بر ساعت	۴۰۰
دبی راکتور pH پایین	مترمکعب بر ساعت	۱۶۰۰
قطر راکتور	متر	۲/۶
ارتفاع راکتور	متر	۱۰/۹
تعداد پمپ	مورد	۵
هد پمپاژ	متر	۲۰
بار سطحی	متر بر ساعت	۷۰

• فرآیند حذف سختی آب

سختی آب را می‌توان با افزایش pH رفع کرد. در pHهای بیشتر از ۸، $CaCO_3$ رسوب خواهد کرد که حد بهینه آن در pH برابر با ۸/۵ تا ۹/۵ می باشد. در pHهای بیشتر از ۱۰، $Mg(OH)_2$ رسوب خواهد کرد که حد بهینه آن در pH برابر با ۱۰/۵ تا ۱۱/۵ است.

امکان تشکیل ذرات لخته‌ای جهت حذف سختی ناشی از کلسیم و منیزیم و همچنین کاتیون‌های دیگر مستلزم فراهم آوردن شرایط در راستای تولید ترکیباتی با قابلیت انحلال پایین می‌باشد. برای این منظور با افزایش آهک در محیط طبق واکنش‌های ۳ و ۴، سختی کربناته به‌طور مستقیم و به‌واسطه تشکیل کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم که انحلال کمتری دارند تشکیل فلوک‌های قابل حذفی را می‌دهد که به‌راحتی قابلیت کریستالیزاسیون و تبلور برروی دانه‌های ریز بستر را دارند.

$$2Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3\downarrow + 2H_2O \quad (۳)$$

$$Mg(HCO_3)_2+Ca(OH)_2\rightarrow Mg(OH)_2\downarrow+CaCO_3\downarrow+H_2O+CO_2\downarrow \quad (۴)$$

بااین‌وجود بخشی از سختی که همان سختی غیرکربناته می‌باشد در بستر آب باقیمانده است. این سختی بر پایه افزایش تلفیقی آهک و سودا اش طبق واکنش‌های ۵ الی ۸ به کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم تبدیل می‌شود.

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow + CaSO_4 \quad (۵)$$

$$MgCL_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2\downarrow + CaCL_2 \quad (۶)$$

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3\downarrow + Na_2SO_4 \quad (۷)$$

$$CaCL_2 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3\downarrow + 2NaCL \quad (۸)$$

تشکیل کریستال $CaCO_3$ در گستره pH ۸/۸ تا ۹/۵ به‌خوبی صورت می‌گیرد. کاتیون کلسیم Ca^{2+} در سیستم پلت راکتور تا کمتر از ۱۰ میلی‌گرم در لیتر حذف می‌شود. اما در این محدوده pH کاتیون منیزیم Mg^{2+} اصلاً حذف نمی‌شود. بعد از تزریق سود NaOH (۶ تا ۱۲ میلی‌مول در لیتر) در ۱۰/۵<pH<۱۱/۵، Mg^{2+} تا کمتر از ۳۰ میلی‌مول در لیتر حذف می‌شود و باعث می‌شود $Mg(OH)_2$ کلوئیدی تشکیل شود که ته نشست ضعیفی دارد و با فیلتراسیون ماسه‌ای که معمولاً در قسمت خروجی پلت راکتورها تعبیه می‌شوند، به‌خوبی باقیمانده آن حذف می‌شود. نکته حائز اهمیت در کاربرد فیلترهای شنی ضرورت بهره‌گیری از فیلترهای جریان پیوسته است. چراکه ماهیت ذرات فلوکوله هیدروکسید منیزیم چسبنده است و منجر به چسبیدن ذرات ماسه فیلتر در طی زمان می‌شود (هاشم‌زاده، ۱۳۹۰).

• روش‌های سختی‌گیری

از متداول‌ترین روش‌های حذف سختی به‌کارگیری از آهک و سود می‌باشد. این فرآیند به روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. فرآیند متداول سختی‌گیری شامل فرآیندهای انعقاد، تجمع، جداسازی آب و لجن، فیلتراسیون و تغلیظ لجن می‌باشد، درحالی‌که در فرآیند نوین سختی‌گیری در راکتور دانه‌ای بستر سیال تنها فرآیندهای سختی‌گیری و فیلتراسیون را خواهیم داشت. در راکتور دانه‌ای با به‌کارگیری دانه‌ها سیال

شده و با ایجاد بستری بسیار گسترده برای رسوب‌گذاری که به حذف سریع رسوبات از محلول اشباع می‌شود، بازده سختی‌گیری به شدت افزایش می‌یابد. سطح ایجاد شده در این روش بسیار زیاد و معادل $۴۰۰۰ m^2/m^3$ می‌باشد. در راکتورهای دانه‌ای شانس حذف فلزات سنگین علاوه بر کلسیم و منیزیم نیز وجود دارد (فرهمند و فریور، ۱۳۹۰).

