Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 4, No. 3, PP. 50- 60, Autumn 2019
DOI: 10.22112/jwwse.2019.187998.1159

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال چهارم، شماره ۳، صفحات ۵۰-۶۰، پاییز ۱۳۹۸

Technical Paper

Studying the Process of Sugar Extraction from Sugarcane and Proposing Solutions to Reduce Water Consumption through Water Reuse

Hashem Asgharnejad[1] and Mohammad-Hossein Sarrafzadeh[2*]

1- M.Sc., Chemical Engineering-Biotechnology, UNESCO Chair on Water Reuse, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, UNESCO Chair on Water Reuse, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
* Corresponding author, Email: sarrafzdh@ut.ac.ir

Received: 08/06/2019
Revised: 01/09/2019
Accepted: 02/09/2019

Abstract

About 95 billion m^3 of water is used all over the country every year, 1.8% of which is consumed in industrial sector. Sugar factories are among consumers with high water demands. In Iranian sugar factories, between 22 and 27 m^3 of water is used per ton of sugarcane which is much higher than the world's average which is about 11 m^3 per sugarcane ton. Besides, the organic load in the wastewater of these factories is high. Therefore wastewater treatment and water reuse are essential for such factories. Water reuse is an effective solution to reduce the consumption of freshwater entry and prevent the environmental consequences. This study introduced a process of sugar production from sugarcane and analyzed the water consumption and feasibility of water reuse in different sections of the production process. Four main methods for reducing water consumption and wastewater production are: rainwater harvesting, using the humidity of sugarcane, water recycle and wastewater treatment and water reuse which are studied and important parameter in each case are introduced. In case of wastewater treatment, application of new methods of treatment such as aerobic granulation will be most efficient.

Keywords: Sugar Factory, Sugarcane, Treatment, Wastewater, Water, Water Reuse.

مقاله ترویجی

مطالعه فرآیند استخراج شکر از نیشکر از منظر مصرف آب و ارائه راه‌کارهایی به‌منظور کاهش مصرف با استفاده از منابع آب نامتعارف

هاشم اصغرنژاد[1] و محمدحسین صراف‌زاده[2*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشیار، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: sarrafzdh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

چکیده

سالانه تقریباً ۹۵ میلیارد مترمکعب آب در سطح کشور به مصرف می‌رسد که از این مقدار حدود ۱/۸٪ آن، در بخش صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کارخانجات قند و شکر جزء پرمصرف‌ترین کارخانجات از منظر مصرف آب به‌شمار می‌آیند. در کارخانجات قند و شکر ایران، به‌طور تقریبی به‌ازای هر تن نیشکر ورودی بین ۲۲ تا ۲۷ مترمکعب آب به مصرف می‌رسد، در حالی‌که این رقم برای کارخانجات قند و شکر در سطح دنیا، حدود ۱۱ مترمکعب به‌ازای هرتن نیشکر است. از سوی دیگر، بار آلی موجود در فاضلاب این کارخانه‌ها بسیار زیاد است. لذا تصفیه فاضلاب به‌منظور کاهش بار آلی و بازچرخانی آب امری ضروری است. با استفاده از بازچرخانی آب، میزان آب تازه مصرفی در این واحدها می‌تواند تا حد بسیار زیادی کاهش یافته و از عواقب زیست‌محیطی ناشی از این فاضلاب‌ها جلوگیری شود. در تحقیق حاضر، ضمن معرفی فرآیند تولید شکر از نیشکر و بررسی میزان آب مصرفی در بخش‌های مختلف این فرآیند، امکان کاهش مصرف آب و تولید فاضلاب در یک واحد صنعتی تولید شکر از نیشکر از جنبه‌های گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرد. چهار روش عمده برای کاهش مصرف آب و تولید فاضلاب در کارخانجات قند و شکر عبارتند از: جمع‌آوری آب باران، استفاده از آب موجود در نیشکر، بازچرخانی آب و تصفیه فاضلاب و بازیافت پساب که هر مورد مطالعه و بررسی شده و در هر مورد راه‌کارها و پارامترهای مهم، معرفی می‌شود. در بخش تصفیه فاضلاب، استفاده از روش‌های نوین تصفیه نظیر گرانول‌های هوازی به‌عنوان بهترین روش تصفیه خواهد بود.

کلمات کلیدی: کارخانه قندوشکر، نیشکر، آب؛ فاضلاب، تصفیه، بازیافت آب.

۱- مقدمه

صنایع تولید قند و شکر از منظر مصرف آب جزو پرمصرف ترین صنایع بوده و در نتیجه حجم قابل‌توجهی از فاضلاب نیز تولید می‌کنند. به‌دلیل وجود ترکیبات قندی زیاد در فاضلاب این کارخانه‌ها، میزان بار آلی و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) آن‌ها بسیار بالا بوده و این امر این فاضلاب‌ها را به مشکلاتی بزرگ برای محیط زیست تبدیل می‌کند (Kushwaha, 2015). علاوه‌بر این میزان مصرف زیاد آب در این صنایع هزینه‌های گزافی را بر واحد تولیدی تحمیل می‌نماید. طبق آمارهای ارائه‌شده توسط انجمن صنفی کارخانه‌های قند و شکر ایران، در سال ۱۳۹۸، ۴۴ واحد تولید قندوشکر فعال در سطح کشور وجود داشته که این واحدها حدود ۲ میلیون تن شکر در کشور تولیدشده که پیش‌بینی می‌شود برای تولید این مقدار شکر، به حدود ۶۰ میلیون مترمکعب آب تازه احتیاج باشد و ۳۸ میلیون مترمکعب نیز فاضلاب تولید شود که ارقام بسیار چشمگیری هستند. در این میان، هشت واحد صنعتی مبتنی‌بر نیشکر به‌عنوان ماده خام اولیه هستند که در مقایسه با واحدهای چغندری، به‌میزان آب کمتری احتیاج دارند. بنابراین تصفیه فاضلاب این کارخانه‌ها ضروری بوده و ضمن جلوگیری از آلودگی محیط زیست، امکان بازیافت آب و در نتیجه کاهش میزان آب تازه مصرفی در کارخانه را فراهم می‌آورد. خوراک اصلی در کارخانه‌های قند و شکر، چغندرقند یا نیشکر است. نوع خوراک تأثیر به سزایی در ساختار فرآیند و درنتیجه میزان آب مصرفی دارد (Bavar et al., 2018). در تحقیق حاضر، کارخانه تولید شکر از نیشکر مورد مطالعه قرار گرفته و ضمن معرفی فرآیند و بررسی میزان آب مصرفی در بخش‌های مختلف، مشخصات فاضلاب این کارخانه‌ها و روش‌های تصفیه آن‌ها و همچنین امکان بازیافت و بازچرخانی آب در بخش‌های مختلف، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲- فرآیند تولید شکر از نیشکر

فرآیند تولید شکر از ساقه‌های نیشکر شامل پنج مرحله‌ی اصلی است: آسیاب کردن، زلال‌سازی، تبخیر، تبلور و سانتریفیوژ (Pastor et al., 2000). در آسیاب، عمل استخراج شربت از نیشکر صورت می‌گیرد. در این مرحله، ساقه‌های نیشکر وارد آسیاب شده و شربت ساکاروز به‌عنوان محصول نهایی از آن خارج می‌شود. معمولا به‌منظور بالاتر رفتن راندمان استخراج، ساقه‌های نیشکر را پیش از ورود به آسیاب، خرد نموده و به تکه‌های کوچکتر تقسیم می‌کنند. در بهترین وضعیت کارکرد آسیاب، می‌توان تا بیش از ۹۵٪ از ساکاروز موجود در نیشکر را به‌صورت شربت، جدا نمود. پسماند جامد باقی مانده در این مرحله که با نام باگاس شناخته می‌شود نیز می‌تواند به‌عنوان سوخت بویلر در مرحله تبخیر به‌کار رفته یا به‌عنوان جاذب در فرآیند تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرارگیرد. شربت تولید شده در این مرحله که به‌آن شربت خام نیز اطلاق می‌شود، به رنگ سبز تیره بوده و pH آن حدود ۴/۵ است. لذا باید وارد واحد زلال سازی شود تا ضمن کاستن کدورت، pH آن نیز تنظیم گردد.

