

## پایش کانون‌های اتلاف انرژی و اکسرژی در خط اوپراسیون شکر (مطالعه موردی: کارخانه قند ارومیه)

احمد پیری<sup>۱</sup>، علی محمدنیکبخت<sup>۲\*</sup> و حامد جانی‌سرنای<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق ممیزی انرژی خط اوپراسیون کارخانه قند ارومیه، به‌عنوان اولین قدم در راستای بهبود و بهینه‌سازی فنی-اقتصادی فرآیند تولید شکر در این کارخانه انجام شده است. به همین منظور با اتکا به تحلیل‌های ترمودینامیکی و بر مبنای اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، سهم هریک از تجهیزات خط اوپراسیون در اتلاف انرژی و اکسرژی تعیین شد. همچنین این پایش به‌صورت جزئی‌تر برای سطوح مختلف هر یک از این تجهیزات صورت گرفت. از روش ترموگرافی برای مطالعه وضعیت عایق‌سازی موجود و میزان تلفات حرارتی خط اوپراسیون استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ۶۷ درصد اتلاف حرارتی از راه انتقال تابشی و ۳۳ درصد به‌واسطه انتقال جابجایی انجام می‌شود. کل اتلاف حرارتی خط اوپراسیون به محیط کارخانه ۱۸۶/۰۳ کیلووات برآورد شد که بر مبنای اتلاف جابجایی و تابشی محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از این است که بیشترین اتلاف انرژی مربوط به اوپراتور اول، مبدل‌های پوسته-لوله دوم و سوم هستند. همچنین بیشترین اکسرژی اتلافی در بخش پیش‌گرمایش اتفاق می‌افتد، به‌طوری‌که مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله به‌تنهایی، اندکی بیش از نیمی از اکسرژی اتلافی مجموعه را تشکیل می‌دهند. نتایج این تحقیق در اخذ تصمیمات مدیریتی آتی در کاهش هزینه‌های تولید شکر در کارخانه مذکور استفاده خواهد شد. جزئیات به‌دست آمده و روش مطالعه به‌کار گرفته شده در این تحقیق نیز می‌تواند در مطالعات سیاست‌های توسعه پایدار بخش دولتی مورد توجه قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** اوپراسیون، انرژی، اکسرژی، ترموگرافی، شکر.

**ارجاع:** پیری ا.، محمدنیکبخت ع. و جانی‌سرنای ح. ۱۳۹۸. پایش کانون‌های اتلاف انرژی و اکسرژی در خط اوپراسیون شکر (مطالعه موردی: کارخانه قند ارومیه). نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۸(۱): ۵۷-۶۶.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۳- فارغ‌التحصیل دکتری مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

\* نویسنده مسئول: a.nikbakht@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴

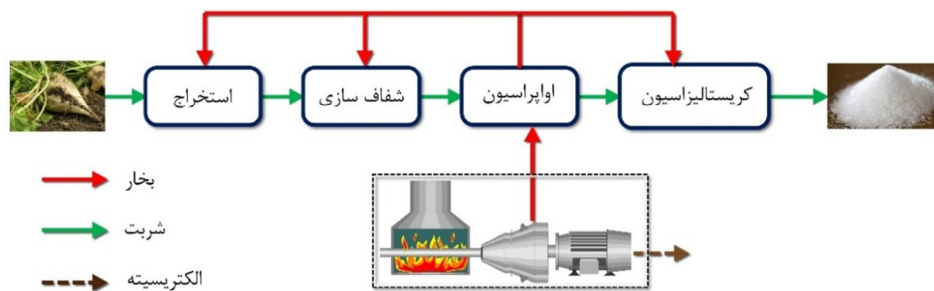
## مقدمه

در سیستم‌های بخار صرفه‌جویی به عمل آورد (Wang, 2008). با استفاده از حسگرهای اندازه‌گیری دمای سطح که از تکنولوژی RTD و ترموکوپل استفاده می‌کنند، تنها می‌توان دمای یک نقطه از سطح را اندازه‌گیری کرد. حال آنکه در اکثر مطالعات در اختیار داشتن توزیع دوبعدی دما در سطح و یا دست‌کم مقدار میانگین به‌دست آمده از این توزیع دوبعدی مبنای موثق‌تری برای محاسبات انتقال حرارت خواهد بود (Carlomagno & Cardone, 2010). استفاده از ترموگرافی مادون‌قرمز (IR) در طول چند سال گذشته به‌طور چشمگیری در سراسر جهان افزایش یافته است. این روش برای اندازه‌گیری خصوصیات سطحی برای تحقیقات مختلف شامل تمام پدیده‌های انتقال حرارت به‌کار برده می‌شود. ترموگرافی حتی در گرادپان‌های بزرگ دما، توزیع دما بر روی سطوح را به‌صورت پیوسته نشان می‌دهد (Fokaides & Kalogirou, 2011).

در تولید شکر خام، مرحله اوپراسیون یکی از یبسی بخش‌های مهم در عملیات واحد است. این مرحله علاوه بر تبخیر آب، جریان‌های بخار موردنیاز برای گرمایش و تبخیر در مراحل بعدی را نیز توزیع می‌کند (شکل ۱). این دو عملکرد از اوپراتورهای چندمرحله‌ای، هسته اصلی یکپارچه‌سازی انرژی را تشکیل می‌دهند (Lorenz, 2008).

در صنعت تولید شکر، بعد از هزینه مواد خام اولیه، بیشترین هزینه عملیاتی فرآیند تولید مربوط به هزینه انرژی است. با توجه به قیمت روزافزون حامل‌های انرژی و بحران کمبود منابع انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی، تولید شکر با مصرف کمتر انرژی موردتوجه است. به‌طورکلی ۲۰ تا ۳۰ درصد از بخار تولیدشده در کارخانه‌های قند صرف فرآیند اوپراسیون می‌شود (Asadi, 2006).

