

بررسی آزمایشگاهی و ارایه رابطه‌های تجربی برای سینی دریچه‌ای در مقیاس صنعتی در حد بالا و پایین عملیاتی

طالب زارعی*⁺

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

مسعود فارسیانی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

احسان عابدینی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده: سینی دریچه‌ای یکی از پرکاربردترین سینی‌ها در برج‌های تقطیر و جذب در صنعت نفت، پتروشیمی و دیگر صنایع مرتبط می‌باشد. در این پژوهش، به منظور شناخت بیش‌تر و بهتر هیدرودینامیک سینی دریچه‌ای و ارایه داده‌های تجربی کاربردی، عملیات دو فاز آبی- هوا در یک برج هیدرودینامیکی به قطر ۱٫۲ متر شامل دو سینی دریچه‌ای با سطح آزاد ۱۴٪ و در مقیاس صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌های تجربی ارتفاع مایع زلال، ارتفاع سرکف، موجودی متوسط مایع، افت فشار کل، افت فشار خشک، ریزش و ماندگی به‌دست آمد و رابطه‌هایی تجربی با تقریب قابل پذیرش، برای آن‌ها ارایه شد. حد بالا و پایین عملیاتی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. همچنین نتیجه‌های به‌دست آمده از رابطه‌های تجربی ارایه شده و داده‌های آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شدند و اعتبار این رابطه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که سرعت جریان گاز بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی تأثیر بیش‌تری نسبت به سرعت جریان مایع روی سینی دارد و سینی دریچه‌ای انعطاف بیش‌تری نسبت به تغییرهای شدت جریان مایع دارد.

واژه‌های کلیدی: سینی دریچه‌ای؛ هیدرودینامیک؛ ریزش؛ ماندگی؛ ارتفاع مایع زلال.

KEYWORDS: Valve tray; Hydrodynamics; Weeping; Entrainment; Clear liquid height.

مقدمه

به خود اختصاص داده‌اند. با ورود آکنده‌های منظم و غیر منظم به برج‌ها و جایگزینی تدریجی آن‌ها به جای سینی‌ها در ابتدا تصور می‌شد که این برج‌های آکنده می‌تواند به طور کامل جایگزین

در بسیاری از صنایع، عملیات جداسازی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که مورد توجه صنعتگران و پژوهشگران قرار گرفته است. امروزه برج‌های سینی‌دار قسمت بزرگی از فرایندهای جداسازی را

*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: talebzarei@hormozgan.ac.ir

کیفیت توزیع گاز در فاز مایع مورد استفاده قرار گرفت. *براهم* و همکاران [۷]، یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد تأثیر طول مسیر حرکت جریان بر عملکرد برج‌های تقطیر سینی‌دار انجام دادند. در این کار، رابطه‌های به دست آمده با نتیجه‌های صنعتی و نیز پژوهش‌های پیشین مقایسه شد و افزون بر سازگاری مناسب، این رابطه‌ها اهمیتی از بابت پیش‌بینی نتیجه‌ها در شرایط صنعتی را دارا بود.

مشکلی که در پژوهش‌های اشاره شده، وجود دارد، این است که مقیاس مورد استفاده آن‌ها آزمایشگاهی و کوچک است. در بررسی عملکرد سینی‌ها مقیاس سینی به علت وجود پدیده‌هایی همچون نقاط مردابی، توزیع جریان گاز و مایع در سینی، جریان‌های چرخشی و ... بسیار مهم می‌باشد. این پدیده‌ها در مقیاس‌های کوچک کمتر رخ می‌دهند و از حالت واقعی و عملیاتی به دور هستند. داده‌های در مقیاس واقعی به طور عموم توسط شرکت‌های بزرگ تولید کننده سینی مانند کوخ گلیتس، سولزر و موسسه تحقیقات جداسازی (FRI) صورت می‌پذیرد که به طور معمول انتشار نمی‌یابد. بنابراین وجود و انتشار چنین داده‌هایی در پژوهش‌های دانشگاهی محدود می‌باشد. از طرف دیگر با گسترش روزافزون محاسبه‌های رایانه‌ای و مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی پژوهش‌ها در زمینه سینی‌ها در مقیاس‌های صنعتی به آن سو گرایش یافت [۸ - ۱۰].

رحیمی [۱۱، ۱۲]، اختلاف فازها را در سینی غربالی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه نمود. در این امر یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی دوفازی در چهارچوب اولری اولری برای شبیه سازی هیدرودینامیک جریان‌ها روی سینی غربالی در مقیاس صنعتی به منظور مطالعه اختلاف فازها توسعه داده شد. برای بررسی وضعیت اختلاف فازها، سه پارامتر توزیع جزء حجمی، توزیع دانسیته مخلوط و سطح تماس فازهای گاز-مایع در مکان‌های گوناگون سینی بررسی شدند. این مدل امکان دید جزئیاتی را فراهم نمود که تاکنون مطالعه‌های موجود قادر به ارائه آن نبوده‌اند. *زارعی* و همکاران [۱۳]، یک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در مورد هیدرولیک سینی MVG^(۹) ارائه نمودند. هندسه و شرایط عملیاتی سینی غربالی بر اساس

برج‌های سینی‌دار شوند. اما در حدود سال ۱۹۹۰ میلادی، مشخص شد که آکنده‌های ساختاریافته در جداسازی‌هایی که در فشارهای بالا صورت می‌گیرد، کارایی مناسبی ندارند [۱]. سینی‌های برج‌های تماس دهنده انواع گوناگونی دارند. سه نوع اصلی این سینی‌ها، سینی غربالی^(۱)، دریچه‌ای^(۲) و کلاهکدار^(۳) می‌باشد. امروزه در صنایع، سینی دریچه‌ای به علت پنجره عملیاتی (نمودار عملکردی) بسیار مناسب و افت فشار و بازده قابل پذیرش، متداولترین نوع سینی مورد استفاده می‌باشد. پژوهش‌ها بر روی این نوع سینی هم به صورت آزمایشگاهی و هم مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در حال انجام است.