در مرحله زلال‌سازی پس از حرارت دادن شربت خام تا دمای ۶۵ الی ۷۵ درجه سانتیگراد، به آن محلول‌های فسفریک اسید، گوگرد دی‌اکسید و آب‌آهک افزوده می‌شود. افزودن این محلول‌ها به‌منظور از بین بردن برخی ناخالصی‌های معلق در محلول شربت و کاهش کدورت آن است. شربت حرارت داده شده وارد یک زلال ساز پیوسته شده و شربت زلال از آن جدا می‌شود. پسماند جامد نیز که با نام عمومی لجن شناخته می‌شود وارد فیلترهای دوار تحت خلأ شده و پس از حذف ترکیبات ناخواسته آن، به‌عنوان کود طبیعی به زمین کشت بازگردانده می‌شود. شربت زلال شده در این مرحله حاوی حدود ۸۵٪ آب است. از این‌رو و به‌منظور تغلیظ، وارد مرحله تبخیر می‌شود.

حدود ۷۵٪ از آب موجود در شربت، طی مرحله تبخیر از آن جدا می‌شود. مرحله تبخیر معمولاً شامل چهار بویلر تحت خلأ است که به‌صورت سری اتصال یافته‌اند. محلولی که از آخرین بویلر خارج می‌شود معمولا شامل ۶۰٪ جامد قندی و ۴۰٪ آب است. پیش از ارسال شربت تغلیظ شده به‌مرحله تبلور، آخرین مرحله حذف ناخالصی توسط محلول گوگرد دی‌اکسید صورت می‌پذیرد.

در مرحله تبلور، محلول شربت تا رسیدن به نقطه‌ی اشباع، تبخیر می‌شود. در این نقطه دانه‌های شکر به‌منظور هسته‌زایی به ظرف بلورساز افزوده شده و هم‌زمان با تبخیر آب، میزان شربت بیشتری به ظرف اضافه می‌شود. رشد بلورها تا زمانی ادامه می‌یابد که ظرف بلورساز پر شود. بلورهای تولید شده در مرحله تبلور، برای دانه‌بندی و یکسان‌سازی دانه‌های شکر، وارد دستگاه سانتریفیوژ می‌شوند. در این مرحله، دانه‌بندی مطلوب ذرات شکر انجام شده و ذرات با اندازه نامطلوب به مرحله تبلور بازگردانده می‌شوند (Gunjal & Gunjal, 2013). شکل ۱، شمایی از فرآیند تولید شکر را نشان می‌دهد.

۳- مصرف آب کارخانه

جریان‌های آب ورودی به فرآیند، در شکل ۱ مشخص شده‌اند. موارد مصرف آب در یک واحد تولید شکر از نیشکر به‌طورکلی به پنج گروه تقسیم می‌شوند:

۱) آب جذب (Imbibition Water) که حین مرحله آسیاب کردن و استخراج عصاره ساکاروز، افزوده می‌شود. بیشترین میزان مصرف آب در فرآیند نیز مربوط به همین آب جذب است که به‌منظور

بهبود عملکرد استخراج، به فرآیند اضافه می‌شود. ضمن این‌که در مرحله استخراج، مقداری آب نیز به‌منظور خنک نمودن تجهیزات به سامانه افزوده می‌شود (Willart et al., 2010).

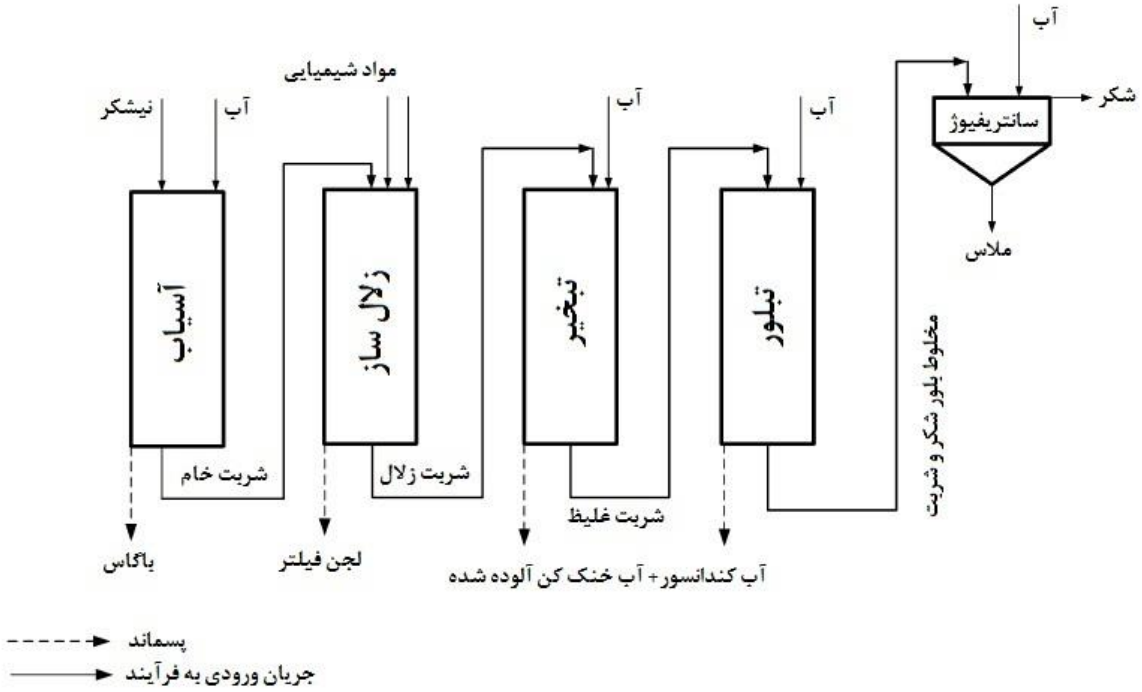
۲) ورود آب طی مرحله تبخیر، به‌منظور خوراک کندانسورهای بارومتریک صورت می‌پذیرد. البته معمولا آب کندانسورها بازچرخانی شده و ورود آب تازه در این مرحله صرفاً به‌عنوان آب جبرانی بوده و حجم بالایی نخواهد داشت.

۳) طی مرحله تبلور و به‌منظور خنک نمودن تانک‌های حاوی مخلوط شربت و بلور شکر، باید آب به سامانه وارد شود.

۴) ورود آب به‌منظور تأمین و تولید توان به‌عنوان مثال در پمپ‌های خلأ یا به‌عنوان آب‌های جبرانی در بویلرها یا تأمین آب مورد نیاز برای عملکرد مناسب اسکرابرهای خیس، مواردی هستند که در نقاط مختلف فرآیند، نیاز به آب وجود دارد.

