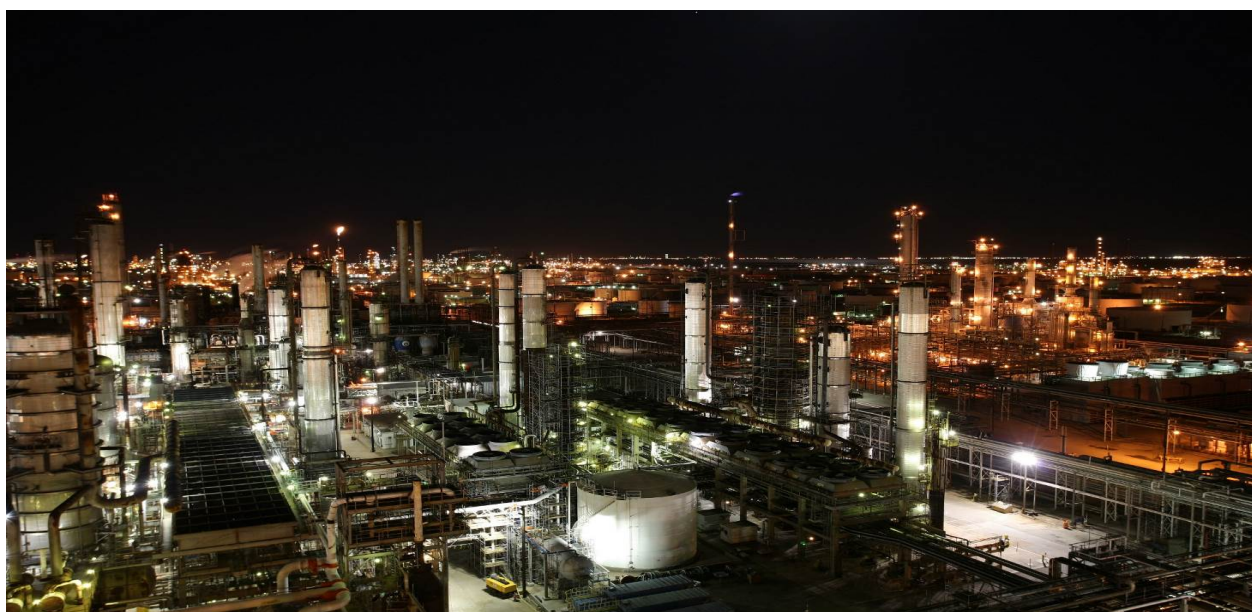


سینی سانتریفیوژ

برای ظرفیتهای بالای عملیاتی و بازدهی بیشتر

شرکت آذر انرژی تبریز



طراحی، مهندسی و ساخت

دفتر مرکزی: تبریز، ابوریحان، خیابان صائب تبریزی، نرسیده به شریعتی، بن بست مهدوی، پلاک 75

04135553513 : ☎

04135576399 : 📠



Info@azarenergy.com

Azarenergy@gmail.com

فهرست مطالب

3 1-1- خلاصه

3-2-1- پیشینه سینی ها	3
1-2-1- مقدمه	3
2-2-1- فناوریهای پیشرفته سینی ها	5
3-2-1- سینی های MVG	5
4-2-1- سینی ها در ترکیب با آکنه	8
5-2-1- سینی کلاهک مخروطی	10
6-2-1- سینی های با فناوری گریز از مرکز	12
3-1- سامانه آزمایشگاهی و مختصری از نحوه کارکرد سامانه	16
1-3-1- پایلوت آذر انرژی	16
2-3-1- نحوه عملکرد سینی های سانتریفیوژ	18
3-3-1- بررسی پدیده weeping در سینی های سانتریفیوژ	20
4-1- شبیه سازی CFD	21
5-1- پروژهای مربوط به سینی سانتریفیوژ	23
6-1- بررسی اقتصادی سینی های سانتریفیوژ	25

۱-۱- خلاصه

در این گزارش به بررسی و معرفی فن‌آوری‌های پیشرفته و ارائه شده در زمینه سینی‌ها با تاکید بر سینی‌های با ظرفیت و بازده بالا اشاره شده است. انواع سینی‌ها از قبیل دریچه‌ای، سینی‌ها در ترکیب با پکینگ و سینی‌های سانتریفیوژ مورد کنکاش و بررسی قرار گرفته است. در سینی‌های سانتریفیوژ با نصب صفحات مورب در قسمت ورودی گاز از مکانیزم نیروی سانتریفیوژ برای ایجاد اختلاط موثر بین فازهای گاز و مایع بهره‌گیری می‌شود. پس از اختلاط و انتقال جرم بین فازی، در بخش رایزر سینی از نیروی سانتریفیوژ به منظور جداسازی کامل فازها از یکدیگر استفاده می‌شود. مراحل تست اولیه این نوع سینی در شرکت آذر انرژی تبریز و در یک برج تقطیر در مقیاس پایلوت که طبق استانداردهای FRI ساخته شده است انجام پذیرفته و به صورت عملی در واحدهای مختلف عملیاتی از جمله پالایشگاه تبریز، پتروشیمی خارگ، پتروشیمی پردیس، پالایشگاه شازند اراک، پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس و ... نصب و با موفقیت مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده عملکرد بسیار مناسب سینی سانتریفیوژ خصوصا در دبی‌های بالای عملیاتی است و این سینی را می‌توان بعنوان راهکاری عملی برای فائق آمدن بر مشکل ماندگی و به منظور افزایش ظرفیت راندمان برج‌های سینی‌دار معرفی می‌گردد. علاوه بر این به منظور بررسی بیشتر هیدرودینامیک جریان و تایید عملکرد آنها، از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یک ابزار قدرتمند و کارساز جهت شبیه سازی سینی‌های سانتریفیوژ در بخش تحقیق و توسعه شرکت آذر انرژی استفاده شده است.

۱-۲- پیشینه‌ی سینی‌ها

۱-۲-۱- مقدمه

کشور ایران با داشتن صنایع نفت، گاز و پتروشیمی از سالیان بسیار دور، هنوز در زمینه دستیابی به فن‌آوری‌های آن با مشکلاتی همراه است. برج‌های تقطیر و به‌ویژه برج‌های سینی‌دار بخش قابل توجهی از این صنایع را تشکیل می‌دهند. در دهه‌های اخیر پژوهش‌ها بر روی سینی‌های برج تقطیر سرعت بیشتری گرفته است. بهبود فرایندها، فشرده‌سازی فرایندها و تجهیزات و ارائه سینی‌های جدید برای افزایش ظرفیت و کارایی واحدها با هدف کاهش انرژی جداسازی، نیاز به پژوهش‌های جدید را افزایش داده است (Olujic, Jodecke, Shilkin, Schuch, & Kaibel, 2009).

طراحی یک سینی، ترکیبی از تجربه و تئوری است. اصولاً طراحی هیدرولیکی سینی باید به گونه‌ای باشد که تماس دو فاز بخار و مایع به‌خوبی صورت گیرد. ماندگی گاز در مایع به اندازه‌ی کافی باشد تا تقریباً تمامی قسمت‌های فعال سینی از مایع پر شود و سینی با بازده بهتری در یک پنجره‌ی عملیاتی معین عمل نماید. کارهای صورت گرفته برای بهبود سینی‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. بهبود سینی‌های موجود و همچنین ارائه سینی‌های جدیدی که در ترکیب با دیگر فرایندهای جداسازی، فراتر از حد ظرفیتی که نیروی گرانش به سینی‌ها اعمال می‌کند، کار می‌کنند. از این فرایندهای جداسازی می‌توان به استفاده از آکنه‌ها، نیروی گریز از مرکز و همچنین فن‌آوری جدایش اینرسی اشاره کرد (Olujic et al., 2009; Quan, Mosca, & Roza, 2010). استفاده از نیرو محرکه‌های اضافی، می‌تواند در عملکرد سینی‌ها نقش قابل توجهی را ایفا کند. اخیراً در سینی‌های جدید علاوه بر نیرو محرکه گرادیان غلظتی از نیرو محرکه‌های دیگر از قبیل نیروهای گریز از مرکز استفاده شده است (Bravo & Kusters, 2000; Penciak, 2006; Quan et al., 2010; Wilkinson et al., 2007).

توسعه کامل تکنیکی و صنعتی سینی‌های برج تقطیر باعث استفاده گسترده آن‌ها در وسایل جداکننده و در فن‌آوری‌های جداسازی شده است. با این حال، برای افزایش بازده و ظرفیت سینی‌ها پژوهش‌های زیادی در حال انجام است. هر چند مطالعات و تحقیقات زیادی در مورد تقطیر صورت گرفته است، اما با مروری بر اطلاعات موجود می‌توان گفت که قسمت اعظم دانش حاصله و روابط و روش‌های طراحی برج‌های تقطیر تجربی بوده و در اختیار شرکت‌های سازنده قرار دارد. درک بنیادین اندکی از هیدرودینامیک جریان فازهای گازی و مایع بر روی سینی‌های برج تقطیر به‌ویژه سینی‌های جدید در کتب و مقالات منتشر شده در دست است، عدم درک عمیق از فرایندهایی که در برج سینی‌دار اتفاق می‌افتند مانع بزرگی در راه بهبود بیشتر کارایی دستگاه‌های فرایندی است (رحیمی, 1385).