متأسفانه اطلاعات دقیقی در مورد میزان مصرف بخار در صنایع تولید شکر در کشور در دسترس نیست. بااین‌حال در بررسی منابع آمده است که در کارخانه‌های تولید شکر آلمان در دهه شصت میلادی به ازای هر صد کیلو چغندر قند ۵۰ کیلوگرم بخار مصرف می‌شده است. این مقدار در دهه هشتاد، ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم و تا قبل از سال ۲۰۰۸ به ۲۰ کیلوگرم کاهش یافته است (Smejkal et al., 2008). تجهیزات اندازه‌گیری دما از اهمیت ویژه‌ای در فراهم آوردن اطلاعات لازم در ممیزی انرژی و تخمین اتلاف حرارتی برخوردارند؛ به‌طوری‌که در صنایع مختلفی که از بخار استفاده می‌کنند با استفاده از ممیزی انرژی و نتایج حاصل از آن می‌توان تا ۲۰ درصد در مصرف انرژی



شکل ۱- روند نمای تولید شکر از چغندر قند

آب چغندر قند تقریباً شامل ۱۲ درصد ساکارز است که باید قبل از انتقال آن به مرحله کریستالیزاسیون غلیظ و به غلظت حدود ۶۵ درصد رسانده شود (Lewis et al., 2010). فرآیند اوپراسیون یکی از واحدهای پرمصرف انرژی در خط تولید شکر است (Taner & Sivrioglu, 2015). گرمای ویژه آب در فشار یک بار و دمای صفر درجه سلسیوس  $4.184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  و گرمای ویژه ساکارز  $1.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  است. بالا بودن گرمای ویژه آب یکی از دلایل مصرف انرژی بالا در مرحله اوپراسیون است (Lorenz, 2008). بنابراین صرفه‌جویی در مصرف انرژی یک مسئله مهم در عملیات تغلیظ شربت است. همچنین دمای خوراک (شربت رقیق) ورودی به خط اوپراسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورت پایین بودن دمای شربت قسمتی از آنتالپی بخار صرف افزایش دمای شربت تا دمای

آب چغندر قند تقریباً شامل ۱۲ درصد ساکارز است که باید قبل از انتقال آن به مرحله کریستالیزاسیون غلیظ و به غلظت حدود ۶۵ درصد رسانده شود (Lewis et al., 2010). فرآیند اوپراسیون یکی از واحدهای پرمصرف انرژی در خط تولید شکر است (Taner & Sivrioglu, 2015). گرمای ویژه آب در فشار یک بار و دمای صفر درجه سلسیوس  $4.184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  و گرمای ویژه ساکارز  $1.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  است. بالا بودن گرمای ویژه آب یکی از دلایل مصرف انرژی بالا در مرحله اوپراسیون است (Lorenz, 2008). بنابراین صرفه‌جویی در مصرف انرژی یک مسئله مهم در عملیات تغلیظ شربت است. همچنین دمای خوراک (شربت رقیق) ورودی به خط اوپراسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورت پایین بودن دمای شربت قسمتی از آنتالپی بخار صرف افزایش دمای شربت تا دمای

به‌عنوان یک سیستم در نظر گرفته شده و انرژی اتلافی کل محاسبه شده است. در تحقیق حاضر خط اواپراسیون به‌صورت جداگانه و برای هر یک از تجهیزات به‌کاررفته در این خط با در نظر گرفتن جزئیات هر یک از تجهیزات مورد مطالعه قرار گرفته است.

کارخانه قند ارومیه به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین کارخانه‌های منطقه به‌عنوان مطالعه موردی در این تحقیق در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این تحقیق انجام ممیزی انرژی خط اواپراسیون به‌عنوان اولین قدم در راستای بهبود و بهینه‌سازی فنی-اقتصادی فرآیند تولید شکر در کارخانه قند ارومیه است. در این تحقیق انرژی و اکسرژی اتلافی از تجهیزات خط اواپراسیون کارخانه قند ارومیه با تکیه بر روش ترموگرافی و انجام تحلیل انرژی با استفاده از نرم‌افزار EES تعیین می‌شود.

### مواد و روش‌ها

بخش پیش‌گرمایش خط اواپراسیون کارخانه قند ارومیه دارای سه مبدل حرارتی پوسته-لوله است که بخار مبدل اول و دوم از سربخار اواپراتورها تأمین می‌شود و مبدل سوم از بخار زنده برای گرمایش شربت استفاده می‌کند. از هشت عدد اواپراتور روبرت<sup>۱</sup> برای تغلیظ شربت استفاده شده است. همچنین دو مبدل صفحه‌ای آلفالاول به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی اواپراتورها در این خط به‌کار گرفته شده‌اند. علاوه بر موارد ذکرشده، سه عدد نیسنر وظیفه‌ی تولید بخار از آب‌کنده‌ی خروجی از اواپراتورها را به عهده دارند (شکل ۲).

از یک دوربین ترموگراف ( G120EXD, NEC Avio ) برای داده‌برداری‌های ترموگرافی استفاده شد. با استفاده از این دستگاه همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است و با تنظیم ضریب نشر سطح بیرونی تجهیزات گردان‌های دمایی مشاهده و ثبت شد. شاخص مقدار اندازه‌گیری دما در سمت راست شکل ۳-ب مقدار دما در هر نقطه از تصویر ترموگرافی را نشان می‌دهد. با گذر به سمت رنگ‌های گرم‌تر مقدار دما افزایش یافته و در نهایت به مقدار بیشینه خود که در این تصویر ۱۲۰/۲ درجه سلسیوس است می‌رسد. همچنین در نقطه مقابل، با گذر به سمت رنگ‌های سردتر کمینه دما، با مقدار ۲۴/۶ درجه سلسیوس قابل مشاهده است. با توجه به اهمیت و

جوش می‌گردد و مابقی برای تبخیر استفاده می‌شود. به همین علت شربت قبل از ورود به خط اواپراسیون، تا رسیدن به دمای جوش حرارت داده می‌شود (Chantasiriwan, 2017).