۵) مصارف متفرقه آب که شامل مواردی چون شست‌وشوی محیط کارخانه، آب سرویس‌های بهداشتی و یا آب مورد نیاز برای تهیه محلول‌های شیمیایی می‌شود (Ramjeawon, 2000).

از بین مصارف فوق، بیشترین میزان مصرف آب مربوط به آب جذب است که حین مرحله استخراج به آسیاب افزوده می‌شود و به‌طور متوسط مقداری حدود ۰/۶۳ مترمکعب به ازای هر تن نیشکر ورودی خواهد داشت. در جدول ۱، مقادیر متوسط آب مصرفی در یک کارخانه تولید شکر از نیشکر به‌صورت تقریبی ذکر شده است.



شکل ۱- فرآیند تولید شکر از نیشکر (Ingaramo et al., 2009)

جدول ۱- مقادیر متوسط آب مصرفی در بخش های مختلف فرآیند (Ramjeawon, 1995)

جریان آب	مقدار متوسط تقریبی (m^3/tc)
آب جذب و خنک‌کننده آسیاب	۰/۶۳
آب خنک‌کننده تجهیزات	۰/۱۰
آب خنک کننده بخش تبلور	۰/۱۵
آب جبرانی بویلرها	۰/۱۳
خوراک اسکرابر*	۱/۲
آب جبرانی اسکرابر	۰/۰۷
خوراک کندانسورها	۰/۵
آب جبرانی کندانسورها*	۸
مجموع	۱۰/۷۸

* بخش عمده آن از طریق بازچرخانی آب کندانسورها و برج‌های خنک‌کننده تأمین می‌شود.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود به‌ازای هر تن نیشکر ورودی به کارخانه، حدود ۱۱ مترمکعب آب نیز به مصرف می‌رسد که از این منظر صنعت تولید شکر جزو صنایع نسبتاً پرمصرف است. برای کاهش میزان آب مصرفی در کارخانه قند و

شکر راه‌کارهای متفاوتی پیشنهاد شده که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود.

۳-۱- جمع آوری آب باران

آب باران منبع آبی ارزشمند برای عمده صنایع بوده و دسترسی به آن ساده است. ضمن این‌که مقدار کم نمک‌های محلول در آن، آن‌را برای استفاده در صنایع بسیار مناسب می‌سازد. در فصولی که بارش باران‌های موسمی زیاد است، جمع‌آوری و تصفیه ساده آب باران با استفاده از فیلتراسیون، بهره‌وری واحد صنعتی را تا حد بسیار زیادی افزایش خواهد داد (رضایی و صراف زاده، ۱۳۹۳). مجموع حجم آب بارانی که ممکن است جمع آوری شود نیز با دردست داشتن سطح زمین کارخانه و میانگین مقدار بارش سالانه در منطقه، قابل محاسبه و برنامه‌ریزی خواهد بود. از آن‌جایی‌که آب باران تصفیه شده میزان جامدات محلول بسیار پایینی داشته و هم‌چنین سختی و هزینه‌های تهیه‌ی آن بسیار کم است، لذا به‌منظور استفاده به‌عنوان آب ورودی بویلرها، آب خنک‌کننده و آب جبرانی فرآیند، بسیار مناسب خواهد بود. یکی از نگرانی‌های اصلی پیرامون استفاده مجدد از آب باران جمع‌آوری شده، آلودگی‌های فیزیوشیمیایی یا میکروبی‌ای است که این آب معمولا به‌همراه داشته و در مواردی که وارد چرخه غذایی و آشامیدنی انسان شود می‌تواند تاثیرات منفی روی سلامت داشته باشد (Gikas and Tsihrintzis, 2012).

در یک مطالعه انجام شده بر روی آب باران جمع‌آوری شده در نیوزیلند برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین سرب، مس و روی، مشاهده شد که به‌ترتیب ۱۴٪، ۲٪ و ۱٪ از هرکدام از این فلزات در نمونه‌های آب باران آزمایش شده وجود داشته و این امر موجب می‌شود که استفاده از آن به‌منظور مصارف شرب یا جایی که به‌طور مستقیم با مواد غذایی در تماس است (نظیر کارخانه‌های مواد غذایی مثل قندوشکر) امکان‌پذیر نباشد (Simmons et al., 2001). وجود این یون‌های فلزی می‌تواند به مشخصات محلی که به جمع‌آوری و نگه‌داری آب باران اختصاص داده شده یا نقاطی که برداشت آب باران از آن‌جا صورت گرفته (بام، زمین و ...) و هم‌چنین شدت و مدت بارش و میزان آلاینده‌های موجود در هوای منطقه بستگی داشته باشد (Farreny et al., 2011; Förster, 1996)، هرچند که برخی مطالعات دیگر اثر ویژگی‌های محل جمع‌آوری را بی‌تاثیر می‌دانند (Peters et al., 2008).

آلودگی‌های میکروبی پارامتر دیگری است که باید در مورد آب باران مورد بررسی قرار گیرد. زیرا اغلب به‌دلیل آلودگی‌های محل جمع‌آوری و میکروارگانیسم‌های موجود و فعال در هوا، کیفیت آب باران ازنظر میکروبی دستخوش تغییر قرار می‌گیرد (Evans et al., 2007). جدول ۲ مشخصات کیفی آب باران جمع‌آوری شده را از نظر شاخص‌های میکروبی در کشورهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات میکروبی آب باران جمع‌آوری شده در کشورهای مختلف (Ahmed et al., 2011)

کشور	*C.perfringens*	*enterococci*	*E. coli*	کلیفرم‌های مدفوعی	کل کلیفرم‌ها	کل باکتری‌ها
استرالیا	۴۹	۸۲	۵۷	۷۸	۹۱	۱۰۰
کانادا	-	-	-	۱۴	۳۱	-
دانمارک	-	-	۷۹	-	-	۱۰۰
نیجریه	-	-	-	-	۱۰۰	۱۰۰
کره جنوبی	-	-	۷۲	-	۹۲	-
زامبیا	-	-	-	۱۰۰	۱۰۰	-
امریکا	-	-	۳	-	۹۳	۱۰۰

