

## اجرای سیستم مدیریت تله‌های بخار در واحد دانه‌بندی گوگرد مجتمع پتروشیمی خارک

روح اله گنجی آزاد

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، اداره خدمات فنی، شرکت پتروشیمی خارک

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

ruliganjiazad@gmail.com

### خلاصه

در این پژوهش به بررسی و مطالعه اجرای پروژه سیستم مدیریت تله‌های بخار و نوسازی آن‌ها در واحد دانه‌بندی گوگرد پتروشیمی خارک با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش بازایافت کندانس، پرداخته می‌شود. در این پروژه، با تعویض تله‌های بخار فرسوده و غیرکارآمد، مقدار قابل توجهی کندانس از دست رفته بازیابی شد و بهره‌وری انرژی افزایش یافت. نتایج نشان داد که سالانه حدود ۲۰۰۰ تن کندانس بازایافت و صرفه‌جویی انرژی معادل ۷۵۰ گیگاژول حاصل شده است. این اقدامات ضمن کاهش هزینه‌های عملیاتی و مصرف سوخت، اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار بخار و اتلاف انرژی را نیز به طور قابل توجهی کاهش داده است. مطالعه حاضر نشان‌دهنده اهمیت سیستماتیک مدیریت تله‌های بخار در بهینه‌سازی عملکرد واحدهای صنعتی و افزایش بازدهی انرژی است.

**کلمات کلیدی:** تله بخار، اتلاف انرژی، کندانس برگشتی، سیستم مدیریت تله بخار، دانه‌بندی گوگرد

### ۱. مقدمه

شرکت پتروشیمی خارک یکی از چهار شرکت پتروشیمی تأسیس شده در دهه ۱۳۴۰ شمسی بوده و در کنار شرکت‌های پتروشیمی شیراز، رازی و آبادان هسته اولیه تشکیل شرکت ملی صنایع پتروشیمی در ایران می‌باشد. شرکت پتروشیمی خارک با بیش از نیم قرن نقش آفرینی در صنعت پتروشیمی کشور در جزیره خارک واقع است. این جزیره مرجانی به مساحت حدود ۵۷ کیلومتر مربع در شمال غربی بندر بوشهر و شمال خلیج فارس قرار دارد. این مجتمع در سال ۱۳۴۴ تحت عنوان شرکت سهامی شیمیایی خارک جهت بازیافت پروپان، بوتان، نفتا و گوگرد از گازهای استحصالی چاه‌های حوزه نفتی فلات قاره ایران با مشارکت پنجاه - پنجاه بین شرکت ملی صنایع پتروشیمی و شرکت آمریکایی آموکو تأسیس شد. در سال ۱۳۷۳ به منظور جلوگیری از سوختن گازهای سبک تولید شده<sup>۱</sup> در فرآیند مجتمع و تبدیل آن به فرآورده‌هایی با ارزش افزوده بالا و حرکت هرچه بیشتر به سمت خودکفایی به منظور قطع وابستگی و افزایش صادرات و همچنین در جهت انتقال تکنولوژی، ایجاد افزایش درآمد ارزی، کاهش آلودگی محیط زیست و اشتغال در منطقه، طرح احداث واحد متانول خارک در زمینی به مساحت ۲۴ هکتار احداث و در سال ۱۳۷۸ به بهره‌برداری رسید. مجتمع پتروشیمی

<sup>۱</sup> Off Gas



خارک دارای واحدهای تولید گاز مایع<sup>۱</sup>، تولید متانول، بازیابی گوگرد مذاب و دانه بندی گوگرد و همچنین سرویس های جانبی در کنار دو اسکله صادراتی با قابلیت بارگیری کشتی های تا ۴۵ هزار تن می باشد.

با توجه به درصد بالای گاز H<sub>2</sub>S گاز خوراک پتروشیمی خارک، و در راستای اهداف زیست محیطی یک واحد بازیافت گوگرد<sup>۲</sup> جهت تبدیل گازهای اسیدی به عنصر گوگردی توسط شرکت آمریکایی PRICHARD طراحی گردیده و تجهیزات مورد نیاز توسط شرکت ژاپنی CHIYODA در سال ۱۹۶۸ نصب و همزمان با راه اندازی دیگر واحدهای فرایندی این واحد آغاز به فعالیت نموده است

همانگونه که ذکر گردید با توجه به درصد بالای گاز H<sub>2</sub>S ورودی که برابر با ۵۸ درصد می باشد از لحاظ غلظت گاز H<sub>2</sub>S در کشور رتبه اول را داشته که به همین جهت با توجه به راندمان بازیافت که برابر با ۹۷ درصد می باشد میزان تولید گوگرد مذاب مطابق با طراحی ۵۱۵ تن در روز بوده و جهت استفاده بهینه، گوگرد مذاب تولیدی در واحد دانه بندی گوگرد تبدیل به گوگرد گرانول می گردد. طراحی واحد دانه بندی توسط شرکت لهستانی BIPROK WAS انجام شده و تجهیزات این واحد توسط شرکت مربوطه نصب و راه اندازی گردیده است که بعلاوه نیاز کل گوگرد تولیدی در داخل کشور، گوگرد تولیدی این مجتمع بدلیل بالا بودن کیفیت و شرایط جغرافیایی و نزدیک بودن به دریا از طریق کشتی های مخصوص به کشورهای همسایه صادر می گردد

شرکت پتروشیمی خارک تنها شرکت تولید کننده گاز مایع، گوگرد، متانول و یوتیلیتی به صورت همزمان است و محصولات تولیدی را از گاز ترش غنی<sup>۳</sup> حوزه جزیره خارک تامین می کند که موقعیتی استراتژیک و انحصاری به آن می دهد [۱ و ۲]. طرح شماتیک فرآیند بازیابی گوگرد مذاب و همچنین فرآیند دانه بندی گوگرد در مجتمع پتروشیمی خارک در شکل شماره ۱ قابل مشاهده می باشد

به منظور کاهش و جلوگیری از اتلافات شبکه بخار در واحد دانه بندی گوگرد، پروژه هایی به جهت مدیریت تله های بخار این شبکه، توسط اداره خدمات فنی و واحد مدیریت انرژی مجتمع تعریف گردید و در دستور کار جهت اجرا قرار گرفت. که در فازهای ابتدایی این پروژه، با توجه به حجم بالای استفاده از بخار، به جهت گرمایش کویل های گرمایشی مخازن ذخیره گوگرد مذاب، نوسازی و بهسازی شبکه کندانس بازگشتی و تله های بخار موجود در این بخش، در دستور کار قرار گرفت. در ابتدا، با انجام مطالعات و بررسی های اولیه، و با توجه به فشار و دما و میزان و حجم کندانس بازگشتی و سایر شرایط فرآیندی، نوع تله های بخار مورد نیاز جهت اجرای این پروژه مشخص گردید. در ادامه و پس از تامین متریکال مورد نیاز جهت اجرا، پروژه مربوطه با موفقیت اجرا و در سرویس قرار گرفت. پژوهش حاضر جزئیات اجرا و دستاوردهای حاصل از این پروژه را تشریح می نماید [۳].