چف و *ویلند* [۲]، ویژگی‌های انتقال جرمی سینی دریچه‌ای در یک مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. *مصطفی* و *مولنار* [۳]، ویژگی‌های هیدرودینامیکی سینی دریچه‌ای ناتر^(۴) را بررسی نمودند. در این مطالعه ارتفاع مایع زلال در رژیم‌های عملیاتی متفاوت مشخص شد و روابط جدیدی برای ارتفاع بند^(۵)، ارائه شد. *براهم* و همکاران [۴]، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی هیدرودینامیک سینی‌های دریچه‌ای انتشار دادند. در این پژوهش یک برج دارای سینی دریچه‌ای طراحی شد که در آن از رابطه‌های تجربی بهره گرفته شد. ایشان رابطه‌هایی برای ارتفاع مایع زلال، موجودی متوسط مایع و ارتفاع تعلیق پیشنهاد نمودند. *وناولی* و همکاران [۵]، بر روی کارایی سینی دریچه‌ای بررسی انجام دادند. ایشان بیان نمودند که با وجود تفاوت‌های موجود بین سینی دریچه‌ای و غربالی، خیلی از پدیده‌های موجود در سینی غربالی و دریچه‌ای یکسان است. در نتیجه مدل‌های سینی غربالی می‌توانند برای تخمین در زمینه سینی‌های دریچه‌ای مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش از داده‌های عمومی FRI^(۶) استفاده شد. *علی زاده داخل* و همکاران [۶]، پژوهشی با استفاده از CFD و مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند که این پژوهش به منظور بررسی تأثیر وزن دریچه‌های سینی دریچه‌ای بر روی کارایی یک برج سینی‌دار انجام شد. در آن پژوهش، یک برج آزمایشگاهی مجهز به یک سینی دریچه‌ای، یک بند^(۷) و دو ناودانی^(۸) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین یک صفحه دارای نوسان برای اندازه‌گیری

(۱) Sieve tray

(۲) Valve tray

(۳) Bubble cap trays

(۴) Nutter valve tray

(۵) Weir height

(۶) Fractionation research institute

(۷) Weir

(۸) Downcomer

(۹) Mini V-Grid

اهمیت کار در این پژوهش از آن جهت است که تلاش شده است با آرایه داده‌های تجربی، برای پارامترهای مورد نظر و بررسی چگونگی تغییرها و چگونگی الگوی رفتاری آن‌ها، نسبت به آن‌ها شناخت بیش‌تر و مناسبی ایجاد شود. در این فعالیت، فشار اتمسفری^(۶) و دمای ۲۵ درجه سلسیوس^(۷) به عنوان فشار و دمای^(۸) عملیاتی تعیین شدند.

عملیات فازها

هوا از طریق بلورهای (شکل ۱ - شماره ۱) قرار گرفته در زیر برج با شدت جریان مشخص وارد سینی‌های دودکشی^(۹) (شکل ۱ - شماره ۲) و از راه آن‌ها وارد برج می‌شود. پس از برخورد دو فاز بر روی سینی پایینی (شکل ۱ - شماره ۳)، هوا از این بازه خارج و به شکل عمودی حرکت نموده و وارد حوزه سینی بالایی می‌شود (شکل ۱ - شماره ۴) و مجدداً پس از برخورد فازی، فاز گاز به حرکت عمودی خود در جهت بالا ادامه می‌دهد. در این مسیر با برخورد فاز گاز با سینی دودکشی (شکل ۱ - شماره ۶) و همچنین در ادامه این برخورد با مش‌های نم زدا که در بالای برج تعبیه شده (شکل ۱ - شماره ۵)، فاز مایع همراه آن جدا می‌شود. سرانجام در بالای برج، عملیات فاز گاز به پایان رسیده و از برج خارج می‌شود. فاز مایع نیز پس از برخورد با فاز گاز بر روی سینی، از طریق ناودانی به سینی پایینی و قسمت‌های پایین‌تر منتقل می‌شود. سرانجام با استفاده از ناودانی (شکل ۱ - شماره ۱۳) از برج خارج می‌شود.

روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای هیدرودینامیکی

به منظور محاسبه مقدارهای ارتفاع مایع زلال از مانومتر^(۱۰) U شکل استفاده شده است. این مانومتر بر روی بدنه برج تقطیر نصب شده است (شکل ۱ - شماره ۸). یک سر این مانومتر به پایین سینی مورد نظر و سر دیگر آن به فضای بالای سینی وصل می‌باشد. با این شرایط، فشار بر روی سطح مایع درون مانومتر و فشار بالای سینی و ارتفاع مایع درون لوله مانومتر با ارتفاع مایع زلال روی سینی برابر می‌باشد. با اندازه‌گیری ارتفاع درون مانومتر در هر شرایط، ارتفاع مایع زلال در آن وضعیت به دست می‌آید.

سینی غربالی سولاری و بل [۱۴] بود. در این مطالعه نیز به دلیل کمبود داده‌های صنعتی و حتی آزمایشگاهی کافی و معتبر در زمینه سینی‌های دریچه‌ای، نتیجه‌های به دست آمده از طرح با داده‌های مربوط به سینی غربالی سولاری و بل مقایسه شده است. همان‌گونه که اشاره شد، کمبود اطلاعات منتشر شده صنعتی معتبر در زمینه سینی دریچه‌ای به منظور درک بهتر از عملکرد عملیاتی این سینی‌ها، به روشنی احساس می‌شود. افزون بر این کارهای صورت گرفته در این زمینه، اغلب به شکل آزمایشگاهی و نیز در انحصار شرکت‌های معتبر می‌باشد. در این پژوهش با هدف ایجاد شناخت بیش‌تر از عملیات سینی‌های دریچه‌ای، یک برج هیدرودینامیکی شامل دو سینی دریچه‌ای ساخته شد و عملیات یک سینی دریچه‌ای در وضعیت هیدرودینامیکی در مقیاس صنعتی (قطر برج ۱/۲ متر می‌باشد) مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های تجربی این کار شامل افت فشار کل، افت فشار خشک، ریزش^(۱)، ماندگی^(۲)، ارتفاع مایع زلال^(۳)، ارتفاع سرکف^(۴) و موجودی متوسط مایع^(۵) می‌باشد. در بحث سینی‌ها، پنجره و بازه عملیاتی این ابزارها دارای بازه‌ی خاصی می‌باشد که کران بالا و پایین آن همان پارامترهای ریزش و ماندگی می‌باشند. منظور از این امر این است که اگر ریزش یا ماندگی از حدی فراتر رود سبب اختلال در عملیات سینی می‌شود [۱۵].

در نتیجه در مطالعه حاضر، یک پژوهش در مقیاس صنعتی با دید گسترده بر پارامترهای هیدرودینامیکی سینی دریچه‌ای صورت پذیرفته است.