در سال‌های اخیر، هر سال کارهای بسیاری در رابطه با فرایندهای تقطیر و جذب منتشر شده است که نشان‌دهنده‌ی این است که فرایند تقطیر هنوز به‌صورت موضوع مهم و مورد توجهی باقیمانده است (Taylor, 2007).

مطالعات زیادی بر روی سینی غربالی و دریچه‌ای در آزمایشگاه‌های دانشگاهی و صنعتی انجام شده است. بیشتر مطالعات بر روی سینی‌های خاص که در بخش بعدی تشریح می‌شوند توسط

موسسه¹ FRI در آمریکا انجام شده است. موسسه FRI سالیانه یک سینی و یک آکنه از شرکت‌های عضو آن را طبق رای‌گیری انتخاب کرده و آزمون می‌کند. نتایج حاصل فقط در اختیار اعضای FRI قرار می‌گیرد. بنابراین داده‌های صنعتی در بسیاری از موارد وجود ندارند.

تحقیقات دانشگاهی در این زمینه بیشتر محدود به دو سینی غربالی و دریچه‌ای است و در برج‌های با قطر کوچک انجام می‌شود. اندازه‌ی تجهیزات، پارامتر بسیار مهمی در تحقیقات بر روی سینی‌ها به‌ویژه تحقیق در مورد ظرفیت سینی‌ها می‌باشد (Fasesan, 1987). در سال‌های گذشته، مدل‌ها به‌صورت تجربی و آزمایشگاهی ارائه می‌شد. هنوز نیز کارهای زیادی به‌صورت آزمایشگاهی بر روی سینی‌ها در حال انجام است. در سال‌های اخیر مدل‌های ریاضی فراوانی برای توصیف پدیده‌های هیدرولیکی سینی‌ها نیز ارائه شد و مهم‌تر از همه شبیه‌سازی‌های CFD است که از سال 1998 بر روی سینی‌ها آغاز شد.

به‌دلیل اینکه توجه کار حاضر به فن‌آوری‌های جدید در زمینه‌ی سینی‌ها است، به آخرین پیشرفت‌ها در این زمینه اشاره می‌شود. هر چند که داده‌های قابل توجهی در مورد این سینی‌ها وجود ندارد، بیشتر به معرفی و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- فن‌آوری‌های پیشرفته سینی‌ها

در حدود 20 سال پیش، مشخص گشت که آکنه‌های ساختاریافته در جداسازی‌هایی که در فشارهای بالا صورت می‌گیرد، کارایی مناسبی ندارند (Olujic et al., 2009). این عامل انگیزه‌ای شد برای پژوهشگران تا سینی‌های برج‌ها را به‌گونه‌ای بهبود دهند که توانایی کار در ظرفیت‌های بالا را در حالی که فشار و بازده مناسبی دارند، داشته باشند. از سال 1990 کارهای بسیار مهمی در فن‌آوری سینی‌ها انجام شده است که در ادامه به مهمترین آن‌ها اشاره می‌شود.

۳-۲-۱- سینی‌های MVG²

یکی از سینی‌های جدیدی که به خوبی مورد استفاده و بهرهوری قرار گرفته است، سینی‌های دریچه‌ای ثابت³ است. این نوع سینی ترکیبی از خواص سینی غربالی و سینی دریچه‌ای را دارد. این سینی در دبی‌های گاز بالاتری می‌تواند کار کند.

¹ Fractionation Research, Inc.

² Mini V-Grid tray

³ fixed valve tray

سینی MVG (Jödecke, Friese, & Schuch, 2007; D. E. Nutter, 1999; E. Nutter, 1994; T. Zarei, R. Rahimi, & M. Zivdar, 2009) که ساخت شرکت سولزر است زیر مجموعه‌ی سینی‌های دریچه‌ای ثابت می‌باشد. بازده و ظرفیت بالا، از خواص گزارش شده درباره‌ی این سینی‌هاست. تاکنون آزمایشاتی نیز توسط شرکت سولزر بر روی این سینی‌ها انجام گرفته است. از اواخر دهه‌ی 1990، تاکنون چندین نمونه از این سینی‌ها در سراسر جهان نصب شده‌اند. همان‌گونه که شکل (1) نشان می‌دهد، سینی‌های MVG از دریچه‌هایی تشکیل شده‌اند. هر دریچه دارای شکاف یا روزنه‌ای برای خروج بخار است. این شکاف‌های روی سینی، بخار را به گونه‌ای هدایت می‌کنند که مسیر حرکت آن افقی و عمود بر جریان مایع است. اندازه‌ی هم‌ی این دریچه‌ها یکسان است. حرکت افقی گاز بر روی سینی، تماس خوبی بین دو فاز گاز و مایع ایجاد می‌کند و ارتفاع سرکف این سینی نسبت به سینی‌های غربالی یا دریچه‌ای کمتر است. در نتیجه میزان ماندگی کمتر می‌شود. میزان ماندگی کمتر باعث افزایش ظرفیت این سینی‌ها می‌شود.

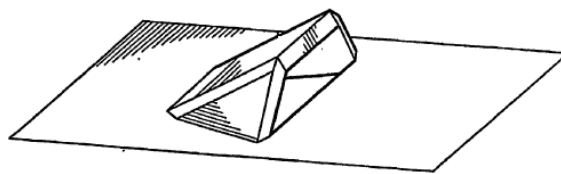


شکل 1. سینی MVG ساخت شرکت آذر انرژی تبریز

سینی غربالی هدایت بخار¹ (Pilling, Fischer, & Mosca, 2007 ; Pilling, Summers, & Fischer, 2006; Rahimi, Zarei, Zarei, Naziri Firoozsalari, & Zivdar, 2010a; Smith, Miller, Richardson, Shakur, & N.F. Urbanski)، در مواردی که افت فشار مدنظر است، می‌تواند مورد توجه باشد. این سینی ترکیبی از سینی با ظرفیت بالا و همچنین بازده بالا است. یکی از مشکلات سینی‌های معمولی تمایل جریان مایع برای حرکت به صورت غیر یکنواخت بر روی سینی است. این دریچه‌های هدایت بخار، بخار را به صورت افقی در کف سینی هدایت می‌کنند و بدین وسیله بر روی جریان مایع اثر می‌گذارند. فایده‌ی این دریچه‌ها ایجاد افت فشاری است که بخار را به

¹ Slotted sieve tray

گونه‌ی مناسب بر روی سینی پخش می‌کند. انرژی ناشی از این افت فشار می‌تواند مایع را به حرکت درآورد. در نتیجه اگر این دریچه‌های هدایت به درستی استفاده شوند، انرژی که صرف ماندگی گاز میشود صرف بالا بردن کارایی سینی می‌گردد. زارعی و همکاران (Rahimi, Zarei, Zarei, Naziri Firoozsalari, & Zivdar, 2010b; A. Zarei, R. Rahimi, T. Zarei, M. Zivdar, & N. Naziri, 2010) نسبت درصد سوراخ‌های دریچه‌ها را به کل سوراخ‌های سینی به‌عنوان پارامتر مهم در طراحی این دریچه‌ها معرفی و مقدار 14 درصد را برای کارکرد مناسب سینی پیشنهاد کردند.



شکل 2: شماتیک یک دریچه‌ی هدایت بخار

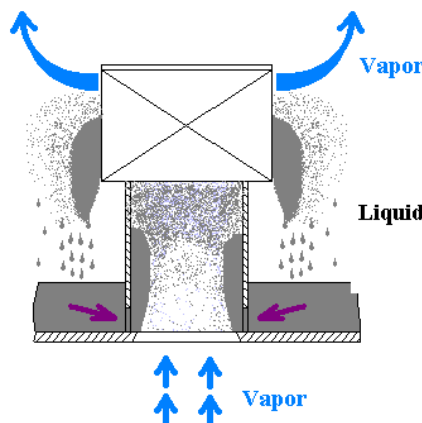
جلوگیری از تشکیل گرادیان هیدرولیکی و ایجاد سرکف یکنواخت از مزایای این سینی است که منجر به حذف و کانالیزه شدن جریان گاز می‌شود. علاوه بر این، راهبردهای گوناگونی برای افزایش ظرفیت سینی‌ها اخیراً مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، افزایش سطح حباب ساز سینی با استفاده از ناودانی‌های کوتاه شده¹، افزایش طول بند با ایجاد چندین ناودانی در یک سینی و همچنین ارائه انواع گوناگونی از سوراخ‌های روی سینی، مثال‌هایی از این فعالیت‌ها است. در بیشتر سینی‌های معمولی انتقال جرم در فضای سرکف سینی انجام می‌شود. جدایش گاز و مایع نیز در این سینی‌های متداول همزمان و در حین رفتن گاز به سینی بالایی صورت می‌پذیرد. جدایش ناقص گاز و مایع در فضای بین دو سینی، ماندگی را به وجود می‌آورد که در نهایت به طغیان می‌تواند منجر شود. بنابراین برای این‌گونه سینی‌ها ظرفیت سینی به چگونگی جدایش گاز و مایع بستگی دارد که این جدایش به تفاوت چگالی گاز و مایع ارتباط مستقیم پیدا می‌کند. بنابراین یک حد بالایی برای ظرفیت سینی وجود دارد. موسسه FRI

¹ Truncated downcomer

مفهوم ظرفیت نهایی¹ را در سال 1959 ارائه کرد که به حد سامانه² نیز شناخته می‌شود. این مفهوم به خوبی مورد قبول صنایع نیز قرار گرفت (Stupin & Kister, 2003). فن‌آوری‌های زیر که اخیراً برای افزایش ظرفیت سینی‌ها ارائه شده و فراتر از حد سامانه هستند، در ادامه می‌آید.