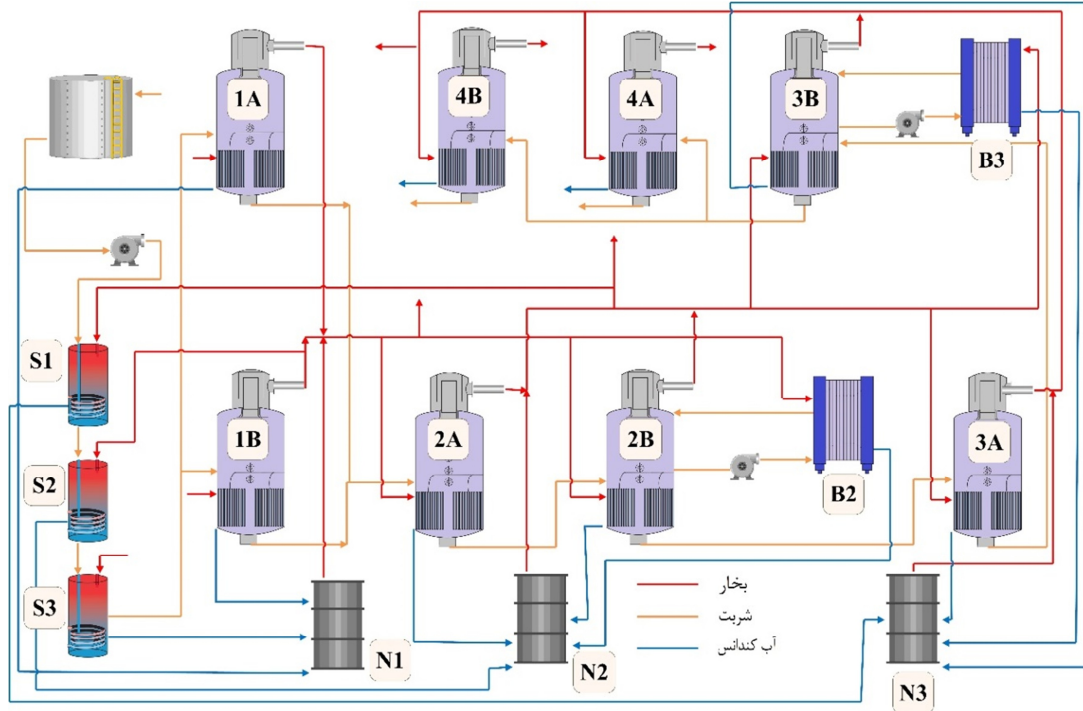
در کارخانه‌های تولید شکر از چغندر قند، با انجام ممیزی انرژی، زمینه‌های حفظ و کاهش مصرف انرژی مشخص خواهد شد. با مدیریت انرژی بخار در خط اواپراسیون و جلوگیری از اتلافات حرارتی موجبات کاهش مصرف انرژی و نزدیک شدن فرآیند به حالت ایده‌آل ترمودینامیکی فراهم خواهد شد.

هرچند مطالعه انرژی در یک خط فرآوری می‌تواند اطلاعات با ارزشی ارائه کند، آگاهی از حداکثر کار قابل دسترسی که یک مقدار از انرژی یا یک جریان سیال می‌تواند تولید کند (Behbahaninia et al., 2017) دید پایشی و کنترلی دقیق‌تری در حوزه‌ی ممیزی انرژی ایجاد می‌نماید. اکسرژی یا همان حداکثر کار قابل دسترسی، در حقیقت بخش مفید انرژی است بنابراین دارای ارزش اقتصادی است و بایستی به‌دقت مدیریت و کنترل شود. اکسرژی، بر مبنای قانون اول و دوم ترمودینامیک تعریف می‌شود و کیفیت و همچنین کمیت انرژی را دربرمی‌گیرد. بررسی منابع نشان داد کارهای اندکی در زمینه ممیزی انرژی در کارخانه‌های تولید شکر از چغندر قند انجام شده است. در یکی از تحقیقات بارز انجام شده در این زمینه، هریک از مراحل تولید شکر به‌صورت یک سامانه‌ی جداگانه در نظر گرفته شدند و با انجام تحلیل انرژی روی آن‌ها، حرارت اتلافی در هر یک از آن‌ها محاسبه شد (Bayrak et al., 2003). بیشترین حرارت اتلافی مربوط به خط اواپراسیون و برابر با ۱۴۵۹۸ کیلوژول به ازای ۱۰۰ کیلوگرم چغندر قند بود. در تحقیق مشابه دیگری، حرارت اتلافی در خط اواپراسیون برابر با ۱۵۳۱۸/۷ کیلوژول به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم چغندر محاسبه شد (Sahin et al., 2010). درحالی‌که همین کمیت برابر با ۱۴۳۵۲/۶ کیلوژول بر ۱۰۰ کیلوگرم چغندر، برای خط اواپراسیون مشابهی تخمین زده شده است (Taner & Sirvioglu, 2015). همچنین در یکی از مطالعات اخیر، نرخ انرژی اتلافی کل یک کارخانه‌ی تولید شکر برابر با ۱۶۸۳۹/۱ کیلووات برآورد شده است (Dogbe et al., 2017). بررسی منابع نشان می‌دهد در اغلب کارهای صورت گرفته در زمینه تعیین اتلاف انرژی خط اواپراسیون، کل خط

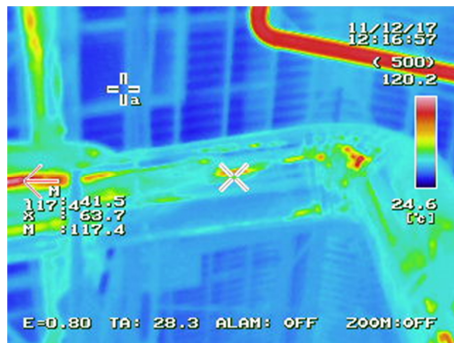
1- Robert

استفاده از حسگر HTC1 با دقت  $0.1^\circ\text{C}$  و  $0.5\%$  به ترتیب برای دما و رطوبت نسبی محیط، انجام شد. همچنین فاصله عدسی دوربین تا سطح بیرونی هدف نیز به صورت دقیق برای دستگاه تعریف شد.