بخش تجربی

در بخش آزمایشگاهی یک برج هیدرودینامیک شامل دو سینی دریچه‌ای ساخته شده است. عملیات در این برج، دو فازی آب - هوا می‌باشد. در این کار، هیدرودینامیک سینی دریچه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. چگونگی قرارگیری سینی‌های دریچه‌ای برج در شکل ۱ دیده می‌شوند.

شکل ۲ تصویر سینی دریچه‌ای را نشان می‌دهد. ویژگی‌های مربوط به سینی‌های دریچه‌ای در جدول ۱ داده شده است.

(۱) Weeping

(۲) Entrainment

(۳) Clear liquid height

(۴) Froth height

(۵) Average liquid hold up

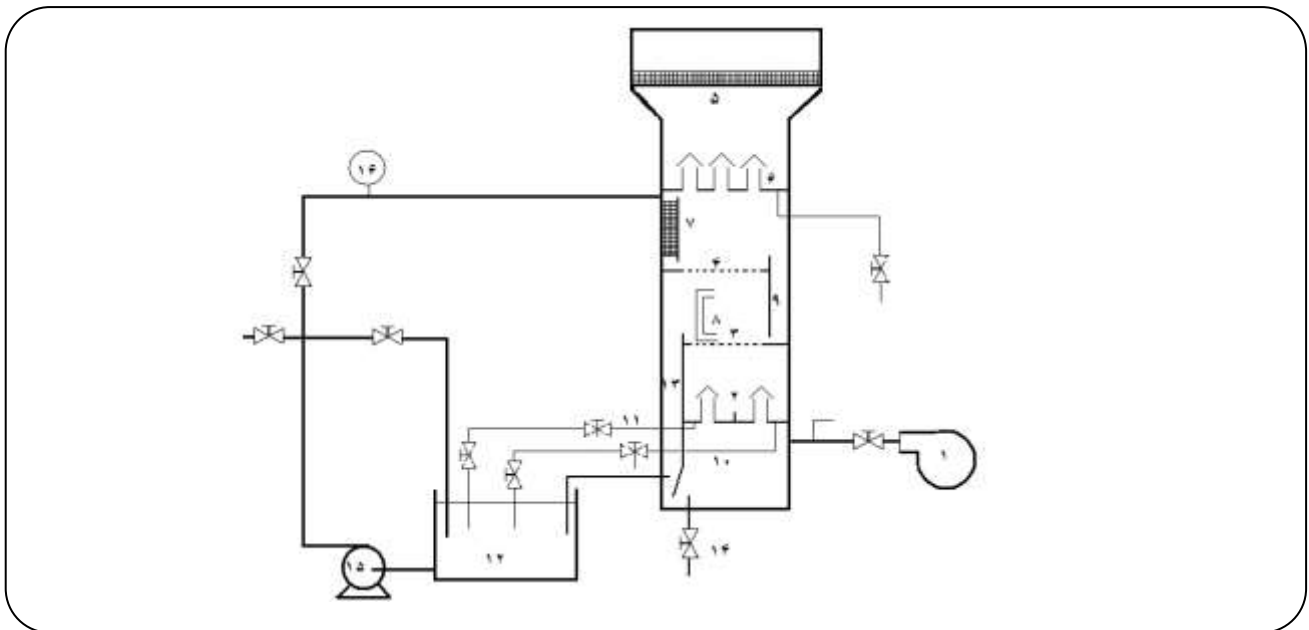
(۶) Atmospheric Pressure

(۷) Centigrade

(۸) Temperature

(۹) Chimney

(۱۰) Manometer



شکل ۱- طرح کلی و شمای برج ساخته شده در بخش تجربی.

اندازه گیری ارتفاع سرکف، شرایط عملیاتی عوض شده و هر بار با همین روش محاسبه اندازه‌های این پارامتر به دست آمده است. همچنین موجودی متوسط مایع، نسبت ارتفاع مایع زلال به ارتفاع سرکف می باشد. برای به دست آوردن مقادیر این پارامتر در شرایط عملیاتی گوناگون، ابتدا در هر شرایط با روش‌های گفته شده در بخش‌های قبل، ارتفاع مایع زلال و ارتفاع سرکف محاسبه شده و مقادیر موجودی متوسط مایع، که نسبت این دو پارامتر نسبت به یکدیگر است، محاسبه می‌شود.

در بیان مفهوم افت فشار خشک می‌بایست بیان شود که این پارامتر بیانگر میزان افت فشار فاز گاز به هنگام عبور فاز گاز از درون سوراخ‌ها و نیز در برخورد با دریچه‌ها در غیاب فاز مایع می‌باشد. برای اندازه گیری افت فشار خشک از یک مانومتر مدرج که مایع آن آب می‌باشد استفاده شده است. دقت این فشارسنج ± 0.05 سانتی متر آب معادل تقریباً ۵ پاسکال می‌باشد. افزون بر این در این پژوهش افت فشار کل اندازه گیری و مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع افت فشار خشک و افت فشار ناشی از برخورد فاز گاز با فاز مایع، افت فشار کل می‌باشد. برای محاسبه این پارامتر همانند افت فشار خشک از مانومتر مدرج استفاده شده است.

از دیگر پارامترهای مهم هیدرودینامیکی در بحث سینی‌ها، ریزش می‌باشد. برای محاسبه این پارامتر، سینی پایینی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- تصویر سینی دریچه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته.

در این پژوهش و برای اندازه گیری ارتفاع سرکف از اندازه گیری به گونه چشمی استفاده شده است. ارتفاع سرکف به صورت لایه‌ای از کف^(۱) در بالای سینی قابل دیدن است. هر بار با کمک یک خط‌کش اندازه گیری و سپس ثبت شده است. برای این کار، ابتدا یک شرایط عملیاتی معین برای برج در نظر گرفته شده و در آن شرایط سامانه به اجرا درآمده است که این اجرا بین ۵ تا ۱۰ دقیقه برای پایا شدن جریان زمان نیاز دارد. پس از اجرای عملیات و

(۱) Foam

جدول ۱- ویژگی‌های سینی دریچه‌ای مورد نظر.