۴-۲-۱- سینی‌ها در ترکیب با آکنه

ظرفیت سینی‌های متداول و همچنین سینی‌های جدید، با قرار دادن آکنه‌های ساختاریافته یا ساختار نیافته بر روی سطح فعال سینی، افزایش می‌یابد (Spagnolo & Chuang, 1984; Z. P. Xu, Afacan, & Chuang, 1996). شرایط عملیاتی برای این‌گونه سینی‌ها باید در دبی‌های متوسط مایع باشد. سینی³ JCPT-Coflow (Olujic et al., 2009) که ساخت شرکت تیانجین⁴ است با استفاده از این مفاهیم توسعه یافته است. همان‌گونه که از شکل (4) پیداست، از یک آکنه ساختاریافته به عنوان مش استفاده شده است. آزمایش‌های هیدرودینامیکی یک افزایش 30 درصدی ظرفیت را برای این سینی نشان می‌دهد.



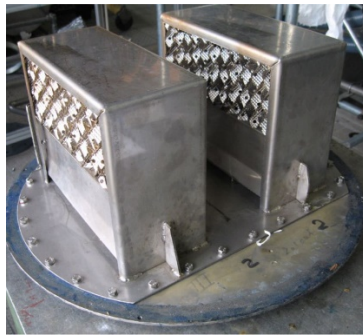
شکل 3: مکانیزم انتقال جرم در سینی JCPT (Olujic et al., 2009)

¹ Ultimate capacity

² System limit

³ Jet Co-flow Packing Tray

⁴ Tianjin



شکل 4: عکسی از سینی JCPT (Olujic et al., 2009)

ترکیب استفاده از پکینگ و سینی در سینی‌های دیگری نیز مورد استفاده گردید. توفانی و همکاران (Taufany, Soewarno, Sutanto, & Girsang, 2015) برای بهینه‌سازی عملکرد سینی غربالی برج تقطیر از اضافه کردن پکینگ بر روی سینی استفاده نمودند. برای ارتفاع پکینگ به ترتیب 5 سانتی متر، 3 سانتی متر، 2 سانتی متر، خواص هیدرودینامیکی مربوطه به سیم مش پکینگ را بررسی نمودند.

ژانگ و همکاران (M. Zhang et al., 2017)، سینی به نام FJPT (جت پکینگ هدایت کننده جریان¹) که دارای ظرفیت و بازده بالا است را معرفی کردند. هیدرودینامیک و انتقال جرم این سینی که شامل افت فشار، ریزش، ماندگی و بازده برای سینی بدست آورده شده است. شکل این سینی در زیر آورده شده است. این سینی همان ساختار سینی JCPT را دارد که توسط دریچه‌های هدایت بخار تقویت شده است (مانند سینی غربالی در ترکیب با دریچه‌های هدایت بخار).

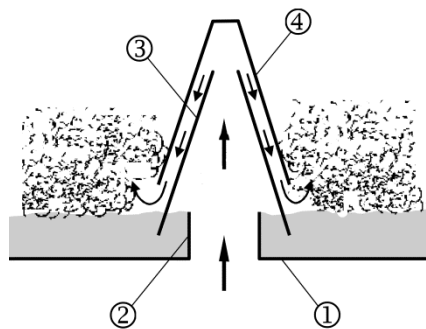


شکل 5: تصویر سینی FJPT (M. Zhang et al., 2017)

¹ flow-guided jet packing tray

۵-۲-۱. سینی کلاhek مخروطی

مبنای طراحی سینی جدید، سینی کلاهکی می‌باشد. مسیر گاز در این سینی تقریباً شبیه سینی کلاهکی است. قسمت‌های مختلف سینی در شکل 7 شماره‌گذاری شده‌اند. سینی یک صفحه مسطح سوراخ‌دار می‌باشد (1)، که نگهدارنده‌هایی¹ دور این سوراخ را گرفته‌اند (2). یک مخروط سر بریده (3) روی این نگهدارنده‌ها قرار می‌گیرد و در نهایت یک کلاhek مخروطی دیگر که سرش بسته است (4) بر روی مخروط اول قرار می‌گیرد. مایع بر روی سینی تا ارتفاع بند یا ارتفاع نگهدارنده جریان می‌یابد. این نگهدارنده این توانایی را به سینی می‌دهد که در جریان‌های بخار و مایع کم کار کند. مخروط اول در سینی کلاhek مخروطی، عملکرد سینی‌های کلاهکی را بهبود می‌بخشد.



شکل 6: چگونگی تماس گاز و مایع در سینی کلاhek مخروطی

در سینی حاضر، برای بهبود عملکرد سینی کلاهکی، بخار بعد از عبور از نگهدارنده وارد یک مخروط شده و سپس با یک کلاhek مخروطی دیگر که بر روی آن قرار می‌گیرد، بخار به توده‌ی مایع بر می‌گردد. موقعی که گاز از مخروط اول که سطح مقطع متغیر دارد، عبور می‌کند سرعت گاز افزایش یافته و در نتیجه طبق موازنه‌های جرم و اندازه حرکت، فشار کاهش می‌یابد. این کاهش فشار گرادیان فشاری در درون مخروط ایجاد می‌کند. مکشی² نیز در قسمت پایین مخروط ایجاد می‌شود. اجزای سبک (اجزایی که فرارتر هستند) در فاز مایع به فاز گاز دفع می‌شوند. بنابراین به‌نظر می‌آید این سینی‌ها برای سامانه‌های عریان‌سازی³ و دفع مناسب باشند.

از طرف دیگر، گرادیان فشاری ایجاد شده در درون مخروط، مایع روی سینی را ناپایدار کرده و باعث شکست جریان پیوسته مایع و تبدیل آن به قطرات می‌شود. جریان مایع به یک رژیم افشانه‌ای

¹ Risers

² Suction

³ Stripping

تبدیل می‌گردد. آشفته‌گی زیاد در جریان مایع و مخلوط شدن با جریان گاز سطح انتقال جرم مناسبی بین دو فاز ایجاد می‌کند. ارتفاع پراکندگی¹ نسبتاً زیادی که در آزمایشات و شبیه‌سازی‌ها مشاهده شده است، ناحیه‌ی مناسبی برای انتقال جرم می‌تواند ایجاد کند. همان‌گونه که اشاره شد گاز توسط کلاهک‌های مخروطی با این مایع افشانه شده تماس برقرار می‌کند و تماس مناسبی بین دو فاز گاز و مایع می‌تواند صورت پذیرد. بنابراین گرادیان فشاری نیرو محرکه‌ی اضافی در انتقال جرم علاوه بر اختلاف غلظت می‌تواند ایجاد کند و این سینی را جز فن‌آوری‌های تجهیزات فشرده² قرار دهد. تیلور و همکاران³ (Taylor & Krishna, 1993) از رابطه‌ی مکسول و استفان⁴، اثر نیرو محرکه‌های گوناگون را بر انتقال جرم بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که مواد با توجه به اختلاف پتانسیلی‌شان⁵ منتقل می‌شوند. نرخ انتقال با اصطکاک⁶ بین اجزا محدود می‌شود. گرادیان پتانسیلی از نیرو محرکه‌های گوناگون می‌تواند ناشی شود. گرادیان غلظتی، گرادیان پتانسیل الکتریکی، گرادیان‌های فشاری و میدان‌های گریز از مرکز نیرومحرکه‌هایی برای انتقال جرم می‌توانند باشند. استفاده از گرادیان‌های بیشتر می‌تواند انتقال جرم را بیشتر کند. اگرچه رابطه‌ی کلاسیک انتقال جرم، رابطه‌ی فیک⁷، تنها روی گرادیان غلظت تاکید دارد. سینی‌های آینده برای کارایی بهتر باید از این توانایی‌ها برخوردار شوند. در سینی کلاهک مخروطی از این ایده استفاده و به‌صورت همزمان از گرادیان‌های فشاری و غلظتی بهره گرفته شده است.

شکل 8 عکس سینی مورد استفاده را نشان می‌دهد. 21 کلاهک مخروطی بر روی این سینی نصب شده است.

¹ Dispersion height

² Compact equipment

³ Taylor et al.