ضرورت دما و رطوبت نسبی محیط در فرآیند واسنجی ترموگراف پیش از هر بار اندازه‌گیری و همچنین در انجام محاسبات انتقال حرارت، این دو پارامتر اندازه‌گیری و در محاسبات لحاظ شدند. اندازه‌گیری این دو کمیت با



شکل ۲- خط پیش‌گرمایش و تغلیظ شریت: S1, S2 و S3 مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمایش شریت، 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A و 4B اوپراتورهای نوع روبرت، B2 و B3 تقویت‌کننده‌های اوپراتورها، N1, N2 و N3 تجهیزات تولید بخار از آب کندانس



(ب) تصویر ترموگرافی خطوط انتقال



(الف) تصویر اصلی خطوط انتقال

شکل ۳- تصاویر ترموگرافی خطوط انتقال بخار و شریت در خط اوپراسیون

موردنظر در هر تصویر جدا شده و عملیات میانگین‌گیری بر روی آن انجام شد. در یک رویکرد حالت پایه، طبق اصل بقای انرژی حرارت انتقال‌یافته به محیط از طریق رسانش به بیرون از بدنه تجهیزات ( $\dot{Q}_{\text{cond}}$ )، برابر با مجموع انتقال حرارت جابجایی ( $\dot{Q}_{\text{conv}}$ ) و انتقال حرارت تابشی ( $\dot{Q}_{\text{rad}}$ ) است. (Forero-Núñez & Sierra-Vargas, 2016.)

با توجه به اینکه در انجام تحلیل‌های مهندسی از دمای میانگین سطوح در محاسبات استفاده می‌شود، لازم است که گرادیان دمایی ثبت‌شده در اندازه‌گیری‌ها، به صورت یک مقدار میانگین برای هر سطح بیان شود. از نرم‌افزار InfReC Analyzer NS9500 Standard برای این منظور استفاده شد. با استفاده از قابلیت‌های این نرم‌افزار سطح

مربوط به استوانه کامل برای اواپراتورها، نیسنرها و مبدل‌های پوسته-لوله، و از روابط مربوط به مکعب کامل برای مبدل‌های صفحه‌ای استفاده شد.

با محاسبه حرارت اتلافی از سطوح، اکسرژی اتلافی ( $\dot{E}x_{loss}$ ) نیز بر مبنای معادله (۹) محاسبه شد (Behbahania *et al.*, 2017).

$$\dot{E}x_{loss} = \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \dot{Q} \quad (9)$$

در این معادله  $\dot{Q}$  نرخ گرمای اتلافی از سیستم،  $T_s$  دمای میانگین سطح انتقال حرارت و  $T_0$  دمای حالت مرده است که ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود.

برای انجام محاسبات انتقال حرارت از نرم‌افزار EES استفاده شد. این نرم‌افزار با داشتن دمای سطح، دمای محیط، طول مشخصه و با استفاده از خواص ترموفیزیکی هوا که در کتابخانه نرم‌افزار موجود است، ضریب انتقال حرارت جابجایی را محاسبه می‌کند. با در اختیار داشتن این ضریب، مقدار حرارت اتلاف شده به روش جابجایی از هر سطح محاسبه می‌شود. حرارت اتلافی از هریک از سطوح به روش تابش نیز توسط نرم‌افزار با لحاظ کردن ضریب نشر سطوح محاسبه شد. سطح تمامی تجهیزات از جنس فولاد (Heavily oxidized) بوده و ضریب صدور سطح برای این ماده (۰/۸۱) است (Cengel, 2014).

### نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در عملیات ترموگرافی بخش‌های مختلف خط اواپراسیون به‌صورت دمای میانگین هر سطح در ستون دوم نشان داده شده است. بررسی اولیه نتایج ترموگرافی نشان داد که دمای سطح خارجی لوله‌ها و نیسنرها اختلاف بسیار اندکی با دمای محیط اطراف آن‌ها داشتند به‌طوری‌که از شار حرارتی اتلافی آن‌ها چشم‌پوشی شد. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد به‌دلیل عدم وجود جریان اجباری هوا در فضای اطراف تجهیزات خط اواپراسیون، توزیع دمای هوای محیط خط اواپراسیون یکسان نیست. از این‌رو دمای هوای محیط اطراف هر تجهیز به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری و در محاسبات لحاظ شد. این دماها در ستون سوم نشان داده شده است.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

که  $h$  ضریب جابجایی متوسط  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$ ،  $A$  مساحت سطح ( $m^2$ )،  $T_s$  دمای میانگین سطح (K)،  $T_\infty$  دمای محیط (K)،  $\varepsilon$  ضریب صدور سطح و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن ( $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$ ) است (Forero-Núñez & Sierra-Vargas, 2016). با اندازه‌گیری ابعاد هر یک از تجهیزات خط اواپراسیون که در شکل ۲ نشان داده شده است، مساحت‌های سطوح انتقال حرارت محاسبه شد. با توجه به مسقف بودن فضای خط اواپراسیون و نبود جریان هوای اجباری در آن، فرض انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محاسبات لحاظ شد. در انتقال حرارت جابجایی طبیعی، ضریب انتقال حرارت به‌عنوان تابعی از اعداد بی‌بعد ناسلت<sup>۱</sup>، گراشوف<sup>۲</sup> (Gr)، پراندل<sup>۳</sup> (Pr) و رایلی<sup>۴</sup> (Ra) محاسبه می‌شود (Forero-Núñez & Sierra-Vargas, 2016).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{g^2} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{g}{\alpha} \quad (5)$$

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{g\alpha} \quad (6)$$

$g$  شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )،  $\beta$  ضریب انبساط حجمی ( $\frac{1}{K}$ )،  $L$  طول مشخصه (m)،  $g$  لزجت سینماتیکی ( $m^2/s$ ) و  $\alpha$  ضریب نفوذ حرارتی ( $m^2/s$ ) است.