## ۲. شرح فرآیند واحد دانه بندی گوگرد<sup>۴</sup> مجتمع پتروشیمی خارک<sup>۵</sup>

گوگرد مذاب با دمای ۱۳۵ °C و فشار ۱۲ bar توسط پمپ های J-100-02 A/B از واحد بازیافت گوگرد مذاب به تانک های ذخیره گوگرد F-200-01 A/B موجود در واحد دانه بندی گوگرد ارسال می شود. تانک های ذخیره گوگرد به منظور حفظ دمای گوگرد مذاب و جلوگیری از جامد شدن گوگرد، مجهز به سیستم گرمایشی کویل می باشند که سیال گرم کننده،

<sup>1</sup> Liquefied Petroleum Gas (LPG)

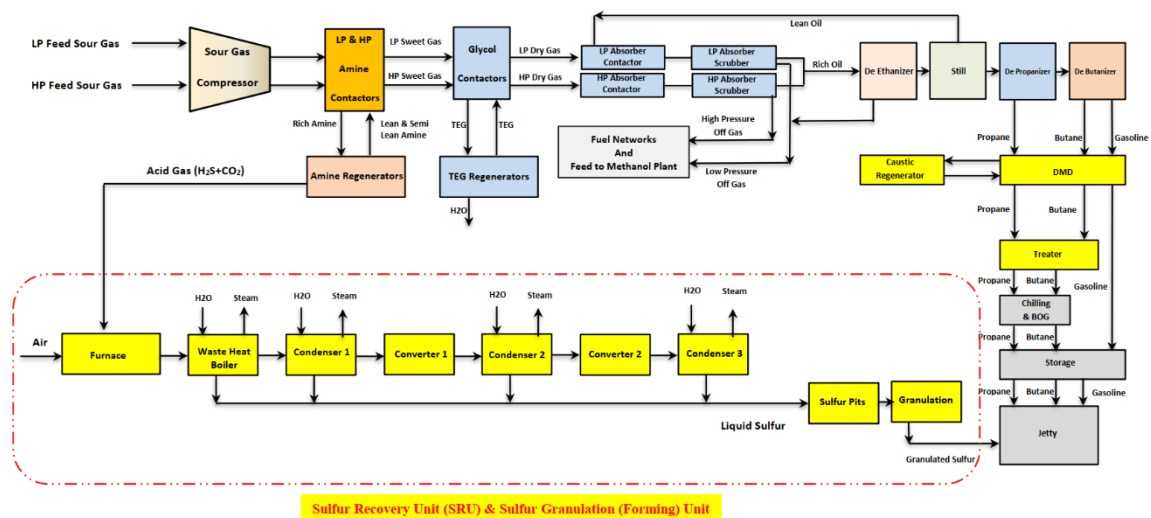
<sup>2</sup> Sulfur Recovery Unit (SRU)

<sup>3</sup> Associated Rich Sour Gas

<sup>4</sup> Sulfur Granulation (Forming) Unit

<sup>5</sup> Khark Petrochemical Complex (KPC)

بخار می باشد. در ادامه گوگرد مذاب بواسطه نیروی وزن از F-200-01 A/B وارد F-200-03 می شود در این تانک، بواسطه تزریق آب پروسس (با دمای  $36^{\circ}\text{C}$ ) دمای گوگرد مذاب از  $135^{\circ}\text{C}$  به  $125^{\circ}\text{C}$  کاهش می یابد و توسط پمپ های J-200-04 A/B با فشار 16 bar به سیستم گرانول سازی B-200-08 (گرانولاتور) ارسال می شود. در شکل ۲ نمودار ساده شده فرآیندی (بلاک دیاگرام) مربوط به واحد دانه بندی گوگرد آورده شده است.



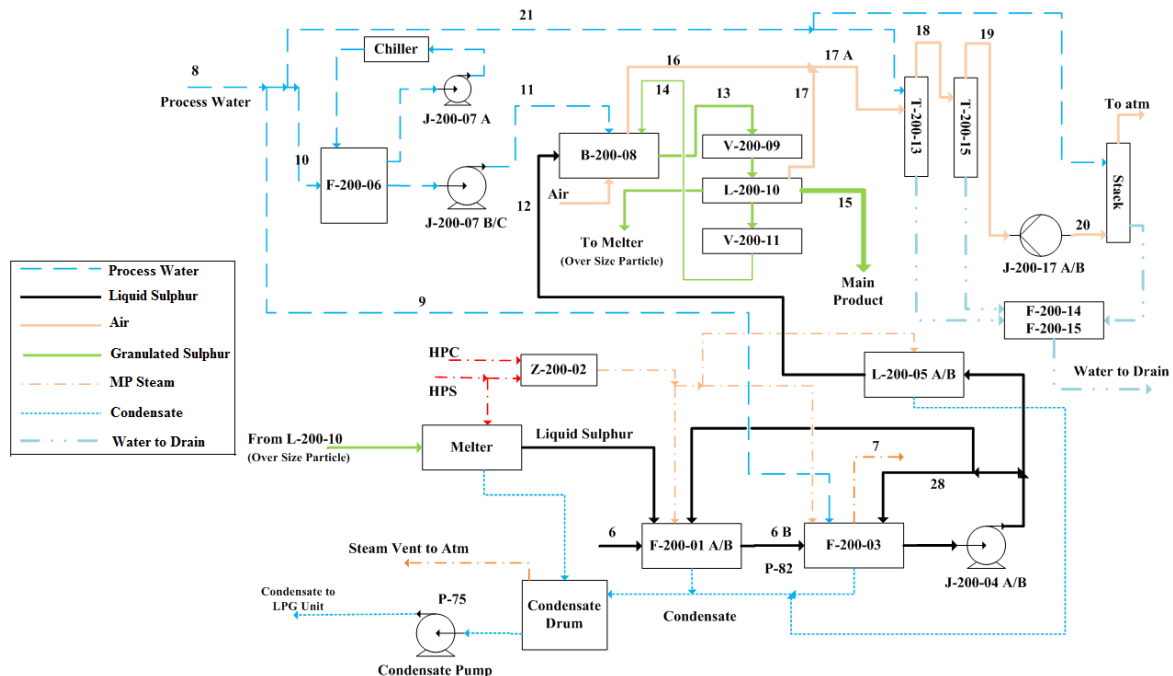
شکل ۱ - طرح شماتیک واحدهای بازیافت و دانه بندی گوگرد در مجتمع پتروشیمی خارک

دانه بندی گوگرد در سیستم گرانولاتور<sup>۱</sup> انجام می شود. گوگرد مذاب ارسال شده توسط پمپ های J-200-04 A/B بصورت تحت فشار به هدر نازل های تزریق، در درام گرانولاتور هدایت می شود. گوگرد مذاب توسط نازل های تزریق به درون فضای مه آلود گرانولاتور، اسپری می شود (شکل ۳). دانه های گوگرد ریز که محصول جانبی سیستم غربالی (L-200-10) می باشد توسط نوار نقاله (V-200-11)، به عنوان هسته اولیه دانه بندی، وارد گرانولاتور می شوند. این دانه ها در حین پیمودن مسیر عمودی (افتادن بر اثر نیروی وزن)، توسط گوگرد مذاب اسپری شده، پوششی از گوگرد بر روی این دانه های ریز قرار می گیرد و لذا قطر این ذرات افزایش می یابد. با چرخش درام گرانولاتور، فرآیند پوشش دهی برای هر دانه گوگرد چندین مرحله تکرار می شود و در نهایت دانه های گوگرد تولید شده از درام گرانولاتور خارج می شوند و توسط نوار نقاله<sup>۲</sup> (V-200) به سیستم غربال لرزشی (L-200-10) منتقل می شود تا دانه های گوگرد با ابعاد مورد نیاز تفکیک شوند. مشخصات سیستم گرانول سازی گوگرد در جدول شماره ۱ گزارش شده است.