⁴ Maxwell and Stefane

⁵ Potential gradient

⁶ Friction

⁷ Fick's law

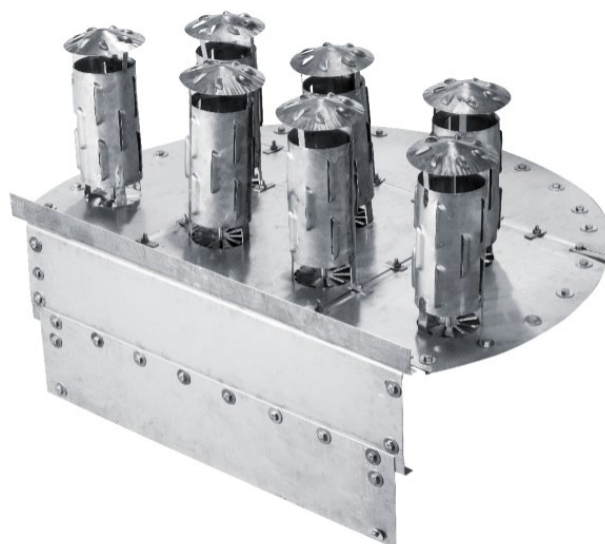


شکل 7: تصویر سینی کلاهک مخروطی ساخت شرکت آذر انرژی

۶-۲-۱. سینی‌های با فن‌آوری گریز از مرکز

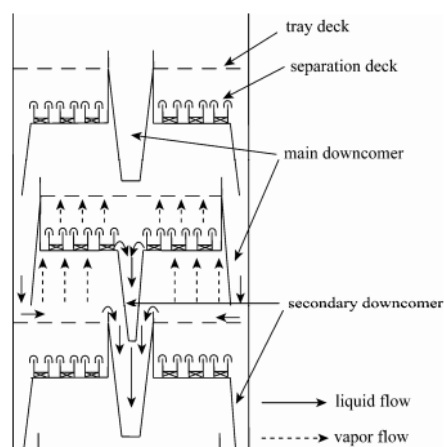
یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در زمینه‌ی سینی‌هایی که فراتر از حد خود کار می‌کنند، سینی‌های سانتریفیوژ یا گریز از مرکز مانند (Consep (Quan et al., 2010 و (Penciak, 2006; Wilkinson و (Naziri, Zadghaffari, & Naziri, 2012) هستند. شکل 9 تصویر این سینی را نشان می‌دهد. مایع از سینی بالایی وارد سل‌های تماس گاز و مایع می‌شود. گاز نیز از درون پره‌ها که در کف سل‌های تماسی قرار گرفته عبور کرده و وارد المان می‌گردد. در این المان گاز و مایع با هم در تماس هستند. حرکت چرخشی گاز که به‌وسیله پره‌ها به‌وجود می‌آید این تماس را شدیدتر می‌کند. جدایش گاز و مایع نیز به‌وسیله‌ی این نیروی سانتریفیوژ که تولید می‌شود صورت می‌پذیرد. جدایش کامل در هنگامی که مخلوط از شیارهای تعبیه شده در دیواره‌ی سل خارج می‌گردند و به روی سینی می‌ریزند، صورت می‌پذیرد. تا سینی بالایی زمان و فاصله کافی برای جدایش کامل وجود دارد. مایعات روی سینی که عاری از گاز شدند نیز، تحت نیروی گرانش از طریق دان کامر به سینی پایینی جریان پیدا می‌کنند.

¹ Chimney type centrifugal



شکل 8: سینی سانتریفیوژ ساخت شرکت آذر انرژی

سینی Consep [4، 5، 31، 35] سینی جدید دیگری است که از نیروی سانتریفیوژ استفاده می‌کند. این سینی یک تماس ناهمسو بین فاز گاز و مایع ایجاد می‌کند. هر مرحله از دو سینی تشکیل شده است. سینی اول، یک سینی معمولی است که تماس گاز و مایع در آن انجام می‌شود. قسمت قابل توجه از مایع توسط ناودانی اصلی که در روی سینی قرار دارد، جدا می‌شود. مایعی که دچار ماندگی می‌شود نیز توسط ابزارهای سانتریفیوژ که در سینی دوم قرار دارد، جدا شده و توسط ناودانی دوم به ناودانی اصلی هدایت می‌شود.



شکل 9: شماتیکی از سینی Consep (Quan et al., 2010)

در طول توسعه سینی‌ها در سال‌های اخیر، فن‌آوری جدایش اینرسی¹ به عنوان یک ابزار جداسازی بسیار مهم مورد توجه قرار گرفت و به صورت مناسبی در سینی‌های تجاری مورد استفاده قرار گرفت (Yang, Mosca, & Roza, 2010). مایعی که دچار ماندگی می‌شود به وسیله جریان گاز شتاب می‌گیرد. اندازه حرکت مایع به علت چگالی زیاد آن از گاز بسیار بیشتر است. جریان گاز حول یک مانع یا سطح فلزی (در یک جداکننده اینرسی) تمایل به تشکیل خط جریان² دارد. در حالی که جریان مایع نمی‌تواند خط جریان تشکیل دهد. بنابراین قطرات مایع به مانع ضربه زده و گرفته می‌شوند. این فن‌آوری را جدایش اینرسی گویند (Quan et al., 2010). Coflo و Simulflow از این دست سینی‌ها هستند که به گونه‌ی مختصر در زیر توضیح داده می‌شوند.

۱-۳- سامانه آزمایشگاهی و مختصری از نحوه کارکرد سامانه

۱-۳-۱- پایلوت آذر انرژی

شرکت آذر انرژی در بخش R&D خود سه برج مطابق با استانداردهای FRI با مشخصات موجود در جدول 1 را احداث نموده و عملکرد سینی‌های گوناگون در داخل آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بطوریکه با انجام تست‌های هیدرولیکی در شرایط عملیاتی یکسان، کارکرد انواع سینی‌ها مورد مقایسه قرار گرفته و مزیت‌ها و معایب هر کدام مشخص می‌گردد. طراحی این برج‌ها به گونه‌ای است که امکان اندازه‌گیری افت فشار سینی‌ها، ماندگی مایع، weeping، Entrainment، Clear liquid height و ... وجود دارد. علاوه بر این سینی‌های موجود در این مجموعه قابل تعویض می‌باشد و به منظور بررسی عملکرد سینی‌های سانتریفیوژ، در داخل برج A1 این سینی‌ها نصب شده‌اند.

جدول 1: مشخصات برج‌های پایلوت شرکت آذر انرژی

Column	Diameter (m)	NO. of Trays	Tray Spacing (m)
A1	1.22	5	0.61
A2	1.22	4	0.61
B1	3	3	0.61

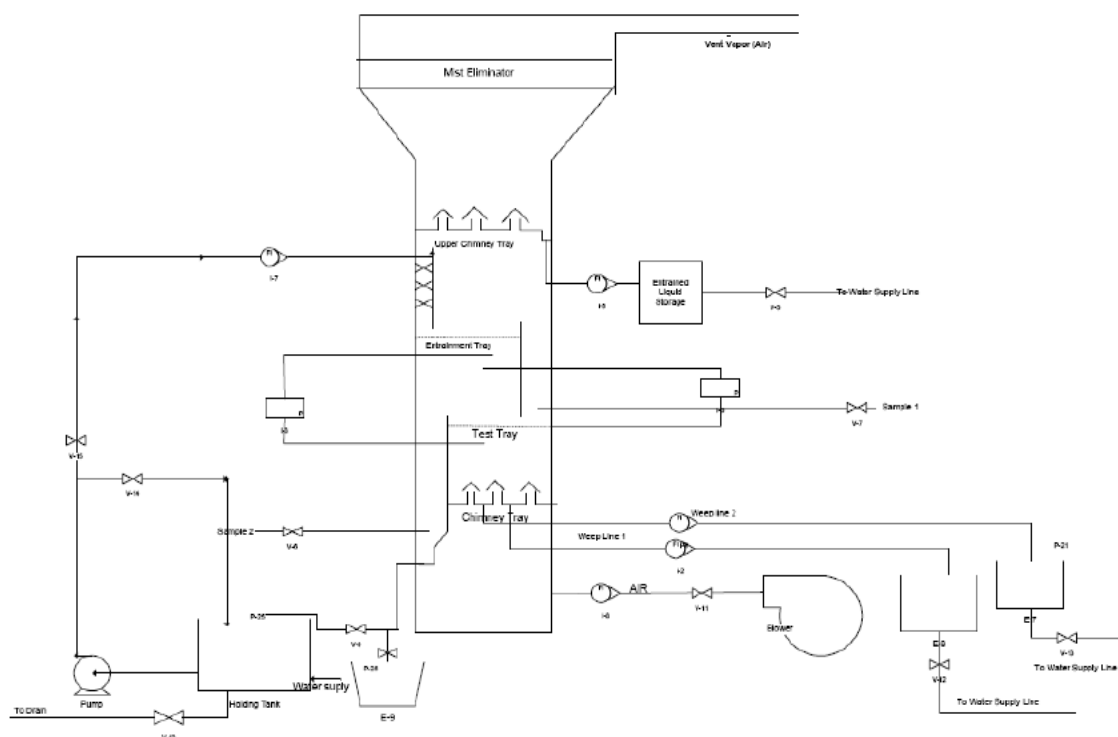
¹ Inertial separation technology

² Stream line

در شکل 13 و 14 تصویر و شماتیک سیستم پایلوت و نحوه اندازه‌گیری متغیرهای عملیاتی نشان داده شده است.