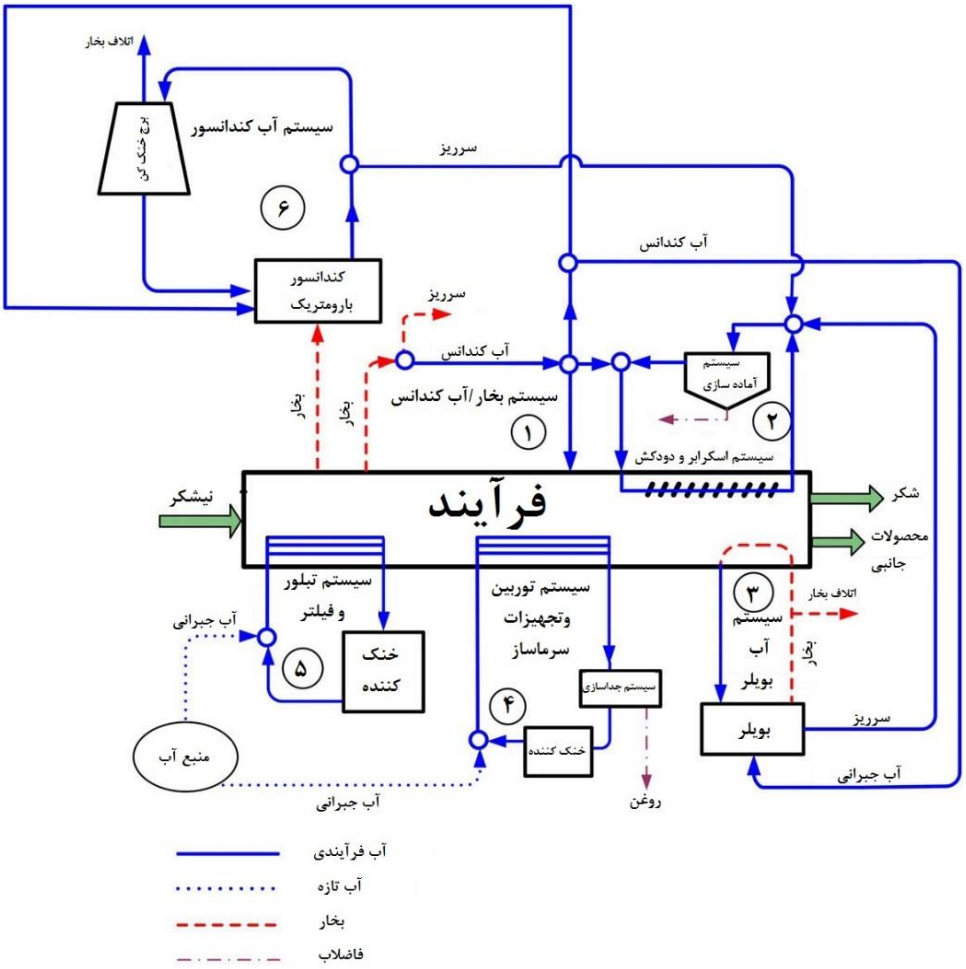
به‌منظور تصفیه آب باران برای استفاده مجدد، روش‌های مختلفی نظیر فیلتراسیون (Kim et al., 2005)، ته‌نشینی و شناورسازی (Martinson and Thomas, 2007) و فیلتراسیون غشایی (Teixeira and Ghisi, 2019) می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد. به‌منظور حذف میکروب‌ها و عوامل بیماری‌زا نیز روش‌هایی نظیر کلرزنی، استفاده از اشعه فرابنفش و ازن‌زنی امکان‌پذیر خواهد بود.

۳-۲- استفاده از آب موجود در نیشکر

ساقه‌های نیشکر ورودی به کارخانه به‌طور کلی شامل ۷۰٪ آب بوده که بخشی از این آب همراه خود نیشکر وارد فرآیند شده و لازمه فرآیند استخراج در آسیاب است. اما بخشی دیگر از این آب، جزو آب‌های مازاد بوده و امکان جداسازی و استفاده مجدد آن وجود دارد. به‌طور متوسط به ازای هر ۱۰۰ تن نیشکر، ۲۳/۲۳ تن آب مازاد در فرآیند، جداسازی می‌شود. این آب کندانس‌شده مازاد، دمایی بین ۷۵ الی ۸۰ درجه سانتیگراد داشته و به‌منظور استفاده برای ذوب نمودن برخی مواد، شست‌وشوی سامانه تبخیرکننده و فرآیندهای دمابالایی از این دست، مناسب است (Sapkal and Gunjal, 2004). علاوه‌بر این، این امکان نیز وجود دارد که با خنک‌کردن این آب، مجدداً آن را به سامانه بازگردانده و به‌عنوان آب تازه مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳- بازچرخانی آب

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده شد حجم قابل‌توجهی از آب در کارخانه قند و شکر به مصرف می‌رسد که بسیاری از این آب‌ها قابلیت بازچرخانی در سامانه را دارند. به‌طور کلی شش چرخه آب در فرآیند تولید شکر از نیشکر وجود دارد که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند (Zver and Glavič, 2005).



شکل ۲- چرخه‌های آب موجود در فرآیند (Ingaramo et al., 2009)

۳-۳-۱- چرخه ۱: سامانه بخار/آب کندانس

بخار تولید شده در واحد تبخیر و تبلور جهت تبادل گرمایی در مبدل‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب کندانس حاصل شده در این بخش کاربردهای فراوانی دارد که از جمله می‌توان به خیساندن نیشکر، شست‌وشوی شکر در سانتریفیوژ، شست‌وشوی ظروف بلورساز و... اشاره کرد. استفاده از این استراتژی بازچرخانی آب در بیشتر واحدهای استخراج شکر از نیشکر، امری متداول است. آب‌های کندانس اضافی که معمولا حاوی مقادیری شکر هستند به چرخه‌های ۲ ، ۳ یا ۶ وارد می‌شوند. بخشی از این آب کندانس نیز به منبع آب باز گردانده می‌شود (Ingaramo et al., 2009).

۳-۳-۲- چرخه ۲: سامانه اسکرابر و دودکش

فاضلاب خروجی از مرحله اسکرابر و دودکش بار آلی زیادی نداشته و با یک فیلتراسیون ساده قابل‌تصفیه و بازگردانی به سامانه خواهد بود. آب سرریزشده از بویلرها می‌تواند به‌عنوان آب جبرانی وارد این چرخه شود. فاضلاب ایجاد شده بر اثر فیلتراسیون به‌صورت لجن جامد بوده که باید از سامانه خارج شود (Ramjeawon, 2000).

۳-۳-۳- چرخه ۳: سامانه آب بویلر

بخار تولید شده در بویلر، برای تولید الکتریسیته به توربین تزریق شده و سپس به‌منظور تولید حرارت مورد نیاز سامانه، کندانس می‌شود. عمدتاً این آب کندانس، به بویلر بازگردانده می‌شود. وجود جریان سرریز به‌منظور حذف جامدات معلق موجود در آب بویلر است. در این مرحله مقداری آب نیز به‌عنوان آب جبرانی به سامانه افزوده می‌شود که می‌تواند از آب تازه یا خروجی آب چرخه ۱ تأمین شود (Ingaramo et al., 2009).

۳-۳-۴- چرخه ۴: سامانه توربین و تجهیزات سرماساز

به‌منظور جداسازی روغن از فرآیند، از تجهیزات سرماساز استفاده می‌شود. آبی که در این تجهیزات مصرف می‌شود امکان

بازچرخانی به سامانه را دارد. اتلاف آب در این چرخه معمولاً ناچیز بوده و فاضلاب اصلی خروجی از این مرحله، روغن است که آب آن به‌طور کامل جدا می‌شود (Ingaramo et al., 2009).

۳-۳-۵- چرخه ۵: سامانه تبلور و فیلتر

حجم آب خنک‌کننده در بلورساز و فیلتر جهت بازچرخانی، مناسب است. در این سامانه افزایش دمای آب خنک‌کننده کم بوده لذا می‌توان از اتلاف آب بر اثر تبخیر، صرف‌نظر نمود.

۳-۳-۶- چرخه ۶: سامانه آب کندانسور

مصرف‌کننده اصلی آب در یک واحد تولید شکر، کندانسورهای بارومتریک هستند. آب در این سامانه با استفاده از یک سامانه خنک‌کننده، قابل بازچرخانی خواهدبود. مقداری اتلاف ناشی از تبخیر نیز در خنک‌کننده‌ها وجود خواهد داشت (Ramjeawon, 2000). به‌منظور حذف ترکیبات جامد معلق، جریان سرریز از این سامانه به خارج وجود دارد. آب جبرانی وارد شده به این چرخه می‌تواند از منبع آب تازه یا آب کندانس چرخه ۱ تأمین شود.