سرمایش مورد نیاز در سیستم دانه بندی گوگرد نیز بواسطه تبخیر آب فرآیندی اسپری شده و گرم شدن هوای موجود در درام گرانولاتور، اتفاق می افتد. آب فرآیندی نیز بواسطه پمپ های J-200-07 B/C، به سمت نازل های تزریق تعبیه شده در درون درام گرانولاتور، هدایت و در مسیر سقوط دانه های گوگرد، اسپری می شود. همچنین بواسطه مکشی که توسط فن های J-200-17 A/B ایجاد می شود، هوای غبار آلود موجود در درام گرانولاتور، تخلیه می شود. پارامترهای فرآیندی سیستم گرانول سازی در جدول شماره ۲ گزارش شده است.

<sup>1</sup> Granulator

<sup>2</sup> Belt



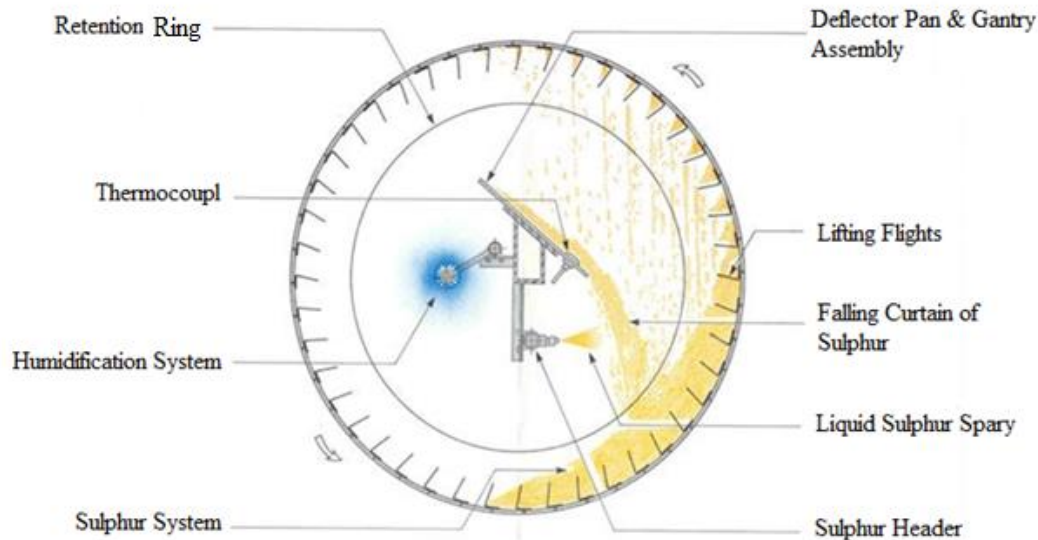
شکل ۲ - نمودار جریان جرم و انرژی واحد دانه بندی گوگرد

جدول ۱- مشخصات سیستم گرانول سازی گوگرد

| Parameter          | Unit     | Value |
|--------------------|----------|-------|
| Normal Capacity    | Ton/ Day | 800   |
| Power              | kW       | 30    |
| Electromotor Speed | rpm      | 740   |
| Drum Speed         | rpm      | 7     |

جدول ۲- پارامترهای فرآیندی سیستم گرانول سازی گوگرد در شرایط طراحی

| پارامتر                            | واحد  | مقدار      |
|------------------------------------|-------|------------|
| فشار گوگرد مذاب ورودی به هدر تزریق | Bar g | 13 - 15    |
| فشار آب فرآیندی ورودی به هدر تزریق | Bar g | 23 - 25    |
| دمای گوگرد مذاب ورودی به هدر تزریق | °C    | 125        |
| دمای آب فرآیندی ورودی به هدر تزریق | °C    | کمتر از 36 |
| دمای گوگرد دانه بندی شده           | °C    | 80 - 85    |



شکل ۳ - نحوه تزریق گوگرد مذاب و آب به سیستم گرانول سازی

دانه‌های گوگرد خروجی از سیستم گرانول سازی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- ۱- کلوخه‌های گوگرد و دانه‌های بزرگ‌تر از حد اندازه قابل قبول، که به سولفور پیت منتقل می‌شوند و توسط ملتر<sup>۱</sup> مجدداً به گوگرد مذاب تبدیل و به تانک‌های ذخیره گوگرد مذاب F-200-01 A/B برگرانده می‌شود.
- ۲- دانه‌های گوگرد با اندازه قابل قبول که توسط سیستم نوار نقاله به انبارهای گوگرد ارسال می‌شود.
- ۳- دانه‌های گوگرد کوچکتر از اندازه قابل قبول، که به عنوان هسته اولیه دانه‌بندی، توسط سیستم نوار نقاله V-200-11 به درام سیستم گرانول سازی منتقل می‌شود.



شکل ۴ - سیستم گرانول سازی (گرانولاتور)<sup>۲</sup> B-200-08

<sup>۱</sup> Melter

<sup>۲</sup> Granulator

### ۳. تله بخار، انواع آن و اهمیت استفاده از آن در سیستم‌ها و سامانه‌های بخار

بخار به عنوان یکی از رایج‌ترین حامل‌های انرژی در صنایع مختلف، نقش اساسی در انتقال حرارت و انرژی دارد. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از بخار، مدیریت موثر کندانس و جلوگیری از هدررفت بخار زنده است. در این راستا، تله بخار به عنوان تجهیز کنترلی برای تخلیه کندانس و گازهای غیرقابل چگالش، بدون نشت بخار زنده، طراحی شده است. این دستگاه‌ها وظیفه جداسازی میعانات، هوا و گاز دی‌اکسید کربن از بخار زنده را بر عهده دارند و در عین حال از اتلاف بخار زنده جلوگیری می‌کنند در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و همچنین پالایشگاه‌های نفتی، تأثیر مالی ناشی از نشتی انرژی بخار در مقایسه با اختلالات لحظه‌ای در تولید، ناچیز به نظر می‌رسد. بنابراین، تعمیرات مربوط به نشتی بخار معمولاً اولویت کمتری نسبت به بهینه‌سازی تولید دارند. با این حال، مصرف سوخت و اثرات زیست‌محیطی ناشی از نشتی بخار موجب افزایش توجه به این موضوع شده است. در یک پالایشگاه نفت معمولی، مصرف انرژی بخار حدود ۳۰٪ از کل ترکیب انرژی را تشکیل می‌دهد. طبق گزارش وزارت انرژی ایالات متحده، حتی تا حدود ۲۰٪ از بخار تولیدی در واحد بویلر بسته به شرایط تله‌های بخار معیوب می‌تواند از طریق تله‌های بخار نشتی‌دار در شبکه توزیع از بین رود [۴ و ۵ و ۶ و ۷]. نشت بخار می‌تواند باعث افزایش مصرف سوخت، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و اختلال در تولید شود. بنابراین، شناسایی مؤثر نشت انرژی از تله‌های بخار برای صرفه‌جویی اقتصادی و تولید سازگار با محیط زیست بسیار حیاتی است.