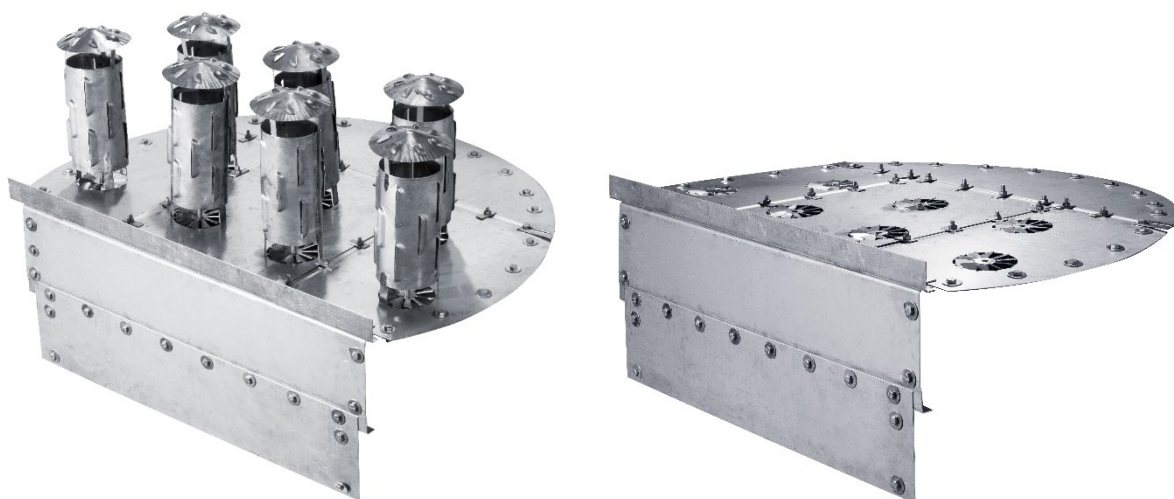
شکل 13: تصویر پایلوت شرکت آذر انرژی



شکل 14: شماتیک سیستم برج تقطیر و نحوه اندازه‌گیری متغیرهای عملیاتی

۱-۳-۲- نحوه عملکرد سینی های سانتریفیوژ

نمایی از سینی های سانتریفیوژ ساخت شرکت آذر انرژی در شکل 15 نشان داده شده است. جریان گاز از پایین از طریق شیارهای زاویه دار، بصورت چرخشی وارد سینی می گردد (شکل 16). این نوع تزریق گاز باعث افت فشار در ناحیه ورود به سطح سینی شده و مایع اطراف مجرای ورودی گاز به داخل مکانیسم ناودانی شکل مکش داده می شود و با جریان گاز ترکیب شده و همراه با آن با الگوی جریان چرخش به طرف بالا حرکت می کند و در طی این مسیر عملیات انتقال جرم بین فازها صورت می گیرد (شکل 17). همانطور که در شکل 15 نشان داده شده است جهت جدایش فازها از یکدیگر از شیارهای تعبیه شده بر سطح دیواره های جانبی و سقف تعبیه شده در ساختمان رایزر استفاده گردیده است. مایع تحت اثر نیروی گریز از مرکز و به علت اختلاف دانسیته با فاز گاز از شیارها خارج گردیده و به سمت بالک سیال در روی سینی جاری می گردد. این مایع مسیر خود را تا رسیدن به ناودانی سینی طی کرده و در هر یک از روزنه های ورودی گاز مکانیسم انتقال جرم بر طبق روش گفته شده تکرار می گردد.



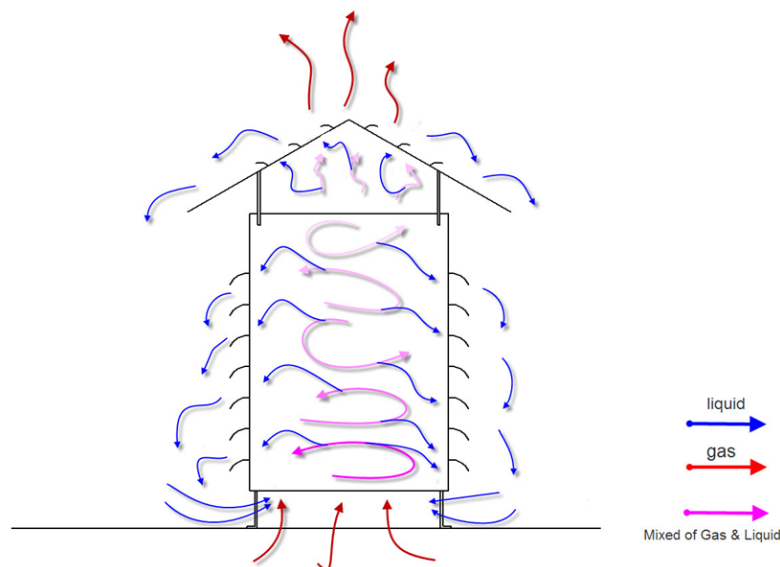
شکل 15- سینی های سانتریفیوژ



شکل 17 - نمایی از رایزر بر روی صفحه‌های پره دار

در واقع در اثر جریان چرخشی، توزیع فاز مایع بر روی سینی یکنواخت گردیده و مقاومت در مقابل جریان گاز در کل سطح یکسان می‌گردد و در نتیجه شانس نفوذ گاز از کلیه سوراخ‌های موجود در سطح سینی وجود داشته و سطح موثر سینی افزایش خواهد یافت و سطوح مرده در سطح سینی حذف می‌گردد. در نتیجه راندمان سیستم نسبت به سینی های متداول افزایش خواهد یافت

در شکل 18، شماتیک مکانیزم تماس گاز و مایع نشان داده شده است. بررسی مشاهده‌ای الگوی جریان در روی سینی های سانتریفیوژ در سیستم پیلوت بیانگر آن است که در این سینی‌ها گاز و مایع مسیر طولانی‌تری را نسبت به سایر سینی‌ها طی می‌کند و این امر موجب افزایش زمان ماند، سطح تماس و در نتیجه انتقال جرم و بازده بیشتر می‌گردد. از دیگر ویژگی های این سینی ها می توان به ظرفیت، بازده و مقاومت مکانیکی بالا و کاهش میزان کف و انسداد اشاره نمود.

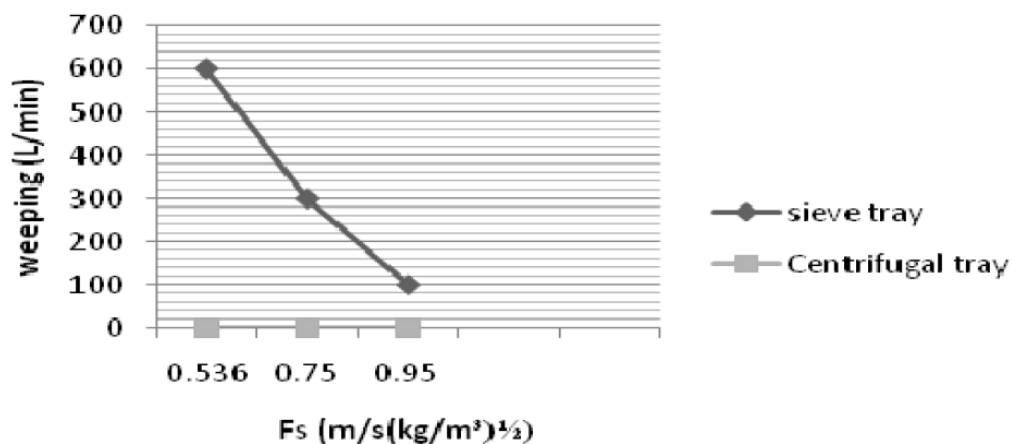


شکل 18 - شماتیک تماس گاز - مایع در سینی سانتریفیوژ

۱-۳-۳- بررسی پدیده weeping در سینی های سانتریفیوژ

بروز پدیده های نا مطلوب و مزاحمی چون weeping روی سینی های برج های مختلف جذب و دفع و غیره در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی باعث کاهش راندمان سینی ها و در نتیجه کاهش عملکرد و بازده برج ها می گردد. این پدیده های نامطلوب باعث محدودیت در عملکرد هیدرولیک سینی ها شده و در نتیجه سنتیک آنها را تحت تاثیر قرار می دهد که این موضوع باعث می شود که انتقال جرم از يك فاز به فاز دیگر به سختی انجام گیرد. بنابراین یا محصول بی کیفیت تولید می شود یا اینکه ظرفیت بهره برداری برج کمتر از میزان پیش بینی شده خواهد بود.