مشخصه	تعداد یا اندازه
قطر سینی (متر)	۱٫۲
فاصله دو سینی (میلی‌متر)	۶۱۰
ارتفاع بند (میلی‌متر)	۵۰
طول بند (میلی‌متر)	۷۳۰
تعداد دریچه‌ها	۱۱۸
ضخامت سینی (میلی‌متر)	۲
درصد سوراخ‌ها	۱۴٪
مساحت سطح فعال سینی (متر مربع)	۱٫۰۰۷۷۶
وزن دریچه‌ها (کیلوگرم)	۰٫۰۲۴
ارتفاع بالا آمدن دریچه‌ها (میلی‌متر)	۱۲٫۵

ارتفاع مایع زلال

ارتفاعی از مایع، با فرض حضور نداشتن گاز بر روی سینی را ارتفاع مایع زلال گویند [۱۷]. در صورتی که شرایط عملیاتی به خوبی تعیین نشود و یا این که ریزش و ماندگی بیش از حد باشد، ارتفاع مایع زلال ممکن است کم‌تر از حد انتظار بوده و این مسئله در اختلاط فازها بر روی سینی و کارایی سینی تأثیر بدی خواهد داشت [۱۸].

شکل ۳ نتیجه‌های مربوط به ارتفاع مایع زلال را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست، با افزایش عدد F_s (که بیانگر شدت جریان گاز می‌باشد) میزان ارتفاع مایع زلال کاهش یافته است. این بدان علت است که با افزایش سرعت گاز، ماندگی گاز در فاز مایع افزایش می‌یابد که این بیانگر تماس بهتر دو فاز می‌باشد. از سوی دیگر، شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان مایع، میزان این پارامتر نیز افزایش می‌یابد. وجود دریچه‌ها بر روی سوراخ‌های سینی سبب می‌شود که گاز به هنگام خروج از سوراخ‌های سینی تا حدی منحرف شود و راستای عمودی حرکت آن تغییر نماید که این امر نیز به تداخل بهتر مایع و گاز کمک می‌نماید. همچنین در ادامه و برای نتیجه‌های تجربی به دست آمده و با رسم نمودار سازگار با داده‌ها، رابطه تجربی زیر برای ارتفاع مایع زلال برحسب شدت جریان گاز و مایع، به دست آمده است:

$$H_{cl} = -0.060526F_s^2 + 0.002437Q_L + 0.424918 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9$$

شکل ۴ مقایسه بین نتیجه‌های به دست آمده از رابطه تجربی و نتیجه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نتیجه‌های پیش‌بینی شده به داده‌های تجربی نزدیک بوده، هرچند که در شدت جریان‌های مایع بالاتر اندکی فاصله نتیجه‌ها افزایش یافته است.

ارتفاع سرکف

رژیم حاکم بر روی سینی دریچه‌ای در این شرایط عملیاتی سرکف می‌باشد. در رژیم سرکف، فاز مایع فاز پیوسته و فاز گاز، فاز پراکنده می‌باشد. سطح بالای این حالت دوفازی بر روی سینی تا کف سینی را ارتفاع سرکف می‌نامند. هر چه این ارتفاع سرکف بیشتر باشد بیانگر اختلاط بهتر دو فاز و انتقال جرم بیشتر می‌شود. هرچند که افزایش بیش از اندازه آن باعث ماندگی فاز مایع می‌شود.

نتیجه‌ها و بحث

در این پژوهش یک پایلوت آزمایشگاهی شامل دو سینی دریچه‌ای و در مقیاس صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این فعالیت، شرایط عملیاتی، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و فشار اتمسفری می‌باشد. افت فشار خشک، افت فشار کل، ریزش، ماندگی، ارتفاع مایع زلال، ارتفاع سرکف و موجودی متوسط مایع از جمله پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش می‌باشند.

شکل ۵ تغییرهای ارتفاع سرکف بر روی سینی در شدت جریان‌های گوناگون مایع بر حسب F_s نشان می‌دهد. ارتفاع سرکف با افزایش ضریب F_s ، افزایش یافته است. این درحالی است که با افزایش شدت جریان مایع نیز ارتفاع سرکف افزایش می‌یابد. با استفاده از همبستگی (رگرسیون) داده‌ها معادله (۲) برای ارتفاع سرکف سینی در چپ‌ای به دست آمده است.

$$H_f = 0.0096784F_s^2 + 0.003825Q_L + 0.461643 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.94$$

همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، روند و تغییرهای نتیجه‌ها در دو حالت نزدیک به هم می‌باشد که این مطلب خود بیانگر اعتبار رابطه تجربی می‌باشد. در نتیجه می‌توان به خوبی از این رابطه در پیش بینی نتیجه‌ها در هر شرایط عملیاتی استفاده نمود.

موجودی متوسط مایع^(۱)

موجودی متوسط مایع، نسبت ارتفاع مایع زلال به ارتفاع سرکف می‌باشد. برای محاسبه این پارامتر همان‌گونه که در بخش روش کار نیز عنوان شد، می‌بایست ابتدا مقادیرهای ارتفاع مایع زلال و ارتفاع سرکف محاسبه شود. نسبت ارتفاع مایع زلال به ارتفاع سرکف، موجودی متوسط مایع را نتیجه می‌دهد.

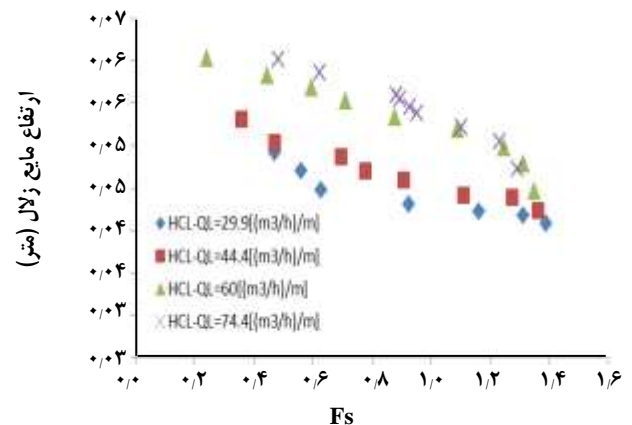
شکل ۷ موجودی مایع در شدت جریان‌های گوناگون مایع نسبت به F_s را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب F_s موجودی متوسط مایع روند کاهشی داشته و انطباق نمودارها بر روی یک‌دیگر بیانگر تأثیر ناچیز تغییر شدت جریان مایع بر نتیجه‌های به دست آمده‌ی این پارامتر می‌باشد.