روش‌های متداول سختی‌گیری شامل مراحل انعقاد، تجمع و ته‌نشینی است. در این روش مقادیر زیادی لجن آبدار تولید می‌شود که برای آب‌گیری باید به واحد آب‌گیری لجن و بسترهای لجن خشک‌کن برده شود، در هر صورت با هدررفت زیاد آب روبرو هستیم. درحالی‌که با جایگزینی چند فرآیند پیشین با فرآیند نوین سختی‌گیری بستر سیال علاوه‌بر کاهش هزینه‌ها دیگر لجنی وجود نخواهد داشت و تنها خروجی مازاد راکتور دانه‌ای، توده‌ای از دانه‌های خشک خواهد بود. دراین‌صورت نه تنها مشکلات لجن‌های متعارف فرآیندهای پیشین سختی‌گیری را ندارد، بلکه مصارف صنعتی نیز می‌توان برای آن متصور بود. جدول (۲) مقایسه فرآیندهای متداول سختی‌گیری و راکتور دانه‌ای ارائه شده است (فرهمند و فریور، ۱۳۹۰).

جدول ۲- مقایسه فرآیندهای متداول سختی‌گیری و پلت راکتور (فرهمند و فریور، ۱۳۹۰)

روش سختی‌گیری	هدررفت آب	سطح بستر لجن خشک‌کن	انرژی مصرفی	محیط زیست	دفع لجن
روش‌های متداول	همراه با لجن	برای آب‌گیری لجن	سیستم تغلیظ و آب‌گیری لجن	دفع مقدار زیاد لجن	زمین کشاورزی
پلت راکتور	ندارد	ندارد	پمپ شناورسازی بستر	بدون آلودگی	مصرف طیور و راه‌سازی

• واحد لاملا و فیلتراسیون

آب خروجی از واحد پلت راکتور باتوجه‌به تزریق آهک، کدورت بسیار بالایی دارد. برای حذف بخشی از این کدورت، قبل از انتقال آب به واحد فیلتراسیون، واحد ته‌نشینی[۴] پیش‌بینی شده‌است (قوی‌پنجه و احسانی، ۱۳۹۲). در صورت استفاده از آهک پس از مرحله سختی‌گیری نیاز به فیلترسازی آب وجود دارد که در صورت استفاده از سود با روی، فیلترها کاهش می‌یابد ولی شوری آب افزایش می‌یابد. برای حذف کلسیم به راکتوری با pH بالای ۸ و برای حذف منیزیم به pH بالای ۱۰ نیاز داریم. در صورت کارکرد راکتور در pH بالا باتوجه‌به چسبندگی ناکافی رسوبات منیزیم به دانه‌های سیال شده، پس از راکتور برای حذف سرباره فرار کرده از راکتور نیاز به زلال‌سازی در واحد زلال‌ساز یا لاملا پیش از ورود به فیلتر می‌باشد. هوازنی آب‌های زیرزمینی پیش از ورود به راکتور با کاهش دی اکسید کربن از آب باعث افزایش راندمان و کاهش آهک مصرفی در راکتور می‌شود. pH آب خروجی از راکتور با تزریق گاز CO_2 یا تزریق اسید سولفوریک و یا HCl باید تنظیم شود. متداول‌ترین روش تنظیم pH تزریق گاز CO_2 می‌باشد که در صورت تزریق گاز کربنیک یک مرحله رسوب‌گذاری پس از آن را نیز خواهیم داشت و تزریق گاز CO_2 به بهبود شرایط بافری آب نیز می‌انجامد. این تنظیم pH پیش از ورود آب به فیلتر صورت می‌گیرد تا با انحلال رسوبات ریز ته‌نشین نشده از گرفتگی و تخریب فیلتر جلوگیری شود. در صورت تزریق اسید سولفوریک افزایش یون سولفات و در صورت تزریق HCl افزایش یون کلر را داریم (فرهمند و گیفانی، ۱۳۸۸).