به منظور بررسی این موضوع در سینی های سانتریفیوژ، مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس پایلوت انجام شده و نتایج آن با عملکرد سایر سینی ها مقایسه گردیده است. همانطور که در نمودار شکل 19 مشاهده می کنید مقدار Weeping در دو سینی سانتریفیوژ و غربالی در F_s های مختلف $F_s = u_s(\rho_g)^{0.5}$ و دبی ثابت مایع مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از عدم وجود Weeping در سینی سانتریفیوژ می باشد. در واقع با توجه به نحوه توزیع جریان در داخل سینی های سانتریفیوژ، حرکت فاز مایع و گاز در داخل chimney ها همراستا بوده و مقاومت فاز مایع در مقابل فاز گاز بسیار کم می باشد. بنابراین افت فشار بسیار کمتر از سینی های متداول خواهد بود.

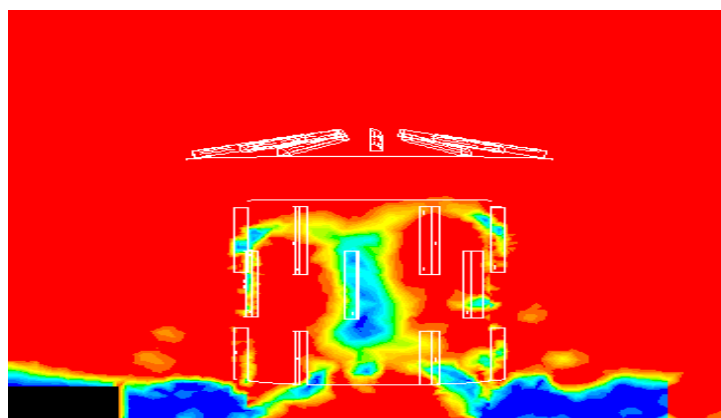


شکل 19 - بررسی weeping در دو سینی سانتریفیوژ و غربالی

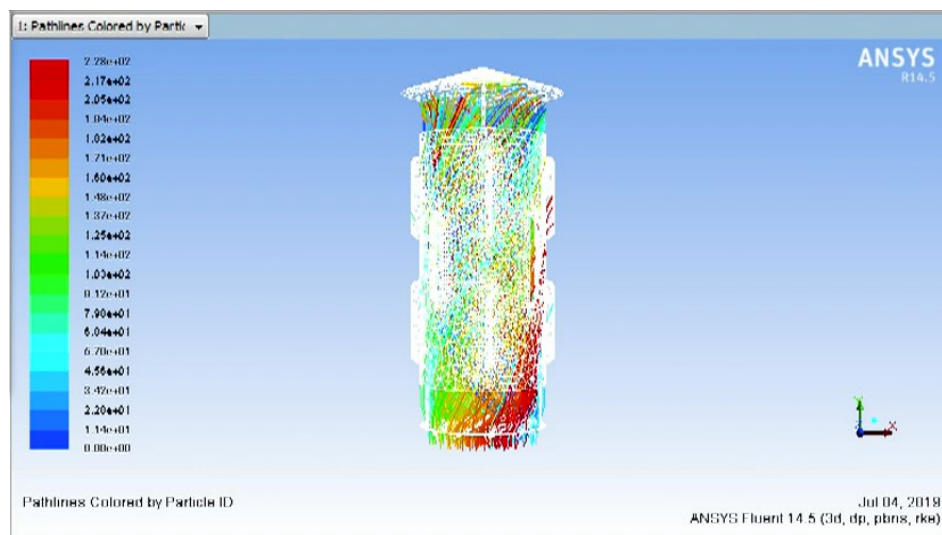
۱-۴- شبیه سازی CFD

در شرکت آذر انرژی مطالعات و شبیه سازی CFD با هدف بهینه سازی و به منظور بررسی بیشتر هیدرودینامیک جریان، بهبود الگوی جریان، کاهش افت فشار، افزایش زمان و منطقه تماس مورد بررسی قرار می گیرد.

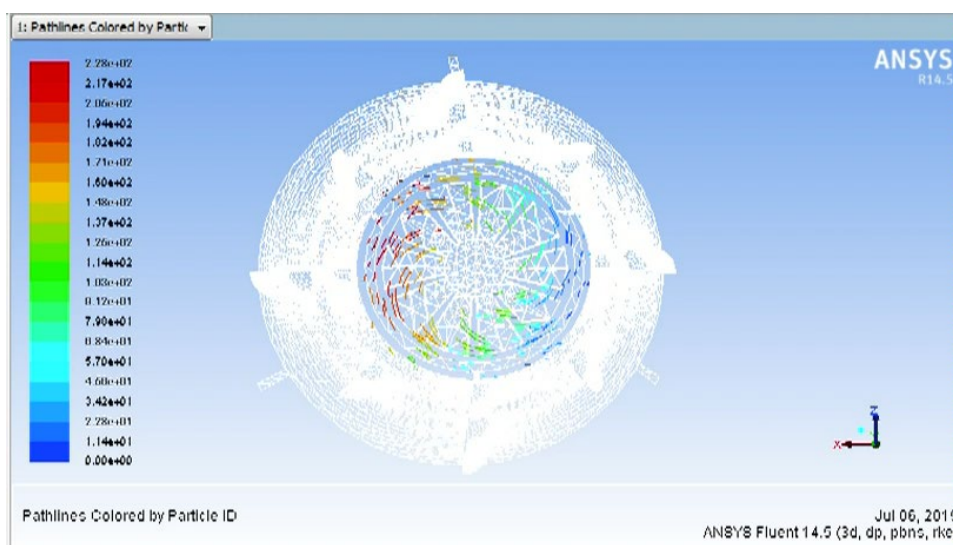
در شکل 20 کوانتور کسر حجمی فاز گاز در شبیه سازی CFD نشان داده شده است. مطابق شکل توزیع فاز مایع به طور یکنواخت و کاملاً متقارن صورت گرفته است. همچنین الگوی جریان در هر یک از رایزرها از دو جهت پهلو و بالای رایزر در دو شکل 21 و 22 نشان داده شده است.



شکل 20 - کوانتور کسر حجمی فاز گاز در شبیه سازی CFD



شکل 21 - الگوی جریان در سینی های سانتریفیوژ



شکل 22 - الگوی جریان در سینی های سانتریفیوژ

۱-۵- پروژه های مربوط به سینی سانتریفیوژ

پروژه های مربوط به سینی سانتریفیوژ به دو بخش پروژه های اجرا شده و پروژه های در دست اقدام تقسیم بندی می شوند.

لیست پروژه های اجرا شده به شرح جدول ذیل است:

Location	Tower	Service	Consideration
Tabriz Refinery	T-808	LP AMINE ABSORBER	
Kharg Petrochemical	V10-2701	HP AMINE CONTACTOR	Train 1 & 2

	V10-2702	LP AMINE CONTACTOR	Train 1 & 2
	V10-2703	AMINE REGENERATOR	Train 1 & 2
	V10-2801	LP GLYCOL CONTACTOR	
	V10-2802	HP GLYCOL CONTACTOR	
Pardis Petrochemical	T-5601	AMMONIA STEAM STRIPPER	
Shazand Arak Refinery	V-1831	RFCC Off Gas Absorber	
Pardis Petrochemical	T-8001	Desorber	

و لیست پروژه‌های در دست اقدام به شرح جدول ذیل است:

Location	Tower	Service	Consideration
Persian Gulf Star Refinery	CC-0101, CC-0102, CC-0103, CC-0104, CC-0105	Fractionators	Train 1 & 2 & 3

در رابطه با پروژه های انجام شده، تاییدیه‌ها و نتایج عملیاتی از طرف کارفرمایان مؤید عملکرد مطلوب این نوع سینی‌ها بوده است که در ادامه چند مورد از آنها آورده شده‌اند:

شماره : ۳۶۶۸

تاریخ : ۱۳۹۴/۰۲/۲۸



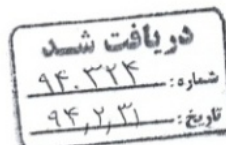
شرکت محترم آذر انرژی تبریز

موضوع: اعلام رضایتمندی

با سلام

احتراماً، به پاس زحمات آن مدیریت و مجموعه آذر انرژی تبریز در طراحی، ساخت و نصب سینی های (نوع ساترینیوژ) مربوط به برج احیاء آمین واحد شیرین سازی گاز این شرکت که به لحاظ کیفیت و کارکرد مورد تایید می باشد، و به زعم واحد خدمات فنی، علاوه بر کاهش ΔP در این برج و عدم مشاهده پدیده طغیان (Flooding)، باعث کاهش شدید میزان H_2S در آمین خروجی از برج شده است. بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر از آن مجموعه محترم بعمل می آید و امید است این همکاری در پروژه های بعدی نیز ادامه داشته و در پناه ایزد منان همواره سر بلند و پیروز باشید.