۳-۴- بازیافت آب

با تصفیه فاضلاب و بازیافت پساب تصفیه‌شده می‌توان تا حد قابل‌توجهی، مصرف آب کارخانه را کاهش داد. فاضلاب کارخانه‌های شکر به‌دلیل داشتن بارآلی بالا و جامدات معلق امکان تخلیه مستقیم به محیط را نداشته و انجام تصفیه روی آن‌ها به‌منظور کاهش مقادیر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) و کل جامدات معلق (TSS) امری ضروری است. می‌توان با ارتقای سامانه تصفیه فاضلاب، کیفیت پساب خروجی را به‌حدی رساند که امکان استفاده مجدد در فرآیند را داشته باشد.

۳-۴-۱- مشخصات فاضلاب کارخانه

فاضلاب خروجی از کارخانه قند و شکر به‌طور کلی به سه دسته آب‌های خنک‌کننده و کندانسور، فاضلاب غلیظ و پسماندهای جامد تقسیم می‌شود که منشأ و مشخصات آن در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

جدول ۳- فاضلاب تولیدی در مراحل مختلف استخراج شکر از نیشکر (Jadhav et al., 2013; Ramjeawon, 2000)

خوراک ورودی	واحد	فاضلاب تولیدی	مشخصات کیفی
نیشکر	آسیاب	جامدات معلق و محتویات روغنی	BOD≈100 COD≈180 TSS≈700 mg/L pH≈7.5
شربت ساکاروز	مجموعه فرآیندی	آب شست‌وشو، فاضلاب فرآیند با BOD و TSS بالا	BOD≈1800 mg/L COD≈3400 mg/L TSS≈340 mg/L pH≈6
تفاله و نفت کوره	بویلر	فاضلاب حاصل از عملکرد اسکرابر	BOD≈200 mg/L COD≈1500 mg/L TSS≈1500 mg/L pH≈8-10

در یک کارخانه معمولی تولید قند و شکر بسته به نوع فرآیند تولید و این‌که تولید برمبنای چغندرقند یا نیشکر صورت گیرد، میزان فاضلاب تولید شده متفاوت خواهد بود. به‌طور میانگین می‌توان گفت که به‌ازای هر تن چغندرقند یا نیشکر ورودی، بین ۱ تا ۴ مترمکعب فاضلاب تولید خواهد شد (Jordening, 2009). در جدول ۴ مشخصات کیفی فاضلاب کارخانه قند و شکر هفت تپه ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات کیفی فاضلاب نهایی خروجی از کارخانه قند و شکر هفت تپه

پارامتر	مقدار
pH	۴-۵/۷
جامدات کل (mg/L)	۸۶۳-۳۵۲۴
جامدات معلق (mg/L)	۲۱۸-۸۰۵
جامدات فرار (mg/L)	۴۵۷-۲۱۹۸
BOD (mg/L)	۸۰۰-۴۵۰۰

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود میزان آلودگی فاضلاب خروجی این کارخانه بسیار زیاد بوده و برای استفاده مجدد، باید حتماً تحت تصفیه قرارگیرد. در حال‌حاضر روش‌های مرسومی که برای تصفیه فاضلاب صنایع قند و شکر مورد استفاده قرار می‌گیرند و جزو فرآیندهای مورد استفاده کارخانه هفت‌تپه نیز هستند، به‌طور عمده سه روش زیر هستند:

- استفاده از لاگون؛
- سیستم ترکیبی حوضچه هاضم و اکسیداسیون؛
- لجن فعال.

طبق مطالعات پیشین صورت گرفته، مشخص شد که راندمان حذف BOD در سیستم لاگون این کارخانه حدود ۵۳٪ بوده و به‌هیچ عنوان استانداردهای مطلوب را برآورده نمی‌کند. هم‌چنین مشکلاتی نظیر کمبود و گرانی زمین، بوی ناخوشایند، تجمع حشرات موذی و نیز عدم امکان بازیافت و بازچرخانی آب از جمله عواملی است که موجب محدودیت استفاده از لاگون‌ها شده است. درحالی‌که ترکیب حوضچه هاضم و اکسیداسیون این قابلیت را دارد که تا ۷۰٪ از BOD موجود در فاضلاب کارخانه قند را حذف نماید. در مورد حذف مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) موجود در جریان فاضلاب، استفاده از سیستم لجن فعال با توجه به هزینه‌ها بهترین فرآیند محسوب می‌شود. با توجه به این‌که فرآیند لجن فعال تا حدودی حذف BOD را تأمین می‌کند، ترکیب سیستم هاضم-اکسیداسیون با لجن فعال، فرآیندی است که تصفیه مطلوب را فراهم می‌نماید. اگرچه خروجی این سیستم تصفیه موجود نیز هنوز استانداردهای لازم برای بازیافت را تأمین ننموده و لازم است که فرآیندهای تصفیه تکمیلی برای ارتقای سطح کیفی پساب مورد بررسی قرارگیرند (کرد و همکاران، ۱۳۷۹).

۳-۴-۲- روش‌های تصفیه‌ی فاضلاب

به‌منظور کاهش میزان جامدات معلق موجود در فاضلاب، از روش‌های تصفیه فیزیکی نظیر غربال‌گری یا شناورسازی با استفاده از هوای فشرده یا روش های شیمیایی نظیر استفاده از لخته‌سازها استفاده می‌شود (Nacheva et al., 2009). اما به‌منظور کاهش بارآلی موجود در فاضلاب حتماً باید تصفیه بیولوژیک روی فاضلاب صورت‌گیرد. روش‌های تصفیه بیولوژیک به دو گروه عمده روش‌های هوازی و بی‌هوازی تقسیم می‌شوند.

۳-۴-۲-۱- روش بی‌هوازی

استفاده از روش بی‌هوازی به‌منظور تصفیه فاضلاب‌های بسیار غنی از مواد آلی، روشی متداول در صنعت به‌شمار می‌رود. روش بی‌هوازی نسبت به روش هوازی از مزایایی برخوردار است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از (Cakir and Stenstrom, 2005):

- نیاز به انرژی کمتر؛
- تولید متان حین تجزیه زیستی ترکیبات آلی؛
- تولید لجن جامد کمتر.

راکتورهای بی‌هوازی ناپیوسته، راکتورهای بی‌هوازی بستر ثابت (AFR)، راکتورهای بی‌هوازی بستر ثابت با جریان رو به بالا (UAFB) و UASB فرآیندهایی هستند که به‌طور عمومی در تصفیه بی‌هوازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول ۵ مشخصات روش‌های تصفیه بی‌هوازی مختلف، نشان داده شده است.

جدول ۵- روش‌های تصفیه بی‌هوازی (Kushwaha, 2015)

نوع راکتور	کاهش COD (٪)	زمان ماند هیدرولیک (HRT)
ناپیوسته	۶۴-۸۷	-
AFR	< ۹۰	۴ روز
UASB	> ۹۰	-
UAFB	> ۹۰	۲۰ ساعت

مراحل مختلف یک تصفیه بی‌هوازی عبارتند از: هیدرولیز یا تخمیر، فاز استات‌سازی و فاز متان‌سازی که به‌ترتیب در هر مرحله توسط باکتری‌های تخمیرکننده، باکتری‌های استات‌ساز و متانوژن ها صورت می‌پذیرند (Fito et al., 2018).