تله بخار<sup>۱</sup> نوعی شیر اتوماتیک است که میعانات (یعنی بخارات متراکم شده) و گازهای غیرقابل تراکم مانند هوا را بدون خروج بخار، فیلتر می‌کند. مهمترین کار تله بخار تخلیه سریع میعانات است که در خطوط توزیع بخار، تریس‌های بخار و تجهیزات مصرف کننده بخار تشکیل شده است. تله بخار همچنین باید بتواند با جلوگیری از نشت بخار و تخلیه گازهایی مانند هوا در مصرف انرژی صرفه جویی کند. برای هر سیستم بخار در نیروگاه‌ها یا کارخانه‌های نفتی و گازی تله بخار یک جزء ضروری است. این تجهیز بخار را در فرآیند حفظ می‌کند که به حداکثر استفاده از انرژی کمک می‌کند و در نتیجه کارایی انرژی را افزایش می‌دهد.

همان طور که عنوان گردید، تله‌های بخار تجهیزاتی هستند که در شبکه توزیع بخار نصب می‌شوند تا کندانس، هوا و سایر گازهای غیرقابل تقطیر را تخلیه کنند، در حالی که جلوی هدررفت بخار را نیز می‌گیرند. باقی‌ماندن کندانس در خطوط لوله باعث کاهش ظرفیت عبور بخار و کاهش توان حرارتی تجهیزات انتقال حرارت می‌شود. همچنین، کندانس اضافی می‌تواند منجر به ضربه چکشی<sup>۲</sup> شود که بسیار خطرناک و مخرب است. هوای محبوس شده در خطوط بخار در زمان راه‌اندازی، فشار و دمای بخار را کاهش می‌دهد و در نتیجه ظرفیت حرارتی تجهیزات را پایین می‌آورد. عامل اصلی خوردگی در شبکه بخار، گازهای غیرقابل تقطیر مانند اکسیژن و دی‌اکسید کربن هستند. تله‌های با ظرفیت بالا عموماً برای کاربردهای فرآیندی و گرمایشی نظیر ریویلر، اواپراتورها، هیترها و راکتورها که مستقیماً با بهره‌وری تولید مرتبط هستند، کاربرد دارد و تله‌های با ظرفیت پایین غالباً برای کاربردهای عمومی مانند خطوط بخار تریسینگ (Steam Tracing)، خطوط ژاکت‌دار، و سیستم‌های بازیافت حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تله‌های بخار در صنایع نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی، نیروگاه‌های بخار و تاسیسات گرمایش منطقه‌ای، صنایع غذایی، دارویی و نساجی کاربرد فراوان دارد.

تله‌های بخار دارای مدل‌های مختلفی هستند. هر مدل تله بخار ویژگی‌های خاص خود را دارد که در مقایسه با مدل‌های دیگر مزایا و معایبی دارا می‌باشد. مطابق با استاندارد بین‌المللی ISO 6704:1982، و همچنین مقالات علمی و گزارشات

<sup>1</sup> Steam Trap

<sup>2</sup> Water Hammer



فنی معتبر، تله‌های بخار به سه نوع اصلی تقسیم می‌شوند که هر کدام ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند [۴ و ۵ و ۸ و ۹]. انواع اصلی عبارتند از:

\* تله‌های مکانیکی (Mechanical Traps)، که بر اساس سطح کندانس درون خود باز و بسته می‌شوند و مستقل از دما و فشار عمل می‌کنند. دو نوع رایج تله شناور توپی (Ball Float Trap) و تله سطل معکوس یا وارونه (Inverted Bucket Trap) از انواع تله‌های بخار مکانیکی می‌باشند

\* تله‌های ترموستاتیکی (Thermostatic Traps)، که بر اساس اختلاف دمای بین بخار و کندانس عمل می‌کنند و از عناصر حساس به حرارت برای تنظیم تخلیه میعان‌ات استفاده می‌کنند که باعث می‌شود اختلاف دمای بین بخار و کندانس منجر به باز یا بسته کردن یک شیر شود. انواع رایج این تله بخار شامل تله با فشار متعادل (Balanced Pressure Trap)، تله بایمتال یا دو فلزی (Bi-Metallic Trap) می‌باشد

\* تله‌های ترمودینامیکی (Thermodynamic Traps)، که بر اساس اختلاف انرژی جنبشی (سرعت) بین کندانس و بخار زنده عمل می‌کنند. رایج‌ترین نوع آن‌ها تله دیسکی (Disc Trap) می‌باشد.

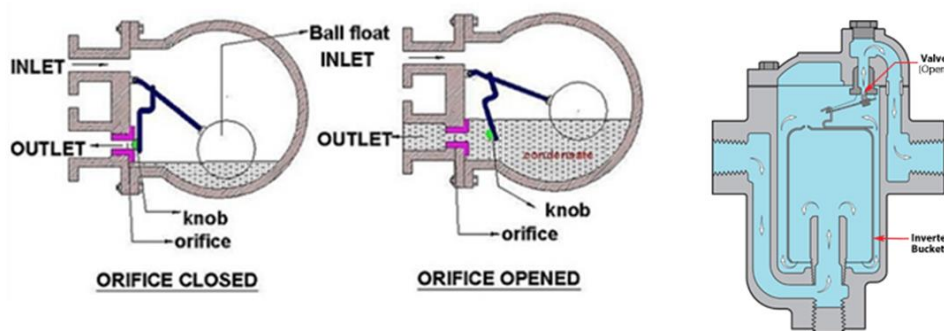
همانگونه که ذکر گردید، تله‌های بخار را می‌توان بر اساس اصول عملکرد به سه نوع مختلف تقسیم‌بندی نمود. در ادامه توضیحات بیشتری در مورد نحوه عملکرد و مزایا و معایب هر مدل ارائه می‌گردد

تله‌های بخار مکانیکی شامل Free Float و Lever Float و تله‌های بخار سطلی معکوس (Inverted Bucket) هستند. تله‌های مکانیکی با استفاده از اختلاف چگالی بین بخار (یا هوا) و میعان‌ات عمل می‌کنند. به عبارت دیگر تله بخار مکانیکی بر اساس تفاوت وزن مخصوص آب و بخار عمل می‌کند، برخلاف انواع دیگر تله‌های بخار که به تغییر دما یا تغییر سرعت فاز متکی هستند. در تله‌های مکانیکی درپچه به دلیل حرکت شناوری که با جریان میعان‌ات بالا و پایین می‌رود، باز و بسته می‌شود. تله‌های مکانیکی می‌توانند بدون اینکه عملکرد آن‌ها توسط اکثر عوامل خارجی به خطر بیفتد بصورت دقیق عمل کرده و میعان‌ات را تخلیه کنند که یکی از مزایای متمایز آن‌ها نسبت به تله‌های بخار ترموستاتیکی و ترمودینامیکی می‌باشد زیرا عملکرد این دو مدل تله بخار می‌تواند تحت تأثیر عوامل خارجی و شرایط محیطی مانند باران، باد یا حتی عایق قرار گیرد. دو نوع اصلی تله بخار مکانیکی وجود دارد تله‌های شناوری و تله‌های سطلی معکوس. تله‌های شناور معمولاً از یک شناور کرووی آب‌بندی‌شده استفاده می‌کنند در حالی که تله‌های سطلی معکوس از یک فنجان شناور و استوانه ای وارونه استفاده می‌کنند. شناوری نیروی کلیدی است که در هسته هر دو نوع تله مکانیکی عمل می‌کند، اما ساختار و اصول عملکرد آنها کاملاً متفاوت است. در شکل شماره ۵، شمایی از این دو مدل مشاهده می‌گردد [۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳].