با تشکر
حسین هاشمی
رئیس کارگاه های فنی



مجموعه: جزیره خارگ
تلفن: ۰۲۲۲۲۸۲۲۰۹ - ۰۲۲۲۲۸۲۲۰۹
فکس: ۰۲۲۲۲۸۲۲۰۹
کد پستی: ۴۸۱۳۳۸-۷
پست الکترونیک: Kharag@Kharagchem.com



تهران: خیابان بهایی شمالی، دهکده ۴۰
کد پستی: ۱۹۶۱۵۱۱۹۵۱
تلفن: ۰۲۱-۲۲۸۷۲۰۲
پست الکترونیک: تهران@Kharagchem.com
وب: www.Kharagpetrochemical.com



Wed: 7, March, 2010
NO: P-T-Z-010- 36423



To: Mr. Naziri,
Managing director,
Azar Energy Co.

Subject: Performance of L. P.Amine Absorber

Dear Sir,

Referring to your letter NO. 111881243 dated 31, January, 2010, about the results of the Amine Low Pressure Absorber Trays replacement project which was performed by Azar Energy Company, please be informed that; after replacing the valve type trays with centrifugal chimney type(supplied by Azar Energy) , some of existing problems such as amine losses and poor absorption of H₂S by amine solution in low pressure column have been improved significantly.

The following table shows the amine makeup consumption in recent months. The two last months indicate good performance of the new Trays.

Amine Makeup (Barrel/Month)

Month	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.
Amine Makeup Barrel	16	16	18	14	6	8	13.5	0	0

Best Regards,

M.B. Dakhili,

Managing Director



ADDRESS: Tabriz Oil Refining Co;
Tabriz , Iran . P.O.Box:4165

TEL: (0) 98-411-4293200, 3302
FAX: (0) 98-21-66162472

باسمه تعالی

" سال ۱۳۹۹؛ سال جهش تولید "

تاریخ: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵
شماره: ۴۵۶۶/۱۱۰-۱۲۶ پ پ
پیوست: ندارد



جناب آقای مهندس نظیری
مدیر عامل محترم شرکت آذر انرژی

موضوع: اعلام رضایتمندی از عملکرد Centrifugal Tray

با سلام

احتراما، ضمن تشکر از جنابعالی و سایر تلاشگران آن مجموعه، بدینوسیله اعلام می دارد استفاده از Centrifugal Tray ابداعی شرکت آذر انرژی باعث بهبود عملکرد برج پساب و کاهش مشکلات جنبی آن در مجتمع پتروشیمی پردیس گردیده است. امید است همچنان شاهد پیشرفت روز افزون جنابعالی و سایر تلاشگران این سرزمین باشیم.


مجتبی غلامحسین میری
رئیس پژوهش و توسعه

							
استان بوشهر، عسلویه، منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس، مجتمع پتروشیمی پردیس، کدپستی: ۱۱۳۵۵-۷۵۱۱۸، تلفن: ۰۷۷-۳۷۲۲۳۰۵-۸				تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیخ بهایی شمالی، کوچه عرفی شیرازی، پلاک ۷، کد پستی: ۱۹۹۳۶-۴۵۸۵۳، تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۰۳۴۹۳-۴			
نمابر: ۰۷۷-۳۷۳۲۵۶۸۰				E-mail: info@paupc.com			
Website: ww.paupc.ir				نمابر: ۰۲۱-۸۸۶۰۳۵۰۲			

طی سالیان اخیر درخواست برای سینی های سانتریفیوژ به صورت روز افزون در حال افزایش است. علت تمایل کارفرمایان به استفاده از این نوع سینی ها را می توان به صورت خلاصه این چنین بیان نمود:

- افزایش ظرفیت برج
- افزایش بازدهی برج
- عملکرد عالی و ثابت شده
- کاهش هزینه عملیاتی
- کاهش مصرف انرژی
- کاهش هزینهی سرمایه گذاری

۶-۱- بررسی اقتصادی سینی های سانتریفیوژ

در یک مطالعه موردی، تاور 101 پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. در یک پروژه افزایش ظرفیت به میزان 160 درصد، دو حالت مورد آنالیز هزینه قرار گرفت. حالت اول تعویض سینی های این برج و ارتقای آنها به سینی های ظرفیت بالای سانتریفیوژ خواهد بود. در این حالت قطر تاور ثابت است و تنها سینی های جدید جایگزین سینی های موجود خواهد شد.

حالت دوم تعویض کل تاور و جایگزینی آن با یک برج با قطر بیشتر، می باشد. این برج با قطر 4250 میلی متر و شامل 28 عدد سینی است. در حالت دوم، در صورت عدم تغییر نوع سینی، قطر مورد نیاز برای افزایش 160 درصدی ظرفیت، بایستی به 4900 میلی متر افزایش یابد و سینی های قبلی با قطر بزرگتر خریداری شوند. فرض می شود که ابزار دقیق و متعلقات برج در صورت امکان از برج قبلی استفاده شوند و نیاز به هزینه نباشد. البته خاطر نشان می گردد که در عمل، افزایش سائز تجهیزات یک واحد به جهت محدودیت در جابجایی، غالباً غیرممکن و یا بسیار مشکل می باشد.

خلاصه نتایج به صورت جدول ذیل است:

حالت	افزایش ظرفیت	تعویض سینی	تعویض برج	هزینه (یورو)
------	--------------	------------	-----------	--------------

100,000	خیر (قطر ثابت 4250)	بله (سانتریفیوژ)	160%	1
700,000	بله (قطر 4900)	بله (سینی ولو)	160%	2

همانگونه که در نتایج مشاهده می‌شود، استفاده از سینی‌های سانتریفیوژ صرفه اقتصادی بالایی دارد.

مراجع

رحیمی، ن.، و... (2010). CFD and experimental studies on the effect of valve weight on performance of a valve tray column. *Computers and Chemical Engineering*, 34, 1-8 .

Bravo, J. L., & Kusters, K. A. (2000). Tray technology for the new millennium. *Chemical Engineering Progress*, 96(12), 33-37 .

- Fair, J. R., Trutna, W. R., & Seibert, A. F. (1999). A new ultra capacity tray for distillation columns. *Trans. IChemE*, 77(a), 619-626 .
- Fasesan, S. O. (1987). Hydraulic characteristics of sieve and valve trays. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 26(10), 2114-2121 .
- Fischer, C. H., & Quarini, J. L. (1998). Three-Dimensional Heterogeneous Modeling of Distillation Tray Hydraulics. *AIChE Meeting, Miami Beach, FL* .
- Gesit, G., Nandakumar, K., & Chuang, K. T. (2003). CFD modeling of flow patterns and hydraulics of commercial-Scale sieve trays *AIChE J* .924-910 ,(4)49 ,.
- Hirt, C. W., Nichols, B. D. . (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225 .
- Hoffmann, A., Ausner, I., Repke, J., Wozny, G. (2005). Fluid dynamics in multiphase distillation processes in packed towers. *Computers and Chemical Engineering* 29 1433–1437 .
- Jödecke, M., Friese, T., & Schuch, G. (2007). Hydraulic investigations to increase the capacity of trays in distillation columns, in: H. Kister, M. Pritchard (Eds.) .*Proceedings of Topical Distillation Conference, AIChE, Washington DC*, 391–397
- Kister, H. Z. (1992). Distillation design. *Mc Graw Hill* .
- Krishna, R., Van Baten, J., Ellenberger, J., Higler, A., P., & Taylor, R. (1999). CFD simulations of sieve tray hydrodynamics. *Trans IChemE*, 77, 639-646 .
- Krishna R., V. J. M. (2003). Modeling Sieve Tray Hydraulics Using Computational Fluid Dynamics. *Trans.IChemE.*, 81, 27 .
- Lebedev, Y. N. (2004). High-performance centrifugal trays. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 40(1), 55-58 .
- Li X, G., Liu, D. X., Xu, S. M., & Li, H. (2009). CFD Simulation of Hydrodynamics of Valve Tray. *Chemical Engineering and Processing*, 48(1), 145-151 .
- Liu, C. J., Yuan, X. G., Yu, K. T., & Zhu, X. J. (2000). A Fluid Dynamic Model for Flow Pattern on a Distillation Tray. *Chem.Eng.Sci.*, 55, 2287 .
- Lockett, M. J. (1986). Distillation tray fundamentals. *Cambridge University Press: Cambridge, U.K* .
- Ludwig, E. E. (1997). *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants: Volume 2* :Elsevier Science.
- Ma, D., Liu, M., Zu, Y, Tang, C. (2012). Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns. *Chemical Engineering Science*, 72, 61-77 .
- Malvin, A., Chan, A., & Lau, P. L .(2010) .Large Eddy Simulation of Distillation Sieve Tray Hydrodynamics using Volume-of-Fluid (VOF) Multiphase Model. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2 .
- Mehta, B., Chuang, K. T., & Nandakumar, K. (1998). Model for Liquid Phase Flow on Sieve Trays. *Chemical Engineering Research and Design*, 76(7), 843-848.
doi:<http://dx.doi.org/10.1205/026387698525450>
- Naziri, N., Zadghaffari, R., & Naziri, H. (2012). A study on chimney type centrifugaltray lower operating limit. *APCBEE Procedia*, 3 182 -187
- Nutter, D. E. (1999). The MVG(TM) tray at FRI. *Chemical Engineering Research and Design*, 77(6), 493-497 .