در ادامه بر اساس نتیجه‌های تجربی مربوط به موجودی متوسط مایع رابطه (۳) به وسیله همبستگی داده‌ها به دست آمده است که این رابطه برای پیش بینی نتیجه‌های موجودی متوسط مایع در شدت جریان‌های گوناگون گاز و مایع قابل استفاده است:

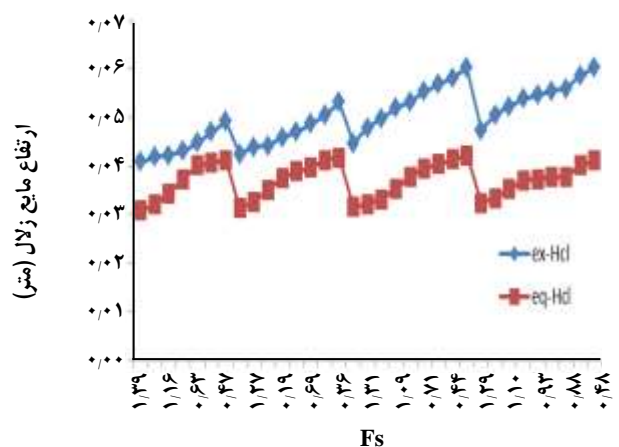
$$Liq_{HoldUp} = -0.1691633F_s^2 - 0.002379Q_L + 0.8378059 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.94$$

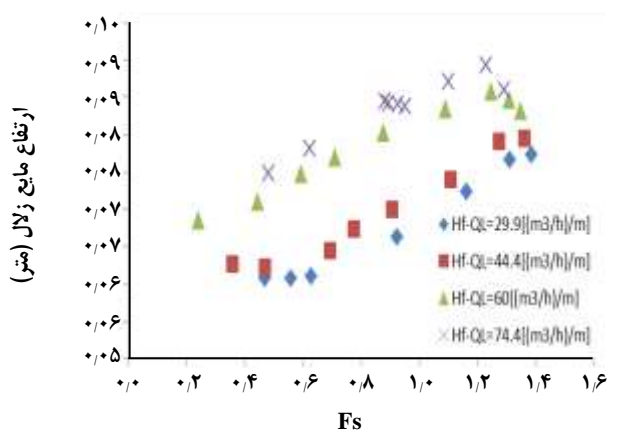
هم پوشانی خوب دو نمودار موجود در شکل ۸ اعتبار و دقت رابطه تجربی به دست آمده را به اثبات می‌رساند. با این نتیجه، پیش‌بینی موجودی متوسط مایع در هر شرایط عملیاتی دیگر نیز به سادگی و با دقت بسیار بالایی امکان پذیر می‌باشد.



شکل ۳- ارتفاع مایع زلال در شدت جریان‌های گوناگون مایع نسبت به F_s .



شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌های ارتفاع مایع زلال به دست آمده از کار تجربی و معادله تجربی.



شکل ۵- ارتفاع سرکف در شدت جریان‌های گوناگون مایع نسبت به F_s .

(۱) Liquid hold up

افت فشار خشک

شکل ۹ افت فشار خشک به ازای بازه‌ی F_s را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب F_s افت فشار خشک نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود در شدت جریان‌های پایین گاز شیب تغییر افت فشار شدید است. علت این امر این است که افت فشار گاز صرف باز کردن درپچه‌ها می‌شود. این شیب زیاد تغییرها تا F_s حدود ۰٫۵ ادامه دارد. در این شدت جریان گاز، با افزایش سرعت گاز شیب تغییرهای افت فشار تا F_s حدود ۱، به تقریب ثابت می‌ماند. علت این امر در این است که در F_s حدود ۰٫۵ همه درپچه‌ها باز شده‌اند و افت فشار برای غلبه بر باز کردن درپچه‌ها صرف نمی‌شود. در F_s بزرگ‌تر از ۱ دوباره به علت افزایش شدید سرعت گاز و افزایش اصطحاک دوباره افت فشار البته با شیب ملایم‌تری، افزایش می‌یابد.

افت فشار کل

نتیجه‌های مربوط به افت فشار کل در شکل ۱۰ رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، افت فشار کل با افزایش شدت جریان گاز و افزایش شدت جریان مایع افزایش می‌یابد. نکته چشمگیر در این است که وابستگی افت فشار به شدت جریان گاز بیش‌تر از شدت جریان مایع است. برای این نتیجه‌های آزمایشگاهی و با رسم نمودار سازگار با داده‌ها، رابطه تجربی زیر برای افت فشار کل برحسب شدت جریان گاز و مایع، به دست آمده است:

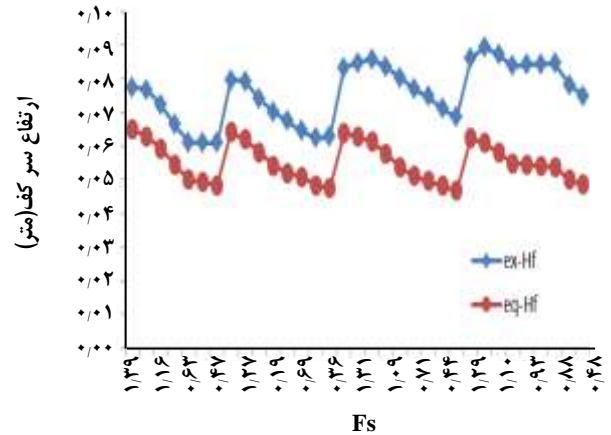
$$\Delta P_T = 222,1306 F_s^2 + 1,773364 Q_L + 438,2346 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,91$$

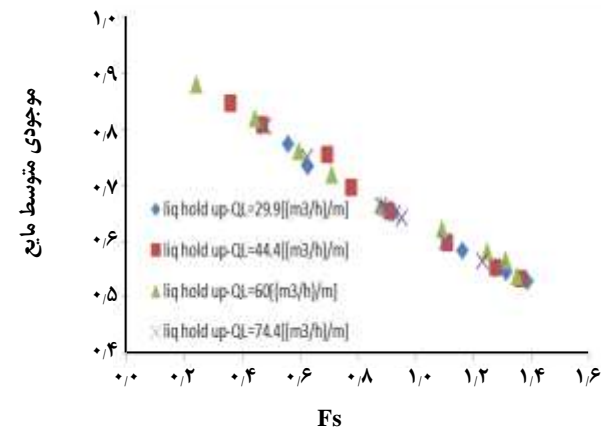
در شکل ۱۱ به خوبی دیده می‌شود که رابطه به دست آمده در این قسمت از دقت بالایی برخوردار می‌باشد و حتی نتیجه‌های به دست آمده از رابطه، فاصله ناچیز خود را نسبت به نتیجه‌های تجربی، به تقریب در تمام شدت جریان‌های مایع حفظ شده‌اند.