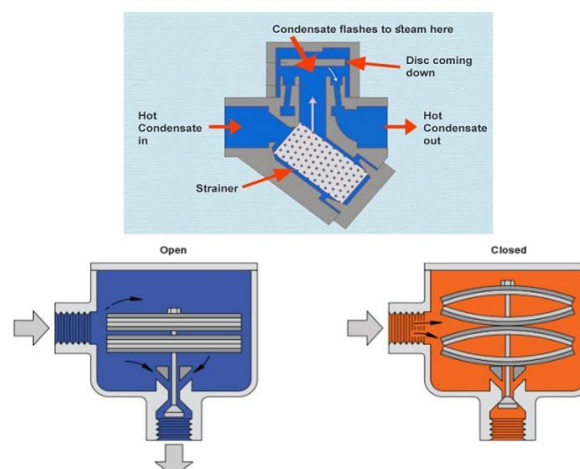
تله بخار ترمودینامیکی شامل دو دسته اصلی، دیسک ترمودینامیکی و ضربه ترمودینامیکی می‌شود. از این دو نوع، تله‌های دیسکی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. تله‌های بخار ترمودینامیکی با استفاده از تفاوت انرژی جنبشی بین بخار با سرعت بالا و میعان‌ات با حرکت کندتر عمل می‌کنند. تله بخار نوع ترمودینامیکی به دلیل اندازه جمع و جور و تطبیق‌پذیری آن‌ها در یک محدوده فشار گسترده ارزشمند است. این نوع می‌تواند ساختار ساده‌ای داشته باشد و در موقعیت‌های افقی یا عمودی کار کند. این ویژگی‌ها تله‌های بخار ترمودینامیکی را به گزینه‌ای مطلوب برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای فرآیند تبدیل می‌نماید. با توجه به شکل ۶، تنها قطعه متحرک در این دستگاه، دیسکی است که در بالای سطح صاف (نشیمنگاه دیسک) و در بخش بالایی تله بخار قرار دارد. در زمان راه‌اندازی، فشار ورودی دیسک را به سمت بالا هل می‌دهد و کندانس سرد به همراه هوا از حلقه داخلی وارد تله بخار می‌شود و سپس از طریق سوراخ خروجی تخلیه می‌شوند. با رسیدن کندانس داغ و کاهش فشار در خروجی، بخار فلاش ایجاد می‌کند و بخار با سرعت زیاد عبور می‌کند. این افزایش سرعت باعث ایجاد یک خلا یا فشار کم هوا در زیر دیسک شده و آن را به سمت پایین می‌کشد. در همان زمان، بخار فلاش در بخش بالایی

دیسک جمع می‌شود و دیسک را به سمت پایین هل می‌دهد و تا زمان کاهش فشار بخار در نتیجه کندانس شدن آن، تله بسته می‌ماند. پس از کاهش فشار بخار بالایی به دلیل سرد شدن، دیسک به سمت بالا حرکت کرده و کندانس تخلیه می‌شود و این سیکل تکرار می‌شود [۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳].

تله‌های بخار ترموستاتیک با استفاده از اختلاف دمایی عمل می‌کنند. یکی از انواع تله‌های بخار ترموستاتیک، تله‌های بی‌متال<sup>۱</sup> (بایمتال) است. بی‌متال یک عنصر ترموستاتیک است که از دو صفحه فلزی غیر مشابه به هم چسبیده تشکیل شده است. این فلزات نامشابه دارای ضرایب انبساط حرارتی متفاوتی هستند و هنگامی که در معرض تغییر دما قرار می‌گیرند عنصر شروع به تغییر شکل می‌کند. تله‌های بخار بی‌متال از تغییر شکل عنصر دو فلزی برای باز کردن یا بستن شیر استفاده می‌کنند. برخی از تله‌های بخار بی‌متال را می‌توان طوری طراحی کرد که در دمای کاری از پیش تعیین‌شده کار کنند. سایر تله‌های بخار بی‌متال می‌توانند دمای عملیاتی خود را توسط اپراتورهای میدانی تنظیم کنند. عنصر بی‌متال موجود در این تله‌ها برای باز کردن تله در زمانی که دما خیلی پایین است (جهت تخلیه کندانس) یا بستن تله زمانی که دما خیلی بالا است استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳].



شکل ۵ - تصویر تله بخار مکانیکی شناوری اهرم‌دار (Lever Float) (چپ) و تله بخار مکانیکی سطل معکوس (راست) [۱۰]



شکل ۶ - تصویر تله بخار ترمودینامیکی (بالا) و تله بخار ترموستاتیک بی‌متالیک (پایین) [۱۰]

<sup>1</sup> Bi-Metal

#### ۴. اتلاف بخار از تله های معیوب

چالش ها و نواقص رایج در تله های بخار شامل نشتی بخار و اتلاف انرژی، انسداد به علت رسوب یا زنگ زدگی، و تعمیرات پرهزینه و پیچیده در صورت عدم پایش منظم می باشد. تله های بخار دارای روزنه داخلی هستند تا در صورت بازماندن (نشتی)<sup>۱</sup>، میزان اتلاف بخار کاهش یابد. جریان بخار از طریق این روزنه طبق معادله جان نیپر<sup>۲</sup> (معادله شماره ۱) محاسبه می شود [۱۴]:

$$W = 0.247275 * P_{abs} * D^2 \quad (1)$$

0.247275

$W$

$P_{abs}$

$D$

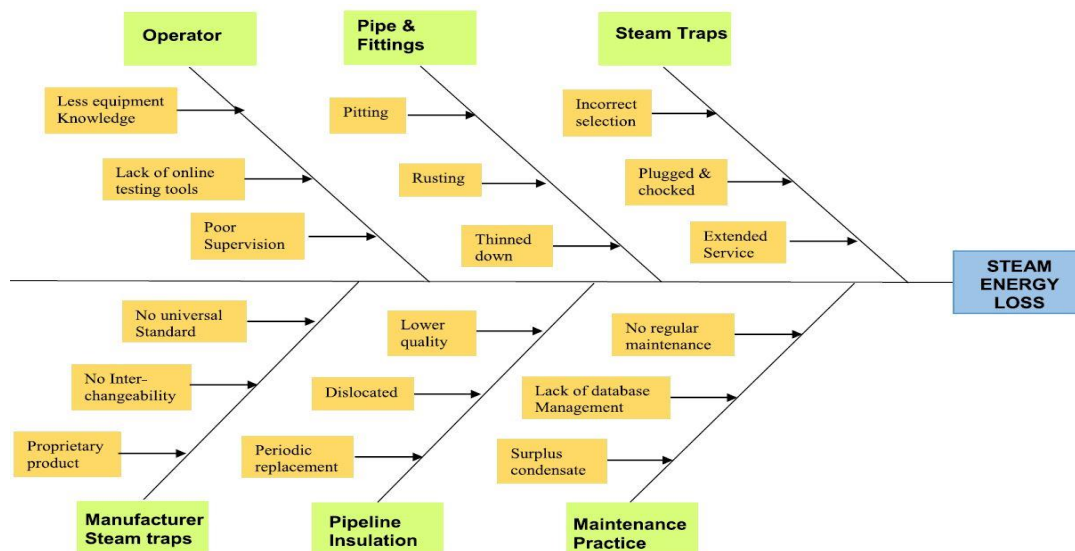
ضریب ثابت<sup>۳</sup>

اتلاف بخار<sup>۴</sup> (کیلوگرم در ساعت)