- Nutter, E. (1994). High capacity tray for gas-liquid contact apparatus. *US Patent, US005360583A* .
- Olujic, Z., Jodecke, M., Shilkin, A., Schuch, G., & Kaibel, B. (2009). Equipment improvement trends in distillation. *Chemical Engineering and Processing*, 48 1089–1104 .
- Penciak, J., Nieuwoudt, I., Spencer, G. (2006). High-performance trays: Getting the best capacity and efficiency. *ICHEME Symp.* , 152, 311-316 .
- Pilling, M., Fischer, M., & Mosca, G. (2007). Tray apparatus, column with same and method of assembling and using. *US Patent, US 2007/0040289 A1* .
- Pilling, M., Summers, D. R., & Fischer, M. (2006). The use of directional momentum devices in fractionation trays. *ICHEME Symposium*
- Quan, Y., Mosca, G., & Roza, M. (2010). Characteristics of Trays Using Inertial Separation Technology. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(6), 954—961
doi:10.1016/S1004-9541(09)60153-1
- R., K., M., V .J., J., E., P., H. A., & R., T. (1999). CFD Simulations of Sieve tray hydrodynamics. *Trans. IChemE*, 77, 639 .
- Rahimi, M. R., Rahimi, R., Shahraki, F., & Zivdar, M. (2006). Prediction of temperature and concentration distributions of distillation sieve trays by CFD. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 9(3), 265-278 .
- Rahimi, R., Mazarei Sotoodeh, M., & Bahramifar, E. (2012). The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency. *Chemical Engineering Science*, 76 90 –98 .
- Rahimi, R., Rahimi, M. R ., Shahraki, F., & Zivdar, M. (2006). Efficiencies of Sieve Tray Distillation Columns by CFD Simulations. *Chem. Eng and Technol* 29(3), 326 .
- Rahimi, R., Zarei, A., Zarei, T., Naziri Firoozsafari, H., & Zivdar, M. (2010a). A computational fluid dynamics and an experimental approach to the effects of push valves on sieve trays. *In: 50th Distillation & Absorption conference*, 407-412 .
- Rahimi, R., Zarei, A., Zarei, T., Naziri Firoozsafari, H., & Zivdar, M. (2010b). A computational fluid dynamics and an experimental approach to the effects of push valves on sieve trays. *In: 50th Distillation & Absorption conference, Netherlands*, 407-412 .
- Rahimi, R., Zarei, T., & Zivdar, M. (2008). Comparison hydraulics and flow patterns of Sieve and Mini –Grid valve tray using CFD. *1st National Conference on CFD application in chemical Engineering, Razi Kermanshah* .
- Ran, W., Jinliang, T., Yanli, L., Feng, W., & Jidong, L. Total spray tray (TST) for distillation columns: a new generation tray with lower pressure drop .
- Shojaee, S., Hosseini, S. H., Rafati, A., & Ahmadi, G. (2011). Prediction of the effective area in structured packings by computational fluid dynamics. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 10833 – 10842 .
- Smith, V. C., Miller, R. J., Richardson, K. J., Shakur, M. S. M & , N.F. Urbanski. First-generation high-capacity trays still have what it takes. *Paper 101d, AIChE Annual Meeting, November 2002, Indianapolis, IN, USA*, 1-14 .
- Solari, R. B., & Bell, R. L. (1986). Fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve trays. *AIChE J.*, 32, 640 .
- Spagnolo, D. A., & Chuang, K. T. T. (1984). Improving sieve tray performance with knitted mesh packing. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 23(3), 561-565. doi:10.1021/i200026a026

- Stober, B. K., & Sowiak, R. M. (1998). Co-current contacting separation tray design and methods for using same. *U.S. Pat.*, 5837105
- Stober, B. K., & Sowiak, R. M. (2000). Co-current contacting separation tray design and methods for using same. *U.S. Pat.*, 6059 934
- Stupin, W. J., & Kister, H. Z. (2003). System limit: The ultimate capacity of fractionators. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(1), 136-146 .
- Taufany, F., Soewarno, N., Sutanto, M. E., & Girsang, I. R. (2015). Performance of Appended Wire Mesh Packing in Sieve Tray Distillation Column of Ethanol-Water System. *Modern Applied Science*, 9(7), 148 .
- Taylor, R. (2007). (Di)still modeling after all these years: A view of the state of the art. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46 .4357-4349 ,(13)
- Taylor, R., & Krishna, R. (1993). *Multicomponent Mass Transfer*: Wiley.
- Vanbatten, J. M., & Krishna, R. (2000). Modeling Sieve Tray Hydraulics Using Computational Fluid Dynamics. *Chemical Engineering Journal*, 77, 143 .
- Wang, H., Niu, X., Li, C .,Li, B., & Yu, W. (2017). Combined trapezoid spray tray (CTST)—A novel tray with high separation efficiency and operation flexibility. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 112, 38-46 .
- Wang, X. L., Liu, C. J., Yuan, X. G., & Yu ,K. T. (2004). Computational Fluid Dynamic Simulation of Three-Dimensional Liquid Flow and Mass Transfer on Distillation Column Trays. *Ind.Eng.Chem.Res.*, 43, 2556 .
- Wilkinson, P., Vos, E., Konijn, G., Kooijman, H., Mosca, G., & Tonon, L. (2007). Distillation trays that operate beyond the limits of gravity by using centrifugal separation. *Chem. Eng. Res. Des.*, 85 (1), 130-135
- Xu, P., Nowak, B., & Richardson, K. (2007). SimulFlow device capacity beyond system limit. *AIChE Meeting, Spring* .
- Xu, Z. P., Afacan ,A., & Chuang, K. T. (1996). Prediction of packed sieve tray efficiency in distillation. *Chemical Engineering Research and Design*, 74(8), 893-900 .
- Xu, Z. P., & Bielinski, D. H. (2004). Apparatus for cocurrent fractional distillation. *U.S. Pat.*, 6682633B .1
- Yang, Q., Mosca, G., & Roza, M. (2010). Characteristics of Trays Using Inertial Separation Technology. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(6), 954-961.
doi:10.1016/s1004-9541(09)60153-1
- Zarei, A., Hosseini, S. H., & Rahimi, R. (2013). CFD study of weeping rate in the rectangular sieve trays. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44, 27-33 .
- Zarei, A., Rahimi, R., Zarei, T., & Naziri, N. (2010). A study on sieve tray lower operating limit. *In: 50th Distillation & Absorption conference*, 479–484 .
- Zarei, A., Rahimi, R., Zarei, T., Zivdar, M., & Naziri, N. (2010). Investigation of push valves orientation on sieve tray by using CFD method. *The 2th national CFD application in chemical engineering, Iran university of science and technology* .
- Zarei, T., & Khorshodi, J. (2016). Experimental study of hydrodynamic characteristics of improved sieve tray with push valves. *Iranian Journal of chemical Engineering, Accepted* .
- Zarei, T., Khorshodi, J., Rahimi, R., & Zarei, A. (2016). Experimental study on the Conical Cap tray performance. *Journal of chemical and petrolium Engineering, Accepted* .

- Zarei, T., Masoud, F., & Jamshid, K. (2016). Hydrodynamic Characteristics Of Valve Tray: Computational Fluid Dynamic Simulation And Experimental Studies. *Korean Journal of chemical Engineering, Accepted*. doi:DOI: 10.1007/s11814-016-0250-z
- Zarei, T., & Rahimi, R. (2008). Prediction of flow pattern and hydraulics of commercial –scale Sieve tray with stationary valve using Computational Fluid Dynamics. *11th Fluid Dynamics Conference, K. N. Toosi University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering* .
- Zarei, T., Rahimi, R., Zarei, A., & Zivdar, M. (2013). Hydrodynamic characteristic of Conical Cap tray: Experimental studies on dry and total pressure drop, weeping and entrainment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 64, 17-23 .
- Zarei, T., Rahimi, R., Zarei, A., Zivdar, M., & Naziri, N. (2010). Design of push valves on sieve tray by CFD. *the 2th national CFD application in chemical engineering, Iran university of science and technology* .
- Zarei, T., Rahimi, R., & Zivdar, M. (2009). Computational fluid dynamic simulation of MVG tray hydraulics. *Korean J. Chem. Eng.*, 26(5), 1213-1219 .
- Zarei, T., Rahimi, R., & Zivdar, M. (2009). Computational fluid dynamic simulation of MVG tray hydraulics. *Korean Journal of chemical Engineering*, 26(5), 1213-1219. doi:10.1007/s11814-009-0214-7
- Zhang, L., Li, Z., Yang, N., Jiang, B., Cong, H., & Zhang, Z. (2016). Hydrodynamics and mass transfer performance of vapor–liquid flow of orthogonal wave tray column. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63, 6-16 .
- Zhang, M., Zhang, B. Y., Zhao, H. K., Zhao, Y., Sun, J., Ren, Z. Q., & Li, Q. S. (2017). Hydrodynamics and mass transfer performance of flow-guided jet packing tray. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 120, 330-336. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2017.07.022>