• واحد فیلتر غشایی

حرکت آب‌های زیرزمینی از بین سازندهای مختلف زمین‌شناسی و همچنین قابلیت آب به‌عنوان یک حلال مناسب، سبب انحلال نمک‌های مختلف موجود در مسیر آب و افزایش املاح موجود در آن خواهد شد (اسداله فردی و همکاران، ۱۳۹۰). میزان بالای املاح که به‌صورت کاتیون‌ها و آنیون‌های یک یا چند ظرفیتی می‌باشند باعث بروز مشکلاتی چه در بعد صنعتی و چه در بعد مصارف عمومی خواهد شد (ضوابط فنی و بررسی و تصویب طرح های تصفیه آب شهری، ۱۳۷۱). به‌طورکلی در تصفیه آب، دو روش اصلی متعارف و نوین تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش متعارف تصفیه آب قادر به حذف املاح موجود در آب نمی‌باشد. لذا به‌این‌منظور از روش‌های نوین تصفیه آب استفاده می‌شود. از جمله روش‌های مذکور که جهت حذف TDS از آب مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از:روش الکترودیالیز، روش تبادل یونی و روش غشایی (ترابیان و قدیم‌خانی، ۱۳۸۶).

جهت حذف املاح آب و رساندن به حد استانداردهای مربوط به این پارامتر که تحت عنوان شوری نیز مطرح می‌شود، گزینه‌های مختلفی وجود دارد، از این میان فرآیندهای غشایی به‌دلایل اقتصادی و راهبری ساده آن در این زمینه موفقیت زیادی کسب نموده است (Crittenden و همکاران،۲۰۰۵). فرآیندهای غشایی به شیوه‌های جداسازی فیزیکی و شیمیایی املاح مختلف از حلال با استفاده از غشاهای نیمه تراوا اطلاق می‌شود. غشا به ماده‌ای اطلاق می‌شود که از یک دیواره نازک تشکیل شده است و قادر به ایجاد مقاومت انتخابی در برابر انتقال ترکیبات مختلف یک سیال می‌باشد که با این عمل سبب جداسازی بعضی از مواد محلول یا معلق از سیال می‌شود (غلامی،۱۳۸۶).

چهار نوع غشاهای صافسازی تحت فشار در تصفیه آب و فاضلاب کاربرد دارند. این تقسیم‌بندی براساس اندازه منافذ آن‌ها می‌باشد و عبارتند از: میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس (Mnif و همکاران، ۲۰۰۷).

ظرفیت واحد فیلتر غشایی تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند ۲۲۰ لیتر در ثانیه بوده و به‌منظور کاهش میزان جامدات محلول TDS و تعدیل غلظت سدیم و سولفات موجود در آب در نظر گرفته شده

است. این تصفیه‌خانه به‌صورت Hybrid multistage طراحی شده و شامل سه بخش اصلی زیر می‌باشد که مطابق شکل (۳) ارائه شده است(قوی پنجه و احسانی، ۱۳۹۲).

- اسمز معکوس فشار بالا (نمک‌زدایی آب دریا)[۵]
- اسمز معکوس فشار پایین (نمک‌زدایی آب‌های لب‌شور)[۶]
- اسمز معکوس فشار بسیار پایین یا نانو فیلتراسیون[۷]

دبی ورودی به واحد اسمز معکوس تصفیه‌خانه در ابتدا وارد بخش نانو ممبران شده، در این بخش آنیون‌ها و کاتیون‌های چند ظرفیتی از دبی ورودی حذف می‌شود. محصول تولیدی این بخش، جهت حذف آنیون‌ها و کاتیون‌های تک‌ظرفیتی به بخش B-RO انتقال می‌یابد، خروجی آب این واحد دارای حداقل میزان TDS خواهد بود. باتوجه‌به کمبود جدی منابع آبی در منطقه شهرستان بیرجند و

نتایج و بحث

• مواد شیمیایی مصرفی تصفیه‌خانه آب بیرجند

مواد شیمیایی مصرفی در واحدهای پلت راکتور و فیلتر غشایی تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند به همراه هدف و میزان تزریق در جدول (۳) ارائه می‌شود.