گران پایین عملیاتی (ریزش^(۱))

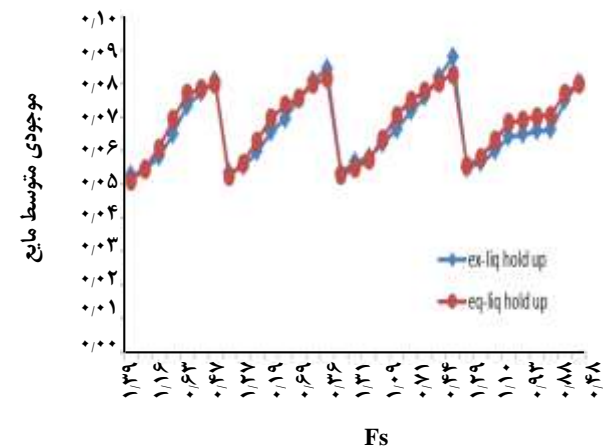
یکی از برتری‌های سینی درپچه‌ای نسبت به سینی غربالی در این است که به علت وجود درپچه‌های تنظیم شونده با شدت جریان گاز، این سینی‌ها در شدت جریان‌های پایین‌تر گاز، میزان ریزش قابل‌پذیرش‌تری دارند. میزان ریزش پایین‌تر باعث می‌شود



شکل ۶ - نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌های به دست آمده از کار تجربی و معادله تجربی.



شکل ۷ - موجودی مایع در شدت جریان‌های گوناگون مایع نسبت به F_s .



شکل ۸ - نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌های به دست آمده از کار تجربی و معادله تجربی.

(1) Weeping

این سینی‌ها پنجره عملیاتی بزرگتری از سینی‌های غربالی داشته باشند. بنابراین پیش‌بینی میزان ریزش این سینی و ارایه رابطه‌های تجربی مربوط به آن بسیار مهم خواهد بود.

شکل ۱۲ میزان ریزش را برحسب تغییرهای شدت جریان گاز در چهار شدت جریان گوناگون مایع را می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، تغییرهای شدت جریان مایع بر روی میزان ریزش تاثیر چشمگیری ندارد. علت این پدیده را می‌توان به نقش دریچه‌های سینی دریچه‌ای اشاره نمود. نقطه شروع ریزش^(۱) در F_s برابر ۰٫۹ است. میزان ریزش در این سینی در شدت جریان‌های پایین گاز، نیز درصد کمی از شدت جریان ورودی مایع است که این بیانگر رفتار مناسب سینی در کران پایین عملیاتی می‌باشد. نکته‌ی مهم دیگر در این شکل، تأثیر کم شدت جریان مایع بر میزان ریزش در این سینی است. علت این امر، نقش کنترل‌کننده دریچه‌ها می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت، انعطاف‌پذیری این نوع سینی در شدت جریان‌های گوناگون مایع، بالا است و این یکی از امتیازهای چشمگیر این نوع سینی می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲، ریزش با افزایش میزان F_s ، کاهش می‌یابد. معادله‌ی (۵) بر اساس داده‌های تجربی ریزش به‌دست آمده است.

$$\text{Weeping} = 0.011F_s^2 + 0.1118F_s^2 - \quad (5)$$

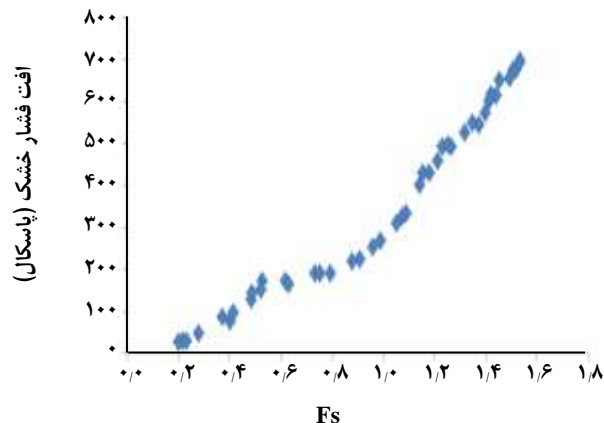
$$0.0287F_s + (4.869E-05)Q_L + 0.0161$$

$$R^2 = 0.9$$

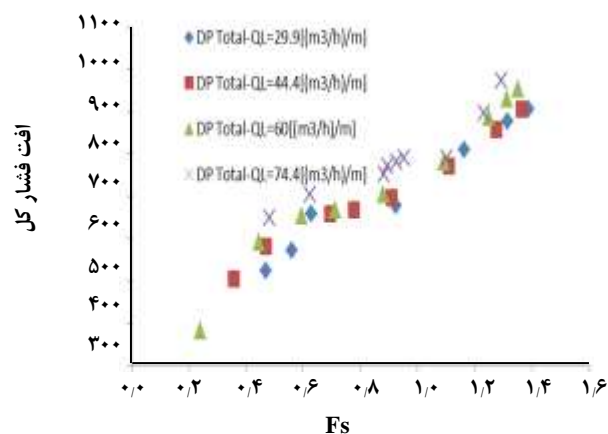
شکل ۱۳ مقایسه بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و رابطه ارایه شده را نشان می‌دهد. رابطه به‌دست آمده برای ریزش از درجه سه می‌باشد و نتیجه این امر با ارایه نمودار مقایسه‌ای در شکل ۱۳ به خوبی قابل دیدن است.

کران بالای عملیاتی (میزان ماندگی^(۲))

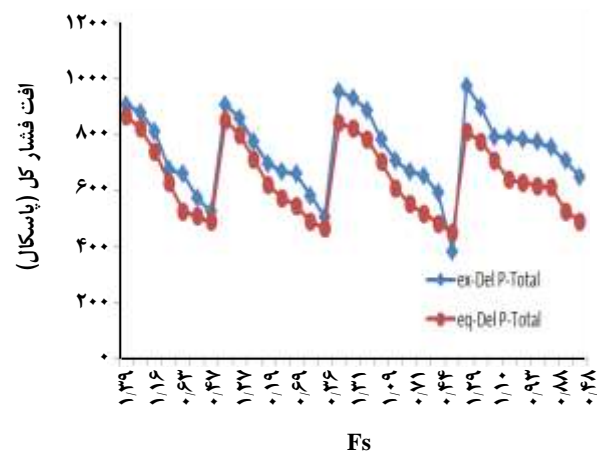
حد بالای عملیاتی سینی به‌وسیله میزان ماندگی کنترل می‌شود. ماندگی زیاد سرانجام باعث طغیان^(۳) در برج می‌شود [۱۹]. دریچه‌ها در سینی دریچه‌ای باعث می‌شود که جریان گاز بر روی سینی از حالت حرکت عمودی منحرف شود. همین پدیده باعث می‌شود که میزان ماندگی در سینی‌های دریچه‌ای از سینی‌های غربالی کم‌تر شود.