۳-۴-۲-۲- روش هوازی

تصفیه هوازی به‌طور عمومی به تخریب زیستی ترکیبات آلی در حضور اکسیژن اطلاق می‌شود. روش‌های متداول تصفیه هوازی شامل روش لجن فعال، فیلترهای چکنده و لاگون‌های هوادهی شده است (Aziz et al., 2019). تمامی اجزای فاضلاب کارخانه قند و شکر به جز روغن و گریس موجود در آن، زیست‌تخریب‌پذیر بوده و طی فرآیند تصفیه بی‌هوازی قابل حذف هستند. روغن و گریس به‌دلیل تولید اسیدهای چرب دراز زنجیر طی فرآیند هیدرولیز، موجب اختلال در فرآیند تولید متان می‌شوند. زیرا اسیدهای چرب دراز زنجیر اثر بازدارندگی بر روی عملکرد باکتری‌های متانوژن دارند (Hanaki et al., 1981).

استفاده از لاگون‌ها برای مدت بسیار زیاد در تصفیه فاضلاب کارخانجات صنایع غذایی به‌خصوص قند و شکر رایج بوده، زیرا از نظر اقتصادی فرآیندی کاملاً به‌صرفه است. اما نیاز به فضای زیاد و هم‌چنین تولید بوی آزاردهنده و جمع شدن حشرات، عواملی هستند که استفاده از این روش را با تردیدهایی مواجه ساخته و به تدریج منسوخ کرده است (Dilek et al., 2003).

لجن فعال، روش هوازی متداولی است که در تصفیه فاضلاب‌های با BOD نسبتاً بالا به‌کار می‌رود. در این‌روش، یک توده میکروبی اتوتروف که به‌نام عمومی لجن فعال شناخته می‌شود، وظیفه حذف بار آلی موجود در فاضلاب را برعهده دارد

(Shariati et al., 2013). اگرچه میزان حذف آلاینده‌ها در این‌روش نسبت به‌روش بی‌هوازی کمتر است ولی کمتر بودن زمان ماند و هم‌چنین هزینه‌های فرآیند، این روش را به‌روش متداول‌تری نسبت به‌روش‌های بی‌هوازی تبدیل کرده است. در جدول ۶ مقایسه‌ای بین روش‌های هوازی و بی‌هوازی تصفیه فاضلاب انجام شده است.

جدول ۶- مقایسه روش‌های تصفیه بیولوژیک فاضلاب (Kushwaha, 2015)

روش تصفیه	محدودیت‌ها	مزایا
بی‌هوازی	عدم حذف آلودگی‌های روغنی عدم امکان حذف کامل ترکیبات آلی نیاز به فرآیندهای تصفیه تکمیلی، بوی نامناسب و آزاردهنده	حجم راکتور پایین مصرف انرژی کمتر تولید متان تولید کمتر لجن امکان حذف جامدات فرار تا ۹۰٪
هوازی	تولید لجن بالا بوی نامناسب و آزاردهنده عدم امکان حذف کامل ترکیبات آلی	امکان کنترل بارگذاری آلودگی حذف عالی COD، BOD و نیتروژن نیاز به فضای کمتر

به‌منظور تکمیل فرآیند تصفیه فاضلاب، معمولاً پس از تصفیه بیولوژیک از برخی روش‌های فیزیوشیمیایی نظیر جذب سطحی، استفاده از فرآیندهای غشایی یا سانتریفیوژ استفاده می‌کنند. امروزه از روش‌های جدیدتری برای کاهش میزان BOD فاضلاب کارخانه‌های قند و شکر استفاده می‌شود. تصفیه الکتروشیمیایی و استفاده از گرانول‌های هوازی، جدیدترین روش‌هایی هستند که به‌منظور تصفیه فاضلاب‌های با BOD بالا به‌طور گسترده به‌کار گرفته می‌شوند.

۳-۴-۲-۳- روش تصفیه الکتروشیمیایی

استفاده از روش‌های بیولوژیک به‌دلیل نیاز به فضای زیاد و نیز هزینه بالای سرمایه‌گذاری چندان به‌صرفه نیست. لذا پژوهش‌ها به‌منظور یافتن روش‌های تصفیه جدید و بهینه، ادامه دارد. یکی از این روش‌ها، روش تصفیه‌ی الکتروشیمیایی است. در تصفیه الکتروشیمیایی فاضلاب کارخانه قند و شکر با استفاده از اعمال میدان الکتریکی بین یک جفت الکترود (کاتد و آند)، عمل جداسازی BOD از فاضلاب انجام می‌شود. ذرات آلودگی موجود در فاضلاب، بر اثر اعمال میدان الکتریکی، باردار شده و درنتیجه به‌طرف یکی از دو الکترود جذب و از جریان فاضلاب، جدا می شوند. در واقع از لخته‌سازی با استفاده از اعمال میدان الکتریکی برای جداسازی در این روش استفاده می‌شود. مزیت اصلی این روش، ساده بودن و عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته ضمن حذف مناسب BOD است (Sahu and Chaudhari, 2015). در جدول ۷ نتایج حاصل از تصفیه الکتروشیمیایی فاضلاب کارخانه قند و شکر، ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از تصفیه الکتروشیمیایی فاضلاب (Sahu and Chaudhari, 2015)

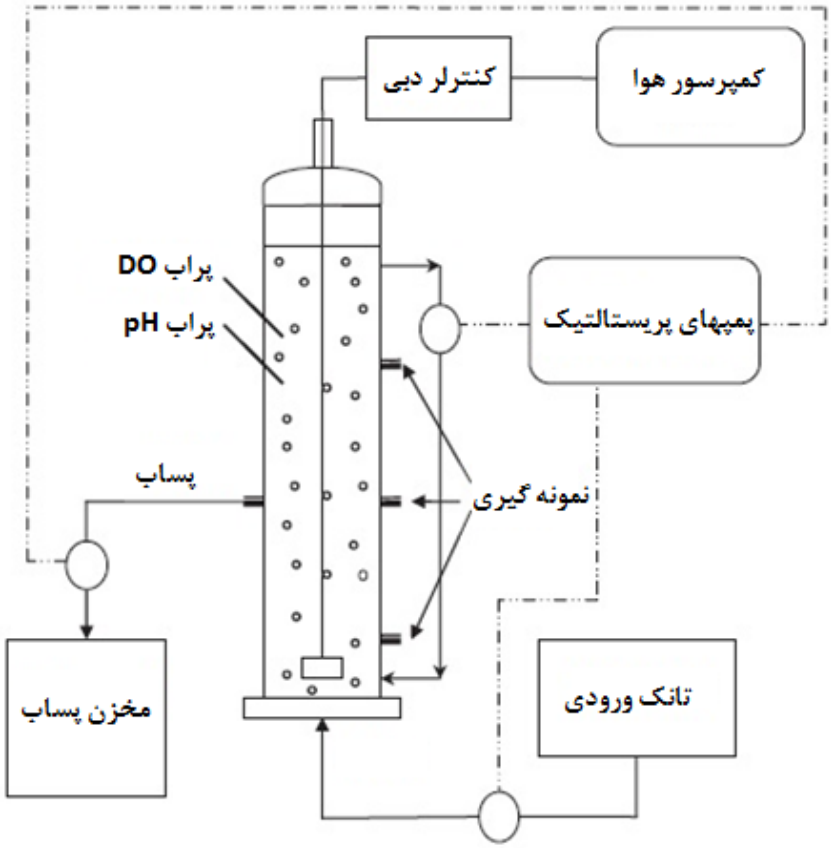
ردیف	ویژگی	قبل از تصفیه	بعد از تصفیه
۱	رنگ	زرد تیره	زرد روشن
۲	تغییرات pH	۵/۵	۸/۲
۳	سی او دی	۳۶۸۲	۶۰۵
۴	فسفات	۵/۹	۳/۱
۵	پروتئین	۴۳	۲۰
۶	جامدات کل	۱۹۸۷	۶۰۰
۷	جامدات معلق	۵۴۰	۱۹۰
۸	جامدات محلول	۱۴۴۷	۴۱۰
۹	کلراید	۵۰	۲۴
۱۰	سختی	۹۰۰	۴۶۰

تمام واحدها به‌جز رنگ و pH برحسب mg/L هستند.