جدول ۳- مواد شیمیایی مصرفی در تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند

ماده شیمیایی مصرفی	هدف	میزان تزریق (mg/Lit)
سدیم بی‌سولفیت	تزریق به‌واحد سختی‌گیر جهت احیاکروم	۵۰
آهک	تزریق به واحد سختی‌گیر	۲۷۰
سود	تزریق به واحد سختی‌گیر	۱۰۴
آنی‌اسکالانت	جلوگیری از تشکیل رسوب در سطح ممبران اسمز معکوس	۷
کلر	ضدعفونی	۱/۴۲
اسید	تزریق به خروجی لاملا و ROبرای تنظیم pH	------

• هزینه‌های تصفیه‌خانه آب بیرجند

به‌طورکلی هزینه‌های تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند را می‌توان در قالب ۳ بخش مجزا به شرح ذیل تقسیم‌بندی نمود:

۱- سرمایه‌گذاری اولیه و ساخت تصفیه‌خانه

۲- هزینه‌های استهلاک، تعمیر و نگهداری سالانه

۳- هزینه‌های راهبری ماهیانه شامل هزینه مواد شیمیایی مصرفی، نیروی انسانی، برق مصرفی و ...

۱- سرمایه‌گذاری اولیه:

عملیات اجرایی ساخت تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند در سال ۱۳۸۶ در زمینی به مساحت پنج هکتار آغاز و در سال ۱۳۹۴ به بهره‌برداری رسیده است. به نقل از گزارشات شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، هزینه پروژه آبرسانی به شهر بیرجند ۶۲ میلیارد تومان می‌باشد که از این مبلغ ۲۳ میلیارد تومان در اجرای تصفیه‌خانه آب شرب، ۳۳ میلیارد تومان خطوط انتقال آن و مبلغ ۶ میلیارد تومان در طرح انتقال آب از سربیشه به بیرجند هزینه شده است.

۲- استهلاک، تعمیر و نگهداری سالانه:

باتوجه‌به محاسبات انجام‌شده و هزینه سرمایه اولیه ۲۳۰ میلیارد ریالی ساخت تصفیه‌خانه و در نظرگرفتن هزینه‌های استهلاک، تعمیرات و نگهداری و تعویض ممبران‌ها (هر ۴ سال یک‌بار) به‌اندازه ۱۵ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های استهلاک، تعمیر و نگهداری سالانه تصفیه‌خانه حدود ۸ میلیارد ریال برآورد شد.

۳- راهبری ماهیانه:

هزینه‌های راهبری ماهانه تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند شامل هزینه‌های نیروی انسانی، مواد شیمیایی مصرفی، برق مصرفی و ... می‌باشد، درصورتی‌که تصفیه‌خانه با تمام ظرفیت ۶۴۰ لیتر در ساعت در مدار باشد برابر ۵۹۹۱ میلیون ریال برآورد شده است. ریز هزینه‌های راهبری ماهیانه به شرح جداول (۴، ۵ و ۶) ارائه شده است.

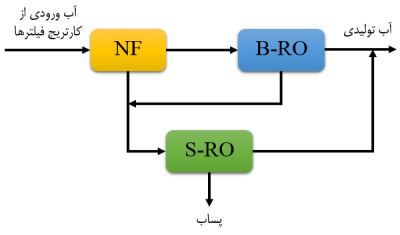
جدول ۴- هزینه ماهیانه نیروی انسانی

تعداد نیروی انسانی	حقوق ماهیانه (میلیون ریال)	کل هزینه نیروی انسانی(میلیون‌ریال)
۱۵	۲۰	۳۰۰

جدول ۵- هزینه برق مصرفی در ماه

قرارداد (کیلووات‌ساعت)	قیمت واحد (کیلووات)	کیلووات مصرفی در ماه	قیمت کل (میلیون ریال)
۶۵۰	۴۷۲	۱۴۴۰۰۰	۶۸

پایین بودن راندمان آبی سیستم‌های مبتنی بر ممبران‌ها، این واحد به‌صورت Hybrid Multistage طراحی شده است. به‌این‌منظور پساب بخش نانو فیلتر پس از اختلاط با پساب بخش B-RO جهت تصفیه ثانویه به بخش S-RO جهت حذف کلیه پارامترهای ناخواسته هدایت می‌شود (قوی‌پنجه و احسانی، ۱۳۹۲).



شکل ۳ – دیاگرام جریان در بخش های اصلی واحد فیلتر غشایی

جدول ۶- هزینه مواد شیمیایی مصرفی در ماه

ماده شیمیایی	میانگین تزریق (mg/lit)	میزان مصرف (Kg)	قیمت واحد (ریال بر کیلوگرم)	قیمت کل (میلیون ریال)
سدیم بی‌سولفیت	۵۰	۵۴۴۳۲	۳۶۰۰۰	۱۹۶۰
آهک	۲۷۰	۲۹۳۹۳۳	۴۰۰۰	۱۱۷۶
سود	۱۰۴	۱۱۳۲۱۹	۱۴۰۰۰	۱۵۸۵
آنتی‌اسکالانت	۷	۳۹۹۲	۲۲۲۰۰۰	۸۸۶
کلر	۱/۴۲	۲۰۴۳	۸۰۰۰	۱۶
		هزینه کل		۵۶۲۳