شکل ۹- افت فشار خشک برای سینی دریچه‌ای نسبت به F_s .



شکل ۱۰- افت فشار کل برای سینی دریچه‌ای در چهار دبی مایع.



شکل ۱۱ - نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌های به دست آمده از داده‌های تجربی و معادله تجربی ارایه شده.

(۱) Weep point

(۲) Entrainment

(۳) Flooding

شکل ۱۴ روند تغییرهای ماندگی را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب F_s ، ماندگی نیز افزایش می‌یابد و این به دلیل افزایش سرعت گاز می‌باشد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان مایع، ماندگی کاهش می‌یابد و این امر به دلیل می‌باشد که با افزایش شدت جریان مایع، افت فشار برای فاز گاز افزایش می‌یابد. همچنین نزدیکی نتیجه‌ی مورد نظر در شدت جریان‌های مایع گوناگون، دلیلی بر تأثیر ناچیز شدت جریان مایع بر میزان ماندگی می‌باشد. بنابراین سرعت گاز نقش بسیار مهم‌تری در میزان ماندگی نسبت به شدت جریان مایع دارد.

در ادامه بر اساس داده‌های تجربی ماندگی معادله‌ی (۶) به دست آمده است که این رابطه نیز تطابق خوبی با نتیجه‌های تجربی دارد و برای پیش بینی ماندگی در حالت‌های گوناگون قابل استفاده است:

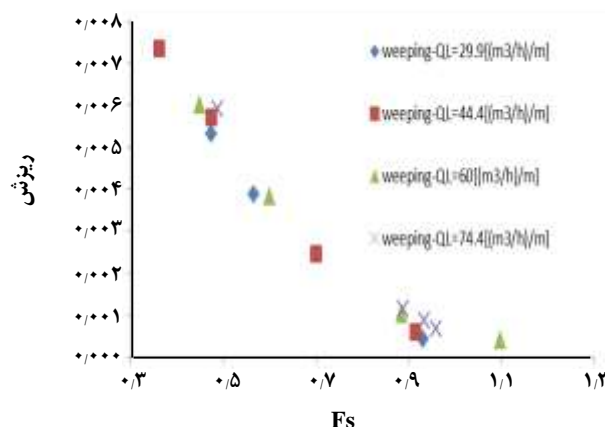
$$\text{Entrainment} = 0.0032617F_s^2 + (1.184E - 0.5)Q_L - 0.0007151 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.9$$

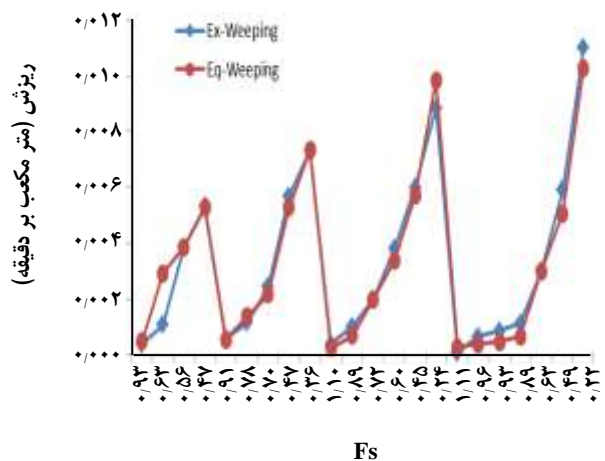
شکل ۱۵ مقایسه بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و رابطه تجربی به دست آمده از همبستگی داده‌ها را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

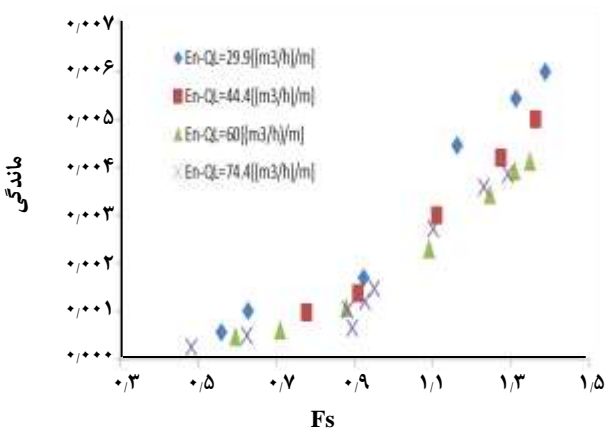
در این پژوهش، به منظور ایجاد شناخت بیشتر از هیدرودینامیک سینی‌های دریچه‌ای، یک نمونه پایلوت^(۱) ساخته شد. این مجموعه شامل یک برج هیدرودینامیک دارای دو سینی دریچه‌ای به قطر ۱/۲ متر است که عملیات هیدرودینامیکی مربوط به سینی دریچه‌ای در این برج مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده، شامل افت فشار خشک، افت فشار کل، ریزش، ماندگی، ارتفاع مایع زلال، ارتفاع سرکف و موجودی متوسط مایع می‌شود. مطالعه در شرایط عملیاتی گوناگون از سرعت‌های گاز و مایع صورت پذیرفت. به علت وجود دریچه‌های قابل تنظیم با سرعت گاز، تأثیر پذیری این سینی نسبت به شدت جریان مایع در همه پارامترهای هیدرودینامیکی، کمتر است. این عامل باعث می‌شود پنجره عملیاتی این سینی بزرگ‌تر شود. به بیان دیگر انعطاف‌پذیری این سینی در شرایط عملیاتی گوناگون بهتر می‌شود. ارایه رابطه‌های تجربی از داده‌های آزمایشگاهی با روش همبستگی داده‌ها از نکته‌های مهم پژوهش حاضر است. رابطه‌های تجربی ارایه شده



شکل ۱۲- ریزش برای سینی دریچه‌ای در چهار شدت جریان گوناگون مایع.



شکل ۱۳- نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌های به دست آمده از ریزش در کار تجربی و معادله تجربی.