۳-۴-۲-۴- روش تصفیه با استفاده از گرانول‌های هوازی

لجن گرانوله هوازی، در تصفیه فاضلاب‌های با BOD بالا و حاوی مواد سمی، بسیار موثرتر از سامانه‌های تصفیه‌ای لجن‌فعال سنتی عمل می‌کند (Duque et al., 2011). گرانوله کردن لجن فعال، این امکان را میسر می‌سازد که عمل حذف مواد آلی و نیتروژن و فسفر به‌طور هم‌زمان و در یک گرانول صورت‌پذیرد. به

بیان دیگر، هر یک از گرانول‌ها راکتورهای کوچکی هستند که عمل حذف آلاینده‌های آلی و همچنین نیتروژن و فسفر را انجام می‌دهند. سامانه راکتورهای ناپیوسته متوالی (SBR) با استفاده از لجن گرانوله هوازی، فناوری جدیدی است که ضمن کاهش چشمگیر زمان عملیات تصفیه، فضای مورد نیاز برای راه‌اندازی سامانه تصفیه‌ای را کاهش داده و برای فاضلاب‌های با BOD بالا، راندمان بالایی دارد (Hosseini et al., 2014). شکل ۳ شمای کلی این سامانه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شمای کلی سامانه تصفیه فاضلاب با استفاده SBR حاوی لجن گرانوله (Muda et al., 2010)

در مقایسه با فرآیند لجن فعال، لجن گرانولی دارای زمان ماند کمتر، سرعت بیشتر، هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر، تعداد مراحل میانی کمتر و درنتیجه راندمان بالاتری است. در یک کار تحقیقاتی بر روی فاضلاب یک کارخانه نساجی با استفاده از روش SBR و حاوی گرانول‌های لجن هوازی، میزان حذف آلودگی آلی از فاضلاب طی مدت زمان ۶۶ روز، تا بیش از ۹۰٪ انجام شده و حذف نیتروژن نیز به‌طور کامل در این مدت زمان انجام پذیرفته است (Muda et al., 2010).

بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که روش UASB در مقایسه با سایر روش‌ها، هزینه‌های بیشتری را به کل مجموعه فرآیند تحمیل می‌کند و البته راندمان بالاتری را نیز در اختیار قرار می‌دهد (احمدی و همکاران، ۱۳۸۴). البته هزینه‌های مربوط به سایر فرآیندهای تصفیه نیز بسته به ظرفیت واحد، نوع کاربرد مشخص شده برای پساب تصفیه شده و کیفیت پساب خروجی و هم‌چنین کیفیت فاضلاب خروجی متفاوت خواهد بود. بنابراین، بررسی دقیق اقتصادی مزیت بازیافت آب به استفاده از آب تازه، نیازمند ممیزی آب و فاضلاب هر کارخانه در مرحله نخست و مشخص نمودن کل آب مصرفی و فاضلاب تولیدی در هر بخش و کیفیت فاضلاب مورد نظر برای تصفیه و بازیافت است.

۴- نتیجه گیری

میزان بالای مصرف آب در کارخانه‌های قند و شکر به لحاظ اقتصادی راندمان تولید این محصولات را به‌شدت کاهش می‌دهد، ضمن این‌که مشکلات فراوانی را برای محیط‌زیست منطقه به‌وجود می‌آورد. لذا باید با استفاده از راه‌کارهای مهندسی موجود، تدبیری برای کاهش میزان آب مصرفی این کارخانه‌ها اندیشیده شود. در این مقاله چهار روش کلی برای کاهش میزان مصرف آب این کارخانه‌ها پیشنهاد شده است: استفاده از آب باران، استفاده از آب همراه نیشکر، بازچرخانی و بازیافت آب.

روش استفاده از آب باران بیشتر در مواردی کاربرد دارد که موقعیت جغرافیایی واحد تولیدی به‌گونه‌ای باشد که در منطقه پرباران واقع شده و استفاده از باران در مقایسه با هزینه‌های لازم برای حذف آلودگی‌های میکروبی و فیزیکی این آب، صرفه

اقتصادی داشته باشد. در غیر این‌صورت استفاده از این منبع آبی چندان متداول نخواهد بود.

در مورد استفاده از رطوبت موجود در ساقه‌های نیشکر، ذکر شد که حدود ۷۰٪ از این ساقه‌ها را آب تشکیل می‌دهد. مشکل اصلی در استفاده از آب جداشده از این ساقه‌ها در طول فرآیند، دمای بالای (حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد) آن است، به‌گونه‌ای که در بیشتر موارد استفاده از آن بدون خنک‌کردن ممکن نیست. یا استفاده در طی فرآیند، موجب ایجاد مشکلاتی از قبیل کاراملیه شده قندهای موجود، می‌شود. البته در مواردی که نیاز به گرمایش وجود داشته باشد، می‌توان از این آب و حرارت موجود در آن با استفاده از تماس غیرمستقیم در مبدل‌های حرارتی، استفاده نمود.

در بازچرخانی آب، تأکید روی استفاده مجدد از آب‌های استفاده شده در طی فرآیند از طریق چرخه‌های داخلی است. شش چرخه کلی آب در فرآیند بررسی و معرفی شده که امکان بسته شدن مدار آب کارخانه در این چرخه‌ها وجود دارد. با این کار میزان مصرف آب تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد.

در بحث بازیافت آب نیز، استفاده از روش‌های تصفیه به‌منظور کاهش بارآلی فاضلاب برای استفاده مجدد از پساب تولیدی، پیشنهاد شده است. تصفیه فاضلاب ضمن فراهم نمودن امکان بازیافت پساب، مشکلات محیط‌زیستی ناشی از تخلیه فاضلاب کارخانه به محیط را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در بحث تصفیه فاضلاب، باتوجه به BOD بسیار بالای جریان فاضلاب خروجی، امکان تصفیه تنها با استفاده از روش‌های فیزیکی ممکن نیست و نیاز به فرآیندهای بیولوژیک تصفیه فاضلاب وجود دارد. از بین فرآیندهای تصفیه بیولوژیک، به‌نظر می‌رسد که تصفیه با استفاده از گرانول‌های هوازی، به‌دلیل نیاز به فضای کمتر و حجم بسیار پایین لجن تولیدی، مناسب‌ترین روش به‌منظور تصفیه فاضلاب‌های بسیار آلوده نظیر فاضلاب کارخانه قندوشکر است. انجام هر یک یا مجموعه‌ای از هر چهار راه‌کار معرفی شده، می‌تواند ضمن کاهش چشمگیر در میزان آب مصرفی واحد صنعتی، حجم فاضلاب تولیدی به‌ازای هر تن خوراک ورودی را نیز کاهش دهد.