هزینه‌های تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند در سه بخش سرمایه اولیه، استهلاک، تعمیر و نگهداری و راهبری ماهانه برآورد شد. سرمایه اولیه احداث تصفیه‌خانه ۲۳۰ میلیارد ریال بوده و سایر هزینه‌های راهبری و نگهداری هر سال حدود ۸۰ میلیارد ریال می‌باشد. این تصفیه‌خانه برای شهروندان محترم شهر بیرجند احداث شده است و مطابق آخرین آمار شرکت آب و فاضلاب استان خراسان جنوبی، شهر بیرجند دارای ۵۲۶۷۶ مشترک آب می‌باشد. با توجه به هزینه یک سیستم تصفیه آب خانگی که معادل ۷۰۰۰ هزار ریال می‌باشد، اگروزارت نیرو به‌جای احداث این تصفیه‌خانه برای هر یک از مشترکین یک عدد سیستم تصفیه آب خانگی تهیه کرده و در اختیار مشترکین قرار داده بود، هزینه این اقدام حدود ۳۶۸ میلیارد تمام می‌شد. این مبلغ معادل سرمایه اولیه ساخت تصفیه‌خانه و هزینه راهبری و نگهداری ۲۱ ماه تصفیه خانه آب شرب برآورد شد.

پی‌نوشت

1- Reverse Osmosis
2- Reactor Pellet
3- Fluidized Bed Crystallization
4- Lamella
5- Sea Water Reverse Osmoss Membrane (S-RO)
6- Brakish Water Reverse Osmoss Membrane (B-RO)
7- NanoFilteration Membrane (NF)

منابع

اسداله فردی، غ.ر.، رضوانی، ع.، جمالی، ی.ا.، قدیم خانی، ع. و قیاسی، ب. ۱۳۹۰. بررسی روش غشایی در حذف کل مواد جامد از آب شرب شهر بیرجند، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

ترابیان، ع. و قدیم‌خانی، ع.ا. ۱۳۸۶، طراحی و راهبری جامع تأسیسات تصفیه آب، انتشارات دانشگاه تهران.

ضوابط فنی و بررسی و تصویب طرح‌های تصفیه آب شهری. ۱۳۷۱. نشریه شماره ۳-۱۲۱، سازمان برنامه و بودجه.

غلامی، م. ۱۳۸۶. کاربرد فناوری غشا جهت حذف رنگ از فاضلاب نساجی، پایان‌نامه دکتری بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران.

فرهمند، ع. و فریور، م. ۱۳۹۰. جایگزینی پساب سختی‌گیری با پسماند خشک دارای کاربرد صنعتی، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، زنجان.

فرهمند، ع. و گیفانی، ن. ۱۳۸۸. سختی‌گیری با استفاده از راکتور دانه ی بستر سیال در حذف کروم و منیزیم از آب شهر بیرجند و اثرات آن در کاهش پساب، سومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد اصلاح الگوی مصرف، تهران.

قوی‌پنجه، م. و احسانی، ع. ۱۳۹۲. نگرشی بر شاخص‌های تصفیه‌خانه آب شرب شهر بیرجند (نخستین تصفیه‌خانه شیمیایی در خاورمیانه)، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

هاشم‌زاده، م. ۱۳۹۰، کاربرد Pellet Reactor در حذف ترکیبی سختی و کروم، کنفرانس بین‌المللی آب و فاضلاب با رویکرد خصوصی‌سازی، تهران.

Crittenden J.C., Rhodes T.R., Hand D.W., Howe K.J. and Tchobanoglous G. 2005. Water Treatment: Principles and Design, 2nh edition, John Wiley & Sons Ins.

Dijk J.C. van., Graveland A., De Moel P.J. de. and Oomen J.H.C.M. 1983. Developments in water softening by means of pellet reactor, Journal AWWA, p.619-625.

Mnif A., Bouguecha S., Hamrouni B. and Dhahbi M. 2007. Coupling of Membrance Processes for Brackish Water Desalination, 203(1-3).

Todd I.A., Verdoes D., Sijstermans L., Meter J.V.D. and Hanemaaijer J.M.H. 1994. The removal of strontium and calcium from aqueous Streams, Canadian Insitute of Mining, Metallurgy and Petroleum, p.181-195.