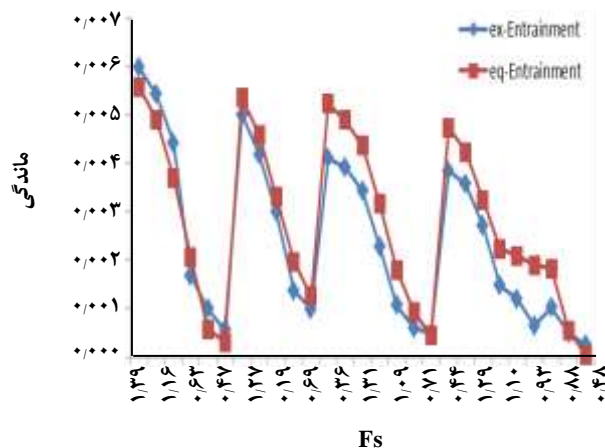


شکل ۱۴- ماندگی برای سینی دریچه‌ای در چهار شدت جریان مایع.

(۱) Pilot

فهرست نمادها

F_s	$F\text{-factor}=VS\sqrt{\rho G} \text{ (m/s(kg/m}^3\text{)}^{0.5})$
g	شتاب گرانش، 9.81 m/s^2
H_{CL}	ارتفاع مایع زلال، m
H_f	ارتفاع سرکف، m
$liqHold Up$	موجودی متوسط مایع
Q_L	شدت جریان حجمی مایع، m^3/s
V_s	سرعت مجازی فاز گاز بر اساس سطح حباب‌ساز، m/s
ρ	دانسیته فاز، kg/m^3



شکل ۱۵- نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌های به دست آمده از کار تجربی و معادله تجربی.

قدردانی

از شرکت آذر انرژی تبریز به خاطر حمایت‌های مالی و فنی در انجام پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

می‌تواند مورد استفاده صنعتگران و پژوهشگران در کمبود رابطه‌ها و داده‌های صنعتی در این زمینه، قرار گیرد. پژوهش‌های آینده می‌تواند بر روی سینی‌های دریچه‌ای از نوع ثابت و دیگر سینی‌های با ظرفیت بالا مانند سینی‌های سانتریفیوژ باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

مراجع

- [1] Zarei T., Rahimi R., Zarei A., Zivdar M, [Hydrodynamic Characteristic of Conical Cap Tray: Experimental Studies on Dry and Total Pressure Drop, Weeping and Entrainment](#), *Chem. Eng. Proc: Proc. Intens*, **64**:17-23(2013).
- [2] Scheffe R.D., Weiland R.H., [Mass-Transfer Characteristics of Valve Trays](#), *Ind. Eng. Chem. Res*, **26**: 228-236 (1987).
- [3] Mostafa H., Be'Ka' Ssy-Molnar' E., Elhamous A., [Hydrodynamics and Mass Transfer of Textile Vibrating-Valve Trays](#), *Ins. Chem. Eng*, **77**:627-632(1999).
- [4] Brahem R., Royon-Lebeaud A., Legendre D., Moreaud M., Duval L., [Experimental Hydrodynamic Study of Valve Trays](#), *Chem. Eng. Sci*, **100**:23-32 (2013).
- [5] Vennavelli A.N., Whiteley J.R., Resetarits M.R., [Predicting Valve Tray Efficiency](#), *Chem. Eng. Res. Des.*, **92**:2148-2152 (2014).
- [6] Alizadehdakhel A., Rahimi M., Abdulaziz Alsairafi A., [CFD and Experimental Studies on the Effect of Valve Weight on Performance of a Valve Tray Column](#), *Com. Chem. Eng*, **34**: 1-8 (2010).
- [7] Brahem R., Royon-Lebeaud A., Legendre D., [Effect of Path length on Valve Tray Columns: Experimental Study](#), *Chem. Eng. Sci.*, **126**:517-528 (2015).

- [8] Zarei T., Abedini E., Rahimi R., Khorshidi J., [Computational Fluid Dynamics on the Hydrodynamic Characteristics of the Conical Cap Tray](#), *Korean J. Chem. Eng.*, **34**: 969-976 (2017).
- [9] Zarei T., Farsiani M., Khorshidi J., [Hydrodynamic Characteristics of Valve Tray: Computational Fluid Dynamic Simulation and Experimental Studies](#), *Korean J. Chem. Eng.*, **34**: 150-159 (2017).
- [10] Rahimi R., Zarei A., Zarei T., Naziri Firoozsalar H., Zivdar M., [A Computational Fluid Dynamics and an Experimental Approach to the Effects of Push Valves on Sieve Trays](#), "50th. Dis. Abs. Conf. Neth", 407-412 (2010).
- [۱۱] رحیمی، رهبر؛ رحیمی، محمودرضا؛ شهرکی، فرهاد؛ بررسی توانمندی دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی سینی های غربالی برج تقطیر، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۱۹: ۲۴ تا ۲۸ (۱۳۸۴).
- [۱۲] رحیمی، محمود رضا، مطالعه اختلاف فازها در سینی غربالی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۱: ۱ تا ۱۳ (۱۳۹۱).
- [13] Zarei T., Rahimi R., Zivdar M., [Computational Fluid Dynamic Simulation of MVG Tray Hydraulics](#), *Korean. J. Chem. Eng.*, **26**(5): 1213-1219 (2009).
- [14] Solari B., Bell R. L., Fluid Flow Patterns and Velocity Distribution on Commercial Scale Siane Troys, *AIChE J.*, **32**: 640-649 (1986).
- [15] Zarei A., Rahimi R., Zarei T., Firoozsalar H.N., [A Study on Sieve Tray Lower Operating Limit](#), *50th. Dis. Abs. Conf.*, **3**: 479-484(2010).
- [16] Zarei T., Khorshidi J., Rahimi R., Zarei, A., [Experimental Study on the Conical Cap Tray Performance](#), *J. Chem. and Petrol. Eng.*, **50**(2): 47-52 (2017).
- [17] Zivdar M., Zarei T., Rahimi R., Ostadzehi, M.R., [CFD Simulation of Concap Tray Hydrodynamics](#), *J. Chem. and Petrol. Eng.*, **47**(1): 39-50 (2013).
- [۱۸] زارعی، طالب، رحیمی، رهبر، کاربرد روش دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی استفاده از دریچه‌های هدایت بخار در عمل کرد سینی غربال، پژوهش نفت، (۵) ۴۸: ۹۵ تا ۵۹ (۱۳۹۵).
- [19] Asadi S. [Multicomponent Distillation Modeling of An Essential Oil by the SRK and PSRK State Equations](#), *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **33**(3): 77-82 (2014).