فشار بخار<sup>۵</sup> (بار)

قطر روزنه داخلی<sup>۶</sup> (میلی متر)

این فرمول نشان می دهد که اتلاف بخار به فشار بخار و قطر روزنه بستگی دارد. بنابراین، تله های مختلف دارای میزان اتلاف متفاوتی هستند. برخی از تله ها اثر مالی و ایمنی بالایی بر عملکرد پالایشگاه دارند. در شکل شماره ۷ تحلیل نمودار استخوان ماهی برای اجزای شبکه توزیع بخار نشان داده است که چگونه وجود نقص و عیب در هر بخش منجر به اتلاف انرژی بخار می گردد. نکته ای که در این نمودار حائز اهمیت است و به چشم می آید این است که وجود هرگونه عیب و نقصی در کارکرد تله بخار (انسداد، عدم تعمیرات به موقع و ...) و همچنین عدم انتخاب مناسب تله بخار متناسب با شرایط فرآیندی سرویس و عملیات، منجر به اتلاف انرژی بخار در شبکه توزیع می گردد [۴].



شکل ۷ - نمودار استخوان ماهی (Fishbone Diagram) برای اجزای شبکه توزیع بخار [۴]

<sup>1</sup> Failed Open Condition

<sup>2</sup> John Napier Equation (Napier's Formula)

<sup>3</sup> Constant

<sup>4</sup> Steam Loss

<sup>5</sup> Steam Pressure

<sup>6</sup> Diameter of the Internal Orifice



با ادامه رشد تقاضا برای انرژی، نقش تله‌های بخار در بهبود کارایی انرژی مهم‌تر خواهد شد. در آینده، پیشرفت‌های فناوری در تله‌های بخار احتمالاً شامل ادغام حسگرهای پیشرفته و قابلیت‌های تحلیل داده‌ها خواهد بود که امکان نظارت در زمان واقعی و بهینه‌سازی عملکرد را فراهم می‌کند. علاوه بر این، توسعه تله‌های بخار جدید می‌تواند نقش زیادی در کاهش مصرف انرژی و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی در صنایع مختلف ایفا کند. با توجه به این مورد که تله بخار نقش بسیار حیاتی در عملکرد بهینه سیستم‌های بخار ایفا می‌کند. استفاده از تکنولوژی‌های نوین نظیر پایش هوشمند و تحلیل داده‌محور می‌تواند کاهش چشمگیر اتلاف انرژی، افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های عملیاتی را حاصل شود. توسعه سیستم‌های هوشمند تشخیص و نگهداری پیش‌بینانه، آینده‌ای کارآمد و پایدار را برای صنایع بخارمحور نوید می‌دهد. فناوری‌های نوین که در پایش تله بخار می‌تواند کاربرد داشته باشد شامل استفاده از حسگرهای حرارتی و آلتراسونیک برای تشخیص عملکرد غیرعادی، سیستم مانیتورینگ بلادرنگ برای کنترل پیوسته وضعیت تله‌ها، و بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی خرابی و زمان تعویض تله باشد.

## ۶. مرور بر ادبیات

بطباطبایی قمشه و همکاران با بررسی و محاسبه میزان اتلاف انرژی از تله‌های بخار واحد MTBE پتروشیمی بندر امام، مشخص کردند که میزان اتلاف بخار از تله‌های بخار معیوب این واحد حدود ۴ درصد از کل مصرف بخار واحد می‌باشد [۱۵]. نتایج بدست آمده از پژوهش بمانی و همکاران به منظور بررسی نقش تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تولید بخار در پالایشگاه چهارم پارس جنوبی نشان می‌دهد که انجام تعمیرات پیشگیرانه مدون بر روی تله‌های بخار باعث صرفه‌جویی سالانه حدود ۵۸۰ میلیون تومانی (مطابق با قیمت حامل‌های انرژی در سال ۱۳۹۳) و همچنین کاهش تولید ۷۰ تن بخار در ساعت می‌شود [۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹]. باغبان و همکاران در بررسی که در جهت مدیریت تله‌های بخار در شرکت پالایش نفت اصفهان انجام گرفت، نشان دادند که هزینه تعویض تله‌های بخار معیوب در آن پالایشگاه با توجه به زمان بازگشت سرمایه ۱/۶ سال، از لحاظ اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است و هزینه سالیانه اعمال برنامه منظم بازرسی و تست تله‌های بخار، فقط ۱۲ درصد هزینه اتلاف بخار در شرایط عملکرد نامناسب تله‌های بخار می‌باشد [۲۰]. مرادی‌فر و همکاران بر اساس بازرسی و پژوهشی که در راستای مدیریت تله‌های بخار در مجتمع گاز پارس جنوبی، فازهای ۱ تا ۵ صورت گرفته است عنوان نمودند که از ۲۷۴۳ تله بخار تست‌شده حدود ۷۲ درصد عملکرد مناسبی نداشتند. طبق بررسی‌های انجام‌شده، نوسازی کامل سیستم جمع‌آوری کندانس و تعویض تله‌های بخار ترمودینامیکی موجود با نوع Free Float، با زمان بازگشت سرمایه کمتر از یک سال از لحاظ اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است [۲۱]. دالوند اصطهباناتی و بمانی، با بررسی اثرات اقتصادی و زیست محیطی انجام تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در پالایشگاه چهارم پارس جنوبی نشان دادند که انجام تعمیرات پیشگیرانه مدون بر روی تله‌های بخار علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، باعث کاهش تولید ۴۹۱ تن دی اکسید کربن در سال می‌گردد [۲۲ و ۲۳]. سلفیان و همکاران در پژوهشی که در راستای بررسی عملکرد و میزان اتلاف انرژی تله‌های بخار پالایشگاه اصفهان انجام دادند، عنوان نمودند که در پالایشگاه اصفهان بالغ بر ۸۰۰۰ عدد تله بخار وجود دارد که میزان اتلاف انرژی از تله‌های بخار معیوب این پالایشگاه حدود ۱۶ درصد کل اتلاف انرژی پالایشگاه برآورد گردیده است که اگر بتوان حتی از اتلاف نیمی از آن جلوگیری نمود، سالانه معادل حدود ۲۵۰ هزار بشکه نفت خام در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌گردد [۲۴]. گنجی آزاد در یک مطالعه به بررسی نحوه انتخاب تله بخار مناسب با شرایط فرآیندی بخار MP در واحدهای تولید کننده متانول طراحی شده توسط شرکت لورگی (Lurgi) آلمان پرداخته است که به صورت موردی مجتمع پتروشیمی خارک مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۵ و ۲۷]. گنجی آزاد در یک پژوهش دیگر با بررسی پروژه اجرای سیستم مدیریت

تله‌های بخار و تعویض تله‌های فرسوده در واحد بازیافت گوگرد مذاب پتروشیمی خارک، نشان داد که اجرای این پروژه نتایج عملی و اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته است که به موجب آن ۱۲۸۰۰ تن کندانس در سال بازیابی و انرژی معادل ۴۷۶۰ گیگاژول صرفه‌جویی گردید. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در کاهش هدررفت انرژی و افزایش بهره‌وری واحد صنعتی است [۲۶].