به‌طورکلی روابط تجربی جابجایی طبیعی به‌صورت زیر است (Cengel, 2014):

$$Nu = cRa_L^n \quad (7)$$

بسته به نوع هندسه و رژیم جریان، عدد ناسلت از با استفاده از روابط تجربی متناظر پیشنهاد شده در منابع، تعیین می‌شود و سپس با استفاده از تعریف آن، ضریب جابجایی به دست می‌آید (Cengel, 2014):

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (8)$$

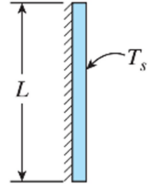
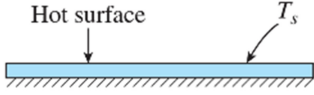
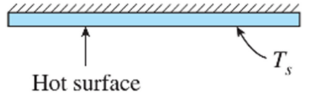
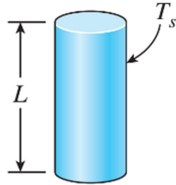
$k$  ضریب هدایت حرارتی ( $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ) است. عدد ناسلت مربوط به اشکال مختلف در جدول ۲ آورده شده است. از روابط

1- Nusselt  
2- Grashof  
3- Prandtl  
4- Rayleigh

جدول ۱- مساحت و طول سطوح انتقال حرارت در تجهیزات خط اوپراسیون کارخانه قند ارومیه

نام تجهیز	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	B2	B3	S1	S2	S3
سطح جانبی (m <sup>2</sup> )	۱۴۲/۰۰	۷۹/۲۰	۹۳/۳۰	۹۳/۳۰	۶۶/۰۰	۶۶/۰۰	۴۵/۲۰	۴۵/۲۰	۲۰/۱۰	۱۸/۵۰	۲۳/۷۰	۲۴/۶۰	۲۴/۶۰
سطح افقی (m <sup>2</sup> )	۱۷/۴۰	۷/۰۰	۸/۵۰	۸/۵۰	۷/۰۰	۷/۰۰	۴/۵۰	۴/۵۰	۴/۳۰	۳/۸۰	۲/۰۰	۱/۵۴	۱/۵۴
طول مشخصه سطح جانبی (m)	۹/۶۰	۸/۷۰	۹/۰۰	۹/۰۰	۷/۰۰	۷/۰۰	۶/۰۰	۶/۰۰	۲/۱۰	۲/۱۰	۴/۷۲	۵/۶۰	۵/۶۰
طول مشخصه سطح افقی (m)	۱/۱۷	۰/۷۵	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۴۳	۲/۰۰	۰/۳۵	۰/۳۵

جدول ۲- تعیین عدد ناسلت (Cengel, 2014)

شکل	طول مشخصه	رنج رایلی	ناسلت
	L	$10^4 - 10^9$	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$
		$10^{10} - 10^{13}$	$Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$
	Surface area Perimeter	$10^4 - 10^7$	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$
		$10^7 - 10^{11}$	$Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$
	Surface area Perimeter	$10^5 - 10^{11}$	$Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$
	L	اگر $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$ باشد استوانه‌ای عمودی مانند صفحه‌ی عمودی رفتار می‌کند.	

موضوع در مقایسه با ضرایب مربوط به سطوح پایینی شدت بیشتری دارد. با این حال بیشترین نرخ اتلاف انرژی مربوط به سطوح جانبی است زیرا مساحت این سطوح بیشتر از مساحت سطوح بالایی و پایینی است.

سهم هر بخش از خط اوپراسیون در اتلاف انرژی صورت نمودار Venn در شکل ۴-الف نشان داده شده است. انرژی اتلافی در قسمت پیش‌گرمایش که شامل تجهیزات S1، S2 و S3 می‌شود، ۷۱/۴۸ کیلووات است که این مقدار ۳۸ درصد از کل انرژی اتلافی محاسبه شده است. قدیمی بودن تکنولوژی این مبدل‌ها، نداشتن عایق حرارتی و استفاده از بخار با دمای بالا برای گرم کردن شربت از دلایل بالا بودن دمای سطح و در نتیجه بالا بودن انرژی اتلافی در این تجهیزات است.

کل انرژی اتلافی از خط اوپراسیون ۱۸۶/۰۳ کیلووات است که سهم انرژی اتلافی به واسطه انتقال حرارت همرفتی ۶۰/۷۳ کیلووات و سهم مربوط به انتقال حرارت تابشی برابر با ۱۲۵/۳ کیلووات است. کمتر بودن سهم مربوط به انتقال حرارت همرفتی را می‌توان به عدم حضور جریان اجباری هوا نسبت داد. سهم چشمگیر اتلاف انرژی ناشی از انتقال حرارت تابشی را می‌توان مؤید این موضوع دانست که راهکارهای کم‌هزینه‌ای همچون رنگ‌آمیزی سطح بیرونی تجهیزات بهترین روش کاهش اتلاف انرژی در این خط است.

به‌طور کلی ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده برای سطوح بالایی تجهیزات به طرز چشم‌گیری از ضرایب مربوط به سطوح جانبی و پایینی متناظر بیشتر است. این



شده است. همان‌گونه که در شکل ۵-الف نشان داده شده است نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شار انرژی اتلافی از سطوح اوپراتورها به طرز چشمگیری از مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله کمتر است. با این حال با توجه به مساحت بیشتر سطح جانبی اوپراتور 1A بیشترین اتلاف انرژی را در آنجا شاهد هستیم (-الف، شکل ۱). اما در مورد اکسرژی اتلافی به دلیل اختلاف بسیار چشمگیر دمای سطح با محیط اطراف، بیشترین مقدار مربوط به S3 می‌شود. شار انرژی اتلافی از سطوح بوسترها نیز از اوپراتورها بیشتر است ولی اختلاف خیلی زیادی با مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله مشاهده نشده است. در مورد اکسرژی اتلافی روند مشابهی مشاهده می‌شود با این تفاوت که اختلاف بین شار اکسرژی اتلافی بوسترها و مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله به نسبت اختلاف متناظر شار انرژی اتلافی آن‌ها، بیشتر شده است.

اوپراتورهای 1A و 1B به نسبت سایر اوپراتورها شار انرژی و اکسرژی اتلافی بیشتری را نشان می‌دهند که این موضوع از دمای سطح بیشتر آن‌ها ناشی می‌شود. اختلاف دمای نسبتاً کم سطح خارجی اوپراتور 4B با دمای هوای اطراف آن موجب شده است که کمترین شار اتلاف انرژی و اکسرژی را در این تجهیز شاهد باشیم.

از طرفی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شار انرژی و اکسرژی اتلافی در سطوح بالایی تجهیزات بیشتر از سایر سطوح است که این موضوع در مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله و بوسترها شدت بیشتری نسبت به اوپراتورها دارد. دلیل این موضوع را می‌توان در نحوه محاسبه مقدار ضریب انتقال حرارت طبیعی جستجو کرد. با توجه به معادلات (۱) تا (۳)، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سطوح بالایی مقدار بیشتری به خود اختصاص داده است. مستقل از نوع تجهیز، بعد از سطوح بالایی بیشترین شار انرژی و اکسرژی اتلافی مربوط به سطوح جانبی و سپس سطوح زیرین می‌شود.