۵- مراجع

احمدی، م.، تجریشی، م.، ابریشم چی، ا.، (۱۳۸۴)، "مقایسه فنی و اقتصادی روش‌های متداول تصفیه فاضلاب صنایع قند در ایران"، *مجله آب و فاضلاب*، ۱۶(۱)، ۵۴-۶۱.

صرافزاده، م.ح.، رضایی، م.، (۱۳۹۳)، "ارزیابی کیفیت آب باران جمع‌آوری شده از پشت بام‌ها و روش‌های تصفیه آن"، *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۲(۳)، ۴۱-۵۲.

کرد، ش.، پناه‌یزدان، م.، آیت‌الهی، س.ش.، (۱۳۷۹)، "بررسی روش تصفیه پساب کارخانه طرح نیشکر هفت تپه"، *سومین همایش ملی بهداشت محیط*، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی کرمان، کرمان.

Ahmed, W., Gardner, T., and Toze, S., (2011), "Microbiological quality of roof-harvested rainwater and health risks: A review", *Journal of Environmental Quality*, 40(1), 13-21.

Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Irfanullah, I., Khan, S.U., Farooqi, I.H., (2019), "Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater", *Science of the Total Environment*, 686, 681-708.

Bavar, M., Sarrafzadeh, M.H., Asgharnejad, H., and Norouzi-Firouz, H., (2018), "Water management methods in food industry: Corn refinery as a case study", *Journal of Food Engineering*, 238, 78-84.

Cakir, F., and Stenstrom, M., (2005), "Greenhouse gas production: a comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology", *Water Research*, 39(17), 4197-4203.

Dilek, F.B., Yetis, U., and Gökçay, C.F., (2003), "Water savings and sludge minimization in a beet-sugar factory through re-design of the wastewater treatment facility", *Journal of Cleaner Production*, 11(3), 327-331.

Duque, A.F., Bessa, V.S., Carvalho, M.F., de Kreuk, M.K., van Loosdrecht, M.C., and Castro, P.M., (2011), "2-Fluorophenol degradation by aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor", *Water Research*, 45(20), 6745-6752.

Evans, C.A., Coombes, P.J., Dunstan, R., and Harrison, T., (2007), "Identifying the major influences on the microbial composition of roof harvested rainwater and the implications for water quality", *Water Science and Technology*, 55(4), 245-253.

Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J., and Gabarrell, X., (2011), "Roof selection for rainwater harvesting: quantity and quality assessments in Spain", *Water Research*, 45(10), 3245-3254.

Fito, J., Tefera, N., Kloos, H., Van Hulle., S.W.H., (2018), "Anaerobic treatment of blended sugar industry and ethanol distillery wastewater through biphasic high rate reactor", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(7), 676-685.

Förster, J., (1996), "Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration", *Water Science and Technology*, 33(6), 39-48.

Gikas, G.D., and Tsihrintzis, V.A., (2012), "Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater", *Journal of Hydrology*, 466, 115-126.

Gunjal, B., and Gunjal, A., (2013), "Water conservation in sugar industry", *Nature Environment and Pollution Technology*, 12(2), 325.

Hanaki, K., Matsuo, T., and Nagase, M., (1981), "Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process", *Biotechnology and Bioengineering*, 23(7), 1591-1610.

Hosseini, M., Khoshfetrat, A.B., Sahraei, E., and Ebrahimi, S., (2014), "Continuous nitrifying granular sludge bioreactor: Influence of aeration and

ammonium loading rate", *Process Safety and Environmental Protection*, 92(6), 869-878.
Ingaramo, A., Heluane, H., Colombo, M., and Cesca, M., (2009), "Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry", *Journal of Cleaner Production*, 17(4), 487-495.
Jadhav, P., Vaidya, N ,.Dethe, S., (2013), "Characterization and comparative study of cane sugar industry wastewater", *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2(2), 19-25.
Jordening, H.J., (2009), "Sustainable water resources management in the German sugar industry" In: *International Conference on Advances in Wastewater Treatment and Reuse*, Tehran, Iran.
Kim, R.-H., Lee, S., and Kim, J.-O., (2005), "Application of a metal membrane for rainwater utilization: Filtration characteristics and membrane fouling", *Desalination*, 177(1-3), 121-132.
Kushwaha, J.P., (2015), "A review on sugar industry wastewater: sources, treatment technologies, and reuse", *Desalination and Water Treatment*, 53(2), 309-318.
Martinson, B., and Thomas, T., (2007), *Roofwater harvesting: A handbook for practitioners*, IRC International Water and Sanitation Centre.
Muda, K., Aris, A., Salim, M.R., Ibrahim, Z., Yahya, A., van Loosdrecht, M.C., Ahmad, A., and Nawahwi, M.Z., (2010), "Development of granular sludge for textile wastewater treatment", *Water Research*, 44(15), 4341-4350.
Nacheva, P.M., Chávez, G.M., Chacón, J.M., and Chuil, A.C., (2009), "Treatment of cane sugar mill wastewater in an upflow anaerobic sludge bed reactor", *Water Science and Technology*, 60(5), 1347-1352.
Pastor, R., Abreu, L., Espuna, A., and Puigjaner, L., (2000), "Minimization of water consumption and wastewater discharge in the sugar cane industry", *Computer Aided Chemical Engineering*, 8, 907-912.
Peters, A., Weidner, K., and Howley, C., (2008), "The chemical water quality in roof-harvested water cisterns in Bermuda", *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 57(3), 153-163.
Ramjeawon, T., (2000), "Cleaner production in Mauritian cane-sugar factories", *Journal of Cleaner Production*, 8(6), 503-510.
Ramjeawon, T., (1995), "Integrated management of cane-sugar factory wastewaters in Mauritius using the upflow anaerobic sludge blanket (UASB) process", PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Mauritius.
Sahu, O., and Chaudhari, P., (2015), "Electrochemical treatment of sugar industry wastewater: COD and color removal", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 739, 122-129.
Sapkal, D., and Gunjal, B., (2004), "Achieving zero wastewater discharge in cane sugar factories" *Proceedings of 53rd Annual Convention of DSTA*, India, pp. G36-G39.
Shariati, F.P., Heran, M., Sarrafzadeh, M.H., Mehrnia, M.R., Sarzana, G., Ghommidh, C., and Grasmick, A., (2013), "Biomass characterization by dielectric monitoring of viability and oxygen uptake rate measurements in a novel membrane bioreactor", *Bioresource Technology*, 140, 357-362.
Simmons, G., Hope, V., Lewis, G., Whitmore, J., and Gao, W., (2001), "Contamination of potable roof-collected rainwater in Auckland, New Zealand", *Water Research*, 35(6), 1518-1524.
Teixeira, C.A., Ghisi, E., (2019), "Comparative Analysis of Granular and Membrane Filters for Rainwater Treatment", *Water*, 11(5), 1004-1019.
Willart, J., Dujardin, N., Dudognon, E., Danède, F., and Descamps, M., (2010), "Amorphization of sugar hydrates upon milling", *Carbohydrate Research*, 345(11), 1613-1616.
Zver, L.Ž., and Glavič, P., (2005), "Water minimization in process industries: Case study in beet sugar plant", *Resources, Conservation and Recycling*, 43(2), 133-145.