#### ۷. پروژه سیستم مدیریت تله‌های بخار<sup>۱</sup> واحد دانه‌بندی گوگرد<sup>۲</sup> مجتمع پتروشیمی خارک<sup>۳</sup>

به منظور کاهش و جلوگیری از اتلافات شبکه بخار در واحد دانه‌بندی گوگرد، پروژه‌ای به جهت مدیریت تله‌های بخار این شبکه، توسط واحد مدیریت انرژی مجتمع تعریف گردید. در این پروژه، با توجه به حجم بالای استفاده از بخار به جهت گرمایش در مخازن ذخیره گوگرد مذاب، سولفور تانک، میلتر و سایر یوزرهای بخار، نوسازی و بهسازی تله‌های بخار موجود در این بخش، در دستور کار قرار گرفت. در ابتدا، با انجام مطالعات و بررسی‌های اولیه، و با توجه به فشار و دما و میزان و حجم کندانس بازگشتی و سایر شرایط فرآیندی، نوع تله‌های بخار مورد نیاز جهت اجرای این پروژه مشخص گردید. در ادامه، با صدور درخواست خرید تایپ و نمونه تله‌های بخار مشخص شده، متریال مورد نیاز جهت اجرا، تامین گردید.

در فاز اول پروژه و با اجرای آن، بالغ بر ۵۰ عدد تله بخار، شامل تله بخارهای دور تا دور هر دو مخزن ذخیره گوگرد مذاب (F-200.01 A/B) و بخش‌هایی دیگری از واحد تعویض گردید. در واحد دانه‌بندی گوگرد به منظور حفظ دمای گوگرد مذاب موجود در دو تانک ذخیره گوگرد مذاب، از کویل‌های گرمایشی استفاده می‌گردد که از بخار جهت تبادل حرارت بهره برده می‌شود. بخار موجود درون کویل‌های گرمایشی، پس از تبادل حرارت با گوگرد مذاب به صورت کندانس درآمده و از سمت دیگر خارج می‌گردند. تله بخارهای موجود در خروجی کویل‌ها، در ابتدا و قبل از اجرای پروژه، مشکل داشته و نوع تله بخار استفاده شده با شرایط بخار و همچنین شرایط محیطی همخوانی نداشته که موجب هدررفت بخار می‌شد. پس از اجرای پروژه، برای هر تانک، ۲۵ عدد تله بخار از نوع ترمودینامیکی تعبیه گردید. همچنین تعدادی تله بخار دیگر نیز بر روی مسیرهای بخار واحد نصب و بهره‌برداری گردید. به موجب اجرای فاز اول پروژه، حدود ۲۰۰۰ تن بخار در سال صرفه‌جویی و به صورت کندانس به سیستم بازگشت داده می‌شود که موجب صرفه‌جویی ۷۵۰ گیگاژول انرژی در سال می‌گردد.

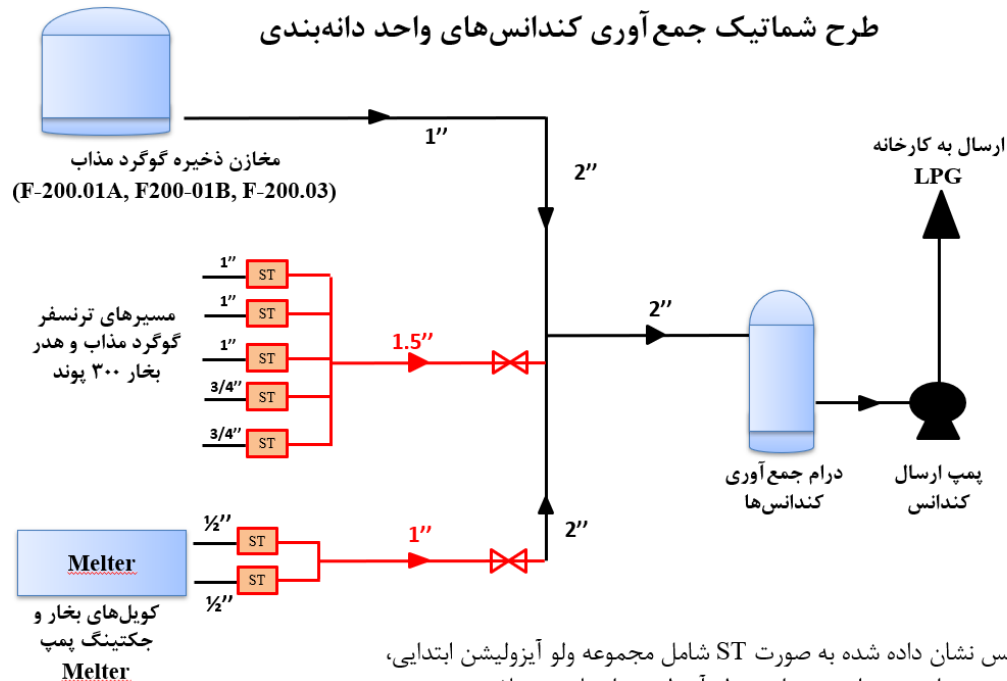
در ادامه اجرای پروژه سیستم مدیریت تله‌های بخار در واحد دانه‌بندی و در فاز دوم پروژه، تعدادی دیگر از تله بخارهای موجود در واحد تعویض گردید که شامل تله بخارهای مسیرهای مربوط به سولفور تانک (F-200.03) و همچنین تله بخارهای موجود بر روی مسیرهای بخار موجود در واحد و میلتر می‌باشد.

در شکل ۸، شماتیکی از نحوه اجرای پروژه سیستم مدیریت تله‌های بخار در واحد دانه‌بندی گوگرد و همچنین مسیرهای جمع‌آوری کندانس‌های خروجی تله‌های بخار ارائه گردیده است. در جدول شماره ۳، نتایج حاصل از میزان کندانس بازگشت داده شده به سیستم و در نتیجه میزان انرژی صرفه‌جویی شده گزارش شده است.

<sup>1</sup> Steam Trap Management System (STMS)

<sup>2</sup> Sulfur Granulation (Forming) Unit

<sup>3</sup> Khark Petrochemical Complex (KPC)



باکس نشان داده شده به صورت ST شامل مجموعه ولو آیزولیشن ابتدایی، استرینر، استیم تریپ و ولو آیزولیشن انتهایی می‌باشد. خطوط مشکی نشان‌دهنده تجهیزات و لاین‌های موجود است. خطوط قرمز نشان‌دهنده تجهیزات و لاین‌هایی که می‌بایست نصب گردند.