بیشترین اتلاف انرژی در اوپراتور 1A صورت می‌پذیرد که ۱۶ درصد انرژی اتلافی کل را تشکیل می‌دهد. علیرغم دمای نه‌چندان بالای سطح خارجی این تجهیز که معادل ۶۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است، به دلیل داشتن بیشترین مساحت سطح خارجی نسبت به سایر تجهیزات، بیشترین اتلاف حرارتی در این تجهیز اتفاق می‌افتد.

تأثیر دمای سطح خارجی تجهیزات بر میزان اتلاف انرژی از آن‌ها را می‌توان در مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله و بوسترها مشاهده کرد. به طوری که مبدل‌های S1، S2، S3 و تقویت‌کننده‌های B2 و B3 به ترتیب با ۱۵، ۱۳، ۱۰، ۹ و ۸ درصد در رده‌های بعدی میزان اتلاف حرارتی قرار می‌گیرند.

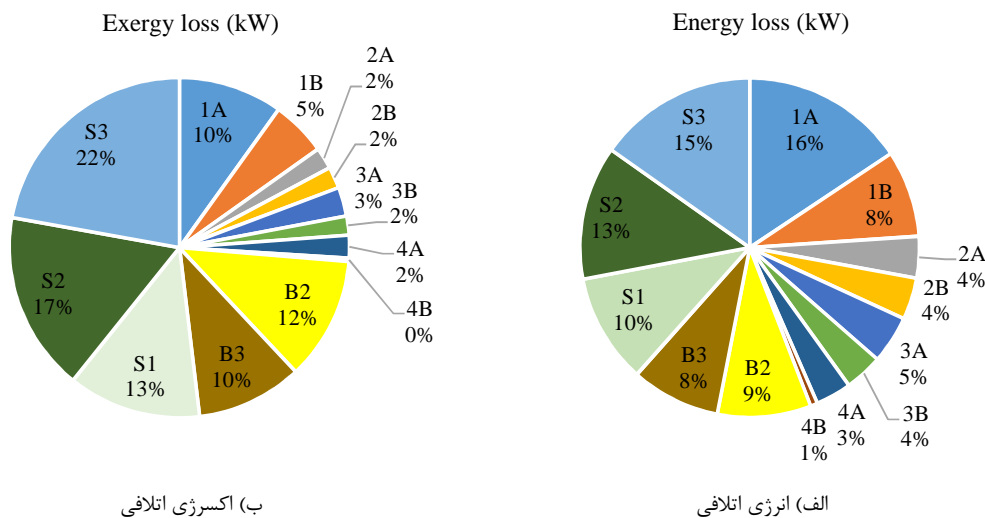
سهم هر بخش از خط اوپراسیون در اتلاف اکسرژی صورت نمودار ون<sup>۱</sup> در شکل ۴- ب نشان داده شده است. کل اکسرژی اتلافی از خط اوپراسیون برابر با ۳۰/۸۶ کیلووات است. تجهیز S3 به تنهایی ۲۲ درصد از این مقدار را به خود اختصاص داده است. علت اتلاف چشمگیر اکسرژی از این تجهیز را می‌توان در بالا بودن دمای سطح خارجی آن که بیشترین مقدار در ستون دوم برابر با ۱۲۰ درجه سلسیوس را دارد، جستجو کرد. بعد از تجهیز S3، بیشترین اتلاف اکسرژی مربوط به مبدل‌های S2 و S1 و تقویت‌کننده‌های B2 و B3 است. با وجود بیشینه بودن انرژی اتلافی از سطح اوپراتور 1A، به علت پایین بودن دمای سطح آن، اکسرژی اتلافی این تجهیز از تقویت‌کننده‌ها و مبدل‌های پوسته-لوله کمتر است. اکسرژی اتلافی از سطح اوپراتورها ۸/۱۲ کیلووات است که ۲۶ درصد از اکسرژی اتلافی کل است.

در نمودارهای ستونی شکل ۵ وضعیت اتلاف انرژی و اکسرژی در خط اوپراسیون کارخانه قند ارومیه به صورت شار برای تجهیزات مختلف این خط به تفکیک سطوح بالایی، جانبی و زیرین آن‌ها نشان داده شده است. در شکل ۵-الف شار انرژی بیانگر نرخ اتلاف انرژی در واحد سطح و در شکل ۵-ب شار اکسرژی نشان‌دهنده نرخ اتلاف اکسرژی در واحد سطح نشان داده شده است. کمترین شار انرژی اتلافی مربوط به تجهیز 4B به دست آمد و بیشترین شار انرژی اتلافی برای تجهیز S3 محاسبه شد. نتایج مشابهی برای شار اکسرژی اتلافی نیز محاسبه

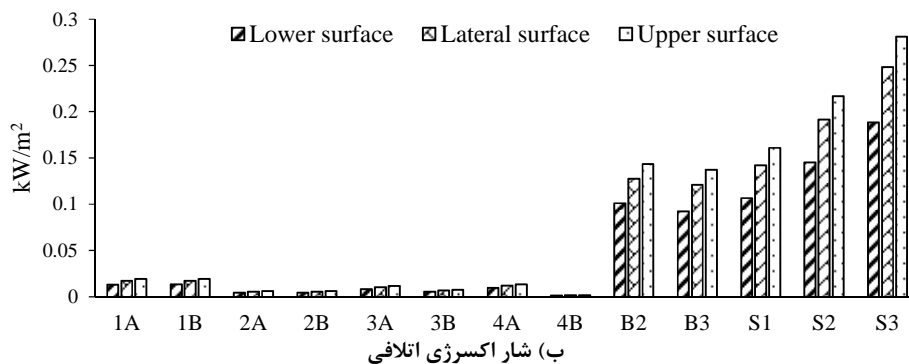
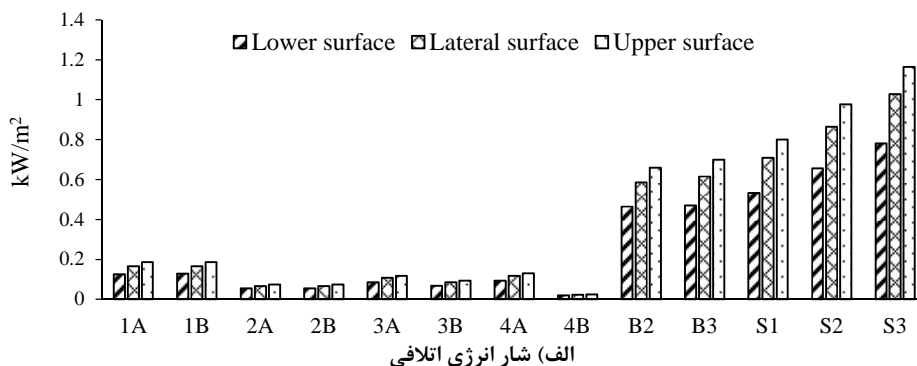
جدول ۳- نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های انرژی و اکسرژی