شکل ۸ - شماتیکی از نحوه اجرای پروژه سیستم مدیریت تله‌های بخار در واحد دانه‌بندی گوگرد

جدول ۳- میزان کندانس بازگشت داده شده به سیستم و در نتیجه میزان انرژی صرفه‌جویی شده

| محدوده اجرایی پروژه                                                 | میزان کندانس بازیابی شده<br>(تن در سال) | انرژی صرفه‌جویی شده معادل<br>(گیگاژول در سال) |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| واحد دانه‌بندی گوگرد؛ مخازن گوگرد مذاب<br>(به عنوان عمده مصرف بخار) | ۲۰۰۰                                    | ۷۵۰                                           |

## ۸. نتیجه‌گیری

اجرای سیستم مدیریت تله‌های بخار و تعویض تله‌های فرسوده در واحد دانه‌بندی مجتمع پتروشیمی خارک، نتایج عملی و اقتصادی قابل توجهی به همراه داشت. بازیابی ۲۰۰۰ تن کندانس در سال و صرفه‌جویی انرژی معادل ۷۵۰ گیگاژول، نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در کاهش هدررفت انرژی و افزایش بهره‌وری واحد صنعتی است. شایان ذکر است بازگشت این حجم آب کندانس در واحد دانه‌بندی باعث کاهش مصرف گاز سوخت می‌گردد. علاوه بر این، کاهش انتشار بخار و اثرات زیست‌محیطی مثبت، اهمیت استفاده از تکنولوژی‌های نوین و مدیریت سیستماتیک تله‌های بخار را در صنایع فرآیندی تأکید می‌نماید. این مطالعه می‌تواند به عنوان الگویی برای پروژه‌های مشابه در سایر واحدهای صنعتی و پتروشیمی‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

## ۹. مراجع

1. Khark Petrochemical Co. Technical Documentations Archive
2. <https://www.khargpetrochemical.ir>
۳. گنجی آزاد، روح اله؛ "اجرای پروژه‌های سیستم مدیریت تله‌های بخار با استفاده از توان و ظرفیت دانش‌بنیان داخلی؛ مطالعه موردی در مجتمع پتروشیمی خارک"، سی و سومین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران ( ISME 2025)، تهران، ایران، اردیبهشت ۱۴۰۴
5. Raghvendra Pratap Singh, M. B. Sorte, Madan M. Jagtap, "Capturing Steam Energy Leaks in the Steam Distribution Network Using an Integrated Method: A Case Study of a Petroleum Refinery", J. Inst. Eng. India, 2022
5. Evaluate Steam Traps for Repair or Replacement, Energy to Care, Technical Report.
6. U.S. Department of Energy, Advanced technologies for evaluating the performance of steam traps, federal energy management program, DOE/EE-0193, Steam Trap Performance Assessment.
7. <https://www.energy.gov>
8. ISO 6704: 1982, Automatic Steam Traps – Classification
9. Mehboob Singh Gill, Paramjit Singh Bilga, "Reduction in Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions by Elimination of Steam Leak from Steam Traps", Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering, Springer India 2014
10. <https://www.spiraxsarco.com>
11. <https://www.valsteam.com>
12. <https://www.gestra.com>
13. <https://www.thermalenergy.com/gem-steam-traps.htm>
14. EMERSON process management; Impact of failed steam traps on process plants, White Paper 00840-0200-4708, Rev AA (2013)
۱۵. طباطبایی قمشه، سید مصطفی؛ قنوتیان، محمود؛ قنوتیان، محمد؛ صادقی، مجتبی؛ "بررسی و محاسبه میزان اتلاف انرژی از تله‌های بخار واحد MTBE پتروشیمی بندر امام و ارائه راهکارهایی جهت صرفه‌جویی انرژی"، اولین همایش ملی تصفیه آب و پساب‌های صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر، ماهشهر، ایران، ۱۳۹۱
۱۶. بمانی، رضا؛ نظری، محمد رضا؛ کلانتر، ولی؛ پیردیر، اباذر؛ "شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تولید بخار از طریق انجام تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در پالایشگاه چهارم پارس جنوبی"، دومین همایش علمی مهندسی فرآیند، تهران، ایران، یکم خرداد ۱۳۹۳
۱۷. بمانی، رضا؛ نظری، محمد رضا؛ کلانتر، ولی؛ "ترموگرافی و شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تولید بخار و اثرات زیست محیطی از طریق انجام تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در فاز ۶ و ۷ و ۸"، چهارمین همایش ملی مدیریت انرژی و محیط زیست، تهران، ایران، ۲۰ آذر ۱۳۹۳



۱۸. بمانی، رضا؛ نظری، محمد رضا؛ کلانتر، ولی؛ پیردیر، اباذر؛ " شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تولید بخار و اثرات زیست محیطی از طریق انجام تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در فاز ۶ و ۷ و ۸"، چهارمین کنفرانس مشعل و کوره‌های صنعتی، تهران، ایران، ۲۹ خرداد ۱۳۹۳
۱۹. بمانی، رضا؛ نظری، محمد رضا؛ کلانتر، ولی؛ " ترموگرافی و شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تولید بخار از طریق انجام تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در پالایشگاه چهارم"، سومین همایش ملی مهندسی فرآیند (نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی)، تهران، ایران، ۱۸ دی ۱۳۹۳
۲۰. باغبان، الهه؛ زارع، رسول؛ صدری، ملک ارسلان؛ " مدیریت تله‌های بخار در شرکت پالایش نفت اصفهان"، شرکت سامان انرژی، اصفهان، ایران.
۲۱. مرادی‌فر، رویا؛ هنرور، بیژن؛ باغبان، الهه؛ " مدیریت تله‌های بخار در مجتمع گاز پارس جنوبی (فاز ۱-۵)"، شرکت سامان انرژی، اصفهان، ایران.
۲۲. دالوند اصطهباناتی، وحید رضا؛ بمانی، رضا؛ " بررسی اثرات اقتصادی و زیست محیطی انجام تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار در پالایشگاه چهارم پارس جنوبی"، سومین کنفرانس انرژی و محیط زیست، تهران، ایران، ۲۸ آذر ۱۳۹۲
۲۳. دالوند اصطهباناتی، وحید رضا؛ بمانی، رضا؛ شیبانی تدرجی، علیرضا؛ " محاسبه صرفه‌جویی‌های اقتصادی ناشی از تعمیرات پیشگیرانه تله‌های بخار پالایشگاه چهارم پارس جنوبی"، دومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، ایران، اسفند ۱۳۹۱
۲۴. سلفیان، رسول؛ کیوانی، سعید؛ پسندیده‌فر، احمد؛ صدری، ملک ارسلان؛ " بررسی عملکرد و میزان اتلاف انرژی تله‌های بخار پالایشگاه اصفهان"، سومین همایش ملی انرژی، تهران، ایران، ۱۱ اردیبهشت ۱۳۸۰
۲۵. گنجی آزاد، روح اله؛ " انتخاب تله بخار مناسب با شرایط فرآیندی بخار MP در واحدهای تولید کننده متانول طراحی شده توسط شرکت لورگی (Lurgi) آلمان؛ مطالعه موردی در مجتمع پتروشیمی خارک"، سیزدهمین همایش ملی محیط زیست، انرژی و منابع طبیعی، تهران، ایران، ۸ مهر ۱۴۰۴
۲۶. گنجی آزاد، روح اله؛ " اجرای سیستم مدیریت تله‌های بخار در واحد بازیافت گوگرد مذاب مجتمع پتروشیمی خارک"، سیزدهمین همایش ملی محیط زیست، انرژی و منابع طبیعی، تهران، ایران، ۸ مهر ۱۴۰۴
۲۷. گنجی آزاد، روح اله؛ " انتخاب تله بخار مناسب با شرایط عملیاتی بخار MPS در کارخانه متانول مجتمع پتروشیمی خارک؛ یک مطالعه موردی"، دومین دوره پذیرش مقالات مهندسی مجتمع پتروشیمی خارک، جزیره خارک، بوشهر ایران، ۵ اسفند ۱۴۰۱