$\dot{E}x_{\text{loss}} (W)$	$\dot{Q}_{\text{total}} (W)$	$\dot{Q}_{\text{rad}} (W)$	$\dot{Q}_{\text{conv}} (W)$	$h (W/m^2\text{C})$	سطح	$T_{\infty} (^\circ\text{C})$	$T_s (^\circ\text{C})$	تجهیز
۲۴۸۸/۵۳	۲۳۶۷۶/۵۸	۱۵۹۸۳/۰۲	۷۶۹۳/۵۶	۳/۰۱	جانبی			
۳۴۰/۴۸	۳۲۳۹/۴۷	۱۹۵۸/۴۸	۱۲۸۰/۹۹	۴/۰۹	بالایی	۴۲	۶۰	1A
۲۲۸/۸۹	۲۱۷۷/۷۲	۱۹۵۸/۴۸	۲۱۹/۲۴	۰/۷۰	پایینی			
۱۳۸۷/۹۷	۱۳۲۰۵/۵۳	۸۹۱۴/۴۷	۴۲۹۱/۰۵	۳/۰۱	جانبی			
۱۳۶/۹۸	۱۳۰۳/۲۳	۷۸۷/۸۹۵	۵۱۵/۳۴	۴/۰۹	بالایی	۴۲	۶۰	1B
۹۴/۰۷	۸۹۴/۹۹	۷۸۷/۸۹۵	۱۰۷/۱۰	۰/۸۵	پایینی			
۵۴/۰۷۰	۶۲۹۵/۳۳	۴۵۷۸/۶۱	۱۷۱۶/۷۲	۲/۳۰	جانبی			
۵۴/۱۱	۶۲۹/۹۷	۴۱۷/۱۳	۲۱۲/۸۴	۳/۱۳	بالایی	۴۵	۵۳	2A
۳۹/۹۱	۴۶۴/۷۳	۴۱۷/۱۳	۴۷/۶۰	۰/۷۰	پایینی			
۵۴/۰۷۰	۶۲۹۵/۳۳	۴۵۷۸/۶۱	۱۷۱۶/۷۲	۲/۳۰	جانبی			
۵۴/۱۰	۶۲۹/۹۷	۴۱۷/۱۳	۲۱۲/۸۴	۳/۱۳	بالایی	۴۵	۵۳	2B
۳۹/۹۰	۴۶۴/۷۳	۴۱۷/۱۳	۴۷/۶۰	۰/۷۰	پایینی			
۷۰۵/۰۰	۷۰۷۱/۳۷	۴۹۹۶/۳۳	۲۰۷۵/۰۴	۲/۶۲	جانبی			
۸۲/۷۳	۸۲۹/۷۹	۵۲۹/۹۱	۲۹۹/۸۸	۳/۵۷	بالایی	۴۶	۵۸	3A
۵۹/۴۵	۵۹۶/۳۷	۵۲۹/۹۱	۶۶/۳۶	۰/۷۹	پایینی			
۴۶۶/۶۸	۵۶۱۷/۴۰	۳۹۷۴/۰۰	۱۶۴۳/۴۰	۲/۴۹	جانبی			
۵۴/۷۳	۶۵۸/۷۸	۴۲۱/۴۸	۲۳۷/۳۰	۳/۳۹	بالایی	۴۲	۵۲	3B
۳۹/۴۳	۴۷۴/۶۸	۴۲۱/۴۸	۵۳/۲۰	۰/۷۶	پایینی			
۵۶۰/۵۷	۵۳۳۳/۴۱	۳۷۵۸/۶۵	۱۵۷۴/۷۷	۲/۶۸	جانبی			
۶۱/۷۷	۵۸۷/۷۲	۳۷۴/۲۰	۲۱۳/۵۲	۳/۶۵	بالایی	۴۷	۶۰	4A
۴۴/۷۴	۴۲۵/۶۸	۳۷۴/۲۰	۵۱/۴۸	۰/۸۸	پایینی			
۸۱/۳۹	۱۰۵۱/۵۷	۸۲۷/۸۲	۲۲۳/۷۴	۱/۶۵	جانبی			
۸/۷۵	۱۱۳/۰۶	۸۲/۴۱	۳۰/۶۴	۲/۲۷	بالایی	۴۷	۵۰	4B
۷/۰۸	۹۱/۴۶	۸۲/۴۱	۹/۰۴	۰/۶۷	پایینی			
۲۵۶۳/۴۲	۱۱۷۶۷/۰۵	۸۱۰۰/۸۰	۳۶۶۶/۲۴	۳/۸۰	جانبی			
۶۱۶/۷۹	۲۸۳۱/۲۶	۱۷۳۳/۰۱	۱۰۹۸/۲۵	۵/۳۲	بالایی	۶۰	۱۰۸	B2
۴۳۵/۰۸	۱۹۹۷/۲۰	۱۷۳۳/۰۱	۲۶۴/۱۹	۱/۲۸	پایینی			
۲۲۳۹/۰۱	۱۱۳۷۹/۱۰	۷۴۰۸/۰۸	۳۹۷۱/۰۲	۴/۰۵	جانبی			
۵۲۲/۵۲	۲۶۵۵/۵۴	۱۵۲۱/۶۶	۱۱۳۳/۸۸	۵/۶۳	بالایی	۴۵	۹۸	B3
۳۵۱/۷۲	۱۷۸۷/۵۰	۱۵۲۱/۶۶	۲۶۵/۸۴	۱/۳۲	پایینی			
۳۳۷۳/۹۱	۱۶۷۷۹/۵۹	۱۰۶۲۲/۳۳	۶۱۵۷/۲۶	۴/۳۳	جانبی			
۳۲۲/۱۲	۱۶۰۲/۰۰	۸۹۶/۳۱	۷۰۵/۶۰	۵/۸۸	بالایی	۴۰	۱۰۰	S1
۲۱۴/۰۲	۱۰۶۴/۳۱	۸۹۶/۳۱	۱۶۸/۰۰	۱/۴۰	پایینی			
۴۷۱۲/۳۳	۲۱۲۳۳/۱۹	۱۳۴۶۶/۹۷	۷۷۶۶/۲۲	۴/۵۱	جانبی			
۳۳۴/۰۰	۱۵۰۴/۹۴	۸۴۳/۰۵	۶۶۱/۸۹	۶/۱۴	بالایی	۴۰	۱۱۰	S2
۲۲۳/۹۴	۱۰۰۹/۰۶	۸۴۳/۰۵	۱۶۶/۰۱	۱/۵۴	پایینی			
۶۱۱۵/۲۲	۲۵۲۹۷/۶۹	۱۶۱۰۷/۱۳	۹۱۹۰/۵۶	۴/۶۷	جانبی			
۴۳۳/۱۵	۱۷۹۱/۸۸	۱۰۰۸/۳۳	۷۸۳/۵۵	۶/۳۶	بالایی	۴۰	۱۲۰	S3
۲۹۰/۵۰	۱۲۰۱/۷۵	۱۰۰۸/۳۳	۱۹۳/۴۲	۱/۵۷	پایینی			





شکل ۴- انرژی و اکسرژی اتلافی از تجهیزات خط اوپراسیون



شکل ۵- شار انرژی و اکسرژی اتلافی در سطوح مختلف تجهیزات خط اوپراسیون کارخانه قند ارومیه

خط اوپراسیون به‌عنوان اولین قدم در راستای ارائه راهکارهایی عملی و اقتصادی برای کاهش سهم انرژی مصرفی در تولید شکر در این کارخانه تعریف شد. به‌منظور رصد و مطالعه کمیت و کیفیت کانون‌های اصلی اتلاف انرژی در خط اوپراسیون، با استفاده از اندازه‌گیری‌های

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از تکنولوژی ترموگرافی و با استفاده از امکانات نرم‌افزاری موجود دمای هر یک از سطوح خارجی تجهیزات خط اوپراسیون در کارخانه قند ارومیه اندازه‌گیری و ثبت شد. ممیزی انرژی اتلافی در

- determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88(12): 4358-4365.
9. Forero-Núñez, C. A. and Sierra-Vargas, F. E. 2016. Heat Losses Analysis Using Infrared Thermography on a Fixed Bed Downdraft Gasifier. *International Review of Mechanical Engineering*, 10(4): 239-246.
  10. Lewis, A. Khodabocus, F. Dhokun, V. and Khalife, M. 2010. Thermodynamic simulation and evaluation of sugar refinery evaporators using a steady state modelling approach. *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15): 2180-2186.
  11. Lorenz, F. 2008. Improving energy efficiency in sugar processing. Elsevier. 885 p.
  12. Sahin, H. Acir, A. Altunok, T. Baysal, E. and Koçyiğit, E. 2010. Analysis of exergy and energy of sugar production process in sugar plant. *Journal of the Energy Institute*, 83(3): 178-185.
  13. Smejkal, Q. Schick, R. Bagherzadeh, A. and Fleischer, L. G. 2008. Influence of reduced temperatures in evaporation and crystallization on the sugar quality and energy consumption in sugar production. *Zuckerindustrie-Berlin*, 133(5): 330.
  14. Taner, T. and Sivrioglu, M. 2015. Energy-exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey. *Energy*, 93: 641-654.
  15. Wang, L. 2008. Energy efficiency and management in food processing facilities: CRC press. 94 p.

به‌عمل‌آمده و محاسبات انجام‌شده در نرم‌افزار EES اتلاف انرژی و اکسرژی محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق را می‌توان به‌صورت صریح در اخذ تصمیمات مدیریتی در رابطه با اولویت بهبود وضعیت عایق‌سازی تجهیزات مورد استفاده قرار داد. همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج به‌دست آمده در این تحقیق به‌عنوان اولین مرحله از مطالعه فنی-اقتصادی رویکردهای ممکن در بهینه‌سازی مصرف انرژی در خط اوپراسیون کارخانه قند ارومیه قلمداد می‌شود. در تحقیقات آتی مؤلفین، مناسب‌ترین روش بهینه‌سازی مصرف انرژی با توجه به اقتضاهای مدیریتی موجود در خط اوپراسیون کارخانه قند ارومیه ارائه خواهد شد.

### سپاس‌گزاری

نویسندگان از مساعدت کارخانه قند ارومیه در حمایت مالی و مهندسی و در اختیار گذاشتن داده‌های فنی قدردانی می‌کنند.

### منابع

1. Asadi, M. 2006. Beet-sugar handbook. John Wiley & Sons. 297 p.
2. Bayrak, M. Midilli, A. and Nurveren, K. 2003. Energy and exergy analyses of sugar production stages. *International Journal of Energy Research*, 27(11): 989-1001.
3. Behbahaninia, A. Ramezani, S. and Hejrandoost, M. L. 2017. A loss method for exergy auditing of steam boilers. *Energy*, 140: 253-260.
4. Carlomagno, G. M. and Cardone, G. 2010. Infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Experiments in fluids*, 49(6): 1187-1218.
5. Cengel, Y. 2014. Heat and mass transfer: fundamentals and applications. McGraw-Hill Higher Education.
6. Chantasiriwan, S. 2017. Optimum Surface Area Distribution of Multiple-effect Evaporator for Minimizing Steam Use in Raw Sugar Manufacturing. *Chemical engineering transactions*, 61: 805-810.
7. Dogbe, E. S. Mandegari, M. A. and Görgens, J. F. 2018. Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process. *Energy*, 145: 614-625.
8. Fokaides, P. A. and Kalogirou, S. A. 2011. Application of infrared thermography for the